

Spalt), sodass geladene Teilchen beschleunigt werden. Die dadurch entstandene Geschwindigkeitserhöhung bewirkt, dass die Teilchen eine Spiralbahn anstatt einer Kreisbahn wie beim Fadenstrahlrohr durchlaufen.

Anwendung: Teilchenbeschleuniger

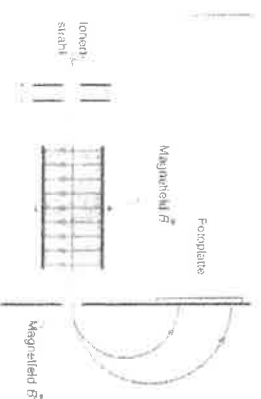
Massenspektrograph:

Ein aus einem engen Spalt kommenden Ionenstrahl wird in ein **elektrisches Feld, auf welches senkrecht ein Magnetfeld steht**, geschickt. Folglich können nur Ionen für die

$$Q \cdot E = Q \cdot v \cdot B$$

F_{el} F_{magn}

gilt, in das zweite Magnetfeld gelangen. Diese haben die gleiche und durch $v = \frac{E}{B}$ definierte Geschwindigkeit. Durch Messung des Bahnradius ist es nun möglich bei bekannten B , Q und v die Masse eines Ions zu bestimmen. (siehe Fadenstrahlrohr)



• Van-Allen-Gürtel

Auch die Erde besitzt ein Magnetfeld (Kommentar: Der **Nordpol ist dabei der magnetische Südpol**). Der sogenannte Sonnenwind besteht aus Elementarteilchen (Protonen und Elektronen) - würden diese bis an die Erdoberfläche gelangen, wäre der Aufenthalt im Freien für den Menschen sehr schädlich. Das Magnetfeld der Erde zwingt jedoch diese Teilchen auf Spiralbahnen rund um die Magnetfeldlinien des Erdfeldes und fängt diese damit quasi in Bereichen außerhalb der Erde ein (Prinzip der magnetischen Flasche). Gelangen einige von diesen in die Atmosphäre am Nordpol, so

ionisieren sie mittels **Stoßionisation** die Atmosphären gas und sind indirekt als Nordlichter beobachtbar.

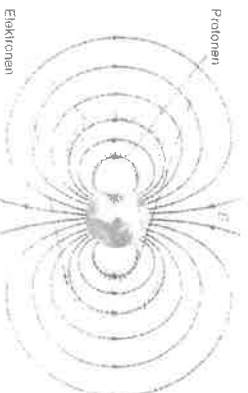


Abbildung 31 Van-Allen-Gürtel



Abbildung 32: Prinzip der magnetischen Flasche⁵

• Hall-Effekt

Auch bewegte Elektronen in einem Leiter erfahren eine Ablenkung durch die Lorentzkraft. Als Folge der Ablenkung entsteht eine messbare Spannung (Hallspannung) am Leiter senkrecht zur Stromrichtung. Die Spannung ist proportional zur magnetischen Flussdichte und kann daher bei Kenntnis des Proportionalitätsfaktors zu deren Messung verwendet werden.

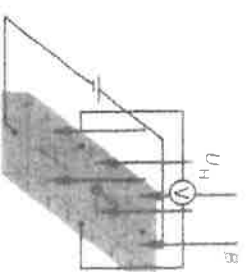


Abbildung 33: Hall-Spannung

$$F_L = v \cdot e \cdot B = \frac{I}{n \cdot b \cdot d \cdot e} \cdot e \cdot B \qquad F_E = \frac{U_H \cdot e}{b}$$

$$F_L = F_E \Rightarrow U_H = \underbrace{\frac{1}{n \cdot e}}_{\substack{\text{Größenordnung} \\ R_{Hall} \approx 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}}} \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

⁵ In einem inhomogenen Magnetfeld können geladene Teilchen eingesperrt werden, da sich die Richtung der Kraft auf die geladenen Teilchen bei einer Änderung der Krümmung der Magnetfeldlinien umkehrt. Als Folge dieser Änderung der Kräfteffekte auf

die geladenen Teilchen, pendeln diese im inhomogenen Bereich des Magnetfeldes auf Spiralbahnen hin und her.

- **Lautsprecher und Drehspulmessinstrument:**

In beiden Fällen wirkt infolge des elektrischen Stroms durch die Spulen eine Lorentzkraft, welche schlussendlich den gewünschten Effekt erzielt.

a) **Lautsprecher:** Als Folge der Lorentzkraft bewirkt ein Wechselstrom in der Spule ein entsprechendes Schwingen der Spule bzw. der Membran.

b) **Drehspulmessgerät:** Ein Stromfluss in der Spule bewirkt infolge der Lorentzkraft eine Verdrehung der Spule und folglich einen entsprechenden Zeigerausschlag.

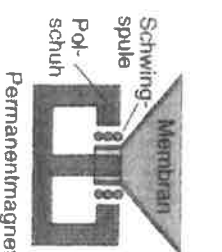


Abbildung 34: Lautsprecher

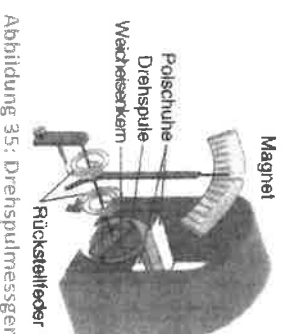
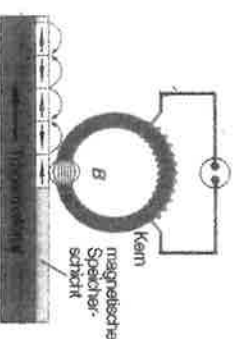
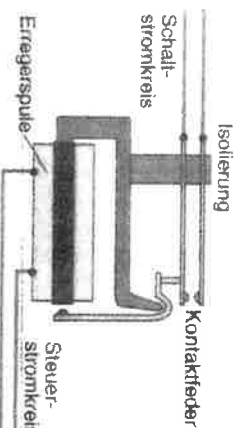


Abbildung 35: Drehspulmessgerät

- **Relais und Speichermedien:**

a) Der Stromfluss durch die Erregerspule erhöht die magnetische Flussdichte derart, dass die Kontaktfeder angezogen wird und den oberen Stromkreis schließt.

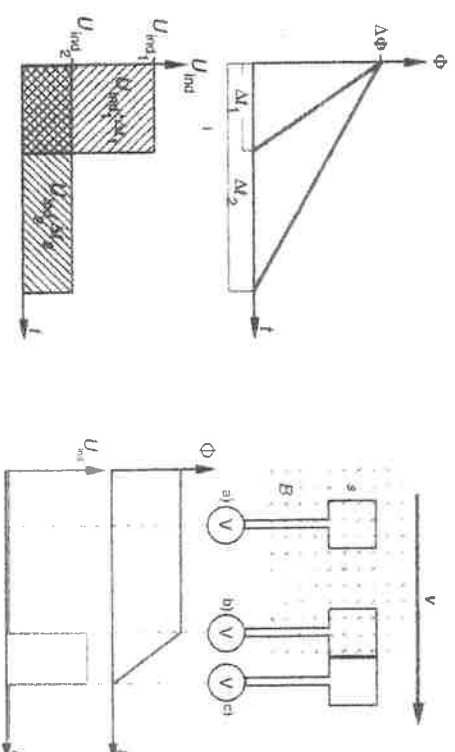
b) Ein entsprechend erhöhter magnetischer Fluss im Eisenring bewirkt eine gewünschte Magnetisierung bzw. Ummagnetisierung des Trägermaterials.



Die elektromagnetische Induktion

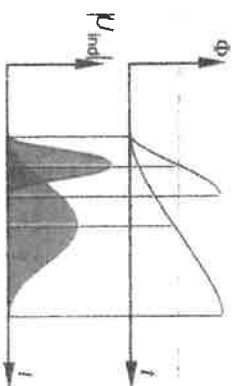
Leiterschleife im Magnetfeld

- **Versuch:** Bewegt man eine **Leiterschleife aus einem Magnetfeld hinaus**, so beobachtet man, dass eine **Spannung in der Leiterschleife induziert** wird. Das Produkt $U_{ind} \cdot \Delta t$, der in der Leiterschleife induzierte **Spannungstoß** (Fläche unter der Kurve) hat dabei **immer den gleichen Wert**. Je größer die relative Geschwindigkeit zwischen Magneten und Spule desto größer ist der Ausschlag, aber desto kleiner ist Δt . Bewegt man eine **Leiterschleife in ein Magnetfeld hinein**, so erhält man auch einen entsprechenden **Spannungstoß nur mit entgegengesetzten Vorzeichen**.



Spule und Magnet

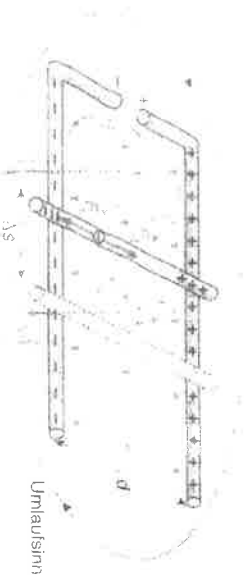
- Bringt man einen Permanentmagneten in eine Spule, so misst man an der Spule eine induzierte Spannung. Zieht man den Magneten aus der Spule, so misst man eine entgegengesetzte Spannung.



- Das Produkt $U_{ind} \cdot \Delta t$, der Spannungsstoß (Fläche unter der Kurve) hat dabei immer den gleichen Wert. Je größer die relative Geschwindigkeit zwischen Magneten und Spule desto größer der Ausschlag aber desto kleiner Δt . **Im Falle eines Stabmagneten ist jedoch die Flussänderung nicht mehr linear (Form der Kurve).**

Leiter im Magnetfeld

Bei den beiden oben beschriebenen Versuchen bewirkt also jeweils eine Änderung des magnetischen Flusses eine induzierte Spannung (Spannungsstoß) in der Leiterschleife bzw. in der Spule.



$$U_{ind} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot l \cdot \Delta s}{\Delta t} = B \cdot l \cdot v$$

Da der **Energiesatz** nicht verletzt werden darf, ist die **gewonnene elektrische Energie im Idealfall gleich der dabei investierten mechanischen Energie**.

$$\underbrace{U_{ind} \cdot I_{ind} \cdot \Delta t}_{W_{el}} = \underbrace{I_{ind} \cdot l \cdot \vec{B} \cdot \Delta \vec{s}}_{F_L} \Rightarrow U_{ind} = l \cdot \vec{B} \cdot \vec{v} = l \cdot B \cdot v \cdot \sin(\varphi_{v,B})$$

W_{mech}

Induktionsgesetz allgemein

$$U_{ind} = \underbrace{N}_{\text{Anzahl der Drahtschleifen}} \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = N \cdot \underbrace{\frac{A \cdot \Delta B}{\Delta t}}_{\substack{\text{Änderung von } \Phi \\ \text{infolge einer} \\ \text{Änderung von } B}} + N \cdot \underbrace{\frac{B \cdot \Delta A}{\Delta t}}_{\substack{\text{Änderung von } \Phi \\ \text{infolge einer} \\ \text{Änderung von } A}}$$

Bzw. bei nicht senkrechter Durchsetzung der Feldlinien durch die Leiter bzw. Spulenfläche.

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha)$$

Lenz'sche Regel

- Versuch: Bewegt man einen Stabmagneten auf eine kurzgeschlossene Spule zu so wird diese abgestoßen. Es wird eine Spannung und infolge ein Induktionsstrom in der Spule erzeugt, dessen Magnetfeld den sich nähernden Magneten abstößt. Es muss also **Arbeit verrichtet** werden, um den **Magneten der Spule zu nähern**. (Kein Perpetuum Mobile) Es wird beim Induktionsvorgang mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.
- Thomson'scher Ring: Beim Einschalten des Spulenstroms wird der Ring unabhängig von der Polung der Spule, von der Spule fortbewegt, beim Ausschalten zur Spule hingezogen.
- Lenz'sche Regel: Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt. Es folgt: $U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

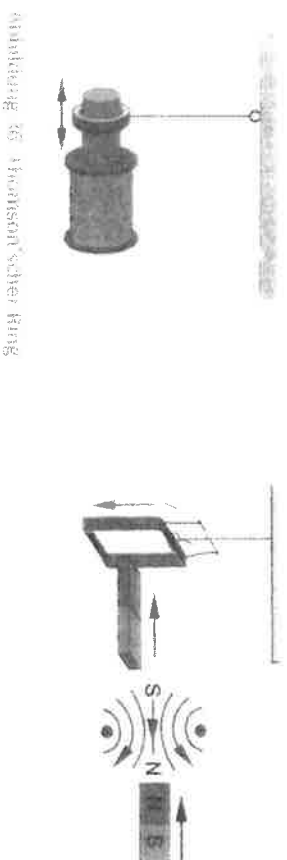


Abbildung 36: Lenz'sches Ring

Lenz'sche Regel

Infolge der Bewegung im Magnetfeld entstehen in der Kupferscheibe sehr große **Induktionsströme** (geringer Widerstand), die entsprechend der Lenz'schen Regel die **Bewegung hemmen**. Diese Wirbelströme führen auch zu einer Erwärmung der Kupferscheibe. Mittels Schlitzen werden die Stromwege teils unterbrochen und die Dämpfung verringert.



Wirbelströme und infolge auch Wirbelstromverluste treten immer auch bei magnetischen Wechselfeldern auf und führen zu Energieverlusten. Bleche von Transformatoren sind daher aus dünnen isolierten Blechen aufgebaut oder besitzen einen hohen elektrischen Widerstand.

Selbstinduktion

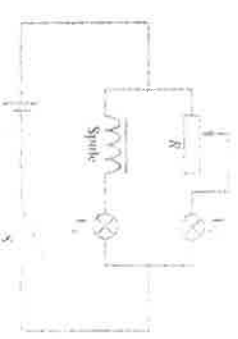
Wird eine Spule von einem sich ändernden Strom durchflossen, so verursacht die **Spule selbst einen sich ändernden magnetischen Fluss** und es wird in der Spule eine **Spannung induziert**, die so gerichtet ist dass sie dem **erzeugenden**

Strom entgegen gerichtet ist. Diesen Effekt bezeichnet man als **Selbstinduktion**.

$$\begin{aligned} U_{ind} &= -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \cdot \frac{A \cdot \Delta B}{\Delta t} \\ &= -N \cdot \frac{A \cdot \mu_0 \cdot N \cdot \Delta I}{\Delta t} \\ &= -N \cdot \underbrace{\frac{\Delta t \cdot l}{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}}_L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \end{aligned}$$

L wird als Induktivität bezeichnet und ist eine

Art Materialkonstante für eine gegebene Spule.



Spule bei Gleichstrom

Beim **Einschalten des Stromes** beginnt eine Lampe die in Serie mit der Spule geschaltet ist, erst nach einer **zeitlichen Verzögerung zu leuchten**, da sich infolge der Selbstinduktion zuerst ein Magnetfeld um die Spule aufbaut, das ein Anwachsen des Stroms behindert. Beim Aus schalten baut sich dieses Magnetfeld um die Spule ab, welches einem Absinken des Stromes für kurze Zeit entgegenwirkt. Das Magnetfeld speichert also in diesem Fall Energie.

Eine genauere Analyse zeigt:

$$i(t) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \text{ bzw. } i(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Magnetische Energie

Die elektrische Arbeit die zum Aufbau des Magnetfelds um eine Spule im Gleichstromkreis benötigt wird ist gegeben durch:

$$\Delta W = U \cdot I \cdot \Delta t = -L \cdot \frac{\Delta I \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta t} \Rightarrow E_{\text{magn}} = \frac{L \cdot I^2}{2}$$