

# Bestimmung des Wirkungsgrads von permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Einzelverlustverfahren



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

K 311-Treffen, 06.-07.04.2017, Lügde

Andreas Binder  
**Björn Deusinger**

Institut für Elektrische Energiewandlung  
Technische Universität Darmstadt  
[abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)



Prüfstand zur Wirkungsgradbestimmung

## Einleitung

Wirkungsgradbestimmung der PMSM

Prüfstand & Messergebnisse

Zusammenfassung & Ausblick

- Untersuchung eines Verfahrens der **Einzelverlustbestimmung für PMSM**  
→ Indirekte Wirkungsgradbestimmung
- Vergleichbares Verfahren für el. erregte SM bereits vorhanden
  
- **INS-Projekt 1224** (Zeitraum 2013-2014)
  - Vermessung dreier unterschiedlicher PMSM
  - Vorgestellt bei K 311-Treffen in Ludwigshafen/Bruchsal 2014
  
- **Weiterführung** am Institut EW



Einleitung

Wirkungsgradbestimmung der PMSM

Prüfstand & Messergebnisse

Zusammenfassung & Ausblick



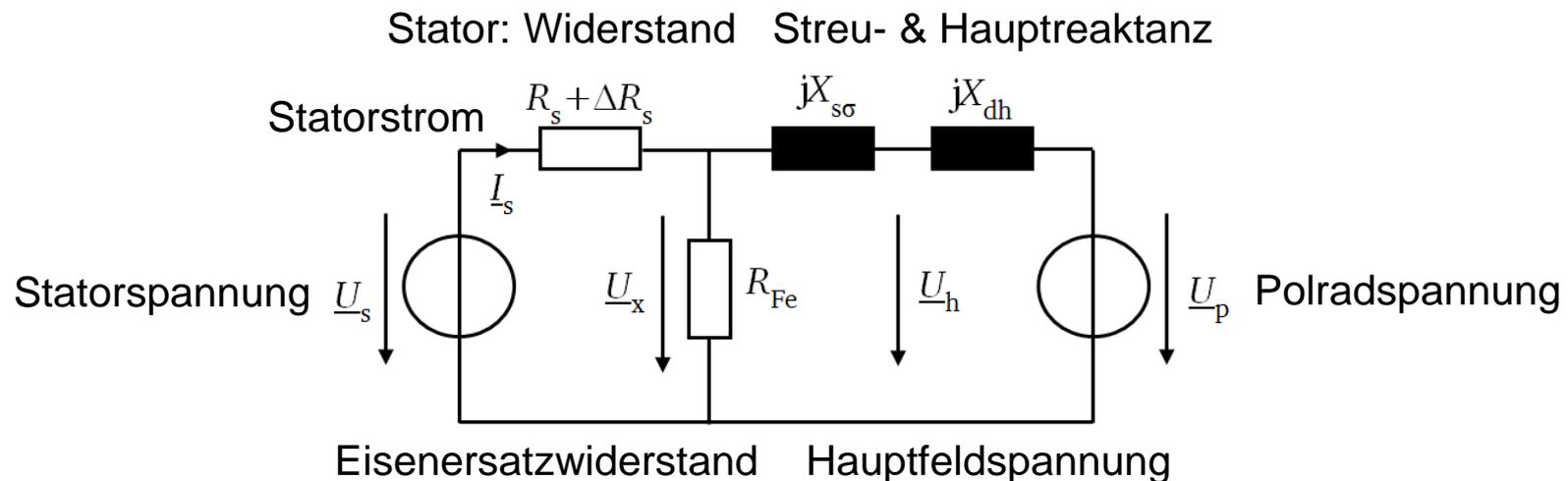
# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Verlustgruppen und Ersatzschaltbild

Verlustgruppen der permanentmagneterregten Synchronmaschine:

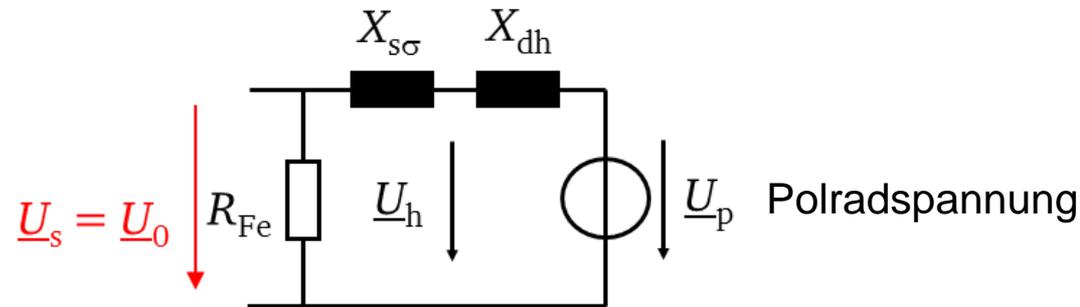
- Leerlaufverluste (Ummagnetisierungs- und Reibungsverluste) im **Leerlaufversuch** (generatorisch/motorisch)
- Lastabhängige Verluste ( $I^2R$ - und Zusatzverluste) im **Bohrungsfeldversuch**
- **Umrichterbedingte Zusatzverluste** (bereits im Leerlauf vorhanden)

**Ersatzschaltbild der PMSM** (kein Reluktanzunterschied in d- und q-Achse):



# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Generatorischer Leerlaufversuch



- Statorspannung = Reaktanzspannung  $\approx$  Polradspannung
- Statorstrom  $\underline{I}_s = 0$
- Messung möglichst bei betriebswarmer Maschine
- Gemessene **mechanische Eingangsleistung**  $P_{in} = 2\pi \cdot n \cdot M_0$ :
  - A) Ummagnetisierungsverluste  $P_{Fe,0}$
  - B) Reibungsverluste  $P_{fr+w}$
$$\left. \begin{array}{l} \text{A) Ummagnetisierungsverluste } P_{Fe,0} \\ \text{B) Reibungsverluste } P_{fr+w} \end{array} \right\} P_{in} = P_{d0,gen}$$
- **Reibungsverluste** müssen **berechnet** oder mit Hilfe eines unmagnetisierten Rotors bestimmt werden.

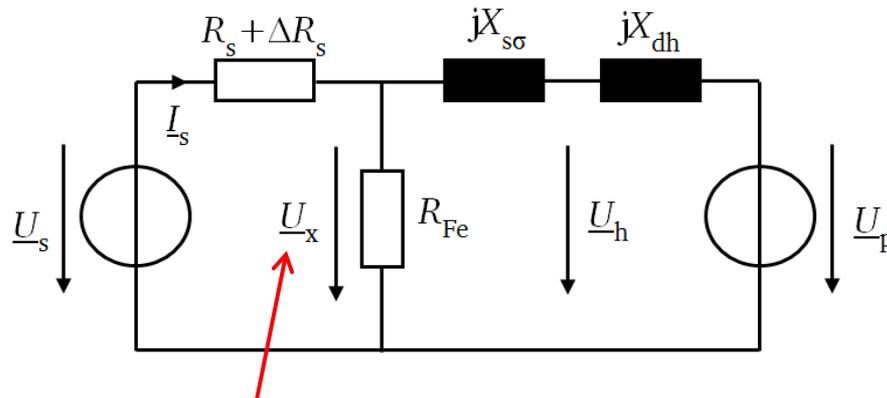
# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Motorischer Leerlaufversuch

- Betrieb am **Umrichter**, möglichst bei betriebswarmer Maschine
- Üblicherweise sehr kleiner Leerlaufstrom  $I_{s0} \approx 0$
- Zusatzverluste durch **Schaltrippel** → hochfrequente **Oberschwingungen**
- **Trennung der Eingangsleistung**  $P_{e,in,0}$  (3-Phasen-Leistungsanalysator)
  - Grundschwingungsleistung  $P_{e,in,0,1}$  (vgl.  $P_{d0,gen}$  aus gen. Messung)
  - Oberschwingungsleistung  $P_{e,in,0,ad} = P_{e,in,0} - P_{e,in,0,1}$
- Umrichterbedingte Zusatzverluste **unabhängig** vom aktuellen **Stromwert**
- Aber:  $P_{e,in,0,ad}$  hängt vom Modulationsgrad des Umrichters ab, d. h. von der (Leerlauf-) **Spannung**
- Rein elektrische Messung → i. a. hohe **Messgenauigkeit** erreichbar

# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Ummagnetisierungsverluste unter Last



Korrekturrechnung mit Hilfe von  $U_x$ :

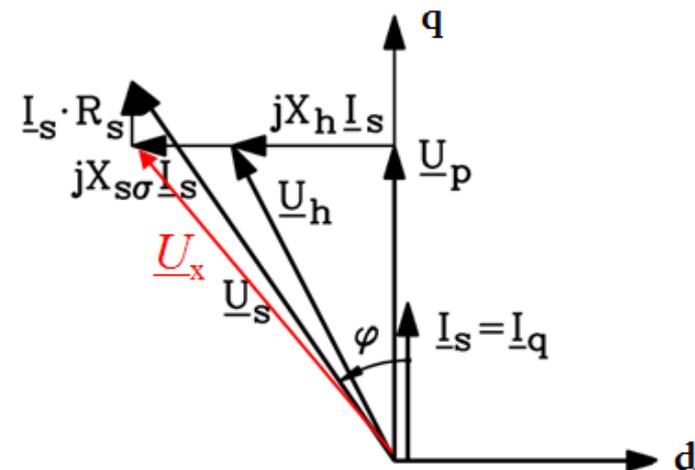
$$P_{Fe} \approx P_{Fe,0} \cdot \left( \frac{U_x}{U_0} \right)^2$$

$P_{Fe,0}$  aus gen./mot. Leerlauf

Berechnung der Reaktanzspannung

$$\underline{U}_x = \underline{U}_s - R_s \cdot \underline{I}_s$$

Zeigerdiagramm der PMSM unter Last:

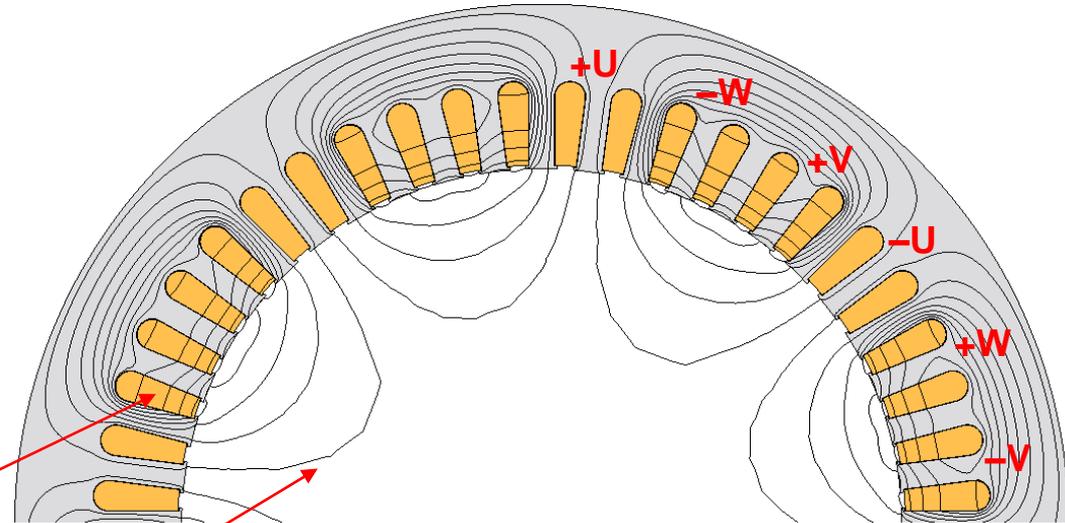


# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Bohrungsfeldversuch

### Beispiel, 2D-FEM-Simulation:

- 8-poliges Stator-Magnetfeld, Rotor entfernt
- Dreisträngige Einschichtwicklung
- $q = 2$  Nuten pro Pol und Strang
- $i_U = 0, i_V = -i_W$
- Sinusspeisung



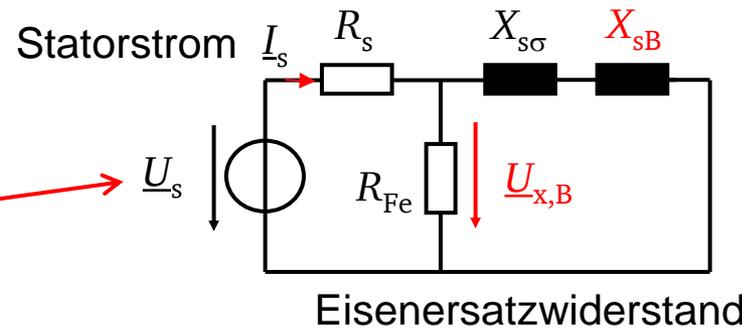
JMAG Designer 16

- Nur **Stator-Streifeld** und **Bohrungsfeld** bei entferntem Rotor
- Gemessene elektrische Eingangsleistung  $P_{e,in,B} = P_{Cu,s} + P_{s,ad} + P_{Fe,B}$ 
  - Ummagnetisierungsverluste:  $P_{Fe,B}$
  - **Dominante**  $I^2R$ - und lastabhängige Zusatzverluste:  $P_{Cu,s} + P_{s,ad}$

# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Bohrungsfeldversuch

Stator: Widerstand, Streu- & Bohrungs-Reaktanz



Sinusspeisung am Umformer:  
Variable Stromamplitude und  
Frequenz

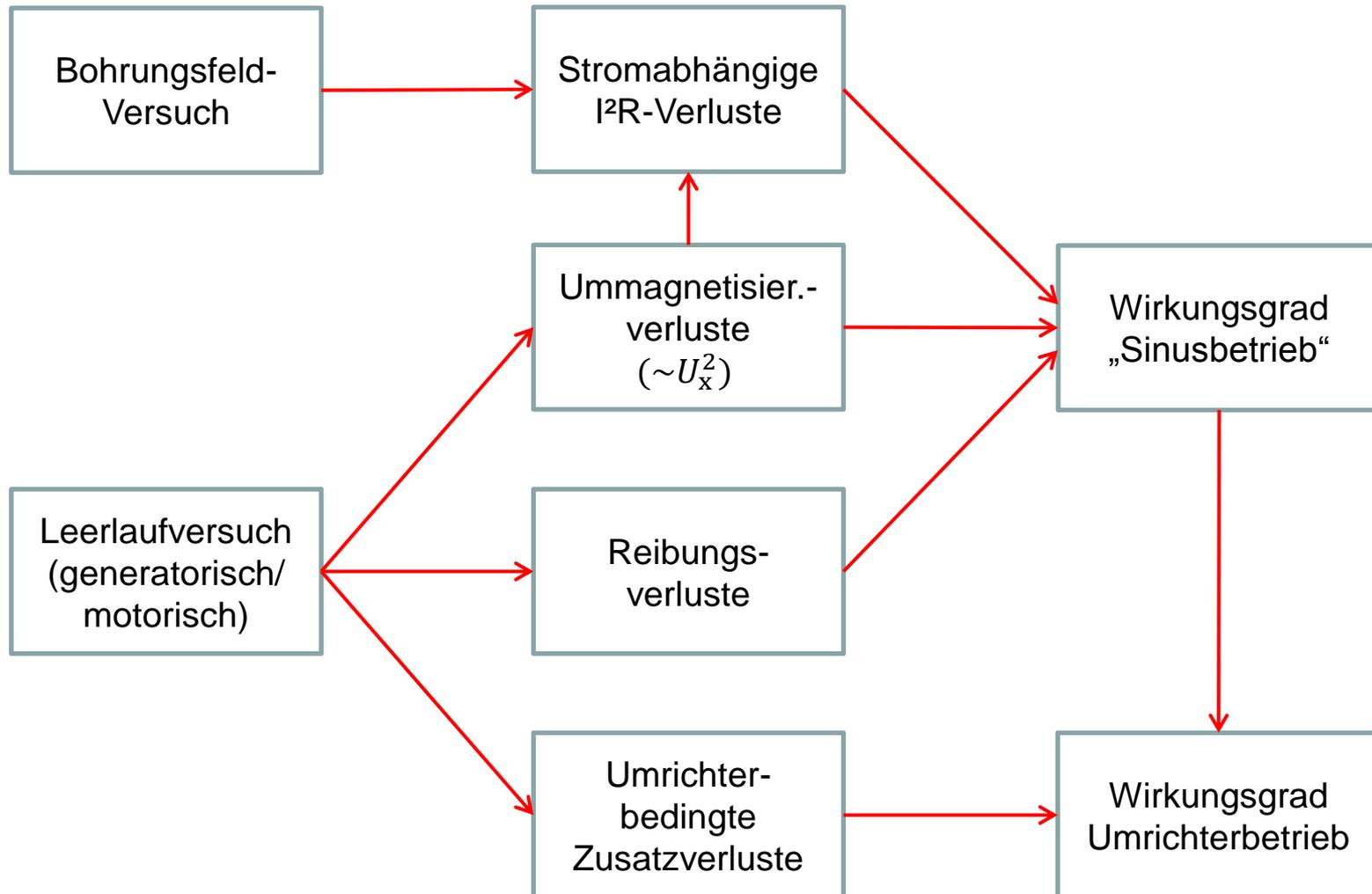
Gemessene elektrische Eingangsleistung:  $P_{e,in,B} = P_{Cu,s} + P_{s,ad} + P_{Fe,B}$

$I^2R$ - und lastabhängige Zusatzverluste:  $P_1 = P_{Cu,s} + P_{s,ad} = P_{e,in,B} - P_{Fe,B}$

$$P_{Fe,B} \approx P_{Fe,0} \cdot \left( \frac{U_{x,B}}{U_0} \right)^2 \quad U_{x,B} = U_s - R_s \cdot I_s$$

# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Verlustkomponenten



# Wirkungsgradbestimmung der PMSM

## Wirkungsgrad unter Last

- Statorstrom  $I_s$  und -spannung  $U_s$  beim (Grundschrwingungs-)Leistungsfaktor  $\cos \varphi_s$
- $P_{e,1} = 3U_s I_s \cos \varphi_s$ ,  $P_1 = f(f_s, I_s)$ ,  $P_{Fe} = f(n, U_x)$ ,  $P_{e,in,0,ad} = f(U_s)$

### „Sinusbetrieb“

**Generator-  
betrieb**

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{e,1}}{P_{e,1} + P_{Fe} + P_{fr+w} + P_1}$$

**Motor-  
betrieb**

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_{e,1} - P_{Fe} - P_{fr+w} - P_1}{P_{e,1}}$$

### Umrichterbetrieb

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{e,1}}{P_{e,1} + P_{Fe} + P_{fr+w} + P_1 + P_{e,in,0,ad}}$$

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_{e,1} - P_{Fe} - P_{fr+w} - P_1}{P_{e,1} + P_{e,in,0,ad}}$$

**Achtung:**

Rotorseitige lastabhängige Zusatzverluste durch den Sinus-Grundschrwingungsstrom werden nicht berücksichtigt.

**Aber:** Diese sind üblicherweise klein bei Maschinen mit verteilter Wicklung.



Einleitung

Wirkungsgradbestimmung der PMSM

Prüfstand & Messergebnisse

Zusammenfassung & Ausblick



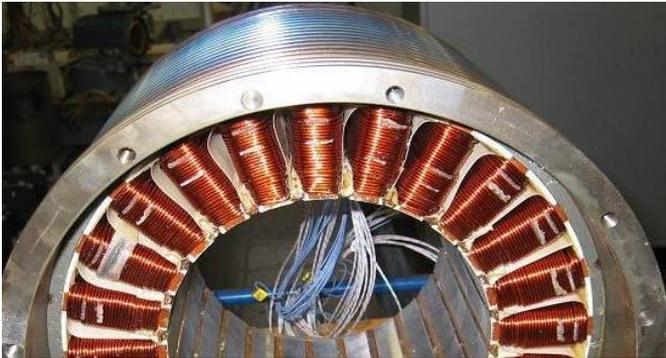
# Prüfstand

## Prüflinge

Maschine	1	2	3	4
Wicklung	<b>Zweischicht, Zahnspule</b>	<b>Einschicht, Zahnspule</b>	<b>Einschicht, verteilt</b>	<b>Einschicht, verteilt</b>
Nennleistung $P_N$	45 kW	45 kW	90 kW	84 kW
Nennzahl $n_N$	1000 min <sup>-1</sup>	1000 min <sup>-1</sup>	3000 min <sup>-1</sup>	2500 min <sup>-1</sup>
Nennmoment $M_N$	430 Nm	430 Nm	286 Nm	320 Nm
Nennspannung $U_{sN}$	230 V	230 V	230 V	230 V
Nennstrom $I_{sN}$	102 A	120 A	200 A	148 A
Luftspaltweite $\delta$	0.7 mm	0.7 mm	1.6 mm	1.0 mm
Nutöffnung	Halboffen	Offen	Halboffen	Halboffen
Nutform	Oval	Parallel	Oval	Oval
Rotormagnete NdFeB	Oberflächen-	Vergraben	Oberflächen-	Oberflächen-
Kühlung	Wassermantel	Wassermantel	Wellenlüfter	Fremdbelüftet

# Prüfstand Prüflinge

**Maschine 1: Zweischichtwicklung, 16-polig**

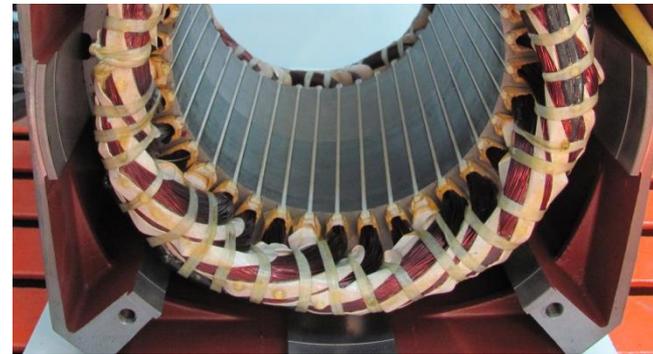


**Zahnspulenwicklung**

**Maschine 2: Einschichtwicklung, 16-polig**



**Maschine 3: Einschichtwicklung, 6-polig**



**Verteilte Wicklung**

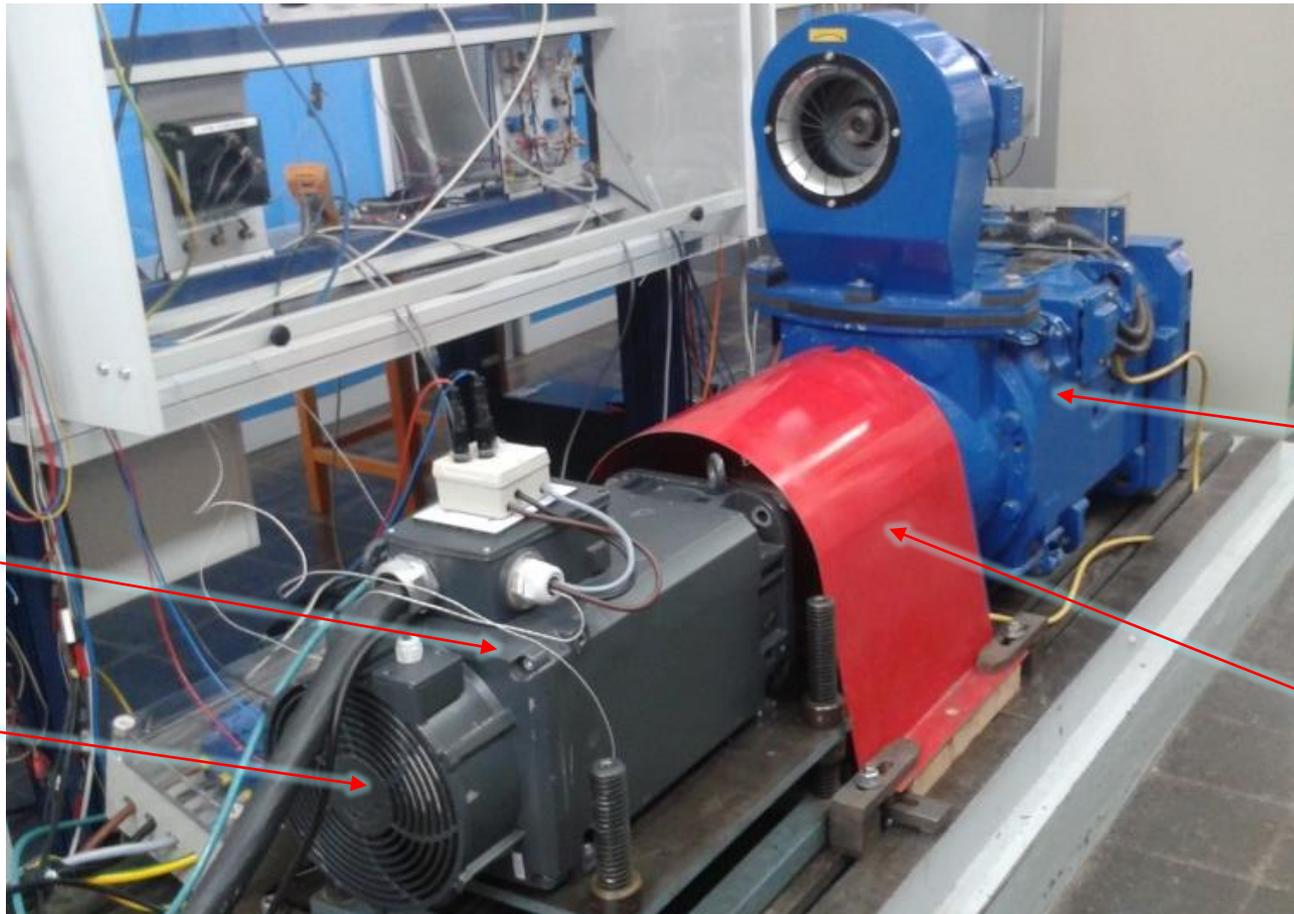
**Maschine 4: Einschichtwicklung, 8-polig**



# Prüfstand

## Drehmomentmessung

Ziel: Vergleich von direkt und indirekt bestimmten Wirkungsgrad



Maschine 4

Externer  
Lüfter

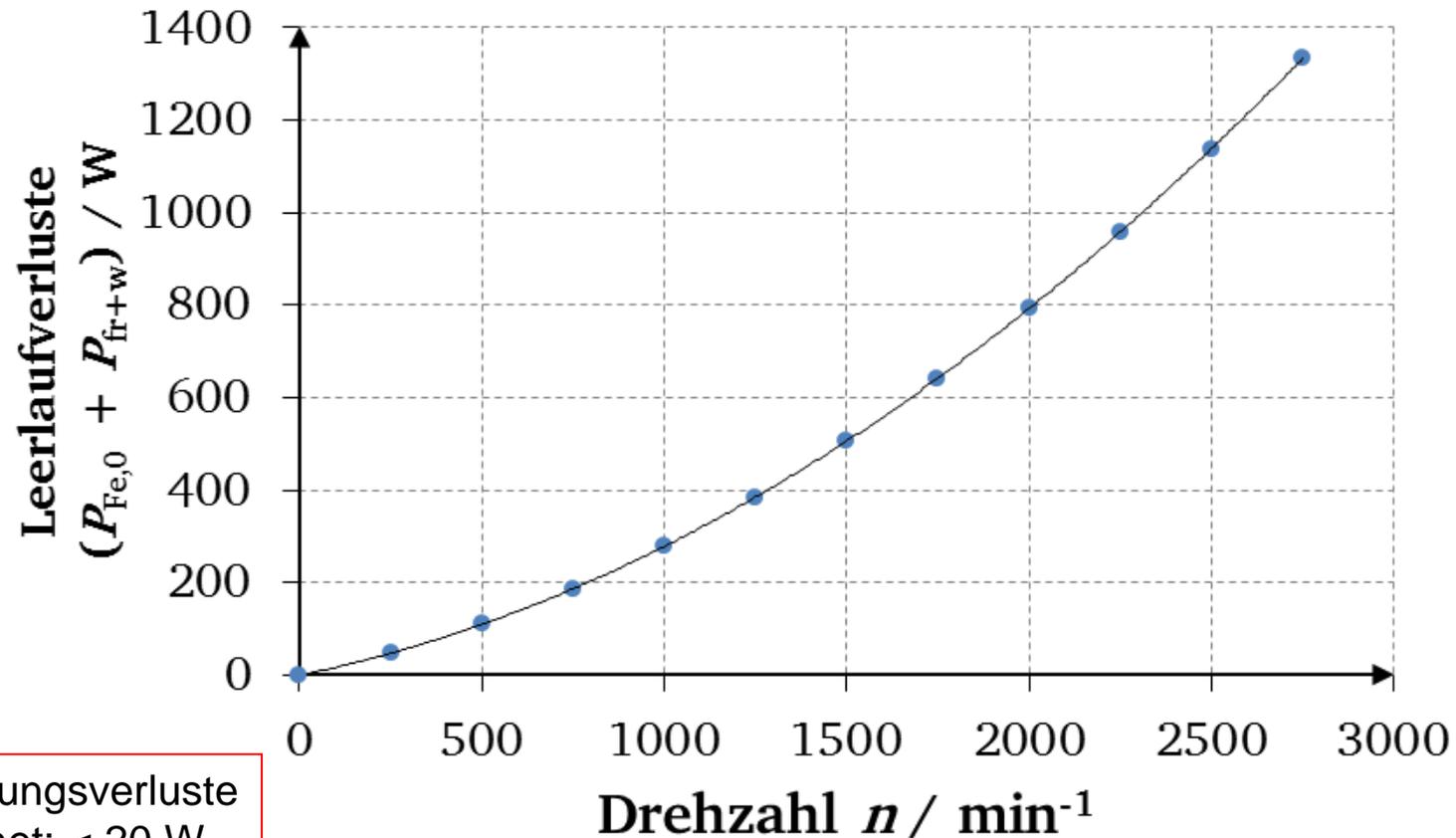
Lastmaschine

Messwelle  
(abgedeckt)

# Messergebnisse

## Leerlaufverluste (generatorisch)

Maschine 4:

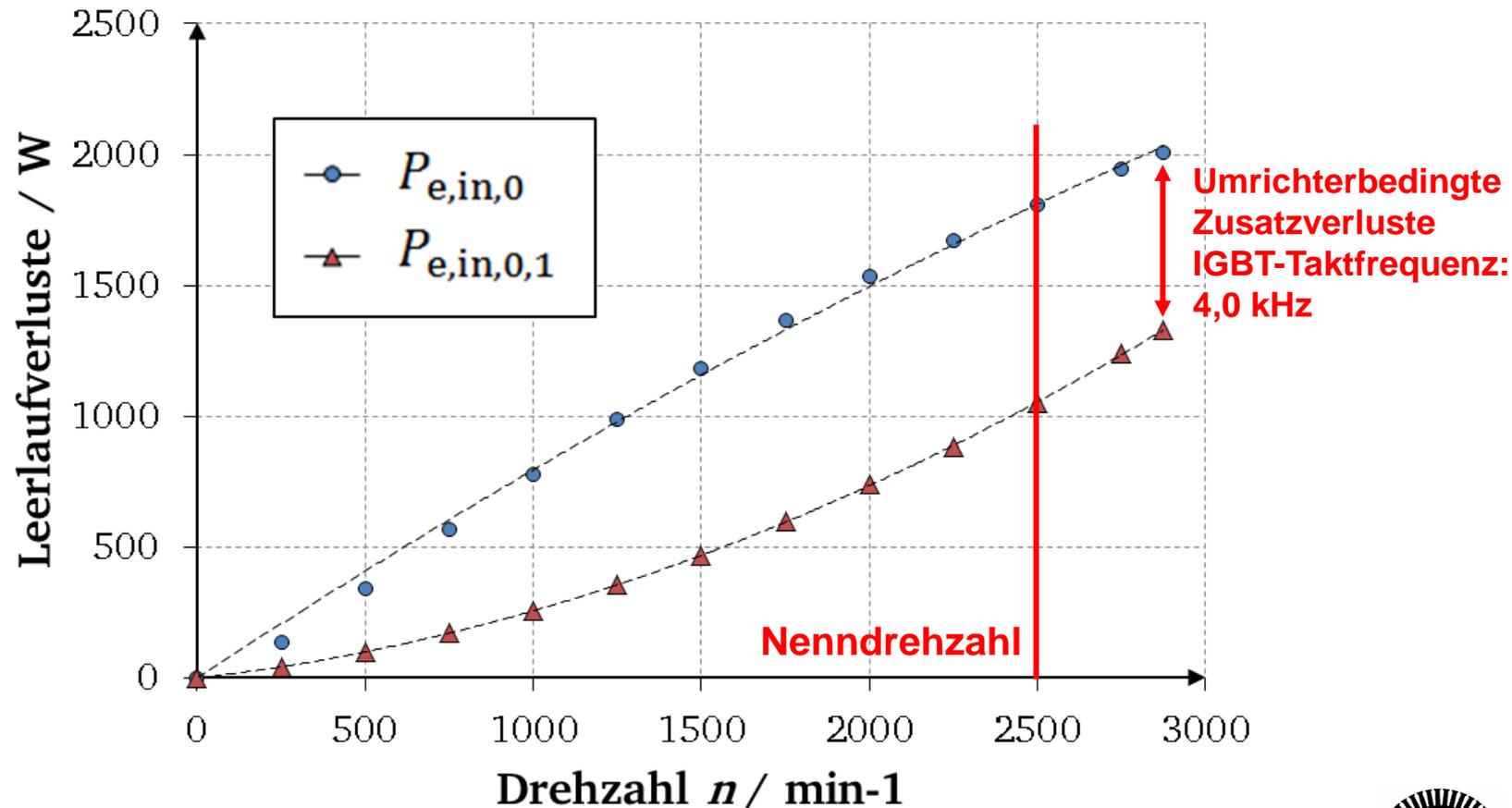


Luftreibungsverluste  
berechnet: < 20 W

# Messergebnisse

## Leerlaufverluste (motorisch)

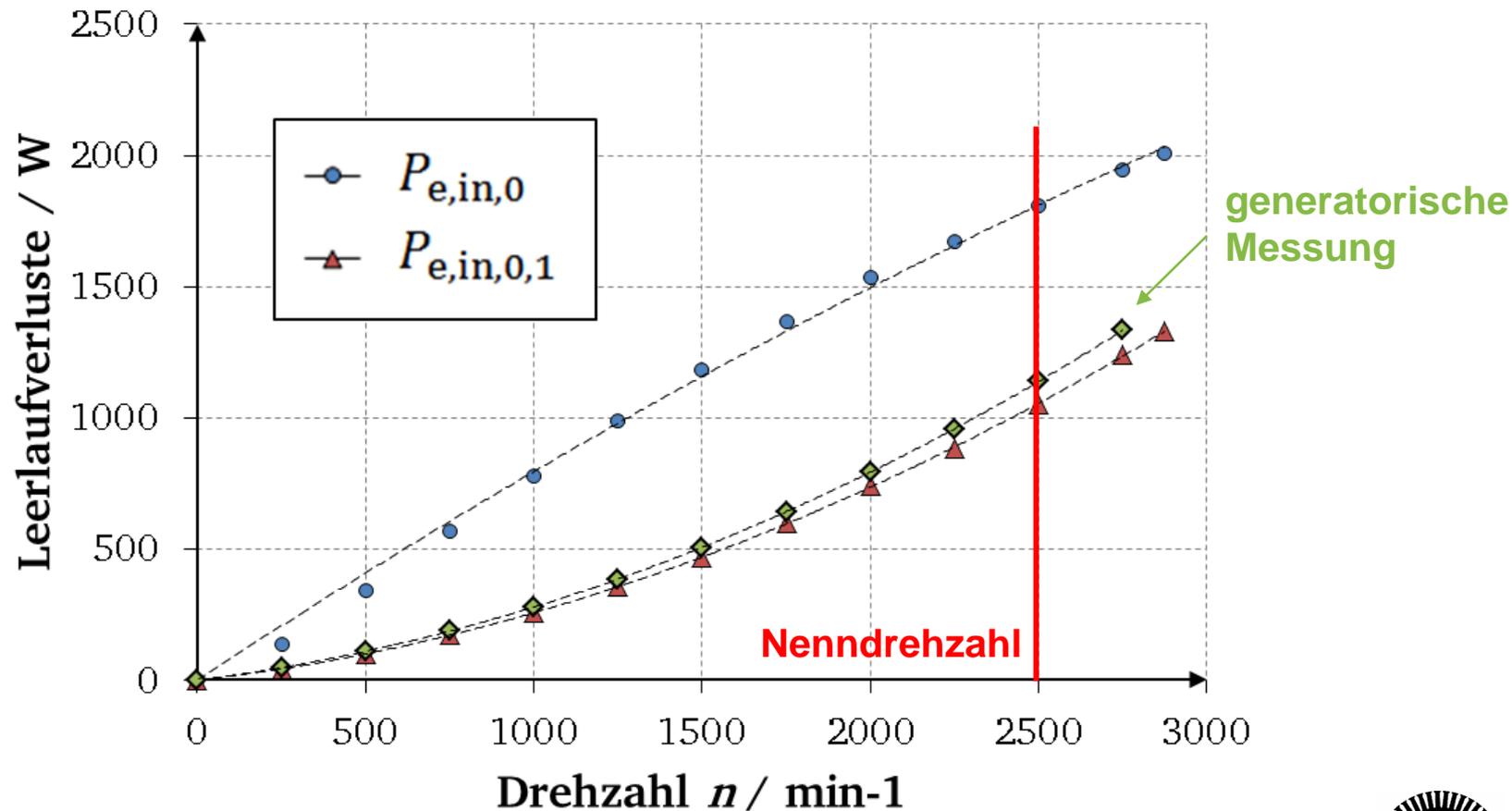
Maschine 4:



# Messergebnisse

## Leerlaufverluste (Vergleich)

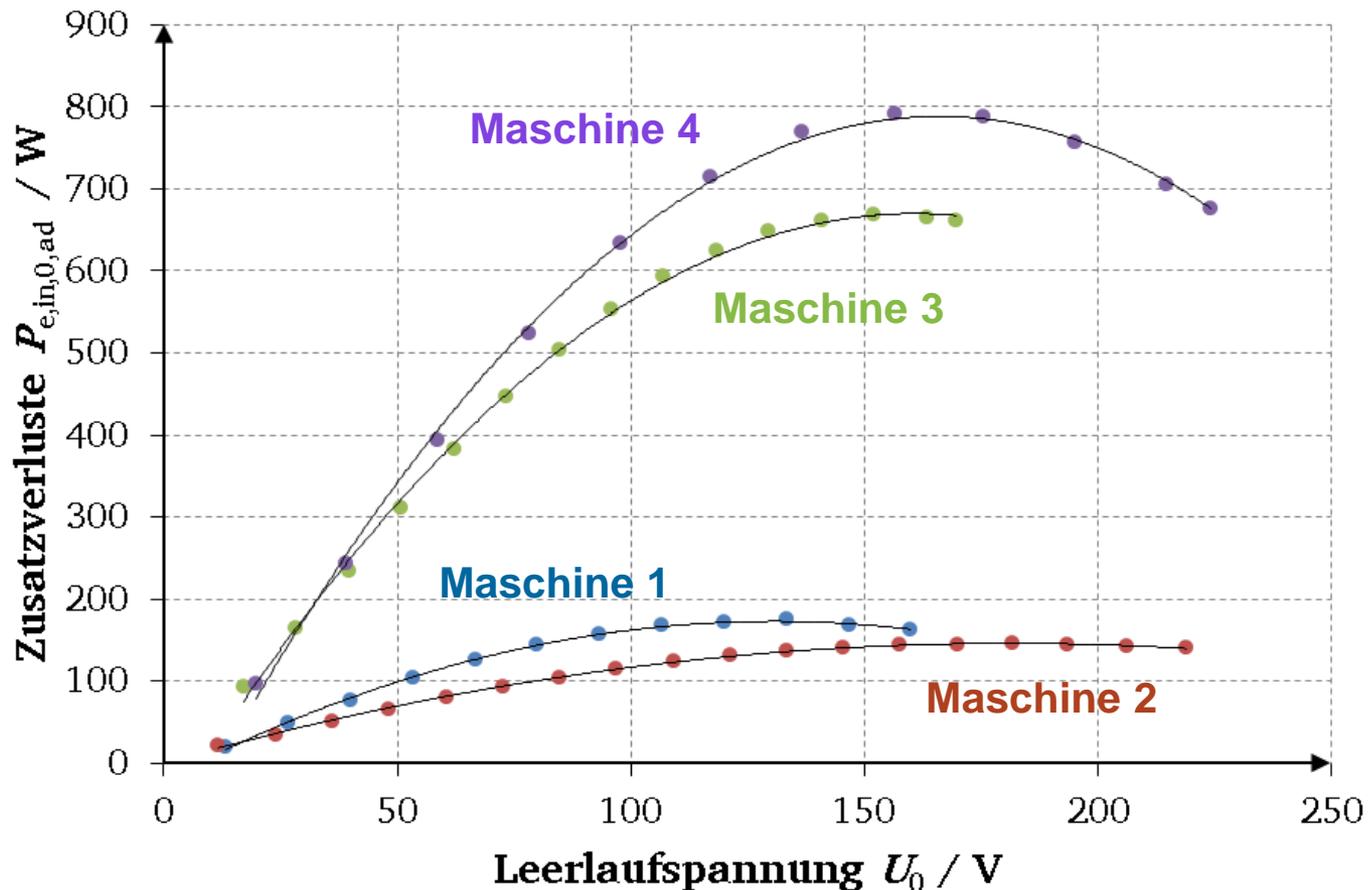
Maschine 4:



# Messergebnisse

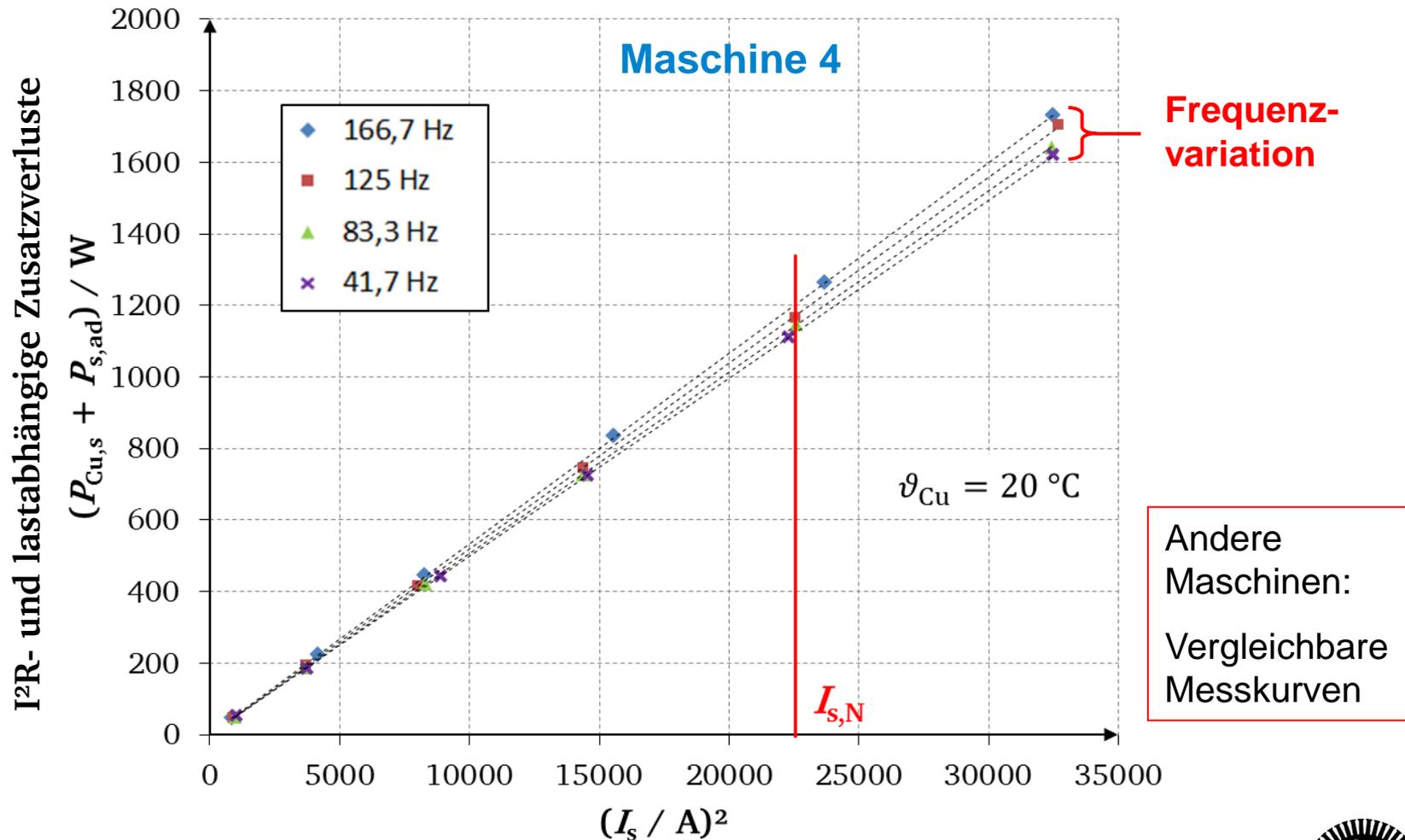
## Umrichterbedingte Zusatzverluste

Vergleich aller Maschinen:



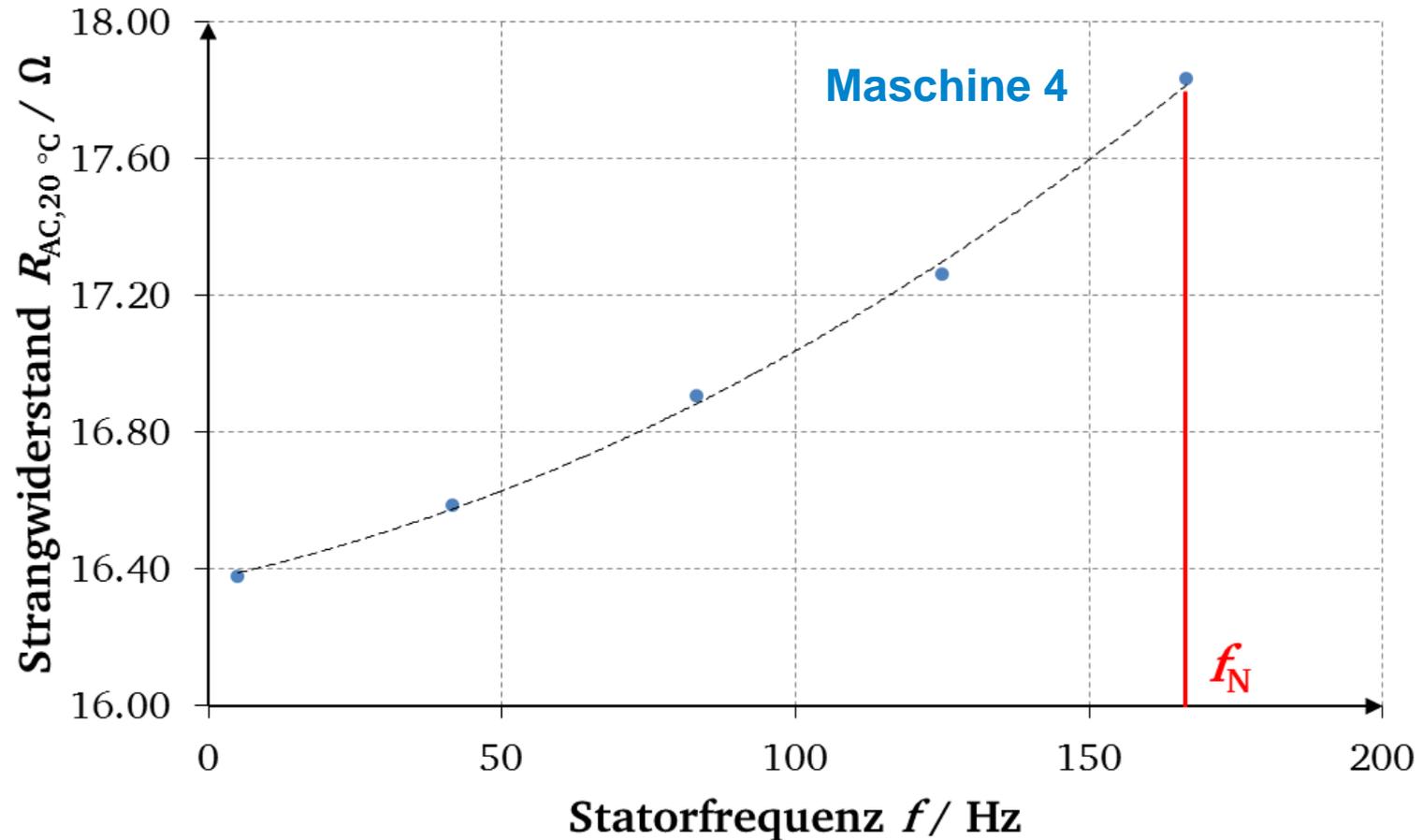
# Messergebnisse

## Bohrungsfeldversuch



# Messergebnisse

## Strangwiderstandszunahme



# Messergebnisse

## Maschine 1 (Zahnspulenwicklung)

### Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb

Motorbetrieb bei

Drehzahlen:

a)  $500 \text{ min}^{-1}$

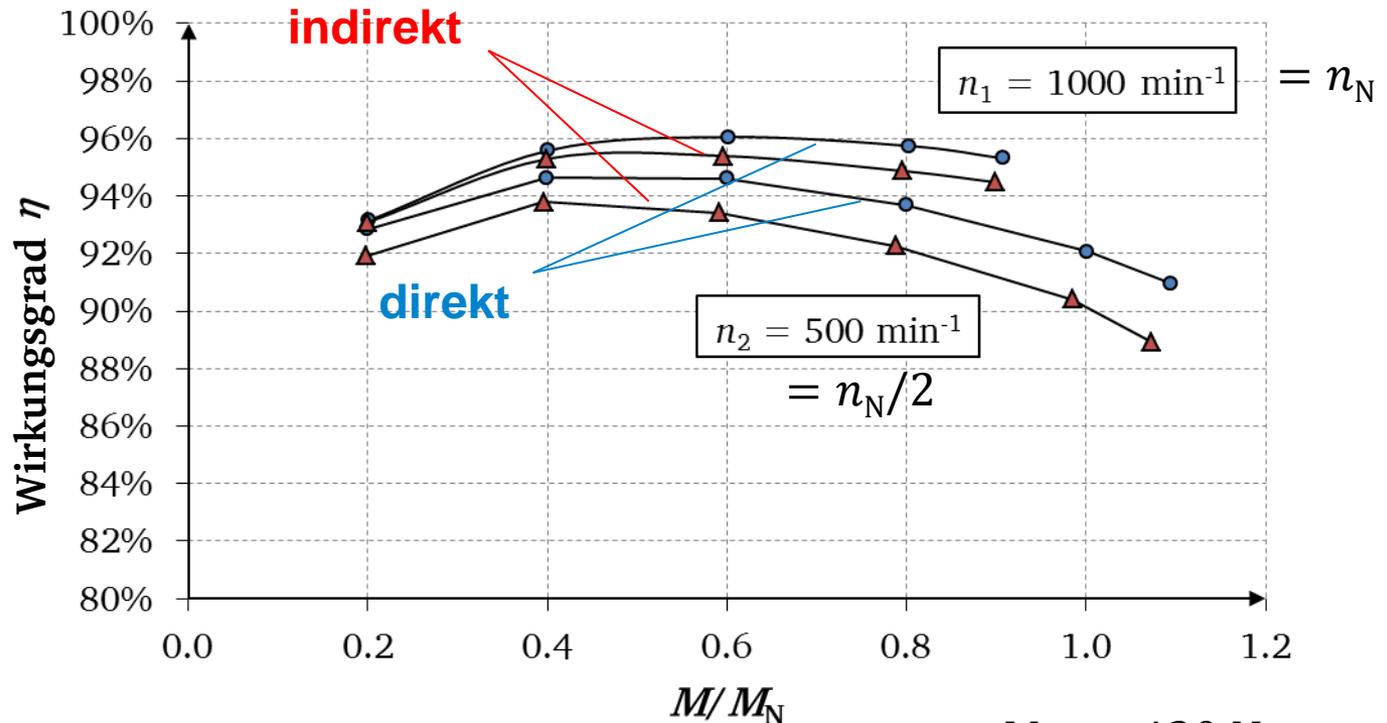
b)  $1000 \text{ min}^{-1}$

Gesamt-  
Eingangsleistung:

$$P_{e,in}$$

Direkt:

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_{e,in}}$$



$$M_N = 430 \text{ Nm}$$

Abweichung bereits bei "Sinusbetrieb" vorhanden



# Messergebnisse

## Maschine 2 (Zahnspulenwicklung)

### Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb

Motorbetrieb bei

Drehzahlen:

a)  $500 \text{ min}^{-1}$

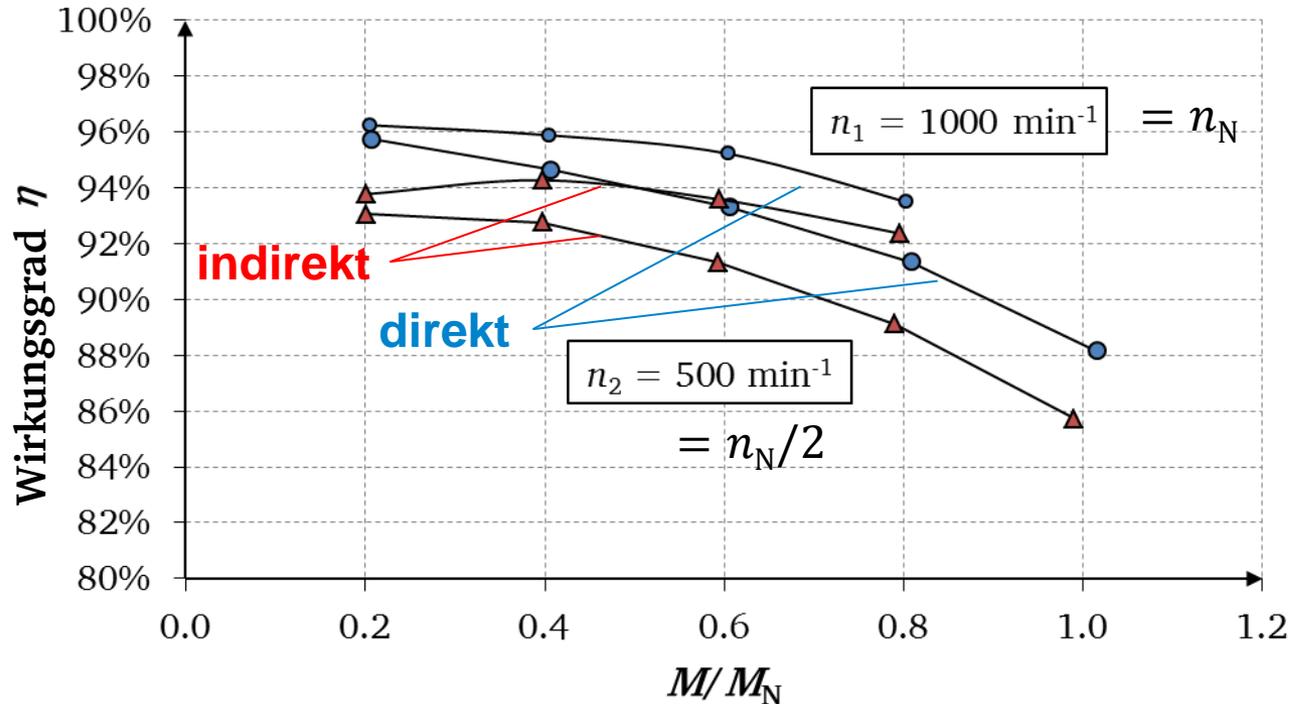
b)  $1000 \text{ min}^{-1}$

Gesamt-  
Eingangsleistung:

$$P_{e,in}$$

Direkt:

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_{e,in}}$$



$$M_N = 430 \text{ Nm}$$

Abweichung bereits bei "Sinusbetrieb" vorhanden



# Messergebnisse

## Maschine 3 (verteilte Wicklung)

### Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb

Motorbetrieb bei

Drehzahlen:

a)  $1500 \text{ min}^{-1}$

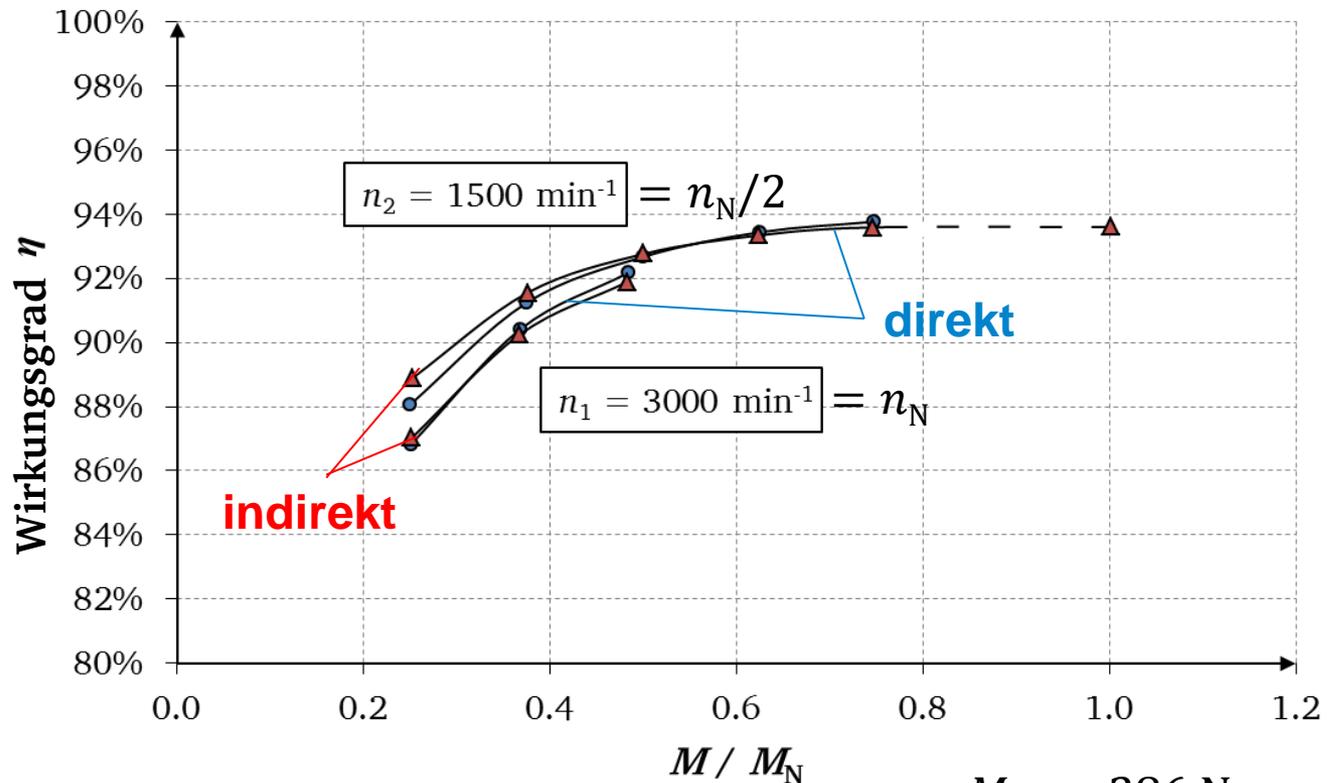
b)  $3000 \text{ min}^{-1}$

**Gesamt-  
Eingangsleistung:**

$$P_{e,in}$$

**Direkt:**

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_{e,in}}$$



Gute Übereinstimmung bereits bei "Sinusbetrieb"

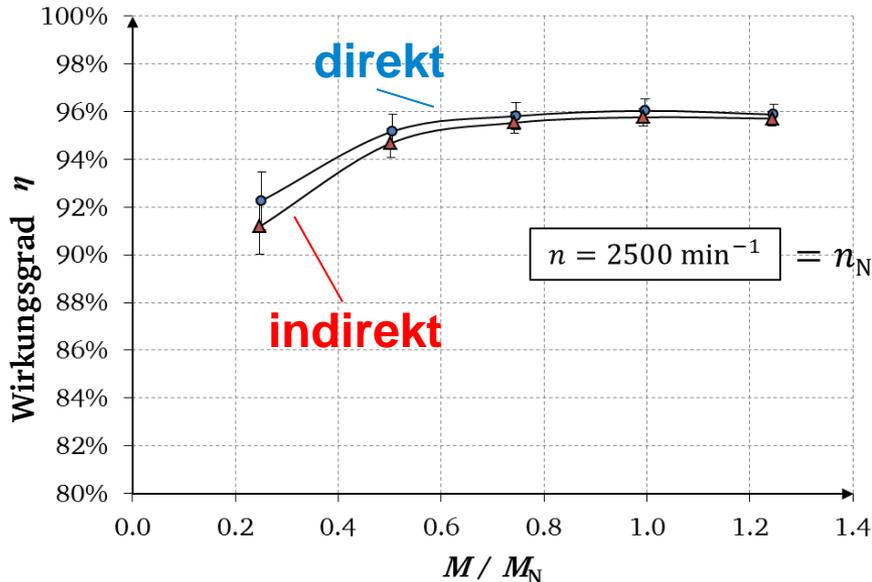
$$M_N = 286 \text{ Nm}$$

# Messergebnisse

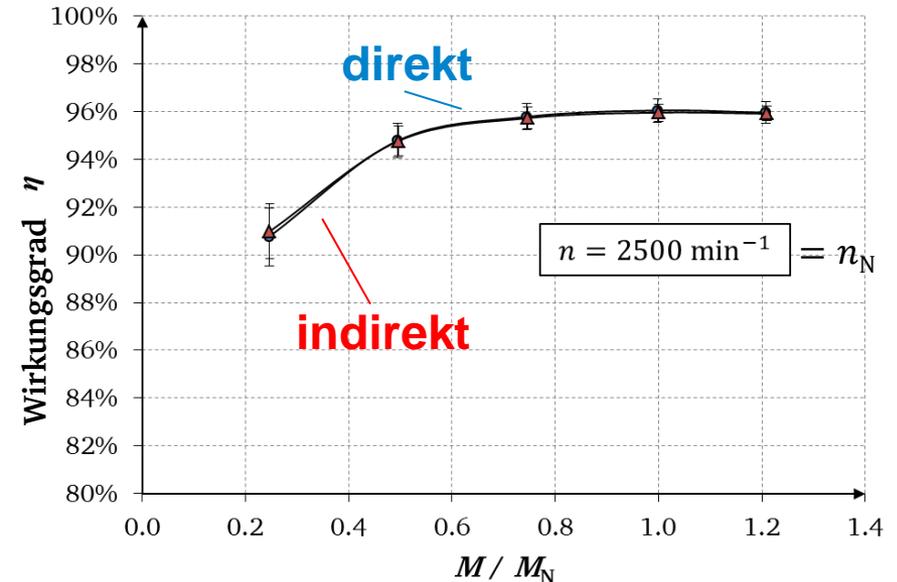
## Maschine 4 (verteilte Wicklung)

### Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb

Motor:



Generator:



Gesamt-Eingangsleistung:  $P_{e,in}$

$M_N = 320 \text{ Nm}$

Direkt: 
$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_{e,in}}$$

Ummagnetisierungsverluste im generatorischen Leerlaufversuch bestimmt

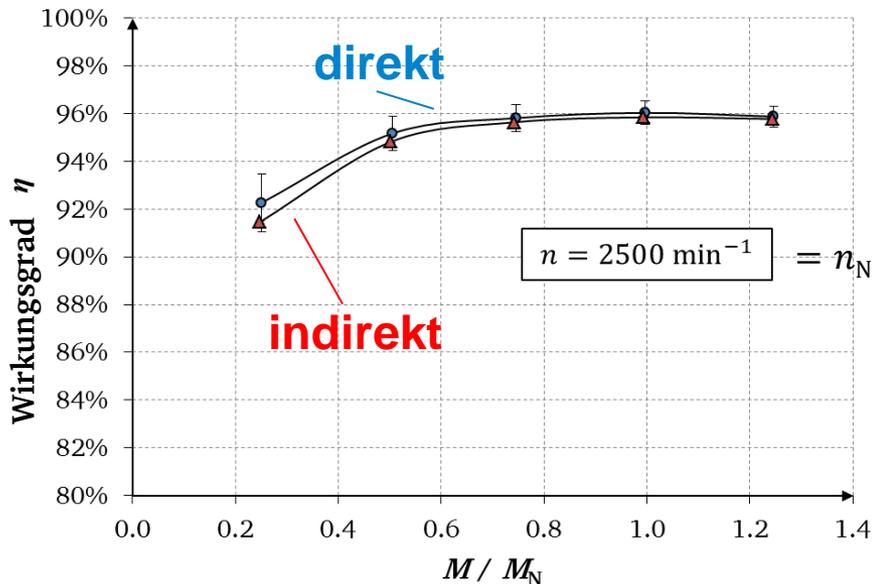


# Messergebnisse

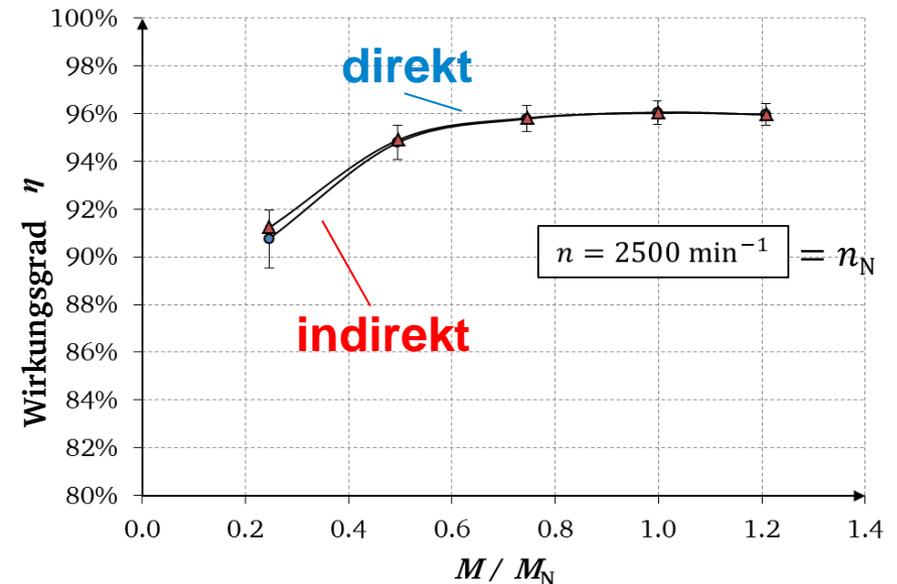
## Maschine 4 (verteilte Wicklung)

### Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb

Motor:



Generator:



Gesamt-Eingangsleistung:  $P_{e,in}$

$M_N = 320 \text{ Nm}$

Direkt: 
$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M}{P_{e,in}}$$

Ummagnetisierungsverluste im motorischen Leerlaufversuch bestimmt

# Messergebnisse

## Übersicht

### Wirkungsgrad bei **Umrichterbetrieb**

Abweichung in %-Punkten, Referenz: Direkte Messung

	Motorbetrieb	Generatorbetrieb
Maschine 1 $n = n_N, M = 0,9 \cdot M_N$	-0,8	+0,1
Maschine 2 $n = n_N, M = 0,8 \cdot M_N$	-1,1	-0,6
Maschine 3 $n = n_N, M = 0,5 \cdot M_N$	+0,2	---*
Maschine 3 $n = 0,5 \cdot n_N, M = 0,8 \cdot M_N$	$\pm 0,0$	---*
Maschine 4 $n = n_N, M = M_N$	-0,2	$\pm 0,0$

\* Keine Rückspeisung möglich



Einleitung

Wirkungsgradbestimmung der PMSM

Prüfstand & Messergebnisse

Zusammenfassung & Ausblick



# Zusammenfassung

- Einzelverlustbestimmung im:
  - **Leerlaufversuch** (motorisch, generatorisch)
  - **Bohrungsfeldversuch**
- Höhere **Messgenauigkeit** bei motorischem Leerlaufversuch
- Die **indirekten** und **direkten Wirkungsgradmessungen** wurden bisher an zwei PM-Synchronmaschinen mit je 45 kW Bemessungsleistung und Zahnspulenwicklung und an zwei PM-Synchronmaschinen mit verteilter Wicklung (90 kW bzw. 84 kW) durchgeführt.
- **Gute Übereinstimmung** bei den Maschinen mit **verteilter Wicklung**, größere Abweichungen bei den Zahnspulenmaschinen

- Vermessung einer weiteren PM-Synchronmaschine mit verteilter Wicklung
  - Bemessungsleistung: 160 kW
  - Bemessungsmoment: 1000 Nm
  - Bemessungsdrehzahl: 1500 min<sup>-1</sup> (1000 min<sup>-1</sup> erreichbar)
- FEM-Simulationen und Berechnungen
  - Validierung der getroffenen Annahme  $P_{Fe} \sim U_x^2$  unter Last und im Bohrungsfeldversuch
  - Kritische Analyse der Verluste/Zusatzverluste
  - Unterschiedliche Reluktanz in d- und q-Achse



**Danke für Ihre Aufmerksamkeit!**

