

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung

Graetz, Leo

Stuttgart, 1918

Zweiter Vortrag

urn:nbn:de:bsz:31-91571

Zweiter Vortrag.

Die Atome und Ionen bei den elektrischen Vorgängen in Flüssigkeiten und Gasen. Die Atome der Elektrizität.

Die Ionen in der Elektrolyse. Das Faradaysche Gesetz. Die atomistische Struktur der Elektrizität. Die Elektronen. Elementarladung. Gasentladungen. Kathodenstrahlen. Die freien negativen Elektronen. Scheinbare Masse. Größe und Masse der negativen Elektronen. Die Kanalstrahlen. Die positive Elektrizität. Neutrale und elektrisch geladene Atome und Moleküle.

Die Fortschritte in der Erkenntnis des Wesens der Atome gingen von der Elektrizitätslehre aus. Als sich um die Mitte des vorigen Jahrhunderts die neuen Erfahrungen im Gebiet der Elektrizität immer mehr häuften, als die Wärmewirkungen, die elektrolytischen Wirkungen, die magnetischen und elektrodynamischen Wirkungen der elektrischen Ströme erforscht wurden und namentlich als durch Faraday die Induktionswirkungen und durch Hertz die wellenförmige Ausbreitung derselben, die elektrischen Wellen, erkannt wurden, da wurde es immer schwieriger, sich ein widerspruchloses Bild von dem Wesen der Elektrizität zu machen. Die Verschiedenheit der Wirkungen war eine so bedeutende, daß es fast unmöglich erschien, dieselben unter einen Hut zu bringen. Eine Reihe von Wirkungen der Elektrizität war durchaus von der Art, als ob die Elektrizität ein Stoff wäre, andere aber schienen zu der Annahme zu zwingen, daß die Elektrizität auf irgend einer Bewegung des Äthers beruhe. In der Tat haben die Ansichten der Physiker darüber vielfach gewechselt, und als Hertz seine prachtvollen Entdeckungen über elektrische Wellen und Strahlen gemacht hatte, schien die Äthertheorie, die Bewegungstheorie der Elektrizität unzweifelhaft den Sieg davongetragen zu haben. Die sogenannte Maxwell'sche Theorie, die alle elektrischen Erscheinungen als Zustands- oder Bewegungserscheinungen des Äthers auffaßte, schien damals die unzweifelhafteste, vollkommenste Theorie der Elektrizität zu sein.

Sie schien es. Aber bei näherer Betrachtung blieben doch bei ihr auch eine Reihe von wichtigen Erscheinungen unerklärt, gerade solche Erscheinungen, welche hinwiederum durch die Annahme einer stofflichen Natur der Elektrizität sich sehr einfach auffassen ließen. Insbesondere waren es die Erscheinungen der Elektrolyse, die bekanntlich von Faraday erforscht und gesetzmäßig festgelegt waren, die durch die Maxwell'sche Theorie nicht erklärt werden konnten. Bei dem Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine zusammen

gesetzte, leitende Flüssigkeit (eine Lösung von Salzen oder Säuren oder Basen in Wasser) wird diese bekanntlich zersetzt, elektrolysiert, so zwar, daß von dem gelösten Salz oder der gelösten Säure oder Base das Metall (bzw. der Wasserstoff) an dem negativen Pol, der negativen Elektrode, der Kathode, frei auftritt, der Rest des Moleküls aber an der positiven Elektrode, der Anode. Die beiden Bestandteile der Moleküle, die hierbei getrennt auftreten, nennt man bekanntlich ihre Ionen. Die Untersuchung der genauen quantitativen Erscheinungen bei der Elektrolyse führte Faraday zu dem Gesetz, daß die Menge der Ionen, die bei der Elektrolyse irgend einer Flüssigkeit an der einen oder der anderen Elektrode abgeschieden wird, proportional ist dem Produkt aus dem Äquivalentgewicht der betreffenden Substanz und der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Stromdauer durch die Flüssigkeit hindurchgegangen ist:

die Masse der abgeschiedenen Ionen ist proportional:

Äquivalentgewicht des Ions \times durchgegangene Elektrizitätsmenge.

Die Äquivalentgewichte der elementaren Stoffe sind bekanntlich ihre Atomgewichte, dividiert durch ihre Wertigkeit. Wasserstoff hat das Äquivalentgewicht 1, der zweiwertige Sauerstoff das Äquivalentgewicht $\frac{16}{2} = 8$, der dreiwertige Stickstoff das Äquivalentgewicht $\frac{14}{3} = 4,66$, der vierwertige Kohlenstoff das Äquivalentgewicht $\frac{12}{4} = 3$.

Die gesamte Masse der abgeschiedenen Ionen, dividiert durch das Äquivalentgewicht derselben, ist aber nichts anderes als die Zahl der abgeschiedenen Äquivalente. Drückt man die ganze abgeschiedene Masse in Grammen aus, so erhält man die Zahl der abgeschiedenen Gramm-äquivalente, wobei ein Grammäquivalent eines Stoffes so viel Gramm ist, als das Äquivalentgewicht angibt. Sind z. B. bei der Elektrolyse 10 Gramm Sauerstoff abgeschieden, so sind das $\frac{5}{4}$ Gramm-äquivalente Sauerstoff. Das Faradaysche Gesetz läßt sich daher auch so ausdrücken:

die Zahl der abgeschiedenen Äquivalente ist proportional der durchgegangenen Elektrizitätsmenge

oder umgekehrt

die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgeschiedenen Äquivalente.

Die Stromleitung in einer Flüssigkeit läßt sich so auffassen — und viele Experimente beweisen das — daß innerhalb der Flüssigkeit die Ionen beider Arten schon von vornherein in sehr großer Zahl frei vorhanden sind, jedoch so, daß in dem kleinsten Raum gleich viel positive und negative Ionen sich befinden. Werden nun in die Flüssigkeit zwei Elektroden eingetaucht und mit der Stromquelle verbunden, so wandern durch elektrostatische Anziehung die positiven Ionen in der Richtung zur Kathode, die negativen Ionen in der Richtung nach der Anode. Diejenigen positiven

oder negativen Ionen, die jedesmal der Kathode oder Anode am meisten benachbart sind, scheiden sich an ihr ab, während im Innern der Flüssigkeit immer gleichviel positive und negative Ionen bleiben. Aus diesem Vorgang erkennt man aber, daß jedes abgeschiedene Ion einen Teil der Stromleitung besorgt hat. Die Leitung durch die Flüssigkeit kommt immer durch die *Wanderung der Ionen* zustande und diese Ionen sind eben positiv oder negativ geladene Teile von Molekülen. Jedes abgeschiedene Äquivalent eines Stoffes war also vorher ein wanderndes Äquivalent und führte eine bestimmte Elektrizitätsmenge mit sich. Dann aber sagt das Faradaysche Gesetz auch aus, daß jedes Äquivalent irgend einer Substanz mit ein und derselben Elektrizitätsmenge verbunden ist, und zwar mit einer positiven, wenn es Kation, mit einer negativen, wenn es Anion ist. Jedes einwertige Atom, wie das des Wasserstoffs, Silbers, Chlors usw., ist danach mit einer ganz bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden, jedes zweiwertige Atom, wie das des Kupfers, Zinks, Sauerstoffs, mit der doppelten, jedes drei- und vierwertige mit der drei- und vierfachen.

Es war zuerst Helmholtz, der aus diesen Tatsachen einen hochbedeutsamen Schluß zog. Die einfachste Interpretation nämlich des eben ausgesprochenen Gesetzes ist die, daß ebenso wie die Materie auch die Elektrizität atomistisch zerteilt ist. Es gibt eine gewisse kleinste Elektrizitätsmenge, welche mit jedem Atom eines einwertigen Stoffes verbunden ist. Von dieser kleinsten Elektrizitätsmenge kann ein anderer Stoff pro Atom nicht etwa das $1\frac{1}{2}$ fache oder das $5\frac{1}{4}$ fache enthalten, sondern nur das 2fache, 3fache usw. Die Elektrizität scheint danach also ein Stoff zu sein, der ebenfalls in kleinste, diskrete Teile, in Atome geteilt ist. Diese Atome der Elektrizität nennt man Elektronen und unterscheidet zunächst positive und negative Elektronen. Die Elektrizität verhält sich demnach wie ein besonderes chemisches Element, dessen Atome sich mit denen der anderen bekannten Elemente verbinden, nämlich zu Ionen. Und zwar ist dieser Stoff ein einwertiger. Denn jedes einwertige Element verbindet sich mit einem Elektron, jedes zweiwertige mit zweien usf., ganz so wie sich ein Chloratom mit einem Atom Wasserstoff verbindet, ein Sauerstoffatom mit zwei Atomen Wasserstoff usw.

So wurde zum ersten Male durch Helmholtz die präzierte Vorstellung in die Physik eingeführt, daß die Elektrizität selbst ein Stoff, und zwar ein atomistisch geteilter Stoff sei, also eine Vorstellung, welche der Maxwell'schen Theorie durchaus widersprach. Da aber anderseits eine große Anzahl von elektrischen Erscheinungen sich nach der Maxwell'schen Theorie durch Bewegungen des Äthers einfach und vollständig erklären ließen, so klaffte hier wiederum ein scheinbar unüberbrückbarer Abgrund zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen der Elektrizität. Dieser Widerspruch wurde aber gelöst, die getrennten Auffassungen wurden zu einer Zusammenfassung, einer höheren Synthese gebracht, durch die von H. A. Lorentz aufgestellte Elektronentheorie der Elektrizität. Lorentz zeigte nämlich, daß alle Wirkungen der Elektrizität innerhalb der Körper sich durch die Stofftheorie, durch die Annahme von Elektronen, daß dagegen alle Wirkungen der Elek-

trizität in die Ferne, die elektrostatischen, elektromagnetischen Induktionswirkungen, sich nur durch Zuhilfenahme des Äthers erklären ließen. Und die Vereinigung dieser beiden Klassen von Erscheinungen geschah durch ihn in der Weise, daß er zeigte, daß jedes Elektron in einer engen Verknüpfung mit dem Äther steht, daß jedes ruhende und ebenso jedes bewegte Elektron in dem Äther ganz bestimmte Veränderungen hervorbringt, die sich dann eben durch den Äther fortpflanzen — und zwar mit Lichtgeschwindigkeit — und so die Fernwirkungen hervorbringen. Die nähere Ausführung dieser Elektronentheorie ist für unsere Zwecke nicht nötig. Für uns ist es dagegen von besonderer Wichtigkeit, daß wir nun außer den Atomen der chemisch bekannten Elemente noch zwei weitere Atome, die der positiven und der negativen Elektrizität, in unsere Betrachtungen einführen müssen. Zwar ist diese Annahme bisher nur aus verwickelten und ziemlich unübersichtlichen Tatsachen geschlossen und es scheinen die angenommenen Atome der Elektrizität immer nur mit Atomen der gewöhnlichen Stoffe verbunden vorzukommen. Aber wir werden bald weitere Erscheinungen besprechen, aus denen wir erkennen werden, daß diese Elektronen unter Umständen auch frei für sich, ohne Verbindung mit anderer Materie auftreten können, so daß ihre Existenz nicht mehr bloß durch eine schwierige Interpretation verwickelter Erscheinungen geschlossen werden muß.

Um diese Betrachtungen vollständig zu machen und damit auch die Grundlage für die späteren Verallgemeinerungen zu legen, müssen wir nun die aus dem Faradayschen Gesetz sich ergebenden Folgerungen nicht bloß allgemein qualitativ, sondern quantitativ nach Maß und Zahl besprechen.

Wir hatten oben den Satz ausgesprochen:

Die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgedehnten Äquivalente,
welchen Satz wir in anderer Fassung auch so ausdrückten:

Jedes Äquivalentgewicht eines Stoffes ist mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden.

Da die Äquivalentzahlen der Elemente zunächst relative Zahlen sind, bezogen auf das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs gleich 1, so können wir unsere erste quantitative Frage so stellen: Wie groß ist die Elektrizitätsmenge, die mit einem Gramm-äquivalent irgend eines Stoffes verbunden ist?

Zur Beantwortung unserer Frage müssen wir zunächst festsetzen, in welchen Einheiten wir die Elektrizitätsmengen messen. In der elektrischen Praxis gilt diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit, welche von dem Strom 1 Ampere in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des Stromkreises hindurchgeschickt wird. Diese Einheit der Elektrizitätsmenge nennt man 1 Coulomb. Für manche wissenschaftlichen Rechnungen aber ist es bequemer, diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit zu nehmen, welche auf eine gleich große in der Entfernung 1 cm befindliche eine elektrostatische Anziehungs- oder Abstoßungskraft ausübt (je nachdem die zweite ungleichnamig oder gleichnamig ist), die gleich der Einheit

der Kraft, 1 Dyne ist. Diese letztere Einheit hat man, weil sie praktisch weniger gebraucht wird, nicht mit einem besonderen einfachen Namen bezeichnet. Man nennt sie die *elektrostatische Einheit* der Elektrizitätsmenge. Sie ist viel kleiner als 1 Coulomb, und genaue Versuche haben gelehrt, daß 1 Coulomb dreitausend Millionen ($3 \cdot 10^9$) elektrostatische Einheiten enthält. Durch diese Angabe kann man also einfach von einer Elektrizitätsmenge in Coulomb übergehen zu der in elektrostatischen Einheiten ausgedrückten oder umgekehrt.

Wir wollen zunächst die Elektrizitätsmengen in Coulomb gemessen denken. Dann beantwortet sich die oben aufgestellte quantitative Frage durch folgenden Versuch, der von F. und W. Kohlrausch in Deutschland und von Lord Rayleigh und Mrs. Sidgwick in England mit der allergrößten Präzision und mit genau demselben Resultat ausgeführt wurde und der die Grundlage für die internationale Festsetzung der Stromeinheit 1 Ampere geworden ist:

Sendet man durch eine Lösung von salpetersaurem Silber die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb hindurch, so werden an der Kathode 0,001118 g Silber abgeschieden. Das heißt nach unserer obigen Erörterung, daß 0,001118 g Silber mit 1 Coulomb verbunden sind. Folglich ist 1 Gramm-äquivalent Silber (107,88 g Silber) verbunden mit

$$\frac{107,88}{0,001118} = 96\,494 \text{ Coulomb.}$$

Dieselbe Anzahl von Coulomb ist nach dem Faradayschen Gesetz verbunden mit einem Grammäquivalent jedes anderen Stoffes, also mit 1 g Wasserstoff, mit 35,5 g Chlor, mit 8 g Sauerstoff, mit 31,78 g des zweiwertigen Kupfers, mit 9,03 g des dreiwertigen Aluminiums usw.

Daraus sieht man sofort, daß mit 1 g der verschiedenen Stoffe sehr verschiedene Elektrizitätsmengen verbunden sind, nämlich um so kleinere, je größer das Äquivalentgewicht ist. Man bezeichnet die mit 1 g eines Stoffes verbundene Elektrizitätsmenge als die *spezifische Ladung* des betreffenden Stoffes. Sie ist auch gleich dem Verhältnis der Ladung zu der Masse des betreffenden Stoffes. Aus den obigen Zahlen ergibt sich, daß die spezifische Ladung des Wasserstoffs, des Elementes mit dem kleinsten Äquivalentgewicht, gleich $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ ist. Dagegen die des Sauerstoffs ist $\frac{96\,494}{8}$
 $= 12\,062 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, die des Chlors $\frac{96\,494}{35,5} = 2718 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, die des Silbers $\frac{96\,494}{107,88} = 894,4 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ usw.

Die spezifische Ladung irgend einer Masse bei der Elektrolyse ist höchstens gleich $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$. Und zwar hat sie diesen Wert für den Wasser-

stoff. Für alle anderen Elemente ist sie kleiner als $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ und zwar um so kleiner, je größer das Äquivalentgewicht des betreffenden Elementes ist.

Aus diesem Satz werden wir später eine wichtige Folgerung ziehen. Unsere Berechnung erlaubt uns aber noch einen großen Schritt weiter zu gehen. Da jedes einwertige Ion mit einer bestimmten Ladungsmenge versehen ist, nämlich mit der Ladung eines Elektrons, so können wir nun auch die Größe dieser Ladung bestimmen. Ein Gramm-äquivalent Wasserstoff, d. h. 1 g Wasserstoff ist mit 96 494 Coulomb verbunden. Nun enthält ein Grammolekül Wasserstoff, d. h. 2 g Wasserstoff (nach S. 10) $61,4 \cdot 10^{22}$ Moleküle (die Avogadro'sche Zahl), also 1 g Wasserstoff ebensoviel Atome bzw. Ionen. Folglich enthält jedes Ion des Wasserstoffs (und ebenso auch ein Ion jedes anderen einwertigen Stoffes) eine Ladung

$$\frac{96\,494}{61,4 \cdot 10^{22}} = 1,57 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb.}$$

Wir drücken diese Zahl lieber in elektrostatischen Einheiten aus, indem wir sie mit $3 \cdot 10^9$ multiplizieren, und erhalten so

$$4,71 \cdot 10^{-10} \text{ elektrostatische Einheiten.}$$

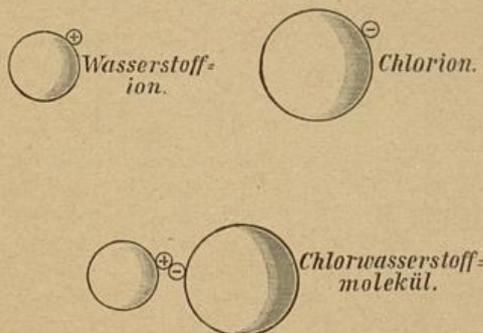
Diese Zahl nennt man die elektrische Elementarladung oder das elektrische Elementarquantum. Sie ist offenbar die Ladung eines einzigen Elektrons, also die kleinste elektrische Ladung, die überhaupt existiert. Irgend ein geladener Körper kann nur eine ganze

Anzahl von diesen Elementarquanten besitzen, aber nicht eine ganze Anzahl plus einem Bruchteil derselben. Da jedoch dieses Elementarquantum so klein ist, daß es mit unseren feinsten Meßinstrumenten nicht erkannt werden kann, so läßt sich diese Folgerung nicht direkt prüfen.

Die bildliche Vorstellung, die man sich nach dem bisherigen von einem positiven oder negativen Ion machen

kann, ist etwa durch Fig. 2 dargestellt. Die Elektronen sind durch kleine Kreise dargestellt, die mit + und - bezeichnet sind, und ein Wasserstoffion besteht aus einer Verbindung eines Wasserstoffatoms mit einem positiven Elektron, ein Chlorion ebenso aus der Verbindung eines Chloratoms mit einem negativen Ion. Die Verbindung von Chlor und Wasserstoff zu einem Chlorwasserstoffmolekül kann man sich auch in dieser Weise wie in Fig. 2 durch das Zusammentreten eines positiven und eines negativen Ions verständlich machen. Nicht aber kann man so zunächst die Ver-

Fig. 2.

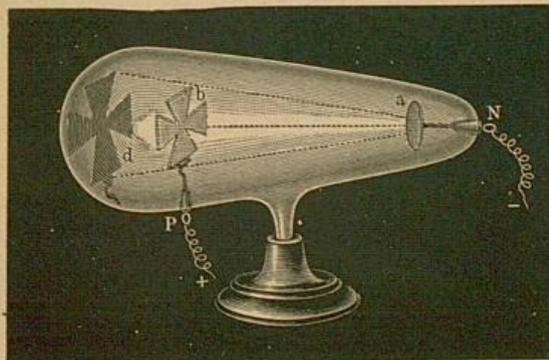


bindung zweier Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül verstehen. Denn jedes Wasserstoffion ist bei der Elektrolyse immer nur positiv geladen.

Obwohl nun hier, bei den Erscheinungen der Elektrolyse zum ersten Male die atomistische Struktur der Elektrizität zutage trat, muß man doch zugeben, daß die Erscheinungen recht kompliziert sind und daß man nicht durchaus sicher sein kann, ob diese Erklärung, wenn sie auch verhältnismäßig einfach ist, auch wirklich stichhaltig ist und weiterer Prüfung standhält.

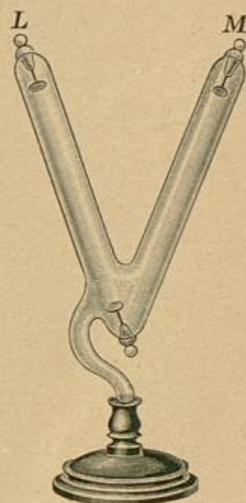
Wesentlich neue Einsichten aber und dabei eine Bestätigung und Weiterführung unserer Elektronenvorstellung gewann man durch die Beobachtung des Durchgangs der Elektrizität durch sehr verdünnte Gase. Wenn man in ein Glasgefäß zwei Metallplatten oder Metalldrähte, die Elektroden, einschmilzt und das Gas in dem Gefäß durch eine Luftpumpe auf etwa 0,01 mm Druck oder noch weiter verdünnt, so treten bekanntlich, wenn man die Elektroden mit einer Elektrizitätsquelle von hoher Spannung verbindet — einem Induktionsapparat oder einer Influenzmaschine oder einem Hochspannungsakkumulator —, in dem Gefäß sehr merkwürdige und charakteristische Erscheinungen auf, die man als Kathodenstrahlen bezeichnet. Es bleibt nämlich das Innere des Gefäßes bei dieser Verdünnung fast vollständig lichtlos, aber man erkennt, daß das Glas der Röhre grün fluoresziert, und zwar am stärksten an den Stellen, welche der negativen Elektrode, der Kathode,

Fig. 4.



gerade gegenüberliegen. Diese Fluoreszenz kommt daher, wie die folgenden Versuche lehren, daß von der Kathode aus unsichtbare Strahlen geradlinig fortgehen und da, wo sie auf ein Hindernis, wie das Glas der Röhre, treffen, besondere Wirkungen, hier Erregung von Fluoreszenz hervorbringen. Daß diese Strahlen nur geradlinig fortgehen — deswegen spricht man eben von Strahlen — und nicht um Ecken umbiegen und nur von der Kathode fortgehen, erkennt man sofort, wenn man eine V-förmige Röhre wie Fig. 3 benutzt. Macht man in dieser L zur Kathode und M zur Anode, so sieht man nur den linken Schenkel des Glases bis zur Biegung grün leuchten, den rechten nicht. Macht man umgekehrt M zur Kathode

Fig. 3.

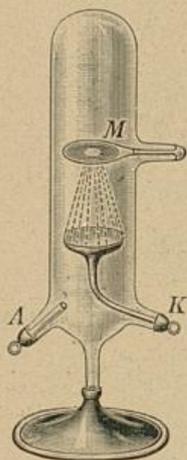


gerade gegenüberliegt. Diese Fluoreszenz kommt daher, wie die folgenden Versuche lehren, daß von der Kathode aus unsichtbare Strahlen geradlinig fortgehen und da, wo sie auf ein Hindernis, wie das Glas der Röhre, treffen, besondere Wirkungen, hier Erregung von Fluoreszenz hervorbringen. Daß diese Strahlen nur geradlinig fortgehen — deswegen spricht man eben von

und L zur Anode, so fluoresziert der rechte Schenkel. Die Kathodenstrahlen gehen eben nicht durch die Biegung des Rohres von der Kathode zur Anode, sondern nur geradlinig von der Kathode fort. Die absolute Geradlinigkeit ihrer Ausbreitung wird auch sehr scharf bewiesen durch eine Röhre wie die in Fig. 4. In dieser Röhre ist der Kathode a gegenüber ein Kreuz aus Metall im Innern befestigt. Die Kathodenstrahlen gehen von a aus geradlinig fort und erregen das Glas der Röhre, wo sie es treffen, zur grünen Fluoreszenz. Durch das Metallkreuz aber werden sie abgehalten und man sieht daher auf der grün leuchtenden Wand der Röhre bei d ein ganz scharfes Schattenbild des Kreuzes.

Nicht alle Gläser leuchten grün; Bleigläser leuchten blau, Didymgläser rot. Ebenso wie das Glas kommen eine Menge anderer Körper, namentlich Mineralien, wenn sie von Kathodenstrahlen getroffen werden, zum fluoreszierenden Leuchten.

Fig. 5.



Von der Lage der Anode ist der Gang der Kathodenstrahlen ganz unabhängig. Diese kann seitlich, vor oder hinter der Kathode angebracht sein, die Kathodenstrahlen gehen ganz geradlinig von der Kathode fort, und zwar senkrecht zu ihr. Macht man die Kathode kugelförmig, hohlspiegelartig, so treffen sich daher die Kathodenstrahlen im Mittelpunkt der Kugel, den man dann den Fokus oder Brennpunkt nennt, und gehen von ihm aus weiter auseinander.

Metallische Körper fluoreszieren nicht. Dagegen kann man an ihnen leicht zeigen, daß die Kathodenstrahlen die Körper, auf die sie treffen, erhitzen. In Fig. 5 ist in der Röhre bei K eine hohlspiegelartige Kathode eingeschmolzen, und deren Brennpunkt fällt auf ein dünnes Metallblech, M, das dort in der Röhre angebracht ist. Sobald die Kathodenstrahlen erregt werden, fängt das Metallblech in der Mitte an zu glühen. Läßt man die Kathodenstrahlen von einer hohlspiegelartigen Kathode auf das Glas der Röhre fallen, so daß der Brennpunkt am Glase liegt, so wird das Glas rasch weich und dann von dem äußeren Luftdruck durchbrochen, so daß die Röhre vernichtet wird.

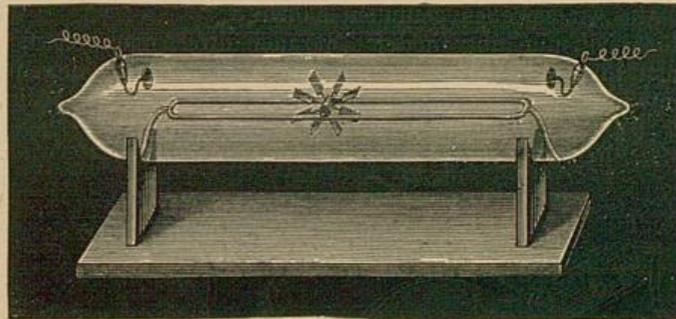
Leicht bewegliche Körper im Innern eines Rohrs werden durch die Kathodenstrahlen bewegt. In Fig. 6 ist ein leichtes Rad mit Glimmerflügeln auf zwei Glasschienen beweglich. Sobald die Kathodenstrahlen von links oder von rechts auf die Flügel fallen, dreht sich das Rad nach rechts oder links und schreitet auf den Schienen fort.

Diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen führten schon den englischen Physiker Crookes dazu, anzunehmen, daß in einer solchen Röhre die Moleküle rasch von der Kathode fortgeschleudert werden, und daß durch den Anprall dieser Moleküle an die Wände Erhitzung erzeugt, bzw. Erschütterung der Teilchen hervorgebracht wird, die sich in dem fluoreszierenden Leuchten äußert. Crookes sprach von einem „Bombardement der Moleküle“, welches die Ursache für das Fluoreszieren und die Wärmeentwicklung sei. Durch den Stoß dieser

rasch bewegten Teile erklärt sich ebenso die Bewegung leichter Körper im Innern der Röhre.

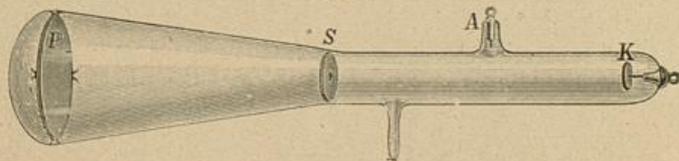
Aber was sind das für Teilchen, die in der Röhre sich rasch bewegen? Daß es nicht, wie C r o o k e s annahm, die Gasmoleküle selbst sein können, wird durch eine weitere, sehr überraschende Eigenschaft der Kathodenstrahlen bewiesen. Die Kathodenstrahlen werden nämlich von einem Magneten stark von ihrer Bahn abgelenkt. Man kann, um das zu zeigen,

Fig. 6.



sich einer Röhre von der Form Fig. 7, einer sogenannten B r a u n schen Röhre, bedienen. In dieser ist bei K die Kathode, bei A die Anode. Die Kathodenstrahlen gehen von K geradlinig fort, und um ein ganz schmales Bündel von ihnen zu erhalten, fallen sie bei S auf ein Diaphragma aus Glas oder Metall, das in der Mitte ein kleines Loch enthält. Durch dieses Loch schreiten sie hindurch und fallen auf einen Schirm P aus Kalziumwolframat, welche Substanz durch sie zum hellen, blauen Fluoreszieren gebracht wird. Man sieht also auf diesem Schirm in der Mitte einen kleinen kreisförmigen, blauen Fleck am Auftreffpunkt der Kathodenstrahlen. Wenn man nun aber in die Nähe des Diaphragmas S einen Pol eines Magnetstabs bringt, z. B. den Nordpol, so sieht man, daß der

Fig. 7.



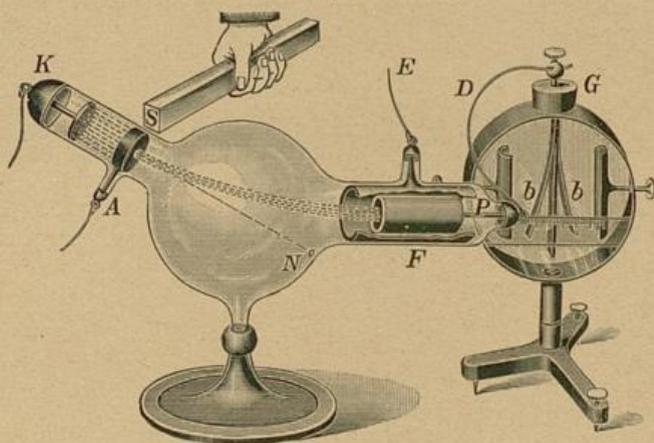
blaue Fleck sich stark verschiebt, daß also die Kathodenstrahlen von ihrer geraden Bahn abgelenkt werden. Bringt man den Nordpol oben an die Röhre, so wird der blaue Fleck nach hinten, bringt man ihn unten an, so wird er nach vorn, hält man ihn seitlich vorn an die Röhre, so wird der Fleck nach oben verschoben, und wenn man den Magnetpol seitlich hinten an die Röhre bringt, so wird der Fleck nach unten verschoben. Die Kathodenstrahlen erleiden dieselbe Ablenkung durch den Magneten, wie sie ein elektrischer Strom erfahren würde, der zur Kathode hinfließt. Übrigens findet man, daß nach der Ablenkung der Fleck nicht mehr rund,

sondern in die Länge gezogen ist, woraus folgt, daß in dem Kathodenstrahl Theile von größerer und solche von geringerer Ablenkbarkeit vorhanden sind.

Nach diesem Versuch können es nicht die Gasmoleküle sein, die in den Kathodenstrahlen fliegen; denn Gasmoleküle sind neutral und werden nicht von einem Magneten beeinflusst. Wenn die ganze Vorstellung von den bewegten Theilen richtig ist, so müßten es vielmehr elektrische, negativ geladene Theile sein, die sich in den Kathodenstrahlen bewegen, denn nur solche würden eine Ablenkung nach der Richtung erfahren, wie wir sie oben gefunden haben.

Es läßt sich nun aber in der That auch direkt nachweisen, daß die Kathodenstrahlen negative Ladung mit sich führen. Zu diesem Zwecke benützten wir die Röhre Fig. 8. In dieser ist K die Kathode, A die Anode,

Fig. 8.



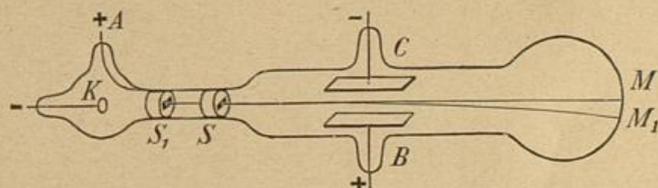
die zugleich ein Diaphragma mit einem kleinen Loch bildet, so daß die Kathodenstrahlen direkt nach der Stelle N fallen. Durch den Magnetstab S lenkt man die Kathodenstrahlen ab, so daß sie in das Ansatzrohr fallen, in welchem ein äußeres, mit der Erde durch E verbundenes Metallgefäß und ein inneres mit P verbundenes Metallgefäß sich befinden. Diese Metallgefäße nennt man einen Faradayschen Käfig. Bei P ist nun ein Goldblattelektroskop G angebracht und sobald die Kathodenstrahlen in den Käfig fallen, sieht man sofort die Blättchen des Elektroskops sich spreizen, ein Beweis, daß sie elektrisch geladen werden. Und durch Prüfung dieser Ladung (mit einem geriebenen Glasstab) erkennt man, daß sie negativ ist. Damit ist bewiesen, daß es negativ elektrisch geladene Theilchen sind, die in den Kathodenstrahlen fliegen.

Daraus erklärt sich auch folgender wichtige Versuch, der, wie wir sehen werden, eine quantitative Messung erlaubt. In Fig. 9 ist eine Röhre von der Form der Braunschen Röhre abgebildet, nur daß in dieser noch 2 Metallplatten B und C sich befinden, die zusammen einen Kondensator bilden. Man kann C mit dem negativen, B mit dem positiven

Pol (oder umgekehrt) einer Stromquelle von 100 oder 200 Volt Spannung verbinden. Die Kathodenstrahlen gehen von K aus, fallen durch die beiden Diaphragmen S_1 und S und erzeugen hinten bei M auf dem Fluoreszenzschirm einen blauen Fleck, solange der Kondensator ungeladen ist. Wird dieser aber in der angegebenen Weise geladen, so verschiebt sich der Fleck nach unten hin, nach M_1 , weil die negativ geladenen Teile der Kathodenstrahlen von der positiven Platte B angezogen werden. Die Kathodenstrahlen erfahren, wie man sagt, eine elektrostatische Ablenkung.

Es sind also sicher negativ geladene Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und die Vermutung liegt nahe, daß man es hier ebenso wie in der Elektrolyse mit Ionen zu tun hat, d. h. mit elektrisch geladenen Atomen. Wenn das der Fall ist, dann muß (nach S. 19) die spezifische Ladung dieser Teile kleiner oder höchstens gleich $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ sein und aus dem Wert, den die spezifische Ladung, wenn man sie bestimmen kann, wirklich besitzt, könnte man das Äquivalentgewicht des

Fig. 9.



Stoffes bestimmen, der die Ladung trägt, könnte also den Stoff selbst ermitteln.

Die Frage ist also, welches ist die spezifische Ladung der Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und eine weitere Frage ist, welche Geschwindigkeit besitzen diese Teilchen?

Diese beiden Fragen lassen sich aber durch quantitative Verfolgung der obigen Experimente beantworten, nämlich durch die Messung der Größe der magnetischen Ablenkung und durch die Messung der elektrostatischen Ablenkung. Bei der elektrostatischen Ablenkung verhält sich ein horizontal fliegendes Teilchen, das eine unbekannte Masse und eine unbekannte Ladung besitzt, sobald es in das von oben nach unten gerichtete elektrostatische Feld kommt, wie ein horizontal geworfener Stein, der von der Erde abgelenkt wird. Aus der Größe der Ablenkung, der Länge des Kondensators und der Größe der elektrischen Kraft, die in ihm herrscht, ergeben sich die beiden unbekanntenen Größen, spezifische Ladung und Geschwindigkeit, in der Kombination: spezifische Ladung dividiert durch das Quadrat der Geschwindigkeit.

Untersucht man andererseits die magnetische Ablenkung, so ergibt sich aus der Krümmung des Kathodenstrahles und aus der Stärke des Magnetfeldes die Kombination: spezifische Ladung dividiert durch die Geschwindigkeit selbst. Man erkennt, daß man durch diese beiden Messungen die beiden unbekanntenen Größen des Problems bestimmen

kann, nämlich 1. die Geschwindigkeit der Teilchen im Kathodenstrahl, 2. die spezifische Ladung derselben.

Was nun erstens die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen betrifft, so erwies sich diese immer als außerordentlich groß, etwa 100 000 Kilometer pro Sekunde, also ungefähr $\frac{1}{3}$ Lichtgeschwindigkeit. Aber diese Geschwindigkeit zeigte sich sehr verschieden, je nachdem die Röhre stärker oder weniger stark ausgepumpt war, also auch, je nachdem sie mit höherer oder geringerer Spannung betrieben werden mußte. Bei sehr stark evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit größer (während bei ihnen die magnetische Ablenkung kleiner war), bei weniger evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit kleiner, aber die magnetische Ablenkung größer. Die Werte, die man so für die Geschwindigkeit in Röhren verschiedener Luftleere fand, variierten zwischen $\frac{1}{5}$ und $\frac{1}{3}$ Lichtgeschwindigkeit.

Im Gegensatz dazu ergab sich der Wert der spezifischen Ladung der Kathodenstrahlen bei Röhren aller Art, weniger oder stärker ausgepumpten, immer als derselbe. Und dabei zeigte sich eine große Überraschung. Während man nämlich aus den Kenntnissen der Elektrolyse erwarten mußte, daß die spezifische Ladung höchstens sich gleich 96 494 Coulomb pro Gramm ergeben könnte, zeigte es sich, daß sie hier fast 1900mal größer war. Sie ergab sich zu 180 000 000 ($1,8 \cdot 10^8$)

Coulomb
Gramm

Daraus würde man zunächst schließen müssen, daß die elektrische Ladung hier verbunden ist mit dem Atom eines Stoffes, dessen Äquivalentgewicht bloß der 1900. Teil desjenigen des Wasserstoffs ist, daß also überraschenderweise in diesen Röhren sich die Existenz einer ganz neuen Materie kundgibt, die 1900mal leichter ist als die bisher leichteste Materie, der Wasserstoff.

Aber dieser seltsame Schluß hält genauerer Betrachtung gegenüber nicht stand. Es erwies sich nämlich als ganz einflußlos, ob das verdünnte Gas in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff oder irgend ein anderes Gas ist, immer ergab sich derselbe Wert der spezifischen Ladung. Da man nun nicht annehmen kann, daß man bei allen den verschiedenen Gasen immer dieselbe Beimengung eines neuen unbekanntes Gases habe und daß dieses allein der Träger der Kathodenstrahlen sei, so ist man zu dem Schluß genötigt, daß die Kathodenstrahlen elektrische Ladungen sind, welche gar nicht an eine fremde Masse gebunden sind, sondern daß man es hier mit den freien negativen Elektronen selbst zu tun habe, daß diese Elektronen es sind, welche die Kathodenstrahlen bilden.

Danach wären die negativen Elektronen kleine Körperchen, die die elektrische Elementarladung besitzen und deren Masse bloß etwa der 1900. Teil der Masse des Wasserstoffatoms wäre. Aber sie wären materielle Körper wie der Wasserstoff.

Indes zeigt eine weitere Überlegung und zeigen weitere Erfahrungen, daß sie nicht materielle Körper wie der Wasserstoff sind. Es läßt sich nämlich beweisen, daß sie gar keine wirkliche Masse haben, sondern daß ihre Masse nur scheinbar ist.

Um diese etwas schwierige Frage zu erörtern, müssen wir untersuchen, woher wir denn eigentlich zu der Behauptung kommen, daß ein Körper *M a s s e* besitzt. Dies schließen wir aus zwei Erfahrungen. Erstens erkennen wir, daß alle Körper von der Erde angezogen werden und daher Gewicht besitzen und dieses Gewicht fühlen wir beim Aufheben der Körper. Die Masse aller unserer irdischen Körper ist also der Schwerkraft unterworfen, sie ist *s c h w e r e M a s s e*. Wenn aber die Schwerkraft nicht vorhanden wäre (wir können sie uns ja in Gedanken fortgenommen vorstellen, oder wir können uns einen Körper in die Verbindungslinie zwischen Mondmittelpunkt und Erdmittelpunkt gebracht denken, 45 700 Meilen von der Erdoberfläche entfernt, dort wirkt die Erdanziehung nicht auf ihn, weil sie durch die Mondanziehung aufgehoben wird), würden wir dann auch noch Erfahrungen haben, durch welche wir den Körpern den Besitz von Masse zuschreiben würden? Zweifellos, und zwar aus folgenden Gründen. Um einen Körper von der Ruhe aus in Bewegung zu setzen, brauchen wir eine erhebliche Kraft. Man erkennt das jedesmal, wenn z. B. ein Pferd einen Wagen anzieht. Ist der Körper einmal in Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit, so brauchen wir eine viel geringere Kraft (wenn keine Reibung vorhanden wäre, gar keine Kraft), um diese Bewegung zu erhalten. Also die Bewegung von der Ruhe aus (oder allgemeiner die Beschleunigung eines Körpers) erfordert Kraft. Umgekehrt, wenn wir einen Körper durch eine Kraft in Bewegung gehalten haben und nun die Kraft plötzlich aufhören lassen (z. B. wenn ein Motorführer bei der elektrischen Trambahn den Strom plötzlich ausschaltet), so kommt der Körper nicht sofort in Ruhe, sondern bewegt sich mit derselben Geschwindigkeit weiter, und zwar beliebig lange (wenn keine Reibung vorhanden wäre, die die Geschwindigkeit allmählich vernichtet). Diese beiden Eigenschaften jedes Körpers beruhen darauf, daß er eben Masse besitzt, und man bezeichnet sie als Wirkungen der Trägheit. Die Masse jedes Körpers ist also *träge Masse*. Aus der Trägheit erkennt man die Masse, die Trägheit ist für uns das Kennzeichen der Masse.

Nun können wir aber einsehen, daß ein bewegtes Elektron bloß wegen seiner Ladung auch die Erscheinungen der Trägheit zeigt, selbst wenn es gar nicht mit einer Masse verbunden ist. Eine bewegte Ladung nämlich, ein bewegtes Elektron, ist ein elektrischer Strom. Aus den von *F a r a d a y* entdeckten Erscheinungen der Induktion wissen wir aber, daß stets, wenn ein Strom zu fließen beginnt, also wenn das Elektron in Bewegung kommt, daß dann vermöge der magnetischen Kräfte, die sich durch den umgebenden Äther ausbreiten, ein *Extrastrom* entsteht, der dem ursprünglichen Strom entgegenwirkt. Es gehört also eine Kraft dazu, um das Elektron in Bewegung zu setzen. Umgekehrt, wenn ein Strom plötzlich geöffnet wird, so entsteht aus demselben Grunde ein *Extrastrom*, der die Bewegung fortzusetzen sucht. Das Elektron bewegt sich also weiter, auch wenn die Kraft, die es in Bewegung hielt, aufhört. Diese beiden durch den Extrastrom (die Selbstinduktion) hervorgebrachten Erscheinungen bei einem Elektron entsprechen also genau der Trägheit bei einer Masse. Wir müssen sagen, ein Elektron besitzt schon wegen seiner Ladung die Eigenschaften der Trägheit, auch wenn es gar nicht

wirklich mit Masse versehen ist. Wir sagen deshalb, ein Elektron besitzt scheinbare Masse. Dieser Schein der Masse wird durch die Ladung hervorgebracht, durch die magnetischen Wirkungen einer bewegten Ladung in dem umgebenden Äther. Es läßt sich mathematisch zeigen, daß die scheinbare Masse einer Ladung um so größer ist, je kleiner das Volumen ist, welches die Ladung besitzt. Denken wir uns das Volumen nämlich kugelförmig, so sind die entstehenden magnetischen Kraftlinien um so näher an der Ladung, also um so wirksamer, je kleiner der Radius der Kugel ist. Die scheinbare Masse eines Elektrons ist, wie ausführliche Rechnung zeigt, gleich $\frac{2}{3}$ mal dem Quadrat seiner (elektrostatisch gemessenen) Ladung, dividiert durch seinen Radius und dividiert durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit — vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit des Elektrons nicht sehr nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt.

Daraus können wir aber die Größe eines Elektrons, seinen Radius, berechnen. Die Masse eines Elektrons ist rund der 1900. Teil der Masse eines Wasserstoffatoms und da diese nach S. 11 gleich $1,6 \cdot 10^{-24}$ ist, so ist die Masse eines Elektrons $= \frac{1,6}{1900} \cdot 10^{-24} = 8,4 \cdot 10^{-28}$ Gramm. Die Ladung eines Elektrons ist nach S. 20 gleich $4,71 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Also ist der Radius eines Elektrons gleich $\frac{2}{3} \cdot \frac{21 \cdot 10^{-20}}{8,4 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 2 \cdot 10^{-13}$ cm.

Der Radius eines Elektrons hat die Größe $2 \cdot 10^{-13}$ cm. Wir erinnern uns von S. 9, daß der Radius eines Atoms von der Ordnung 10^{-8} cm ist. Veranschaulichen wir uns dieses Verhältnis an einem Beispiel. Der Radius der Erde beträgt rund 6350 Kilometer. Denken wir uns ein Atom Wasserstoff vergrößert, so daß es den ganzen Raum der Erde einnimmt, so hat ein Elektron bloß den Radius 127 Meter, es entspricht also etwa dem Raum einer großen Kirche, aber nicht mehr. So wie diese winzig ist im Vergleich zur ganzen Erde, so ist ein Elektron winzig im Vergleich zu einem Atom.

Daß die Masse eines Elektrons nur scheinbare Masse ist, ist zunächst nach den obigen Betrachtungen bloß möglich. Es könnte immerhin sein, daß doch auch wirkliche Masse, Materie, mit dem Elektron verbunden wäre. Aber das ist nicht der Fall, wie weitere Versuche lehren. Es ergibt sich nämlich aus der Theorie, daß die scheinbare Masse eines Elektrons nur dann den oben angeführten, konstanten Wert hat, wenn die Geschwindigkeit des Elektrons klein ist gegen die Lichtgeschwindigkeit, also etwa wie bei den Kathodenstrahlen bloß $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{3}$ der Lichtgeschwindigkeit ist. Wenn aber die Geschwindigkeit eines Elektrons sehr viel größer wird, nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt, dann muß seine scheinbare Masse auch größer werden und bei Erreichung der Lichtgeschwindigkeit würde sie sogar unendlich groß werden. Nun kennen wir, wie im nächsten Kapitel genauer auseinandergesetzt werden wird, in den β -Strahlen des Radiums negative Elektronen, deren Geschwindigkeit viel größer als die der Kathodenstrahlen ist, und in der Tat hat sich experimentell gezeigt, daß deren Masse immer größer wird, je mehr sich ihre Geschwindigkeit der des Lichtes nähert. Das konnte man daraus ermitteln, daß man auch bei ihnen die spezifische Ladung be-

stimmt, d. h. das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse. Wächst die Masse, so muß die spezifische Ladung kleiner werden und immer kleiner, je mehr man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Es ergaben z. B. die Versuche über die spezifische Ladung der Elektronen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit folgendes:

Geschwindigkeit	Spezifische Ladung
$1,00 \cdot 10^{10}$ cm/sek	$1,80 \cdot 10^8$ Coulomb/Gramm
$1,50 \cdot 10^{10}$ "	$1,80 \cdot 10^8$ "
$2,36 \cdot 10^{10}$ "	$1,31 \cdot 10^8$ "
$2,48 \cdot 10^{10}$ "	$1,17 \cdot 10^8$ "
$2,59 \cdot 10^{10}$ "	$0,97 \cdot 10^8$ "
$2,72 \cdot 10^{10}$ "	$0,77 \cdot 10^8$ "
$2,83 \cdot 10^{10}$ "	$0,63 \cdot 10^7$ "

Also bei der Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^{10}$ cm/sek) bis auf 94% derselben nahm die spezifische Ladung auf etwa den dritten Teil ab, die scheinbare Masse wuchs also auf etwa das Dreifache.

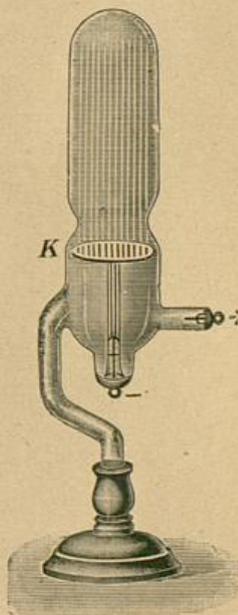
Daraus ist mit Sicherheit zu schließen, daß ein Elektron nur scheinbare Masse, keine wirkliche besitzt.

Für die negativen Elektronen ist so der Beweis ihrer Existenz geführt, und da wir bei der Elektrolyse aus einem Molekül ein positiv und ein negativ geladenes Ion erhalten, so ist also mindestens sicher, daß ein Molekül außer den materiellen Atomen noch wenigstens negative Elektronen besitzen muß.

Wie steht es nun aber mit der positiven Elektrizität, mit den positiven Elektronen? In den evakuierten Röhren treten beim Stromdurchgang unter bestimmten Umständen nicht bloß die negativen Kathodenstrahlen, sondern auch Strahlen mit positiver Ladung auf, die man als Kanalstrahlen bezeichnet. Bringt man nämlich, wie in Fig. 10, im Innern der Röhre eine Kathode mit Löchern oder Spalten, also mit Kanälen, an und in dem unteren Teil der Röhre eine Anode, so gehen die Kathodenstrahlen von K nach unten, in den Raum, in dem sich die Anode befindet, und erregen unten das Glas zu grüner Fluoreszenz. Aber man sieht dabei weiter von den Kanälen aus nach oben andere Strahlen ausgehen, die in Luft rotbraun gefärbt sind, und dieses sind die Kanalstrahlen. Daß sie positive Ladungen mit sich führen, wurde daraus erkannt, daß sie von einem Magneten und von einem elektrostatischen Feld abgelenkt werden, aber gerade nach der entgegengesetzten Richtung wie die Kathodenstrahlen.

Durch Messung der Größe der magnetischen und elektrostatischen Ablenkung konnten nun aber auch hier, wie bei den Kathodenstrahlen, die beiden wichtigen Fragen beantwortet werden: Welches ist die Geschwindigkeit der Teilchen, die in den Kanalstrahlen fliegen, und zweitens,

Fig. 10.



welches ist ihre spezifische Ladung? Die Geschwindigkeit ergab sich verschieden, aber immer viel kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Während sie dort $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{3}$ der Lichtgeschwindigkeit war, ist sie hier etwa $\frac{1}{500}$ der Lichtgeschwindigkeit, also mehrere hundert Mal kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Wichtiger war noch die Antwort auf die Frage über die Größe der spezifischen Ladung. Diese ergab sich ausnahmslos kleiner oder höchstens gleich $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$,

während sie, wie oben ausgeführt, bei den Kathodenstrahlen 1900mal größer war. Daraus ist (nach S. 19) zunächst zu schließen, daß die positive Elektrizität in den Kanalstrahlen nicht frei für sich vorkommt, sondern stets nur in Verbindung mit gewöhnlichen Atomen, daß es also Ionen sind, welche die Kanalstrahlen bilden. Und weiter: während der Wert der spezifischen Ladung bei den Kathodenstrahlen sich immer als derselbe ergab, welches Gas auch in der Röhre vorhanden war, ist das bei den Kanalstrahlen ganz anders. Die Größe der spezifischen Ladung ist durchaus verschieden, je nachdem in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff ist, auch ein Beweis dafür, daß die positive Elektrizität hier immer mit den Atomen verbunden ist.

Aber die genauere Untersuchung hat gezeigt, daß in jedem Fall, welches auch das Gas in der Röhre ist, es mehrere verschiedenartige Träger der positiven Elektrizität gibt. In Wasserstoff findet man z. B., daß es positiv geladene Atome, also H^+ , aber auch positiv geladene Moleküle H_2^+ gibt. Ja, es scheint auch dreifache Verbindungen von Wasserstoff zu geben, die positiv geladen sind, also Ionen von der Art H_3^+ . Weiter aber hat sich gezeigt, daß es unter den Kanalstrahlen auch negativ geladene Strahlen gibt, die erst entstehen, wenn die Kanalstrahlen schon gebildet sind. So haben sich z. B. negativ geladene Wasserstoffatome H^- gezeigt. Ebenso hat man positiv und negativ geladene Sauerstoffatome O^+ und O^- gefunden, ferner Kohlenstoffatome, die einfach positiv oder negativ geladen waren, C^+ und C^- , und solche, die doppelt positiv geladen waren, C^{++} , ferner auch positiv oder negativ geladene Moleküle von Kohlenstoff C_2^+ und C_2^- .

Was aus diesen Untersuchungen folgt, ist ein doppeltes. Erstens: freie positive Elektronen sind nicht gefunden worden, und zwar, wie wir hinzusetzen wollen, niemals, auch bei anderen Versuchsanordnungen nicht. Wir können es als das Resultat aller bisherigen Versuche hinstellen: Während die negative Elektrizität frei für sich vorkommen kann, ohne Verbindung mit Materie, ist das bei der positiven Elektrizität nicht der Fall. Die positive Elektrizität ist stets und durchgängig an die Atome der gewöhnlichen Materie gebunden.

Und zweitens ersehen wir, daß die Verbindungen von Atomen untereinander zu Molekülen und mit der Elektrizität zu Ionen vielseitiger sind, als wir zunächst glaubten. Es gibt positiv und negativ geladene Atome derselben Art, es gibt auch solche Atome mit mehrfachen positiven oder negativen Ladungen, aber es gibt auch außer den neutralen Molekülen positiv bzw. negativ geladene Moleküle mit einer oder mehreren Ladungen.

Eine umfassende Atomtheorie wird diesen vielfachen Möglichkeiten, wie sich die Atome in Wirklichkeit verhalten, Rechnung zu tragen haben.