

Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen

Gegenüberstellung und Optimierung verschiedener Verfahren

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], kommt der Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen eine immer grössere Bedeutung zu. Welchen Herausforderungen begegnet man bei der Ermittlung des Wirkungsgrads von Elektromotoren?

Christian Lehrmann, Uwe Dreger und Frank Lienesch

Die Verordnung Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG (Ecodesign) legt für elektrische Maschinen künftig Mindestwirkungsgrade fest. Die Marktaufsichtsbehörden der Mitgliedsstaaten sind aufgefordert, eine Überprüfung der Anforderungen durchzuführen.

Deshalb gewinnt eine möglichst exakte und reproduzierbare messtechnische Bestimmung des Maschinenwirkungsgrads an Bedeutung. Der Maschinenwirkungsgrad ist dabei definiert als $\eta = P_2/P_1$, wobei P_1 die aufgenommene elektrische Leistung bezeichnet und P_2 ein Mass für die über die Welle abgegebene mecha-

nische Leistung ist. Die Verlustleistung ist dabei definiert als $P_1 - P_2$.

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

Bei in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführten Untersuchungen an einer 30-kW-Maschine und einer gemäss GUM1 [2] ausgewerteten Messunsicherheitsbetrachtung wurde deutlich, dass die Erfassung des Drehmoments in diesem Fall mit ca. 95% den weitaus grössten Anteil an dem gesamten Messunsicherheitsbudget der direkten Wirkungsgradbestimmung aufweist. Dieser Situation wurde in EN 60034-2-1 [3] Rechnung getragen, in der die Anwendung der direkten Wirkungsgradbestimmung als bevorzugtes Verfahren auf Maschinen mit einer Bemessungsleistung bis einschliesslich 1 kW eingeschränkt wurde.

Für grössere Maschinen stehen zur Wirkungsgradbestimmung alternative Verfahren zur Verfügung, bei deren Anwendung die Messunsicherheit der Messgrösse Drehmoment auf das Endergebnis «Wirkungsgrad» gegenüber der direkten Messung an Einfluss verliert. Ein möglicher Ansatz hierbei ist, die Einzelverluste der Maschine, wie die Statorkupferverluste, die Eisenverluste, die Reibungsverluste und die Stromwärmeverluste des Rotors, zu bestimmen und von der Leistung P_1 zu subtrahieren. Als Unbekannte verbleiben hierbei die Zusatzverluste, welche sich über die Belastungskennlinie der Maschine bestimmen lassen. Der Einfluss der Messunsicherheit der für die Lastkennlinie erforderlichen Drehmomentmessung auf das Gesamtergebnis wird somit deutlich verkleinert.

Auftretende Maschinenverluste

Die in der Maschine während des Betriebs auftretenden Verluste können zunächst einmal grob auf den Stator und den Rotor der elektrischen Maschine aufgeteilt werden. Dem Stator werden dabei die Stromwärmeverluste in der Wicklung (P_{Cu1}) sowie die Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste, zusammengefasst in den Eisenverlusten (P_{Fe}), zugeordnet. Dem Rotor werden dann die im Rotorkäfig auftretenden Stromwärmeverluste (P_{Cu2}) und die mechanischen Reibungsverluste (Lagerreibung und für den Lüfter aufgewendete Leistung) zusammenge-

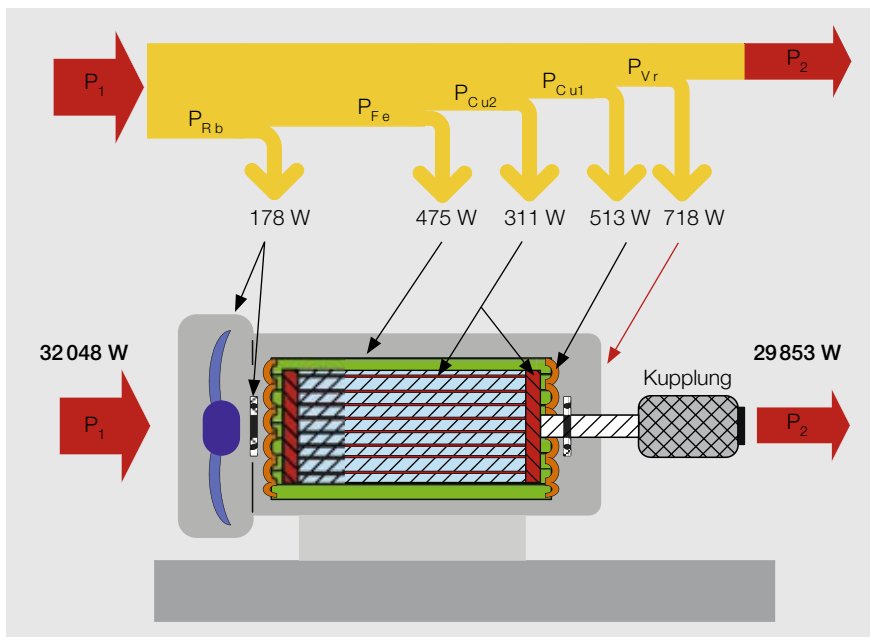


Bild 1 Aufteilung der Maschinenverluste für eine Maschine der Baugrösse 200, Beispiel.

fasst in der Grösse P_{Rb} zugeordnet (Bild 1). [4]

Bei einem Vergleich der mittels Differenzbildung aus der aufgenommenen elektrischen und abgegebenen mechanischen Leistung ermittelten Maschinenverluste $P_{V,direkt} = P_1 - P_2$ mit der Summe der beschriebenen Einzelverluste $P_{V,indirekt} = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{Rb}$ wurde schon früh erkannt, dass zwischen diesen beiden Grössen keine Übereinstimmung herrscht und die indirekt bestimmte Verlustleistung generell kleiner ist als das Ergebnis der direkten Messung. Diese zusätzlichen Verluste P_{Vr} erhielten den Namen Zusatz- oder Restverluste.

Die Eisen- und Reibungsverluste werden dabei gemäss EN 60034-2-1 [3] über einen Leerlaufversuch bestimmt. Das Ergebnis für eine 30-kW-Maschine zeigt beispielhaft das Bild 2.

Ermittlung der Restverluste

Zur Ermittlung der Restverluste bediente man sich früher eines festen prozentualen Anteils, bezogen auf die von der Maschine aus dem Netz aufgenommene Wirkleistung, der gemäss EN 60034-2 zu 0,5% bei Bemessungsstrom festgelegt wurde. Hierbei wurde ausser Acht gelassen, dass der Anteil der Zusatzverluste auch von der Baugrösse abhängig ist. Deshalb wiesen die tatsächlichen Zusatzverluste der Maschine teilweise grosse Abweichungen gegenüber der getroffenen Festlegung auf.

Besonders unter dem Aspekt der Forderung von Mindestwirkungsgraden für elektrische Maschinen und dem Interesse, den Wirkungsgrad möglichst exakt bestimmen zu können, wurden mit dem Erscheinen der EN 60034-2-1 [3] neue Verfahren zur Bestimmung der Zusatzverluste festgelegt. Ab 1. November 2010 müssen diese Verfahren zwingend für die Wirkungsgradbestimmung durch den Hersteller angewandt werden.

Hierzu stehen gemäss EN 60034-2-1 die folgenden Verfahren zur Verfügung:

- Ermittlung der Zusatzverluste über eine mathematische Funktion in Abhängigkeit der Maschinenbemessungsleistung: Hierbei wird davon ausgegangen, dass die tatsächlichen Verluste unterhalb der über diese Funktion definierten Kurve liegen, für die Wirkungsgradbestimmung also höhere Zusatzverluste als die Tatsächlichen angenommen werden und somit der Wirkungsgrad einen geringeren Wert als in der Realität aufweist. Umgangssprachlich wird diese Funktion

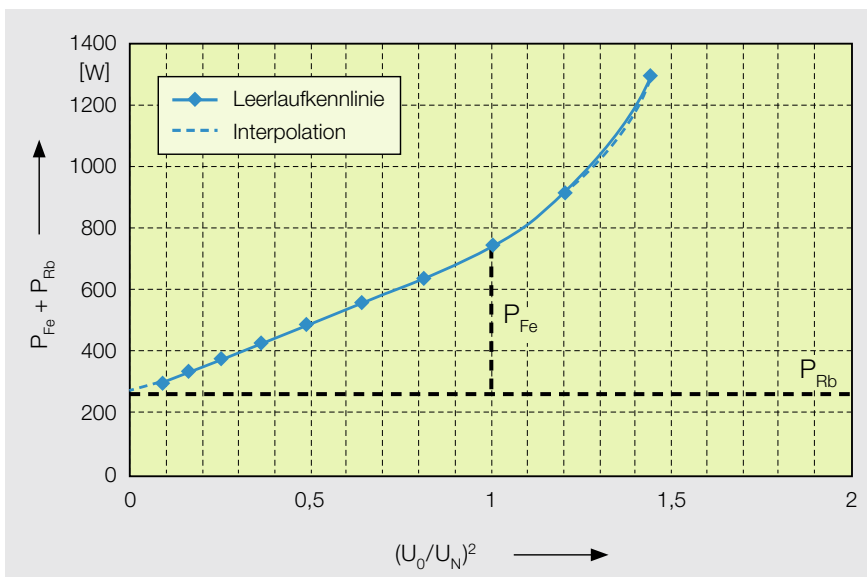


Bild 2 Leerlaufkennlinie einer Maschine, Bemessungsleistung 30 kW.

daher auch als «Strafkurve» bezeichnet. Dieses Verfahren ist unabhängig von der Maschinenbemessungsleistung anwendbar.

- Bestimmung der Zusatzverluste über die EH*-Methode: Dieses ist ein synthetisches Prüfverfahren, bei der die Zusatzverluste über eine spezielle Messschaltung bestimmt werden. Näheres dazu in [5].

- Bestimmung der Zusatzverluste über die Auswertung der Lastkennlinie der Maschine: Bei diesem Verfahren werden die Eisen- und Reibungsverluste der Maschine, die erreichte Dauerbetriebstemperatur der Statorwicklung bei Betrieb mit Bemessungslast und der Statorwicklungswiderstand bei Erreichen der Dauerbetriebstemperatur benötigt. Für die Maschine wird nach Betrieb mit Bemessungslast und Erreichen der Dauerbetriebstemperatur die Belastungskennlinie üblicherweise für 6 Lastpunkte im Bereich $1,5 - 0,25 M_N$ aufgenommen, anschliessend erfolgt eine erneute Bestimmung des Statorwicklungswiderstands. Hier von sollen 4 der Lastpunkte gleich verteilt im Intervall $0,25 - 1,0 M_N$ liegen. An den einzelnen Lastpunkten werden der Maschinenstrom, die Klemmenspannung der Maschine, die elektrische Wirkleistung, die Frequenz der Versorgungsspannung, das Drehmoment und der Schlupf bestimmt. Der Schlupf kann dabei mittels der Schlupffrequenz über eine Schlupfspule entweder direkt bestimmt oder aber aus der gemessenen Drehzahl und der Netzfrequenz berechnet werden.

Anschliessend werden die Restverluste für jeden Lastpunkt über die Differenz zwischen den direkt bestimmten Maschinenverlusten

$$P_{V,direkt} = P_1 - \frac{M \cdot n \cdot 2\pi}{60} \quad (1)$$

und den indirekt bestimmten Verlusten

$$P_{V,indirekt} = P_{Cu1} + P_{Fe} + s \cdot (P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}) + P_{Rb} \quad (2)$$

berechnet

$$P_{Vr} = P_{V,direkt} - P_{V,indirekt} \quad (3)$$

Die in der Formel 2 enthaltenen Eisenverluste P_{Fe} werden aus der Leerlaufkennlinie für jeden Lastpunkt aus der um den ohmschen Spannungsabfall verminderten Klemmenspannung U_r bestimmt. Die Spannung U_r berechnet sich dabei gemäss dem folgenden Zusammenhang:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi \right)^2} \quad (4)$$

Hierbei beschreibt der Wert U den Spannungseffektivwert an den Maschinenklemmen, R den ohmschen Wicklungswiderstand der betriebswarmen Maschine und φ den Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im betrachteten Betriebspunkt.

Anschliessend werden die an den einzelnen Lastpunkten bestimmten Restverlustwerte P_{Vr} über dem Quadrat des

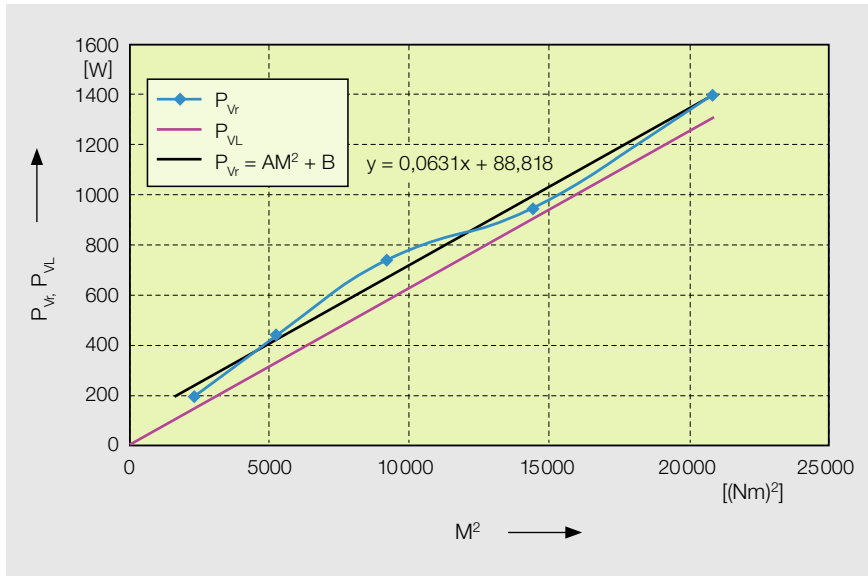


Bild 3 Näherung der Restverluste über die abgegebene mechanische Leistung im Verhältnis zur Maschinenbemessungsleistung.

| 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 min ⁻¹ | 1,15 min ⁻¹ | | | | |
| nm | 2965,4 min ⁻¹ | 1,14 min ⁻¹ | unendlich | $310 \cdot 10^{-6}$ | $360 \cdot 10^{-6}$ | 0,8 % |
| na | 0,0 min ⁻¹ | 0,0289 min ⁻¹ | unendlich | $310 \cdot 10^{-6}$ | $9,1 \cdot 10^{-6}$ | 0,0 % |
| P ₁ | 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 % |
| P ₂ | 29811 W | 128 W | | | | |
| π | 3,14159265 | | | | | |
| η _{dir} | 0,9302 | $4,06 \cdot 10^{-3}$ | unendlich | | | |

Erläuterung der verwendeten Grössen

| | | | |
|----|---|------------------|--|
| M | Drehmoment | na | Auflösungsfehler der Drehzahl |
| Mm | Messwert des Drehmoments | P ₁ | aufgenommene elektrische Leistung |
| Ma | Auflösungsfehler des Drehmoments | Pm | Messwert der elektrischen Leistung |
| Mk | Konstanter Fehler der Drehmomentmessung | Pa | Auflösungsfehler der elektrischen Leistung |
| n | Drehzahl | P ₂ | abgegebene mechanische Leistung |
| nm | Messwert der Drehzahl | η _{dir} | Maschinenwirkungsgrad |

Ergebnis:

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Messgrösse | η _{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.

Drehmoments gemäss **Bild 3** aufgetragen und durch die einzelnen Messpunkte eine Näherungsfunktion $P_{Vr} = A \cdot M^2 + B$ mit der Steigung A gelegt. Durch Parallelverschiebung dieser Geraden um $-B$ in den Ursprung des Koordinatensystems erhält man die Funktion $P_{VL} = A \cdot M^2$ zur Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste für jeden betrachteten Lastpunkt mit dem Drehmoment M .

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Prüfung des Korrelationskoeffizienten der an den einzelnen Lastpunkten ermittelten Messwerte für P_L gemäss EN 60034-2-1 $\gamma \geq 0,95$ ergibt. Anderenfalls ist der «schlechteste» Messpunkt zu streichen und die Regression zu wiederholen. Falls dabei $\gamma < 0,95$ bleibt, so weist dieses auf Fehler im Versuchsaufbau bzw. der Durchführung hin. Der Versuch ist dann nach Erkennung und Beseitigung der Fehler zu wiederholen.

■ Bestimmung der Zusatzverluste über die Methode der kalibrierten Referenzmaschine gemäss EN 60034-2-1 [3]

Im Folgenden werden die Methoden «Direkte Wirkungsgradbestimmung» und «Indirekte Wirkungsgradbestimmung über das Restverlustverfahren» (Bestimmung der Zusatzverluste über die Auswertung der Lastkennlinie) anhand eines Beispiels (30-kW-Asynchronmaschine mit Kupferdruckgussläufer) im Detail betrachtet.

Messunsicherheiten beim Verfahren nach GUM

In den meisten Fällen wird eine Messgrösse nicht direkt gemessen, sondern aus weiteren Grössen berechnet. Die Eingangsgrössen werden wiederum über eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungsfunktion (PDF) in Bezug auf den wahren Wert beschrieben. Der Erwartungswert der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungsfunktion wird als bester Schätzwert für den Wert der Grösse verwendet. Wird dieser Ansatz verfolgt, werden die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungsfunktionen zu einem Informationsträger über die auf das Messergebnis einwirkenden Eingangsgrössen.

Die eigentliche Schwierigkeit ist nun, für das angewandte Messprinzip die den Sachverhalt am besten reflektierende Verteilungsdichtefunktion auszuwählen. Sind am Endergebnis mehrere Messprozesse beteiligt, muss für jede Stelle, an der Messwerte ermittelt werden, eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichtefunktion angesetzt und hieraus die Unsi-

| Verfahren | Direkt n gemessen | Direkt s gemessen | Indirekt n gemessen | Indirekt s gemessen |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| P_1 | 32048 W | 32048 W | 32048 W | 32048 W |
| P_2 | 29811 W | 29853 W | 29909 W | 29951 W |
| $P_{V\text{gesamt}}$ | 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.

cherheit für das Gesamtergebnis bestimmt werden.

Für die Verteilungsdichtefunktion kann ein rechteckförmiger Verlauf angenommen werden, wenn die Werte in einem Intervall enthalten sind, z. B. vorgegebene, feste Toleranzen eines Messgeräts, Quantisierungsfehler bei der Signaldigitalisierung.

Es kann eine Gauss'sche Normalverteilung angenommen werden, wenn ein bester Schätzwert mit beigeordneter Standardunsicherheit angegeben werden kann. Das ist z. B. bei der Angabe eines Kalibrierergebnisses oder als Ergebnis einer statistischen Auswertung (Mittelwert + Standardabweichung) gegeben. Analog zur Eingangsgrösse lassen sich aus der PDF der Ausgangsgrösse (Messgrösse) der Erwartungswert und die beigeordnete Messunsicherheit ableiten. [2]

Zur Bewertung der Messunsicherheiten wird im Rahmen dieses Beitrags das Verfahren nach GUM eingesetzt, welches zur Berechnung der Messunsicherheit die Methode der Gauss'schen Messunsicherheitsfortpflanzung anwendet. Detaillierte Ausführungen zum GUM-Verfahren finden sich in [2].

Es ist dabei schwierig, die Realität möglichst gut in den Modellgleichungen abzubilden. Für die Messunsicherheiten der verwendeten Geräte – meist aus einem konstanten und einem messgrössenabhängigen Beitrag sowie einem die begrenzte Ablesegenauigkeit beschreibenden Auflösungsfehler bestehend – wird auf die Herstellerangaben zurückgegriffen.

Beispiel 30-kW-Maschine

Die Betrachtung der einzelnen Messunsicherheitsbeiträge auf dem Weg zur gesamten Messunsicherheit, mit der die Angabe des Wirkungsgrads behaftet sein wird, erfolgt hier anhand einer Maschine der Bemessungsleistung 30 kW,

für die der Wirkungsgrad in der PTB für verschiedene Ansätze bestimmt worden ist.

Der aus Sicht des Betrachters wahrscheinlich einfachste Ansatz stellt die direkte Bestimmung des Wirkungsgrads über den Quotienten $\eta = P_2/P_1$ dar.

Mit einer bei Betrieb mit Bemessungsleistung aufgenommenen Leistung von $P_1 = 32048$ W und einer mechanisch abgegebenen Leistung von $P_2 = 29811$ W ergibt sich für den Wirkungsgrad $\eta = 0,9302$. Dieses entspricht gemäss der EU-Verordnung 690/2009 der Wirkungsgradklasse IE2. [1]

Zu berücksichtigende Messunsicherheiten

Bei diesem Ansatz gehen die Messunsicherheiten der elektrischen Spannungs- und Strommessung, der Bestimmung des Leistungsfaktors, der Drehmomentenerfassung 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 das in **Tabelle 1** aufgeführte Ergebnis.

Es zeigte sich hierbei deutlich, dass mit 95% die Drehmomentmessung mit Abstand den grössten Messunsicherheitsbeitrag liefert.

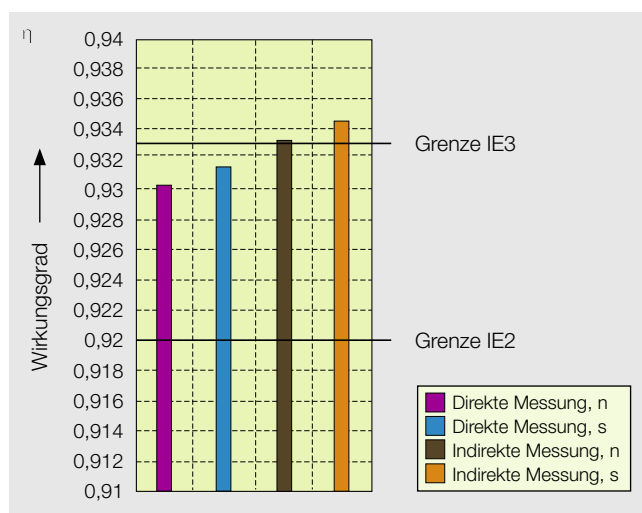
Wird zur Wirkungsgradbestimmung hingegen das Restverlustverfahren angewandt (**Tabelle 2**), so ergibt sich bei einer aufgenommenen Leistung $P_1 = 32048$ W und einer abgegebenen Leistung

$$P_2 = P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1} - P_{Rb} - P_{Cu2} - P_{Vr} =$$

29951,1 W der Wirkungsgrad zu $\eta = 93,5\%$ bei Bestimmung der Drehzahl mittels Schlupfspule, dieses entspricht der Klassifizierung IE3 [1].

Bei der Betrachtung der Messunsicherheit zeigte sich, dass der Beitrag der Drehmomentmessung gemittelt über alle Lastpunkte (aus der Restverlustbestimmung gemäss **Bild 3**) 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» 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 gemäss [4] berechnet wurde. Die Messung des Maschinenschlupfs erfolgt dabei mittels Schlupfspule. Es wird dabei mittels Stoppuhr manuell die Zeit bestimmt, die während 10 Periodendauern der in der Schlupfspule induzierten Spannung verstreicht.

Bild 4 Einfluss des Messverfahrens auf die IE-Klassifizierung der Maschine.



Auffällig hierbei ist, dass die Unterschiede im Ergebnis der Auswertung, dem Maschinenwirkungsgrad und auch der Messunsicherheiten zwischen dem Drehzahlmessverfahren «Drehzahlgeber» und «Berechnung über den mittels Schlupfspule ermittelten Maschinen-schlupf» 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 im berechneten Wirkungsgrad und der angegebenen Messunsicherheit. In diesem Beispiel führt das zu der gravierenden Konsequenz, dass die Maschine bei Bestimmung des Wirkungsgrads 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 (**Bild 4**).

Diesem Zusammenhang wurde in der EN 60034-2-1 [3] Rechnung getragen, indem die direkte Wirkungsgradbestimmung als bevorzugtes Verfahren nur für Maschinen mit Bemessungsleistungen ≤ 1 kW vorgesehen ist. Für Maschinen von > 1 kW bis 150 kW wird das Einzelverlustverfahren mit Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste über das Restverlustverfahren, welches hier bei der indirekten Bestimmung des Wirkungsgrads (**Bild 4**) zur Anwendung kommt, als bevorzugtes Verfahren genannt.

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. Die Messunsicherheit, die sich dadurch ergibt, dass die Ermittlung des Schlupfs mittels Schlupfspule und die Messung der elektrischen Grössen für diesen Messpunkt prinzipbedingt nicht exakt gleichzeitig erfolgen kann, wurde dabei in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

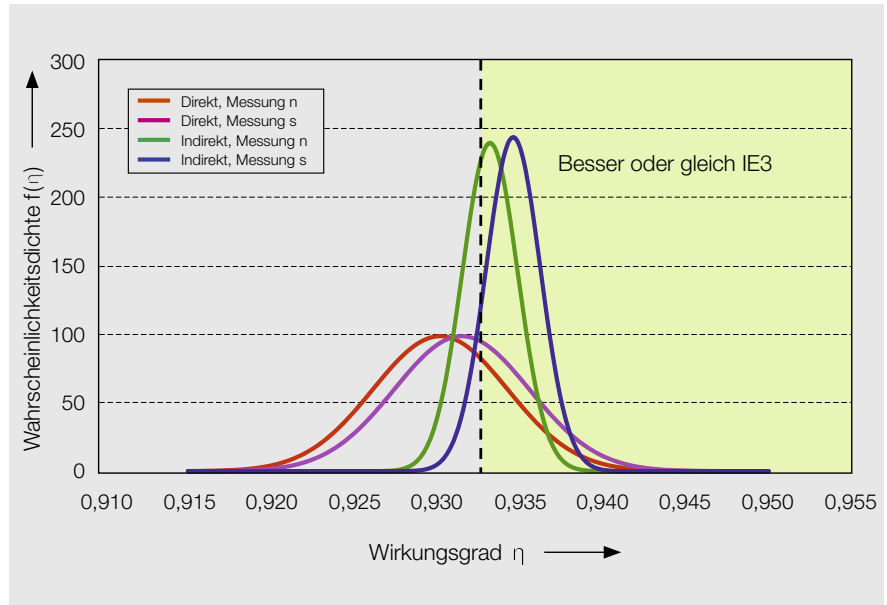


Bild 5 Darstellung des Ergebnisses der Wirkungsgradbestimmungen in Form der Verteilungsdichtefunktion.

Einordnung der berechneten Maschinenwirkungsgrade

Zur anschaulichen Beurteilung der Ergebnisse der hier durchgeführten Messung wurde in **Bild 5** 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.

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

Bei der Betrachtung des Messwerts ohne die dazugehörige Messunsicherheit zeigt sich, dass, wie auch in **Bild 4** dargestellt, lediglich die hier untersuchten, auf der indirekten Bestimmung der Restverluste basierenden Messverfahren für den Wirkungsgrad ein Ergebnis liefern, welches den Anforderungen der Wirkungsgradklassifizierung IE3 genügt. Für die Verfahren «Direkte Messung, n» und

«Direkte Messung, s» ergibt sich lediglich die Klassifizierung IE2.

Bezieht man jetzt die resultierenden Messunsicherheiten für den Wirkungsgrad in die Betrachtung mit ein, so ist gemäss **Bild 5** 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.

Zur besseren Veranschaulichung des Ergebnisses dieser Untersuchungen wurden in **Bild 6** die Intervallbereiche des 95%-Vertrauensniveaus des Wirkungsgrades dargestellt. [2] Diese Angabe bedeutet, dass sich, bei angenommenen unendlich vielen Messungen, 95% der ermittelten Messwerte innerhalb dieses Intervalls befinden.

Dies 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.

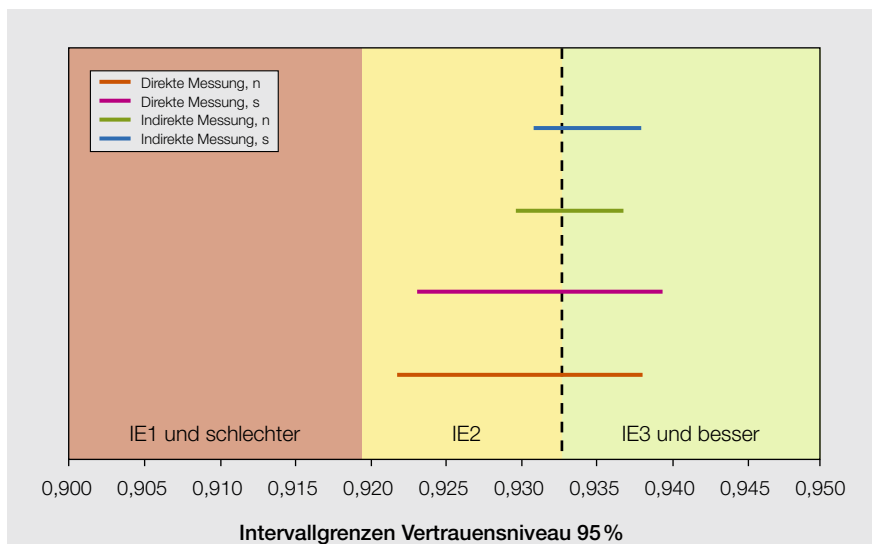


Bild 6 Darstellung der Intervallgrenzen des 95%-Vertrauensniveaus.

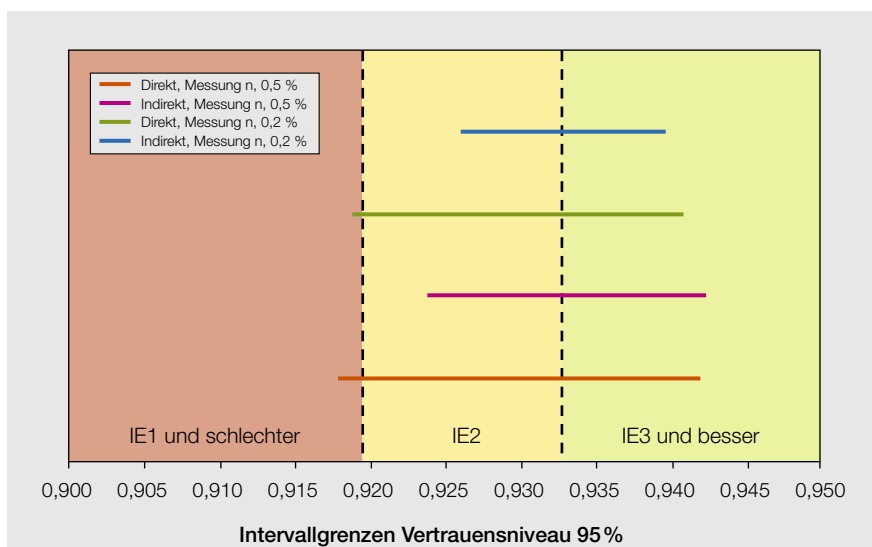


Bild 7 Auswirkung der Messgeräte-Genauigkeitsklasse auf das 95%-Vertrauensintervall.

Genauigkeitsklassen der Messgeräte

In EN 60034-2-1 werden die Mindest-Genauigkeitsklassen der verwendeten Messgeräte definiert. Für elektrische Grössen wird eine Mindest-Genauigkeitsklasse von 0,2% gefordert (bei in Serienprüfungen verwendeten Geräten wird 0,5% noch als ausreichend definiert). Für die Drehmomentmessung wird eine Genauigkeit von maximal $\pm 0,2\%$ gefordert, für die Drehzahl eine maximale Abweichung von $\pm 1 \text{ min}^{-1}$.

Eine Vergrößerung der Messunsicherheit bedeutet, dass die in Bild 6 dargestellten Intervallgrenzen des 95%-Vertrauensniveaus weiter auseinanderwandern, das Maximum der Verteilungsdichtefunktion der Messwerte sich verringert und die

Wendepunkte der Funktion auseinanderwandern. Die in Bild 5 dargestellten Verläufe würden sich also «abflachen» und «verbreitern».

Was bedeutet dies in der Praxis? Eine Vergrößerung der Messunsicherheiten der beteiligten Geräte führt auch zu einer Vergrößerung der Messunsicherheit des Endergebnisses, d. h. dass auch die Aussage über den Maschinenwirkungsgrad somit immer unsicherer wird. Würde ein in Bild 6 dargestelltes 95%-Vertrauensintervall z. B. den Bereich IE2 komplett überdecken und auch noch in die Bereiche IE1 und IE3 hineinragen, könnte für den Motor die Aussage getroffen werden: «Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt der für diesen Motor bestimmte Wirkungsgrad im Bereich der Wirkungsgrad-

klassen IE1 bis IE3. Diese Aussage ist für alle Beteiligten von geringem Nutzen.

Um die Auswirkung einer Verschlechterung der geforderten Genauigkeitsklasse von 0,2% auf 0,5% bei der Messung der elektrischen Grössen quantitativ zu betrachten, wurden die bereits betrachteten Messungen «Direkt, Messung n» und «Indirekt, Messung n» unter Annahme der Genauigkeitsklassen 0,2% und 0,5% für die elektrischen Grössen miteinander verglichen. Die minimalen Genauigkeiten der Messgeräte für das Drehmoment und die Drehzahl wurden dabei gemäss EN 60034-2-1 angenommen. Die Messbereiche wurden gemäss Tabelle 3 gewählt.

Das Ergebnis dieser fiktiven Messung ist in Bild 7 dargestellt. Es zeigte sich, dass sich die 95%-Vertrauensintervalle der ermittelten Wirkungsgrade erwartungsgemäss mit steigender Messunsicherheit der verwendeten Geräte verbreiterten. Es ist auch erkennbar, dass analog zu Bild 6 die 95%-Vertrauensbereiche der direkten Messmethode einen weiteren Bereich überdecken als bei der indirekten Bestimmung.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass der Einsatz von Messgeräten der Klassengenauigkeit 0,5% und 0,2% für die Wirkungsgradbestimmung von Induktionsmaschinen als nicht sinnvoll angesehen werden kann. Insbesondere bei der direkten Messung überdeckt der 95%-Vertrauensbereich die Klassen IE1, IE2 und IE3 – es kann daher nicht auf die tatsächliche Wirkungsgradklasse geschlossen werden. Ursächlich hierfür ist hauptsächlich der Messunsicherheitsbeitrag der Drehmomentmessung mit 87,4% zur gesamten Messunsicherheit bei Verwendung von Messgeräten der Genauigkeitsklasse 0,5% für die elektrischen Grössen. Die Verwendung von Messgeräten der Genauigkeitsklasse 0,2% ändert daher an der Situation nichts Wesentliches. Der Messunsicherheitsanteil der Drehmomentmessung beträgt hierbei sogar 97,5%.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigten, dass die Wahl des Messverfahrens zur Bestimmung des Maschinenwirkungsgrads aus den in EN 60034-2-1 beschriebenen Ansätzen einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis nehmen kann, nämlich die Einordnung der Maschine in die entsprechende Energieeffizienzklasse.

Diesen Einflüssen liegen die Messunsicherheiten zugrunde, mit denen die

| Messgrösse | U | I | P | M | R | f |
|-------------|--------|-------|----------------------------------|--------|--------|--------|
| Messbereich | 1000 V | 100 A | 10 kW (Leerlauf) 50 kW (Last) | 500 Nm | 100 mΩ | 100 Hz |

Tabelle 3 Für die Betrachtung angenommene Messbereiche.

verschiedenen Verfahren bei Verwendung handelsüblicher Messsysteme prinzipiell behaftet sind. Die Messung des Drehmoments hat in dem hier betrachteten Fall bei der direkten Methode mit 95% den weitaus grössten Anteil an der gesamten Messunsicherheit. Diese Zahl kann jedoch nicht als absolut angesehen werden und verändert sich bei Verwendung anderer Messmittel mit anderen Messunsicherheiten. Die direkte Methode wird in der Norm EN 60034-2-1 nur für Maschinen bis zu einer Bemessungsleistung von 1 kW empfohlen.

Bei Maschinen grösserer Leistung, wie bei der hier untersuchten, kann durch den Wechsel der Methode auf ein indirektes Verfahren die gesamte Messunsicherheit verringert und auch der Anteil der Drehmomentmessung an der gesamten Messunsicherheit reduziert werden.

Insgesamt betrachtet ist die Messunsicherheit bei der Bestimmung des Wirkungsgrads elektrischer Maschinen gerade vor dem Hintergrund der Wirkungsgradklassifizierungen ein wichtiges Instrument, um das zahlenmässige Ergebnis «Wirkungsgrad» einer Messung besser einordnen zu können und die Lage des Bereichs beurteilen zu können, in dem

sich die Ergebnisse mehrerer an einer Maschine durchgeführter Messungen bewegen werden (Bild 6).

Die Betrachtung der Messunsicherheit ist auch ein gutes Mittel, die Geräte und Verfahren mit den grössten Beiträgen zur gesamten Messunsicherheit aufzudecken und an diesen Stellen durch Optimierungen eine möglichst grosse Verbesserung des Gesamtergebnisses zu bewirken.

Bei allen den hier durchgeführten Betrachtungen ist jedoch bisher ein wichtiger Aspekt unberücksichtigt geblieben – die fertigungsbedingte Streuung der hergestellten Maschinen untereinander. Viele Herstellungsparameter hat der Hersteller zwar «in der Hand» und kann durch optimierende Massnahmen die Streuung möglichst klein halten, auf die Materialparameter wie z. B. die magnetischen Verlustparameter der zugekauften Elektroleche hat der Motorhersteller jedoch nur begrenzten Einfluss.

Ausblick

Es ist geplant, zukünftig in der PTB die einzelnen Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen im Hinblick auf die Messunsicherheiten systematisch zu untersuchen. Durch Optimierung der Messeinrichtun-

gen für die mechanische Leistung sollen insbesondere die Messunsicherheiten bei der direkten Wirkungsgradbestimmung deutlich verringert werden, damit dieses Verfahren auch bei Maschinen mit einer Bemessungsleistung grösser als 1 kW sinnvoll eingesetzt werden kann.

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] Pesch, B.; Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM; Norderstedt, Books on Demand, 2003.
- [3] DIN EN 60034-2-1: 2008; Drehende elektrische Maschinen – Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrads aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen und Strassenfahrzeuge); Beuth-Verlag, Berlin.
- [4] Eckhardt, H.; Grundzüge der elektrischen Maschinen; Teubner-Verlag Stuttgart, 1982.
- [5] Aoukadi, M.; Binder, A.; Comparison of Different Evaluation Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines With Eh-Star Method; IEEE Transactions on Industry Applications; Band 44(2008), Heft 6, S. 1675–1682.
- [6] Sommer, K.-D., Siebert, B.R.L.; Praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM; Technisches Messen; Band 71(2004), Heft 2, S. 52–66.

Angaben zu den Autoren

Dr.-Ing. **Christian Lehmann** ist nach einem Studium der Elektrotechnik an der TU Braunschweig seit 1999 Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe 3.72 «Explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme» der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Die Dissertation mit dem Titel «Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichter gespeiste Käfigläufer der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» wurde im August 2006 erfolgreich abgeschlossen.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, DE-38116 Braunschweig, christian.lehmann@ptb.de

Uwe Dreger hat an der Hochschule für Technik Bremen das Studium der Elektrotechnik Energietechnik 1982 abgeschlossen. Nach mehreren Jahren Tätigkeit in der Industrie ist er seit 1999 bei der PTB in der Arbeitsgruppe «Explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme» tätig.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, DE-38116 Braunschweig, uwe.dreger@ptb.de

Dr.-Ing. **Frank Lienesch** ist seit 2003 Leiter der Arbeitsgruppe «Explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme» in der PTB und Mitglied im Normungsarbeitskreis K311 «Drehende elektrische Maschinen».

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, DE-38116 Braunschweig, frank.lienesch@ptb.de

¹⁾ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (eine international anerkannte Vorgehensweise zur Messunsicherheitsberechnung).

Résumé Définition du rendement de machines électriques

Comparaison et optimisation de plusieurs procédés

En raison de l'augmentation des prix de l'énergie, de l'amenuisement des ressources, et des directives de l'UE en matière de produits consommateurs d'énergie spécifiant des rendements minimums requis à l'avenir en fonction de la puissance pour les machines à induction commercialisées en UE, la définition du rendement des machines électriques devient de plus en plus importante. Cette contribution décrit différentes méthodes de définition du rendement de machines électriques ainsi que les pertes générées par ces dernières. Il est expliqué comment ces pertes peuvent être déterminées et quel rôle jouent les incertitudes de mesure. Finalement, l'influence du procédé de mesure choisi sur le résultat des mesures, et donc sur la classification de la machine dans la classe d'efficacité énergétique appropriée, est expliquée en détail.

No

Anzeige

Dumme Frage? Gibt es nicht. www.technik-forum.ch

