




# Physik für Infotronik (16)

Gerald Kupris

02.12.2015

## Vorlesungen Physik WS2015/16

|   |                       |  |
|---|-----------------------|--|
| 25.11.2015  | Vorlesung 13          | Das elektrische Feld                         |
| 25.11.2015  | Vorlesung 14          | Ladungsverteilung und elektrisches Potenzial |
| 02.12.2015  | Vorlesung 15          | Die Kapazität                                |
|  02.12.2015 | Vorlesung 16          | Das Magnetfeld                               |
| 09.12.2015  | Vorlesung 17          | Quellen des Magnetfelds                      |
| 09.12.2015  | Vorlesung 18          | Die magnetische Induktion                    |
| 16.12.2015  | Vorlesung 19          | Magnetische Induktion und Transformatoren    |
| 16.12.2015  | Vorlesung 20          | Elektromagnetische Wellen                    |
| <b>23.12.2015</b>   | <b>vorlesungsfrei</b> |  |
| 13.01.2016  | Vorlesung 21          | Aufbau von Festkörpern                       |
| 13.01.2016  | Vorlesung 22          | Leiter und Halbleiter                        |
| 20.01.2016  | Vorlesung 23          | Wiederholung und Prüfungsvorbereitung        |
| 20.01.2016  | Vorlesung 24          | Wiederholung und Prüfungsvorbereitung        |

# 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.

## Magnetische Monopole?

Elektrische Ladungen und magnetische Pole ähneln einander in vielerlei Hinsicht, aber zwischen ihnen besteht ein wesentlicher Unterschied: Magnetische Pole treten niemals isoliert, sondern stets paarweise auf.

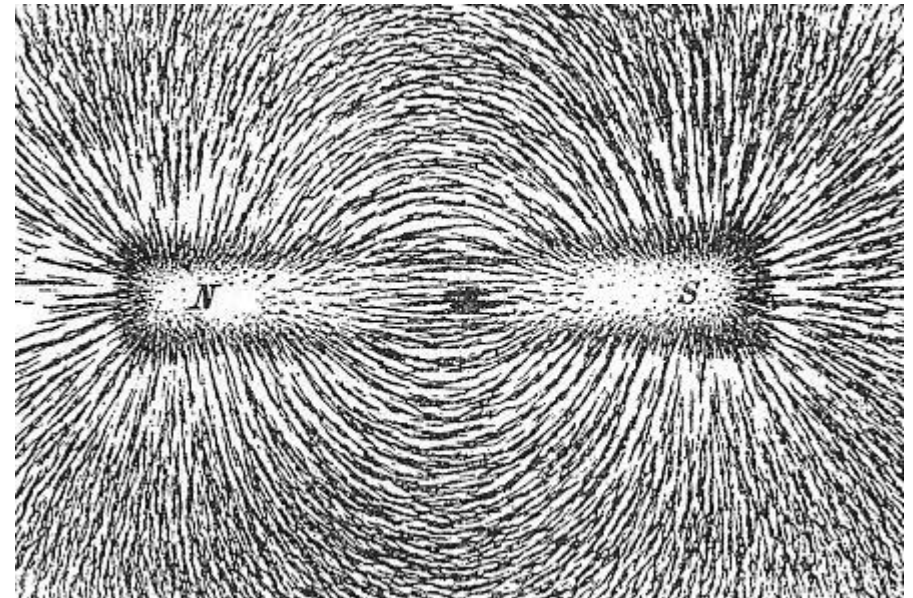
Wenn ein Stabmagnet in zwei Hälften geteilt wird, erscheinen an der Bruchstelle neue Pole - das bedeutet, es entstehen zwei Magnete mit jeweils einem Nord- und Südpol. Eine Erklärung dafür ist, dass schon die einzelnen Moleküle/Atome als Magneten wirken. Durch die gleichmäßige Aneinanderreihung (also in die gleiche Richtung) wird die Wirkung entsprechend stark.

Über die Existenz magnetischer Monopole wurde vielfach spekuliert. Viele Forscher haben in den zurückliegenden Jahren erfolglos versucht, ein solches Phänomen nachzuweisen. Es wurde aber auch noch nicht endgültig bewiesen, dass es magnetische Monopole nicht geben kann.

## Magnetische Feldlinien

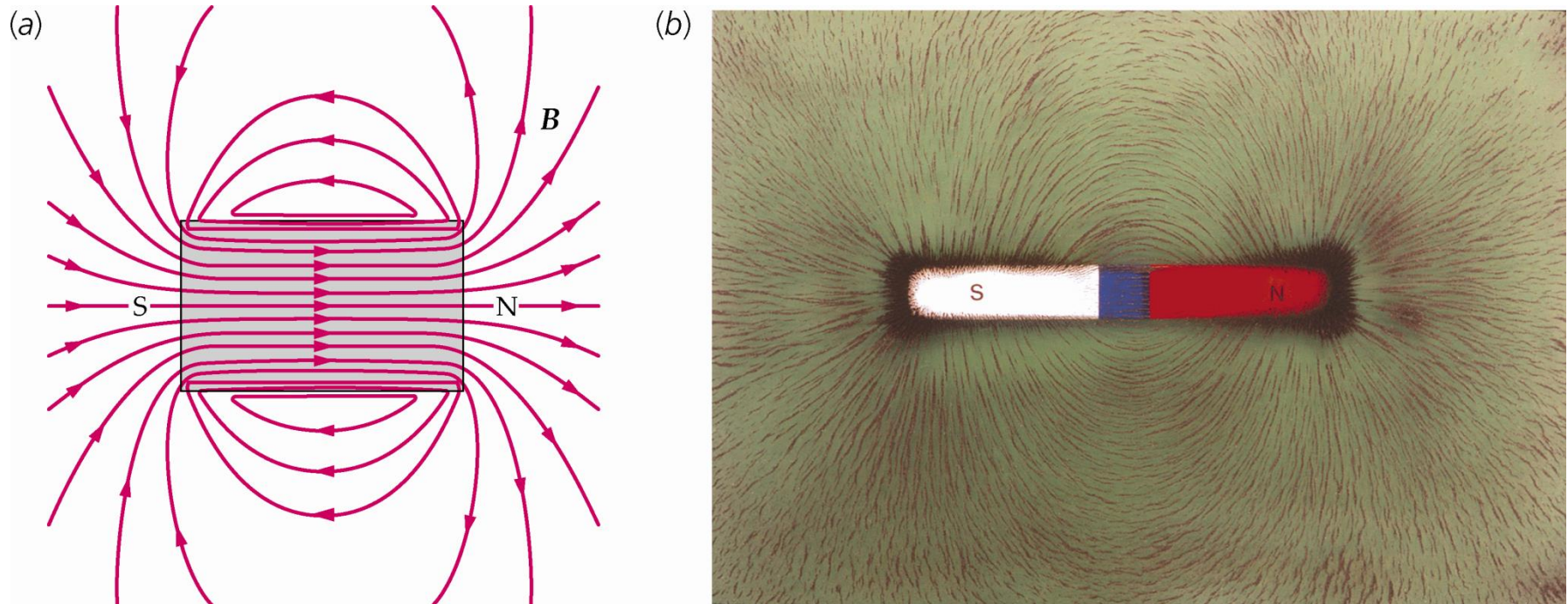
Magnetische Feldlinien veranschaulichen in jedem Punkt des Feldes Richtung und Richtungssinn des Magnetfeldes bzw. des magnetischen Flusses. Der Abstand zwischen benachbarten Feldlinien ist ein Anhaltspunkt für die Stärke des Magnetfeldes: je dichter die Feldlinien, desto stärker das Feld.

Magnetische Feldlinien haben keinen Anfang und kein Ende, sondern verlaufen als geschlossene Bahnen. In der Magnetostatik gibt es im Gegensatz zur Elektrostatik keine Ladungen. Somit ist das Magnetfeld quellenfrei. Magnetische Feldlinien können durch die Ausrichtung von Eisenfeilspänen oder einer Kompassnadel sichtbar gemacht werden; für dreidimensionale Demonstrationen kann man die Eisenfeilspäne zum Beispiel in Silikonöl suspendieren.





## Richtung der magnetischen Feldlinien

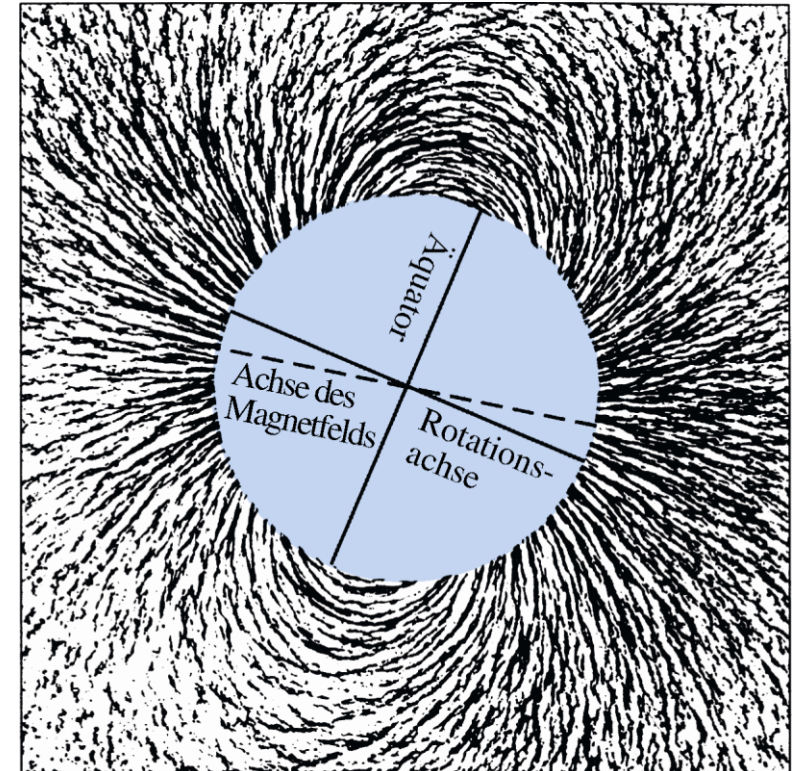


Innerhalb des Magneten verlaufen die Feldlinien von Südpol zum Nordpol, außerhalb des Magneten von Nordpol zum Südpol.

## Magnetfeld der Erde

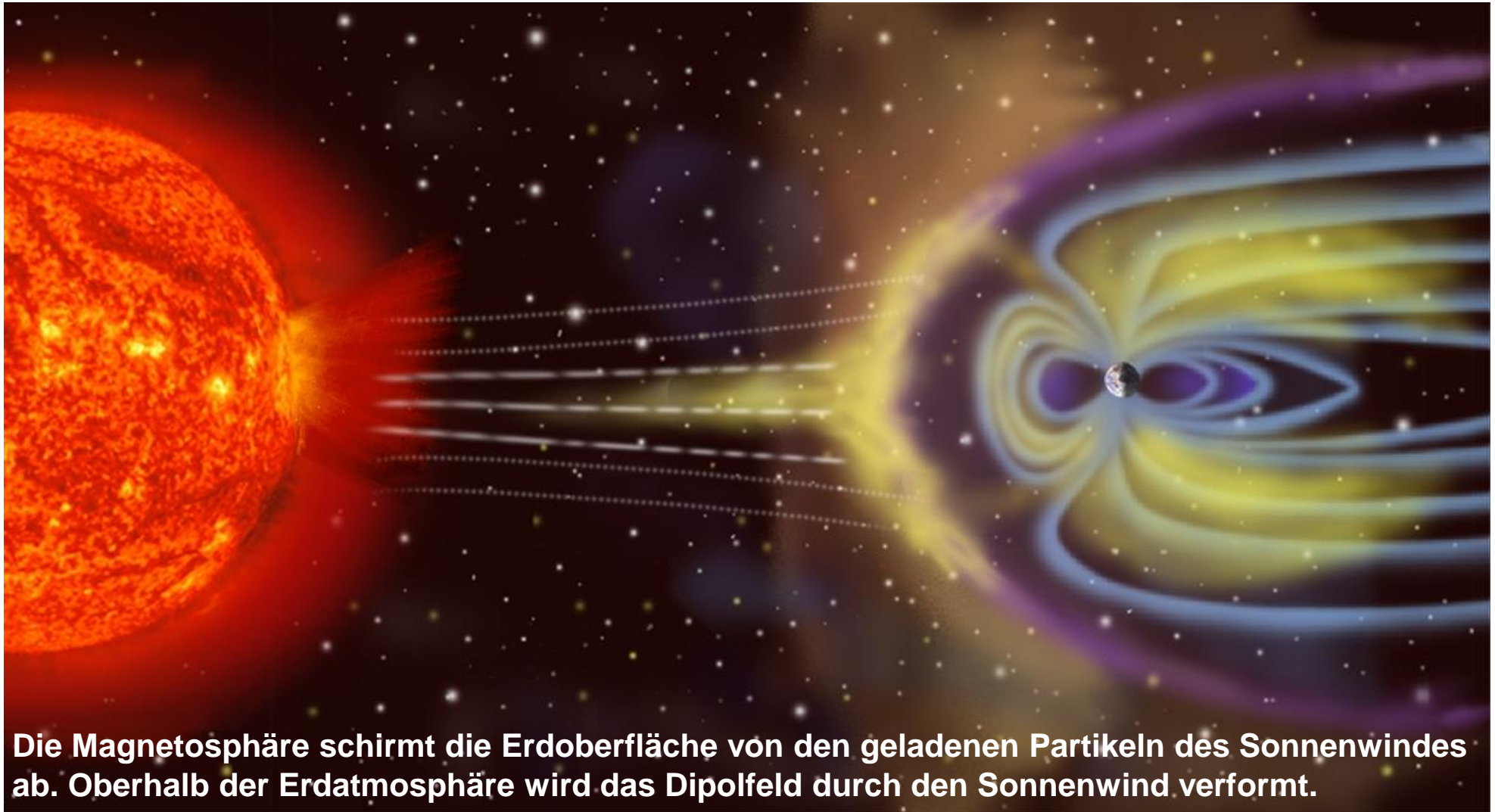
Das Erdmagnetfeld ist das Magnetfeld, das die Erde umgibt. Es wird von dem so genannten Geodynamo erzeugt. Nahe der Erdoberfläche ähnelt das Feld dem eines magnetischen Dipols. Die magnetischen Feldlinien treten im Wesentlichen auf der Südhalbkugel aus der Erde aus und durch die Nordhalbkugel wieder in die Erde ein.

In guten Magnet-Kompassen ist die Nadel so aus-tariert, dass sie vor allem auf die Horizontal-komponente anspricht und daher in den meisten Gebieten etwa nach Norden weist. Am Geomag-netischen Nordpol befindet sich aus physikalischer Sicht ein magnetischer Südpol. Die geomagneti-schen Pole der Erde fallen nicht genau mit den geographischen Polen der Erde zusammen. Zur Zeit ist die Achse des geomagnetischen Dipolfeldes um etwa  $11,5^\circ$  gegenüber der Erdachse geneigt.





# Magnetosphäre der Erde



Die Magnetosphäre schirmt die Erdoberfläche von den geladenen Partikeln des Sonnenwindes ab. Oberhalb der Erdatmosphäre wird das Dipolfeld durch den Sonnenwind verformt.



## Stärke des Magnetfeldes

Die Stärke eines Magnetfeldes kann durch zwei verschiedene physikalische Größen ausgedrückt werden, die magnetische Feldstärke  $\mathbf{H}$  (Einheit:  $\mathbf{A/m}$ ) und die magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$  (Einheit  $\mathbf{T}$ -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  $\mathbf{H}$ , 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:  **$1 \text{ T} = 10000 \text{ G} = 10^4 \text{ G}$**      **$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} = 100 \text{ } \mu\text{T}$** .

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

## Magnetische Kraftwirkung auf Magnete

Das magnetische Feld übt ferner Kräfte auf Magnete und magnetisierbare Körper (Ferromagnetismus der weichmagnetischen Ferrite und Ferromagnetismus von Metallen wie Eisen) aus. Magnete und gestreckte Probekörper aus magnetisierbaren Materialien richten sich immer längs der Feldlinien beziehungsweise antiparallel zu diesen aus, das heißt, der magnetische Südpol eines Probemagneten richtet sich entlang der Feldlinien zum Nordpol des erzeugenden Feldes aus.

Dieser Effekt wird zum Beispiel beim magnetischen Kompass ausgenutzt, bei dem sich die Kompassnadel, ein magnetischer Dipol, nach dem Erdmagnetfeld ausrichtet. Weitere Beispiele sind Zugmagnete, Haltemagnete und Elektromagnete an Magnetkranen.

Ugleichnamige Pole ziehen sich an und gleichnamige Pole stoßen sich ab, daher sind zwei Magnete bestrebt, ungleichnamige Pole einander zuzuwenden. Handelt es sich jeweils um inhomogene Felder, ziehen sich die beiden Magnete an. Ursache für beide Beobachtungen ist, dass ein energieärmerer Zustand eingenommen wird – die Kräfte wirken stets so, dass die Gesamtenergie des Feldes abnimmt, wenn die Magnete ihnen folgen. In der mathematischen Beschreibung der Kraft spielt daher der Gradient des Magnetfeldes eine Rolle.

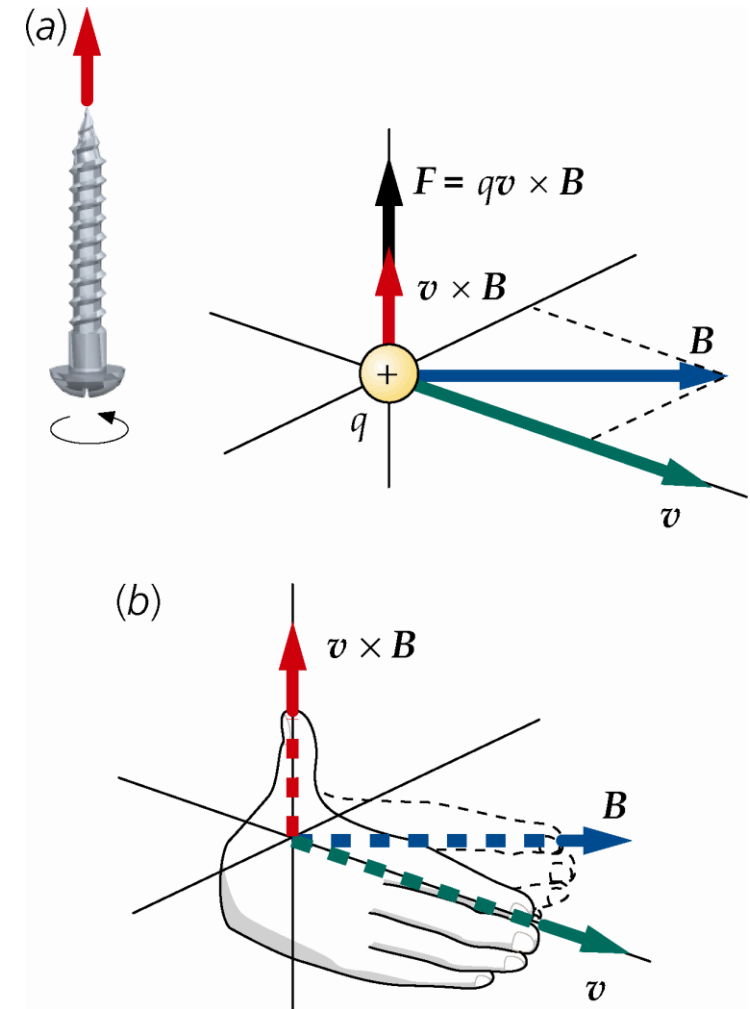
# Magnetische Kraftwirkung auf bewegte Ladungen

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.

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

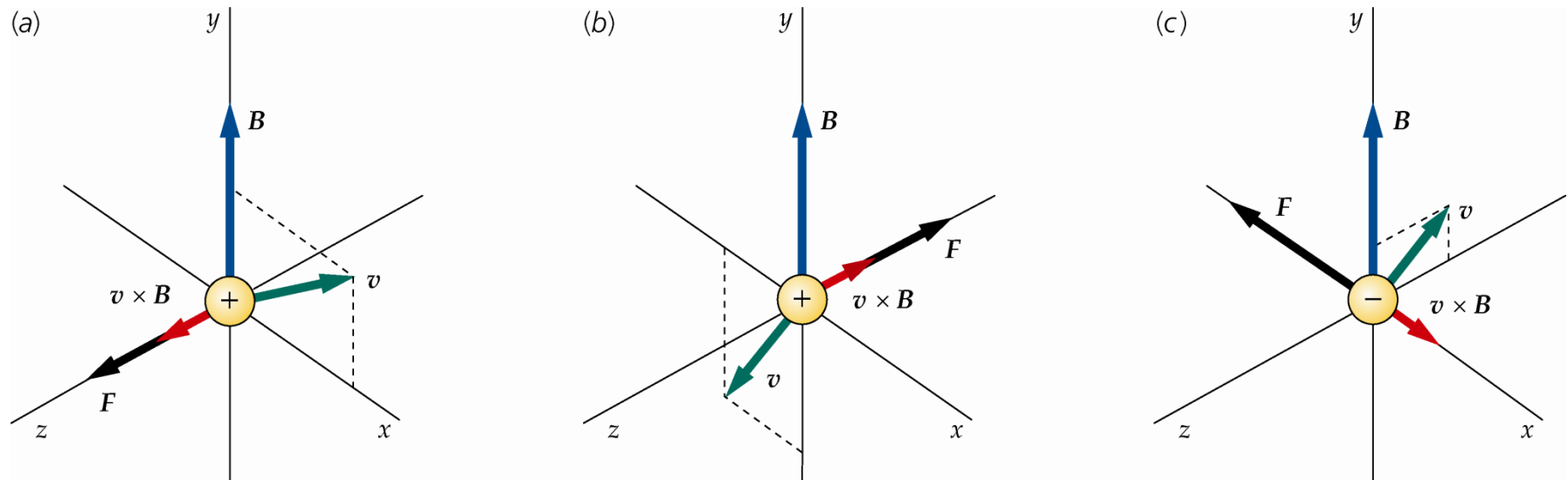




## Stärke des Magnetfeldes

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

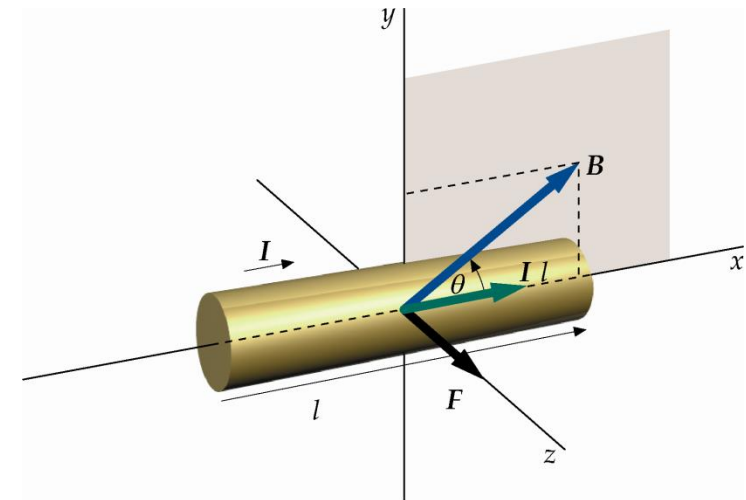
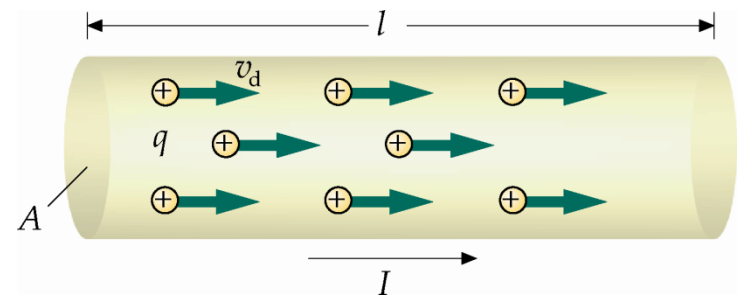
$$F = (q \cdot v_d \times B) \cdot \frac{n}{V} \cdot A \cdot l$$

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

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

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

Stromelement



## Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld

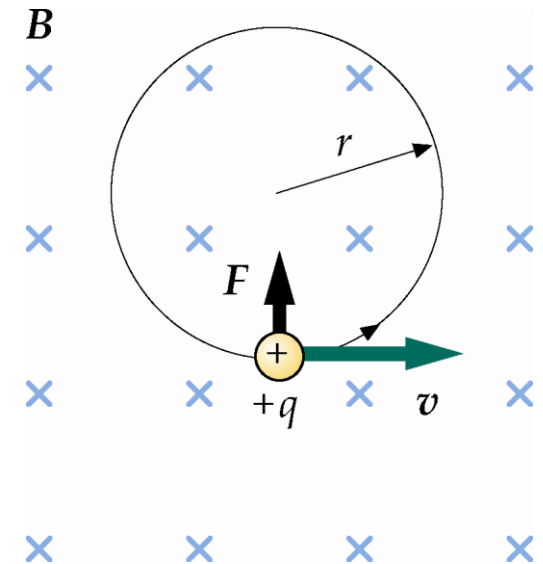
Wenn sich ein Teilchen in einem homogene Magnetfeld bewegt und seine Geschwindigkeit senkrecht zu dem Magnetfeld gerichtet ist, dann beschreibt das Teilchen eine Kreisbahn.

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

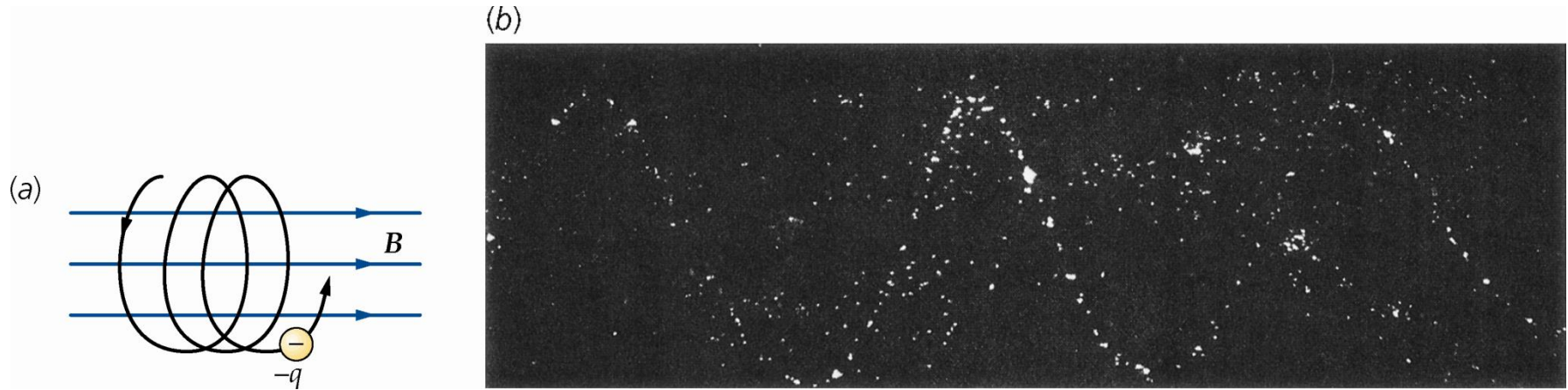
$$\frac{q \cdot v \cdot B}{m} = \frac{v^2}{r}$$

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

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



## Schraubenbahn eines geladenen Teilchens

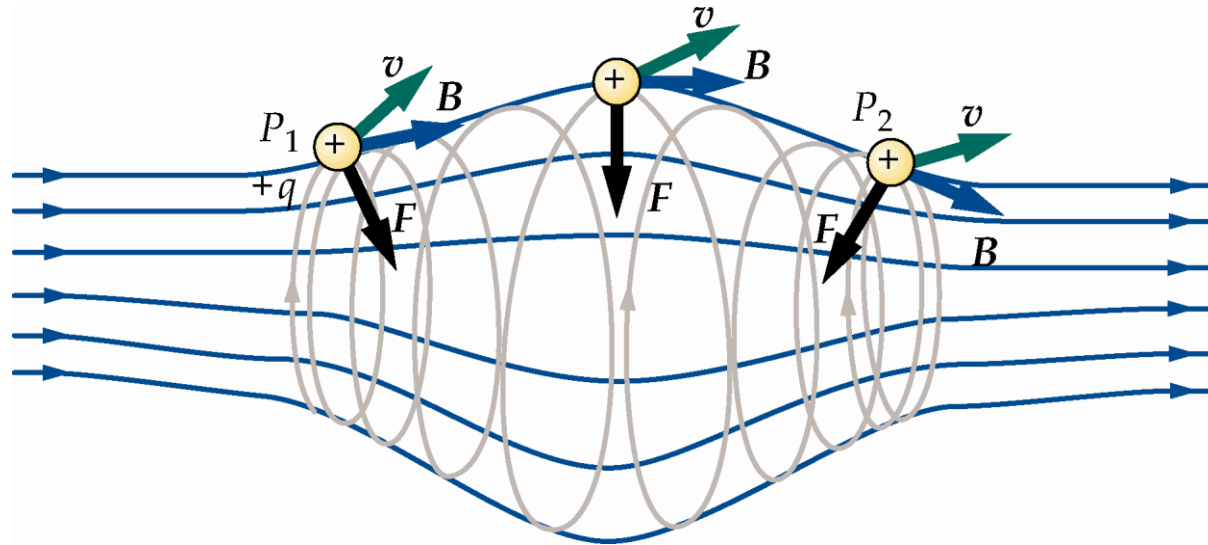


a) Besitzt die Geschwindigkeit eines Teilchens Komponenten sowohl parallel als auch senkrecht zum homogenen Magnetfeld, so beschreibt das Teilchen eine Schraubenbahn um die Feldlinien.

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



## Magnetische Flasche



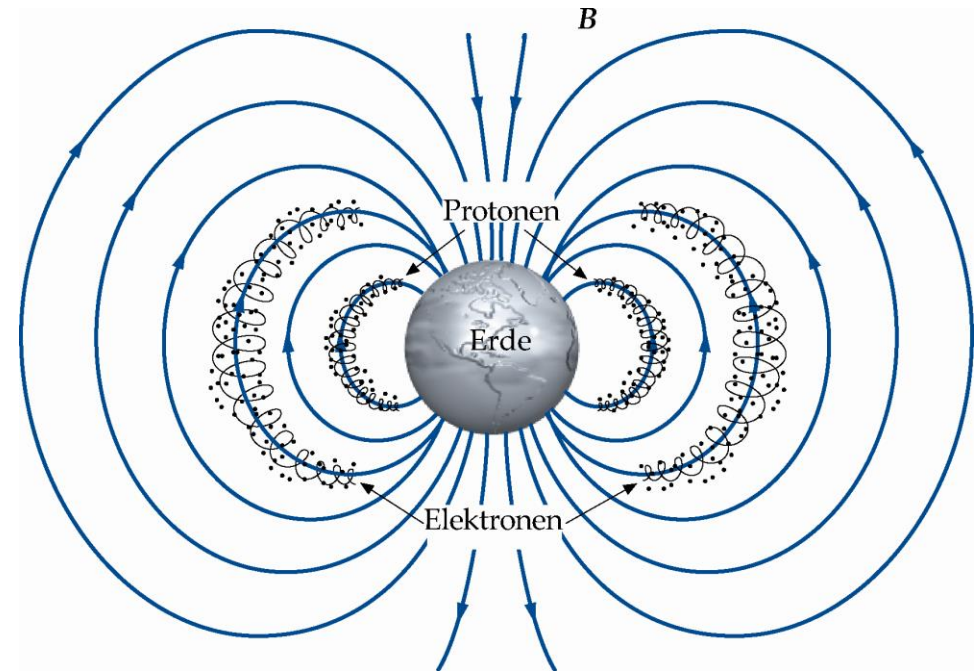
Das Feld ist auf beiden Seiten (rechts und links außen) wesentlich stärker als in der Mitte. Ein geladenes Teilchen bewegt sich darin auf Spiralbahnen um die Feldlinien hin und zurück, ohne die Flasche verlassen zu können.

## 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

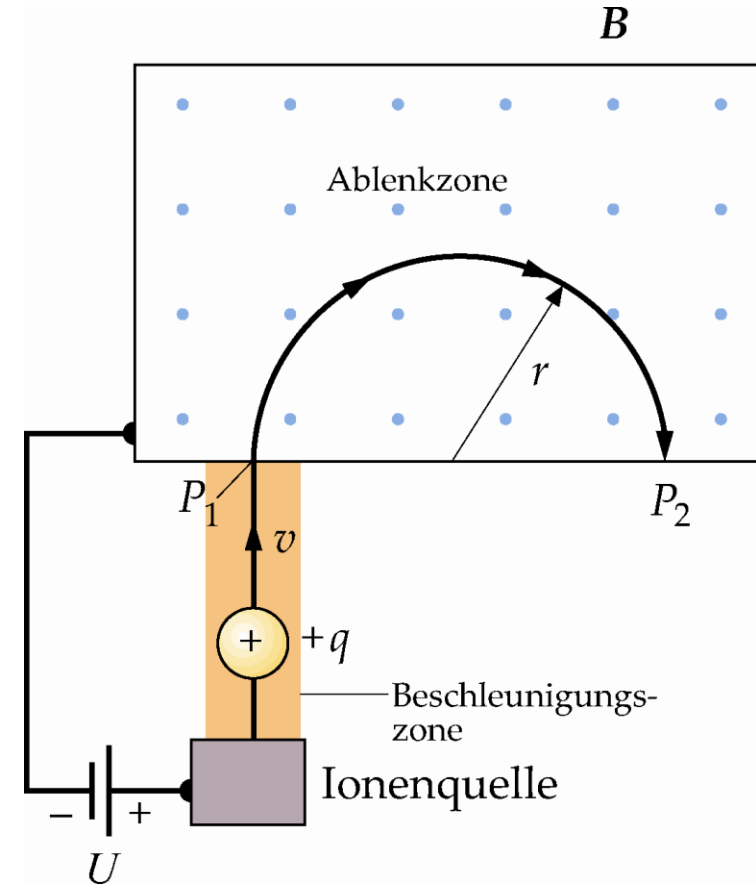
Ziel des Massenspektrometers ist der Nachweis von Isotopen, z.B. Magnesium:

$^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ .

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

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

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

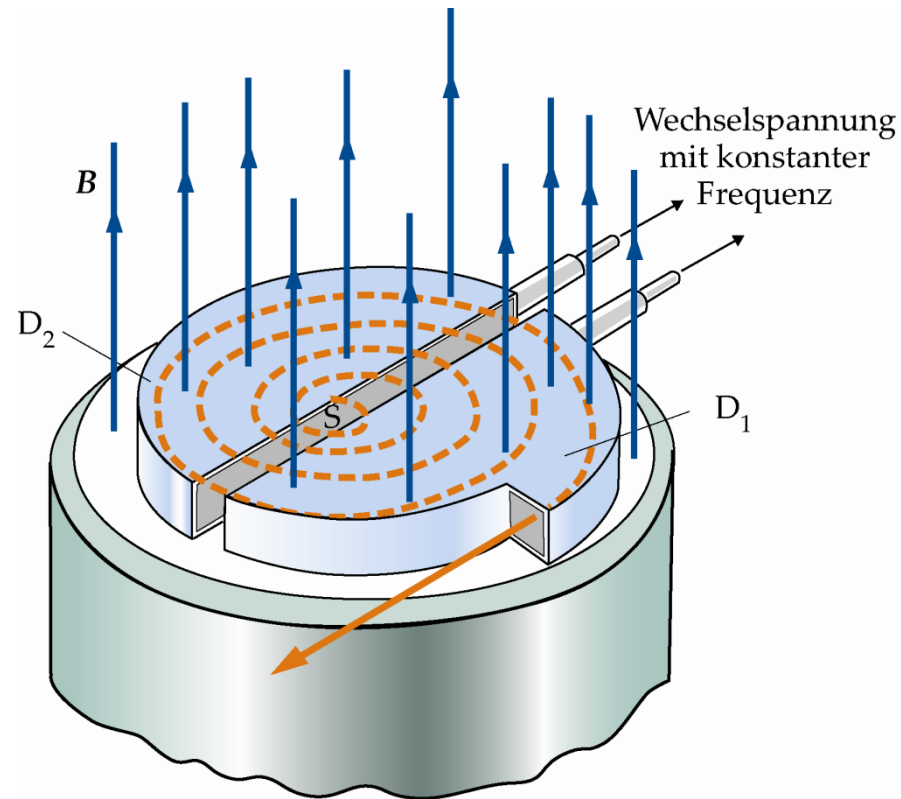


# Zyklotron

Geladene Teilchen, emittiert von einer Quelle S in der Mitte der Anordnung, werden durch eine in der Lücke zwischen den Ds 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:

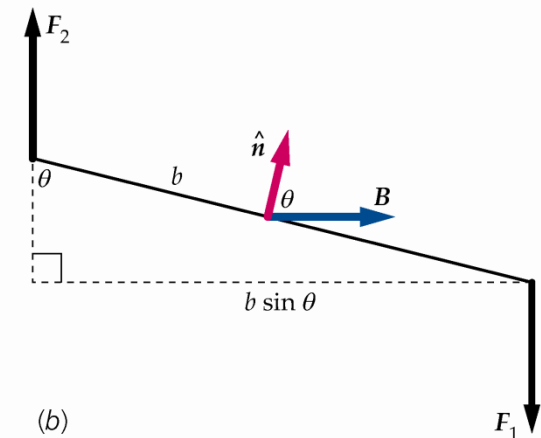
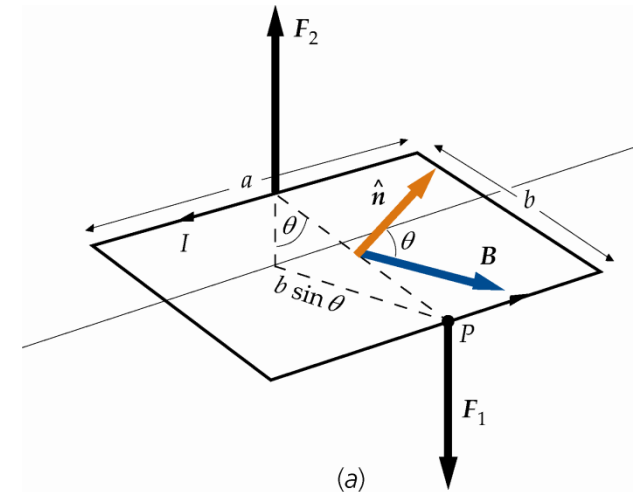
- a) rechteckige, stromdurchflossene Leiterschleife, deren Normalvektor  $\hat{n}$  einen Winkel  $\Theta$  mit der Richtung eines homogenen Magnetfelds  $\mathbf{B}$  einschließt.  
 b) Seitenansicht der Leiterschleife: das ausgeübte Drehmoment ist so gerichtet, dass durch die Drehung der Schleife der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

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

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

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

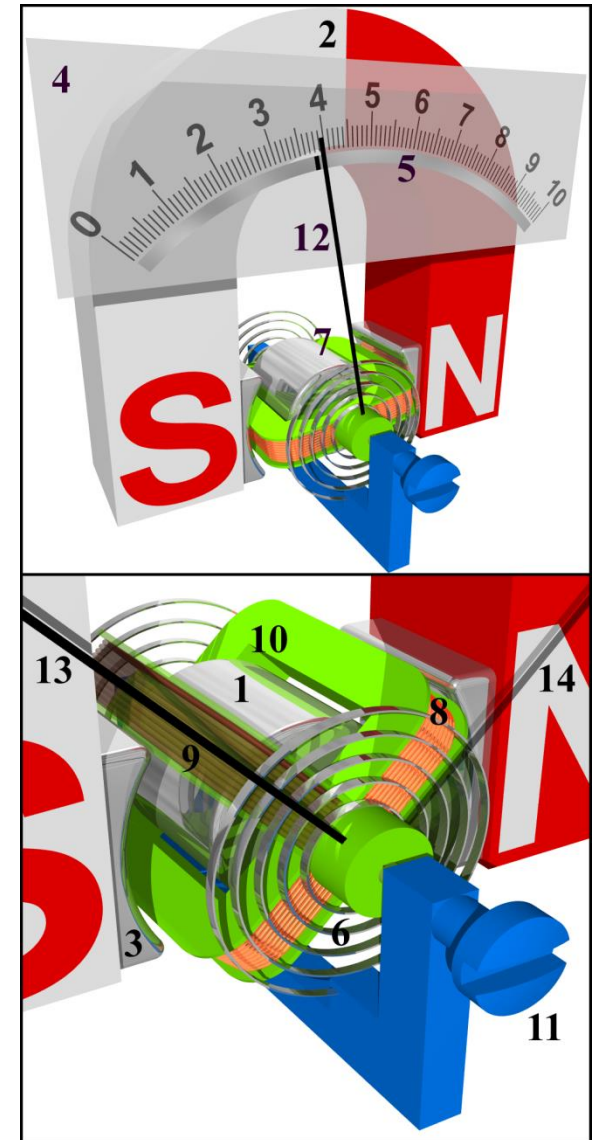
$$|M| = I \cdot |A| \cdot |B| \cdot \sin \Theta$$



## 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



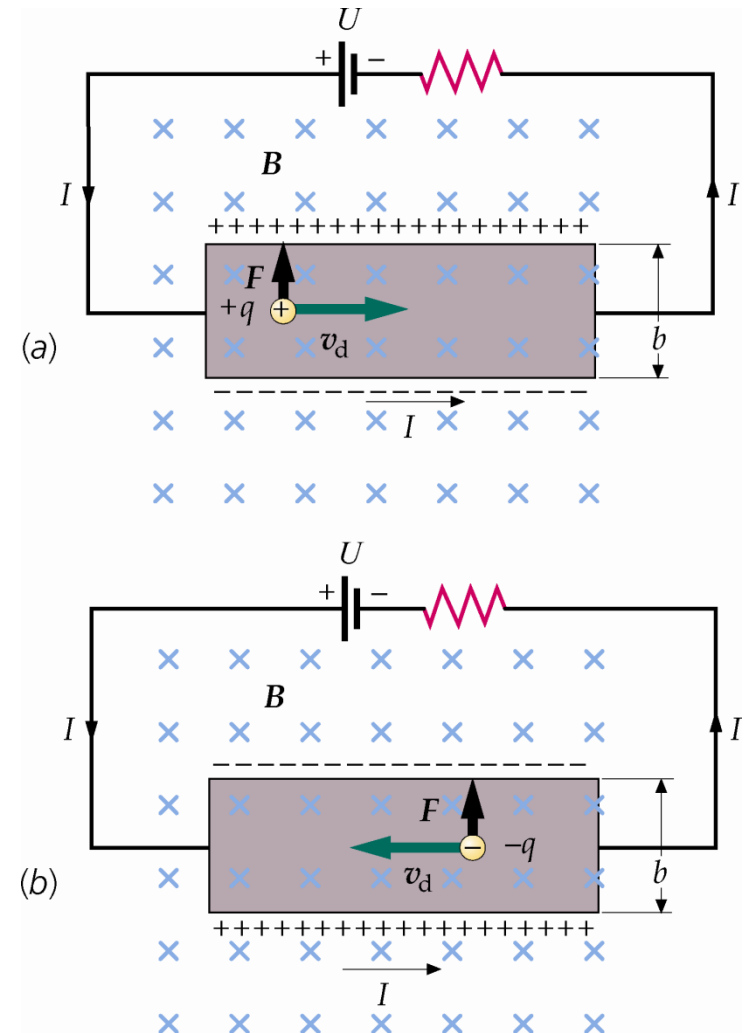
## Der Hall-Effekt

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.

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

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



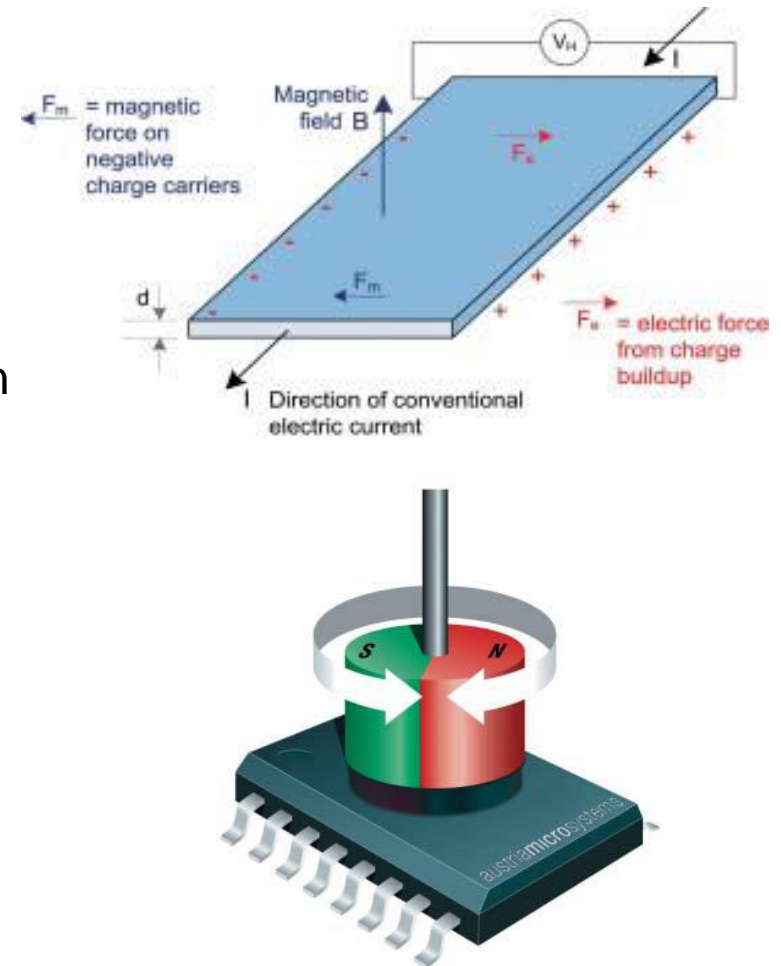
## Hall-Sensoren

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.

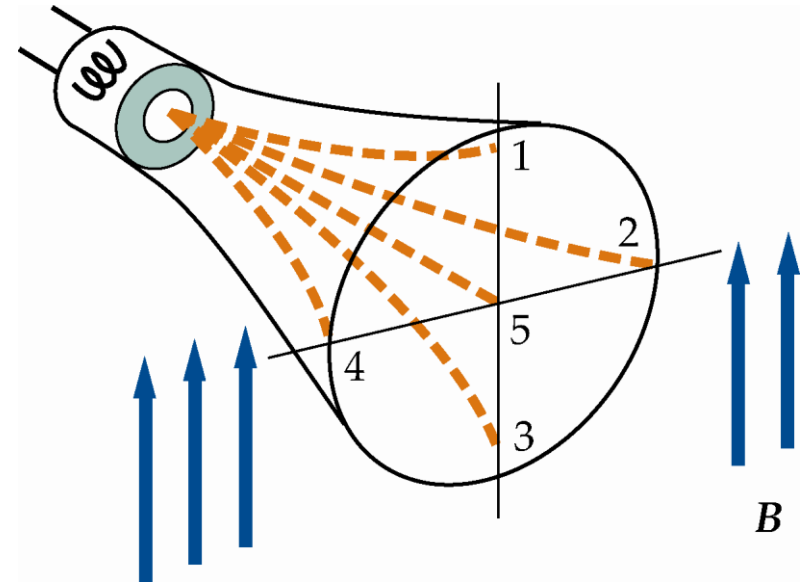
Sind Stromstärke und Magnetfeldstärke bekannt, kann der Hall-Sensor auch als Metalldetektor verwendet werden.

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.



## Aufgaben

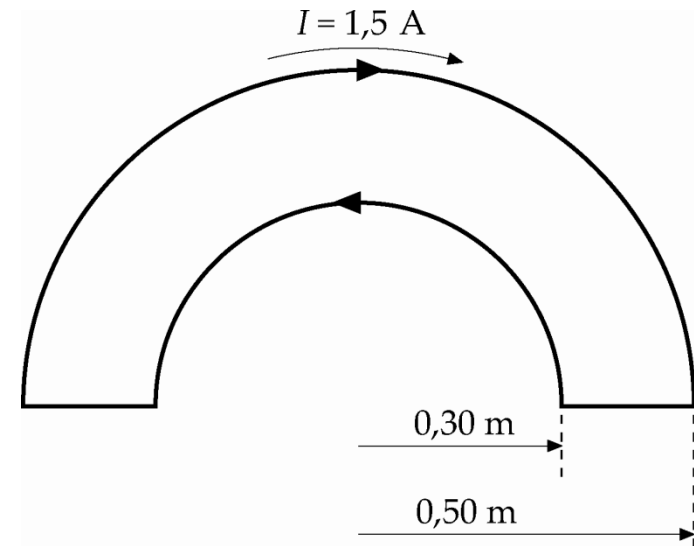
1. Die Achse einer Kathodenstrahlröhre liegt waagrecht in einem Magnetfeld, dessen Vektor senkrecht nach oben zeigt. Auf welcher der gestrichelten Bahnen bewegen sich die von der Kathode emittierten Elektronen?



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 ( $\text{Proton} = {}^1\text{H}^+$ ,  $\text{Deuteron} = {}^2\text{H}^+$ )?

## Aufgaben

3. Es gibt zwei stabile Chlorisotope:  $^{35}\text{Cl}$  und  $^{37}\text{Cl}$ . 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!



# Literatur und Quellen

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

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



Technische Hochschule Deggendorf – Edlmaistr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf