

A 9 Spezifische Ladung des Elektrons

1. Aufgabenstellung

1.1 Bestimmen Sie die spezifische Ladung des Elektrons

- a) nach der Methode von BUSCH
- b) nach der Methode mit dem Fadenstrahlrohr

1.2 Führen Sie für typische Messbedingungen eine Größtfehlerberechnung durch. Übernehmen Sie den ermittelten relativen Fehler von e/m für dessen Mittelwert.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

elektrisches Feld, magnetisches Feld, LORENTZ-Kraft, Zentrifugalkraft, Elektronenstrahlröhre, lange Spule, HELMHOLTZ-Spulenpaar Fadenstrahlrohr,

Literatur:

W. Walcher Praktikum der Physik, Kap. 6.1,
Teubner Verlag 1989

W. Demtröder Experimentalphysik, d. 2,
Kap. 1.8, 3.2.5, 3.3,
Springer Verlag 1995

W. Ilberg, M. Krötzsch Physikalisches Praktikum, Kap. 0-6.2
Teubner Verlag 1992

E. W. Schpolski Atomphysik Teil 1, Kap. 4 -8,
Verlag der Wissenschaften, Berlin 1968

Becker, Jodl Physikalisches Praktikum, V 28
VDI-Verlag 1991

2.1 e/m - Bestimmung nach BUSCH

Die genannte Methode beruht auf der Wirkung eines magnetischen Gleichfeldes auf ein divergentes Bündel von Elektronenstrahlen. Letzteres wird in einer Elektronenstrahlröhre, wie sie in Abb. 1a schematisch dargestellt ist, erzeugt.

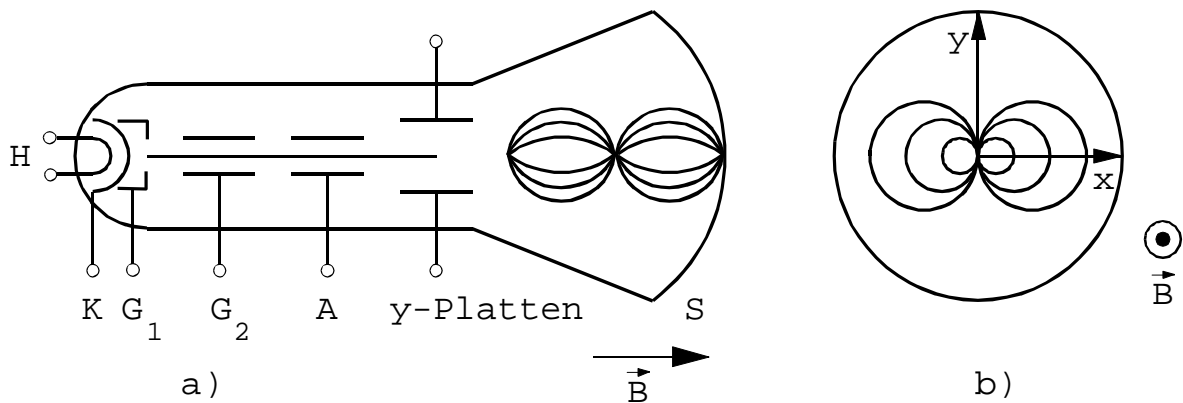


Abb. 1 Spiralförmige Elektronenbahnen in der Elektronenstrahlröhre
a) Längsschnitt, schematisch (die x -Platten sind nicht gezeichnet)
b) Projektionen der Bahnen auf die Leuchtschirmebene

Die Elektronen treten aus der indirekt geheizten Katode K aus und werden durch die an der Anode A anliegenden positiven Spannung beschleunigt. Durch das Gitter G_1 (WEHNELT-Zylinder) wird die Intensität und durch das Gitter G_2 die Fokussierung des Elektronenstrahls beeinflusst. Nach Verlassen der Anode bewegen sich die Elektronen mit konstanter Geschwindigkeit durch die beiden Ablenkplattenpaare x und y weiter und gelangen auf den Leuchtschirm S . Die gesamte Röhre ist so im Innern einer Spule angeordnet, dass in ihr ein koaxiales Magnetfeld erzeugt werden kann. Bei guter Justierung hat das Magnetfeld keinen Einfluß auf den Elektronenstrahl, da die magnetischen Feldlinien parallel zur Bewegung der Elektronen verlaufen. Durch die Spannung an einem Ablenkpaar, z. B. den y -Platten, erhalten die Elektronen zusätzlich zu ihrer axial gerichteten Geschwindigkeit v_z eine Vertikalkomponente v_{y0} . Die dann auftretende LORENTZ-Kraft führt zu einer gleichmäßigen Richtungsänderung der Elektronenbewegung, das Elektron wird auf eine Kreisbahn in der xy -Ebene gezwungen, die sich der Translation in z -Richtung überlagert.

In der xy -Ebene ist der Betrag der Geschwindigkeit $v_{\perp} = v_{y0}$ konstant. Auf der Kreisbahn halten sich die durch das Magnetfeld ausgeübte Zentralkraft und die Fliehkraft das Gleichgewicht

$$e B v_{\perp} = m v_{\perp}^2 / r \quad , \quad (1)$$

daraus folgt für den Radius der Elektronenbahn

$$r = \frac{m v_{\perp}}{e B} \quad . \quad (2)$$

Für die Umlaufzeit T ergibt sich :

$$T = \frac{2 \pi r}{v_{\perp}} = \frac{2 \pi m}{e B} \quad , \quad (3)$$

das heißt, T ist unabhängig von der Größe der Vertikalkomponente der Geschwindigkeit.

Die Elektronen legen in der Zeit T in z -Richtung gleichzeitig den Weg $s_z = v_z T$ zurück. Durch Einstellung des Magnetfeldes auf B_0 kann die Umlaufzeit T_0 der Elektronen so eingestellt werden, dass sie in dieser Zeit gerade den Weg ℓ von der Mitte der y -Platten bis zum Bildschirm zurücklegen, es gilt $s_z = \ell$. Sie kommen dann am Bildschirm so an, als wären sie gar nicht abgelenkt worden. Mit Gl. (3) ergibt sich :

$$T_0 = \frac{\ell}{v_z} = \frac{2 \pi m}{e B_0} \quad . \quad (4)$$

Mit $\frac{m}{2} v_z^2 = e U_a$ folgt

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \pi^2 U_a}{B_0^2 \ell^2} \quad . \quad (5)$$

Die magnetische Induktion auf der Achse einer Zylinderspule der Länge L und der Windungszahl N , die vom Strom I_s durchflossen wird, beträgt

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N I_s}{L} \quad . \quad (6)$$

2.2 e/m - Bestimmung mit dem Fadenstrahlrohr

Bewegt sich ein Elektron mit der Geschwindigkeit \vec{v} in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} , so beschreibt es eine Kreisbahn, wenn \vec{v} und \vec{B} senkrecht aufeinander stehen. Mit der LORENTZ - Kraft und der Zentrifugalkraft ergibt sich für den Bahnradius r

$$r = m \frac{v_{\perp}}{e B} . \quad (7)$$

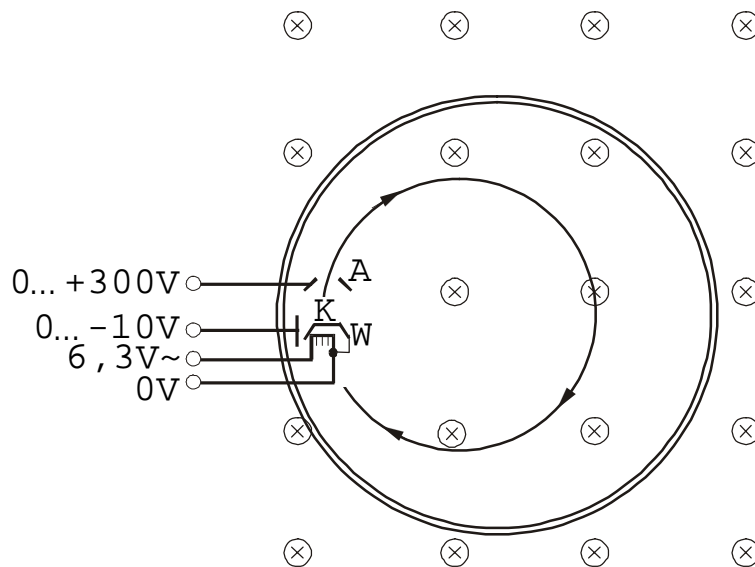


Abb. 2: Versuchsaufbau: A = Anode
K = Kathode
W = Wehneltzylinder

Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit erzeugt man, indem man die aus einer Glühkatode austretenden Elektronen durch eine an die Anode angelegte Spannung U_A so beschleunigt, dass sie sich nach dem Durchgang durch ein Loch in der Anode senkrecht zum Magnetfeld bewegen (Abb. 2).

Aus dem Energiesatz

$$\frac{m}{2} v_{\perp}^2 = e U_A \quad (8)$$

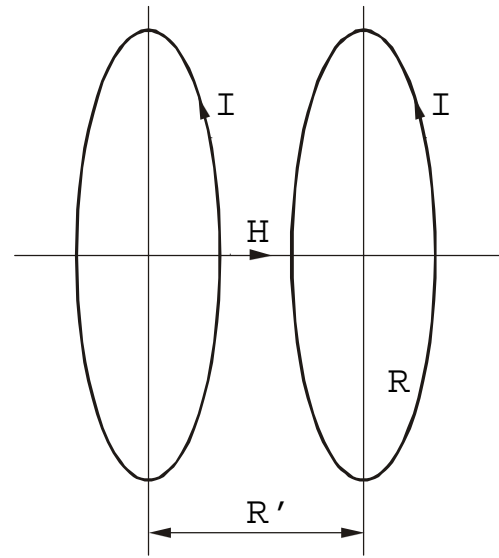
folgt für den Bahnradius

$$r = \sqrt{\frac{2 m U_A}{e}} \cdot \frac{1}{B} \quad (9)$$

bzw. für die spezifische Ladung des Elektrons

$$\frac{e}{m} = \frac{2 U_A}{B^2 r^2} \quad (10)$$

Das Magnetfeld wird mit einem Helmholtz-Spulenpaar erzeugt (Abb. 3). Dieses besteht aus zwei flachen Spulen mit dem Radius R und je n Windungen, die im Abstand $R' = R$ parallel zueinander angeordnet sind und vom gleichen Strom I durchflossen werden. Das in dem frei zugänglichen Innenraum entstehende Magnetfeld ist weitgehend homogen und hat die Flussdichte



$$B = \frac{8 \mu_0}{\sqrt{125}} \frac{I}{R} n \quad (11)$$

Die Bahn der Elektronen wird sichtbar gemacht, indem man die Messröhre nicht vollständig evakuiert (Wasserstoffatmosphäre, $p \approx 10^{-2}$ mbar). Infolgedessen stößt ein Teil der Elektronen mit den Restgasmolekülen zusammen und regt sie zur Lichtaussendung (bläulicher Faden) an. Bei einem Teil der Zusammenstöße entstehen positive Ionen. Sie bleiben infolge ihrer im Vergleich zu den Elektronen großen Masse in der Nähe des Entstehungsortes, d. h. auf der Elektronenbahn und kompensieren durch ihre Ladung die Raumladung des Elektronenstrahls. Durch diese „Raumladungsfokussierung“ entsteht ein enges Elektronenbündel ein sog. Fadenstrahl.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Elektronenstrahlröhre

Zur Inbetriebnahme der Elektronenstrahlröhre wird die in Abb. 2 dargestellte Schaltung aufgebaut.

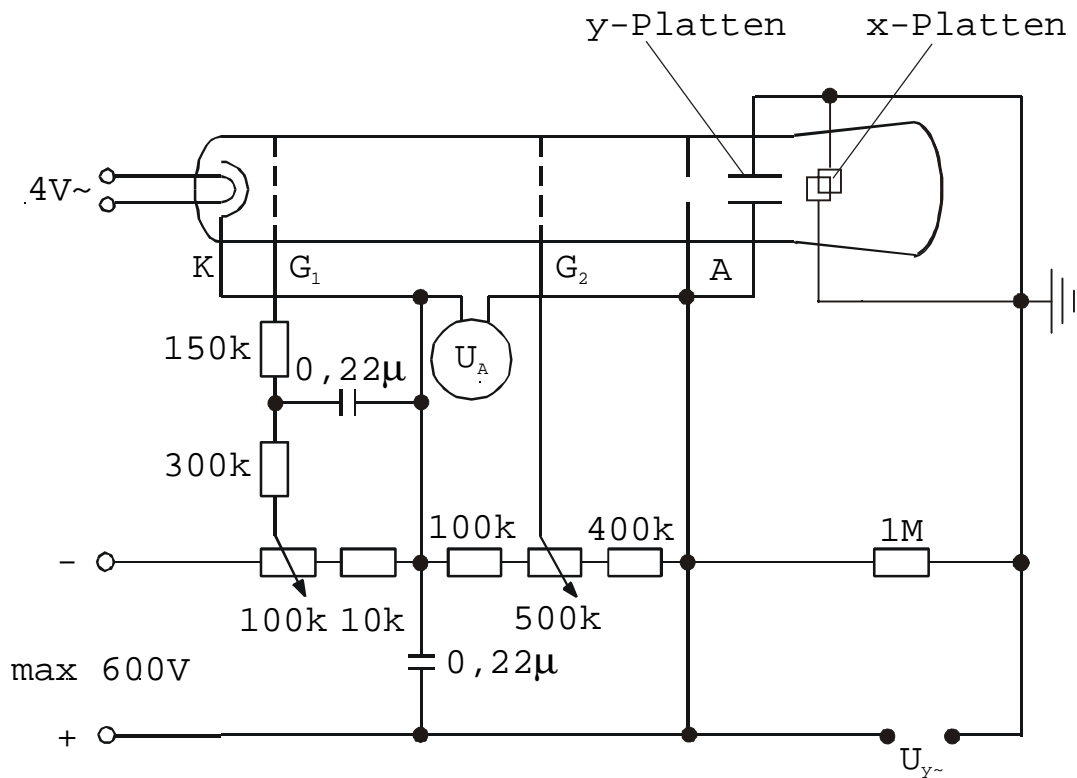


Abb. 4 : Schaltplan für die Elektronenstrahlröhre

Die Anodenspannung darf maximal 600 V und die Heizspannung der Röhre nur 4 V betragen! Zur Ablenkung des Elektronenstrahls wird an die y-Platten eine Wechselspannung angelegt, deren Größe zweckmäßig so zu wählen ist, dass sich der zu beobachtende Strich über den gesamten Leuchtschirm erstreckt. Das x-Plattenpaar wird dabei kurzgeschlossen. Der Abstand Mitte y-Plattenpaar-Leuchtschirm beträgt $l_y = (4,9 \pm 0,2) \text{ cm}$.

Die Magnetspule wird aus einem Stromversorgungsgerät ($I_{\text{max}} = 200 \text{ mA}$) versorgt, die Stromstärke wird mit Hilfe der Spannungsregelung am Gerät eingestellt (Abb. 5).

Die Länge der Spule beträgt $L = (0,185 \pm 0,002)$ m, die Windungszahl ist $N=10.000$.

Der Versuch ist bei 5 verschiedenen Anodenspannungen U_a im Bereich von 350 V bis 600 V durchzuführen. Es wird jeweils 5 mal der Spulenstrom I_0 bestimmt, bei dem sich auf dem Leuchtschirm wieder ein Punkt ausbildet. Mit Gl. (5) und (6) ist daraus jeweils ein experimenteller Wert für e/m zu berechnen.

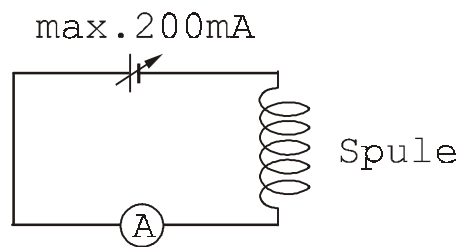


Abb. 5 : Schaltung der Stromversorgung für die Magnetspule

Für eine mittlere Anodenspannung ist eine Größtfehlerberechnung für e/m durchzuführen, deren Resultat für den Mittelwert von e/m in der Ergebniszusammenfassung übernommen wird.

Berechnen Sie außerdem für die 5 von Ihnen benutzten Anodenspannungen U_a die Axialgeschwindigkeiten, und geben Sie die Werte (auf 1% Genauigkeit gerundet) in Tabellenform an.

3.2 Fadenstrahlrohr

Abb. 2 zeigt die Beschaltung des Elektrodensystems. Wenn sich nach dem Anlegen der Heizspannung (6,3 V) und der Beschleunigungsspannung (ca. 200 V bis 300 V) das Elektronenbündel ausgebildet hat, wird die Spannung am Wehneltzylinder

(-10 V bis 0 V) soweit verändert, dass das Elektronenbündel möglichst fein und scharf begrenzt ist. Die Stromstärke durch die Helmholtz-Spulen wird so eingestellt, dass die Elektronen auf einer geschlossenen Kreisbahn laufen. Erfolgt die Ablenkung in die falsche Richtung zum Glaskolben hin, muß die Stromrichtung in der Helmholtz-Spule geändert werden. Falls sich statt der Kreisbahn eine Schraubenbahn ergibt, so steht die Anfangsgeschwindigkeit \vec{v} der Elektronen nicht senkrecht auf \vec{B} . Dies kann durch vorsichtiges Drehen des Fadenstrahlrohres um seine Längsachse korrigiert werden.

Der Bahnradius r geht bei der Bestimmung von e/m_e quadratisch ein. Um den relativen Fehler in r klein zu halten, wird r möglichst groß gewählt.

Zur parallaxefreien Messung von r wird hinter dem Fadenstrahlrohr ein ebener Spiegel und ein Paar auf einem Maßstab beweglicher Schieber angebracht. Mit einem Auge peilt man dann so auf den Spiegel Sp , dass der am weitesten links außen liegende Punkt A des Elektronenstrahls E mit seinem Spiegelbild A' zur Deckung kommt. Der Schieber wird so eingestellt, dass seine Innenkante die Visierlinie gerade berührt (d. h. gerade beginnt, den Elektronenstrahl zu verdecken). Gleichermaßen verfährt man mit dem rechts außen gelegenen Punkt C des Elektronenstrahls und dem zweiten Schieber.

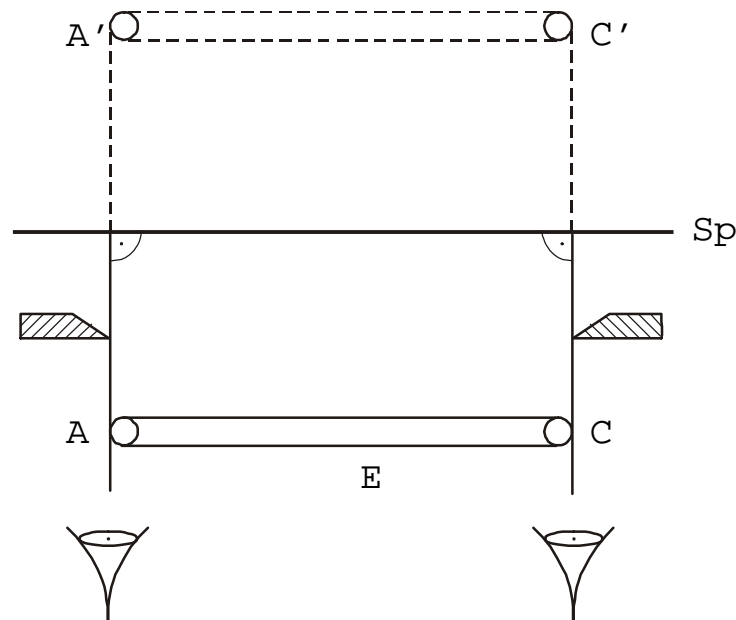


Abb. 6: Parallaxefreie Ablesung des Bahndurchmessers

Es ist zweckmäßig, die Schieber schwach zu beleuchten, um in der Dunkelheit die Einstellgenauigkeit zu erhöhen. Um ein Maß für die Einstellgenauigkeit zu erhalten, wird bei festem Bahnradius die Einstellung mehrfach wiederholt. Nach jeder Änderung der Beschleunigungsspannung wird auch der Spulenstrom soweit verändert, bis der durch die Schieber vorgegebene Bahndurchmesser wieder erreicht ist.

Für die Berechnung der spezifischen Ladung e/m werden folgende Daten der HELMHOLTZ-Spulen benötigt:

Windungszahl: je Spule $n=130$

Spulenradius: $R=R' = (150 \pm 1) \text{ mm}$.

4. Kontrollfragen

4.1 Welche Kraft \vec{F} übt ein Magnetfeld der Induktion \vec{B} auf eine Ladung q aus, die sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt? Diskutieren Sie die Bahn eines Elektrons im homogenen Magnetfeld, wenn das Elektron mit einer Geschwindigkeit v_0

- a) parallel zu den Feldlinien,
 - b) senkrecht zu den Feldlinien,
 - c) unter einem Winkel α zu den Feldlinien
- in das Magnetfeld eingeschossen wird.

4.2 Was bedeutet im Rahmen dieses Versuches \vec{v}_\perp und \vec{v}_\parallel ?
Warum ist die Aufspaltung $\vec{v} = \vec{v}_\perp + \vec{v}_\parallel$ sinnvoll?

4.3 Geben Sie mit Hilfe von (3) und (4) an, welches Bild sich auf dem Bildschirm ergibt, wenn B auf $B_0 / 2$ eingestellt wird.

Welche Bilder erhält man für $B=B_0/4$ und $B=3B_0/4$?

4.4 Die Herleitung von Gl. (5) setzt voraus, dass $v \ll c$ ist. Für hohe Geschwindigkeiten ist die relativistische Massenzunahme auf

$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ zu berücksichtigen. Für welche Beschleunigungsspan-

nungen bleibt die Massenzunahme kleiner als 1%?

4.5 Wie erhält man einen allgemeinen Ausdruck für die Berechnung der magnetischen Induktion im Inneren der HELMHOLTZ-Spulen?