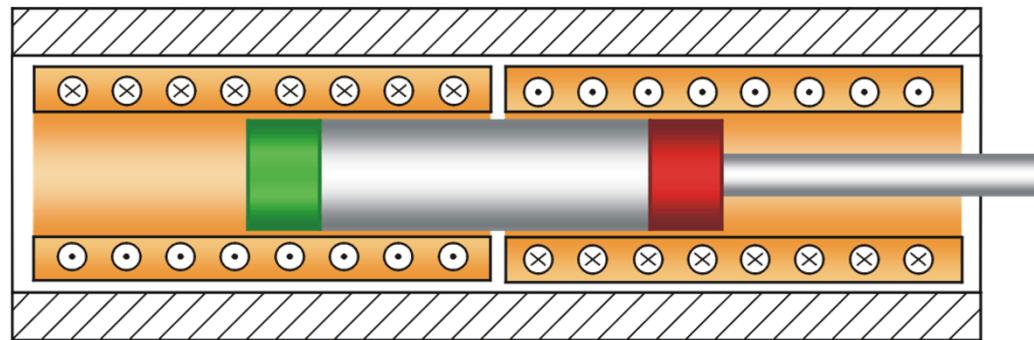


Magnettechnik



**Dimensionierung,
Werkstoffe, Anwendungen**

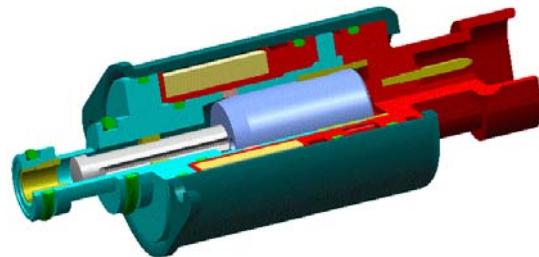
Dr.-Ing. B. Gundelsweiler

Gliederung

- Einordnung der Aktoren
- Dimensionierung
 - Antriebsspezifikation und Lastenheft
 - Grobabschätzung
 - Grobdimensionierung mittels der Netzwerktechnik
 - Feindimensionierung mittels FEM
- Anwendungsbeispiele
- Zusammenfassung

Elektromagnetische Bauformen:

- Haftmagnetsysteme
- Schaltmagnete
- Proportionalmagnete
- Ventiltechnik

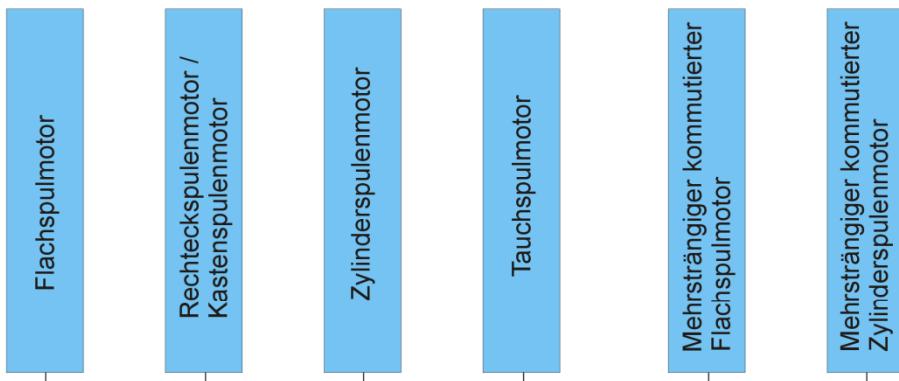


Beispiel: Proportionales Druckregelventil

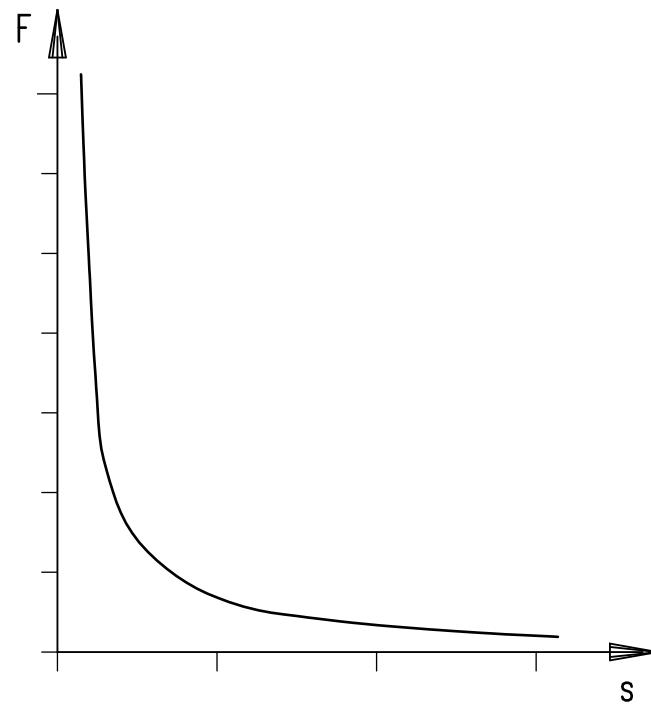
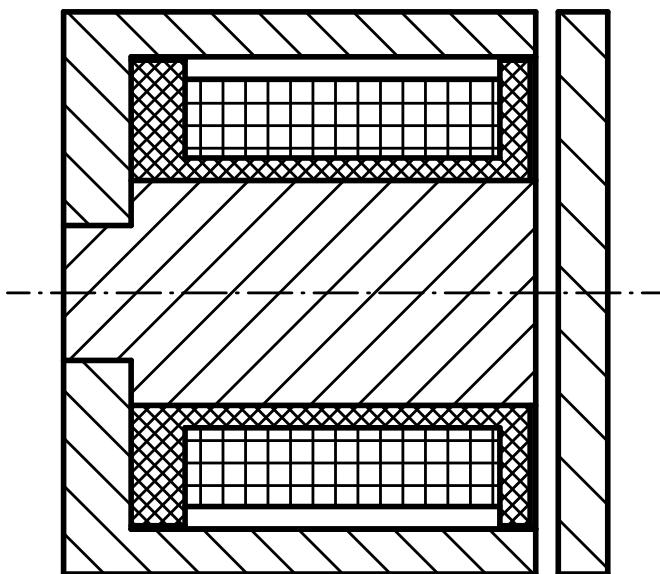
Einordnung der Motorbauformen

Steigender Ausnutzungsgrad (Verhältnis Magnet- / Spulenlänge)

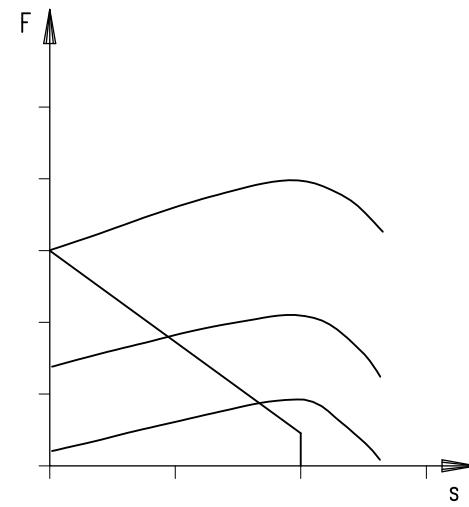
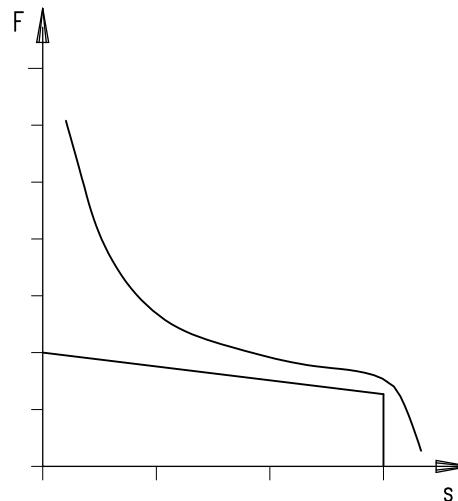
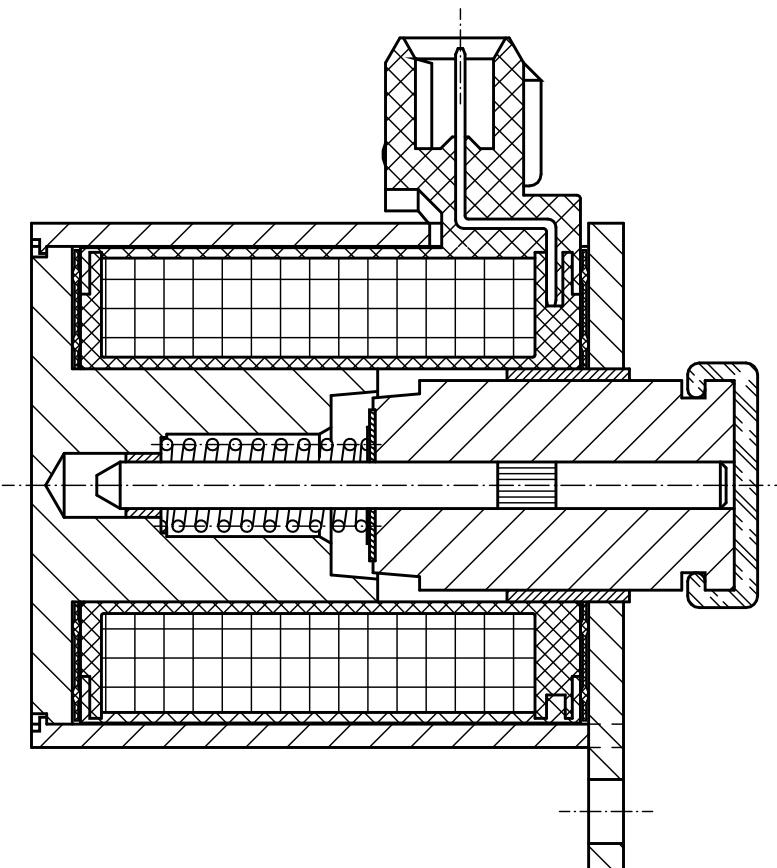
Magnetlänge
Spulenlänge

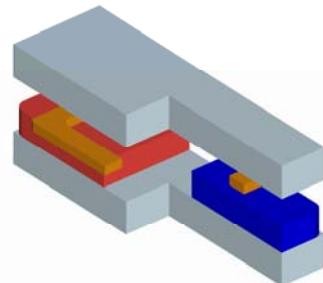


Haftmagnetsystem

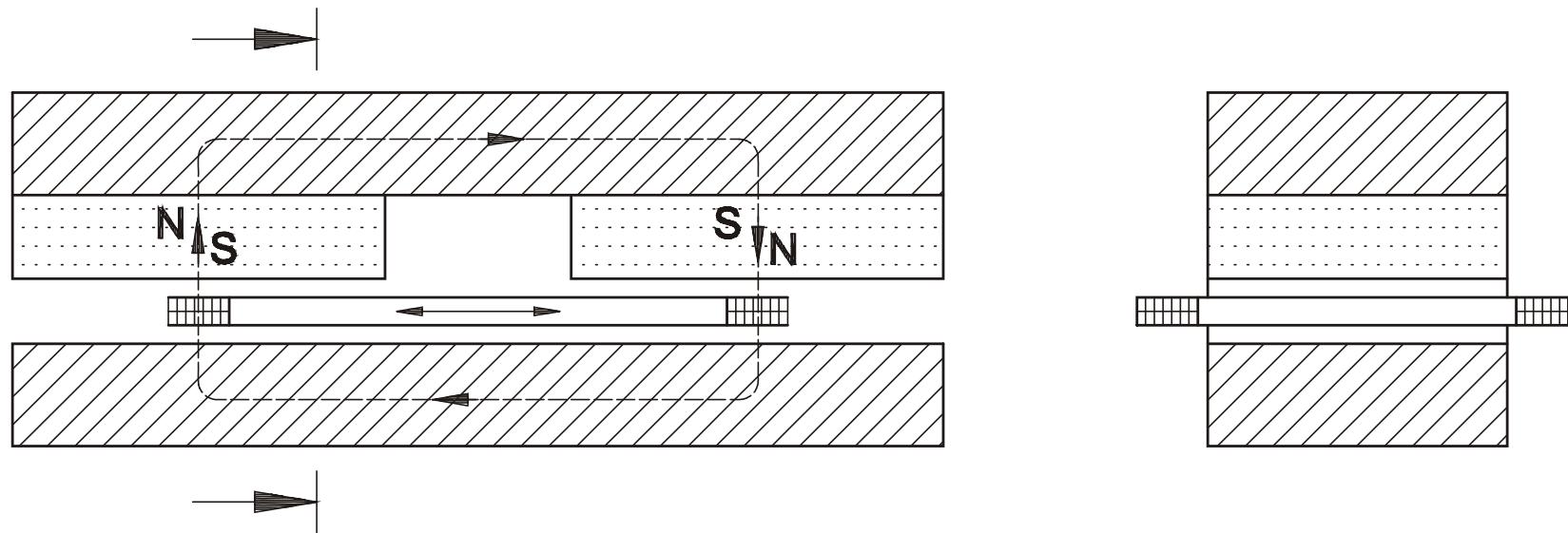


Hubmagnetsystem (Schaltmagnet, Proportionalmagnet)



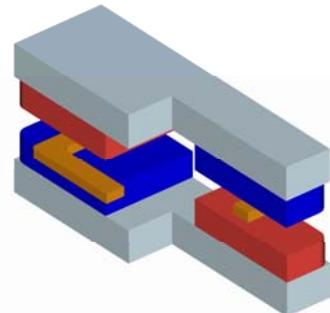


Flachspulmotor

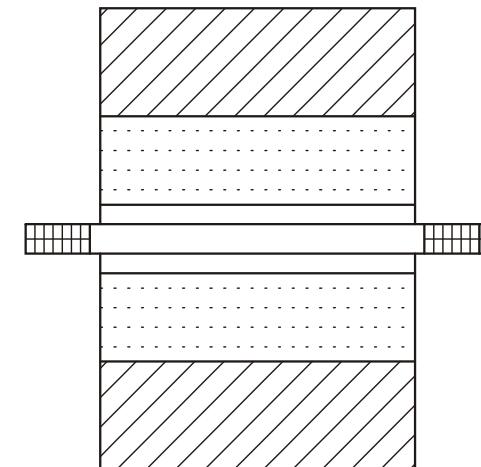
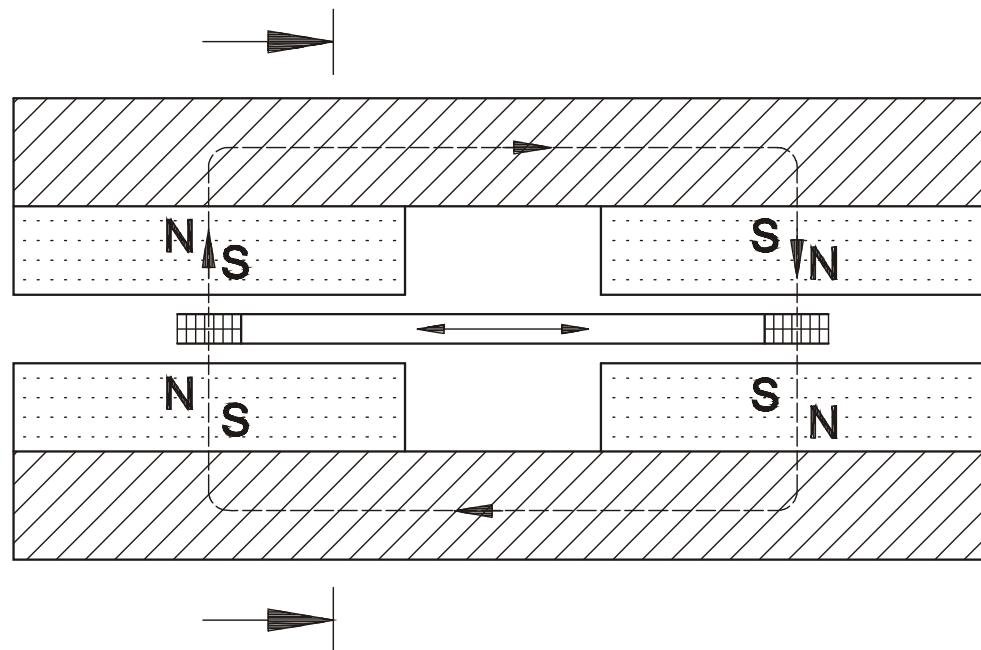


Unsymmetrische Bauform

[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]



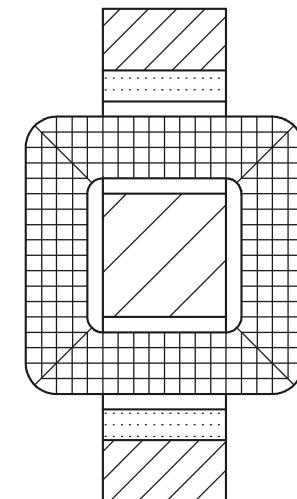
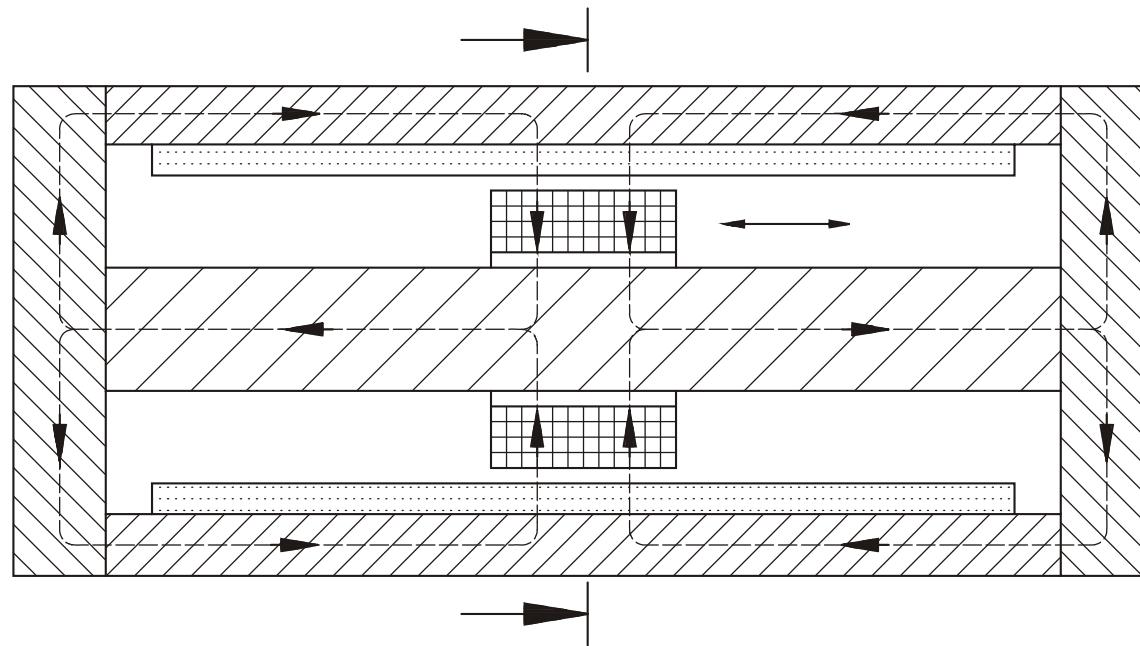
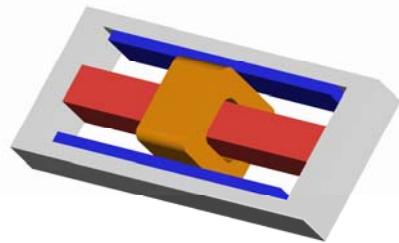
Flachspulmotor

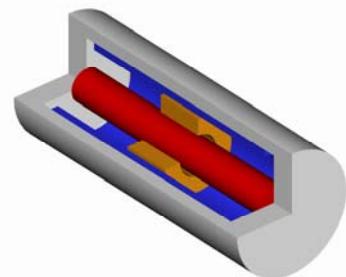


Symmetrische Bauform

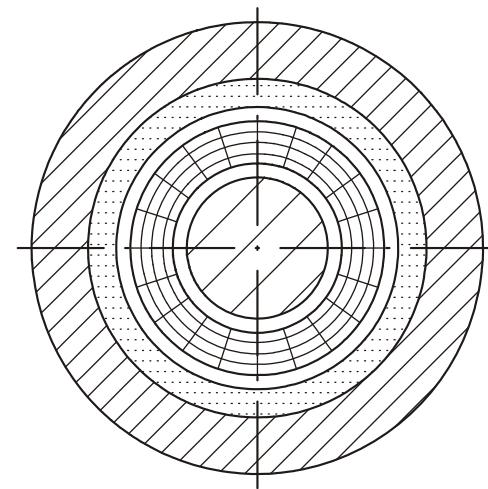
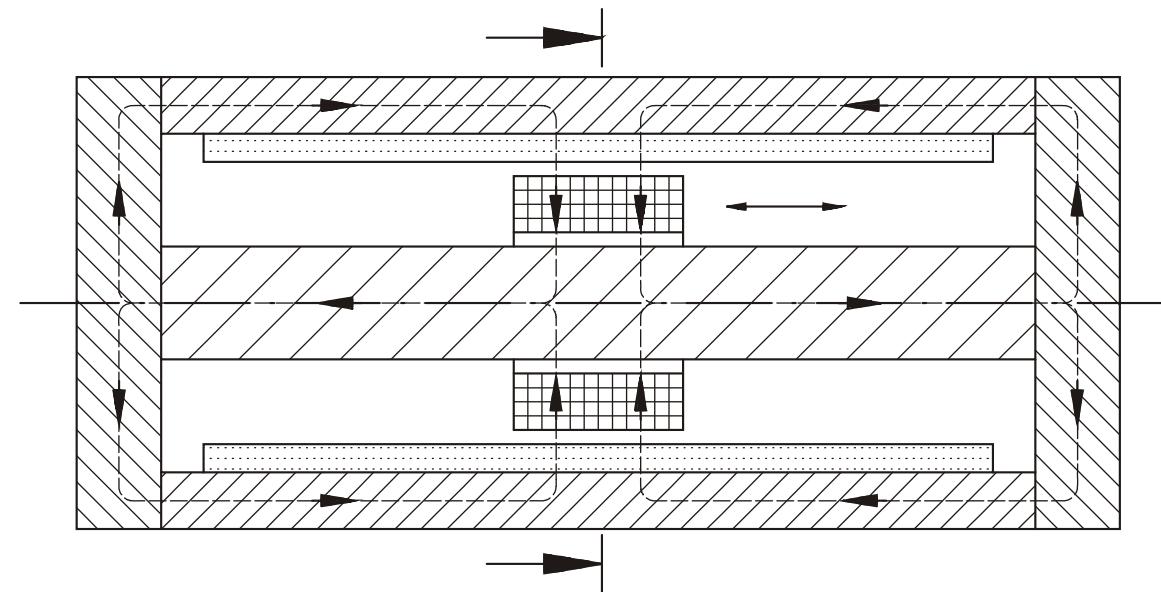
[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]

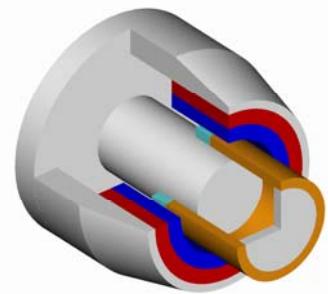
Kastenspulenmotor



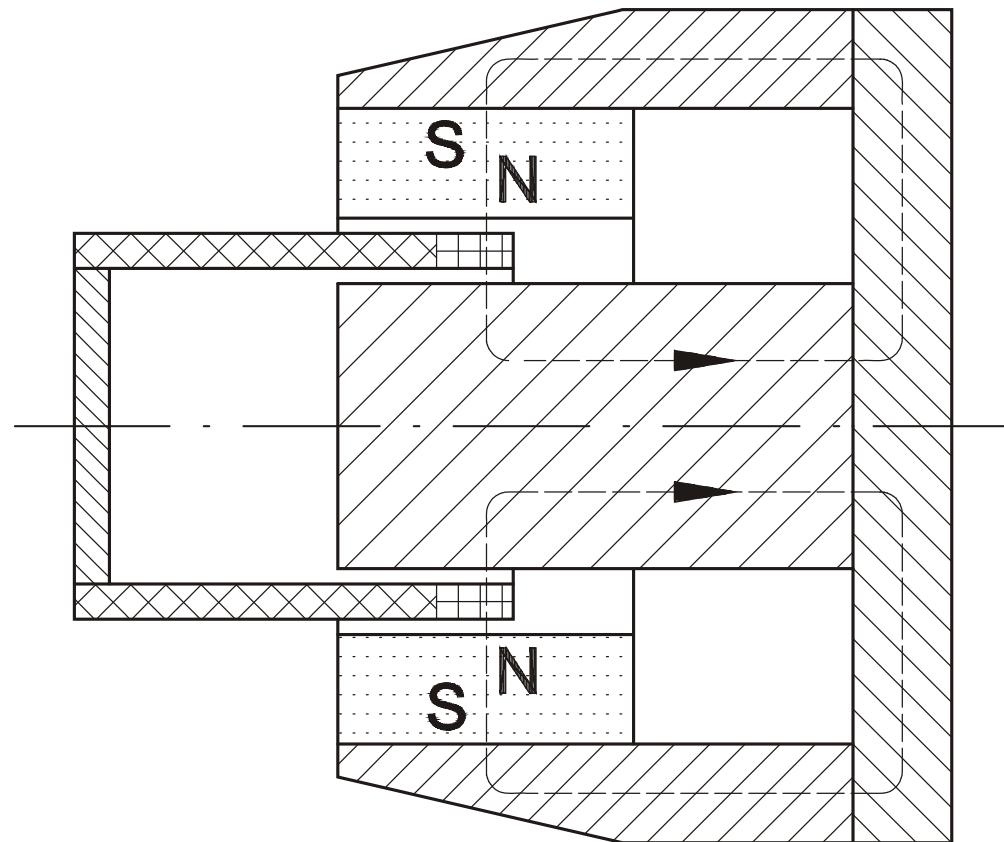


Zylinderspulenmotor

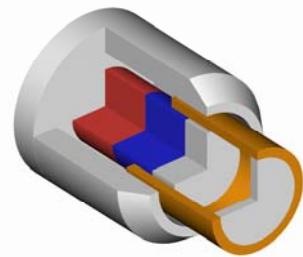




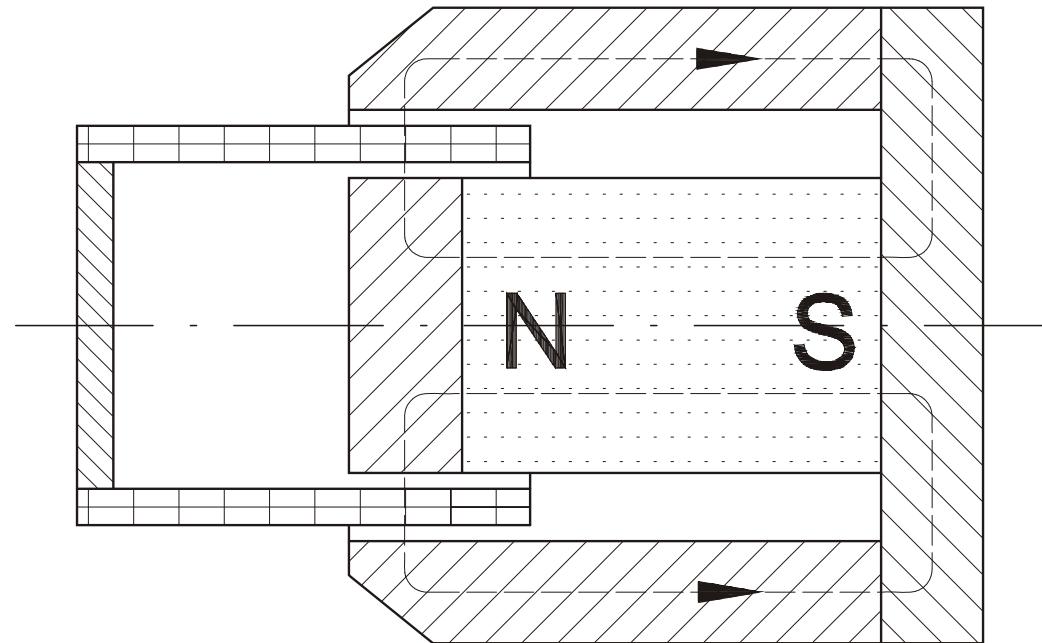
Tauchspulmotor



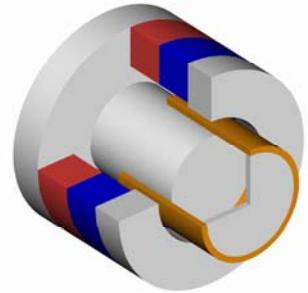
[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]



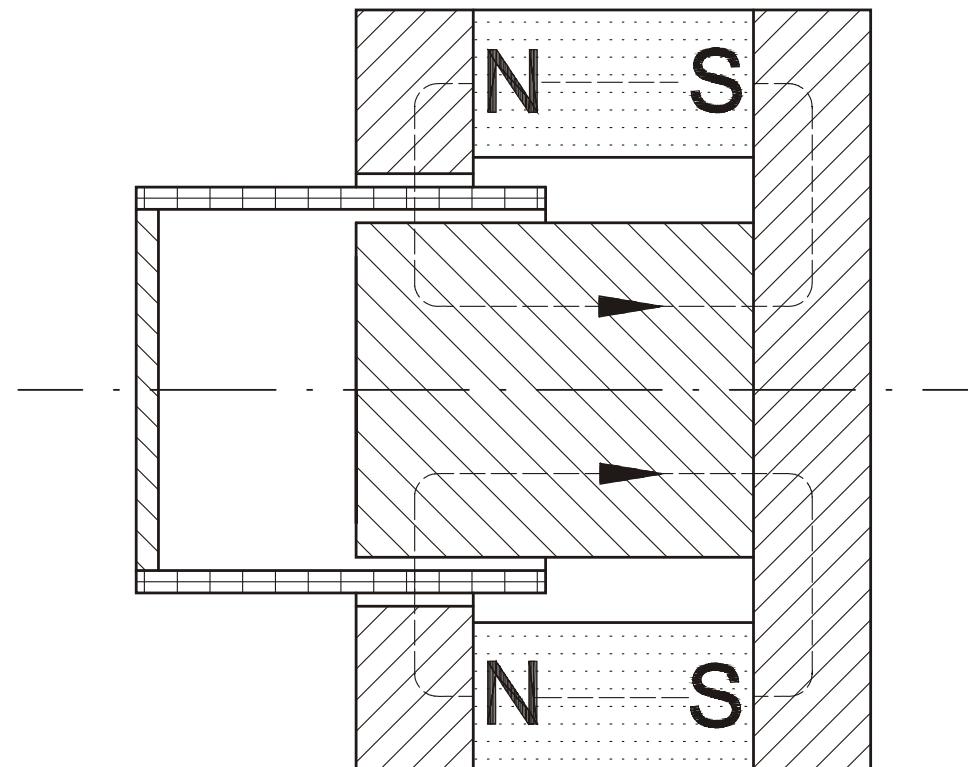
Tauchspulmotor



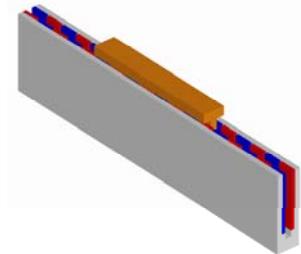
[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]



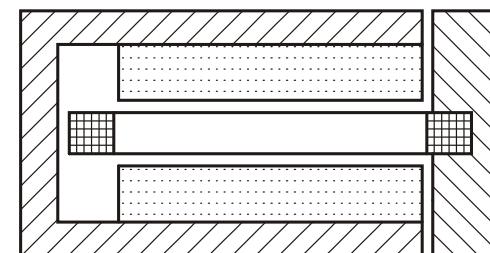
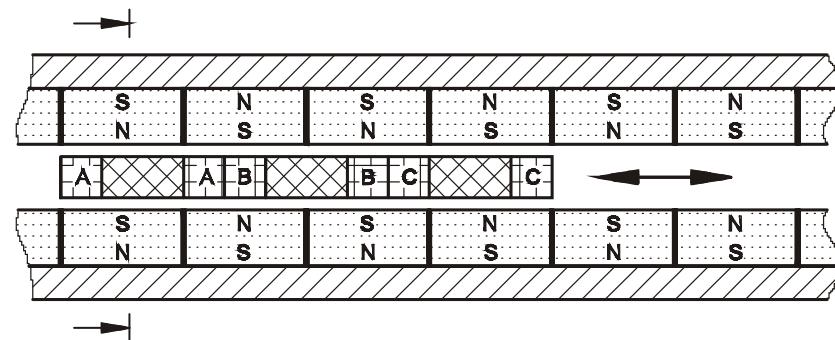
Tauchspulmotor



[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]

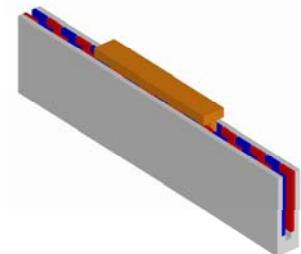


Flachspulmotor (mehrsträngig, kommutiert)

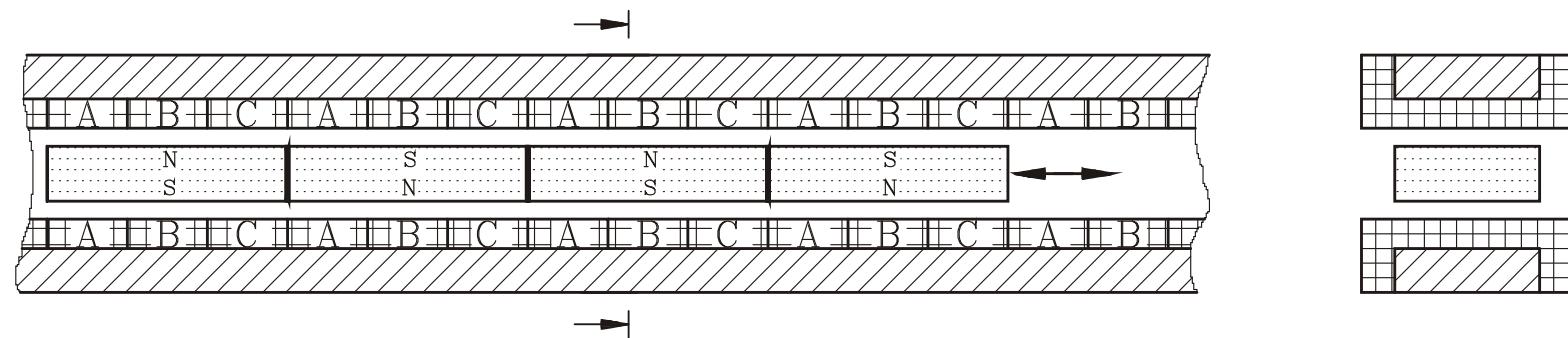


Bewegtes Spulensystem

[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]

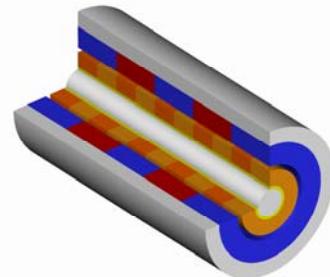


Flachspulmotor (mehrsträngig, kommutiert)

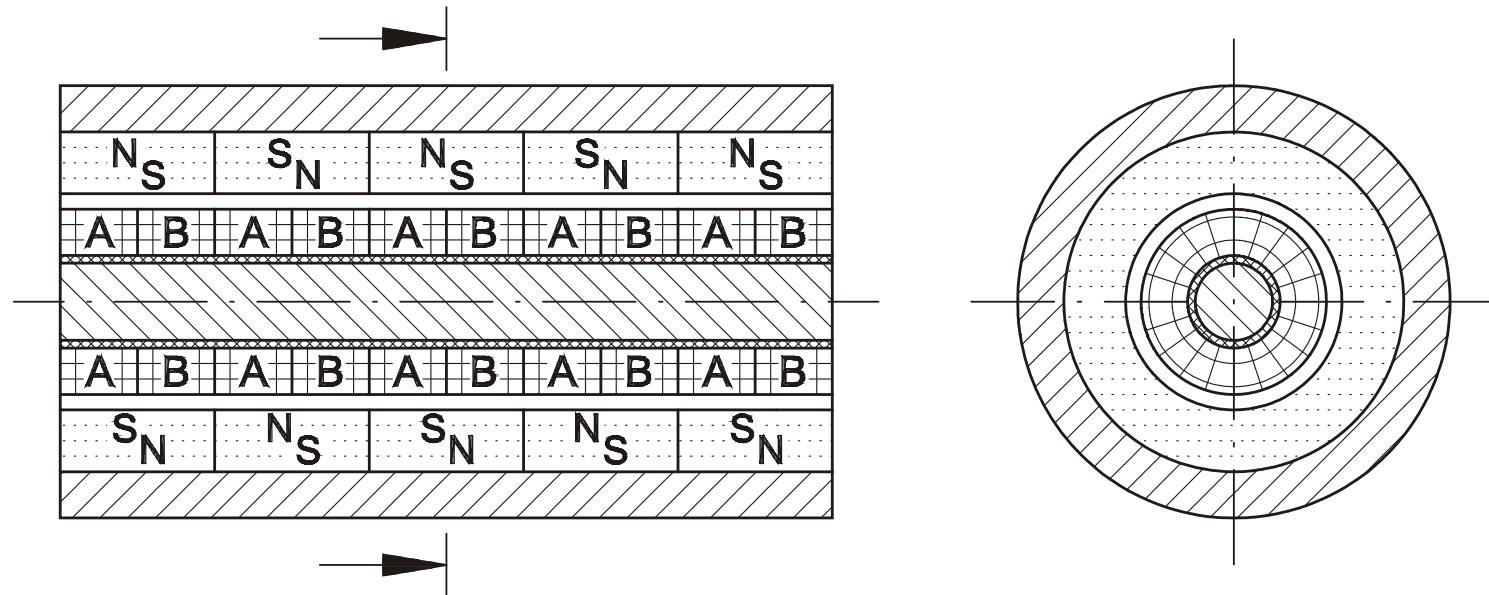


Bewegtes Magnetsystem

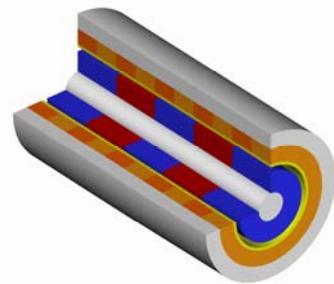
[Quelle 11: Handbuch elektrische Kleinantriebe]



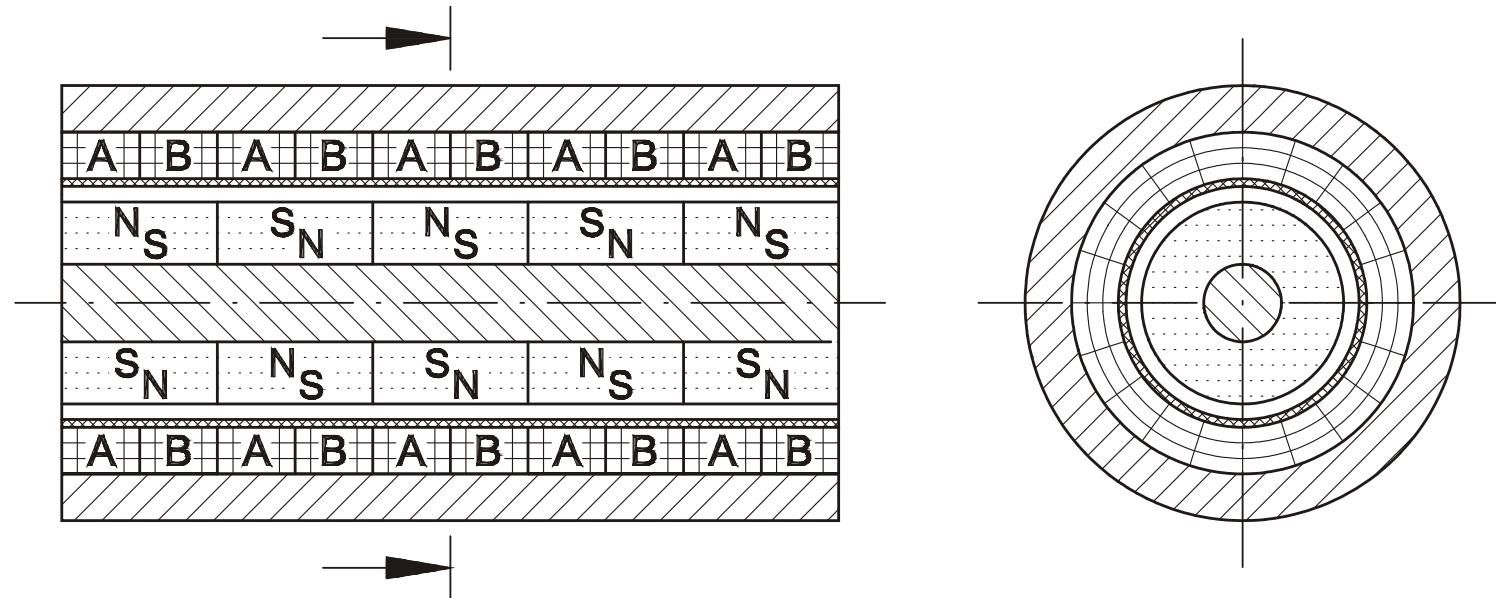
Zylinderspulenmotor (mehrsträngig, kommutiert)



Magnetsystem außen



Zylinderspulenmotor (mehrsträngig, kommutiert)

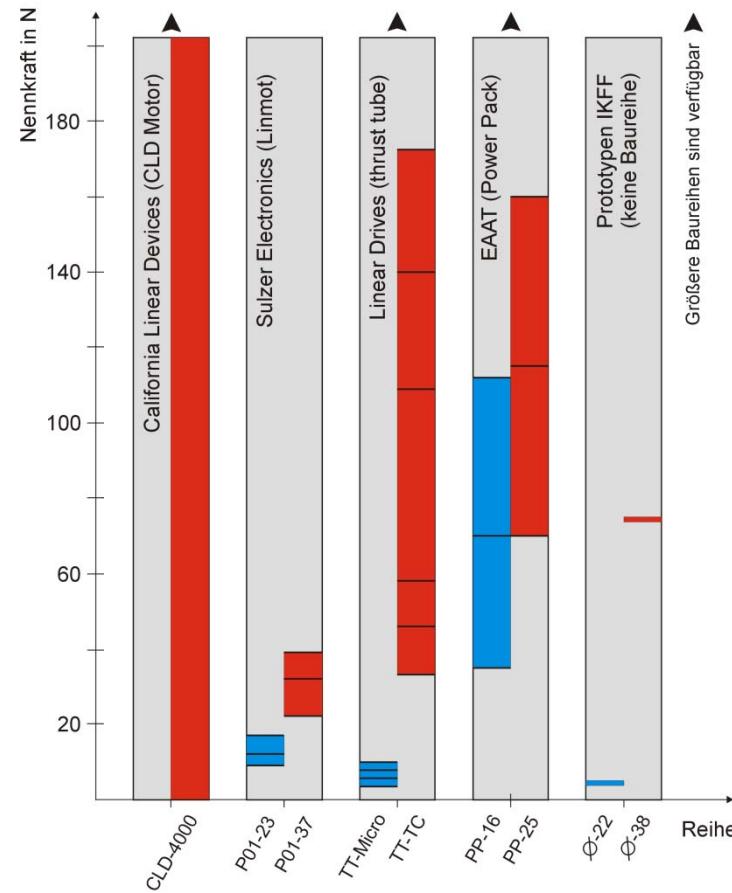


Magnetsystem innen

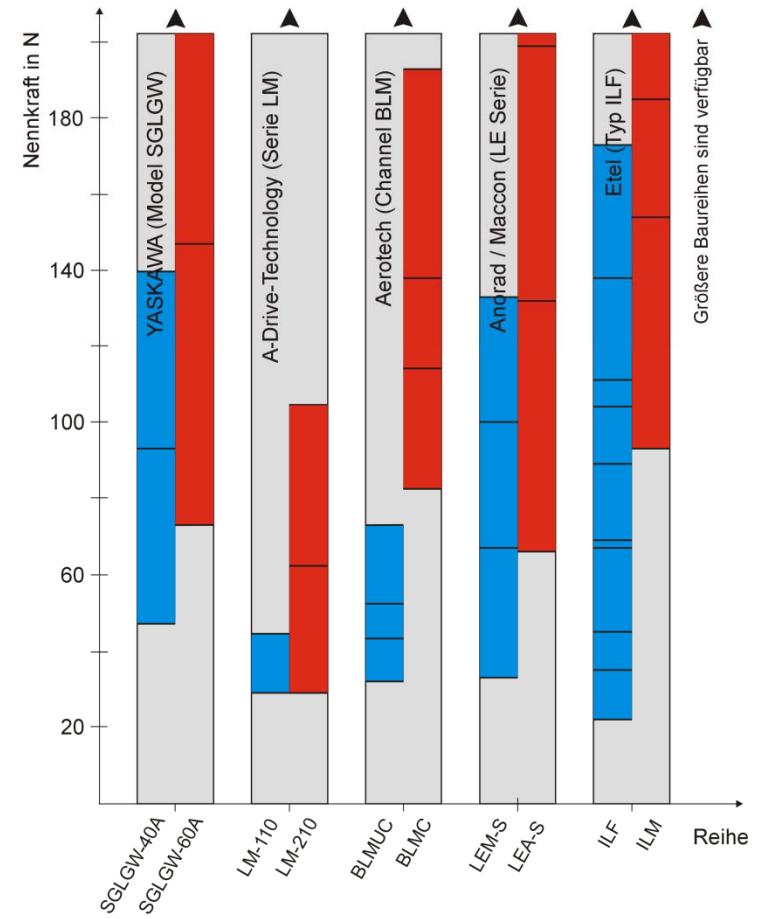
Motoranalyse (kommerzielle Systeme)



Zylinderbauform (Hub ... 200 mm)



Flachspulmotor (eisenlos, symmetrisch (Hub ... 200 mm))



Typische Kenngrößen der elektromagnetischen Aktoren

Baugröße: $\varnothing 10 \text{ mm} < \varnothing 30 \text{ mm} < \varnothing 100 \text{ mm}$
 $L10 \text{ mm} < L40 \text{ mm} < L70 \text{ mm}$

Leistung: $P < 10 \text{ W}$, Impulsbetrieb $< 100 \text{ W}$

Hub: $0,1 \text{ mm} < 3 \text{ mm} < 7 \text{ mm}$

Kraft: $0,5 \text{ N} < 10 \text{ N} < 300 \text{ N}$

Hubarbeit: $1 \text{ Nmm} < 20 \text{ Nmm} < 100 \text{ Nmm}$

Ströme: $0,1 \text{ A} < 1 \text{ A} < 10 \text{ A}$

Dimensionierung (typische Herstellerangaben)

Aufbau

- Typ
- Baugröße
- Läufermasse

Energieversorgung

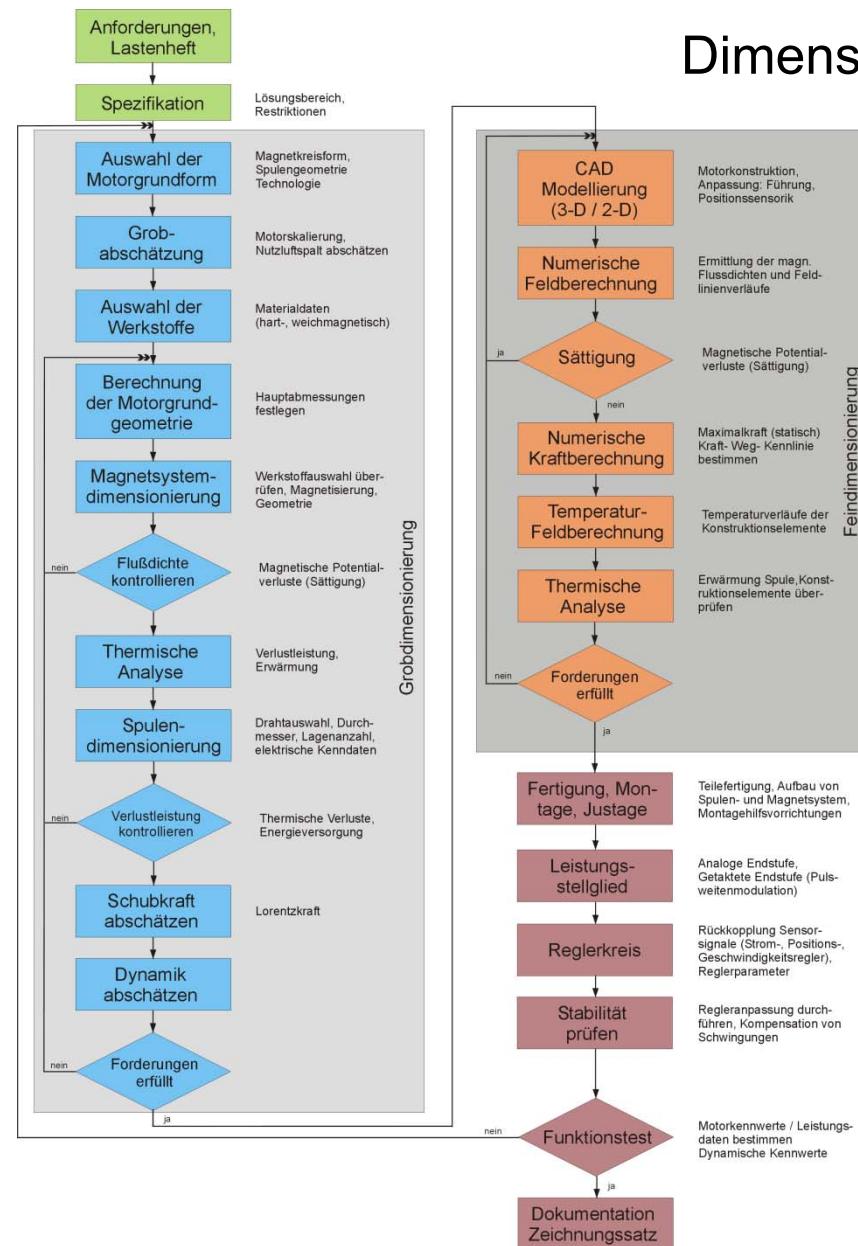
- Bestromung (Dauerstrom, maximaler Strom)
- Wicklungswiderstand, Wicklungsinduktivität
- elektrische Zeitkonstante
- Isolationsklasse
- Leistungselektronik

Schubkraft

- Nennkraft im Dauerbetrieb
- Spitzenkraft bei verminderter Einschaltverhältnis
- Kraftkonstante

Dynamik

- Geschwindigkeit
- Beschleunigung



Dimensionierung

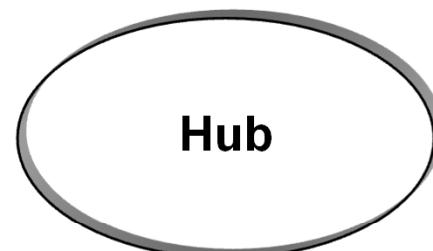
Gliederung:

1. Anforderungsliste und Spezifikationen
2. Grobdimensionierung
 - Grobabschätzung
 - Netzwerkanalyse
3. Feindimensionierung, Konstruktion
4. Fertigung, Montage, Justage
5. Ansteuerung, Leistungselektronik
6. Inbetriebnahme

Charakterisierung einer linearen Bewegung

Initialbereich

Arbeitsbereich



Vertikalhub

Horizontalhub

Gegenkraft:

- kontinuierlich
- Kraftspitzen

bewegte Masse:

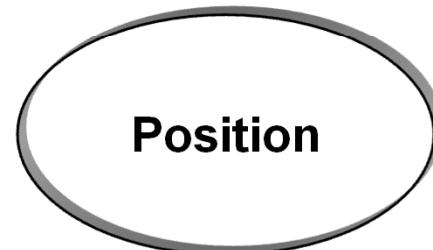
- konstant
- veränderlich



Haftreibung

Gleitreibung

Absolute Positionierbarkeit
Bahnabweichung



Wiederholgenauigkeit
- statisch / dynamisch

Beschleunigungen



Wiederholfrequenzen

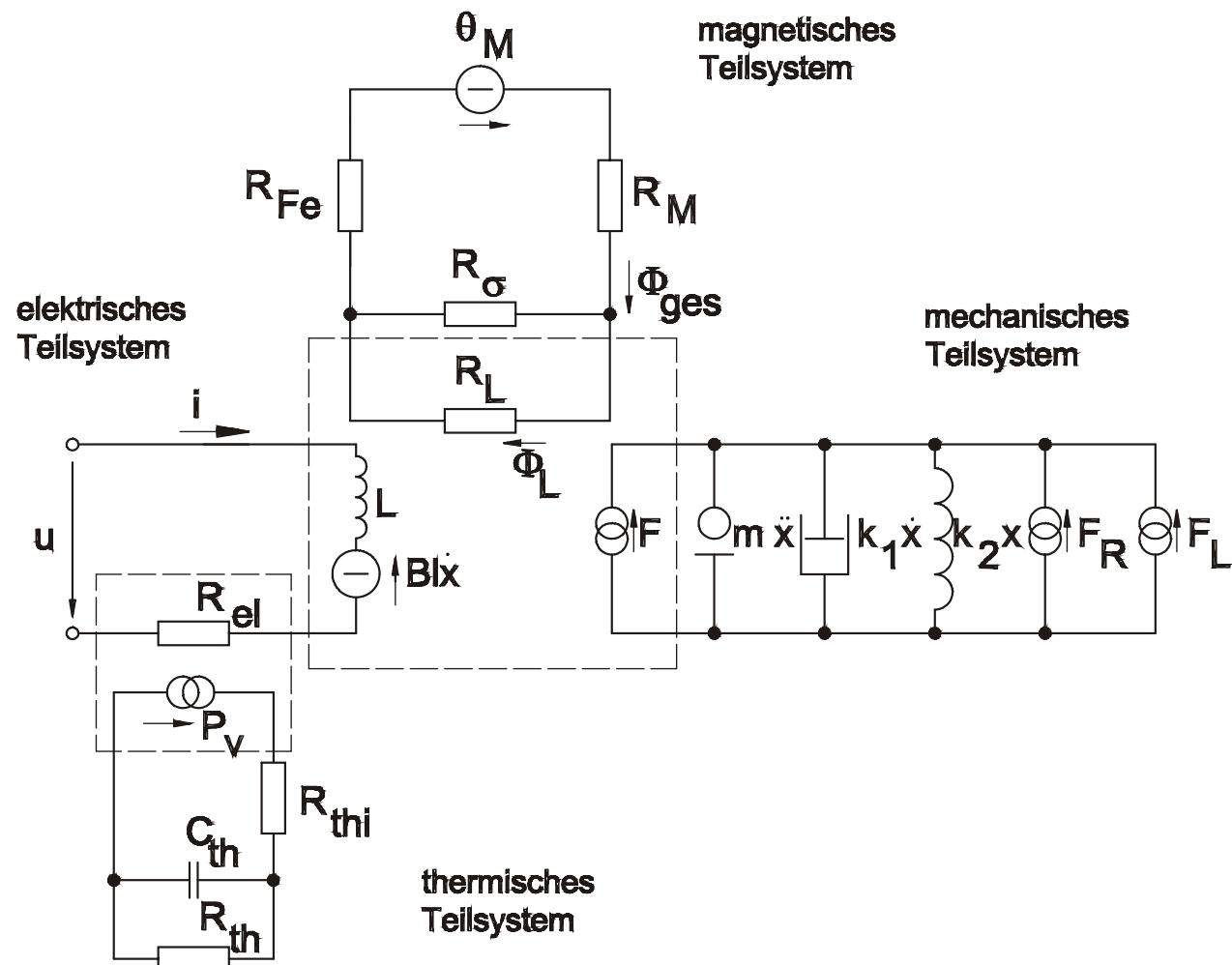
Geschwindigkeiten

Reaktionszeiten

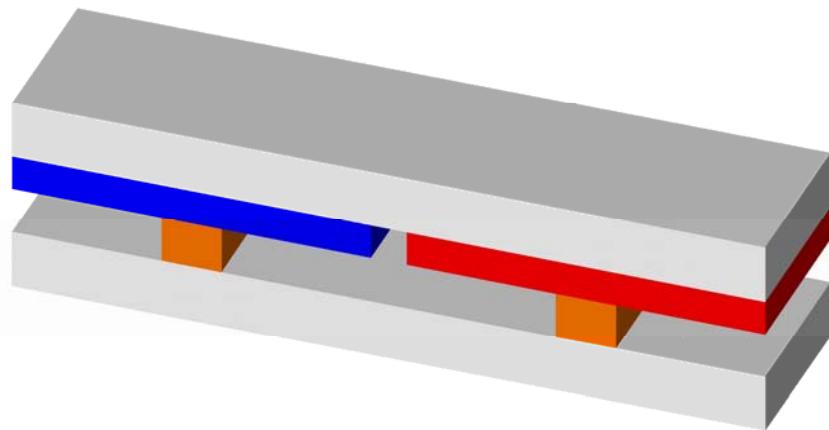
Dimensionierung



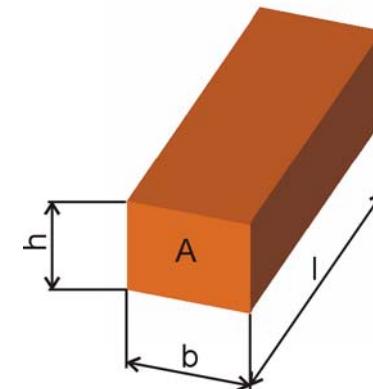
Dimensionierung (Teilsysteme)



Grobdimensionierung (Grobabschätzung)



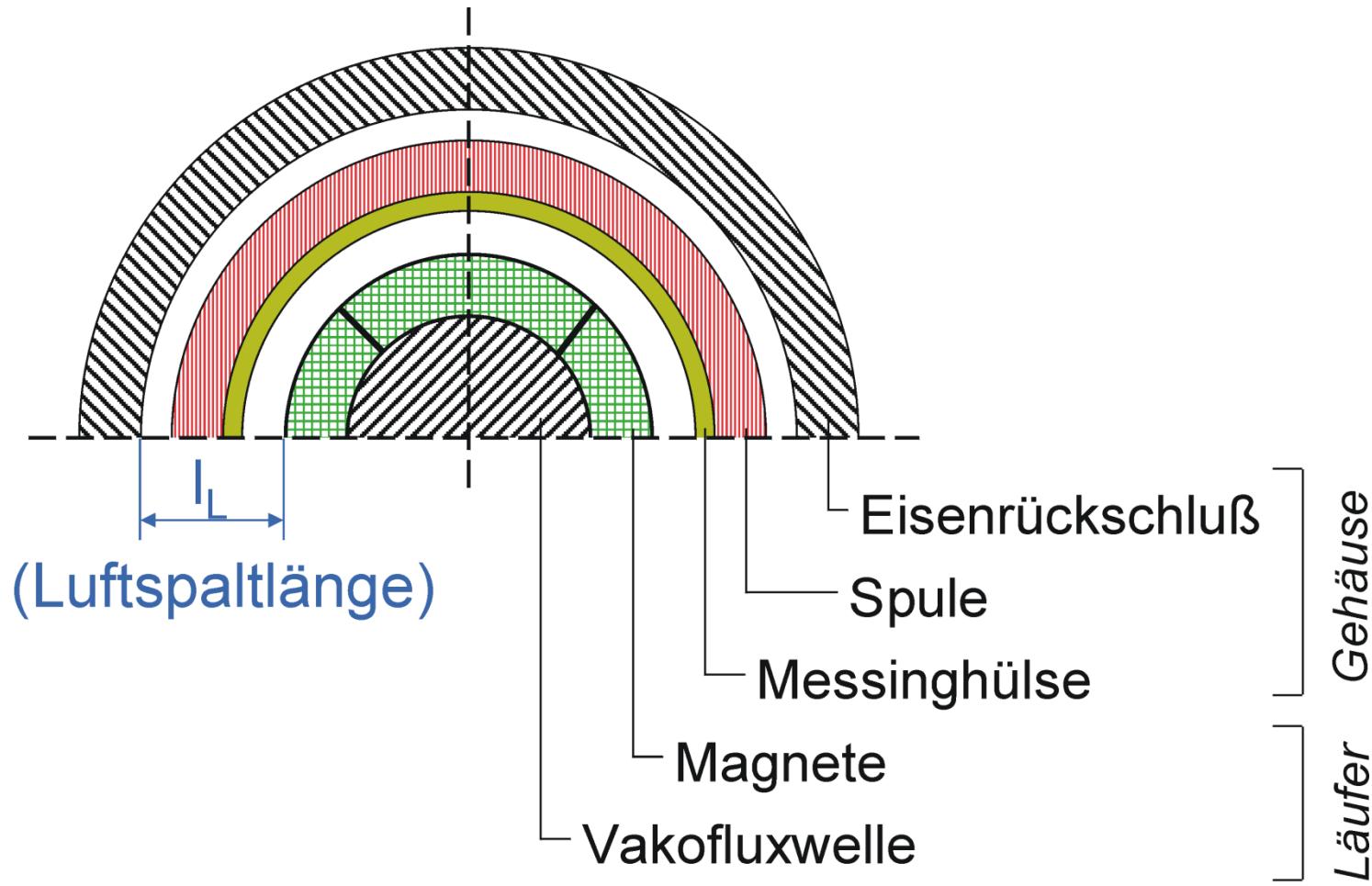
a.) in gegebenen Bauraum skalierter Aktor



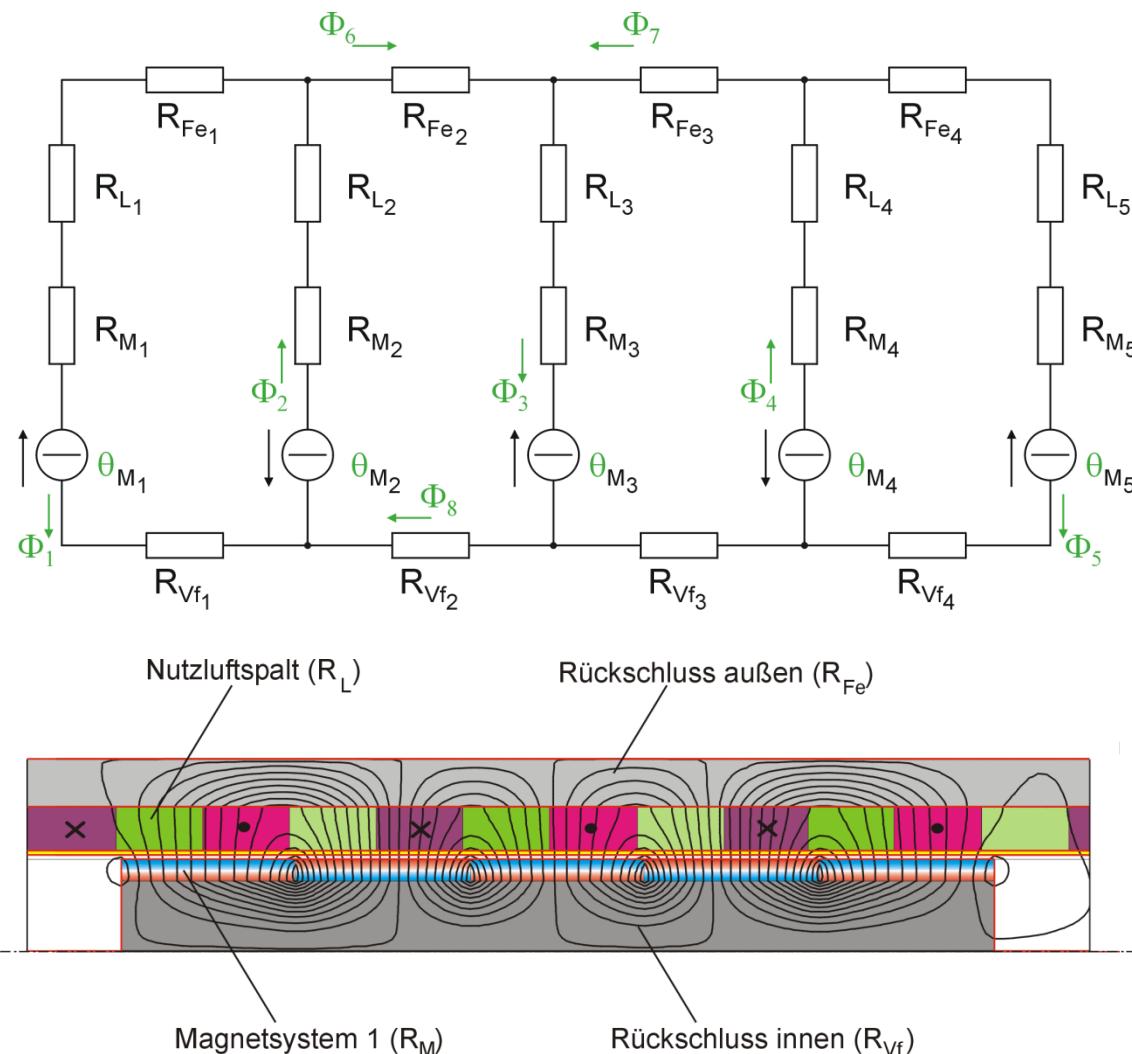
b.) abgeschätzter Luftspaltquerschnitt
im Spulenfenster

c.) Berechnung: Lorentzkraft / Zugkraftformel / Elektrische Verlustleistung

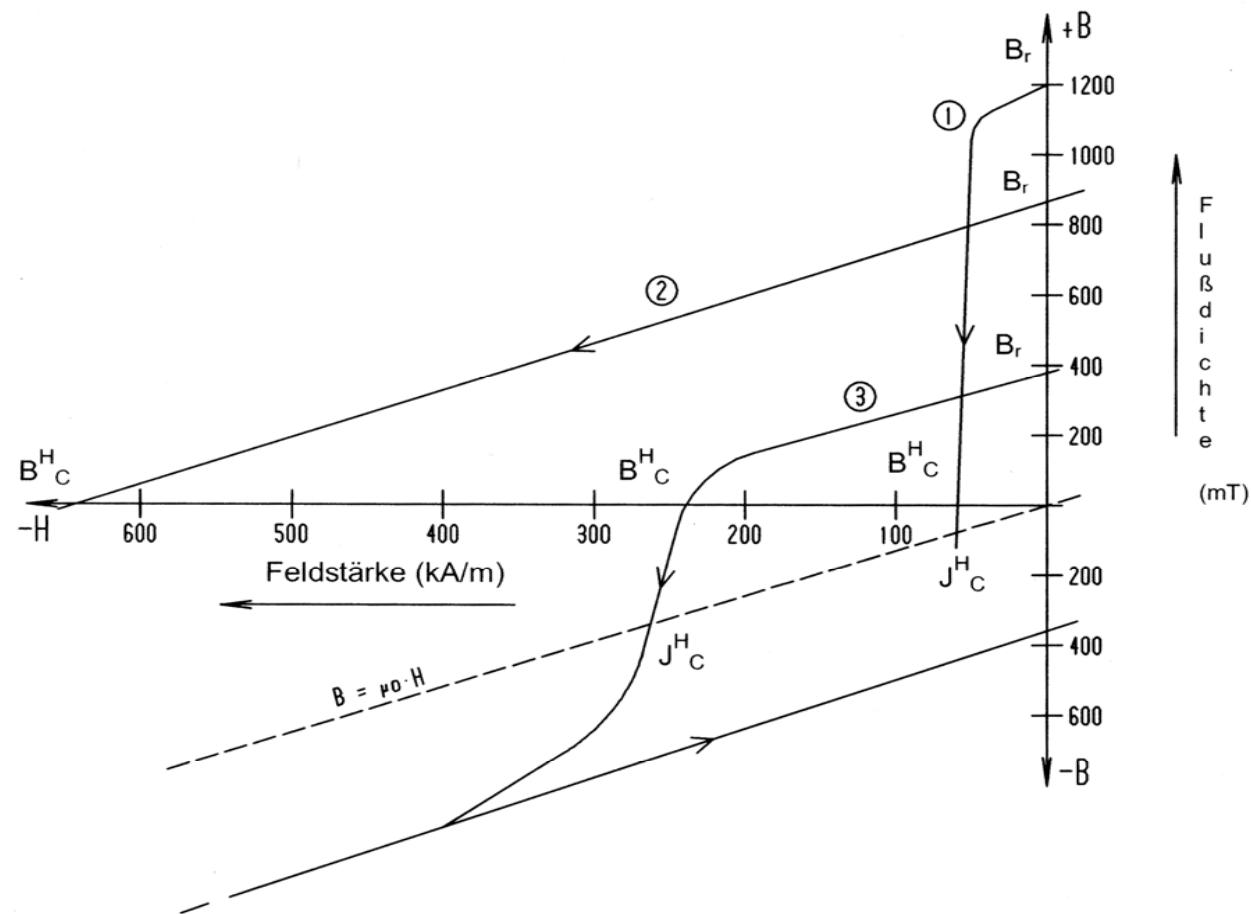
Motorgrobdimensionierung (magnetisches Teilsystem)



Grobdimensionierung (magnetisches Teilsystem)



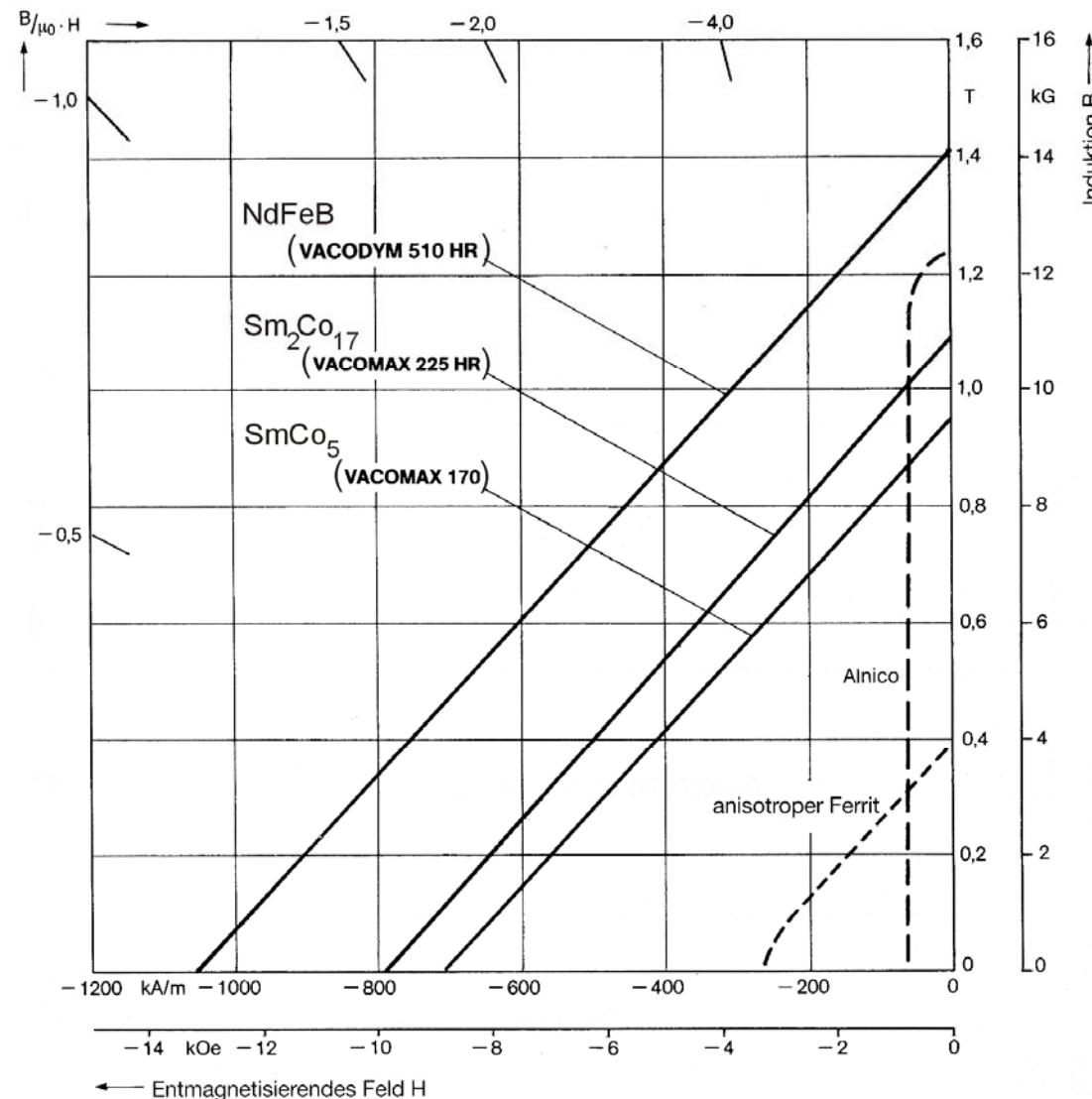
Entmagnetisierungskennlinien



Werkstoffgruppe:
1 AlNiCo
2 Seltene Erden
3 Ferrite

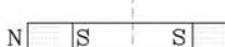
[Quelle: Magnet-Physik]

Dimensionierung (hartmagnetische Werkstoffe)

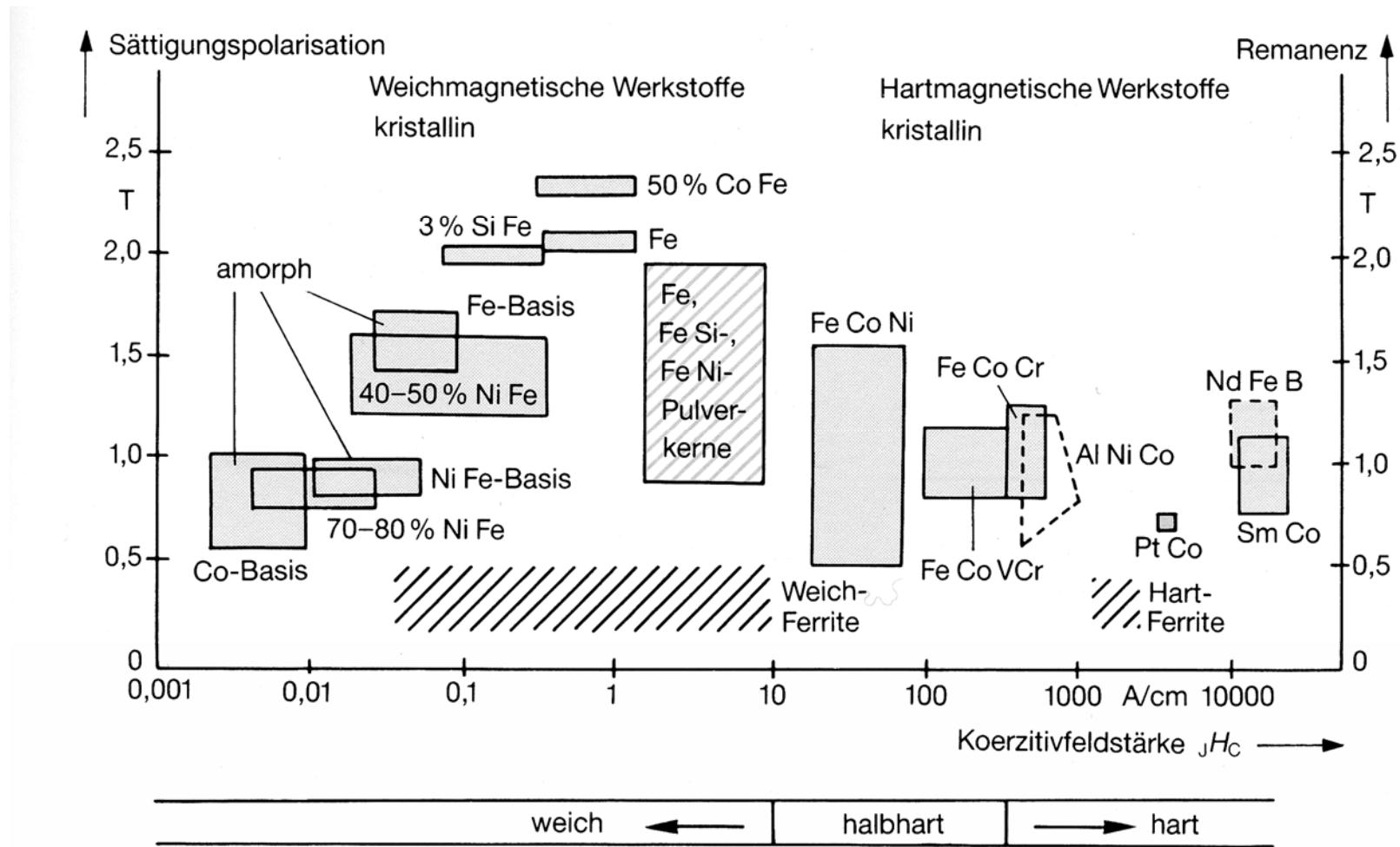


[Quelle 30: VAC]

Dimensionierung (hartmagnetische Werkstoffe)

 <p>einpolig - axial</p> <p>anisotrop, isotrop</p>	 <p>mehrpolig - beide Stirnflächen</p> <p>anisotrop, isotrop</p>	 <p>mehrpolig - Außenumfang</p> <p>isotrop, polorientiert</p>
 <p>einpolig - diametral</p> <p>isotrop</p>	 <p>mehrpolig - eine Stirnfläche</p> <p>anisotrop, isotrop</p>	 <p>mehrpolig - Innenumfang</p> <p>isotrop, polorientiert</p>
 <p>einpolig - radial</p> <p>isotrop</p>	<p>Isotrope Werkstoffe: keine Vorzugsrichtung - alle Magnetisierungsarten sind möglich, aber geringere magnetische Kennwerte</p> <p>Anisotrope Werkstoffe: Vorzugsrichtung durch den Magnetherstellungsprozeß, höhere magnetische Kennwerte</p>	

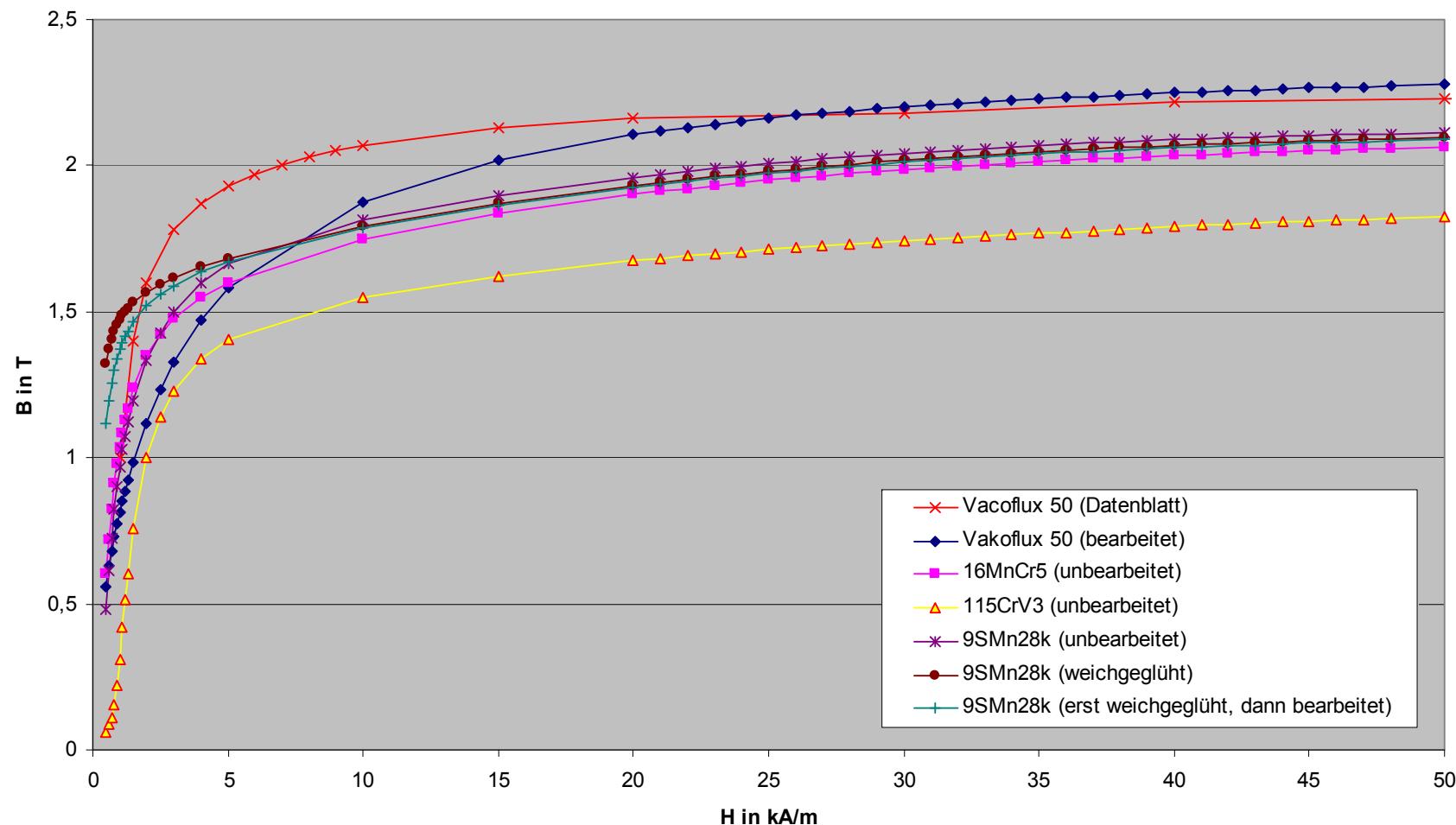
Werkstoffe - Übersicht



[Quelle: VAC]

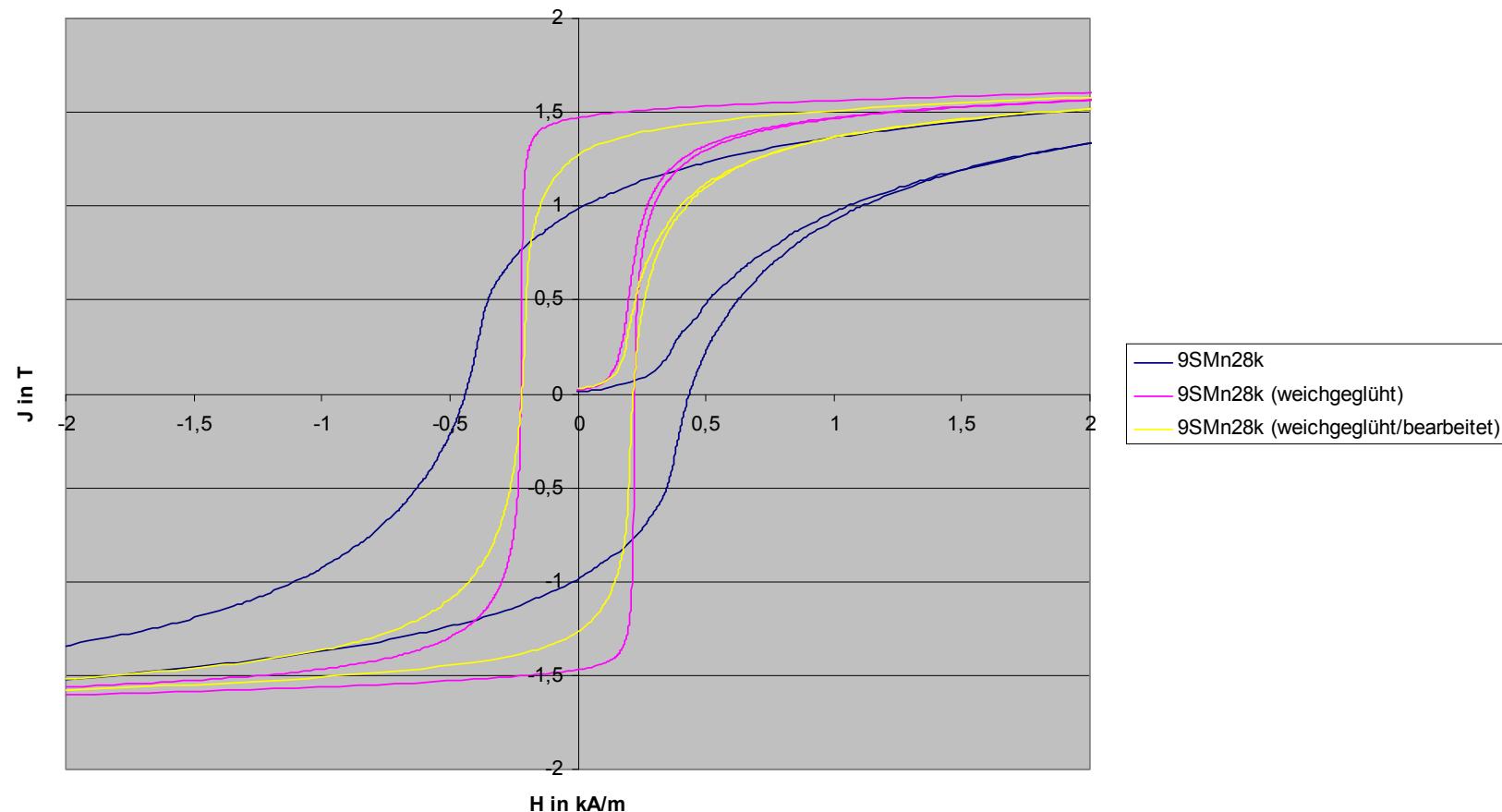
Dimensionierung (weichmagnetische Werkstoffe)

B-H-Diagramm weichmagnetischer Werkstoffe



Dimensionierung (weichmagnetische Werkstoffe)

Hysteresediagramme



Dimensionierung (magnetisches Teilsystem)

Durchflutungsgesetz (allgemein):

$$\Theta = \oint_S \vec{H} d\vec{s} = \int_A \vec{S} d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_A \vec{D} d\vec{A}$$

Durchflutungsgesetz
(stationäre und quasistationäre
Magnetfelder):

$$\Theta = \oint_S \vec{H} d\vec{s} = \oint_A \vec{S} d\vec{A} = \sum I_v$$

Unterteilung des Umlaufintegrals
in Wegelemente Δs
konstanter Feldstärke:

$$\oint_S \vec{H} d\vec{s} = \sum H_i \Delta s_i = \sum V_i = \Theta$$

Dimensionierung (magnetisches Teilsystem)

Magnetisches ohmsches Gesetz:

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi}$$

Magnetische Spannung:

$$\Theta = i \cdot w = \sum H_e l_e = \sum V_i$$

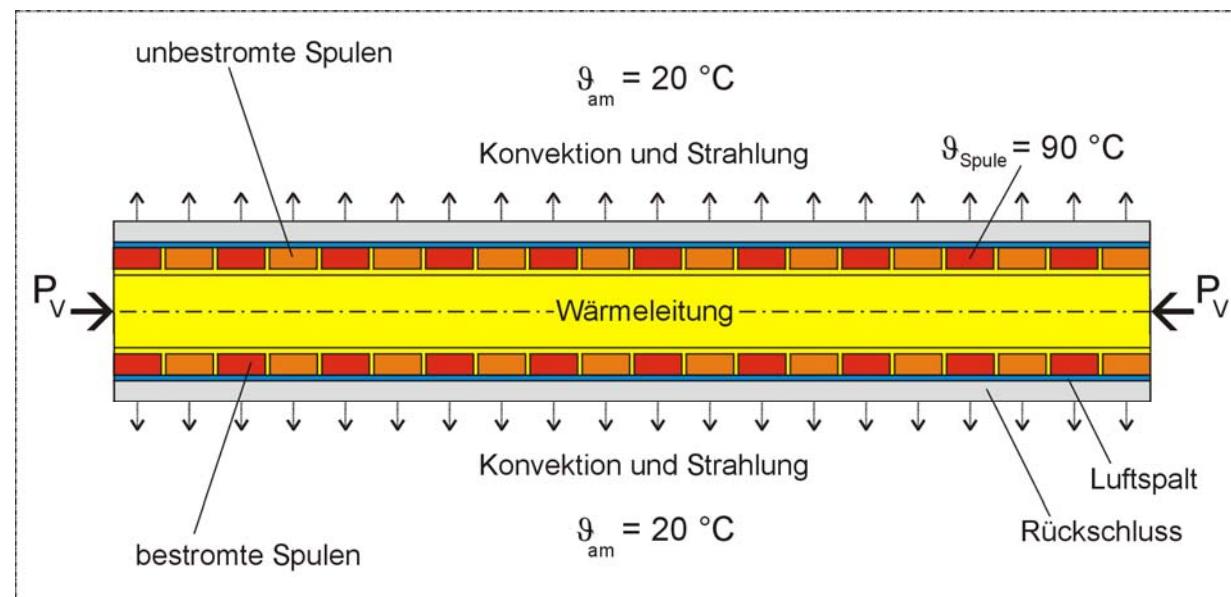
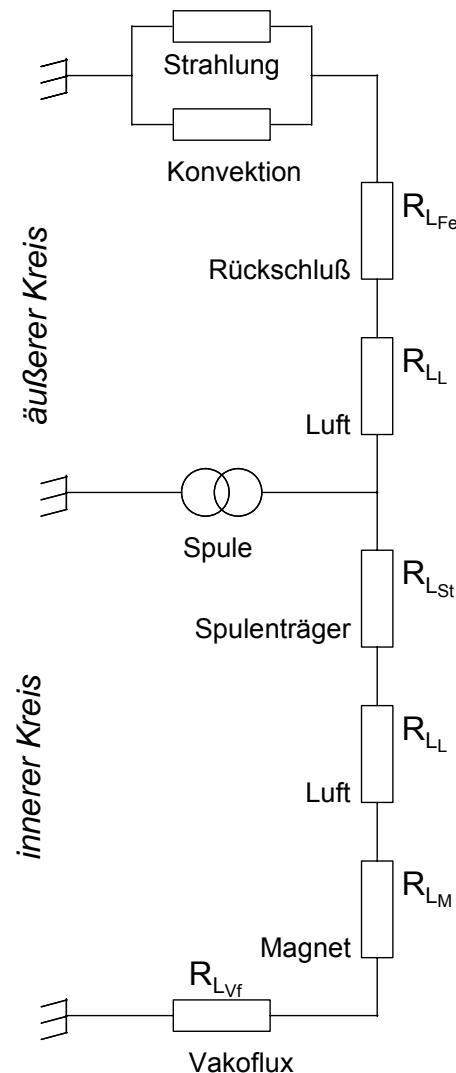
Magnetischer Fluss:

$$\Phi = B \cdot A$$

Magnetischer Widerstand:

$$R_m = \frac{1}{\mu \cdot A} \quad \text{mit} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Dimensionierung (thermisches Teilsystem)



Wärmeübertragungsmechanismen:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung

Grobdimensionierung (thermisches Teilsystem)

Wärmeleitung (ebene Wand):	$\Phi_L = \frac{\Delta \vartheta_{12}}{R_L} = \varphi \cdot A = \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta \vartheta_{12} \cdot A$ <p>mit $R_L = \frac{s}{\lambda \cdot A}$</p>
Konvektion:	$\Phi_K = \alpha_K \cdot A_1 \cdot \Delta \vartheta_{12}$ <p>mit $R_K = \frac{1}{\alpha_K \cdot A_1}$</p>
Strahlung:	$\Phi_s = \varepsilon \cdot c_s \cdot A \cdot f_{12} \cdot \Delta \vartheta_{12}$ <p>mit $f_{12} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta \vartheta_{12}}$; $R_s = \frac{1}{\varepsilon \cdot c_s \cdot f_{12} \cdot A}$</p>

Grobdimensionierung (thermisches Teilsystem)

Leistungsüberhöhung im Kurzzeitbetrieb S 2:

$$k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ein}}}{\tau}}}$$

mit $P_{\text{kurz}} = P_{\text{Dauer}} \cdot k$, $I_{\text{kurz}} = I_{\text{Dauer}} \cdot \sqrt{k}$

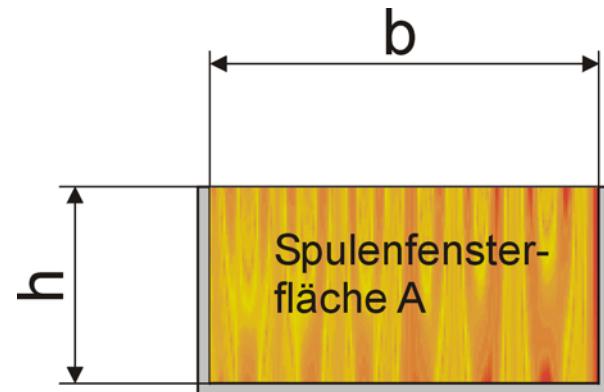
Leistungsüberhöhung im periodischen Aussetzbetrieb S 3:

$$k = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ein}}}{\tau}}}$$

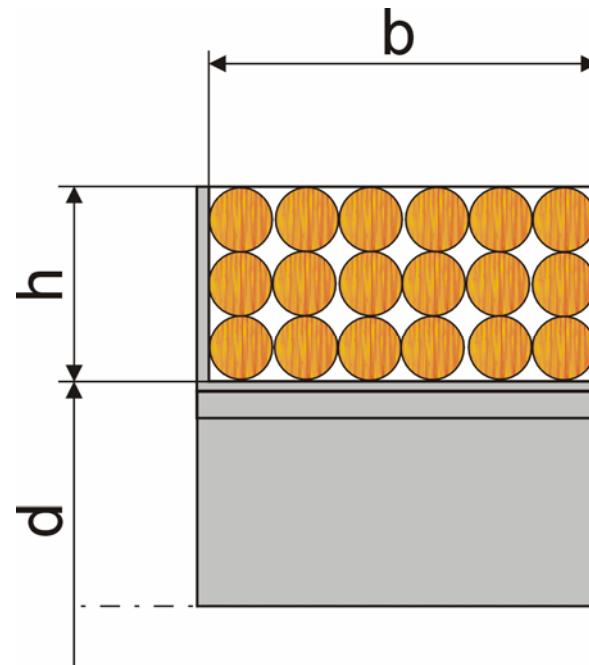
mit $P_{\text{kurz}} = P_{\text{Dauer}} \cdot k$, $I_{\text{kurz}} = I_{\text{Dauer}} \cdot \sqrt{k}$

[Quelle 87: Der Gleichstrommagnet]

Grobdimensionierung (elektrisches Teilsystem)



a.) Grobabschätzung



b.) Spulenfenster mit Reihenwicklung

Ablauf:

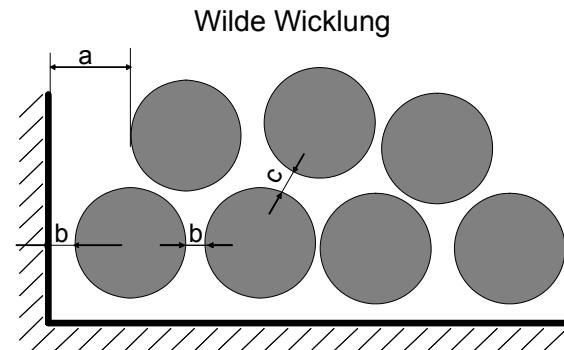
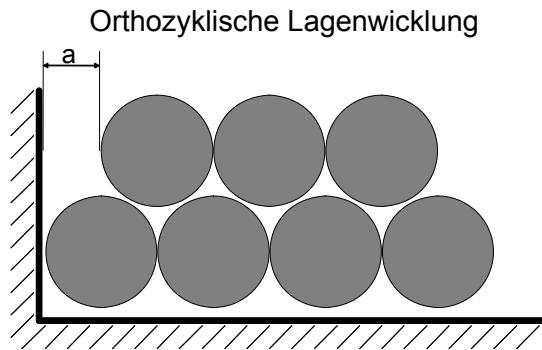
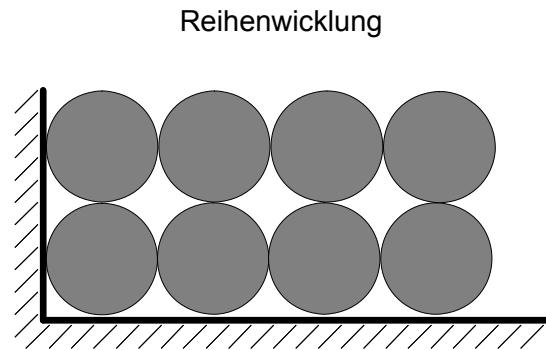
- Übernahme der abführbaren Verlustleistung aus dem thermischen Teilsystem
- Auswahl des Drahtdurchmessers
- Berechnung des ohmschen Widerstandes bei max. Spulentemperatur
- Ermittlung des maximalen Stromes und der erforderlichen Spannung

Grobdimensionierung (elektrisches Teilsystem)

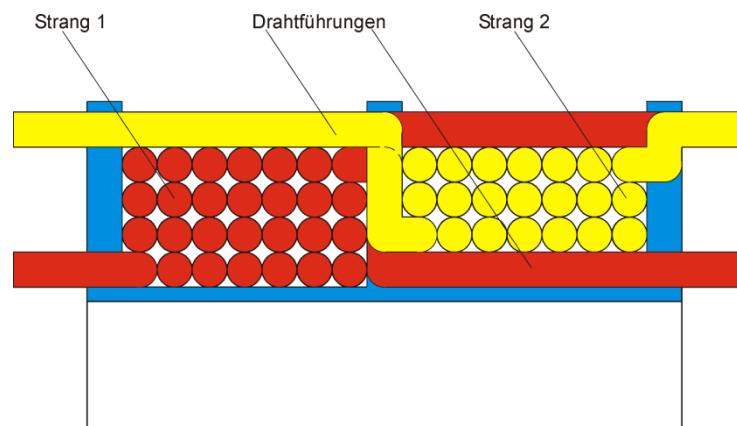
Drahtfläche	$A_{Draht} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{draht}^2$
Wickelfenster	$A = b \cdot h$
Windungszahl (theoretisch)	$W = \frac{A}{A_{Draht}}$
Windungszahl (reduziert)	$W_{red} = f \cdot W$
Mittlerer Durchmesser	$D_m = d + h$
Drahtlänge (rot. symm.)	$L = \pi \cdot D_m \cdot W_{red}$
Widerstand (20 °C)	$R = \rho \cdot \frac{L}{A_{Draht}}, \rho_{(20\text{ °C})} = 0,01724 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$
Widerstand (max. Temperatur)	$R_{max} = R + [R \cdot \alpha \cdot (T_{max} - T_{amb})], \alpha_{Cu} = 0,00391/\text{K}$
Motorstrom	$I_{max} = \sqrt{\frac{P_{el}}{R_{max}}}$
Motorspannung	$U_{erf} = R_{max} \cdot I_{max}$

Dimensionierung (Füllfaktoren)

Wicklungsformen:

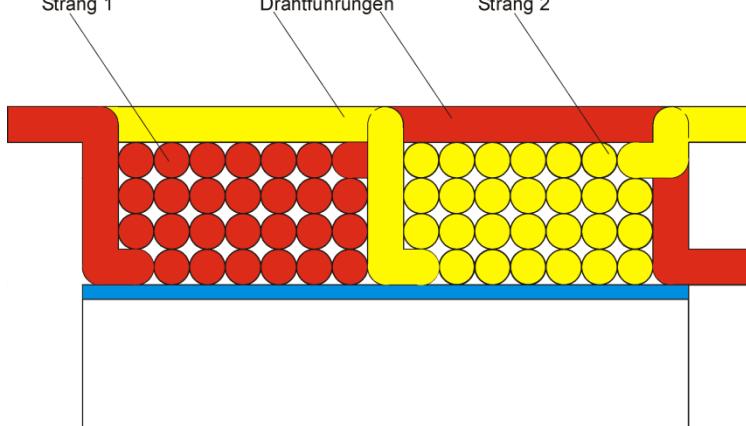


Drahtüberleitung:



a.) Wickelhülse in Kammerbauform

2014, Dr. Bernd Gundelsweiler

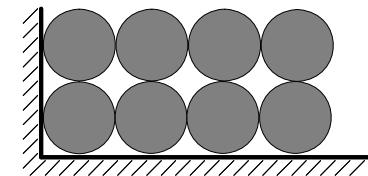


b.) Glatte Wickelhülse

Reihenwicklung

Dimensionierung (Füllfaktoren)

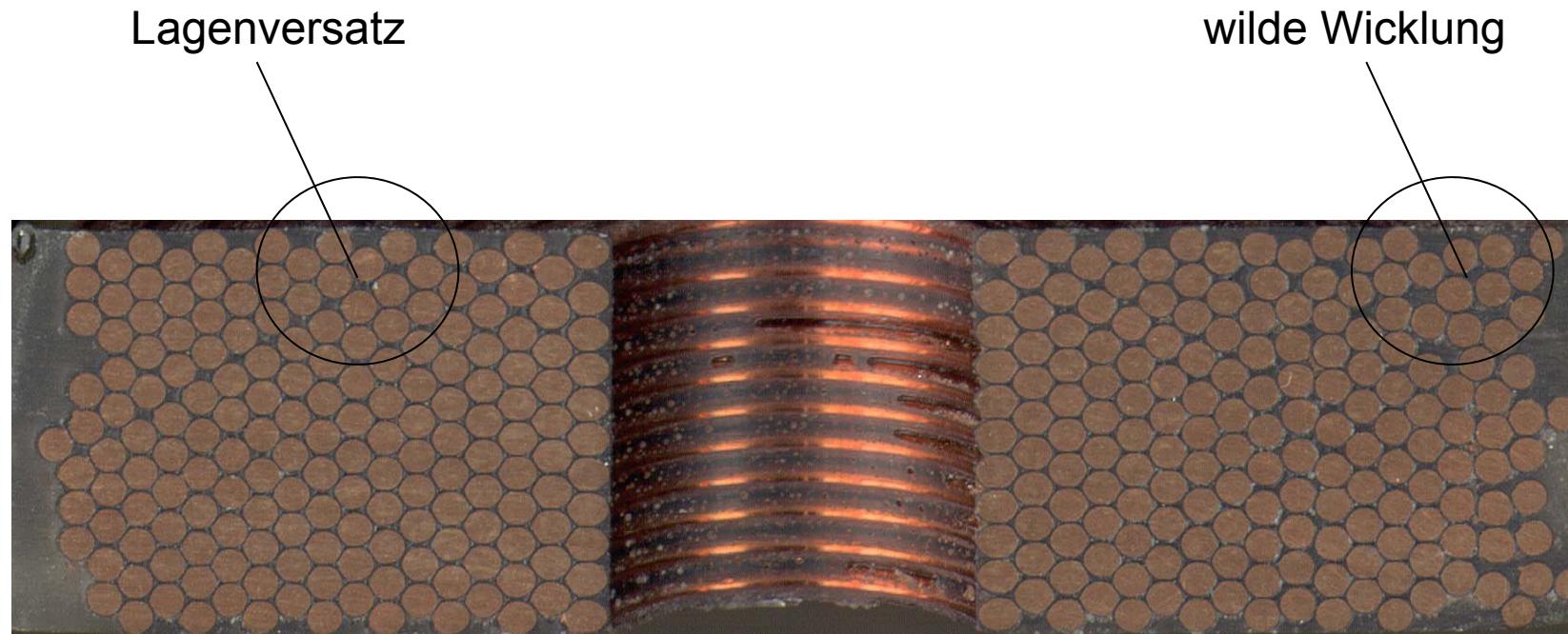
Der Füllfaktor ist unabhängig vom Drahtdurchmesser ($\pi/4$):



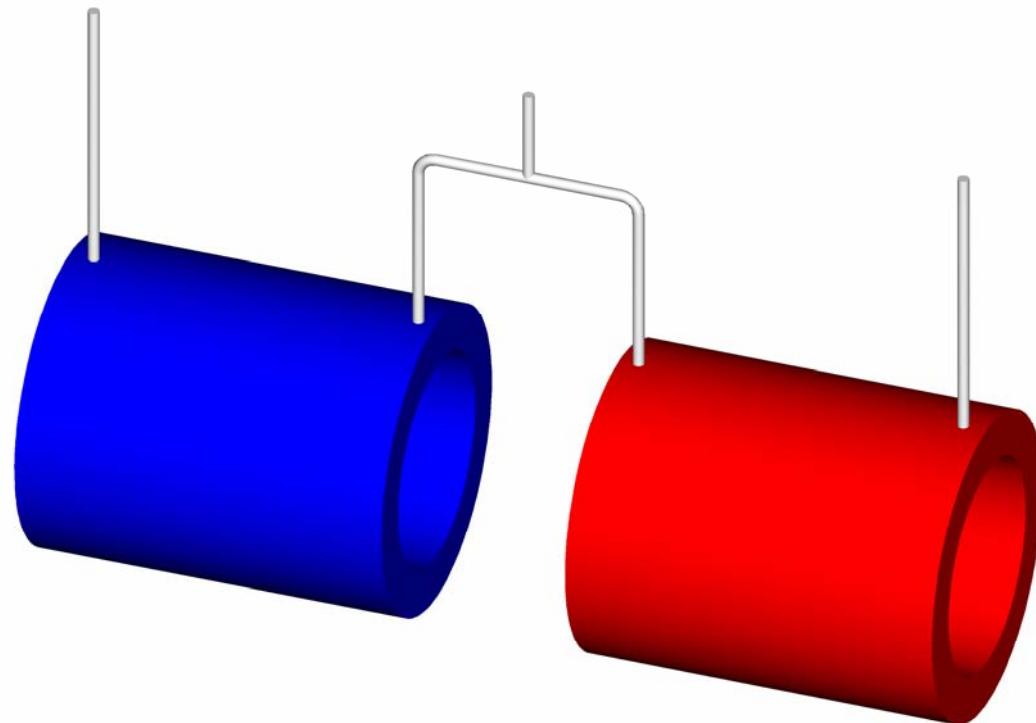
$n_x = \frac{b}{d_{draht}}$	Anzahl der Windungen pro Lage
$n_y = \frac{h}{d_{draht}}$	Anzahl der Wicklungslagen
$n_{gesamt} = n_x \cdot n_y = \frac{b \cdot h}{d_{draht}^2}$	Gesamtanzahl der Windungen
$A_{Qn} = n_{gesamt} \cdot A_Q = \frac{b \cdot h}{d_{draht}^2} \cdot \frac{\pi \cdot d_{draht}^2}{4} = \frac{b \cdot h \cdot \pi}{4}$	Gesamtfläche der Windungen
$A_{SF} = b \cdot h$	Fläche des Wickelfensters
$f = \frac{A_{Qn}}{A_{SF}} = \frac{\frac{b \cdot h \cdot \pi}{4}}{b \cdot h} = \frac{\pi}{4} \neq f(d)$	Füllfaktor

Dimensionierung (Wickelfehler)

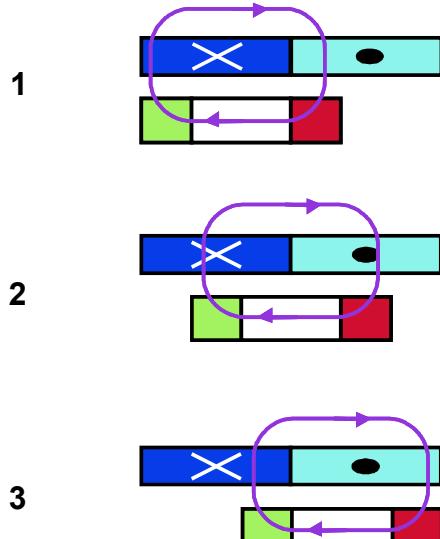
Wickelfehler an einer orthozyklischen Lagenwicklung:



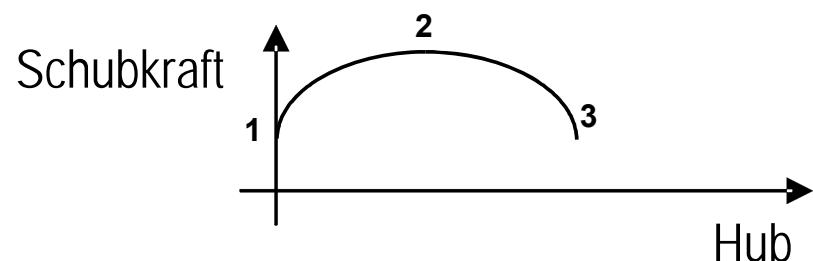
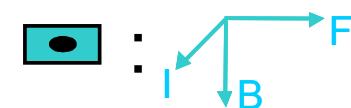
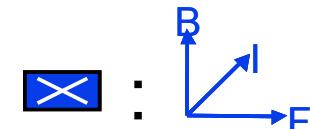
Dimensionierung (Spulensystem einsträngig)



Dimensionierung (Spulensystem einsträngig)

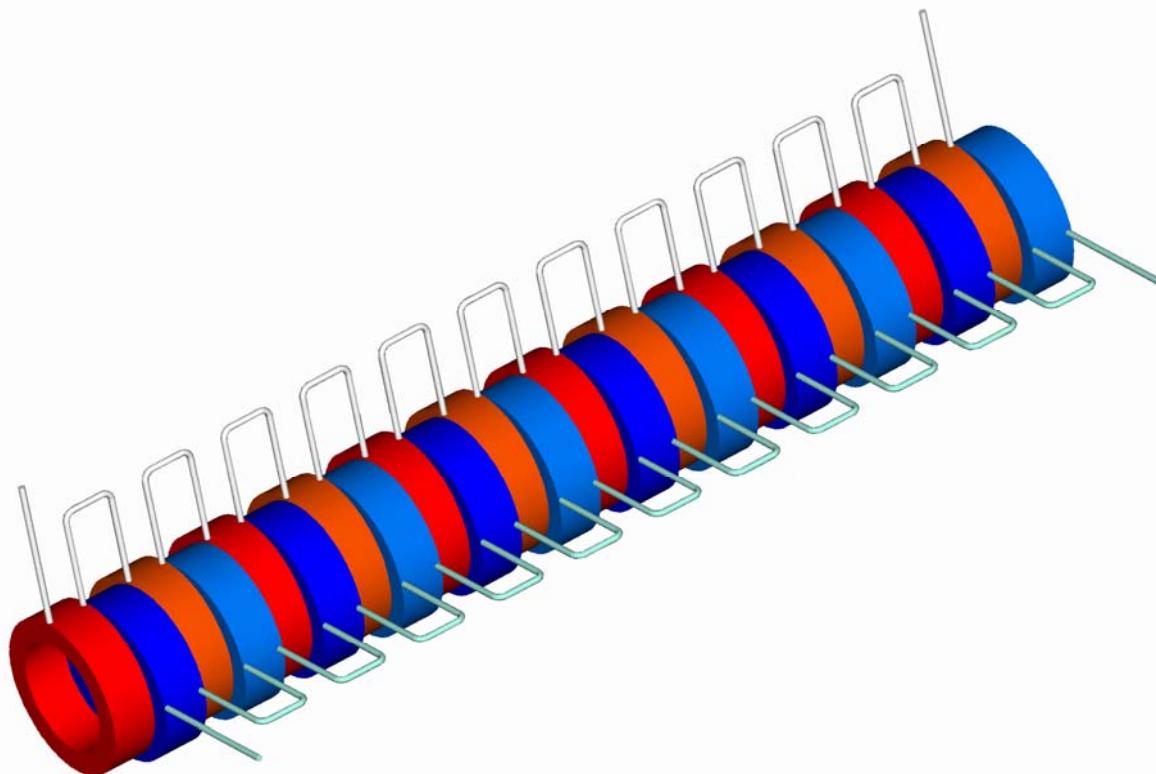


Spulenstromrichtung

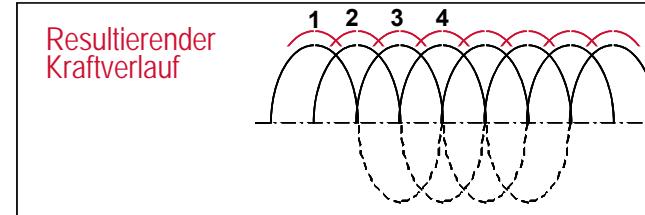
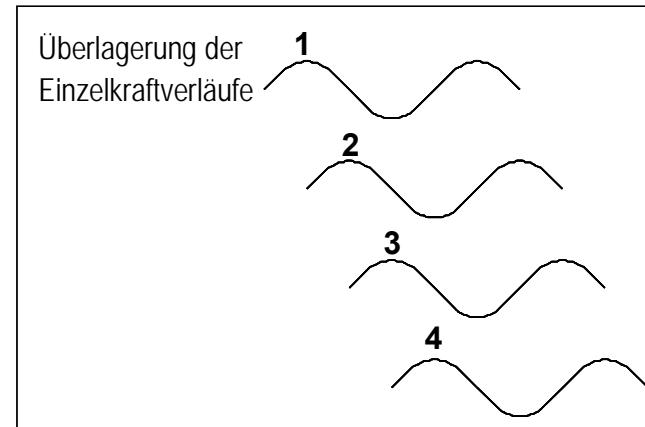
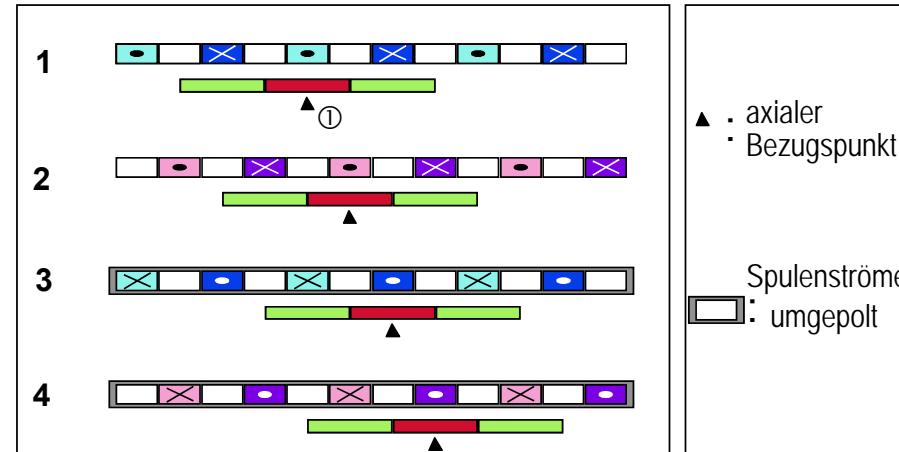


Flussführungsteile
wurden zur
besseren Übersicht
weggelassen

Motordimensionierung (Spulensystem zweisträngig)



Motordimensionierung (Spulensystem zweisträngig)

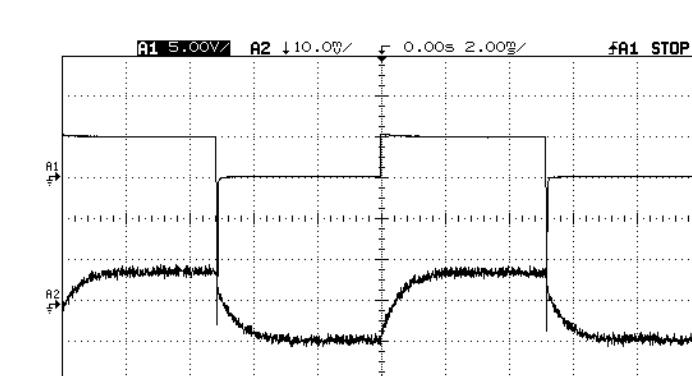


▲ . axialer
· Bezugspunkt

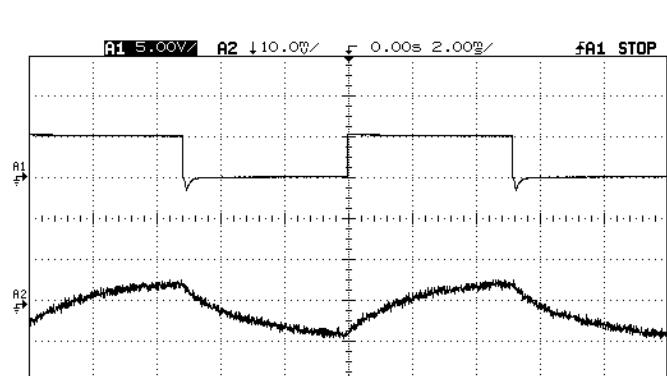
Spulenströme
■: umgepolt

Flußführungsteile
wurden zur
besseren Übersicht
wegelassen

Dimensionierung (elektrische Zeitkonstanten)



Luftspule



Stahlkern

Elektrische Zeitkonstante: $\tau_{el} = \frac{L}{R}$

Einflussfaktoren:

- Eisen im Kreis
- Kurzschlusshülse
- Übererregung (Vorwiderstand)

Dimensionierung (elektrische Zeitkonstanten)

Ohmsche Widerstand	$R = w \cdot \rho \cdot \frac{1}{A} = w \cdot \rho \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot d_{draht}^2}$
Induktivität	$L = w^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{\delta} = w^2 \cdot G_m = w^2 \cdot \frac{1}{R_m}$
Elektrische Zeitkonstante	$\begin{aligned} \tau_{el} &= \frac{L}{R} = \frac{w^2 \cdot G_m}{w \cdot \rho \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot d_{draht}^2}} = w \cdot d_{draht}^2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G_m}{\rho \cdot 1} \\ &= n_y \cdot d \cdot n_x \cdot d \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G_m}{\rho \cdot 1} = h \cdot b \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G_m}{\rho \cdot 1} \end{aligned}$

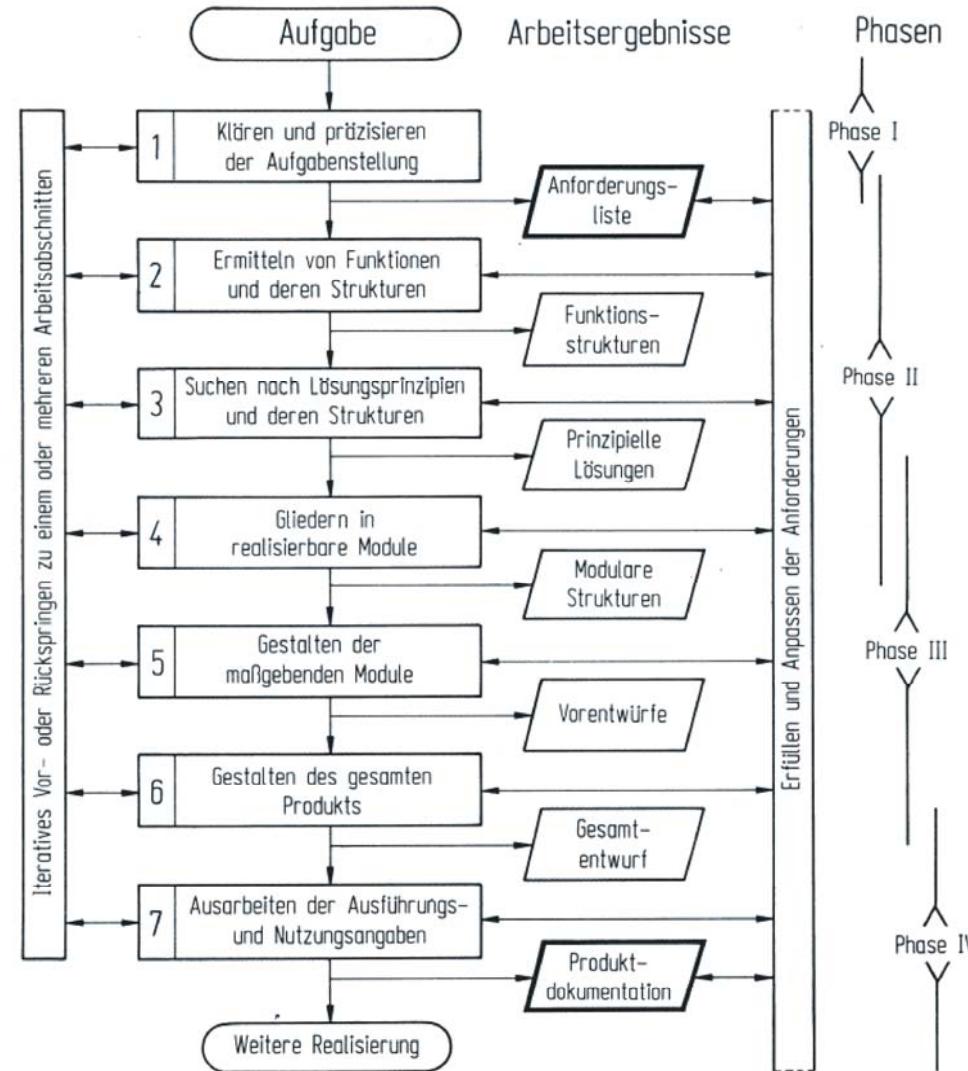
→ Die elektrische Zeitkonstante ist unabhängig vom Drahtdurchmesser.

Dimensionierung (Leistungsstellglied)

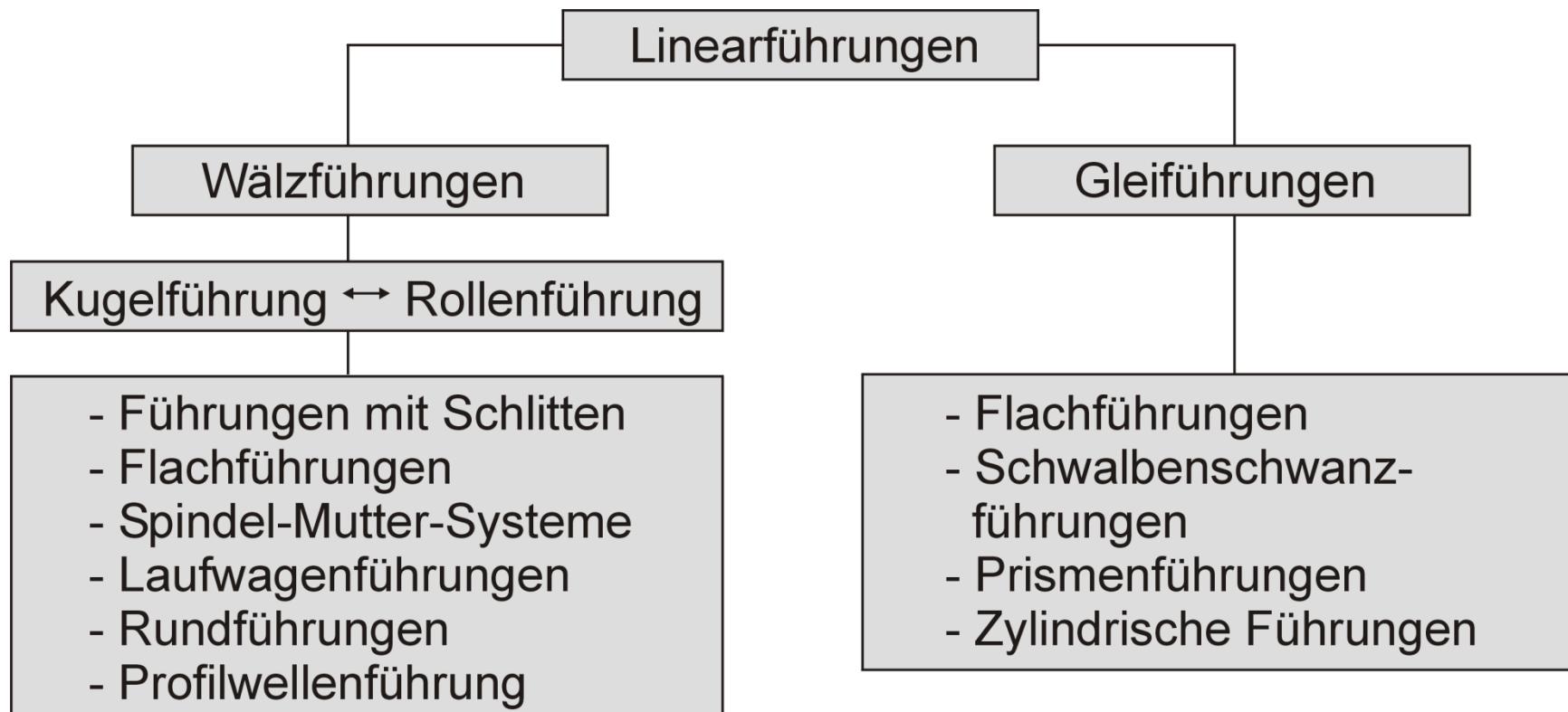
Anforderungen:

- Stufenloser Stellbereich der Ausgangsgrößen (Spannung, Strom)
- Kompensation der Motorrückwirkungen (Gegen-EMK, Induktionsspitzen)
- Erbringung des erforderlichen Motornennstromes
- Möglichst geringe Signalverzögerung
- Schnelle Stromrichtungsumkehr
- Hoher Wirkungsgrad
- Schutzeinrichtungen gegen Überstrom

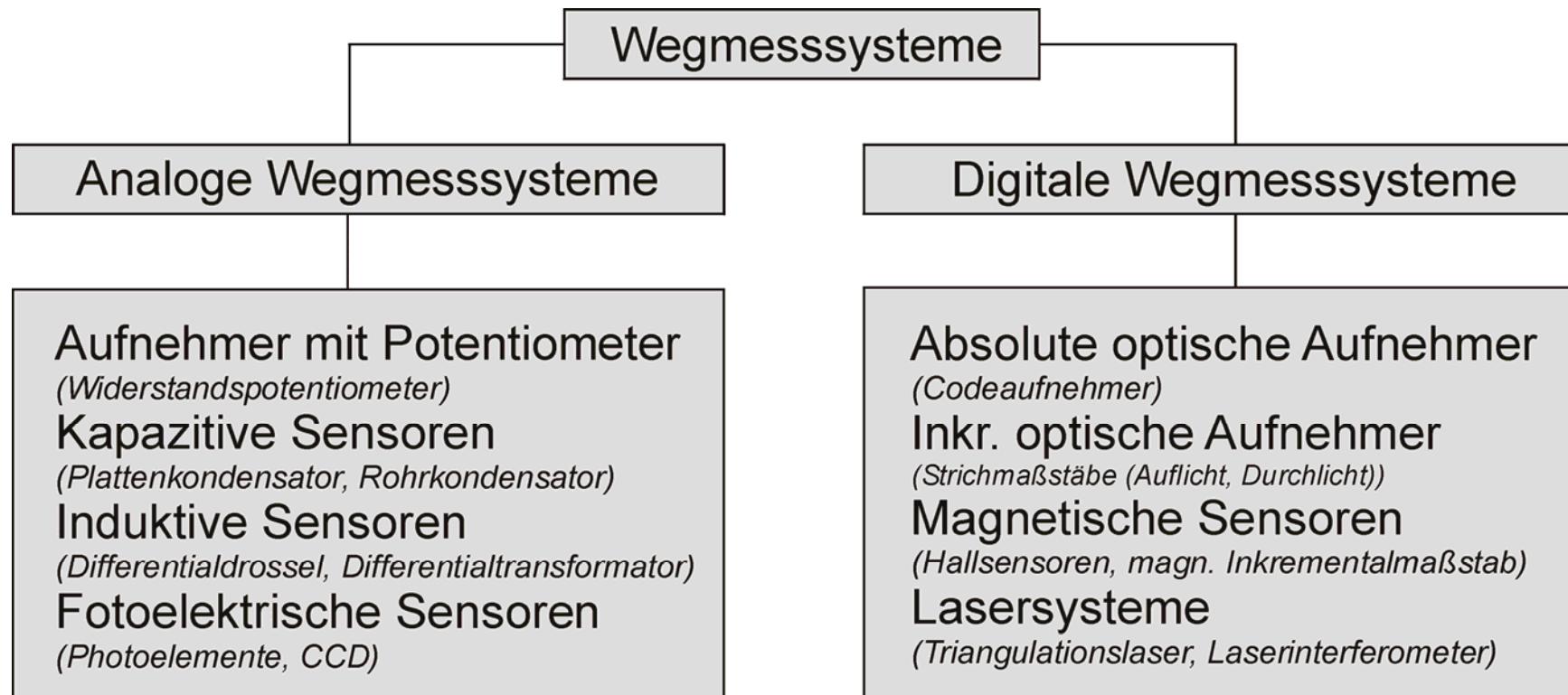
Dimensionierung (Konstruktionsablauf)



Dimensionierung (Führungssysteme)



Dimensionierung (Wegmesssysteme)



Feindimensionierung (Optimierung)

Material		Querschnitt	Geometrie / Verteilung	Wärmeabfuhr
hartmagnetisch	weichmagnetisch	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionierung des Flussweges [innere + äußere Rückschluss] Dimensionierung des Wickelfensters (inkl. Spulenteilung) Wickeldorn bzw. Wickelhülse (Wickeltechnik) Querschnitts- und Längenvariationen Sonderwerkstoffe durch größere Querschnitte möglichst vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> Flussführungsgeometrie gezielt einstellen (Fluss einschnüren bzw. aufweiten, um definierte Querschnittsbelastungen einzustellen) Flussformung (Homogenität im Nutzluftspalt, Reduzierung von Streufeldern) 	<ul style="list-style-type: none"> Große Oberflächen Hoher Temperaturgradient Hohe Wärmeleitfähigkeit (Luftspalte im Motorinneren minimieren) Konvektion (Kühlkörper, Zwangskühlung) Wärmestrahlung (Emissionsfaktor durch schwarze matte Oberflächen erhöhen) Grenztemperaturen kontrollieren
<ul style="list-style-type: none"> → Werkstoffauswahl → Einsatztemperatur → Energieprodukt → Magnetgeometrie → Magnetisierung → Befestigung → Montage → Korrosionsschutz → Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> → Werkstoffauswahl → Sättigungsinduktion → Hysterese → Bearbeitbarkeit → Glühbehandlung → Festigkeit → Korrosionsschutz → Kosten 			

Optimierungsziel: Maximale Schubkraft bei kleinster Verlustleistung!

Feindimensionierung (magnetisch)

Magnetische Optimierung

- Optimierungsparameter festlegen
- Definition der Elementtypen (lineare / quadratische Ansatzfunktionen)
- Definition der verfügbaren Materialien (lineare / nichtlineare Eigenschaften)

Geometriemodellierung (Motorgeometrie / Fernfeldsimulation)

Teilsystem I: Magnetkreis

- Materialauswahl
- Magnetgeometrie und Verteilung
(Variation von Magnetlänge / Magnetdicke)
- Rückschlussgeometrie
(Variation der Querschnitte, um Sättigung zu vermeiden)

Teilsystem II: Spulensystem

- Materialauswahl
- Spulenfenstergeometrie und Wickelhülse
(Länge entsprechend Magneteilung, Höhenvariation)
- Rückschlussgeometrie
(Variation der Querschnitte, um Sättigung zu vermeiden)

→ Für das bewegte System ist eine Optimierung hinsichtlich maximaler Beschleunigung erforderlich (Masse reduzieren).

Werkstoffzuweisung / Elementtypzuweisung / Vernetzung

Einprägung der Lasten

Definition der Randbedingungen

Lösung der partiellen Differentialgleichungen (Maxwell-Gleichungen)

Auswertung der Ergebnisse

Feindimensionierung (thermisch)

Thermische Optimierung

- Geometriemodell aus Magnetfeldberechnung übernehmen
- Elementtypen umschalten (thermische Elemente)
- Materialdaten ergänzen (Dichte, elektr. Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Konvektionskoeffizient, Emissionsfaktor)

Werkstoffzuweisung / Elementtypzuweisung / Vernetzung

Einprägung der Lasten

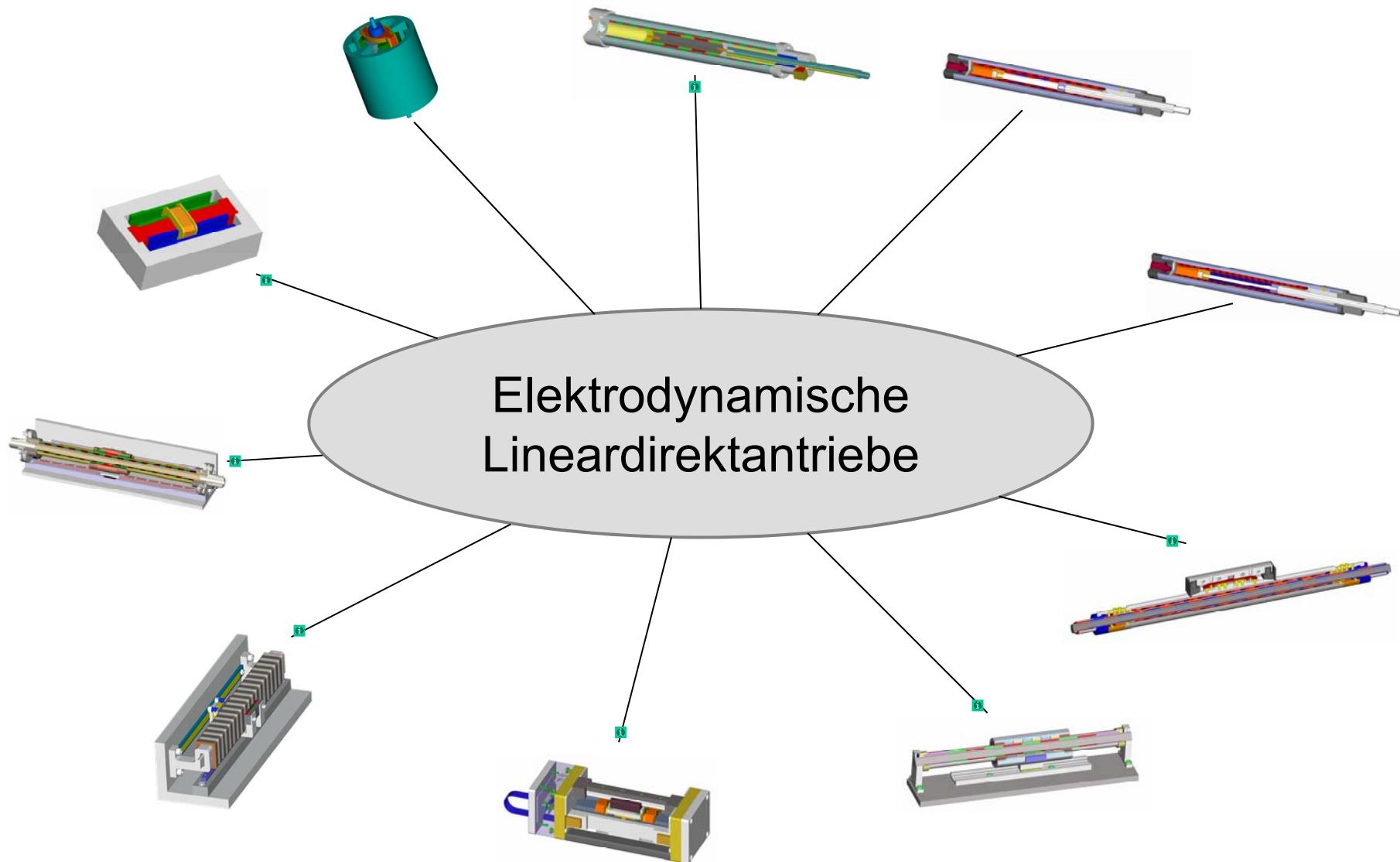
- volumenbezogene Wärmeentwicklung durch das Spulensystem (statisch / transient)

Definition der Randbedingungen

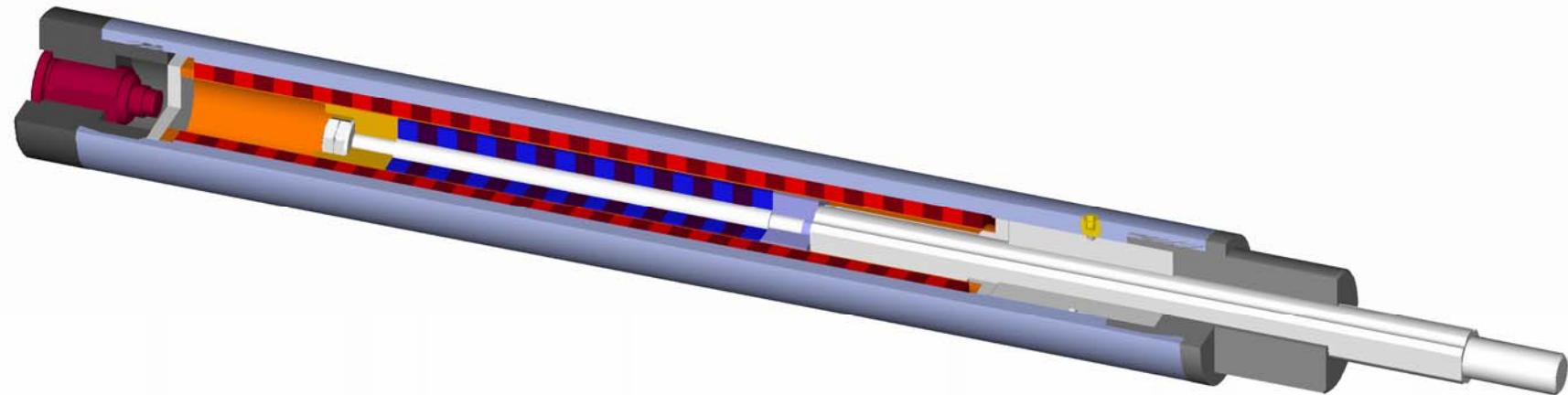
- Wärmeleitung (Motorinneren)
- Konvektion (Bezugstemperatur definieren)
- Strahlung (Strahlungsmatrix oder Oberflächenelement)

Lösung der partiellen Differentialgleichungen (Temperaturfelder)

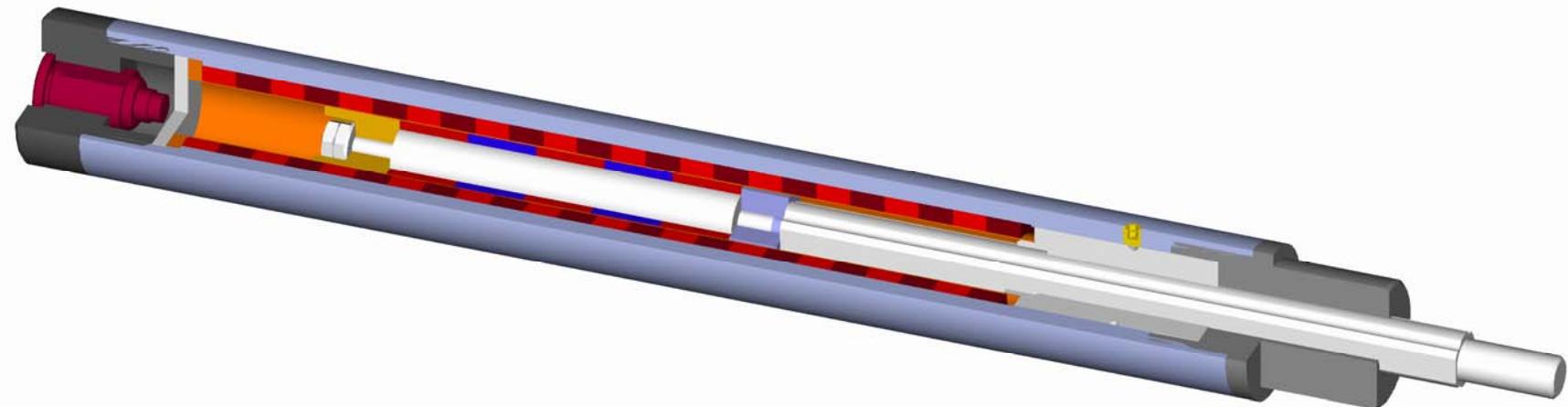
Auswertung der Ergebnisse



Zweisträngiger Antrieb mit bewegtem heteropolaren Magnetsystem
(Motortyp I, axiale Magnetisierung)



Zweisträngiger Antrieb mit bewegtem heteropolaren Magnetsystem
(Motortyp II, diametrale Magnetisierung)



Zusammenfassung

- Dimensionierung, Konstruktion und Auslegung Aktoren
- Einordnung und Charakterisierung von Bauformen
- Dimensionierungsablauf mit Auslegung der Teilsysteme
- Anwendungen mit technischen Daten
- Leitfaden