

Verlustberechnung und experimentelle Validierung bei hochausgenützten Permanentmagnet- Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklungen und Feldschwächbetrieb



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

BOSCH CR 17.11.2009

Andreas Binder

Technische Universität Darmstadt

Institut für Elektrische Energiewandlung

Landgraf-Georg-Strasse 4

abinder@ew.tu-darmstadt.de



- Bemessung hoch ausgenützter PM-Synchronmaschinen
- Ausgeführte Prototypen
- Läuferzusatzverluste
- Experimentelle Validierung
- Zusammenfassung



Bemessung hoch ausgenützter PM-Synchronmaschinen



High-torque-Antriebe für höhere Drehzahlen

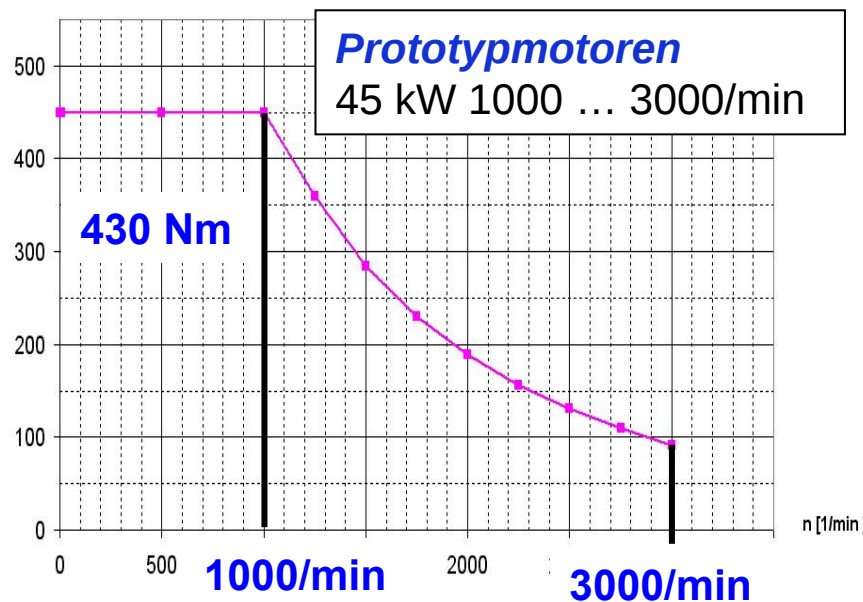
- **Zahnspulentechnologie** und **Permanentmagnetläufer** :
 - kompakte Statoren
 - niedrige Stromwärmeverluste
 - hohe Induktivität für gute Feldschwächbarkeit
 - hohe Kraftdichte
- Genutzt für Servoantriebe, High-torque-Antriebe !
- Auch nutzbar für Industrieantriebe **mit höheren Drehzahlen ?**



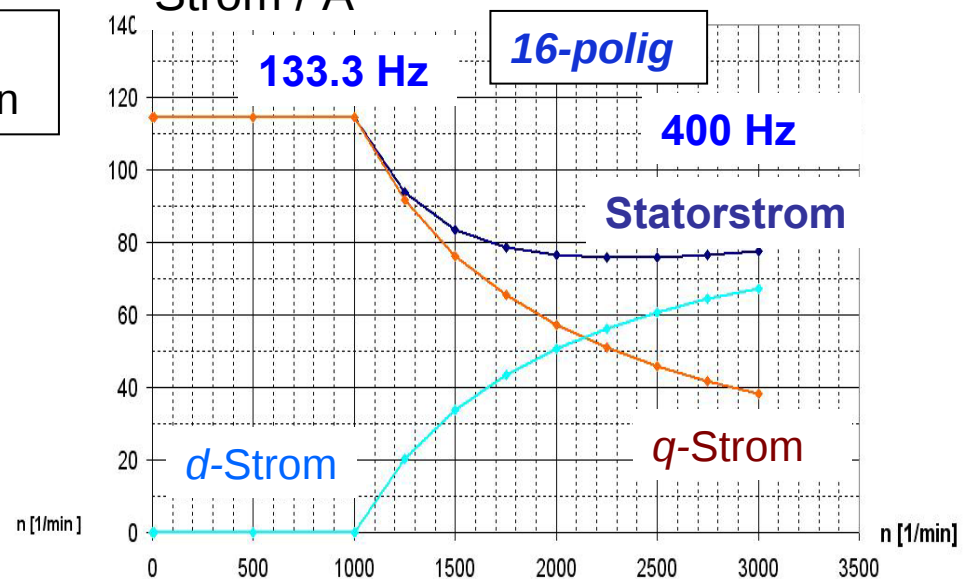
High-torque-Antriebe für höhere Drehzahlen

Prototypen: 0 ... 45 kW, 0 ... 1000/min
45 kW , 1000 ... 3000/min

Drehmoment / Nm

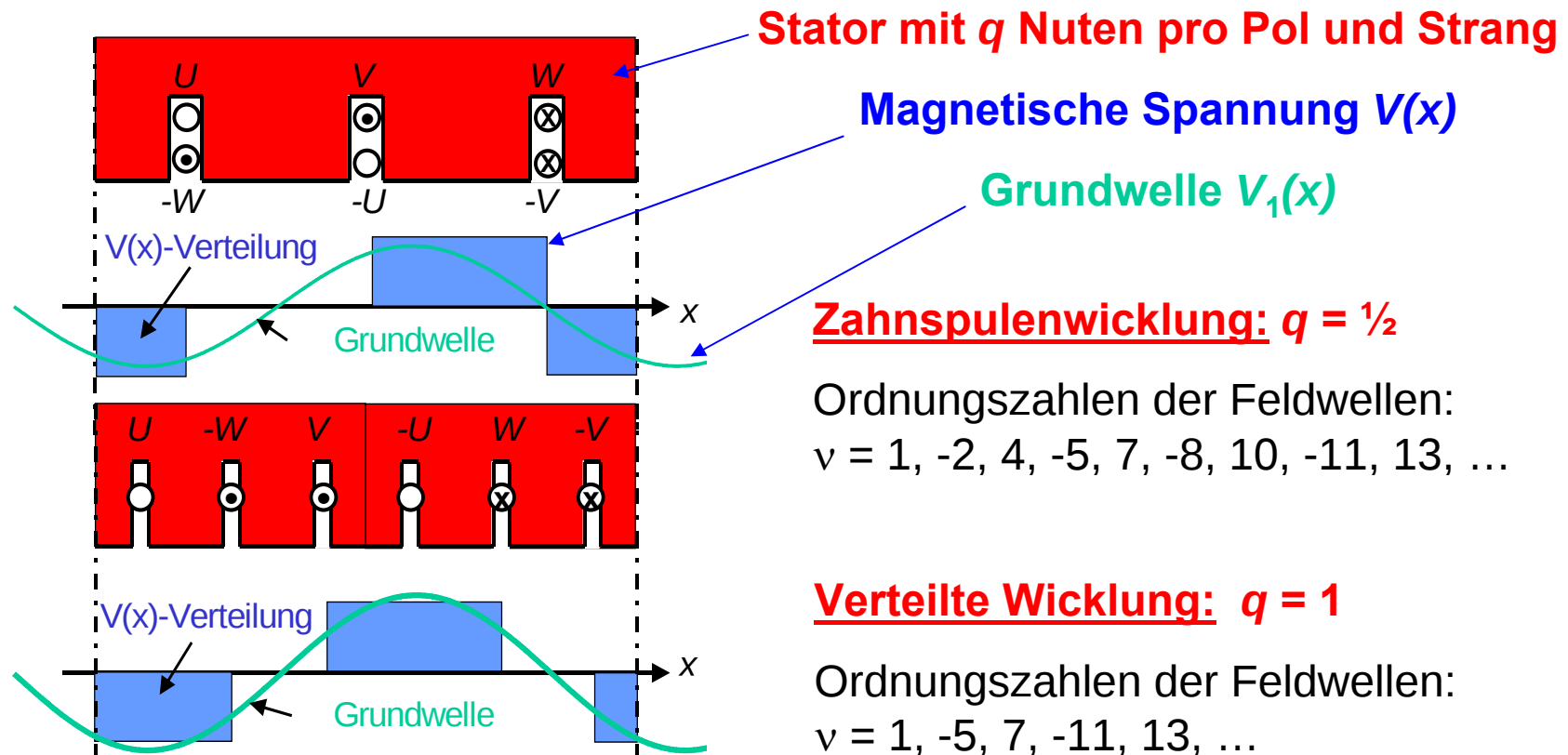


Strom / A



Entwurf VOR Optimierung !

Zahnspulenwicklung vs. verteilte Wicklung

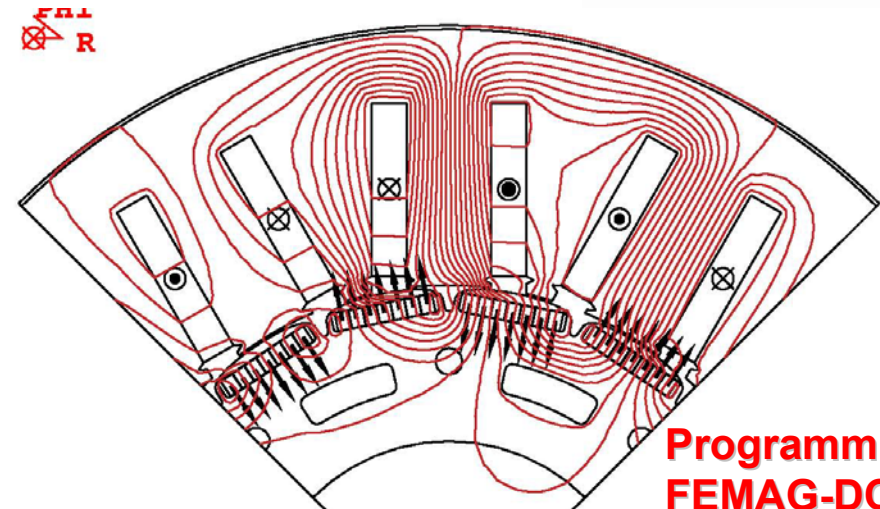
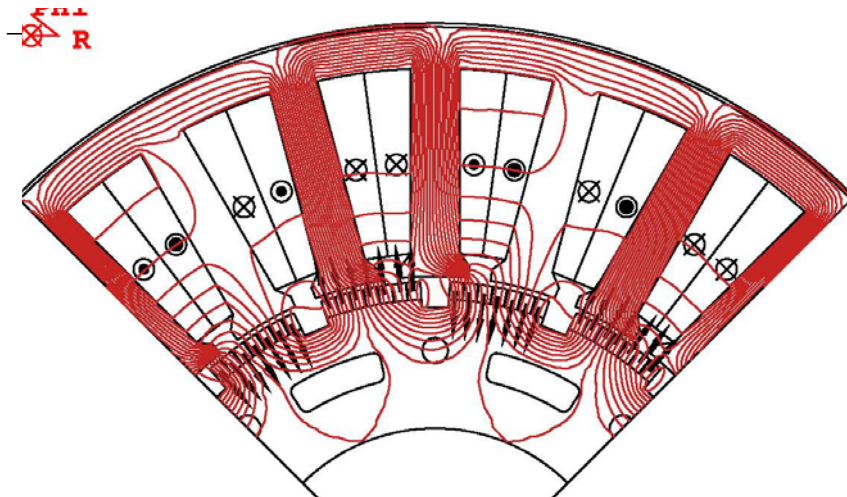


**Beispiel: Ständerfeldverteilung für Zeitpunkt:
 $i_U = 0, i_V = -i_W = I$ (Augenblickswert des Strangstroms).**

Bemessung von Motor A und Motor B



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



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

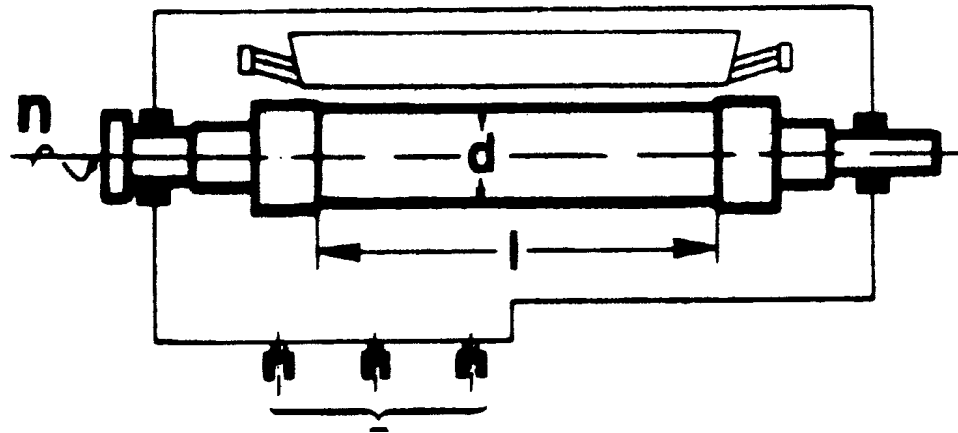
*) direkter Wirkungsgrad, *gemessen* bei:

Umrichterspeisung, Wärmeklasse F, 45 °C Kühlwasser



ESSON-Ausnutzungsziffer

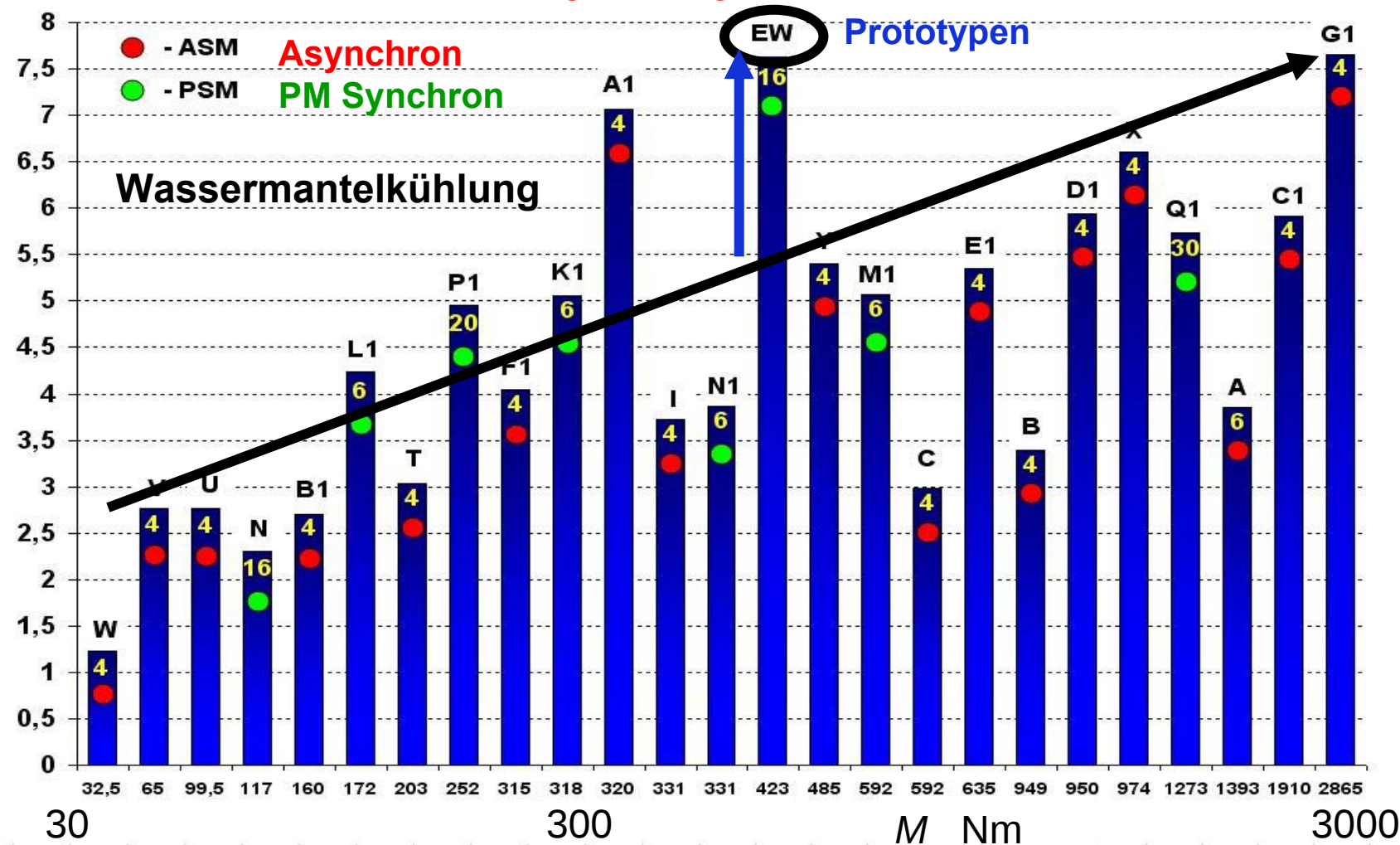
$$C = \frac{S_{\delta}}{d_{si}^2 \cdot l_{Fe} \cdot n} \approx \frac{2\pi \cdot M_N}{d_{si}^2 \cdot l_{Fe}} \sim \frac{M_N}{V_{aktiv}} \sim k_w \cdot A \cdot B$$



Erreichte hohe Ausnutzungsziffer

C

kWmin/m³ - Hohe Ausnützung im Vergleich



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 Umrichter-einfluss – Schaltfrequenz 2 kHz)

Elektromagnetische Kennwerte

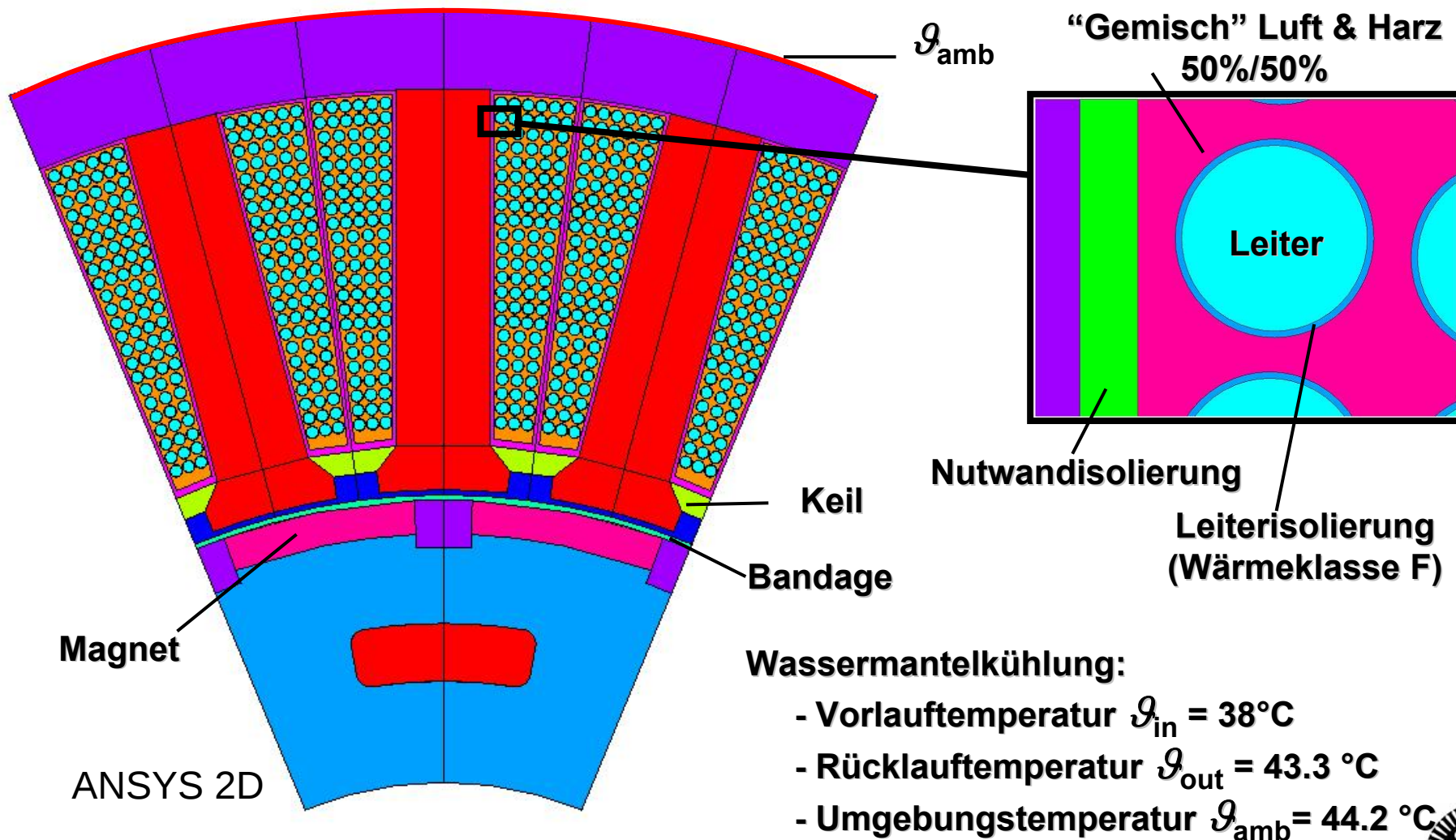
45 kW, 230 V/Strang	Motor A		Motor B	
Drehzahl (1/min)	1000	3000	1000	3000
Strangstrom (gemessen) (A)	102	64	119	70.5
Leistungsfaktor (gemessen)	0.7	1	0.6	0.94
Drehmoment (Nm)	430	143	430	143
Drehmoment / Gesamtmasse (Nm/kg)	2.15	-	2.10	-
Drehmoment / Aktivmasse (Nm/kg)	5.56	-	4.77	-
Leistungsdichte / 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**

Motor A: Thermisches 2D-Modell



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

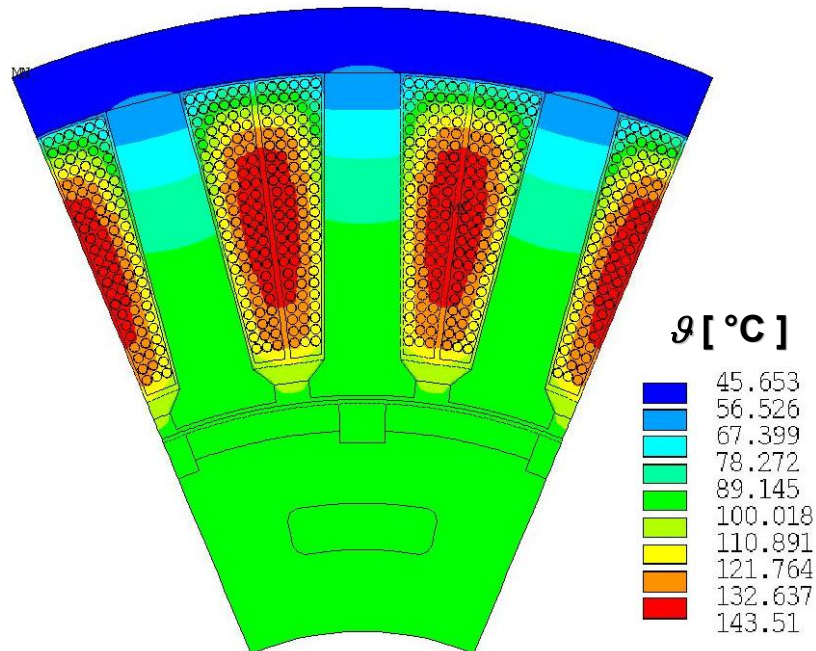


Motor A: Berechnete 2D-Temperaturverteilung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Nenndrehzahl 1000/min, 45 kW



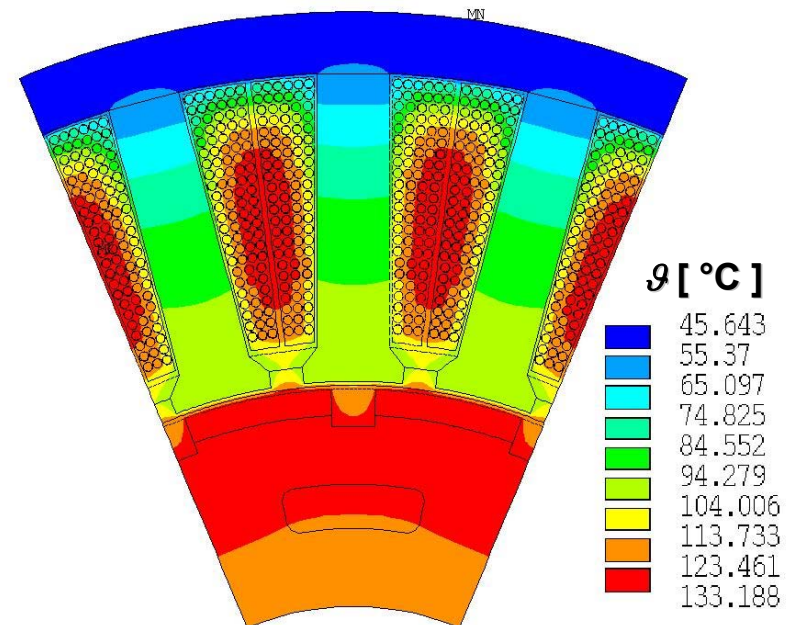
Hotspot: $\vartheta_{\text{hotspot}} = 144 \text{ °C}$

$\Delta \vartheta_{\text{hotspot}} = 104 \text{ K}$

Mittelwert: $\vartheta_{\text{av}} = 119 \text{ °C}$

$\Delta \vartheta_{\text{av}} = 79 \text{ K}$

Maximaldrehzahl 3000/min, 45 kW



Hotspot: $\vartheta_{\text{hotspot}} = 133 \text{ °C}$

$\Delta \vartheta_{\text{hotspot}} = 93 \text{ K}$

Mittelwert: $\vartheta_{\text{av}} = 112 \text{ °C}$

$\Delta \vartheta_{\text{av}} = 72 \text{ K}$

Wärmeklasse F: $\Delta \vartheta_{\text{avl,lim}} = 105 \text{ K}$; $\vartheta_{\text{av,lim}} = 145 \text{ °C}$; $\Delta \vartheta_{\text{hotspot,lim}} = 115 \text{ K}$; $\vartheta_{\text{hotspot,lim}} = 155 \text{ °C}$

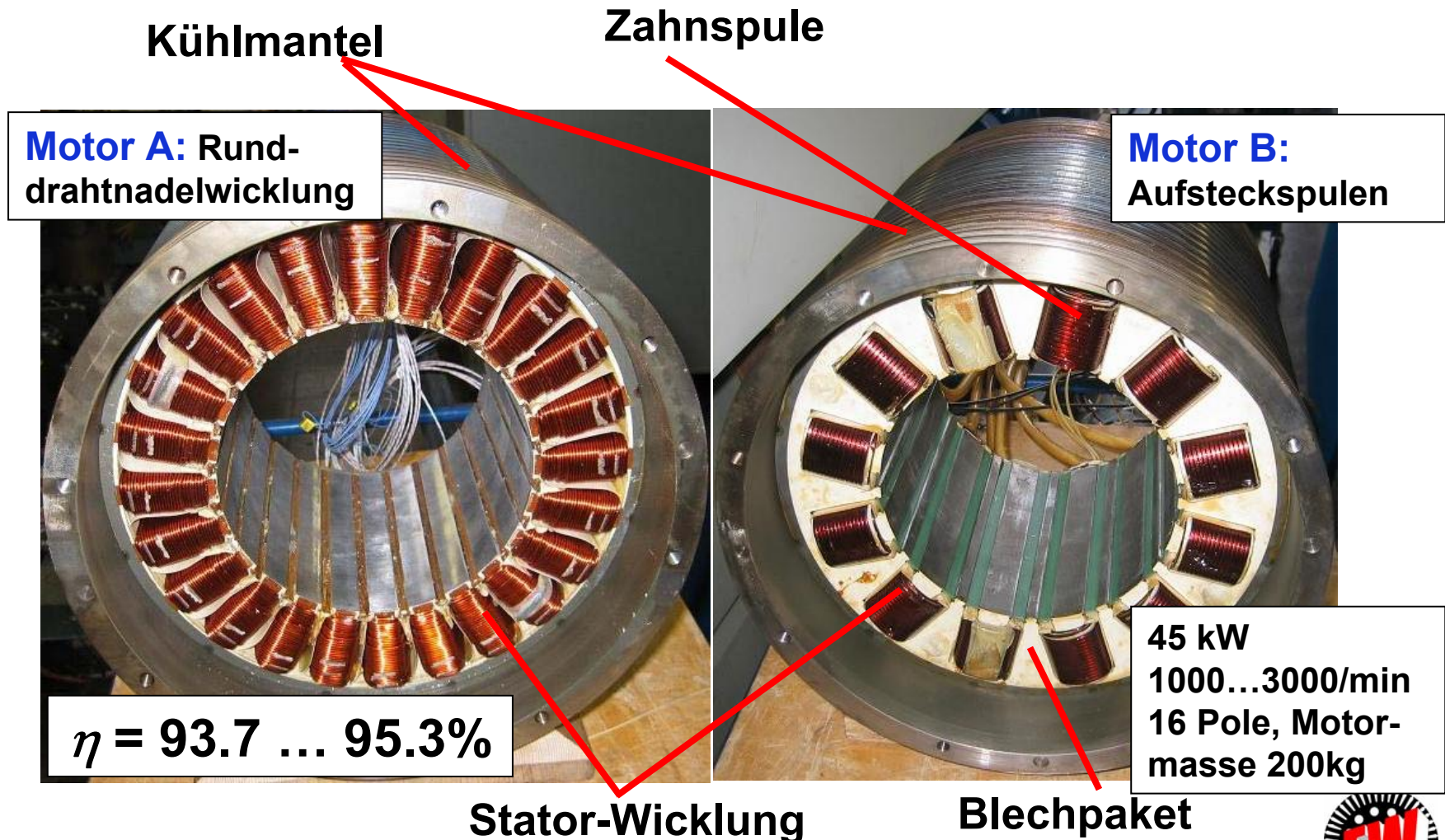




Ausgeführte Prototypen

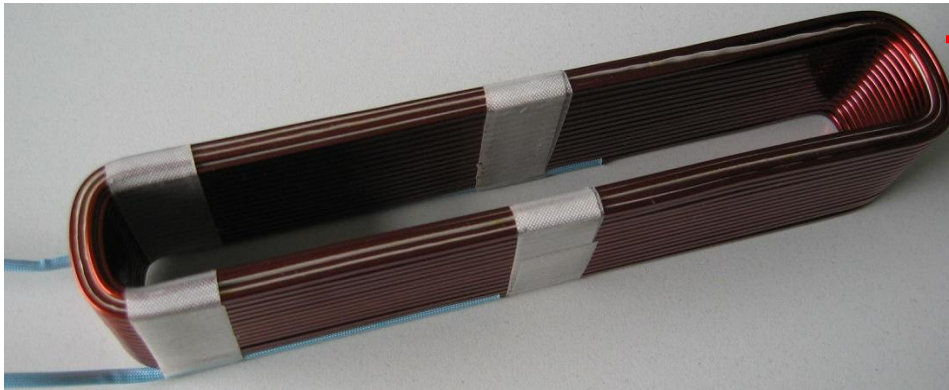


Zwei alternative Motorkonzepte: 16-polige Statoren Motor A: $q = 0.5$ Motor B: $q = 0.25$

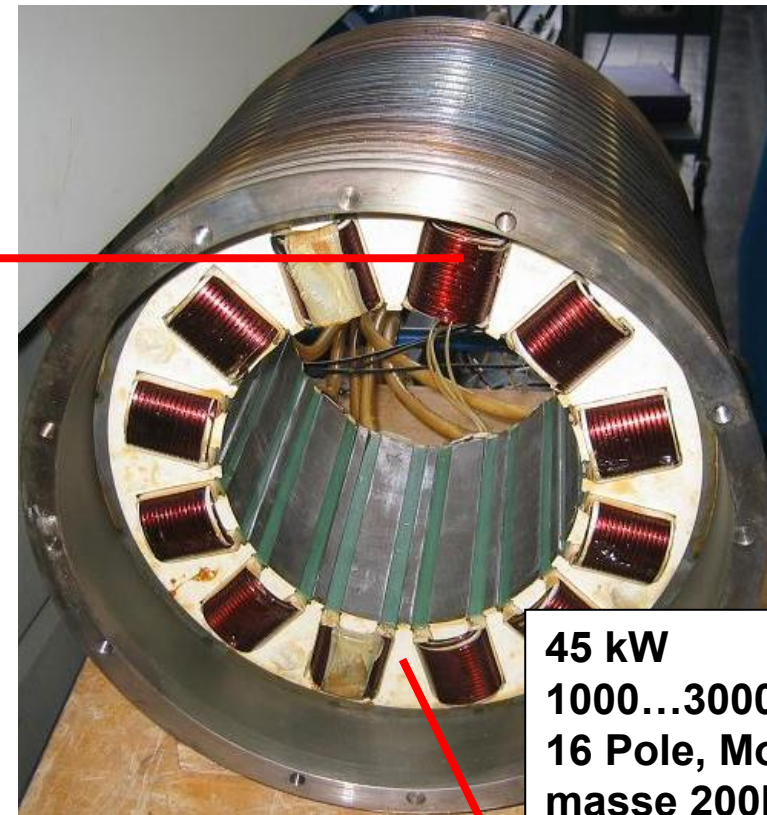


Stator-Wicklung mit Aufsteckspulen

Motor B:
Aufsteckspulen



Zahnspule



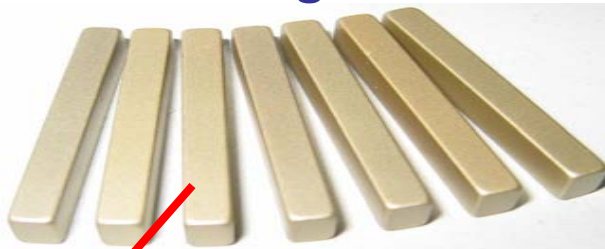
45 kW
1000...3000/min
16 Pole, Motor-
masse 200kg

Blechpaket



Minimierung von Magnetverlusten: Segmentierte NdFeB-Magnete

Permanentmagnete

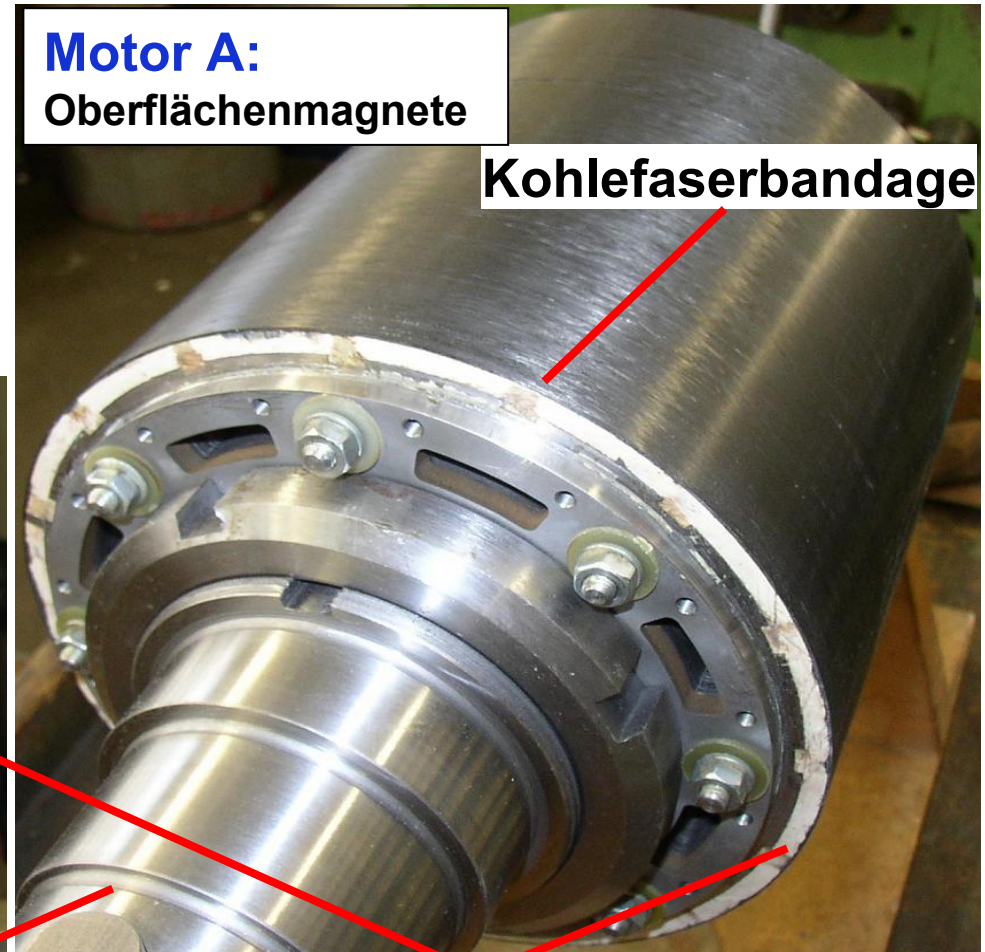


Magnete



Welle

Motor A: Oberflächenmagnete



Kohlefaserbandage

Rotorblechpaket

Motor B: Versenkte Rotormagnete

Magnete



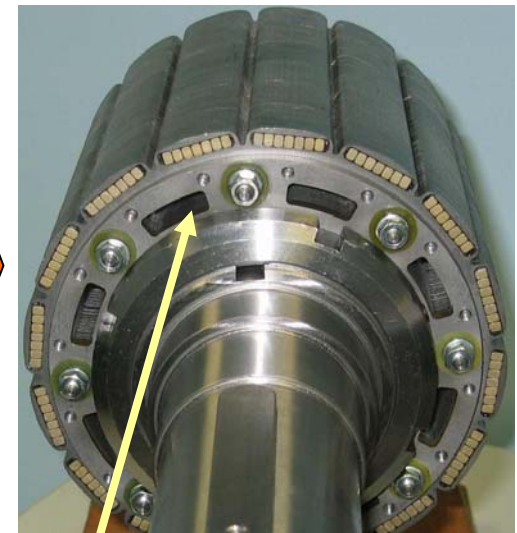
Motor B

6 Teilpakete

Komplettierter Rotor B



Rotorblech



Interner Luftkreislauf

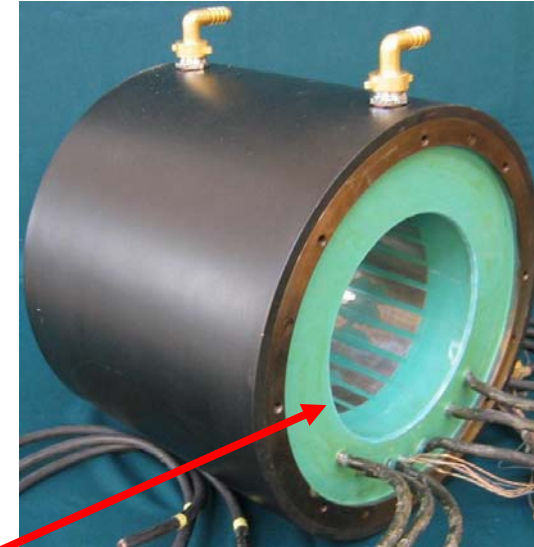
Intensivierte Kühlung

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

Kühlmantel



Flüssigkeitskühlung indirekt

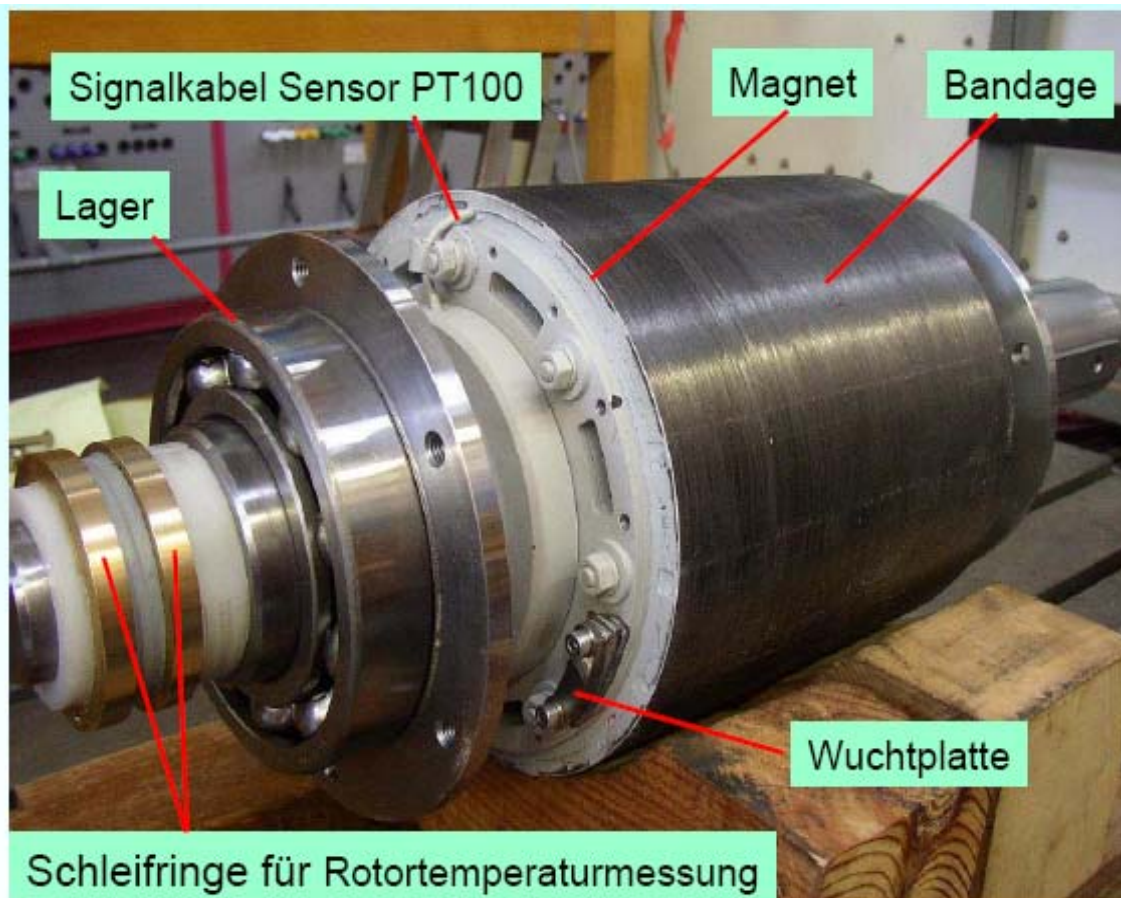


Verguss

Motor A1

Läufer mit Oberflächenmagnetschalen

keine Segmentierung pro Pol in Umfangsrichtung



Magnetpol nur in axiale Richtung segmentiert: 4 x 45 mm statt 6 x 30 mm



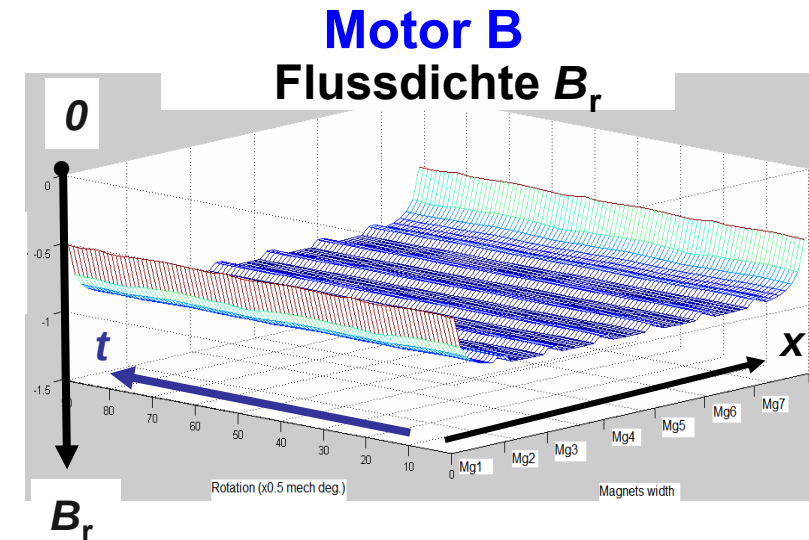
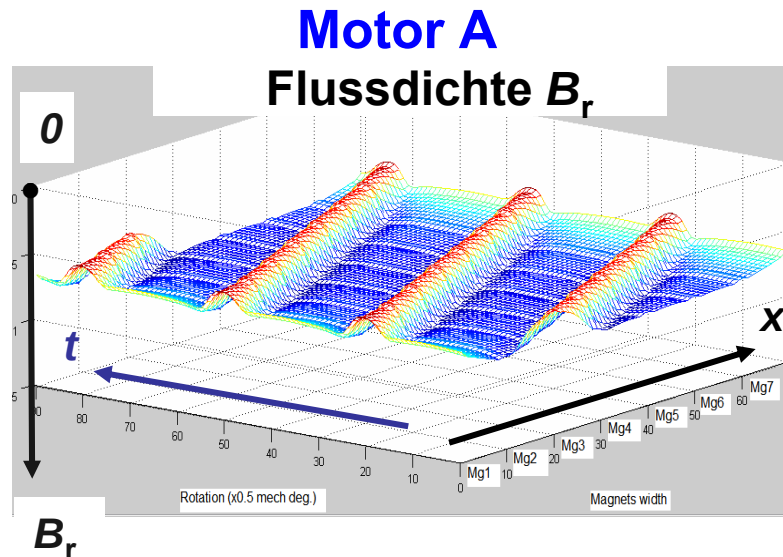
Läuferzusatzverluste



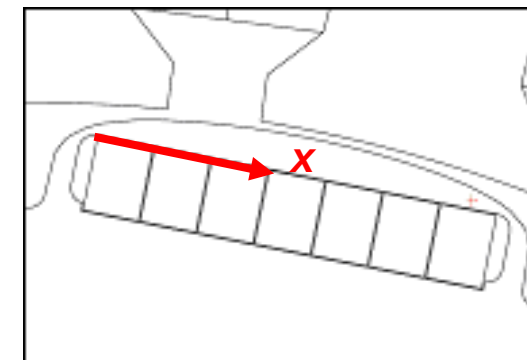
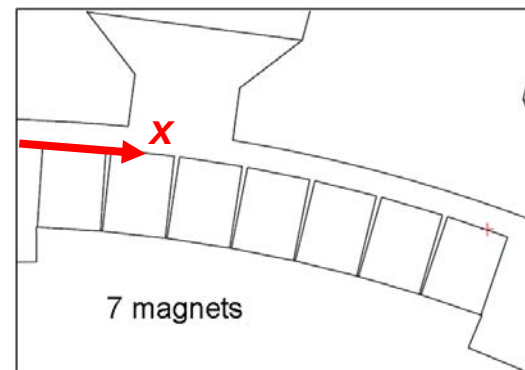
Einfluss der Läuferbauart auf Flusspulsationen in den Magneten durch Nutöffnungen bei Leerlauf



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Drehzahl 1000/min,
Radialkomponente
 B_r der Flussdichte
an der Magnet-
oberfläche

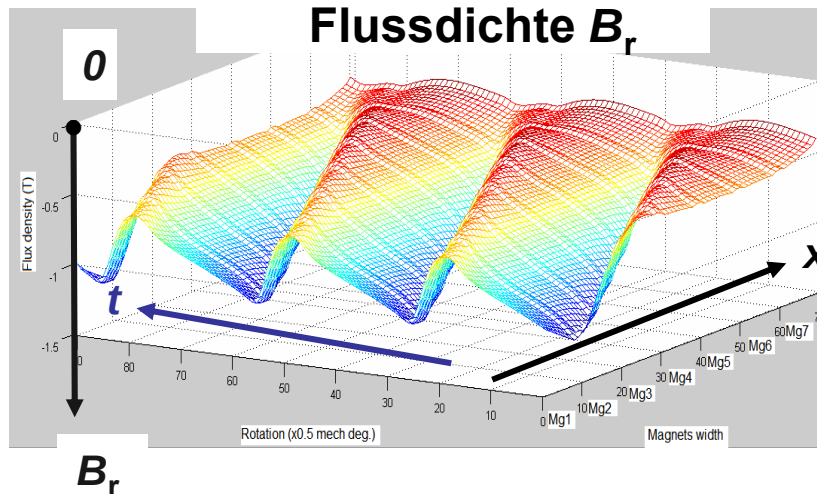


FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

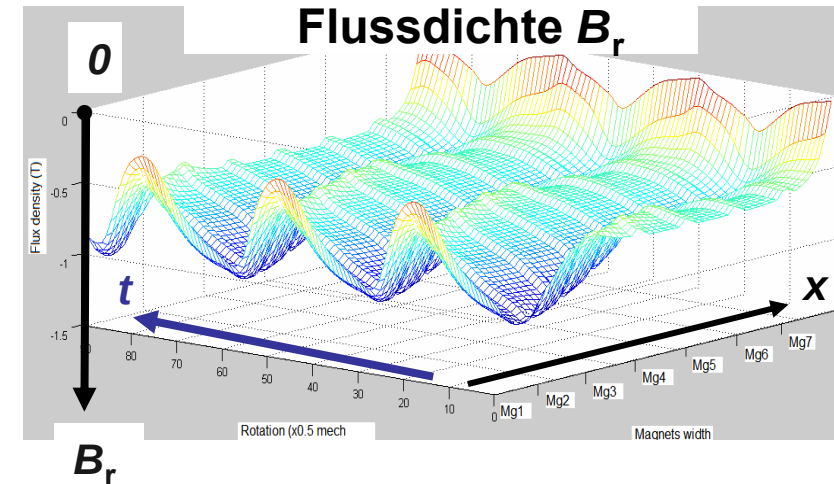


Flusspulsationen in den Magneten bei Last – Sinusstrom, Feldoberwellen

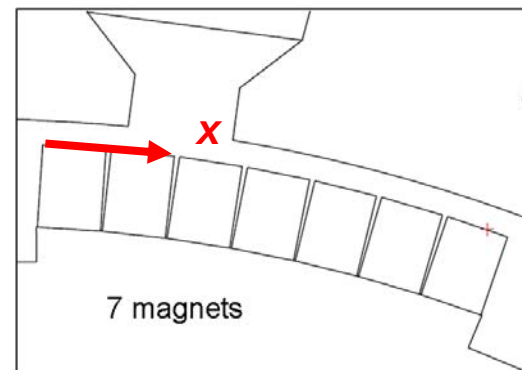
Motor A
Flussdichte B_r



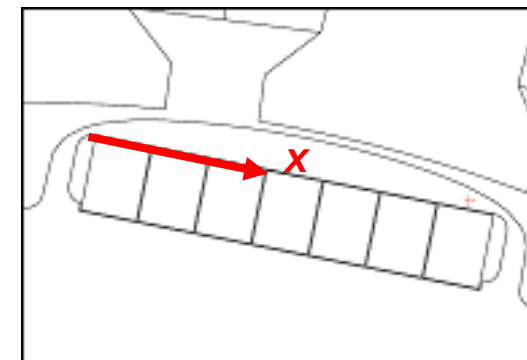
Motor B
Flussdichte B_r



Drehzahl 1000/min,
Radialkomponente
 B_r der Flussdichte
an der Magnet-
oberfläche



Nennlast
45 kW
1000/min



FEMAG-DC (magnetostatische Rechnung OHNE Wirbelströme!)

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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Verluste (Watt) in den Magneten:

- a) Segmentiert**
- b) Massiv**

- A) Oberflächenmagnete**
- B) Versenkte Magnete**

- I) OHNE Rückwirkung der Wirbelströme**
- II) MIT Rückwirkung der Wirbelströme**

- i) Bei 1000/min Nennfluss**
- ii) Bei 3000/min Feldschwächung**

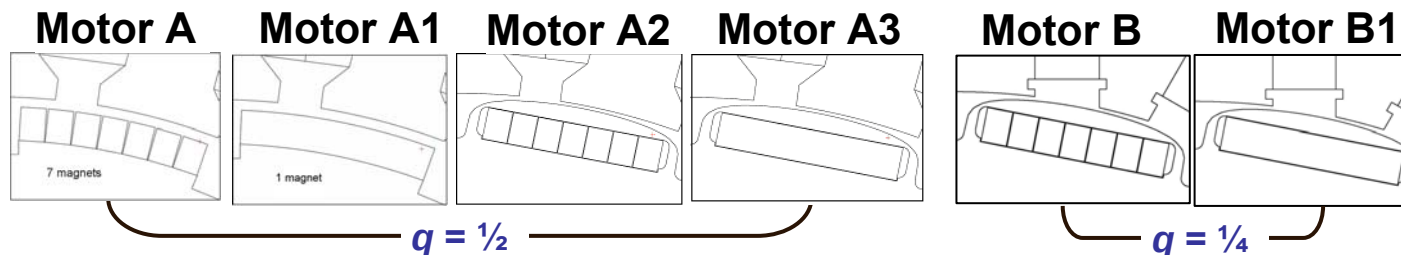
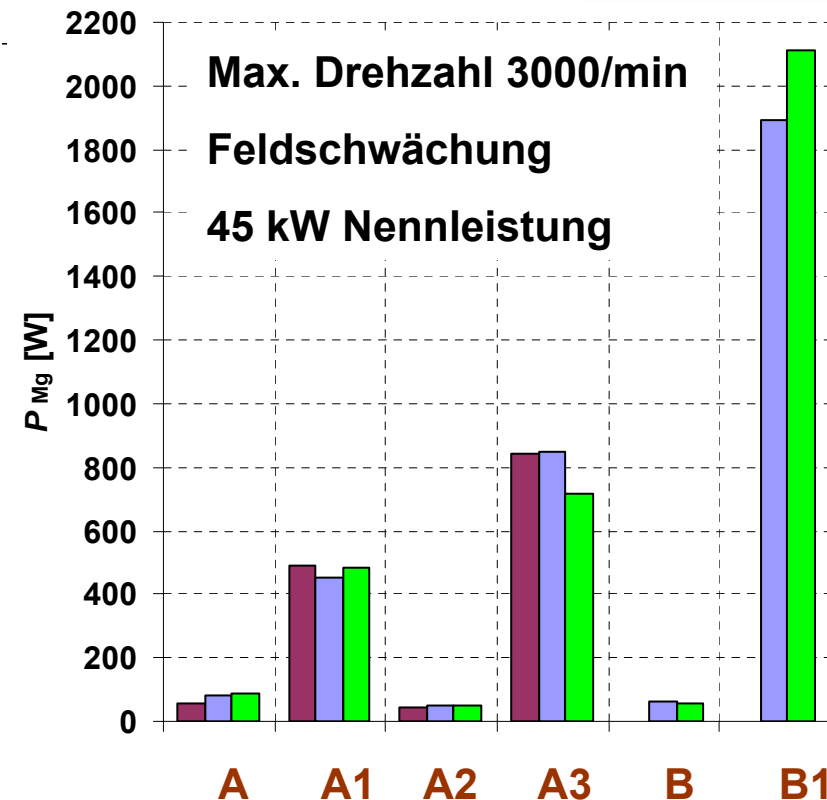
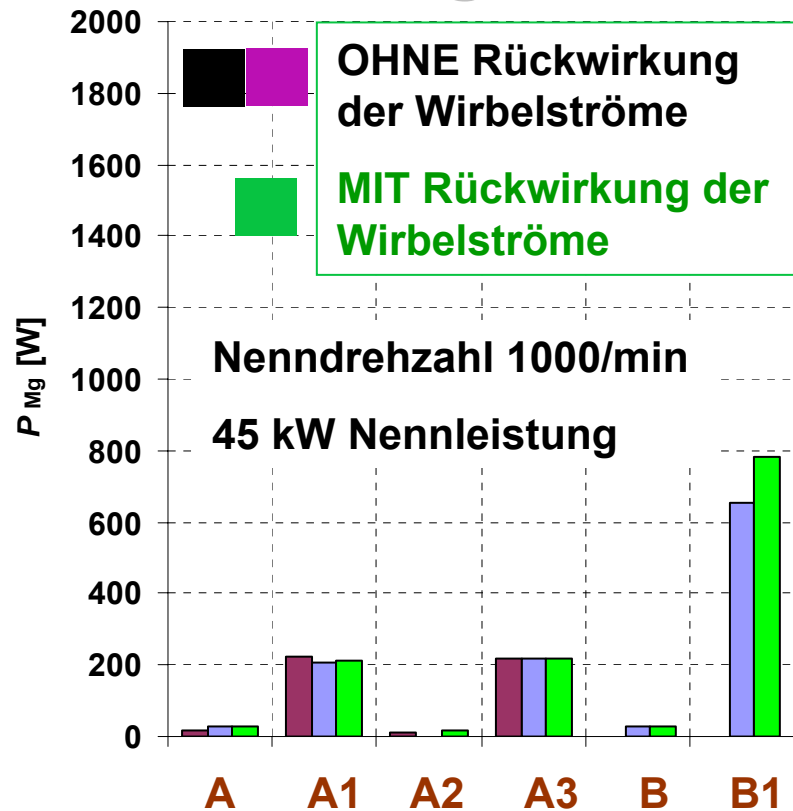
- α) Bei $q = \frac{1}{2}$: KEINE Unterwelle**
- β) Bei $q = \frac{1}{4}$: Eine dominante Unterwelle**



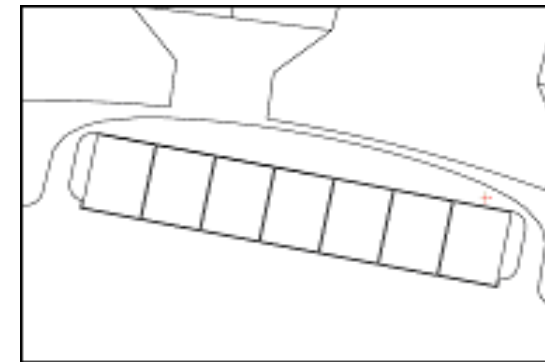
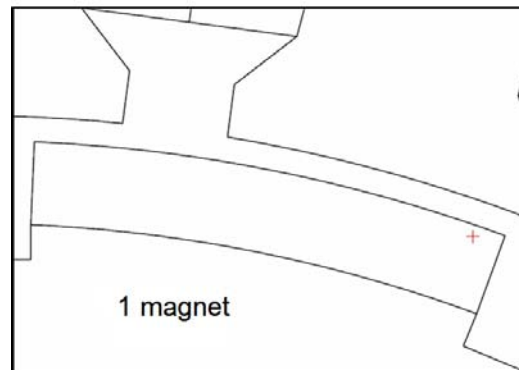
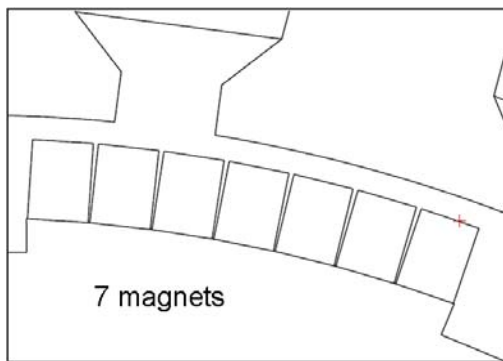
Rotor-Wirbelstromverluste in den Magnete und im Eisen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Rotor-Wirbelstromverluste in den Magneten und im Eisen



Oberflächenmagnete:

Große Verluste in den Magneten

Kleine Verluste im Rotoreisen

Versenkte Magnete:

Kleine Verluste in den Magneten

Große Verluste im Rotoreisen

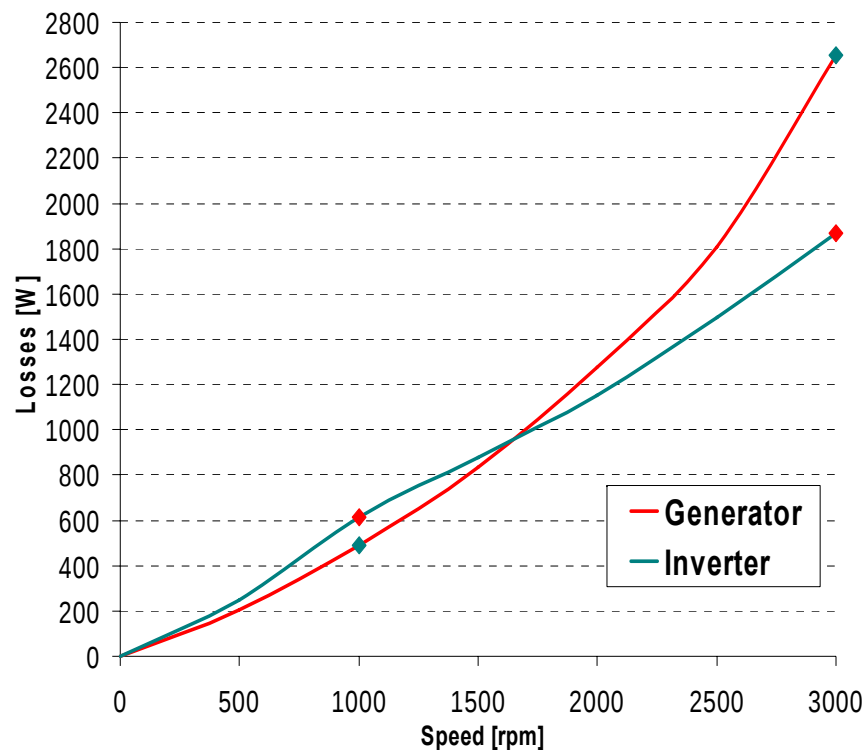


Experimentelle Validierung

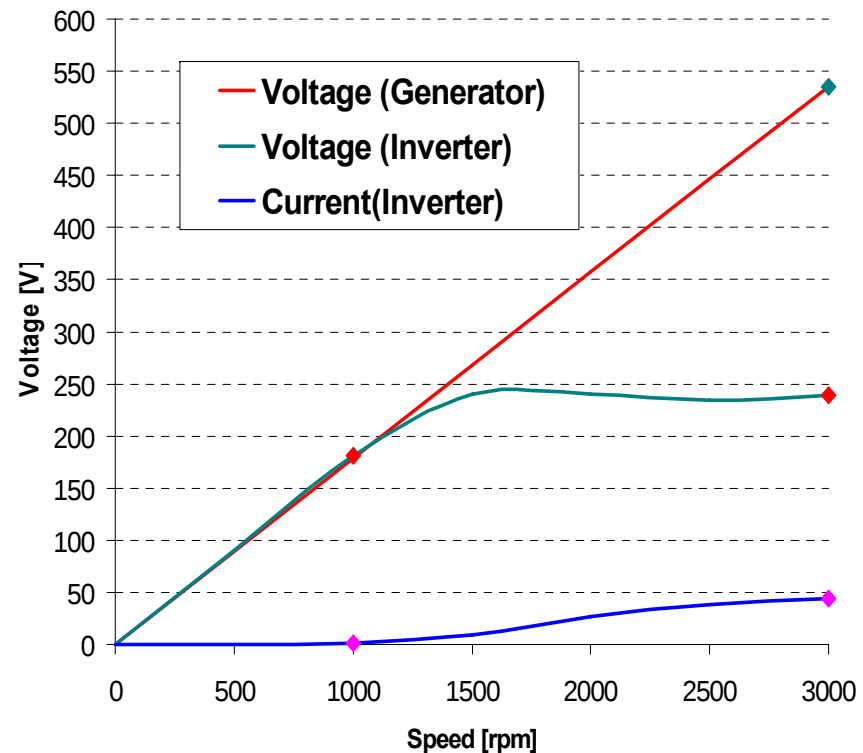


Motor A: Messung Leerverluste: Generator & Motor am Umrichter

Leerverluste



Leerlaufstrangspannung



- Wassermantelkühlung: 6.6 l/min,
Magnettemp.: Mess-Beginn 53.9°C

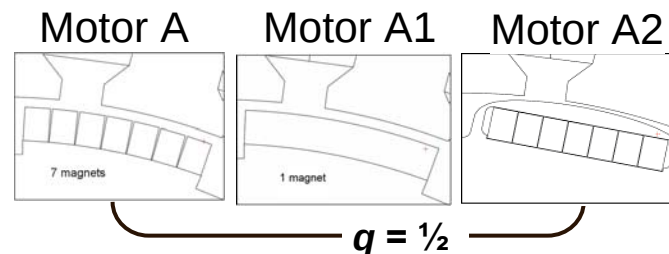
Mess-Ende: 55.5°C

Messung der Kurzschlussverluste: Generatorbetrieb, 3000/min

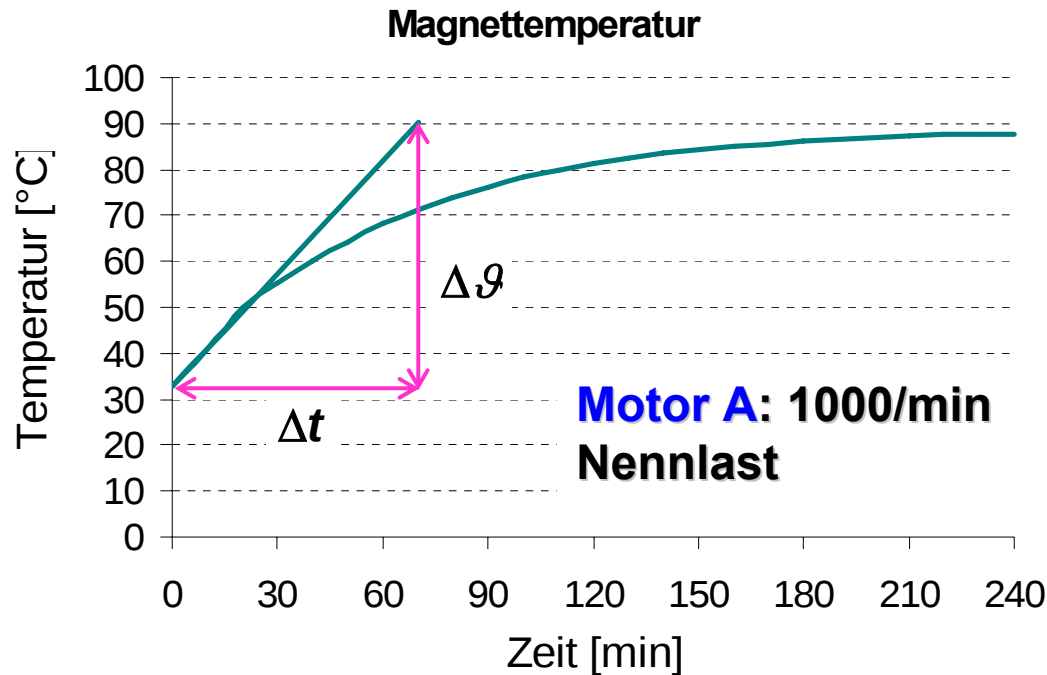


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Maschine	A	A1	A2
Kurzschluss- strom	76.6 A	78.6 A	69.8 A
KS-Verluste (W)	2576	3484	1995
Zusatzverluste (W)	262	2244 (!)	184
Magnet- erwärmung	49 K	145 K	50.5 K



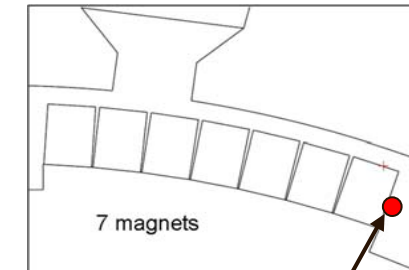
Gemessene Magnettemperaturen – adiabatische Betrachtung



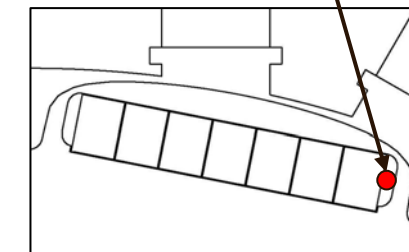
Verluste: $P = m \cdot c \cdot d g / dt$

Nur das Verhältnis $d g / dt$ wird für
unterschiedliche Motoren verwendet!

Motor A



Temperatursensor



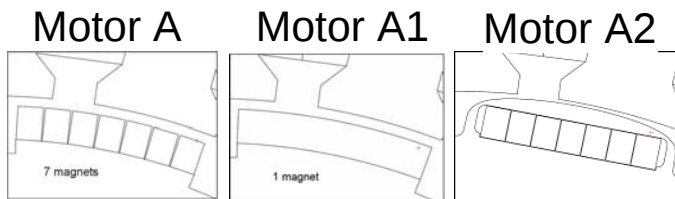
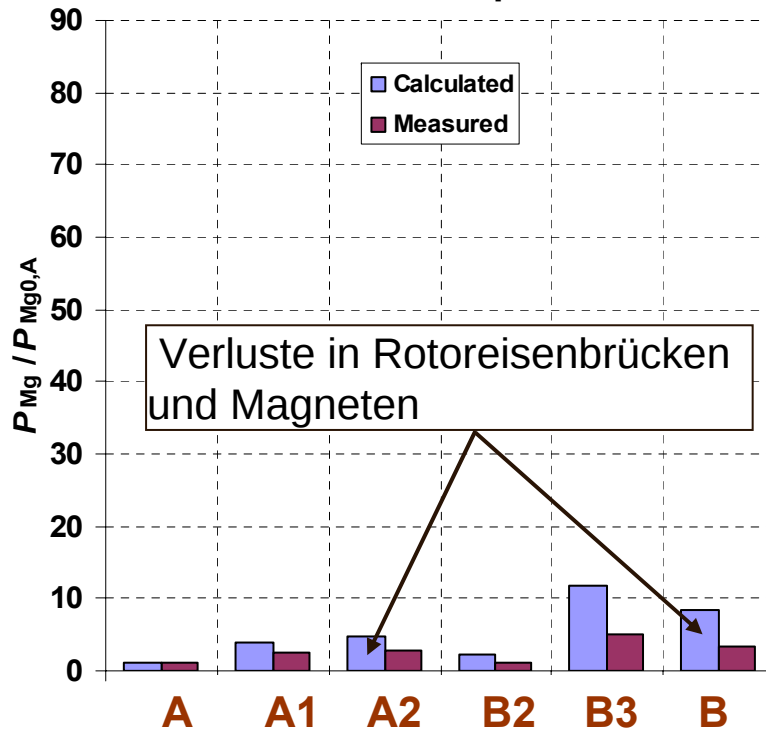
Motor B

Generator-Leerlauf: Rotorverluste: Rechnung vs. Messung



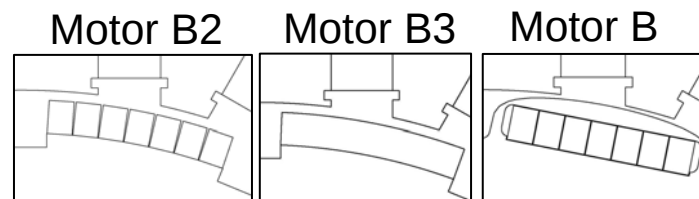
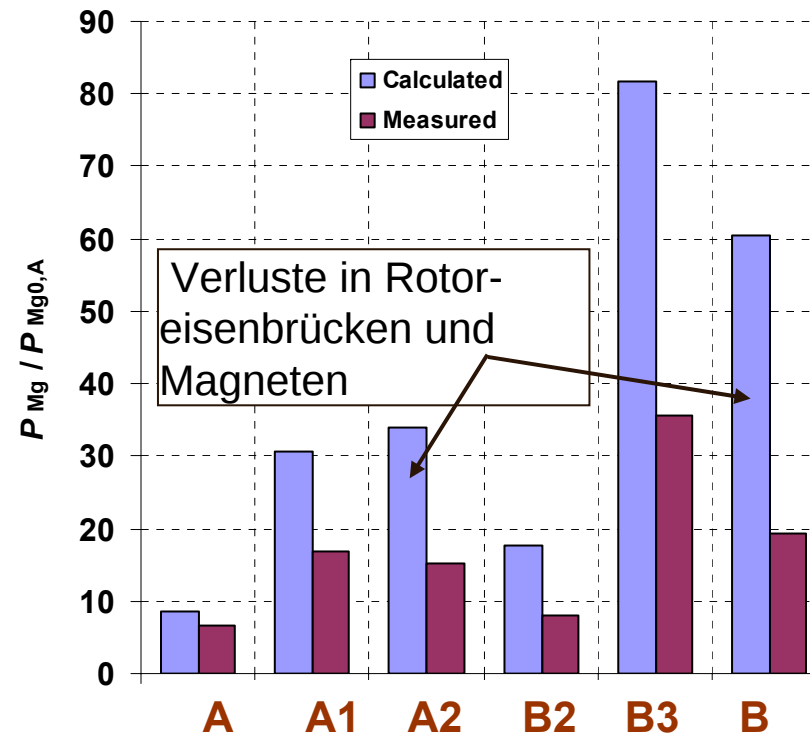
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Verluste auf **Motor A**, 1000 rpm, Leerlauf ($P_{Mg0,A}$) bezogen
No- load 1000 rpm



$q = \frac{1}{2}$

No- load 3000 rpm



$q = \frac{1}{4}$



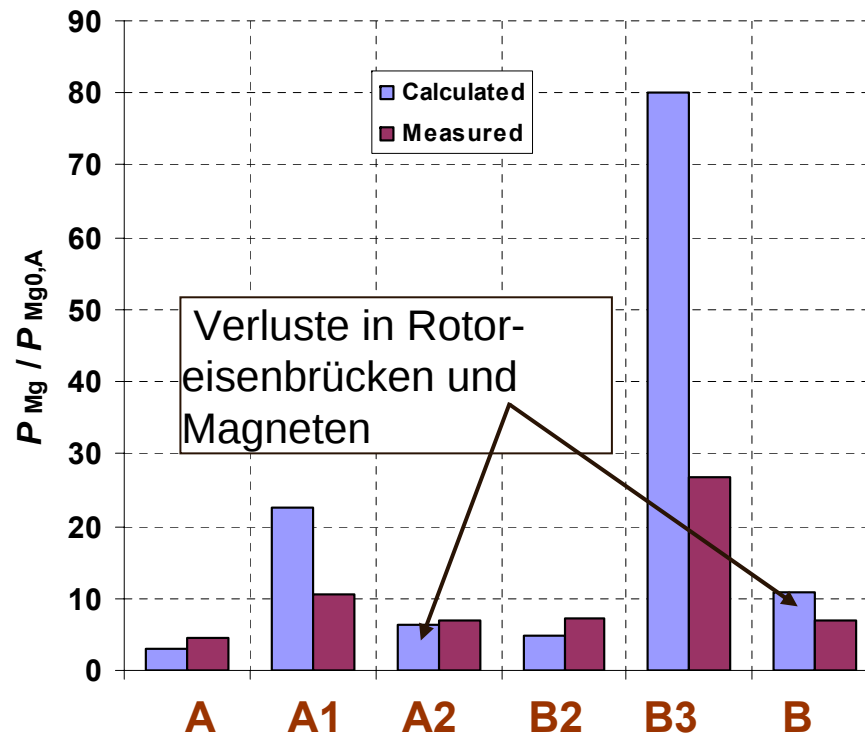
Nennleistung 45 kW: Motor am Umrichter: Rotorverluste: Rechnung vs. Messung



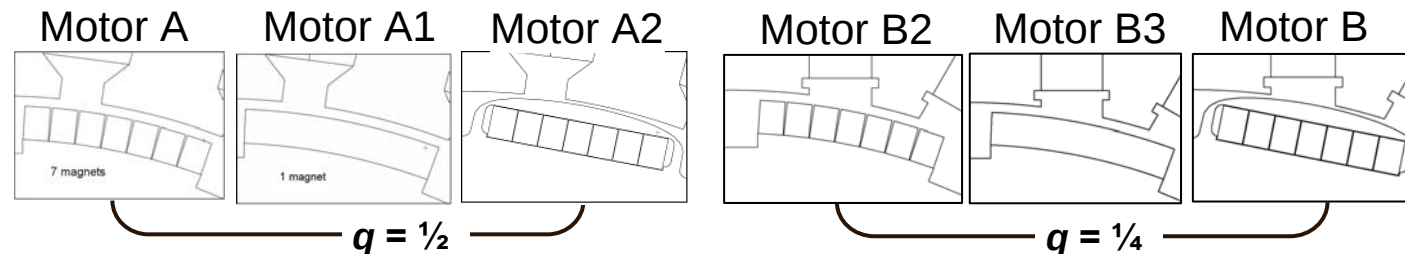
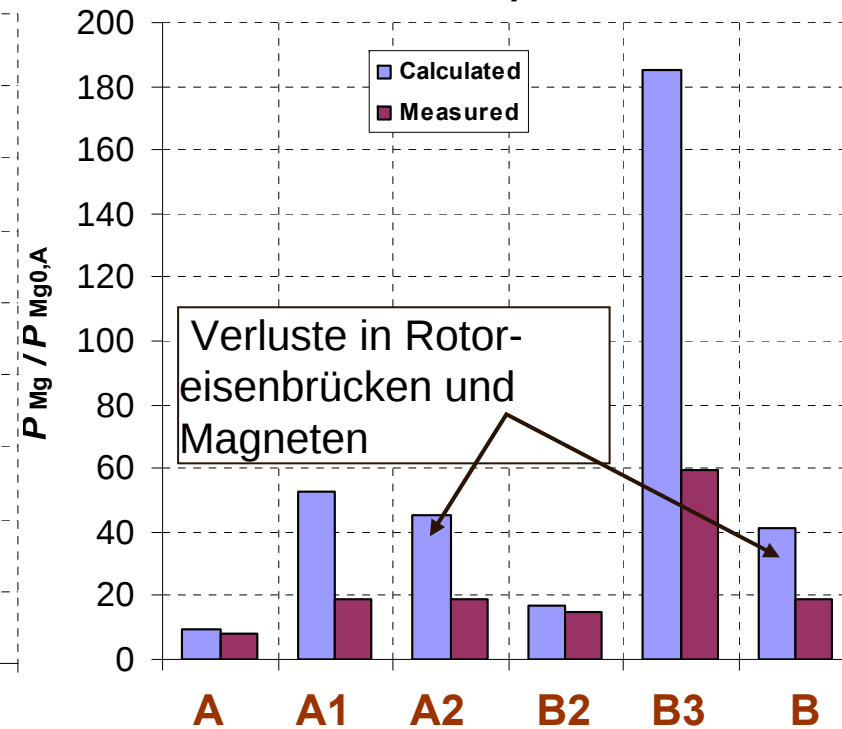
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Verluste auf **Motor A**, 1000 rpm, Leerlauf ($P_{Mg0,A}$) bezogen

Load 1000 rpm

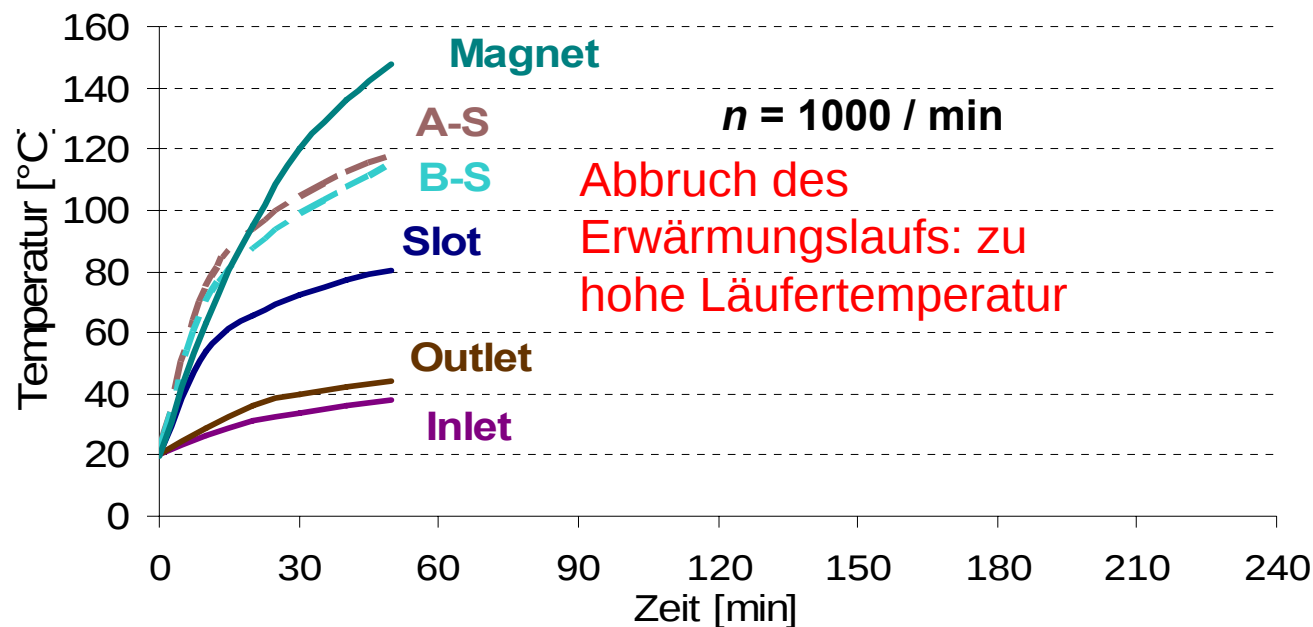


Load 3000 rpm

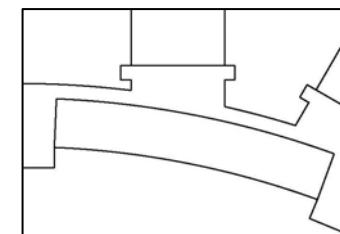


Gemessene Temperaturen, Nennleistung 45 kW: Motor am Umrichter: Motor B3

Wicklungs & Magnettemperatur



Motor B3



$$I_s = 128.1 \text{ A}; U_s = 203.2 \text{ V}; \cos \varphi = 0.64;$$
$$M = 430.7 \text{ Nm}; P_{\text{mech}} = 45.1 \text{ kW}; P_d = 5.34 \text{ kW}$$



Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Kompakte Industrieantriebe mit Zahnspulenwicklung sind möglich
- Sie erlauben hohe Leistungsdichte
- Sie ermöglichen hohen Feldschwäcbereich
- Sie bedürfen einer speziellen Dimensionierung
- Es treten relativ hohe Statorfrequenzen auf
- Parasitäreffekte bedürfen einer besonderen Beachtung
- Parasitäreffekte sind: zusätzliche Verluste, mögliche Geräuschanregungen



Danke
für Ihre Aufmerksamkeit !

