

# Untersuchungen zur Wicklungstemperaturbestimmung an frequenzumrichter gespeisten Maschinen während des Betriebes

G. Gramse, H. Pape, C.Lehrmann  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

## 1 Einleitung

Elektrische Maschinen werden wegen der mit ihrem Einsatz oftmals verbundenen Energieeffizienzsteigerungen auch in explosionsgefährdeten Bereichen zunehmend an Frequenzumrichtern betrieben. Hierbei ist wegen des großen Schadenspotentials beim Auftreten einer Explosion neben der sicheren Funktion und der Lebensdauer des Antriebes insbesondere die Sicherstellung des Explosionsschutzes auch bei Auftreten einer Störung, wie z.B. einer Überlastung, ein sehr wichtiger Punkt. Mögliche weitere Fehlerfälle sind neben der bereits erwähnten Überlastung Fehler des Umrichters, fehlerhafte Parametrierung des Gerätes sowie Motorbetriebsparameter außerhalb der Motorspezifikation. Diese Betriebszustände können bereits nach kurzer Zeit zu unzulässigen Erwärmungen der Maschine führen. Zum sicheren Betrieb muss daher eine Überwachungseinrichtung vorhanden sein, die den Antrieb im Fehlerfall abschaltet. Diese Überwachungseinrichtung fällt für den hier betrachteten Motor der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ (Kategorie 2 – Gerät) unter die Richtlinie 94/9/EG (Sicherheits-, Kontroll- u. Regelvorrichtung). Zur Zeit wird diese Schutzfunktionalität bei umrichter gespeisten Maschinen der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ über eine in der Umrichtersteuerung implementierte, drehzahlvariable Strombegrenzung in Kombination mit einem thermischen Maschinenschutz durch in die Wicklung eingebettete Kaltleiter zusammen mit einem zertifizierten Kaltleiterauslösegerät sichergestellt [1]. Auf den Kaltleiter kann verzichtet werden, wenn die Stromüberwachung und – auswertung des Frequenzumrichters gemäß Richtlinie 94/9/EG funktionsgeprüft und zertifiziert wurde. Diese Vorgehensweise wird jedoch von den Frequenzumrichterherstellern wegen des Aufwandes und der Einschränkungen bei nachträglichen Änderungen am Umrichter nicht gewünscht. Eine Möglichkeit der Vereinigung der Wünsche der Anlagenbetreiber nach einer möglichst einfachen Installation des Motors (Verzicht auf das Kaltleiterauslösegerät) und des Umrichterherstellers (möglichst Verwendung eines Standardmodelles) ist die Verwendung eines zertifizierten Motorschutzgerätes analog zum netz gespeisten Motor.

Die Funktionsweise des Motorschutzgerätes beruht dabei auf dem Schutzgerät für einen netzgespeisten Motor, bei dem die Maschinentemperatur über das thermische Modell der Maschine, die umgesetzte Verlustleistung (abhängig vom Maschinenstrom) und die Zeit berechnet wird und bei unzulässigen Werten eine Abschaltung erfolgt. Eine Bestimmung der tatsächlichen Maschinentemperatur erfolgt dabei nicht. Dieses Verfahren hat die Nachteile, dass bei blockierten Kühlluftwegen die ausgefallene Kühlung nicht erkannt wird und daher der Motor unbemerkt unzulässige Temperaturen annehmen kann.

Erfolgt hingegen eine direkte Temperaturbestimmung, werden auch Fehler im Kühlsystem erkannt. Außerdem können bei Kenntnis der genauen Maschinentemperatur die zulässigen Überlastzeiten ohne Abstriche bei der Sicherheit eventuell verlängert werden.

Zur Bestimmung bzw. Abschätzung der Temperatur einer elektrischen Maschine stehen im Wesentlichen drei Ansätze zur Verfügung:

- Die direkte Messung mittels in der Wicklung eingebetteter Pt100 - Temperaturfühler bzw. Kaltleiter
- Die Abschätzung über ein im Schutzgerät hinterlegtes thermisches Maschinenmodell und den Maschinenstrom in Abhängigkeit der Frequenz und der Zeit. Unsicherheiten: Umgebungstemperatur, Genauigkeit des thermischen Modells der Maschine, keine Berücksichtigung der tatsächlichen Kühlleistung.
- Der Ansatz über die Parameteridentifikation, wobei während des Betriebes die Bestimmung eines temperaturabhängigen Parameters der Maschine, z.B. des Statorwiderstandes, erfolgt und für die Temperaturermittlung herangezogen wird. Schwierigkeit dabei: Die Identifikation von Maschinenparametern während des Betriebes stellt sehr hohe Anforderungen an die Messtechnik und die Algorithmen zur Messdatenverarbeitung.

Das Ziel bei der Untersuchung verschiedener in der Literatur beschriebener Ansätze zur Parameteridentifikation ist dabei gewesen, ein Verfahren zu finden, welches mit möglichst geringem hard- und softwaretechnischem Aufwand die Temperatur der Maschine bewerten kann. Da es sich bei den Temperaturänderungen hier um langsame Vorgänge im Minutenbereich handelt (zusätzlich ist ja noch die Stromüberwachung des Schutzgerätes aktiv, die eine starke Überlastung bzw.

Blockierung des Motors erkennen und innerhalb weniger Sekunden abschalten würde), werden an die Bewertung keine zeitkritischen Anforderungen gestellt. Des weiteren ist es nicht das Ziel, die Maschine bis zu den thermischen Grenzen für Stator und Rotor auszunutzen. In Kombination mit der drehzahlvariablen Stromüberwachung ist es daher ausreichend, nur die Statortemperatur oder aber eine Größe zu identifizieren, die die Stator und Rotortemperatur mit unterschiedlicher Gewichtung enthält.

Die Statorübertemperatur kann basierend auf dem Temperaturkoeffizienten unter Verwendung der Gleichung (1) berechnet werden [2]:

$$\vartheta_S = \vartheta_{S0} + \frac{R_S - R_{S0}}{\alpha_S \cdot R_{S0}} \quad (1)$$

$\vartheta_S$  = Statortemperatur

$\vartheta_{S0}$  = Statortemperaturreferenz

$R_S$  = Statorwiderstand

$R_{S0}$  = Statorwiderstandreferenz

$\alpha_S$  = Temperaturkoeffizient

Die Zuverlässigkeit zur Bestimmung der Temperatur des Stators basiert auf der Genauigkeit der Bestimmung des Statorwiderstandes und der Genauigkeit des Temperaturkoeffizienten. Da die Überwachung der Maschine während des Betriebes erfolgen soll, muss der Statorwiderstand bei drehender Maschine ermittelt werden. Dafür wird der Grundschwingung ein zusätzliches Sinussignal überlagert und unter Zuhilfenahme des Scheinwiderstandes  $Z$  und des Phasenwinkels  $\varphi$  schließlich der Statorwiderstand bestimmt.

## 2 Grundlagen zur Maschinentemperaturbestimmung mittels Oberschwingungen

Das vereinfachte elektrische Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine besteht aus einem Netzwerk von Induktivitäten und ohmschen Widerständen (Bild 1) [3]. Die Induktivitäten können dabei als temperaturunabhängig angesehen werden. Es

bleiben die ohmschen Widerstände  $R_S$  und  $R'_r$ . Da die Größe  $R'_r = R'_r \cdot \frac{1}{s}$  auch eine

Abhängigkeit vom Maschinenschlupf  $s$  aufweist, ist sie somit bei reinen Grundschwingungsbetrachtungen auch drehzahl- und somit belastungsabhängig. Eine Verwendbarkeit im Rahmen des Grundschwingungersatzschaltbildes setzt daher eine präzise Kenntnis der Motordrehzahl voraus, was in der Praxis oft nicht

gegeben ist. Wird eine blockierte Maschine angenommen, so entfällt die schlupfabhängige Komponente ( $s = 1$ ). Als Vereinfachung kann die Hauptinduktivität  $L_h$  bei Betrachtung des Oberschwingungsverhaltens wegen des im Verhältnis zu den Streuinduktivitäten sehr viel größeren Blindwiderstandes vernachlässigt werden.

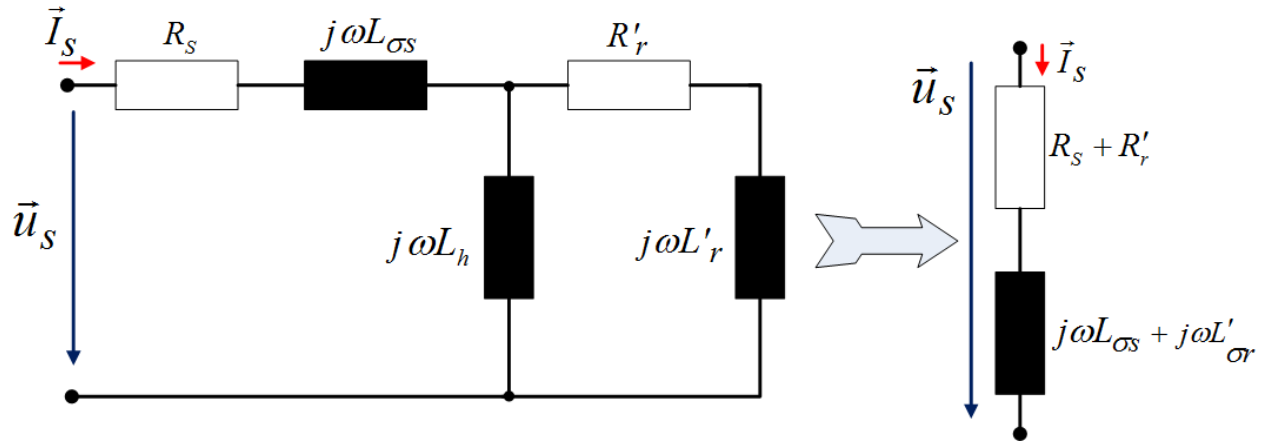


Bild 1: vereinfachtes Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Es gilt:

$$\underline{u}_S = (R_S + R'_r + j\omega(L_{\sigma S} + L'_{\sigma r})) \cdot \underline{i}_S = \underline{Z}_S \cdot \underline{i}_S \quad (2)$$

$$|\underline{Z}_S| = |R_S + R'_r + j\omega(L_{\sigma S} + L'_{\sigma r})| = \frac{|\underline{u}_S|}{|\underline{i}_S|} = \frac{u_{S,eff}}{i_{S,eff}} \quad (3)$$

Dabei sind  $L_{\sigma S}$  die verkettete Statorstreuinduktivität,  $L'_{\sigma r}$  die verkettete Rotorstreuinduktivität,  $R_S$  der verkettete ohmsche Statorwiderstand und  $R'_r$  der verkettete ohmsche Rotorwiderstand. Der Phasenwinkel  $\varphi$  der verketteten Maschinenimpedanz (Gleichung 4) ist zwischen der Spannung  $\underline{u}_S$  und dem Strom  $\underline{i}_S$  in Bild 1 gegeben.

$$\varphi = \arctan \frac{R_S + R'_r}{L_{\sigma S} + L'_{\sigma r}} \quad (4)$$

Aus der Maschinenimpedanz (Gleichung 3) und dem Phasenwinkel (Gleichung 4) wird der temperaturabhängige, über die Klemmen messbare ohmsche Maschinenwiderstand berechnet.

$$R'_S + R'_r = \frac{u_{S,eff}}{i_{S,eff}} \cdot \cos \varphi = |\underline{Z}| \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

Eine Schwankung der Temperatur der Asynchronmaschine verursacht eine Veränderung des Statorwiderstandes  $R_S$  und des Rotorwiderstandes  $R_R$ , diese Widerstandsänderungen sind lineare Funktionen, die von den Materialeigenschaften

jeder Wicklung abhängen [4]. Unter der Vereinfachung, dass die Stator- und die Rotorwicklungen aus dem gleichen Material hergestellt sind und gleiche Temperatur haben, ergibt sich daraus für den Maschinenwiderstand  $R_M$ :

$$R'_M = R'_{M0} + \alpha'_S \cdot R'_{M0} (\vartheta_S - \vartheta_0) \quad (6)$$

Nun ist hinreichend untersucht und bestätigt, dass für die elektrischen Maschinen das Superpositionsprinzip (Bild 2) bei Speisung mit überlagerten Wechselspannungen verschiedener Frequenzen anwendbar ist [1]. Ein weiterer für den Ansatz wichtiger Zusammenhang ist, dass der Maschinenschlupf für die Oberschwingungen der Versorgungsspannung hinreichend genau mit 1 angenommen werden kann. Die Maschine kann vor diesem Hintergrund in zwei Teilen modelliert werden. Der erste Teil dieses Modells, die „Oberschwingungsmaschine“, befindet sich dabei nahezu im festgebremsten Zustand und wird unabhängig von der Drehzahl des zweiten Teils, der „Grundschwingungsmaschine“, mit dem Schlupf  $s = 1$  und somit mit dem mechanischen Widerstand  $R_{mech} = 0$  betrieben.

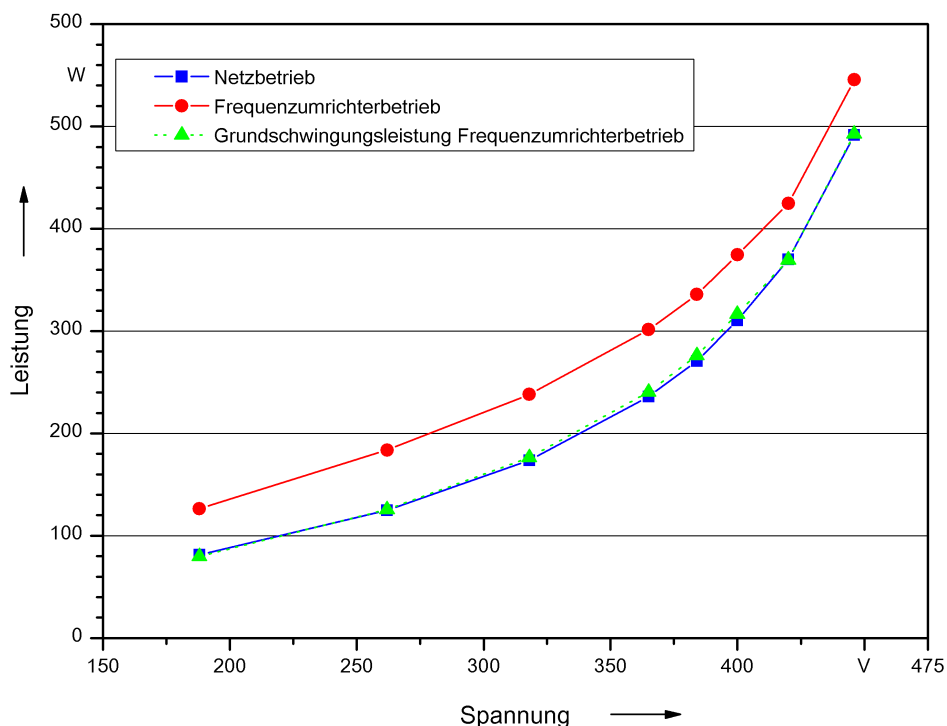


Bild 2: Verlauf der Leerlaufverluste für Netz- und Umrichterbetrieb, Grundschwingungsfrequenz 50 Hz

Hierdurch wird es theoretisch möglich, über eine Messung des Oberschwingungsstromes und der Oberschwingungsspannung die komplexe

Impedanz der Maschine zu bestimmen und, gemäß des vereinfachten Ersatzschaltbildes über den Betrag von Strom und Spannung sowie des zugehörigen Phasenwinkels, eine Zerlegung in den ohmschen und den induktiven Anteil vorzunehmen. Der ohmsche Widerstand erhöht sich durch Stromverdrängungseffekte dabei gegenüber dem Gleichstromfall [1].

Detaillierte Betrachtungen hierzu sind in [5] ausgeführt.

Der Kaltwiderstand bei Oberschwingungsfrequenz kann durch eine einmalige „Lernmessung“ des Systems bei bekannter Maschinentemperatur, vorzugsweise Raumtemperatur, messtechnisch ermittelt werden. Es ist daher keine detaillierte Berechnung der frequenzabhängigen Stromverdrängungseffekte erforderlich. Kommen für Stator und Rotor unterschiedliche Materialien zum Einsatz, z.B. Kupfer für die Statorwicklung und Aluminium für den Rotor, ist es zur genauen Temperaturbestimmung erforderlich, die Aufteilung des resultierenden ohmschen Widerstandes auf Stator und Rotor abzuschätzen. Der frequenzabhängige Widerstandserhöhungsfaktor des Rotorkäfigs kann dabei über die Läufernutform gemäß Näherungsgleichungen oder die Methode der Finiten Elemente (numerische Berechnung) abgeschätzt werden.

Über die temperaturabhängige Widerstandserhöhung, die z.B. für Kupfer gemäß Gleichung

$$\Theta_{Cu} = \frac{R_{w,Cu} - R_{k,Cu}}{R_{k,Cu}} (235 + \vartheta_{k,Cu}) + (\vartheta_{k,Cu} - \vartheta_{Kü,Cu}) \quad (8)$$

und für Aluminium gemäß Gleichung

$$\Theta_{Al} = \frac{R_{w,Al} - R_{k,Al}}{R_{k,Al}} (225 + \vartheta_{k,Cu}) + (\vartheta_{k,Cu} - \vartheta_{Kü,Cu}) \quad (9)$$

angesetzt werden kann [6], kann dann die Übertemperatur z.B. für die Statorwicklung berechnet werden. Es bedeuten:

$\Theta$  = mittlere Wicklungsübertemperatur in K

$R_k$  = Wicklungswiderstand der kalten Wicklung

$\vartheta_k$  = Temperatur der kalten Wicklung in °C

$R_w$  = Wicklungswiderstand der betriebswarmen Wicklung

$\vartheta_{Kü}$  = Temperatur des Kühlmittels am Ende der Erwärmungsprüfung in °C

### 3 Erste Untersuchungen zur Parameteridentifikation

In einer ersten Untersuchung sollte geklärt werden, ob es prinzipiell möglich ist, die Temperatur einer Asynchronmaschine über die Auswertung der Oberschwingungsimpedanz zu bestimmen. Als Spannungsquelle wurde für diesen Versuch ein dreiphasiges Leistungsverstärkersystem verwendet, welches es

ermöglicht, zusätzlich zur Grundschiwingungsspannung ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) eine zusätzliche Spannungsüberschwingung definierter Amplitude und Frequenz additiv zu überlagern. Ein Blockschaltbild des Aufbaus ist in Bild 3 dargestellt. Für diese Überschwingung wurden dann nach Signalfilterung der Real- und der Imaginärteil bestimmt und über die Änderung des Realteiles (ohmscher Anteil) während des Betriebes der Maschine die Temperaturzunahme berechnet. Für die Messung der elektrischen Größen wurde ein Digital-Speicheroszilloskop verwendet, dessen Eingänge mit den internen Strom- und Spannungswandlern der Verstärker verbunden gewesen sind.

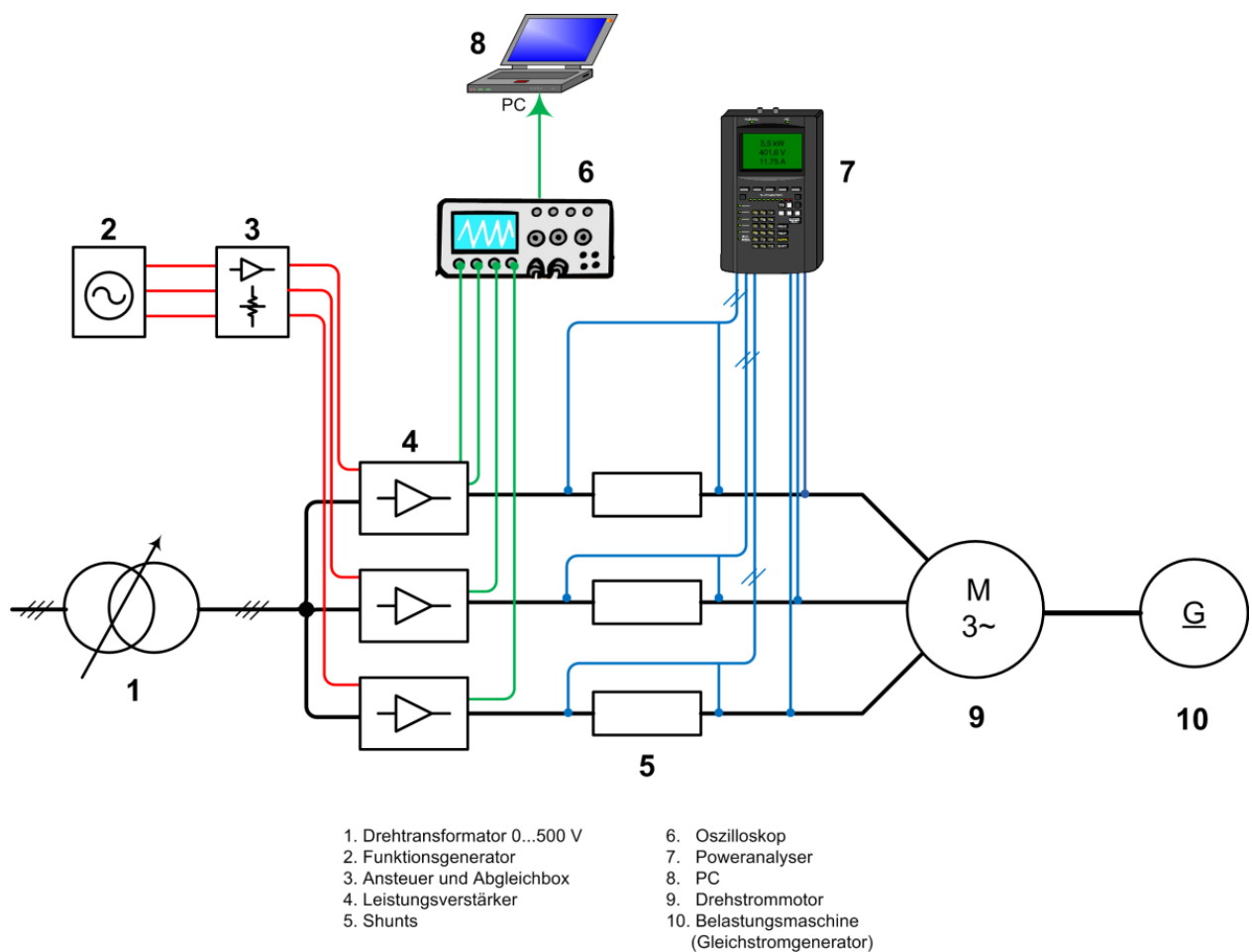


Bild 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Maschinenimpedanz

Die Auswertungen zeigten für alle untersuchten Überschwingungsfrequenzen einen deutlich erkennbarer Zusammenhang zwischen dem Verlauf des bestimmten ohmschen Maschinenimpedanzanteiles während des Betriebes und der nach dem Abschalten der Maschine gemessenen Statorwicklungstemperatur. Dieses entspricht auch den in Veröffentlichungen anderer Autoren zu diesem Sachverhalt dargestellten

Ergebnissen [7]. Bild 4 stellt das Ergebnis der in der PTB durchgeführten Untersuchungen für die Maschinenimpedanz bei überlagerten Oberschwingungen der Frequenzen 380 Hz und 770 Hz dar. Die ermittelte Impedanz ist dabei unabhängig von der Höhe der Oberschwingungsamplitude, jedoch wird es mit zunehmender Reduzierung der überlagerten Oberschwingungsspannung immer schwieriger, die sehr kleinen Oberschwingungsströme (mA-Bereich) im gemessenen Maschinenstrom zu detektieren und zu verarbeiten.

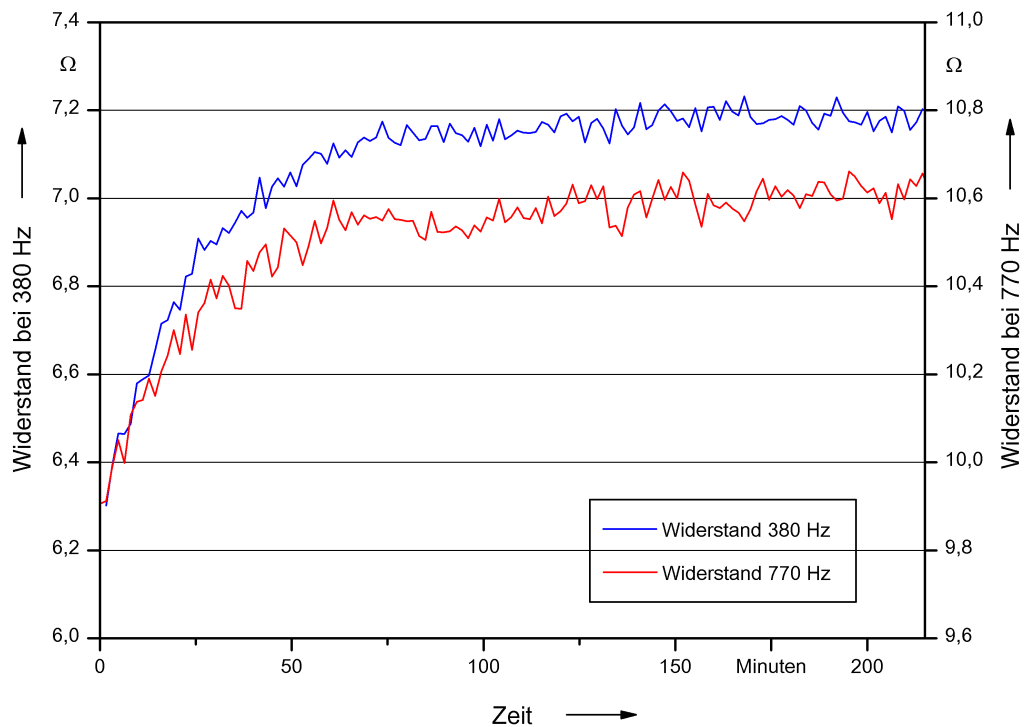


Bild 4: Berechneter ohmscher Maschinenimpedanzanteil

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, inwieweit die während des Betriebes erfasste Temperaturänderung auch bei Laständerungen die tatsächliche Temperatur abbildet. Hierzu wurde eine Maschine mit einem bereits bei der Herstellung in die Wicklung eingebrachten Thermoelement verwendet. Das Ergebnis des Versuches ist in Bild 5 dargestellt.



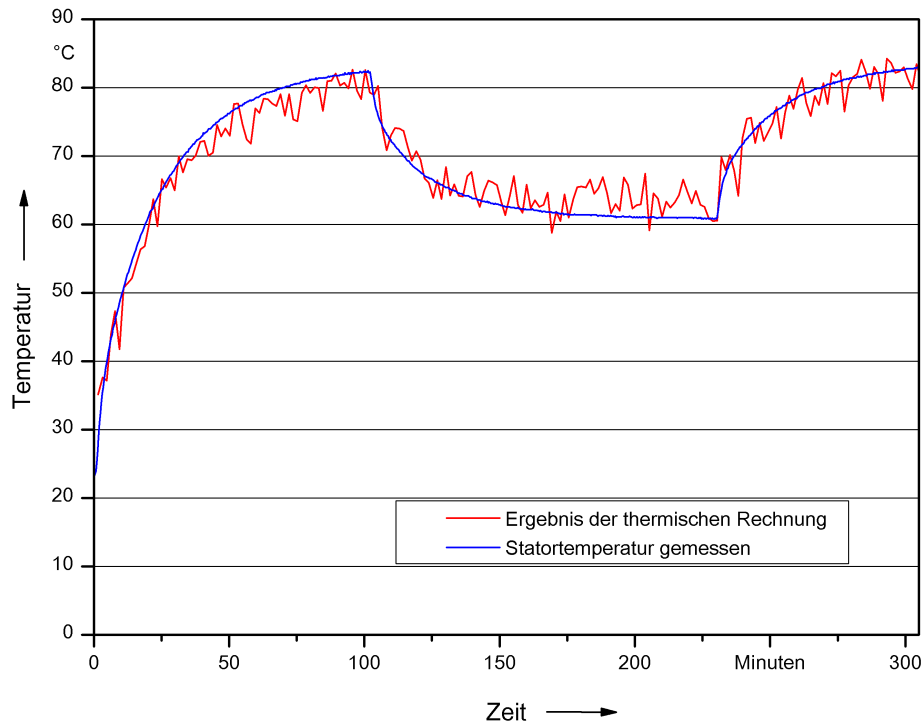


Bild 5: Vergleich der berechneten Temperatur mit dem gemessenen Wert

Bei der Auswertung zeigte sich, dass die berechneten Temperaturen alle innerhalb eines Intervalls von 10 K um den gemessenen Wert lagen.

Für den praktischen Einsatz ist das hier beschriebene Verfahren jedoch noch nicht geeignet, da in der praktischen Anwendung die Maschinen am Frequenzumrichter betrieben werden und keine derart idealisierten Randbedingungen wie bei der Speisung mittels Leistungsverstärkersystem vorliegen. Anstelle einer einzelnen, gezielt überlagerten Spannungsüberschwingung enthält das Umrichterausgangssignal ein Gemisch aus sehr vielen verschiedenen Oberschwingungen, wobei der Schwerpunkt im Bereich der Taktfrequenz und deren Umgebung liegt. Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass die Taktfrequenz aktueller Umrichter im Bereich einiger Kilohertz liegt, und die Impedanz in diesem Frequenzbereich relativ große Werte annimmt. Es muss auch berücksichtigt werden, dass sich die Impedanz der Maschine in Abhängigkeit der Rotorstellung periodisch verändert und daher das Impedanzsignal nicht konstant ist, sondern eine überlagerte, in der Frequenz von der Motordrehzahl abhängige, Oberschwingung enthält (Bild 6).

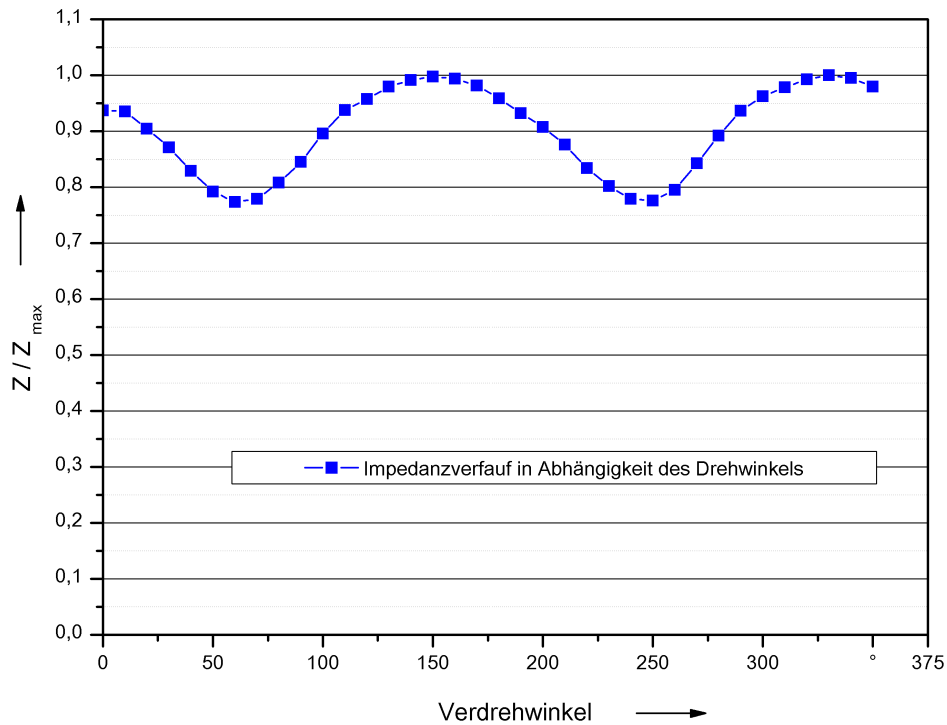


Bild 6: Beispielhafter Impedanzverlauf in Abhängigkeit des Drehwinkels, Motorbemessungsleistung 0,75 kW

Hierzu werden zur Zeit gerade verschiedene Filter- und Signalaufbereitungsalgorithmen untersucht und deren Anwendbarkeit geprüft. Des weiteren wird untersucht, das in Bild 6 dargestellte Ergebnis nutzbringend einsetzen zu können. Denkbar wäre hier z.B. die Frequenz der Einhüllenden zu bestimmen und darüber eine exakte gerberlose Drehzahlbestimmung zu ermöglichen.

#### 4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die Möglichkeit besteht, die Maschinentemperatur während des Betriebes über eine der Grundschwingungsspannung überlagerten Oberschwingung reproduzierbar zu bestimmen. In einem ersten Schritt wurde zur Versorgung der Maschine und Bereitstellung der zur Messung verwendeten Oberschwingung ein Leistungsverstärkersystem verwendet, welches bezüglich der Signalform ideale Verhältnisse schafft.

Zur Zeit wird gerade untersucht, inwieweit dieses Verfahren an frequenzumrichter gespeisten Antrieben einsetzbar ist, und ob die durch den Umrichtereinsatz parasitär vorhandenen Spannungsüberschwingungen als

Anregungssignal für die Temperaturbestimmung verwendet werden können. Weiterhin ist zukünftig auch eine Betrachtung dieses Verfahrens unter den Aspekten der Messunsicherheit geplant.

## 5 Literatur

- [1] Lehrmann, C.: Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichter gespeiste Käfigläufer der Zündschutzart "Erhöhte Sicherheit", Dissertation Leibniz-Universität Hannover, 2006, Shaker-Verlag Aachen
- [2] Sang-Bin Lee, Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley, David J. Gritter  
An Evaluation of Model-Based Stator Resistance Estimation for Induction Motor Stator Winding Temperature Monitoring  
IEEE Transactions on Energy Conversion  
VOL. 17, No.1, Page 7 – 15, March 2002
- [3] D. W. Novotny, T. A. Lipo  
Vector Control and Dynamics of AC Drives  
New York: Oxford University Press 1996
- [4] R. Beguenane, M.E.H. Benbouzid  
Induction Motors Thermal Monitoring by Means of Rotor Resistance Identification  
IEEE Transactions on Energy Conversion  
VOL. 14, No.3, Page 566 – 570, September 1999
- [5] Richter, R.; Über zusätzliche Stromwärme, III.Nutenwicklungen mit unterteilten Leitern; Archiv für Elektrotechnik, Band 5, 1916, Heft 1-2, S. 1-52
- [6] DIN-EN 60034-1: 2004; Drehende elektrische Maschinen, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten, Beuth-Verlag, Berlin
- [7] Fernando Briz, Michael W. Degner, Juan M. Guerrero, Alberto B. Diez  
Temperature Estimation in Inverter-Fed Machines Using High-Frequency Carrier Signal Injection; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 44, No.3, Page 799 – 808, May/June 2008