

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A4
Institut für Physik	Spezifische Ladung des Elektrons	Seite 1

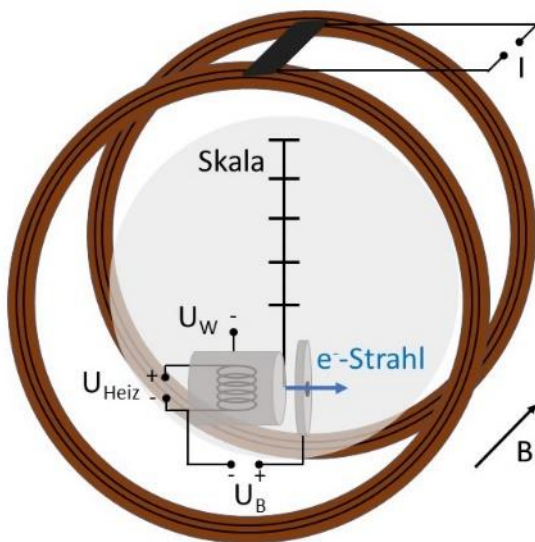
1. Aufgabenstellung

- 1.1. Die spezifische Ladung e/m des Elektrons ist mithilfe eines Fadenstrahlrohres aus dem Durchmesser von Elektronenbahnen in einem homogenen Magnetfeld zu bestimmen.
- 1.2. Es ist abzuschätzen, bis zu welcher Beschleunigungsspannung die relativistische Massenzunahme der Elektronen unter 1% bleibt.

2. Grundlagen

2.1. Elektronenstrahl im magnetischen Feld

Die spezifische Ladung eines Elektrons ist das Verhältnis seiner Ladung $q = -e$ (Elementarladung) und seiner Masse m . Dieses Verhältnis e/m kann experimentell aus der Ablenkung eines Elektronenstrahls bestimmt werden.



In einem Fadenstrahlrohr (siehe Abb.) entstehen durch Glühemission Elektronen an der Kathode innerhalb des negativ geladenen Wehneltzylinders. Durch eine hohe positive Spannung U_b werden die Elektronen zur Anode hin beschleunigt und treten dort durch eine lochartige Öffnung als Elektronenstrahl aus. Die Geschwindigkeit der Elektronen ergibt sich aus dem Energieerhaltungssatz zu:

$$\frac{m}{2}v^2 = eU_b. \quad (1)$$

Die gesamte Röhre befindet sich innerhalb eines homogenen Magnetfeldes der Flussdichte \vec{B} , das von einem Helmholtz-Spulenpaar erzeugt wird. Ist die Bewegungsrichtung der Elektronen genau senkrecht zu diesem Magnetfeld, so werden sie durch die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

auf Kreisbahnen mit dem Radius r gelenkt. Die Lorentzkraft ist senkrecht zur Bewegungsrichtung gerichtet und ist betragsmäßig gleich der Zentrifugalkraft:

$$evB = m \frac{v^2}{r}. \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (1) und (3) erhält man:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_b}{r^2 B^2} \quad (4)$$

und somit die spezifische Ladung des Elektrons, wenn die von den Spulen erzeugte magnetische Flussdichte B bekannt ist.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A4
Institut für Physik	Spezifische Ladung des Elektrons	Seite 2

Ein Helmholtz-Spulenpaar besteht aus 2 flachen Ringspulen vom Radius R , die parallel zueinander und koaxial im Abstand $a = R$ angeordnet sind. In dem Gebiet zwischen den beiden Spulen ist das magnetische Feld weitgehend homogen. Werden die Spulen vom Strom I durchflossen, dann ist die magnetische Flussdichte B näherungsweise:

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R} . \quad (5)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ ist hierbei die magnetische Feldkonstante und N die Windungszahl jeder Spule.

2.2. Relativistische Massenzunahme

Bei Elektronengeschwindigkeiten, die durch hohe Beschleunigungsspannungen hervorgerufen werden, d.h. v kommt in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit c , muss die relativistische Massenzunahme berücksichtigt werden. Während m_0 die Ruhemasse des Elektrons ist, erhöht sich seine Masse mit zunehmender Geschwindigkeit gemäß

$$m = \gamma m_0 , \quad (6)$$

wobei

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7)$$

der Lorentzfaktor ist. Die kinetische Energie ergibt sich als Differenz zwischen Gesamt- und Ruheenergie:

$$E_{kin} = mc^2 - m_0 c^2 = (\gamma - 1)m_0 c^2 \quad (8)$$

und muss entsprechend in (1) abgeändert werden. Entwickelt man (7) in eine Reihe, dann wird aus (8):

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 \frac{v^4}{c^2} + \dots , \quad (9)$$

d. h., falls $v \ll c$ ist, erhält man für die kinetische Energie den bekannten klassischen Ausdruck.

3. Messanleitung

Das verwendete Fadenstrahlrohr besteht aus einem kugelförmigen Glaskolben, in dem das Elektronenstrahlensystem (indirekt geheizte Kathode, Lochanode und Wehnelt-Zylinder) ein scharf begrenztes Elektronenbündel erzeugt. In dem evakuierten Glaskolben befindet sich eine kleine Menge Helium (ca. 13 Pa). Bei Stößen von Elektronen und Gasatomen werden die Atome zum Leuchten angeregt und dadurch die Elektronenbahnen sichtbar. Zusätzlich können durch Elektronenstoß positive Ionen erzeugt werden, die um den Elektronenstrahl eine Raumladungswolke bilden. Sie wirkt wie eine elektrostatische Zylinderlinse und konzentriert die Elektronen auf dem sogenannten Fadenstrahl.

Sowohl der Glaskolben als auch das Helmholtz-Spulenpaar sind fest mit dem Betriebsgerät verbunden. Dieses liefert alle benötigten Spannungen direkt über den Röhrensockel bzw. zu den Spulen. Es sind keine weiteren elektrischen Verbindungen notwendig.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A4
Institut für Physik	Spezifische Ladung des Elektrons	Seite 3

Achtung! Glühkathodenröhren sind dünnwandige, evakuierte Glaskolben. Sie sind vorsichtig zu behandeln, es besteht Implosionsgefahr. Röhre keinen mechanischen Belastungen aussetzen!

Vor Einstellen der Anodenspannung ca. 1 min abwarten, bis sich die Temperatur der Heizwendel stabilisiert hat.

Beachten Sie weiterhin folgende Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Durch Lösen der Feststellmutter kann der Röhrensockel verdreht werden, um sicherzustellen, dass der Elektronenstrahl exakt senkrecht zur magnetischen Feldrichtung ist. Ist dies nicht der Fall, so werden Spiralbahnen beobachtet. Nicht an der Röhre drehen, sondern nur am Drehteller oder der Überwurfmutter!
- Der Regler für die Heizspannung verbleibt zunächst in Mittelstellung (6V), die Wehnelt-Spannung ist so zu wählen, dass ein möglichst dünnes, scharf begrenztes Elektronenbündel zu sehen ist. Der Kreisbahndurchmesser darf sich hierbei nicht verändern.
- Im Fadenstrahlrohr befindet sich ein Drahrähmchen mit zweifach angebrachten Peilmarken im Abstand $d = (20, 40, 60, 80 \text{ und } 100) \text{ mm}$ von der Strahlaustrittsöffnung. Mithilfe eines Beobachtungsfernrohrs, das seitlich auf einer optischen Schiene und in der Höhe justiert werden kann, ist damit eine parallaxefreie Beobachtung der Elektronenbahnen möglich.

Stellen Sie zunächst eine Beschleunigungsspannung von $U_b = 300 \text{ V}$ ein. Wählen Sie den Spulenstrom so, dass die Elektronen sich auf einer Kreisbahn mit einem Durchmesser von $d_1 = 100 \text{ mm}$ bewegen. Nun wird die Beschleunigungsspannung in Schritten von $\Delta U_b = 10 \text{ V}$ bis $U_b = 150 \text{ V}$ (Richtwerte) verringert und der Spulenstrom I so eingestellt, dass d konstant bleibt (Strahlschärfe und -helligkeit ggf. mit Wehnelt- und Heizspannung optimieren). Die Messreihe wird für zwei weitere Kreisbahndurchmesser wiederholt.

4. Auswertung

Gemäß Gleichung (5) gilt:

$$B = kI. \quad (10)$$

Die Konstante k soll auf zwei verschiedene Weisen ermittelt werden:

- Durch Berechnung aus Gl. (5) mit den Spulendaten $N = 124$ und $R = (147 \pm 2) \text{ mm}$.
- Durch Auswertung des gemessenen Zusammenhangs zwischen Spulenstrom und magnetischer Flussdichte. Dazu wurde eine Hallsonde mittig zwischen das Spulenpaar, an den Platz der Röhre gebracht. Diesen Versuchsschritt führen Sie nicht selbst durch sondern haben die Messwerte im Diagramm am Ende der Anleitung gegeben.

Vergleichen Sie die beiden Ansätze und die gefundenen Ergebnisse. Die Unsicherheit von k ist abzuschätzen.

Zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung werden Gl. (4) und Gl. (5) verknüpft zu:

$$B^2 = k^2 I^2 = \frac{8mU_b}{ed^2} \Rightarrow I^2 = \frac{8m}{ed^2 k^2} U_b = S U_b. \quad (11)$$

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A4
Institut für Physik	Spezifische Ladung des Elektrons	Seite 4

Für jeden der drei eingestellten Durchmesser ist ein Diagramm $I^2 = f(U_B)$ zu zeichnen und mittels linearer Regression der Anstieg S der Ausgleichsgeraden zu bestimmen. Die spezifische Elektronenladung e/m ergibt sich hieraus nach Gl.(11).

Die gefundenen Resultate sind, unter Berücksichtigung ihrer kombinierten Unsicherheiten, mit dem Tabellenwert zu vergleichen, Ursachen möglicher größerer Abweichungen sind zu diskutieren.

5. Kontrollfragen

1. Welche Kräfte wirken auf Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld?
2. Warum befindet sich ein Restgas bei sehr niedrigem Druck in der Röhre? Was passiert, wenn man den Gasdruck erhöhen würde?
3. Was ist die relativistische Massenzunahme?

6. Anhang

