

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 93 (2002)

**Heft:** 15

**Artikel:** Oberschwingungsverluste und Erwärmungen umrichter gespeister Induktionsmaschinen

**Autor:** Lehrmann, Christian / Lienesch, Frank / Engel, Ulrich

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855431>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.03.2025

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

# Oberschwingungsverluste und Erwärmungen umrichter gespeister Induktionsmaschinen

## Bestimmung der Verluste in Abhängigkeit der Betriebsparameter

Die Einstellung der Förderleistung von Strömungsmaschinen über Umrichterantriebe bietet gegenüber anderen Methoden – wie etwa das Nachschalten von Drosselorganen – einen wesentlich höheren Wirkungsgrad und umfangreichere Konfigurationsmöglichkeiten, stellt aber an Maschine und Umrichter auch zusätzliche Anforderungen, die insbesondere im Hinblick auf den Explosionsschutz beachtet werden müssen: weder im Betrieb noch bei Störungsfällen dürfen Teile des Motors, die einer explosionsfähigen Atmosphäre ausgesetzt sein können, die zugelassenen Temperaturen überschreiten, und der Motor darf keine Funken bilden. Der vorliegende Beitrag zeigt, in welcher Form sich die Umrichterspeisung auf Verluste und Erwärmung eines handelsüblichen Normmotors auswirkt.

Zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den Betriebsparametern des Antriebs und den daraus resultierenden Maschinenverlusten und Erwärmungen wurde im Laboratorium für explosionsgeschützte elektrische Maschinen der

*Christian Lehrmann, Frank Lienesch, Ulrich Engel*

Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig ein vollständiger Lastkreislauf aufgebaut, bestehend aus Umrichter, Drehstrom-Induktionsmotor und einer als Gleichstromgenerator ausgeführten Belastungsmaschine mit Netzzurückspeisung. Hinzu kamen Geräte zur Messung der aufgenommenen und abgegebenen Leistung der Maschine und der Erwärmungen der Ständerwicklung, des Motorgehäuses sowie des mit einer Aluminiumkäfigwicklung ausgeführten Rotors.

Der zeitliche Verlauf des die Maschine speisenden Stromes und der an den Maschinenklemmen anliegenden Spannung wurde im Leerlauf und bei belasteter Maschine mit einem digitalen Speicheroszilloskop aufgezeichnet und einer Spektralanalyse unterzogen.

Um einen Überblick über den Einfluss der in der Industrie zur Zeit verwendeten Umrichtertypen auf das Erwärmungsverhalten der elektrischen Maschine zu erhalten, wurden die Versuche mit einem Pulsrichter, einem Umrichter mit sinusbewerteter Pulsweitenmodulation (PWM) sowie einem Stromzwischenkreisumrichter<sup>1</sup> durchgeführt. Die Resultate wurden an handelsüblichen Normmotoren ermittelt; die Ergebnisse sind

jedoch auch auf explosionsgeschützte Maschinen unabhängig von der Zündschutzart anwendbar.

### Versuchsaufbau und Beschreibung der Auswertung

Da die Übertemperatur der Wicklung nach den einzelnen Versuchen über die Erhöhung des Wicklungswiderstandes bestimmt werden soll, wird vor Beginn einer Versuchsreihe der Kaltwiderstand der Wicklung gemessen. Hierzu wird über das Widerstandsmessgerät ein konstanter Strom (z.B. 1 A) in die Wicklung eingepreßt und über eine separate Messleitung der Spannungsabfall über den Motorklemmen zur Berechnung des elektrischen Widerstandes gemessen. Danach werden an den zu untersuchenden Maschinen die Leerlaufverluste bestimmt. Dies ist deshalb notwendig, weil die Eisen- und Reibungsverluste später bei den Auswertungen zur Bestimmung der umrichterspezifischen Zusatzverluste benötigt werden.

Die Reibungsverluste werden durch Extrapolation bestimmt (Bild 1). Dazu wird die Summe der Eisen- und Reibungsverluste über dem quadratischen Verhältnis von Spannung und Bemessungsspannung ( $U_0/U_n$ )<sup>2</sup> der Maschine aufgetragen. Als Messpunkte wurden üblicherweise ( $U_0/U_n$ )<sup>2</sup> = 0,2 bis 1,2 – aufgeteilt in fünf äquidistante Schritte –

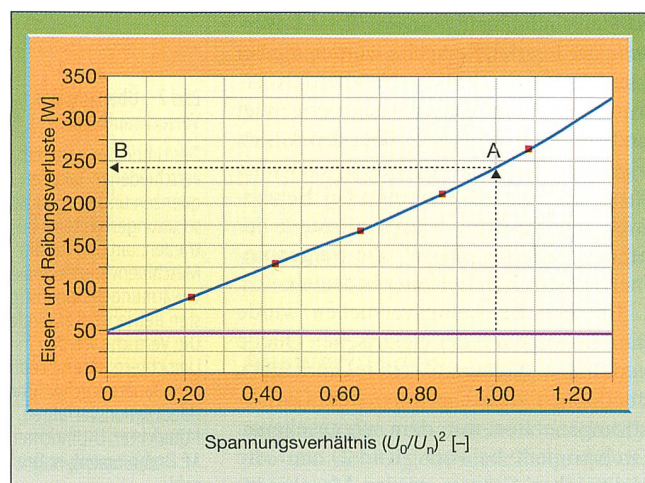


Bild 1 Bestimmung der Reibungsverluste durch Extrapolation

**Untersuchte Maschinen und Umrichter**

**Maschine 1**

4-polige, mit Telemetriesystem zur Messung der Läufertemperatur ausgestattete Käfigläufermaschine mit einer Bemessungsleistung<sup>2</sup> von 5,5 kW; Baugröße 132 S; Messungen: Temperaturverteilung im Läufer sowie Verluste bei Umrichterspeisung, Einfluss der Maschinenschaltung (Stern bzw. Dreieck).

**Maschine 2**

4-polige, mit Thermoelementen im Wickelkopf ausgestattete Käfigläufermaschine mit einer Bemessungsleistung von 22 kW; Baugröße 180 L; Messungen: Leerlauf- und Betriebsverluste bzw. Erwärmungen in Abhängigkeit der Betriebsparameter des Umrichters (Taktfrequenz, Netzspannung usw.), Untersuchung des Einflusses der Maschinenschaltung (Stern bzw. Dreieck), Messung des Oberschwingungsspektrums von Maschinenspannung und -strom.

**Umrichter 1**

Pulsumrichter mit einstellbaren Taktfrequenzen von 4, 8, 12 und 16 kHz; Eingangsspannungsbereich 380–500 V bei 50–60 Hz; Ausgangsspannungsbereich 30 V bis  $U_{\text{Netz}}$ ; Ausgangsfrequenzbereich 0–180 Hz; Dauerstrom max. 60 A; Bemessungsleistung 41,6 kVA.

**Umrichter 2**

Sinusbewertete Pulsweitenmodulation; Eingangsspannungsbereich 370–415 V bei 50–60 Hz; Ausgangsspannungsbereich 0 V bis  $U_{\text{Netz}}$ ; Ausgangsfrequenzbereich 0–900 Hz; Dauerstrom max. 62 A; Bemessungsleistung 43 kVA.

verwendet. Das genaue Einhalten der Spannungswerte ist jedoch für das Ergebnis nicht relevant. Die Kurve wird dann z.B. über einen polynomischen Ansatz dritten Grades mit linearem Anfang nach  $(U_0/U_n)^2 = 0$  extrapoliert.

Am Schnittpunkt mit der Ordinate lassen sich die Reibungsverluste ablesen: die im Eisen umgesetzte Verlustleistung bei Bemessungsspannung ist der Wert für  $(U_0/U_n)^2 = 1$  abzüglich der Reibungsverluste. Die Ständerkupferverluste wurden bereits von der gesamten Leerlaufleistung subtrahiert. Die Leerlaufverluste werden sowohl bei Netzbetrieb als auch bei Betrieb am Umrichter bestimmt, wobei sich bei letzterem jedoch die Reibungsverluste nicht direkt bestimmen lassen, da noch die Oberschwingungsverluste, die auch bei kleinem  $(U_0/U_n)^2$  vorhanden sind, hinzukommen. Zur Auswertung der Leerlaufversuche wurden die bei gleicher Drehzahl bei Netzbetrieb ermittelten Reibungsverluste verwendet und die Eisenverluste  $V_{\text{Fe}}$  über den Ansatz  $V_{\text{Fe}} = P_1 - V_{\text{RbgNetz}} - V_{\text{Cu1}}$  berechnet, wobei  $V_{\text{RbgNetz}}$  die Reibungsverluste bei Netzbetrieb,  $V_{\text{Cu1}}$  die Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung und  $P_1$  die aufgenommene elektrische Leistung bedeuten.

Bei den Belastungsversuchen wurde die Maschine mit der elektrischen Quelle verbunden (Generator oder Umrichter), über einen direkt gekoppelten Gleichstromgenerator mit dem vorgesehenen Drehmoment belastet (Bild 2) und die elektrischen Größen an den Maschinen-

klemmen<sup>3</sup>, die abgegebene mechanische Leistung<sup>4</sup> sowie die Temperaturen<sup>5</sup> gemessen. Bei Maschine 2 (Kasten) wurde zusätzlich während des Betriebes über ein Thermoelement die Wickelkopf-

**Bild 2 Übersicht des Versuchsaufbaus**

Der Umrichter wird mit verschiedenen Taktfrequenzen und Ausgangsbeschaltungen (Filtern) betrieben, um den für die Maschinenverluste und -erwärmungen ungünstigsten Betriebsfall zu finden. Die Versuche werden mit Umrichtern unterschiedlicher Bauart durchgeführt (Modulationsverfahren, I-Umrichter, U-Umrichter). M: Drehmoment; n: Drehzahl

temperatur ermittelt. Die Läufertemperatur wurde bei Maschine 1 während des Betriebes über in die Läuferstäbe eingebrachte isolierte Thermoelemente und ein berührungsfrei arbeitendes Telemetriesystem gemessen, bei Maschine 2 mit einem durch eine Bohrung im Lagerschild nach Versuchsende eingeführten Temperaturfühler am Kurzschlussring.

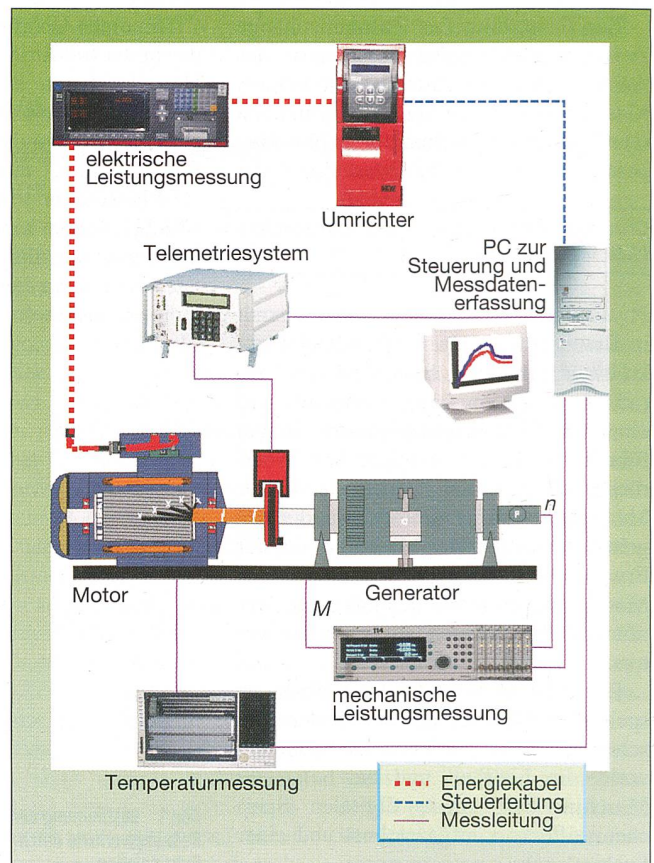
Die einzelnen Messwerte wurden über eine in LabView programmierte Software aus den Messgeräten ausgelesen und gespeichert (Bild 3). Der Versuch ist dann beendet, wenn der thermische Beharrungszustand erreicht ist<sup>6</sup>. Danach wurde die Maschine abgeschaltet, möglichst schnell abgebremst und mit dem Widerstandsmessgerät der Warmwiderstand der Ständerwicklung gemessen.

Aus der Differenz zum Kaltwiderstand wurde die Wicklungstemperatur nach den Formeln

$$\Delta\vartheta = \frac{R_W - R_K}{R_K} \cdot (235 + \vartheta_K) - (\vartheta_{\text{Ku}} - \vartheta_K)$$

$$\Theta = \Delta\vartheta + \vartheta_{\text{Ku}}$$

berechnet [1], wobei  $\vartheta$  die Übertemperatur der Wicklung gegen die Umgebungstemperatur in K,  $R_W$  den Warmwiderstand der Wicklung (nach dem Versuch) in  $\Omega$ ,  $R_K$  den Widerstand der kalten Wicklung bei Wicklungstemperatur  $\vartheta_K$  in  $\Omega$ ,



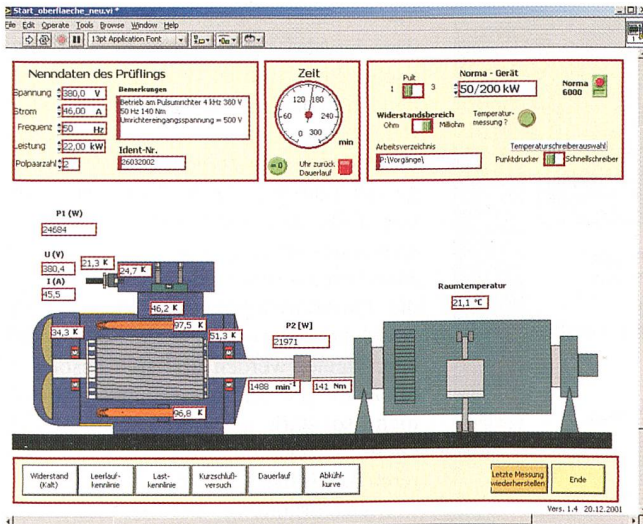


Bild 3 Aufzeichnung der Messdaten über eine mit LabView programmierte Software

$\vartheta_{Kü}$  die Temperatur des Kühlmediums (z.B. Umgebungsluft) am Ende des Versuchs in °C und  $\Theta$  die Temperatur der Wicklung nach dem Versuch in °C bedeuten.

Aus dem Warmwiderstand der Wicklung und dem Strom während des Versuches können über  $P = R \cdot I^2$  direkt die Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung berechnet werden.

Die Oberschwingungsspektren wurden mit einem digitalen Speicheroszilloskop und anschließender Signalverarbeitung mittels einer mit LabView programmierten Software durchgeführt. Der Strom wird hierbei über eine elektronische Strommesszange in einem Leiter erfasst, die Spannung mit einem potenzialgetrennten Differenzialtastkopf zwischen zwei Leitern gemessen<sup>7</sup>.

## Versuchsablauf

### Leerlauf-Messungen

Hierbei werden die Einflüsse der Umrichterspeisung auf die Eisenverluste untersucht. Die Eisenverluste einer Induktionsmaschine setzen sich aus den Wirbelstrom- und den Ummagnetisierungsverlusten in den magnetisch aktiven Teilen der Maschine zusammen [2, 3, 4]. Durch die umrichterspezifischen Oberschwingungen kommt es zu einer Erhöhung der Verluste gegenüber dem Betrieb am Netz.

Die Messungen wurden für den Pulsrichter auch bei 500 V Umrichtereingangsspannung durchgeführt, da dieser Umrichtertyp auch in Industrienetzen mit 500 V Betriebsspannung eingesetzt wird.

Zur Ermittlung der Höhe der einzelnen Oberschwingungsamplituden wurden der Maschinenstrom und die Maschinenspannung bis zur 500. Oberschwingung nach Fourier zerlegt. Diese hohe Ord-

nungszahl ist zur sicheren Erfassung der Umrichtertaktfrequenz nötig.

### Lastlauf-Messungen

Die Maschinen wurden am Pulsrichter mit den Taktfrequenzen 4, 8, 12 und 16 kHz und am Umrichter mit sinusbewerteter PWM bei 4500 Hz und 7500 Hz mittlerer Taktfrequenz in Sternschaltung betrieben. Zusätzlich wurde auch die Dreieckschaltung untersucht. Da Maschine 1 mit Thermoelementen in den Stäben des Rotorkäfigs und einem Telemetriesystem zum Auslesen der Temperaturen während des Betriebes versehen ist, konnten hier die Läufertemperaturen direkt angegeben werden (Bild 5). Es zeigte sich bei der Auswertung der gemessenen Temperaturen, dass es zumindest bei der hier untersuchten Maschine an den Einbauorten der Thermoelemente keine Hot Spots gibt. Die Temperaturverteilung ist bogenförmig und – wie erwartet – mit einem Maximum in der Mitte des Rotors. Bei den weiteren Auswertungen wird daher nur die maximale Temperatur als Rotortemperatur angegeben.

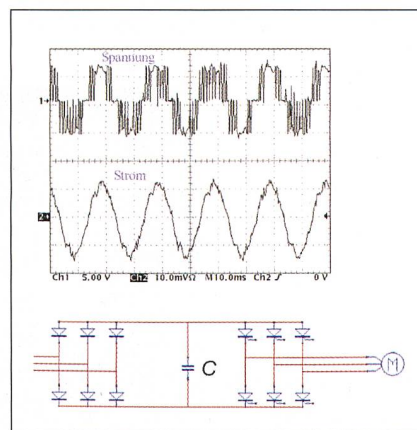


Bild 4 Schema eines Spannungszwischenkreisumrichters

Die Läufertemperatur erhöhte sich bei Speisung mit dem Pulsrichter bei diesem Versuch gegenüber Netzbetrieb um etwa 8 K. Die Temperaturzunahme lässt sich unter Zuhilfenahme des Wärmeübergangswiderstandes der Maschine an die Umgebung auch theoretisch abschätzen.

Der Wärmeübergangswiderstand zwischen Gehäuse und Umgebung wurde zu 0,042 K/W berechnet. Durch die Umrichterspeisung wurden bei diesem Versuch zusätzliche Verluste von 153 W gemessen, was über 6,4 K Temperaturerhöhung am Gehäuse ergibt<sup>8</sup>. Gemessen wurde eine Temperaturerhöhung von 6 K an der Messstelle mit der höchsten Temperatur (55,5 K bei Umrichterbetrieb 4 kHz) und von 5,8 K gemittelt über alle Gehäusemessstellen. Im Läufer erhöhte sich das Temperaturmaximum von 108 K bei Netzbetrieb auf 116 K bei Umrichterspeisung. Die Temperatur der Ständerwicklung erhöhte sich um 7 K auf 90 K. Die Abschätzung über den Wärmewiderstand zeigt, dass die zusätzlich von der Maschine aufgenommene Leistung bei Umrichterbetrieb in der Maschine in Wärme umgewandelt wird.

Durch die Verwendung eines mitrotierenden Telemetriesystems zur Messung der Rotortemperatur während des Betriebes sind hier nun gesicherte Aussagen über die Temperaturverteilung im Rotor eines Induktionsmotors bei Umrichterbetrieb möglich.

Es scheint sich die Vermutung zu bestätigen, dass an den zusätzlichen Verlusten im Rotor der Maschine Stromverdrängungseffekte massgeblich beteiligt sind. Diese Vermutung wird durch die Abnahme der Läufertemperatur bei steigender Taktfrequenz des Umrichters (Abnahme der Stromüberschwingungen) untermauert.

Zur Ergründung des Zusammenhanges zwischen der Umrichtereingangsspannung und den Maschinenverlusten bzw. den Erwärmungen wurde bei Maschine 2 und bei Bemessungsleistung die Eingangsspannung des Pulsrichters in 10-Volt-Schritten ausgehend von 420 V auf 500 V erhöht und das Verhältnis des Effektivwertes der Maschinenspannung zur konstant gehaltenen Grundschnungsspannung berechnet. Das Verhältnis steht in einem direkten Zusammenhang mit dem gesamten im Maschinenstrom enthaltenen Oberschwingungsanteil.

## Auswertungen

Bei der Auswertung der Leerlaufmessungen an den verwendeten Umrichtertypen und der Gegenüberstellung mit den Messungen am Generator zeigte sich eine

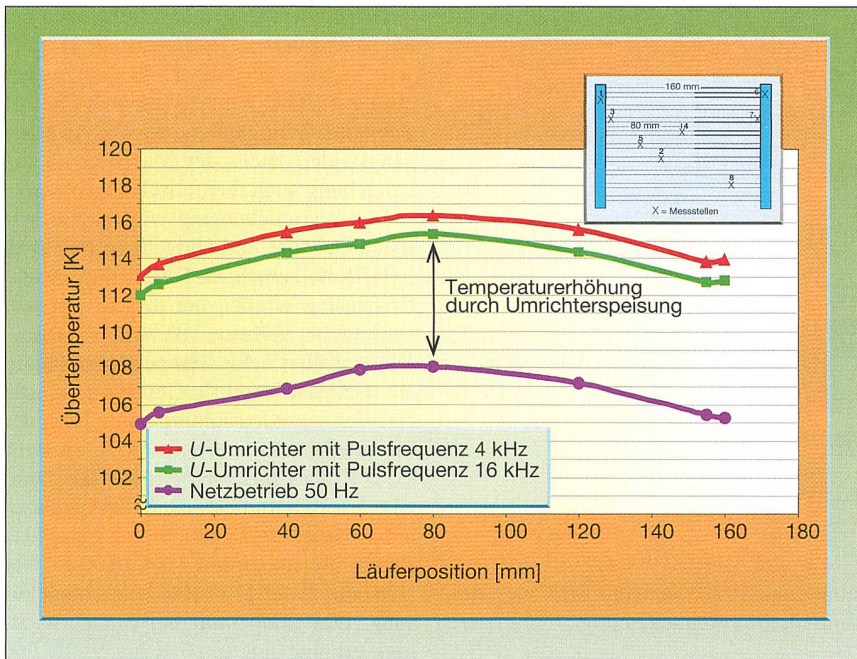


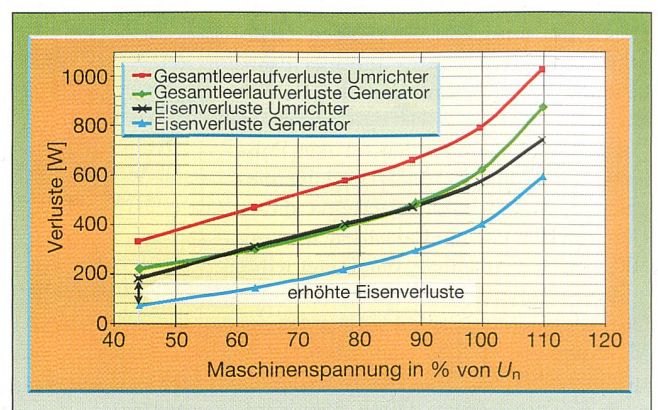
Bild 5 Auswertung der mit dem Telemetriesystem gemessenen Rotortemperatur  
Läuferübertemperaturen bei Betrieb am Netz und am U-Umrichter bei verschiedenen Taktfrequenzen

deutliche Erhöhung der Eisenverluste bei Umrichterbetrieb. Dies war auch zu erwarten, da nach dem Induktionsgesetz jede an den äusseren Klemmen einer Spule (Maschinenwicklung) anliegende Spannung einen zugehörigen, die Spule durchsetzenden magnetischen Fluss mit der gleichen Frequenz erzeugt. Es muss  $U_i = w \cdot \xi \cdot d\Phi/dt$  erfüllt sein, wobei  $w \cdot \xi$  die effektive Windungszahl je Strang und  $\Phi$  der magnetische Fluss bedeuten [5]. Die magnetischen Flüsse mit den Frequenzen der Spannungsüberschwingungen haben auch bei kleinen Amplituden auf Grund der hohen Frequenzen deutlich messbare Ummagnetisierungsverluste im Eisen zur Folge, die sich in den Eisenverlusten bei der Leerlaufmessung niederschlagen. Diese zusätzlichen Eisenverluste treten auch beim Betrieb der Maschine mit Bemessungsleistung am Umrichter auf. Es tragen auch die Oberschwingungen mit der Schaltfrequenz des Umrichters zu den Eisenverlusten bei, wobei die durch diese Spannungen getriebenen Ströme auf Grund des grossen induktiven Blindwiderstandes  $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  ( $L$ : Spuleninduktivität,  $f$  liegt im Bereich von 4–16 kHz) im Verhältnis zum Grundschwingungsstrom sehr klein sind und daher in erster Näherung die durch diese Ströme verursachten zusätzlichen Kupferverluste vernachlässigt werden können [6].

Da die Amplitude der schaltfrequenten Anteile des Oberschwingungsspektrums von der Grundschwingungsamplitude un-

abhängig ist, lassen sich die Reibungsverluste – wie aus Bild 6 ersichtlich – nicht durch eine Extrapolation zur Spannung  $U_0 = 0$  V bestimmen. Zur Bestimmung der Eisenverluste wurden daher die aus der Messung am Generator ermittelten Reibungsverluste verwendet. Da es sich um rein mechanische Verluste handelt, werden sie durch die Umrichterspeisung nicht beeinflusst. Dies ist an der näherungsweise Parallelverschiebung der beiden Kurven in Bild 6 (Gegenüberstellung von Pulsumrichter und Generator) gut erkennbar. Bei Verwendung des Spannungszwischenkreisumrichters mit sinusbewerteter PWM haben die Kurven einen ähnlichen Verlauf (Bild 6). Eine Erhöhung der Taktfrequenz wirkte sich bei den hier durchgeführten Versuchen gemäss Tabelle I in einer Erhöhung der Eisenverluste aus. Erklären lässt sich dies

Bild 6 Erhöhung der Leerlaufverluste durch Umrichterspeisung bei Maschine 2



mit der bereits beschriebenen Annahme, dass die Maschinenwicklung ein magnetischer Fluss mit der Frequenz der anliegenden Spannung durchsetzen muss. Bei Betrieb mit Bemessungsleistung nehmen die gesamten Maschinenverluste mit steigender Taktfrequenz des Umrichters hingegen ab, da die Form des Maschinen-spannungsverlaufs insgesamt für die Maschinenverluste günstiger wird und die Oberschwingungen niedriger Ordnung, die auch nennenswerte Ströme treiben, kleiner werden und sich besonders im Rotor die Stromverdrängungseffekte nicht so stark auswirken (Bild 5) [7]. Diese Zusammenhänge konnten mit mehreren Messungen bestätigt werden.

Eine Erhöhung der Umrichtereingangsspannung beim Pulsumrichter von 400 V auf 500 V führte bei Maschinenbemessungsspannung zu einer weiteren Erhöhung der Eisenverluste. Dieses lässt sich dadurch erklären, dass der Effektivwert der Umrichterausgangsspannung im Verhältnis zur Grundschwingungsspannung und damit der prozentuale Oberschwingungsanteil ansteigt (Bild 7).

Bei der Auswertung der Belastungsversuche wurde eine Zunahme der Erwärmungen und Verluste gegenüber Netzbetrieb festgestellt. Es zeigte sich, dass die geringsten Verluste und Erwärmungen bei Betrieb an sinusförmiger Spannung (Generator) aufgetreten sind, gefolgt vom Betrieb am Umrichter mit sinusbewerteter PWM. Wie Tabelle II entnommen werden kann, zeigten sich beim Betrieb am Pulsumrichter die höchsten Verluste und Erwärmungen sowie der geringste Maschinenwirkungsgrad in der Dreieckschaltung.

Zwei Beobachtungen sind besonders für die Anwendung des Antriebes in explosionsgefährdeter Umgebung von Bedeutung:

- die Zunahme der Verluste und Erwärmungen bei Erhöhung der Umrichtereingangsspannung z.B. von 400 V auf 500 V;

Taktfrequenz [kHz]	25 Hz		40 Hz		50 Hz	
	$V_{Rbg} = 55 \text{ W}$ 400 V	500 V	$V_{Rbg} = 93,5 \text{ W}$ 400 V	500 V	$V_{Rbg} = 140 \text{ W}$ 400 V	500 V
4	270	326	403	482	496	569
8	289	374	441	482	510	574
12	303	387	446	513	528	603
16	330	391	466	551	547	655

Tabelle I Eisenverluste [W] in Abhängigkeit der Taktfrequenz für Maschine 2 und Speisung der Maschine mit den Grundschwingungsfrequenzen 25, 40 und 50 Hz

$V_{Rbg}$ : Reibungsverluste

Speisequelle	Übertemperatur		Verluste [W]	$\eta$ [%]
	Stator [K]	Rotor [K]		
Generator 50 Hz Stern	83	108	1073	83
Pulsumrichter 4 kHz Stern	90	116	1228	81
Pulsumrichter 4 kHz Dreieck	95	128	1357	80
Pulsumrichter 4 kHz Stern $U_E = 500 \text{ V}$	92	123	1275	81
Umrichter sinusbewerte PWM	84	114	1148	82

Tabelle II Maschinenverluste in Abhängigkeit der Speisequelle

Betrieb b von Maschine 1 an verschiedenen Speisequellen bei 50 Hz und 36,2 Nm Bemessungsleistung;  $\eta$ : Wirkungsgrad

– die Zunahme der Verluste und Erwärmungen bei Änderung der Maschinenschaltung von Stern zu Dreieck.

Hinzu kommt noch die Abnahme der Wärmeabgabe an die Umgebung von eigenbelüfteten Maschinen bei einer Verminderung der Drehzahl, was ebenfalls bei der Auslegung des Antriebes zu berücksichtigen ist.

Der für die Untersuchungen verwendete Pulsumrichter besitzt einen Eingangsspannungsbereich von 380–500 V und kann somit auch in den im Bergbau und Industriebetrieben häufig verwendeten Netzen mit 500 V Betriebsspannung betrieben werden. Hierzu sind am Umrichter ausser einer veränderten Einstel-

lung bei der Inbetriebnahme keine weiteren Eingriffe nötig.

Die Bestimmung der Leerlaufverluste zeigte bei der Speisung des Umrichters mit 500 V Eingangsspannung signifikant höhere Eisenverluste als bei 400 V. Bei den Belastungsversuchen verschlechterte sich zudem der Maschinenwirkungsgrad und die Temperatur erhöhte sich deutlich – im Läufer der Maschine um etwa 6 K. Bild 8 zeigt die Temperaturerhöhung in Ständer und Läufer von Maschine 1 bei Generator- und Umrichterspeisung.

Auch die Auswertung der aufgenommenen Spektren zeigt eine signifikante Zunahme des Oberschwingungsgehaltes bei Erhöhung der Umrichtereingangs-

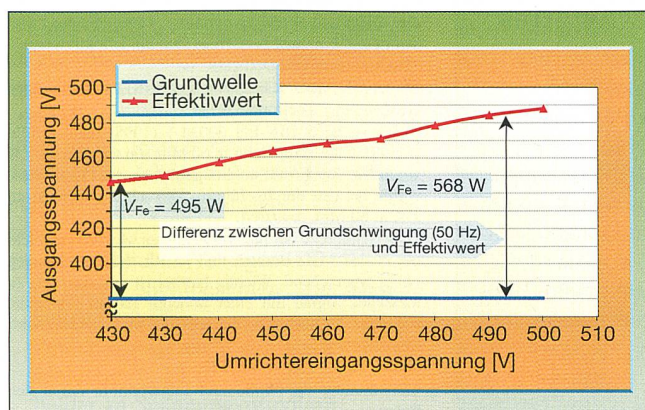


Bild 7 Grundschwingung und Effektivwert der Umrichterausgangsspannung bei Pulsumrichterspeisung  
Pulsumrichter: 4 kHz bei variabler Eingangsspannung

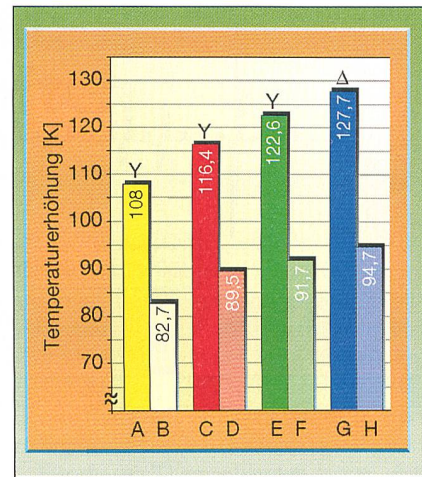


Bild 8 Temperaturerhöhung bei Umrichterspeisung bei Maschine 1

- A Läufertemperatur Netz 50 Hz
- B Statorübertemperatur Netz 50 Hz
- C Läufertemperatur Pulsumrichter 4 kHz Taktfrequenz
- D Statorübertemperatur Pulsumrichter 4 kHz Taktfrequenz
- E Läufertemperatur Umrichtereingangsspannung 500 V
- F Statorübertemperatur Umrichtereingangsspannung 500 V
- G Läuferübertemperatur Pulsumrichter 4 kHz Dreiecksschaltung
- H Statorübertemperatur Pulsumrichter 4 kHz Dreiecksschaltung

spannung von 400 V auf 500 V. Bild 9 zeigt das Spektrum für Maschine 2 (50 Hz, Belastung: 140 Nm).

Die Änderung der Maschinenschaltung von Stern in Dreieck führte ebenfalls zu einer deutlich messbaren Temperaturzunahme in Ständer und Läufer der Induktionsmaschine. Gegenüber der Sternschaltung wurden bei Dreieckschaltung unter gleichen Bedingungen Temperaturerhöhungen von etwa 10 K gemessen (Bild 8). Bei Maschine 2 – zusammen mit Umrichter 2 – ergaben sich Temperaturerhöhungen in der gleichen Grössenordnung.

Um einen konstanten Grundschwingungsfluss zu erhalten, wurde bei Stern- und Dreieckschaltung die Grundschwingungsspannung je Motorstrang konstant gehalten, d.h. die Umrichterausgangsspannung muss um den Faktor  $\sqrt{3}$  geändert werden. Da bei Speisung des Umrichters mit der gleichen Netzspannung auch die Zwischenkreisspannung in beiden Motorschaltungen die gleiche ist, muss sich zwangsläufig der Oberschwingungsgehalt der Motorspannung ändern. Der gleiche Effekt tritt ein, wenn der Umrichter bei gleicher Grundschwingungsausgangsspannung wahlweise aus einem 400- oder 500-V-Netz gespeist wird. In diesem Fall ändert sich die Zwischenkreisspannung um den Faktor 500/400,

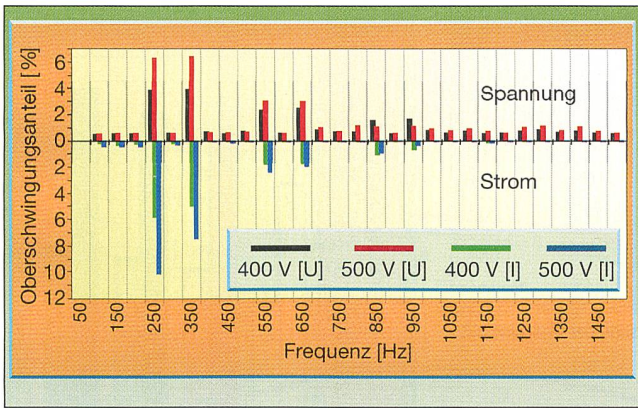


Bild 9 Zunahme des Oberschwingungsanteiles bei Erhöhung der Eingangsspannung  
Betrieb bei Bemessungsleistung, 1.–30. Oberschwingung, Grundfrequenz 50 Hz

[5] H. O. Seinsch: Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe. Teubner-Verlag, 1993.  
[6] DIN – EN 60034-1, 1998  
[7] G. Müller, E. Bunzel: Oberschwingungsverluste in Niederspannungs-Asynchronmaschinen. Veröffentlichung in «Die Antriebstechnik», 2000, Heft 8.  
[8] T. Vetter: Überwachung und Prädiktion des Erwärmungsverhaltens einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer mittels Parameterschätzung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1988.

während die Motorspannung konstant gehalten wird.

Aus den Bildern 8 und 9 lassen sich die Zusammenhänge zwischen dem Oberschwingungsgehalt der Motorspannungen und -ströme und den Erwärmungen der Maschine erkennen. Hieraus ergibt sich auch die Möglichkeit einer Vorhersage der zusätzlichen Maschinen-erwärmungen bei bekanntem Oberschwingungsspektrum des Umrichters [8]. Die Ergebnisse müssen auch bei der Verwendung druckfest gekapselter Motoren am Umrichter berücksichtigt werden<sup>9</sup>. Bei der Zündschutzart «druckfeste Kapselung» muss der Motor nicht zusammen mit dem Umrichtertyp, mit dem er später betrieben wird, geprüft werden.

Diese Ergebnisse sind für die Anwendungspraxis besonders bedeutsam, da Umrichter-gespeiste Antriebe häufig in Dreieckschaltung betrieben werden, da wegen der um den Faktor  $\sqrt{3}$  gegenüber der Sternschaltung verminderten Klemmenspannung der Maschine höhere Mo-

tordrehzahlen bei gleicher maximaler Umrichter Ausgangsspannung erreicht werden können, ohne in den Feldschwächbereich zu kommen. Dies ist besonders dann wichtig, wenn beispielsweise bei Nachrüstung des Antriebes mit einem Umrichter kein eigens für den Umrichterbetrieb ausgelegter Motor zum Einsatz kommt. Der Einfluss der Netz-nennspannung auf die Maschinenverluste muss berücksichtigt werden, da viele Industrienetze eine Betriebsspannung von 500 V aufweisen.

### Referenzen

[1] H. Dreier, H. Stadler, U. Engel, H. Wickboldt: PTB – Prüffregel für explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart «Erhöhte Sicherheit» Ex e., Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt 1978 ISSN 0341-7964.  
[2] H. Eckhardt: Grundzüge der elektrischen Maschinen. Teubner-Verlag, 1982.  
[3] K. Wolters: Drehzahlveränderbare Antriebe mit Asynchronmotoren. VDE-Verlag, 1994.  
[4] P. Vaske, J. H. Riggert: Elektrische Maschinen und Umformer. Teil 2: Berechnung el. Maschinen, Teubner-Verlag, 1973.

### Weiterführende Literatur

R. Fischer: Elektrische Maschinen. Hanser-Verlag, München, 1999.  
J. Xie, D. Hasenkopf, R. Schmidt: Messung von Oberschwingungen extrem kleiner Amplituden. Veröffentlichung in «Elektrische Bahnen», 2001, Heft 6-7.  
J. Paetzold, D. Blume: Oberschwingungen durch drehzahlgeregelte Antriebe im Eigenbedarf und Anforderungen an die Spannungsqualität. Veröffentlichung in «VGB Kraftwerkstechnik», 2000, Heft 1.  
G. Zimmert, W. Haut: Umrichterwerk Jübek: Erprobungsergebnisse und erste Betriebserfahrungen. Veröffentlichung in «Zeitschrift für Eisenbahnen und Verkehrstechnik», 1997, Heft 10.  
N. Beständig: Ermittlung der Ströme, Verluste und Erwärmungen eines Asynchron-Normmotors bei stationärem Betrieb an einem selbst geführten Stromrichter mit konstanter Eingangsspannung. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1986.  
G. Hagmann: Leistungselektronik. Grundlagen und Anwendungen, Aula-Verlag, 1993.

### Adressen der Autoren

Dr. Ing. Ulrich Engel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Labor «Explosionsgeschützte Maschinen», D- 38116 Braunschweig, ulrich.engel@ptb.de  
Dipl. Ing. Christian Lehrmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Labor «Explosionsgeschützte Maschinen», D- 38116 Braunschweig, christian.lehrmann@ptb.de  
Dr. Ing. Frank Lienesch, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Labor «Explosionsgeschützte Maschinen», D- 38116 Braunschweig, frank.lienesch@ptb.de

## Pertes dues aux harmoniques et à l'échauffement des machines à induction alimentées par convertisseur

### Détermination des pertes en fonction des paramètres d'exploitation

Le réglage de débit des turbomachines au moyen d'entraînements à convertisseur offre en comparaison d'autres méthodes – comme l'insertion d'éléments d'étranglement – un rendement beaucoup plus élevé et de plus vastes possibilités de configuration, mais pose à la machine et au convertisseur des exigences supplémentaires dont il faut tenir compte en particulier au niveau de la protection contre l'explosion; les parties du moteur pouvant être exposées à une atmosphère déflamante ne doivent dépasser les températures admises ni en service, ni en cas de dérangements, et le moteur ne doit pas produire d'étincelles. L'article montre l'impact de l'alimentation par convertisseur sur les pertes et l'échauffement d'un moteur standard du commerce.

<sup>1</sup> Stromzwischenkreisumrichter werden heute nur noch bei Grossantrieben im MW-Bereich angewendet.

<sup>2</sup> Der Ausdruck *Nennleistung* ist in Deutschland nicht mehr erlaubt. Der richtige Ausdruck ist *Bemessungsleistung*. Bei Strom und Leistung gilt Gleiches. In der Schweiz ist der Begriff «Nennleistung» gebräuchlich.

<sup>3</sup> Strom, Spannung, Frequenz, aufgenommene Wirkleistung. Bei Umrichterspeisung wird als Spannungswert die Grundschwingungsspannung herangezogen. Bei Strom und Leistung handelt es sich um Effektivwerte.

<sup>4</sup> Drehmoment und Drehzahl

<sup>5</sup> Gehäuse, Lager, Klemmenkasten usw. Die Messungen erfolgen über Thermoelemente.

<sup>6</sup> Dies ist nach DIN-EN 60034-1 (1998) dann erfüllt, wenn sich die Temperatur in 60 Min. um weniger als 2 K verändert. Zur Ermittlung möglichst genauer Ergebnisse wurde bei den durchgeführten Versuchen der Wert auf 1 K in 60 Min. reduziert.

<sup>7</sup> Die Bandbreite der hier verwendeten Messgeräte reicht bis in den MHz-Bereich und ist für diese Messungen völlig ausreichend. Wichtig hierbei ist nur, dass das zu messende Signal mit einer höheren als der doppelten Frequenz der höchsten Oberschwingung abgetastet wird (Shannon).

<sup>8</sup> 0,042 K/W · 153 W = 6,4 K

<sup>9</sup> Erwärmung der Welle und Lagerschilde durch den Rotor.