

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 2: Grundlagen Magnetkreis

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

→ **Kapitel 2:** Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

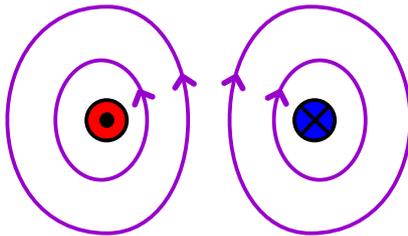
Inhalt Kapitel 2 : Grundlagen Magnetischer Kreis

- 2.1 Durchflutungsgesetz
- 2.2 Magnetischer Kreis
- 2.3 Kräfte in magnetischen Feldern
- 2.4 Materialeigenschaften
- 2.5 Beispiele und Anwendung
- 2.6 Gegenüberstellung der Größen

2.1 Durchflutungsgesetz

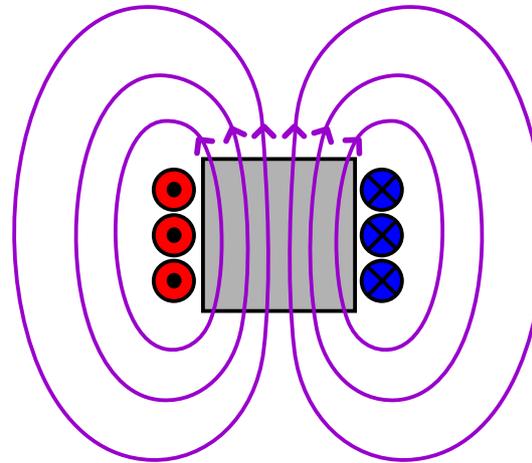
Erzeugung von magnetischen Feldern

Magnetfeld
stromdurchflossener
Leiter



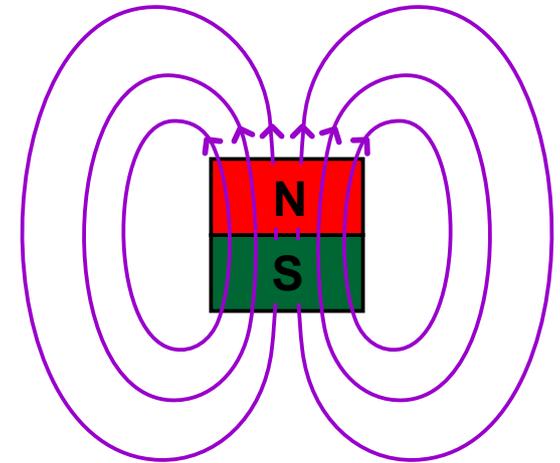
Rechter-Daumen-Regel:
Daumen = Stromrichtung
Finger = Feldrichtung

Spule
mit Eisenkern



magn. Feldlinien
sind immer in sich
geschlossen!

Permanent-
magnet



Feldlinien laufen
im Außenfeld
von N nach S

2.1 Durchflutungsgesetz

Theorie

$$\oint_{dA} H ds = \Theta$$

Linienintegral über eine beliebige geschlossene Strecke im Raum

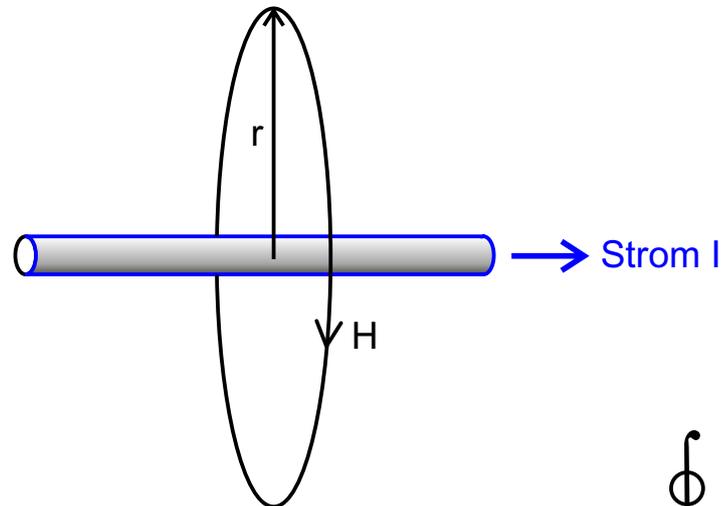
H: magnetische Feldstärke [A/m]

Θ : Durchflutung [A]

Einfaches Beispiel:

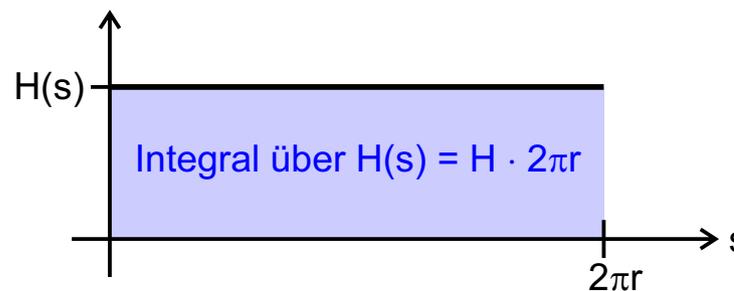
Θ = Strom I eines Leiters

H = Feldstärke über einem konzentrischen Kreis mit dem Abstand r



$$\oint H ds = H \cdot 2\pi r = I$$

$$\text{bzw. } H = \frac{I}{2\pi r}$$



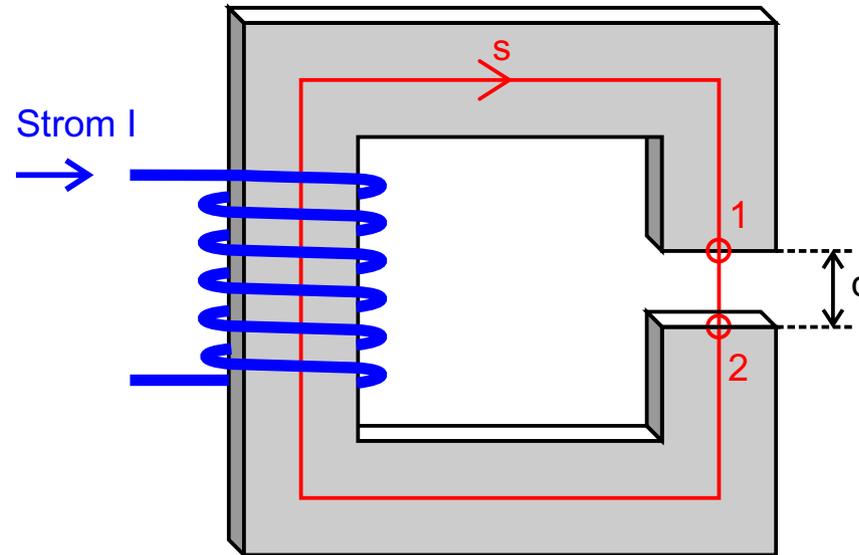
2.1 Durchflutungsgesetz

praktische Anwendung

$$\oint_{dA} \mathbf{H} \, ds = \sum_{i=1..n} v_i = \Theta = N \cdot I$$

Summe der magnetischen Teilspannungen in einem geschlossenen Umlauf

Durchflutung mit N Windungen "Amperewindungen"



$s_{12} = d = \text{Luftspaltweg}$

$s_{21} = l_{FE} = \text{Eisenweg}$

magn. Teilspannungen: $v_{ij} = \int_i^j \mathbf{H} \, ds = H_{ij} \cdot s_{ij} \rightarrow v_{12} + v_{21} = H_{12} \cdot s_{12} + H_{21} \cdot s_{21} = \Theta$

$$\Rightarrow \underbrace{H_L \cdot d}_{\text{überwiegt}} + H_{FE} \cdot l_{FE} = N \cdot I \Rightarrow$$

überwiegt, wenn $H_L \gg H_{FE}$

$$H_L \approx N \cdot I / d$$

$$B_L = \mu_0 \cdot H_L$$

2.2 Magnetischer Kreis

Magnetische Flussdichte

magnetischer Kreis:

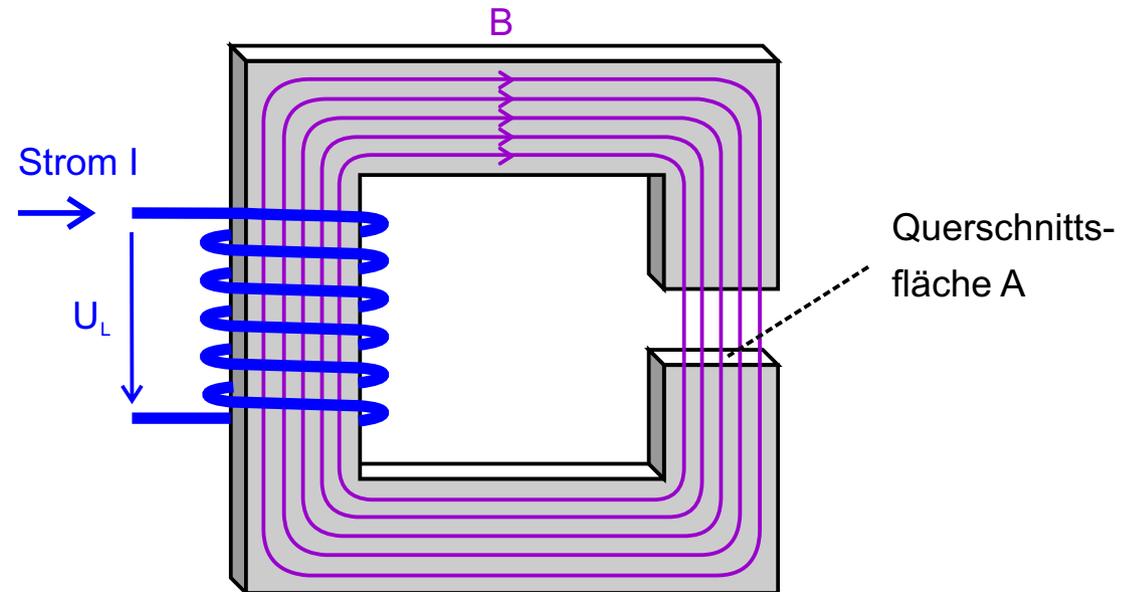
Magnetische Flussdichte: $B \text{ [Vs/m}^2\text{]} = \mu_0 \mu_r \cdot H$

Magnetischer Fluss: $\Phi \text{ [Vs]} = \int B \, dA = B \cdot A$

magn. Feldkonstante: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

Anmerkungen:

- Flussdichte: $1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ T (Tesla)}$
- Ohne Streuung: Gesamter Fluss im Eisenkreis
- Eisen: $H_{FE} = B / \mu_0 \mu_R$ $\mu_R = 10^2 \dots 10^4$
- Luftspalt: $H_L = B / \mu_0$
 $\Rightarrow H_L \gg H_{FE}$

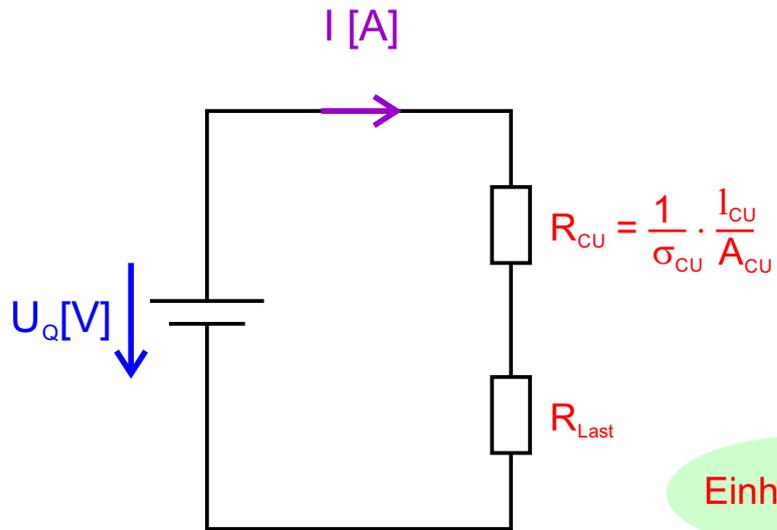


Messung B-Feld: Hallsonde

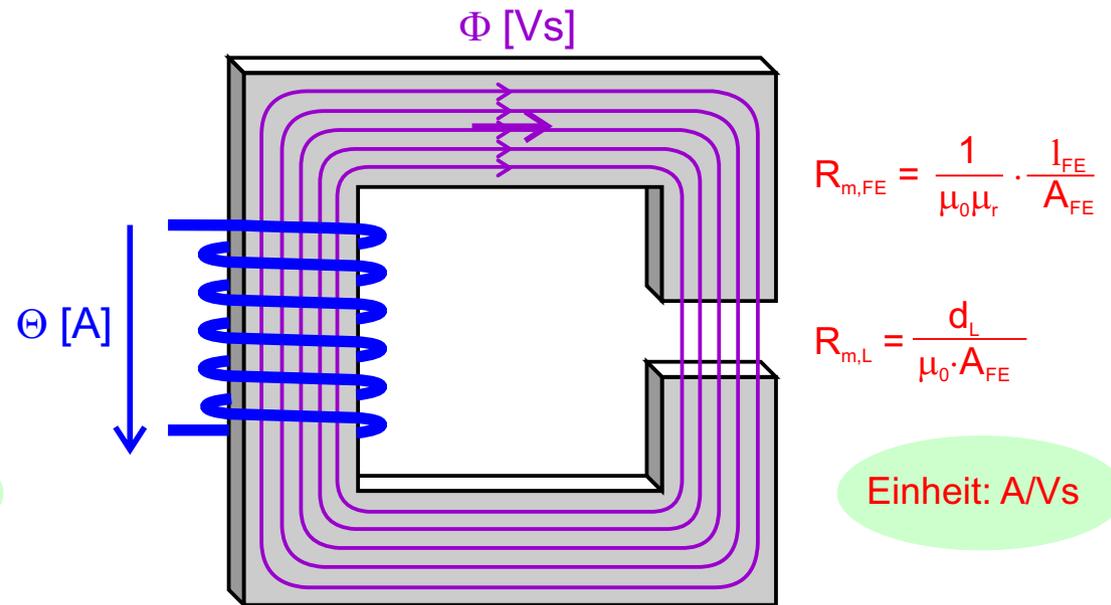
2.2 Magnetischer Kreis

Analogie zum Elektrischen Kreis

Kupferdraht führt Strom



Eisenjoch führt magn. Fluss



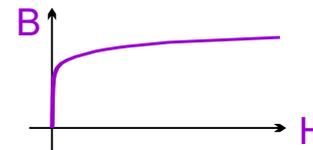
el. Leitfähigkeit bei 25°C:

$$\sigma_{Cu} = 58 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$$

$$\sigma_{Al} = 36 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$$

$$\sigma_{FE} = 10 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$$

magn. Leitfähigkeit: $\mu_0 \mu_r$
 aus Kennlinie B(H) \rightarrow



l_{FE} : Eisenweg
 d_L : Luftspaltdicke
 A_{FE} : Eisenquerschnitt

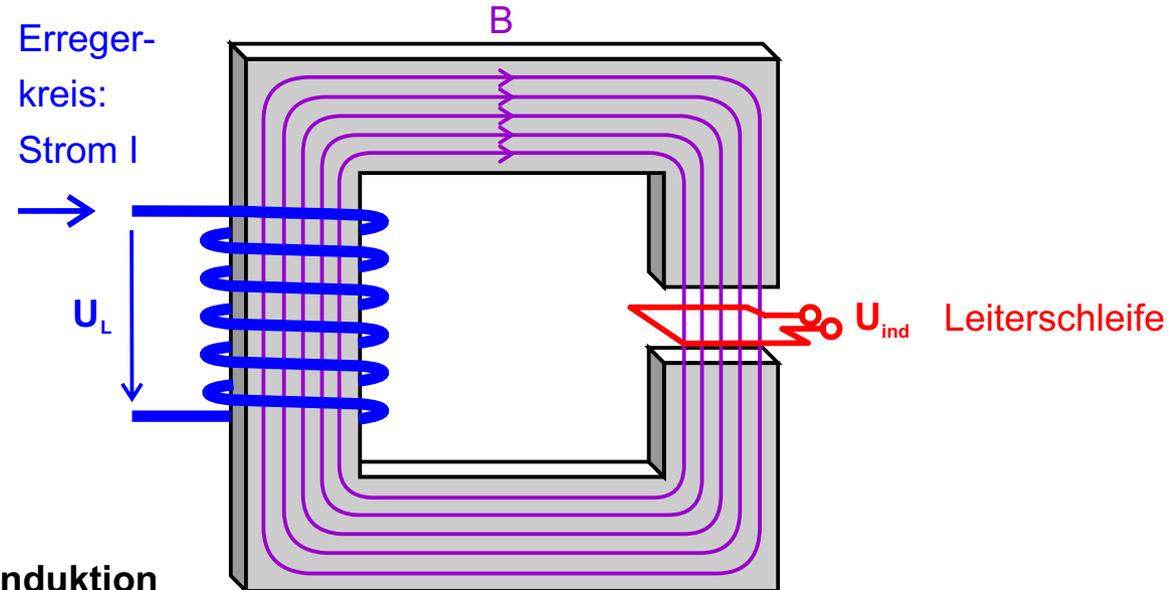
2.2 Magnetischer Kreis

Induktionsgesetz

elektrischer Kreis:

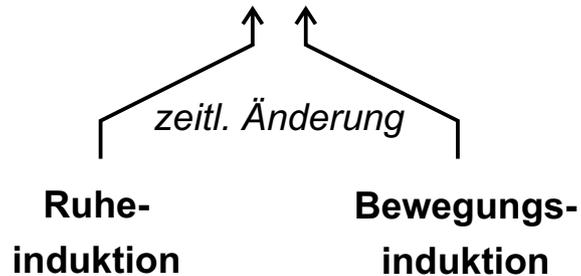
Verketteter Fluss: $\Psi = N \cdot \Phi$ bzw. $\Psi = L \cdot I$

Induktionsgesetz: $U_{\text{ind}} [\text{V}] = - d\Psi / dt$



Erregerkreis: $U_L = L \cdot di/dt$ ← Selbstinduktion

Leiterschleife: $U_{\text{ind}} = d(B \cdot A)/dt$



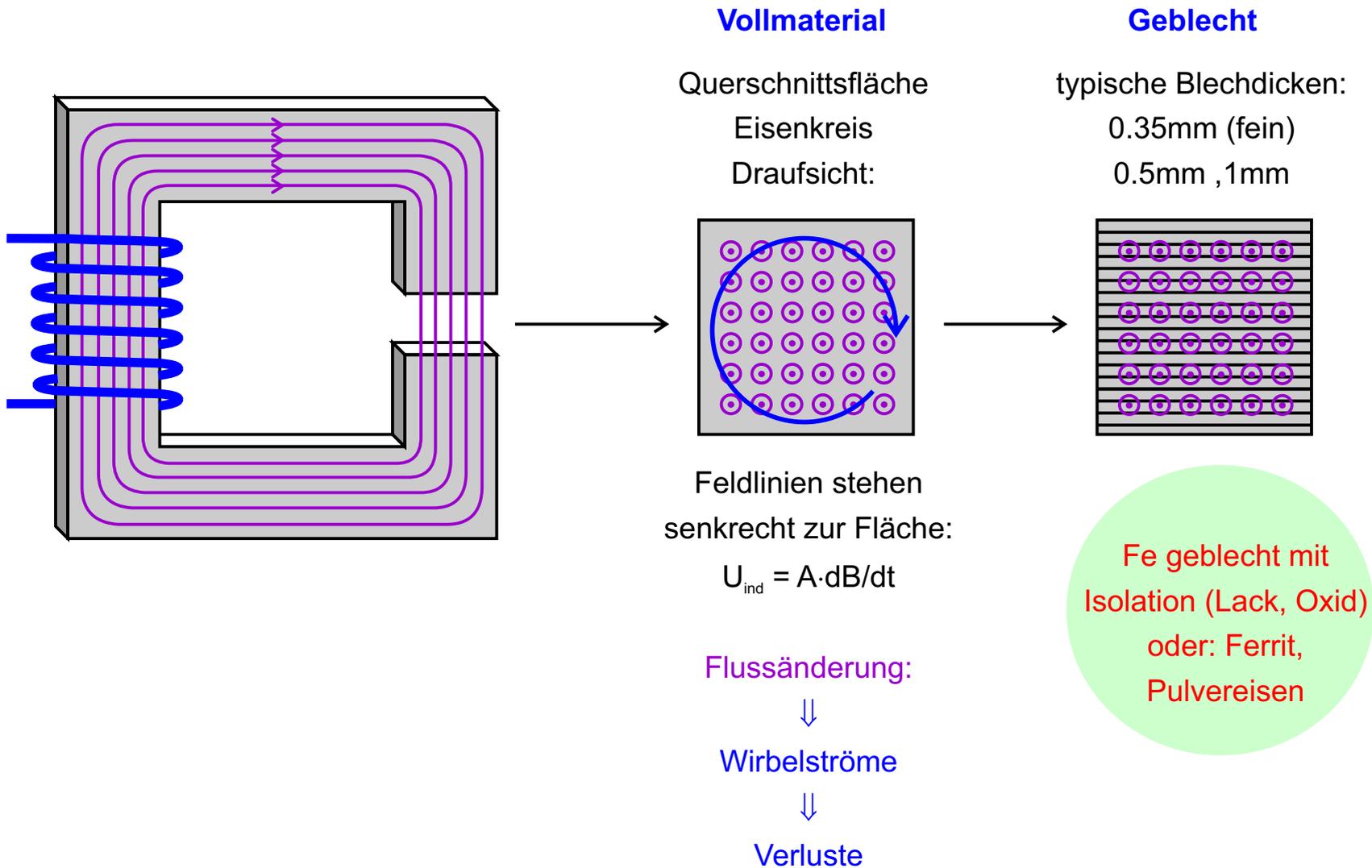
Θ, ϑ : "Theta"

Φ, φ : "Phi"

Ψ, ψ : "Psi"

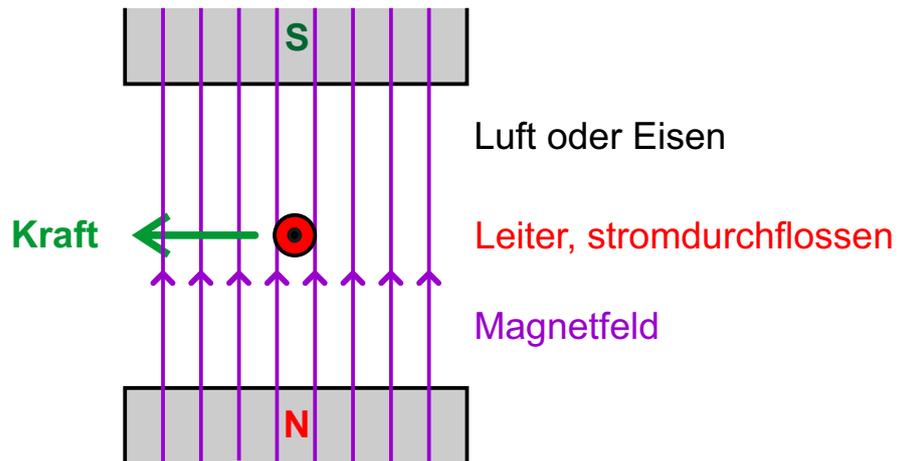
2.2 Magnetischer Kreis

Induktionsgesetz: Wirbelströme

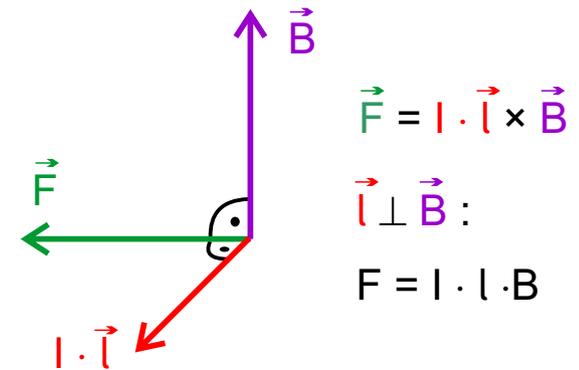


2.3 Kräfte in magnetischen Feldern

stromdurchflossener Leiter: Lorentzkraft



Lorentz - Kraft



Rechte-Hand-Regel:

$I \cdot \vec{l}$ Daumen

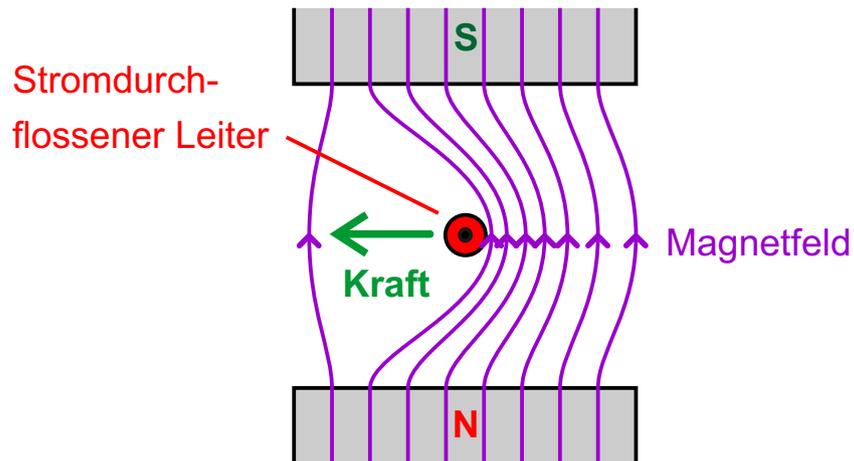
\vec{B} Zeigefinger

\vec{F} Mittelfinger

2.3 Kräfte in magnetischen Feldern

...etwas genauer: Querdruck und Längszug \Rightarrow Grenzflächenkräfte

Die magn. Feldlinien haben das Bestreben, sich auseinander zu drängen

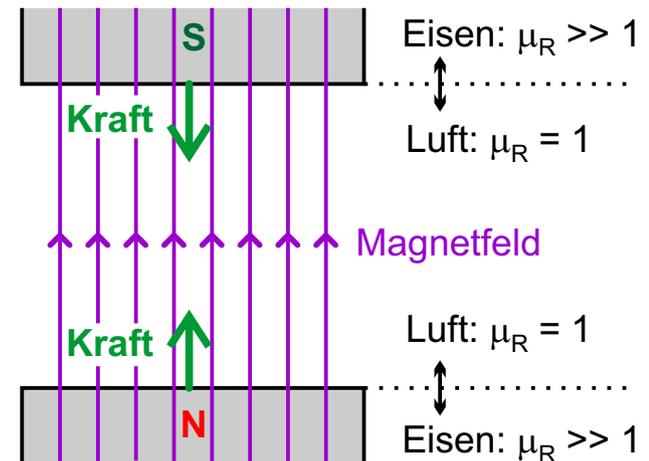


Berechnung

Analytisch: Lorentzkraft

Numerisch: FEM-Simulation

Die magn. Feldlinien haben das Bestreben, sich zu verkürzen



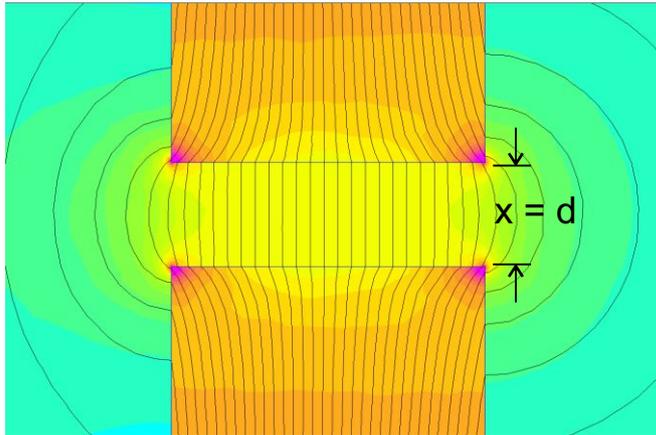
Berechnung

Analytisch: Ableitung aus Energie im Luftspalt

Numerisch: FEM-Simulation

2.3 Kräfte in magnetischen Feldern

Auf den Eisenkern wirkende Anziehungskraft in einem Luftspalt



Kräfte greifen an dem Material mit hohem μ_r an, d.h. an der Eisenoberfläche.

Maschinenauslegung: Kraft bzw. Drehmoment aus FEM-Simulation.

Analytische Rechnung für einfachen Fall:

Energieinhalt im Luftspalt

$$W_M = \frac{1}{2\mu_0\mu_r} B^2 \cdot A \cdot x, \quad x = d$$

Gedachtes Aufweiten des Luftspaltes:

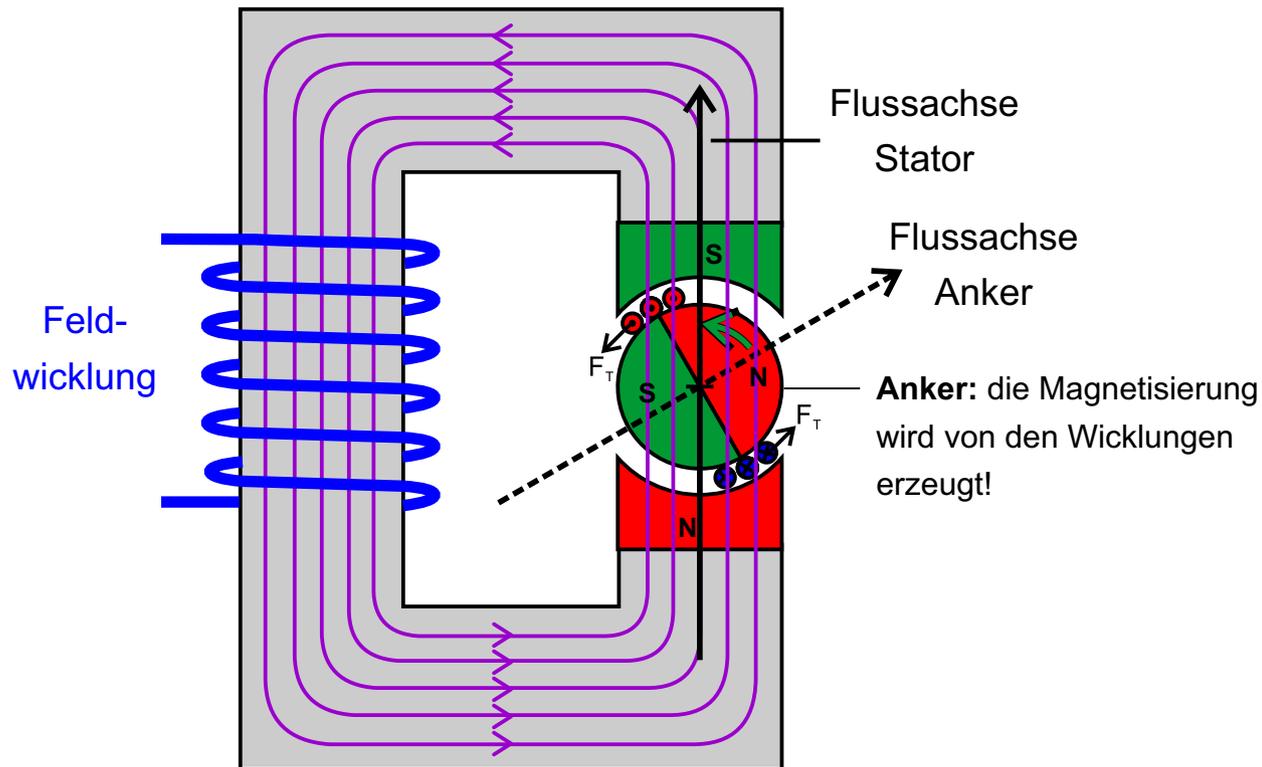
$$F = dW_M/dx \Rightarrow F = \frac{1}{2\mu_0\mu_r} B^2 \cdot A$$



gilt nur, solange eine Änderung von x nicht das B des Eisenkreises beeinflusst!

2.3 Kräfte in magnetischen Feldern

Drehmomenterzeugung mit Lorentzkraften



Wirkprinzip:

Lorentzkraften erzeugen
Tangentialkräfte an den
Leiterstäben des Ankers

Anschaulich:

N und S ziehen sich jeweils an:
die Flussachse des Ankers will sich
parallel zum Statorfeld ausrichten

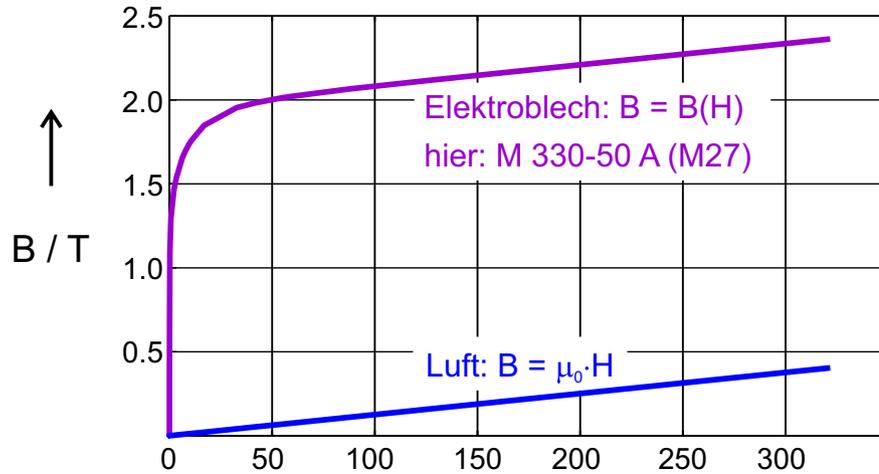
Physik dahinter: ???

Technische Umsetzung: ???

2.4 Materialeigenschaften

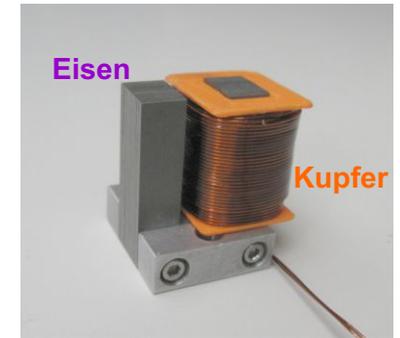
Eisen, Luft und Kupfer

Magnetisierungskennlinien

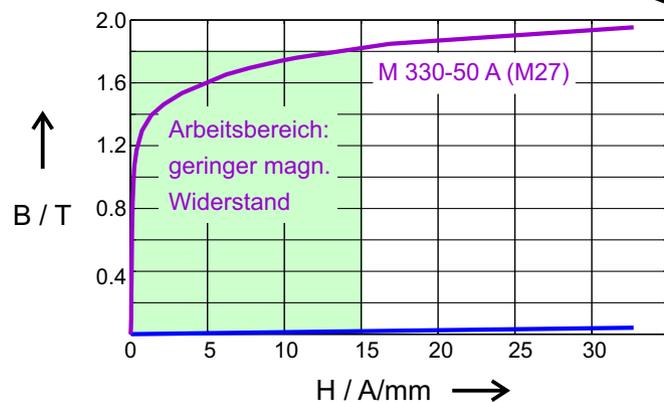


Eisen ab ca. 2.0T vollständig gestättigt:
 B steigt nur noch mit $\mu_0 \cdot H$ (Luft)

Luft: hoher magn. Widerstand
 $1T \approx 800kA/m$



Zoom



Stromdichten Kupfer

- Hausinstallation 1.5mm^2 : $16\text{A} \rightarrow 10\text{A}/\text{mm}^2$
- Laborkabel 2.5mm^2 : $20\text{A} \rightarrow 8\text{A}/\text{mm}^2$
- Installationsrohr, 120mm^2 : $240\text{A} \rightarrow 2\text{A}/\text{mm}^2$
- Wicklung Elektrische Maschine:
 - Nennbetrieb: $3..7\text{ A}/\text{mm}^2$
 - Überlast: über $10\text{A}/\text{mm}^2$

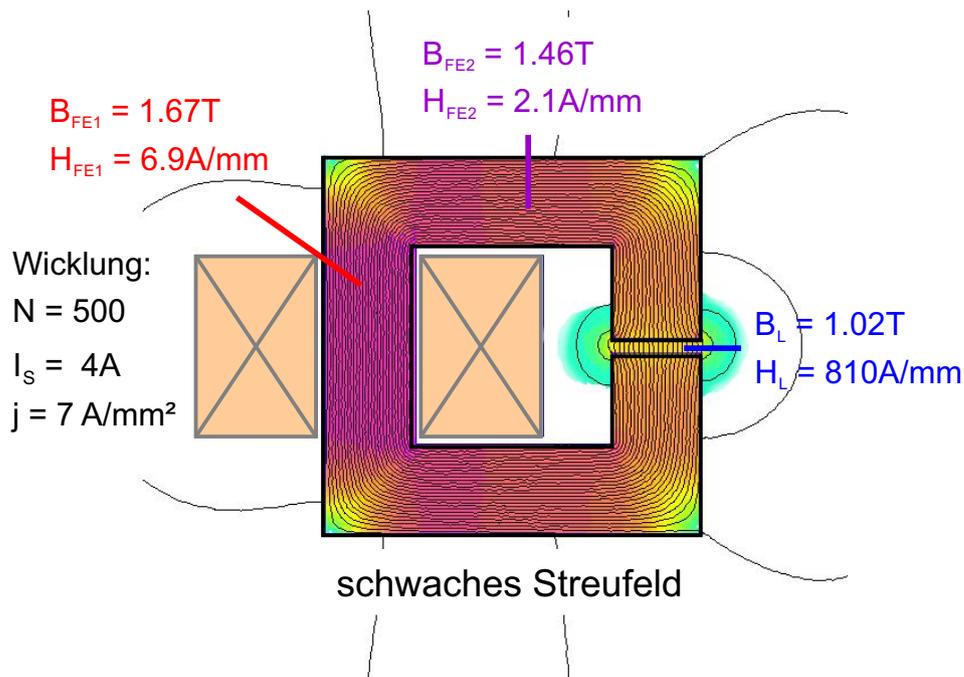
2.4 Materialeigenschaften

Grenzen: Eisen → Sättigung,

Kupfer → Erwärmung

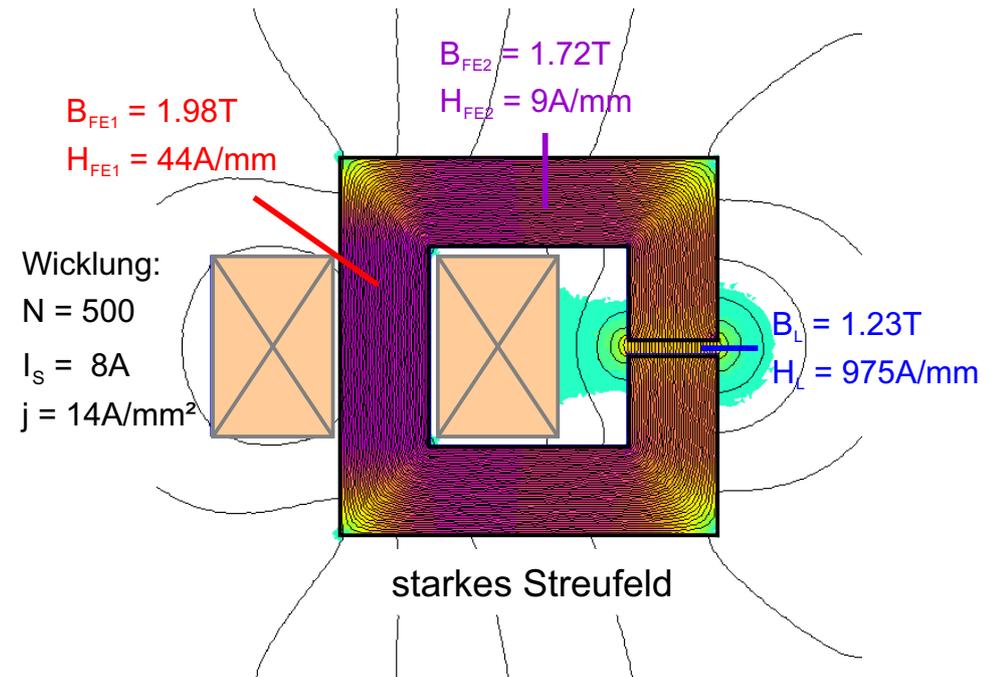
Eisenjoch bei mittlerer Aussteuerung

- Eisen: kaum gesättigt, $B < 1.8T$, wenig Streufeld
- Durchflutungsbedarf entspricht Dauerbetrieb
- Kupfer: Beharrungstemperatur typ. 100..120°C



Eisenjoch bei hoher Aussteuerung

- Eisen: stark gesättigt, $B \approx 2T$, deutliches Streufeld
- Durchflutungsbedarf entspricht Überlastbetrieb
- Kupfer: Temperaturanstieg typ. 50..100K/min



Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info) – Simulation: A. Kleimaier

2.4 Materialeigenschaften

Einfaches Eisenjoch

Durchflutung ("Strom")

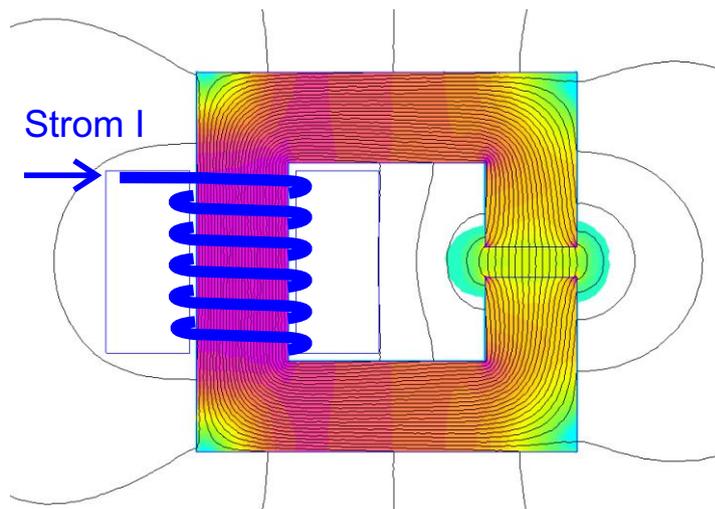


magn. Feldstärke H



magn. Fluss Φ

Eisen: magnetischer Widerstand R_m klein
Luft: magnetischer Widerstand R_m groß



Spielregeln:

- Feldlinien suchen den Weg des kleinsten R_m
- Feldlinien drängen auseinander
- Feldlinien versuchen sich zu verkürzen

Konsequenz:

Fluss wird durch den Eisenkreis geführt

Gleichmäßige Verteilung im Eisen bzw. Luftspalt

Grenzflächenkräfte: Querdruck

kleinster Weg in Eisen und im Luftspalt

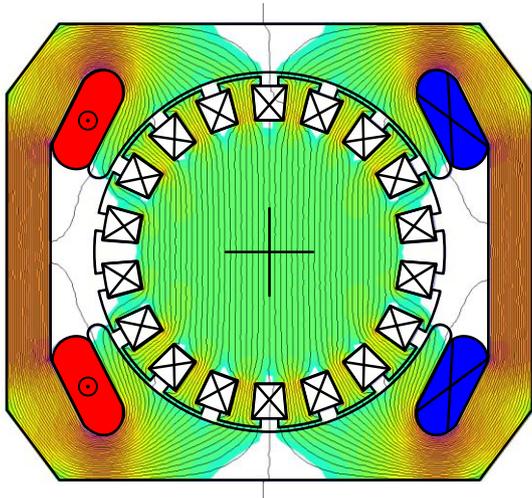
Grenzflächenkräfte: Längszug

Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info)

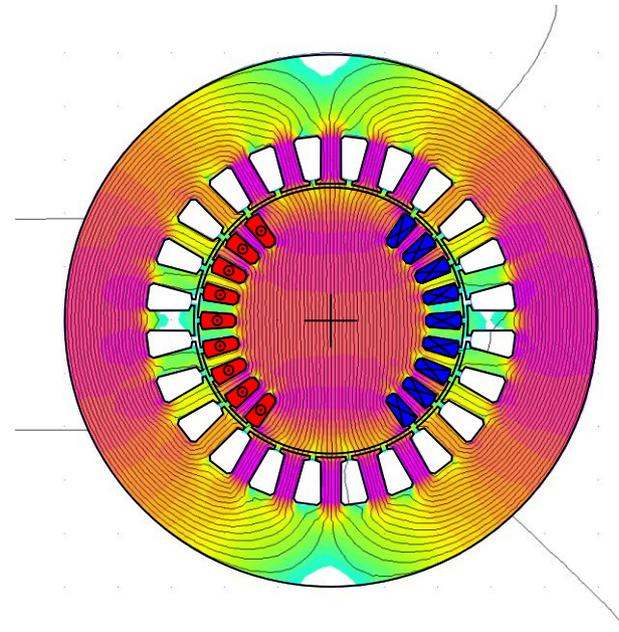
2.5 Beispiele und Anwendung

Flussführung in elektrischen Maschinen

Gleichstrommaschine,
Erregung eingeschaltet



Synchronmaschine,
Erregung eingeschaltet

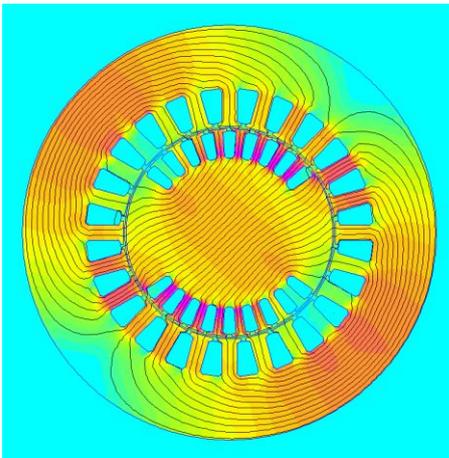


Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info) – Simulation: A. Kleimaier

2.5 Beispiele und Anwendung

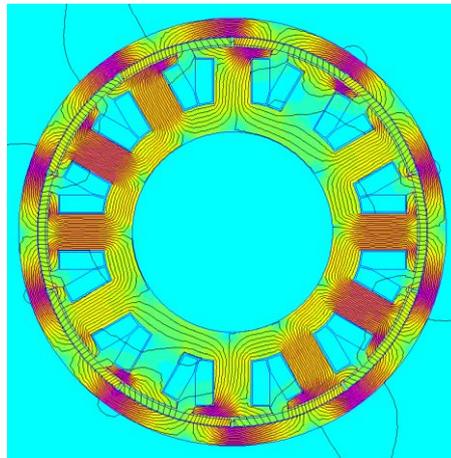
Flussführung in elektrischen Maschinen

Synchronmaschine
mit Vollpoläufer



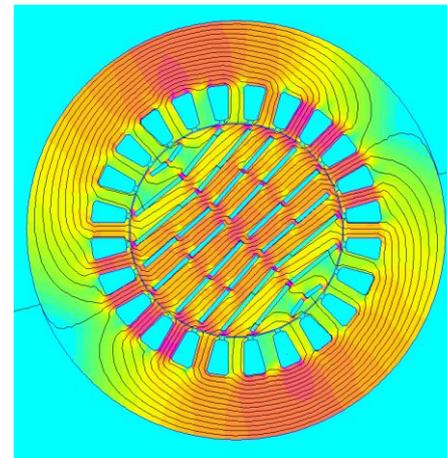
Stator: verteilte Wicklung
(klassisches Drehfeld)
Rotor: Fremderregung

Außenläufer-PMSM
mit Einzelzahnwicklung



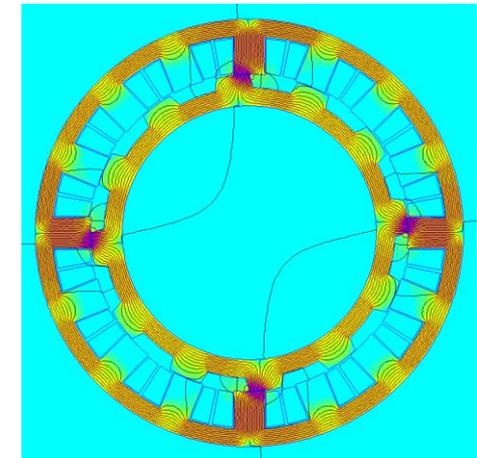
Stator: konzentrierte Wicklung
(Einzelzahnwicklung)
Rotor: Permanentmagnete

Synchrone
Reluktanzmaschine



Stator: verteilte Wicklung
(klassisches Drehfeld)
Rotor: Flussbarrieren

Geschaltete
Reluktanzmaschine (SRM)

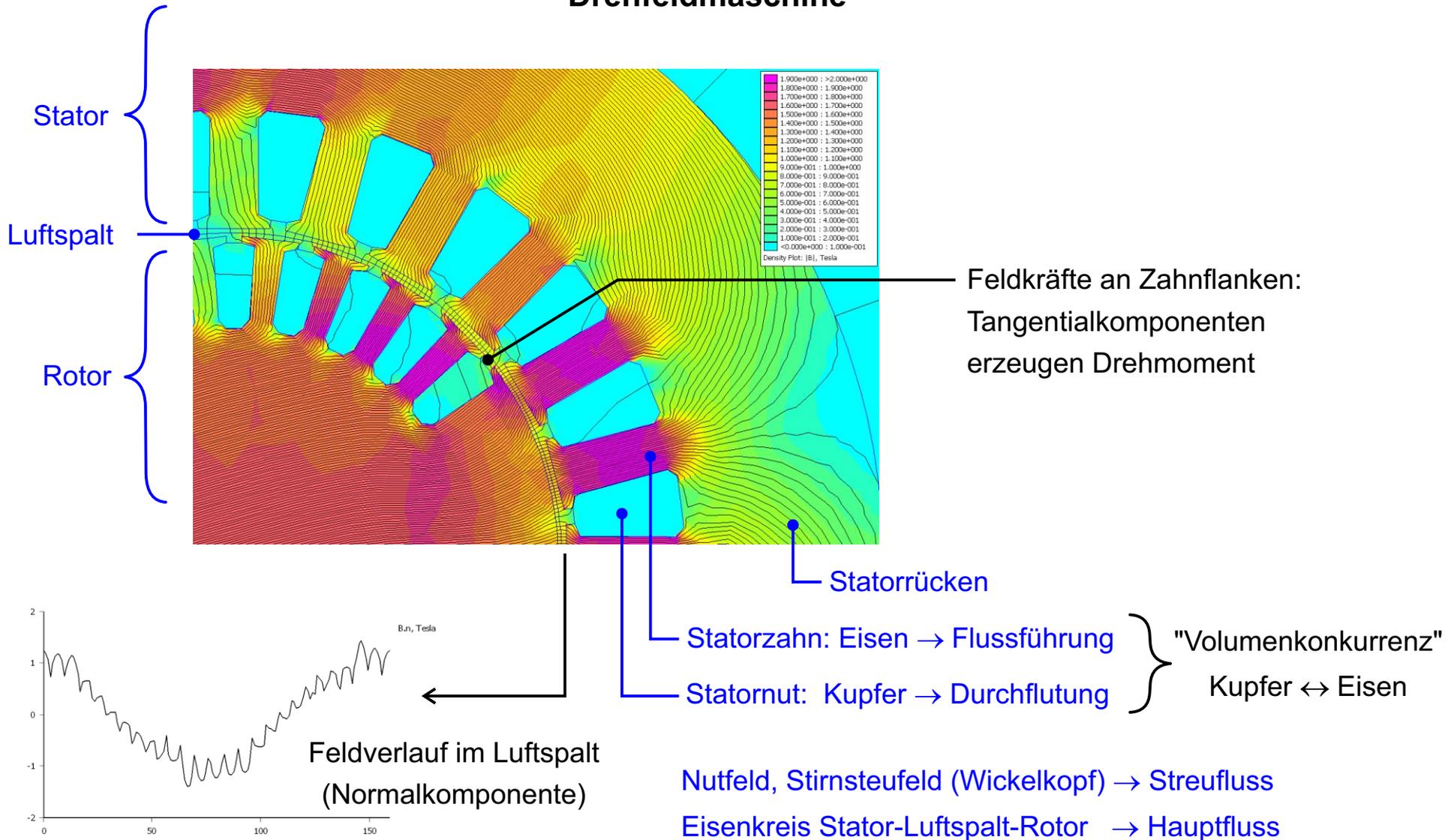


Stator: konzentrierte Wicklung
Rotor: ausgeprägte Zähne

Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info)

2.5 Beispiele und Anwendung

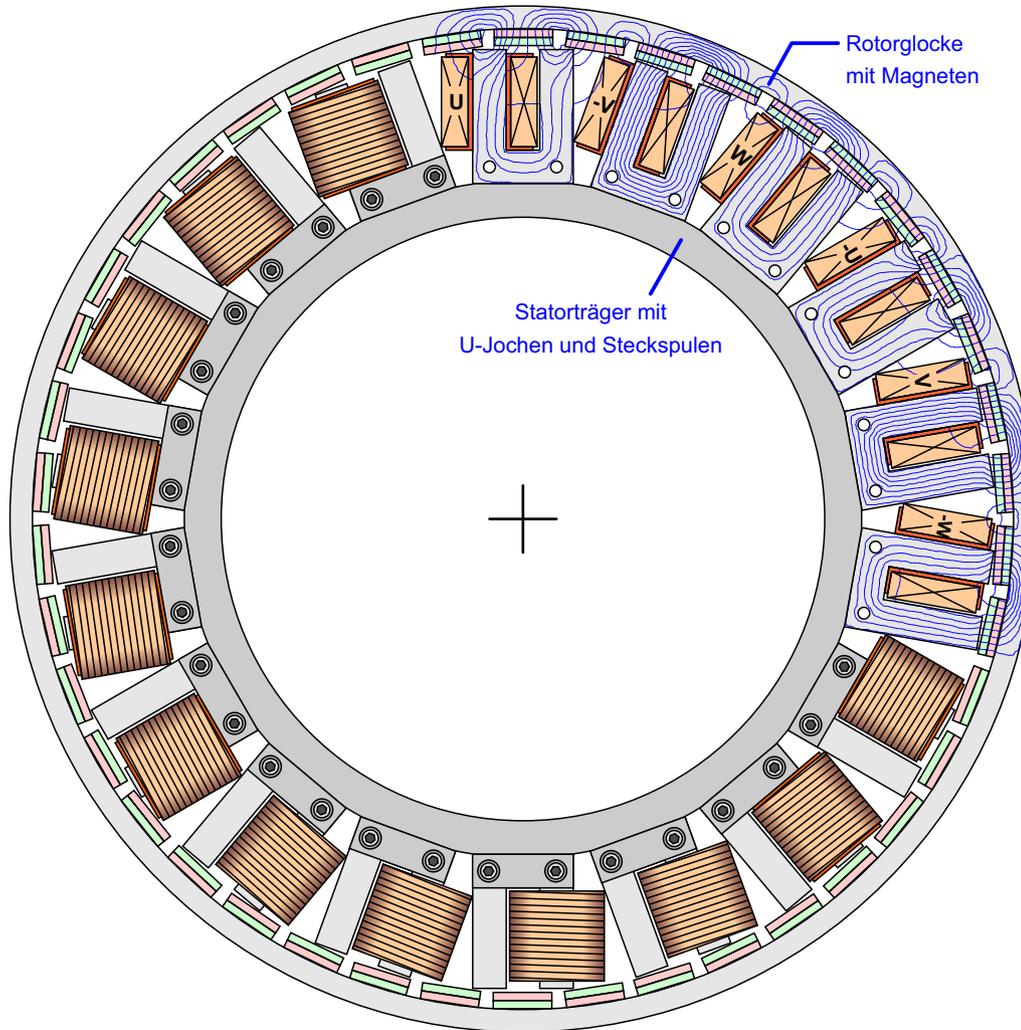
Drehfeldmaschine



Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info)

2.5 Beispiele und Anwendung

Auslegung von elektrischen Maschinen



1. Maschinengeometrie definieren

2. Symmetriebedingungen nutzen:

- Problem vereinfachen
- FEM-Analyse nur für eine Grundmaschine

3. Maschinenparameter ableiten:

- Drehmoment, EMK-Konstante
- Induktivität, Widerstand, Kurzschlussstrom
- nachgelagerte Simulationen:
Leistung, Betriebsbereiche, ...

4. Maschinengeometrie optimieren

- ggf. mehrere FEM-Durchläufe, bis
Lastenheftvorgaben / Zieldaten erreicht

hier: konkretes Beispiel aus interner Untersuchung
"Radialflussmaschine mit U-Kernblechen"

2.6 Gegenüberstellung der phys. Größen

Größe	Beziehung	Einheit
Durchflutung "Amperewindungen":	$\Theta = N \cdot I = \oint_{dA} H \, ds$ $= \sum_{i=1..n} H_i \cdot s_i \text{ für } H_i = \text{const.}$	A, Aw Summe der magn. Spannungen
Magnetische Feldstärke:	H	A/m
Magnetische Flussdichte	$B = \mu_0 \cdot \mu_r(B) \cdot H$	Vs/m ² bzw. T $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
Magnetischer Fluss	$\Phi = \int B \, dA$ $= B \cdot A \text{ für } B = \text{const. und } \vec{B} \perp \vec{A}$	Vs (im Eisen)
(elektrisch) verketteter Fluss	$\Psi = N \cdot \Phi$	Vs (Spule/Wicklung)
induzierte Spannung bzw. EMK:	$U_{\text{ind}} = - d\Psi / dt$	V
Induktivität:	$L = \Psi / I$ "Fluss pro Strom"	Ωs bzw. H
Magnetische Feldenergiedichte	$w_m = \int H \, dB$ $= \frac{1}{2} B \cdot H \text{ für } H, B = \text{const.}$	J/m ³