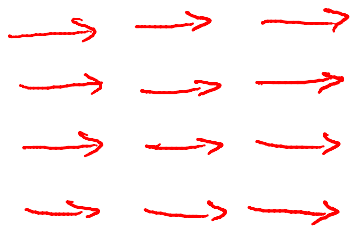


Ferromagnetismus



paramagnetisch für $T > T_c$
ferromagnetisch für $T < T_c$

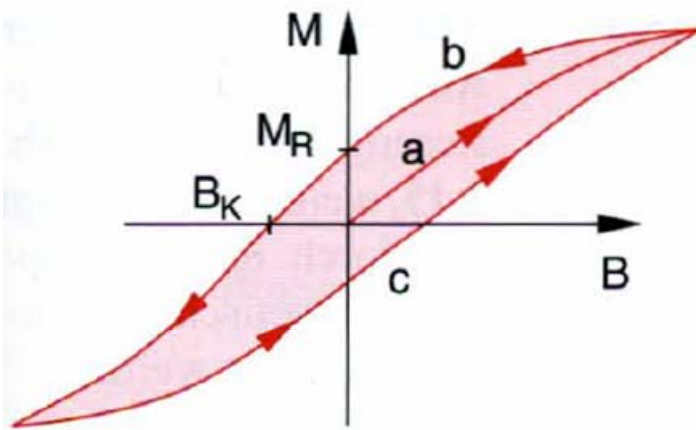
$$\chi(T) = \frac{C}{(T - T_c)^\delta}$$

$T > T_c$; $\delta \approx 1 - 1,5$

Curie-Temperatur T_c , Curie-Konstante C und Schmelztemperatur T_{Schm} für einige ferromagnete

Substanz	T_c/K	C/K	T_{Schm}/K
Co	1395	2,24	1767
Fe	1033	2,22	1807
Ni	627	0,59	1727
EuO	70	4,7	1145

Hystereseschleife



M_R Remanenz

B_K Koerzitivkraft

Hysteresekurve der Magnetisierung M in Abhängigkeit vom äußeren Feld B

die magnetische Energie im Volumen V $W_{\text{magn}} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$

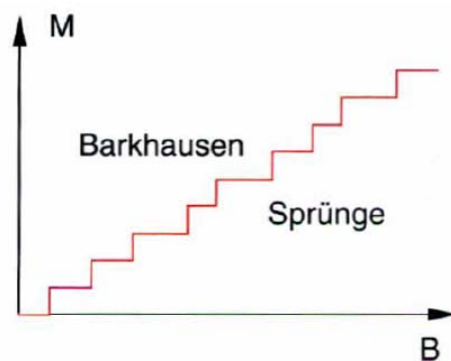
zur Magnetisierung notwendigen zusätzlichen magnetischen Energie pro Volumeneinheit

$$\begin{aligned}\int M(B) \cdot dB &= \chi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \int H \cdot dH \\ &= \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H^2 \\ &= \frac{1}{2} (\mu - 1) \cdot H \cdot B\end{aligned}$$

Vergrößerter
Ausschnitt der
Magnetisierungskurve

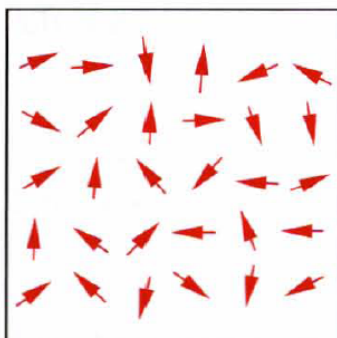
Barkhausen-Sprünge:

Ausrichtung der atomaren
Dipolmomente geschieht
sprungweise

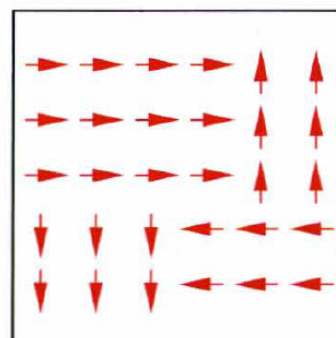


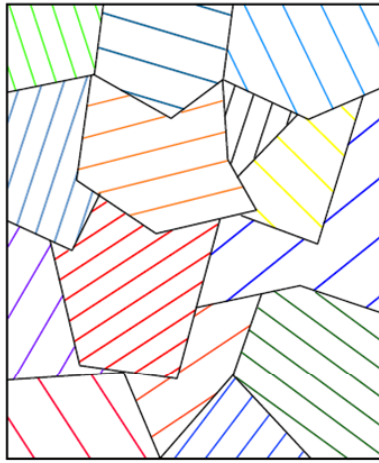
Weißsche Bezirke

ohne äußeres Magnetfeld



mit äußerem Magnetfeld





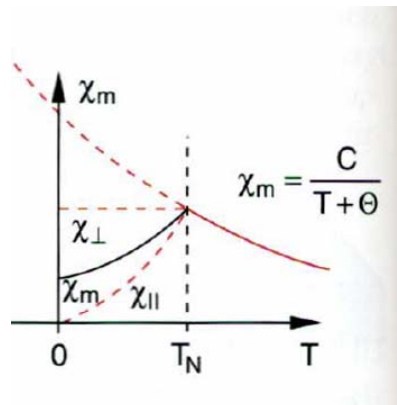
Ferromagnete



Antiferromagnete



antiferromagnetischen
Neel-Temperatur T_N

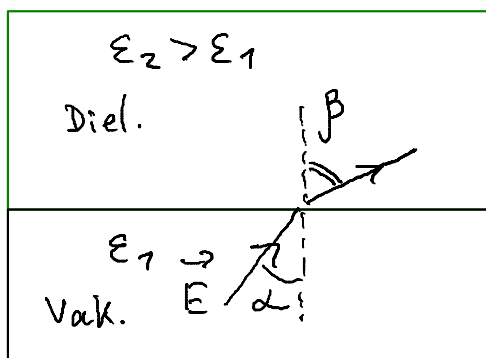


Ferrimagnete



Feldgleichungen in Materie

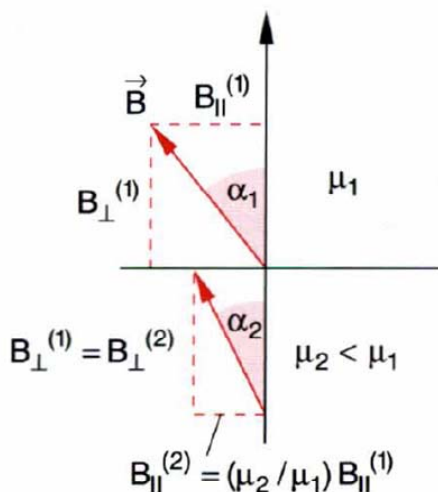
Wir haben im Vorl.6 das Verhalten der elektrischen Feldgrößen E und D an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante behandelt.



$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\perp}^{\text{Diel.}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_{\perp}^{\text{vak}} \\ E_{\parallel}^{\text{Diel.}} = E_{\parallel}^{\text{vak}} \end{array} \right.$$

für $\vec{D}$ das Umgekehrte

Ähnlich verhält es sich bei den magnetischen Feldgrößen



$$H_{\parallel}^{(1)} = H_{\parallel}^{(2)} \Rightarrow \frac{B_{\parallel}^{(1)}}{\mu_1} = \frac{B_{\parallel}^{(2)}}{\mu_2}.$$

$$B_{\perp}^{(1)} = B_{\perp}^{(2)} \Rightarrow \mu_1 H_{\perp}^{(1)} = \mu_2 H_{\perp}^{(2)}.$$

Brechungsgesetz für die Richtungsänderung von $\mathbf{H}$ und $\mathbf{B}$ bei schräger Orientierung

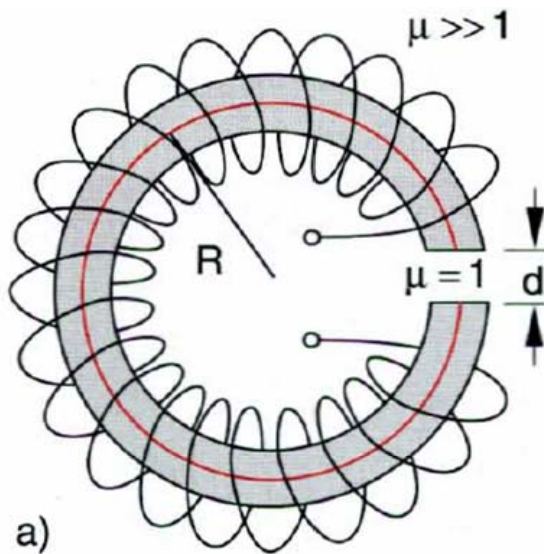
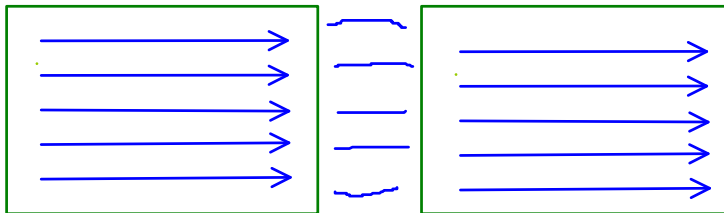
$$\tan \alpha_1 = B_{\parallel}^{(1)} / B_{\perp}^{(1)} \quad \text{und} \quad \tan \alpha_2 = B_{\parallel}^{(2)} / B_{\perp}^{(2)}$$

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} .$$

Elektromagnete

Die Vergrößerung der magnetischen Induktion **B** durch Stoffe mit großer relativer Permeabilität μ wird technisch ausgenutzt in Elektromagneten.

$$B_{\text{Fe}} = B_{\text{Luft}} \Rightarrow \mu \cdot H_{\text{Fe}} = H_{\text{Luft}} .$$



$$H_{\text{Luft}} \approx \frac{N \cdot I \cdot \mu}{\mu \cdot d + 2\pi R} \quad \text{für } \mu \gg 1$$

$$B_{\text{Luft}} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{\mu \cdot d + 2\pi R} .$$

Zeitlich veränderliche Felder

Für statische elektrische und magnetische Felder, die durch ruhende Ladungen bzw. stationäre Ströme erzeugt werden, gilt

$$\begin{array}{ll} \text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0} & \text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{j} \\ \text{div } \mathbf{E} = \varrho / \varepsilon_0 & \text{div } \mathbf{B} = 0 \end{array}$$

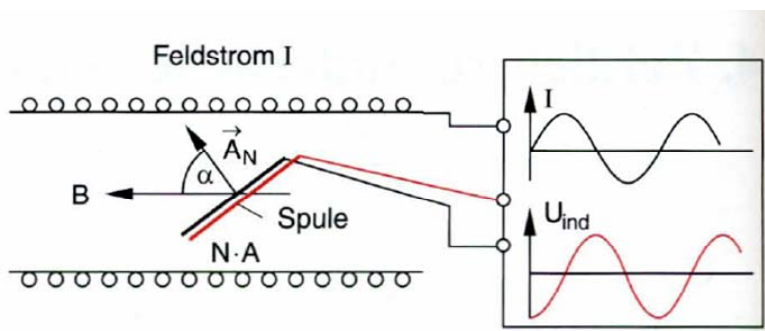
und

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E} = -\text{grad } \phi & \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \\ \mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E} & \end{array}$$

Faradaysches Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

Beispiel:



Strom

$$I(t) = I_0 \cdot \sin \omega t$$

Induktionsspannung

$$U_{\text{ind}}(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

mit

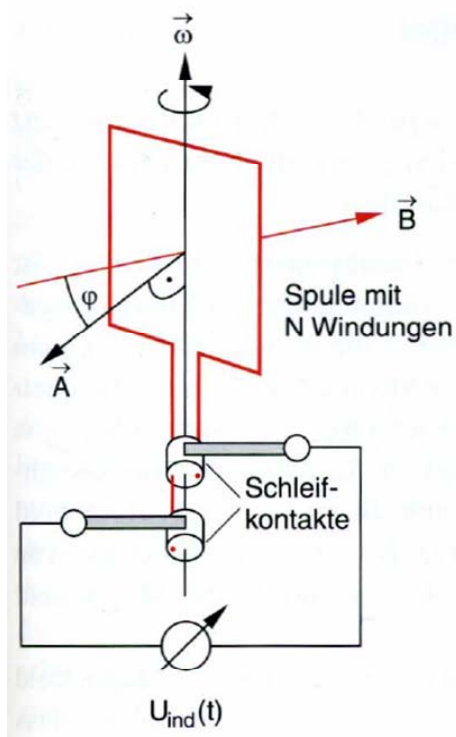
$$U_0 = -\omega \cdot B \cdot N \cdot A \cdot \cos \alpha ,$$

$$U_{\text{ind}}(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

mit

$$U_0 = -\omega \cdot B \cdot N \cdot A \cdot \cos \alpha ,$$

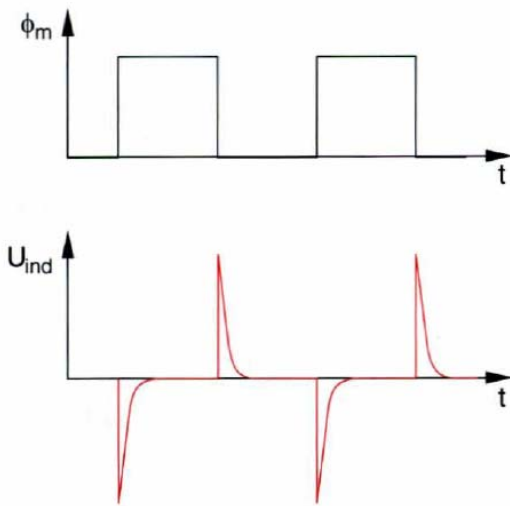
Erzeugung einer
Induktionswechselspannung
Durch Drehen einer
Leiterschleife



$N=1$

$$\begin{aligned} U_{\text{ind}} &= -\frac{d}{dt} \Phi_m \\ &= B \cdot N \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t \end{aligned}$$

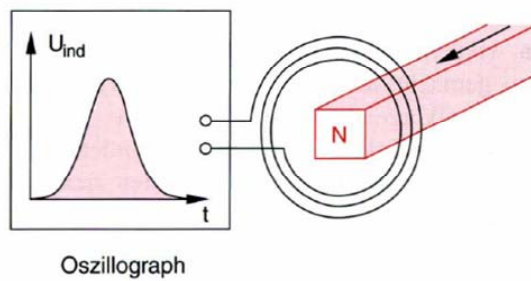
Bei rechteckförmiger Modulation des
Magnetfeldes



$$U_{\text{ind}} = - \int \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{A} = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \int \text{rot } \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} .$$

Ein magnetisches Feld, welches sich zeitlich ändert, erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld:

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt}$$



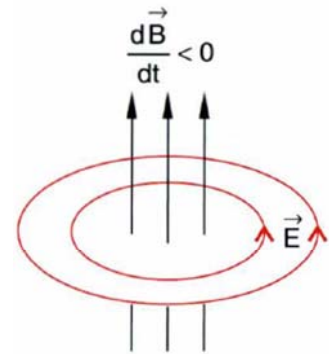
Lenzsche Regel

! folgt aus dem negativen Vorzeichen im Induktionsgesetz

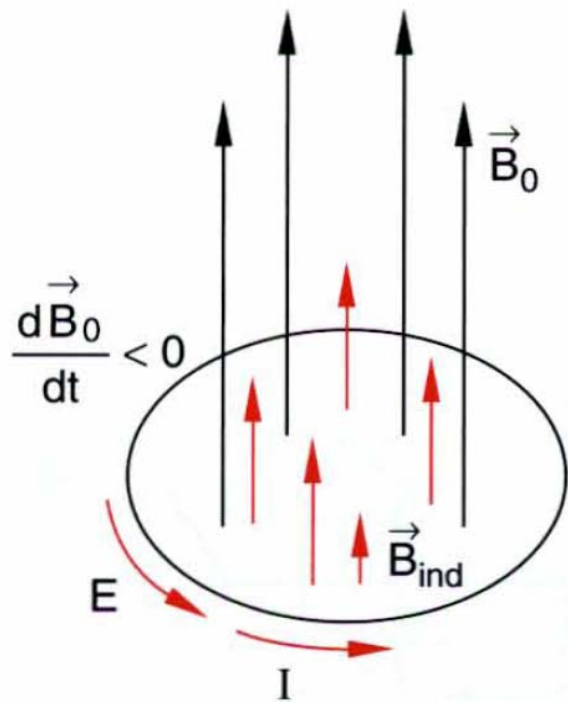
$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$$

Die Änderung der Induktionsspannung $\vec{U}_{\text{ind}}$ ist der Änderung des magnetischen Flusses entgegengerichtet

Die Änderung von $d\vec{B}/dt$ ist durch das induzierte Magnetfeld verringert.

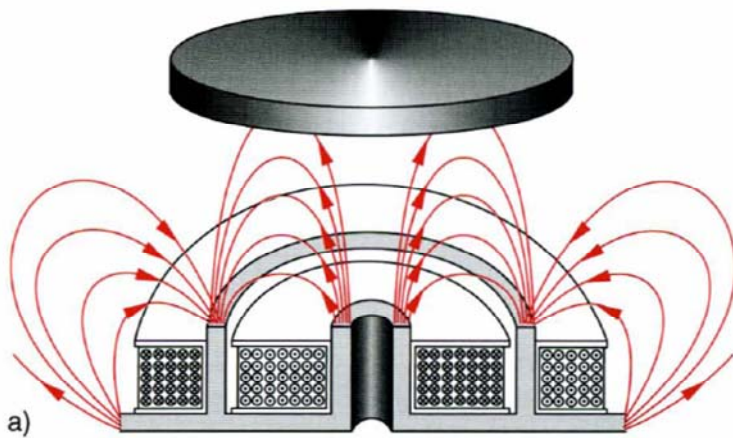


Die durch Induktion entstehenden Ströme, Felder und Kräfte behindern stets den die Induktion einleitenden Vorgang (Lenzsche Regel).



Magnetische Levitation

Schwebeversuch



eine massive Aluminiumplatte über einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld, das durch einen Wechselstromelektromagneten erzeugt wird, schwebend in einer Höhe von einigen cm gehalten