

Hochausgenutzte Permanentmagnet- synchronmaschinen

Andreas Binder
Elektrische Energiewandlung
TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de



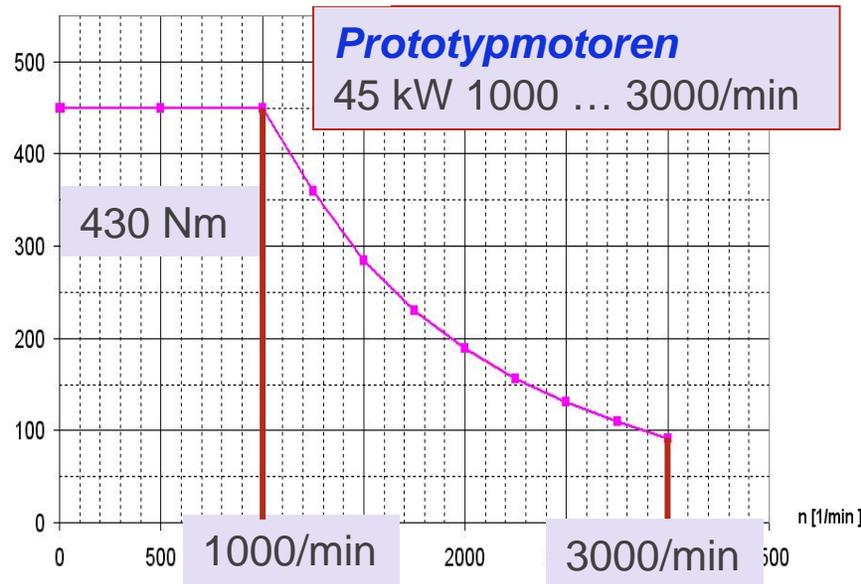
Vortrag - Inhaltsübersicht

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

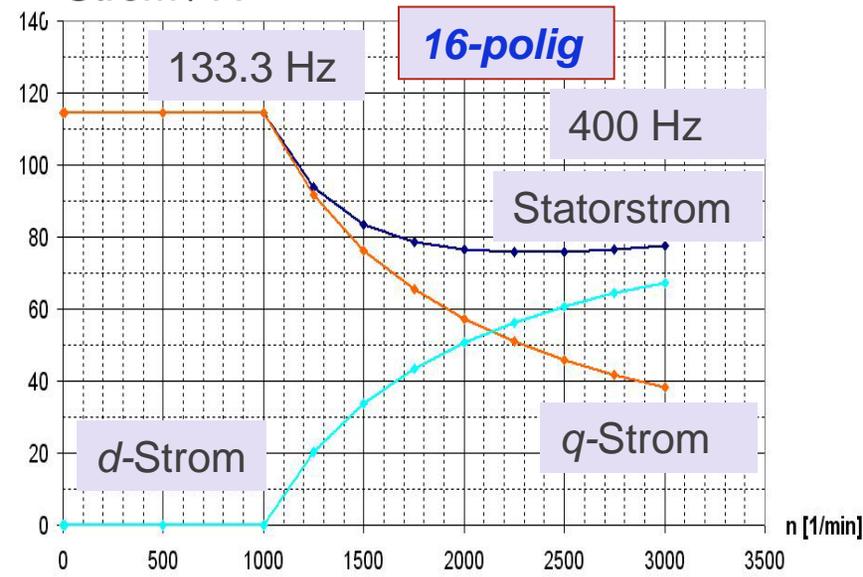
High-torque-Antriebe für höhere Drehzahlen

- **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

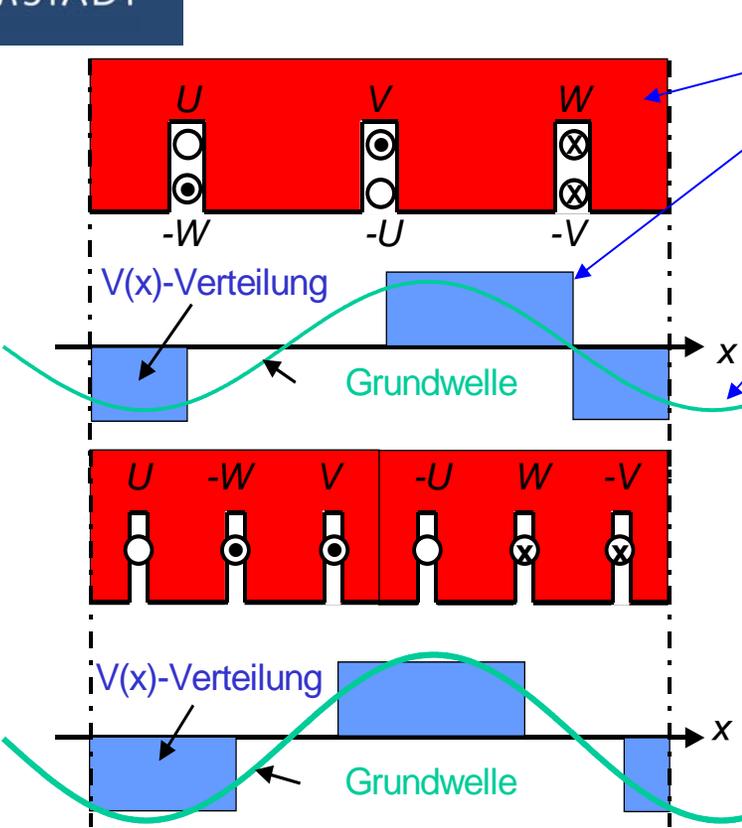


Strom / A



Entwurf VOR Optimierung !

Zahnspulenwicklung vs. verteilte Wicklung



Stator mit Nuten

Magnetische Spannung $V(x)$

Grundwelle $V_1(x)$

Zahnspulenwicklung: $q = 1/2$

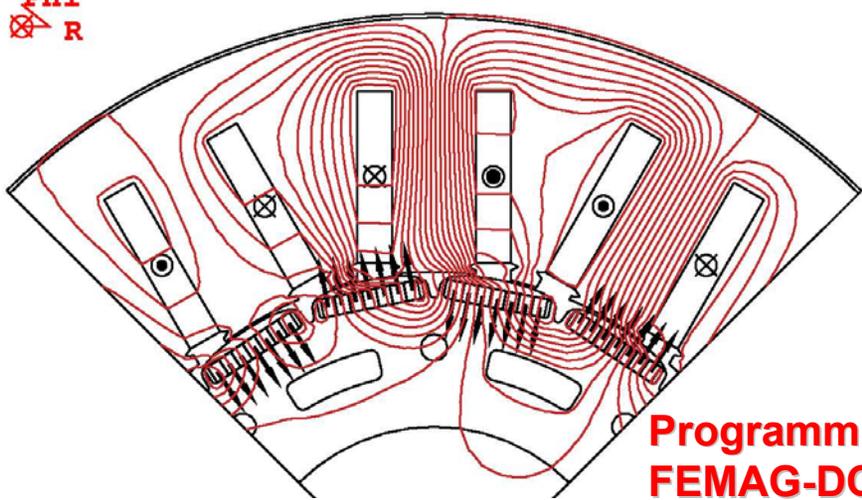
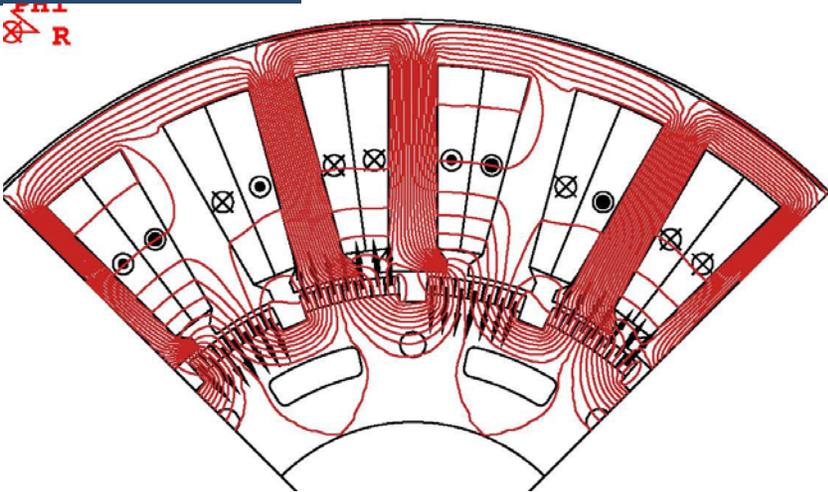
Ordnungszahlen der Feldwellen:
 $v = 1, -2, 4, -5, 7, -8, 10, -11, 13, \dots$

Verteilte Wicklung: $q = 1$

Ordnungszahlen der Feldwellen:
 $v = 1, -5, 7, -11, 13, \dots$

Ständerfeldverteilung für Zeitpunkt:
 $i_U = 0, i_V = -i_W = I$ (Augenblickswert des Strangstroms).

Bemessung von Motor A und Motor B



Programm
FEMAG-DC

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

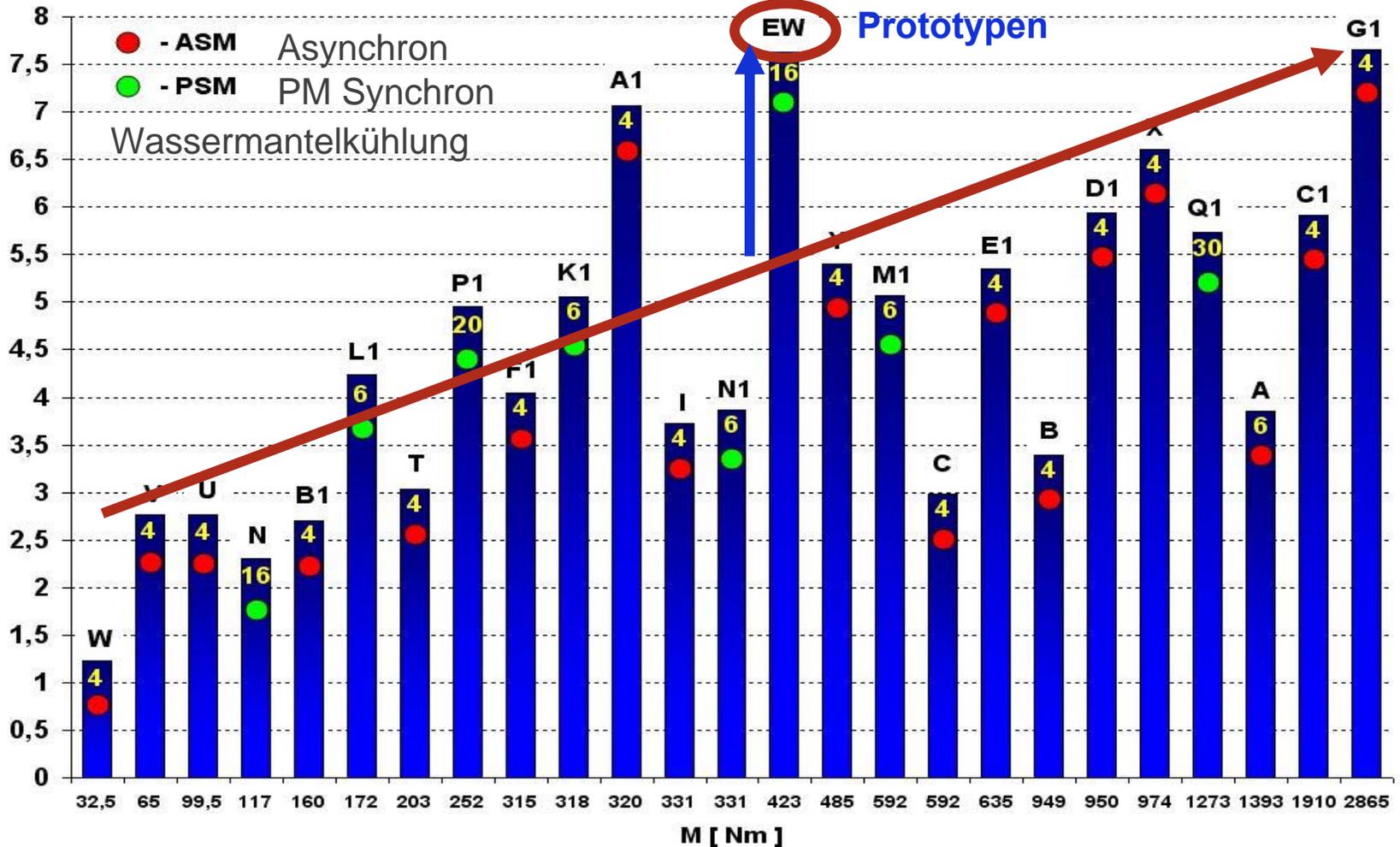
*) direkter Wirkungsgrad, *gemessen* bei:
 Umrichterspeisung, Wärmeklasse F, 45 °C Kühlwasser

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 | |
|---|---------|-------|---------|-------|
| | 1000 | 3000 | 1000 | 3000 |
| 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 | 32 | 97 | 166 | 650 |
| 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)

| 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

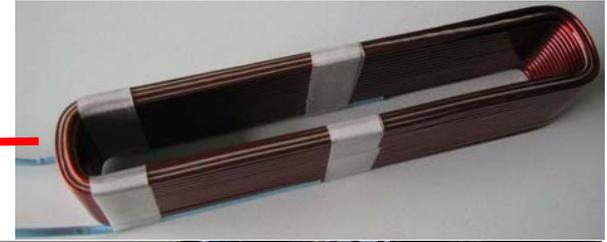
Motor A: $q = 0.5$

Motor B: $q = 0.25$

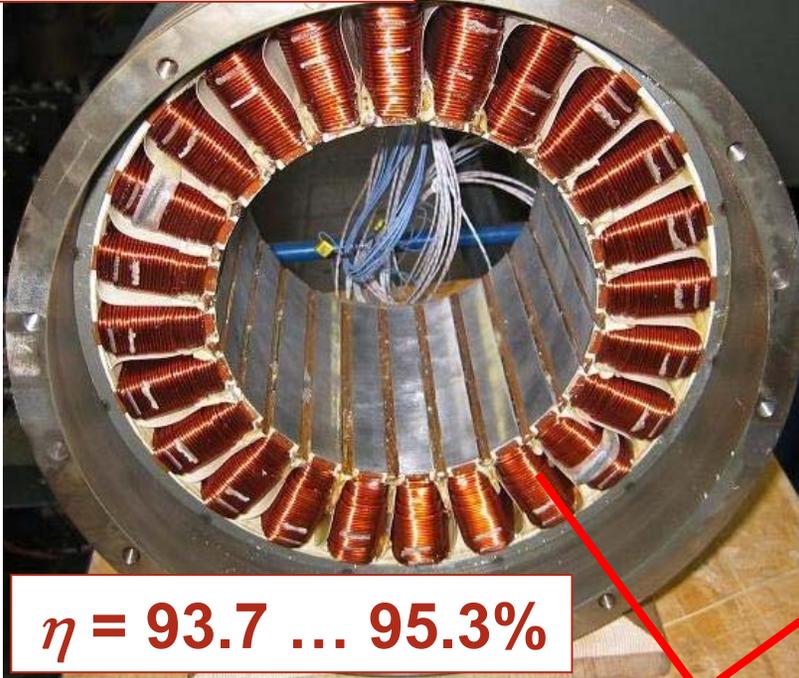
Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste

Kühlmantel

Zahnspule

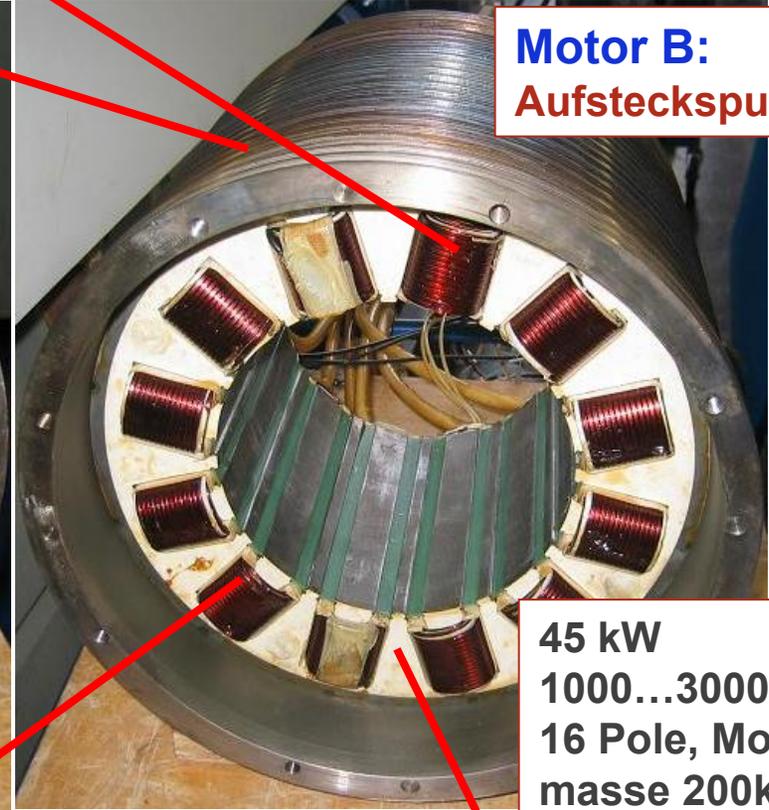


Motor A: Rund-
drahtnadelwicklung



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

Motor B:
Aufsteckspulen



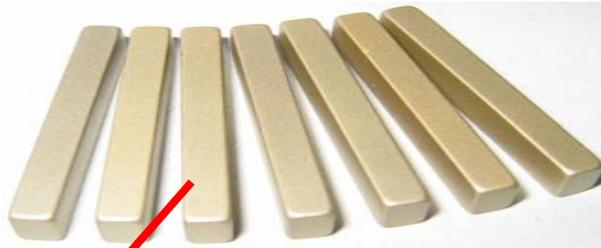
45 kW
1000...3000/min
16 Pole, Motor-
masse 200kg

Stator-Wicklung

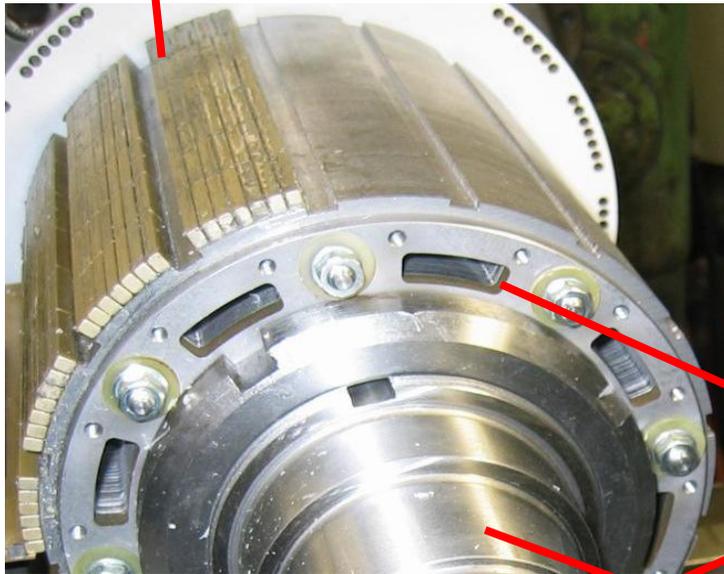
Blechpaket

Vermeidung von Magnetverlusten: Segmentierte NdFeB-Magnete

Permanentmagnete erzeugen
verlustfrei das Magnetfeld



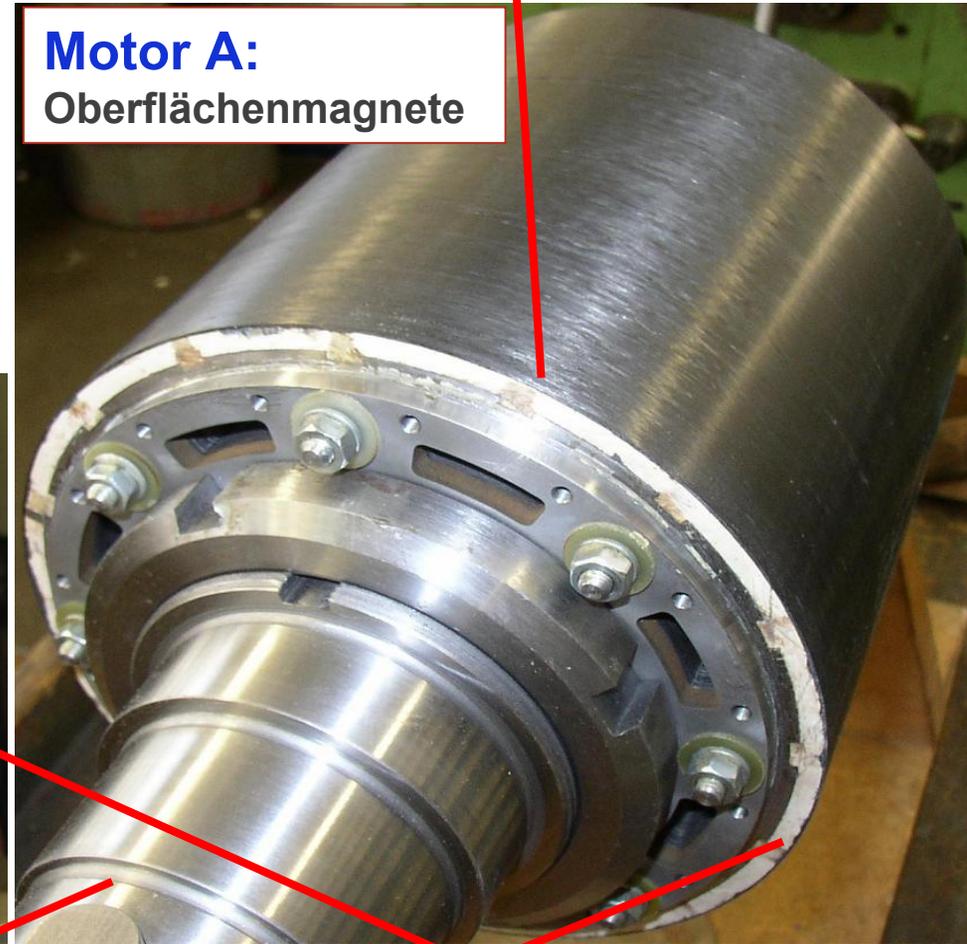
Magnete



Welle

Kohlefaserbandage

Motor A:
Oberflächenmagnete



Rotorblechpaket

Motor B: Versenkte Rotormagnete

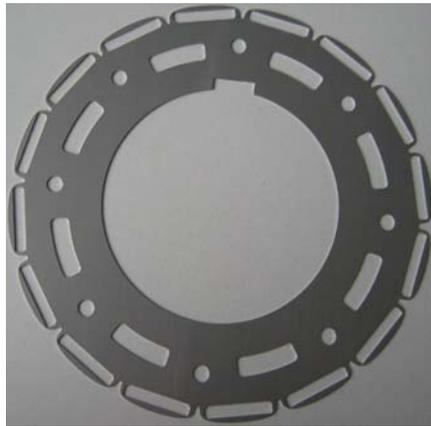
Motor B

Magnete

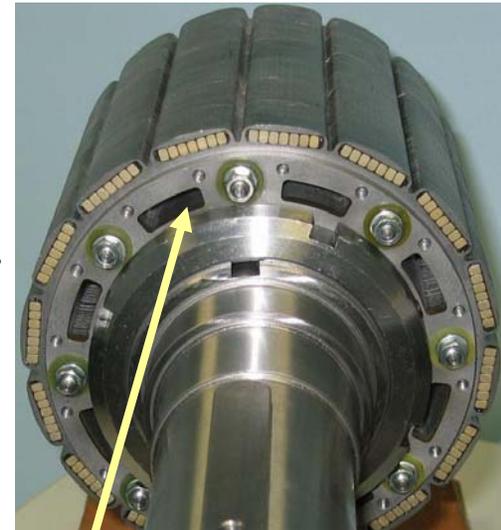


6 Teilpakete

Komplettierter Rotor B



Rotorblech



Interner Luftkreislauf

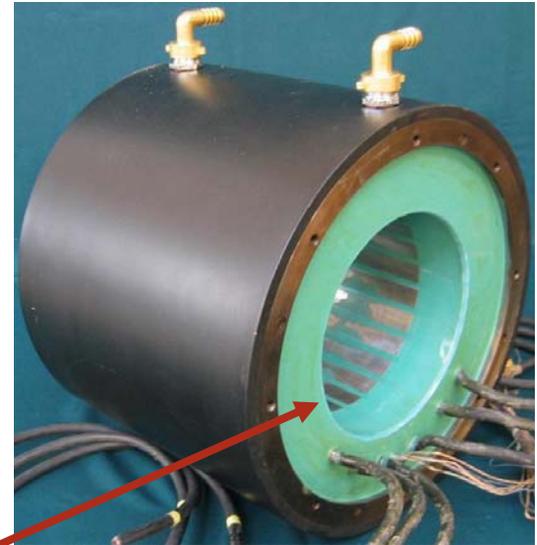
Intensivierte Kühlung

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

Kühlmantel



Flüssigkeitskühlung indirekt



Verguss

Vortrag - Inhaltsübersicht

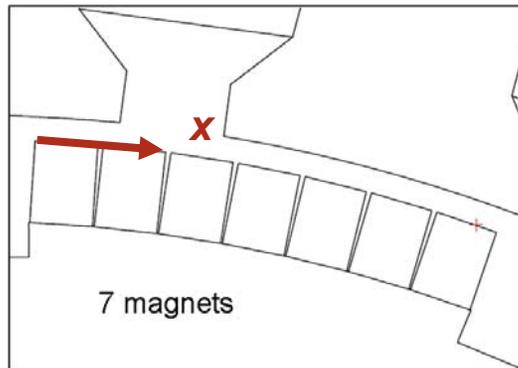
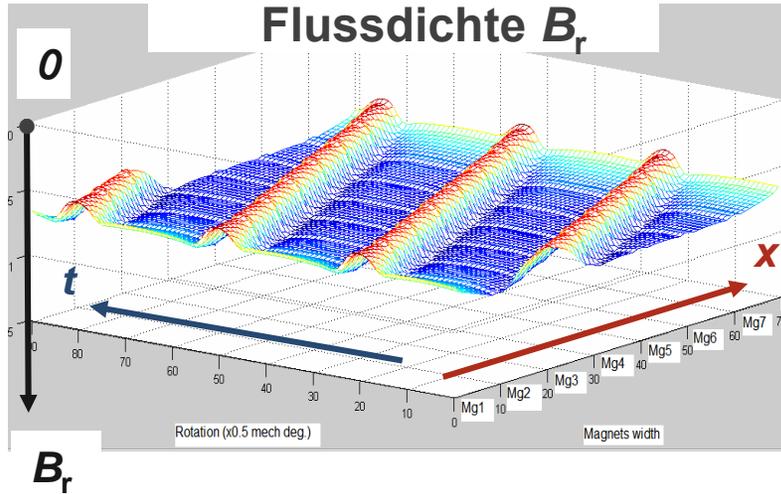
- Grundsatzüberlegungen zur Stator- und Rotortopologie
- Ausgeführte Prototypen
- **Läuferzusatzverluste**
- Geräuschproblematik bei Zahnspulen
- Zusammenfassung

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

Drehzahl 1000/min, Radialkomponente der Flussdichte an der Magnetoberfläche

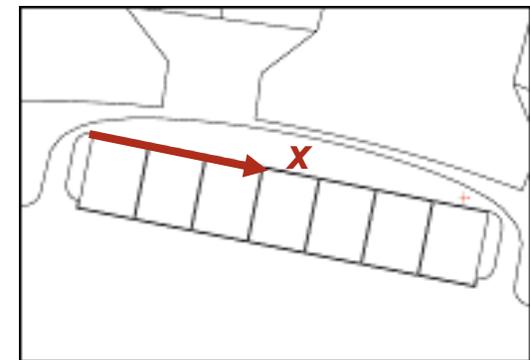
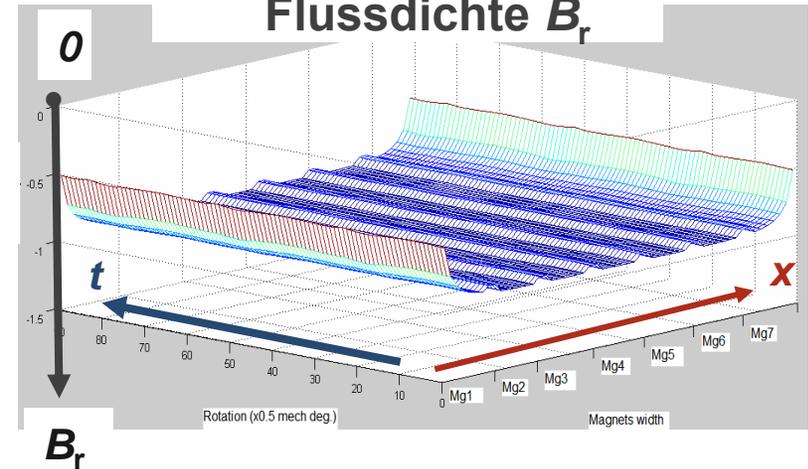
Motor A

Flussdichte B_r



Motor B

Flussdichte B_r



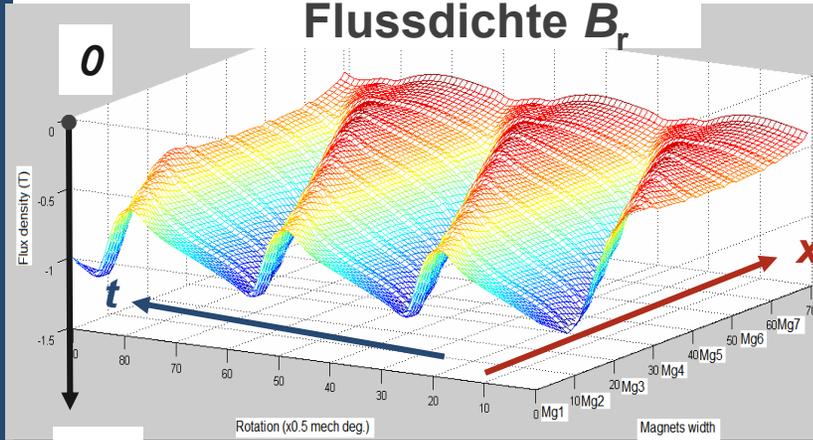
FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

Flusspulsationen in den Magneten bei Last – Sinusstrom, Feldoberwellen

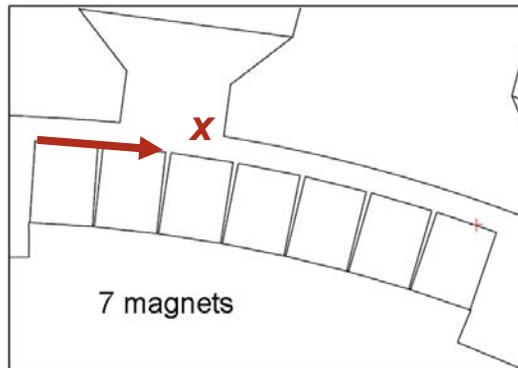
Drehzahl 1000/min, Radialkomponente der Flussdichte an der Magnetoberfläche

Motor A

Flussdichte B_r

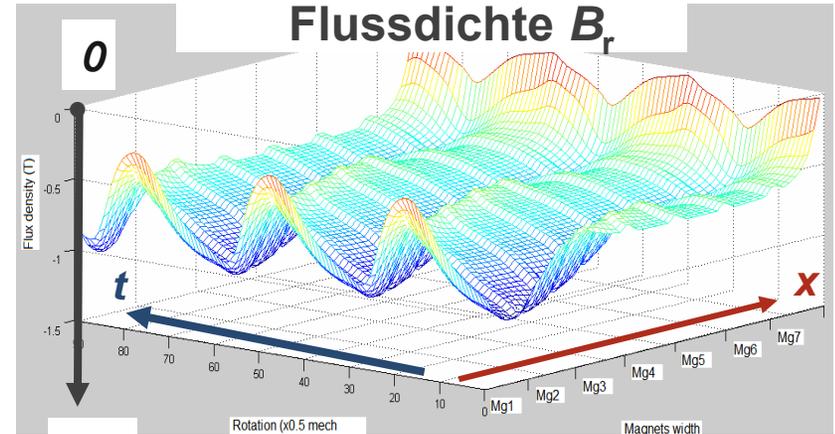


B_r

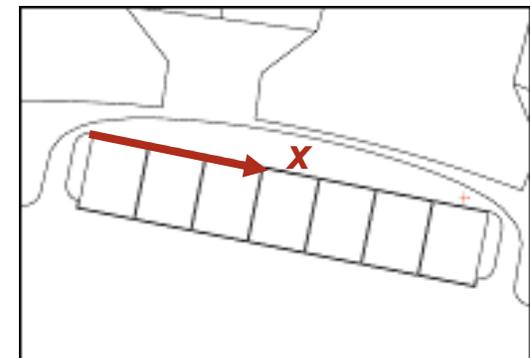


Motor B

Flussdichte B_r



B_r



Nennlast

45 kW

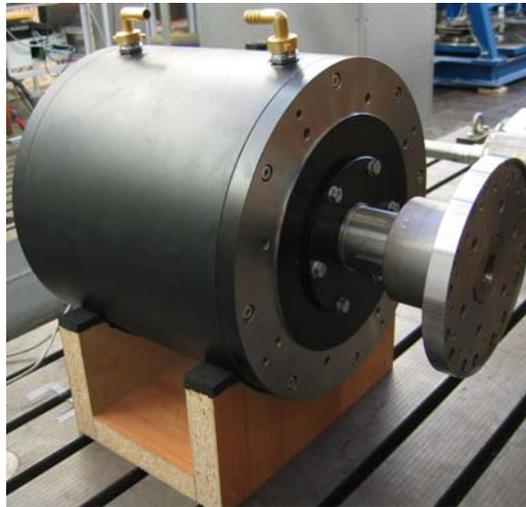
1000/min

FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

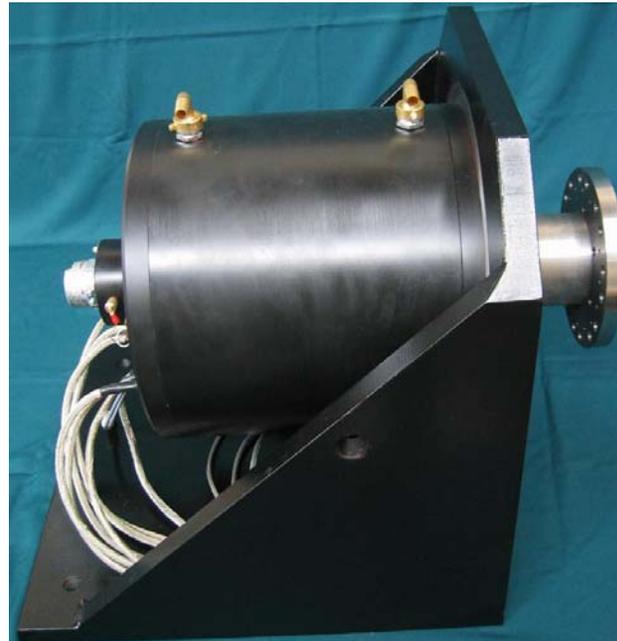
Vortrag - Inhaltsübersicht

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

Die Prototypmotoren sind sehr leise !



- Flüssigkeitsmantel-
kühlung
- Bauform B5
(Flanschmotoren)
- Doppelmantel-
Stahlgehäuse



- **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 Anregfrequenzen 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

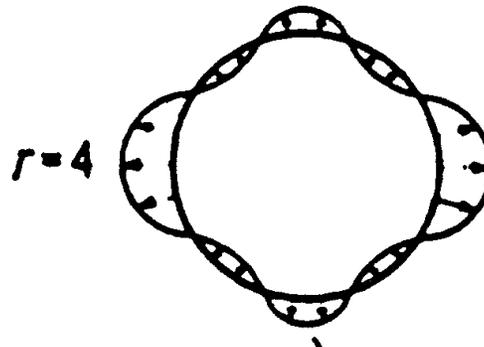
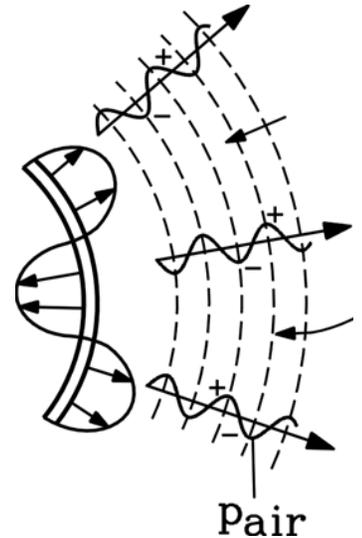
Geräuschanregung $2f$: 666 ... 2000 Hz

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**

- 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