

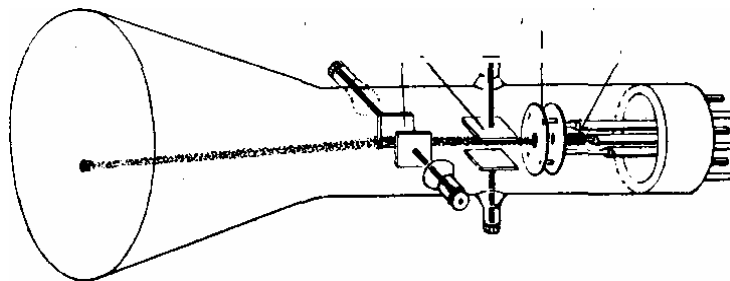
Das Bestimmen der spezifischen Ladung des Elektrons mit Hilfe der “Bush“-Regel

Ziel des Experiments

In dieser Arbeit will man die spezifische Ladung des Elektrons bestimmen, indem man die Wirkung zweier Felder, ein elektrisches und ein magnetisches, auf den von einer Kathode ausgesendeten Elektronenfazikel benützt.

Die Theorie des Experiments

Als wichtige Anwendung der Glühelktronenemission im Hochvakuum erwähnen wir ferner den Kathodenstrahloszillographen. Sein wesentlicher Bestandteil, die Braunsche Röhre¹⁾, ist in einer der zahlreichen Ausführungsformen. Die von der Glühkathode ausgehenden Elektronen durchlaufen zunächst den negativ geladenen *Wehneltzylinder*²⁾, in dem sie zu einem feinen Strahl gebündelt werden. Durch die Öffnung der Anode gelangen sie dann auf einen gegenüberliegenden Fluoreszenzschirm und erzeugen dort einen Leuchtfleck.



Schematische Darstellung einer Röhre.

Die Intensität des Strahles und damit die Helligkeit des Leuchtflecks kann durch die negative Vorspannung des *Wehneltzylinders* geregelt werden. Auf dem Wege von der Anode zum Schirm durchlaufen die Elektronen zwei um 90° gegeneinander gedrehte Plattenkondensatoren. Legt man nun an einen der beiden Kondensatoren, eine

¹⁾ Die *Braunsche Röhre* geht auf den deutschen Physiker *K. F. Braun* (1850—1918) zurück.

²⁾ Der *Wehneltzylinder* wurde von dem deutschen Physiker *A. Wehnell* (1871—1944) eingeführt

elektrische Spannung, so wird der Elektronenstrahl entsprechend abgelenkt und das Bild auf dem Schirm verschoben. Statt durch elektrische Felder kann man die Ablenkung auch durch magnetische Felder herbeiführen. Legt man an den ersten Kondensator eine Wechselspannung, so wird der Leuchtfleck auf dem Schirm zu einem vertikalen Strich auseinandergezogen, der im rotierenden Spiegel das Kurvenbild der Wechselspannung zeigt. Eine Wechselspannung am zweiten Kondensator bewirkt, dass der Lichtfleck in horizontaler Richtung auseinandergezogen wird. Man verfährt nun so, dass man an den zweiten Kondensator eine Spannung legt, die proportional zur Zeit ansteigt, plötzlich auf Null absinkt, wieder in gleicher Weise ansteigt usw., die also den dargestellten zeitlichen Verlauf besitzt, und die man mit Hilfe von Kippschwingungen erzeugen kann. Die Wirkung dieser Spannung ist, dass der Lichtfleck sich gleichmäßig in horizontaler Richtung über den Leuchtschirm bewegt, dann plötzlich in die Ausgangslage zurückspringt und erneut die gleiche horizontale Bewegung ausführt.



Zeitlicher Verlauf der Spannung bei einer elektrischen Kippschwingung.

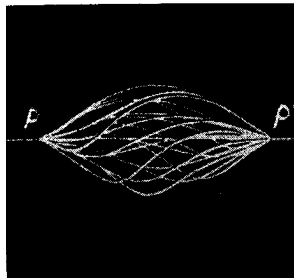
Wird gleichzeitig eine zu untersuchende variable Spannung an den ersten Kondensator gelegt so wird die dadurch bewirkte Vertikalbewegung des Leuchtflecks durch die Kipp-Schwingung in horizontaler Richtung auseinandergezogen, und man erhält auf den Schirm ein ähnliches Bild wie im rotierenden Spiegel. Da die Masse der Elektronen sehr klein ist, folgen sie dem Wechsel der ablenkenden elektrischen und magnetischen Felder ohne merkliche Trägheit, so dass es auf diese Weise möglich ist, elektrische Vorgänge mit hohen Frequenzen zu untersuchen. Man kann noch Strom oder Spannungsschwankungen, die sich in 10^{-9} Sekunden abspielen, erkennen. Eine der wichtigsten und bekanntesten Anwendungen der Elektronenablenkung in magnetischen und elektrischen Feldern stellt das Elektronenmikroskop dar. Wir behandeln hier nur das am meisten benutzte Durchstrahlungselektronen-Mikroskop, das mit dem Lichtmikroskop verglichen werden kann. Die von einer Glühkathode ausgehenden Elektronenstrahlen durchsetzen das zu betrachtende Objekt und werden dabei je nach der Erschaffenheit der Objeksubstanz an den verschiedenen Stellen in wechselndem

Maße geschwächt, so wie dies bei gewöhnlichen Mikroskopen mit den Lichtstrahlen ebenfalls geschieht. Die das Objekt durchdringenden Elektronenstrahlen fließen durch magnetische oder elektrische Felder zu einem Bilde des durchstrahlten Gegenstandes vereinigt, das auf einer photographischen Platte oder einem Leuchtschirm sichtbar gemacht werden kann.

Die Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe von Elektronenstrahlen beruht auf einem von *H. Busch* (geb. 1884) im Jahre 1926 entdeckten Gesetz.

Die von einem Punkte P mit gleicher Geschwindigkeit und geringer Neigung gegen die Kraftlinien eines rotations-symmetrischen magnetischen Feldes ausgehenden Elektronen werden durch das Feld in einem Punkt vereinigt, der das elektronenoptische Bild des Punktes P darstellt.

Der einfachste Fall liegt vor, wenn man ein homogenes Magnetfeld verwendet, des durch eine längere Spule erzeugt werden kann. Die Bahnen der einzelnen Elektronen sind Schraubenlinien. Das Spulenfeld übt auf die Elektronenstrahlen eine fokussierende Wirkung aus, die mit derjenigen einer Konvexlinse auf Lichtstrahlen vergleichbar ist. Man spricht deshalb auch von Elektronenlinsen. Denkt man sich nun durch P und P' senkrecht zu den Kraftlinien zwei Ebenen E und E' gelegt, so entspricht jedem Punkt von E ein Punkt von E' .

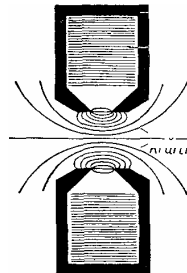


Ein von P ausgehendes divergentes Elektronenstrahlbündel wird durch das homogene magnetische Feld einer Spule in P' vereinigt.

Für elektronenmikroskopische Zwecke sind aber homogene Magnetfelder nicht geeignet, weil sie nur Abbildungen von der gleichen Größe wie der Gegenstand, aber keine vergrößerten Bilder liefern. Die Analogen zu den lichteoptischen Konvexlinsen sind rotationssymmetrische, inhomogene Magnetfelder, wie sie z. B. durch kurze stromdurchflossene Spulen erzeugt werden können. In der Abb. wird durch das homogene magnetische Feld einen Schnitt durch eine solche Spule schematisch

dargestellt. Die Mikroskopachse konzentrisch umgebende Erregungsspule des magnetischen Feldes ist mit einer Eisenpanzerung umgeben, die den Zweck hat, das magnetische Feld in der Nähe der Achse auf kleinem Raum zu konzentrieren. Man erhält auf diese Weise magnetische Linsen hoher Brechkraft.

Busch zeigte, dass man bei diesen magnetischen Linsen ebenso wie bei optischen Linsen eine Brennweite definieren kann und dass es mit ihnen möglich ist, unter



Schematische Darstellung einer magnetischen Elektronenlinse.

Benutzung von Elektronenstrahlen vergrößerte reelle Bilder zu erzeugen. Die Brennweite dieser magnetischen Linsen hängt von der Feldstärke des magnetischen Feldes ab, und zwar ist zur Erzielung kurzer Brennweiten ein starkes Magnetfeld erforderlich. Außerdem ist die Brennweite einer solchen Linse proportional zu der kinetischen Energie der Elektronen.

Die magnetischen Linsen haben gegenüber dem optischen, dem großen Vorteil einer stetig veränderbaren Brennweite. Durch Veränderung des Magnetisierungsstroms lässt sich die Brennweite einer solchen Linse im Betrieb kontinuierlich regeln, eine Tatsache, von der man sowohl bei der Scharfeinstellung des Bildes als auch bei einem Wechsel der Vergrößerung Gebrauch macht. Auf der anderen Seite kann eine Konstanz der Brennweite, wie sie für die Erzielung scharfer Bilder bei einer einmal eingestellten Abbildung erforderlich ist, nur durch sorgfältige Stabilisierung der Magnetisierungsstromstärke und der Elektronengeschwindigkeit (auf $d: 0,01\%$) erzielt werden.

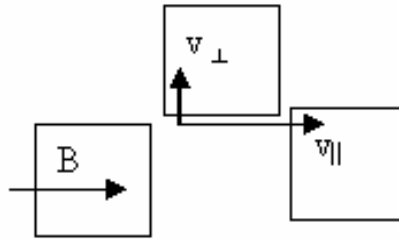
Die spezifische Ladung des Elektrons ist das Verhältnis zwischen der Ladung des Elektrons, deren Wert mit der elementaren elektrischen Ladung ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C) übereinstimmt, und der Masse des Elektrons ($m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).

Die Kathode K sendet einen Elektronenfazikel, welcher von der, Beschleunigungsspannung U_0 beschleunigt wird. Als Folge des Überganges der

Beschleunigungsenergie eU_0 in kinetischer Energie $mv^2/2$, bekommen die Elektronen die lineare Geschwindigkeit v_{\parallel} .

Die Spule, die auf dem Rohr gewunden ist, erzeugt ein magnetisches Feld B , das mit der Achse des Rohres Ox parallel orientiert ist.

Als Folge zersetzt sich die Geschwindigkeit der Elektronen in zwei Komponenten: eine entlang der Richtung des magnetischen Feldes, v_{\parallel} , die andere senkrecht zum magnetischen Feld, v_{\perp} .



Die Geschwindigkeit v_{\parallel} wird dem Elektron eine Translation entlang der Richtung des Feldes einprägen und v_{\perp} eine auf dem Feld senkrechte Rotationsbewegung. Die resultierende Bewegung wird eine helikoidale (schraubenförmige) Bewegung sein.

Die Periode T der helikoidalen (schraubenförmigen) Bewegung ist gleich mit der Periode der Kreisbewegung des Elektrons in dem senkrechten magnetischen Feld ($v_{\perp} \perp B$). $T = 2\pi r / v_{\perp}$, wo r der Radius der kreisförmigen Bahn des Elektrons ist.

Aus der Bedingung für die Stabilität des Elektrons auf der Bahn (die Zentrifugalkraft soll mit der Lorentzkraft gleich sein) folgt:

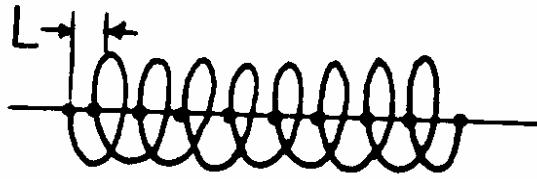
$$\frac{mv_{\perp}^2}{r} = ev_{\perp} B \Rightarrow r = \frac{mv_{\perp}}{eB}$$

Also:

$$T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi}{v_{\perp}} \cdot \frac{mv_{\perp}}{eB} = \frac{2\pi m}{eB}$$

Die Entfernung, die von dem Elektronenfaszikel während einer Periode T , entlang der Richtung des Feldes zurückgelegt wird, ist L , also der Schritt der Schraube.

$$L = v_{\parallel} T = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0} \frac{2\pi m}{eB} = \frac{2\pi}{B} \sqrt{2 \frac{m}{e} U_0}$$



Laut der oberen Beziehung, hängt die Periode T von der Geschwindigkeit des Teilchens nicht ab, also je welche Geschwindigkeit die Elektronen haben, legen sie alle in einer Periode T , dieselbe Entfernung L zurück, die Brennweite genannt wird. (Die Longitudinalgeschwindigkeit v_{\perp} ist dieselbe für alle Elektronen $v_{\perp} = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}$).

Wenn die Entfernung zwischen dem Kondensator und dem Bildschirm des Rohres ein Vielfaches der Brennweite L ist, dann wird sich der Elektronenfazikel auf dem Bildschirm fokussieren, so dass man ein punktförmiges Bild auf dem Schirm erhält.

Durch Anwenden der Bedingung für die Fokussierung erhält man:

$$D = kL$$

wo k = Fokalisierungsorden ist. Man benützt für L den Ausdruck gegeben:

$$D = k \frac{2\pi}{B} \sqrt{2 \frac{m}{e} U_0}$$

Und man erhält:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_0}{\frac{D^2}{K^2} B^2}$$

Das magnetische Feld weist zylindrische Symmetrie auf und ist durch den folgenden Ausdruck gegeben:

$$B = \mu_0 \cdot 0,5 \frac{n \cdot I}{l} \left[\frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{L - a}{\sqrt{R^2 + (L - a)^2}} \right]$$

wo $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Nm die magnetische Permeabilität des Vakuums ist

n = Anzahl der Windungen = (6000)

l = Länge der Spule = 29 cm

R = Radius der Windungen

a = der Punkt auf der Achse, in dem B berechnet wird

I = die Stromstärke durch die Spule

In der Mitte der Spule a = L/2 und

$$B = \mu_0 \frac{nI}{\sqrt{4R^2 + L^2}}$$

Weil $L^2 > 4R^2 \rightarrow B = \mu_0 \frac{nI}{L}$

Also ist die Endform für e/m:

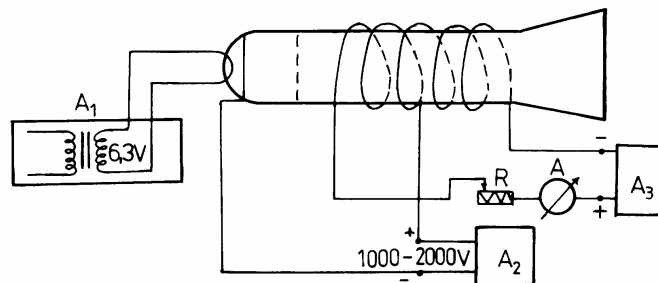
$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2}{0,79^2 D^2 \mu_0^2 \frac{n^2}{I^2}} k^2 \frac{U_0}{I^2} = 0,11 \cdot 10^8 \frac{U_0}{I^2} \cdot k^2$$

wo: D = 13 cm

Diese Formel wird in der Arbeit für das Bestimmen von e/m benutzt.

Die experimentelle Vorrichtung

Die experimentelle Vorrichtung, deren Entwurf in Abb. dargestellt wird, enthält:



- (A1) stellt den Transformator, der den Heizfaden, die Kathode bei der konstanten Spannung von 6.3V antreibt, dar.

- (A2) stellt den stabilisierten Gleichrichter, der die Anode bei Spannungen zwischen 1000-2000V antreibt, dar.

- (A3) stellt den Selen-Gleichrichter, der die Spule durch den Regelwiderstand (Rheostat) R antreibt, dar

- (A) ist das Amperemeter, das die Stromstärke durch die Spule anzeigt.

Arbeitsmodus

Nachdem man die Theorie der Laborarbeit erlernt, die Geräte identifiziert und den Arbeitsmodus verstanden hat, schließt man unter Beaufsichtigung des didaktischen Personals die Geräte an.

1. Man bringt den Transformator 6.3V am 200 V Wechselstromnetz an und man wartet ungefähr eine Minute, bis der Heizfaden warm wird. Man wartet bis der helle Spot auf dem Schirm erscheint.

2. Wenn der Spot erscheint, bringt man den Selen-Gleichrichter an dem 220 V Wechselstromnetz an, man macht den Schalter an und, indem man den Läufer bewegt, verändert man die Stromstärke durch die Spule von null anfangend, bis man einen Punkt auf dem Schirm erhält. Dieses ist das erste Fokussieren $k=1$.

3. Man liest auf dem Amperemeter den Wert der Stromstärke während der Fokussierung. Man wiederholt das Messverfahren fünfmal, indem man jedes Mal die Stromstärke auf null bringt.

4. Indem man die Stromstärke des Stromes durch die Spule erhöht, wird der Punkt zu einer Linie und dann wieder zu einem Punkt. Es ist die zweite Fokussierung $k=2$. Man liest den zweiten Wert des Stromes $I(A)$. Man wiederholt das Messverfahren fünfmal, indem man jedes Mal die Stromstärke unter 1,3 A sinkt (weil der Regelwiderstand Stromstärken über diesen Wert nicht lange aushält).

5. Nach der Durchführung der Messungen bei der Spannung von 1500 V, stellt man die Spannung vom Gleichrichter A2 auf 1750 V, 1000 V und 1300 V und wiederholt alle Messungen.

Vorsicht: Nach der Bestimmung der Stromstärke entsprechend der zweiten Fokussierung, die meistens über 1.5 A liegt, sinkt man den Strom sofort unter 1,3 A, weil der Regelwiderstand Stromstärken über diesen Wert nicht lange aushält.

Die Bearbeitung der experimentellen Daten

Für jedes Fokussierungsordnen soll die Berechnung separat erfolgen. Man stellt eine Tabelle wie die unten, für jede Beschleunigungsspannung, her. (insgesamt vier Tabellen)

Nr.	U(v)	I Fokussierung	I(A)	$\frac{e}{m}$	Nr.	U(v)	II Fokussierung	I(A)	$\frac{e}{m}$
1.	1500	k=1			1.	1500	k=2.		
2.	1500	k=1			2.	1500	k=2		
3.	1500	k=1			3.	1500	k=2		
4.	1500	k=1			4.	1500	k=2		
5.	1500	k=1			5.	1500	k=2		

Man berechnet einen Durchschnittswert des Bruches e/m für jedes Set von Messungen, die in identischen Bedingungen stattgefunden haben. Man berechnet die Abweichungen, $(e/m)_i = X_i$ eines der berechneten Werte.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N=5} X_i}{N}; \sigma_{\bar{X}} = \sigma\left(\frac{e}{m}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N=5} (X_i - \bar{X})^2}{N(N-1)}}, \quad N = 5.$$

$$X = \bar{X} \pm c_{\bar{X}}$$