Magnetische Feldgrößen und Zusammenhänge

Feldgröße	Maßeinheit	Zusammenhänge
Magnetischer Fluss Φ	1Vs = 1 Wb	
Magnetische Flussdichte $\vec{B}$	1 Vs/m^2 = 1 T	$\vec{B} = \frac{d\Phi}{dA_\perp}$ $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$
Magnetische Feldstärke $\vec{H}$	1 A/m	$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
Durchflutung Θ	1 A	$\oint \vec{H} \cdot \overrightarrow{ds} = \Theta = \sum_{\nu=1}^{\nu=n} I_\nu$ Durchflutungsgesetz

Anwendung des Durchflutungsgesetzes

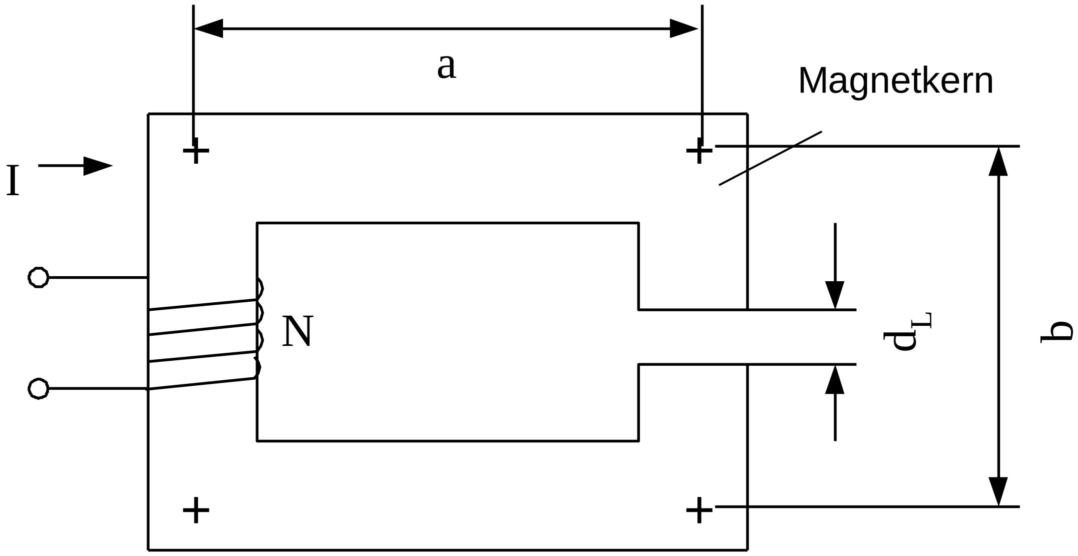
$$\oint \vec{H} \cdot \overrightarrow{ds} = \Theta = \sum_{\nu=1}^{\nu=n} I_{\nu}$$

Merksatz

Durchflutungsgesetz gibt Beziehung zwischen den erfassten Strömen und dem Umlaufintegral wieder, nicht aber einen unmittelbaren Zusammenhang zur magnetischen Feldstärke selbst!

Berechnung der magnetischen Feldstärke ist aus Durchflutungsgesetz möglich, wenn $\vec{H}$ *über dem Integrationsweg* $d\vec{s}$ *oder zumindest über Teile von* $d\vec{s}$ *konstant ist!*

Magnetkreise



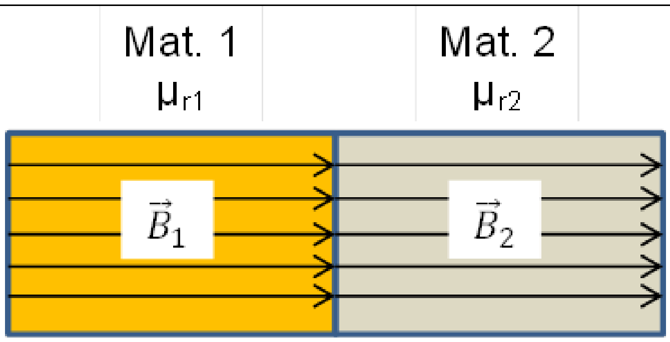
Grundlagen zur Berechnung von Magnetkreisen

① Verhalten von Stoffen im Magnetfeld
(Magnetisierungskennlinien)

② Wirkung von Grenzflächen
(Quer-; Längs- und Schräggrenzflächen)

③ Nutzung von Analogiebeziehungen zwischen einem elektrischen Stromkreis und einem magnetischen Kreis

Magnetkreise - Grenzflächen im magnetischen Feld



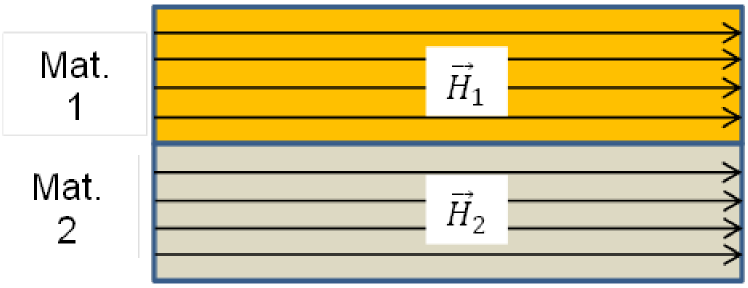
Quergrenzfläche

$$B_{1n} = B_{2n}$$

(sog. Normalkomponente)

$$\rightarrow$$

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}$$



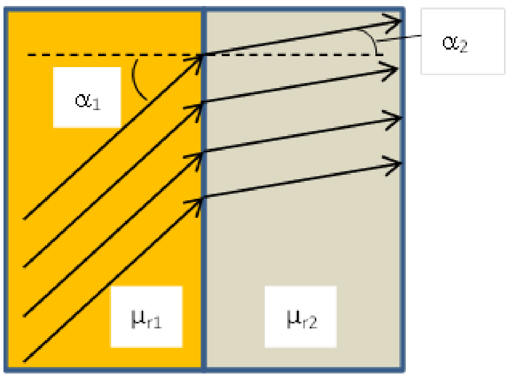
Längsgrenzfläche

$$H_{1t} = H_{2t}$$

(sog. Tangentialkomponente)

$$\rightarrow$$

$$\frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}$$

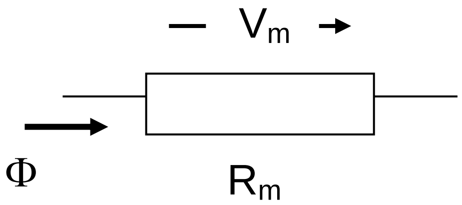


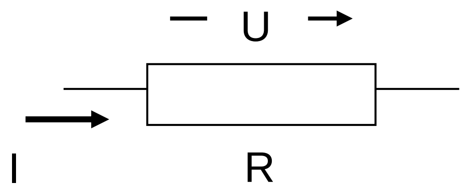
Schräggrenzfläche

$$\frac{tan \propto_1}{tan \propto_2} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}$$

(Brechungsgesetz)

Analogie zwischen magnetischem Kreis und elektrischem Stromkreis





homogener **magnetischer Kreis**	homogener **elektrischer Kreis**
Φ	I
$V_m; \Theta$	$U; U_q$
$R_m = \dfrac{V_m}{\Phi} = \dfrac{l_m}{\mu \cdot A}$	$R = \dfrac{U}{I} = \dfrac{l}{\kappa \cdot A}$
$H = \dfrac{V_m}{l}$	$E = \dfrac{U}{l}$
$B = \dfrac{\Phi}{A} = \mu \cdot H$	$S = \dfrac{I}{A} = \kappa \cdot E$

Berechnung von Magnetkreisen – Lösungswege

Variante ① - Annahme - μ_r – konstant

Bsp. Eisenkern (e) mit Luftspalt (l)

<u>geg.</u>: $\Theta = I \cdot N$; geometrische Abmessungen des Kerns und des Luftspalts
<u>ges.:</u> $\Phi; B; H$

Ansatz: $\Theta = V_{me} + V_{ml} = \Phi \cdot R_{me} + \Phi \cdot R_{ml}$

$\rightarrow$

$$\Phi = \frac{I \cdot N}{R_{me} + R_{ml}}$$

wobei

$$R_{me} = \frac{l_{me}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

und

$$R_{ml} = \frac{l_l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

(l_{me} – mittlere Flusslinienlänge im Eisenkern; l_l – Luftspaltlänge; A – Querschnittsfläche des Eisenkerns bzw. des Luftspalts)

Eisenkern-Luftspalt bildet eine Quergrenzfläche $\rightarrow$

$$B_l = \frac{\Phi}{A} = B_e$$

$$H_l = \frac{B_l}{\mu_0}$$

$$H_e = \frac{B_e}{\mu_r}$$

Berechnung von Magnetkreisen – Lösungswege

Variante ② - $\mu_r = f(H_e)$ (bzw. $B_e = f(H_e)$- Magnetisierungskennlinie)

Bsp. Eisenkern (e) mit Luftspalt (l)

geg.: $\Theta = I \cdot N$; geometrische Abmessungen des Kerns und des Luftspalts

ges.: $\Phi; B; H$

Ansatz: $\Theta = V_{me} + V_{ml} = H_e \cdot l_{me} + H_l \cdot l_l$

(l_{me} – mittlere Flusslinienlänge im Eisenkern; l_l – Luftspaltlänge;

außerdem gilt:

$$H_l = \frac{B_l}{\mu_0}$$

und Eisenkern-Luftspalt bildet eine Quergrenzfläche →

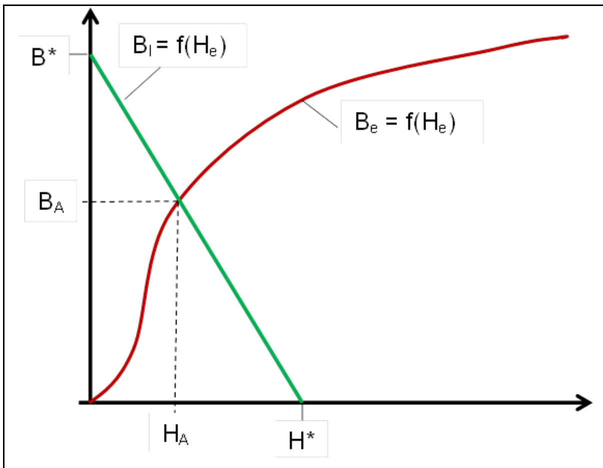
$$B_l = B_e$$

→

$$\Theta = H_e \cdot l_{me} + \frac{B_l}{\mu_0} \cdot l_l$$

→

$$B_l = \frac{\mu_0}{l_l} \cdot (\Theta - H_e \cdot l_{me})$$



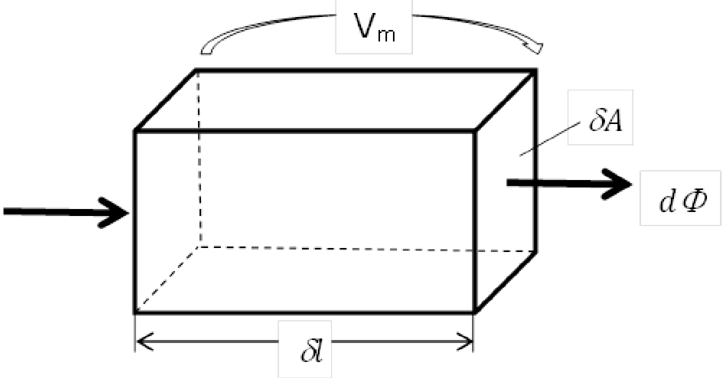
$$B_l = f(H_e) = \frac{\mu_0}{l_l} \cdot (\Theta - H_e \cdot l_{me})$$

$$B_l^* = \frac{\mu_0 \cdot \Theta}{l_l}$$

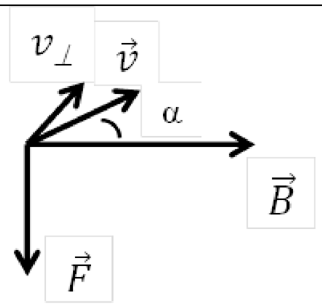
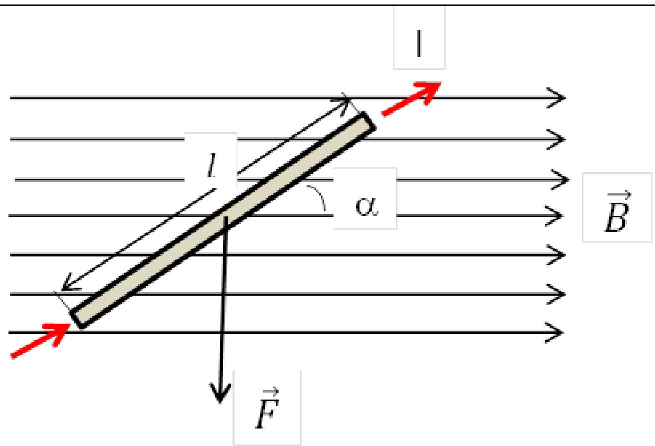
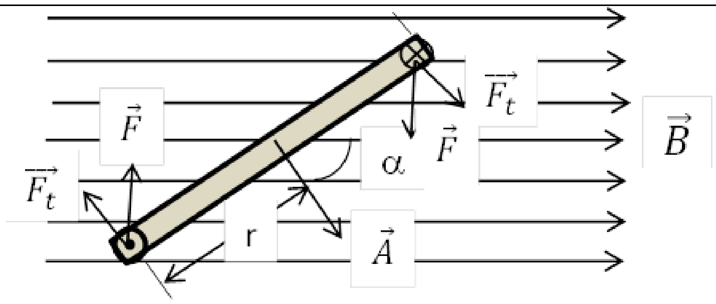
$$H^* = \frac{\Theta}{l_{me}}$$

B_A; H_A – grafisch ermitteln → Φ

Gespeicherte Energie im magnetischen Feld

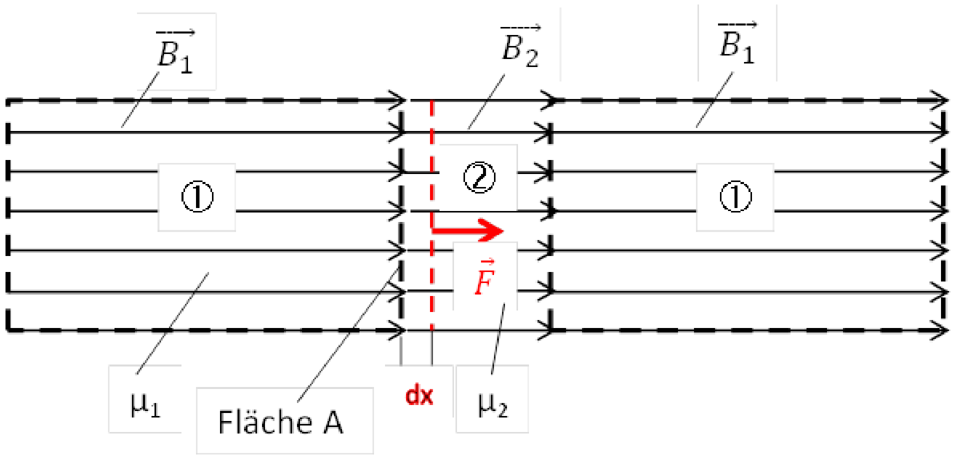
	$\delta W_m = d\Phi \cdot V_m$ $\downarrow$ $\delta W_m = dB \cdot \delta A \cdot dH \cdot \delta l$ $\downarrow$ $\frac{\delta W_m}{\delta V} = H \cdot dB$ $\downarrow$
magnetische Energiedichte allgemein	$\int_V \frac{\delta W_m}{\delta V} = \int HdB$
magnetische Energiedichte im homogenen Magnetfeld	$\frac{W_m}{V} = w_m = \int HdB$
magnetische Energiedichte im homogenen Magnetfeld bei µ = konst.	$w_m = \int_0^{B_1} HdB = \frac{B_1^2}{2\mu}$ $= \frac{H_1 \cdot B_1}{2}$
magnetische Energiedichte im homogenen Magnetfeld bei µ ≠ konst. *(Magnetisierungskennlinie)*	$w_m = \int_0^{B_1} HdB$ *grafische Integration*

Kräfte im magnetischen Feld

Kraft auf bewegte Ladungen (Lorentzkraft)	 $\vec{F} = \pm q(\vec{v} \times \vec{B})$ $\lvert\vec{F}\rvert = \pm q \cdot v \cdot B \cdot sin\alpha$
Kraft auf stromdurchflossene Leiter	 $\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$ $\lvert\vec{F}\rvert = I \cdot l \cdot B \cdot sin\alpha$
Kraft und Drehmoment auf rotierende Stromschleife	 $M = 2 \cdot F_t \cdot r$ $M = I \cdot B \cdot A \cdot sin\alpha$

Kräfte im magnetischen Feld (2)
Kraft auf Grenzflächen

Quergrenzfläche



$$\frac{F}{A} = \frac{B^2}{2}\left(\frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1}\right)$$

Anwendung auf Eisenkreis (①) mit Luftspalt (②)

wobei : $\mu_1 >> \mu_2$ $\rightarrow$

$$\frac{F}{A} \approx \frac{B^2}{2 \cdot \mu_2} = \frac{B \cdot H_l}{2} = \frac{dW_{ml}}{dV}$$

Kraft/Fläche – entspricht magnetischer Energiedichte
im Luftspalt