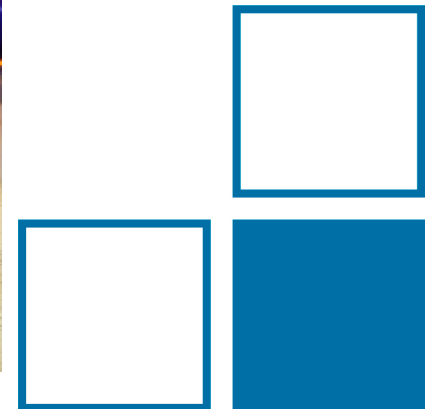


Wirkungsgradmessung permanentmagneterregter Synchronmaschinen – ein Überblick unter den Aspekten der Messunsicherheit



C. Lehrmann, N. Yogal



Der Wirkungsgrad – eine wichtige Größe bei der Motorcharakterisierung

Asynchronmotor – permanentmagneterregter Synchronmotor

Wirkungsgradmessung – die direkte und die indirekte Methode

Die indirekte Methode bei der PM-Synchronmaschine

Die Bestimmung der Messunsicherheit bei der Wirkungsgradmessung

Vergleich der Messunsicherheit direkte – indirekte Methode

Zusammenfassung / Ausblick



Einsatz elektrischer Antriebe – ein Beispiel

Pumpenantriebe,
600 kW Gesamt-
bemessungsleistung





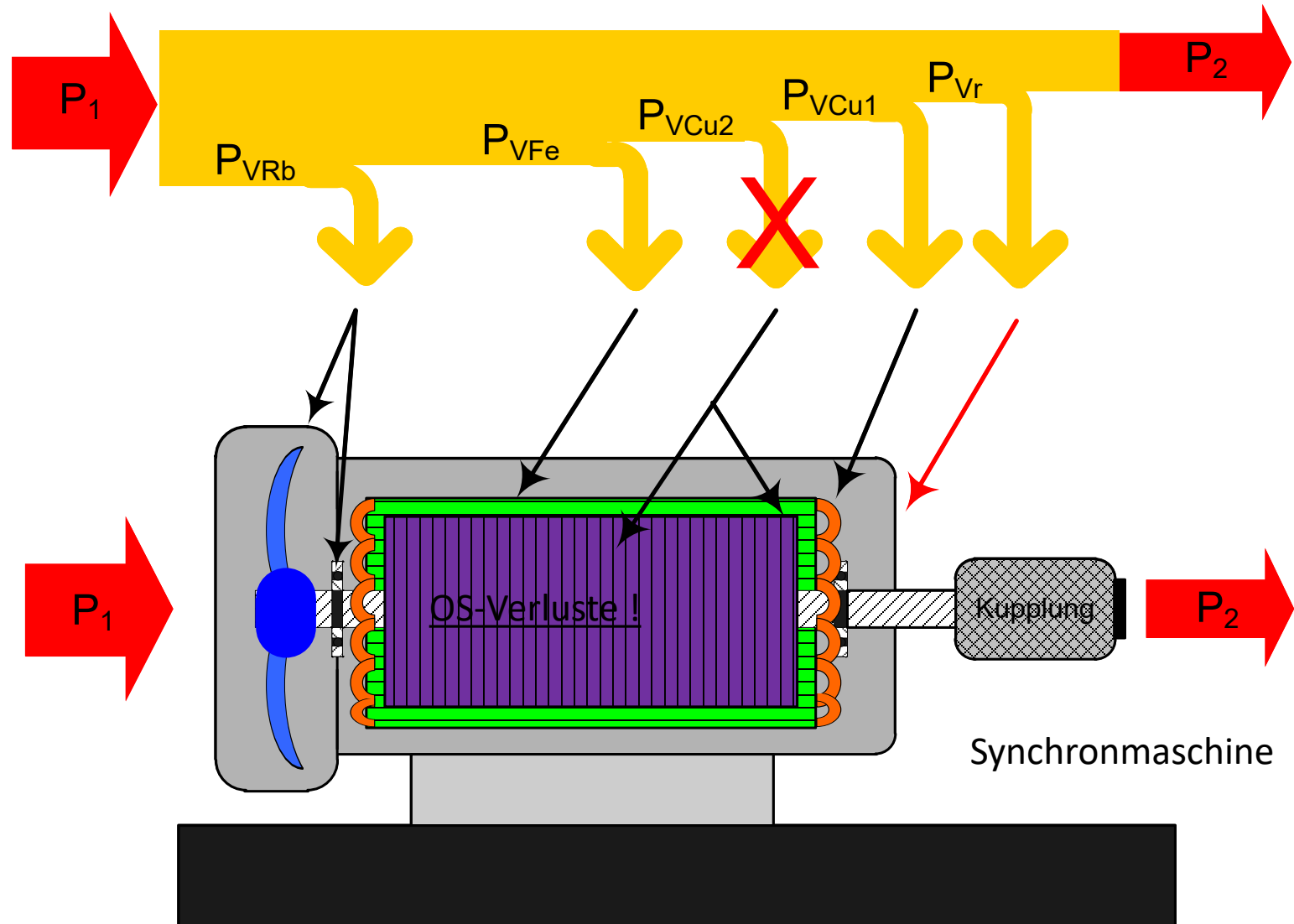
Der Wirkungsgrad – eine wichtige Größe der Motorcharakterisierung



- Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der abgegebenen mechanischen Leistung (P_2) zur aufgenommenen elektrischen Leistung (P_1) einer drehenden elektrischen Maschine.
- Der Wirkungsgrad der Maschine ist von der Konstruktion der Maschine, aber auch vom Betriebspunkt abhängig.
- Da die Elektroenergie ein wichtiger Kostenfaktor ist, besteht seitens des Nutzers der Maschine ein großes Interesse an einem möglichst hohen Wirkungsgrad – und der Vertrauenswürdigkeit des vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrades
- Für viele innerhalb der EU in Verkehr gebrachte Maschinen, z.B. Asynchronmaschinen, existieren mittlerweile Richtlinien, die Mindestwirkungsgrade verbindlich fordern, z.B. die EU-Verordnung 2019/1781. Bei Nichterfüllung darf der Motor innerhalb der EU nicht in Verkehr gebracht werden
- **Explosiongeschützte Motoren fallen ebenfalls in den Geltungsbereich der Richtlinie 2019/1781. Motoren der Zündschutzart Ex eb müssen z.B. ab dem 01.07.2023 mindestens IE2 erfüllen.**



Besondere Eigenschaft der PM-Synchronmaschine im Vergleich zur Asynchronmaschine





Generelle Herausforderungen bei der Wirkungsgradbestimmung



- Die Wirkungsgrade der Maschinen liegen in der Regel bei $\eta = 0,9$ oder besser
- Die Verlustleistung der Maschine, $P_v = P_1 - P_2$, ist als Differenz zweier um mindestens eine Zehnerpotenz größeren Werten definiert
- Bereits kleine Messunsicherheiten bei der elektrischen und oder der mechanischen Leistung haben deutliche Auswirkungen auf den Wirkungsgrad und können über die IE-Klassifizierung entscheiden
- Die Versuchsparameter wie z.B. die Spannungssymmetrie und der Oberschwingungsgehalt der Versorgungsspannung müssen berücksichtigt werden
- Erfüllung der Norm EN 60034-2-1 zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse (Indirekte Methode bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine in der Ausgabe 2014 noch nicht enthalten)

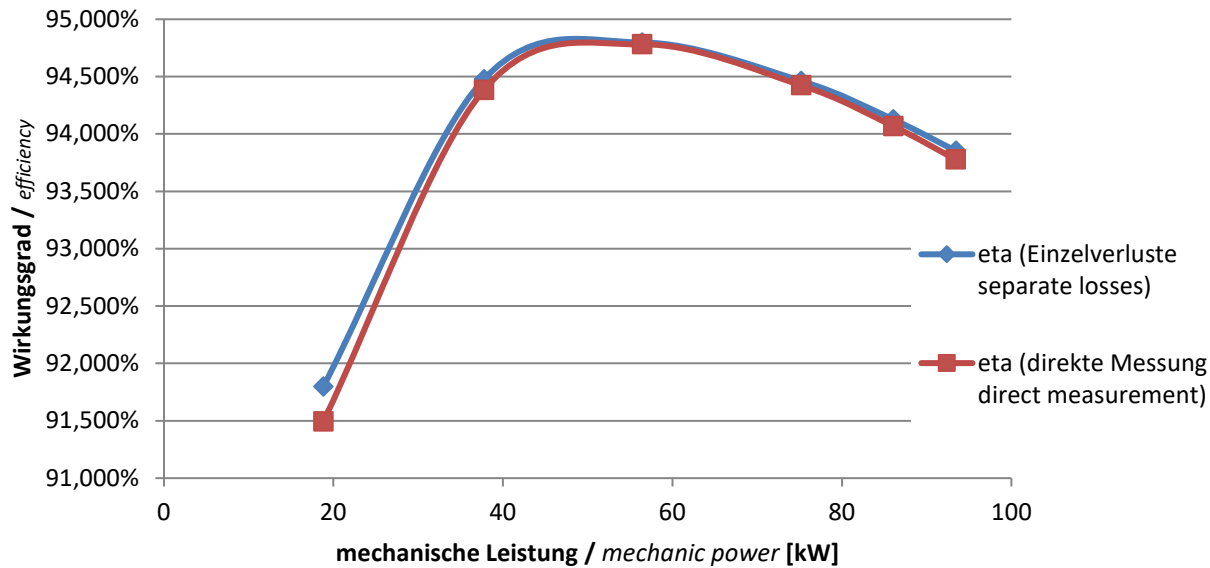


- Alle Messgrößen sind prinzipbedingt mit gewissen Messunsicherheiten behaftet
- Die gesamte Messunsicherheit einer Messgröße setzt sich im allgemeinen aus einem konstanten Anteil, einem messwertabhängigen Anteil sowie einem auflösungsabhängigen Anteil zusammen
- Über das Verfahren nach GUM* werden aus den Messunsicherheiten der am Endergebnis, hier dem Wirkungsgrad, beteiligten Messgrößen die Messunsicherheit des Endergebnisses berechnet und die Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Messgrößen am Gesamtergebnis dargestellt
- Zur Umsetzung der mathematischen Ansätze wurde die Software „GUM Workbench“ verwendet

* *Guide to the expression of uncertainty in measurement*



Ein Beispiel: der belastungsabhängige Wirkungs-gradverlauf bei einer IE3-Asynchronmaschine $P_N = 75 \text{ kW}$

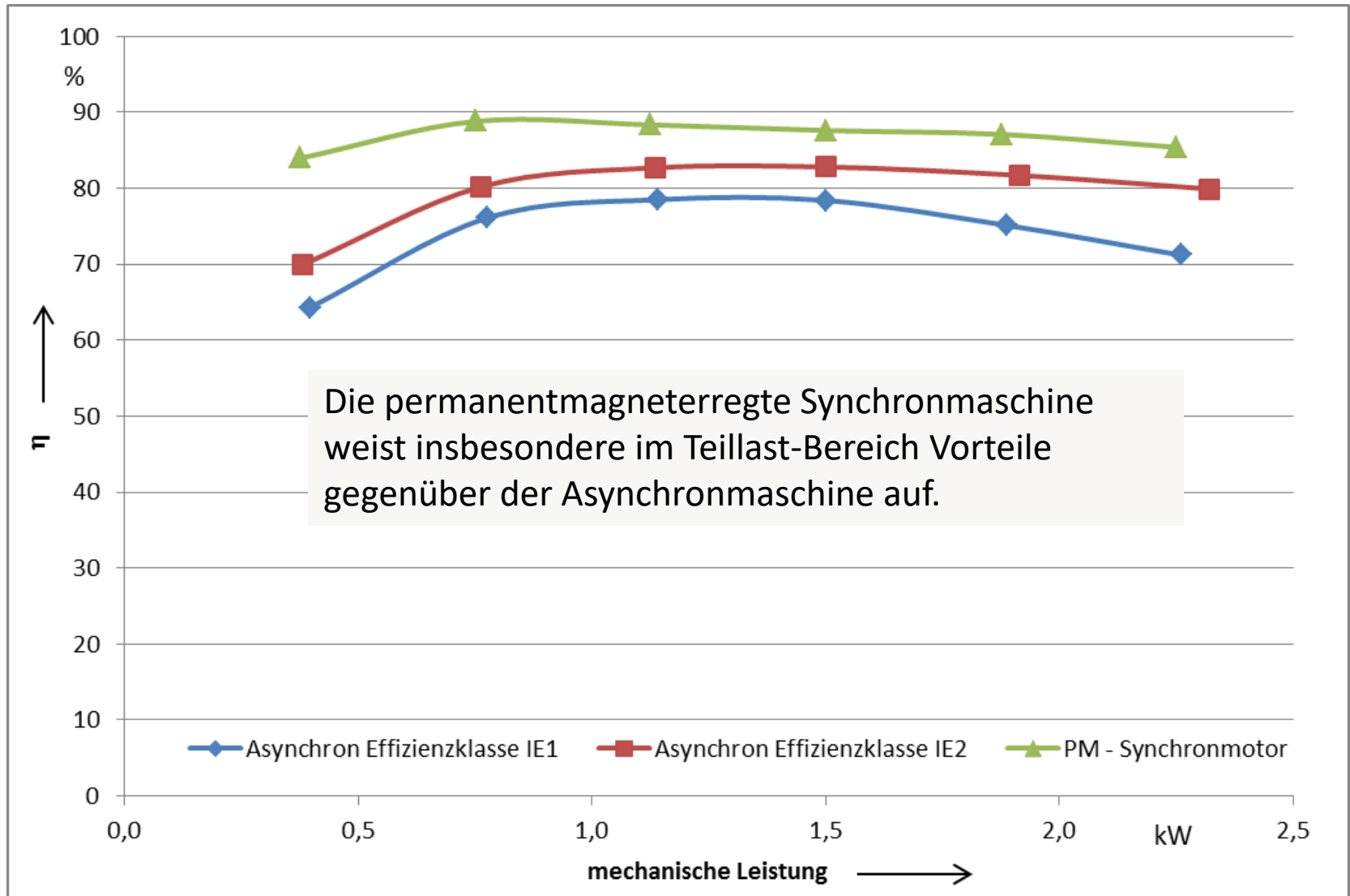


WIRKUNGS GRAD		IEC 60034-2-1			6.1.3.3		
efficiency		125%	175%	100%	75%	50%	25%
eta [%] (Einzelverluste / separate losses)		93,85	94,13	94,46	94,80	94,48	91,80
eta [%] (direkte Messung / direct measurement)		93,78	94,07	94,42	94,78	94,38	91,49
Wirkungsgrad nach IE3 / efficiency after IE3		(IEC 60034-30)		94,7	P _N :		75 kW
IE3 abzügl. Toleranz / IE3 less tolerance		(IEC 60034-1)		93,957	η _N :		94,745 %



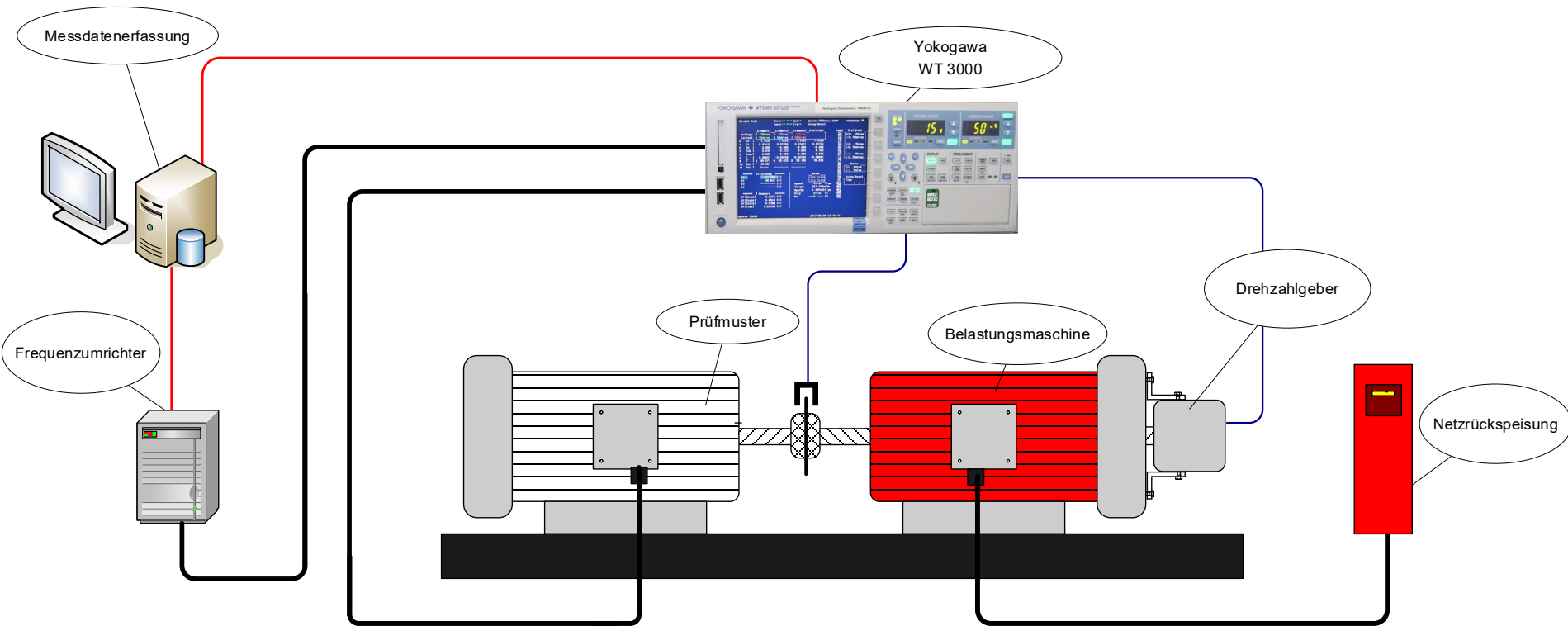
Vergleich der Maschinenwirkungsgrade

Asynchron – PM-Maschine (Quelle: VEM Motors GmbH)





Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen





Wirkungsgradmessung an der Synchronmaschine: Die direkte und die indirekte Methode



- Im Gegensatz zur Asynchronmaschine ergibt sich die Motordrehzahl direkt aus der speisenden Frequenz und der Polpaarzahl der Maschine --> der Messunsicherheitsbeitrag der Drehzahlmessung entfällt daher.

Der Wirkungsgrad kann auf zwei Wegen bestimmt werden:

- Die abgegebene Leistung wird über die Differenz der aufgenommenen elektrischen Leistung und der Einzelverluste bestimmt und mit der aufgenommenen elektrischen Leistung in das Verhältnis gesetzt. Herausforderung bei Betrieb am Umrichter: die korrekte Bestimmung der Eisen- und Oberschwingungsverluste der Maschine.
- Die aufgenommene und abgegebene Leistung werden direkt ermittelt und in das Verhältnis gesetzt. Vorteil: Der zeitliche Wirkungsgradverlauf bei Anlaufvorgängen und Lastaufschaltungen kann messtechnisch bestimmt werden.
Aber: die Messunsicherheit der Drehmomentmessung geht direkt in die gesamte Messunsicherheit der Größe „Wirkungsgrad“ ein



Wirkungsgradmessung bei der Synchronmaschine: Beschreibung der indirekten Methode



Elektrisch erregte Synchronmaschine:

- Bestimmung der Leerlaufverluste (ummagnetisierungs- und Reibungsverluste) über den Leerlaufversuch.
- Die lastabhängigen Verluste (Stromwärmeverluste in der Statorwicklung und die Zusatzverluste) können über den Kurzschlussversuch bestimmt werden.
- Die ohmschen Verluste in der Erregerwicklung lassen sich über den aus der Leerlaufkennlinie und der Kurzschlusskennlinie für den betrachteten Lastpunkt berechneten Erregerstrom bestimmen.

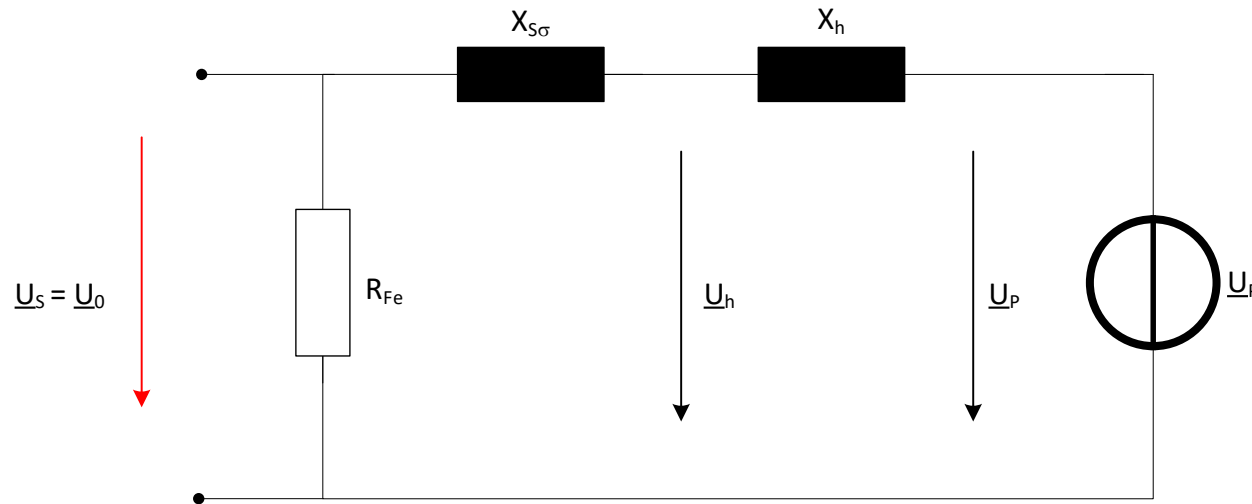
Diese Methode ist auf die permanentmagneterregte Synchronmaschine aber nicht anwendbar, da die Erregung zur Anpassung des magnetischen Flusses nicht variiert werden kann:

- auf Bemessungsfluss im Leerlauf
- zu näherungsweise Null für den gewünschten Strom- und Drehzahlwert im Kurzschluss





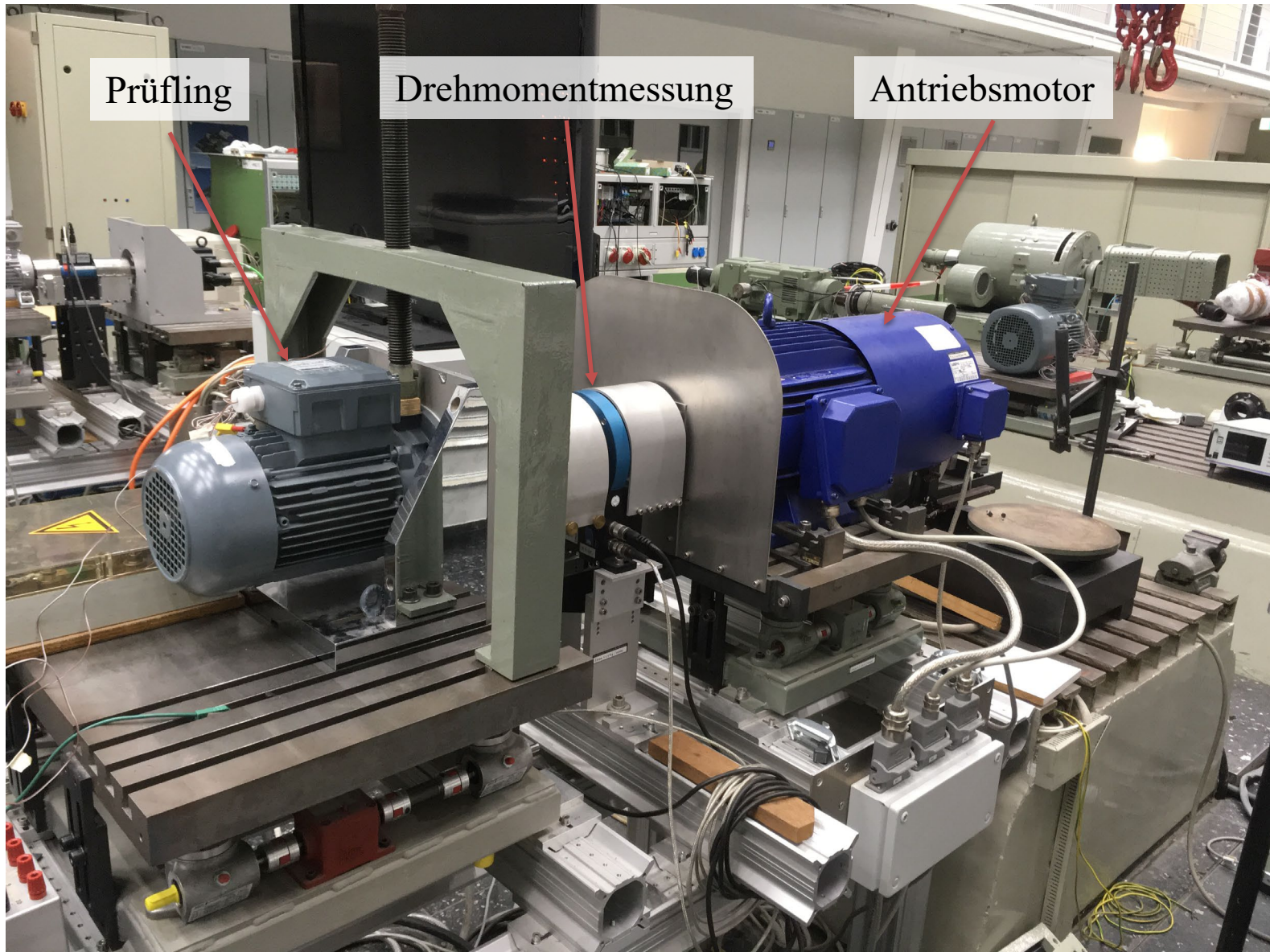
Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: Aufteilung der Verluste – Leerlauf generatorisch



- Statorspannung $\underline{U}_S \approx$ Reaktanzspannung $\underline{U}_h \approx$ Polradspannung \underline{U}_P
- Statorstrom $I_S = 0 \text{ A}$
- Messung: mechanische Antriebsleistung $P_{\text{mech}} = 2\pi \cdot n \cdot M_G = P_{\text{Fe}} + P_{\text{Rbg}}$
- Eine weitere Aufteilung auf die Reibungsverluste und Eisenverluste ist ohne zusätzliche Messung nicht möglich.
- Die Bestimmung der Reibungsverluste erfolgte mittels eines Rotors ohne Magnete, hier nur Lüfterverluste und Lagerreibungsverluste
- **Unsicherheitsbehaftete Messgrößen: M_G , n , Einfluss der Motortemperatur**

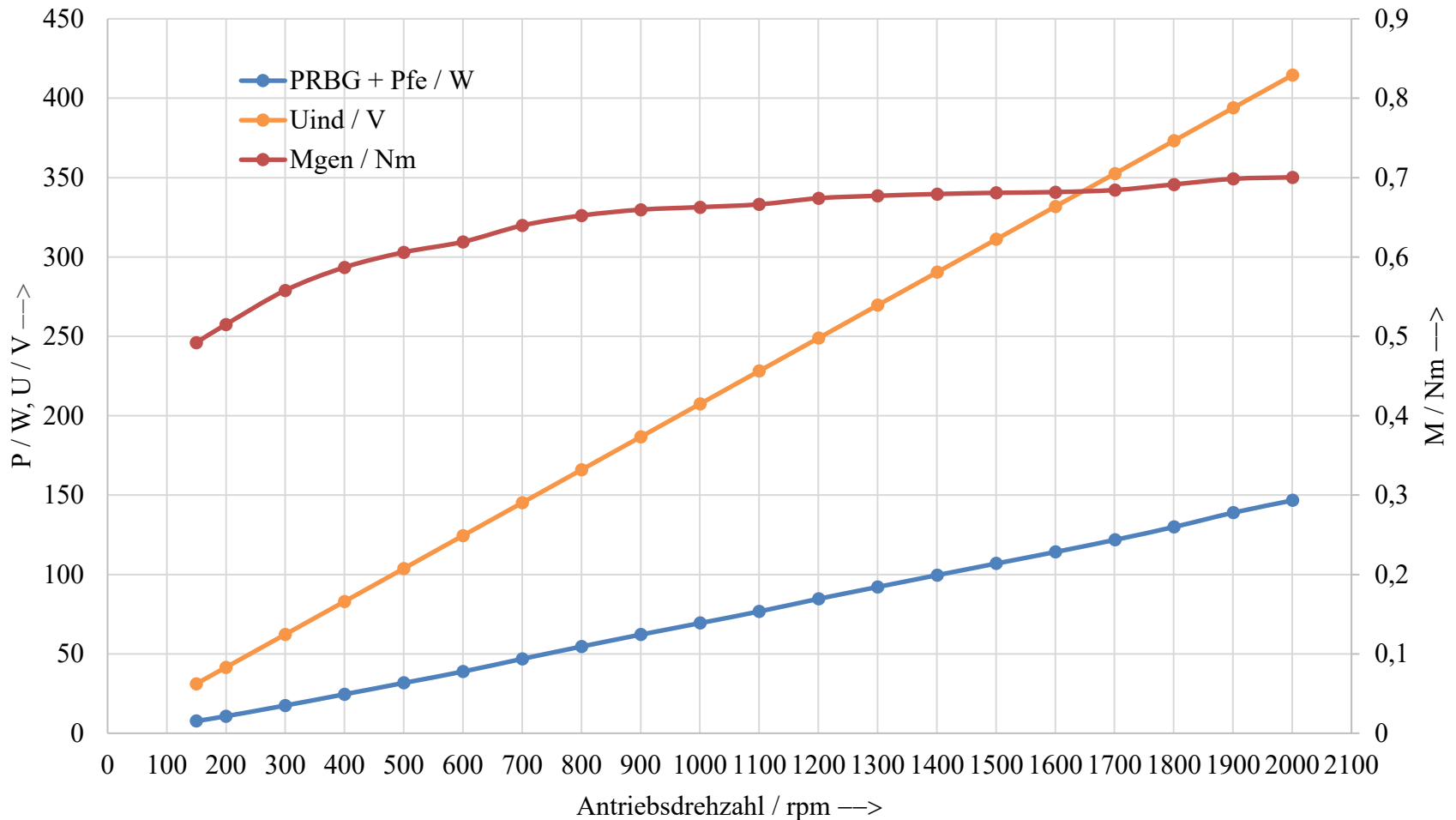


Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: Foto eines Versuchsaufbaus zur generatorischen Leerlaufmessung





Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: beispielhafte Leerlaufkennlinie generatorisch, magnetisiert



- Maschinenbemessungsleistung 2,2 kW
- Näherungsweise linearer Verlauf der induzierten Spannung und der mechanischen Antriebsleistung im betrachteten Drehzahlbereich



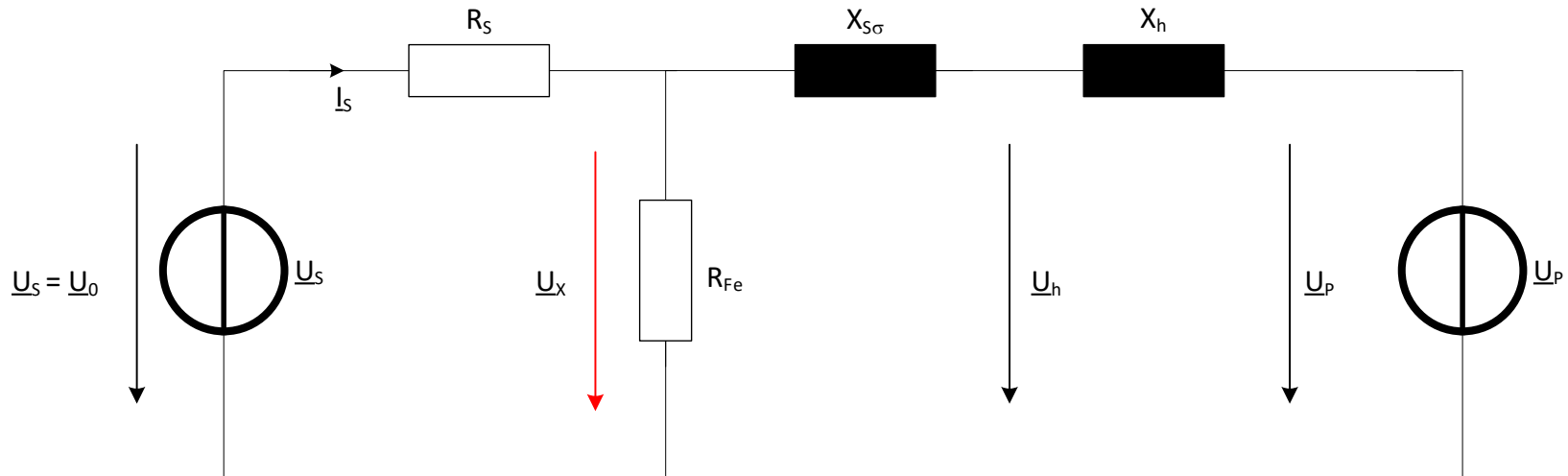
Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Aufteilung der Verluste – Leerlauf motorisch



- Betrieb möglichst am selben Frequenzumrichter mit gleicher Parametrierung wie bei der späteren Anwendung
- Üblicherweise sehr kleiner Leerlaufstrom im Vergleich zur ASM
- Zusätzliche Verluste durch die umrichterbedingten Oberschwingungen, abhängig von der Schaltfrequenz und der Umrichtereingangsspannung, **aber lastunabhängig**
- Trennung der Eingangsleistung in die Grundschwingungsleistung P_{H01} und die Oberschwingungsverluste $P_{VOS} = P_{eff} - P_{H01}$
- Unsicherheitsbehaftete Messgrößen: P_{H01} und P_{eff} . Aufgrund der rein elektrischen Messgrößen ist eine geringe Messunsicherheit mit aktuell am Markt verfügbaren Messgeräten möglich.



Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Aufteilung der Verluste – Eisenverluste unter Belastung



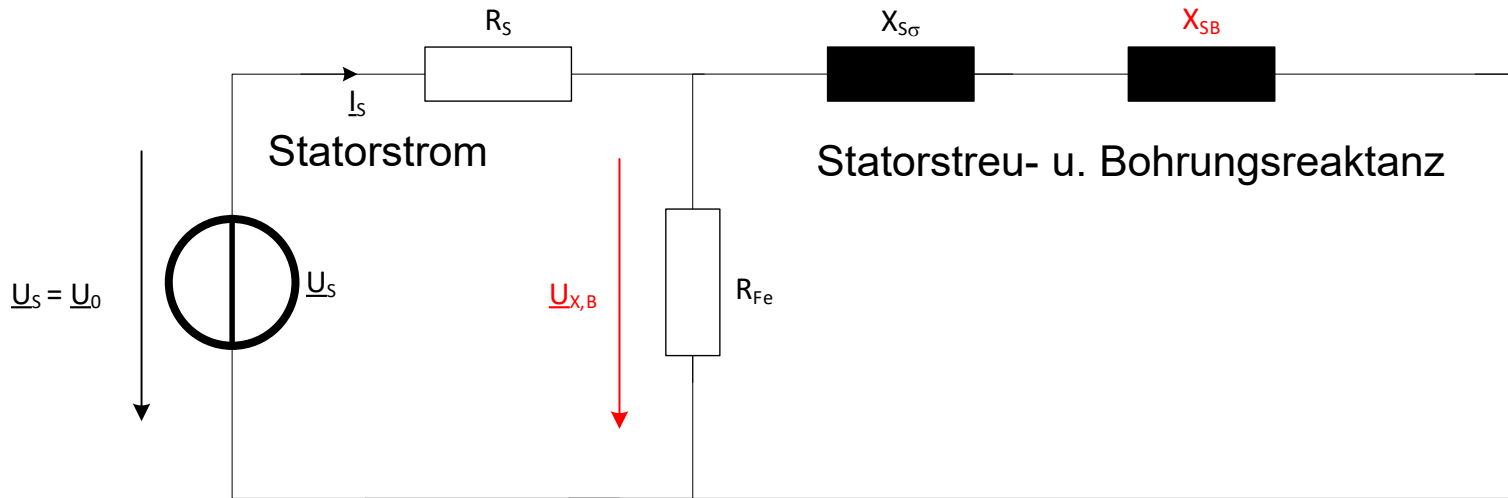
Korrekturrechnung für die Eisenverluste bei Belastung des Motors:

$P_{Fe} \approx P_{Fe, LL} \cdot \left(\frac{U_x}{U_0}\right)^2$, $U_x = U_s - R_s \cdot I_s$ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Statorwiderstand R_s ebenfalls von der Statortemperatur abhängig ist.

$P_{Fe, LL}$ aus generatorischer und motorischer Leerlaufmessung



Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: Aufteilung der Verluste - Rotor entfernt (Bohrungsfeldversuch)



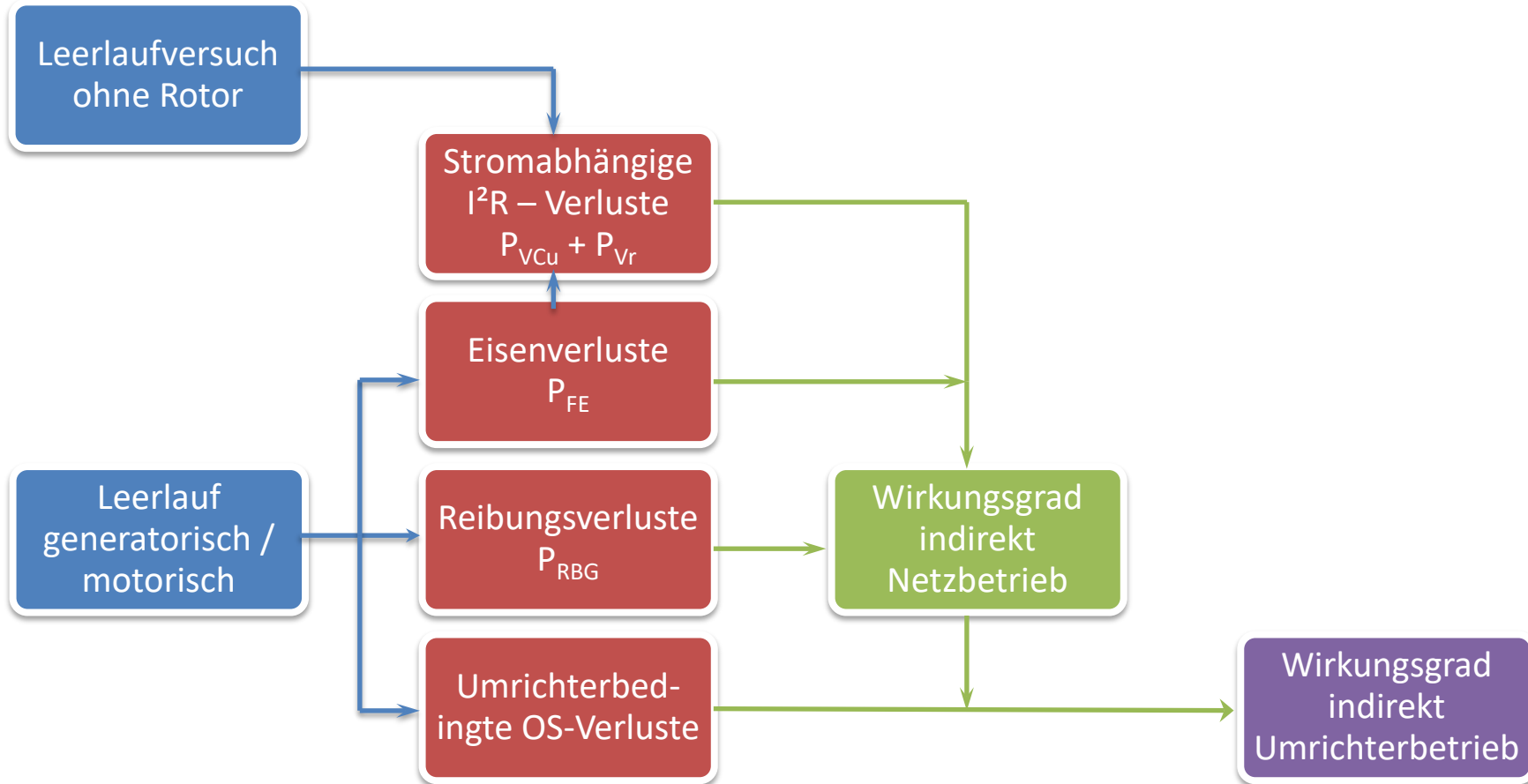
- Speisung der Maschine mit sinusförmiger Spannung variabler Frequenz und Amplitude
- Gemessene el. Leistung: $P_{1,B} = P_{CU,S} + P_{zus} + P_{Fe,B}$
- Statorwicklungsverluste und lastabhängige Zusatzverluste:
 $P_{CU,S} + P_{zus} = P_{1,B} - P_{Fe,B}$

Es gilt weiterhin:

$$P_{FE,B} \approx P_{FE,LL} \cdot \left(\frac{U_{X,B}}{U_0} \right)^2 \quad \text{und} \quad U_{X,B} = U_S - R_S \cdot I_S$$



Zusammenfassung Vorgehensweise der Wirkungsgradbestimmung über Einzelverlustbestimmung





Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Der Motorwirkungsgrad unter Last, indirekte Methode



Betrieb mit sinusförmiger Spannung

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_1 - P_{\text{Fe}} - P_{\text{Rbg}} - P_{\text{Zus}} - P_{\text{VCu1}}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}$$

Betrieb am Frequenzumrichter

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_1 - P_{\text{Fe}} - P_{\text{Rbg}} - P_{\text{Zus}} - P_{\text{VCu1}}}{P_1 + P_{\text{VOS}}} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi_s$$

$$P_{\text{VCu1}} = f(f_S, I_S)$$

$$P_{\text{Fe}} = f(f_S, U_X)$$

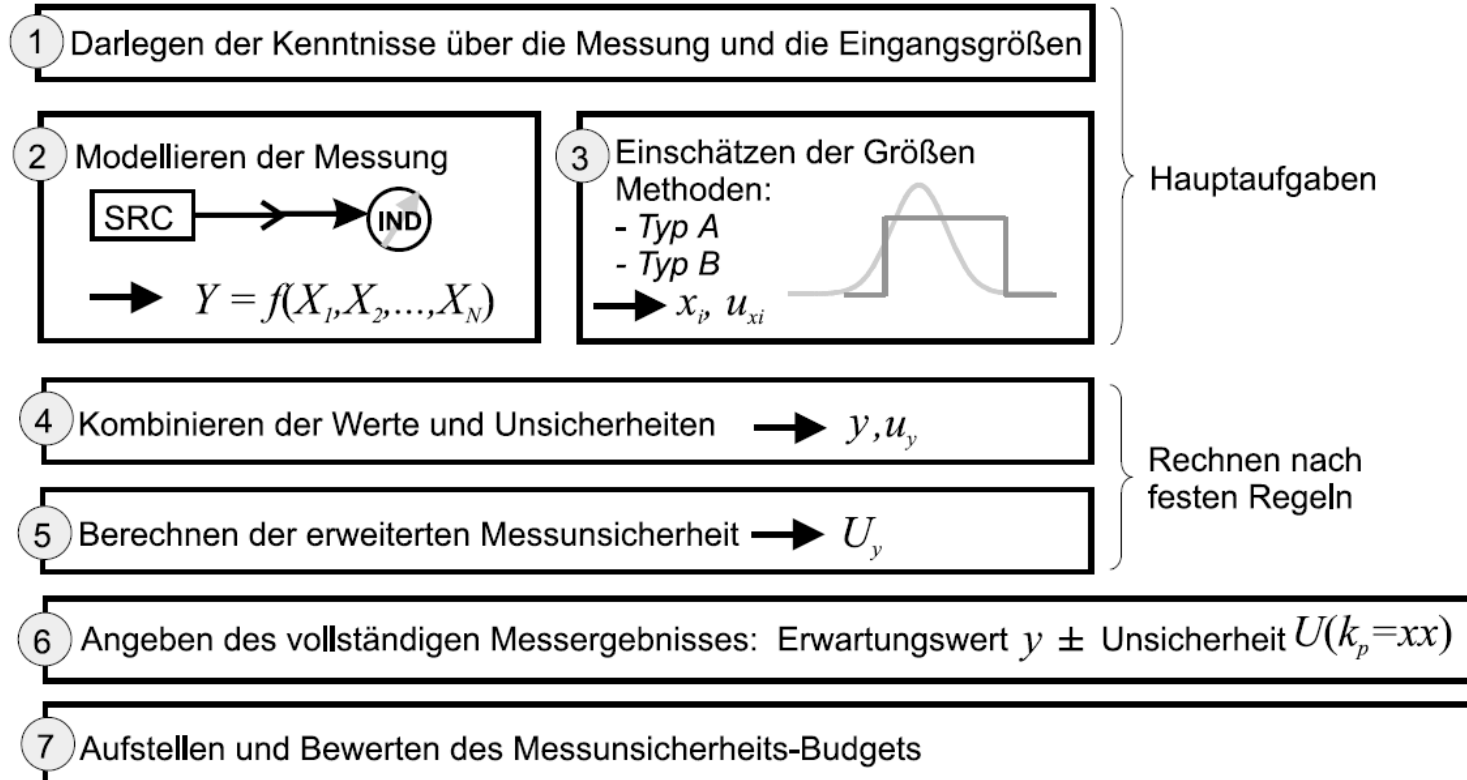
$$P_{\text{Rbg}} = f(f_S)$$

Unsicherheitsbehaftete Größen:

$P_1, U_S, I_S, \cos \varphi_S, P_{\text{VCu1}}, P_{\text{Fe}}, P_{\text{Rbg}}$



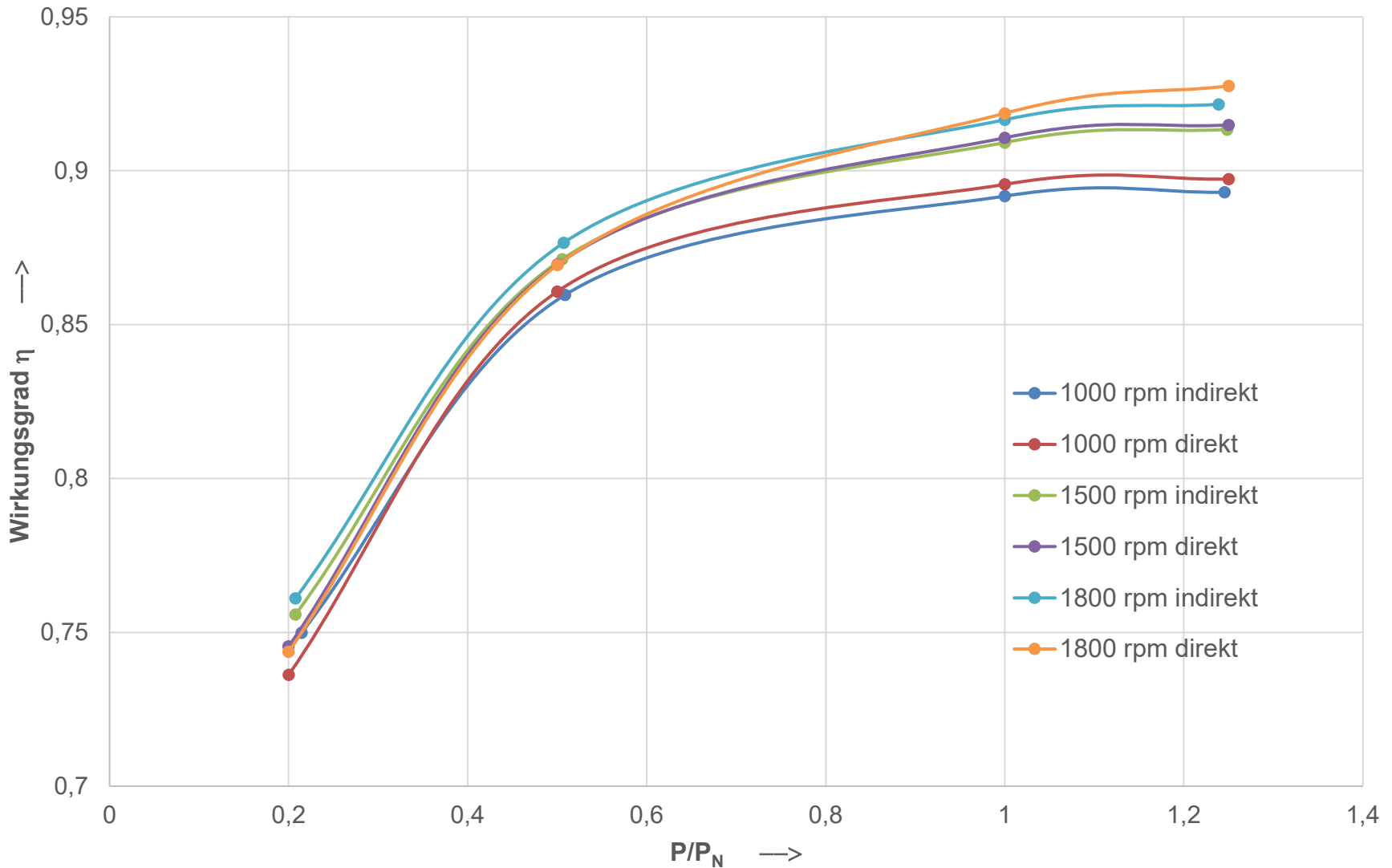
Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: Messunsicherheitsbestimmung nach GUM



aus: Technisches Messen Band 71 (2004) Heft 2



Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Ergebnisse der durchgeführten Messungen, $P_N = 7,5 \text{ kW}$





Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Das Messunsicherheitsbudget der direkten Methode



	Größe	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
mechanische Leistung	P_mech	7509.797 W	0.995 W				
elektrische Leistung	P_el	8246.12 W	1.53 W				
konstante (Pi)	π	3,14159265					
Drehmoment	M	47.80331 Nm	$6.32 \cdot 10^{-3}$ Nm				
Drehzahl	n	1500.1740 1/min	0.0150 1/min				
gemessenes Drehmoment	M_m	47.803310 Nm	$478 \cdot 10^{-6}$ Nm	Normal	0.019	$9.1 \cdot 10^{-6}$	0.2 %
Auflösungsfehler M	M_a	0.0 Nm	$2.89 \cdot 10^{-6}$ Nm	Rechteck	0.019	$55 \cdot 10^{-9}$	0.0 %
Fehler M Messflansch	M_k	0.0 Nm	$6.30 \cdot 10^{-3}$ Nm	Normal	0.019	$120 \cdot 10^{-6}$	33.5 %
gemessene Drehzahl	n_m	1500.1740 1/min	0.0150 1/min	Normal	$610 \cdot 10^{-6}$	$9.1 \cdot 10^{-6}$	0.2 %
Auflösungsfehler n	n_a	0.0 1/min	$289 \cdot 10^{-6}$ 1/min	Rechteck	$610 \cdot 10^{-6}$	$180 \cdot 10^{-9}$	0.0 %
Spannung	U	348.6635 V	0.0192 V				
Strom	I	13.80660 A	$1.46 \cdot 10^{-3}$ A				
Leistungsfaktor	λ	0.988999	$140 \cdot 10^{-6}$				
gemessene Spannung	U_m	201.3010 V	0.0111 V	Normal	$-4.5 \cdot 10^{-3}$	$-50 \cdot 10^{-6}$	5.8 %
Auflösungsfehler Spannung	U_a	0.0 V	$289 \cdot 10^{-9}$ V	Rechteck	$-2.6 \cdot 10^{-3}$	$-750 \cdot 10^{-12}$	0.0 %
gemessener Strom Strang U	I_mu	13.91307 A	$2.55 \cdot 10^{-3}$ A				
gemessener Strom Strang V	I_mv	13.82942 A	$2.54 \cdot 10^{-3}$ A				
gemessener Strom Strang W	I_mw	13.67730 A	$2.51 \cdot 10^{-3}$ A				
Auflösungsfehler IU	I_au	0.0 A	$2.89 \cdot 10^{-6}$ A	Rechteck	-0.022	$-63 \cdot 10^{-9}$	0.0 %
Auflösungsfehler IV	I_av	0.0 A	$2.89 \cdot 10^{-6}$ A	Rechteck	-0.022	$-63 \cdot 10^{-9}$	0.0 %
Auflösungsfehler IW	I_aw	0.0 A	$28.9 \cdot 10^{-6}$ A	Rechteck	-0.022	$-630 \cdot 10^{-9}$	0.0 %
gemessener Leistungsfaktor	λ_m	0.988999	$140 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	-0.92	$-130 \cdot 10^{-6}$	38.6 %
Auflösungsfehler Leistungsfaktor	λ_a	0.0	$289 \cdot 10^{-12}$	Rechteck	-0.92	$-270 \cdot 10^{-12}$	0.0 %
IU mit Fehler WT3000	I_u	139.1307 A	0.0126 A	Normal	$-2.2 \cdot 10^{-3}$	$-28 \cdot 10^{-6}$	1.8 %
Widerstand Shunt U	R_shuntu	5.000000 ohm	$550 \cdot 10^{-6}$ ohm	Normal	0.061	$34 \cdot 10^{-6}$	2.6 %
Fehler Wandler U	I_wandlertu	0.0	$1.61 \cdot 10^{-3}$	Rechteck	-0.022	$-35 \cdot 10^{-6}$	2.9 %
IV mit Fehler WT3000	I_v	138.2942 A	0.0125 A	Normal	$-2.2 \cdot 10^{-3}$	$-28 \cdot 10^{-6}$	1.8 %
Widerstand Shunt V	R_shuntv	5.000000 ohm	$550 \cdot 10^{-6}$ ohm	Normal	0.061	$33 \cdot 10^{-6}$	2.6 %
Fehler Wandler V	I_wandlerv	0.0	$1.60 \cdot 10^{-3}$	Rechteck	-0.022	$-35 \cdot 10^{-6}$	2.9 %
IW mit Fehler WT3000	I_w	136.7730 A	0.0124 A	Normal	$-2.2 \cdot 10^{-3}$	$-27 \cdot 10^{-6}$	1.7 %
Widerstand Shunt W	R_shuntw	5.000000 ohm	$550 \cdot 10^{-6}$ ohm	Normal	0.060	$33 \cdot 10^{-6}$	2.5 %
Fehler Wandler W	I_wandlerw	0.0	$1.58 \cdot 10^{-3}$	Rechteck	-0.022	$-35 \cdot 10^{-6}$	2.8 %

Ergebnis:

Wert: ±

Erw. Messunsicherheit: Erweiterungsfaktor: Überdeckung:



Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Das Messunsicherheitsbudget der indirekten Methode



Beschreibung	Größe	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Indes
M unmagnetisierter Rotor	M_nm	0,34376	2,34·10 ⁻³	Normal	370·10 ⁻⁶	880·10 ⁻⁹	0 %
n unmagnetisierter Rotor	n_nm	1500	0,0107	Normal	86·10 ⁻⁹	910·10 ⁻¹²	0 %
die Zahl Pi	Pi	3,14159265					
Eisen und Reibungsverluste Leerlaufversuch	P_fe0frw	420,404	0,81				
Drehmoment LL Rotor magnetisiert	M_g	2,67525	5,15·10 ⁻³	Normal	-0,019	-99·10 ⁻⁶	66,3 %
Drehzahl LL magnetisierter Rotor	n_g	1500,6285	1,91·10 ⁻³	Normal	-34·10 ⁻⁶	-66·10 ⁻⁹	0 %
Statorspannung Rotor entfernt	U_sr	36,13058	1,29·10 ⁻³				
Statorwiderstand Rotor entfernt	R_sr	0,8289	19,5·10 ⁻⁶	Normal	-160·10 ⁻⁶	-3,2·10 ⁻⁹	0 %
Statorstrom Rotor entfernt	I_sr	13,81	4,90·10 ⁻³	Normal	-2,3·10 ⁻³	-11·10 ⁻⁶	0,9 %
Messwert Statorspannung LL Rotor entfernt	U_msr	20,86	747·10 ⁻⁶	Normal	-1,5·10 ⁻³	-1,1·10 ⁻⁶	0 %
Auflösungsfehler Spannung	U_a	0	289·10 ⁻⁹	Rechteck	-870·10 ⁻⁶	-250·10 ⁻¹²	0 %
Eisenverluste Rotor entfernt	P_FEB	2,9551	7,19·10 ⁻³				
induzierte Spannung LL magnetisiert verkettet	U_0	338,5865	0,0129				
Induzierte Spannung LL magnetisiert stern	U_01	195,483	7,48·10 ⁻³	Normal	460·10 ⁻⁶	3,4·10 ⁻⁶	0 %
Eingangsleistung Rotor entfernt	P_einB	267,017	0,178				
Leistungsfaktor Rotor entfernt	λ_sr	0,308965	174·10 ⁻⁶	Normal	-0,1	-18·10 ⁻⁶	2,2 %
Statorspannung Lastversuch	U	348,6635	0,0192				
Statorwiderstand Lastversuch	R	0,7811	19,5·10 ⁻⁶	Normal	1,8·10 ⁻³	36·10 ⁻⁹	0 %
Statorstrom Lastversuch	I	13,8066	9,27·10 ⁻³				
Statorspannung Bemessungsleistung	U_ml	201,301	0,0111	Normal	-9,5·10 ⁻⁶	-100·10 ⁻⁹	0 %
Eisenverluste Lastversuch	P_Fe	376,617	0,915				
Messwert Strom Strang U Lastversuch	I_mu	13,9131	0,0162				
Messwert Strom Strang V Lastversuch	I_mv	13,8294	0,0161				
Messwert Strom Strang W Lastversuch	I_mw	13,6773	0,0159				
Auflösungsfehler Strom U	I_au	0	2,89·10 ⁻⁶	Rechteck	2,2·10 ⁻³	6,4·10 ⁻⁹	0 %
Auflösungsfehler Strom V	I_av	0	2,89·10 ⁻⁶	Rechteck	2,2·10 ⁻³	6,4·10 ⁻⁹	0 %
Auflösungsfehler Strom W	I_aw	0	2,89·10 ⁻⁶	Rechteck	2,2·10 ⁻³	6,4·10 ⁻⁹	0 %
Leistungsfaktor Lastversuch	λ	0,988999	140·10 ⁻⁶				
Messwert Leistungsfaktor Lastversuch	λ_ml	0,988999	140·10 ⁻⁶	Rechteck	0,091	13·10 ⁻⁶	1,1 %
Auflösungsfehler Leistungsfaktor	λ_al	0	289·10 ⁻¹²	Rechteck	0,091	26·10 ⁻¹²	0 %
Strom Strang U mit Fehler	I_u	139,1307	0,0126	Normal	220·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁶	0 %
Shuntwiderstand Phase U	R_shuntu	5	550·10 ⁻⁶	Normal	-6,2·10 ⁻³	-3,4·10 ⁻⁶	0 %
Ausgangsstrom Wandler U	I_wandleru	0	0,0161	Rechteck	2,2·10 ⁻³	36·10 ⁻⁶	8,5 %
Strom Strang V mit Fehler	I_v	138,2942	0,0125	Normal	220·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁶	0 %
Shuntwiderstand Phase V	R_shuntv	5	550·10 ⁻⁶	Normal	-6,1·10 ⁻³	-3,4·10 ⁻⁶	0 %
Ausgangsstrom Wandler V	I_wandlerv	0	0,016	Rechteck	2,2·10 ⁻³	35·10 ⁻⁶	8,4 %
Strom W mit Fehler	I_w	136,773	0,0124	Normal	220·10 ⁻⁶	2,7·10 ⁻⁶	0 %
Shuntwiderstand Phase W	R_shuntw	5	550·10 ⁻⁶	Normal	-6,1·10 ⁻³	-3,3·10 ⁻⁶	0 %
Ausgangsstrom Wandler W	I_wandlerw	0	0,0158	Rechteck	2,2·10 ⁻³	35·10 ⁻⁶	8,2 %
Effektivwert Spannung Leerlauf	U_rms	233,83841	9,00·10 ⁻³	Normal	-230·10 ⁻⁶	-2,1·10 ⁻⁶	0 %
Effektivwert Strom Leerlauf	I_rms	1,4925	272·10 ⁻⁶	Normal	-0,036	-9,7·10 ⁻⁶	0,6 %
Phasenwinkel Effektivwert Leerlauf	λ_rms	0,465773	179·10 ⁻⁶	Normal	-0,11	-21·10 ⁻⁶	2,8 %
Grundschwingung Spannung Leerlauf	U_H01	198,64313	7,38·10 ⁻³	Normal	240·10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁶	0 %
Grundschwingung Strom Leerlauf	I_H01	0,7179	106·10 ⁻⁶	Normal	0,065	6,9·10 ⁻⁶	0,3 %
Leistungsfaktor Grundschwingung Leerlauf	λ_H01	0,999678	104·10 ⁻⁶	Normal	0,047	4,9·10 ⁻⁶	0,2 %

Messung Drehmoment: 66,3%

Stromwandler L1: 8,5 %

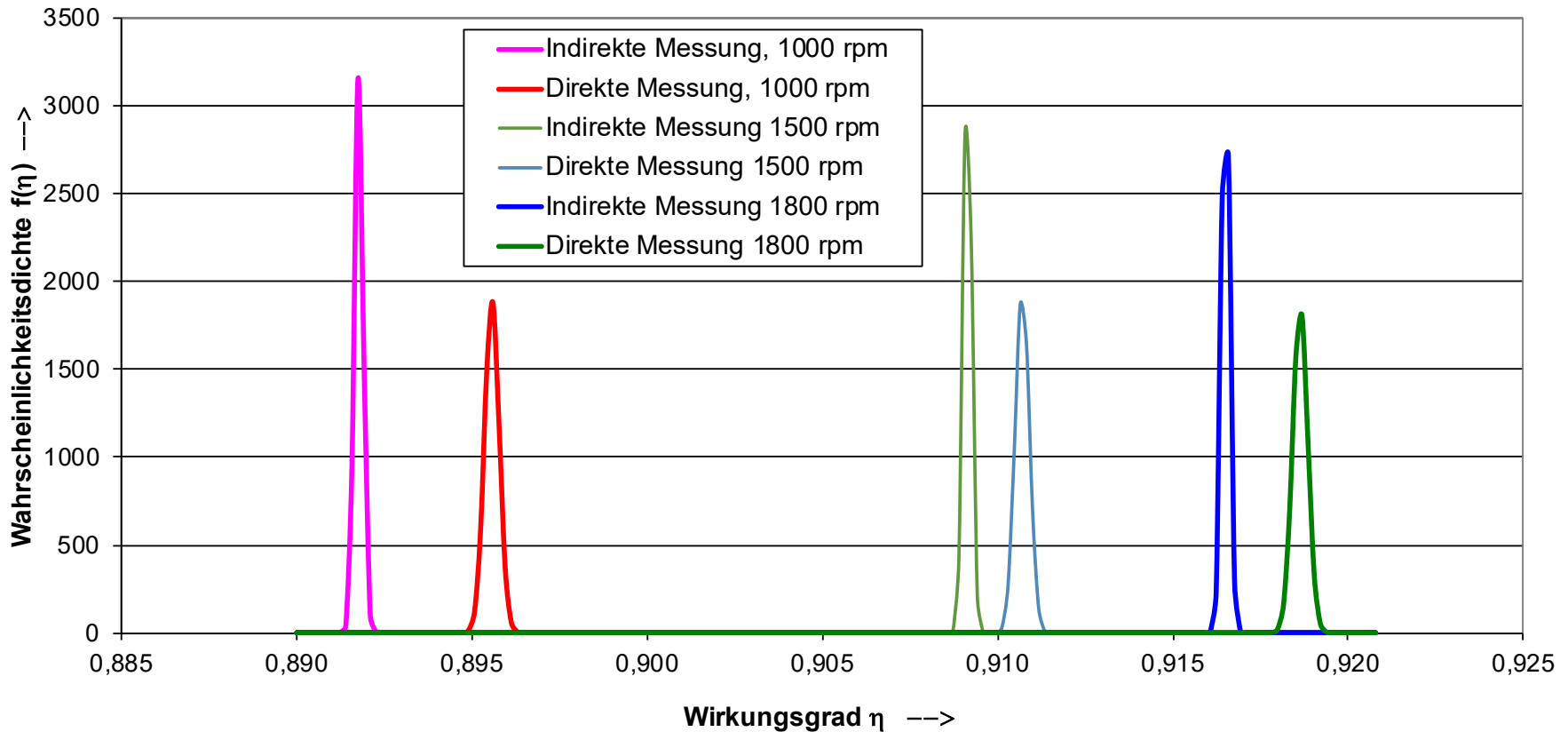
Stromwandler L2: 8,4 %

Stromwandler L3: 8,2 %

Ergebnis:
 Wert: ± Erweiterungsfaktor: Überdeckung:



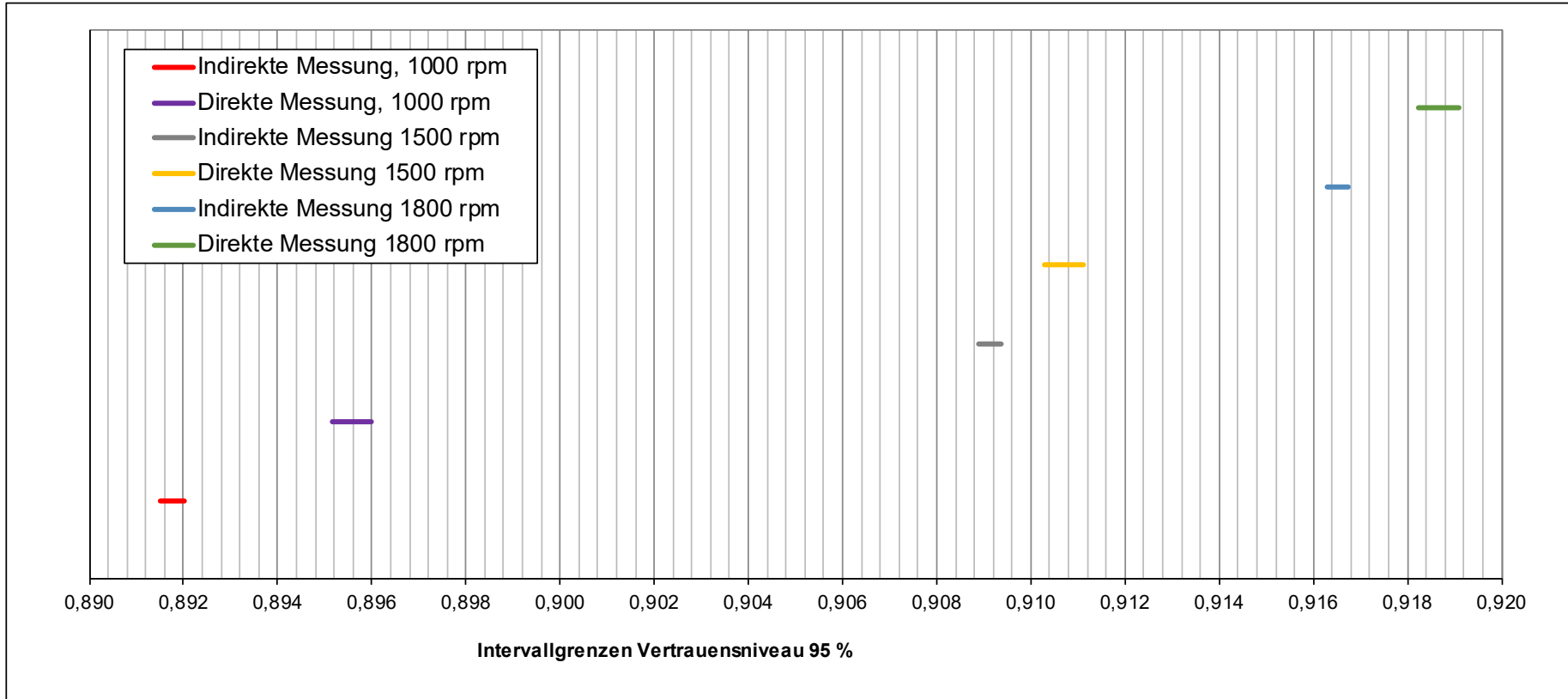
Wirkungsgradmessung bei der PM-Synchronmaschine: Vergleich der direkten und der indirekten Methode



- Die Messunsicherheit der Größe „Wirkungsgrad“ ist bei der indirekten Messung durchweg geringer als bei der direkten Methode
- Der ermittelte Wirkungsgrad nimmt mit steigender Drehzahl / Frequenz im hier betrachteten Bereich zu



Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Darstellung der Intervallgrenzen des Vertrauensniveaus 95 %



- Die Breite des jeweiligen Balkens beschreibt den Bereich, in dem um den Mittelwert 95 % der für diesen Betriebspunkt in wiederholten Messungen ermittelten Wirkungsgrade liegen.
- Überdeckungsintervall: $[y - U, y + U]$
- Erweiterte Messunsicherheit = $k * \text{Standardmessunsicherheit}$ mit k = Erweiterungsfaktor
- $U = k * u(y)$, $k = 2$



Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Vergleich der direkten und indirekten Methode



- Bei der hier untersuchten PM-Synchronmaschine der Bemessungsleistung 7,5 kW mit aufgeklebten Rotormagneten ergab sich eine gute Übereinstimmung der mit der direkten und der indirekten Methode ermittelten Wirkungsgraden auch im Teillastbereich
- Es zeigte sich im betrachteten Drehzahlbereich für beide Verfahren der erwartete Anstieg des Wirkungsgrades mit zunehmender Motorfrequenz
- Es zeigte sich weiterhin bei allen untersuchten Lastpunkten durchweg bei der Anwendung der indirekten Methode zur Wirkungsgradbestimmung eine geringere Messunsicherheit als bei der Anwendung der direkten Messmethode mit einfacher Quotientenbildung aus der aufgenommenen elektrischen Leistung und der abgegebenen mechanischen Leistung
- Die verringerte Messunsicherheit wird bei der indirekten Messmethode jedoch mit einem immensen Messaufwand erkauft (es sind ein zweiter, unmagnetisierter Rotor sowie ein Tausch der Rotoren während der Messung erforderlich), welcher dieses Verfahren z.B. für routinemäßige Messungen an Stichproben zur Überprüfung der Produktqualität beim Hersteller unattraktiv macht.



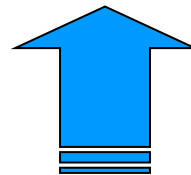
Wirkungsgradmessung bei der PM- Synchronmaschine: Zusammenfassung



- Mit den in der PTB durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für die hier betrachtete Maschine die indirekte Methode zur Wirkungsgradmessung an der permanentmagneterregten Synchronmaschine gegenüber der direkten Messmethode eine geringere Messunsicherheit aufweist.
- Den höchsten Einfluss auf das gesamte Messunsicherheitsbudget hat dabei gemäß der Auswertung nach GUM bei der indirekten Methode die generatorische Leerlaufmessung der mit aufmagnetisierten Magneten bestückten Maschine
- Eine Herausforderung sind hierbei die im Vergleich zum Bemessungsbetrieb sehr kleinen Drehmomente und somit hohen Messunsicherheiten bei Verwendung des selben Prüfstandes wie für die Messung mit Bemessungslast
- Bei den hier vorgestellten Ergebnissen wurde dieser Versuch daher mittels eines anderen Prüfstandes mit um den Faktor 5 kleinerem Bemessungsdrehmoment durchgeführt.
- Im Vergleich zur direkten Messung des Wirkungsgrades über die aufgenommene elektrische Leistung und die abgegebene mechanische Leistung ist der Aufwand für die indirekte Messung auch wegen des nötigen Rotortausches sehr hoch



Fragen





Vielen Dank für Ihr Interesse!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

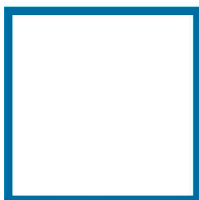
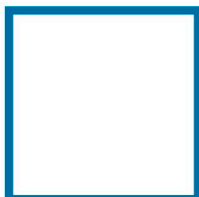
38116 Braunschweig

Dr.-Ing. Christian Lehrmann

Telefon: 0531-592-3533

E-Mail: christian.lehrmann@ptb.de

www.ptb.de, www.explosionsschutz.ptb.de



Stand: April 2023