

# Bewertung der Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung von Drehstrom-Asynchronmaschinen unter Anwendung des GUM

Uwe Dreger, Frank Lienesch, Ulrich Engel

## 1. Einleitung

Der Wirkungsgrad elektrischer Antriebe gilt als Maß für die Wirtschaftlichkeit, die über die Lebensdauer der Maschine zu wesentlichen Einsparungen an Energie und damit auch Kosten führen kann. Zur Schonung der Energiereserven wurden in den USA und in Kanada seit Mitte der neunziger Jahre gesetzliche Auflagen geschaffen, die für Niederspannungs-Drehstrommotoren Mindestwirkungsgrade verbindlich vorschreiben.

Im Gegensatz dazu haben sich in Europa führende Hersteller von Elektromotoren für eine Reihe freiwilliger Maßnahmen eingesetzt, um gesetzliche Auflagen zu vermeiden. Es wurde eine Vereinbarung getroffen, nach der bei 2- und 4poligen Normmotoren im Leistungsbereich von 1,1 bis 90 kW die Wirkungsgrade in drei Klassen (EFF1, EFF2 und EFF3) eingeteilt werden. Auf dem Leistungsschild und in der Dokumentation des Motors ist die Wirkungsgradklasse anzugeben. Die Wirkungsgradklasse EFF1 stellt hierbei das höchste Wirkungsgradniveau dar.

Momentan werden die EN 60034-2 in Europa und die IEEE112 in Nordamerika angewendet [1,2]. Zur energetischen Optimierung und zur einheitlichen Klassifizierung der Wirkungsgrade von elektrischen Antrieben muss ein hinreichend genaues einheitliches Verfahren zur Verlustbestimmung definiert werden, welches auch einem industriell ökonomischen Aufwand gerecht wird. Dieser Bericht soll einen Überblick über die zur Zeit diskutierten Methoden geben sowie den Vergleich zu den bislang üblichem Verfahren ziehen. Dabei soll auch unter Berücksichtigung des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) der Einfluss jeweiliger Messunsicherheiten der bestimmenden Messgrößen konkret diskutiert werden [3]. Der GUM ist der international angewendete Leitfadens zur Angabe der Messunsicherheit und diskutiert die Bedeutung für die Qualität in der Messtechnik.

## 2. Wirkungsgrad von Asynchronmaschinen

Die Verluste der Asynchronmotoren werden in Europa entsprechend IEC 60034-2 im Einzelverlustverfahren ermittelt. Ausgehend von der aufgenommenen elektrischen Leistung werden hierbei durch Subtraktion der einzelnen Verluste, die überwiegend aus Messwerten rechnerisch bestimmt sind, die mechanisch abgegebene Leistung errechnet (Abb. 1).

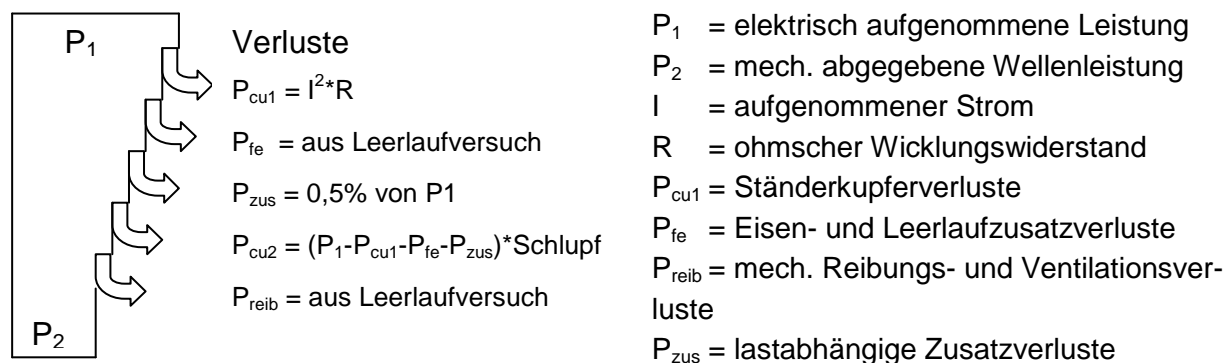


Abb. 1: Wirkungsgrad von Asynchronmaschinen

Im Gegensatz zu  $P_{fe}$  und  $P_{reib}$ , die aus den Ergebnissen des Leerlaufversuchs ermittelt sind, werden die lastabhängigen Zusatzverluste z.Zt. lediglich pauschal mit 0,5% der elektrischen aufgenommenen Leistung bei Bemessungsbetrieb angesetzt.

$$(P_{zus} = 0,005 * P_1 * I^2 / I_N^2)$$

Die Pauschalierung wird sowohl bei Maschinen kleiner Leistung (einige kW) als auch bei Maschinen großer Leistungen im MW-Bereich angewandt. Heute ist bekannt, dass die Zusatzverluste insbesondere von Maschinen kleinerer Leistung deutlich über 0,5% der Klemmenleistung liegen können. Die Zusatzverluste setzen sich im wesentlichen aus lastabhängig im aktiven Eisen auftretenden Verlusten sowie durch Streufeldänderungen verursachte Wirbelstromverluste zusammen.

Zur Optimierung des Wirkungsgrades der Antriebe müssen die Zusatzverluste spezifiziert werden, um die Ermittlung der Verluste mit einer höheren Genauigkeit zu ermöglichen. Zur Zeit wird in den nationalen und internationalen Normungsgremien an einem entsprechenden Normentwurf gearbeitet, der letztendlich zur Integration in die IEC 60034-2 vorgesehen ist. Das vorgeschlagene Verfahren zur Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste ist im Normentwurf (DIN IEC 2G/111/CDV) [4] beschrieben und entspricht dem Ansatz der Methode B aus IEEE 112.

### 3. Entwurf: DIN IEC 2G/111/CDV

Grundlage dieses Entwurfs ist die Methode B aus IEEE112 sowie das Einzelverlustverfahren entsprechend IEC 60034-2 jedoch mit erweiterten Anforderungen an die Messinstrumente und an die thermischen Bedingungen.

Der Entwurf unterscheidet zwei mögliche Methoden zur Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste:

- a) Methode 1: Die Ermittlung der Zusatzverluste durch Drehmomentmessungen bei der Aufnahme der Belastungskennlinie sowie Differenzbildung von elektrischer Klemmenleistung, Einzelverluste und der mechanischen Wellenleistung
- b) Methode 2: Festgelegte Zusatzverluste jedoch in Abhängigkeit der Bemessungsleistung (und nicht pauschal 0,5 % entsprechend IEC 60034-2)

Nach Methode 1 können die Zusatzverluste mit höherer Genauigkeit ermittelt werden, unter der Voraussetzung, dass eine Drehmomentenmesstechnik mit hinreichender Messunsicherheit vorhanden ist. Die nach Methode 2 festgelegten Zusatzverluste in Abhängigkeit der Bemessungsleistung beruhen auf Erfahrungswerten der verschiedenen Hersteller und sind im Kompromiss entstanden.

#### 3.1 Ermittlung der Einzelverluste

Die Eisen- und Reibungsverluste werden durch einen Leerlaufversuch nach IEC 60034-2 ermittelt. Die Betriebsbedingungen für den Leerlaufversuch werden im Normentwurf DIN IEC 2G/111/CDV klar definiert. So soll der Motor im Leerlauf solange betrieben werden, bis die aufgenommene Verlustleistung innerhalb von 30 Minuten um weniger als 3% variiert. Zur Ermittlung der Kupferverluste ist der Wicklungswiderstand der Ständerwicklung vor und nach der Aufnahme der Kennlinienwerte zu messen und entsprechend für jeden Messpunkt zu interpolieren.

Die Eisen- und Reibungsverluste werden wie bisher durch Abzug der Kupferverluste  $P_{cu1}$  und anschließende Aufteilung in spannungsabhängige und spannungsunabhängige Verluste aus der Messreihe ermittelt (Abb.2).

$$P_{cu1} = I^2 \cdot R \cdot 1,5$$

Auf die Berücksichtigung der Läuferkupferverluste kann verzichtet werden, weil der Schlupf im Leerlauf nahezu verschwindet und somit die Läuferkupferverluste vernachlässigbar klein sind.

$$P_{cu2} = (P_1 - P_{cu1} - P_{fe}) \cdot s$$

$$s = (f \cdot 30 - n) / (f \cdot 30)$$

R=0,3570 Ω

U V	I A	P1 W	P <sub>cu1</sub> W	P <sub>fe</sub> +P <sub>reib</sub> W
450,6	23,13	1072,0	286,5	785,5
400,7	15,63	632,6	130,5	502,1
348,2	11,51	452,6	70,5	382,1
300,3	9,33	353,0	46,2	306,8
248,3	7,47	272,0	29,5	242,5
201,7	5,97	212,2	18,8	193,4
155,5	4,61	168,0	11,2	156,8
100,5	3,10	127,7	5,0	122,7

R=0,3500 Ω

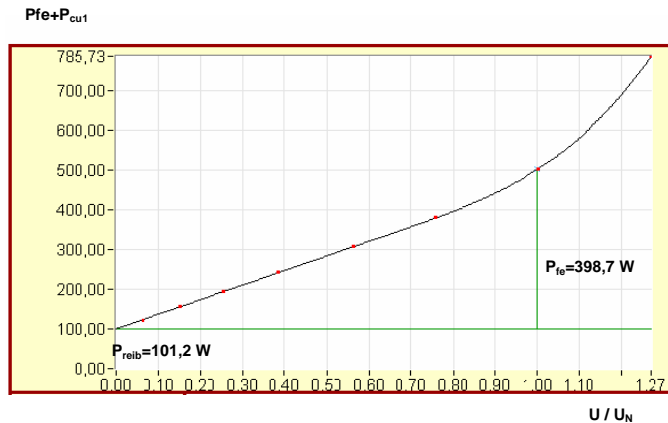


Abb. 2: Ermittlung der Eisen- und Reibungsverluste

### 3.2 Ermittlung der Zusatzverluste nach DIN IEC 2G/111/CDV (Methode1)

Für die Ermittlung der Zusatzverluste ist eine Drehmomentmessung zur Bestimmung der Wellenleistung während der Belastungsprüfung erforderlich. Die Belastungsprüfung ist bei Betriebstemperatur des Motors durchzuführen. Hierbei wird der Motor in 25%-Stufen der Bemessungsleistung belastet. Für jeden gemessenen Lastpunkt bleiben nach Abzug der abgegebenen Wellenleistung und der Eisen-, Ständerkuper-, Läuferkuper- und der Reibungsverluste von der aufgenommenen Leistung die sogenannten Restverluste  $P_{Rest}$  übrig.

$$P_2 = M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi / 60$$

$$P_{Rest} = P_1 - P_2 - P_{fe} - P_{cu1} - P_{cu2} - P_{reib} \quad (\text{für jeden Lastpunkt})$$

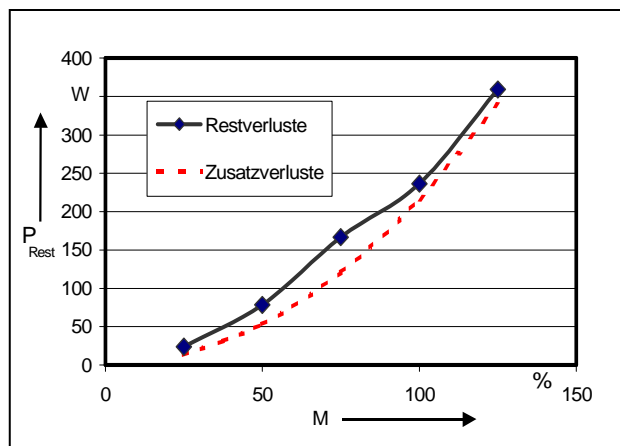


Abb. 3: Ermittlung der Funktion der Zusatzverluste

Durch lineare Regression werden aus den Restverlusten die Zusatzverluste in Abhängigkeit vom Drehmoment ermittelt (Abb. 3).

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Zusatzverluste der Funktion  $P_{zus} = A + B \cdot (M/M_N)^2$  folgen. Da die Zusatzverluste im Leerlauf schon in den Leerverlusten enthalten sind, wird der Funktionswert A auf 0 gesetzt. Hierdurch wird ein möglicher Offsetfehler der Drehmomentmessung kompensiert.

### 3.3 Ermittlung des Wirkungsgrades

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades werden mit der aus den Restverlusten ermittelten Funktion die Zusatzverluste berechnet. Die Gesamtverluste setzen sich zusammen aus den Einzelverlusten wie Eisenverluste, Ständerkupferverluste, Läuferkupferverluste, Reibungsverluste und den Zusatzverlusten. Abweichend von der bisherigen IEC 60034-2 wird für die Ständer- und Läuferkupferverluste als Bezugstemperatur jedoch die Betriebstemperatur der Wicklung angesetzt, die sich bei Bemessungsleistung und 25°C Umgebungstemperatur ergibt.

#### 4. Alternative Bestimmung der Zusatzverluste

Die Ermittlung der Zusatzverluste ist alternativ auch möglich, wenn zwei baugleiche Maschinen gegeneinander als Motor-Generator betrieben werden. Voraussetzung ist die Annahme annähernd gleicher Zusatzverluste. Zunächst erfolgt die Ermittlung der Eisen- und Reibungsverluste entsprechend Punkt 3.1 aus dem Leerlaufversuch. Anschließend werden die beiden Maschinen aneinander gekuppelt. Der erste Motor treibt dabei den generatorisch betriebenen zweiten Motor an (Abb. 4), der mit einer geringeren Frequenz über einen Maschinensatz in das Netz zurück speist.

Bei beiden Maschinen werden die elektrischen Werte wie Spannung, Strom, Leistung, Frequenz zeitgleich gemessen. Die aufgenommene Motorleistung reduziert um die abgegebene Generatorleistung und die Ständerkupfer-, Eisen-, Reibungs- und Läuferkupferverluste beider Maschinen ergibt die Summe der lastabhängigen Zusatzverluste. Bei den Einzelverlusten (Eisenverluste) muss berücksichtigt werden, dass die Frequenz des generatorisch laufenden Motors kleiner ist als die des antreibenden Motors. Dieser Frequenzunterschied ergibt sich aus der Summe des Schlupfes beider Maschinen und ist somit lastabhängig.

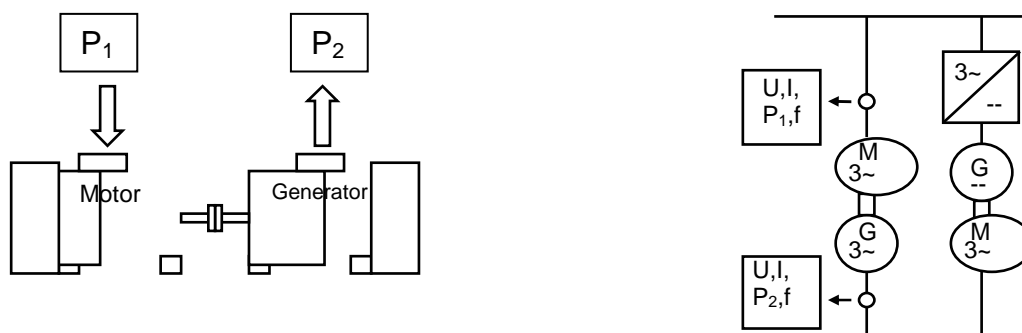


Abb. 4: Versuchsaufbau

#### 5. Versuchsaufbau und Messunsicherheit

Für die Untersuchungen standen zwei gleiche Asynchronmotoren 180er Achshöhe, 18,5 kW, 400V, 4polig zur Verfügung. Für beide Maschinen wurden entsprechend dem beschriebenen Entwurfsverfahren DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1 die Zusatzverluste und der Wirkungsgrad ermittelt. Für die Belastungsmessungen stand ein spannungsgeregeltes Netz, ein in den Wellenstrang integrierter Drehmomentmessflansch mit berührungsloser Datenübertragung, ein Poweranalyser für die elektrischen Daten sowie der 50 kW Motorenprüfstand der PTB mit einem Gleichstrompendeldynamo zur Verfügung. Zur Bestimmung der Wicklungswiderstände diente eine Widerstandsmessbrücke RESISTOMAT vom Typ 2302.

Außerdem wurde zur Ermittlung der Zusatzverluste ein alternativer Motor-Generator Versuch (siehe Punkt 4) mit mehrmals wechselndem Betrieb durchgeführt. Bei diesem Versuch erfolgte die Erfassung der elektrischen Daten der zweiten Maschine zeitgleich mit einem zusätzlichen Norma 5255S. Eine Drehmomentmessung war bei diesem Aufbau nicht möglich, weil der Messflansch mechanisch nicht in den Wellenstrang integriert werden konnte.

Bei der Betrachtung der Messunsicherheit wurde der „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ herangezogen. Die Messunsicherheitsbetrachtung kann die Zuverlässigkeitsgrenzen, die Reproduzierbarkeit und die messtechnischen Schwachstellen bei den unterschiedlichen Bestimmungsverfahren der Wirkungsgrade von elektrischen Maschinen deutlich machen.

Entsprechend dem oben beschriebenen Versuchsaufbau können die eingesetzten Messgeräte wie folgt bezüglich der Messunsicherheit näher spezifiziert werden. Die Daten beruhen dabei auf Angaben der Hersteller in den jeweiligen Spezifikationen. Durch regelmäßige Kalibrierung der Geräte durch den Hersteller oder die PTB wird sichergestellt, dass die Geräte diese Unsicherheitsgrenzen einhalten.

Meßgröße:	Gerät	Messunsicherheit gemäß Spezifikation *)
Spannung, Strom:	Norma 5255S	U, I = 0,1% v. MW. + 0,1% v. MB.
Leistung:		P ergibt sich aus U und I
Frequenz:		f = 0,01% ± 0,08% v. MW.
Drehmoment, Drehzahl:	Hottinger T10F	M = 0,1 % , n = 0,05 %
Widerstand:	Burster	R = 0,05 %
Stromwandler:		0,1%

\*) v. MW. bedeutet vom Messwert, v. MB bedeutet vom Messbereich.

Die Messwerte wurden mit folgender Auflösung protokolliert und ausgewertet:

U = 0,1 V; I = 0,01 A; P = 0,1 W (Leerlauf); P = 1 W (Last); n = 1 1/min; f = 0,01 Hz;  
R = 0,0001 Ohm; M = 0,01 Nm (Leerlauf); M = 0,1 Nm (Last)

Neben den direkt messbaren Größen werden die Eisen- und Reibungsverluste ( $P_{fe}$  und  $P_{reib}$ ) aus dem Leerlaufversuch ermittelt. Hinsichtlich der Bestimmung der Messunsicherheit muss berücksichtigt werden, dass diese Verluste ebenfalls eine Messunsicherheit enthalten. Somit muss zuerst die Messunsicherheit der Eisenverluste und der Reibungsverluste ermittelt werden. Die Leerverluste bei Bemessungsspannung ergeben die Summe der Eisen- und Reibungsverluste. Die Messunsicherheit kann sich nur auf deren Summe beziehen. Eine Aufteilung der Leerverluste in Eisenverluste und Reibungsverluste kann zwar näherungsweise erfolgen, es kann jedoch keine Aussage über die Messunsicherheit der Einzelverluste gemacht werden.

Daher wurde bei unserer Ermittlung angenommen, dass die Messunsicherheit der Leerverluste ausschließlich in den Eisenverlusten enthalten ist. Die Reibungsverluste wurden als konstant angenommen. Da für die Wirkungsgradermittlung die Summe beider Einzelverluste maßgebend ist, ist diese Vereinfachung zulässig.

## 6. Gegenüberstellung der Ergebnisse der Zusatzverluste

Für die beiden Maschinen wurden die Zusatzverluste in Abhängigkeit des Drehmomentes nach den oben beschriebenen Verfahren bestimmt (Abb. 5). Während die Auswertung des Motor-Generator-Betriebes sowie nach dem Entwurfsverfahren DIN IEC 2G/111/CDV ähnliche Werte für die Zusatzverluste zeigen, wird deutlich, dass die Zusatzverluste nach dem bisherigen Verfahren entsprechend EN60034-2 am niedrigsten sind.

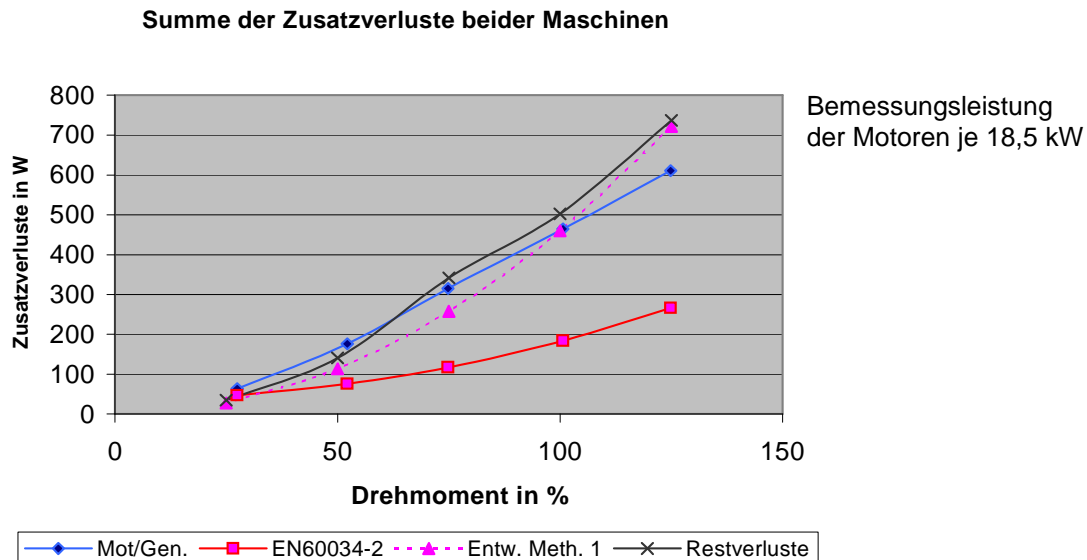


Abb. 5: Vergleich der Summe der Zusatzverluste beider Motoren

Bezieht man die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren auf die Angabe der Zusatzverluste bei Bemessungsleistung ergeben sich für Motor 1 / Motor 2 folgende Werte:

Verfahren:	Zusatzverluste	$P_{\text{zus.}}/P_1$
Motor-Generator	→ 260W / 204,2W	1,26%
EN60034-2	→ 103W / 103W	0,5%
DIN IEC 2G/111/CDV (Meth. 1)	→ 216,1W / 243,4W	1,05/1,18%
Restverluste (Messung nach 3.2)	→ 236,4W / 265,7W	1,15/1,29%

Tab 1: Vergleich der Zusatzverluste

Beim Motor-Generator-Betrieb wurden beide Maschinen gegeneinander geprüft. Bei gleicher Spannung hat der Generator (Motor 2) einen kleineren Strom und somit auch gegenüber dem Motor reduzierte Zusatzverluste. Die hier angegebenen Zusatzverluste beziehen sich auf Motor und Generator. Somit ist  $P_{\text{zus.}}/P_1$  nur für den Motor angegeben. Bei den anderen drei Verfahren beziehen sich die Angaben der Zusatzverluste auf die zwei einzeln als Motor betriebenen Maschinen.

Die DIN IEC 2G/111/CDV lässt alternativ die Ermittlung der Zusatzverluste über einen pauschalen Zuschlagsfaktor zu (siehe Pkt 3 Methode 2:). Für die untersuchten Motoren ergeben sich entsprechend der Bemessungsleistung aus Tabelle 1 der DIN IEC 2G/111/CDV folgende Zusatzverluste

$$P_2=18,5\text{kW} \rightarrow P_1=20,6\text{kW} \rightarrow P_{\text{zus.}}/P_1=1,88\% \rightarrow 384\text{W je Motor.}$$

Die so ermittelten Zusatzverluste sind um ca. 50-80% höher, als die nach Methode 1 durch die Messung bestimmten. Da die Zusatzverluste nach Methode 1 und aus dem Motor-

Generator-Betrieb durch konkrete Messungen bestimmt wurden und auf unabhängigen Versuchsreihen basieren, kann von einer hohen Glaubwürdigkeit dieser Ergebnisse ausgegangen werden. Zumal eine gute Übereinstimmung festgestellt werden kann. Die nach der bisherigen Methode nach EN60034-2 ermittelten Zusatzverluste betragen lediglich ca. 45% der wahrscheinlich anzunehmenden Zusatzverluste (Abb. 6).

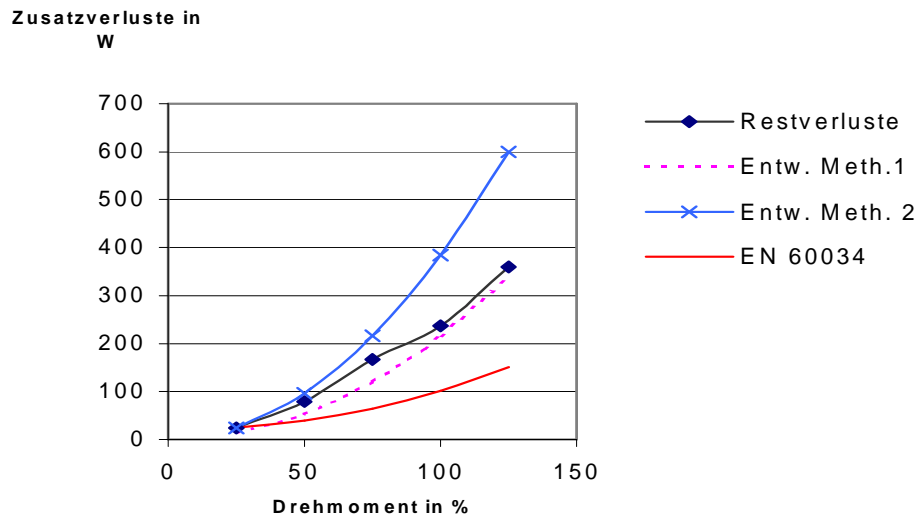


Abb. 6: Vergleich der Zusatzverluste eines Motors

## 7. Wirkungsgrad unter Einbeziehung der Messunsicherheit

Die Ergebnisse der durch verschiedene Methoden bestimmten Zusatzverluste zeigen deutliche Unterschiede. Die Messergebnisse sagen jedoch nichts über ihre Zuverlässigkeit aus. Auch muss die Aussage über die Messunsicherheit zeigen, wie hoch der Aufwand einzuschätzen ist und ob eine wirtschaftliche Realisierbarkeit vorliegt. Der Motor-Generator-Betrieb ist sicherlich nicht als normative Methode geeignet, liefert jedoch hilfreiche Anhaltspunkte bei der Bewertung der Ergebnisse.

Entsprechend der EN 60034-2 müssen die eingesetzten Messgeräte und Wandler eine Genauigkeitsklasse von 0,5 oder besser haben. Bei Dreiphasen-Leistungsmessern sowie Leistungsmessgeräten für niedrige Leistungsfaktoren (z.B. im Leerlauf) ist eine Genauigkeitsklasse von 1,0 oder besser gefordert.

Die DIN IEC 2G/111/CDV stellt an die Messgeräte davon abweichend folgende Mindestanforderungen:

U, I, P	Genauigkeitsklasse 0,2
M	0,2 % vom Messbereich, f 0,1 % vom Messbereich
Wandler für U, I	Genauigkeitsklasse 0,2

Die bei unseren Messungen eingesetzten Messgeräte (siehe Pkt. 5) entsprechen den Anforderungen des Entwurfs oder haben eine geringere Messunsicherheit. Zunächst wird die Analyse der Ergebnisse diskutiert. Im Anschluss sollen die Anforderung der Normen an die Messgeräte betrachtet werden.

### 7.1 Analyse der Ergebnisse

Zur Analyse der Messungen wurde eine Software herangezogen, die entsprechend dem GUM das komplexe mathematische Modell auswertet [5]. Die Ergebnisse der

hier angegebenen Messunsicherheiten beziehen sich immer auf einen Erweiterungsfaktor von 2. Das bedeutet, dass der tatsächliche Wert mit 95%tiger Wahrscheinlichkeit dem ermittelten Ergebnis entspricht. Dieser Ansatz ist in der Praxis üblich und vollkommen ausreichend.

Verfahren	Meßgeräte Unsicherheit	Wirkungs- grad in %	Unsicher- heit in %	Unsicherheit wird bestimmt durch		Anlage
Schlupfermittlung über		$n / t_{\text{Schl.}}$	$n / t_{\text{Schl.}}$	Drehzahl $n$	Schlupfspule $t_{\text{Schl.}}$	
DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1	siehe Pkt. 5	90,44 / 90,48	$\pm 0,38 / \pm 0,38$	zu ~86% durch M	zu ~86% durch M	1
DIN IEC 2G/111/CDV Methode 2	siehe Pkt. 5	89,76 / 89,80	$\pm 0,12\% /$ $\pm 0,074$	zu ~52% durch $f$ , zu ~20% durch $n$ , zu ~13% durch Leerverluste	zu ~56% durch $t_{\text{Schl.}}$ zu ~32% durch Leerverluste	2
EN 60034-2	siehe Pkt. 5	91,12 / 91,16	$\pm 0,12\% /$ $\pm 0,074$			3
DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1	entsprechend Entwurf	90,43 / 90,48	$\pm 0,86\% / \pm 0,82$	zu ~70% durch M	zu ~77% durch M	4
EN 60034-2	entsprechend EN 60034-2	91,1 / 91,16	$\pm 1,6\% / \pm 0,46$	zu ~47% durch $n$ , zu ~45% durch $f$ , zu ~ 8% durch Leerverluste	zu ~89% durch Leerverluste, zu ~ 8% durch Rw	5

Tab 2: Vergleich der Wirkungsgrade und Unsicherheiten

Die in der Tabelle 2 angegebenen Daten für "Wirkungsgrad", "Unsicherheit" und "Unsicherheit bestimmt durch" wurden ermittelt mit Hilfe der Schlupfbestimmung über Drehzahl / Schlupfspule. Aus den Messungen eines Motors und deren Auswertungen entsprechend der DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1 ergibt sich ein Wirkungsgrad von 90,44%  $\pm 0,38\%$ . Analysiert man die jeweiligen Messunsicherheiten zeigt sich, dass die Messunsicherheit zu 86% durch die Drehmomentmessung bestimmt wird. (Anlage 1)

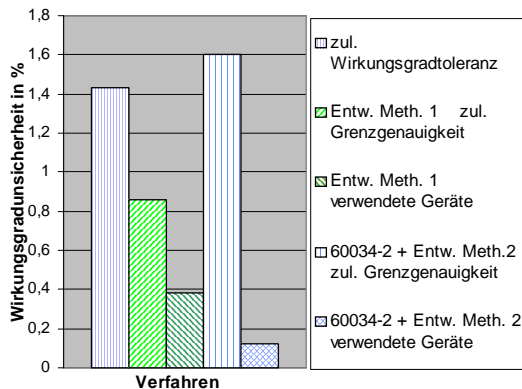
Der nach der DIN IEC 2G/111/CDV Methode 2 alternativ vorgesehene pauschale Zuschlagfaktor für die Zusatzverluste ergibt einen Wirkungsgrad von 89,76%  $\pm 0,12\%$  (Anlage 2) bzw. 89,80%  $\pm 0,074\%$ . Unter Verwendung der Methode nach EN 60034-2 beträgt der Wirkungsgrad 91,12%  $\pm 0,12\%$  bzw. 91,16%  $\pm 0,074\%$  (Anlage 3). Hierbei wird die Messunsicherheit im wesentlichen durch die Frequenzmessung (~52%), die Drehzahlmessung (~20%) sowie durch die ermittelten Leerverluste (~13%) bzw. zu 56% durch die Ermittlung der Schlupfperiodendauer und 32% durch die Leerverluste bestimmt.

## 7.2 Normenanforderung der Messgeräte

Die Ermittlung der Messunsicherheit bei Verwendung von Messgeräten entsprechend der Mindestforderungen der EN60034-2 bzw. der DIN IEC 2G/111/CDV ergibt, dass nach DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1 der Wirkungsgrad 90,43%  $\pm 0,86\%$  bzw. 90,48%  $\pm 0,82\%$  beträgt. Hierbei wird die Messunsicherheit vom Wirkungsgrad zu 70-80% durch die Drehmomentmessung bestimmt (Anlage 4). Nach EN 60034-2 beträgt der Wirkungsgrad 91,1%  $\pm 1,6\%$  bzw. 91,16%  $\pm 0,46\%$ . Die Unsicherheitsbestimmenden Größen sind zu 47% die Drehzahl, zu 45% die Frequenz und zu 8% die Leerverluste bzw. zu 89% die Leerverluste sowie zu 5% die Widerstandsmessung (Anlage 5).

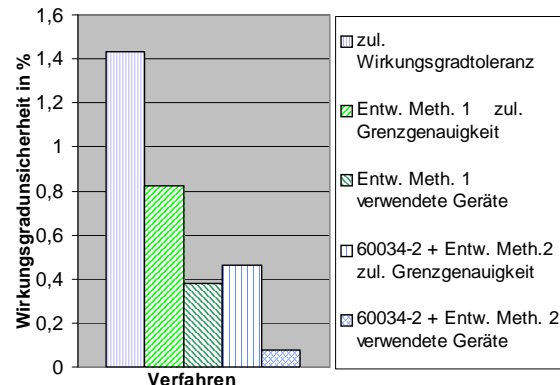
Nach EN 60034-1 beträgt die zulässige Toleranz der Verluste der untersuchten Asynchronmaschinen 15% der Gesamtverluste. Hieraus ergibt sich bei 90,44% Wirkungsgrad eine zulässige Wirkungsgradtoleranz von -1,434%.





Schlupf über Drehzahl ermittelt

Abb. 7a: Vergleich der Wirkungsgradunsicherheit bei Schlupfbestimmung durch Drehzahl



Schlupf über Schlupfspule ermittelt

Abb. 7b: Vergleich der Wirkungsgradunsicherheiten bei Schlupfbestimmung durch Schlupfperiodendauermessung

Die Auswertung zeigt, dass beim Verfahren nach EN 60034-2 sowie nach dem Entwurfverfahren Methode 2 die Messunsicherheit stark von der Art der Schlupfermittlung abhängt. Bei Schlupfwerten bis ca. 5% ist es sinnvoll, den Schlupf mit Hilfe einer Schlupfspule durch Messung der Schlupfperiodendauer zu bestimmen.

Werden bei der Auswertung der Messunsicherheiten die Genauigkeitsklassen der Messgeräte entsprechend der Forderung der DIN IEC 2G/111/CDV angenommen, so wirkt sich insbesondere nach Methode 1 die Drehmomentmessung (Anteil ~ 70-85%) mit der KI 0,2 aus. Demnach wird sich der Betrag der Messunsicherheit von  $\pm 0,38\%$  auf  $\pm 0,86\%$  mehr als verdoppeln, während der Einfluss der übrigen Messwerte fast vernachlässigbar ist.

Die Messunsicherheit bei Methode 2 nach DIN IEC 2G/111/CDV wird ungefähr zur Hälfte durch die Frequenzmessung bzw. durch die Ermittlung der Schlupfperiodendauer bestimmt. Da die Anforderungen der Genauigkeitsklasse in der Norm für die Frequenzmessung deutlich geringer sind als bei dem hier verwendeten Messgeräten, ist die Messunsicherheit auf der Basis der zulässigen Genauigkeitsklasse deutlich schlechter als bei der vorliegenden Messung. Bei der Messunsicherheitsbetrachtung wurden nur die Einflüsse der Unsicherheit der verwendeten Messgeräte sowie die übliche Auflösung der Messwerte berücksichtigt. Weitere mögliche Einflüsse durch thermische Veränderungen während der Messung (Widerstandsveränderung), Netzschwankungen im Messpunkt (Spannung, Frequenz) sind in dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt.

## 8. Schlussbetrachtung

Die Analyse der verschiedenen Verfahren zeigt, dass jedes Verfahren für sich Vor- und Nachteile hat und entsprechend der Zielsetzung zu bewerten ist. Dem entsprechend zeigt die Auswertungen nach DIN IEC 2G/111/CDV Methode 1, dass die tatsächlichen Zusatzverluste der Asynchronmaschine genauer ermittelt werden können als mit dem bisherigen Verfahren. Andererseits ist aber die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse deutlich schlechter. Selbst mit einer modernen, hochwertigen Messausrüstung beträgt die Messunsicherheit bei Maschinen mit 90% Wirkungsgrad etwa 25-40% der nach EN 60034-1 gültigen Verlusttoleranz. Bei den angestrebten verlustarmen Motoren wird dieser Einfluss der Messunsicherheit noch entsprechend größer.

Die nach EN 60034-1 zulässige Verlusttoleranz wird für Fertigungstoleranzen sowie Blechqualitätsstreuungen benötigt. Wenn jedoch durch das Prüfverfahren bei der Wirkungsgradbestimmung schon ein erheblicher Teil dieser Toleranzen in Anspruch genommen wird, muss man sich fragen, ob das Entwurfsverfahren für die Wirkungsgradbestimmung als Nachweis von Garantiewerten in der Praxis sinnvoll ist.

Für die Entwicklung und Wirkungsgradoptimierung der Asynchronmaschinen ist die DIN IEC 2G/111/CDV sicherlich gut geeignet. Zum Nachweis von Garantiewerten oder zur nachträglichen Überprüfung des Wirkungsgrades könnte die Methode 2 des Entwurfverfahrens genutzt werden, wobei eventuell der Faktor der Zusatzverluste nicht aus der pauschalierten Funktion entnommen wird, sondern aus den Entwicklungsmessungen der Maschine. Dies könnte die Vorteile der Genauigkeit der DIN IEC 2G/111/CDV mit den Vorteilen der Reproduzierbarkeit des bisherigen Verfahrens verbinden.

Daher sollte die Methode 2 des Normentwurfs die Möglichkeit zulassen, bei einer Nachmessung oder Messwiederholung den Faktor der Zusatzverluste aus der Typprüfung zu verwenden. Die im Entwurf dargestellte Funktion der Zusatzverluste in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung sollte nur zur Anwendung kommen, wenn bei der Typprüfung nicht die Methode 1 verwendet wurde. Aus der Messunsicherheitsbetrachtung ist zu sehen, dass bei der Wirkungsgradbestimmung entsprechend dem Entwurfsverfahren Methode 1 die Drehmomentmessung unsicherheitsbestimmend ist und folglich die mit einer möglichst kleinen Messunsicherheit gemessen werden sollte. Bei dem Entwurfsverfahren Methode 2 oder beim Verfahren nach EN 60034-2 liegt der größte Einfluss auf die Messunsicherheit bei der Schlupfermittlung. Bei kleinen Schlupfwerten (z.B. unter 5%) sollte der Schlupf über die Messung der Schlupfperiodendauer erfolgen. Wenn der Schlupf über die Drehzahl ermittelt wird, ist auf die Auflösung der Drehzahlmessung und Messwertprotokollierung zu achten.

Zukünftig sollte bei der Normung der Verfahren und der Projektierung des Messplatzes eine Analyse nach GUM durchgeführt werden, um den Einfluss der Messgrößen zu kennen und zu berücksichtigen.

- [1] DIN EN 60034-2  
Drehende elektrische Maschinen Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von drehenden elektrischen Maschinen aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge)
- [2] IEEE 112  
IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators
- [3] GUM  
Guide to Expression of Uncertainty in Measurement  
first edition, 1993, corrected and reprinted 1995
- [4] IEC 2G/111/CDV (IEC 61972)  
Methode for determining losses and efficiency of three-phase, cage induction motors.
- [5] GUM Workbench (Auswertesoftware für GUM)  
Version 1.2.11.56 Win32