8. *Über die Reflexion der Kathodenstrahlen an dünnen Metallblättchen.*

*Nach Versuchen von S. Williams mitgeteilt
von E. Warburg.*

(Der Berl. Akad. vorgelegt am 27. April 1905.)

§ 1. Von der Stelle, an welcher die Oberfläche eines Körpers von Kathodenstrahlen getroffen wird, gehen nach allen Richtungen hin Kathodenstrahlen aus. Dieses Phänomen, welches als Reflexion der Kathodenstrahlen bezeichnet wird, kann man sich wohl am einfachsten so vorstellen, daß die Elektronen, nachdem sie teils mehr teils weniger tief in den Körper eingedrungen sind, von den Körpermolekülen zurückgeworfen werden.¹⁾ Hr. J. J. Thomson²⁾ nimmt hingegen an, daß der größte Teil der reflektierten Strahlen aus Elektronen gebildet wird, welche durch den Stoß der auffallenden Elektronen aus den Körpermolekülen frei gemacht werden.

Wie dem auch sein mag, so ist es jedenfalls von Interesse, zu untersuchen, wie dick die an der Oberfläche liegende Schicht ist, in welcher der Vorgang der Reflexion sich abspielt. Darüber haben Versuche des Hrn. Williams über die Reflexion der Kathodenstrahlen an dünnen Metallblättchen einigen Aufschluß gegeben, Versuche, über welche hier zu berichten ich mir erlaube.

§ 2. Fig. 1 zeigt den benutzten Apparat. K_I , K_{II} sind zwei gleiche zur Erde abgeleitete Aluminiumkathoden, r_I , r_{II} zwei Reflektoren, die als Anoden dienen, r_I eine dicke Platte, r_{II} ein dünnes Blättchen aus demselben Metall. Die einfallenden Kathodenstrahlen sind, was wichtig ist, senkrecht zur Reflektoroberfläche gerichtet. Die von r_I und r_{II} reflektierten Strahlen passieren je zwei Diaphragmen s_I , s'_I und s_{II} , s'_{II} , 1 mm lang, 6 mm breit, so daß auf dem Fluoreszenzschirm S

1) E. Warburg, Verh. der Deutsch. Physik. Ges. 1904. p. 9.

2) J. J. Thomson, Conduction of electricity through gases p. 509. Cambridge 1903.

zwei helle Flecke f_I , f_{II} entstehen, deren einer von r_I , deren anderer von r_{II} herrührt. Sofern der Apparat um die Achse AA' symmetrisch ist, kann man aus der relativen Helligkeit von f_I und f_{II} die relativen Reflexionskoeffizienten von r_I und r_{II} ermitteln. Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Stromstärken, mithin auch die Kathodenstrahlen, in I und II die gleiche

Fig. 1.

Intensität besitzen. Reflektiert nun r_{II} stärker als r_I , so gelangen in II mehr reflektierte Kathodenstrahlen als in I, wodurch vermöge der ionisierenden Wirkung der Strahlen der Strom in II stärker als in I wird. Dies ist z. B. der Fall, wenn r_{II} eine Kupferplatte, r_I eine Aluminiumplatte ist, und wird durch das Galvanometer G erkannt, durch welches man mittels des Schlüssels X sukzessive den von K_I und K_{II} kommen-

den Strom hindurchschickt. Dabei geht der Strom immer gleichzeitig durch I und II über gleiche Widerstände zur Erde.

Die genannte Fehlerquelle wurde praktisch dadurch beseitigt, daß man bei b_1 und b_2 Schirme mit schmalen Spalten einsetzte, so daß die durch s_1 , s_1' und s_{II} , s_{II}' gelangenden Strahlen von den Projektionen der 1 mm langen, 15 mm breiten Spalte in b_1 und b_{II} auf die bezüglichen Reflektoren r_1 und r_{II} herkamen. Dies beeinträchtigte die Helligkeit der Flecke f_1 und f_{II} nicht wesentlich, während der größte Teil der reflektierten Kathodenstrahlen von den Röhren I und II abgehalten war. Man eliminierte jede weitere Unsymmetrie, indem man die Beobachtung nach Umlegung der Reflektoren r_1 und r_{II} um 180° mittels des Schliffes Q wiederholte.

Der gewünschte Grad der Luftverdünnung wurde, nach Vorpumpen mit einer Sprengelpumpe, nach Dewar¹⁾ durch einen Behälter mit Kokosnußkohle in einem Bade von flüssiger Luft leicht und bequem hergestellt.

Zur Erzeugung der auffallenden homogenen Kathodenstrahlen diente eine 20 plattige Töplersche Influenzmaschine.

§ 3. War nun r_1 eine dicke Aluminiumplatte, r_{II} ein $0,53 \mu$ dickes Aluminiumblättchen, so bemerkte bei 20000-Voltstrahlen²⁾ schon das bloße Auge, daß f_1 heller war als f_{II} , daß also das dünne Blättchen weniger als die dicke Platte reflektierte. Da aber homogene Kathodenstrahlen bei der Reflexion unhomogen werden³⁾, so nahm man die photometrischen Messungen an den magnetischen Spektren der reflektierten Strahlen vor. Die Spektren wurden hervorgebracht durch die Wirkung der Magnetisierungsspulen C_1 und C_{II} und waren ungefähr dreimal so lang, wie die 5 mm langen unabgelenkten Flecke f . Die Methode der Messungen war folgende. Die Spektren I und II (Fig. 2) wurden je in drei 5 mm lange Bezirke 1, 2, 3 geteilt und 1. I_1 mit I_2 und I_3 , 2. I_1 mit II_1 , I_2 mit II_2 , I_3 mit II_3 durch

I.	II.
3	3
2	2
1	1

Fig. 2.

1) J. Dewar, Compt. rend. 139. p. 261. 1904.

2) Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode gleich 20000 Volt.

3) E. Gehrcke, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin. 1901. p. 461.

ein Martenssches Photometer¹⁾ verglichen. Als Vergleichslichtquelle diente im allgemeinen eine Glühlampe; nur bei niedrigeren Potentialen, bei welchen die Kathoden I und II zugleich miteinander betrieben werden konnten, geschahen die Vergleichen unter 2. direkt.

§ 4. Es handelt sich darum, aus diesen Messungen die Stromdichte in den verschiedenen Bezirken der Spektren zu bestimmen, indem die Stromdichte in $I_1 = 1$ gesetzt wird. Bezeichnet man nun durch H, H' die Helligkeiten zweier durch Kathodenstrahlen auf demselben Schirm erzeugten Fluoreszenzflecke, durch i und i' die Stromdichte der beiden Bündel, durch V und V' deren Potentiale, so ist nach Leithäuser für die hier vorkommenden Potentiale

$$\frac{H'}{H} = \frac{i'}{i} \cdot \frac{F(V')}{F(V)},$$

wo die Werte der Funktion F aus den Leithäuserschen Messungen²⁾ zu entnehmen sind. Also

$$(1) \quad \frac{i'}{i} = \frac{H'}{H} \cdot \frac{F(V)}{F(V')}.$$

Die Potentiale der mit gleichen arabischen Ziffern bezeichneten Bezirke in beiden Spektren sind gleich, die mittleren Potentiale verschieden stark abgelenkter Bezirke verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate der Ablenkungen. Die Ablenkung z eines Bezirkes wurde der Ablenkung seines Mittelpunktes, das Potential der Bezirke I_1 und II_1 — nicht ganz genau — der Potentialdifferenz der Elektroden gleich gesetzt.

Man mache

$$(2) \quad \frac{i_{II,m}}{i_{I,m}} = n_m, \quad \frac{i_{I,m}}{i_{I,1}} = k_m,$$

und bezeichne durch J_I und J_{II} die Integralwerte der die beiden Spektren erzeugenden Ströme, welche sich — sofern die mehr als 3 abgelenkten Strahlen zu vernachlässigen sind — wie die Reflexionskoeffizienten r_I und r_{II} verhalten.

1) F. F. Martens, Physik. Zeitschr. 1. p. 299. 1900.

2) G. E. Leithäuser, Ann. d. Phys. 15. p. 296. 1904.

Dann ist, indem der Flächeninhalt der einzelnen Bezirke gleich 1 und die Stromdichte im Bezirk I_1 gleich 1 gesetzt wird,

$$(3) \quad \frac{J_{II}}{J_I} = \frac{r_{II}}{r_I} = \frac{n_1 + n_2 \cdot k_{21} + n_3 \cdot k_{31}}{1 + k_{21} + k_{31}}.$$

Die i werden nach (1), die n und k nach (2) berechnet.

§ 5. Zur Prüfung der Methode wurde die Reflexion von 16500-Voltstrahlen an dicken Platten aus Kupfer (I) und Aluminium (II) verglichen. Die Ergebnisse waren folgende:

Bezirk	1	2	3	
z cm	1,7	2,2	2,7	
V	16500	9850	6550	
$F(V)$	182,6	110,1	56,4	} daraus
H_1	0,601	0,178	0,044	
n	0,518	0,616	0,787	
	$k_{21} = \frac{0,178}{0,601} \cdot \frac{182,6}{110,1} = 0,518$			
	$k_{31} = \frac{0,044}{0,601} \cdot \frac{182,6}{56,4} = 0,237$			
$\frac{J_{II}}{J_I} =$	$\frac{0,518 + 0,616 \cdot 0,518 + 0,787 \cdot 0,237}{1 + 0,518 + 0,237} = \frac{1,006}{1,728} = 0,58$			
	$= \frac{r \text{ Aluminium}}{r \text{ Kupfer}} \quad (\S 4).$			

Nach Hrn. Starke¹⁾ ist dieses Verhältnis vom Potential der einfallenden Strahlen unabhängig und gleich $\frac{2}{3} = 0,56$, eine befriedigende Übereinstimmung, wenn man bedenkt, daß die Fehler der obigen Messungen auf 6 Proz. zu veranschlagen sind.

Man bemerkt, daß die n -Werte steigen, wenn man zu größeren Ablenkungen fortschreitet; d. h. daß die starke Reflexion des Kupfers besonders die schnelleren, weniger ablenkbaren Strahlen betrifft. Kurve 1 enthält die graphische Darstellung, z_0 ist das z des ersten Bezirkes.

§ 6. Hierunter folgen die Ergebnisse der Versuche mit dünnen Aluminiumblättchen. Der nach Hrn. Starke vom Potential der auffallenden Strahlen unabhängige Reflexionskoeffizient für eine dicke Aluminiumplatte wurde gleich 1 gesetzt. r bedeutet also den Reflexionskoeffizienten des Aluminiumblättchens relativ zu dem einer dicken Aluminiumplatte. V_1 ist das Potential der auffallenden Strahlen. Die graphische

1) H. Starke, Ann. d. Phys. 3. p. 95. 1900; L. Austin u. H. Starke, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesellsch. 1902. p. 124.

Darstellung ist in den Kurven 2—9 gegeben. Dabei ist die Stromdichte im Bezirk 1 des Reflexionsspektrums einer dicken Aluminiumplatte gleich 10 gesetzt.

Kurve 1. Entladungspotential 16500 Volt.

Kurve 2. Entladungspotential 11000 Volt. Blättchendicke = 0,53 μ .

Kurve 3. Entladungspotential 16500 Volt. Blättchendicke = 0,53 μ .

Kurve 4. Entladungspotential 21800 Volt. Blättchendicke = 0,53 μ .

Kurve 5. Entladungspotential 27800 Volt. Blättchendicke = $0,53 \mu$.

Kurve 6. Entladungspotential 16500 Volt. Blättchendicke = $1,90 \mu$.

Kurve 7. Entladungspotential 21800 Volt. Blättchendicke = $1,90 \mu$.

Kurve 8. Entladungspotential 21800 Volt. Blättchendicke = $2,55 \mu$.

Kurve 9. Entladungspotential 27800 Volt. Blättchendicke = $2,55 \mu$.

Blättchendicke 0,53 μ .

$V_1 = 11000$, $r = 0,99$. Kurve 2.

Bezeichnung	z cm	V	n_m	k_{m1}
1	2,3	11000	1,021	
2	2,8	7400	0,958	0,508
3	3,3	5350	0,949	0,318

Blättchendicke 1,9 μ .

$V_1 = 16500$, $r = 0,60$. Kurve 3.

			$V_1 = 16500$, $r = 1$. Kurve 6.		
			z	V	n_m k_{m1}
1	2	16500	0,656		
2	2,5	10600	0,517	0,489	
3	3	7350	0,451	0,133	

Blättchendicke 2,44 μ .

$V_1 = 21800$, $r = 0,43$. Kurve 4.

			$V_1 = 21800$, $r = 0,77$. Kurve 7.		
			z	V	n_m k_{m1}
1	1,8	21800	0,518		
2	2,3	13400	0,274	0,331	
3	2,8	9000	0,216	0,142	

$V_1 = 21800$, $r = 1$.

$V_1 = 27800$, $r = 0,30$. Kurve 5.

			$V_1 = 27800$, $r = 0,65$. Kurve 8.		
			z	V	n_m k_{m1}
1	1,5	27800	0,329		
2	2,0	15600	—	0,096	
3	—	—	—	—	

$V_1 = 27800$, $r = 0,91$. Kurve 9.

			$V_1 = 27800$, $r = 0,91$. Kurve 9.		
			z	V	n_m k_{m1}
1	1,5	27800	0,671		
2	2,0	15600	0,510	0,125	
3	—	—	—	—	

§ 7. Es wurde noch die Reflexion eines Kupferblättchens (unechtes Blattgold) von der Dicke $0,66 \mu$ mit der Reflexion einer dicken Kupferplatte verglichen. Selbst bei dem Potential 27800 Volt der auffallenden Strahlen konnte kein Unterschied der Helligkeit in den beiden Spektren bemerkt werden.

§ 8. Aus diesen Messungen kann man folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Reflexion der Kathodenstrahlen erfolgt an einem dünnen Metallblättchen ebenso wie an einer dicken Platte aus demselben Metall, solange die Geschwindigkeit bez. das Potential der auffallenden Strahlen kleiner ist als ein gewisser Wert, welcher der kritische Potentialwert heißen mag. Überschreitet das Potential der auffallenden Strahlen den kritischen Wert, so nimmt die Reflexion ab, und zwar tritt diese Abnahme im Spektrum der reflektierten Strahlen zuerst bei den mehr abgelenkten Strahlen auf und schreitet bei wachsendem Potential der auffallenden Strahlen zu den weniger abgelenkten im reflektierten Bündel fort. Der kritische Potentialwert hängt ab von der Dicke und von der Natur des Blättchens und beträgt bei Aluminium für Blättchendicken von $0,53 \mu$, $1,9 \mu$, $2,44 \mu$ bez. 11000, 16500, 21800 Volt. Für ein Kupferblättchen von der Dicke $0,66 \mu$ ist der kritische Potentialwert größer als 27800 Volt.

2. Sofern eine möglicherweise vorhandene Verschiedenheit in der Beschaffenheit des Metalles an der Oberfläche und im Innern auf diese Phänomene ohne Einfluß ist, geht aus dem Gesagten hervor, daß die Dicke der an der Oberfläche liegenden Schicht, in welcher die Reflexion sich abspielt, bei Aluminium für 11000-Voltstrahlen $0,53 \mu$, für 16500-Voltstrahlen $1,9 \mu$, für 21800-Voltstrahlen $2,44 \mu$ beträgt. Viel dünner ist diese Schicht bei dem dichteren Kupfer, bei welchem sie für 27800-Voltstrahlen dünner als $0,66 \mu$ ist.

Diese Ergebnisse entsprechen im allgemeinen den Vorstellungen, welche ich mir von der Bewegung der Elektronen in wägbaren Körpern l. c. gebildet habe. Im einzelnen aber und besonders in quantitativer Beziehung zeigt sich schlechte Übereinstimmung mit den l. c. gegebenen, auf das Verhalten der durchgehenden Strahlen gegründeten Berechnungen, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll.

(Eingegangen 28. Juli 1905.)