2. Über Röntgenstrahlen und das Röntgensche Absorptionsgesetz; von W. Seitz.

Erster Teil.

Bekanntlich hat schon Röntgen nachgewiesen, daß das Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen zunimmt, wenn sie durch immer dickere absorbierende Schichten filtriert werden, und er hat daraus geschlossen, sie müßten aus einem Gemisch mehr oder weniger absorbierbarer Strahlen bestehen. Diese Versuche wurden später mit dem gleichen Resultat mehrfach wiederholt, wobei stets die untersuchten Strahlen vorher die Glaswand der Röhre passieren mußten. Dadurch werden sie aber bereits sehr stark filtriert und die allerweichsten Strahlen werden vollkommen beseitigt, andernteils entstehen beim Durchgang durch das Glas stark absorbierbare sekundäre Strahlen. Eine solche Untersuchung, bei der aber die störende Glaswand vermieden wird, ist von Interesse, da man hierdurch einigen Einblick in den Mechanismus der Strahlenerzeugung an der Antikathode gewinnt.

Die auftreffenden Elektronen werden wohl nur zum kleinsten Teil sofort absorbiert werden, ohne vorher ihre Geschwindigkeit vermindert zu haben, und dabei werden die durchdringendsten Strahlen ausgesandt. Die weitaus größere Menge wird erst nach kürzeren oder längeren Kreuz- und Querbahnen im Metall zu Ruhe kommen, wobei durch jede momentane Richtungs- und Geschwindigkeitsänderung Impulse von größerer oder kleinerer Breite hervorgebracht werden. Gleichzeitig werden im Metall auch sekundäre relativ langsame Elektronen freigesetzt, die aber alsbald wieder absorbiert werden und dabei die Quelle sehr weicher Röntgenstrahlen bilden. Wenn demnach im ganzen viel mehr längere und daher absorbierbarere Impulse entstehen als kurze, durchdringende, so muß man doch bedenken, daß die Energie eines Impulses sehr stark mit der Größe der Geschwindigkeitsänderung des erzeugenden Elektrons zunimmt.

Da die Messung in der Entladungsröhre selbst nicht ausführbar ist, so wurde in die Glaswand ein möglichst dünnes Aluminiumfenster eingesetzt, durch das die Strahlen austreten konnten. Dadurch wird allerdings die Zusammensetzung des Strahlungsgemisches gegenüber der ursprünglichen erheblich verändert, aber doch in weitaus geringerem Maße als durch eine Glaswand.

Die Versuche wurden in folgender Weise ausgeführt: Als Intensitätsmaß der Röntgenstrahlen diente die positive Ladung, welche sie einem Platinblech, auf das sie treffen, im höchsten Vakuum erteilen. Mir erschien diese Meßmethode als die zuverlässigste, nachdem durch die Versuche von Frl. Carter¹⁾ nachgewiesen ist, daß sie zu den gleichen Resultaten führt als die weitaus schwierigere Energiebestimmung mit dem Bolometer.

Die Entladungsröhre, welche durch eine Gädepumpe evakuiert wurde, hatte eine Platinantikathode mit Wasserkühlung (vgl. Fig. 1). Bei *A* war auf eine Messingfassung das Aluminiumfenster *f*, das eine Größe von etwa $1\frac{1}{2}$ qcm und eine Dicke von etwa 0,05 mm hatte, aufgeklittet. Dünne Messingrippen verhindern das Eindringen des Fensters durch den äußeren Luftdruck. *B* ist ein Schirm aus 2 mm dickem Bleiblech, welcher die Strahlen, die durch das Glas hindurchgehen, aufhält. In einem Abstand von 1 cm von dem Röhrenfenster *f* befindet sich das etwas größere, sonst aber genau ebenso beschaffene Fenster des Auffangapparates. Dieser besteht aus einer Messingdose *D*, welche mit einer Quecksilberhandpumpe möglichst hoch evakuiert wurde. Das dachförmige Platinblech *S*, auf welches die eingedrungenen Strahlen fielen, war durch Bernstein aufs beste isoliert und mit einem Dolezalekschen Elektrometer, das ebenfalls Bernsteinisolation hatte und das durch einen Harmsschen Kondensator geeicht werden konnte, verbunden. Die Zuleitungen zum Elektrometer waren durch geerdete Bleihüllen geschützt.

Zwischen die beiden Fenster wurden Blätter von Metallfolie oder dünne Bleche gebracht und der Elektrometerrausschlag beobachtet, den die Strahlen in einer bestimmten Anzahl von Sekunden hervorbrachten. Auf diese Weise wurden die Ver-

1) E. Carter, Ann. d. Phys. 21. p. 955. 1906.

hältnisse J_0/J_1 , J_1/J_2 , J_2/J_3 usw. gemessen, wobei J_0 die Strahlenmenge ohne Zwischenschaltung eines Blattes, J_1 diejenige, die auftritt, wenn ein Blatt, J_2 diejenige, wenn zwei Blätter usw. dazwischen gebracht werden, bedeutet. Um die

Fig. 1.

Resultate möglichst sicher zu stellen, wurden z. B. J_0 und J_1 abwechselnd mehrmals gemessen und dann ebenso oft J_1 und J_2 usw.

Der Entladungsröhre diente ein Induktorium mit Quecksilber oder Hammerunterbrecher als Stromquelle, die Spannung wurde durch die Funkenschlagweite zwischen Kugeln von 0,6 cm Radius bestimmt.

Es wurden Messungen der Absorption bei Stanniolblättern von 0,0177 mm Dicke und bei Aluminiumblättern von 0,0192 mm bei einer Entladungsspannung von 23000 Volt ausgeführt. Die Ergebnisse sind durch die Kurven Figg. 2 u. 3 dargestellt. Die Abszisse bildet die Anzahl n der vorgeschalteten Blätter, die

Ordinate der durch ein Blatt absorbierte Bruchteil $\left(\frac{J_n - J_{n+1}}{J_n}\right) \cdot 100$ in Prozenten von J_n . (Bei dieser Darstellung müssen sich natürlich kleine Unsicherheiten in der Bestimmung von J_n/J_{n+1} in sehr verstärktem Maße geltend machen.)

Fig. 2.

Fig. 3.

Wie man aus dem Verlauf der Kurven ersehen kann, nimmt anfangs das Durchdringungsvermögen sehr rasch zu, um sich später einem bestimmten Grenzwert zu nähern. *Es muß also der weitaus größte Teil der ursprünglichen Strahlen sehr absorbierbar sein und von relativ langsamen Elektronen erzeugt sein.* Diese Strahlen würden die Glaswand nicht mehr passieren können. *Der dagegen kleine Rest von konstantem Durchdringungsvermögen, der nach genügender Filtration durch etwa 9 Stanniolblätter oder 20 Aluminiumblätter übrig bleibt, besteht wohl aus denjenigen Strahlen, welche entstehen, wenn Elektronen gehemmt werden, ehe sie ihre Geschwindigkeit im Metall verringert haben.*

In der folgenden Tabelle ist die Strahlenmenge $J_n/J_0 \cdot 100$, welche eine Schicht von n Stanniolblättern bei einer Entladungsspannung von 23000 Volt durchdrungen hat, in Prozenten der unfiltrierten angegeben.

n	$\frac{J_n}{J_0} \cdot 100$	n	$\frac{J_n}{J_0} \cdot 100$	n	$\frac{J_n}{J_0} \cdot 100$
0	100	5	4,3	9	1,4
1	33,3	6	3,0	10	1,1
2	17,0	7	2,3	11	0,87
3	10,0	8	1,8	12	0,70
4	6,3				

Zweiter Teil.

Vor drei Jahren hat B. Walter¹⁾ Röntgenstrahlen, welche das eine Mal direkt von der Röhre kamen, das andere Mal durch ein Metallblech hindurchgehen mußten, mit der Walter-Bénoistschen Härteskala untersucht. Während ein Aluminiumblech stets die Skalenummer erhöhte, wurde sie durch Silber erniedrigt. Wenn also die Strahlen durch ein 0,11 mm dickes Silberblech filtriert wurden, so entsprach dem zentralen Silberblättchen der Skala eine dünnere Aluminiumschicht als bei Untersuchung direkter Strahlen. Daraus schloß er, daß die Strahlen durch Aluminium härter, durch Silber dagegen weicher gemacht werden, was in direktem Widerspruch mit

1) B. Walter, Ann. d. Phys. 17. p. 561. 1905.

der Röntgenschen Erklärung seines Absorptionsgesetzes stehe. Er macht dann die Annahme, „daß die Strahlung einer Röntgenröhre, die man dann sogar als homogen ansehen kann, bei der Absorption eben durch den Einfluß des absorbierenden Atomes selbst allgemein derartig verändert wird, daß sie für jeden beliebigen Körper ein größeres Durchdringungsvermögen erhält, bei den Atomen der Silbergruppe aber noch in besonderem Maße ein solches für Atome derselben Art“.

Ich habe diese Versuche, die ich im übrigen auch auf die gleiche Weise wie Walter wiederholte und vollständig bestätigen konnte, noch auf andere Art ausgeführt, indem ich direkt nach der oben beschriebenen elektrischen Methode das Durchdringungsvermögen bestimmte. Diese gibt die Intensität aller Strahlen, während auf die photographische Platte doch wohl vor allem die weicheren wirken. Es war daher nicht unbedingt das gleiche Resultat zu erwarten.

Hierbei wurde meistens eine gewöhnliche große Röntgenröhre verwandt, die sich in einem dickwandigen Bleikasten befand. Ein Loch in der Wand desselben ließ ein Strahlenbündel von etwa 1 cm Durchmesser auf die absorbierenden Schichten und dahinter auf das Fenster des Auffangapparates fallen. Als Stromquelle diente auch hier ein großes Induktorium mit Quecksilberturbinenunterbrecher, die Kathodenspannung wurde durch die Funkenschlagweite zwischen Kugeln vom Radius 1,5 cm bestimmt.

J_{Al} bedeute die Strahlenmenge, welche im Auffänger gemessen wird, wenn eine Aluminiumschicht von bekannter Dicke auf das Fenster desselben gelegt ist, J_0 diejenige, welche bei der gleichen Entladungsspannung beobachtet wird, wenn die Aluminiumschicht fehlt.

Vor allem wurde untersucht, ob sich J_{Al}/J_0 ändert, wenn die direkt von der Röhre kommenden Strahlen durch ein Silberblatt filtriert werden. Stets fand sich eine geringe Vermehrung dieser Größe. *Die Strahlen werden also beim Durchgang durch Silber etwas härter*, und zwar besonders bei niederen Entladungsspannungen, weniger bei hohen. Wurden die Strahlen direkt beim Verlassen der Röhre noch durch Aluminium filtriert, so daß der absorbierbarste Teil weggenommen wurde, so verringerte sich der Einfluß des Silbers. Bei diesen Messungen

mußte also der Strahl einmal durch Aluminium (I), Silber, Aluminium (II) oder durch Aluminium (I), Silber, das andere Mal durch Aluminium (I), Aluminium (II), oder durch Aluminium (I) allein hindurchgehen.

Als Beispiel seien folgende Zahlen angegeben:

1. Kein Aluminium (I) vorgeschaltet.

Spannung in Volt	$\frac{J_{Al}}{J_0}$ (Al (II) = 0,0780 mm dick)	
	Ohne Silber	Silber von 0,0276 mm Dicke vorgeschaltet
35 000	0,415	0,488
45 000	0,439	0,524
58 000	0,536	0,579

2. Aluminium (I) von 0,780 mm Dicke vorgeschaltet. Al (II) = 0,836 mm.

41 000	0,609	0,623
50 000	0,670	0,671
55 000	0,686	0,691

3. Aluminium (I) von 0,780 mm Dicke vorgeschaltet.

Spannung in Volt	$\frac{J_{Al}}{J}$ (Al (II) = 0,836 mm Dicke)	
	Ohne vorgeschaltetes Silber	Silber von 0,0552 mm Dicke vorgeschaltet
32 000	0,522	0,573
40 000	0,552	0,589
57 000	0,701	0,707
58 000—63 000	0,738	0,742

Während das Durchdringungsvermögen der Strahlen für Aluminium mit wachsender Dicke der Aluminiumschichten zunimmt, wie schon durch die im ersten Teil angegebenen Messungen bewiesen ist, wird auch die Absorption in Silber verkleinert, wenn ein Silberblech vorgeschaltet wird.

Im gleichen Sinne wirkt Aluminium als Strahlenfilter bei Silber.

Als Beispiel seien folgende Zahlen angegeben: J_{Ag} bedeutet die Strahlenmenge, die durch eine Silberschicht von 0,0276 mm hindurchgegangen ist. Die vorgeschalteten Silber und Aluminiumschichten absorbierten ungefähr einen gleichen Bruchteil der Gesamtstrahlung.

Spannung in Volt	$\frac{J_{Ag}}{J_0}$		
	Ohne vorgeschaltetes Metall	Mit vorgeschaltetem Silber von 0,0276 mm Dicke	Mit vorgeschaltetem Aluminium von 0,780 mm Dicke
46 000	0,440	0,560	0,524

Doch wird durch Filtration mit Aluminium das Durchdringungsvermögen für Silber weniger gesteigert als für Aluminium, was durch die Beobachtungen von Bnoist, Walter u. a. schon lngst bekannt ist. Hierauf beruhen eben die bekannten Hrteskalen. Zu diesem Resultat kam ich auch durch meine elektrische Memethode, wie folgende Zahlen zeigen.

Es wurden Silberschichten von 0,0276 mm Dicke und Aluminiumschichten von 0,836 mm Dicke miteinander verglichen, und abwechselnd die Strahlen noch durch 1,70 mm Aluminium von dem Auftreffen auf die Schichten filtriert.

Spannung in Volt	$\frac{J_{Ag}}{J_{Al}}$	
	Nichts vorgeschaltet	1,70 mm Aluminium vorgeschaltet
35 000	1,152	1,004
50 000	0,909	0,828
53 000	0,864	0,777

Im Gegensatz hierzu wird das Durchdringungsvermgen fr Silber mehr als fr Aluminiumverstrkt, wenn Silber als Filter dient. Dies zeigen die Resultate folgender Messungen, bei welchen die gleichen Silber- und Aluminiumschichten wie

oben verglichen wurden, während abwechselnd 0,0954 mm Silber vorgeschaltet wurden.

Spannung in Volt	$\frac{J_{Ag}}{J_{Al}}$	
	Nichts vorgeschaltet	0,0276 mm Silber vorgeschaltet
37000	1,015	1,082
42000	1,03	1,105
50000	0,872	0,975
53000	0,852	0,939

Obwohl also die Strahlen durch Silber nicht weicher, sondern sogar etwas härter gemacht werden, wird doch J_{Ag}/J_{Al} vergrößert, d. h. es wird die Skalenummer der Benoistschen Härteskala erniedrigt. *Dieselbe täuscht uns also in diesem Fall ein Weicherwerden der Strahlen usw. vor.*

Alle diese Beziehungen können wir folgendermaßen erklären:

Die von der Röhre ausgehenden Strahlen bestehen aus einem Gemisch längerer und kürzerer Impulse. Für Aluminium wächst das Durchdringungsvermögen kontinuierlich mit Abnahme der Impulslänge, Silber dagegen hat ein Minimum des Absorptionsvermögens bei Impulsen mittlerer Breite. Es absorbiert ebenso wie das Aluminium vor allem die längsten Impulse und erhöht dadurch im ganzen die Härte des Strahlengemisches sowohl für Silber wie für Aluminium; da es aber auch die kürzesten Impulse, die für Aluminium ganz besonders durchdringend sind, größtenteils wegnimmt, so wird die Absorption im Aluminium weniger als im Silber verringert. Es entsprechen diese Verhältnisse vollständig der selektiven Lichtabsorption. Die Annahme irgendwelcher Verwandlung der Strahlen im Metall, wie Walter vorgeschlagen hat, dürfte kaum nötig sein. Auch besteht zwischen obiger Erklärung und der Auffassungsweise von Röntgen kein Widerspruch.

Ich habe das Absorptionsvermögen von Silber bei verschiedenen Spannungen gemessen, um vielleicht jenes Minimum nachzuweisen. Die weichsten Strahlen wurden durch Filtration

mit 0,780 mm Aluminium schon vorher teilweise entfernt. Bei Untersuchung von 0,0552 mm dickem Silber ergaben sich für J_{Ag}/J_0 folgende Werte.

Spannung	$\frac{J_{Ag}}{J_0}$
34 000	0,300
44 000	0,316
49 000	0,324
55 000	0,347
56 000	0,353

Das Durchdringungsvermögen nimmt also kontinuierlich, doch sehr langsam mit der Spannung zu, und jenes gesuchte Minimum des Absorptionsvermögens wird durch die weichsten Strahlen, die kaum genügend beseitigt werden können, verdeckt.

Aachen, Juli 1908.

(Eingegangen 25. Juli 1908.)