

- Erhöht man nun die Feldstärke in Gegenrichtung, so tritt wieder eine Sättigungsfeldsdichte B_s auf, nun aber mit entgegengesetzten Vorzeichen. Die entsprechende geschlossene Kurve heißt Hystereseschleife - die **Neukurve wird nur bei einem unmagnetisierten Material durchlaufen**.
- Weichmagnetische Stoffe** sind dadurch gekennzeichnet, dass beim Umkehren eines äußeren Magnetfeldes wenig Energie für die Ummagnetisierung des Werkstoffes nötig ist. Diese Stoffe werden z.B.: in Festplatten und Transformatoren verwendet.

Hartmagnetische Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass beim Ausschalten des äußeren Magnetfeldes die Magnetisierung weitgehend erhalten bleibt (für ihre Magnetisierung ist viel Energie nötig). Sie finden ihre Anwendung als Permanentmagnete.

Supraleiter

Supraleiter verlieren ab einer gewissen sehr niedrigen Temperatur, der sogenannten **Sprungtemperatur** T_C , schlagartig ihren elektrischen Widerstand. Ein **Magnetfeld** wird in diesem Fall **aus einem Supraleiter hinausgedrängt**. Zur Erzeugung von starken Magnetfeldern in Teilchenbeschleunigern und Kernspintomographen werden Supraleiter eingesetzt, weil in diesen Materialien sehr hohe Stromdichten ohne beträchtliche Wärmeverluste erzeugt werden können.

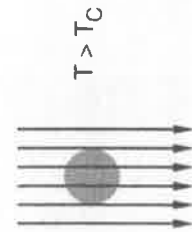


Abbildung 27: Feldverlauf oberhalb T_C

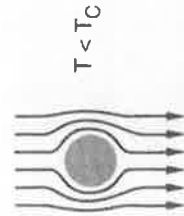


Abbildung 28: Feldverlauf oberhalb T_C

Anwendungen bzw. Phänomene des Magnetischen Felds

- Fadenstrahlrohr

$$F_L = e \cdot v \cdot B \quad F_{zp} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$F_L = F_{zp} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \quad (1)$$

v nicht direkt messbar daher über Energiesatz:

$$e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow v^2 = \frac{2 \cdot e \cdot U}{m}$$

Aus (1):

$$\frac{e^2}{m^2} = \frac{v^2}{B^2 \cdot r^2} = \frac{2 \cdot e \cdot U}{m \cdot B^2 \cdot r^2} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2} \quad \text{kürzen}$$

Ergebnis: Spezifische Ladung des Elektrons:

$$\frac{e}{m} = 1,75881962 \cdot 10^{-11} \frac{C}{kg}$$

- Zyklotron:

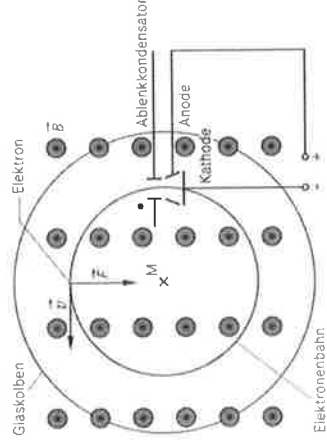


Abbildung 29: Fadenstrahlrohr

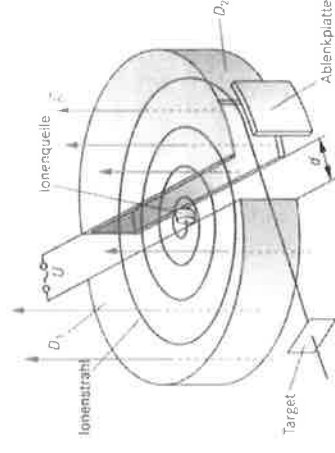


Abbildung 30: Zyklotron

Prinzip: Zwischen den dosenförmigen Elektroden liegt eine Wechselspannung, die im richtigen Moment umgepolt wird (Durchgang durch den

des äußeren Feldes fast vollständig. Es existieren keine Weiß'schen Bezirke. Neben Festkörpern gibt es auch viele Flüssigkeiten und Gase die paramagnetische Eigenschaften besitzen.

- Ein **paramagnetisches Material** wird vom **Pol eines Magneten angezogen**, d.h.: die magnetischen Feldlinien werden in einem paramagnetischen Material bei vorhanden sein eines äußeren magnetischen Feldes verdichtet und verstärken somit ein äußeres Magnetfeld.

Ferromagnetische Stoffe $\mu_r \gg 1$

- Es existieren Weiß'sche Bezirke und somit existiert ein atomares Dipolmoment.
- Ein **ferromagnetisches Material** wird vom **Pol eines Magneten angezogen**, d.h.: die magnetischen Feldlinien werden in einem **ferromagnetischen Material verdichtet** und **verstärken** somit ein **äußeres Magnetfeld**.

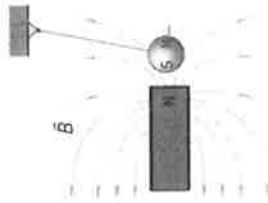


Abbildung 22: Verhalten eines paramagnetischen bzw. ferromagnetischen Stoffes im inhomogenen Magnetfeld



Abbildung 23: Feldlinienverlauf bei einem paramagnetischen bzw. ferromagnetischen Material

⁴ B_s kann nicht mehr gesteigert werden – alle Weiß'schen Bezirke sind parallel gerichtet.

Hystereseschleife

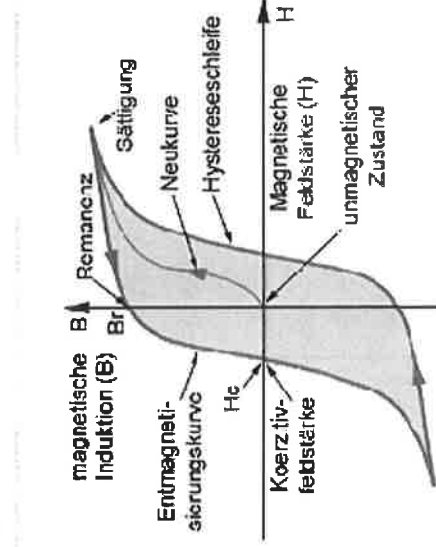


Abbildung 24: Hystereseschleife

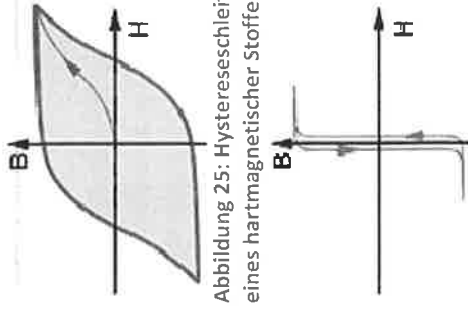


Abbildung 25: Hystereseschleife eines hartmagnetischen Stoffes

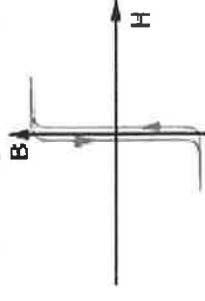


Abbildung 26: Hystereseschleife eines weichmagnetischen Stoffes

Bei ferromagnetischen Stoffen **hängen H und B nicht linear zusammen**, daher ist μ_r **keine Konstante** und hängt vom vorherrschenden H – Feld ab.

- Wird bei einem anfangs unmagnetischen ferromagnetischen Material die magnetische Erregung $H \sim I$ (in Spule) gesteigert, so stellt sich bei einer gewissen Feldstärke H_s eine **Sättigungsflussdichte** B_s ⁴ ein. Die **Neukurve** ist durchlaufen worden.
- Verringert man nun die Feldstärke H auf Null so bleibt eine gewisse Flussdichte B_r (**Remanenz**) erhalten, d.h: einige Weiß'schen Bezirke bleiben ausgerichtet.
- Um auch diese Remanenz zu beseitigen, muss man eine magnetische Gegenfeldstärke H_c (**Koerzitivfeldstärke**) anlegen – dabei wird die Entmagnetisierungskurve durchlaufen. Es gilt dann $B = 0$.

- Bei einer langen Spule mit N Windungen werden N Leiter jeweils vom Strom I durchflossen. Man erhält somit für die magnetische Feldstärke im Inneren einer langen Spule:

$$H = N \cdot \frac{I}{l}$$

Diese **Formel gilt nur für das Innere der Spule** und, wenn der Spulendurchmesser d klein gegenüber der Spulenlänge l ist. Im Inneren der Spule existiert dann annähernd ein homogenes Feld, im Außenbereich ist die magnetische Erregung erheblich kleiner und nicht homogen.

Die magnetische Eigenschaften der Materie

- Füllt man in dem Versuch in Abbildung 19 die Spule mit unterschiedlichen Materialien, so bemerkt man, dass die **Kraft auf das Leiterelement vom Füllmaterial der Spule abhängt**. Im Falle eines Eisenkerns in der Spule stellt man eine besonders große Zunahme an Kraftwirkung fest. Da jedoch weder die Versuchsanordnung noch der Strom verändert wurden, kann die gesteigerte Kraftwirkung nur durch eine Erhöhung des magnetischen Flusses durch das Eisen in der Spule erklärt werden.

- Man definiert daher die Permeabilitätszahl μ_r als das Verhältnis der magnetischen Flussdichte in Materie B_M zu der magnetischen Flussdichte in Vakuum:

$$\mu_r = \frac{B_M}{B_0} = \frac{B_M}{\mu_0 \cdot H} \Rightarrow B_M = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

- Durch die Ausrichtung der Weiß'schen Bezirke im Eisen erhöht sich der magnetische Fluss in der Spule. Diese durch das **Eisen zusätzliche magnetische Erregung wird als Magnetisierung M** bezeichnet. Es gilt:

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) = \mu_0 \cdot H \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{M}{H}\right)}_{\mu_r} \Rightarrow \mu_r = \left(1 + \frac{M}{H}\right)$$

- Alle Stoffe lassen sich bzgl. μ_r in drei Gruppen einteilen.
Diamagnetische Stoffe $\mu_r < 1$
- Diamagnetische Stoffe **schwächen** ein **äußeres Magnetfeld** ab.
- In einem **diamagnetischen Stoff** heben sich alle atomaren magnetischen Dipole auf (abgeschlossene Elektronenschalen). Wird ein solcher Stoff in ein Magnetfeld gebracht so werden **magnetische Dipole induziert**, die das **induzierende Feld abschwächen**.
- Ein **diamagnetisches Material** wird vom **Pol eines Magneten abgestoßen**, d.h.: es drängt die magnetischen Feldlinien aus sich heraus.
- Diamagnetismus tritt bei allen Stoffen auf (innere Schalen), wird jedoch bei bestimmten Materialien vom Para- bzw. Ferromagnetismus überlagert.

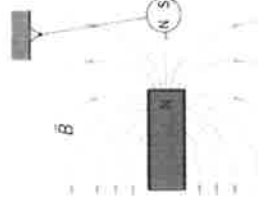


Abbildung 20: Verhalten eines diamagnetischen Stoffes im inhomogenen Magnetfeld

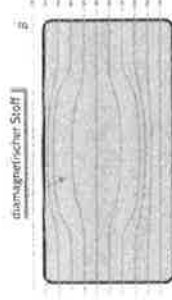


Abbildung 21: Feldlinienverlauf in einem diamagnetischen Material

Paramagnetische Stoffe $\mu_r \approx > 1$

- Einige **paramagnetische Materialien** besitzen ein **atomares magnetisches Dipolmoment**. Diese Dipole sind jedoch infolge der **Wärmebewegung völlig ungeordnet**. Wird an diese ein Magnetfeld angelegt so richten sich die Dipole aus und **verstärken das äußere magnetische Feld**. Die gemeinsame **Ausrichtung verschwindet jedoch nach Abschalten**

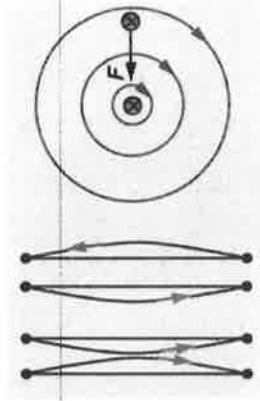


Abbildung 16: Erklärung 1

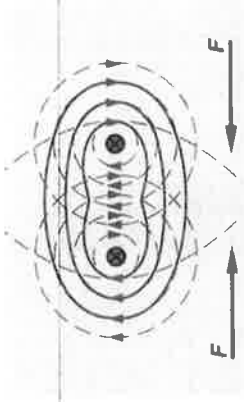


Abbildung 17: Erklärung 2

- **Definition Ampere:** 1 Ampere ist die Stromstärke, die durch zwei geradlinige dünne unendlich lange, im Abstand von 1 m im Vakuum angeordnete Leiterstücke fließen muss, damit diese aufeinander eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N je 1 m Länge ausüben.

Kraft auf bewegte Ladungen

- Da ja ein elektrischer Strom aus bewegten elektrischen Ladungen besteht, geht man dazu von der Formel für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter aus.

$$F = B \cdot \underbrace{I \cdot l}_{\frac{N \cdot q}{t}} = B \cdot N \cdot q \cdot \underbrace{\frac{l}{t}}_{\frac{v}{v}} \quad \xrightarrow{\text{pro Ladung}} \quad F = q \cdot B \cdot v$$

- Stehen die **Feldlinien nicht senkrecht auf den Geschwindigkeitsvektor** der bewegten Ladung, so gilt die allgemeine Form dieses Gesetzes:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\varphi_{\vec{v}, \vec{B}})$$
- Die Kraft, welche auf bewegte Ladungen in einem Magnetfeld wirkt, bezeichnet man auch als **Lorentzkraft**. Die oben angeführten Beziehungen gelten für **positive Ladungen** bzw. für die **technische Stromrichtung**.

Die magnetische Feldstärke bzw. magnetische Erregung

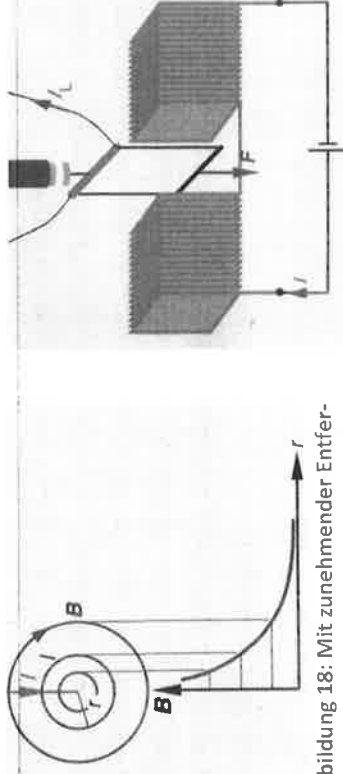


Abbildung 18: Mit zunehmender Entfernung vom Leiter sinkt B ab, da sich die zugeführte Energie auf die zunehmende Feldlinienlänge immer mehr verteilt.

Abbildung 19: Bestimmung der magnetischen Eigenschaft von Materie

- Versuche zeigen, dass die **Kraftwirkung des magnetischen Feldes** und damit auch die magnetischen Flussdichte B **direkt proportional zur Stromstärke I** im Leiter, jedoch **verkehrt proportional zur Feldlinienlänge** $l = 2 \cdot \pi \cdot r$ ist.

$$B \sim \frac{I}{l} \Rightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{I}{l} = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Die eigentliche Ursache für das magnetische Feld ist dabei der Stromfluss ausgedrückt durch die Stromstärke I. Um die geometrische Anordnung zu berücksichtigen, fasst man die Stromstärke I und die Feldlinienlänge l zu einer neuen Größe, der sogenannten **magnetischen Erregung** (oder der **magnetischen Feldstärke**) H zusammen.

$$H = \frac{I}{l} \Rightarrow [H] = \frac{A}{m}$$

Somit ist die magnetische Feldstärke mit der magnetischen Flussdichte über folgende Beziehung verknüpft:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad \text{mit } \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$$

μ_0 ... magnetische Feldkonstante, absolute Permeabilität