

Versuch 503

Spezifische Ladung e/m des Elektrons

1. Aufgabe

- 1.1 Bestimmen Sie mit Hilfe einer Fadenstrahlröhre die spezifische Ladung e/m des Elektrons!
- 1.2 (Zusatzaufgabe) Ermitteln Sie die Größe der magnetischen Störfelder am Versuchstisch!

2. Grundlagen

Stichworte:

geladenes Teilchen im Magnetfeld, Lorentzkraft, Stoßanregung, Fadenstrahlen, Magnetfeld einer Helmholtzspule

Es gibt in der Physik eine Reihe von Fundamentalkonstanten, deren Größe als naturgegeben anzusehen ist und nur durch Experimente bestimmt werden kann. Dazu gehören (als Beispiel) die Lichtgeschwindigkeit, die Gravitationskonstante, das Plancksche Wirkungsquantum und auch die Masse und Ladung eines Elektrons. Die Methoden zur Messung dieser Konstanten bilden eines der reizvollsten Kapitel der Physik, weil darin der innere Zusammenhang der verschiedenen Teilgebiete sehr deutlich sichtbar wird. In vielen Fällen führen bereits einfache und anschauliche Versuchsanordnungen zu guten Ergebnissen. Ein Beispiel ist die Fadenstrahlröhre zur Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons.

2.1 Meßprinzip

Bewegt sich ein Elektron in einem magnetischen Feld, so unterliegt es dem Einfluß der Lorentzkraft \mathbf{F}_L

$$\mathbf{F}_L = e (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

wobei e die Ladung des Elektrons (Elementarladung) und $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ das Kreuzprodukt aus Geschwindigkeit \mathbf{v} des Elektrons und Stärke des Magnetfeldes (magnetische Induktionsflussdichte \mathbf{B}) ist.

\mathbf{F}_L , \mathbf{v} und \mathbf{B} sind Vektoren. Der Betrag von \mathbf{F}_L steht berechnet sich aus:

$$|\mathbf{F}_L| = e \cdot |\mathbf{v}| \cdot |\mathbf{B}| \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

φ ist der von \mathbf{v} und \mathbf{B} eingeschlossene Winkel, \mathbf{F}_L steht senkrecht auf \mathbf{v} und \mathbf{B} (vgl. Bild 1).

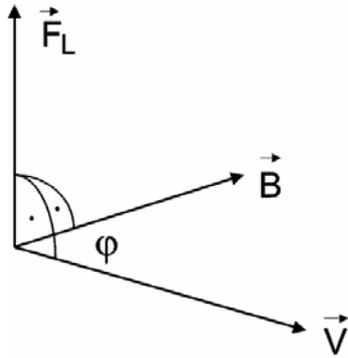


Bild: 1

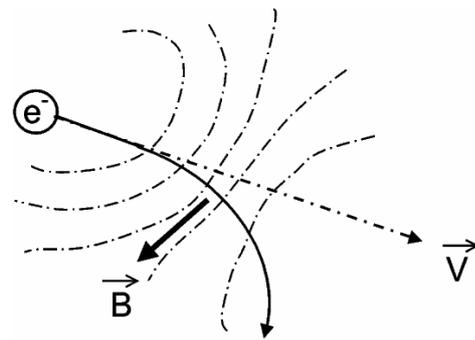


Bild: 2

Wird ein Elektron senkrecht zu den Feldlinien in einem homogenen Magnetfeld bewegt, so erfährt es eine ständige Ablenkung zur Seite hin, die schließlich in eine geschlossene Kreisbahn mündet (Bild 2). Die dann wirkende Zentrifugalkraft F_Z ist mit der Lorentzkraft F_L im Gleichgewicht. Da in unserem Fall \mathbf{v} und \mathbf{B} senkrecht aufeinander stehen ($\varphi = 90^\circ$, $\sin \varphi = 1$), kann im Folgenden mit den Beträgen gerechnet werden:

$$F_L = e \cdot v \cdot B \quad (3)$$

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

Aus $F_Z = F_L$ folgt eine einfache Beziehung zur Bestimmung des Quotienten aus Elementarladung und Masse des Elektrons

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \quad (5)$$

Bei Kenntnis der Elementarladung, z.B. als Ergebnis des „Millikan-Versuches“, erhält man daraus die Elektronenmasse.

2.2 Versuchsaufbau

Der Elektronenstrahl wird in einer Fadenstrahlröhre erzeugt. Diese besteht aus einem evakuierten Glaskolben mit Anode und geheizter Katode. Die aus der Glühkatode austretenden Elektronen werden durch eine hohe Spannung U zur Anode hin beschleunigt und treten durch eine Öffnung mit der kinetischen Energie E_{kin} aus.

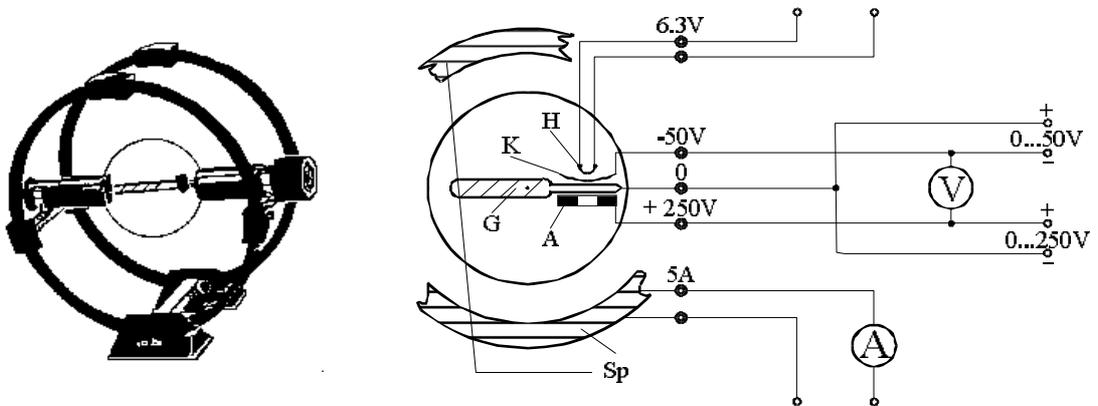
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U \quad (6)$$

Da der Elektronenstrahl selbst nicht sichtbar ist, befindet sich in der Röhre eine geringe Menge Edelgas (Argon). Durch Stöße der Elektronen mit den Argon-Atomen werden diese ionisiert und zum Leuchten angeregt. Da sich die vergleichsweise schweren Argonionen in der kurzen Zeit ihrer Existenz kaum von der Stelle bewegen,

wird durch sie die Bahn der Elektronen sehr gut markiert. Außerdem führt die Anziehungskraft der (positiven) Ionen zur Bündelung des Strahls (→ „Fadenstrahl“). Das Magnetfeld wird mit Hilfe eines sogenannten Helmholtz-Spulenpaares erzeugt. Das sind zwei Spulen mit gleicher Windungszahl N , welche koaxial und parallel zueinander stehen mit einem Abstand, der gleich dem Spulenradius R ist. Durch diese Anordnung läßt sich im Innenraum ein nahezu ideal homogenes Feld erzeugen. Fließt durch die Spulen der Strom I , so beträgt das dadurch erzeugte Magnetfeld

$$B = 0,715 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{R} \quad (7)$$

(μ_0 ... magnetische Feldkonstante, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am, der Faktor 0,715 ergibt sich aus der Geometrie der Anordnung).



(K ... Kathode, H ... Kathodenheizung, A ... Anode, G ... Gitter, Sp ... Helmholtz-Spulen)

Bild 3: Versuchsaufbau und elektrische Beschaltung

Der Elektronenstrahl beschreibt unter Einfluß des Magnetfeldes eine Kreisbahn, deren Radius mit Hilfe geeigneter Markierungen (in die Röhre eingebaute fluoreszierende Metallstege) gemessen werden kann. Aus den drei Meßgrößen: Beschleunigungsspannung U , magnetische Induktion B und Bahnradius r läßt sich durch Kombination von Gl. 5 und Gl. 6 die spezifische Ladung e/m berechnen. Es gilt:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2} \quad (8)$$

3. Versuchsdurchführung

3.1 Messung und Auswertung

Die Inbetriebnahme des Versuchsplatzes darf **nur durch den zuständigen Assistenten** erfolgen. Lesen Sie sich vor Beginn die am Platz ausliegende Betriebsanleitung (insbesondere den Abschnitt 3.3) genau durch, und befolgen Sie während des Experimentierens die dort gegebenen Hinweise (nachfolgend in verkürzter Form dargestellt und teilweise ergänzt):

- Heizspannung 6.3 V einschalten; Anheizzeit (ca. 1min) abwarten
- Anodenspannung (0 ... 250 V) und Gitterspannung (0 ... 50 V) einschalten, so daß ein aus der Anodenöffnung austretender schwach leuchtender Strahl sichtbar wird (Raum abdunkeln!)
- Spulenstrom (max. 5 A) einschalten, so daß der Fadenstrahl eine Kreisbahn beschreibt.
- Röhre senkrecht zum Magnetfeld ausrichten.
- gewünschten Wert der (Gesamt)-Beschleunigungsspannung einstellen, Spulenstrom so regeln, daß der Fadenstrahl einen der vier Meßstege trifft (entspricht Vollkreis mit Radius 2, 3, 4 oder 5 cm).
- aus den Werten für U, I und r kann mit Gl.7 und Gl.8 die spezifische Ladung e/m berechnet werden.

Es wird vorgeschlagen, Meßwerte für $U = 200, 250$ und 300 V und alle vorgegebenen Radien (2, 3, 4 und 5 cm) aufzunehmen.

Untersuchen Sie, ob das Ergebnis e/m eine systematische Abhängigkeit von den Meßbedingungen (Kreisradius, Beschleunigungsspannung, Lage der Röhre, ...) zeigt. Beachten Sie dies bei der Mittelwertbildung.

Die Abschätzung der Genauigkeit der Ergebnisse kann über Fehlerfortpflanzung aus ΔU , ΔI und Δr sowie ggf. auch statistisch erfolgen. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert!

3.2 Messung der magnetischen Störfelder am Ort der Helmholtzspulen (Zusatzaufgabe für Physikstudenten und Interessierte)

Der magnetischen Induktionsflußdichte der Helmholtzspulen überlagert sich das Erdmagnetfeld sowie ein starkes Magnetfeld, das durch einen im Nachbarlabor aufgestellten Supraleitungsmagneten erzeugt wird. Die Größe beider B-Feldstärken ist näherungsweise zu bestimmen und mit dem Feld der Helmholtzspulen zu vergleichen. Die Messung von B erfolgt aus der Schwingungsdauer T einer pendelnden Magnetnadel. Ein magnetischer Dipol mit dem Dipolmoment M erfährt im Magnetfeld der Feldstärke B/μ_0 ein Drehmoment, das zu Drehschwingungen führt. Es gilt

$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{M \cdot B}{\Theta \cdot \mu_0}}$. Dabei ist Θ das Trägheitsmoment der Magnetnadel. m und Θ sind im allgemeinen unbekannt, können aber durch Referenzmessung der Schwingungsdauer T_0 in einem bekannten Magnetfeld B_0 eliminiert werden. Für die gesuchte Induktionsflußdichte B gilt:

$$B = B_0 \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad (6)$$

Für die Messung wird ein Deklinatorium/Inklinatorium benutzt, das es ermöglicht, die Achse der Magnetnadel jeweils senkrecht zu den Feldlinien zu drehen. Nur in dieser Stellung bedeutet die Größe B in der obigen Gleichungen den Betrag der Induktionsflußdichte.

Messen Sie die Schwingungsdauern der einjustierten Magnetnadel an einem möglichst ungestörten Ort (nur Erdmagnetfeld), am Ort der Helmholtzspule (nicht stromdurchflossen) sowie in der stromdurchflossenen Helmholtzspule. Unter Benutzung des berechneten B_0 in der Spule bestimmen Sie näherungsweise das Erdmagnetfeld sowie das wirkende Störfeld.