

A10 Bestimmung von e/m	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.
(Version: 16. Oktober 2021)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Wie groß ist der Energiezuwachs eines Elektrons nach Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 100 V?

2.) In welcher Form hat das Elektron diese Energie gespeichert? Hängt diese Energie bei konstanter Spannung vom Abstand zwischen Kathode und Anode ab? Begründung!

3.) Welche Wirkung hat ein Magnetfeld auf ein bewegtes Elektron? Notieren Sie die Gesetzmäßigkeit in vektorieller Form (mit Skizze)!

4.) Warum verwendet man zur Erzeugung des Magnetfelds sog. Helmholtzspulen?

5.) Die magnetische Feldstärke einer ($n=1$) kreisförmigen Leiterschleife mit Radius R für Punkte auf der Schleifenachse mit Abstand a zur Schleifenebene ist:

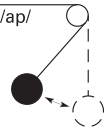
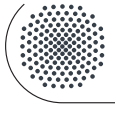
$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(a^2+R^2)^{\frac{3}{2}}}. \text{ Wie ergibt sich daraus Gl.(A10-4)?}$$

6.) Stellen Sie in einer Skizze die durch den in Abbildung A10-3 skizzierten Plattenkondensator erzeugten elektrischen Feldlinien, sowie auch die Feldlinien zwischen Plattenkondensator und Beschleunigungsanode dar.

7.) Dem oben skizzierten System wird nun ein Helmholtz-Spulenpaar hinzugefügt, das ein der elektrischen Kraft entgegenwirkendes, senkrecht zu den elektrischen Feldlinien des Plattenkondensators verlaufendes homogenes Magnetfeld erzeugt. Skizzieren Sie den Verlauf des Elektronenstrahls beim Feldausgleich.

8.) *Nur Physiker:* Skizzieren Sie die Radialabhängigkeit der magnetischen Feldstärke im Innen- und Außenraum eines dicken, geraden, stromführenden Kabels mit Radius R ! Wie wirkt der kreisförmige Fadenstrahl auf die Feldverteilung in der Helmholtzspule? Skizze!

9.) *Nur Physiker:* Wie groß ist die Geschwindigkeit der Elektronen für die höchste beim Versuch verwendete Anodenspannung? Um wieviel Prozent weicht die damit korrigierte relativistische Masse eines Elektrons von der Ruhemasse ab?



A Atomphysik

A10 Bestimmung von e/m

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 7* Elektromagnetismus: Ladungen und Ströme. In: MESCHEDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [2] *Kapitel 3* Statische Magnetfelder. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2013. – E-Book
- [3] *Kapitel 9* Freie Elektronen und Ströme. In: MESCHEDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [4] *Kapitel 2.4* Bewegungen mit nicht-konstanter Beschleunigung. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer, 2015. – E-Book

Stichworte

Spezifische Ladung [1], Elementarladung [1], Bewegung eines Elektrons im elektrischen und magnetischen Feld [2], Lorentz-Kraft [2], Kathode [3], Anode [3], Helmholtz-Spulen [2], Biot-Savart'sches Gesetz [2], Zentrifugalkraft bei Kreisbewegungen [4]

Theoretische Grundlagen

1. Verläuft die Bahn eines Elektronenstrahls senkrecht zur Richtung eines homogenen Magnetfeldes, so durchlaufen die Elektronen eine Kreisbahn mit Radius r . Die auf die Elektronen wirkende Lorentzkraft infolge der magnetischen Feldstärke B wirkt als Zentripetalkraft. Für den Betrag gilt daher:

$$e v B = \frac{mv^2}{r} \quad (\text{A10-1})$$

m : Elektronenmasse v : Elektronengeschwindigkeit e : Elektronenladung

Die Geschwindigkeit der Elektronen ist durch ihre kinetische Energie bestimmt, die sie infolge der Beschleunigungsspannung U des Entladungsrohres erhalten :

$$\frac{m}{2} v^2 = e U \quad (\text{A10-2})$$

Daraus ergibt sich die spezifische Elektronenladung zu

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (\text{A10-3})$$

2. Zur Erzeugung des homogenen Magnetfeldes werden nach Helmholtz zwei vom gleichen Strom gleichsinnig durchflossene parallele Ringspulen mit dem Abstand ihres Radius voneinander benutzt. Diese Anordnung erlaubt, die Größe des Magnetfeldes nach dem Biot-Savartschen Gesetz zu berechnen.

Es ergibt sich für die magnetische Feldstärke entlang der Achse:

$$B \approx \mu_0 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{n I}{R} ; \quad \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \quad \left[\frac{Vs}{Am} \right] \quad (\text{A10-4})$$

I : Spulenstrom; n : Windungszahl einer Spule; R : Radius einer Spule.

Das Magnetfeld der verwendeten Spulen wurde experimentell bestimmt und der aus dem Biot-Savart'schen Gesetz resultierende Vorfaktor von $\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} = 0,716$ zu **0,733 (Typ I)**, **0,735 (Typ II)** und **0,761 (Typ III)** korrigiert.

3. Ein Plattenkondensator mit Plattenabstand d und angelegter Spannung U_P erzeugt in seinem Innern ein homogenes elektrisches Feld. Tritt ein an einer Anode beschleunigtes Elektron mit Beschleunigungsspannung U_A in das elektrische Feld des Plattenkondensators ein, so wirkt die elektrische Kraft $F_{el} = e \cdot \frac{U_P}{d}$ auf die Ladung und beschleunigt sie.

Wirkt die elektrische Kraft des Plattenkondensators in y -Richtung, so wird ein Elektronenstrahl im homogenen elektrischen Feld des Kondensators auf eine parabel-förmige Bahn abgelenkt, da er in y -Richtung beschleunigt wird. Es ergeben sich folgende Teilbewegungen in x - und y -Richtung:

$$x = v \cdot t ; \quad y = \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{U_P}{d} \cdot t^2 \quad (\text{A10-5})$$

a_y : Beschleunigung in y -Richtung v : Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen

Dabei seien x - und y -Richtung so definiert wie in Abbildung A10-1 zu erkennen. Mit Gleichung (A10-2) folgt für die Bahnkurve der Elektronen:

$$y = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_P}{d \cdot U_A} \cdot x^2 \quad (\text{A10-6})$$

4. Wird ein Plattenkondensator mit Kondensatorspannung U_P zusätzlich von einem durch Helmholtz-Spulen erzeugten homogenen Magnetfeld durchzogen, dessen Magnetfeldlinien senkrecht zum elektrischen Feld des Plattenkondensators stehen, so ist es bei geeigneter Wahl der Beschleunigungsspannung U_A , der Kondensatorspannung U_P und des Spulenstroms I möglich, einen Feldausgleich zu erreichen.

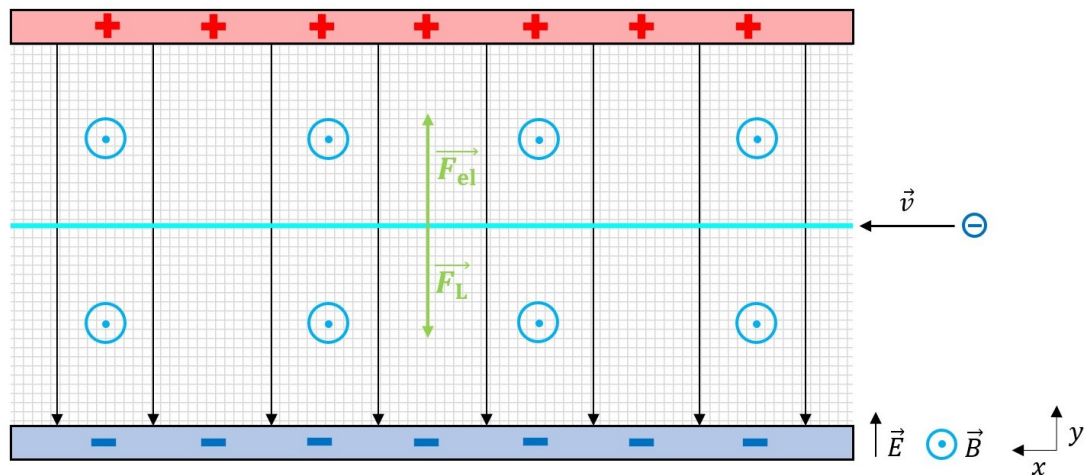


Abb. A10-1: Schematische Darstellung des Feldausgleichs zwischen elektrischem und magnetischem Feld mit von rechts ins Feld eintretendem Elektronenstrahl.

Dabei kompensiert die Lorentzkraft der Spulen die elektrische Kraft des Kondensators. Es gilt also:

$$e \cdot v \cdot B = e \cdot \frac{U_P}{d} \quad (\text{A10-7})$$

Aus Gleichung (A10-7) und dem Energieerhaltungssatz nach Gleichung (A10-2) folgt schließlich für die spezifische Ladung:

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{U_A} \cdot \left(\frac{E}{B}\right)^2 \quad (\text{A10-8})$$

5. Im Praktikum sind etwas unterschiedliche Fadenstrahlrohre verschiedener Hersteller in Verwendung, die sich aber in ihrer grundsätzlichen Funktion nicht unterscheiden.

Die Fadenstrahlrohre vom Typ I und II bestehen aus einem mit Gas gefüllten Glaskolben ($\approx 10^{-1}$ Pa Argon oder Wasserstoff) und einem Elektrodensystem, das einen möglichst gut gebündelten Elektronenstrahl erzeugen soll. Dazu wird die Kathode K durch einen darunter liegenden Heizdraht H (6,3V Versorgungsspannung) erhitzt. Eine kegelförmige Elektrode mit Loch in der Spitze dient als Anode A (max. +300V). Zwischen Kathode und Anode liegt - von außen nicht sichtbar - als weitere Elektrode ein sog. Wehnelt-Zylinder oder ein Steuergitter G auf variablem Potential bzgl. der Kathode. Durch geeignete Wahl dieser Spannung (je nach Bauweise positiv oder negativ relativ zum Kathodenpotential) lässt sich ein gebündelter Strahl einstellen.

Die elektrische Beschaltung eines Fadenstrahlrohres mit Gitter kann man der schematischen Abbildung A10-2 entnehmen. Als Beschleunigungsspannung U wirkt im Wesentlichen die Differenz zwischen Anoden- und Kathodenpotential.

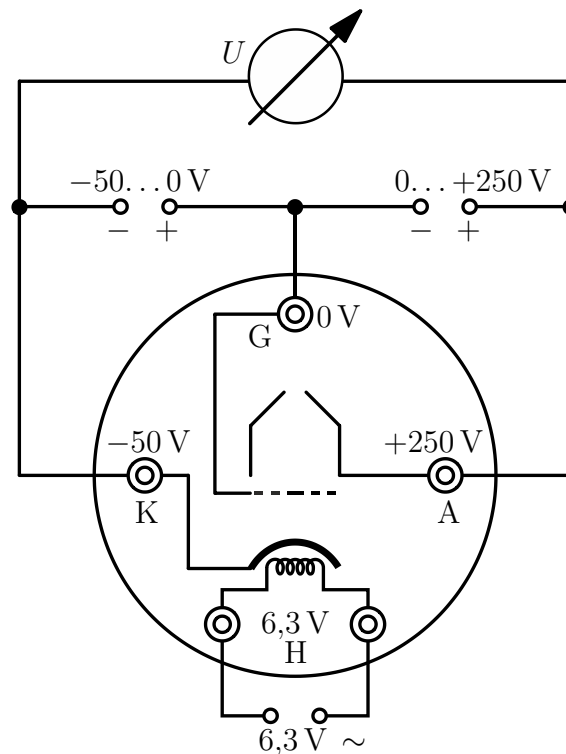


Abb. A10-2: Elektrische Beschaltung des Fadenstrahlrohres vom Typ I und II.

Das Gas im Kolben erfüllt einen doppelten Zweck: Erstens bilden die durch Elektronenstoß erzeugten positiven Ionen eine Raumladungswolke um den Elektronenstrahl. Sie wirken wie eine elektrostatische Linse und konzentrieren die Elektronen auf ein fadenförmiges Bündel, den "Fadenstrahl". Außerdem werden die Gasatome durch Ionisation und Rekombination zum Leuchten angeregt und machen dadurch den Weg des Fadenstrahls sichtbar. Obwohl im Fadenstrahl $10^{15} - 10^{16}$ Elektronen umlaufen, können alle für ein einzelnes Elektron abgeleiteten Gleichungen benutzt werden. Die Elektronen haben alle die gleichen Eigenschaften und sind darum nicht unterscheidbar. Deshalb kann aus dem Verlauf der vielen Elektronen auf die Eigenschaft eines einzelnen geschlossen werden.

Beim Fadenstrahlrohr vom Typ III handelt es sich um einen evakuierten Glaskolben mit Elektrodensystem. Dabei wird die Wolframglühkathode so erhitzt, dass sie Elektronen emittiert. Die maximale Heizspannung, mit welcher die Glühkathode betrieben werden darf, beträgt $U_H = 6,5 \text{ V}$. Die emittierten Elektronen werden zu einer positiven Anode abgelenkt und an ihr mit einer Anodenspannung von $0 \text{ V} \leq U_A \leq 5000 \text{ V}$ beschleunigt. Innerhalb der Fadenstrahlröhre befindet sich ein Plattenkondensator mit Plattenabstand $d = 54 \text{ mm}$, welcher mit einer Spannung von $0 \text{ V} \leq U_P \leq 5000 \text{ V}$ betrieben wird. Der Kondensator erzeugt beim Anlegen einer Spannung ein homogenes elektrisches Feld, welches die Elektronen je nach Einstellung der Spannung unterschiedlich stark ablenkt. Außerhalb der Fadenstrahlröhre befindet sich ein Helmholtz-Spulenpaar mit Windungszahl $n = 320$ und Radius

$R = 68 \text{ mm}$, welches ein weitgehend homogenes Magnetfeld erzeugt. Die elektrische Beschaltung des Fadenstrahlrohres vom Typ III ist Abbildung A10-3 zu entnehmen.

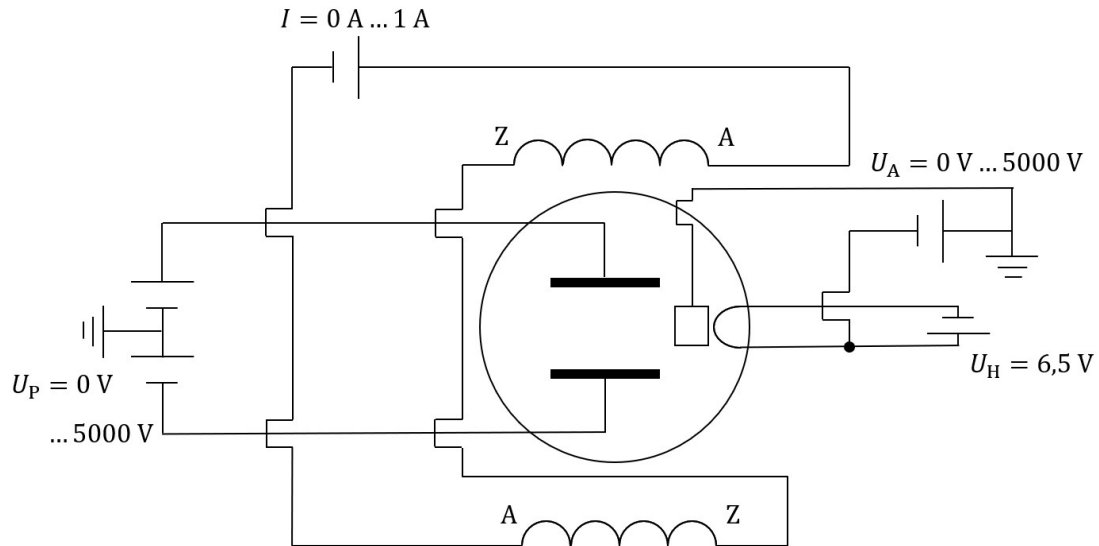


Abb. A10-3: Elektrische Beschaltung des Fadenstrahlrohres vom Typ III.

Messprogramm

Bestimmen Sie die spezifische Elektronenladung mithilfe des Fadenstrahlrohres vom Typ I/II und mithilfe von Typ III. Dazu sind folgende Messreihen durchzuführen:

Typ I/II:

1. Bei einem festen Spulenstrom im Bereich von $I = 1 \text{ A}$ bis $1,8 \text{ A}$ wird die Beschleunigungsspannung von $U = 75 \text{ V}$ bis 300 V variiert und der Radius der resultierenden Elektronenbahn gemessen. Der Aufbau Typ I verfügt über 4 Messstege, die Radien von 2, 3, 4 und 5 cm entsprechen. Bei Typ II wird die Bestimmung von r durch parallaxenfreie (!) Peilung auf die Spiegelskala vorgenommen.
2. Bei einer festen Beschleunigungsspannung wird der Spulenstrom variiert und wiederum der Radius der Elektronenbahn bestimmt.
3. Für verschiedene Beschleunigungsspannungen wird der Spulenstrom so eingestellt, dass sich jeweils der selbe Radius der Elektronenbahn einstellt.

Für alle drei Messreihen sind die resultierenden Werte für U , I und r zu notieren. Die Kathodenspannung ist bei jedem Messpunkt so einzuregeln, dass sich immer optimale Strahlschärfe ergibt.

Stellen Sie die Ergebnisse $r^2(U)$, $I^2(1/r^2)$ und $I^2(U)$ graphisch dar und ermitteln Sie aus der jeweiligen Steigung mithilfe der Gleichungen A10-3 und A10-4 den Wert der spezifischen Elektronenladung. Bewerten Sie die drei Methoden bezüglich der Messgenauigkeit.

Typ III:

1. Messen Sie bei variabler Beschleunigungsspannung $U_A = 0$ V bis 5000 V und variablem Spulenstrom I die Ablenkung des Elektronenstrahls. Dabei darf der Spulenstrom nicht größer als 1 A werden.
2. Bei fester Beschleunigungsspannung im Bereich von $U_A = 0$ V bis 5000 V soll für verschiedene Spulenströme $I = 0$ A bis 1 A die Kondensatorspannung U_P so eingestellt werden, dass ein Feldausgleich stattfindet. Legen Sie die Priorität dabei darauf, dass der Elektronenstrahl einen möglichst linearen, nicht notwendigerweise horizontalen, Verlauf hat.

Berechnen Sie für alle Messungen mithilfe der Gleichungen (A10-3) und (A10-8) die spezifische Ladung.

Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse von Typ I/II mit Typ III.

Hinweise

- Die Apparatur darf erst in Betrieb genommen, wenn die Schaltung vom Assistenten geprüft ist. Die Schaltung soll nicht abgebaut werden!
- Glühkathode nicht länger als erforderlich heizen. Bei längeren Messpausen sind die Spannungen auf Null zu drehen, um die Lebensdauer der (teuren!) Röhre zu erhöhen.
- Die Wehneltspannung der Fadenstrahlröhren vom Typ I und II ist nach jeder Anodenspannungsänderung auf optimale Strahlbündelung nachzuregeln.
- Beim Abmessen des Kreisdurchmessers der Fadenstrahlröhre vom Typ II ist auf Parallaxenfreiheit zu achten.
- Bei Benutzung der Fadenstrahlröhre vom Typ III wird mit Hochspannungen gearbeitet. Verwenden Sie Hochspannungsschutzstecker und vermeiden Sie den Kontakt mit hochspannungsleitenden Kabeln. Wenn Sie den Kondensator entladen möchten müssen Sie beide Platten auf Erdpotential bringen!
- Bei der Fadenstrahlröhre vom Typ III handelt es sich um einen evakuierten Glaskolben. Arbeiten Sie also mit Vorsicht, da aufgrund des Unterdruckes Implosionsgefahr besteht!