



Physikalisches Praktikum I

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik, Biomedizintechnik
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, M.Sc. M. Gilbert

E 07 Elektronen im Magnetfeld

(Pr_PhI_E07_Elektronenröhre_6, 04.04.2023)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
3.			
Protokoll ist ok	<input type="radio"/>	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	<input type="radio"/>		
Teilnahme erfordert erfolgreiches Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung).			

1. Ziel

Elektromagnetische Effekte bilden die Grundlage fast aller technologisch wichtiger Geräte wie Fernseher, Oszilloskop, Drucker, Magnetometer, Massenspektrometer oder Schreib- und Lesekopf von Festplatten im Computer. In diesem Praktikum untersuchen wir die Grundlagen der Bewegung elektrischer Ladung in elektrischen und magnetischen Feldern.

2. Theorie

2.1 Elektronen im elektrischen Feld

Auf ein Elektron mit der negativen Ladung $q = -e$ und der Masse m_e wirkt im elektrischen Feld E eine Kraft längs der E-Feldlinien

$$(1) \quad F = -eE \quad \text{Kraft im E-Feld (Einheit Newton)}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad \text{Elektronenladung (Einheit Coulomb)}$$

Das elektrische Feld E liegt in unserem Fall zwischen zwei Metallplatten (Plattenkondensator) und kann als homogen betrachtet werden. Aus dem Plattenabstand d und der anliegenden elektrischen Spannung U berechnet man das E-Feld zu

$$(2) \quad E = U/d \quad \text{Elektrisches Feld (Einheit Volt / Meter)}$$

Das Elektron wird im E-Feld mit a beschleunigt, gemäß dem newtonschen Gesetz

$$(3) \quad F = m_e a$$

$$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{Elektronenmasse}$$

Mit dem Durchlaufen der Spannung U nimmt das Elektron die elektrische Energie auf

$$(4) \quad W_{el} = QU, \quad \text{Elektrische Energie (in Joule oder Elektronenvolt*)}$$

in unserem Fall $W_{el} = eU$, da es sich um eine Elektronenladung handelt.

Diese Energie besitzt das Elektron nun in Form kinetischer Energie $W_{kin} = \frac{1}{2} m_e v^2$. Für langsame (nicht-relativistische) Elektronen ergibt sich die Geschwindigkeit v als Funktion der Spannung

$$(5) \quad v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} U}$$

Tritt ein Elektron mit der Geschwindigkeit v_x senkrecht in das homogene E_y -Feld ein, so wird es zur positiven Platte hin beschleunigt und beschreibt eine Parabel. Die Rechnung dazu verläuft analog zur Bestimmung der Flugbahn eines Masseteilchens im Gravitationsfeld. Auf diesem Effekt basiert die Ablenkung des Elektronenstrahls in einem Oszilloskop, Fernsehrohr oder des geladenen Tintentropfens im Tintenstrahldrucker.

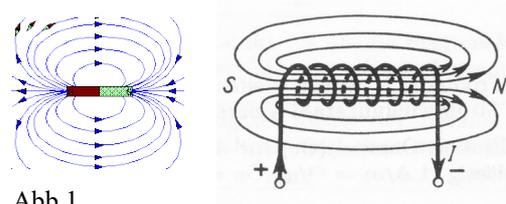
*Hinweis: Die Einheit Elektronenvolt ist eine sehr kleine Energiemenge $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

2.2 Elektronen im Magnetfeld

Magnetische Felder werden z.B. durch Permanentmagnete erzeugt. Außerhalb des Magneten verlaufen die Feldlinien vom Nord- zum Südpol. Aber auch elektrische Ströme erzeugen Magnetfelder. Wickelt man einen Draht der Länge L zu einer Spule mit n Windungen, und fließt ein Strom I durch den Draht, so erhält man im inneren der Spule ein homogenes Magnetfeld H mit

$$(6) \quad H = \frac{nI}{L} \quad (\text{Einheit A/m})$$

Im Außenraum der Spule entspricht der Feldverlauf dem eines Stabmagneten. Die häufig gebräuchliche Größe ist der magnetische Fluss B



$$(7) \quad B = \mu_0 \mu H \quad (\text{Einheit Tesla} = \text{T})$$

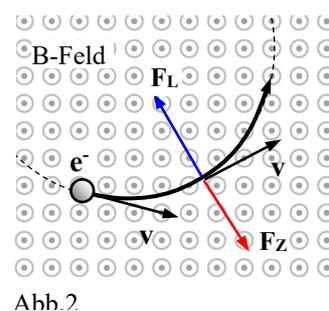
$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m} \quad \text{Permeabilitätskonstante}$$

$$\mu = 1 \quad \text{für Vakuum}$$

Bringt man eine Ladung q in das Magnetfeld, so erfährt sie keine Kraftwirkung, wenn sie im Feld ruht, oder wenn sie sich parallel zu den Feldlinien bewegt. Wenn die Ladung sich aber mit einer Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} senkrecht zu den B -Feldlinien bewegt, so erfährt die Ladung die Lorentzkraft F_L , welche senkrecht zu den Feldlinien und auch zur Geschwindigkeit steht.

$$(8) \quad \begin{aligned} F_L &= qv_{\perp}B \\ \vec{F}_L &= q\vec{v} \times \vec{B} \end{aligned} \quad \text{Lorentzkraft}$$

Stehen v und B nicht senkrecht zueinander, so gilt die zweite Gleichung. Sie drückt den Sachverhalt durch das Kreuzprodukt der Vektoren aus. Es gilt hierbei natürlich die Rechte-Hand-Regel, mit der die Richtung der Lorentzkraft bestimmt wird. Tritt ein Elektron mit der Geschwindigkeit v senkrecht in ein homogenes Magnetfeld, entsteht eine Kreisbahn mit dem Radius r , weil die Lorentzkraft und die Zentrifugalkraft F_Z sich die Waage halten. In Abb.2 zeigen die B -Feldlinien senkrecht zur Papierebene.



$$(9) \quad F_z = m_e \frac{v^2}{r}$$

Da für alle Orte auf der Kreisbahn $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ gilt, nimmt das Elektron keine Energie auf und seine Geschwindigkeit bleibt konstant. Mit $F_z = F_L$ lässt sich aus Gl. 8 und 9 nun direkt die Kreisbahn des Elektrons im Magnetfeld bestimmen

$$(10) \quad r = \frac{m_e v_{\perp}}{eB}$$

Tritt das Elektron *nicht* senkrecht in das Magnetfeld ein, so ergibt sich *keine* Kreis- sondern eine Spiralbahn. Verantwortlich ist die Geschwindigkeitskomponente parallel zu B . Diese erzeugt keine Lorentzkraft aber sie „zieht“ den Kreis zur Spirale auf.

Aus der Kreisbahn (Gl. 10) lässt sich nun direkt die fundamentale Größe e/m_e des Elektrons bestimmen: der Radius r wird gemessen, der magnetische Fluss B sowie die Geschwindigkeit eingestellt. Für die praktische Messung von e/m_e bestimmen wir den Radius r der Elektronenbahn als Funktion der Elektrogeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit wird dabei durch die Beschleunigungsspannung U variiert. Mit Gl. 5 erhalten wir folgenden Zusammenhang

$$(11) \quad U = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} r^2 B^2$$

Die genaue Kenntnis des Wertes e/m_e ist u.a. für das quantitative Verständnis der Atomphysik von enormer Bedeutung gewesen.

2.3.1 Das Fadenstrahlrohr

Das Fadenstrahlrohr besteht aus einem kugelförmigen Glaskolben, der mit dem Edelgas Neon gefüllt ist (Unterdruck $p = 1,3 \text{ Pa}$). Die Elektronen werden aus einer beheizten Elektrode (Heizspannung $U_H = 6 - 8 \text{ V}$, Strom $I = 0,15 \text{ A}$) emittiert (thermisches Verdampfen). Die positive hohe Anodenspannung ($U_A = 0 - 400 \text{ V}$) zwischen Kathode und Anode beschleunigt die Elektronen, welche dann durch das Loch im Anodenblech in den vom homogenen B-Feld durchsetzten Raum treten (Abb.3).

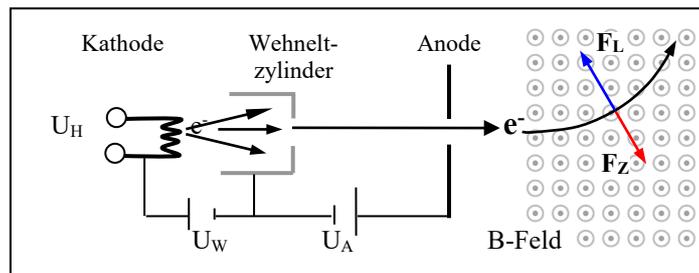
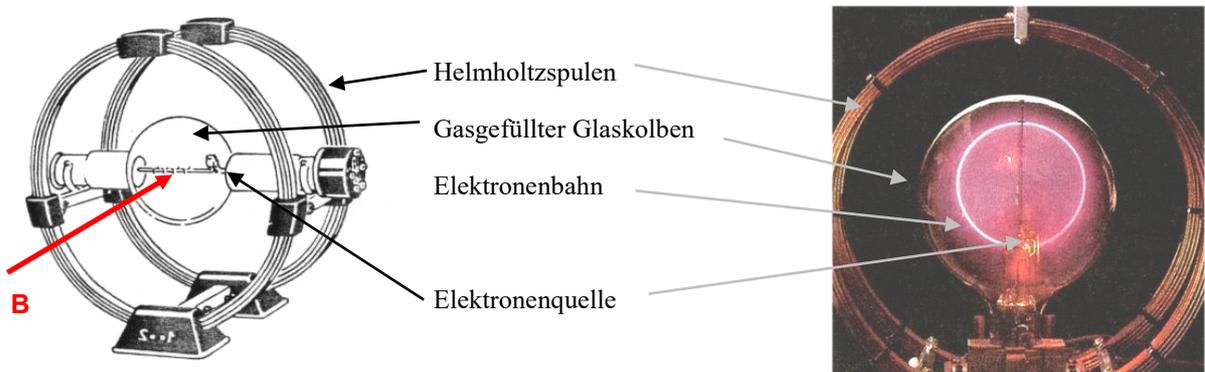


Abb.

Der Wehneltzylinder dient der Fokussierung und Bündelung des Elektronenstrahls. Er bildet zusammen mit der Anode eine elektrostatische Sammellinse für den Elektronenstrahl. Die negative Wehneltspannung U_W bremst die Elektronen allerdings etwas ab, was in der späteren Auswertung zu berücksichtigen ist. Die Elektronen stoßen auf ihrem Weg mit den Neon-Atomen zusammen, ionisieren diese und regen sie damit zum Leuchten an. Man sieht also nicht die Elektronen selbst, sondern die leuchtenden Ne-Atome welche die Spur der Elektronen abzeichnen!

2.3.2 Das Helmholtzspulenpaar

Das Helmholtzspulenpaar ist eine präzise Spulenanordnung, die ein homogenes Magnetfeld erzeugt, das den transversal eintreffenden Elektronenstrahl ablenkt. Die Feldstärke im Bereich der Elektronenbahn beträgt

$$(12) \quad B = \mu_0 \mu \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{nI}{R_H}$$

R_H = Spulenradius, wird angegeben

n = Windungszahl, wird angegeben

I = Spulenstrom

μ_0 = magnetische Feldkonstante

μ = Permeabilität (im Vakuum $\mu = 1$)

Der Zusammenhang der für die Messung von e/m_e notwendigen Größen I , U und r ergibt sich aus Gl. 11 und Gl. 12 zu

$$(13) \quad U = \frac{e}{2m_e} \left(\frac{4}{5} \right)^3 \left(\mu_0 \mu \frac{n}{R_H} \right)^2 r^2 I^2$$

Wird U als Funktion von $r^2 I^2$ aufgetragen, so ergibt sich demnach ein linearer Zusammenhang. Aus der Steigung der Geraden kann durch passende Umformung anschließend die gesuchte Größe e/m_e berechnet werden.

Fragen zur Zulassung

- Wie werden freie Elektronen „erzeugt“?
- Wie werden Sie beschleunigt?
- Durch welche Felder kann man Elektronen ablenken?
- Was ist die Lorentzkraft, auf wen und wie wirkt sie?
- Wie wird die Bahn der Elektronen sichtbar gemacht?
- Was ist ein Fadenstrahlrohr?
- Was ist ein Helmholtzspulenpaar?

3 Durchführung

Für den Versuch werden zwei Labornetzteile verwendet. Eines stellt die Beschleunigungsspannung an der Anode bereit und liefert bis zu 200 V. Daher gilt: Die stromführenden Kabel zur Anode während des Betriebes nicht ausstecken! Lebensgefahr!

Vorbereitung

- 3.1 Die Beschleunigungsspannung wird hochgeregelt, bis der Fadenstrahl sichtbar wird. Wenn nötig, wird die negative Wehneltspannung nun im Bereich $-40\text{V} < U_W < 0\text{V}$ so eingestellt, dass der Strahl möglichst scharf wird. Halten Sie U_W während des ganzen Versuchs konstant!
- 3.2 Probieren Sie mit einem kleinen Stabmagneten die Wirkung des Magnetfeldes auf die bewegte Ladung. (Achtung: nur unter Aufsicht des Betreuers)

e/m-Bestimmung

- 3.3 Nehmen Sie mehrere Wertetripel von Radius r , Spulenstrom I und Beschleunigungsspannung U_A auf. Stellen Sie zunächst bei hoher Spannung (ca. 200 V) den Strom so ein, dass die Elektronenbahn den Radius $r = 50$ mm besitzt. Damit haben Sie bereits das erste Wertetripel. Senken Sie die Spannung und passen Sie den Strom so an, dass der Radius wieder 50 mm beträgt. Wiederholen Sie den Vorgang sieben Mal. Wiederholen Sie das Vorgehen danach für die Radien 40 mm und 30mm, sodass Sie insgesamt wenigstens 20 Wertetripel erhalten. Beachten Sie dabei folgende Grenzen:

$$100\text{ V} < U_A < 200\text{ V}$$

$$0\text{ A} < I < 2,0\text{ A}$$

Schätzen Sie den Fehler für den Radius ab und notieren Sie die Messungenauigkeiten für I und U_A . Notieren Sie sich die Windungszahl und den Durchmesser der Spulen (siehe Aufbau).

Achtung: wird U_W während der Messreihe variiert, müssen Sie alle Messungen wiederholen!

4 Auswertung

- 4.1 Berechnen Sie die Elektronengeschwindigkeit für die Beschleunigungsspannung $U = 150$ V.
- 4.2 Berechnen Sie den Energiegewinn eines Elektrons bei einem vollen Kreisumlauf.
- 4.3 Tragen Sie die Beschleunigungsspannung U als Funktion von $r^2 I^2$ auf. Zeichnen Sie dabei ein gemeinsames Diagramm für alle Wertetripel. Berechnen Sie die Fehlerbalken für $r^2 I^2$ mittels Fehlerfortpflanzung.

Legen Sie eine einzelne Ausgleichsgerade durch alle Messpunkte. Aufgrund der Wehneltspannung läuft die Gerade nicht zwingend durch den Ursprung.
- 4.4 Durch Ableiten der Gl. 13 kann aus der Steigung die gesuchte Größe e/m_e berechnet werden. Bestimmen Sie den Steigungsfehler über zwei zusätzliche Steigungen (minimal und maximal) und errechnen Sie daraus den Fehler der gesuchten Größe e/m_e .
- 4.5 Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert und diskutieren Sie eventuelle Abweichungen.



Betriebsanweisung für Elektronenstrahlröhre mit Helmholtzspulenpaar

Der Versuchsaufbau beinhaltet: evakuierte Elektronenstrahlröhre mit Vorschaltgerät für Heiz- und Beschleunigungsspannung, Helmholtz-Spulenpaar mit Stromversorgung.

Am Vorschaltgerät der Röhre ist die Beschleunigungsspannung von 100- 350V einstellbar. Die Stromversorgung der Spule wird maximal auf 3 A geregelt

- Betreiben Sie die Geräte nur so, wie in der Praktikumsanleitung beschrieben.
- Die Anordnung darf ausschließlich mit Sicherheits-Patchkabeln (isolierte Steckerhülse) betrieben werden.
- Die Elektronenstrahlröhre benötigt eine Aufwärmphase von 10min in der lediglich die Heizspannung (6V) an der Glühwendel angelegt ist.
- **Die Beschleunigungsspannung von bis zu 350V ist bei direktem Kontakt lebensgefährlich!** Sollten Sie bemerken, dass jemand Kontakt zu stromführenden Bauteilen hat, betätigen Sie sofort den Not-Aus-Schalter.
- Lösen Sie unter keinen Umständen die Steckverbindungen.
- Verändern Sie nicht den Aufbau der Versuchsanordnung. Wenn der Elektronenstrahl schlecht sichtbar ist, wenden Sie sich an Ihren Betreuer.
- Während des Experimentes dürfen Änderungen von Beschleunigungsspannung und Spulenstrom nur von ein und derselben Person vorgenommen werden.
- In der Elektronenstrahlröhre herrscht Unterdruck → Implosionsgefahr! Berühren Sie im Betrieb weder mit Ihren Händen, noch mit irgendwelchen Gegenständen die Röhre. Sollten Sie an der Röhre Risse oder andere Schäden erkennen, melden Sie dies dem Betreuer.