

# 7

## Exp. Arbeiten: Geladene Teilchen in elektr. Feldern – Teil 2

Ph12 Lernbereich 4: Experimentelles Arbeiten

Die Schülerinnen und Schüler **bestimmen die Masse des Elektrons mit dem Fadenstrahlrohr. Dazu identifizieren sie zu messende Eingangsgrößen, schätzen deren Messunsicherheiten ab und ermitteln die Messgröße mit ihrer Messunsicherheit. Sie beurteilen die Güte ihrer Messung anhand der Messabweichung vom Tabellenwert.**

**Voraussetzung:** Technische Anwendungen (Kap. 4.2 im Buch)  
AB7 „Exp. Arbeiten: Geladene Teilchen in elektr. Feldern – Teil 1“

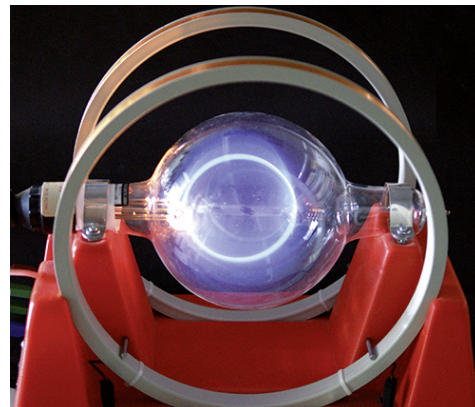
### Das Fadenstrahlrohr

Mit einem Fadenstrahlrohr in Verbindung mit einem Helmholtzspulenpaar kann das Verhalten eines Elektronenstrahls, dem sogenannten Fadenstrahl, in einem senkrecht zur Elektronenbahn orientierten Magnetfeld untersucht werden. Ziel des Versuchs ist es, die Masse des Elektrons zu bestimmen.

#### Aufbau des Fadenstrahlrohrs

In B1 ist der Aufbau eines Fadenstrahlrohrs dargestellt. Dieses besteht aus einer kugelförmigen Glasröhre, in deren Innern sich eine Elektronenkanone befindet, die über passende Anschlüsse (vgl. B2) gesteuert wird. Das ist also ganz analog zur Elektronenablenkröhre, die ebenfalls eine Elektronenkanone verwendet.

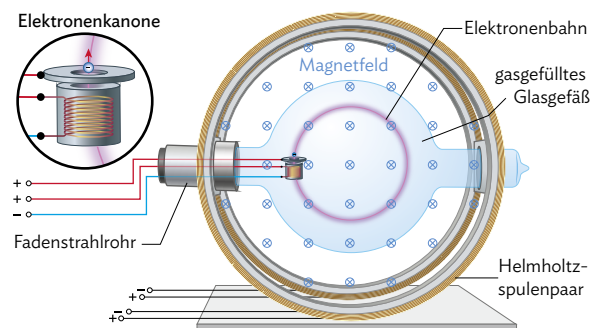
Für die Experimente wird das Fadenstrahlrohr allerdings noch mit weiteren Bauteilen kombiniert: Mit einer Messvorrichtung zur Untersuchung der Elektronenbahn sowie einem Helmholtzspulenpaar, das ein homogenes Magnetfeld erzeugt und die Elektronen so auf eine Kreisbahn lenkt.



B1 | Aufbau eines Fadenstrahlrohrs.

#### Funktionsweise

Das Fadenstrahlrohr wird so zwischen den beiden Helmholtzspulen befestigt, dass die Flugbahn der aus der Elektronenkanone austretenden Elektronen senkrecht zum homogenen Magnetfeld der Spulen verläuft. Eine Messskala wird so angebracht, dass der Radius der so entstehenden Kreisbahn der Elektronen gemessen werden kann. In B2 ist dargestellt, wie diese drei Bauteile kombiniert werden. Im Folgenden wird die Funktionsweise jeweils jeweils noch etwas detaillierter beschrieben.



B2 | Helmholtzspulenpaar, Fadenstrahlrohr und Messvorrichtung im Experiment.

### Helmholtzspulenpaar

Die Helmholtzspulen bestehen aus zwei gleichartigen, freitragenden Spulen. Der Abstand der beiden Spulen ist gleich dem Spulenradius. Sie dienen zur Erzeugung eines weitgehend homogenen Magnetfeldes in einem kleinen Raumbereich, in dem die Wirkung des Magnetfeldes auf die bewegten Elektronen untersucht wird.

### Fadenstrahlrohr

In einer kugelförmigen Glasröhre befindet sich eine sogenannte Elektronenkanone. Dies kennen wir bereits von der Elektronenablenkröhre. Es werden Elektronen, die aus der Glühkathode austreten, mit der Beschleunigungsspannung  $U_B$  beschleunigt. Durch einen Wehneltzylinder wird der Elektronenstrahl fokussiert. Die Glühkathode ihrerseits wird mit einer 6 V-Heizspannung versorgt. Die beschleunigten Elektronen verlassen mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  die Elektronenkanone und bewegen sich durch die kugelförmige Röhre. Da die Röhre mit einem Edelgas unter sehr geringem Druck gefüllt ist, stoßen einige der beschleunigten Elektronen mit Gasmolekülen zusammen und regen diese zum Leuchten an. Die Elektronenspur, also nicht die Elektronen selbst, wird dadurch bei Verdunklung sichtbar. Der geringe Druck des Gases ist deshalb nötig, damit die Elektronen weit genug in die kugelförmige Röhre eindringen können, bevor es zu Stößen kommt – und somit nicht alle Elektronen direkt zu Beginn ihre gesamte Energie abgeben.

### Messvorrichtung

Das homogene Magnetfeld des Helmholtzspulenpaars steht senkrecht zum Elektronenstrahl. Dadurch wirkt die Lorentzkraft, die die Elektronen senkrecht zu ihrer Bahngeschwindigkeit  $v$  auf eine Kreisbahn lenkt. Mit der Messkala kann der Radius  $r$  der sichtbaren Kreisbahn gemessen werden.

## Experimente zum Fadenstrahlrohr

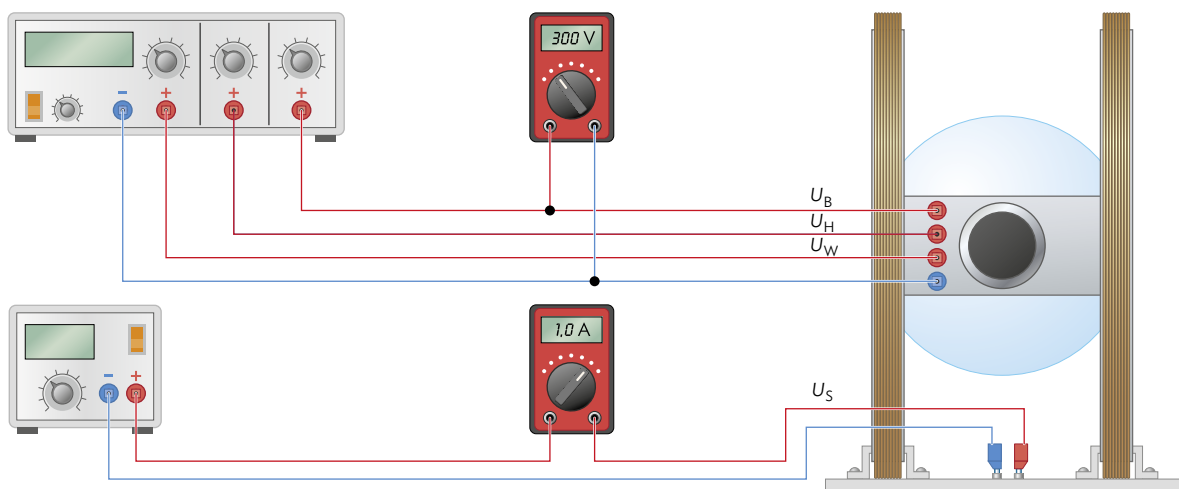
Bevor Sie den Versuch selbst aufbauen, nutzen Sie das interaktive Bildschirmexperiment im Mediacode. Bauen Sie den Versuch dort zuerst virtuell auf.

Um mit der Elektronenstrahl-Ablenkröhre Experimente durchzuführen, müssen das Fadenstrahlrohr und das Helmholtzspulenpaar separat beschaltet und an eine eigene Spannungsversorgung angeschlossen werden. B2 und B3 bieten eine Orientierung dafür, die Verkabelung sollte aber immer von Ihrer Lehrkraft überprüft werden!



MC 67054-14

*Bemerkung:* Bei manchen Spulenpaaren müssen Sie die Verbindung selbst verkabeln. Dann werden die beiden Helmholtzspulen in Reihe geschaltet, wobei die Polung so zu wählen ist, dass sich die Felder beider Helmholtzspulen addieren.



B3 | Experimenteller Aufbau mit dem Fadenstrahlrohr.

### Durchführung der Experimente

Der Aufbau ist immer wie auf der vorherigen Seite beschrieben durchzuführen. Bei den Arbeitsaufträgen werden Sie dann unterschiedliche Experimente damit durchführen. Ziel unserer Überlegungen und unserer Versuche ist es, die Masse eines Elektrons zu bestimmen.

**!** Die Versuchsanordnung muss vor der Inbetriebnahme immer von einer Lehrkraft abgenommen werden!  
Beachten Sie die Sicherheitshinweise der Versuchsaufbauten! Achten Sie dabei auch darauf, dass die maximal zulässige Stromstärke der Helmholtzspulen nicht überschritten wird!

Schalten Sie bei den Experimenten zuerst die Spannung für die Glühkathode  $U_H$  ein und warten Sie ungefähr 1 Minute. Danach schalten Sie die Hochspannung  $U_B$  für den Elektronenstrahl (Fadenstrahl) ein.

Bei Verdunklung können Sie nun einen kurzen, geraden Elektronenstrahl erkennen. Die volle Intensität des Fadenstrahls wird in der Regel erst nach einer Heizdauer von 2 bis 3 Minuten erreicht.

Nun schalten Sie den Strom durch die Helmholtzspulen ein. Sie können nun beobachten, wie der Fadenstrahl unter der Wirkung des homogenen Magnetfeldes eine Kreisbahn beschreibt. Beachten Sie die maximal zulässige Dauerstromstärke der Spulen!

*Bemerkung:* Tritt keine oder nur eine unwesentliche Ablenkung auf, so heben sich die Magnetfelder der beiden Spulen gegenseitig auf. Andernfalls ist das Magnetfeld falsch gerichtet und die Lorentzkraft wirkt in die falsche Richtung. Dies ist unkompliziert durch Umpolen beziehungsweise durch Umstecken der Reihenschaltung behebbar.

### Arbeitsauftrag

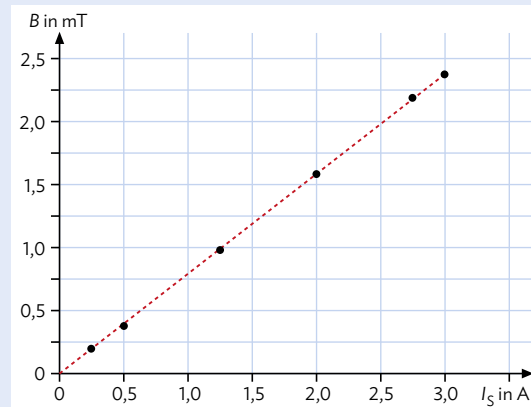
- 1 | Untersuchen Sie entweder im interaktiven Bildschirmexperiment im Mediacode oder im realen Experiment mit dem Fadenstrahlrohr die Einflüsse der Beschleunigungsspannung  $U_B$  und der Stromstärke  $I_S$  des durch die Spulen fließenden Stroms auf den Verlauf der Elektronenbahn. Formulieren Sie geeignete „Wenn-dann-Aussagen“. Formulieren Sie zusätzlich einen Zusammenhang dieser beiden Größen mit der Zentripetalkraft auf die Elektronen.
- 
- MC 67054-15
- 2 | Beobachtbar im Fadenstrahlrohr ist die Kreisbahn vieler Elektronen. Damit ein Elektron aber auf eine Kreisbahn gezwungen wird, muss eine Zentripetalkraft der Stärke  $F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r}$  auf ein Elektron mit der Geschwindigkeit  $v$  und der Masse  $m$  wirken. In unserem Experiment wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft. Die Formel zur Berechnung der Lorentzkraft ist uns bekannt:  $F_L = B \cdot e \cdot v$ . Daraus ergibt sich (vgl. auch M4 im Buch auf S. 70):  $m = \frac{B \cdot e \cdot r}{v}$ . **1**  
Es soll nun der Zusammenhang zwischen Masse  $m$  eines Elektrons mit seiner Kreisbahn mit Radius  $r$  und den Größen  $U_B$  bzw.  $I_S$  untersucht werden.
    - a) Geben Sie jeweils an, ob die Größen  $B$  und  $v$  aus Gleichung **1** von  $U_B$  oder von  $I_S$  abhängen.
    - b) Leiten Sie eine Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit  $v$  her.  
*Tipp:* Die Geschwindigkeit  $v$  der Elektronen nach dem Austritt aus der Elektronenkanone ist im Fadenstrahlrohr und in der Elektronenablenkröhre entsprechend.
    - c) Informieren Sie sich über die Elementarladung  $e$ . Notieren Sie, welcher Physiker für die Entdeckung der Elementarladung einen Nobelpreis bekam, und skizzieren Sie kurz seinen Versuchsaufbau.
    - d) Planen Sie einen Versuch, mit dem Sie die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte  $B$  des Helmholtzspulenpaares vom Spulenstrom  $I_S$  untersuchen können. Notieren Sie sich dafür die benötigten Materialien, skizzieren Sie den Versuchsaufbau und beschreiben Sie die Durchführung.

### Arbeitsauftrag

- 3 \ Untersuchen Sie nun die Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke  $B$  des Helmholtzspulenpaares vom Spulenstrom  $I_S$ .
- Das Magnetfeld im Innern des Helmholtzspulenpaares ist theoretisch weitgehend homogen. Notieren Sie, welche Eigenschaften das Magnetfeld also hat und wie Sie dies experimentell verifizieren können. Führen Sie nun diesen Versuch durch.
  - Um die Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke  $B$  des Helmholtzspulenpaares vom Spulenstrom  $I_S$  zu bestimmen, messen Sie mit einer Hallsonde die Magnetfeldstärke  $B$  und notieren Sie die Wertepaare  $B$  und  $I_S$ . Sollte Ihnen die notwendige Ausstattung nicht zur Verfügung stehen oder sollten Sie noch Fragen zur Durchführung des Versuchs haben, können Sie das interaktive Bildschirmexperiment im Mediencode nutzen.
  - Führen Sie nun eine Regression mit einem geeigneten Programm durch. Sie erhalten eine Ursprungsgerade mit einer bestimmten Steigung  $k$  (vgl. B4). Formulieren Sie nun das gefundene Gesetz für Ihre Helmholtzspulen als mathematische Gleichung. Achten Sie dabei auf die Einheiten.
  - Recherchieren Sie, ob Ihre in c) gefundene Gleichung korrekt ist. Passen Sie Ihre Berechnung ggf. an und begründen Sie Abweichungen.



MC 67054-16



B4  $I_S$ - $B$ -Diagramm mit Regressionsgerade.

- 4 \ Nun soll schließlich die Masse  $m$  eines Elektrons bestimmt werden. Ausgehend von der Lorentzkraft, die bei der Kreisbewegung als Zentripetalkraft wirkt (siehe Aufgabe 2), erhalten wir  $m = \frac{B \cdot e \cdot r}{v}$ . Gemessen werden im Experiment die Größen Beschleunigungsspannung  $U_B$ , der Helmholtzspulenstrom  $I_S$  sowie der Radius  $r$  der Kreisbahn der Elektronen. Die Elementarladung finden Sie als Literaturwert, zum Beispiel in Ihrer Formelsammlung, siehe auch Aufgabe 2d. Die Bahngeschwindigkeit  $v$  der Elektronen erhalten Sie mit  $v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_B}$ , siehe Aufgabe 2b. Wird dieser Ausdruck für die Geschwindigkeit  $v$  in Gleichung ① eingesetzt und die so erhaltene Gleichung quadriert, dann erhält man
- $$m = \frac{B^2 \cdot e \cdot r^2}{2 \cdot U_B} \quad \text{②}$$
- Die magnetische Flussdichte  $B$  erhalten wir mit dem in Aufgabe 3c gefundenen Zusammenhang  $B(I_S) = k \cdot I_S$  mit  $k = \mu_0 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{n}{R}$ . Mit:  $\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$ ;  $n$  = Anzahl der Windungen;  $R$  = Radius und Abstand der Spulen;  $I_S$  = Spulenstrom
- Bestimmen Sie nun experimentell für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen  $U_B$  jeweils drei verschiedene zugehörige Datenpakete mit Radius  $r$  und Spulenstrom  $I_S$ . Ermitteln Sie dabei auch die jeweilige Messunsicherheit.
  - Berechnen Sie nun mit einem Tabellenkalkulationsprogramm die 15 verschiedenen Werte für die Elektronenmasse und bilden Sie daraus das arithmetische Mittel. Vergleichen Sie Ihren experimentell bestimmten Wert unter Berücksichtigung der Messunsicherheit mit Werten aus der Literatur. Identifizieren Sie mögliche Fehlerquellen, die für eventuelle Abweichungen verantwortlich sein können.

*Bemerkung:* Sollten Sie den Versuch „Experimentelle Bestimmung der Elektronenmasse“ mit einem Fadenstrahlrohr und Helmholtzspulen selbst nicht durchführen können, so führen Sie das im Mediencode hinterlegte interaktive Bildschirmexperiment durch. Hier wird die spezifische Ladung eines Elektrons ermittelt. Bestimmen Sie aus Ihrem „experimentell“ gefundenen Wert der spezifischen Ladung dann die Elektronenmasse.



MC 67054-17