

Einfluss von Messfehlern der elektrischen Leistung auf die Zusatzverlustbestimmung

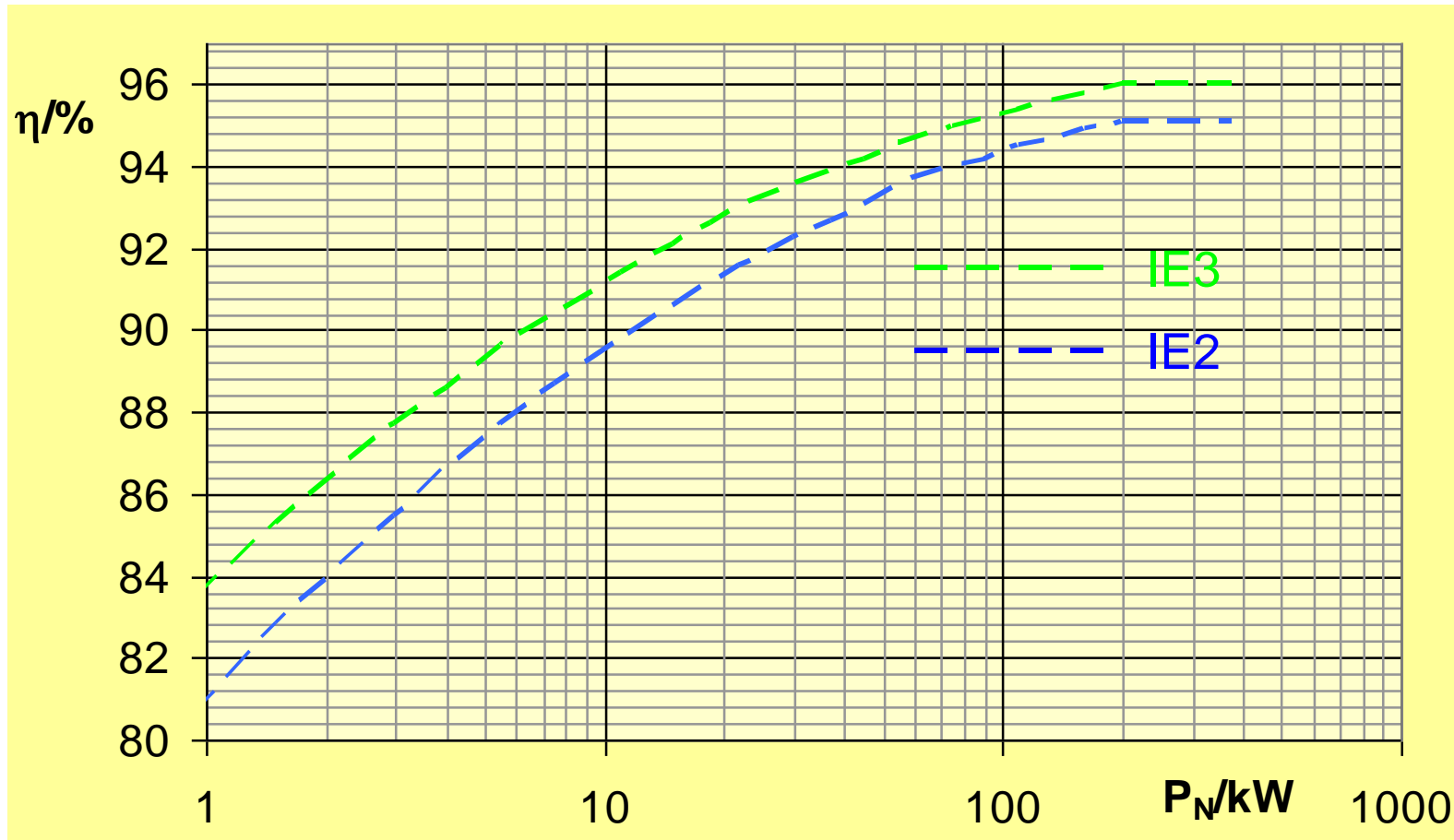
- **Einführung**
- **Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung**
 - **Direkte Verfahren**
 - **Indirekte Verfahren**
- **Toleranz der Wirkungsgradangabe**
- **Verlustquellen elektrischer Maschinen**
- **Fehleranalyse eines Messverfahrens**
- **Ergebnisse von Prüffeldmessungen**
- **Zusammenfassung**

Einführung

Die VERORDNUNG für Europa (EG) Nr. 640/2009 DER KOMMISSION vom 22. Juli 2009 legt die Fristen für die Einführung von Mindestwirkungsgraden fest.

Termin	Leistungsbereich [kW]	Forderung
16.06.2011	0,75 – 375	IE2 (Netz)
01.01.2015	7,5 – 375	IE3 (Netz) / IE2 + Frequenzumrichter
01.01.2017	0,75 – 375	IE3 (Netz) / IE2 + Frequenzumrichter

Mindestwirkungsgrade (IEC 60034-30, 4polig, 50 Hz)



Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung – Auswahl (IEC 60034-2-1)

direkte Verfahren

Torque meter test

Gemessen werden die elektrisch aufgenommene Leistung, das Drehmoment und die Drehzahl

Dual supply back- to- back test

Zwei gleiche Maschinen werden mechanisch gekuppelt. Gemessen werden die von Maschine 1 aufgenommene und die von Maschine 2 abgegebene elektrische Leistung

Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung – Auswahl (IEC 60034-2-1)

indirekte Verfahren

Summation der Einzelverluste mit Last- Test

Die einzelnen Verlustanteile werden bestimmt. Bei Bemessungsspannung werden die elektrisch aufgenommene Leistung, das Drehmoment und die Drehzahl gemessen

Empfohlen für Asynchronmaschinen von 1 kW bis 150 kW

geringe Messunsicherheit

Messung in eh- Stern- Schaltung

Die einzelnen Verlustanteile werden bestimmt. Die Maschine wird in einer unsymmetrischen Schaltung betrieben. Gemessen wird die aufgenommene Leistung. Keine Belastungsmaschine erforderlich
mittlere Messunsicherheit

Toleranz der Wirkungsgradangabe

Motoren

IEC 60034-1:2010

bis einschließlich 150 kW: -15% von $(1 - \eta)$

über 150 kW: -10% von $(1 - \eta)$

NEMA MG1:2006

Mindestwirkungsgrade sind in Abhängigkeit von den nominellen Wirkungsgraden angegeben. Toleranz etwas größer als nach IEC 60034-1: 2010

Anmerkung:

durch **E**nergy **I**ndependence and **S**ecurity **A**ct 2007 (EISA) seit 19.12.2010

IE3- Mindestwirkungsgrade gefordert

Toleranz der Wirkungsgradangabe

Systeme

IEC 61800-4:2002: (Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe über 1000 V AC)

Toleranz der Verluste

Gesamtsystem	7%
Stromrichter	10%
Transformator und Motor	10%

Wichtig:

Toleranz der Wirkungsgradangabe/Verluste ist nicht gleich
zulässige Toleranz der Leistungsmessung

Toleranzen beinhalten Unsicherheiten der Vorausberechnung,
Fertigungstoleranzen, Messtoleranzen,...

Verlustquellen

Neben den „klassischen“ Verlusten, wie zum Beispiel

- Stromwärmeverluste in Ständer- und Läuferwicklung
- Grundschiwingungseisenverluste
- Reibungsverluste

entstehen in Asynchronmaschinen Verluste durch

- Stromverdrängung
- Flusspulsationen durch Leitwertschwankungen
- Flusspulsationen durch Durchflutungsschwankungen
- Querströme im Läufer (bei Schrägung)
- Wirbelströme in massiven Konstruktionsteilen



Zusatzverluste

Bestimmung der Zusatzverluste

In der Vergangenheit wurden die Zusatzverluste durch einen pauschalen Zuschlag von 0,5% der im Bemessungsbetrieb aufgenommenen Leistung ermittelt (EN 60034).

IEC 60034-2-1 sieht vor, dass die Zusatzverluste entweder gemessen oder durch einen deutlich höheren, leistungsabhängigen Zuschlag erfasst werden (2,5% bei Maschinen kleiner Leistung; 0,5% werden erst bei einer Leistung von 10 MW erreicht).

Die nach Norm zugelassenen Messverfahren stellen hohe Ansprüche an die Genauigkeit der verwendeten Messgeräte.

Bestimmung der Zusatzverluste

1. Verfahren

Bei Bestimmung der Zusatzverluste mit Drehmomentmessung werden die Restverluste für 6 Lastpunkte ermittelt.

$$(1) \quad P_{Li} = P_{1i} - P_{2i} - P_{Cu1i} - P_{Fe} - P_{Reib} - P_{Cu2i}, i = 1 \dots 6$$

P_{1i} aufgenommene elektrische Leistung, Messwert

P_{2i} mechanisch abgegebene Leistung, $P_{2i} = 2\pi n_i M_i$

P_{Cu1i} Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung, $P_{Cu1i} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{1Strangi}^2$

P_{Fe} Eisenverluste, aus Leerlaufmessung

P_{Reib} Reibungsverluste, aus Leerlaufmessung

P_{Cu2i} Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung $P_{Cu2i} = (P_{1i} - P_{Cu1i} - P_{Fe}) \cdot s_i$

Die Leistungen P_{Li} werden über dem Quadrat des Drehmoments aufgetragen.

Messung an einer
315 kW- Maschine

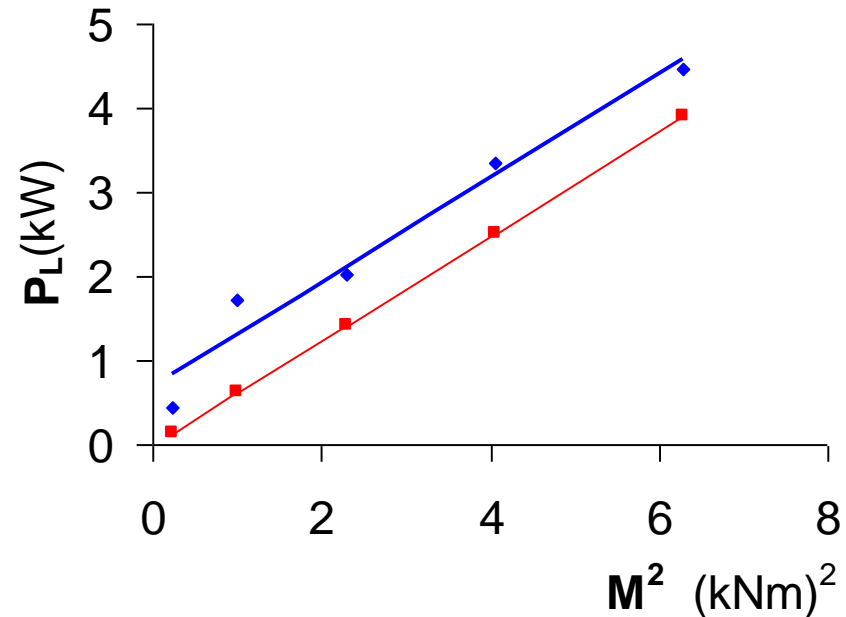
Geradensteigung

$$(2) \quad a = \frac{6 \cdot \sum P_{Li} M_i^2 - \sum P_{Li} \cdot \sum M_i^2}{6 \cdot \sum (M_i^2)^2 - (\sum M_i^2)^2}$$

Aus den Messwerten
ermittelt:

$$a = 0,000622 \text{ W/N}^2\text{m}^2$$

Nennmoment $M_N = 2023 \text{ Nm}$



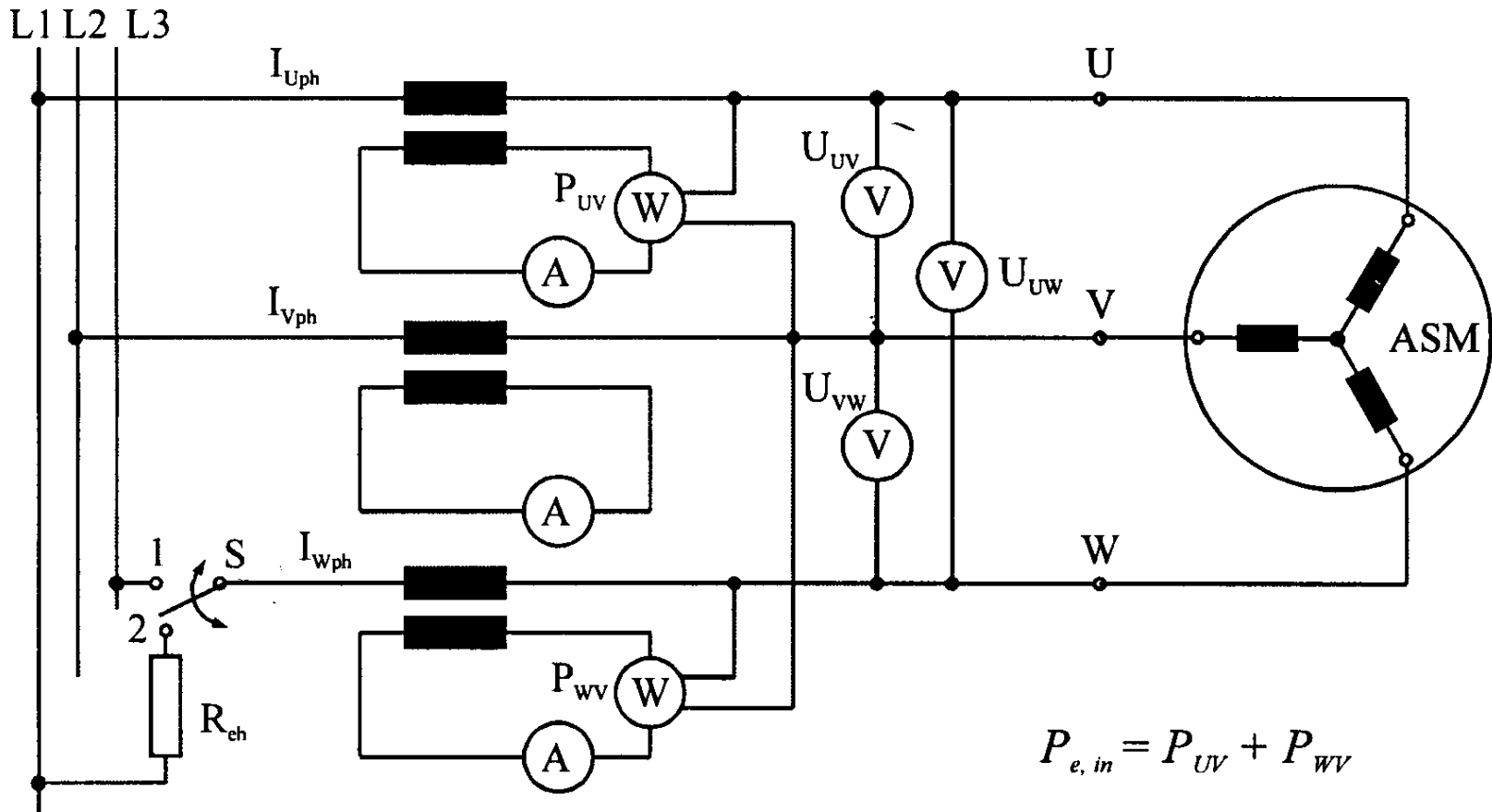
Zusatzverluste

$$P_{zusN} = a \cdot M_N^2 = 2,5 \text{ kW} = 0,8\% \cdot P_{1N}$$

Korrelationskoeffizient $r = 0,98$

Bestimmung der Zusatzverluste

2. Verfahren: Messung in eh- Schaltung



1. Verfahren

Die Messfehler von Leistung und Drehmoment haben den größten Einfluss auf die ermittelten Zusatzverluste nach IEC 60034-2-1/ IEC 61972.

Auswirkung eines konstanten prozentualen Fehlers bei der Leistungsmessung

Die fehlerhaft ermittelten Größen werden durch einen hochgestellten Strich gekennzeichnet.

Alle Messwerte außer der elektrisch aufgenommenen Leistung werden als fehlerfrei unterstellt.

$$P'_1 = P_1 + \Delta P_1$$

$$P'_L = P_L + \Delta P_L \quad \Delta P_L = \Delta P_1 \cdot (1 - s) \approx \Delta P_1$$

$$(1) \quad P'_{Li} = P'_{1i} - P_{2i} - P_{Cu1i} - P_{Fe} - P_{Reib} - P_{Cu2i}, i = 1 \dots 6$$

$$(2) \quad a' = \frac{6 \cdot \sum P'_{Li} M_i^2 - \sum P'_{Li} \cdot \sum M_i^2}{6 \cdot \sum (M_i^2)^2 - (\sum M_i^2)^2}$$

Es ist der Einfluss des Messfehlers der Leistung auf die Geradensteigung zu untersuchen.

1. Summand im Zähler von (2)

$$6 \cdot \sum P'_{Li} M_i^2 = 6 \cdot \sum (P_{Li} + \Delta P_{Li}) \cdot M_i^2 = 6 \cdot \sum P_{Li} M_i^2 + 6 \cdot \sum \Delta P_{Li} M_i^2$$

Mit dem Lastfaktor $k_{Mi} = \frac{M_i}{M_N}$

lautet der erste Summand im Zähler von (2)

$$6 \cdot \sum P_{Li}' M_i^2 = P_{LN} \cdot M_N^2 \cdot 6 \cdot \sum k_{Mi}^4 + \Delta P_{1N} M_N^2 \cdot 6 \cdot \sum k_{Mi}^3$$

2. Summand im Zähler von (2)

$$- \sum P_{Li} \sum M_i^2 - \sum \Delta P_{Li} \sum M_i^2 = -P_{LN} \cdot M_N^2 \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2 - \Delta P_{1N} M_N^2 \cdot \sum k_{Mi} \cdot \sum k_{Mi}^2$$

Nenner von (2)

$$6 \cdot \sum \left(M_i^2 \right)^2 - \left(\sum M_i^2 \right)^2 = 6 \cdot M_N^4 \cdot \sum k_{Mi}^4 - M_N^4 \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2$$

Die Steigung beträgt also

$$a' = \frac{M_N^2 \cdot \left(P_{LN} \cdot 6 \cdot \sum k_{Mi}^4 + \Delta P_{1N} \cdot 6 \cdot \sum k_{Mi}^3 - P_{LN} \cdot \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2 - \Delta P_{1N} \cdot \sum k_{Mi} \cdot \sum k_{Mi}^2 \right)}{M_N^4 \cdot \left(6 \cdot \sum k_{Mi}^4 - \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2 \right)}$$

Normierung

$$\frac{a'}{P_{LN} / M_N^2} = 1 + \frac{\Delta P_{1N}}{P_{LN}} \cdot \frac{6 \cdot \sum k_{Mi}^3 - \sum k_{Mi} \cdot \sum k_{Mi}^2}{6 \cdot \sum k_{Mi}^4 - \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2} = 1 + \frac{\Delta a}{P_{LN} / M_N^2}$$

relativer Fehler der Steigung

$$\frac{\Delta a}{P_{LN} / M_N^2} = \frac{\Delta P_{1N}}{P_{LN}} \cdot \frac{6 \cdot \sum k_{Mi}^3 - \sum k_{Mi} \cdot \sum k_{Mi}^2}{6 \cdot \sum k_{Mi}^4 - \left(\sum k_{Mi}^2 \right)^2}$$

Lastpunkte (nach Norm 4 Lastpunkte äquidistant zwischen 25% und 100% Last, zwei Lastpunkte bei Überlast, nicht mehr als 150% Last)

$$\frac{M_i}{M_N} = k_{Mi} = 1,25; \quad 1,13; \quad 1,0; \quad 0,75; \quad 0,5; \quad 0,25$$

$$\frac{\Delta a}{P_{LN} / M_N^2} = \frac{\Delta P_{1N}}{P_{LN}} \cdot 0,6422$$

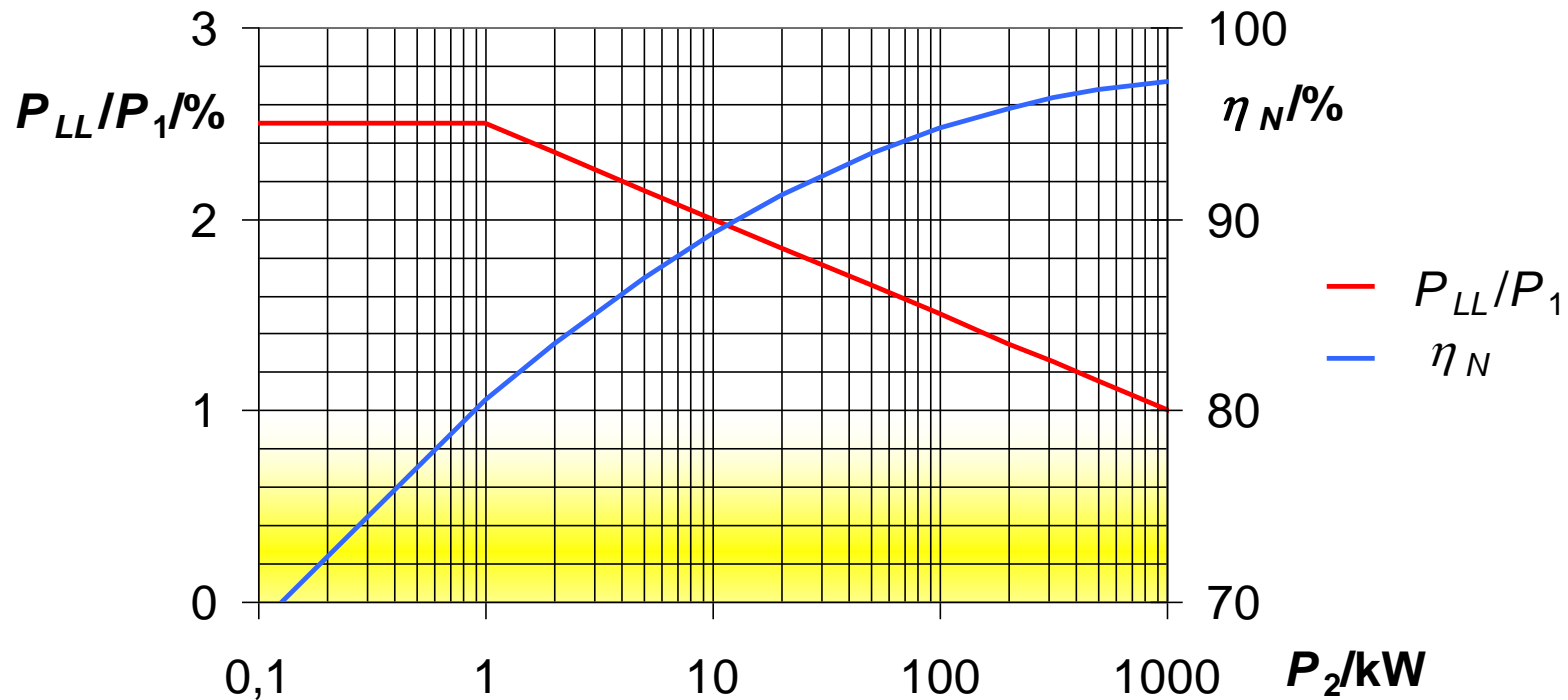
Der Fehler bei der Berechnung der Steigung beträgt 64% des Messfehlers der Leistung, dividiert durch die Zusatzverluste im Nennbetrieb.

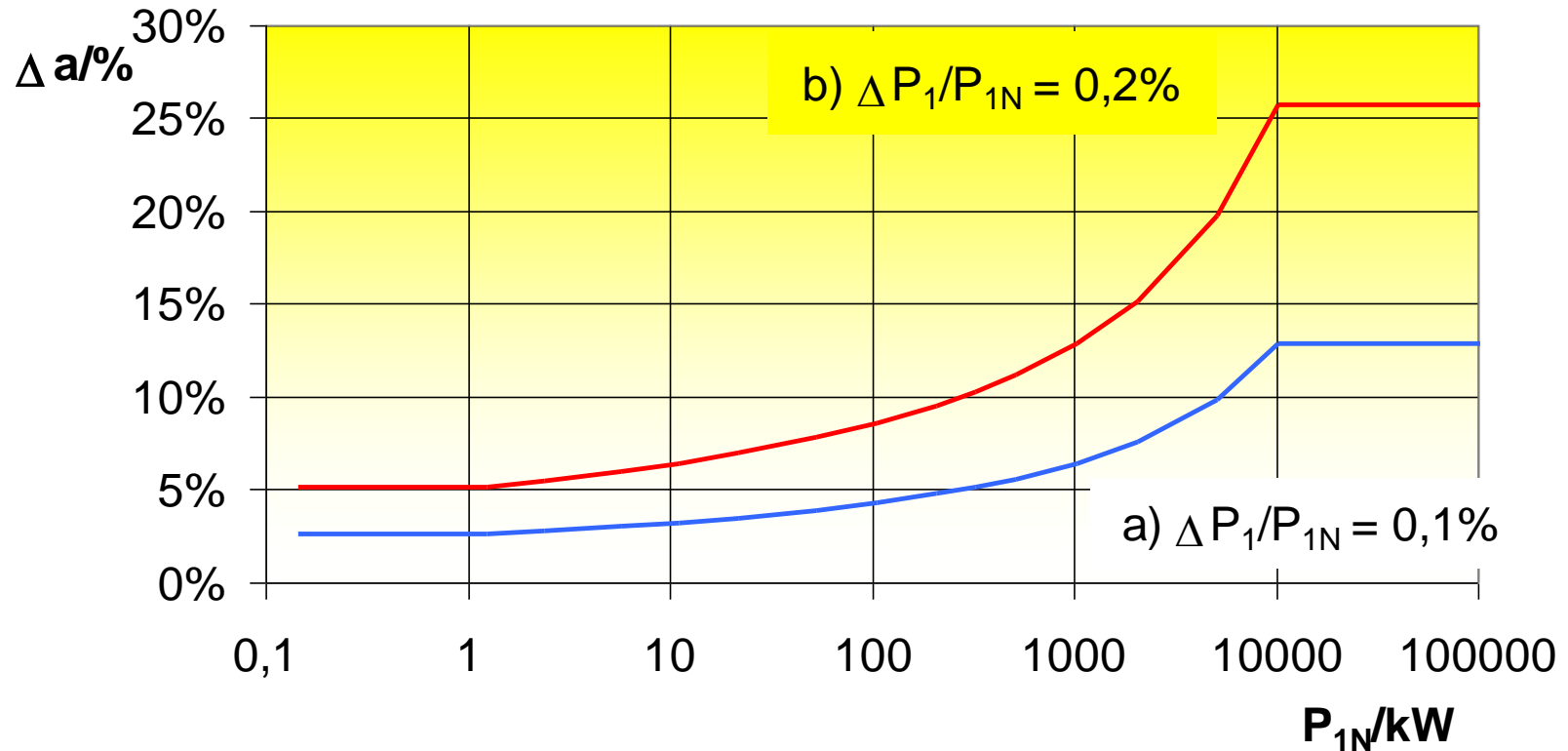
Was bedeutet dies für die Messgenauigkeit der Zusatzverluste?

Zusatzverluste in Prozent der aufgenommenen Leistung

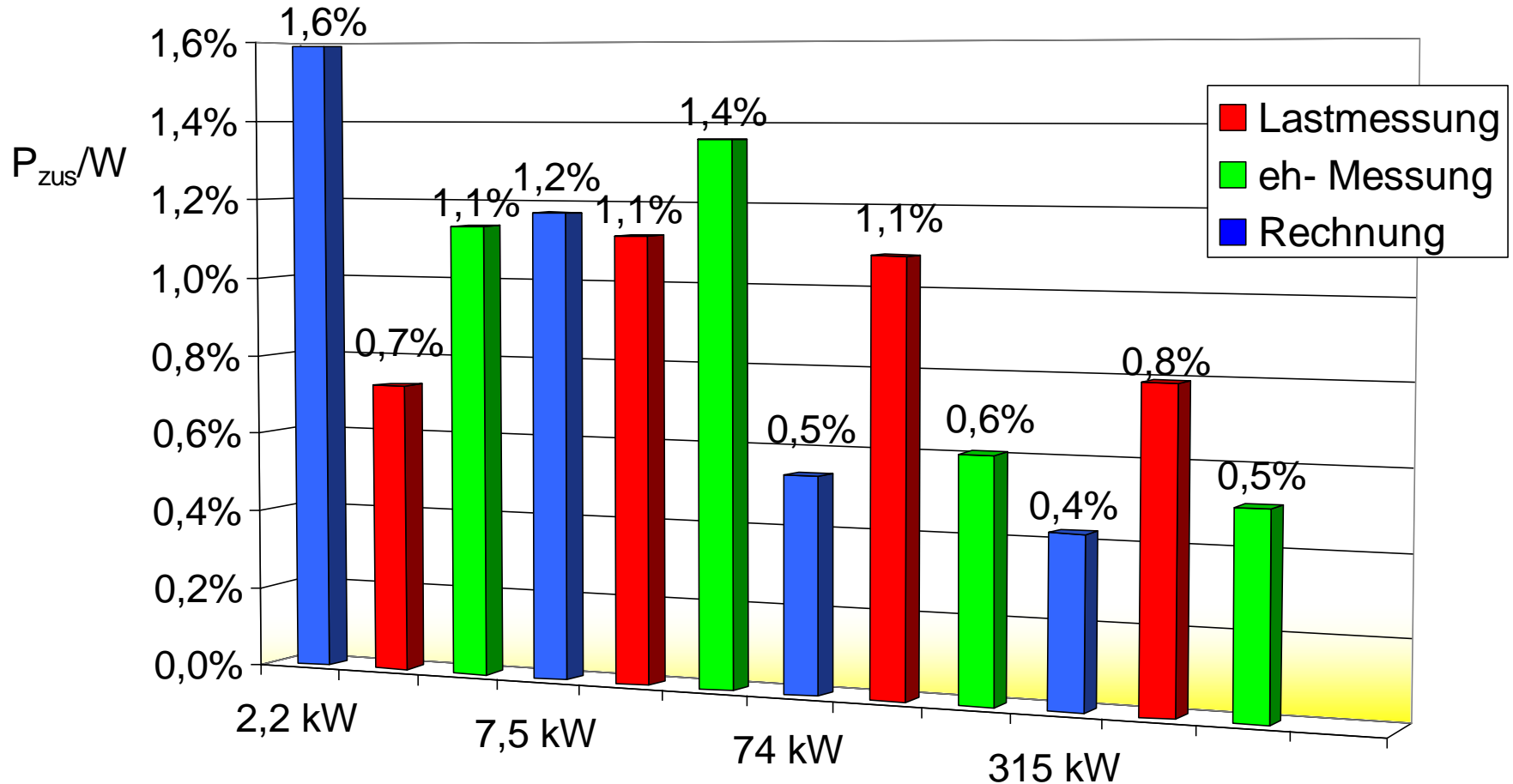
(Bild 11 IEC 60034-2-1, „Strafkurve“)

typische Wirkungsgrade als Funktion der Bemessungsleistung





Bei einem 315- kW- Motor ist bei dem „erlaubten“ Fehler von 0,2% bei Leistungsmessung mit einem Fehler von 10% bei der Ermittlung der Zusatzverluste zu rechnen.



Vergleich Rechnung – Lastmessung – eh- Messung

Durch Änderung der Normung und die Marktforderung nach energieeffizienten Antrieben ergibt sich die Notwendigkeit, Zusatzverluste zu minimieren.

Die messtechnische Bestimmung der Zusatzverluste bei größeren Asynchronmaschinen stellt hohe Anforderungen an die Messung der aufgenommenen elektrischen Leistung.

Der Fehler bei der Messung der Zusatzverluste beträgt trotz hoher Klassengenauigkeit bei der Leistungsmessung bis zu 25%.

Der Fehler bei der Zusatzverlustbestimmung infolge fehlerhafter Drehmomentmessung stimmt betragsmäßig mit dem infolge fehlerhafter Leistungsmessung überein.

Die berechneten und die nach zwei verschiedenen Messverfahren ermittelten lastabhängigen Zusatzverluste weisen deutliche Abweichungen auf.