

Wirkungsgradbestimmung an (explosionsgeschützten) elektrischen Maschinen – eine Übersicht unter den Aspekten der Messunsicherheit

Efficiency determination of (explosion-protected) electrical machines - a survey from the point of measurement uncertainty

Dr.-Ing. Christian Lehrmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, christian.lehrmann@ptb.de

Uwe Dreger, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, uwe.dreger@ptb.de

Dr.-Ing. Frank Lienesch, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, frank.lienesch@ptb.de

Kurzfassung

Der Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen kommt aufgrund steigender Energiepreise, knapper werdender Ressourcen und EU-Vorgaben für energiebetriebene Produkte, die zukünftig leistungsabhängig Mindestwirkungsgrade für innerhalb der EU in Verkehr gebrachte Induktionsmaschinen fordern [1], eine immer größere Bedeutung zu. In diesem Beitrag werden verschiedene Verfahren zur Ermittlung des Maschinenwirkungsgrades gegenübergestellt und hinsichtlich deren Eigenschaften bewertet. Ein wichtiger Aspekt ist dabei auch die Bewertung der Messunsicherheit des Endergebnisses „Wirkungsgrad“ in Abhängigkeit des zu seiner Bestimmung verwendeten Verfahrens.

Abstract

Due to increasing energy prices, increasingly scarce resources and EU requirements for energy-operated products which require for the future performance-related minimum efficiencies for induction machines which are marketed within the EU [1], ever increasing importance is attached to the efficiency determination on electric machines.

In this article, different procedures for determination of the machine efficiency are compared and their properties are assessed. An important aspect also is the evaluation of the measurement uncertainty of the final result "efficiency" as a function of the procedure used for its determination.

1 Ansätze zur Bestimmung des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen

Der Maschinenwirkungsgrad ist definiert als

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1), \text{ wobei } P_1 \text{ bei Motoren die aufgenommene}$$

elektrische Leistung bezeichnet und P_2 ein Maß für die über die Welle abgegebene mechanische Leistung ist. Die Verlustleistung der Maschine ist dabei definiert als

$$P_V = P_1 - P_2 \quad (2).$$

Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von $\eta = 0,9$ bedeutet dieses, dass die Verlustleistung lediglich 10 % der Leistung P_1 beträgt und somit die Verlustleistung als Differenz aus zwei um jeweils ca. eine Zehnerpotenz größeren Werte im besonderen Maße in ihrer Genauigkeit von den Messunsicherheiten bei der elektrischen und mechanischen Leistungsmessung abhängig ist. Dieser Einfluss verschärft sich mit zunehmender Maschinenbemessungsleistung weiter, da die Maschinenwirkungsgrade im Allgemeinen mit zunehmender Bemessungsleistung ansteigen.

1.1 Direkte Messung des Wirkungsgrades

Die wohl auf den ersten Blick plausibelste und „einleuchtendste“ Möglichkeit der Bestimmung des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen ist die direkte Messmethode. Dabei werden die Messgrößen „aufgenommene elektrische Leistung“ und „abgegebene mechanische Leistung“ in das Verhältnis gesetzt und der Wirkungsgrad direkt berechnet. Dieses Verfahren ist auch gemäß der Norm EN 60034-2-1 [3] zulässig, wird jedoch nur für Maschinen mit einer maximalen Bemessungsleistung von $P_N \leq 1$ kW empfohlen. Der Grund hierfür ist die relativ große Messunsicherheit der mechanischen Leistungsmessung, die bei der direkten Messung direkt in die Messgröße „Wirkungsgrad“ eingeht. Dieses wurde in den Ausführungen in [2] bereits ausführlich dargelegt.

1.2 Indirekte Messung des Wirkungsgrades

Für Induktionsmaschinen im Bemessungsleistungsbereich $1 \text{ kW} < P_N$ wird gemäß der Norm EN 60034-2-1 die indirekte Messmethode (Einzelverlustverfahren) empfohlen. Hierbei werden gemäß [3] die in den einzelnen Maschinenteilen auftretenden Verluste separat bestimmt und dann von der gemessenen, aufgenommenen elektrischen Leistung subtrahiert, um die abgegebene mechanische

Leistung zu bestimmen. Die in der Maschine auftretenden Verluste und die gesuchten Restverluste P_{LL} sind in **Bild 1** dargestellt.

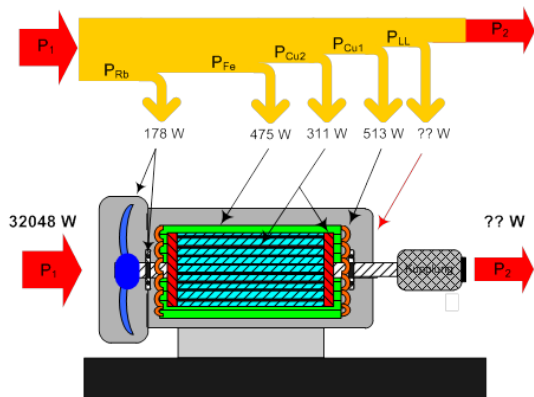


Bild 1: in einer Induktionsmaschine auftretenden Verluste, Zahlenwerte als Beispiel

Die Berechnung der Eisenverluste P_{Fe} und der Reibungsverluste P_{Rb} erfolgt dabei über die bei der Durchführung des Leerlaufversuches ermittelte Leerlaufkennlinie. Die Spannung, für welche die Eisenverluste berechnet werden, ist die gemäß [3] berechnete reduzierte Spannung U_r . Hierdurch wird den mit steigender Belastung und steigendem Maschinenstrom ebenfalls zunehmendem Spannungsabfall über dem ohmschen Statorwicklungswiderstand Rechnung getragen. Die Bestimmung des Maschinenschlupfes s (diese Angabe wird zur Berechnung der Rotorverluste benötigt, [2]) erfolgt dabei mittels Schlupfspule, wobei die Periodendauer des mit der Schlupfspule erfassten schlupffrequenten Rotormagnetfeldes bestimmt wird.

Im weiteren Fortgang der Berechnungen entspricht dann die abgegebene mechanische Leistung der Maschine $P_2 = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} - P_{LL} - P_{Cu2} - P_{Rb}$ (3).

Dieser Zusammenhang ist für die beiden hier im weiteren Fortgang beschriebenen indirekten Verfahren derselbe, die Unterschiede liegen dabei in der Art und Weise, wie die benötigten lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} ermittelt werden.

2 Ermittlung der lastabhängigen Zusatzverluste

Die Restverluste können zum einen, wie in [3] beschrieben, über eine mathematische Funktion rechnerisch abgeschätzt werden. Der Eingangsparameter dieser Funktion ist die aufgenommene elektrische Leistung P_1 der Maschine. Die Berechnungsvorschrift ändert sich in Abhängigkeit der Bemessungsleistung P_2 der elektrischen Maschine. Für den Leistungsbereich $P_2 \leq 1 \text{ kW}$ wird für die Zusatzverluste ein konstanter Anteil an der elektrischen Leistung P_1 angenommen: $P_{LL} = P_1 \cdot 0,025$ (4).

Im Bereich $1 \text{ kW} < P_2 < 10000 \text{ kW}$ gilt:

$$P_{LL} = P_1 \cdot \left[0,025 - 0,005 \log_{10} \left(\frac{P_N}{1 \text{ kW}} \right) \right] \quad (5)$$

Für den Bereich $P_2 \geq 10000 \text{ kW}$ wird angenommen:

$$P_{LL} = P_1 \cdot 0,005 \quad (6)$$

Alle hier betrachteten Maschinen liegen bezüglich der Leistung im Bereich zwischen $0,75 \text{ kW}$ und 30 kW .

Die zweite Art der Ermittlung der Zusatzverluste beruht auf der Bestimmung der Restverluste für verschiedene Punkte der Lastkennlinie im Bereich vom $0,25$ -fachen bis zum $1,5$ -fachen Bemessungsdrehmoment der Maschine.

Bei diesem Verfahren werden die Eisen- und Reibungsverluste der Maschine, der bei Betrieb mit Bemessungslast im thermischen Beharrungszustand erreichte Statorwicklungswiderstand und der Statorwicklungswiderstand nach Beendigung der Bestimmung der Lastkennlinie benötigt. Ein weiterer Parameter ist die Kühlmitteltemperatur während der Prüfung.

Für die Maschine wird nach Betrieb mit Bemessungslast und Erreichen der Dauerbetriebstemperatur die Belastungskennlinie üblicherweise für 6 Lastpunkte im Bereich $1,5 M_N \dots 0,25 M_N$ aufgenommen. Im Detail ist dieses Verfahren in [2] beschrieben.

3 Gegenüberstellung der messtechnisch und rechnerisch ermittelten Zusatzverluste

Da die Ermittlung der Zusatzverluste über die Lastkennlinie einen erhöhten Aufwand bedeutet, wird in der Praxis des Öfteren die Berechnung der Zusatzverluste, wie mit den Gleichungen (4) bis (6) beschrieben, angewandt, insbesondere wenn der erzielte Wirkungsgrad die gewünschte IE-Klassifizierung erreicht. Die sich ergebende Fragestellung ist nun, inwieweit die berechneten Zusatzverluste mit den messtechnisch über die Lastkennlinie ermittelten übereinstimmen.

Durch Anwendung beider Verfahren an in der PTB vorhandenen Maschinen der Baujahre 2006 – 2010 und Vergleich der Ergebnisse der Wirkungsgradbestimmung wurden diese Zusammenhänge für die hier betrachteten Maschinen messtechnisch untersucht.

Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen, daher kann das im Folgenden dargestellte Ergebnis auch nur einen Zwischenstand wiedergeben, der noch nicht repräsentativ ist.

Es wurden bisher Maschinen im Bemessungsleistungsbe- reich $0,75 \text{ kW}$ – bis 30 kW betrachtet, wobei die Maschinen der Bemessungsleistungen 3 kW (C) und 30 kW (D) mit Kupferdruckgussläufern ausgestattet waren. Die bisherigen Ergebnisse dieser Untersuchung für die Ermittlung der Zusatzverluste P_{LL} sind prozentual auf die aufgenommene elektrische Leistung P_1 bei Bemessungsbetrieb bezogen in **Bild 2** dargestellt:

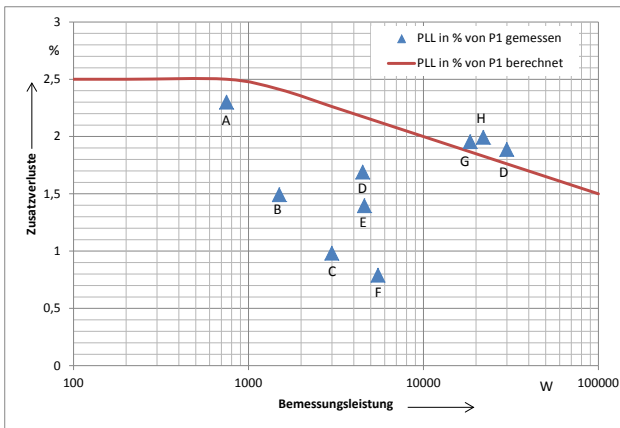


Bild 2 Darstellung der gemessenen und berechneten Restverluste bei Maschinen der Hersteller A – H prozentual auf P_1 bezogen

Aufgrund der geringen Zahl der bisher bezüglich der Zusatzverluste untersuchten elektrischen Maschinen ist eine statistische Auswertung und das sichere Erkennen von Zusammenhängen zur Ausführung der Maschinen bisher nicht möglich, zwei Fakten sind jedoch bereits jetzt ersichtlich geworden:

- Zwischen den berechneten und messtechnisch ermittelten Zahlenwerten für die Zusatzverluste treten teilweise große Abweichungen auf (hier bis zum Faktor 2,7), die Auswirkung auf den Wirkungsgrad ist aber auch in diesem Fall mit $\eta = 0,904$ zu $\eta = 0,893$ gering.
- Die bisher beobachteten, größeren Differenzen wirken sich negativ auf den ermittelten Wirkungsgrad aus, in positiver Richtung wurde lediglich eine maximale Abweichung des bestimmten Wirkungsgrades von $\eta = 0,880$ zu $\eta = 0,882$ bestimmt, dieses kann als vernachlässigbar angesehen werden.

Die Auswirkungen auf die ermittelten Maschinenwirkungsgrade für die berechneten und gemessenen Restverluste sind in **Bild 3** dargestellt.

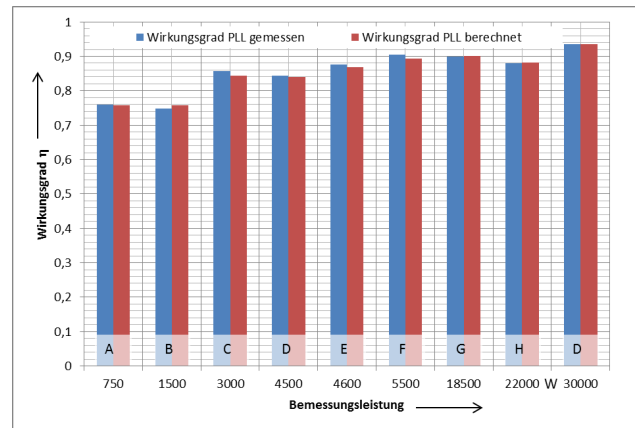


Bild 3: Vergleich der ermittelten Wirkungsgrade für die Versuchsmaschinen der Hersteller A – D bei Berechnung und messtechnischer Ermittlung der Zusatzverluste

Bedingt durch die Tatsache, dass die Zusatzverluste nur einen relativ kleinen Anteil an den gesamten Maschinenverlusten aufweisen, ist die Auswirkung auf das Messergebnis „Wirkungsgrad“ mit einer maximalen Abweichung von 1,49 % bezogen auf die Wirkungsgradbestimmung mit den messtechnisch bestimmten Restverlusten als gering zu bezeichnen, kann aber dennoch über die IE-Klassifizierung der Maschine entscheiden.

Es muss hierbei aber auch berücksichtigt werden, dass der Wirkungsgrad der Maschine, wie alle anderen Messgrößen auch, mit Messunsicherheiten behaftet ist, die sich den Ergebnissen aus Bild 3 noch überlagern. Für die Maschine mit einer Bemessungsleistung von 30 kW wurden die Messunsicherheiten in [2] im Detail analysiert. Die Ergebnisse der Analyse nach GUM [4], [6] sind hier noch einmal zusammengefasst.

4 Berücksichtigung der Messunsicherheit

Bei dem hier beschriebenen Ansatz gehen die Messunsicherheiten der elektrischen Spannungsmessung, der Strommessung, der Bestimmung des Leistungsfaktors, der Drehmomentfassung und der Drehzahlmessung ein. Die Messunsicherheiten für den Strom, die Spannung und den Leistungsfaktor können in einer Messunsicherheitsangabe für die Leistungsmessung zusammengefasst werden. Eine Auswertung der Messung unter Zuhilfenahme des GUM gab für die direkte Wirkungsgradbestimmung gemäß **Tabelle 1** das folgende Ergebnis:

Größe	Wert	Standardmessunsicherheit	Freiheitsgrad	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Beitrag zur ges. Unsicherheit
M	96,00 Nm	0,409 Nm				
Mm	96,00 Nm	0,289 Nm	unendlich	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	47,5 %
Ma	0,0 Nm	0,0289 Nm	unendlich	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$280 \cdot 10^{-6}$	0,5 %
Mk	0,0 Nm	0,289 Nm	unendlich	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	47,5 %
n	$2965,4 \text{ min}^{-1}$	$1,15 \text{ min}^{-1}$				
nm	$2965,4 \text{ min}^{-1}$	$1,14 \text{ min}^{-1}$	unendlich	$310 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^{-6}$	0,8 %
na	$0,0 \text{ min}^{-1}$	$0,0289 \text{ min}^{-1}$	unendlich	$310 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
P₁	32048,0 W	27,0 W				
Pm	32048,0 W	27,0 W	unendlich	$-29 \cdot 10^{-6}$	$-780 \cdot 10^{-6}$	3,7 %
Pa	0,0 W	0,289 W	unendlich	$-29 \cdot 10^{-6}$	$-8,4 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
P₂	29811 W	128 W				
π	3,14159265					
eta_{dir}	0,9302	$4,06 \cdot 10^{-3}$	unendlich			
Erläuterung der verwendeten Größen						
M	Drehmoment	na	Auflösungsfehler der Drehzahl			
Mm	Messwert des Drehmomentes	P₁	aufgenommene elektrische Leistung			
Ma	Auflösungsfehler des Drehmomentes	Pm	Messwert der elektrischen Leistung			
Mk	Konstanter Fehler der Drehmomentmessung	Pa	Auflösungsfehler der elektrischen Leistung			
n	Drehzahl	P₂	abgegebene mechanische Leistung			
nm	Messwert der Drehzahl	eta_{dir}	Maschinenwirkungsgrad			
Ergebnis:						
	Messgröße		eta _{dir}			
	Wert		0,9302			
	Erweiterte Messunsicherheit		$\pm 8,1 \cdot 10^{-3}$			
	Erweiterungsfaktor		2,0			
	Überdeckung		t-Tabelle 95 %			

Tabelle 1: Messunsicherheitsbudget für den Wirkungsgrad bei direkter Messung

Es zeigte sich hierbei ganz deutlich, dass mit 95 % die Drehmomentmessung mit Abstand den größten Messunsicherheitsbeitrag zu der gesamten Messunsicherheit liefert.

Wird zur Bestimmung des Wirkungsgrades hingegen das Restverlustverfahren gem. [2] angewandt, so ergibt sich bei einer aufgenommenen Leistung $P_1 = 32048 \text{ W}$ und einer abgegebenen Leistung

$$P_2 = P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1} - P_{Rb} - P_{Cu2} - P_{LL} = 29951,1 \text{ W} \quad (7)$$

der Wirkungsgrad zu $\eta = 93,5 \%$, dieses entspricht der Klassifizierung IE3 [1].

Bei der Betrachtung der Messunsicherheit zeigte sich, dass der Beitrag der Drehmomentmessung gemittelt über alle Lastpunkte nur noch 14,9 % beträgt. In der **Tabelle 2** sind die Messverfahren „Direkte Messung M und n“, „Direkte Messung M und s“, „indirekte Messung M und n“ sowie „indirekte Messung M und s“ bezüglich des ermittelten Wirkungsgrades beispielhaft für die Maschine mit einer Bemessungsleistung von 30 kW gegenübergestellt. Die Bezeichnungen „direkte Messung M und s“ sowie „indirekte Messung M und s“ bedeuten, dass statt der Drehzahlmessung mittels Drehzahlgeber dieser Wert über den Maschinenschlupf „s“ und die Netzfrequenz gem. [5] berechnet wurde. Die Messung des Maschinenschlupfes erfolgt dabei mittels Schlupfspule. Es wird dabei mittels Stoppuhr manuell die Zeit bestimmt, die während 10 Periodendauern der in der Schlupfspule induzierten Spannung verstreicht.

Verfahren	Direkt n gemessen	Direkt s gemessen	Indirekt n gemessen	Indirekt s gemessen
P₁	32048 W	32048 W	32048 W	32048 W
P₂	29811 W	29853 W	29909 W	29951 W
P_{Vgesamt}	2237 W	2195 W	2139 W	2097 W
η	0,930	0,932	0,933	0,935
Erweiterte Messunsicherheit (k=2), aus GUM	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
IE-Klasse	IE2	IE2	IE3	IE3

Tabelle 2: Gegenüberstellung verschiedener Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung, beispielhaft für die Maschine mit 30 kW Bemessungsleistung

Auffällig hierbei ist, dass die Unterschiede im Ergebnis der Auswertung, der Messunsicherheit, zwischen dem Drehzahlmessverfahren „Drehzahlgeber“ und „Berechnung über den mittels Schlupfspule ermittelten Maschinenschlupf“ nur sehr gering ausfallen. Der Einfluss der Drehzahlmessmethode kann daher in diesem Fall als sehr gering angesehen werden.

Grundsätzlich verschieden ist der Sachverhalt jedoch bei der Gegenüberstellung der Methoden „direkte Wirkungsgradbestimmung aus aufgenommener und abgegebener Leistung“ und „Bestimmung über das Restverlustverfahren“. Hier ergeben sich gemäß **Tabelle 2** signifikante Unterschiede bei der angegebenen Messunsicherheit. In diesem Beispiel führen die in Abhängigkeit des Verfahrens ermittelten, unterschiedlichen Wirkungsgrade η auch zu der gravierenden Konsequenz, dass die Maschine bei Bestimmung des Wirkungsgrades nach der direkten Methode nur der Effizienzklasse IE2 zugeordnet werden könnte und gemäß der EU-Verordnung 640/2009 ab dem 1. Januar 2015 nicht mehr für den direkten Betrieb am Netz in Verkehr gebracht werden dürfte.

Bei Anwendung des Restverlustverfahrens erreicht die Maschine hingegen die Energieeffizienzklasse IE3.

Die Ursache für die in **Tabelle 2** dargestellte Abweichung der erweiterten Messunsicherheit ist in den Messunsicherheiten der Drehmomentmessung zu finden, deren Einfluss auf das Endergebnis bei Anwendung der Restverlustmethode deutlich kleiner ist als bei Anwendung der direkten Methode zur Wirkungsgradbestimmung.

Hierbei ist jedoch noch anzumerken, dass die Messunsicherheit, die sich dadurch ergibt, dass die Ermittlung des Schlupfes mittels Schlupfspule und die Messung der elektrischen Größen für diesen Messpunkt prinzipbedingt nicht exakt gleichzeitig erfolgen kann, in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurde.

5 Einordnung der berechneten Maschinenwirkungsgrade bezüglich der Messunsicherheiten in die IE-Klassifizierung

Zur anschaulichen Beurteilung der Ergebnisse der hier für die Maschine mit 30 kW Bemessungsleistung durchgeführten Auswertungen wurde in **Bild 4** die Verteilungsdichtefunktionen der Messergebnisse dargestellt. Die Verteilungsdichtefunktion ist charakterisiert durch den Erwartungswert μ , hier dem jeweiligen Messwert für den Wirkungsgrad, und die Standardabweichung σ , welche der mittels GUM ermittelten Standardmessunsicherheit entspricht. Die Strecke zwischen den beiden Wendepunkten einer jeden Funktion entspricht der zweifachen Standardabweichung $\mu \pm \sigma$ (Vertrauensintervall 68 %). Als weitere Bedingung muss der Flächeninhalt unter den Verteilungsdichtefunktionen gleich sein. Eine steigende Standardmessunsicherheit zeigt sich in einer Verbreiterung der Kurvenverläufe bei gleichzeitiger Verkleinerung des Kurvenmaximums. Für die Verteilungsdichtefunktion des Wirkungsgrades gem. Bild 4 kann geschrieben werden:

$$f(\eta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\eta - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (8)$$

Alle Wirkungsgrade auf der rechten Seite der gestrichelten Linie erfüllen die Wirkungsgradklassifizierung IE3 oder besser.

Bei der Betrachtung des Messwertes ohne die dazugehörige Messunsicherheit zeigt sich, dass lediglich die hier untersuchten, auf der indirekten Bestimmung der Restverluste basierenden Messverfahren für den Wirkungsgrad ein Ergebnis liefern, welches den Anforderungen der Wirkungsgradklassifizierung IE 3 genügt. Für die Verfahren „Direkte Messung, n“ und „Direkte Messung, s“ ergibt sich lediglich die Wirkungsgradklassifizierung IE2 im Ergebnis.

Bezieht man jetzt die resultierenden Messunsicherheiten für den Wirkungsgrad in die Betrachtung mit ein, so ist gemäß Bild 4 ersichtlich, dass bei wiederholter Messung ein und derselben Maschine z.B. nach dem Verfahren „Direkte Messung, n“ mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Ergebnisse herauskommen, die der Klassifizierung IE3 genügen. Andererseits werden bei wiederholter Wirkungsgradbestimmung nach dem Verfahren „Indirekt, Messung n“ auch Ergebnisse auftreten, bei denen die Maschine nur der Wirkungsgradklassifizierung IE2 genügt.

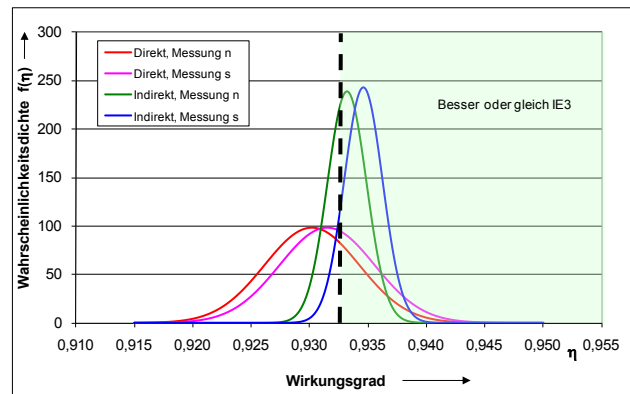


Bild 4: Darstellung des Ergebnisses der Wirkungsgradbestimmungen in Form der Verteilungsdichtefunktion

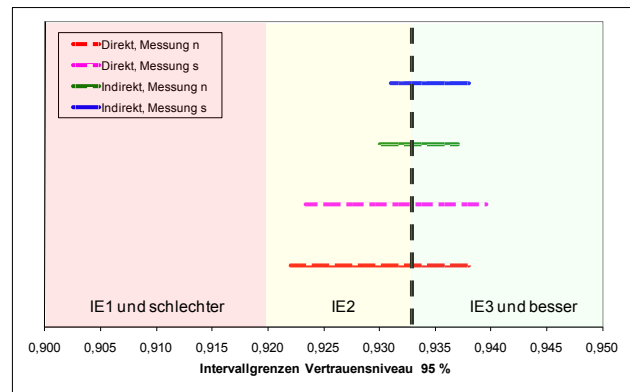


Bild 5: Darstellung der Intervallgrenzen des 95 % Vertrauensniveaus

Zur besseren Veranschaulichung des Ergebnisses dieser Untersuchungen wurden in **Bild 5** die Intervallbereiche des 95 % - Vertrauensniveaus des Wirkungsgrades, ermittelt über die hier beschriebenen Verfahren, dargestellt. [6] Diese Angabe bedeutet, dass sich, bei angenommenen unendlich vielen Messungen, 95 % der ermittelten Messwerte innerhalb dieses Intervalles befinden.

Dieses Ergebnis zeigt sehr deutlich den Einfluss der gesamten Messunsicherheit des verwendeten Verfahrens auf das Endergebnis der Betrachtung, den Maschinenwirkungsgrad, und somit auch der IE-Klassifizierung des untersuchten Motors. Es handelt sich hierbei um dieselbe Maschine und denselben Versuch, wobei lediglich unterschiedliche Messgrößen mit verschiedenen Verfahren ausgewertet wurden.

6 Zusammenfassung

Es zeigte sich gem. Bild 2 bei den bisher untersuchten Maschinen verschiedener Baugrößen, dass sich zwischen den rechnerisch ermittelten und messtechnisch bestimmten Zusatzverlusten teilweise deutliche Abweichungen ergeben, die auch Auswirkungen auf den berechneten Maschinenwirkungsgrad haben. In fast allen Fällen führte dieses zu einer Verschlechterung des Maschinenwirkungsgrades gegenüber der messtechnischen Bestimmung der Restverluste, die bei einigen Maschinen beobachtete „Verbesserung“ des Wirkungsgrades ist sehr gering und liegt im Bereich der auftretenden Messunsicherheiten, kann aber durchaus über die IE-Klassifizierung des Motors entscheiden. Dieser Punkt wird auch Gegenstand weitergehender wissenschaftlicher Untersuchungen sein.

Es ist daher für den Motorhersteller bei der Wirkungsgradbestimmung durchaus lohnend, den zusätzlichen Aufwand für die messtechnische Bestimmung der Zusatzverluste zu investieren.

Bei der Auswertung der Ergebnisse bezüglich des Materials des Rotorkäfigs zeigte sich bisher kein eindeutiger Einfluss der Ausführung des Rotorkäfigs in Kupferdruckguss an Stelle von Aluminiumdruckguss.

7 Literatur

- [1] Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren
- [2] Lehrmann, C., Dreger, U., Lienesch, F.; Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen: Gegenüberstellung und Optimierung verschiedener Verfahren; Bulletin SEV Band 101 (2010), Heft 11, S. 37 - 43
- [3] DIN EN 60034-2-1: 2008; Drehende elektrische Maschinen – Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen und Straßenfahrzeuge); Beuth-Verlag, Berlin
- [4] Pesch, B.; Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM; Norderstedt, Books on Demand, 2003
- [5] Eckhardt, H.; Grundzüge der elektrischen Maschinen; Teubner-Verlag Stuttgart, 1982
- [6] Sommer, K.-D., Siebert, B.R.L.; Praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM; Technisches Messen; Band 71(2004), Heft 2, S. 52-66