

Elektrisches und magnetisches Feld

Veranschaulichung der fundamentalen Kraftwirkungen auf Ladungen

Versuchsvorbereitung

... bedeutet, sich vor dem Labortermin mit Begriffen und Funktionsprinzipien vertraut zu machen. Gute Vorbereitung heißt, diese jemand anderem erklären zu können !

1.) Informieren Sie sich über folgende Begriffe :

Kraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Wurfparabel, Zentripetalkraft, Ladung und spezifische Ladung, Coulombkraft, elektrisches Feld, Potential, Lorentzkraft, magnetisches Feld

2.) Erarbeiten Sie für sich die Wirkungsweise folgender Anordnungen :

Braunsche Röhre, Elektronenablenkung durch Kondensatorplatten und Spulen

3.) Leiten Sie sich die nachstehend verwendete Beziehung (10) her

Literatur :

Hering, Martin, Stohrer : Physik für Ingenieure, 11. Auflage (2012), Springer

Nerretter: Grundlagen der Elektrotechnik, (2006), fv Leipzig - Hanser

Einführung

Elektrisches Feld

Elektrische Ladungen sind von elektrischen Feldern umgeben. Zu ihrer Veranschaulichung dient die Modellvorstellung der Feldlinien. Eine solche Linie beschreibt die Richtung der Kraft des elektrischen Feldes auf eine positive Probeladung.

Besonders einfach sind die Verhältnisse in einem homogenen E-Feld. Darin verlaufen alle Feldlinien parallel. Ein solches Feld entsteht, wenn an zwei ausgedehnte, planparallele Platten im Abstand d eine Spannung U_P angelegt wird. Die elektrische Feldstärke E in einem solchen Plattenkondensator berechnet sich zu:

$$E = \frac{U_P}{d} \quad (1)$$

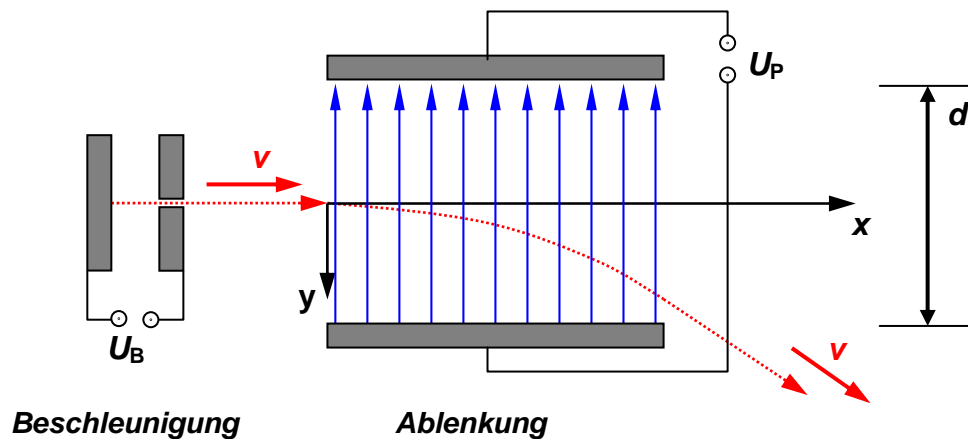
Die Kraft F_{el} auf die Ladung q folgt daraus zu

$$F_{el} = E q \quad (2)$$

Bringt man ein geladenes Teilchen der Ladung q und der Masse m in ein E-Feld, so beschleunigt die Kraft F_{el} das Teilchen in Richtung der Feldlinien. Die Beschleunigung a folgt direkt aus dem 2. Newtonschen Axiom zu

$$a = \frac{F_{el}}{m} = \frac{E q}{m} \quad (3)$$

Ein geladenes Teilchen werde mit einer Beschleunigungsspannung U_B auf eine Geschwindigkeit v in x -Richtung gebracht und mit dieser im - weiteren konstanten - Geschwindigkeit in eine Ablenkeinheit eingeschossen (siehe nachstehende Skizze).



Dann führt das Teilchen in x -Richtung eine gleichförmige Bewegung mit $v = \text{const}$ durch, während sich in y -Richtung eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ergibt. Es bewegt sich also entlang einer Parabelbahn in der x - y -Ebene. Die dafür gültigen Weg-Zeit Gesetze für die einzelnen Koordinatenrichtungen lauten :

$$x(t) = v t \quad (4a)$$

$$y(t) = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} E \frac{q}{m} t^2 \quad (4b)$$

Die Gleichungen (4a) und (4b) beschreiben die Bahnkurve in der sogenannten Parameterdarstellung. Im vorliegenden Fall ist der Parameter die Zeit t . Elimination von t ergibt daraus die Bahnkurve $y(x)$ als Funktion der Ortskoordinate x :

$$y(x) = \frac{1}{2} \frac{U_P}{d} \frac{q}{m} \frac{x^2}{v^2} \quad (4c)$$

Die Geschwindigkeit v in x -Richtung hängt von der Beschleunigungsspannung U_B ab

$$v^2 = 2 \frac{q}{m} U_B \quad (5)$$

und somit ergibt sich schließlich für den Verlauf der Parabelbahn :

$$y = y(x) = \frac{x^2}{4 d} \frac{U_P}{U_B} \quad (6)$$

Magnetisches Feld und Lorentzkraft

Das elektrische Feld wirkt sowohl auf ruhende als auch auf bewegte Ladungen. Im Gegensatz dazu hat das magnetische Feld nur eine Wirkung auf bewegte Ladungen.

Bewegt sich eine Ladung q mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu den Feldlinien durch ein B -Feld dann wirkt auf sie die Lorentzkraft F_L . Die Lorentzkraft steht immer senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladung. Ihr Betrag ist in diesem Spezialfall :

$$F_L = q v B \quad (7a)$$

Die Lorentzkraft ist ein Vektor und im allgemeinen als Vektorprodukt von Geschwindigkeit und Magnetfeld zu berechnen, ihre Richtung folgt aus der Rechte-Hand-Regel

$$\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7b)$$

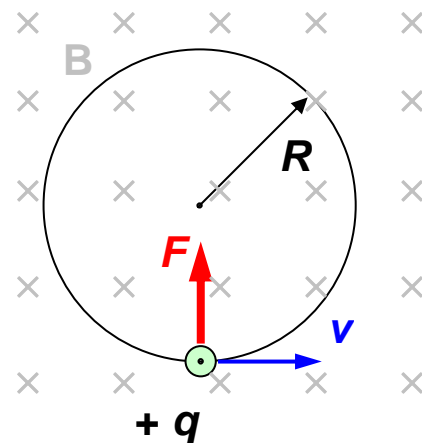
Da die Lorentzkraft immer senkrecht zur Bahnbewegung wirkt, beschreiben geladene Teilchen der Geschwindigkeit v im homogenen B-Feld eine Kreisbahn mit Radius R . Die Lorentzkraft übernimmt die Funktion der Zentripetalkraft und es gilt (in Beträgen):

$$q v B = \frac{m v^2}{R} \quad \text{und damit} \quad R = \frac{m v}{q B} \quad (8)$$

Der Radius R der Kreisbahn hängt also von der spezifischen Ladung q/m des bewegten Teilchens ab. Wird das Teilchen mit einer Beschleunigungsspannung U_B auf die Geschwindigkeit v gebracht, folgt unter Verwendung von (5) schließlich

$$\frac{q}{m} = 2 \frac{U_B}{R^2 B^2} \quad (9)$$

Aus einer Messung des Radius R der Kreisbahn eines geladenen Teilchens im homogenen Magnetfeld B folgt also seine spezifische Ladung q/m

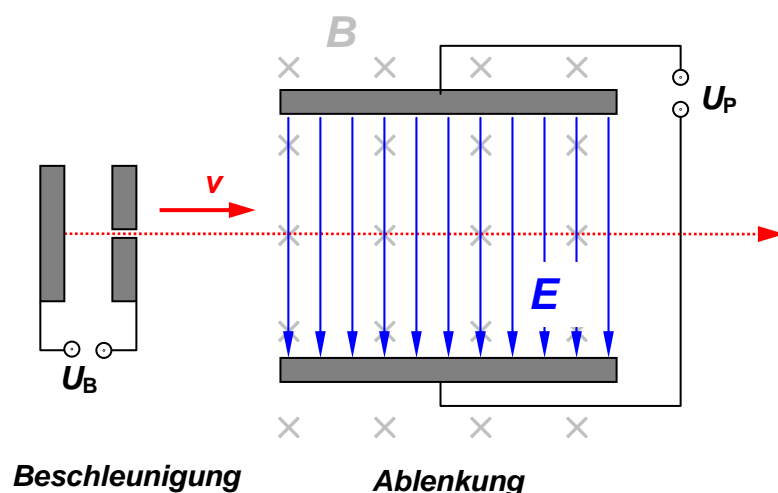


Geschwindigkeitsfilter

Ein interessanter Grenzfall ergibt sich für geladene Teilchen, die durch eine Ablenkordnung geschossen werden, in der ein E-Feld und ein B-Feld senkrecht aufeinander stehen. Die Krümmung ihrer Bahn hängt allein von der Teilchengeschwindigkeit ab, sie ist dagegen unabhängig von Teilchenmasse und -ladung. Für die Geschwindigkeit von Teilchen, die ohne Ablenkung geradlinig durch eine solche Anordnung fliegen, gilt

$$v = \frac{E}{B} = \frac{U_P}{d B} \quad (10)$$

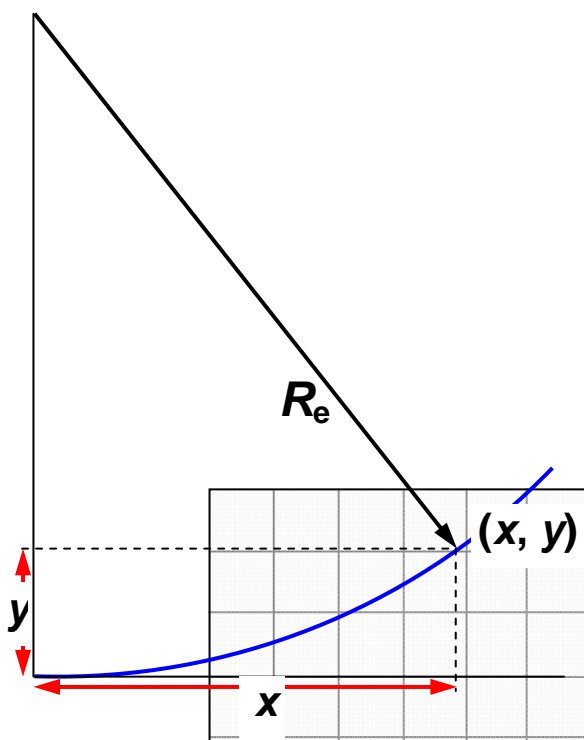
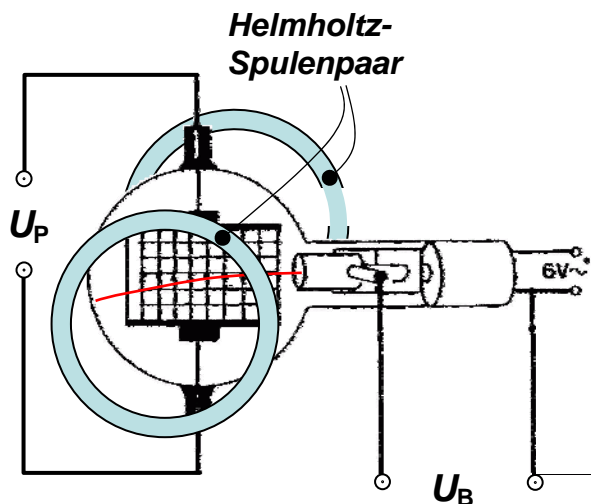
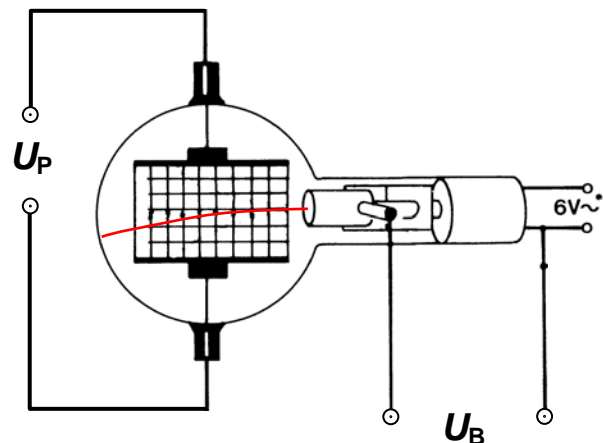
Mit Hilfe einer solchen Anordnung kann man also die Geschwindigkeit der Teilchen auf direkte Weise durch Bestimmung von E und B ermitteln.



Geräte

Elektronenstrahl-Ablenkröhre Leybold :

Sie besteht aus einer evakuierten Glasröhre mit Glühkathode zur Erzeugung freier Elektronen. In der nachfolgenden Beschleunigungseinheit durchlaufen diese eine einstellbare Potentialdifferenz U_B und erhalten dabei eine kinetische Energie bis zu ~ 5 keV. Danach treten sie in eine Ablenkeinheit ein. Sie besteht aus zwei Metallplatten im Abstand $d = 5,4$ cm, an denen eine Ablenkspannung U_P anliegt. Die Bahn der Elektronen wird auf einem zwischen den Platten angebrachten Leuchtschirm sichtbar.



Mit einem symmetrisch aufgebauten Helmholtz-Spulenpaar kann zusätzlich ein magnetisches Feld im Bereich der Elektronenbahn erzeugt werden. Das B-Feld ergibt sich aus dem Stromfluss I durch die Spulen nach :

$$B = \frac{\mu_0 n R_S^2 I}{\sqrt{(R_S^2 + a^2)^3}} \quad (11a)$$

Geometrie des Versuchsaufbaus :

$$\begin{aligned} R_S &= 6,8 \text{ cm} && \text{Spulenradius} \\ a &= 3,4 \text{ cm} && \text{halber Spulenabstand} \\ n &= 320 && \text{Windungszahl/Spule} \\ \mu_0 &= 4 \pi 10^{-7} \text{ Vs/Am} \end{aligned}$$

Dies ergibt für die Berechnung von B :

$$B(\text{in T}) = 0,00423 \cdot I(\text{in A}) \quad (11b)$$

Den Radius R_e der Kreisbahn der Elektronen im B-Feld ermittelt man über die Messung einer Reihe von Wertepaaren (x, y) . Für die Bahn gilt:

$$R_e^2 = x^2 + (R_e - y)^2$$

Daraus folgt:

$$y = \frac{1}{2 R_e} (x^2 + y^2) \quad (12)$$

Die Auftragung der jeweiligen Werte y über $x^2 + y^2$ sollte eine Gerade ergeben, aus deren Steigung man R_e direkt berechnen kann.

Aufgabe

Antworten auf nachfolgendem Formblatt eintragen und nach dem Versuch abgeben.

Im ersten Versuchsteil wird die Ablenkung freier Elektronen im **E - Feld** untersucht

- Zeichnen Sie eine detaillierte Skizze der Ablenkvorrichtung in der Röhre mit der Bahn der Elektronen. Die im Versuch verwendete Polarität der Platten soll daraus eindeutig hervorgehen.
- Zeichnen Sie das Kräfte diagramm für ein Elektron in der Ablenkvorrichtung.
- Überprüfen Sie die Gültigkeit von Beziehung (6) anhand der im Demonstrationsversuch aufgenommenen Wertepaare (x,y) für die Bahn der Elektronen. Erstellen Sie dazu ein Diagramm mit x^2 als Abszisse und y als Ordinate.
- Berechnen Sie aus der an den Platten angelegten Ablenkspannung U_P das elektrische Feld in der Ablenkeinheit (Plattenabstand $d = 5,4$ cm).
- Berechnen Sie die Beschleunigung der Elektronen in y -Richtung durch das E-Feld und vergleichen Sie sie mit der Beschleunigung aufgrund ihrer Gewichtskraft (Literatur : $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, *Hering/Martin/Stohrer*).
- Berechnen Sie die aus der gemessenen Beschleunigungsspannung U_B die Geschwindigkeit der Elektronen in x -Richtung und vergleichen Sie sie mit der Lichtgeschwindigkeit (Literatur : $c = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s , *Hering / Martin / Stohrer*)
- Berechnen Sie die Flugdauer der Elektronen durch die Ablenkeinheit (Länge 9 cm).

Im zweiten Versuchsteil wird die Ablenkung freier Elektronen im **B - Feld** untersucht

- Berechnen Sie das B-Feld innerhalb des Helmholtz-Spulenpaars aus dem gemessenen Stromfluss I durch die Spulen unter Verwendung von (11b).
- Ermitteln Sie den Radius R_e der Elektronenbahn unter Verwendung der Beziehung (12) aus den fünf im Demonstrationsversuch aufgenommenen Wertepaaren (x,y) .
- Bestimmen Sie daraus die spezifische Ladung q/m des Elektrons (Angabe auf zwei signifikante Stellen).

Im – optionalen - dritten Versuchsteil wird die **Geschwindigkeit der Elektronen** direkt ermittelt

- Notieren Sie den Strom I durch das Helmholtz-Spulenpaar und die Spannung U_P an den Ablenkplatten, für welche die Elektronen sich geradlinig durch die gekreuzten E- und B-Felder bewegen. Berechnen Sie daraus die Geschwindigkeit der Elektronen.
- Leiten Sie die für die Berechnung verwendete Beziehung (10) auf nachvollziehbare Weise her.

Elektrisches und magnetisches Feld																																																																													
Gruppe				Datum																																																																									
Name, Vorname																																																																													
Ablenkung freier Elektronen im E – Feld																																																																													
<u>Skizze:</u> Ablenkeinheit mit Bahnkurve, Polarität von U_P , Kräftediagramm für Elektron																																																																													
<u>Messung:</u>																																																																													
Beschleunigungsspannung U_B						Ablenkspannung U_P																																																																							
x / cm																																																																													
y / cm																																																																													
$x^2 /$																																																																													
Diagramm y gegen x^2 – Überprüfung von Beziehung (6)																																																																													
<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																																													
<u>Berechnungen:</u>																																																																													
E-Feld in der Ablenkeinheit																																																																													
Beschleunigung des Elektrons, Vergleich mit g																																																																													
Geschwindigkeit der Elektronen, Vergleich mit c																																																																													
Flugzeit durch die Ablenkeinheit																																																																													

Ablenkung freier Elektronen im B – Feld											
<u>Messung:</u>											
Beschleunigungsspannung U_B								Spulenstrom I			
x / cm											
y / cm											
$x^2 + y^2 /$											
Diagramm y gegen x^2+y^2 – Bestimmung des Bahnradius aus Beziehung (12)											
Auswertung:											
a) Geradensteigung											
b) Bahnradius R_e											
<u>Berechnungen:</u>											
B -Feld im Helmholtz-Spulenpaar											
Spezifische Ladung e/m des Elektrons (2 signifikante Stellen), Vergleich mit Literatur											
Geschwindigkeit der Elektronen (optional)											
<u>Messung:</u> Bedingungen für gerade Bahn in gekreuzten E - und B -Feldern											
Strom I durch die Spulen								Spannung U_P an den Platten			
Berechnung der Geschwindigkeit v nach (10)											
(Nachvollziehbare) Herleitung von (10)											