Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 101 (2010)
Heft: 11

Artikel: Wirkungsgradbestimmungen an elektrischen Maschinen
Autor: Lehrmann, Christian / Dreger, Uwe / Lienesch, Frank
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856153

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

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 mechanische 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 P1 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.

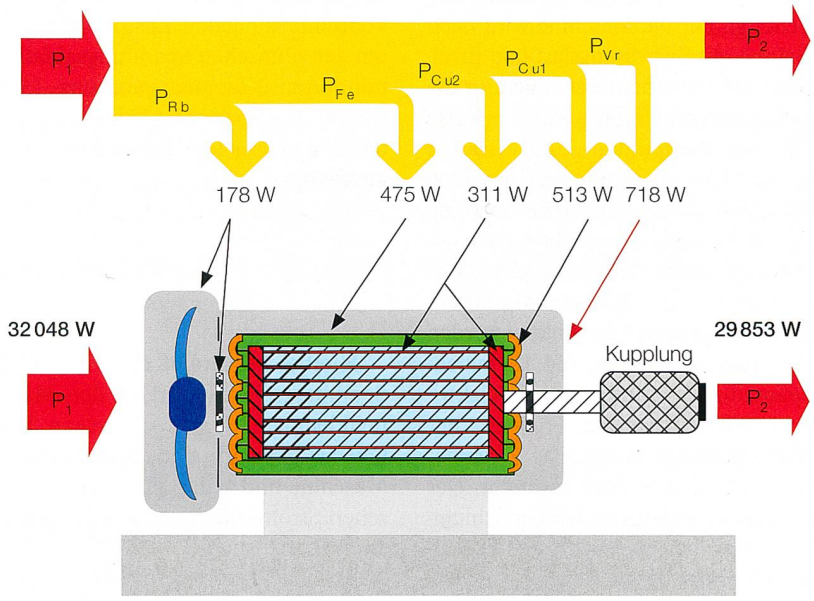

Bild 1 Aufteilung der Maschinenverluste für eine Maschine der Baugrösse 200, Beispiel.

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 P1 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-

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**.

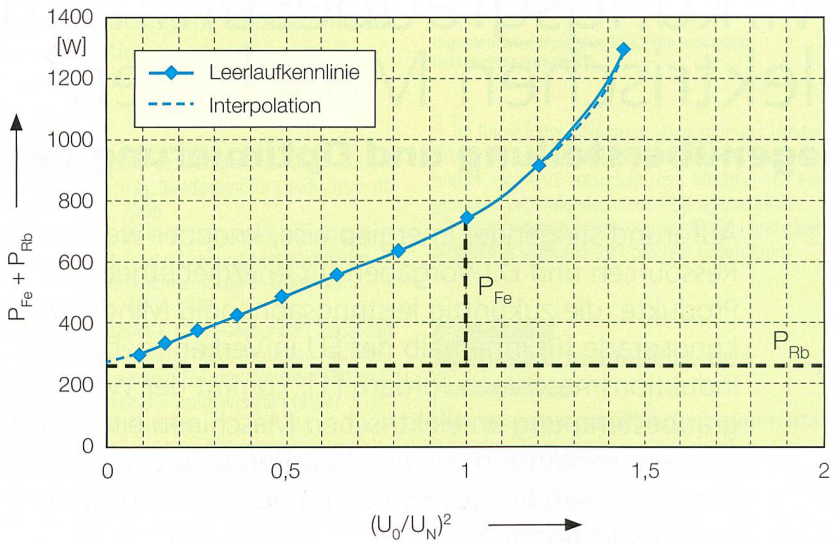

Bild 2 Leerlaufkennlinie einer Maschine, Bemessungsleistung 30 kW.

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 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. Hiervon 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

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

und den indirekt bestimmten Verlusten

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

berechnet

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

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:

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

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

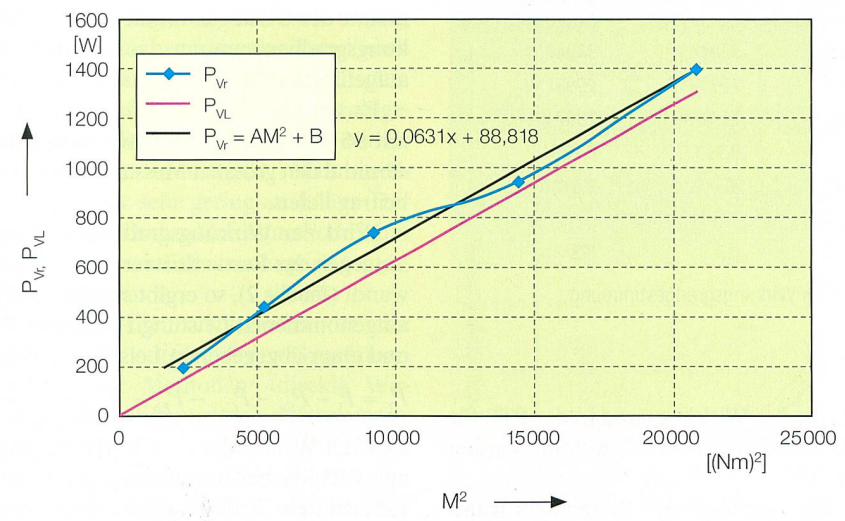

Bild 3 Näherung der Restverluste über die abgegebene mechanische Leistung im Verhältnis zur Maschinenbemessungsleistung.

Grösse	Wert	Standard-messunsi-cherheit	Freiheits-grad	Sensitivitäts-koeffizent	Unsicher-heits-beitrag	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	Auflösungsgfehler der Drehzahl
Mm	Messwert des Drehmoments	P_1	aufgenommene elektrische Leistung
Ma	Auflösungsgfehler des Drehmoments	Pm	Messwert der elektrischen Leistung
Mk	Konstanter Fehler der Drehmoment-messung	Pa	Auflösungsgfehler 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 Messunsicherheite	$\pm 8{,}1 \cdot 10^{-3}$
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 Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilungsfunktion (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
$P_{V\,gesamt}$	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 $P_1 = 32\,048$ W und einer mechanisch abgegebenen Leistung von $P_2 = 29\,811$ 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 Drehmomenterfassung 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 $P_1 = 32\,048$ W und einer abgegebenen Leistung

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

29 951,1 W der Wirkungsgrad zu = 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.

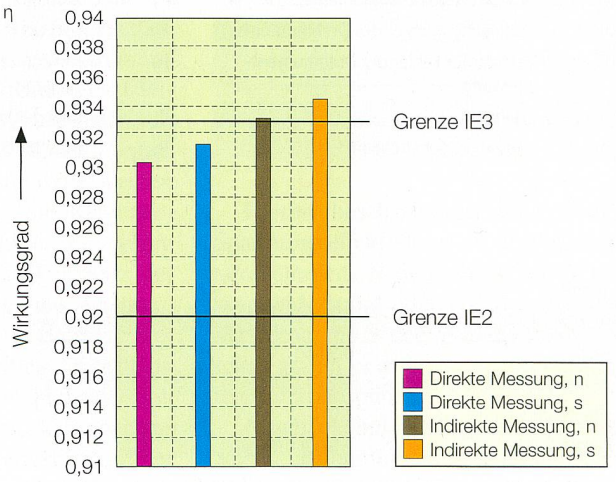

Bild 4 Einfluss des Messverfahrens auf die IE-Klassifizierung der Maschine.

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 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 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.

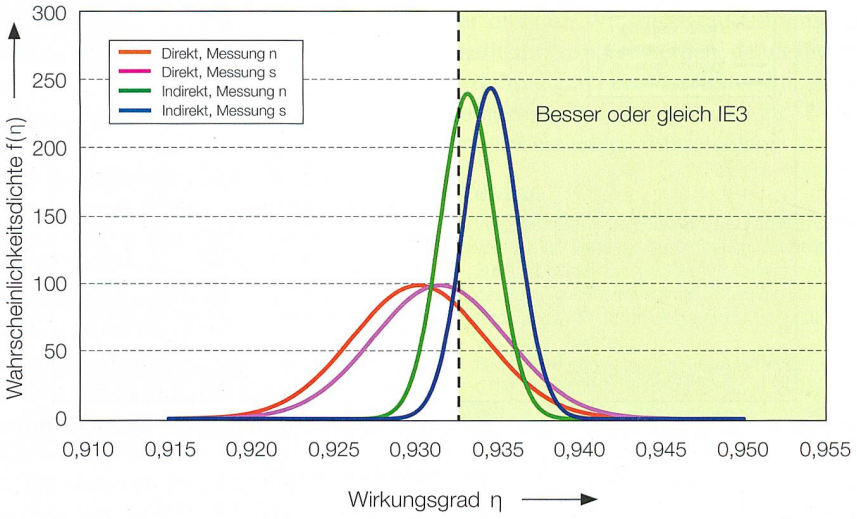

Bild 5 Darstellung des Ergebnisses der Wirkungsgradbestimmungen in Form der Verteilungsdichtefunktion.

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.

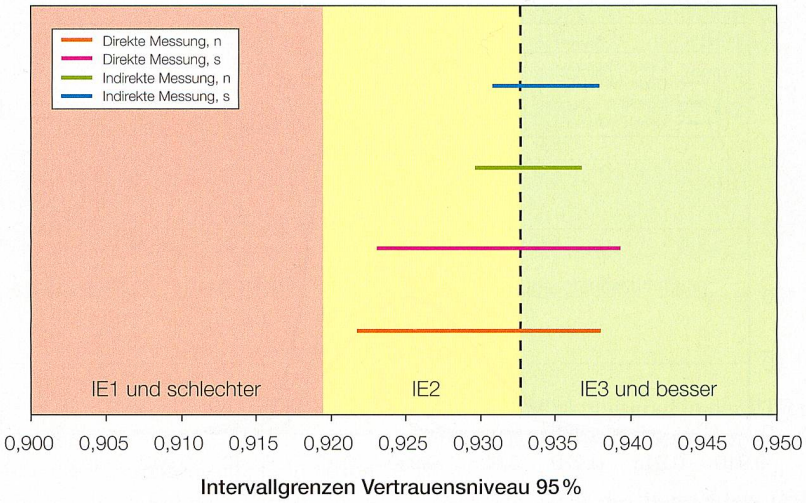

Bild 6 Darstellung der Intervallgrenzen des 95%-Vertrauensniveaus.

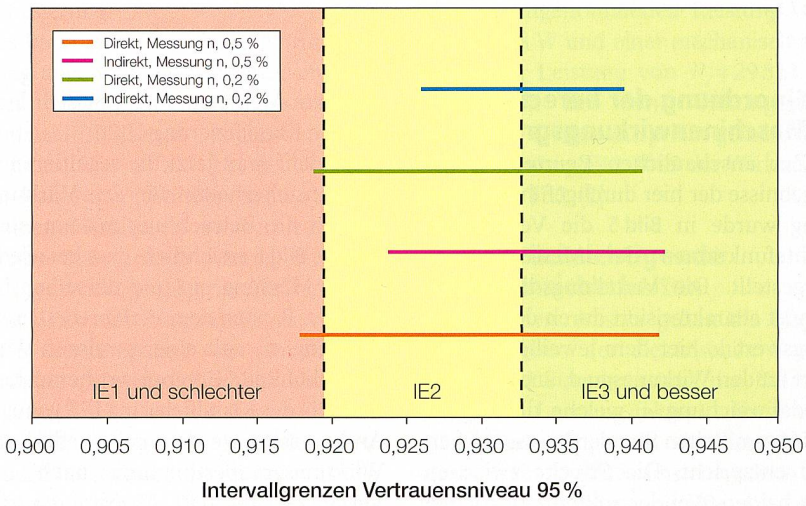

Bild 7 Auswirkung der Messgeräte-Genauigkeitsklasse auf das 95%-Vertrauensintervall.

Bilder: PTB

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 ±0,2 % gefordert, für die Drehzahl eine maximale Abweichung von ±1 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 Wirkungsgradklassen 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 Elektrobleche 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 Messeinrichtungen 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.

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

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] Aoulkadi, 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 Lehrmann** 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, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart ‹Erhöhte Sicherheit›» wurde im August 2006 erfolgreich abgeschlossen.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, DE-38116 Braunschweig, christian.lehrmann@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).

Anzeige

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

Wählen Sie zwischen Kupfer- und Aluleiter.

Brugg Cables entwickelt und produziert Kabel, Zubehör sowie Systemlösungen, um elektrische Energie gezielt, wirtschaftlich und umweltfreundlich fliessen zu lassen. Das halogenfreie Niederspannungskabel mit Alu-Leiter gibt Ihnen die Möglichkeit, bei gleicher Leistung wie bei einem Kupfer-Leiter-Kabel, Kosten und Gewicht zu reduzieren. Für weitere Informationen, eine Beratung oder Ausbildungsprogramme für Kabelmonteure wenden Sie sich bitte an:

Brugg Kabel AG, Klosterzelgstrasse 28, 5201 Brugg,
Telefon +41 (0)56 460 33 33, Fax +41 (0)56 460 35 36,
E-Mail info@brugg.com, www.bruggcables.com

BRUGG CABLES
Well connected.