



Physik für Infotronik (21)

Gerald Kupris

07.01.2013

Alles Gute und viel Erfolg im Neuen Jahr 2013!



Physik Themenbereiche (3)

Teil 4: Elektrizität und Magnetismus

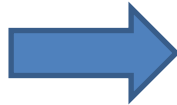
21 Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen

22 Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen

23 Das elektrische Potenzial

24 Die Kapazität

25 Elektrischer Strom – Gleichstromkreise



26 Das Magnetfeld

27 Quellen des Magnetfelds

28 Die magnetische Induktion

29 Wechselstromkreise

30 Die Maxwellschen Gleichungen – Elektromagnetische Wellen

Wiederholung: Magnetismus

Magnetismus ist ein physikalisches Phänomen, das sich als Kraftwirkung zwischen Magneten, magnetisierten bzw. magnetisierbaren Gegenständen und bewegten elektrischen Ladungen wie z.B. in stromdurchflossenen Leitern äußert.

Die Vermittlung dieser Kraft erfolgt über ein Magnetfeld, das einerseits von diesen Objekten erzeugt wird und andererseits auf sie wirkt. Alle Erscheinungsformen von Magnetismus können letztlich auf die Bewegung von elektrischen Ladungen oder das magnetische Moment von Elementarteilchen zurückgeführt werden.

Um die Erscheinungen des Magnetismus zu beschreiben, führt man den Begriff des Magnetfelds ein. Magnetfelder können verursacht werden:

- durch magnetische Materialien, etwa einen Dauermagneten,
- durch elektrische Ströme, z. B. eine stromdurchflossene Spule oder
- durch zeitliche Änderung eines elektrischen Feldes.

Stärke des Magnetfeldes

Die Stärke eines Magnetfeldes kann durch zwei verschiedene physikalische Größen ausgedrückt werden, die magnetische Feldstärke **H** (Einheit: **A/m**) und die magnetische Flussdichte **B** (Einheit **T** -Tesla).

Während die magnetische Feldstärke bei Berechnungen mit elektrischen Strömen von Vorteil ist, verwendet man die magnetische Flussdichte zum Berechnen von induzierten Spannungen oder der Lorentzkraft.

Die magnetische Feldstärke **H** , früher auch als magnetische Erregung bezeichnet, ordnet als vektorielle Größe jedem Raumpunkt eine Stärke und Richtung des durch die magnetische Spannung erzeugten Magnetfeldes zu.

Die beiden Feldgrößen sind über die Materialgleichungen der Elektrodynamik miteinander verknüpft, welche sich im einfachsten Fall über einen Faktor, die magnetische Permeabilität, ausdrücken lässt.

Magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte ***B***, auch magnetische Induktion, bisweilen umgangssprachlich einfach nur „Flussdichte“ oder „Magnetfeld“ genannt, ist eine physikalische Größe der Elektrodynamik, für die Flächendichte des magnetischen Flusses steht, der senkrecht durch ein bestimmtes Flächenelement hindurchtritt.

Die SI-Einheit der magnetischen Flussdichte ist das Tesla (***T***):

$$[B] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{As}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{Am}^2} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T}$$

Eine veraltete Einheit für die magnetische Flussdichte ist das Gauß (***G***), das allerdings in der Technik immer noch häufig verwendet wird.

Es gilt: **1 T = 10000 G = 10⁴ G 1 G = 10⁻⁴ T = 100 μT.**

Am Äquator hat das Erdmagnetfeld eine Stärke von ca. **30 μT** = 30.000 nT. An den Polen ist der Betrag doppelt so groß. In Mitteleuropa sind es ca. **48 μT**, wobei ca. 20 μT in der horizontalen und ca. 44 μT in der vertikalen Richtung auftreten.

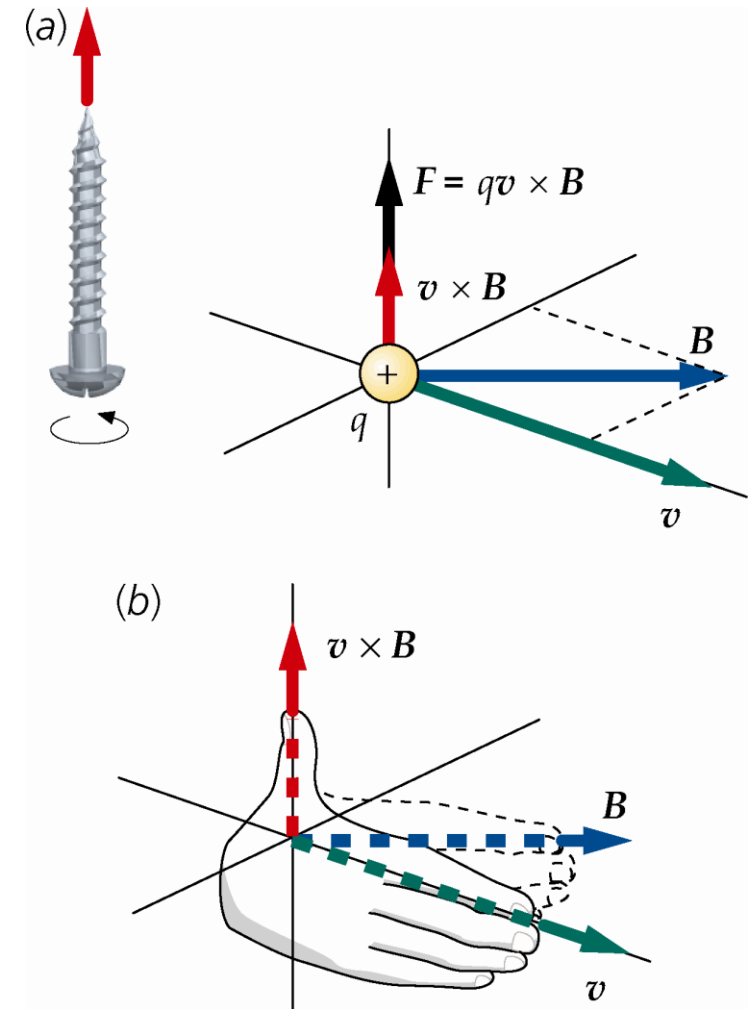
Magnetische Kraftwirkung auf bewegte Ladungen

Auf ein Teilchen mit einer elektrischen Ladung q , das sich mit der Geschwindigkeit v in einem Bereich des Raums bewegt, in dem ein Magnetfeld B existiert, wirkt eine Kraft (Lorentzkraft).

Diese Kraft ist proportional zu q , v , B und dem Sinus des Winkels, den die Richtungen von v und B einschließen.

Die Kraft ist senkrecht zu dem Geschwindigkeitsvektor und zu dem Feldvektor des Magnetfeldes gerichtet.

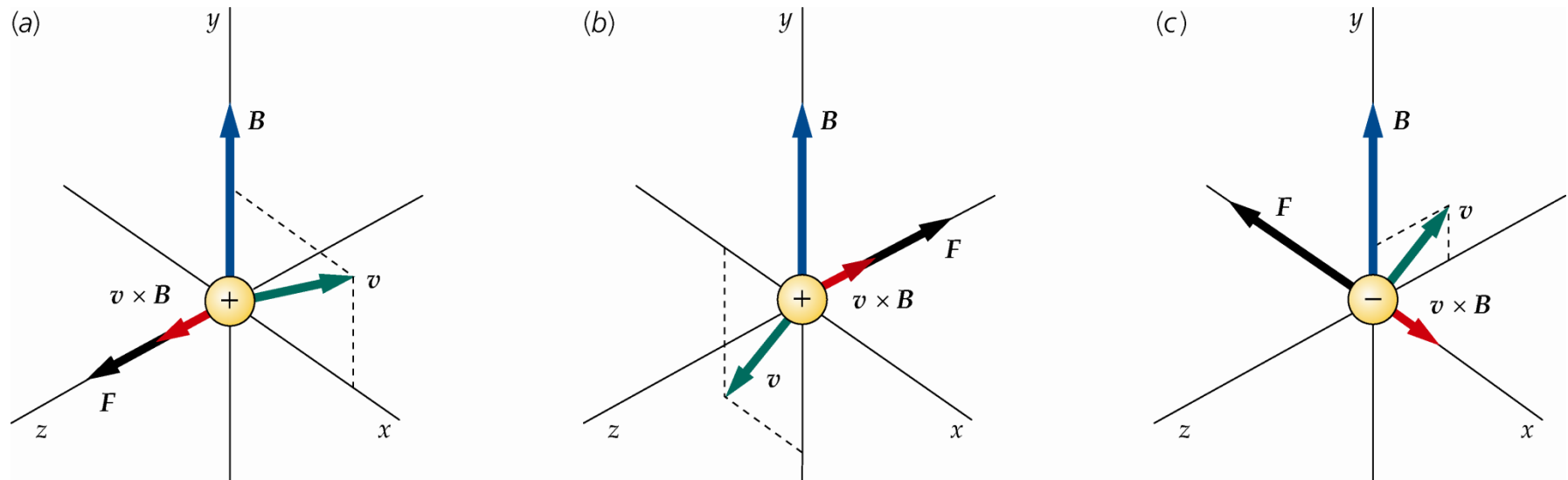
$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



Stärke des Magnetfeldes

Das Magnetfeld kann anhand einer auf eine bewegliche Ladung ausgeübte Kraft definiert werden. Die SI-Einheit der Stärke des Magnetfeldes ist das Tesla (T). Auf ein Teilchen mit einer Ladung von 1 C, das sich mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s senkrecht zu einem Magnetfeld von 1 T bewegt, wirkt eine Kraft von 1 N.

$$1T = 1 \frac{N}{C \cdot m/s} = 1 \frac{N}{A \cdot m}$$



Magnetische Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiterabschnitt

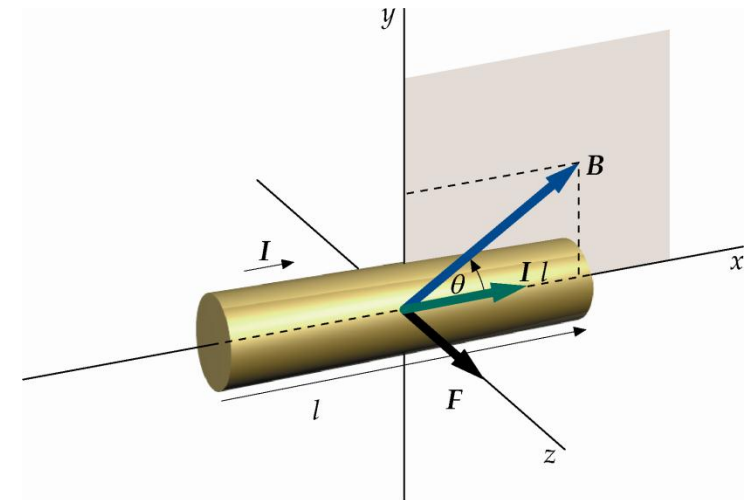
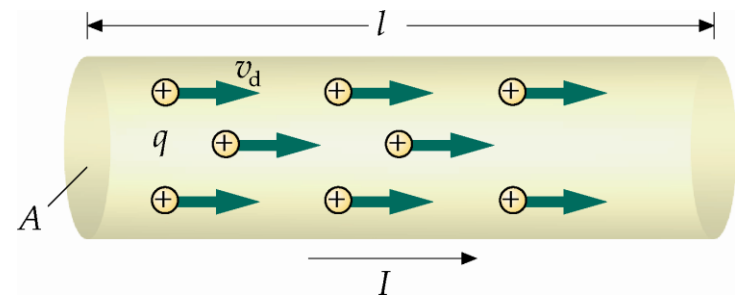
$$F = (q \cdot v_d \times B) \cdot \frac{n}{V} \cdot A \cdot l$$

$$I = \frac{n}{V} \cdot q \cdot v_d \cdot A$$

$$F = I \cdot l \times B$$

$$dF = I \cdot dl \times B$$

Stromelement



Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld

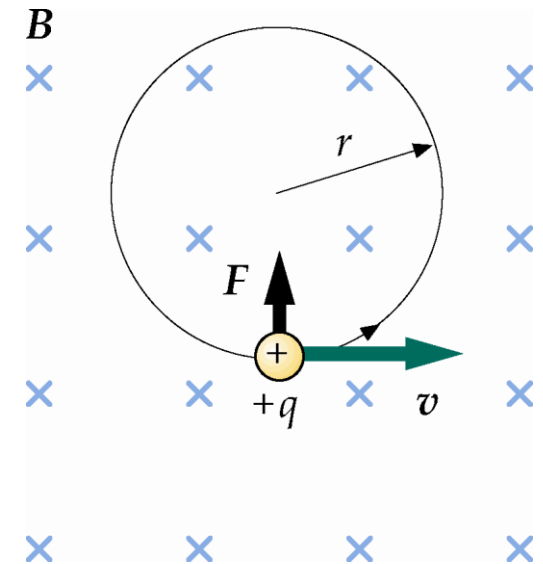
Wenn sich ein Teilchen in einem homogene Magnetfeld bewegt und seine Geschwindigkeit senkrecht zu dem Magnetfeld gerichtet ist, dann beschreibt das Teilchen eine Kreisbahn.

$$a_n = \frac{F}{m} = \frac{q \cdot v \cdot B}{m}$$

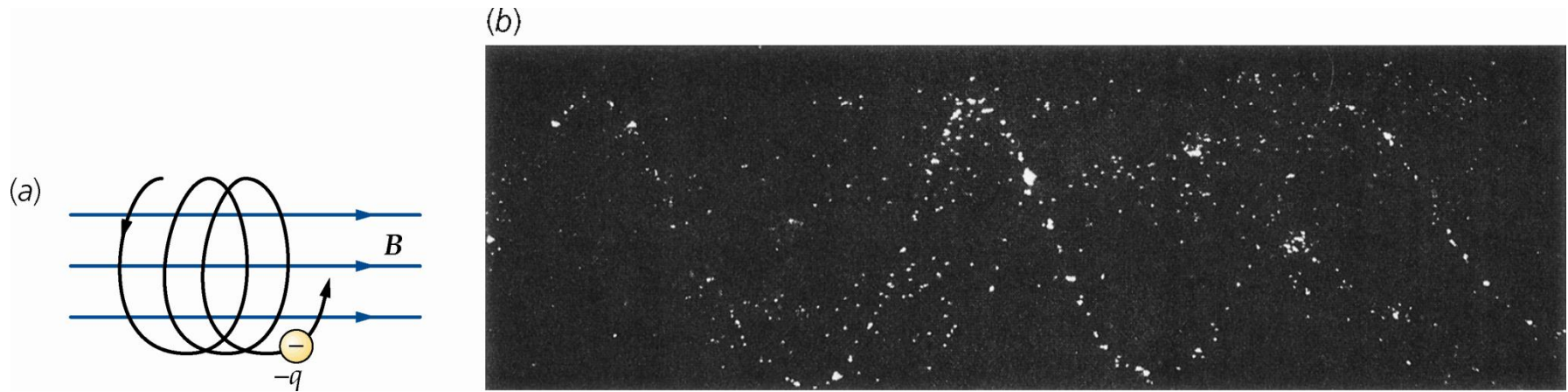
$$\frac{q \cdot v \cdot B}{m} = \frac{v^2}{r}$$

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

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



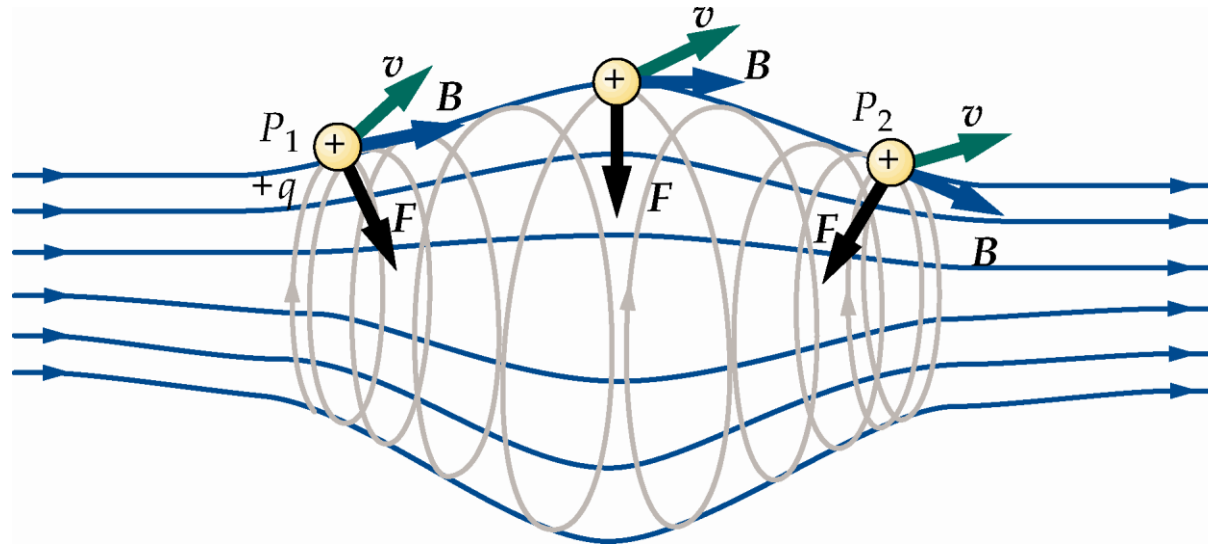
Schraubenbahn eines geladenen Teilchens



a) Besitzt die Geschwindigkeit eines Teilchens Komponenten sowohl parallel als auch senkrecht zum homogenen Magnetfeld, so beschreibt das Teilchen eine Schraubenbahn um die Feldlinien.

b) Nebelkammeraufnahmen der Schraubenbahn eines Elektrons, das sich in einem Magnetfeld bewegt. Die Bahn wird durch die Kondensation von Wassertröpfchen in der Kammer sichtbar gemacht.

Magnetische Flasche



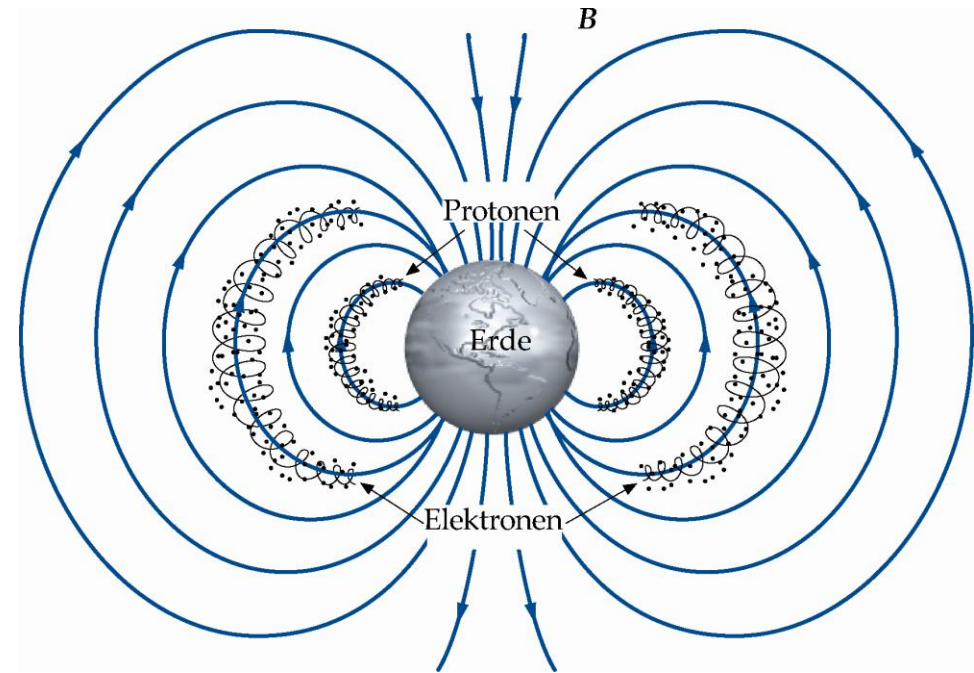
Das Feld ist auf beiden Seiten (rechts und links außen) wesentlich stärker als in der Mitte. Ein geladenes Teilchen bewegt sich darin auf Spiralbahnen um die Feldlinien hin und zurück, ohne die Flasche verlassen zu können.

Van-Allen-Gürtel

Protonen (innerer Gürtel) und Elektronen (äußerer Gürtel) können das Erdmagnetfeld nicht verlassen und bewegen sich auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien zwischen Nord- und Südpol hin und her.

Die geladenen kosmischen Teilchen werden im Van-Allen-Gürtel durch das Magnetfeld der Erde in Folge der Lorentzkraft abgelenkt, in einer magnetischen Flasche eingeschlossen und schwingen so zwischen den Polen der Erde mit einer Schwingungsdauer von ca. einer Sekunde hin und her.

Wenn der Gürtel überladen wird, streifen die Partikel die obere Atmosphäre und regen diese zum Fluoreszieren an, wodurch das Polarlicht entsteht.



Massenspektrometer

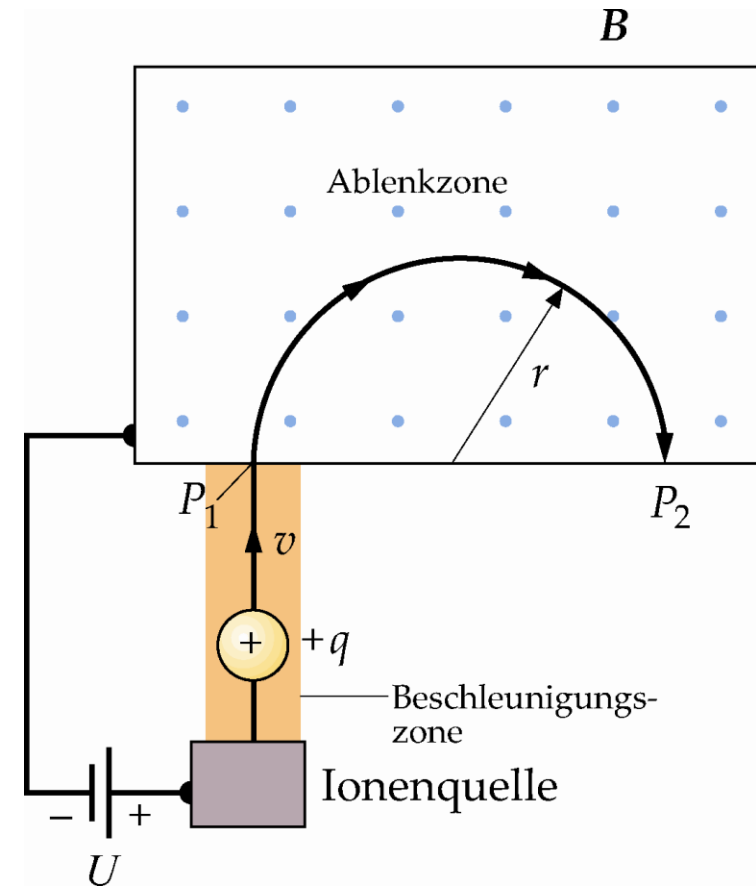
Ziel des Massenspektrometers ist der Nachweis von Isotopen, z.B. Magnesium:

^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg .

$$\frac{1}{2}mv^2 = q \cdot U$$

$$q \cdot U = \frac{1}{2}m \cdot \frac{r^2 \cdot q^2 \cdot B^2}{m^2}$$

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

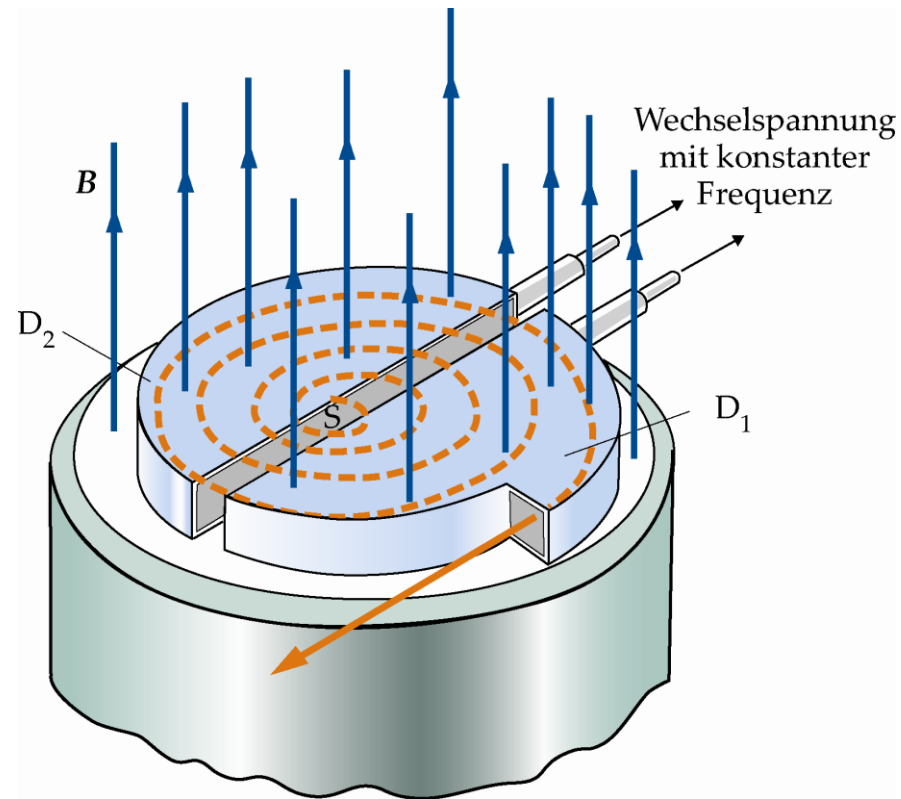


Zyklotron

Geladene Teilchen, emittiert von einer Quelle S in der Mitte der Anordnung, werden durch eine in der Lücke zwischen den D s herrschende Potenzialdifferenz beschleunigt und bewegen sich entlang der gestrichelten Bahn.

Die Potenzialdifferenz ändert ihr Vorzeichen mit der Zyklotronfrequenz des untersuchten Teilchens, die nicht von dem Radius der Bahn abhängt. Jedes Mal, wenn die Teilchen die Lücke erreichen, werden sie erneut beschleunigt, weshalb der Bahnradius immer größer wird.

Schließlich treten die Teilchen nach typischerweise 50 bis 100 Umläufen aus dem Magnetfeld aus und haben dann eine Energie von bis zu mehreren hundert MeV.



Drehmoment auf Leiterschleifen

Auf eine stromdurchflossene Leiterschleife wirkt in einem homogenen Magnetfeld keine resultierende Kraft, sondern ein Drehmoment:

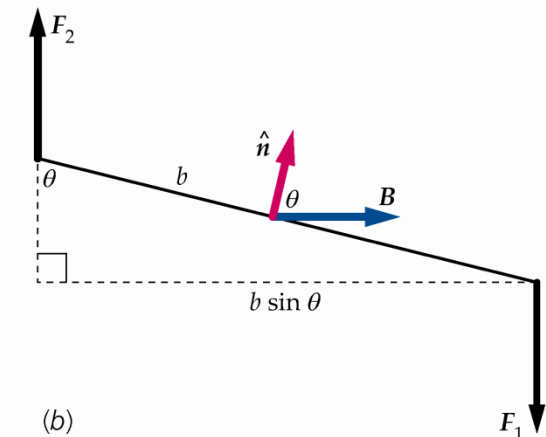
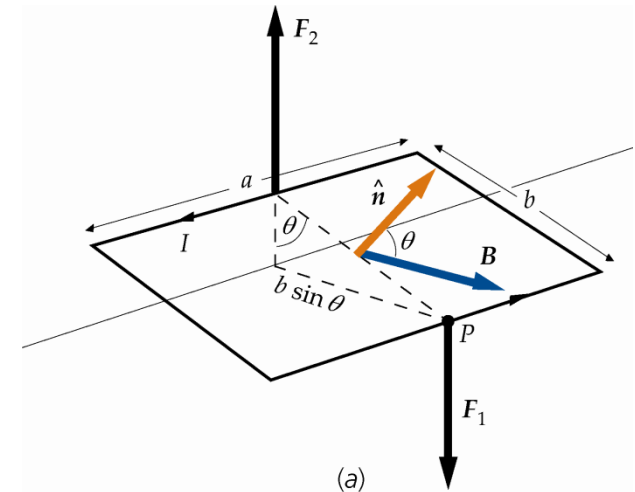
- a) rechteckige, stromdurchflossene Leiterschleife, deren Normalvektor \hat{n} einen Winkel Θ mit der Richtung eines homogenen Magnetfelds \mathbf{B} einschließt.
- b) Seitenansicht der Leiterschleife: das ausgeübte Drehmoment ist so gerichtet, dass durch die Drehung der Schleife der Normalvektor mit der Richtung von \mathbf{B} zur Deckung kommt.

$$|F_1| = |F_2| = I \cdot |a| \cdot |B|$$

$$|M| = |F_2| \cdot |b| \cdot \sin \Theta$$

$$|M| = I \cdot |a| \cdot |B| \cdot |b| \cdot \sin \Theta$$

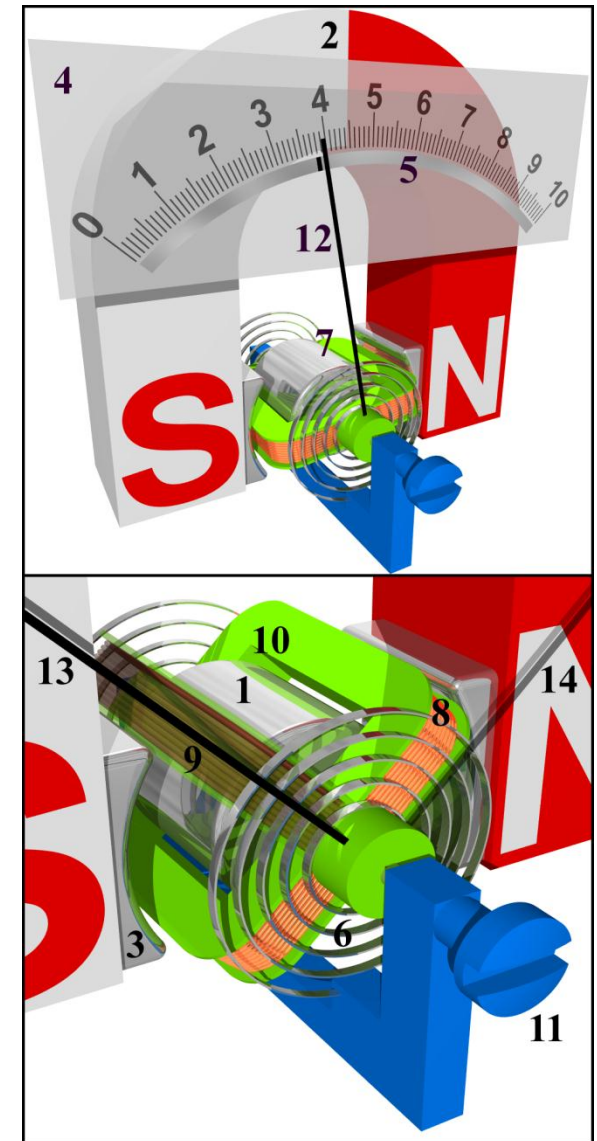
$$|M| = I \cdot |A| \cdot |B| \cdot \sin \Theta$$



Beispiel: Drehspulmesswerk

Funktionsprinzip eines Drehspulmesswerkes:

- (1) Weicheisenkern,
- (2) Permanentmagnet,
- (3) Polschuhe,
- (4) Skale,
- (5) Spiegelskale,
- (6) Rückstellfeder,
- (7) Drehspule,
- (8) Ruhelage,
- (9) Maximalausschlag,
- (10) Spulenkörper,
- (11) Justierschraube,
- (12) Zeiger,
- (13) Südpol,
- (14) Nordpol



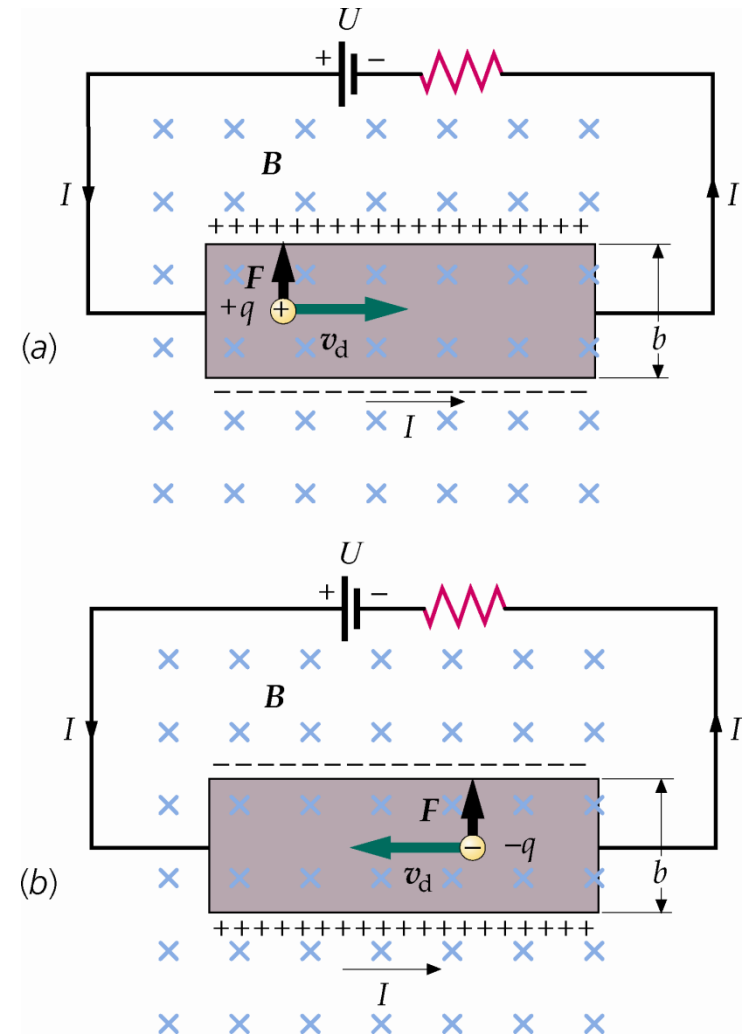
Der Hall-Effekt

Wenn der Strom von links nach rechts fließt, dann übt das Magnetfeld eine nach oben gerichtete Kraft auf den Ladungsträger aus, gleichgültig, ob es sich um

- a) positive Ladungsträger handelt, die sich nach rechts bewegen, oder
- b) negative Ladungsträger handelt, die sich nach links bewegen.

Eine Messung des Vorzeichens der Potentialdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Rand führen zum Vorzeichen der Ladungsträger.

Experimente dieser Art führten historisch zu dem Schluss, dass negative Ladungsträger für die Leitfähigkeit typischer Metalle verantwortlich sind.



Die Hall-Spannung

Die Hall-Spannung bietet einen bequemen Weg zur Messung von Magnetfeldern.

$$U_H = E_H \cdot b = v_d \cdot B \cdot b$$

$$U_H = \frac{|I|}{(n/V) \cdot d \cdot e} \cdot B$$

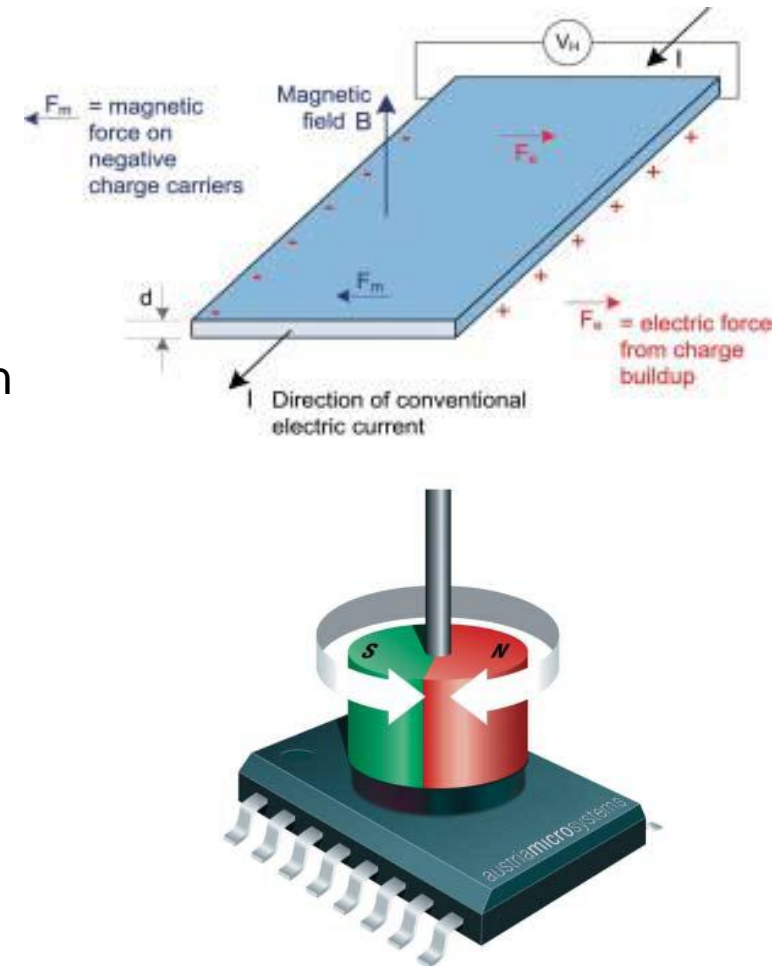
Hall-Sensoren

Wird ein Hall-Sensor von einem Strom durchflossen und in ein senkrecht dazu verlaufendes Magnetfeld gebracht, liefert er eine Ausgangsspannung, die proportional zum Produkt aus magnetischer Feldstärke und Strom ist.

Ist der Strom bekannt, kann man die magnetische Feldstärke messen; wird das Magnetfeld durch einen stromdurchflossenen Leiter oder eine Spule erzeugt, kann man potentialfrei die Stromstärke in diesem Leiter bzw. der Spule messen.

Sind Stromstärke und Magnetfeldstärke bekannt, kann der Hall-Sensor auch als Metalldetektor verwendet werden.

Ein Hall-Sensor liefert auch dann ein Signal, wenn das Magnetfeld konstant ist. Das ist der entscheidende Vorteil im Vergleich zur Paarung Magnet und Spule.



Der Versuch von Oersted

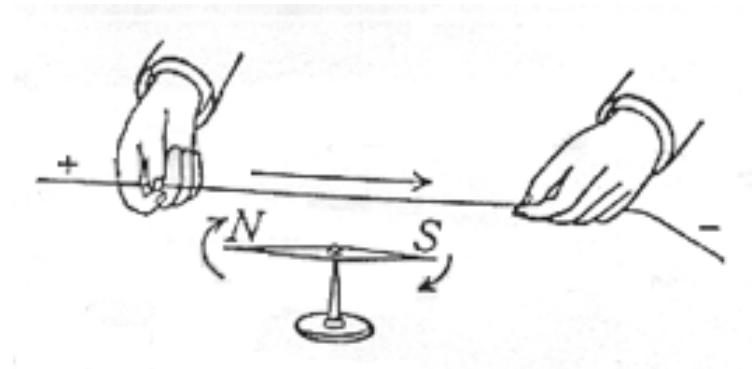
Im Jahre 1819 beobachtete Hans Christian Oersted die Ablenkung einer Kompassnadel als Strom durch einen Draht floss, der parallel zur Kompassnadel verlief. Oersted kannte den Begriff "Strom" noch nicht, er sprach von einem "elektrischen Conflict".

Bis zur Entdeckung von Oersted waren der Magnetismus und die Elektrizität zwei scheinbar voneinander völlig unabhängige Wissensgebiete. Die Entdeckung einer grundsätzlichen Verknüpfung zwischen Elektrizität und Magnetismus schlug bei der damaligen wissenschaftlichen Welt wie eine Bombe ein und führte zu Untersuchungen durch andere Forscher wie z.B. Ampere.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot v \times \hat{r}}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \times \hat{r}}{r^2}$$

magnetische Feldkonstante: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$



Magnetfeld eines geraden Leiters

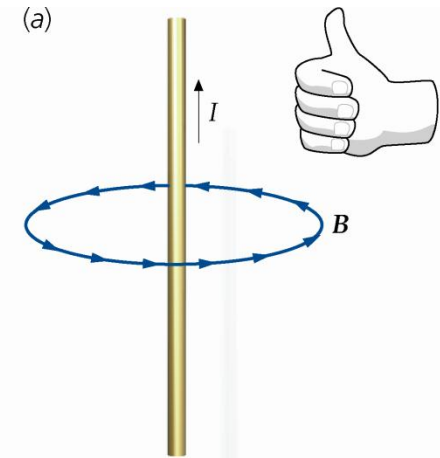
Abb. a): Zur Bestimmung der Richtung des von einem langen, geraden, stromdurchflossenen Leiter erzeugten Magnetfelds wenden wir die rechte-Hand-Regel an. Die Magnetfeldlinien bilden Kreise um den Draht in Richtung der Finger der rechten Hand, wenn der Daumen in Stromrichtung zeigt.

Abb. b): Feldlinien des von einem langen Draht hervorgerufenen Magnetfeldes, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r_S}$$

I - Strom durch den Leiter

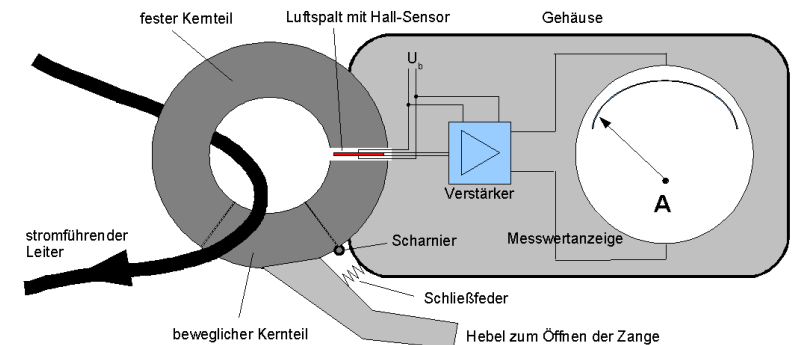
r_S - Radius senkrecht zum Leiter



Beispiel: Zangenamperemeter

Ein Zangenamperemeter, auch Strommesszangen oder Stromzangen genannt, sind Messgeräte zur indirekten Quantifizierung von Strömen. Während bei der direkten Messung der Stromkreis aufgetrennt werden muss, um das Amperemeter in Reihe zu schalten, ist dies bei der indirekten Messung mit dem Zangenamperemeter nicht erforderlich, da es die magnetische Wirkung des Leiterstroms misst.

Dank eines zangenartig teilbaren Eisenkerns kann man Leiter oder Stromschienen umfassen, ohne in den Stromkreis eingreifen zu müssen. Deshalb kann auch an Anlagen gemessen werden, die nicht abgeschaltet werden können. Ein weiterer Vorteil ist die galvanische Trennung. Das Messsignal ist also gegenüber der zu messenden Größe vollkommen potentialfrei.



Magnetfeld einer Leiterschleife

Abb. a): Magnetfeldlinien einer kreisrunden Leiterschleife

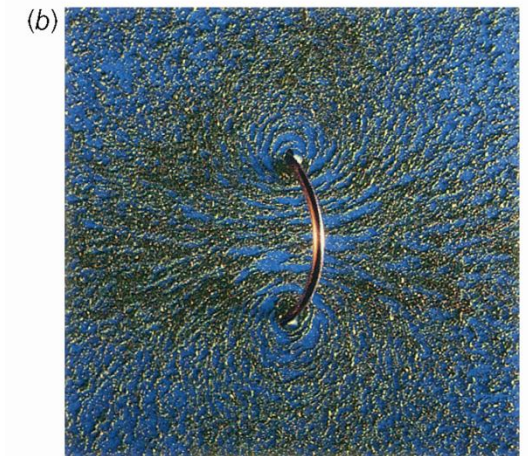
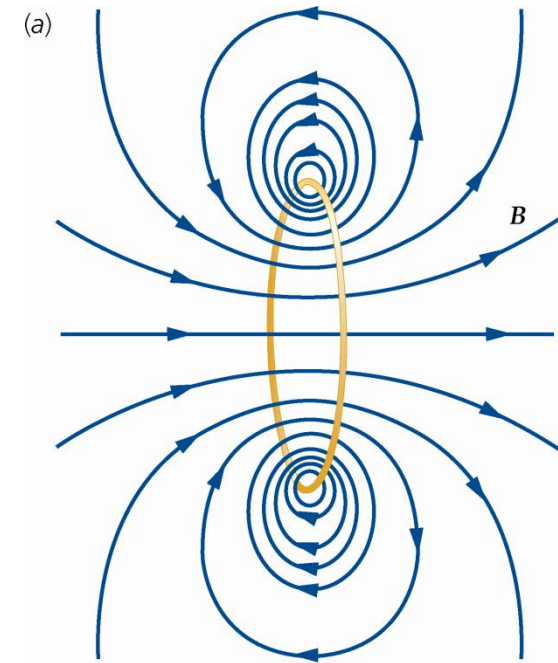
Abb. b): Magnetfeldlinien eines stromdurchflossenen Rings, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne.

Magnetfeld im Mittelpunkt einer Leiterschleife:

$$B = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{I}{2 \cdot r_{LS}}$$

I - Strom durch den Leiter

r_{LS} - Radius der Leiterschleife



Magnetfeld einer Spule

Abb. a): Magnetfeldlinien einer stromdurchflossenen Spule

Abb. b): Das Linienmuster stimmt mit dem eines Stabmagneten gleicher Gestalt überein.

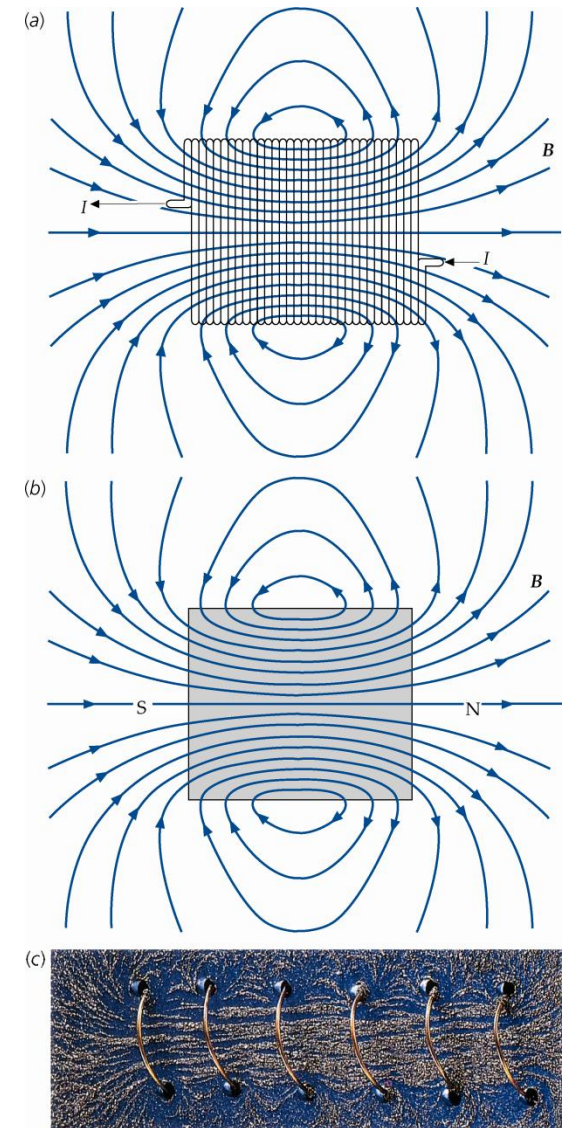
Abb. c): Magnetfeldlinien einer Spule, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne.

Magnetfeld im Inneren einer langen Spule:

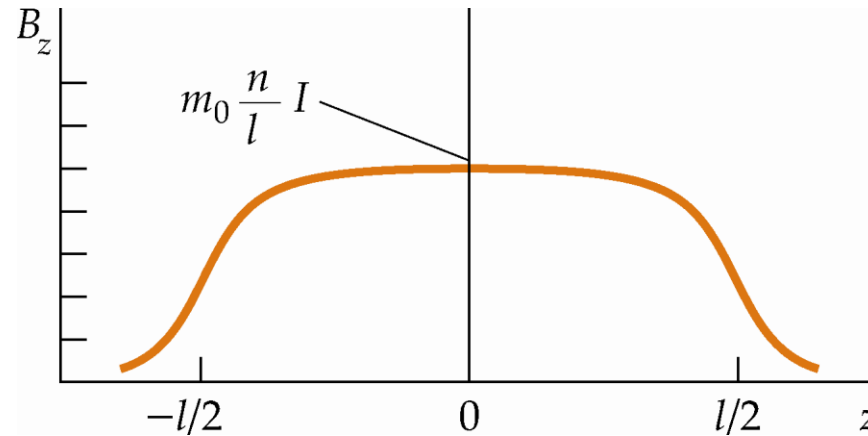
$$B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{l_S}$$

I - Strom durch den Leiter

l_S - Länge der Spule



Magnetfeld im Inneren einer langen Spule

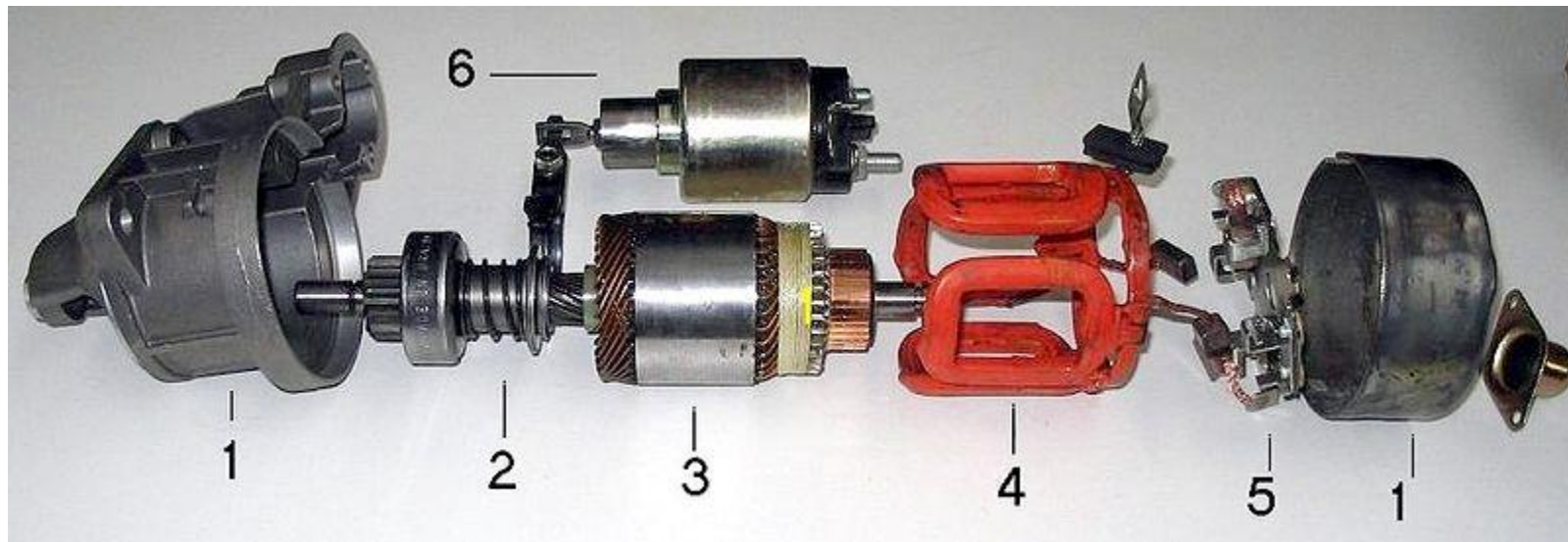
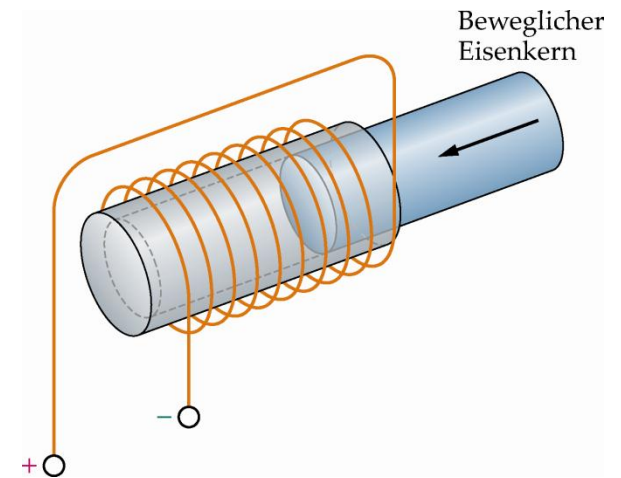


Magnetfeld im Inneren einer Spule auf deren Achse als Funktion der Position z

In hinreichend großer Entfernung von den Enden der Spule ist das Magnetfeld nahezu konstant. Die Länge l dieser Spule ist zehnmal so groß wie ihr Radius r .

Beispiel: Anlasserspule eines Autos

Fließt durch die Spule ein Strom, so zieht das erzeugte Magnetfeld den Eisenkern ins Innere der Spule, woraufhin das Ritzel des Anlassermotors an das Schwungrad des Motors koppelt. Wird die Stromzufuhr zur Spule unterbrochen, so kuppelt eine Feder das Ritzel wieder ab und schiebt den Eisenkern in die Ausgangslage.



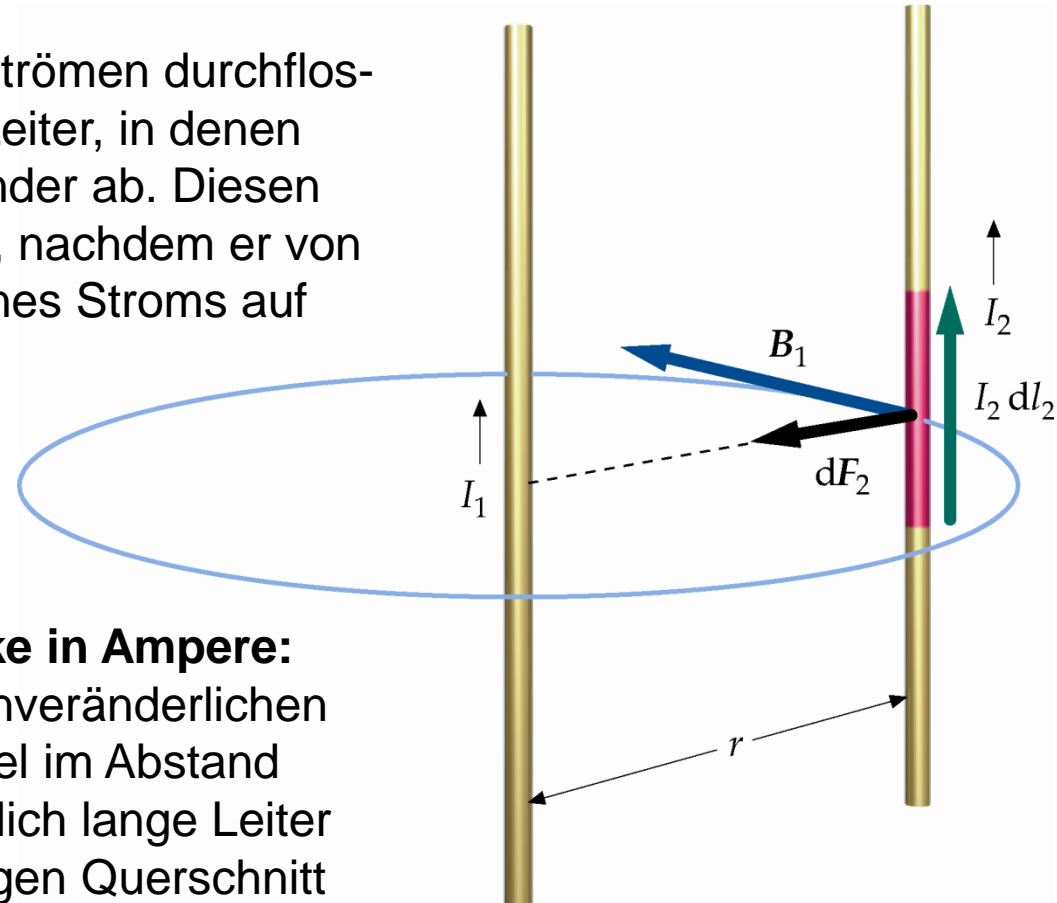
Die Kraft zwischen zwei parallelen stromdurchflossenen Leitern

Zwei parallele, in gleicher Richtung von Strömen durchflossene Leiter, ziehen sich gegenseitig an. Leiter, in denen antiparallele Ströme fließen, stoßen einander ab. Diesen Effekt entdeckte Ampere nur eine Woche, nachdem er von Oersteds Beobachtungen zur Wirkung eines Stroms auf eine Kompassnadel erfahren hatte.

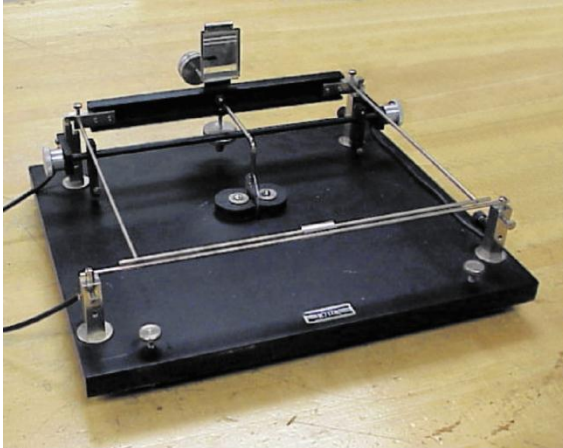
$$\frac{dF_{12}}{dl_2} = -2 \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$

Das führt zur Definition der Stromstärke in Ampere:

Ein Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 m angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließt und zwischen diesen Leitern je 1 m Leiterlänge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorruft.

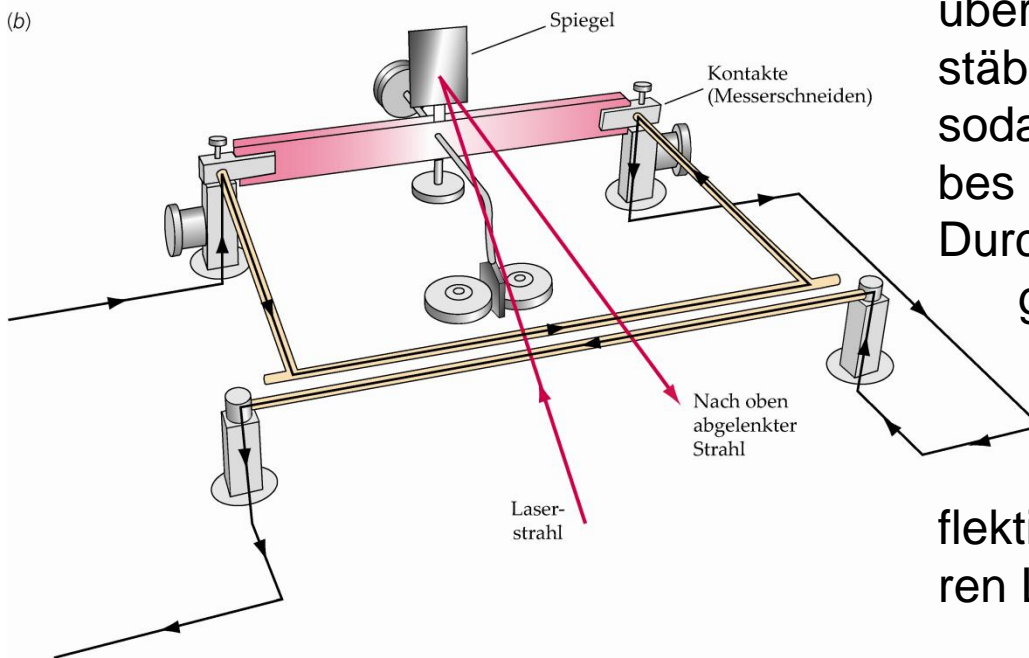


Beispiel: Stromwaage



(a)

(b)



Die Stromwaage ist ein Messinstrument, das in physikalischen Labors verwendet wird.

Durch die beiden parallelen Stäbe im Vordergrund fließen gleich starke, aber entgegengesetzt gerichtete Ströme, weshalb die Leiter einander abstoßen. Der obere Stab ist

über rechtwinklig angesetzte Verbindungsstäbe kippbar auf Messerschneiden gelagert, sodass der Spiegel je nach Position des Stabes aus der Senkrechten gekippt wird.

Durch Tariergewichte auf dem oberen Stab gleicht man die nach dem Einschalten des Stroms wirkende Abstoßungskräfte aus. Mit Hilfe eines Laserstrahls, der am hinten angebrachten Spiegel reflektiert wird, kann man die Position des oberen Leiterstabs exakt bestimmen.

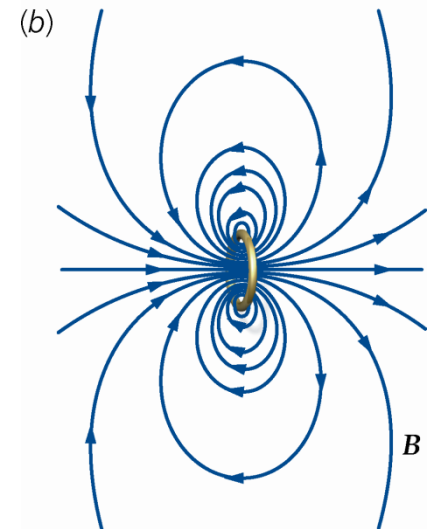
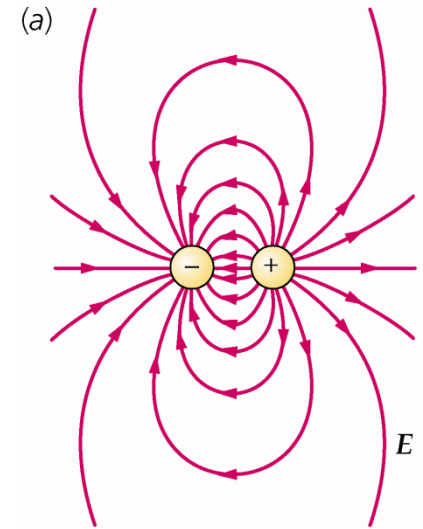
Feldlinien

Abb. a): Elektrische Feldlinien eines elektrischen Dipols

Abb. b): Magnetfeldlinien eines magnetischen Dipols

In großer Entfernung von den Dipolen sind die Muster identisch.

Im Gebiet zwischen den elektrischen Ladungen (a) ist die Richtung der elektrischen Feldlinien entgegengesetzt der Richtung des Dipolmoments, innerhalb der Leiterschleife (b) sind die Magnetfeldlinien parallel zur Richtung des Dipolmoments.



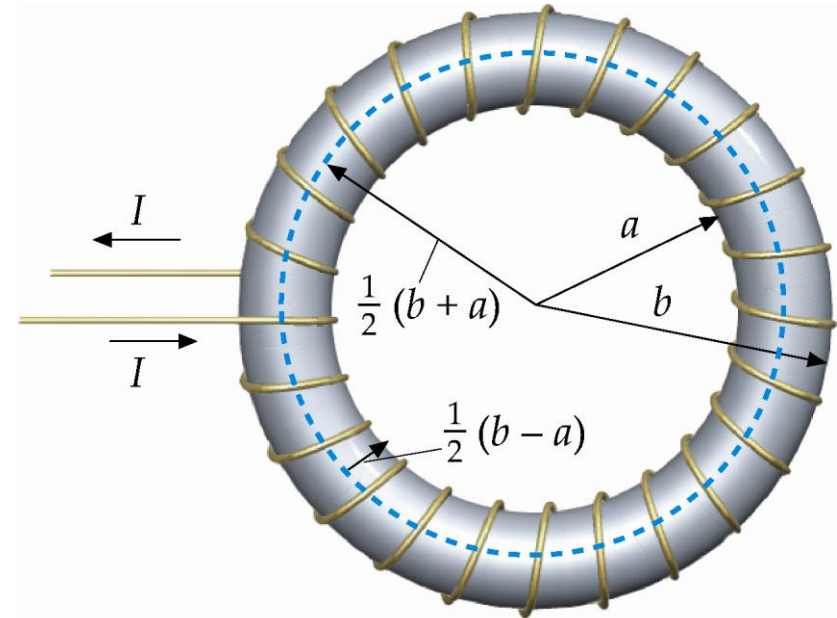
Magnetfeld im Inneren einer Ringspule

Eine dicht gewickelte Toroid- oder Ringspule besteht aus Drahtschleifen, die um eine zum Ring geschlossene Röhre gewickelt sind. In jeder der n Windungen fließt der gleiche Strom I .

Für $a < r < b$ gilt:

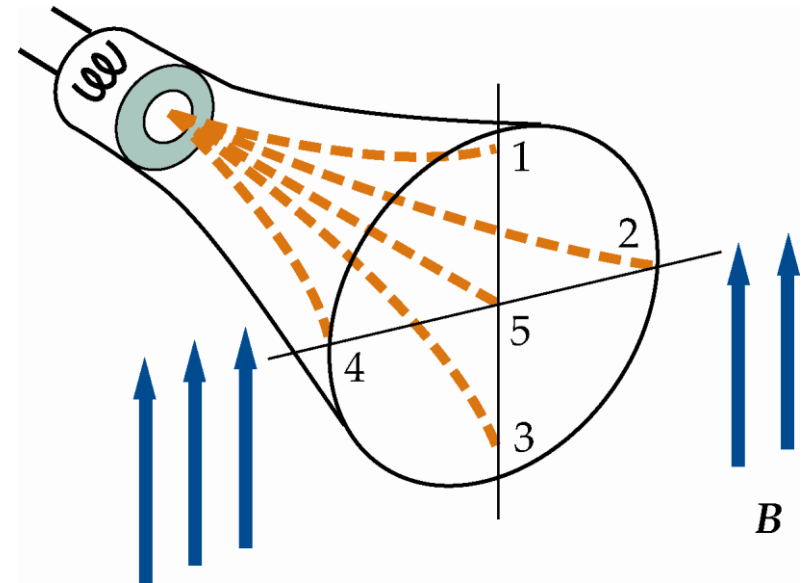
$$B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

I - Strom durch den Leiter
 r_{LS} - Radius der Leiterschleife



Aufgaben

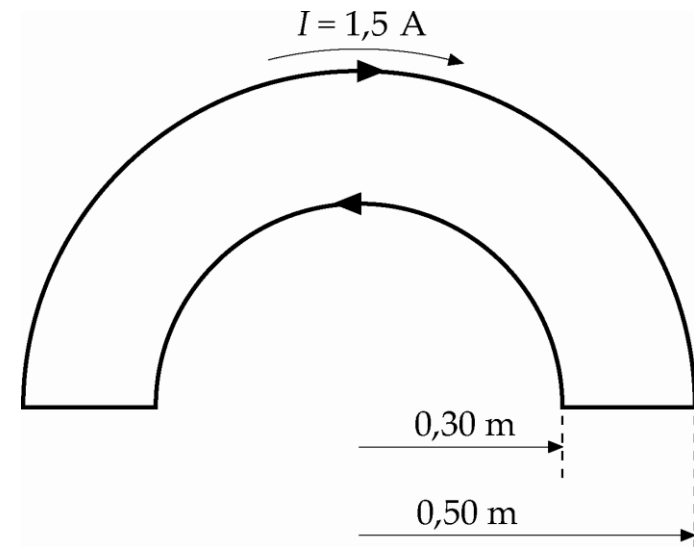
1. Die Achse einer Kathodenstrahlröhre liegt waagerecht in einem Magnetfeld, dessen Vektor senkrecht nach oben zeigt. Auf welcher der gestrichelten Bahnen bewegen sich die von der Kathode emittierten Elektronen?



2. Ein Zyklotron zur Beschleunigung von Protonen arbeitet mit einem Magnetfeld von $1,4 \text{ T}$ und hat einen Radius von $0,70 \text{ m}$.
 - a) Geben Sie die Zyklotronfrequenz an.
 - b) Berechnen Sie die kinetische Energie der Protonen beim Austritt aus dem Zyklotron.
 - c) Wie ändern sich Ihre Ergebnisse, wenn Sie Deuteronen anstelle von Protonen betrachten (Proton= ${}^1\text{H}^+$, Deuteron= ${}^2\text{H}^+$)?

Aufgaben

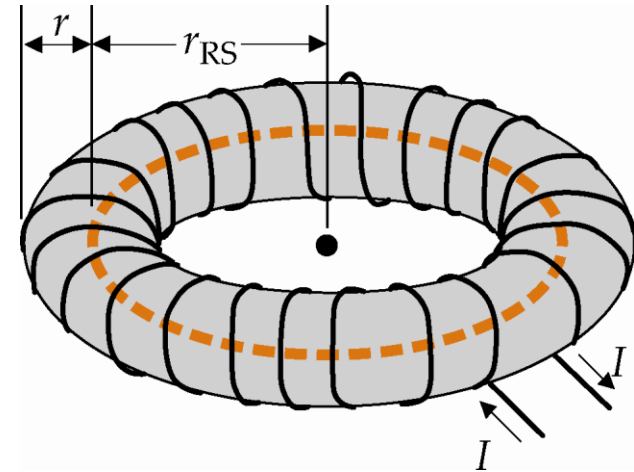
3. Es gibt zwei stabile Chlorisotope: ^{35}Cl und ^{37}Cl . Eine Mischung einfach ionisierter Chlormoleküle soll mit Hilfe eines Massenspektrometers in die Isotopenanteile getrennt werden. Das Spektrometer arbeitet mit einer Magnetfeldstärke von 1,2 T. Welche Beschleunigungsspannung muss mindestens anliegen, damit die räumliche Trennung der Isotope nach dem Durchlaufen der Halbkreisbahn 1,4 cm beträgt?
4. Eine Leiterschleife besteht aus zwei Halbkreisbögen, verbunden durch gerade Abschnitte (siehe Abbildung). Der innere Radius ist 0,3 m, der äußere ist 0,5 m. Durch die Schleife fließt ein Strom $I=1,5\text{ A}$ (im äußeren Bogen in Uhrzeigerrichtung). Geben Sie das magnetische Moment der Leiterschleife an!



Aufgaben

1. Eine von Strom I durchflossene Ringspule mit n Windungen hat den mittleren Radius r_{RS} und den Querschnittsradius r mit $r \ll r_{RS}$ (siehe Abbildung).

Ist die Spule mit einem Material gefüllt, so nennt man sie auch Rowald-Ring. Berechnen Sie \mathbf{B}_{aus} und \mathbf{B}_{res} in einem solchen Ring, wenn die Magnetisierung überall parallel zu \mathbf{B}_{aus} ist.



2. Ein 2,0 m unter der Erde verlegtes Starkstromkabel führt einen Strom von 50 A. Die genaue Lage und die Richtung des Kabels sind nicht bekannt. Wie können Sie beides mit Hilfe eines Kompasses ermitteln? Das Kabel befindet sich in unmittelbarer Nähe des Äquators, wo das Erdmagnetfeld mit einer Stärke von 0,70 G nach Norden zeigt.

Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Hochschule Deggendorf – Edlmairstr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf