

Spezifische Elektronenladung



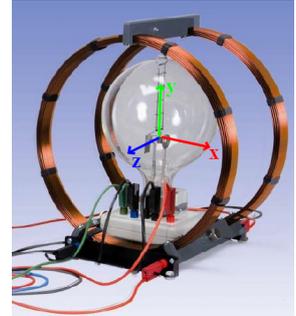
Die Bestimmung der spezifischen Elektronenladung e/m_e war ein grundlegendes Experiment zur Quantennatur der Elektronen. Die Elementarladung können Sie im Millikan-Versuch ermitteln. Demzufolge können somit mit e/m_e die Masse des Elektrons bestimmen. Die Elementarladung ist seit 2019 eine festgelegte Naturkonstante zur Definition der SI-Basiseinheiten (Système international d'unités). Demzufolge ist seitdem die Permeabilität des Vakuums μ_0 nicht mehr exakt $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$, sondern eine Messgröße. Selbstverständlich gilt noch immer $\epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$.

1 Lernziele

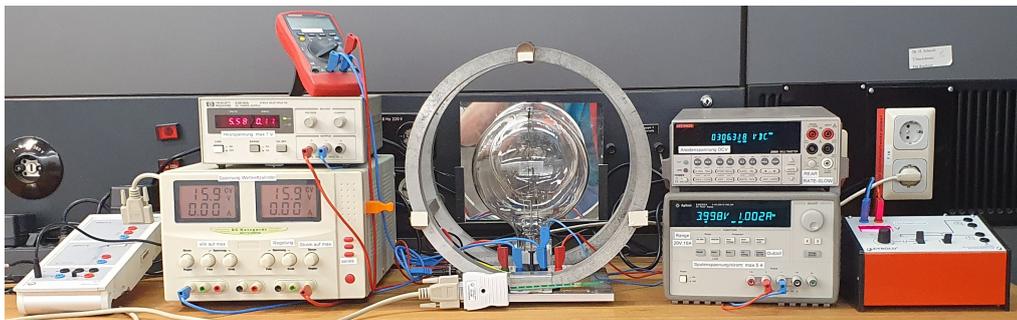
- Homogene Magnetfelder werden mit Helmholtzspulenpaaren erzeugt.
- Das Elektron ist zirka 2000-mal leichter als das Proton/H-Atom.

2 Experimenteller Aufbau – Fadenstrahlrohr

- Fadenstrahlrohr im Helmholtzspulenpaar mit Längenskala, $\Delta y = 2 \text{ cm}$
- Helmholtzspulenpaar, Durchmesser $\bar{d} = 31 \text{ cm}$, 2×129 Windungen
- Netzteil für die Heizwendel, $U_{\text{Heiz}} \leq 7 \text{ V}$
- Netzteil für den Wehnelt-Zylinder $U_{\text{W}} \leq 60 \text{ V}$
- Hochspannungsnetzteil $U \leq 300 \text{ V}$
- Netzteil für das Helmholtzspulenpaar $I_{\text{H}} \leq 5 \text{ A}$
- Multimeter zur Bestimmung der Anodenspannung
- Hall-Sonde zur Messung des magnetischen Feldes \vec{B} .



Spulenpaar mit Koordinatensystem



3 | Messung - | Durchführung - | Auswertung

3.1 Messung des magnetisches Feldes \vec{B} der Helmholtzspulen

Bei diesem Versuch erfassen Sie erst alle Messwerte und werten anschließend die Daten am Computer aus.

- 1) Bestimmen Sie für mehrere Stromstärken $I_{\text{H}} \leq 5 \text{ A}$ durch die Helmholtzspulen die Feldstärke $|\vec{B}|(I_{\text{H}}; z = r/2)$ in der Mitte der vorderen Spule, nicht in der Mitte des Systems. Bitte nicht die Fadenstrahlröhre berühren! Da die Hall-Sonde nur die Projektion des magnetischen Feldes auf das interne Sensorelement erfasst, müssen Sie die Sonde während der Messung leicht drehen, um die maximale Feldstärke zu erfassen.
- 2) Zusatz: Sie können die Feldstärkewerte auch messen, wenn Ihr Telefon magnetische Sensoren hat und Sie die App PhyPhox installiert haben. Der Messbereich ist allerdings oft eingeschränkt, da die Sensoren eher als Kompassersatz ausgelegt sind, wobei nur die Richtung des Feldes bezüglich des Telefonkoordinatensystems aus den Verhältnissen der x, y, z -Komponenten bestimmt wird. Einfach ausprobieren. Hinweis: Wenn die Werte völlig widersprüchlich sind, starten Sie Ihr Telefon neu, damit die Sensoren neu kalibriert werden.
- 3) Messen Sie für eine Stromstärke auch die Abhängigkeit der z -Komponente $\vec{B}_z(x; z = r/2)$ des Feldes für zunehmende Abstände von der Mittelachse nach außen. Den sensor nicht mehr drehen, damit sie immer die z -Komponente erfassen. Diesen Abstand können Sie grob mit einem Lineal messen, um später einen eher qualitativen Verlauf angeben zu können.

Auswertung - Magnetfeld Helmholtzspulen

- Erstellen Sie eine Abbildung mit $|\vec{B}|(I_H; z = r/2)$ und führen Sie eine lineare Regression mit $B = k_{r/2} I_H$ durch, um den Proportionalitätskoeffizienten $k_{r/2}$ mit seiner statistischen Messunsicherheit zu bestimmen.
- Berechnen Sie aus $k_{r/2}$ den Proportionalitätskoeffizienten k , welcher für die Spulenmitte bei $z = 0$ gilt. Vergleichen Sie diesen Wert mit Ihrem berechneten Ergebnis aus der Versuchsvorbereitung. Berücksichtigen Sie dabei Ihre ermittelte Messunsicherheit.
- Erstellen Sie die Abbildung $\vec{B}_z(x; z = r/2)$. Entspricht diese Ihrem erwarteten Verlauf?

3.2 Messungen mit der Fadenstrahlröhre

- Die Helmholtzspulen sind stromfrei, das Licht ist ausgeschaltet.
- Schalten Sie das Netzteil für die Glühwendel ein, es sollten zirka 6.5V eingestellt werden. Messen Sie den fließenden Strom und berechnen Sie die Heizleistung.
- Prüfen Sie nach etwa einer Minute ob die Wendel glüht.
- Stellen Sie die Anodenspannung zur Beschleunigung der e^- von zirka 100V ein. Hinweis: Die Anodenspannung wird gemessen, der angezeigte Wert an der Spannungsquelle zur Einstellung der Spannung entspricht nicht der Anodenspannung, da weitere Geräte mit unterschiedlichen Grundpotenzialen zusammenschaltet sind.
- Im *abgedunkelten Raum* sollte ein schwach blauer, gerader Strahl zu sehen sein, welcher entsteht, weil die e^- das wenige Restgas in der Röhre ionisieren und diese Ionen unter Aussendung von Licht wieder rekombinieren.
- Mit dem ausliegenden Dauermagneten können Sie den Strahl ablenken. Bestimmen Sie so, wo bei dem Magneten der Nord- und wo der Südpol ist. Nicht raten ☹.
- Schalten Sie den Strom für die Helmholtzspulen ein und erhöhen Sie diesen, bis der Elektronenstrahl sich zu einem geschlossenen Kreis mit zirka $d = 8$ cm verbiegt.
- Verändern Sie die Spannung am Wehneltzylinder ($U_W < 60V$) und verringern Sie eventuell die Spannung an der Glühwendel, bis Sie einen dünnen, scharfen Strahl sehen.
- Verändern Sie den Strom durch die Helmholtzspulen so, dass der Durchmesser exakt $d = 10$ cm beträgt. Schätzen Sie durch leichte Variation des Spulenstromes dessen Messunsicherheit ab. Hinweise: Vermeiden Sie Parallaxenfehler. Des Weiteren ist der Austritt aus dem Wehneltzylinder der tiefste Punkt des Kreises. Die Austrittsöffnung ist 5 mm rechts von der Mitte. Daher ist der Strom richtig eingestellt, wenn der höchste Punkt von der Elektronenbahn mit dem rechten Ende der Metallmarke im Fadenstrahlrohr übereinstimmt.
- Notieren Sie immer die zugehörige Anodenspannung, diese ändert sich durch die Spannung am Wehneltzylinder und hat manchmal einen Drift.
- Erfassen Sie so auch die zugehörigen Stromstärken und jeweiligen Anodenspannungen zu den anderen Durchmessern $d = \{6; 4\}$ cm.
- Wiederholen Sie obige Messungen für alle Durchmesser für mindestens vier weitere Anodenspannungen. Bei einer neu eingestellten Anodenspannung müssen Sie die Spannung am Wehneltzylinder und eventuell die Heizleistung ebenfalls verändern, um wieder einen scharfen Strahl zu erhalten.

Auswertung - Fadenstrahlröhre e/m -Bestimmung

- Der Zusammenhang zwischen Elektronenbahnradius $r = d/2$, dem Magnetfeld B und der Anodenspannung ist

$$U = \frac{e}{2m_e} r^2 B^2. \quad (1)$$

Erstellen Sie das zugehörige Diagramm mit $x = r \cdot B$.

- Überlegen Sie, für welchen Messpunkt wird die *relative* Messunsicherheit am größten sein?
- Bestimmen Sie für diesen Messpunkt die Messunsicherheit von $x = r \cdot B$ aus den abgeschätzten Messunsicherheiten von r und B . Diese sollen einen Eindruck vermitteln, wie reproduzierbar Sie die Messung wiederholen können. Tragen Sie die Unsicherheit von x als horizontalen Fehlerbalken

in Ihre Abbildung ein. Schätzen Sie die Messunsicherheit der Anodenspannung ab und tragen Sie diese ebenfalls als Fehlerbalken ein. Tipp: Erhöhen/verringern Sie die Anodenspannung und versuchen Sie wieder den selben Radius einzustellen. Sie bekommen Sie eine quantitative Aussage über die Reproduzierbarkeit.

- d) Ermitteln Sie e/m_e durch Regression an die Parabel $y = ax^2$.
- e) Ermitteln Sie ebenfalls aus der Regression die statistische Messunsicherheit von e/m_e .
- f) Abschließend erstellen Sie ein Diagramm $U = 2(e/m_e)r^2B^2$ mit $x = r^2B^2$. Tragen Sie ebenfalls für einen Punkt die Messunsicherheit ein und zeichnen Sie die zugehörige Gerade und Ihr ermitteltes e/m_e ein.

4 Vorbereitung und Fragen

- 1) Elektrische Feldlinien gehen immer von „+“ nach „-“. Wie ist dies bei magnetischen Feldlinien?
- 2) Skizzieren Sie das magnetische Feld einer langen Spule mit Nord- und Südpol, sowie die Richtung des Stromes und der zugehörigen Feldlinien.
- 3) Welchen Betrag und in welche Richtung zeigt das Magnetfeld der Erde in Deutschland?
- 4) Das rote Ende einer Kompassnadel zeigt immer nach Norden. Ist dieses Ende der magnetische Nord- oder Südpol der Nadel?
- 5) Was zeichnet ein Helmholtzspulenpaar und was ein Anti-Helmholtzspulenpaar aus? Wieso ist der Abstand zwischen den Spulen der halbe Spulenradius?
- 6) Wie ist der mathematische Ausdruck für das Magnetfeld $\vec{B}(\vec{r})$ entlang der z -Achse bei einer kreisrunden Leiterschleife mit dem Radius r , dem Strom I und N Windungen, welche sich in der $x - y$ -Ebene am Koordinatenursprung befindet?
- 7) Wenn die runde Leiterschleife durch eine quadratische mit der Kantenlänge $2r$ ersetzt wird, ist dann das Feld stärker oder schwächer bei gleichem Stromfluss?
- 8) Skizzieren Sie den Verlauf des Magnetfeldes $B_z(z)$ eines Helmholtzspulenpaares und Anti-Helmholtzspulenpaares entlang der Rotationsachse in z -Richtung.
- 9) Um wie viel Prozent ist das Magnetfeld an $B(z = r/2)$ eines Helmholtzspulenpaares abgefallen im Vergleich zu $B(z = 0)$?
- 10) Berechnen Sie den Proportionalitätsfaktor k für den Zusammenhang $B(I_H; z = 0) = k I_H$ aus den angegebenen Spulendaten für Ihren experimentellen Aufbau.
- 11) Leiten Sie den Zusammenhang der Gleichung (1) her.
- 12) Wie groß ist die Geschwindigkeit v von Elektronen nach einer Beschleunigungsspannung $U = 300 \text{ V}$? Berechnen Sie ebenfalls das Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit $\beta = v/c$ und die relative Massenzunahme in %.
- 13) Welchen Wert hat e/m_e mit den bekannten Naturkonstanten?

5 Literatur

Sie können gerne die Wikipedia (bevorzugt in Englisch) zum Nachschlagen benutzen. Die Inhalte sind meist fehlerfreier als in Fachbüchern. Allerdings stellt die Wikipedia die Informationen aus dem Zusammenhang herausgerissen dar, im Gegensatz zu Fachbüchern. Ihr Gehirn kann Zusammenhänge langfristig besser ablegen, wenn die Information im Kontext erarbeitet werden.

- [1] W. Schenk and F. Kremer (Hrsg.), *Physikalisches Praktikum*. Springer, 14. Auflage, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00666-2>.
- [2] D. Meschede, *Gerthsen Physik*. Springer, 25. Auflage, 2015, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5>.
- [3] P. A. Tipler, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer Spektrum, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58281-7>.

6 Zusatzmaterial

Ein Interessantes Video zur Fusionsanlage Wendelstein 7-X in Greifswald finden Sie unter <https://youtube.com/watch?v=24k3KqxtfQM>. Im Weiteren einige aufschlussreiche Bilder:

