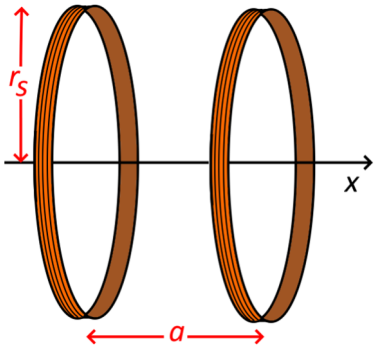
AB (Elektronen-)Flugbahn im Magnetfeld: Das Fadenstrahlrohr

eA-Kurs

Wir wollen uns die Flugbahn geladener Körper wie Elektronen durch ein Magnetfeld ansehen. Am Ende werden wir es sogar schaffen, die sogenannte „spezifische Ladung“ $\frac{e}{m_e}$ zu bestimmen. Und da wir e bereits kennen, können wir daraus dann auch die Masse m_e von Elektronen ermitteln.

Teil 1: Das Helmholtz-Spulenpaar



Der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz hat sich eine besondere Anordnung von zwei schmalen Spulen mit großem Durchmesser überlegt. Das kann etwa so aussehen wie hier rechts dargestellt. (Aufgaben leicht abgewandelt aus Abitur 2014, Vorschlag 1, Aufgabe 1).

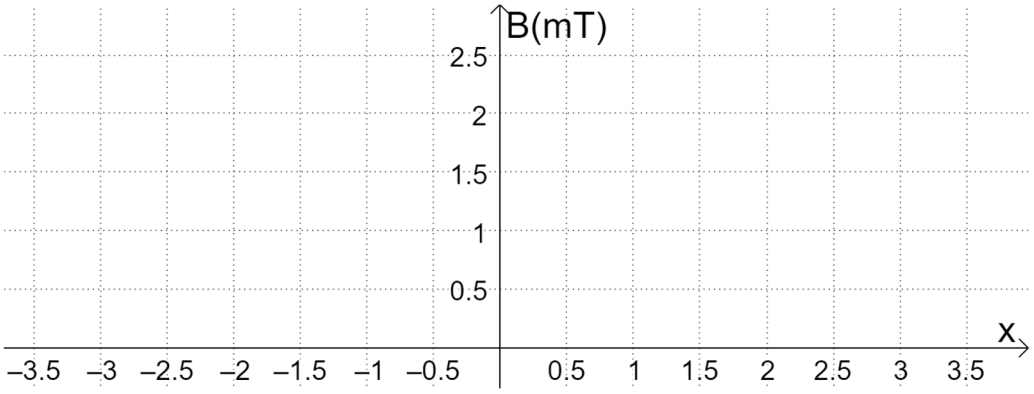
Hier haben die Spulen mit Radius $r_s = 2cm$ auch einen Abstand von $a = 2cm$. Die Mitte der linken Spule sei an der Position $x = 0$. Sie haben 135 Windungen und werden von einem Strom der Stärke $I = 400mA$ durchflossen.

1.1) Mit dem Magnetfeldsensor wird nun die magnetische Flussdichte B_1 der linken Spule in axialer Richtung in Abhängigkeit von der *x*-Koordinate gemessen. Die Tabelle zeigt einige Messergebnisse.

x in cm	-3,5	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0,0
B_1 in mT	0,18	0,24	0,36	0,56	0,80	1,20	1,58	1,82
B_2 in mT								

x in cm	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	
B_1 in mT	1,60	1,25	0,88	0,57	0,38	0,25	0,18	
B_2 in mT								

Zeichnen Sie auf der Grundlage der Messdaten aus Tabelle 2 das Diagramm (Vorschlag: in blau)



1.2) Nun wird auch die 2. Spule angeschlossen und erzeugt ein prinzipiell identisches Magnetfeld, nur entsprechend auf ihre Position verschoben.

Tragen Sie (dort wo möglich) die passenden Werte für B_2 in die dritte Zeile zu den obigen Werten ein. Ergänzen Sie den Graphen zum Feld der zweiten Spule in das bereits vorhandene x-B-Diagramm. Vorschlag: in grün.

1.3) Die Gesamtfeldstärke ergibt sich aus der additiven Überlagerung der beiden Einzelfelder. Bestimmen Sie jeweils die Gesamtfeldstärke an allen Positionen, wo das möglich ist. (4. Zeile der Tabelle). Zeichnen Sie auch das Diagramm der Gesamtfeldstärke mit ein. Vorschlag: in rot.

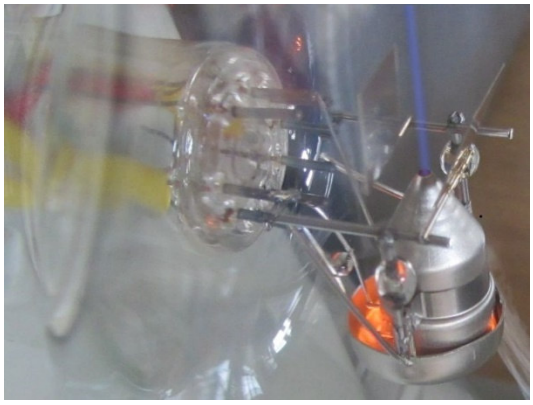
1.4) Beurteilen Sie, ob es einen Bereich gibt, an dem das Gesamtfeld als homogen angesehen werden kann, d.h. die einzelnen Messwerte um nicht mehr 5% vom Durchschnittswert in diesem Bereich abweichen.

1.5) Laut Literatur kann man die Feldstärke im homogenen Bereich mit Hilfe der Formel $B = \mu_0 \cdot 0{,}8^{1{,}5} \cdot \frac{n \cdot I}{r_S}$ * berechnen. Prüfen Sie, ob die Formel zu den obigen Messdaten zumindest halbwegs passt.

* $\mu_0 \approx 1{,}257 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$ *magn. Feldkonstante, n: Windungszahl, I: Stromstärke, r_S: Radius der Spule(n)*

Teil 2: Die Flugbahn qualitativ

Im Folgenden erzeugen wir einen Elektronenstrahl mit Hilfe einer nach oben gerichteten Elektronenkanone, der dann durch den homogenen Feldbereich der Helmholtzspulen geschossen wird.



2.1) Zeichnen Sie den inneren Aufbau der Elektronenkanone. Beschreiben Sie ihre Funktionsweise. Da das eine Wiederholungsaufgabe ist, reicht es diesmal, nur Stichpunkte zu notieren. *(Es sei denn, Sie haben damals keinen sauber ausformulierten Text produziert – dann jetzt aber.)*

2.2) Schauen wir uns nun das Experiment an. Wenn wir keine realen Versuchsaufbau im Unterricht haben sollten, können Sie das auch hier auf Video sehen: https://youtu.be/pw8M7rr3BXU . Ansehen bis zur Stelle 01:53 reicht erstmal.

Skizzieren Sie selbst ordentlich den ganzen Versuchsaufbau und die zu beobachtende Bahnkurve.
Die Schaltkreise inkl. Spannungsquellen und Messgeräte können Sie in der üblichen Symbolik vereinfachen.

2.3) Begründen Sie mit Hilfe einer Zeichnung, warum hier diese Bahnkurve entsteht. Insbesondere ist der Unterschied zur Bahnkurve im elektrischen (Quer-)Feld interessant.

[Ggf. bearbeiten wir diesen Aufgabenteil gemeinsam.]

Teil 3: Die Formelherleitung

Der Quotient $\frac{e}{m_e}$ heißt „spezifische Ladung“ und ist in vielen Formeln wichtig. Mit ihm können wir aber auch konkret die Elektronenmasse m_e bestimmen, weil wir e ja schon kennen.

3.1) *Wiederholung: Woher kennen wir e?*

3.2) Der Anfang scheint nicht schwer zu sein. Wir nutzen einen Kräfteansatz, indem wir feststellen,

dass die _____-kraft wie eine _____-kraft wirkt (→ 2.3).

D.h. wir können die Formeln gleichsetzen.

a) Machen Sie das und leiten Sie daraus die Formel $\frac{e}{m_e} = \frac{v}{B \cdot r}$ her.

b) Begründen Sie, warum es mit der in 3.2a) hergeleiteten Formel ein Problem gibt.

3.3) a) Aber es gilt ja auch noch die Energieerhaltung in der Elektronenkanone. Die Herleitung von v daraus sollte inzwischen bekannt sein – notieren Sie sie hier nochmal (allein, um sich zu erinnern…)

Ergebnis: $v = \sqrt{2 \cdot \ldots}$

b) Aber auch hier gibt es ein Problem! Benennen Sie es:

3.4) *(eA)* So, jetzt machen wir ernst: Mit beiden Formeln zusammen kommen wir ans Ziel. Setzen Sie die Formel aus Aufg. 3.3) in die aus Aufg. 3.2) ein und wurschteln Sie mal algebraisch ein gutes Stück herum, bis Sie eine Formel für $\frac{e}{m_e}$ bzw. eine für m_e gefunden haben! Ich bin gespannt!
In einem gA-Kurs können wir die Aufgabe gemeinsam bearbeiten.

Teil 4: Bestimmen von $\frac{e}{m_e}$ und damit m_e

Wir kommen zum Finale: Mit unserem Experiment (oder notfalls dem Video) bestimmen wir die spezifische Ladung $\frac{e}{m_e}$ und die Masse m_e von Elektronen.

4.1) Notieren Sie die Formel aus 3.4) nochmal und überlegen Sie, ob Sie alle zugehörigen Eingangsgrößen kennen. Sammeln und notieren Sie diese dann dazu:

Ich weise insbesondere auf Aufgabe 1.5 hin.

4.2) Bestimmen Sie $\frac{e}{m_e}$ und m_e.

4.3) Recherchieren Sie den Literaturwert von m_e. Berechnen Sie die relative Abweichung unseres Messwerts vom Literaturwert und beurteilen Sie damit, ob unsere Messung brauchbar ist.