

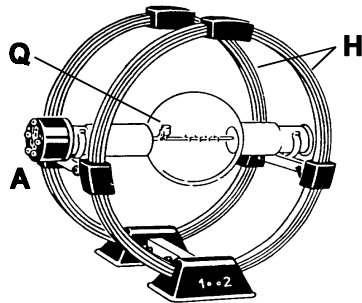
## Versuch B 8: Bestimmung der spezifischen Ladung $e/m$

**1. Literatur:** Bergmann-Schaefer, Experimentalphysik, Bd. II  
 Pohl, Einführung in die Physik, Bd. 2  
 Dobrinski/Krakau/Vogel, Physik für Ingenieure

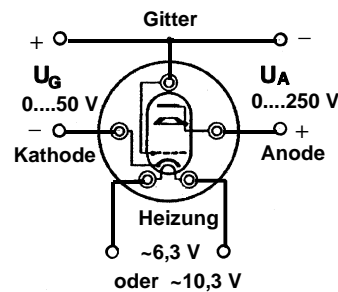
**Stichworte:** Elektronenröhre, Kraftwirkung elektromagnetischer Felder auf bewegte Ladungen, magnetische Feldstärke und Induktion, Ionisation, Rekombination, Lichtemission, Millikan-Versuch

### 2. Grundlagen

In diesem Versuch soll die spezifische Ladung  $e/m$  des Elektrons durch Ablenkung eines Elektronenstrahls im Magnetfeld bestimmt werden. Ähnliche Versuche wurden erstmals von H. Busch (1922) durchgeführt.



**Abb.1:** Fadenstrahlrohr mit Helmholtz-Spulen H, Elektronenstrahlquelle Q, Sockel mit Anschlussbuchsen A



**Abb.2:** Anschlussbuchsen mit Schalt-schema für Strahlerzeugungseinheit

Abb. 1 zeigt das benutzte Fadenstrahlrohr mit dem Helmholtz-Spulenpaar. Abb. 2 gibt die Stirnfläche der Röhre mit dem Schalt-schema und den Anschlussbuchsen für die Glühkathode, das Gitter und die mit einem Loch versehene Anode wieder. Durch thermisch induzierte Elektronenemission (Heizen der Kathode) und anschließende Beschleunigung und Fokussierung der Elektronen wird ein

Elektronenstrahl erzeugt. Liegt zwischen der Kathode und der Anode eine Beschleunigungsspannung  $U$ , so verlassen die Elektronen (Ladung  $e$ , Masse  $m$ ) das Beschleunigungssystem durch das Anodenloch mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$ . Es gilt nach dem Energieerhaltungssatz:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \quad (1)$$

Im feldfreien Raum würden die Elektronen nach Verlassen der Anode gradlinig mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  weiterfliegen. Bewegen sich die Elektronen jedoch in einem Magnetfeld der Flussdichte  $B$ , so wirkt auf sie die Lorentzkraft  $F_L$ :

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

Da die Kraft  $F_L$  immer senkrecht auf der von  $v$  und  $B$  aufgespannten Ebene steht, wird durch die Lorentzkraft nur die Richtung, nicht aber der Betrag der Geschwindigkeit der Elektronen geändert.

Betrachtet man die Bahn eines Elektrons, dessen Geschwindigkeitsvektor  $v$  senkrecht zum  $B$ -Vektor eines homogenen Magnetfeldes orientiert ist und geht zu Beträgen über, so vereinfacht sich Gl. (2) zu:

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

Die Lorentzkraft wirkt dann ständig mit konstanter Größe  $F_L$  senkrecht zu  $v$ . Das Elektron wird auf eine Kreisbahn gezwungen, wobei die Lorentzkraft gleich der Zentripetalkraft ist, und es gilt:

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

wobei  $r$  der Bahnradius ist. Mit Gl. (1) und (4) erhält man:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (5)$$

Die Beschleunigungsspannung  $U$  und der Bahnradius  $r$  werden im durchzuführenden Versuch direkt gemessen. Die Größe des B-Feldes muss hingegen aus der Geometrie des felderzeugenden Spulensystems und dem Spulenstrom  $I$  bestimmt werden. Im Vakuum gilt zwischen der magnetischen Induktion  $B$  und der magnetischen Feldstärke  $H$  die Beziehung:

$$B = \mu_0 H \quad (6)$$

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$  ist die *Induktionskonstante*. Prinzipiell lässt sich die magnetische Feldstärke jeder beliebigen Spule mit Hilfe des Biot-Savart'schen Gesetzes berechnen. Für die Feldstärke bzw. magnetische Induktion im Mittelpunkt einer Ringspule von  $n$  Windungen und dem Radius  $R$  ergibt sich, wenn die Länge der Spule  $l \ll R$  ist:

$$H = \frac{nI}{2R} \quad \text{bzw.} \quad B = \mu_0 \frac{nI}{2R} \quad (7)$$

Zur Erzeugung eines homogenen Magnetfeldes (nach Helmholtz) bedient man sich zweier Kreisspulen mit gleichem Radius, deren Mittelpunkte auf der gemeinsamen Achse im Abstand ihrer Radien liegen (s. Abb. 1). Ist der Strom in beiden Spulen gleich, so lässt sich die magnetische Flussdichte  $B$  im inneren Bereich eines solchen Helmholtz-Spulensystems aus dem mittleren Spulenradius  $R$ , der Windungszahl  $n$  einer jeden Spule und dem Spulenstrom  $I$  errechnen:

$$B = 0,715 \mu_0 \frac{nI}{R} \quad (8)$$

Der Faktor 0,715 ergibt sich aus der Geometrie der Spulenordnung. Aus Gl. (5) und (8) erhält man schließlich:

$$\frac{e}{m} = C \frac{U}{(rI)^2} \quad (9)$$

mit der Konstanten:

$$C = 2 \left( \frac{R}{0,715 \mu_0 n} \right)^2 \quad (10)$$

Der Radius des im Praktikum beutzten Spulensystems beträgt  $R = 20 \text{ cm}$ ; die Windungszahl je Spule ist  $n = 154$ . Bestimmt man  $U$ ,  $I$  und  $r$  experimentell, so kann die spezifische Ladung  $e/m$  nach Gl. (9) berechnet werden.

Die Bahn des Elektronenstrahls im Fadenstrahlrohr wird sichtbar, da die Elektronen mit den Gasmolekülen des Füllgases (Inertgas unter vermindertem Druck) zusammenstoßen und diese ionisieren (Stoßionisation). Nach der anschließenden Rekombination befinden sich die Gasmoleküle in angeregten Zuständen. Beim Übergang in energetisch tieferliegende Niveaus bzw. in den Grundzustand emittieren die Moleküle elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Spektralbereich (Licht).

Da die Größe der Elektronenladung  $e = -1,6021 \times 10^{-19} \text{ C}$  unabhängig von der Masse bestimmt werden kann, (z.B. im Versuch von R.A. Millikan, 1910; geladene Öl-Tröpfchen in einem Kondensator), lässt sich aus dem Verhältnis von  $e/m$  die Elektronenmasse  $m_e = 9,1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$  berechnen.

Technisch wird die Ablenkung von Elektronenstrahlen durch Magnetfelder bei Fernsehbildröhren und bei den magnetischen Linsen in Elektronenmikroskopen genutzt. Das Prinzip lässt sich jedoch auch auf andere geladene Teilchen (Protonen, Ionen uws.) anwenden. Dies geschieht z.B. in den Massenspektrometern und den Beschleunigungsanlagen der Elementarteilchen- und Kernforschung (Zyklotron, Synchrotron).

### 3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Am Fadenstrahlrohr ist aus mehreren Messungen der Beschleunigungsspannung und des Spulenstromes für verschiedene vorgegebene Radien des kreisförmigen Elektronenstrahls die spezifische Ladung  $e/m$  zu bestimmen.
- 2. Aufgabe:** Eine kritische Fehlerbetrachtung und -berechnung ist durchzuführen.

### 4. Versuchsdurchführung

Zur Erzeugung des Magnetfeldes werden die beiden Spulen (siehe Abb. 1) in Reihe geschaltet und an eine stabilisierte, regelbare Gleichstromquelle angeschlossen. Der Spulenstrom  $I$  wird mit einem Amperemeter gemessen.

Das Fadenstrahlrohr ist gem. Abb. 2 an die Gleichspannungsquellen für die

Anoden- und Gitterspannung  $U_A$  bzw.  $U_G$  (*Polung beachten!*) und die Wechselspannungsquelle für die Kathodenheizung anzuschließen. Die zu bestimmende Beschleunigungsspannung  $U$  ist die Summe von  $U_A$  und  $U_G$ . Sie wird mit einem Voltmeter (300 V=) gemessen, welches zwischen Kathode und Anode geschaltet wird. Die für die Heizung der Kathode notwendige Wechselspannung (6,3V~ oder 10,3V~) ist auf den Anschlussbuchsen des jeweils benutzten Fadenstrahlrohrs angegeben.

*Wichtig:* Vor dem Einschalten der Geräte muss die Schaltung vom Betreuer des Versuchs überprüft werden! Außerdem ist vor Inbetriebnahme des Fadenstrahlrohrs darauf zu achten, dass die beiden Potentiometer der Spannungsquellen  $U_A$  und  $U_G$  auf Null stehen. Erst nach einer Anheizzeit von ca. 3 Minuten darf die Anodenspannung  $U_A$  im Bereich von 0 bis 250 V und die Gitterspannung  $U_G$  im Bereich von 0 bis 50 V eingestellt werden.

Durch eine geeignete Gitterspannung wird Schärfe und Helligkeit des Fadenstrahlrohrs bestimmt. Bei längeren Messpausen sind Anoden- und Gitterspannung wieder auf Null zu stellen, die Kathodenheizung bleibt jedoch an. Ist nach der Anheizzeit der Fadenstrahl im abgedunkelten Raum sichtbar, wird eine bestimmte Beschleunigungsspannung  $U$  ( $= U_A + U_G$ ) eingestellt, der Stromkreis zu den Helmholtzspulen geschlossen und durch vorsichtiges Drehen des Fadenstrahlrohrs der Strahl so eingestellt, dass er das Strahlerzeugungssystem senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes verlässt und bei geeigneter Größe des Magnetfeldes einen Vollkreis beschreibt. Der Spulenstrom ist so einzustellen, dass der Elektronenstrahl einen Kreis mit dem gewünschten Radius  $r$  beschreibt. Zur Bestimmung der Radien sind im Fadenstrahlrohr Messmarken angebracht, die  $r = 2, 3, 4$  und  $5$  cm entsprechen.

Folgende Messreihen sind aufzunehmen:

Bei vorgegebener fester Beschleunigungsspannung (z.B. 150 V) wird zu jedem der vier o.a. Radien der zugehörige Spulenstrom  $I$  viermal gemessen und dann der Mittelwert gebildet.

Der Versuch ist für mindestens 4 Beschleunigungsspannungen (z.B. 150 V, 200 V, 250 V und 300 V) durchzuführen.

## 5. Auswertung

Zunächst ist die Konstante  $C$  zu berechnen (Gl. 10), dann (gem. Gl. 9) aus den zugehörigen Werten von  $U$ ,  $r$  und dem gemittelten Wert von  $I$  das Verhältnis  $e/m$ .

Es ist so für jede der 4 Beschleunigungsspannungen zu verfahren und dann der

Mittelwert von  $e/m$  zu berechnen.

Führen Sie eine Fehlerrechnung durch und verwenden Sie hierfür:  $\Delta r = \pm 0,5\text{mm}$ ,  $\Delta R = \pm 2\text{mm}$ ,  $\mu_0$  und  $n$  fehlerfrei.  $\Delta U$  und  $\Delta I$  sind der Güteklasse der Messgeräte zu entnehmen.  $\Delta I$  wird außerdem als Messunsicherheit (Standardabweichung des Mittelwertes) aus den 4 Messwerten bestimmt. Für die Weiterrechnung wird der größere der beiden Fehler benutzt. Zu berechnen sind nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für jeden Radius  $r$  und jede Spannung  $U$  der relative Größtfehler von  $e/m$ . (Da  $e/m$  ein Potenzprodukt von  $R$ ,  $U$ ,  $r$  und  $i$  ist, ist die Berechnung des relativen Fehlers besonders einfach).

Diskutieren Sie die Ergebnisse, gehen Sie dabei auch auf mögliche systematische Fehler (z.B. elektrostatische Aufladung des Glases, Potenziale der Metallteile usw.) ein.

## 6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie lassen sich - außer durch Glühemission - noch *freie* Elektronen erzeugen?
- 2) Wie hängen Radius und Kreisfrequenz der Elektronenbahn von der Geschwindigkeit bzw. Beschleunigungsspannung ab?
- 3) Wie können Sie feststellen, dass es sich tatsächlich um die Kreisbahn negativ geladener Teilchen handelt?
- 4) Welche Bahn beschreiben geladene Teilchen, die schräg zur Feldrichtung in ein Magnetfeld eintreten?
- 5) Warum werden für sehr große Beschleunigungsspannungen die Werte für  $e/m$  kleiner?
- 6) Was versteht man unter den Begriffen *Stoßionisation* und *Rekombination*?
- 7) Beschreiben Sie den mikroskopischen Mechanismus der atomaren Lichtemission.