12.8 Bewegung geladener Teilchen im homogenen Magnetfeld

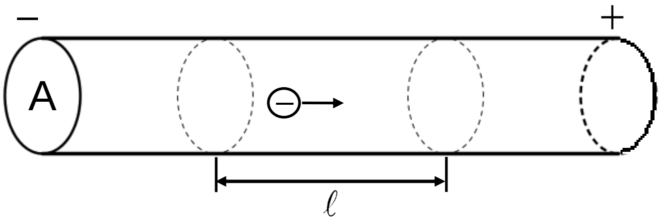
Bewegung von freien Ladungsträgern im Inneren eines Körpers, der von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt wird

Die Lorentzkraft:

Fließt durch einen geraden Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, ein elektrischer Strom, so erfährt dieser Leiter eine Kraft $\vec{F}$. Da diese Kraft nur dann auftritt, wenn ein el. Strom fließt ist sie die resultierende aller Einzelkräfte $\vec{F}_m$ auf die bewegten Elektronen.

Für die Stromstärke im Leiter gilt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad (1)$$



In der Zeit Δt durchsetzen alle freien Leitungselektronen im Volumen $A \cdot \ell$ die Querschnittsfläche A und tragen so zur Stromstärke I bei.

Für die Ladung ΔQ im Volumen $A \cdot \ell$ ergibt sich somit:

$$\Delta Q = N_{Ges} \cdot e \qquad (2)$$

Für den Betrag der Kraft auf dieses Leiterstück folgt:

$$F = I \cdot \ell \cdot B \overset{(1)}{=} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \ell \cdot B \overset{(2)}{=} \frac{N_{ges} \cdot e}{\Delta t} \cdot \ell \cdot B = N_{ges} \cdot e \cdot \underbrace{\frac{\ell}{\Delta t}}_{=v} \cdot B = N_{ges} \cdot e \cdot v \cdot B$$

Der Quotient $v = \frac{\ell}{\Delta t}$ ist die Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Leiter.

Den Betrag der Kraft, die ein einzelner Ladungsträger erfährt nennt man die Lorentzkraft F_L; für sie gilt:

$$\boxed{F_L = e \cdot v \cdot B}$$

Zusammenfassung:

Bewegt sich ein Körper der Ladung q mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Feldes mit der Flussdichte $\vec{B}$, so erfährt er die Lorentzkraft vom Betrag

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

(Die Richtung der Lorentzkraft erhält man mit der Drei-Finger-Regel)

Vektoriell erhält man für die Lorentzkraft die Gleichung:

$$\vec{F}_L = q \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$$

dabei ist q die Ladung des Körpers inklusive Vorzeichen.

Bewegt sich der Körper nicht senkrecht zum Magnetfeld, dann gilt für den Betrag der Lorentzkraft:

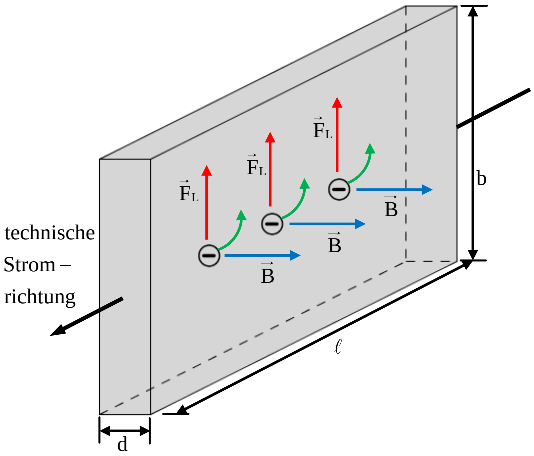
$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\rho \quad \text{mit} \quad \rho = \sphericalangle\left(\vec{v}; \vec{B}\right)$$

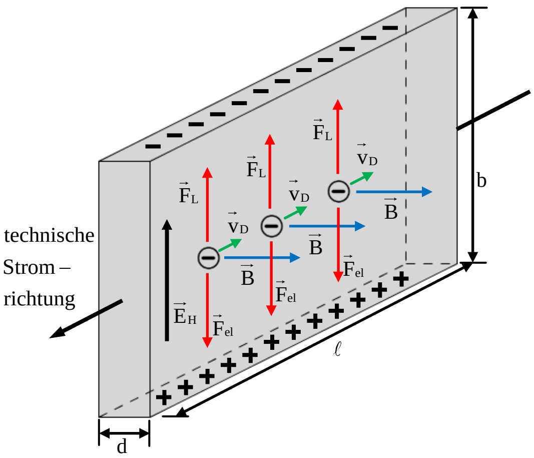
Hinweis:

Der Vektor der Lorentzkraft steht immer senkrecht auf der momentanen Bewegungsrichtung des Teilchens und verrichtet somit keine Arbeit (Beschleunigungsarbeit) an dem Teilchen, sondern lenkt es nur senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor ab. Es gibt deshalb keine potentielle Energie des magnetischen Feldes.

Der Halleffekt:

Betrachtet wird ein Metallplättchen, das freie Ladungselektronen enthält. Durch Anlegen einer Spannung erhält man im Metallplättchen einen Strom I. Legt man noch zusätzlich ein Magnetfeld der Flussdichte $\vec{B}$ an, so wirkt auf die bewegten Elektronen die Lorentzkraft $\vec{F}_L = -e \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$ mit $\left(\vec{v} \perp \vec{B}\right)$. Die bewegten Elektronen erfahren somit eine Lorentzkraft, welche nach oben wirkt. Die Elektronen werden zum oberen Rand des Plättchens abgelenkt, wo es zu einem Überschuss an Ladungsträgern kommt. Am unteren Rand entsteht Elektronenmangel. Durch die unterschiedliche Konzentration der Ladungsträger baut sich ein elektrisches Feld der Feldstärke $\vec{E}$ auf. Da $E = \frac{U}{b}$ ist, kann diese Spannung zwischen der oberen und der unteren Seite des Plättchens man mit einem empfindlichen Spannungsmessgerät bestimmt werden. Diese Spannung bezeichnet man als **Hallspannung** U_H.





Mathematische Behandlung:

Auf einen Ladungsträger im Hallplättchen wirken im stationären Zustand (Gleichgewichtszustand) zwei Kräfte.

Zunächst wirkt die Lorentzkraft auf ein Elektron $\left[\vec{F}_L = -e \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B}\right)\right]$. Die Lorentzkraft führt zur Veränderung der Ladungsträgerverteilung und somit zum Aufbau eines elektrischen Feldes. In dem elektrischen Feld wirkt auf das Elektron die Kraft $\vec{F}_{el} = -e \cdot \vec{E}$. Die Kräfte sind entgegengerichtet und nach sehr kurzer Zeit $\left(t < 1\mu s\right)$ betragsgleich. Ist das der Fall, so bewegen sich die Elektronen wieder mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig weiter. Für diesen stationären Zustand gilt:

$$\vec{F}_L = -\vec{F}_{el}$$

$$\left|\vec{F}_L\right| = \left|\vec{F}_{el}\right|$$

$$\left|-e \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B}\right)\right| = \left|-e \cdot \vec{E}\right|$$

Unter der Bedingung, dass $\vec{v} \perp \vec{B}$ ist folgt:

$$e \cdot v \cdot B = e \cdot E$$

Setzt man nun noch für die elektrische Feldstärke $E = \frac{U_H}{b}$ ein, dann erhält man:

$$v \cdot B = \frac{U_H}{b}$$

$$\boxed{U_H = b \cdot B \cdot v} \quad \left(\text{Hallspannung}\right)$$

Da die Hallspannung direkt proportional zum Betrag der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ ist eignet sich diese Anordnung zur Messung der Flussdichte magnetischer Felder (Hallsonde).
Eine weitere Umformung der Formel für die Hallspannung:
Es gilt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta Q}{I} \quad (1)$$

Formt man nun die Formel für die Hallspannung etwas um, so folgt:

$$U_H = b \cdot B \cdot v = b \cdot B \cdot \frac{\ell}{\Delta t} \overset{(1)}{=} b \cdot B \cdot \frac{\ell \cdot I}{\Delta Q} = b \cdot B \cdot \frac{\ell \cdot I}{N_{Ges} \cdot e} = \frac{B \cdot I}{N_{Ges} \cdot e} \cdot b \cdot \ell \cdot \frac{d}{d} = \frac{B \cdot I}{N_{Ges} \cdot e} \cdot \frac{V}{d}$$

$$U_H = \frac{B \cdot I}{N_{Ges} \cdot e} \cdot \frac{V}{d} = \frac{B \cdot I}{d \cdot e} \cdot \frac{V}{N_{Ges}} = \frac{B \cdot I}{d \cdot e} \cdot \frac{1}{n} = \underbrace{\frac{1}{n \cdot e}}_{R_H} \cdot \frac{B \cdot I}{d} = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

Dabei ist:

$n = \frac{N_{Ges}}{V}$ die ***Ladungsträgerkonzentration*** (Anzahl der Ladungsträger pro Volumeneinheit) des Metallplättchens.

$R_H = \frac{1}{n \cdot e}$ die ***Hallkonstante*** (stoff- und temperaturabhängig)

Für die Hallspannung ergibt sich somit:

$$U_H = B \cdot b \cdot v \quad \text{und} \quad U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d} \quad \text{mit} \quad R_H = \frac{1}{n \cdot e}$$

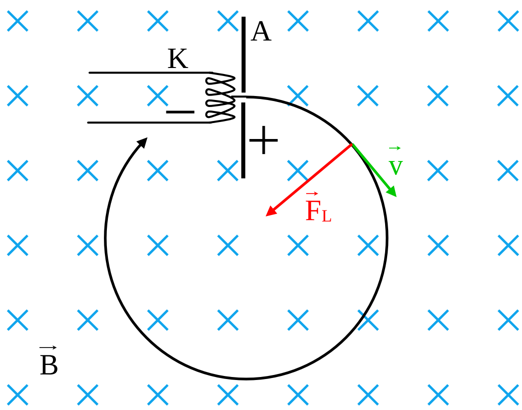
Somit kann über die Hallkonstante die Dichte der Leitungselektronen bestimmt werden.
Setzt man die beiden obigen Formeln für die Hallspannung gleich, dann erhält man:

$$Bbv = R_H \frac{IB}{d}$$

$$bv = R_H \frac{I}{d} \Rightarrow v_D = \frac{R_H I}{db}$$ Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger

Bahn geladener freier Teilchen im homogenen Magnetfeld:

Auf ein freies Teilchen der Ladung q, das sich senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes bewegt wirkt die Lorentzkraft $\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$. Da dabei die Richtung der Lorentzkraft $\vec{F}_L$ immer senkrecht auf $\vec{v}$ und $\vec{B}$ steht liegt die Bahn der Ladungen in derjenigen Ebene senkrecht zu $\vec{B}$ (Ebene in der $\vec{B}$ Normalenvektor ist). Die Bahn der Ladungen beschreibt somit einen Kreis.
Aus dem bestehende Kräftegleichgewicht aus Lorentzkraft und Zentripetalkraft folgt:



Bewegung eines freien Elektrons im homogenen Magnetfeld

$$\vec{F}_L = \vec{F}_Z$$

$$F_L = F_Z$$

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$\boxed{r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}} \quad (\text{Kreisbahnradius})$$

Für die Winkelgeschwindigkeit gilt:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{\frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}} = \frac{|q|}{m} \cdot B$$

Zusammenfassung:
Besitzt ein freier Ladungsträger bei seinem Eintritt in ein homogenes Magnetfeld eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Richtung der magnetischen Flussdichte, so beschreibt er in der Ebene senkrecht zur magnetischen Flussdichte eine Kreisbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{q}{m} \cdot B$$

Besitzt das Teilchen zusätzlich eine Geschwindigkeitskomponente in Feldrichtung, so bleibt diese unverändert, das Teilchen durchläuft eine Schraubenlinie.

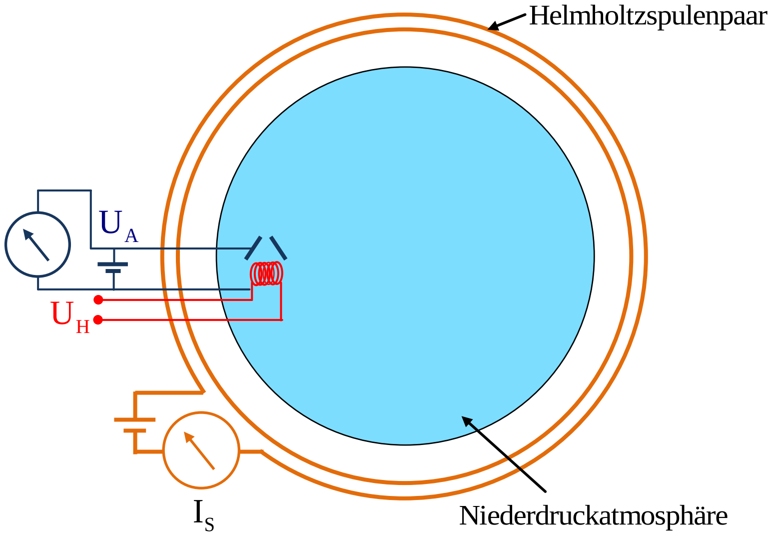
Bestimmung der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ mit dem Fadenstrahlrohr:

Fadenstrahlrohr
Ein Fadenstrahlrohr besteht aus einem Glaskolben, der mit Wasserstoffgas von geringem Druck gefüllt ist. Außerhalb der Mitte befindet sich ein Elektrodensystem mit Kathode (K), durchbohrter Anode (A) und Wehneltzylinder (W).

U_H : Heizspannung $(6\,\text{V})$

U_A : Beschleunigungsspannung $(400\,\text{V})$

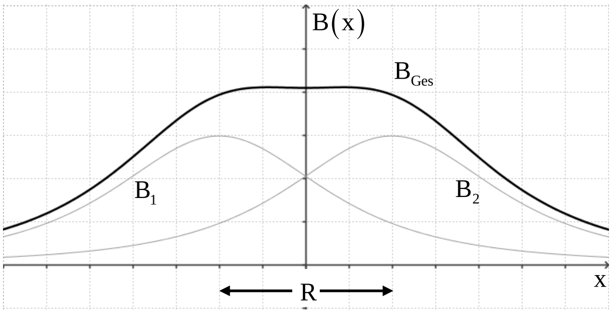
$$v_1 = \sqrt{2 \cdot U_A \cdot \frac{e}{m}}$$



Funktionsweise des Fadenstrahlrohrs:
Die aus der beheizten Kathode austretenden Elektronen werden im elektrischen Längsfeld zwischen Kathode und Anode beschleunigt und fliegen durch das Loch in der Anode aus dem Feld hinaus. Der Zusammenstoß einiger Elektronen mit Wasserstoffmolekülen regt diese zum Leuchten an, so dass die Flugbahn sichtbar wird. Der Wehneltzylinder dient durch Anlegen einer geeigneten Spannung zur Fokussierung des Elektronenstrahls.

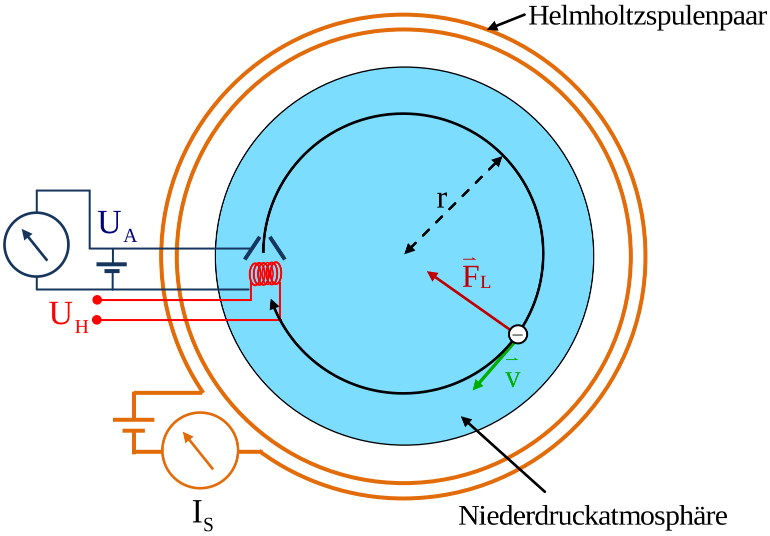
Der so erzeugte Elektronenstrahl kann zum Beispiel in einem durch ein Helmholtz-Spulenpaar erzeugten Magnetfeld untersucht werden.

Helmholtz-Spulenpaar
Ein Helmholtz-Spulenpaar besteht aus zwei Ringspulen mit gleichem Radius R, die so angeordnet sind, dass ihr Abstand gleich dem Spulenradius ist. Die Magnetfelder beider Ringspulen überlagern sich so, dass zwischen den beiden Ringspulen ein homogenes Magnetfeld vorliegt, wobei $B \sim I$.



B – Feld im Helmholtzspulenpaar

Versuchsaufbau und –beschreibung:
Im Inneren eines Helmholtz-Spulenpaars herrscht ein nahezu homogenes Magnetfeld. In diesem befindet sich ein Fadenstrahlrohr (Glaszylinder mit Wasserstoffgas bei $1\,\text{Pa}$ Druck), der zusätzlich einen Beschleunigungskondensator enthält. Die Elektronen werden über den glühelektrischen Effekt freigesetzt und im Kondensator beschleunigt. Die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Füllgas (Ionisation des Füllgases) lässt den Elektronenstrahl sichtbar werden.
Durch Änderung der magnetischen Flussdichte lässt sich der Fadenstrahl zu einem Kreis biegen.



Bei der Behandlung der Ablenkung eines Elektrons im elektrischen Feld wurde gezeigt, dass die Gesamtablenkung von der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ unabhängig ist.
Da die Ablenkung im Magnetfeld von der spezifischen Ladung des Elektrons abhängig ist kann nun mit Hilfe dieser Ablenkung versucht werden die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ zu bestimmen.
Der Bahnradius, den ein Elektron im homogenen Magnetfeld durchläuft, beträgt:

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} \quad \Rightarrow \quad \frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B}$$

Um nun die spezifische Ladung berechnen zu können müssen die Größen r, v und B experimentell bestimmt werden. Der Kreisbahnradius r und der Betrag der magnetischen

Flussdichte B können direkt bestimmt werden, die Geschwindigkeit entspricht der Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen, da im homogenen Magnetfeld keine Änderung des Betrags der Bahngeschwindigkeit auftritt. Die Anfangsgeschwindigkeit $v = v_0$ ist die Geschwindigkeit der Elektronen nach durchlaufen der Beschleunigungsspannung U_B. Hierfür gilt:

$$v = \sqrt{2 \cdot \tfrac{e}{m} \cdot U_B} \qquad (1)$$

Nun folgt:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)^2 = \frac{v^2}{r^2 \cdot B^2} = \frac{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}$$

$$\boxed{\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}}$$

In dieser Gleichung für die spezifische Ladung sind nun alle Größen sehr gut messbar.
Für beliebige Ladungsträger gilt:

$$\frac{|q|}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}$$

In einem Experiment soll nun die spezifische Ladung von Elektronen bestimmt werden.

In einem Versuch erhält man folgende Messwerte:

Durchmesser des Kreises:	$d = 10\,\text{cm} \quad \Rightarrow \quad r = 5\,\text{cm}$
Beschleunigungsspannung:	$U_B = 150\,\text{V}$
Betrag der magnetischen Flussdichte:	$B = 0{,}85\,\text{mT}$ (Messung mit Hallsonde)

Für die spezifische Ladung folgt somit:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2} = ... \approx 1{,}66 \cdot 10^{11}\,\tfrac{\text{As}}{\text{kg}}$$

Genauere Messungen liefern für die spezifische Ladung der Elektronen:

$$\frac{e}{m} = 1{,}7588047 \cdot 10^{11}\,\tfrac{\text{As}}{\text{kg}}$$

Da die Elementarladung e im Milikan-Versuch bestimmt wurde lässt sich nun somit die Masse eines Elektrons berechnen:

$$m_e = \frac{e}{\frac{e}{m}} = \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{As}}{1{,}7588047 \cdot 10^{11}\,\frac{\text{As}}{\text{kg}}} = 9{,}108 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$$

Aufgaben

1.0 Das radioaktive Element Radium sendet $\alpha-\text{Teilchen}$ aus, deren Austrittsgeschwindigkeit 5% der Lichtgeschwindigkeit beträgt.

1.1 Welche Lorentzkraft erfährt ein $\alpha-\text{Teilchen}$, wenn es senkrecht in den homogenen Feldbereich eines Hufeisenmagneten mit der Flussdichte $B = 40\,\text{mT}$ eintritt?

1.2 Wie ändert sich die Geschwindigkeit eines $\alpha-\text{Teilchen}$ im Magnetfeld (Begründung)?

1.3 Vergleiche die auftretende Beschleunigung eines $\alpha-\text{Teilchen}$ im magnetischen Feld mit der Fallbeschleunigung eines $\alpha-\text{Teilchen}$ auf der Erdoberfläche.

2.0 Ein Elektron gelangt mit der Geschwindigkeit $v = 9{,}4\cdot 10^{6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ in ein homogenes magnetisches Feld der Flussdichte $B = 2{,}2\cdot 10^{-3}\,\text{T}$.

2.1 Wie groß ist der Betrag der Kraft, die im Feld auf das Elektron wirkt, wenn die Bewegungsrichtung des Elektrons senkrecht zur Feldrichtung steht? Was kann über die Richtung der Kraft ausgesagt werden?

2.2 Welchen Durchmesser hat die entstehende Kreisbahn des Elektrons?

2.3 Wie groß ist seine Umlaufzeit um die Kreisbahn?

3.0 Ein Elektronenstrahl wird in einem homogenen magnetischen Feld eines Fadenstrahlrohrs mit der Flussdichte $B = 1{,}5\,\text{mT}$ auf eine Kreisbahn von $12\,\text{cm}$ Durchmesser gezwungen

3.1 Welchen Betrag hat die Geschwindigkeit der Elektronen?

3.2 Wie groß ist ihre Umlaufzeit auf der Kreisbahn?

4.0 Elektronen werden mit verschiedenen Geschwindigkeiten senkrecht zu den Feldlinien in ein homogenes Magnetfeld geschossen. Zeige, dass sich dann die Elektronen im magnetischen Feld auf einer Kreisbahn bewegen,

4.1 deren Radius direkt proportional zur Geschwindigkeit der Elektronen ist.

4.2 die Umlaufzeit der Elektronen jeweils konstant ist.

5.1.1 Unter welchen Bedingungen werden Elektronen in einem zeitlich konstanten homogenen Magnetfeld nicht beeinflusst?

5.1.2 Unter welchen Bedingungen werden Elektronen in einem zeitlich konstanten homogenen Magnetfeld in eine Kreisbahn gezwungen?
Leite die Gleichung zur Berechnung des Bahnradius her und stelle in einer Skizze die Orientierung der Bahn im Magnetfeld dar.

5.2.0 In einem homogenen Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 8{,}0\cdot 10^{-4}\,\text{T}$ werden Elektronen in eine Kreisbahn mit dem Radius $r = 5{,}0\,\text{cm}$ gelenkt.

5.2.1 Berechne die Bahngeschwindigkeit v der Elektronen.

5.2.2 Welche Spannung ist erforderlich um die Elektronen auf die Geschwindigkeit v zu bringen?

6.0 Protonen werden durch ein homogenes elektrisches Feld, das durch die elektrische Spannung $U_B = 96\,\text{kV}$ hervorgerufen wird, aus der Ruhe beschleunigt. Anschließend fliegen die Protonen senkrecht zu den Feldlinien in ein homogenes Magnetfeld der magnetischen Flussdichte $B = 2{,}0\,\text{T}$.

6.1 Welchen Betrag hat die Eintrittsgeschwindigkeit der Protonen in das Magnetfeld?

6.2 Welchen Durchmesser hat die entstehende Kreisbahn?

6.3 Welche Umlaufzeit haben die Protonen auf der Kreisbahn?

7.0 Elektronen und Protonen werden durch gleichartige elektrische Felder aus der Ruhe heraus beschleunigt. Die Elektronen gelangen anschließend in ein genügend ausgedehntes Magnetfeld der Flussdichte $\vec{B}_e$, die Protonen in ein solches der Flussdichte $\vec{B}_p$.

7.1 Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Geschwindigkeiten der Elektronen und der Protonen nach durchlaufen der elektrischen Felder?

7.2 Welcher Zusammenhang besteht zwischen B_e und B_p, wenn Elektronen und Protonen Kreisbahnen vom gleichen Durchmesser beschreiben?

Aufgaben zum Hall-Effekt

1. (LK 2001 I Nr. 3)

Bei einem Versuch zum Hall-Effekt verwendet man eine quadratische Kupferfolie mit den Abmessungen $25\,\text{mm}$ in x- bzw. y-Richtung und der Dicke $18\,\mu\text{m}$ in z-Richtung. Die Folie wird von einem Strom der Stärke $15\,\text{A}$ in x-Richtung durchflossen. Die magnetischen Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes durchsetzen die Folie in z-Richtung. Man misst die Hallspannung $8{,}8\,\mu\text{V}$, wenn die Flussdichte $0{,}20\,\text{T}$ beträgt.

a) Erklären Sie anhand einer Skizze, wie es zum Auftreten der Hallspannung kommt.

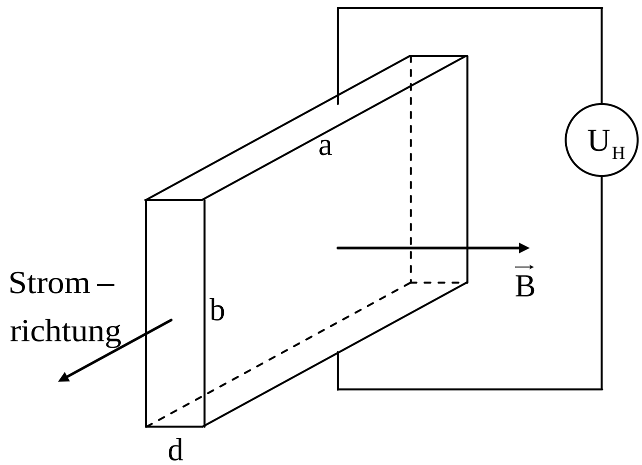
b) Berechnen Sie aus den oben angegebenen Daten die Ladungsträgerkonzentration n von Kupfer.

$\left[\text{Zur Kontrolle}: n = 1{,}2\cdot 10^{29}\,\frac{1}{\text{m}^3}\right]$

c) Berechnen Sie, wie viele freie Elektronen im Mittel auf ein Cu-Atom kommen.

2. (Gk 2003 I Nr. 3)

Aus einem Goldstreifen mit der Länge $a = 8{,}0\,\text{mm}$, der Breite $b = 2{,}0\,\text{mm}$ und der Dicke $d = 0{,}10\,\text{mm}$ soll eine Hall-Sonde gefertigt werden (siehe Skizze). In ihr befinden sich $N = 9{,}5\cdot 10^{19}$ frei bewegliche Elektronen. Die Hall-Sonde wird bei einer konstanten Stromstärke von $I = 100\,\text{mA}$ betrieben; die magnetische Flussdichte $B = 1{,}0\,\text{T}$.



a) Leiten Sie aus einem geeigneten Kraftansatz die folgende Beziehung für die Hallspannung U_H her.

$$U_H = v\cdot b\cdot B$$

Hierbei ist v die Driftgeschwindigkeit der Elektronen.

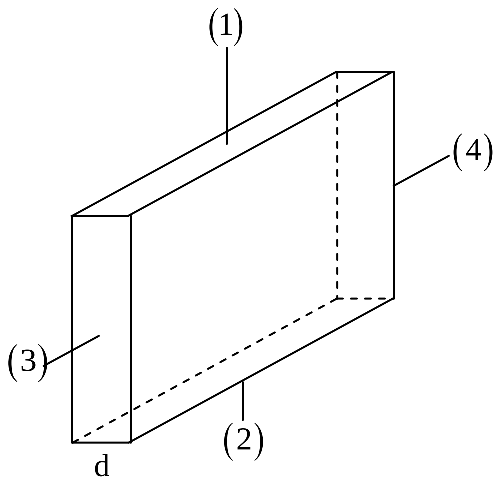
b) Die Driftgeschwindigkeit ist nicht direkt messbar, sie lässt sich jedoch indirekt ermitteln. Berechnen Sie dazu zunächst die Hallspannung mit Hilfe einer weiteren Gesetzmäßigkeit, die Sie z.B. der Formelsammlung entnehmen können.

$\left[\text{Zur Kontrolle}: U_H = 0{,}11\,\mu\text{V}\right]$

c) Bestimmen Sie nun die Driftgeschwindigkeit der Elektronen.

3. (Lk 1997 V Nr. 1)

Die Hall-Sonde ist ein wichtiger Sensor zum Ausmessen von Magnetfeldern.



a) Erläutern Sie kurz, unter welchen Bedingungen in einem quaderförmigen Silberplättchen (siehe Skizze) zwischen den Anschlüssen (1) und (2) eine Hallspannung U_H auftritt. Geben Sie die Polung von U_H unter der Voraussetzung an, dass der Ladungstransport durch freibewegliche Elektronen erfolgt.

b) Bei einer Hall-Sonde wird ein Silberplättchen der Dicke $d = 0{,}012\,\text{m}$ verwendet. Die Hall-Konstante $R_H = \frac{1}{n \cdot e}$ von Silber beträgt bei Zimmertemperatur $0{,}90 \cdot 10^{-10}\,\frac{\text{m}^3}{\text{C}}$, dabei bezeichnet n die Ladungsträgerdichte und e die Elementarladung. In einem Magnetfeld ergibt sich bei einem Sondenstrom von $10\,\text{A}$ eine Hall-Spannung von $1{,}7 \cdot 10^{-5}\,\text{V}$.
Berechnen Sie die Flussdichte B. Berechnen Sie ferner, wie viele Elektronen pro Silberatom im Mittel dem „freien Elektronengas“ zugeordnet werden können.

c) Fertigen Sie eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Hall-Konstanten R_H eines Plättchens an.

Für eine Hall-Sonde aus dem Halbleitermaterial Germanium mit der Dicke $d = 1{,}0\,\text{mm}$ wurden folgende Messreihen aufgenommen:

Für $B = 10\,\text{mT}$:

I in mA	10	15	20	25
U_H in mV	1,4	2,1	2,9	3,7

Für $B = 20\,\text{mT}$:

I in mA	10	15	20	25
U_H in mV	2,8	4,3	5,7	7,3

Für $B = 30\,\text{mT}$:

I in mA	10	20	30	40
U_H in mV	4,4	8,8	13,1	17,5

d) Welche Zusammenhänge zwischen Hall-Spannung U_H, Sondenstrom I und Flussdichte B lassen sich damit belegen? Werten Sie die Messreihen entsprechend aus.

e) In einem weiteren Experiment kann gezeigt werden, dass die Hall-Spannung U_H bei konstanter Flussdichte B und konstantem Sondenstrom I umgekehrt proportional zur Dicke d des Plättchens ist.
Welche Proportionalitätskonstante (Hall-Konstante R_H) ergibt sich aus der Messreihe unter der Annahme, dass auch für Germanium $R_H = \frac{1}{n \cdot e}$ gilt?

f) Berechnen Sie unter Verwendung der Ergebnisse bzw. Angaben der Teilaufgaben b) und e) das Verhältnis der Ladungsträgerdichten von Silber und Germanium.