

Inhalt

1. Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung
 2. Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung – Kraftwirkung
 3. Bauelemente elektrischer Maschinen
 4. Wicklungsauslegung und Auswahl
 5. Ausnutzungs- und Dimensionierungsfaktoren
 6. Modellierung und Auslegung des magnetischen Kreises
 7. Ersatzstromkreise, Zweiachsenmethode, Identifikationsverfahren
 8. Numerische Feldberechnungsmethoden
 9. Fertigungsmethoden – Übersicht
 10. Übersicht über wichtige Motortopologien
 11. Materialien
 12. Fertigungsverfahren Statoren
 13. Fertigungsverfahren Rotoren
 14. Verluste
 15. Erwärmung, Kühlung
 16. Magnetisch erregte Geräusche in elektrischen Maschinen
- J. Steinbrink
- W. Thaler
- A. Binder

ERGÄNZUNG ZUM NACHLESEN

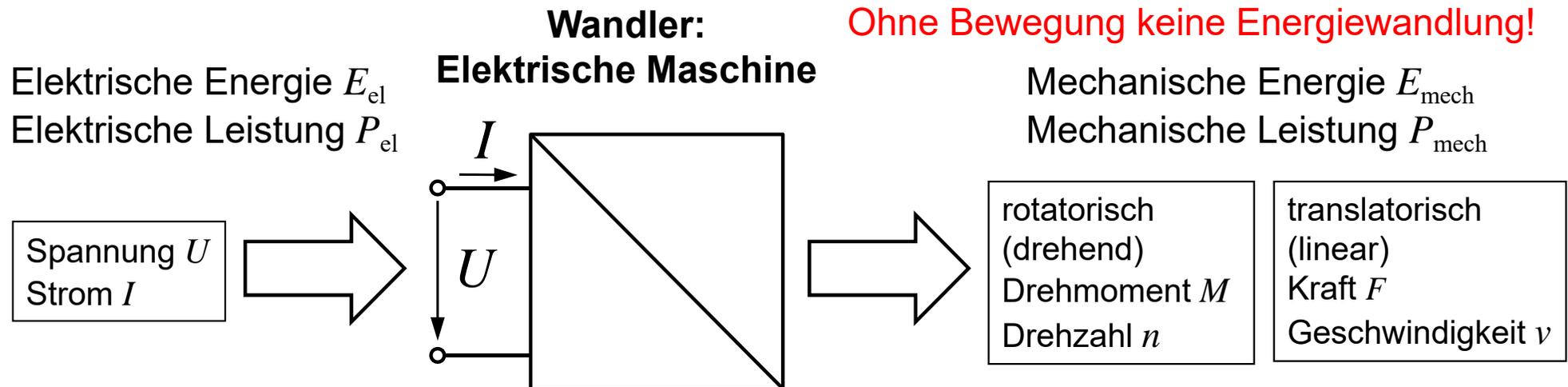
17. Anhang – Literatur und Formelzeichen
18. Eigenschaften permanentmagneterregter Synchronmaschinen am Umrichter (Beispiele)
19. du/dt -Effekte in umrichtergespeisten Maschinen

Kapitel 1

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

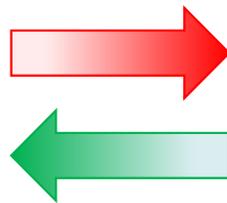
- 1.1 Energiewandlungsprozesse
- 1.2 Elektromagnetischer Energiewandlungsprozess
- 1.3 Basisgrößen des elektromagnetischen Feldes
- 1.4 Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes
- 1.5 Sekundärgrößen des elektromagnetischen Feldes
- 1.6 Magnetwerkstoffe
- 1.7 Magnetischer Kreis & Beispiel
- 1.8 Leiter- und Isolierwerkstoffe

1.2 Elektromagnetischer Energiewandlungsprozess



$$P_{el} = U \cdot I$$

real: Verluste P_v : $I^2 R$, $P_{v,Fe}$...



motorisch (+)

generatorisch (-)

Vorzeichen gültig für Verbraucherzählpeilsystem (VZS)

$$P_{mech,trans} = F \cdot v$$

$$P_{mech,rot} = M \cdot \Omega$$

Verluste P_v : $P_{v,rbg}$...

Winkelgeschwindigkeit Ω

Geschwindigkeit v

Drehmoment M

Kraft F

Hebelarm, Radius R

$$P_{el} = \frac{dW_{magn}}{dt} + P_{mech} + P_v$$

Ideale Energiewandlung: $P_{el} = P_{mech}$

$$\Omega = 2\pi \cdot n$$

$$v = \Omega \cdot R$$

$$M = F \cdot R$$

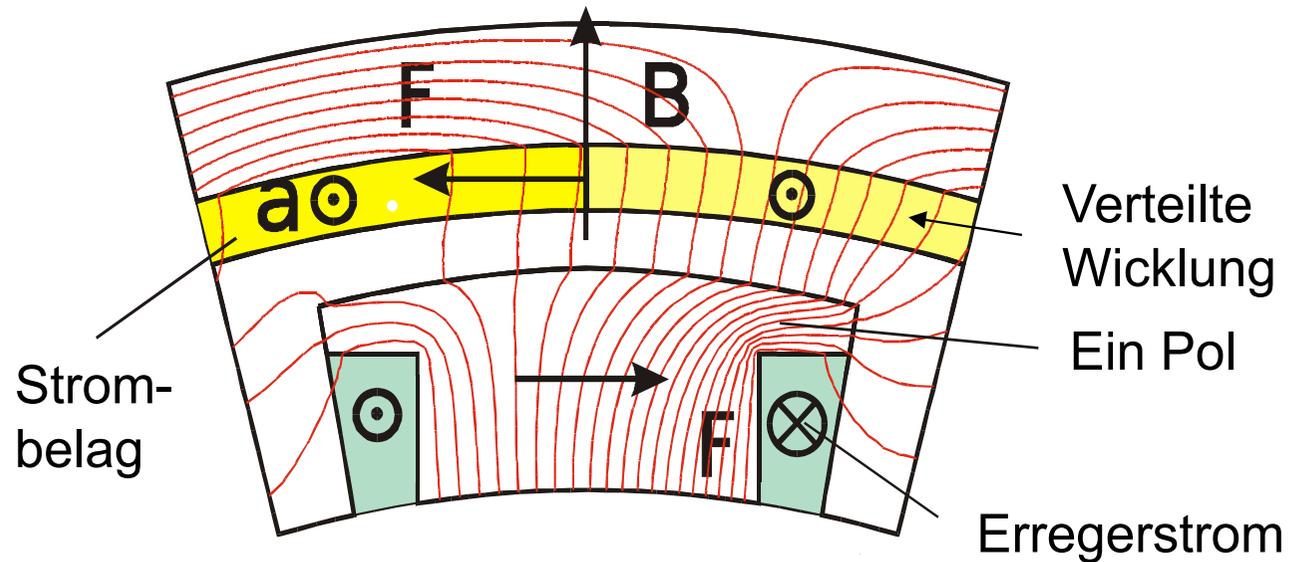
2.1 Kraftwirkung im elektromagnetischen Feld – VIII

Lorentz – Kraft F

$$F = l \cdot \int a \cdot B dx$$

Kraft / Fläche

$$f_s = B A$$



Technische Grenzen:

- Flussdichte $B < 1,8 \text{ T}$ (Sättigung, $\cos \varphi$)
- Strombelag $A < 250 \text{ kA/m}$ (Verluste, Kühlung, Ankerrückwirkung)
 $\Rightarrow f_s < 450 \text{ kN/m}^2$

Vorteile:

- Schubkraftdichte: linear, einstellbar, feldschwächbar

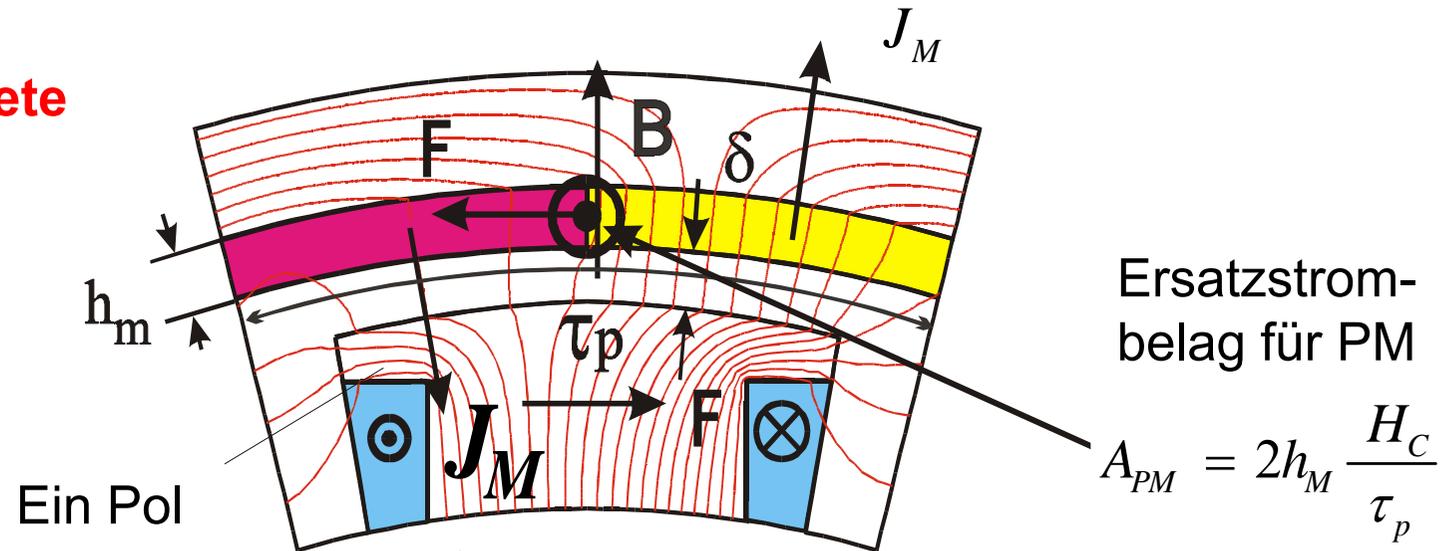
Einsatz:

- Gleichstrommaschine: A, B (konstant) $f_s < 40 \text{ kN/m}^2$
- Synchronmaschine: A, B (Drehfeld) $f_s < 300 \text{ kN/m}^2$
- Induktionsmaschine: A induziert, B (Drehfeld) $f_s < 40 \text{ kN/m}^2$

2.1 Kraftwirkung im elektromagnetischen Feld – IX

Lorentz – Kraft F auf Permanentmagnete

$$f_s = B \cdot 2h_M \frac{H_C}{\tau_p}$$



Technische Grenzen:

- Flussdichte $B < 1,4$ T (Sättigung, Verluste, ARW, $\cos \varphi$)
- Koerzitivkraft $|H_C| < 1000$ kA/m, $h_M/\tau_p > 0,1$
 $\Rightarrow f_s < 280$ kN/m², Einzelzahnwicklungen: $f_s \sim 1/\tau_p \sim p$

Vorteile:

- Schubkraft: linear, einstellbar, feldschwächbar, guter Wirkungsgrad

Einsatz:

- Synchronmaschine: B (Drehfeld) $f_s < 80$ kN/m²

verteilte Wicklungen erzeugen B – Drehfeld
aus dessen Strombelag A

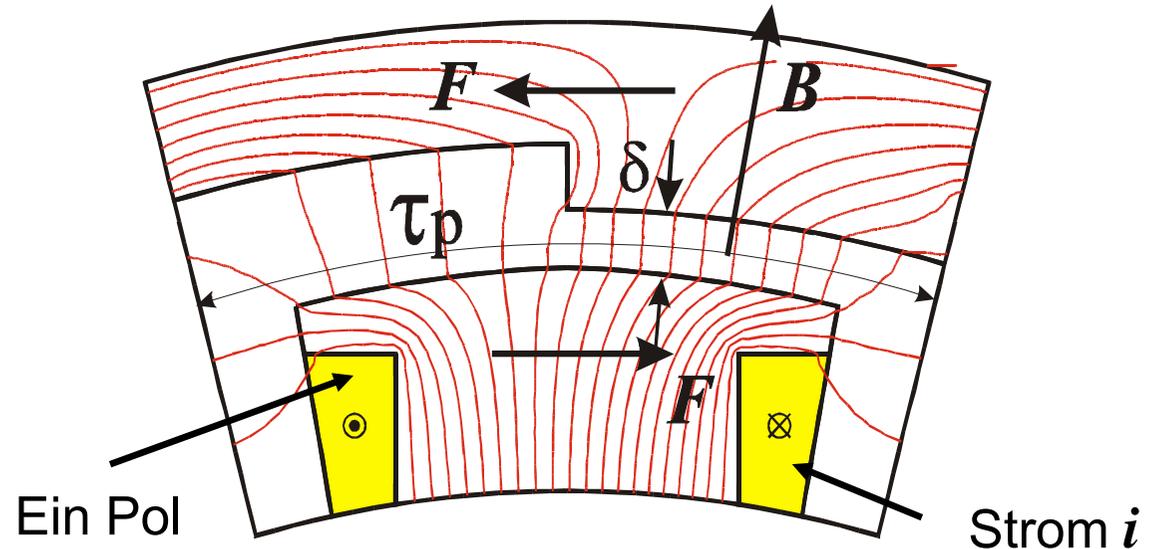
$$B = \mu_0 \frac{A \tau_p}{2 (h_m + \delta)} \Rightarrow f_s \approx \mu_0 H_C A$$

2.1 Kraftwirkung im elektromagnetischen Feld – X

Reluktanzkraft F auf Eisen

$$F = -\frac{\partial E_{\text{magn}}}{\partial x}$$

$$f_s = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \approx \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{\tau_p}$$



Technische Grenzen:

- Flussdichte $B < 1,5$ T (Sättigung)
- Strombelag $A < 60$ kA/m (Verluste, Kühlung, Ankerrückwirkung)
 $\Rightarrow f_s < 170$ kN/m² ($\delta/\tau_p \leq 0,1$), $f_s \sim 1/\tau_p \sim p$

Vorteile:

- einfache Rotorkonstruktion, Einzelzahnwicklungen

Einsatz:

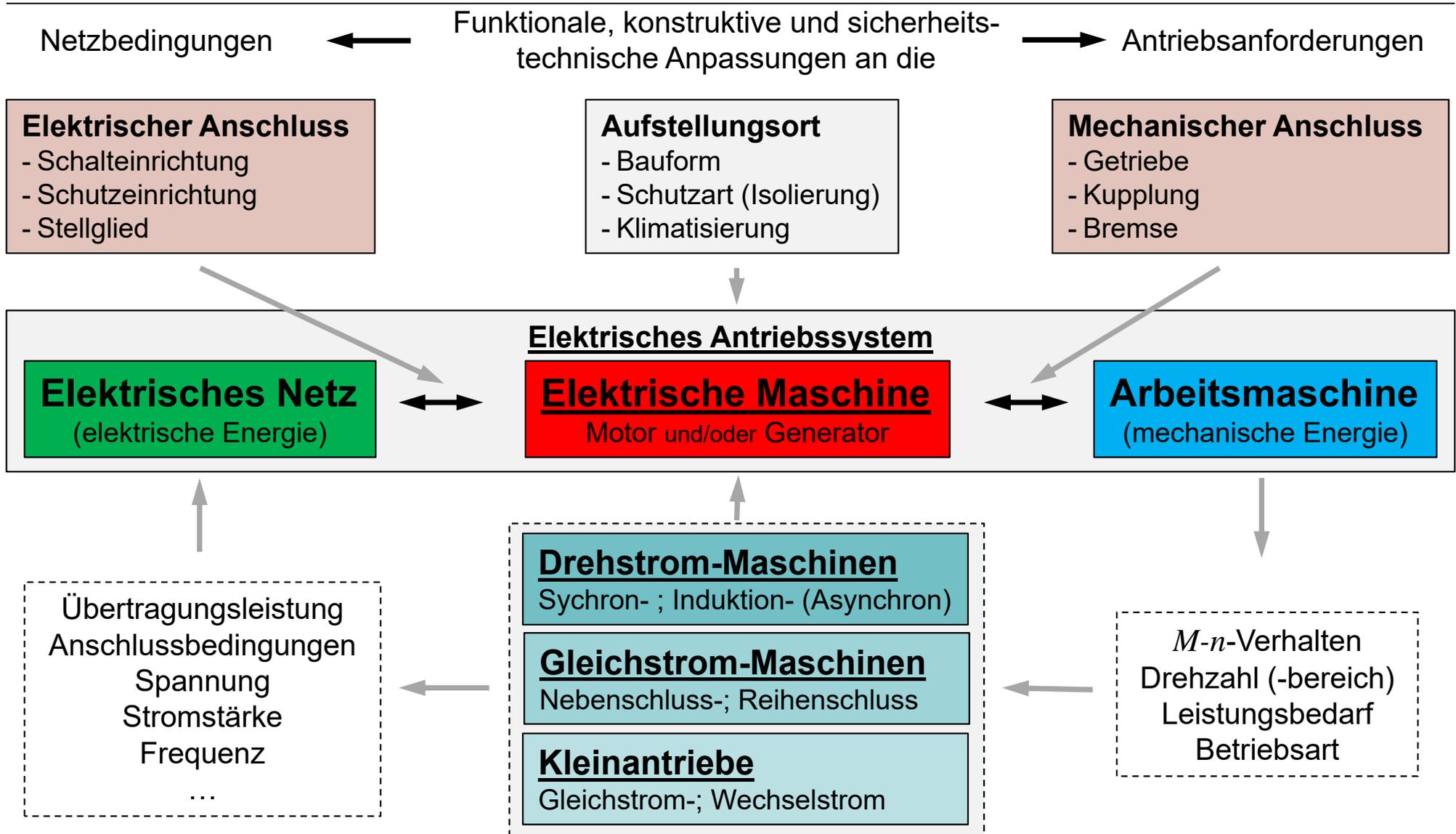
- *Switched-Reluctance-Maschine* (Strom i , unipolar): $f_s < 25$ kN/m²
- *Schrittmotor*
- *Reluktanzmotor, verteilte Wicklung*: $f_s < 25$ kN/m²
- *Vernier-Maschine* (Strom i bipolar): $f_s < 35$ kN/m²

Kapitel 3

Bauelemente elektrischer Maschinen

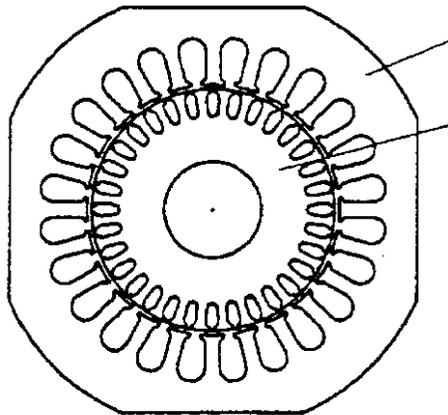
- 3.0 Grundelemente elektrischer Maschinen
- 3.1 Magnetkreise
- 3.2 Luftspalt
- 3.3 Wicklung
- 3.4 Permanentmagnete
- 3.5 Stator/Rotoranordnungen
- 3.6 Mechanische Anordnung
- 3.7 Maschinentopologien (Kühlung)
- 3.8 Umrichterkomponenten und Antriebsumrichter
- 3.9 Maschineneigenschaften

3.0 Grundelemente Elektrischer Maschinen

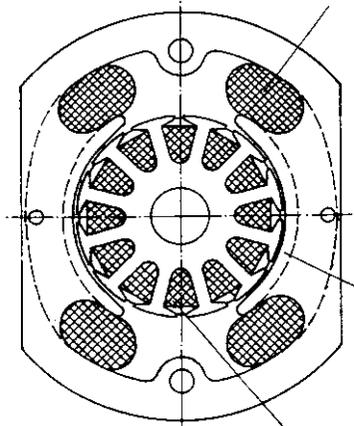


3.5 Stator- / Rotor-Anordnungen

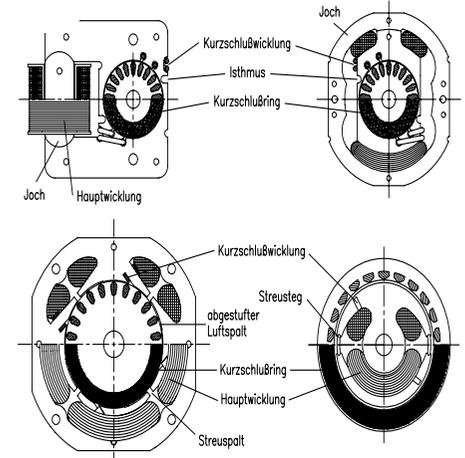
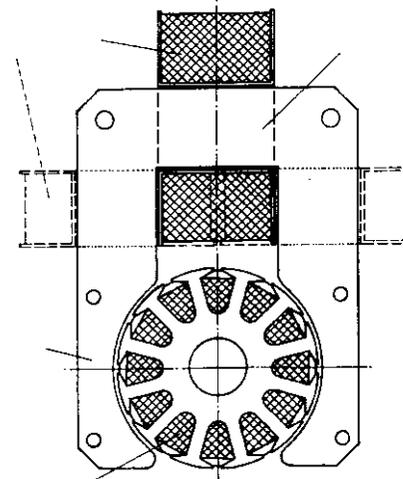
Längsflussmaschinen



ASM, SM

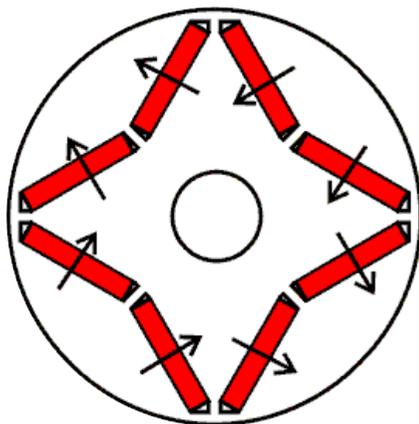


Universalmotor

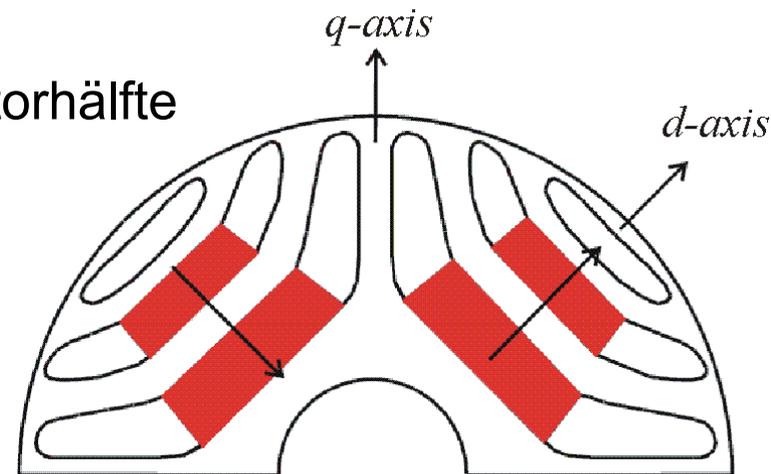


Spaltpolmotor

Hybride Topologien: Reluktanzeffekt & Permanentmagnete



Rotorhälfte

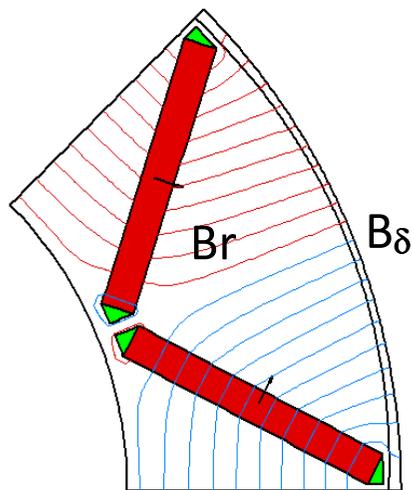


$$L_d < L_q$$

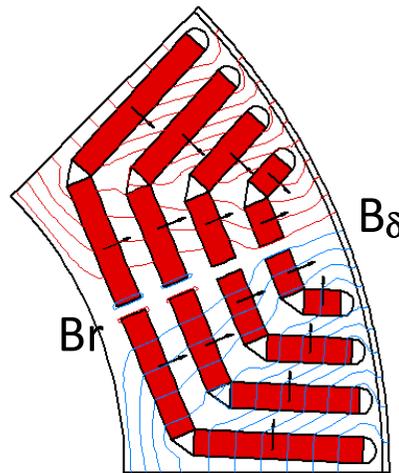
3.5 Stator- / Rotor-Anordnungen

Hybride Maschinen: Einfluss der PM-Topologie

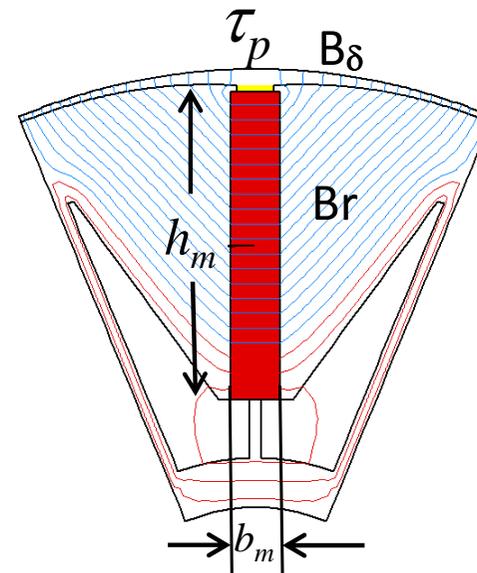
FEMAG - Modelle



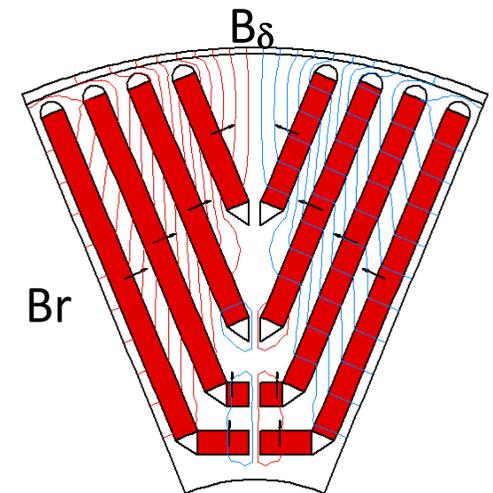
$$B_{\delta} / B_r : 1,06$$



$$1,19$$



$$1,1$$



$$1,6$$

Flussverstärkungsfaktor: $B_{\delta} / B_r = f(p)$ bzw. $f(b_m, h_m / \tau_p)$

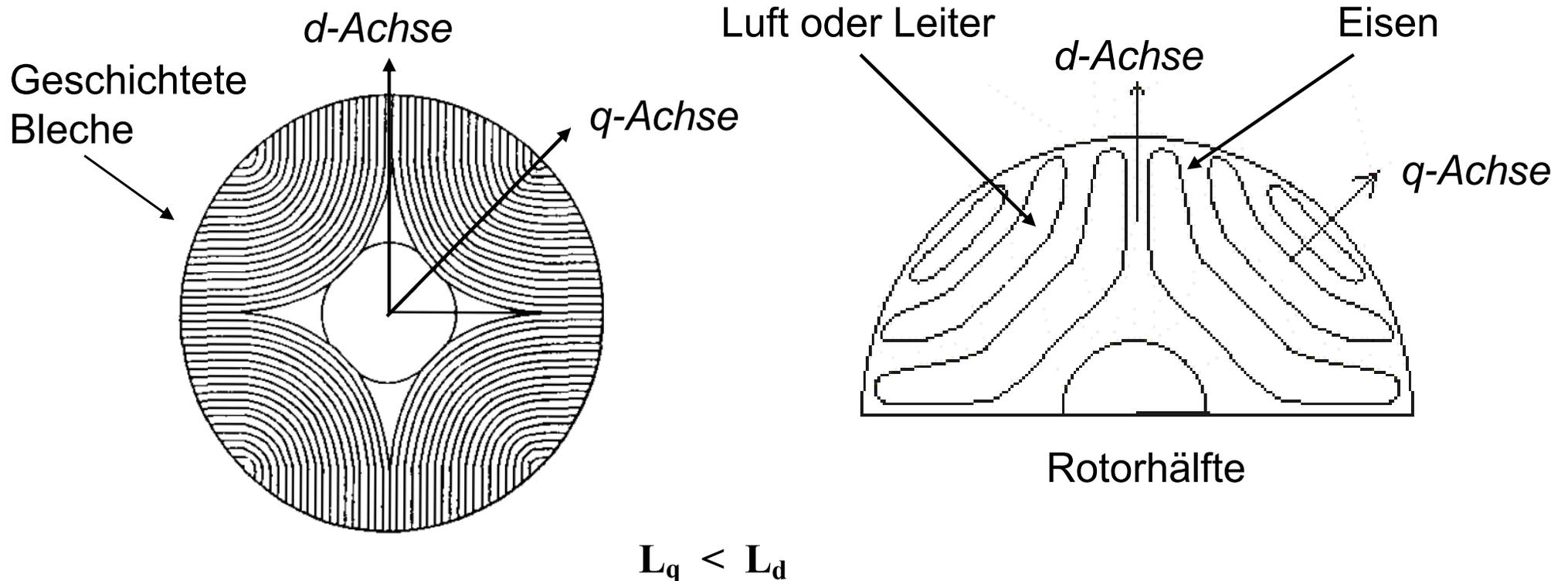
Reluktanzfaktor: $L_q / L_d < 2$ bis 4 (sättigungsabhängig)

Problem: Drehmomentpulsation und Eisenverluste im Stator durch Rotornuten

p = Polpaarzahl, b_m, h_m = Magnetbreite, -höhe, τ_p = Polteilung, B_r = Remanenz

3.5 Stator- / Rotor-Anordnungen

Reluktanz-Topologien



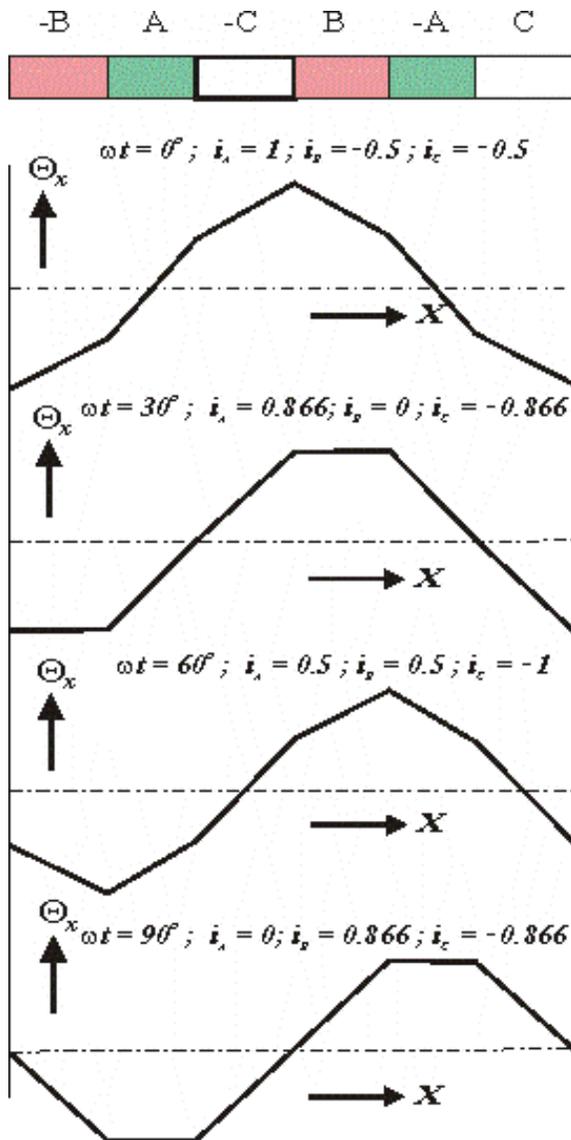
Reluktanzmaschinen mit magnetischer Unsymmetrie im Rotor und verteilter m -Phasenwicklung im Stator

Kapitel 4

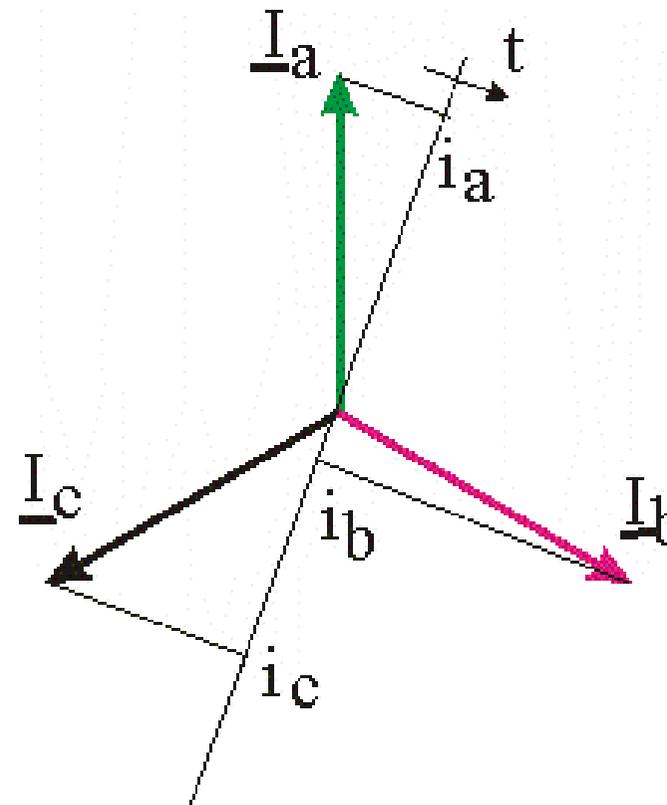
Wicklungsauslegung und Auswahl

- 4.1 Grundbegriffe
- 4.2 Entstehung eines Drehfeldes
- 4.3 Entwurf einer Wicklung
- 4.4 Bewertung

4.4 Bewertung von Wicklungen – II



Felderregerkurve einer idealen Wicklung



Wicklungsfaktoren Einfluss der Durchflutungsverteilung

Strombelag a und Luftspaltinduktion b

- a) bei feinverteiltem Strombelag
- b) bei diskreter Nutung, Durchflutung in Nutmitte konzentriert
- c) bei diskreter Nutung, Durchflutung über die Nutschlitzbreite verteilt

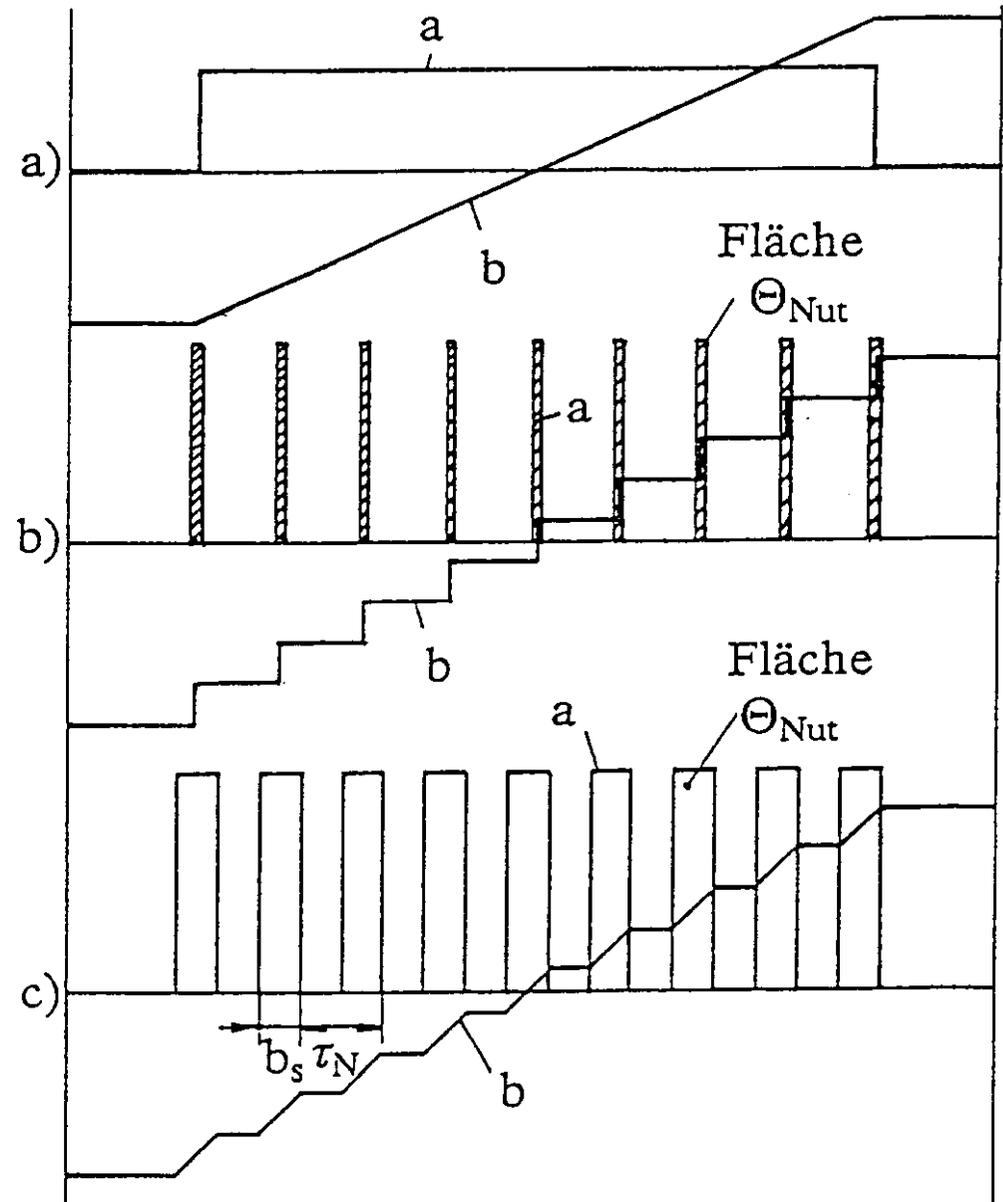
Berücksichtigung der Durchflutungsbreite durch den Breitenfaktor:

$$\xi_{bv} = \frac{\sin\left(v \frac{b_s \pi}{\tau_N N}\right)}{v \frac{b_s \pi}{\tau_N N}} = \frac{\sin\left(v \frac{b_s}{2R}\right)}{v \frac{b_s}{2R}}$$

Grenzfälle:

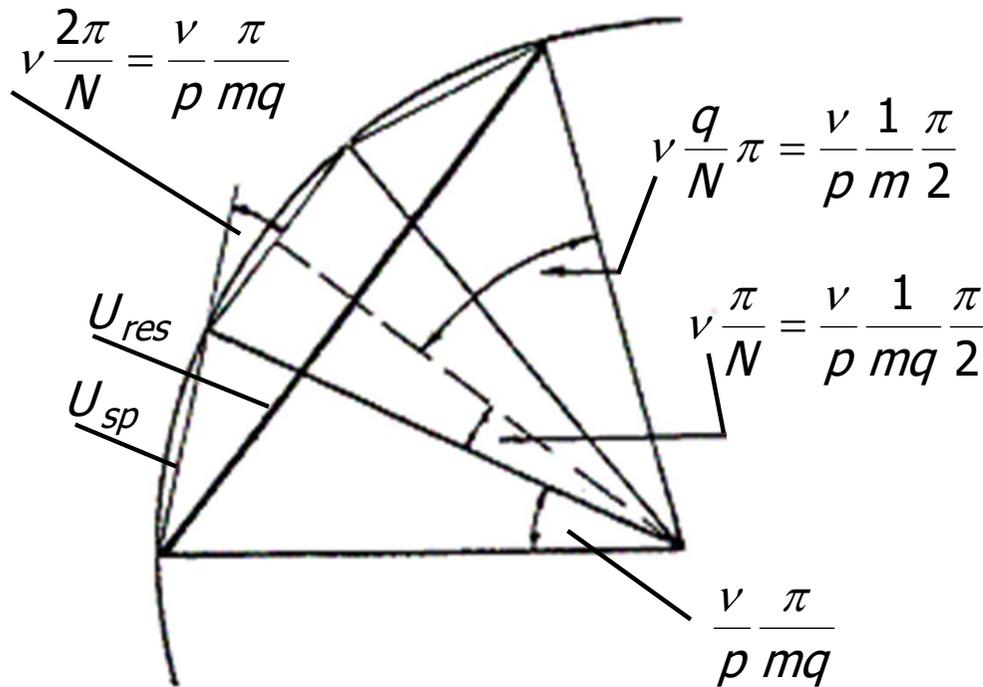
$$b_s \rightarrow 0 \Rightarrow \xi_{bv} = 1$$

$$b_s \rightarrow \tau_N \Rightarrow \xi_{bv} = \frac{\sin\left(v \frac{\pi}{N}\right)}{v \frac{\pi}{N}}$$



Wicklungsfaktoren Zonenwicklungsfaktor

Zonenwicklungsfaktor einer unverschachtelten Ganzlochwicklung mit konzentrierter Nutdurchflutung (Darstellung für $q = 3$):



Abhängigkeit des Zonenwicklungsfaktors von der Lochzahl q :

q	$v/p=1$	$v/p=-5$	$v/p=7$
1	1,000	1,000	1,000
2	0,966	0,259	-0,259
3	0,960	0,218	-0,177
4	0,958	0,205	-0,158
5	0,957	0,200	-0,149
6	0,956	0,197	-0,145
7	0,956	0,196	-0,143
8	0,956	0,194	-0,141
9	0,955	0,194	-0,140
10	0,955	0,193	-0,140
20	0,955	0,192	-0,137
∞	0,955	0,191	-0,136

Zonenwicklungsfaktor:

$$\xi_{zv} = \frac{U_{res}}{q \cdot U_{sp}} = \frac{\sin\left(\frac{v \cdot 1 \cdot \pi}{p \cdot m \cdot 2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{v \cdot 1 \cdot \pi}{p \cdot m \cdot q \cdot 2}\right)} = \frac{\sin\left(vq \frac{\pi}{N}\right)}{q \cdot \sin\left(v \frac{\pi}{N}\right)}$$

für $v = p(1 + 2mg)$ mit $g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Wicklungsfaktoren Sehnung, Schrägung und res. Kopplung

Zonenwicklungsfaktor

Zweischichtwicklung mit Zonenänderung

$$\xi_{zv} = \frac{\sin\left(\frac{v}{p} \frac{1}{m} \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{v}{p} \frac{1}{mq} \frac{\pi}{2}\right)} \cos\left(v \frac{q_{\Delta}}{N} \pi\right)$$

Wicklung mit doppelter Zonenbreite

$$\xi_{zv} = \frac{\sin\left(\frac{v}{p} \frac{1}{m} \pi\right)}{2q \cdot \sin\left(\frac{v}{p} \frac{1}{mq} \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\sin\left(v 2q \frac{\pi}{N}\right)}{2q \cdot \sin\left(v \frac{\pi}{N}\right)}$$

Sehnungswicklungsfaktor

Spulenweite im Längenmaß W :

$$\xi_{sv} = \sin\left(\frac{v}{p} \frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right)$$

Spulenweite im Bogenmaß W' :

$$\xi_{sv} = \sin\left(v \frac{W'}{2}\right)$$

Spulenweite in Nutteilungen W^* :

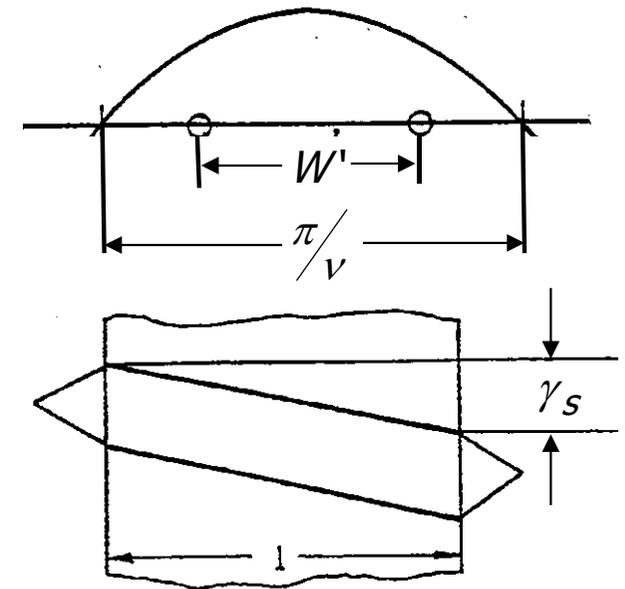
$$\xi_{sv} = \sin\left(v \frac{W^*}{N} \pi\right)$$

Schrägungsfaktor

Für Nutschrägung um Umfangswinkel γ_s gilt:

$$\xi_{Schv} = \frac{\sin\left(v \frac{\gamma_s}{2}\right)}{v \frac{\gamma_s}{2}}$$

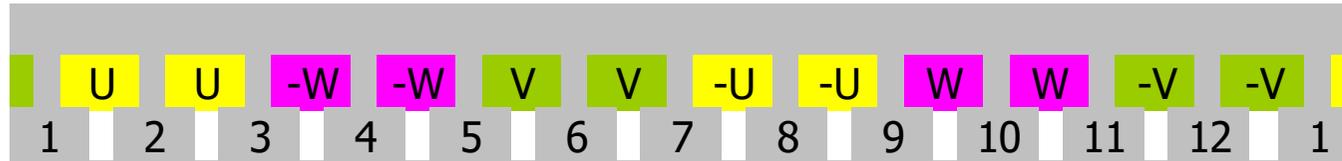
Der Schrägungsfaktor ist kein Wicklungsfaktor, sondern Kopplungsfaktor zwischen Ständer und Läufer.



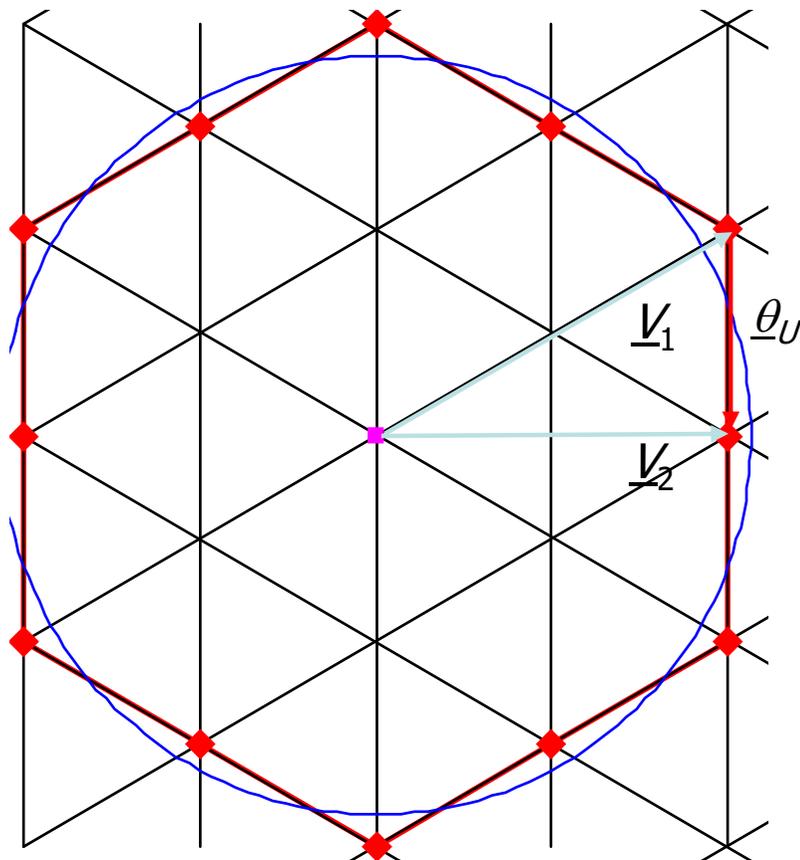
Resultierender Kopplungsfaktor zwischen Ständer und Läufer: $\xi_v = \xi_{zv} \cdot \xi_{sv} \cdot \xi_{bv} \cdot \xi_{Schv}$

Görges-Diagramm Einschicht-Ganzlochwicklung

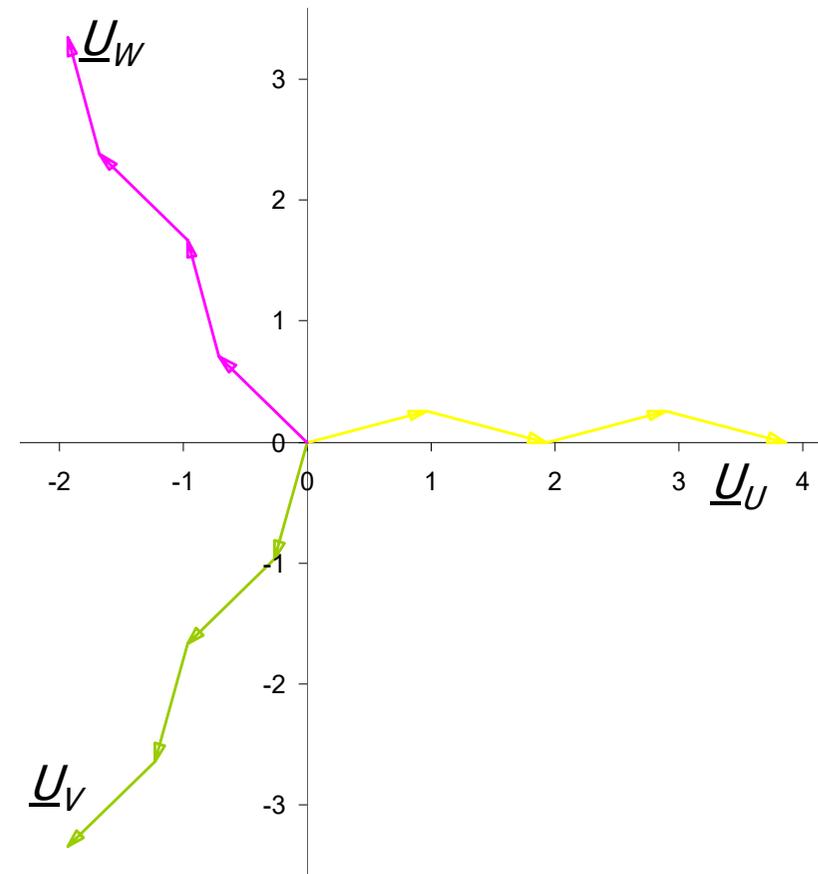
Einschicht-Ganzlochwicklung mit $m = 3$, $p = 1$, $N = 12$, $W/\tau = 6/6$



Nummerierung der Zähne und Belegung der Nuten durch die Stränge



Görges-Diagramm ($\sigma_d = 2,85\%$)



vom Grundfeld induzierte Spg. ($\xi_p = 0,966$)

Görges-Diagramm Allgemeines und Käfigwicklungen

Allgemeine Zusammenhänge
bei Görges-Diagrammen:

Koeffizient der doppelverketteten Streuung:

$$\sigma_d = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1$$

mit dem Trägheitsradius des GD:

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}$$

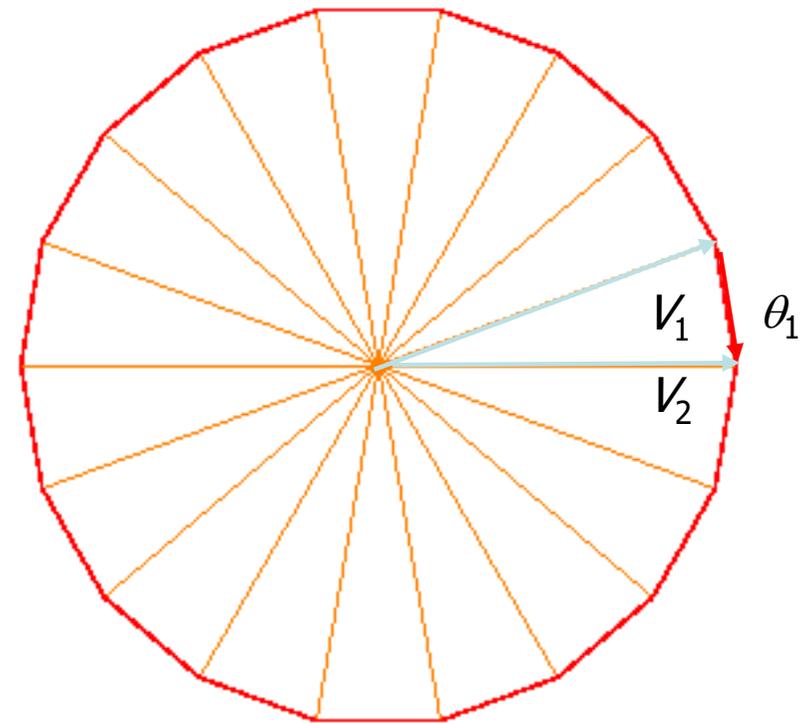
und dem Trägheitsradius der Grundwelle:

$$R_p = \frac{\xi_p}{2\pi p} \theta_N N \quad \text{mit} \quad \theta_N N = \sqrt{2m2wI}$$

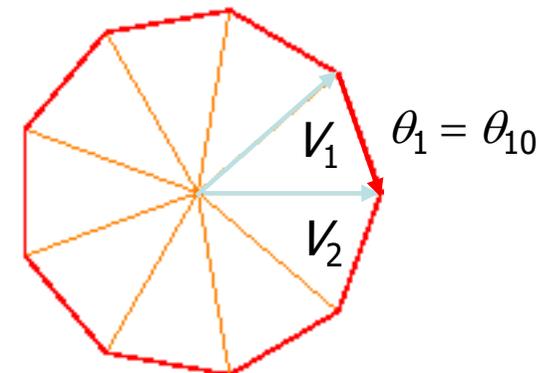
Damit folgt für Käfigläufer:

$$\sigma_d = \left(\frac{\frac{p\pi}{N}}{\sin\left(\frac{p\pi}{N}\right)} \right)^2 - 1$$

Käfigläufer haben die kleinste doppelverkettete Streuung, die mit N/p Nuten je Pol erzielbar ist, d. h. den geringstmöglichen Anteil an Oberfeldern.



GD einer *zweipolig* erregten Käfigwicklung mit $N = 18$ Nuten ($\sigma_d = 1,02\%$)



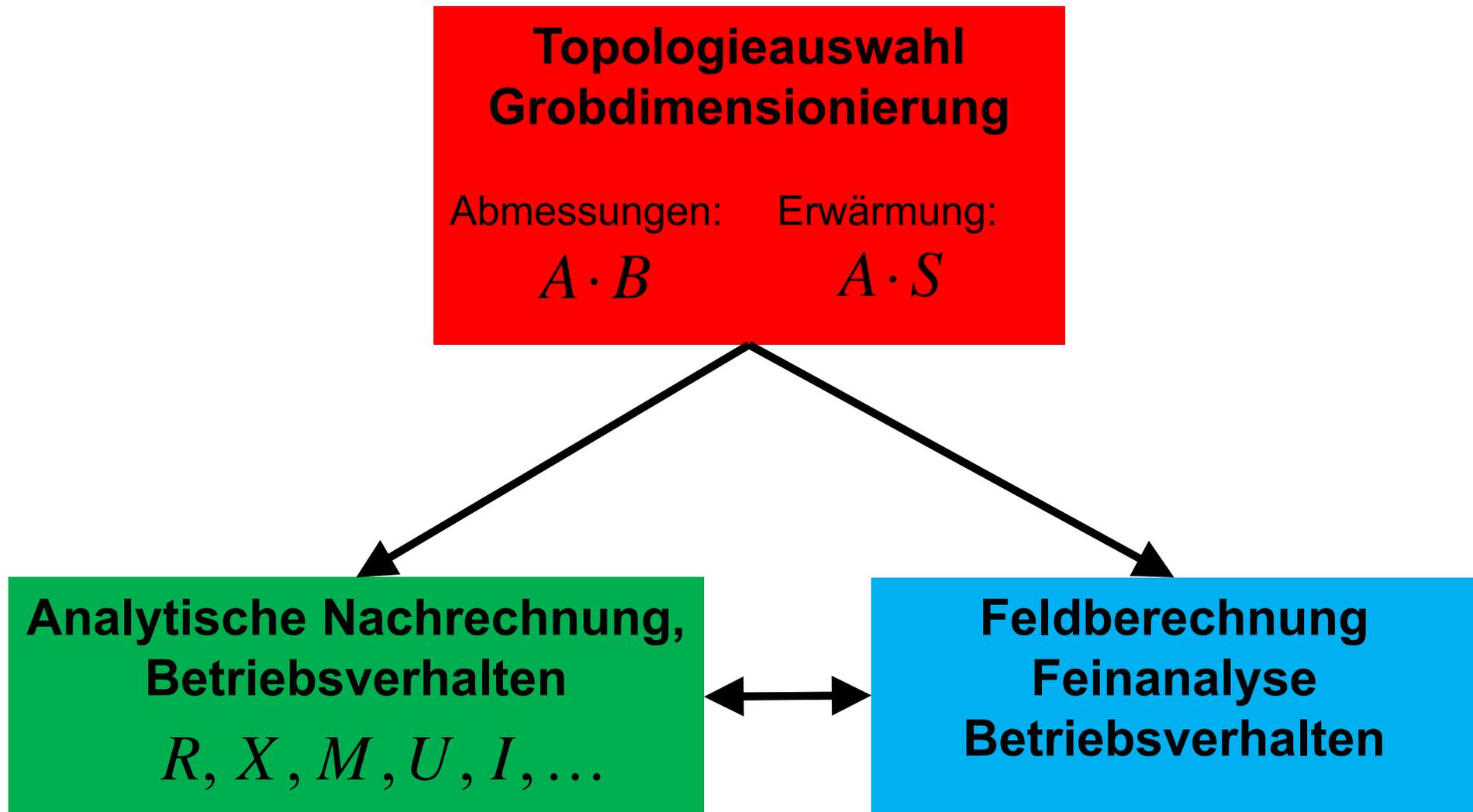
GD einer *vierpolig* erregten Käfigwicklung mit $N = 18$ Nuten ($\sigma_d = 4,16\%$)

Kapitel 5

Ausnutzungs- und Dimensionierungsfaktoren

- 5.1 Auslegung elektrischer Maschinen
- 5.2 Grundsätzliche Beziehungen
- 5.3 Bestimmung der Hauptabmessungen
- 5.4 Elektromagnetischer Entwurf – analytische Entwurfsprogramme

5.1 Auslegung elektrischer Maschinen – I



Kapitel 7

Ersatzstromkreise, Zweiachsmethode, Identifikationsverfahren

7.1 Allgemeines

7.2 Selbst- und Gegeninduktivitätsmodelle

7.3 Identifikationsverfahren

7.4 Stromkreismodelle Synchronmaschine

7.5 Stromkreismodelle Asynchronmaschine

Kapitel 8

Numerische Feldberechnungsmethoden

- 8.1 Grundlagen, Maxwell'sche Gleichungen
- 8.2 Numerische Feldberechnung
- 8.3 Fehlerprobleme der FEM
- 8.4 Anwendung numerischer Feldberechnungsmethoden
- 8.5 Praktischer Einsatz der FEM zur numerischen Feldberechnung – Vorgehen
- 8.6 Feldberechnungsprogramme FEMAG-DC, -AC, -ME, -TH



Wolfgang Thaler

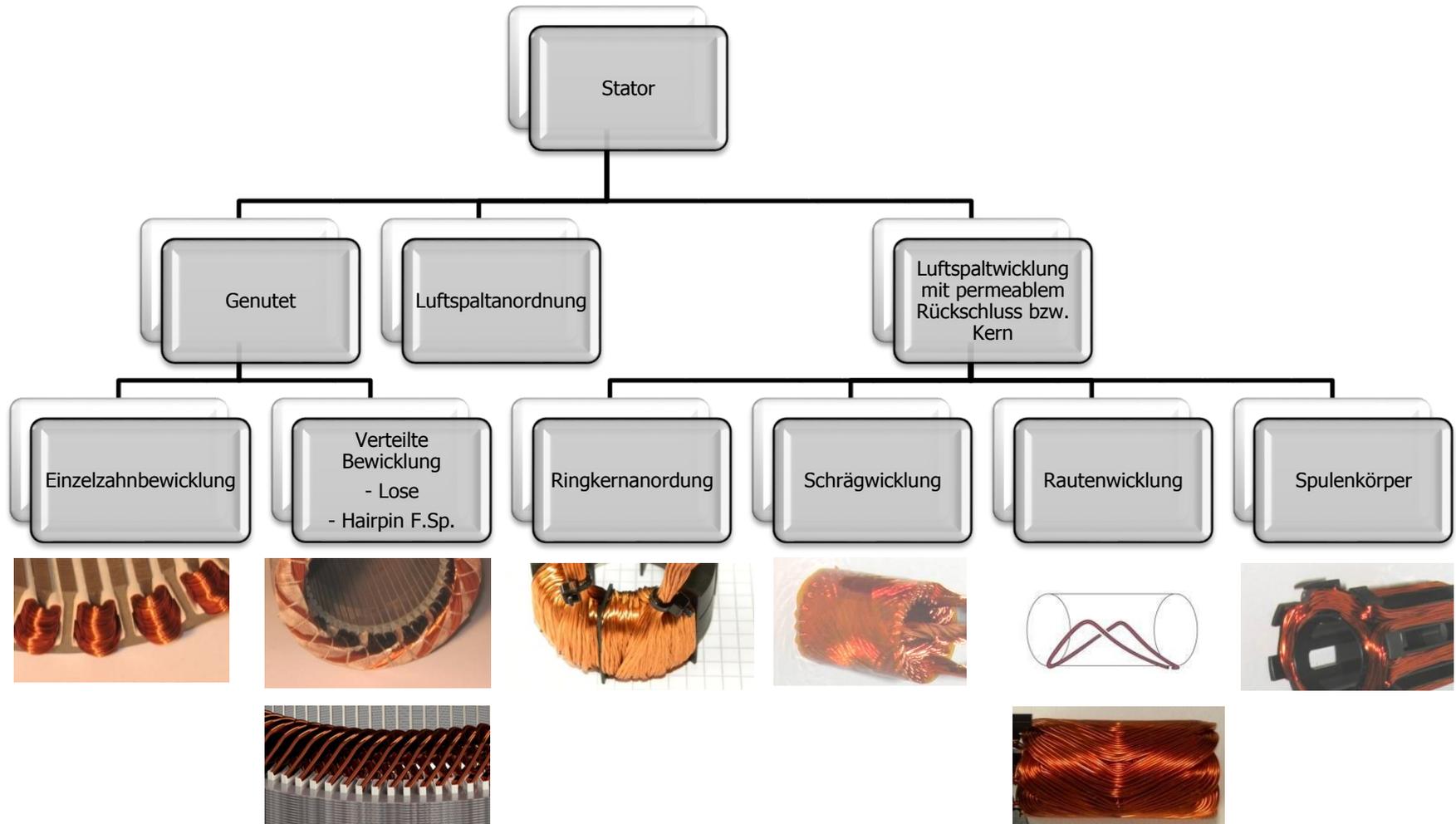
Inhaltsverzeichnis

1. Eingrenzung des Vortrages
2. Übersicht über wichtige Motortopologien
3. Materialien
4. Fertigungsverfahren Statoren
5. Fertigungsverfahren Rotoren
6. Kosten
7. Ausblick
8. Quellen

1. Eingrenzung des Vortrages

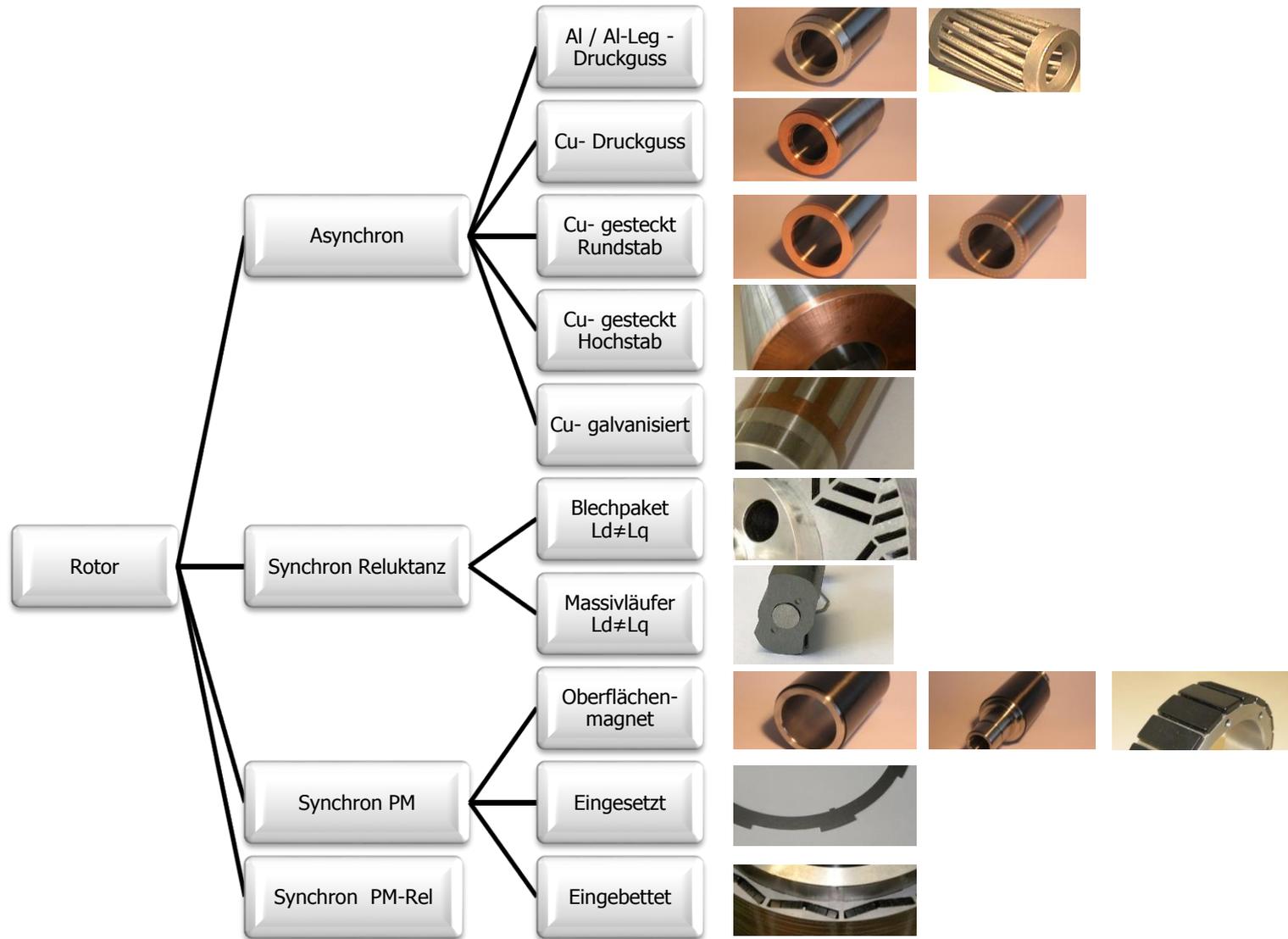
- Niederspannungsmaschinen $< 1000\text{V}$
- Leistungsbereich einige Watt bis einige 100kW
- Drehzahlbereich $0 \dots 1\text{Mio min}^{-1}$
- Stator- und Rotorkomponenten
- Keine Komplettmotoren

2. Übersicht über wichtige Motortopologien



Weitere Topologien: Transferschlussmaschine → Ringspule / Verteilte und Einzelzahnwicklungen → Flachdrahtausführung / Bürstenbehafter bewickelter Rotor

2. Übersicht über wichtige Motortopologien



3. Materialien

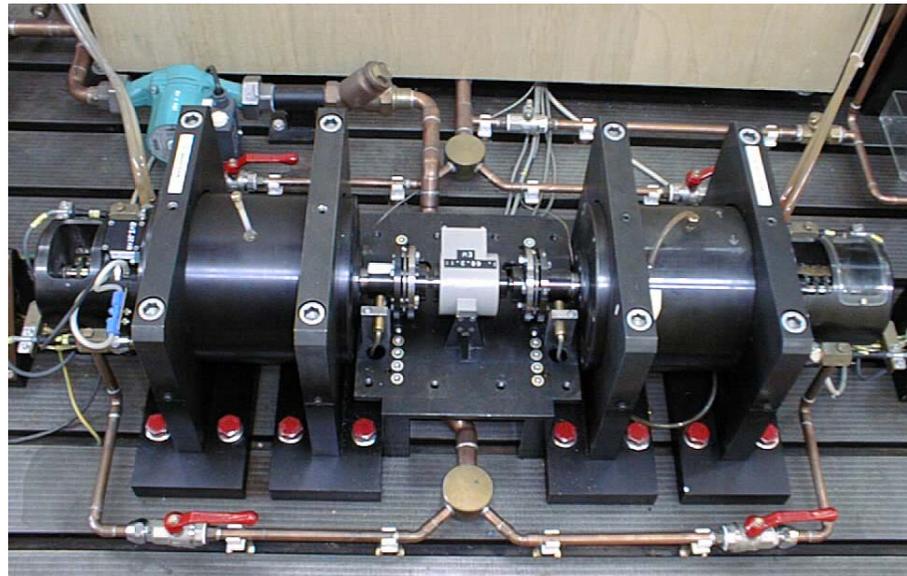
Elektrische Isolierstoffe:

Einteilung in Isolierklassen (DIN EN 60085):

Klasse	höchstzulässige Dauertemperatur	Isolierstoffe Beispiele
Y	90°C	Baumwolle, Naturseide, Zellwolle, Kunstseide, Polyamidfaser, Papier, Preßspan, Vulkanfiber, Holz, Formaldehyd-Kunstharz
A	105°C	Wie bei Klasse Y, jedoch nach dem Einbau mit Natur- oder Kunstharzlacken, Schellack usw. getränkt, lackbehandelte Textilien
E	120°C	Pressteile mit Zellulosefüllstoff, Papierschichtstoffe
B	130°C	Pressspan mit Polyesterfolie / Polyesterflies teilweise in Verbindung mit Harzen
F	155°C	Nomex (Aramidfasergeflecht → aromatische Polyamide) mit Polyesterfolie
H	180°C	Nomex mit Kapton (Polyimidfolie) / Glasfaser, Silikonkautschuk
N	200°C	Kapton (Polyimidfolie), Glimmer, Porzellan, keramische Stoffe, Glas, Quarz...
R	220°C	Keramische Stoffe, Glas, Quarz
-	>220°C	

Sonderprobleme bei elektrischen Maschinen

14. Verluste



14. Verluste

14.1 Wirkungsgrad und Effizienz

14.2 Verlustgruppen der PM-Synchronmaschine

14.3 Verlustgruppen der Käfigläufer-Asynchronmaschine

14.4 Stromwärmeverluste

14.5 Ummagnetisierungsverluste

14.6 Reibungs- und Ventilationsverluste

14.7 Zusatzverluste

14. 7 Zusatzverluste

- 14.7.1 Zusatzverluste in der Asynchronmaschine bei sinusförmigem Strom (Netzbetrieb)
- 14.7.2 Zusatzverluste in der Asynchronmaschine bei nichtsinusförmigem Strom (Umrichterbetrieb)
- 14.7.3 Zusatzverluste in der PM-Synchronmaschine bei sinusförmigem Strom (Netzbetrieb)
- 14.7.4 Zusatzverluste in der PM-Synchronmaschine bei nichtsinusförmigem Strom (Umrichterbetrieb)

14.7.1 Zusatzverluste in der Asynchronmaschine bei sinusförmigem Strom (Netzbetrieb)

- Rotoroberflächenverluste durch Wirbelströme:

Das durch die Statornutung verzerrte Luftspaltfeld induziert mit Statornutfrequenz eine Wechselspannung in die leitfähige Rotoroberfläche, wo Wirbelströme fließen können, wenn die Isolation der Eisenbleche durch die Drehbearbeitung tw. leitfähig überbrückt sind. Weiter werden die Zahnköpfe durch den (nutfrequenten) Luftspalt-Oberwellenfluss nutfrequent ummagnetisiert.

$$\text{Statornutfrequenz: } f_{Q_s} = n \cdot Q_s$$

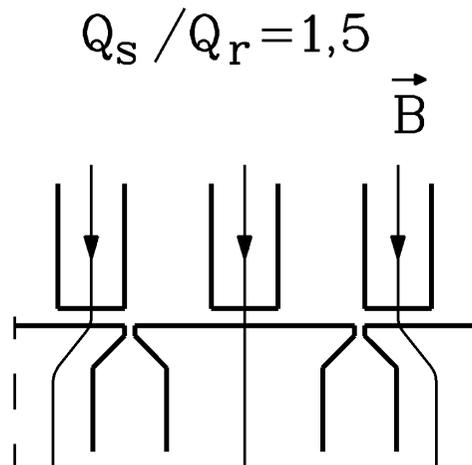
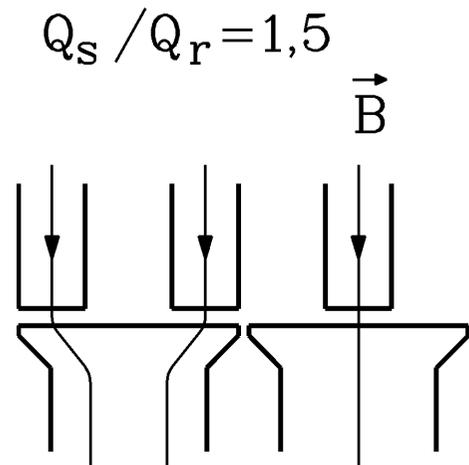
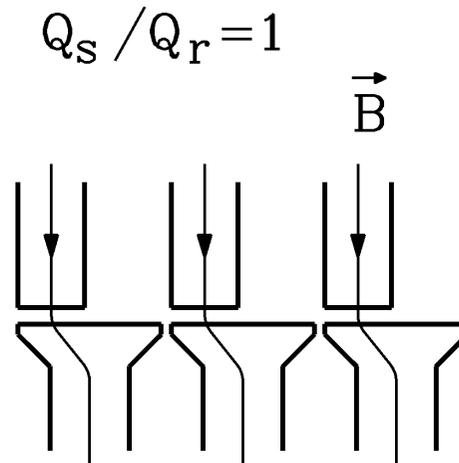
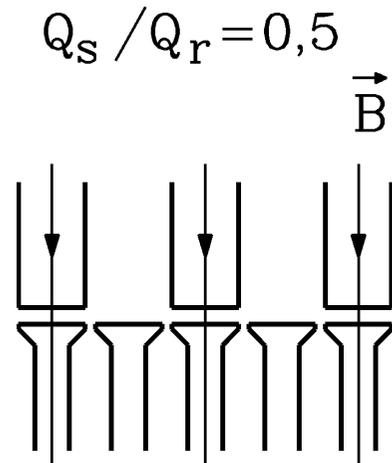
- Rotor-Zahnpulsationsverluste:

Auch die Zahnschäfte werden durch den (nutfrequenten) Luftspalt-Oberwellenfluss nutfrequent ummagnetisiert. Die Stator-Zahnpulsationsverluste sind meist viel kleiner wegen der halbgeschlossenen oder geschlossenen Rotornuten.

- Rotor-Käfigzusatzverluste:

Durch die Ständer-Luftspalt-Oberwellen werden im Käfig höherfrequente Rotoroberströme mit entsprechender Stromwärme hervorgerufen. Schrägung um eine etwa Ständernutteilung verringert sie. Bei geschrägtem Käfig fließen diese Oberströme aber als Querströme zwischen den Stäben über das Blechpaket (Querstrom-Zusatzverluste).

Rotorpulsationsverluste hängen ab vom Nutzahlverhältnis Q_s/Q_r



$Q_s/Q_r = 0.5:$

Zahnflusspulsation zwischen 0 und 200%

$Q_s/Q_r = 1$ (verboten wegen hohem Rastmoment!):

Keine Zahnflusspulsation

$Q_s/Q_r = 1.5:$

Zahnflusspulsation zwischen 66% und 133%

Statornutfrequente Rotorzahnflussdichte-Schwankung ΔB_{dr} , bezogen auf die schlupffrequente Rotorzahnflussdichte B_{dr} der Grundwelle:

$$\frac{\Delta B_{dr}}{B_{dr}} \sim \frac{\sin(\pi \cdot Q_s / Q_r)}{\pi \cdot Q_s / Q_r}$$

Offene Statornuten, halbggeschlossene Rotornuten

Berechnung der Rotorzahn pulsationsverluste $P_{puls,r}$ bei Leerlauf

- Wegen der relativ hohen Statornutzfrequenz bei Leerlauf und Nennschlupf dominieren in den Läuferzähnen die Wirbelstromverluste gegenüber den Hystereseverlusten (diese werden vernachlässigt!)
- Es wird die *Steinmetz-Jordan-Formel* für die Wirbelstromverluste im Eisen verwendet
- Sie gilt ohne Berücksichtigung der Abdämpfung des Zahnflusses durch das Eigenfeld der Käfigoberströme und liefert daher i. A. zu große Verluste.

$$P_{puls,r} = k_{Vd} \left(\frac{\Delta B_{dr}}{1.0} \right)^2 \cdot p_{Ft} \cdot \left(\frac{f_Q}{50} \right)^2 \cdot m_{dr}$$

Beispiel: 60 Statornuten, 1500/min, Statornutzfrequenz: 1500 Hz

Grundwellen-Zahnflussdichte: $B_{dr}(x) \sim B_{dr} \cdot \sin(x\pi/\tau_p)$: Deshalb sind Verluste prop. zu $B_{dr} / \sqrt{2}$

Rotorzahnflussdichteamplitude:

$$\Delta B_{dr} = \frac{B_{dr} \cdot \beta \cdot k_{Cs}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot Q_s / Q_r)}{\pi \cdot Q_s / Q_r} = \frac{1.41 \cdot 0.391 \cdot 1.5}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot 60 / 50)}{\pi \cdot (60 / 50)} = -0.091T$$

Pulsationsverluste: $P_{puls,r} = 1.8 \cdot \left(\frac{0.091}{1.0} \right)^2 \cdot 0.4 \cdot \left(\frac{1500}{50} \right)^2 \cdot 127.8 = \underline{\underline{688W}}$

Leerlauf-Zusatzverluste bei Käfigläufer-Asynchronmaschinen

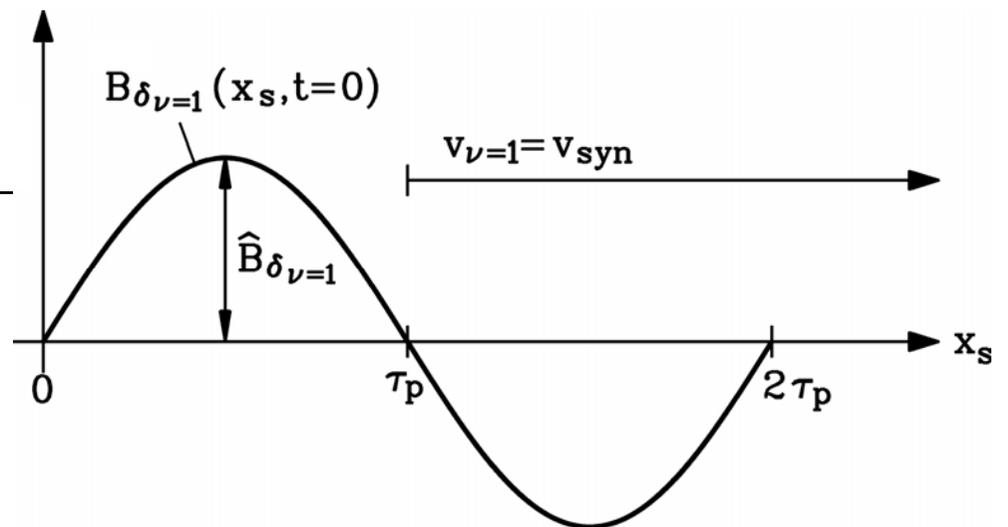
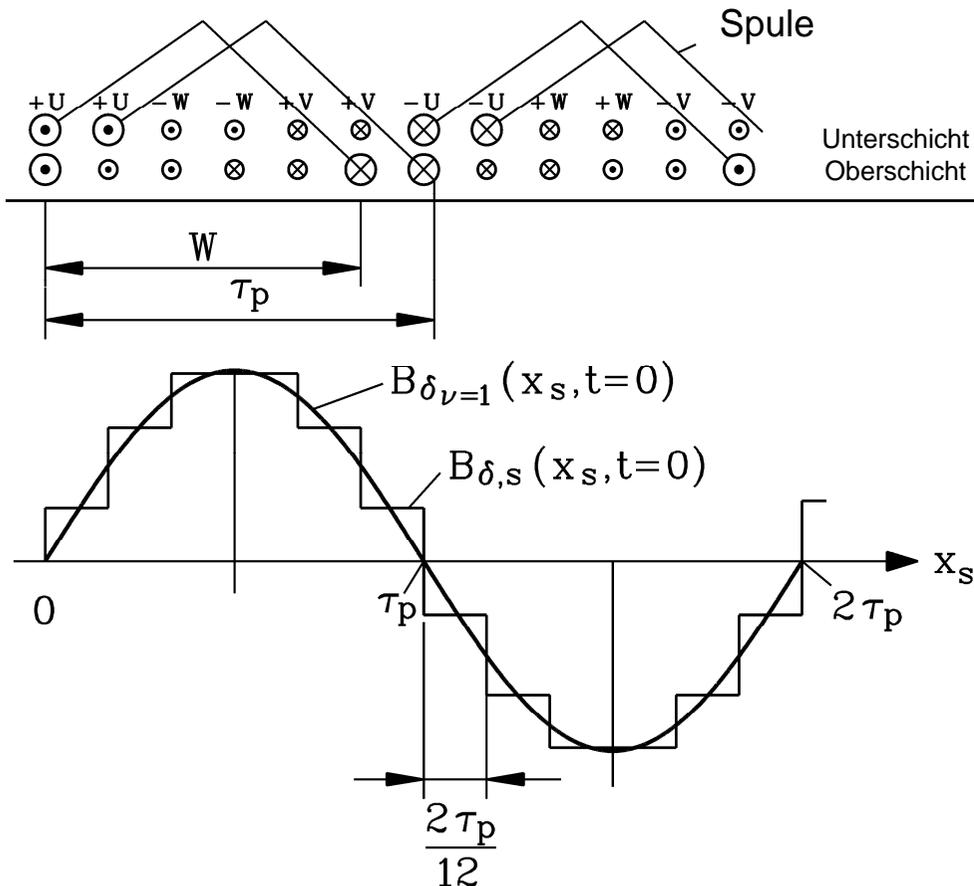
- **Leerlaufzusatzverluste** treten bei Leerlauf der Asynchronmaschine auf (Schlupf $s = 0$) !
- Sie umfassen **Zahnpulsationsverluste** (hauptsächlich in den Rotorzähnen wegen der größeren Statornutöffnungen), **Rotor-Oberflächenverluste** und **Käfigzusatzverluste** durch die Oberwellen des Leerlauf-Luftspaltfelds!
- Sie werden während des **Leerlaufversuchs im Prüffeld** gemessen !
- Sie sind daher **in den gemessenen Ummagnetisierungsverlusten („Eisenverlusten“)** bei Leerlauf **enthalten** und sind ein Grund dafür, dass die gemessenen Ummagnetisierungsverluste i. A. größer ausfallen als die berechneten, wenn keine „Korrekturwerte“ $k_V > 1$ verwendet werden!
- Beispiel:

550 kW: Käfigläufer-Asynchronmotor:

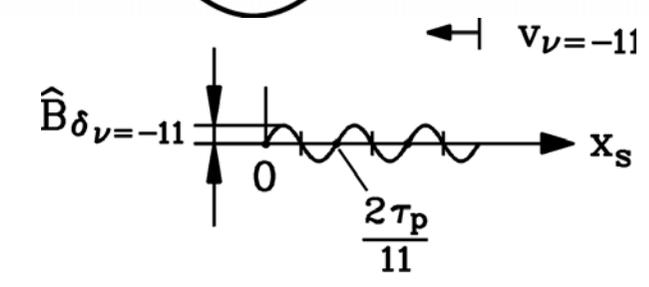
Wirbelstromverluste Hystereseverluste Leerlaufzusatzverluste (Oberflächen- + Pulsationsverluste)

$$4871 \text{ W} + (1220 \text{ W} + 688 \text{ W}) = 6779 \text{ W} \text{ „Gemessene“ Ummagnetisierungsverluste!}$$

Ständer-Luftspaltfeld: Grund- und Oberwellen infolge der Statornutung



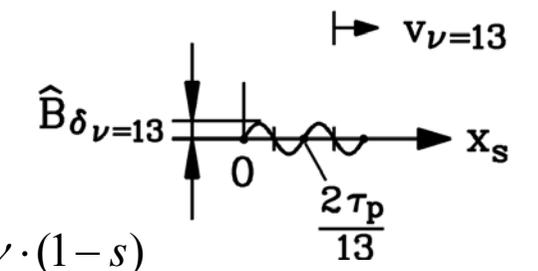
Beispiel:
 $m = 3, q = 2$
Sehnung 5/6



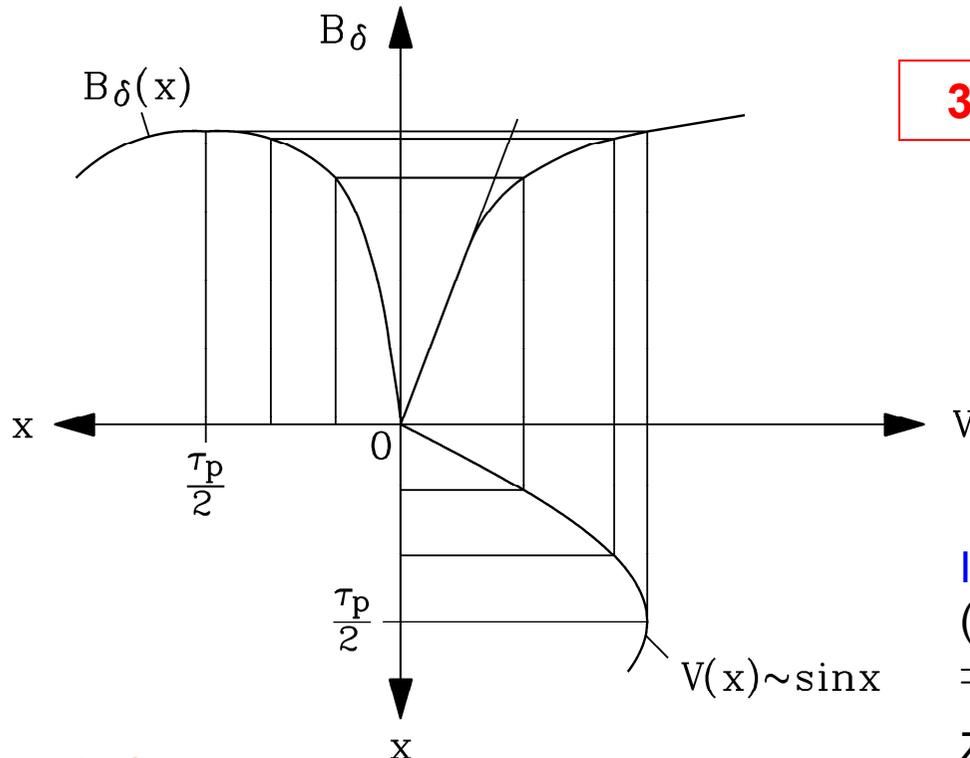
FOURIER-Reihe: Zerlegung in Grundwelle und Oberwellen:

Oberwellen: Amplitude, Wellenlänge, Geschwindigkeit sinken mit steigender Ordnungszahl ν , daher: Schlupf der ν -ten Stator-Oberwelle gegenüber dem Rotorkäfig:

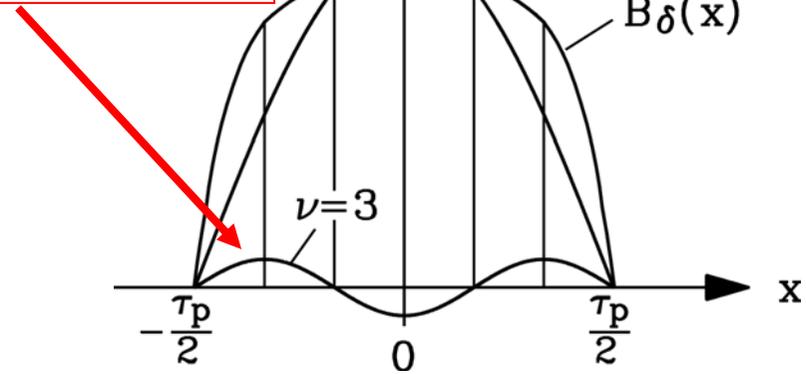
$$s_{\nu} = \frac{n_{syn,\nu} - n}{n_{syn,\nu}} \Rightarrow s_{\nu} = 1 - \nu \cdot (1 - s)$$



Statoroberwelle durch Eisensättigung = „dritte“ Feldharmonische = Sättigungsoberwelle



3. Oberwelle



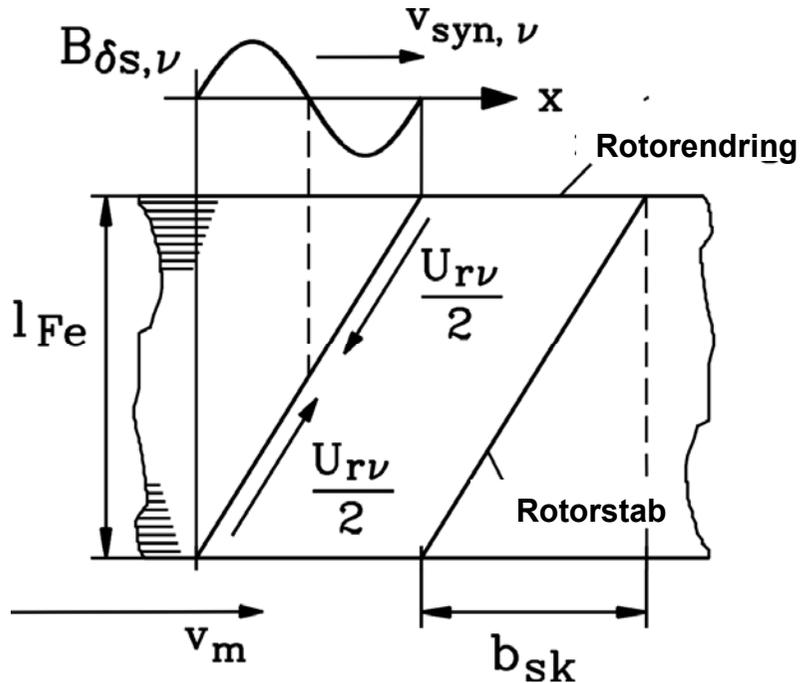
Idealfall: Sinusförmig verteilte Durchflutung im Luftspalt
(= unendlich feine Nutung, unendlich hohe Strangzahl)
⇒ sinusförmig verteilte magnetischen Spannung $V(x)$
Zugehöriges Luftspaltfeld ist wegen der Eisensättigung
abgeflacht, enthält also eine **dritte Oberwelle!**

3. Oberwelle:

$$B_{\delta s, \nu=3}(x_s, t) = B_{\delta s, \nu=3} \cdot \cos\left(\frac{3x_s \pi}{\tau_p} - 3\omega_s t\right)$$

- Die dritte Oberwelle bewegt sich gleich schnell wie die Grundwelle und induziert daher den Käfig mit dreifacher Frequenz: $s \cdot 3f_s$
- Es fließt mit dieser Frequenz je Stab ein Käfigoberstrom $I_{r\nu=3}$ und verursacht Verluste!

Die Rotorschrägung vermindert die Rotoroberströme!



Stabschrägung (b_{sk}): Für eine bestimmte Stator-Oberwelle ν ist induzierte Spannung $U_{r\nu}$ in den beiden Stabhälften gegenphasig \Rightarrow hebt sich auf $\Rightarrow U_{r\nu} = \Delta v_\nu \cdot B_\nu \cdot l = 0$
 \Rightarrow Zugehöriger Rotoroberstrom $I_{r\nu}$ für diese Ordnungszahl ν „unterdrückt“ = **Schrägungsfaktor** ist Null!

Schrägungsfaktor:

$$\chi_\nu = \frac{\sin(S_\nu)}{S_\nu}, \quad S_\nu = \frac{\nu \pi b_{sk}}{2\tau_p}$$

Verringerung des Rotoroberstroms $I_{r\nu}$ um den Schrägungsfaktor χ_ν :

$$\underline{I}_{r\nu} = -j \frac{(2m_s \cdot N_s k_{ws\nu} / Q_r) \cdot \omega_s L_{rh\nu}}{R_r / s_\nu + j \cdot \omega_s (L_{r\sigma\nu} + L_{rh\nu})} \cdot \chi_\nu \cdot \underline{I}_s$$

Beispiel: Vierpoliger Käfigmotor: 36/28 Stator-/Rotornuten.

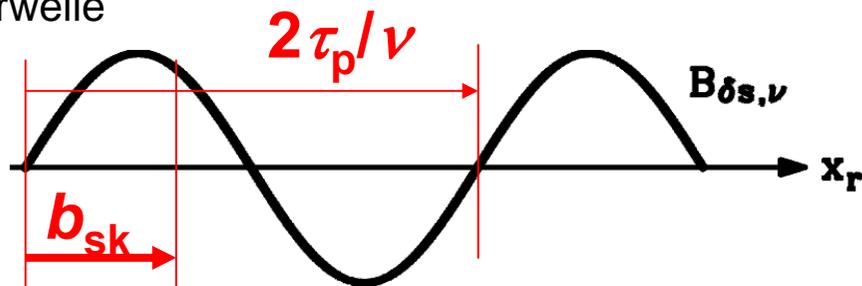
Rotornuten geschrägt um eine Statornutteilung: $b_{sk} = \tau_p / 9$

Schrägungsfaktor für unterschiedliche Ordnungszahlen der Statoroberwellen:

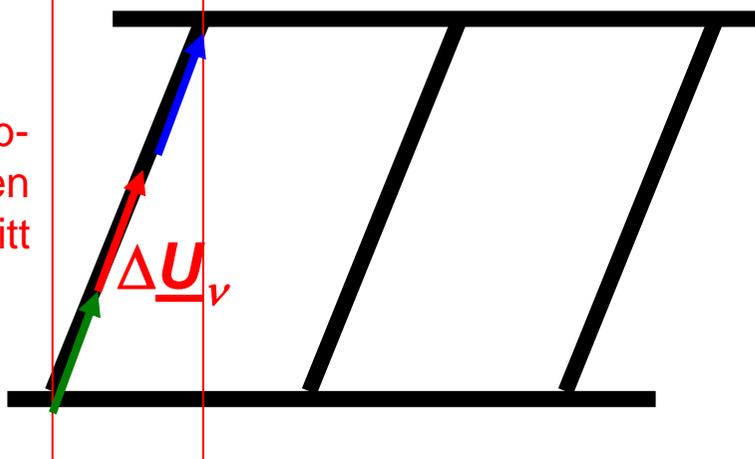
ν	1	-17	19	-35	37
χ_ν	0.9949	0.0585	-0.0523	-0.0284	0.0267

Schrägungsfaktor χ_ν für den Rotorkäfig: Herleitung

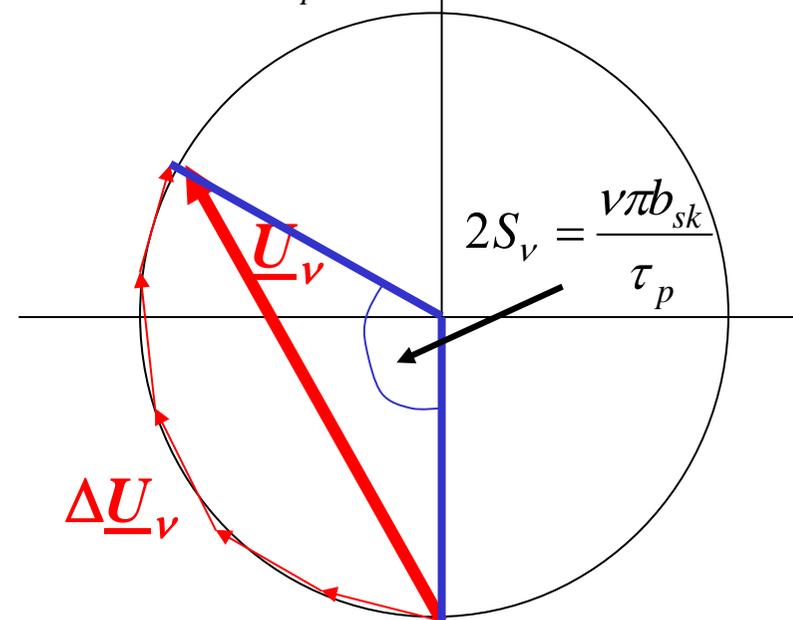
ν -te Statoroberwelle



Induzierte Stab-Teilspannungen je Stababschnitt



$$2S_\nu = 2\pi \cdot \frac{b_{sk}}{2\tau_p/\nu}$$



$$\chi_\nu = \frac{|\underline{U}_\nu|}{\left| \sum \Delta \underline{U}_\nu \right|} = \frac{2 \sin(S_\nu)}{2S_\nu} = \frac{\sin(S_\nu)}{S_\nu} = \frac{\sin\left(\frac{\nu\pi b_{sk}}{2\tau_p}\right)}{\frac{\nu\pi b_{sk}}{2\tau_p}}$$

Summierung der induzierten Teilspannungen je Stab $\Delta \underline{U}_\nu$ zur resultierenden Stabspannung \underline{U}_ν

Das unerwünschte Auftreten von Querströmen

Querwiderstand

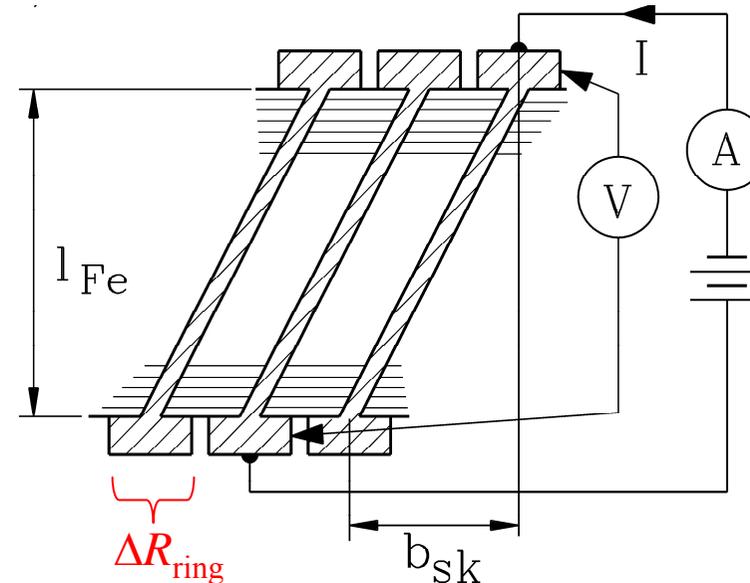
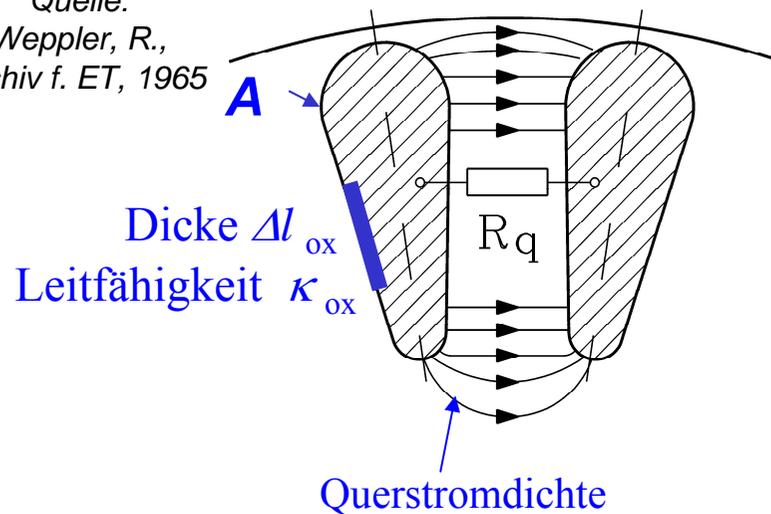
$$R_q = \frac{\Delta l_{ox}}{\kappa_{ox} \cdot A}$$

zwischen zwei Stäben hängt ab von:

- Dicke der Oxidschicht Δl_{ox} zwischen Stab und Läuferblechpaket
- Leitfähigkeit der Oxidschicht κ_{ox} .

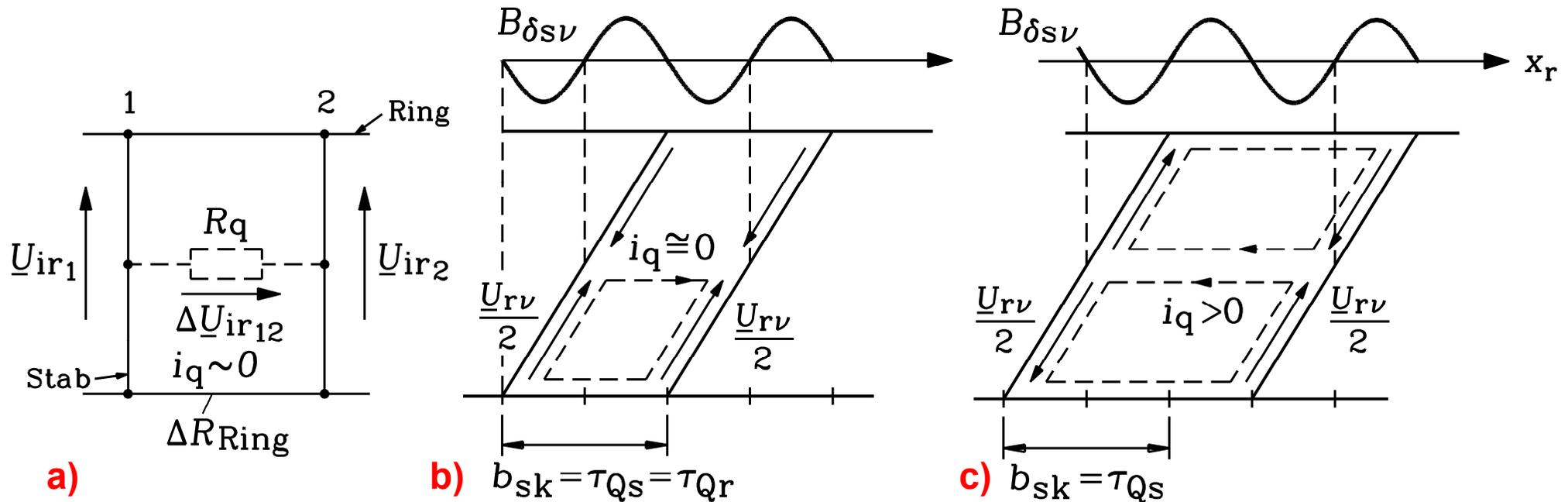
Typische Werte für Aluminiumdruckgusskäfige: $r_q = R_q \cdot A = \Delta l_{ox} / \kappa_{ox} = 10^{-6} \Omega \cdot m^2$

Quelle:
Wepler, R.,
Archiv f. ET, 1965



- **Messaufbau** für den Querwiderstand $R_q = U/I - R_{Stab} - \Delta R_{ring}$
- Der Querwiderstand R_q ist i. A. deutlich höher als der Stab- oder der Endringwiderstand !

Die Querstrom-Verluste hängen ab von Schrägungsmaß b_{sk} und Nutzahlverhältnis Q_s/Q_r



Induzierende statornutharmonische Feldoberwelle (Wellenlänge \approx Statornutteilung):

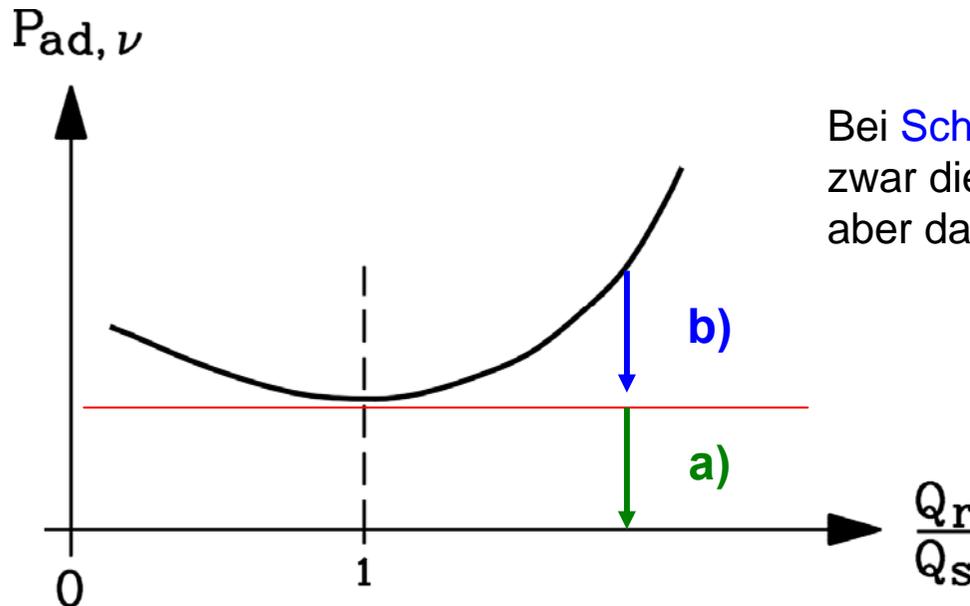
a) **Ungeschrägter Käfig:** (Fast) **keine** Querströme, da $\Delta R_{Ring} \ll R_q$

Käfig ist um eine Statornutteilung geschrägt:

b) **Geschrägter Käfig:** Bei gleichen Nutzahlen $Q_r = Q_s$: (Fast) **kein** Querstrom

c) **Geschrägter Käfig & $Q_r = Q_s/1.5$:** **Großer Querstrom fließt**, da sich die induzierten Teilspannungen der Nachbarstäbe addieren!

Einfluss des Nutzahlverhältnisses auf die Querstromverluste



Bei **Schrägung** des **nichtisolierten Läuferkäfigs** werden zwar die Käfigzusatzverluste verringert, aber dafür treten **Querstromverluste** auf!

$$P_{ad,r} = Q_r \cdot \sum_{v>1}^{\infty} (R_r I_{rv}^2 + R_q I_{qv}^2)$$

a) Käfigzusatzverluste **b) Querstromverluste**

$Q_s = Q_r$: Bei $Q_r/Q_s = 1$ sind die Querstromverluste minimal.

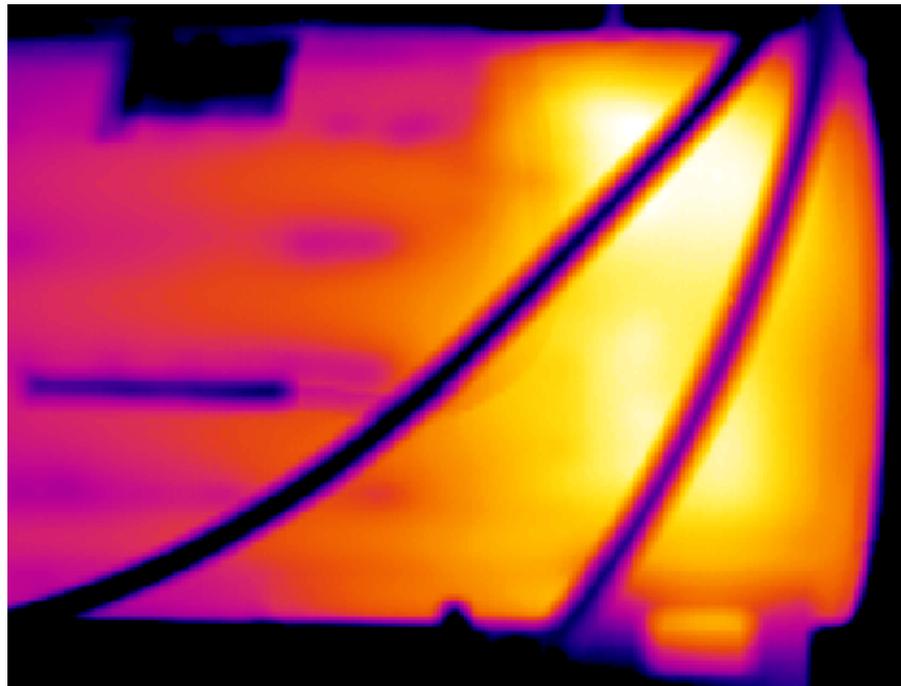
$Q_s > Q_r$: Bei kleinerer Rotornutzahl nimmt der Oberwellenstreufloss der Rotoroberstrom-Systeme zu. Dessen Streu-Selbstinduktivität $L_{r\sigma v}$ begrenzt die Käfigoberströme, aber vor allem auch die Querströme: **KLEINE VERLUSTE $P_{ad,r}$**

$Q_s < Q_r$: Bei größerer Rotornutzahl haben wegen der feineren Nutung auch die Rotorfeldwellen der Rotoroberströme eine „sinusförmigere“ Form. Der Oberwellen-Streufloss ist daher kleiner und damit auch $L_{r\sigma v}$, so dass die Querströme weniger gut begrenzt werden: **GROSSE VERLUSTE $P_{ad,r}$**

*Netzgespeiste Asynchronmaschinen (ihre Anlaufmomentkurve ist durch Oberwellenmomente verzerrt), **müssen geschrägt sein**, um Oberwellenmomente zu minimieren. Dadurch treten **Querströme** auf, so dass **$Q_s > Q_r$ ausgeführt werden muss**, um die Zusatzverluste klein zu halten!*

Sonderprobleme bei elektrischen Maschinen

15. Erwärmung, Kühlung



Infrarotbild
1,5 MW Asynchrongenerator
Nennlast

Quelle: ELIN Motoren GmbH

15. Erwärmung, Kühlung

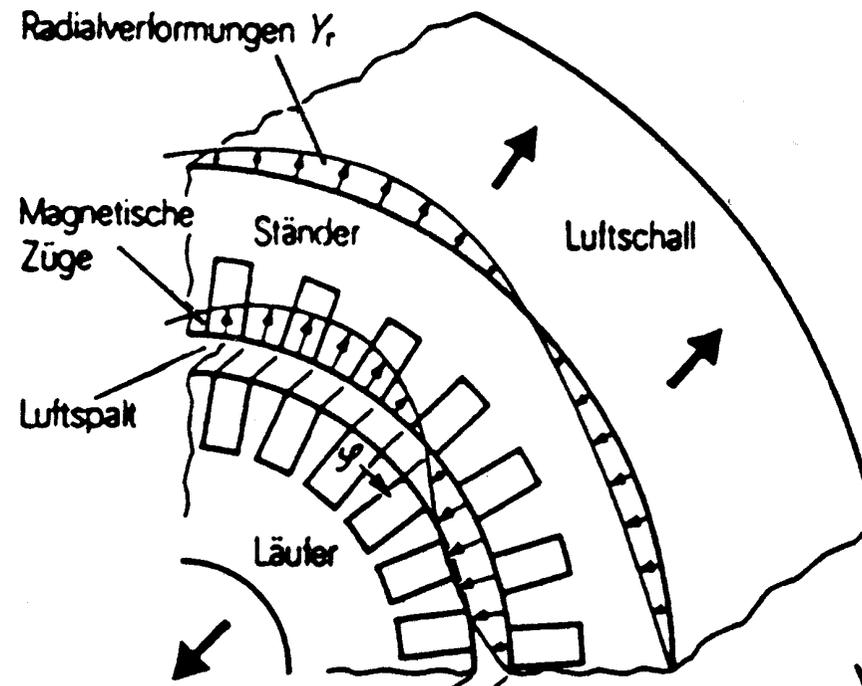
15.1 Erwärmungsberechnung - Methoden

15.2 Kühlverfahren

15.3 Betriebsarten

Sonderprobleme bei elektrischen Maschinen

16. Magnetisch erregte Geräusche in elektrischen Maschinen



Quelle: Seinsch, H.-O.: Oberwellenerscheinungen in Drehfeldmaschinen, Teubner, 1992

16. Magnetisch erregte Geräusche in elektrischen Maschinen

16.1 Magnetische Luftspaltfeldwellen

16.2 Magnetische Zusatzmomente und Geräusche durch Oberwellen bei Sinusspeisung

16.3 Magnetische Geräusche durch Oberschwingungen bei Umrichterspeisung