

Die spezifische Elektronenladung e/m_e soll aus der Bahnkurve eines Elektronenstrahls im homogenen magnetischen Feld bestimmt werden.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Elektronen im homogenen magnetischen Feld

Ein Teilchen der Masse m trage die Ladung q . Es wird mit der Geschwindigkeit \vec{v} in ein homogenes Magnetfeld \vec{B} eingeschossen, dessen Richtung senkrecht auf der Bewegungsrichtung des Teilchens steht. Die auf das Teilchen wirkende Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

steht immer sowohl senkrecht auf \vec{B} als auch auf der Momentangeschwindigkeit \vec{v} . Sie verändert demzufolge die kinetische Energie des Teilchens nicht, sondern zwingt es auf eine Kreisbahn mit Radius r in einer Ebene senkrecht zu \vec{B} . Wegen der Orthogonalität ist

$$|\vec{F}_L| = |q \cdot v \cdot B|. \quad (2)$$

Auf der Kreisbahn wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft, und für Elektronen mit der Ladung e und der Masse m_e folgt

$$e \cdot v \cdot B = m_e \cdot \frac{v^2}{r}. \quad (3)$$

Die spezifische Ladung der Elektronen ist

$$\frac{e}{m_e} = \frac{v}{B \cdot r}. \quad (4)$$

Die Einschussgeschwindigkeit v der Elektronen wird durch die Beschleunigungsspannung U bestimmt, wenn man die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen vernachlässigen kann (*thermische Elektronen*). Man setzt die Energiebilanz

$$e \cdot U = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \quad (5)$$

in Gleichung (4) ein und erhält

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2}. \quad (6)$$

1.2 Experimentelle Ausführung

Der Elektronenstrahl wird mit einem Elektrodensystem erzeugt (**Bild 1**), bestehend aus einer Kathode K mit indirekter Heizung, einem Wehneltzylinder W und einer durchbohrten, kegelförmigen Anode A . Der Wehneltzylinder dient zur Bündelung des erzeugten Elektronenstrahls.

Die Anordnung befindet sich in einem Glaskolben, der eine Wasserstoff-Atmosphäre enthält. Bei den Stößen mit Elektronen werden die Gasatome zum Leuchten angeregt. Die Elektronenbahn zeichnet sich dann als bläulicher „Faden“ ab, weshalb der Glaskolben als Fadenstrahlrohr bezeichnet wird. Der Druck des Gases darf nur gering sein ($p \approx 10^{-2}$ mbar), damit die mittlere freie Weglänge der Elektronen hinreichend groß ist, also nur relativ wenige Elektronen mit Gasatomen zusammenstoßen und dabei Energie abgeben.

Das Magnetfeld wird mit einem Helmholtz-Spulenpaar erzeugt. Es besteht aus zwei flachen Spulen mit dem Radius r und je n Windungen, die im Abstand $r_1 = r_2$ parallel zueinander angeordnet sind und vom gleichen Strom I durchflossen werden (**Bild 1**).

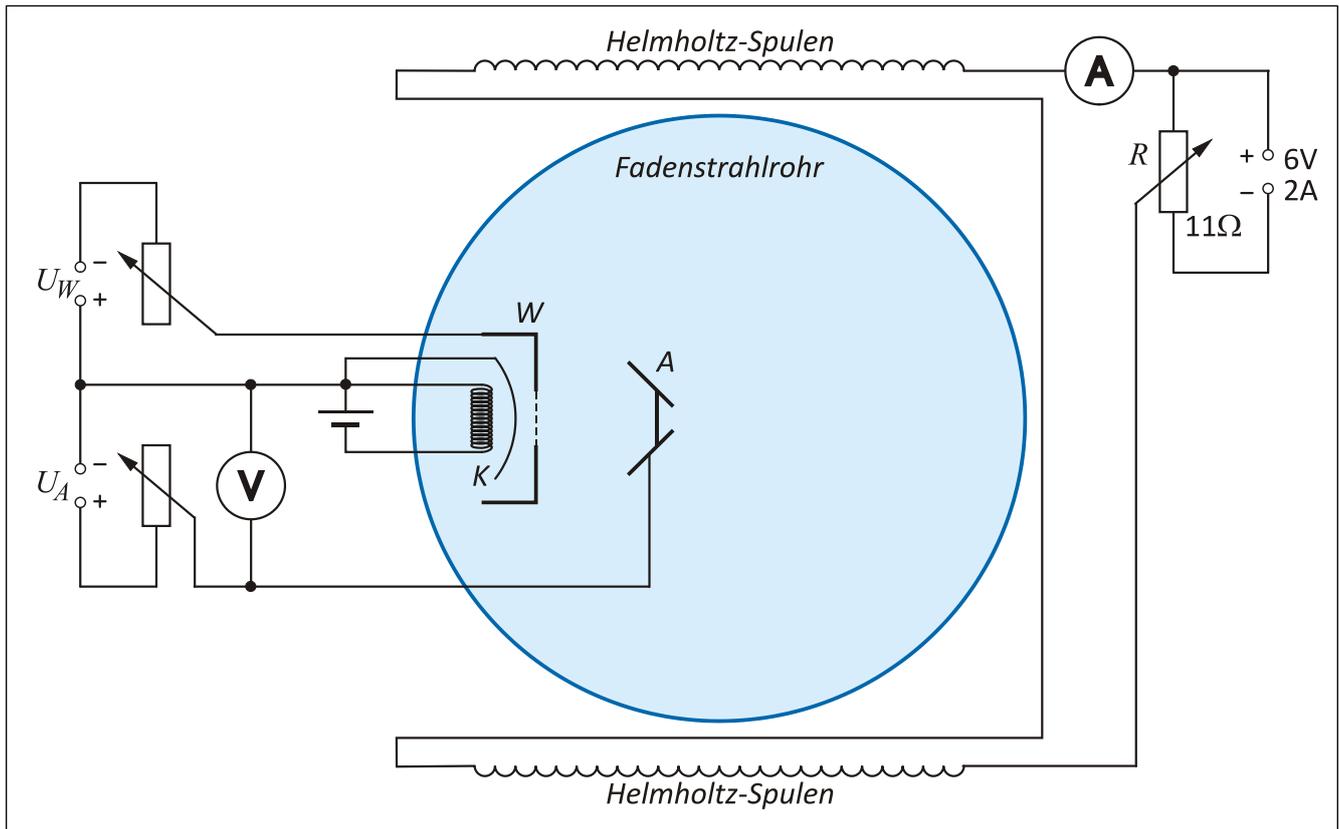


Bild 1: Schematischer Versuchsaufbau

Das in dem frei zugänglichen Innenraum entstehende Magnetfeld ist weitgehend homogen und die magnetische Flussdichte wird wie folgt ermittelt:

$$B = \frac{8}{\sqrt{125}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot n}{r} \cdot I \quad (7)$$

$$\text{magnetische Feldkonstante: } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Tritt in einem Fadenstrahlrohr ein Elektronenstrahl mit einer Beschleunigungsspannung von $U=300 \text{ V}$ aus dem Wehneltzylinder senkrecht nach oben aus, so kann dieser mittels des Helmholtzspulenpaares auf eine Kreisbahn des Durchmessers von $d=100 \text{ mm}$ gezwungen werden. Der dafür benötigte Spulenstrom beträgt $I=1,75 \text{ A}$.

Bestimmen Sie mit Hilfe der Kalibrierkennlinie **a)** die magnetische Flussdichte B . Berechnen Sie **b)** die spezifische Ladung eines Elektrons e/m_{e0} und **c)** die Ruhemasse m_{e0} . Wie groß ist **d)** die Elektronenaustrittsgeschwindigkeit v ?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Fadenstrahlrohr auf Ständer mit Visiereinrichtung, Helmholtzspulenpaar, Netzgerät 0...500V, DC-Netzgerät 0...20V mit Stromanzeige, Spannungsmesser DC $U \leq 300V$, Messschieber (Kunststoff)

2.2.2 Versuchshinweise

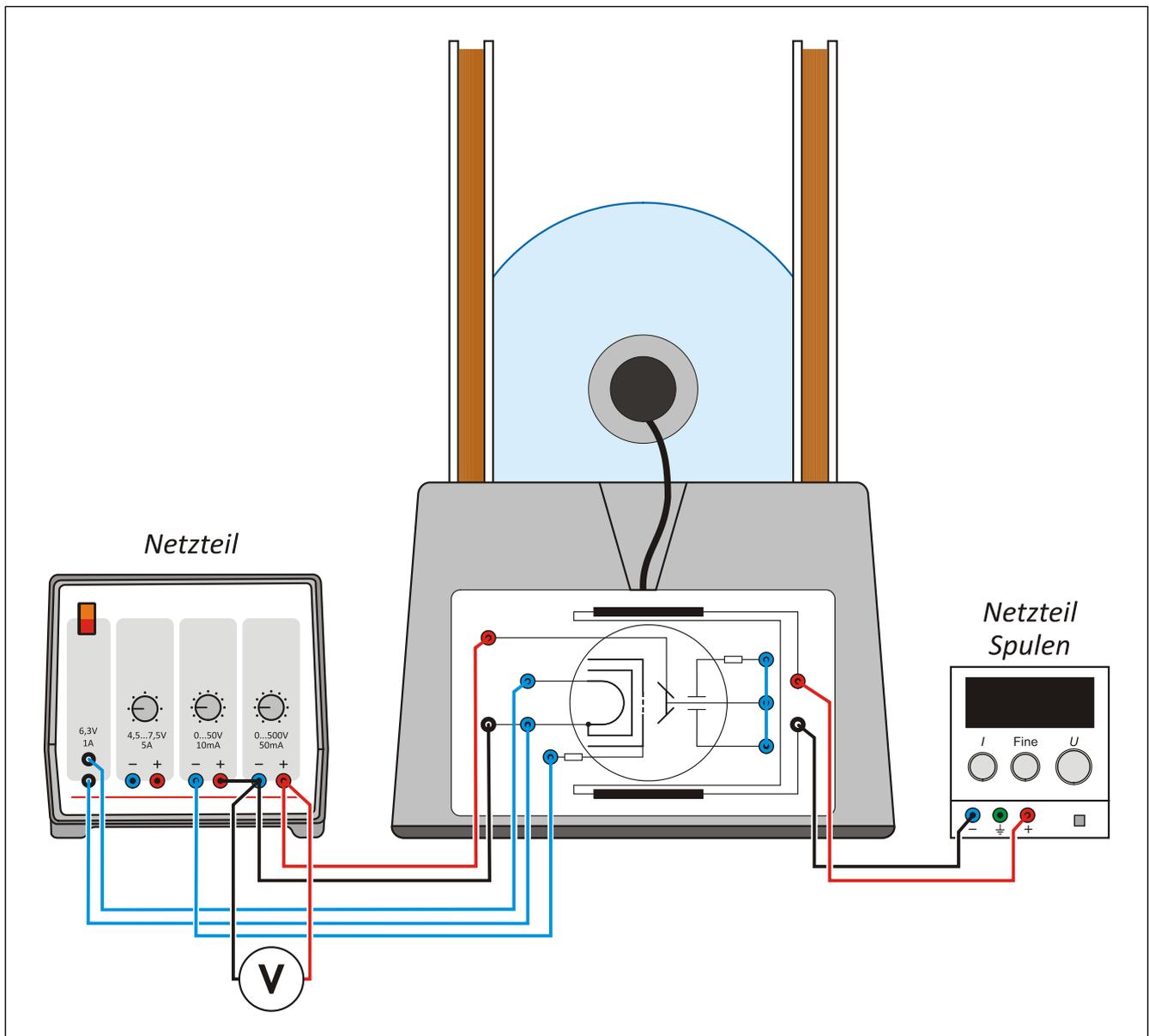


Bild 2: Versuchsaufbau

- Kontrollieren Sie den Versuchsaufbau (nach **Bild 2**).
- Überprüfen Sie, ob beide Netzgeräte ausgeschaltet und sämtliche Drehpotentiometer auf Linksanschlag gedreht sind.

Der **6,3 V-Eingang** des Fadenstrahlrohres ist an den **6,3 V-Ausgang** des Röhrennetzgeräts angeschlossen. Der Pluspol des **50 V-Ausganges** am Röhrennetzgerät ist mit dem Minuspol des **500 V-Ausganges** kurzgeschlossen und mit der Buchse „-“ des Fadenstrahlrohres (*Kathode*) verbunden. Die Buchse „+“ des Fadenstrahlrohres (*Anode*) ist mit dem Pluspol des **500 V-Ausganges** verbunden.

Zur Messung der Beschleunigungsspannung U ist ein Spannungsmesser (*Messbereich 300V DC*) an den **500 V-Ausgang** angeschlossen. Die Ablenkplatten des Fadenstrahlrohres sind auf Anodenpotential gelegt. Das **DC-Netzgerät** (*mit Stromanzeige*) ist in Reihenschaltung mit den Helmholtz-Spulen verbunden.

Versuchsvorbereitung:

- Schalten Sie das Röhrennetzgerät ein und stellen Sie die Beschleunigungsspannung $U=300\text{ V}$ ein. Die Glühelktronen-Emission beginnt nach einer Heizdauer **von wenigen Minuten**.
- Optimieren Sie die Bündelung des Elektronenstrahls durch Variieren der Spannung am Wehnelt-Zylinder zwischen **0 ... 10V**, bis ein enges, scharf begrenztes Strahlenbündel ohne diffusen Rand entsteht.
- Schalten Sie nun das DC-Netzgerät zur Versorgung der Helmholtz-Spulen ein und suchen Sie den Strom I , bei dem der Elektronenstrahl auf eine geschlossene Kreisbahn abgelenkt wird.

Laborpersonal verständigen:

- *Wenn der Elektronenstrahl nach Austritt aus der Anode zur falschen (linken) Seite abgelenkt wird, schalten Sie beide Netzgeräte sofort ab. Die Ausgänge am Spulen-Netzgerät müssen dann umgepolt werden.*
- *Wenn sich die Elektronen nicht auf einer geschlossenen Kreisbahn, sondern auf einer Schraubenlinie bewegen. Lockern Sie die Befestigungsschrauben der beiden Haltebügel. Drehen Sie dann das Fadenstrahlrohr vorsichtig um seine Längsachse, bis der Elektronenstrahl auf einer geschlossenen Kreisbahn verläuft und ziehen Sie die Befestigungsschrauben wieder fest.*

Aufgabe 1: Messung der Beschleunigungsspannung

- Verschieben Sie den linken Schieber der Messvorrichtung so, dass die **Innenkante**, das Spiegelbild und die Austrittsöffnung des Elektronenstrahls in einer Visierlinie liegen.
- Stellen Sie den rechten Schieber so ein, dass nun beide **Innenkanten** einen Abstand von **8 cm** haben.
- Visieren Sie dabei die Innenkante des rechten Schiebers an und bringen Sie diesen mit deren Spiegelbild zur Deckung.
- Stellen Sie den Spulenstrom I so ein, dass die Kreisbahn des Elektronenstrahls **8 cm** Durchmesser beträgt (Bahndurchmesser).
Siehe **Bild 3**.

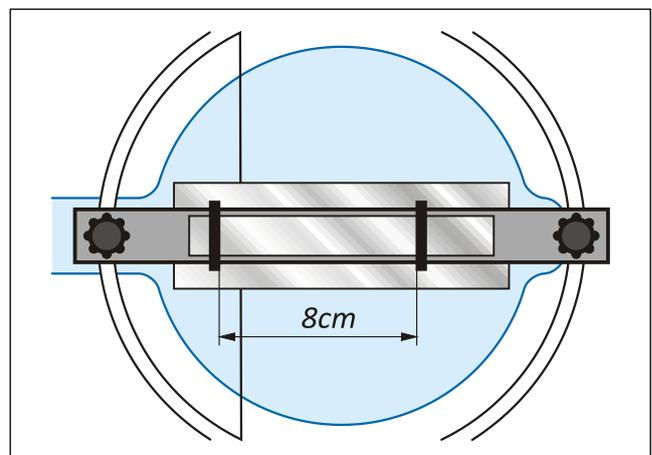


Bild 3: Ausmessen des Bahndurchmessers mit der Messvorrichtung

- Notieren den Spulenstrom I bei der Beschleunigungsspannung von $U=300\text{ V}$.
- Reduzieren Sie die Beschleunigungsspannung U bis auf 200 V in **10 V-Schritten**.
- Halten Sie dabei den Bahnradius r konstant, in dem Sie nur den Spulenstrom I verkleinern.

Aufgabe 2: Messung der Durchmesser des Elektronenstrahls bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

- Messen Sie den Durchmesser des Elektronenstrahls bei den Beschleunigungsspannungen von $U=150\text{ V}$ bis 300 V in **50 V-Schritten**. Halten Sie den Spulenstrom I konstant auf **1,5 A**.
- Nutzen Sie die Visiereinrichtung und messen Sie den sich jeweils ergebenden Abstand mit dem Messschieber.

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Messung der Beschleunigungsspannung

- Stellen Sie in einem Diagramm die Funktion $U = f(B^2)$ graphisch dar.
- Bestimmen Sie den Anstieg der Regressionsgeraden. Tragen Sie dazu in das Diagramm die Fehlerbalken an und schätzen Sie so die Unsicherheiten der Messgrößen ab.
- Berechnen Sie aus dem Anstieg der Regressionsgeraden die spezifische Elektronenladung e/m_e und bestimmen Sie die Messunsicherheit (*absolut und relativ*) durch eine Fehlerrechnung unter Verwendung des erstellten Diagramms.
- Verwenden Sie für die Berechnung die Kalibrierkurve $B = f(I)$ (siehe **Anhang**).

Aufgabe 2: Messung der Durchmesser des Elektronenstrahls bei vier verschiedenen Beschleunigungsspannungen

- Stellen Sie in einem Diagramm die Funktion $U = f(r^2)$ graphisch dar und bestimmen Sie den Anstieg der Regressionsgeraden. Tragen Sie dazu in das Diagramm die Fehlerbalken an und schätzen Sie so die Unsicherheiten der Messgrößen ab.
- Bestimmen Sie die jeweilige spezifische Elektronenladung e/m_e und bestimmen Sie die Messunsicherheiten (*absolut und relativ*) durch eine Fehlerrechnung unter Verwendung des erstellten Diagramms.

Aufgabe 3: Vergleich

- Vergleichen Sie die Ergebnisse aus **Aufgabe 1** und **2** einschließlich der zu erzielenden Messgenauigkeit mit dem Tabellenwert.
- Diskutieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 4: Berechnung

- Berechnen Sie aus den Messwerten die Elektronenaustrittsgeschwindigkeit v bei der Beschleunigungsspannung $U=220\text{ V}$ und bestimmen Sie die Messunsicherheiten (*absolut und relativ*) durch eine Fehlerrechnung.

Kalibrierkennlinie für das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen

