

**2. Über die durch Röntgenstrahlen
erzeugten sekundären Kathodenstrahlen;
von J. Laub.**

Ein Körper, welcher von Röntgenstrahlen getroffen wird, sendet bekanntlich außer den sekundären Röntgenstrahlen auch noch negative elektrische Teilchen aus. Schon Curie und Sagnac zeigten, daß das Durchdringungsvermögen dieser sekundären Kathodenstrahlen von der gleichen Ordnung wie das der Lenardschen Strahlen ist. Eine Aluminiumfolie von $0,46 \cdot 10^{-6}$ cm Dicke verkleinerte den Strom negativer Elektrizität um 40 Proz., woraus man schließen kann, daß die Geschwindigkeit der durch Röntgenstrahlen erzeugten Elektronen zwischen 10^9 und 10^{10} cm/Sek. liegt. Dorn¹⁾ hat die magnetische Ablenkung dieser Strahlen gemessen und Geschwindigkeiten gefunden, welche zwischen $5,3 \cdot 10^9$ und $8,5 \cdot 10^9$ cm/Sek. liegen, wobei er für e/m den Wert $1,865 \times 10^7$ setzt. Nimmt man $e/m = 1,7 \times 10^7$, so müssen die Dornschen Zahlen auf $4,9 \times 10^9$ bis $7,8 \times 10^9$ reduziert werden.

Ferner hat Bestelmeyer²⁾ das magnetische Spektrum der sekundären Kathodenstrahlen, welche durch Röntgenstrahlen an *Platin* erzeugt werden, aufgenommen, wobei er die Werte $5,9 \times 10^9$ bis $9,6 \times 10^9$ ($e/m = 1,7 \cdot 10^7$) findet.

Während ich mit meinen Messungen beschäftigt war, ist auch eine Arbeit von P. D. Innes³⁾ erschienen, der bei der Bestimmung der Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen auch die photographische Methode anwendet. Innes kann mit seiner Methode nur die schweren Metalle untersuchen; er findet für die Geschwindigkeiten der Sekundärstrahlen bei den verschiedenen Schwermetallen sehr nahe gleiche Werte, nur für Zink ist der Wert der Maximalgeschwindigkeit um etwa 15 Proz. kleiner.

1) E. Dorn, Jubelband für H. A. Lorentz, 1900.

2) A. Bestelmeyer, Ann. d. Phys. 22. p. 429. 1907.

3) P. D. Innes, Proc. Roy. Soc. 79. p. 442. 1907.

Die in der folgenden Abhandlung angewandte Methode hat den Vorzug, daß sie die Untersuchung der Sekundärstrahlen auch bei Aluminium und Ruß gestattet. Außerdem gibt sie auch eine Übersicht über die Geschwindigkeitsverteilung der Strahlen und läßt erschließen, welchen Geschwindigkeiten die meisten Elektronen angehören. Auch war das Vakuum bei meinen Untersuchungen viel besser als bei den oben mitgeteilten.

§ 1. Versuchsanordnung.

In einem zur Erde abgeleiteten Bleikasten konnten die verschiedenen Röntgenröhren angebracht werden. Zur Erzeugung der Strahlen diente ein großes Induktorium mit Quecksilber-Turbinenunterbrecher, der den Strom etwa 32 mal in der Sekunde unterbrach. Die Spannung an der Röhre wurde durch eine parallel geschaltete Funkenstrecke zwischen zwei Messingkugeln von 6 cm Durchmesser gemessen. Die Funkenstrecke wurde noch mit einem Bleischirm vor den Strahlen geschützt. Um die Härte der Röntgenröhren möglichst konstant zu erhalten, wurden sie nie länger als 50 Sek. in Betrieb gehalten. Durch ein Fenster des Bleikastens fielen die Strahlen auf die 8,5 cm lange und 2,8 cm breite Platte *R*, deren eine Seite aus Platin, die andere aus Aluminium bestand. Die Sekundärröhre (dieselbe, welche Hr. W. Wien benutzt hatte¹⁾), in welcher die Platte *R* angebracht war, hatte folgende Gestalt.

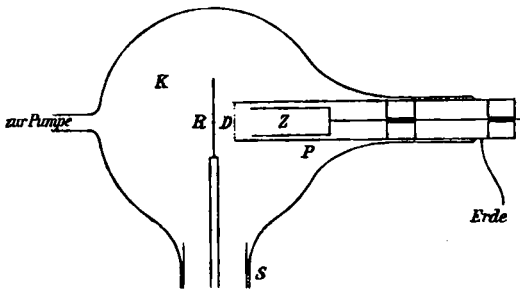


Fig. 1.

In das 10 cm weite, kugelförmige Gefäß *K* war eine zur Erde abgeleitete Bleiröhre *P* von etwa 2 cm Weite ein-

1) W. Wien, Gött. Nachr., November 1907.

gekittet, in die, durch Bernstein isoliert, ein zylindrischer Auffänger Z eingeführt war. Auf der Vorderseite war die Bleiröhre P durch ein feines Drahtnetz D abgeschlossen. Der Auffänger bestand aus einem hohlen Metallzylinder, der vorn offen, hinten geschlossen war und mit einem Dolezalekschen Elektrometer mit Bernsteinisolation verbunden war. Die Zuleitung zu der Nadel des Elektrometers wurde durch ein Metallrohr mit Schellackisolation geführt. Es wurde die Nadel-schaltung gebraucht; ein kleiner Kondensator von 41,5 cm Kapazität wurde auch in Verbindung gesetzt, um die Empfindlichkeit nach der Harmschen¹⁾ Methode zu kontrollieren. Ein Skalenteil entsprach $2-3 \cdot 10^{-4}$ elektrostatischen Einheiten. Sowohl das Elektrometer, wie auch die Akkumulatoren-batterie befanden sich in einem erdabgeleiteten Metallkasten.

Dem Ende der Bleiröhre P gegenüber befand sich die oben erwähnte Platte R , auf die möglichst *schräg* von der Seite die Röntgenstrahlen fielen. Durch die Bleiröhre war der Auffänger gegen die Röntgenstrahlen geschützt. Bei S befand sich (vgl. Fig. 2) ein an der Stelle T eingengter, leicht dreh-

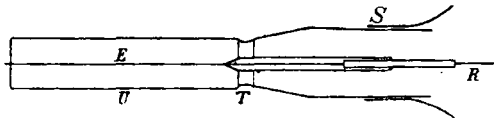


Fig. 2.

barer Schliff. Die Fortsetzung des Schliffes bildete ein 75 cm langes, 5 cm weites, mit einer Mischung aus Paraffin und Wachs ausgefülltes Glasrohr U , durch welches der an der Stelle T eingeschmolzene Draht eingeführt war. An den Draht E , an welchem die Platte R befestigt war, konnte eine hohe Spannung gelegt werden. Wenn R positiv geladen wurde, so verzögerte die Spannung die von R durch D nach Z gelangenden sekundären Kathodenstrahlen. Das Rohr U war noch mit Stanniol bedeckt und zur Erde abgeleitet, wodurch man gegen elektrische Störungen geschützt war.

Die Entfernung zwischen R und D betrug 1,5 cm, von D bis Z 1 cm.

1) F. Harms, Physik. Zeitschr. 1903. p. 47.

An den Schliff *S* war auch noch eine Kreisteilung angebracht, an welcher man die verschiedenen Inzidenzwinkel, unter welchen die Röntgenstrahlen auf die Platte *R* fielen, ablesen konnte.

Die Sekundärröhre war mit einer Quecksilberpumpe verbunden, welche ein sehr gutes Vakuum lieferte. Um die Metalle vor Quecksilberdämpfen zu schützen, wurde eine weite, fast 2 m lange mit Schwefelkörnchen gefüllte Röhre dazwischen geschaltet. Auf beiden Seiten des Schwefels befanden sich in der Leitung je fünf Kupferspiralen, welche dazu dienten, den Schwefeldampf einerseits von der Pumpe, andererseits von der Röhre abzuhalten. Um das Vakuum möglichst zu erhöhen, war gleich an der Sekundärröhre ein sackförmiges Gefäß angeblasen, welches mit kleinen Stücken durch Glühen von Kokosnußschale hergestellter Kohle ausgefüllt war. Die Kohle wurde unter fortwährendem Pumpen so lange auf 320° gehalten, bis sie nur noch ganz wenig Gas abgab. Dann wurde das die Kohle enthaltende Gefäß in einen mit flüssiger Luft gefüllten Dewarschen Becher gebracht, wodurch das Vakuum so hoch stieg, daß bei weiterem Pumpen keine Luftblasen mehr erschienen.

§ 2. Ausführung der Versuche.

Bei der Ausführung der Beobachtungen wurde auf folgende Weise verfahren. Von dem Platz des Fernrohres aus konnte das Induktorium in Gang gesetzt und der Ausschlag am Elektrometer von der Ruhelage aus beobachtet werden. Es wurde zunächst die Spannung an der Röntgenröhre und der sich nach 30 Sek. am Elektrometer einstellende Ausschlag gemessen. Dann wurde an die Platte *R* eine positive Spannung gelegt, die Potentialdifferenz an der Röntgenröhre nochmals kontrolliert und der verkleinerte Ausschlag gemessen, den das Elektrometer nach 30 Sek. angab. Es wurde bei jedem Versuche zuerst der Elektrometersausschlag abgelesen bei ungeladenem *R* und dann die Abnahme der Zahl der Skalenteile nach angelegter Spannung oder umgekehrt, so daß eine eventuelle schwache Veränderung der Intensität oder Härte der Röntgenröhre in Rechnung gezogen werden konnte; es kommt immer nur auf die relative Abnahme an. Dank der kurzen Exposi-

tionsdauer blieben die Röntgenröhren für viele Versuche unverändert. Die Isolation am Elektrometer war eine vorzügliche; eine Ladung auf 100 Skt. nahm in einer Minute nur um 2 Proz. ab. Um nicht viel Zeit zwischen den einzelnen Versuchen zu verlieren, konnte der Torsionskopf des Elektrometers vom Beobachtungsplatz aus mit einem zur Erde abgeleiteten Draht berührt werden.

Die positive Spannung lieferte eine kleine Influenzmaschine, welche unmittelbar an der Zuleitung zur Platte *R* stand. Für kleine Spannungen wurde eine Akkumulatorenbatterie gebraucht. Durch Regulierung der Tourenzahl des Motors und durch eine Spitzenanordnung konnte das Potential allmählich erhöht werden. Vom positiven Pol der Influenzmaschine gingen Leitungen zu *R*, zum die Spannung messenden Elektrometer und zu einer in Paraffin eingegossenen Messingplatte. Neben dem Fernrohr befand sich ein Tischchen, von dem aus der Beobachter mittels eines Räderwerkes ein erdabgeleitetes Drahtbündel an die Messingplatte nähern und auf diese Weise das Potential beliebig variieren konnte.

Alle Zuleitungen waren durch weite, mit Paraffin ausgefüllte Röhren gezogen.

Die ersten Versuchsreihen wurden mit einer verhältnismäßig weichen Röntgenröhre ausgeführt; die Spannung betrug 35000 Volt. Es wurden die Geschwindigkeiten der Elektronen gemessen, welche an *Platin*, *Aluminium* und *Ruß* erzeugt wurden; ferner wurde auch die Abhängigkeit der Zahl der erzeugten negativen Teilchen von der Politur des Metalles und des Winkels untersucht, unter welchem die Röntgenstrahlen auf die Platte fielen. Dann wurden dieselben Messungen mit einer Röntgenröhre von 65000 Volt Spannung gemacht. Mit einer „100000 Volt“-Röhre konnten nur bei Platin die verschiedenen Geschwindigkeiten der Sekundärstrahlen bestimmt werden, während bei Aluminium und Ruß nur die Maximalgeschwindigkeit gemessen wurde, weil der Effekt zu schwach war. Bei allen den Röhren bestand die Antikathode aus Platin. Es wurde auch eine Versuchsreihe mit Strahlen gemacht, welche aus einer Röntgenröhre mit Aluminiumantikathode kamen, wobei es sich herausstellte, daß, obwohl die Spannung 58000 Volt betrug, die Maximalgeschwindigkeit der

erzeugten Elektronen kleiner war, als bei einer 35000 Volt-Röntgenröhre mit Platinantikathode. Es wurden ferner auch noch die Geschwindigkeiten der sekundären Kathodenstrahlen gemessen, welche von durch eine Bleischicht filtrierten Röntgenstrahlen erzeugt wurden.

Das Vakuum war bei allen Versuchen sehr hoch; die im nächsten Abschnitt angegebenen Resultate wurden in dem durch Kohle und flüssige Luft erhöhten Vakuum gefunden.

§ 3. Beobachtungsergebnisse.

1. Was die Abhängigkeit der Menge der sekundären Kathodenstrahlen von der *Natur* des bestrahlten Materiales bei *derselben Spannung* der Röntgenröhre betrifft, zeigt Platin unter den von mir untersuchten Körpern den stärksten Effekt, bei Aluminium sinkt die Zahl der erzeugten Elektronen in Vergleich mit Platin ungefähr auf ein Drittel, bei Ruß auf ein Viertel. Als Beispiel sollen die folgenden Zahlen angegeben werden: zeigt das Elektrometer für Platin einen Ausschlag von 162,3 Skt. an, so beträgt der Ausschlag für Aluminium 65,5 Skt., für Ruß 48,2 Skt. Aus dem Verhalten der untersuchten Metalle kann man schließen, daß, je größer die Dichte des bestrahlten Körpers ist, die Emission der Elektronen desto stärker wird.

2. Die Anzahl der emittierten Elektronen nimmt ab mit der Abnahme der Intensität der primären Röntgenstrahlen.

3. Die Intensität der erzeugten Kathodenstrahlung ist bei verschiedener Härte der Röntgenröhre verschieden. Bei einer gewissen Qualität der Strahlen scheint der Effekt ein Maximum zu erreichen, während sowohl durch härtere wie auch durch weichere Strahlen weniger Elektronen erzeugt werden. Bei meinen Versuchen lag der Maximaleffekt etwa bei 70000 Volt Spannung der Röhre; mit zunehmender Härte nahm dann die Zahl der sekundären Elektronen ab. Dies ist jedenfalls auch auf die Abnahme der Intensität der Röntgenstrahlen zurückzuführen.

4. Die Politur des Platins und Aluminiums hat auf den Effekt keinen Einfluß. Dies Resultat ist einleuchtend, wenn man bedenkt, daß die Elektronen im Innern des Atoms erzeugt werden.

5. Die Röntgenröhre war zuerst so eingestellt, daß die Röntgenstrahlen möglichst schräg auf die Platte R fielen. Wurde die Platte R gedreht, so nahm der Ausschlag des Elektrometers ab; bei einem Winkel von 40° gegen die Anfangslage, war die Zahl der emittierten Elektronen etwa um 20 Proz. kleiner. *Die Emission der sekundären Kathodenstrahlen ist also um so größer, je schiefer der Inzidenzwinkel der primären Röntgenstrahlen ist.* Man hat hier ein analoges Verhalten wie bei den durch Kathoden- und Kanalstrahlen erzeugten Sekundärstrahlen.¹⁾

6. Was die Geschwindigkeiten der an Platin erzeugten Kathodenstrahlen betrifft, so zeigte es sich, daß sich die Menge der nach dem Auffänger gelangenden Sekundärstrahlen erst dann um 18 Proz. verkleinerte, wenn die angelegte, verzögernde positive Spannung 1500 Volt betrug. Wurde eine kleinere Spannung angelegt, dann war keine Änderung am Elektrometer in bezug auf den absoluten Effekt zu merken. Wir können daraus schließen, daß sicher verschwindend wenig Kathodenstrahlen (relativ zu der Gesamtstrahlung) erzeugt werden, deren Geschwindigkeit kleiner als 1500 Volt ist. Wird nach Anlegung der positiven Spannung V an die Platte R der Ausschlag am Elektrometer um einen bestimmten Bruchteil β verringert, so kommt das erstens daher, daß die Sekundärstrahlen, deren Geschwindigkeit der angelegten Spannung gleich ist, infolge der Verzögerung an der Oberfläche des bestrahlten Körpers zurückgehalten werden; ferner wird auch ein gewisser Teil α infolge der Zerstreuung der Kathodenstrahlen im elektrischen Felde nicht mehr an den Auffänger gelangen. Zieht man den Bruchteil α von β ab, so gibt der Rest die Menge der Elektronen an, deren Geschwindigkeit gleich „ V -Volt ist“.

Man kann durch folgende Überlegung ausrechnen, wie groß ungefähr α bei den verschiedenen Spannungen V ist. Bewegt sich das erzeugte Elektron in der xy -Ebene, ist ferner v die Anfangsgeschwindigkeit und α der Winkel, unter welchem das Elektron den Körper verläßt, f die verzögernde Kraft auf die

1) Vgl. Chr. Füchtbauer, Verh. d. Deusch. Physik. Ges. 1906, p. 394 u. J. Laub, Ann. d. Phys. 23. p. 285. 1907.

Einheitsladung in der Richtung x normal zur Fläche, e die Ladung des Elektrons, so hat man bekanntlich die Gleichungen:

$$(1) \quad \begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = - e f, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0. \end{cases}$$

Durch Integration erhält man die Ausdrücke:

$$(2) \quad \begin{cases} x = - \frac{\varepsilon y^2}{4a \sin^2 \alpha} + y \cotg \alpha, \\ y = \frac{2\alpha}{\varepsilon} \left\{ \cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \frac{x}{a} \varepsilon} \right\} \sin \alpha, \end{cases}$$

wobei gesetzt ist:

$$a e f = \frac{m v^2}{2} \varepsilon,$$

(a ist die Entfernung des bestrahlten Körpers vom Auffänger). Man sieht, daß für $\cos \alpha < \sqrt{\varepsilon}$, x nicht mehr gleich a werden kann. Andererseits darf y nicht größer werden als die halbe Breite b des Auffängers, wenn die Strahlen noch auf den Auffänger fallen sollen. Setzt man in den Gleichungen (2) $y = b$, $x = a$, so erhält man, indem man noch $\sin \alpha$ durch α ersetzt (was bei uns bis auf 2 Proz. gestattet ist), für den Winkel α die Gleichung:

$$\alpha = \frac{b}{2a} (1 \pm \sqrt{1 - \varepsilon}),$$

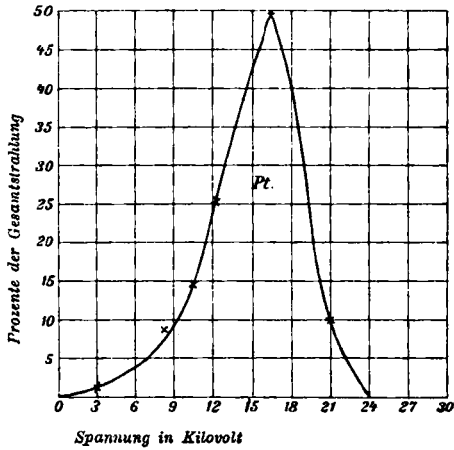
$$\left(\varepsilon = \frac{2 a e f}{m v^2} = \frac{2 e V}{m v^2} \right).$$

Die Größe des Teiles x wird von der Differenz des Winkels α und des Öffnungswinkels abhängen, welche die sekundären Kathodenstrahlen mit dem Auffänger bilden. (Bei den Versuchen betrug der Öffnungswinkel 0,2 cm). Es wurde immer der Wert x berechnet mit Hilfe der letzten Gleichung und bei den verschiedenen Spannungen in Rechnung gezogen als Korrektionsglied.

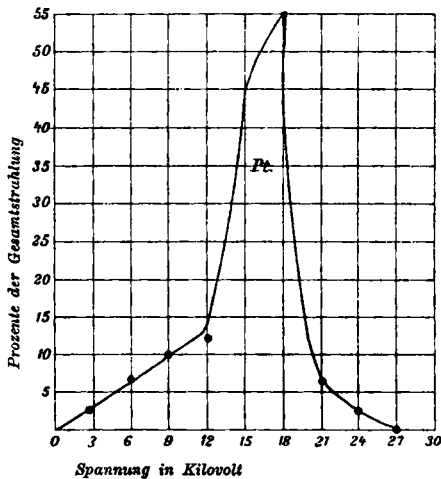
Aus den folgenden Kurven überblickt man die Geschwindigkeitsverteilung der erzeugten sekundären Kathodenstrahlen bei Platin. Die Kurve I bezieht sich auf die Röntgenröhre, deren Spannung 35000 Volt betrug. Man sieht, daß der größte Teil der erzeugten Sekundärstrahlen im Gebiete 10000 bis 20000 Volt liegt, während die Maximalgeschwindigkeit 24000 Volt beträgt. Wurde die positive Spannung über 24000 Volt erhöht, so blieb das Elektrometer stromlos.

Bei der härteren Röntgenröhre von der Spannungsdifferenz 65000 Volt betrug die Maximalgeschwindigkeit 27000 Volt, bei der Röhre von zirka 100000 Volt betrug die Maximalgeschwindigkeit 29500 Volt.

Man kann mit Bestimmtheit schließen: *Mit der Zunahme der Härte der Röntgenröhren nimmt die Maximalgeschwindigkeit der erzeugten Elektronen zu.*



Kurve I. Spannung der Röntgenröhre = 35 000 Volt.

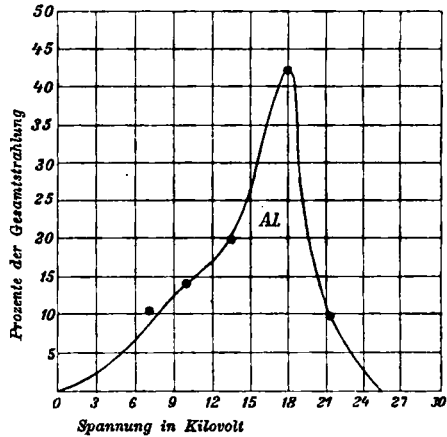


Kurve II. Spannung der Röntgenröhre = 65 000 Volt.

7. Die Geschwindigkeitsverteilung bei Aluminium ist aus der Kurve III zu ersehen. Die kleinsten zur Messung gelangenden Geschwindigkeiten sind dieselben wie Platin, hingegen ist die Maximalgeschwindigkeit etwas größer.

Die Geschwindigkeitsverteilung bei Ruß ist dieselbe wie bei Aluminium.

Auch Aluminium und Ruß wurden mit harten Röntgenstrahlen bestrahlt, wobei es sich wieder herausstellte, daß die Maximalgeschwindigkeit etwa um 8 Proz. größer als bei Platin ist.



Kurve III. Spannung der Röntgenröhre = 85 000 Volt.

8. Bei Verwendung einer Röntgenröhre mit Aluminiumantikathode zeigte sich, daß, obwohl ihre Spannung 58 000 Volt betrug, die Maximalgeschwindigkeit der sowohl an der Platin- wie auch an der Aluminiumplatte erzeugten Kathodenstrahlen um etwa 10 Proz. kleiner war als die entsprechende Geschwindigkeit bei der Bestrahlung mit der 35 000 Volt-Röhre und Platinantikathode. Nun ist ja bekanntlich die Intensität der X-Strahlen, die in einer Röhre erzeugt werden, deren Antikathode aus Aluminium besteht, viel kleiner als bei einer Röhre mit Platinantikathode; andererseits gelten aber auch die Röntgenstrahlen einer Röhre mit Aluminiumantikathode als viel weicher.

Um nun zu entscheiden, ob die Verkleinerung der Maximalgeschwindigkeit von der schwächeren Intensität oder „Weicheit“ der Strahlen herrührt, wurde folgender Versuch ausgeführt: Zwischen die Sekundärrohre und die aus der Platinantikathode kommenden Röntgenstrahlen wurden solange dünne Aluminiumscheiben geschoben, bis die Menge der erzeugten Elektronen gleich derjenigen war, welche bei der Bestrahlung durch die Röhre mit Aluminiumantikathode erzeugt wurden. Die auf solche Weise hervorgebrachte Schwächung der Intensität

der Röntgenstrahlen hatte keinen Einfluß auf die Maximalgeschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen. Man kann daher sagen: *die Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen wächst mit der Härte der Röntgenröhre, ist aber unabhängig von der Intensität der primären Strahlung.*

9. Um nun zu sehen, ob sich die Geschwindigkeit der Sekundärstrahlung ändert, wenn nur harte Strahlen auf ein Metall fallen, wurden die in der „65 000 Volt“-Röntgenröhre erzeugten X-Strahlen durch eine Bleischeibe filtriert, so daß unter den auf das Platin auftreffenden Strahlen die weichen sicher fehlten. Es zeigte sich aber kein merklicher Unterschied in der Geschwindigkeit der erzeugten Kathodenstrahlen; die Geschwindigkeit war dieselbe wie im Falle ohne Filtration der Röntgenstrahlen.

§ 4. Deutung der Versuchsergebnisse.

Um die Entstehung der sekundären Strahlen zu deuten, wäre die einfachste Annahme, daß es die freien Elektronen des entsprechenden Metalles sind, welche durch den auftreffenden Röntgenimpuls beschleunigt werden. Nun hat aber W. Wien gezeigt, daß die Geschwindigkeit der von Röntgenstrahlen sekundär erzeugten Kathodenstrahlen zu groß ist, um durch die beschleunigende Wirkung des von den Röntgenstrahlen herrührenden elektrischen Feldes erklärt zu werden. Wien stellte zuerst in seiner Arbeit „Über die Energie der Kathodenstrahlen im Verhältnis zur Energie der Röntgen- und Sekundärstrahlen“ die Hypothese auf, daß die Energie der sekundären Kathodenstrahlen aus dem Innern der Atome selbst stamme, so daß die Wirkung der Röntgenstrahlen nur eine auslösende sei; durch die X-Strahlen werden die Atome in eine Art radioaktiven Zustand versetzt.

In einer späteren Abhandlung¹⁾ stellt Wien, indem er die Planck-Einsteinsche Theorie der Strahlung auch auf die Röntgenstrahlen ausdehnt, eine neue Hypothese auf, welche auch geeignet ist, die große Geschwindigkeit der Sekundärstrahlung zu erklären. Nach der Hypothese²⁾ sind es die in

1) W. Wien, Gött. Nachr. 1907.

2) Diese Hypothese hat auch Hr. Stark aufgestellt.

den Röntgenstrahlen enthaltenen Energiequanten, welchen die sekundären Kathodenstrahlen ihre Energie verdanken, denn „das Elementarquantum ist diejenige Energiemenge, welche von einem Atom in der Form von Strahlung aufgenommen oder abgegeben wird, um ein Elektron aus dem Atom zu treiben oder in das Atom aufzunehmen.“

Die vorliegenden experimentellen Tatsachen scheinen mir besonders aus folgenden Gründen für die zweite Wiensche Hypothese zu sprechen; sie bilden auch zugleich, falls man die Röntgenstrahlen als Ätherwellen von sehr kleiner Länge betrachtet, eine Stütze für die Lichtquantentheorie. Es ergibt sich nämlich für die Geschwindigkeit der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen die Gleichung:

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{\lambda m}},$$

wobei $h = 6,548 \cdot 10^{-27}$, λ die Wellenlänge der Röntgenstrahlen, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, m die Masse des Elektrons ist. Setzt man λ gleich von der Ordnung 10^{-9} cm, so muß notwendig v von der Ordnung 10^{-9} cm/sec werden, was mit der Beobachtung übereinstimmt.

Man sieht aus der obigen Formel, daß die Geschwindigkeit der Sekundärstrahlen mit der Härte der Röhre (λ) wachsen muß. Und in der Tat ergaben die Versuche, daß die Maximalgeschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen je nach der Härte der Röntgenröhren zwischen 24000—30000 Volt variiert.

Bekanntlich besitzen die beim photoelektrischen Effekt erzeugten Elektronen Geschwindigkeiten von der Größenordnung 10^7 cm/sec. Hat man es bei der Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und Röntgenstrahlen mit einem radioaktiven Vorgang zu tun, ist die Rolle des Lichtes nur eine auslösende, so erscheint es kaum erklärlich, daß die Geschwindigkeiten der durch Licht und X-Strahlen erzeugten Teilchen so wesentlich voneinander variieren. Nach der Lichtquantenhypothese müssen die „photoelektrischen“ Elektronen eine ca. 1000mal kleinere Geschwindigkeit besitzen, wenn man in die Formel für die Geschwindigkeit die Wellenlänge des ultravioletten Lichtes einsetzt.

Die Maximalgeschwindigkeit der erzeugten Elektronen

scheint nach den Versuchen nicht wesentlich von dem Material abzuhängen, das die Sekundärstrahlen aussendet. Auch das fordert die zweite Wiensche Hypothese.

Geben die im Röntgenstrahl enthaltenen Energiequanten unabhängig voneinander ihre Energie an die absorbierenden Elektronen des getroffenen Körpers ab, so muß natürlich die Geschwindigkeitsverteilung und insbesondere die Maximalgeschwindigkeit der erzeugten Kathodenstrahlen von der Intensität der auffallenden Röntgenstrahlen unabhängig sein, was mit dem Experiment vorzüglich übereinstimmt. Hingegen muß die Menge der aus dem Körper herauskommenden Elektronen unter sonst gleichen Umständen, der Intensität der erzeugenden Röntgenstrahlen, wie es auch die Erfahrung zeigt, proportional sein.

Schließlich möchte ich noch erwähnen, daß das analoge Verhalten der α , β , γ -Strahlen in bezug auf Ionisationswirkungen auf Grund der Lichtquantentheorie leicht verständlich ist. Denn nach der Quantenhypothese muß man sich die Energie eines sich fortpflanzenden Röntgenstrahles nicht kontinuierlich über den Raum verteilt denken, vielmehr besteht seine Energie aus einer *endlichen Zahl* von Elementarteilchen, welche als Ganze absorbiert werden. Die Energie der Röntgenstrahlen kann nach dieser Auffassung nicht aus beliebig vielen und beliebig kleinen Teilchen bestehen; die Röntgenstrahlen verhalten sich in energetischer Hinsicht nicht wesentlich verschieden von den materiellen α - und β -Strahlen. (Vgl. H. W. Bragg, Trans. Roy. Soc. of S. A. p. 94. 1907. Bragg stellt die Hypothese auf, daß die X-Strahlen aus neutralen Teilchen bestehen. Auf die in der Arbeit beschriebenen Versuche hoffe ich in einer nächsten Mitteilung zurückzukommen.)

Was die Zahl der aus dem bestrahlten Körper herauskommenden Elektronen betrifft, wird diese Zahl vom Verhältnis des Absorptionskoeffizienten der Röntgenstrahlen zu dem der Kathodenstrahlen für das entsprechende Material abhängen, und zwar je größer dieses Verhältnis bei einem Körper ist, desto größeren Effekt wird man erwarten. Nun ist für schnelle Kathodenstrahlen und harte Röntgenstrahlen das genannte Verhältnis bei Platin etwa 10mal so groß wie bei Aluminium; die Beobachtungen zeigen auch, daß bei Platin zirka dreimal

so viel Strahlen aus dem getroffenen Körper herauskommen wie bei Aluminium.

Aus demselben Grund ist auch die Abhängigkeit der Intensität der erzeugten Kathodenstrahlung von der Härte der Röntgenröhre leicht zu deuten. Mit zunehmender Härte wird der Absorptionskoeffizient für die Röntgenstrahlen bekanntlich kleiner, die X-Strahlen dringen in sehr tiefe Schichten ein, so daß die ausgetriebenen Elektronen nicht mehr infolge der Absorption an die Oberfläche des Körpers gelangen können.

Die Messungen zeigen, daß um so mehr sekundäre Kathodenstrahlen aus dem Körper herauskommen, je schiefer der Inzidenzwinkel der primären Röntgenstrahlen ist. Diese Tatsache läßt sich analog deuten, wie bei den durch Kathodenstrahlen¹⁾ erzeugten Elektronen. Die Trennung eines Elektrons vom Atom ist nach der Wien-Starkschen Hypothese mit der Absorption eines Energiequantums verbunden. Die auffallenden Röntgenstrahlen behalten sicherlich zum großen Teil auch innerhalb des Körpers ihre ursprüngliche Richtung, sie werden daher bei normaler Inzidenz in tiefe Schichten eindringen, während sie bei streifender Inzidenz schon in den äußersten Schichten absorbiert werden. Die bei senkrechter Inzidenz der Röntgenstrahlen ausgetriebenen Elektronen entstehen dann auch in tiefen Schichten des bestrahlten Körpers, und ein Teil wird gar nicht mehr an die Oberfläche des Körpers kommen, sondern schon im Innern absorbiert werden.

Es zeigte sich, daß die kleinste zur Messung gelangende Geschwindigkeit der Sekundärstrahlen von der Härte der Röntgenstrahlen unabhängig ist; auch bei der Verwendung von durch Blei filtrierte Röntgenstrahlen trat keine Änderung ein. Daraus kann man schließen, daß die langsameren sekundären Kathodenstrahlen nicht nur durch die in einem X-Strahlenbündel immer enthaltenen weichen Strahlen, sondern auch durch die sekundären schnellen Kathodenstrahlen erzeugt werden.

Zusammenfassung.

Beim Auftreffen von Röntgenstrahlen auf einen Körper werden neben den sekundären Röntgenstrahlen auch Kathoden-

1) J. Laub, l. c.

strahlen erzeugt, deren Menge desto größer ist, je größer die Dichte des betreffenden Körpers ist. Die Intensität der sekundären Kathodenstrahlen hängt sowohl von der Intensität wie auch von der Härte der primären Röntgenstrahlen ab; es ist auch ferner eine Abhängigkeit von dem Inzidenzwinkel der primären X-Strahlen vorhanden, analog wie bei den Kathoden- und Kanalstrahlen. Die Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen wächst mit der Härte der erzeugenden Röntgenstrahlen, hingegen ist sie unabhängig von der Intensität. Die Messungen wurden bei Platin, Ruß und Aluminium ausgeführt. Die erhaltenen Resultate scheinen für die Lichtquantenkonstitution der Röntgenstrahlen zu sprechen.

Zum Schlusse sei es mir gestattet, auch an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer Hrn. Geheimrat Wien für die vielen Anregungen, wie auch für das große Interesse zu danken, welches er stets meinen Untersuchungen entgegenbringt.

Würzburg, Physik. Inst., im März 1908.

(Eingegangen 3. Juni 1908.)

Anmerkung bei der Korrektur: Aus einer mir soeben zugesandten Abhandlung „H. W. Bragg und J. P. V. Madsen, An experimental investigation of the nature of γ -rays“ (Trans. Roy. Soc. of S. A. May 1908) ersehe ich, daß die Herren Bragg und Madsen behaupten, die Wiensche Hypothese (Gött. Nachr. 1907) über die Entstehung der Kathodenstrahlen beim Auftreffen von X-Strahlen auf einen Körper setze voraus, daß die Energie des sekundären Elektrons aus dem Innern des Atoms stamme. Ich möchte darauf hinweisen, daß die von den Herren Bragg und Madsen geäußerte Ansicht offenbar auf einem Mißverständnis beruht. Denn nach der Lichtquantenhypothese verdanken die sekundären Kathodenstrahlen ihre Energie den in dem X-Strahlenbündel enthaltenen Energiequanten, und liegt doch gerade diese Anschauung der für die Geschwindigkeit der sekundären Elektronen abgeleiteten Gleichung:

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{\lambda m}}$$

zu grunde.