

Hochausgenutzte Permanentmagnet-synchronmaschinen

Andreas Binder
Elektrische Energiewandlung
TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de

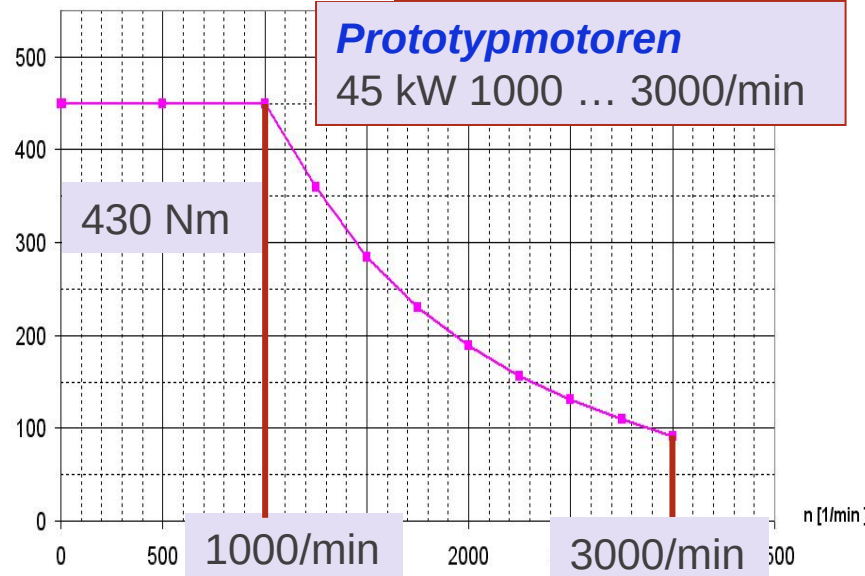
Vortrag - Inhaltsübersicht

- Bemessung hoch ausgenützter PM-Synchronmaschinen
- Ausgeführte Prototypen
- Läuferzusatzverluste
- Geräuschproblematik bei Zahnspulen
- Zusammenfassung

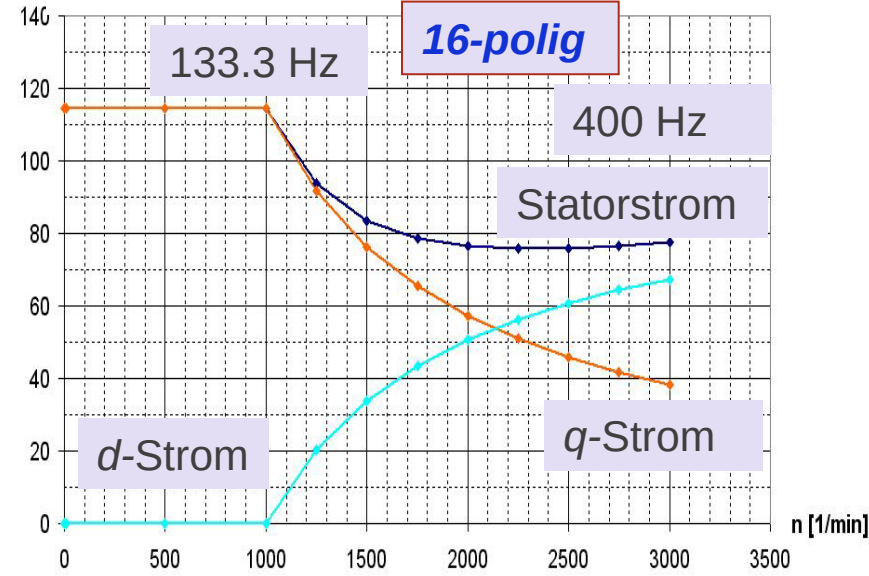
High-torque-Antriebe für höhere Drehzahlen

- **Zahnpulentechnologie** und **Permanentmagnetläufer** :
 - kompakte Statoren
 - niedrige Stromwärmeverluste
 - hohe Induktivität für gute Feldschwächbarkeit
 - hohe Kraftdichte
- Genutzt für Servoantriebe, High-torque-Antriebe !
- Auch nutzbar für Industrieantriebe mit höheren Drehzahlen ?

Drehmoment / Nm

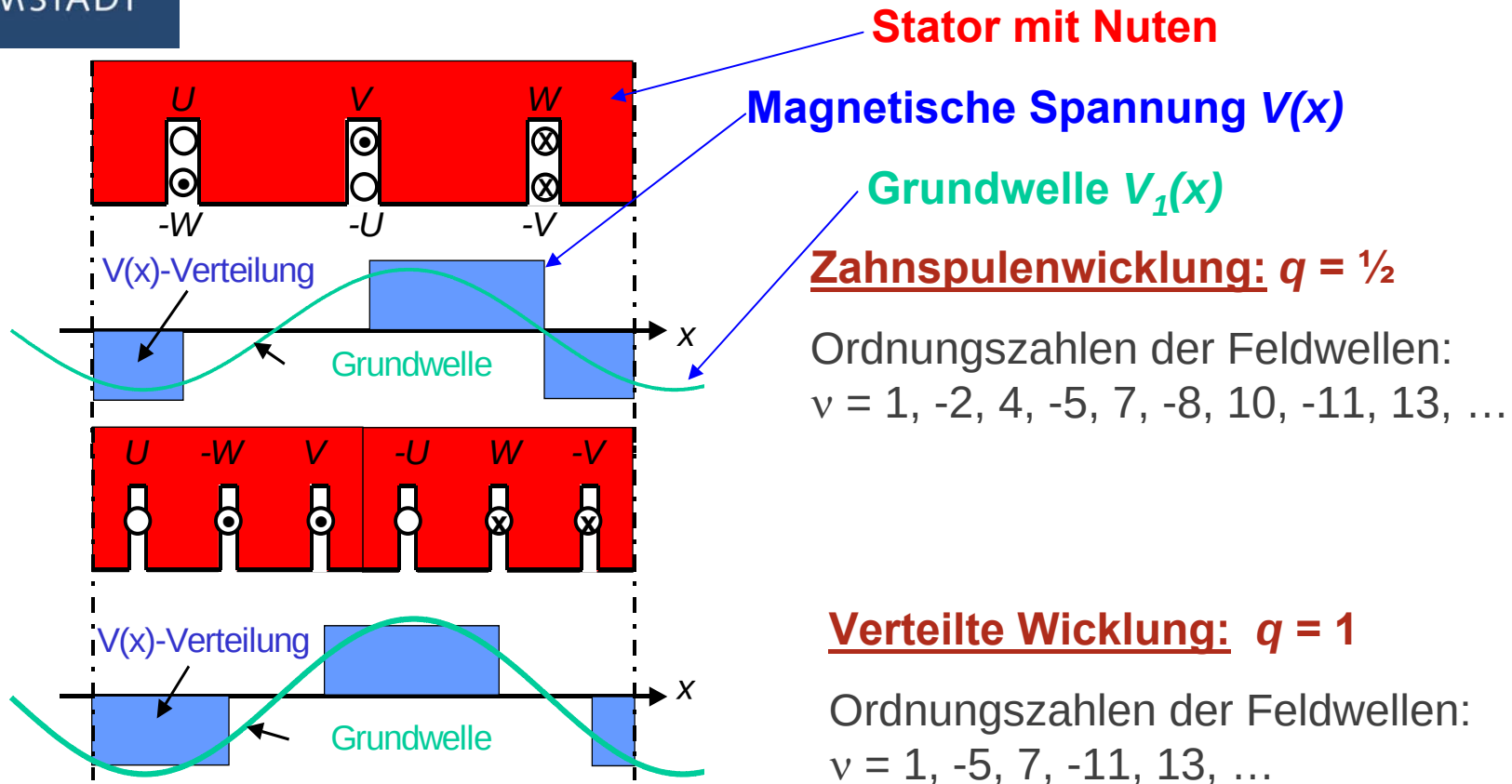


Strom / A



Entwurf VOR Optimierung !

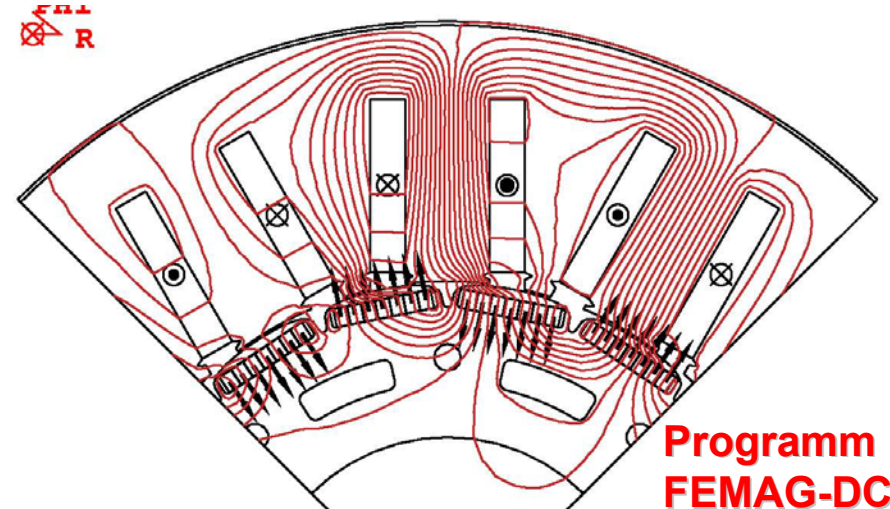
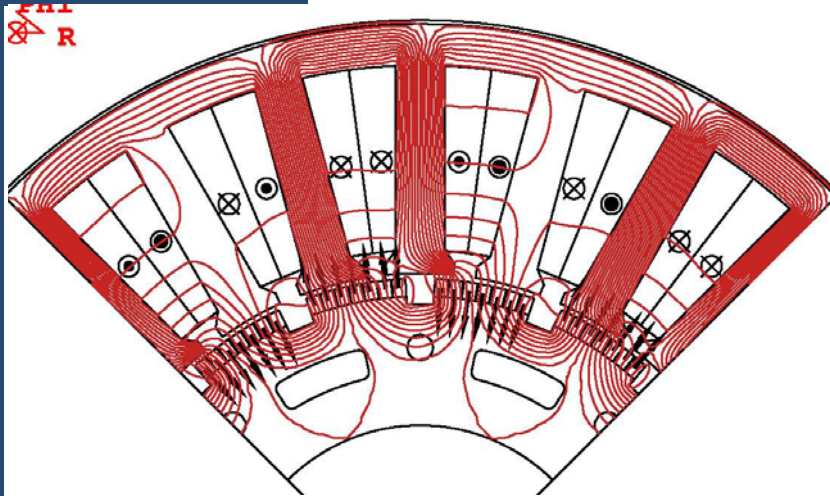
Zahnspulenwicklung vs. verteilte Wicklung



Ständerfeldverteilung für Zeitpunkt:

$i_U = 0, i_V = -i_W = I$ (Augenblickswert des Strangstroms).

Bemessung von Motor A und Motor B



Alternative Motorkonzepte: 16-polige Statoren

Motor A: $q = 0.5$

Motor B: $q = 0.25$

Wirkungsgrad *) 93.7% / 95.3 %

92.8 % / 93.3 %

45 kW 1000 / 3000/min

1000 / 3000/min

Magnettemperatur 87°C

115°C

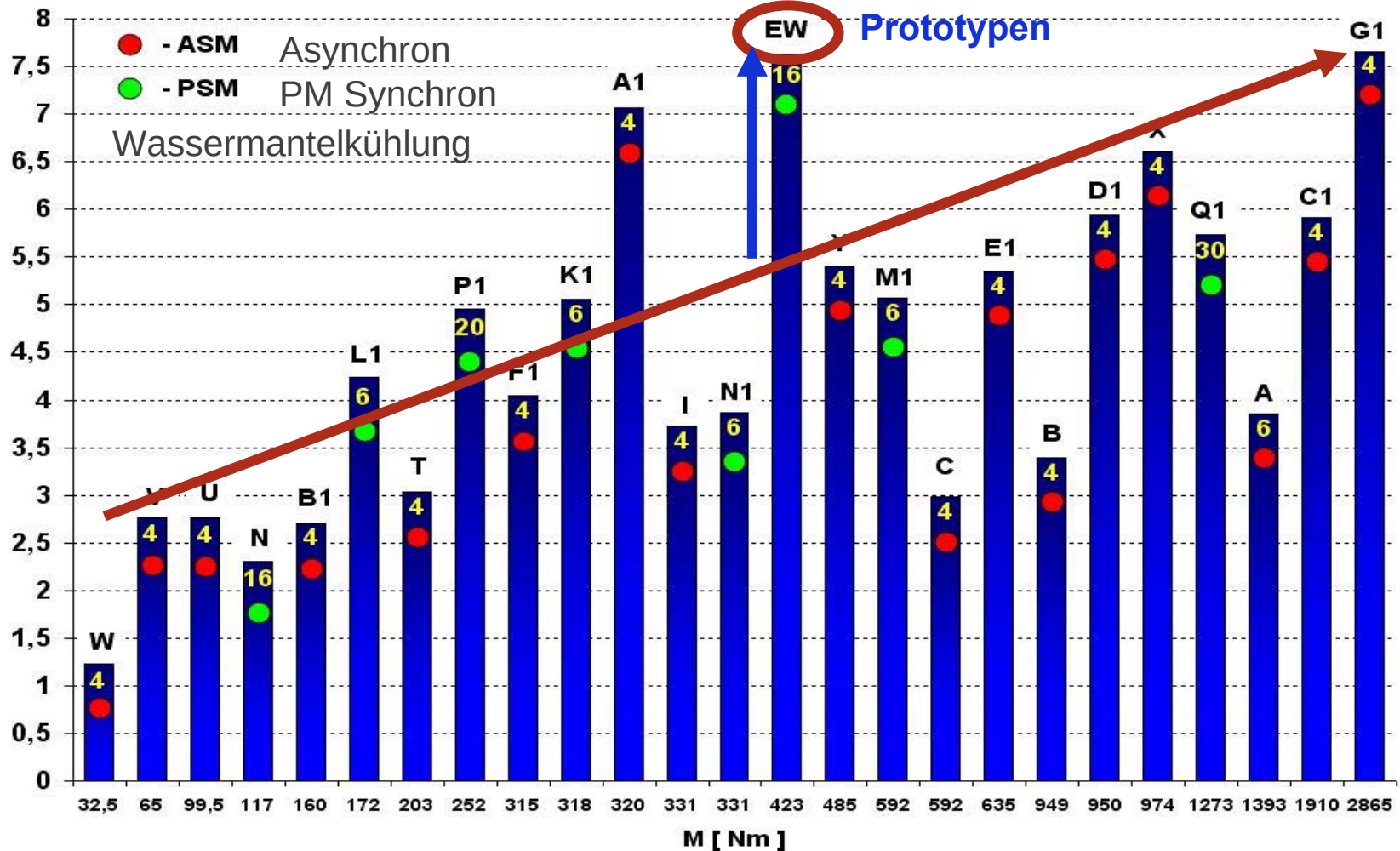
*) direkter Wirkungsgrad, *gemessen* bei:
Umrichterspeisung, Wärmeklasse F, 45 °C Kühlwasser

Erreichte *ESSON*-Ausnutzungsziffer

- Hohe Ausnützung im Vergleich

c [kWmin/m³]

$$C = \frac{P_N}{d_{si}^2 \cdot l_{Fe} \cdot n} = \frac{2\pi \cdot M_N}{d_{si}^2 \cdot l_{Fe}} \sim \frac{M_N}{V_{aktiv}} \sim k_w \cdot A \cdot B$$



Verlustverteilung bei 45 kW

Verluste in Watt (berechnet)	Motor A		Motor B	
Drehzahl (1/min)	1000	3000	1000	3000
Stromwärmeverluste *)	1893	856	2273	1891
Ummagnetisierungsverluste – Zähne	628	911	551	1207
Ummagnetisierungsverluste – Joch	246	177	266	297
Wirbelstromverluste: Magnete / Rotoreisen	28/4	89/8	25/140	85/585
Reibungsverluste	10	30	10	30
Gesamtverluste (ohne Kühlmittelpumpe)	2808	2072	3266	4074
Gemessen: Gesamtverluste	3015	2204	3471	3253
Gemessen: Erwärmung Wicklung/Magnete (K)	66/39	50/40	64/48	64/66

*) inkl. Zusatzverluste durch Stromverdrängung (Sinusgrundschwingungs- und Umrichtereinfluss – Schaltfrequenz 2 kHz)

Elektromagnetische Kennwerte

45 kW, 230 V/Strang		Motor A		Motor B	
Drehzahl	(1/min)	1000	3000	1000	3000
Strangstrom (gemessen)	(A)	102	64	119	70.5
Leistungsfaktor (gemessen)		0.7	1	0.6	0.94
Drehmoment	(Nm)	430	143	430	143
Drehmoment / Gesamtmasse	(Nm/kg)	2.15	-	2.10	-
Drehmoment / Aktivmasse	(Nm/kg)	5.56	-	4.77	-
Leistungsdichte / Aktivmasse	(kW/kg)	0.58	0.58	0.5	0.5
Momentenwelligkeit *)	(% Nennmoment)	7	7.3	6.4	2.7
Therm. Belastung A·J	(A/cm·A/mm ²)	6550	2580	5603	1967

*) Motoren ungeschrägt

Vortrag - Inhaltsübersicht

- Grundsatzüberlegungen zur Stator- und Rotortopologie
- **Ausgeführte Prototypen**
- Läuferzusatzverluste
- Geräuschproblematik bei Zahnspulen
- Zusammenfassung

Zwei alternative Motorkonzepte: 16-polige Statoren

Motor A: $q = 0.5$ **Motor B: $q = 0.25$**

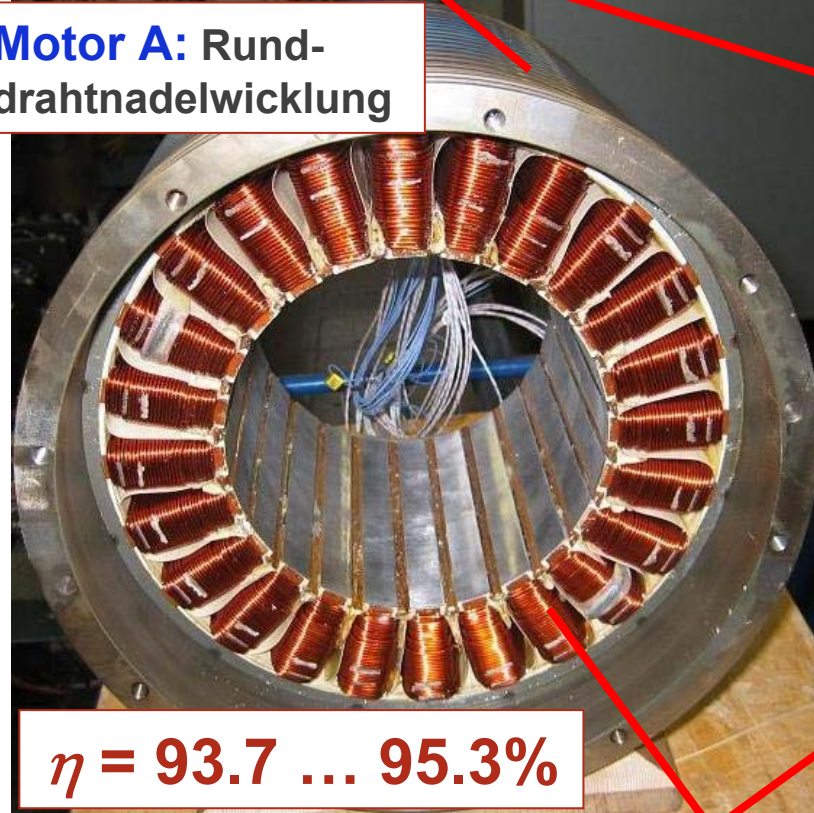
**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste**

Kühlmantel

Zahnspule

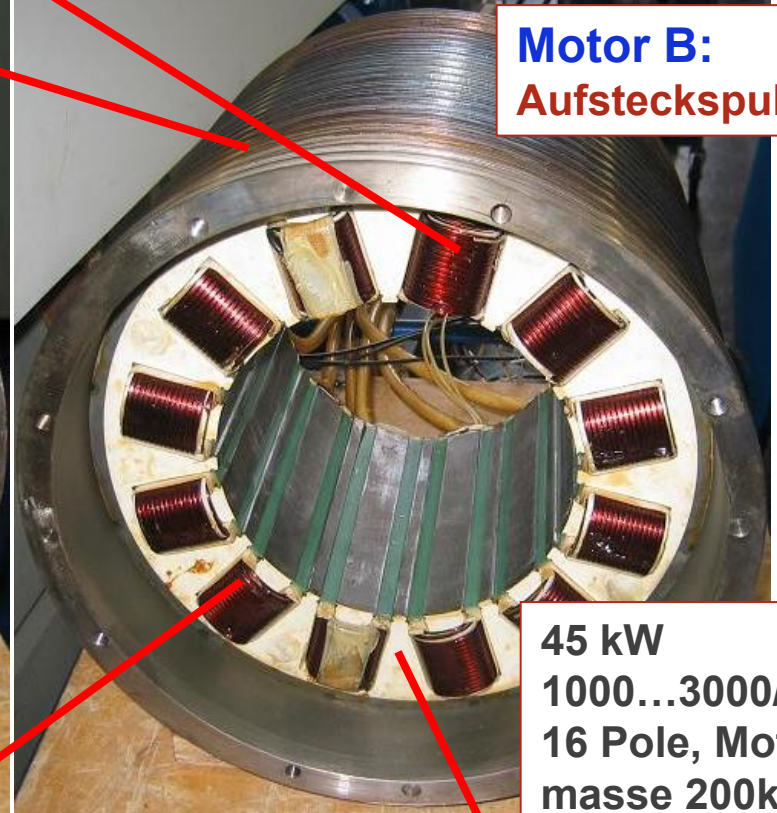


**Motor A: Rund-
drahtnadelwicklung**



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

**Motor B:
Aufsteckspulen**



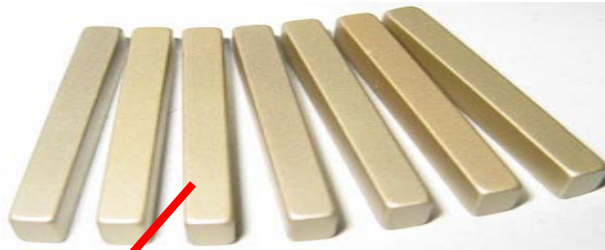
**45 kW
1000...3000/min
16 Pole, Motor-
masse 200kg**

Stator-Wicklung

Blechpaket

Vermeidung von Magnetverlusten: Segmentierte NdFeB-Magnete

Permanentmagnete erzeugen
verlustfrei das Magnetfeld



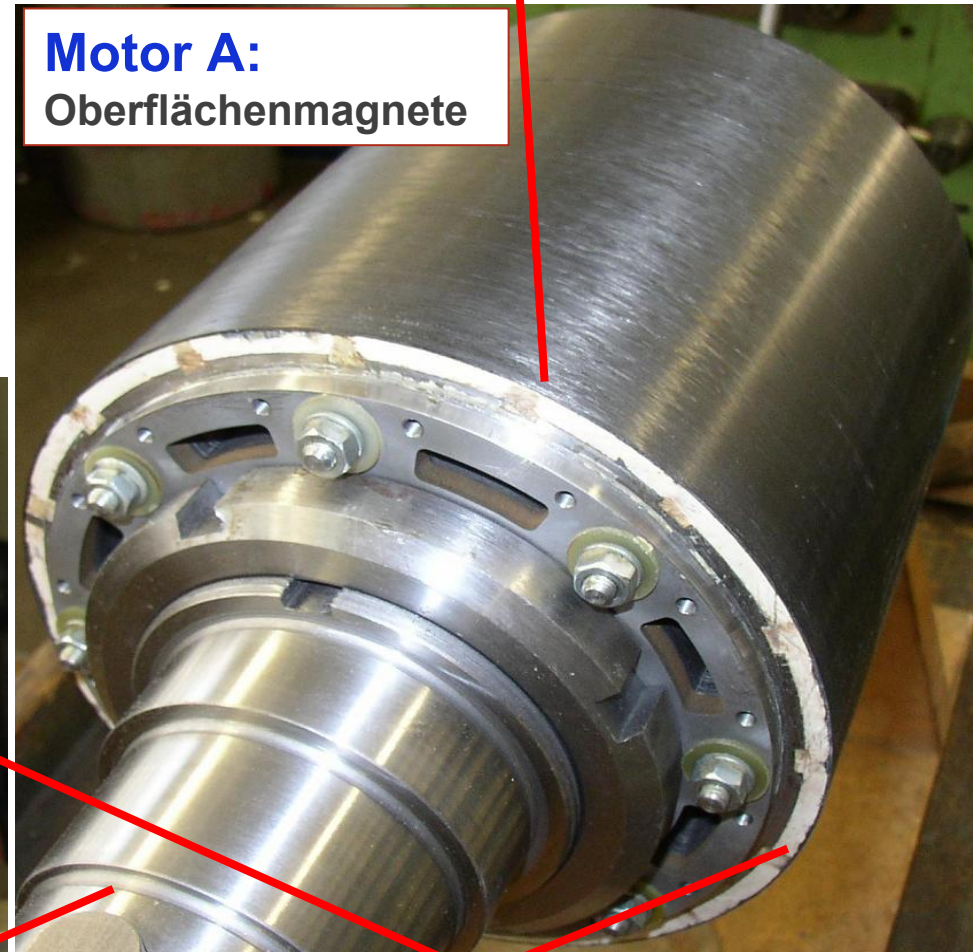
Magnete



Welle

Kohlefaserbandage

Motor A:
Oberflächenmagnete



Rotorblechpaket

Motor B: Versenkte Rotormagnete

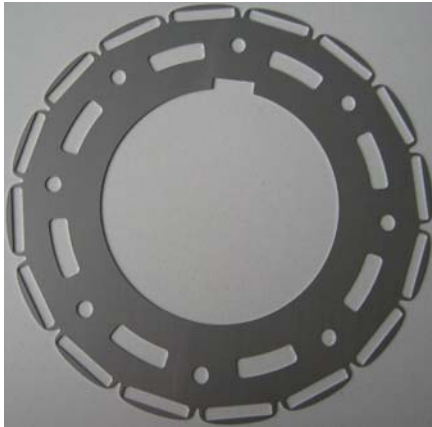
Magnete



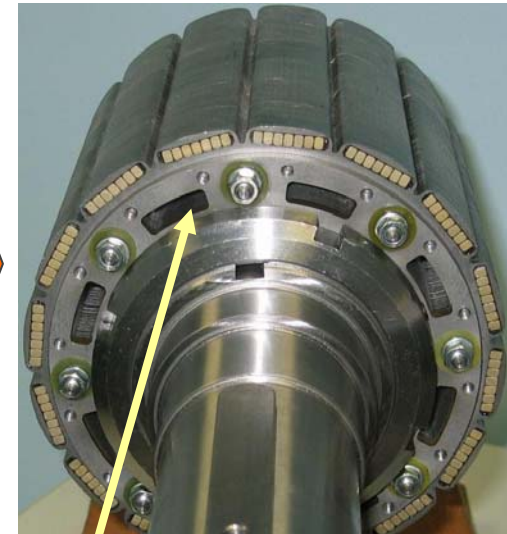
Motor B

6 Teilpakete

Komplettierter Rotor B



Rotorblech



Interner Luftkreislauf

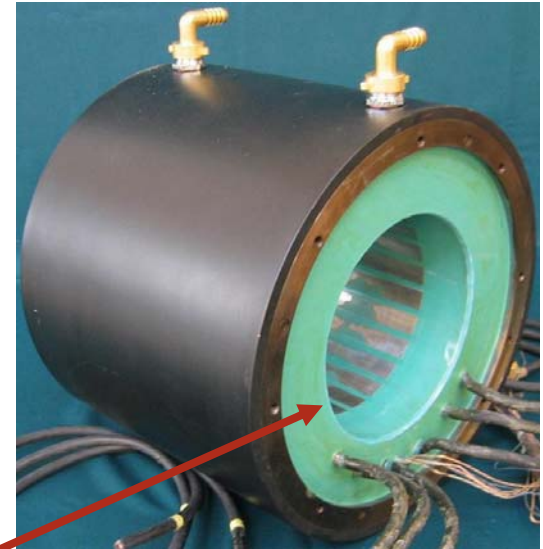
Intensivierte Kühlung

- **Flüssigkeitsmantelkühlung**
- **Interner Luftkreislauf**
- **Verguss** der Ständerwicklung – thermische Anbindung an Kühlmantel

Kühlmantel



Flüssigkeitskühlung indirekt



Verguss

Vortrag - Inhaltsübersicht

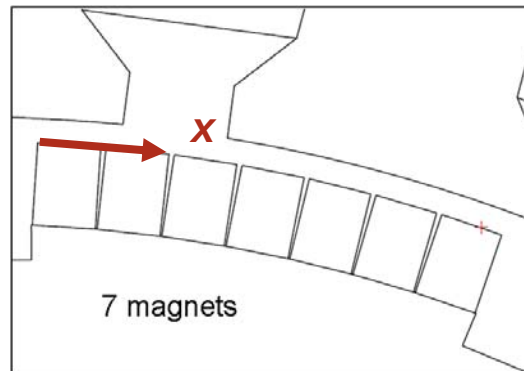
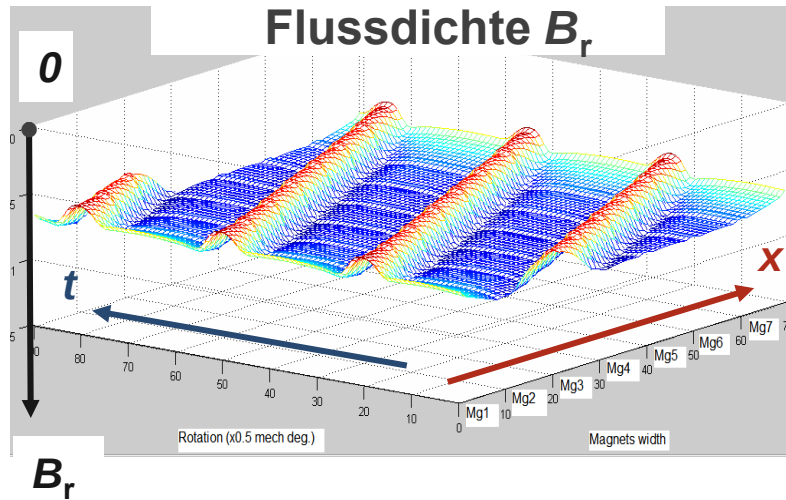
- Grundsatzüberlegungen zur Stator- und Rotortopologie
- Ausgeführte Prototypen
- **Läuferzusatzverluste**
- Geräuschproblematik bei Zahnspulen
- Zusammenfassung

Einfluss der Läuferbauart auf Flusspulsationen in den Magneten bei Leerlauf infolge der Nutöffnungen

Drehzahl 1000/min, Radialkomponente der Flussdichte an der Magnetoberfläche

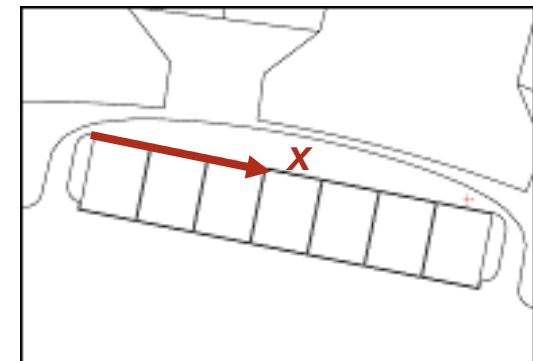
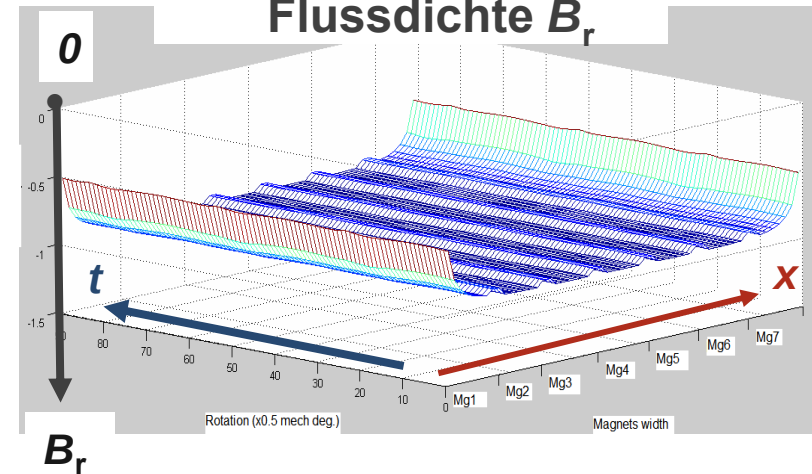
Motor A

Flussdichte B_r



Motor B

Flussdichte B_r



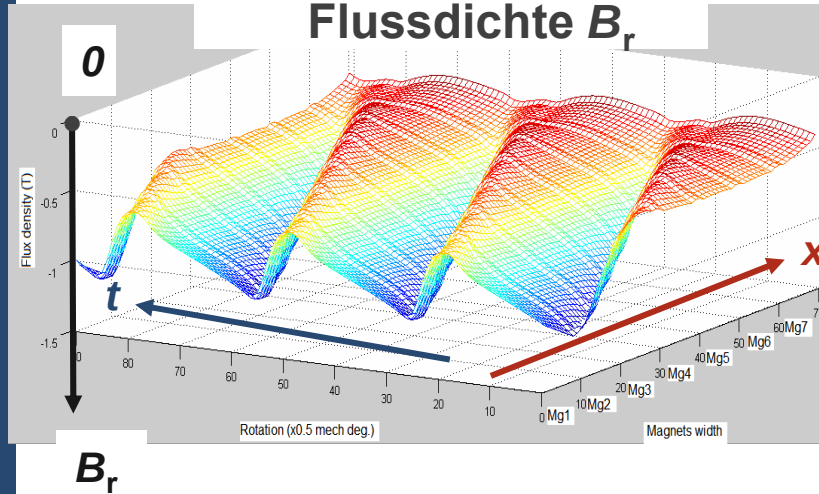
FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

Flusspulsationen in den Magneten bei Last – Sinusstrom, Feldoberwellen

Drehzahl 1000/min, Radialkomponente der Flussdichte an der Magnetoberfläche

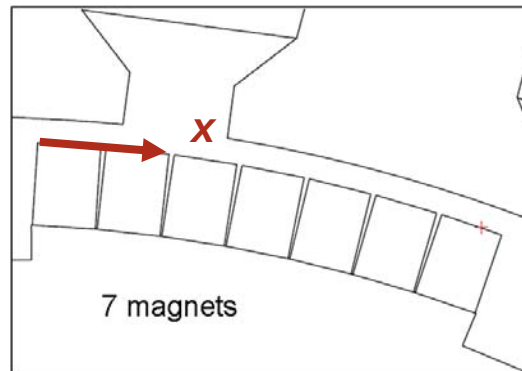
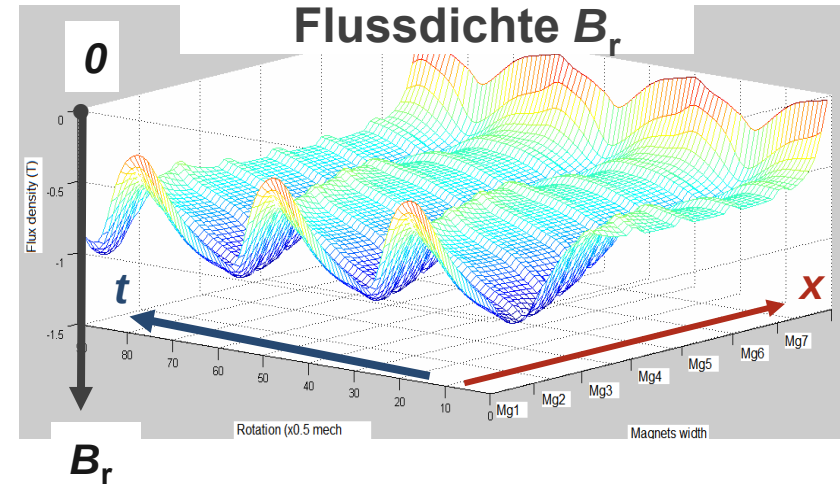
Motor A

Flussdichte B_r



Motor B

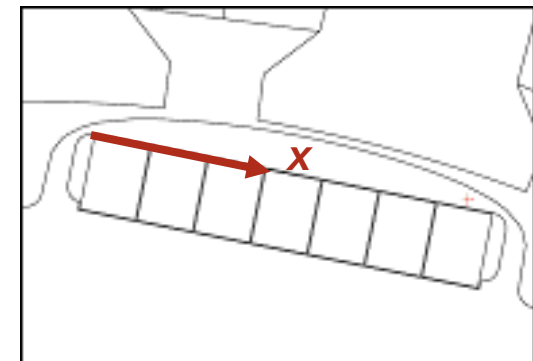
Flussdichte B_r



Nennlast

45 kW

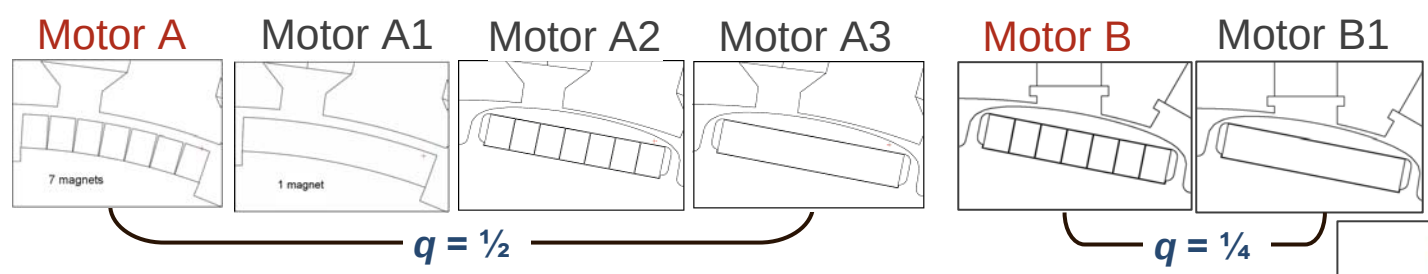
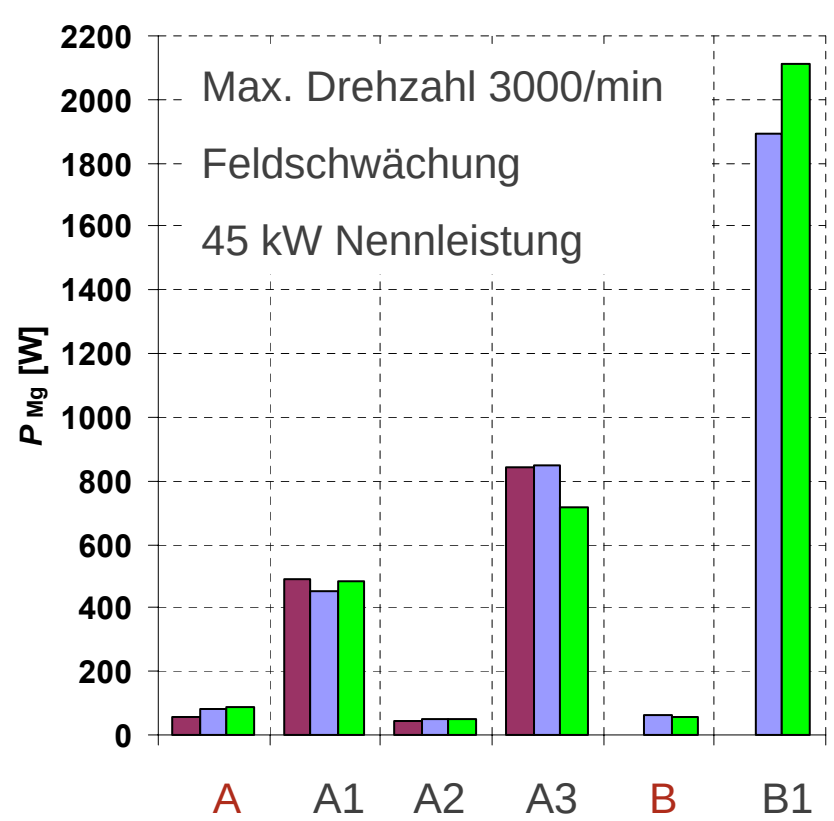
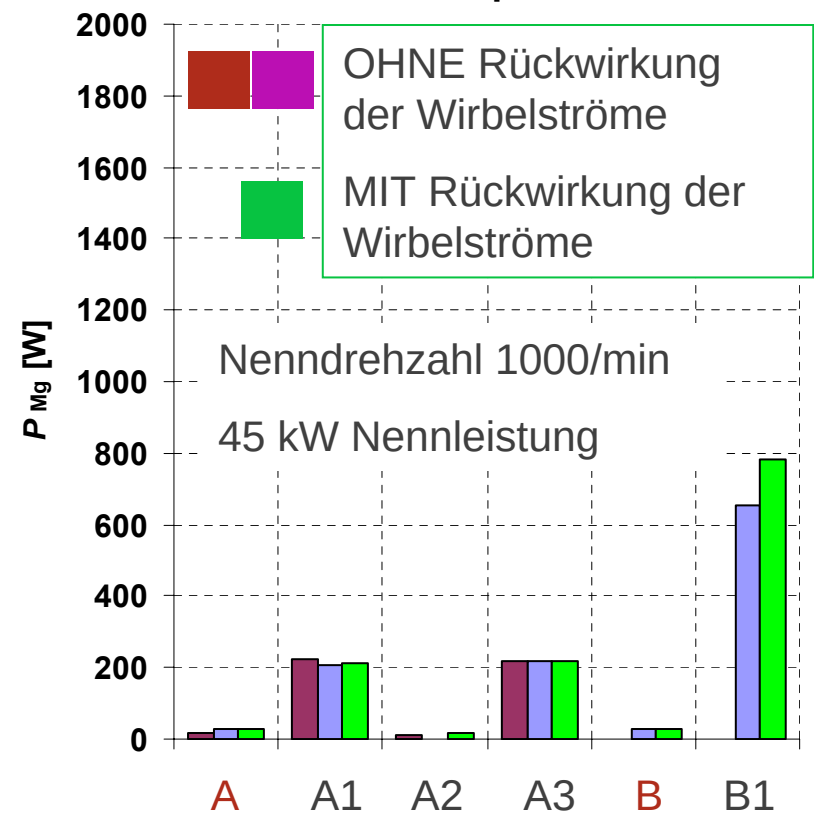
1000/min



FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

Berechnete Rotor-Wirbelstromverluste (Magnete, Eisen) Nennlast - Sinusstrom, Feldoberwellen

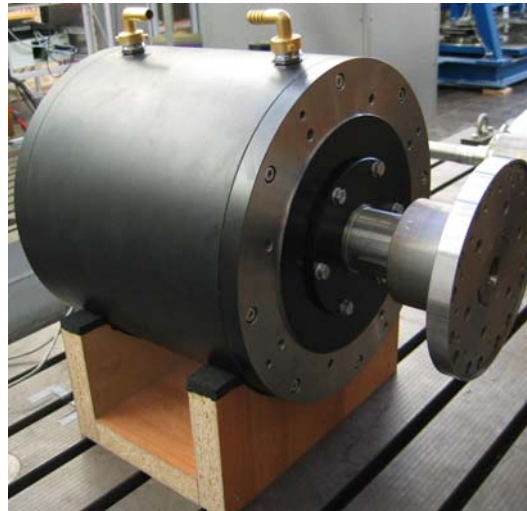
Verluste (Watt): Magnete: Segmentiert/Massiv, Oberflächen-/Versenkt



Vortrag - Inhaltsübersicht

- Grundsatzüberlegungen zur Stator- und Rotortopologie
- Ausgeführte Prototypen
- Läuferzusatzverluste
- **Geräuschproblematik bei Zahnspulen**
- Zusammenfassung

Die Prototypmotoren sind sehr leise !



- Flüssigkeitsmantelkühlung
- Bauform B5 (Flanschmotoren)
- Doppelmantel-Stahlgehäuse



Geräuschproblematik bei Zahnpulen

- **Zahnpulenwicklungen** ergeben kompakte Antriebe, aber erregen i. a. viele Unter- und Oberwellen im Luftspalt
- Die Unter-/Oberwellen können **magnetische Geräuschanregungen** ergeben.



Beispiel: PM-Waschmaschinenantrieb mit Außenläufer, Zahnpulen, Luftkühlung

Feldwellen:

Statorwicklung: $B_v \cos\left(\frac{v\pi x}{\tau_p} - \omega t\right)$

Rotormagnete: $B_\mu \cos\left(\frac{\mu\pi x}{\tau_p} - \mu\omega t\right)$

Radialkraftwellen:

$$\sigma \sim B_v \cos\left(\frac{v\pi x}{\tau_p} - \omega t\right) B_\mu \cos\left(\frac{\mu\pi x}{\tau_p} - \mu\omega t\right)$$

$$\sigma \sim \frac{B_v B_\mu}{2} \cos\left(\frac{(v \pm \mu) p \pi x}{p \tau_p} - (1 \pm \mu) \omega t\right)$$

Geräuschanregung: Beispiel

PM-Motor C: $2p = 8$ -polig, 12 Nuten, $q = \frac{1}{2}$, Zahnspulentechnik, versenkte NdFeB-Magnete, konstanter Luftspalt, halbgeschlossene Nuten

Knotenzahl der anregenden Radialkraftwellen: $2r = 2p(\nu \pm \mu)$

Tonfrequenz: $f_{Ton} = (1 \pm \mu)\omega / (2\pi)$

Dominante **Kraftanregung:**

a) Rotorgrundwelle $\mu = 1$ und Statoroberwelle $\nu = -2$

$$\nu = -2, \quad \mu = 1: \quad r = |(-2 + 1)p| = \underline{\underline{p}}, \quad f_{Ton} = |f(1 + 1)| = \underline{\underline{2f}}$$

b) Rotoroberwelle $\mu = 3$ und Statoroberwelle $\nu = -2$

$$\nu = -2, \quad \mu = 3: \quad r = (-2 + 3)p = \underline{\underline{p}}, \quad f_{Ton} = f(1 + 3) = \underline{\underline{4f}}$$

Es treten Anregefrequenzen mit 2-facher, 4-facher, 6-facher ... Statorfrequenz auf, wobei niedrigpolige Verformungen (8-polige Jochverformung, $2r = 2p = 8$) hauptsächlich mit $2f$ und $4f$ auftreten.

Geräuschmessung

PM-Motor C: $2p = 8$ -polig, Luftkühlung,
Umrichterbetrieb: Schaltfrequenz 16 kHz (MOS-FET)

Drehzahl n : 5000 ... 15000/min

Statorfrequenz f : 333 ... 1000 Hz

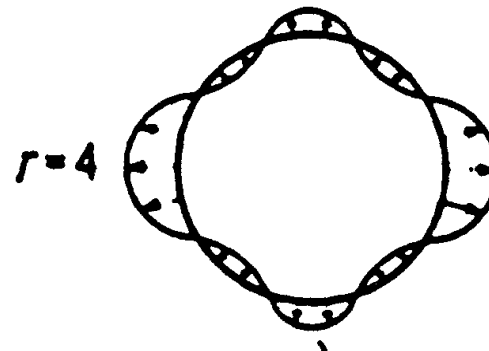
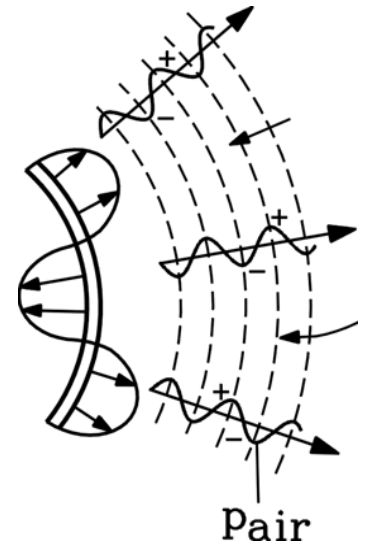
Geräuschanregung $2f$: 666 ... 2000 Hz

Resonanz bei $f = 1200$ Hz:

Jochschwingung verstärkt Geräuschabstrahlung: 20 dB(A)

Zunahme im Schalldruckpegel

Bei verteilter Wicklung tritt diese Verformung $r = 4$ nicht auf, da die Oberwelle $v = -2$ fehlt !



Vortrag - Inhaltsübersicht

- Grundsatzüberlegungen zur Stator- und Rotortopologie
- Ausgeführte Prototypen
- Läuferzusatzverluste
- Geräuschproblematik bei Zahnspulen
- **Zusammenfassung**

Ausblick

- Die **Evolution** der elektrischen Maschinen dauert nun schon seit **150 Jahren** und ist in einem beständigen Wandel, der durch
 - **neue Werkstoffe** für Motoren / Umrichter
 - **neue Applikationen**
 - verbesserte **Auslegungsverfahren** u. **Konstruktionsprinzipien** beflügelt wird.
- Dank **Zahnspulentechnik, Permanentmagneten, spezieller Kühlverfahren** ist auch im mittleren „Industriedrehzahlbereich“ eine Erhöhung der Momentendichte möglich.
- Durch zusätzliche Nutzung des **Reluktanzmoments** ist **Magnetersparnis** möglich
- Sorgfältige Auslegung wegen **Zusatzverlusten / Geräusch** erforderlich.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

abinder@ew.tu-darmstadt.de