

# **Umrichtergespeiste Antriebe - Messung und Vorhersage der auftretenden Verluste und Erwärmungen unter den Aspekten des Explosionsschutzes**

Dipl. Ing. Christian Lehrmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

## **Converter-fed drives – measurement and prediction of the occurring losses and heatings from explosion protection aspects**

The contribution deals with the factors influencing the converter-specific losses as well as with a novel procedure for the computational estimate of the heatings caused by the converter from the point of view of explosion protection.

First the dependencies of the machine losses on the operating parameters of the frequency converter is described and a procedure for the metrological determination of the losses and heating presented. Then a linear power amplifier system to simulate the converter is presented and a procedure is described which allows the converter-specific harmonics losses to be estimated computationally. Next, the influences of the converter's supply voltage and of the line length between converter and motor on the machine losses are dealt with and the influence of the speed of self-ventilated machines on the resistance to heat transfer to the environment is described. Finally, an outlook on a feasible motor protection concept is given.

## **1. Anwendungsgebiete umrichtergespeister Antriebe**

Umrichtergespeiste Antriebe werden in einem immer breiter werdenden Bereich in der Anlagentechnik eingesetzt. Die Vorzüge der Umrichterspeisung sind im Wesentlichen eine deutlich bessere Dosierbarkeit der Antriebsleistung und somit die Ermöglichung produkt- und maschinenschonenderer Produktionsweisen sowie ein großes Energieeinsparungspotential, welches besonders bei Strömungsmaschinen im Vergleich zur konventionellen Förderleistungsanpassung über Drosselorgane enorm ist. Dies ist in Zeiten hoher Energiepreise ein Hauptargument für die Nachrüstung bestehender Antriebe.

Aufgrund dieser und weiterer Vorteile erobern sich umrichtergespeiste Antriebe in der Industrie immer breitere Anwendungsgebiete, wobei hierbei auch der Anteil der in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzten Antriebseinheiten zunimmt. Für eine Zulassung eines umrichtergespeisten Antriebes im explosionsgefährdetem Bereich müssen die maximal erreichten Temperaturen bekannt sein und eine Überschreitung der zulässigen Temperaturen während

des Betriebes auch bei anzunehmenden Fehlerfällen sicher ausgeschlossen werden. Für die Ermittlung und Quantifizierung der einzelnen Einflussfaktoren wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

## 2. Messung der Verluste und Erwärmungen umrichter gespeister Maschinen

Ein möglicher Versuchsaufbau für die Messung der Verluste und Erwärmungen umrichter gespeister Maschinen ist in Abbildung 1 dargestellt. Hierbei wird die Maschine über einen Umrichter gespeist und mit einem Gleichstromgenerator mit dem gewünschten Drehmoment belastet. Aus der Differenz zwischen der von der Maschine aufgenommenen elektrischen Leistung und der aus Drehmoment und Drehzahl ermittelten mechanischen Leistung werden die Maschinenverluste bestimmt (direkte Verlustmessung). Die Gehäusetemperaturen werden über Thermoelemente bestimmt, die Wicklungstemperaturen über die Widerstandserhöhung sowie über Thermoelemente im Wickelkopf. Der Umrichter wird über einen Stelltrafo eingespeist, so dass auch der Einfluß der Spannung des speisenden Netzes untersucht werden kann.

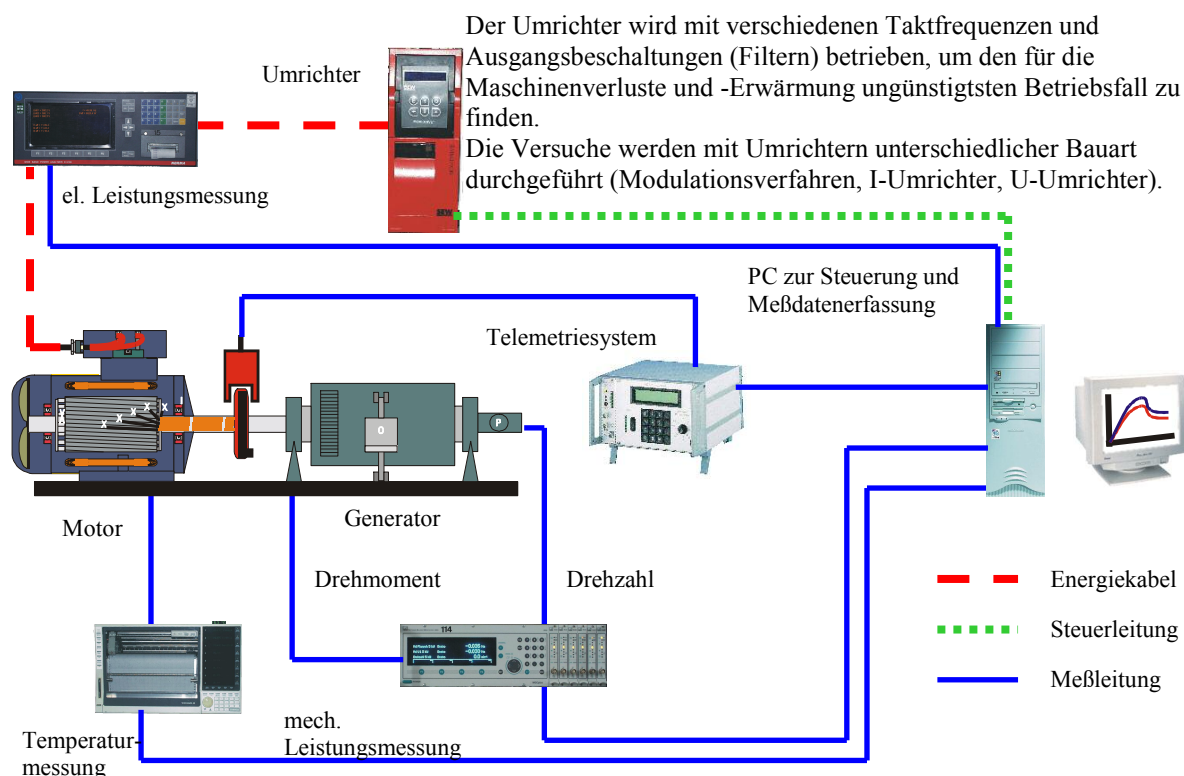


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Temperatur – u. Verlustmessung

Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, über ein Telemetriesystem die Rotortemperatur während des Betriebes zu messen und somit bereits während des Versuches den Einfluß von Parameteränderungen am Umrichter auf die Rotorerwärmung zu beobachten.

### **3. Ursachen für die zusätzlichen Erwärmungen**

Die zusätzlichen Erwärmungen am Umrichter haben ihre Ursache in den umrichterbedingten Zusatzverlusten und den schlechteren Kühlverhältnissen eigenbelüfteter Maschinen beim Betrieb mit kleinen Drehzahlen. Die Verluste sind zum Einen durch die Oberschwingungsbedingten zusätzlichen Eisen- u. Ummagnetisierungsverluste (Abbildungen 2,3), zum Anderen durch Stromverdrängungseffekte aufgrund der Stromüberschwingungen begründet.

Die Oberschwingungen sind von der Konzeption (Modulationsverfahren, Auslegung des Zwischenkreises) und von den Betriebsparametern des Umrichters abhängig. So führt eine Erhöhung der Umrichtereingangsspannung von 400 V auf 500 V bei Geräten mit ungesteuertem Gleichrichter zu signifikant höheren Erwärmungen (Betrieb an 500 V-Industrienetzen). Einen ähnlichen Effekt bewirkt die Änderung der Maschinenschaltung von Stern auf Dreieck, weil hierdurch ebenfalls die Differenz zwischen der Zwischenkreisspannung und der Grundschwingung der Umrichterausgangsspannung zunimmt. Die Eisenverluste sind außerdem von der Pulsfrequenz des Umrichters abhängig. Eine Erhöhung führte im Versuch zu einer geringfügigen Zunahme der Eisenverluste, vermutlich aufgrund der besseren Stromkurvenform (bessere Annäherung an den Sinus) jedoch zu einer leichten Temperaturverminderung im Rotor der Maschine.

Die zusätzlichen Erwärmungen durch Stromüberschwingungen treten vorrangig bei über Stromzwischenkreisumrichter gespeisten Antrieben auf, da hier der Strom blockförmig auf die Maschine geschaltet wird und durch den nahezu rechteckförmigen Verlauf (sehr breites Oberschwingungsspektrum) den Worst-Case-Fall darstellt.

Dies sind heute überwiegend Antriebe im MW-Bereich, bei Altanlagen jedoch werden I-Umrichter auch bei deutlich kleineren Leistungen eingesetzt.

Die Stromverdrängungseffekte treten aufgrund der hier verwendeten sehr großen Leiterquerschnitte überwiegend im Rotor der Maschine auf und führen zu einer deutlichen Temperaturerhöhung im Vergleich zum Netzbetrieb.

Dies ist für den Explosionsschutz besonders kritisch, da sich der Läufer während des Betriebes einer direkten Temperaturmessung entzieht.

Ein weiteres Problem stellt die Kühlung bei eigenbelüfteten Maschinen dar. Wird die Maschine längere Zeit bei kleinen Drehzahlen (z.B. unter 20 Hz) betrieben, so nimmt die Temperatur aufgrund des höheren Wärmeübergangswiderstandes an die Umgebung stark zu.

Extrem ungünstig wirkt sich jedoch auch der Betrieb bei Unterspannung (Schlupfvergrößerung!) auf die Maschinenerwärmung aus, hierzu mehr unter Punkt 5.2)

Diese Effekte müssen für den Explosionsschutz unbedingt beachtet werden und erfordern eine genaue Untersuchung des Einflusses der Umrichterbetriebsparameter auf die Maschinenverluste und Erwärmungen.

Das Ziel ist, zukünftig sowohl das Sicherheitsniveau während des Betriebes zu erhöhen, als auch das Zulassungsverfahren für Maschinen der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ durch eine generelle Zulassung für den Umrichterbetrieb unter Beachtung der noch festzulegenden Umrichterbetriebsparameter zu vereinfachen und den Zwang zur Kombinationsprüfung Motor-Umrichter aufzuheben.

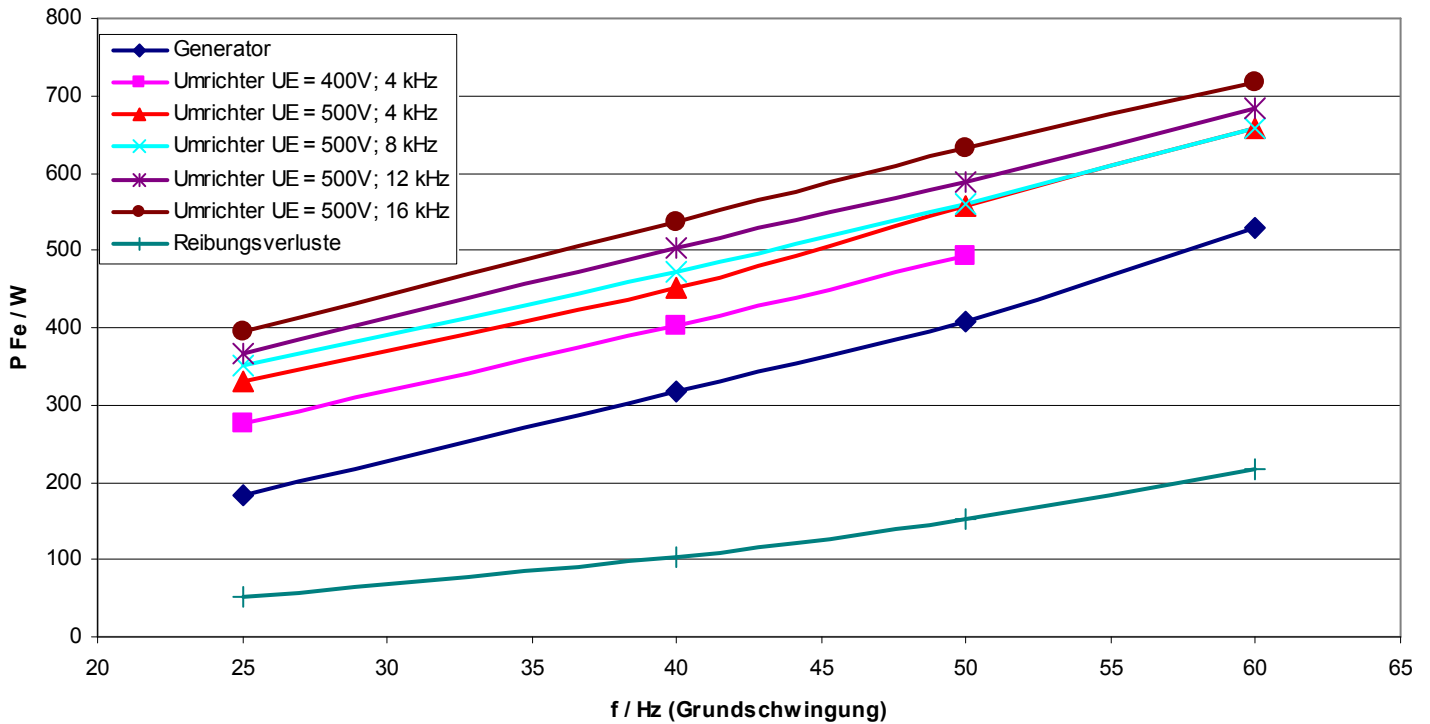


Abbildung 2: Eisenverluste bei verschiedenen Betriebsparametern

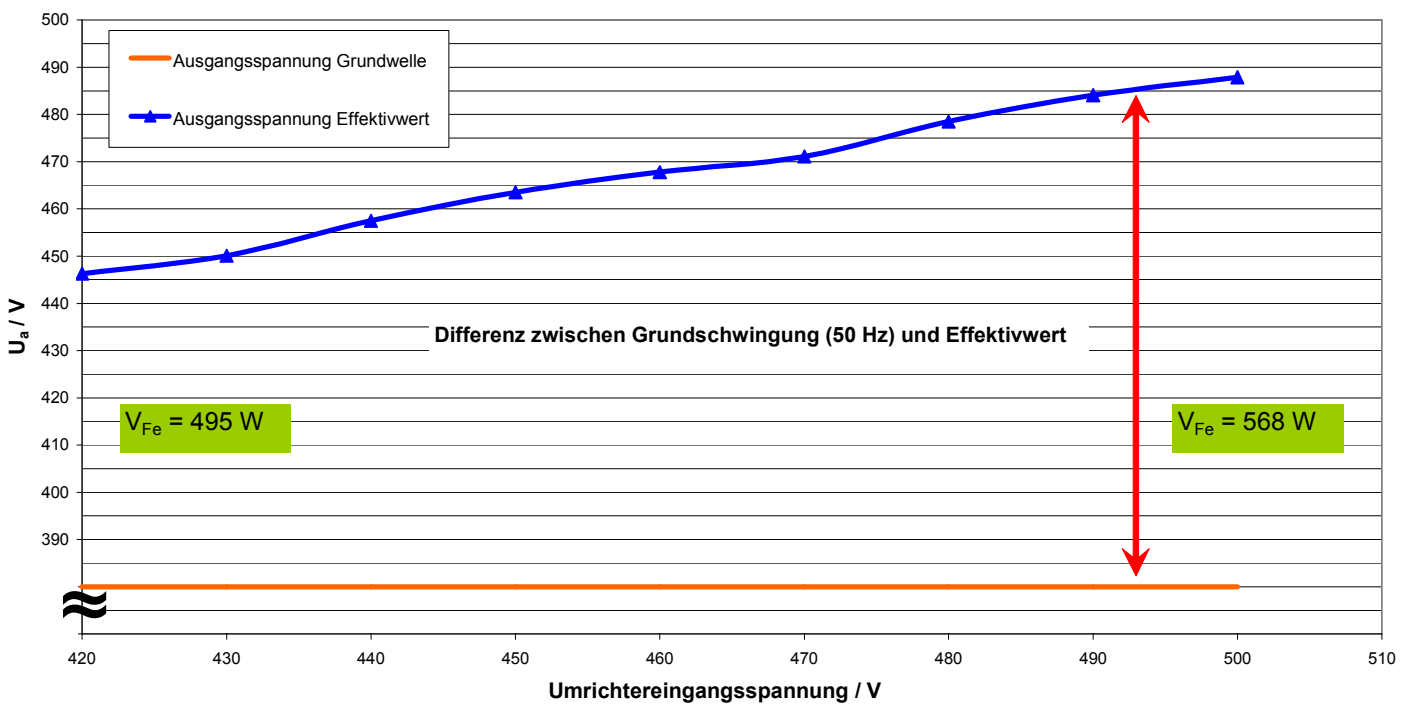


Abbildung 3: Eisenverluste in Abhängigkeit von der Umrichtereingangsspannung

## 4. Umrichternachbildung über ein Leistungsverstärkersystem

Zur Ergründung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Umrichterparametern und den zusätzlichen Maschinenverlusten wurde ein Leistungsverstärkersystem (Linearverstärker), bestehend aus einem Arbiträrfunctionsgenerator sowie den 3 Leistungsverstärkern (einer pro Phase) aufgebaut. Dieses System ermöglicht die Erzeugung nahezu beliebiger Signalformen. Die Leistungsdaten sind  $f_{\max} = 10 \text{ kHz}$ ,  $I_{\max} = 32 \text{ A}$ ,  $U_{\max} = 500 \text{ V}$ ,  $S_{\max} = 27 \text{ kVA}$ . Das Blockschaltbild ist in Abbildung 4 dargestellt.

Über eine im Laboratorium erstellte Software ist es möglich, die Amplitude jedes gewünschten Frequenzanteiles im Signal bis hinauf zu 10 kHz einzustellen. Zur Minimierung der in den Verstärkern umgesetzten Verlustleistung werden die Verstärker netzseitig über einen Stelltrafo mit der für das geforderte Ausgangssignal minimal erforderlichen Spannungshöhe versorgt.

Die Verstärker bieten nun zum Einen die Möglichkeit, direkt über das Erwärmungsverhalten den Einfluß der einzelnen Spektralanteile auf die Maschine zu ergründen, zum Anderen ist es möglich, eine Impedanzkennlinie der Maschine mit dem zugehörigen Leistungsfaktor über der Frequenz aufzuzeichnen. Diese maschinenspezifische Kennlinie dient dann als Basis für die Vorausberechnung des Maschinenverhaltens bei gegebenen Umrichter Ausgangsparametern.

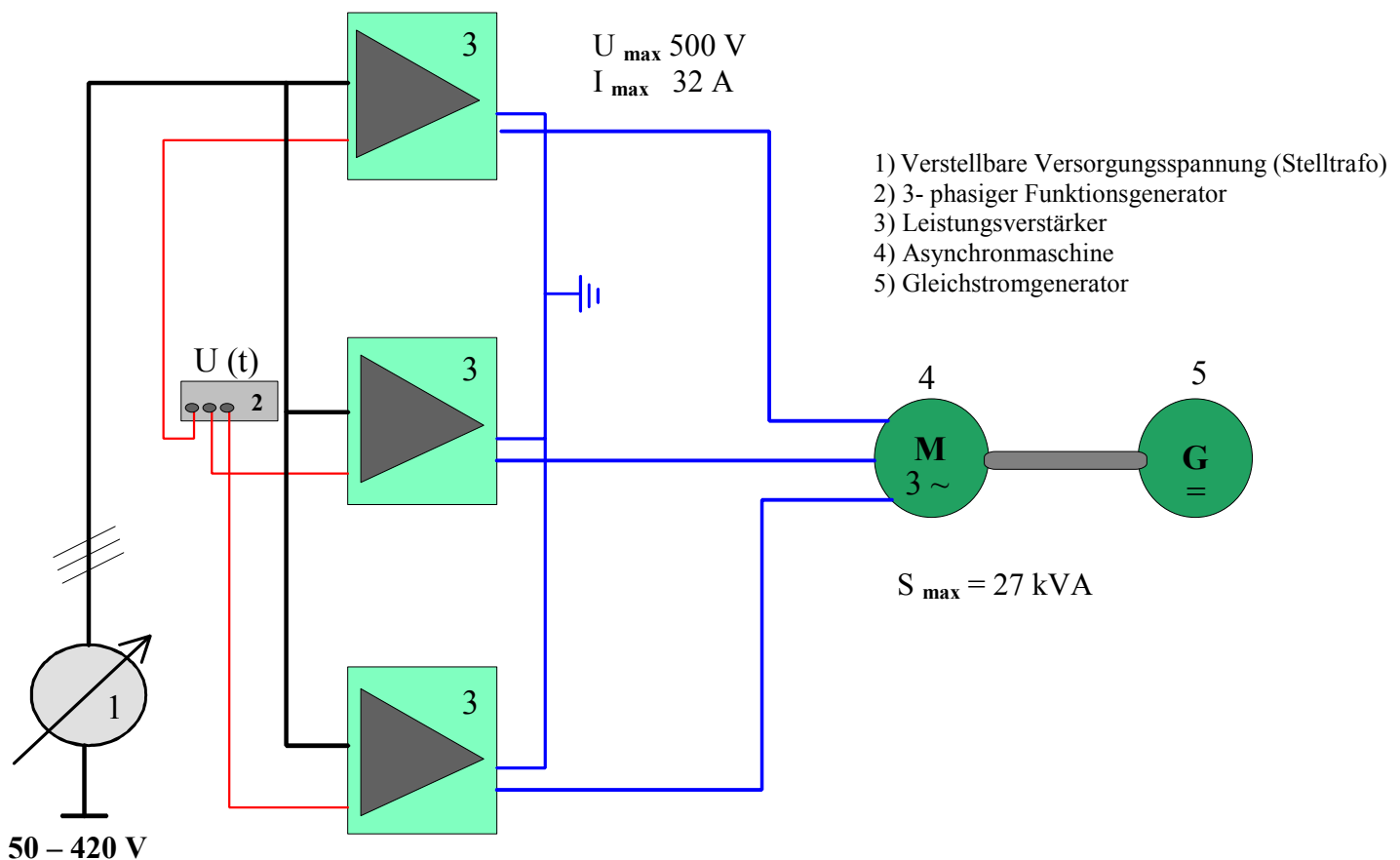


Abbildung 4: Prinzipschaltbild Verstärkersystem

## **5. Möglichkeiten zur Abschätzung der umrichterbedingten Temperaturerhöhungen**

Für eine Vorhersage müssen zunächst die umrichterspezifische Verlustzunahme sowie der drehzahlabhängige Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Verlustzunahme wird zur Zeit ein Verfahren zur Vorausberechnung über die gemessenen Impedanzkennlinien erprobt. Ist die Verlustzunahme bekannt, kann über den thermischen Widerstand zwischen Gehäuse und Umgebung die zu erwartende Übertemperatur abgeschätzt werden. Zur Bestimmung des zeitlichen Temperaturverlaufs bis zum stationären Endwert (wichtig für Kurzzeitbetrieb und kurzzeitige Überlastungen) ist die Kenntnis über die in der Maschine vorhandenen Wärmekapazitäten erforderlich.

In diese Rechnung müssen auch die äußeren Betriebsparameter des Antriebes, wie z.B. die Netzspannung und die Leitungslänge zwischen Maschine und Umrichter eingehen, da diese die Maschinenverluste beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Einsatz von Filtern zwischen Motor und Umrichter, die zwar die Spannungsbelastung der Wicklung verringern, jedoch durch ihren Spannungsabfall zu einem Betrieb des Motors an Unterspannung mit den entsprechend hohen Erwärmungen führen können.

### **5.1 Abschätzung der umrichterspezifischen Oberschwingungsverluste**

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage der umrichterbedingten zusätzlichen Verluste an einer Maschine bei Kenntnis des Oberschwingungsspektrums und eventuell weiterer Ausgangsparameter des Umrichters sowie der frequenzabhängigen Impedanz einer baugleichen Maschine. Mit diesem Verfahren ist es möglich, bei einer bereits in der Produktionsanlage eingebauten Maschine z.B. nach einem Umrichtertausch die zu erwartenden Verluste abzuschätzen.

Für die Anwendung dieses Verfahrens müssen zunächst die frequenzabhängige Impedanzkurve sowie die Kurve für den Leistungsfaktor der betreffenden Maschine gemessen werden.

Bei den in der PTB durchgeführten Erprobungen wurden die Kennlinien über zunächst 30 Messpunkte zwischen 0 und 10 kHz für verschiedene Maschinentypen bestimmt (Abbildung 5). Es wurden dann im Rahmen einer Extrapolation die Koeffizienten eines die Kurve am besten annähernden Polynoms bestimmt. Über das Polynom ist es möglich, für jede zwischen den Messpunkten liegende Frequenz die Impedanz und den Leistungsfaktor anzugeben, den eine an den Maschinenklemmen anliegende Sinusschwingung „sieht“. Die Verluste für diese Oberschwingung berechnen sich dann über  $((\text{Spannung})^2 / \text{Impedanz}) \cdot \text{Leistungsfaktor}$ .

Die gesamten Oberschwingungsverluste berechnen sich als Summe der Einzelverluste aller Harmonischen, wobei hier zur Vereinfachung nur Frequenzen bis zur doppelten Umrichtertaktfrequenz betrachtet werden.

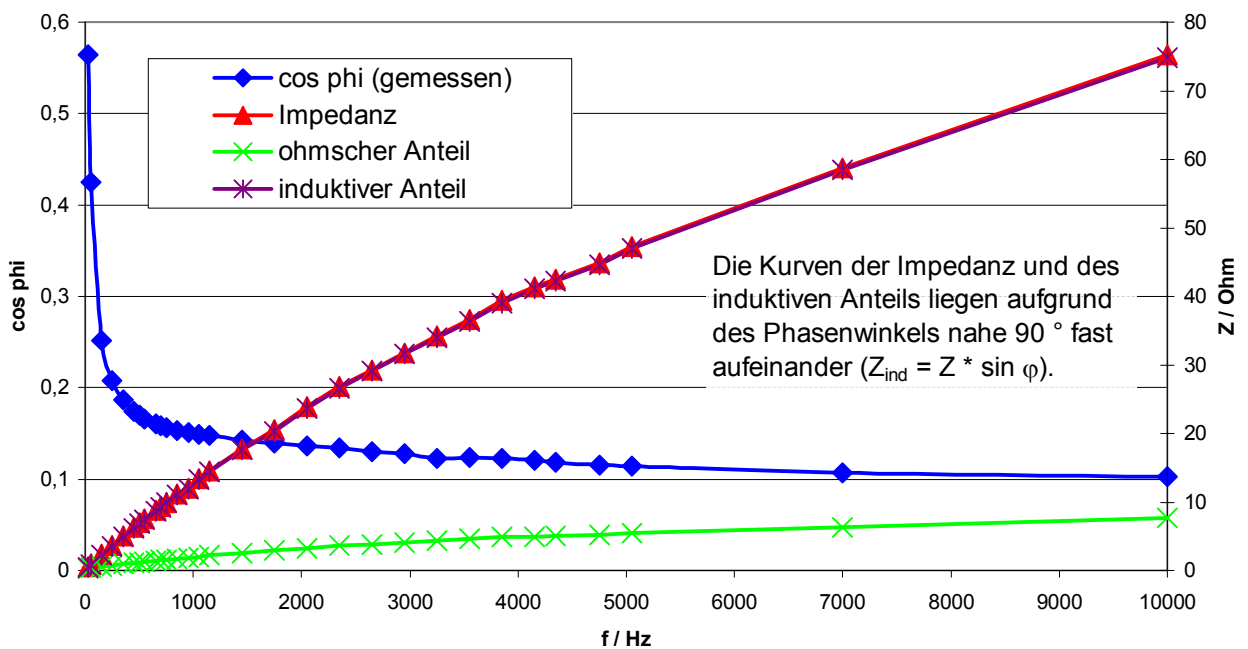


Abbildung 5: Verlauf der Impedanz und des Leistungsfaktors über der Frequenz

Zusätzlich zu den Oberschwingungsbedingten Verlusten müssen dann noch die durch Stromverdrängungseffekte bedingten Verluste ermittelt werden. Hierzu sollen zunächst für gängige Läufergeometrien und Maschinenbaugrößen Schätzwerte für den Pulsrichterbetrieb ermittelt werden.

## 5.2 Auswirkungen der Eingangsspannung und der Leitungslänge zwischen Umrichter und Motor

Betrachtet man einen Umrichter mit einem weiten Eingangsspannungsbereich, so gibt es für die Netzspannung bezüglich der Maschinenverluste einen optimalen Bereich, in dem die umrichterbedingten Zusatzverluste minimal werden.

Wird nun die Eingangsspannung erhöht, z.B. wenn der Umrichter an einem 500V-Industriernetz betrieben wird, nehmen gemäß Bild 3 aufgrund der Erhöhung der Oberschwingungsanteile im Ausgangsspektrum die Eisenverluste zu.

Einen weitaus größeren Effekt auf die Verluste und Erwärmungen der Maschine hat hingegen ein Betrieb des Umrichters an verminderter Spannung. Der Umrichter selbst hat einen Spannungsbedarf von ca. 15 V, dies bedeutet, dass bei einer Netzspannung von 400 V und Bemessungsstrom an den Ausgangsklemmen des Umrichters maximal eine Grundschwingungsspannung von 385 V anliegt. Die Netzspannung darf gemäß Bereich A um 5 %, bei Bereich B um 10 % vom Nennwert nach unten abweichen, das bedeutet der Umrichter wird nur mit einer Spannung von 380 bzw. 360 V eingespeist. Da zwischen Motor und Umrichter oftmals Kabellängen im Bereich von 100 m und mehr vorhanden sind, verringert sich die am Motor verfügbare Spannung weiter.

Durch den Betrieb mit Unterspannung erhöhen sich Schlupf und Rotortemperatur stark, da der Motor jetzt quasi im Feldschwächbereich betrieben wird. Bei Absenkung der Netzspannung um 5 % (Bereich A) kam es zu einer Temperaturerhöhung im

Rotor um ca. 28 K (an einer Maschine der Baugröße 180 bei Bemessungslast messtechnisch ermittelt und in Abbildung 6 dargestellt).

Es sollte also hier ein Motor mit einer kleineren Bemessungsspannung ausgewählt oder aber die Bemessungslast des Antriebes muß entsprechend gesenkt werden. Bei der Umrichternachrüstung an einem bestehenden Antrieb ist das jedoch oftmals nicht möglich.

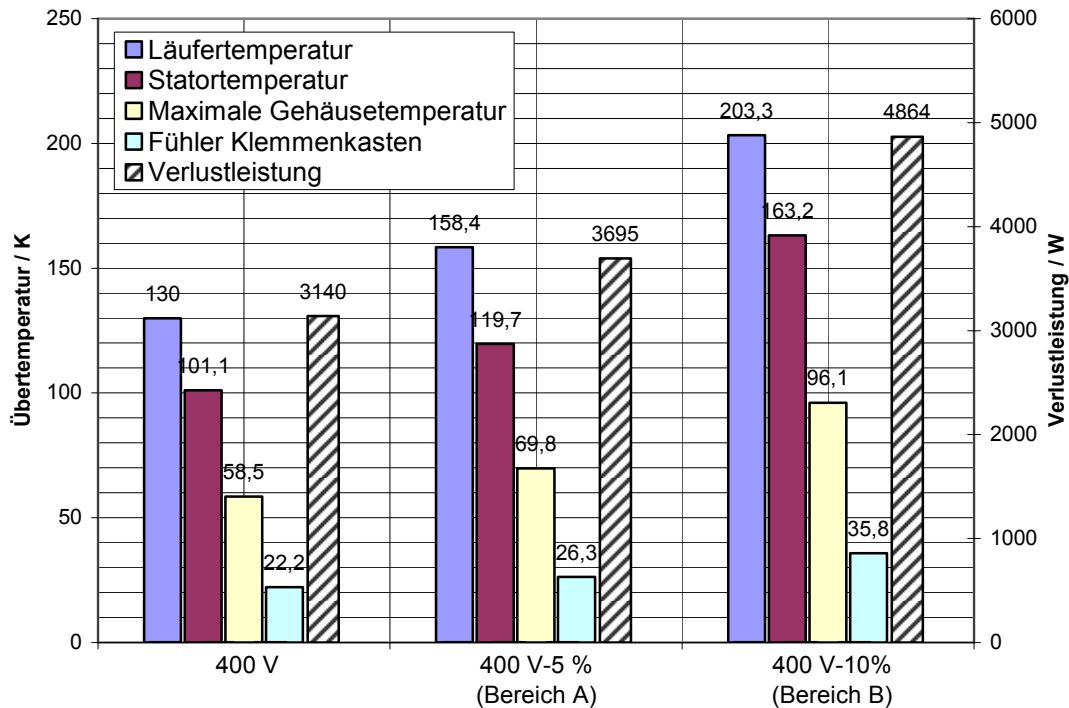


Abbildung 6: Einfluß der Umrichterbetriebsspannung

### 5.3 Auswirkung der erhöhten Verluste auf die Maschinentemperatur

Die sich einstellende Dauerbetriebstemperatur der Maschine ist zum Einen von der umgesetzten Verlustleistung, zum Anderen vom Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung abhängig. Bei einer nur kurzzeitigen Verlustleistungsänderung wird die Temperaturänderung im Wesentlichen von der Wärmekapazität der Maschine bestimmt. Da der Hauptzweck des Umrichters gerade die Drehzahlstellung des Antriebes ist, kann der Motor durchaus für eine längere Zeit bei kleinen Drehzahlen und Bemessungsmoment betrieben werden. Durch Versuche wurde jedoch festgestellt, dass oftmals unterhalb 20 Hz Betriebsfrequenz die Kühlleistung für den Dauerbetrieb nicht mehr ausreicht. Zum Schutz des Motors und zur Sicherstellung des Explosionsschutzes muß entweder die Betriebsdauer mit niedrigen Drehzahlen begrenzt oder der Motor mit einer Fremdlüftung versehen werden. Der Verlauf des thermischen Widerstandes Gehäuse – Umgebung über der Drehzahl ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Abweichung zwischen gemessener und gerechneter Temperatur lassen sich dadurch erklären, dass bei der Rechnung die Wärmeableitung über die Welle nicht berücksichtigt wurde.



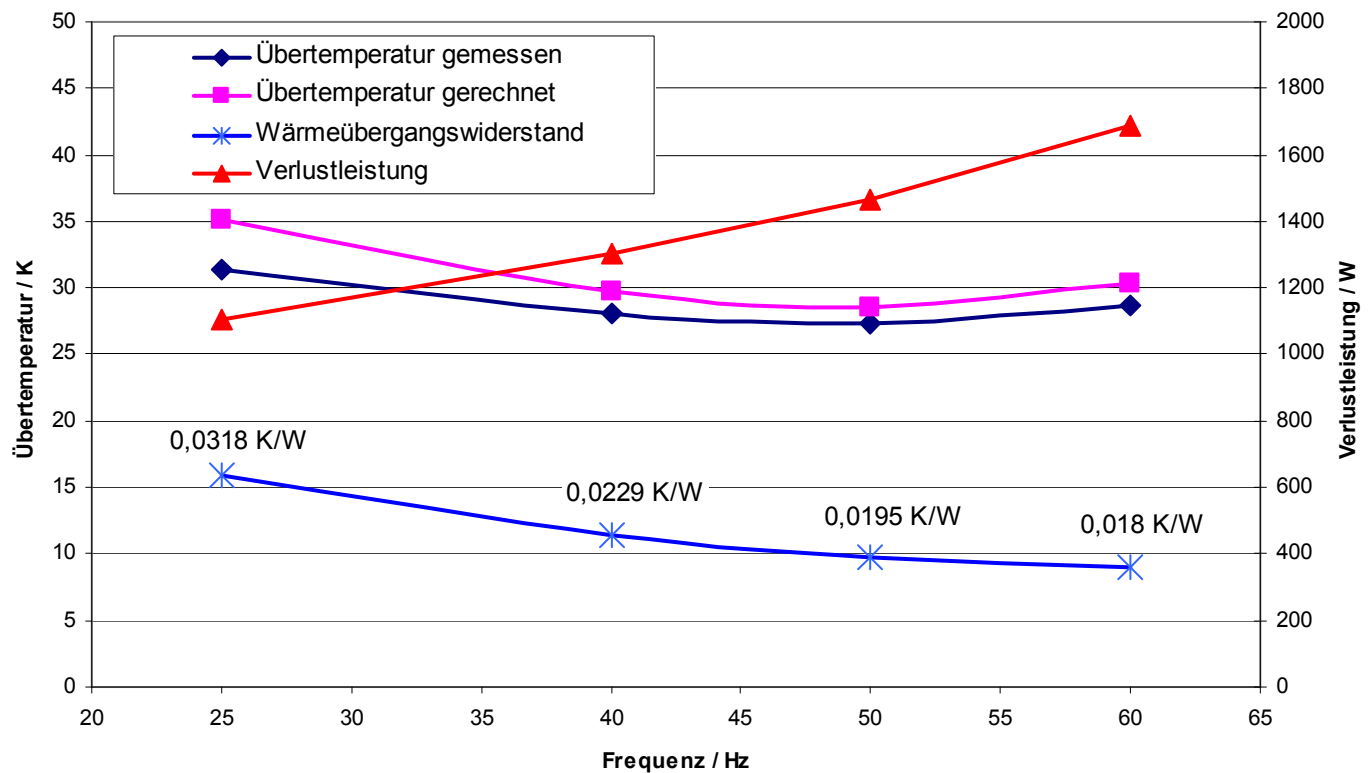


Abbildung 7: Gemessener und gerechneter Gehäusetemperaturverlauf über der Drehzahl

## 6. Schutz der Maschine

Die bisher erwähnten Faktoren für die zusätzlichen Verluste am Umrichter stellen besonders für den Schutz des Motors in der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ ein Problem dar, denn es muss hier auch eine während des Betriebes nur sehr schwer erfassbare unzulässige Rotortemperatur verhindert werden. Es werden daher zurzeit Motor und Umrichter zusammen geprüft und die möglichen Betriebsparameter verbindlich für den Umrichter festgelegt. Dieses Verfahren bedeutet natürlich für den Betreiber einige Einschränkungen, so dass z.B. Änderungen der Prozessführung eventuell die Zustimmung der Prüfstelle bedürfen.

Wenn es möglich wird, während des Betriebes aus einfach zu messenden Betriebsparametern eine Abschätzung über die aktuellen Zusatzverluste und die sich daraus in der Zukunft einstellenden Temperaturen durchzuführen, würde der Antrieb vor Erreichen einer gefahrbringenden Temperatur sicher abgeschaltet werden bzw. der Bediener würde rechtzeitig gewarnt, so dass Gegenmaßnahmen ergriffen werden könnten und es erst gar nicht zur Betriebsunterbrechung kommt.

Die gewonnenen Erkenntnisse könnten auch dazu verwendet werden, Verfahren für die einfachere Prüfung explosionsgeschützter umrichtergespeister Maschinen im Rahmen einer Neuzulassung zu entwickeln. Wünschenswert wäre es, wenn hierdurch die Möglichkeit geschaffen wird, auf einen Erwärmungslauf der Maschine

mit jedem Umrichtertyp, mit dem sie später betrieben werden soll, zu verzichten und die zu erwartenden Temperaturen und Verluste über die bekannten Maschinen – u. Umrichterparameter rechnerisch zu ermitteln.

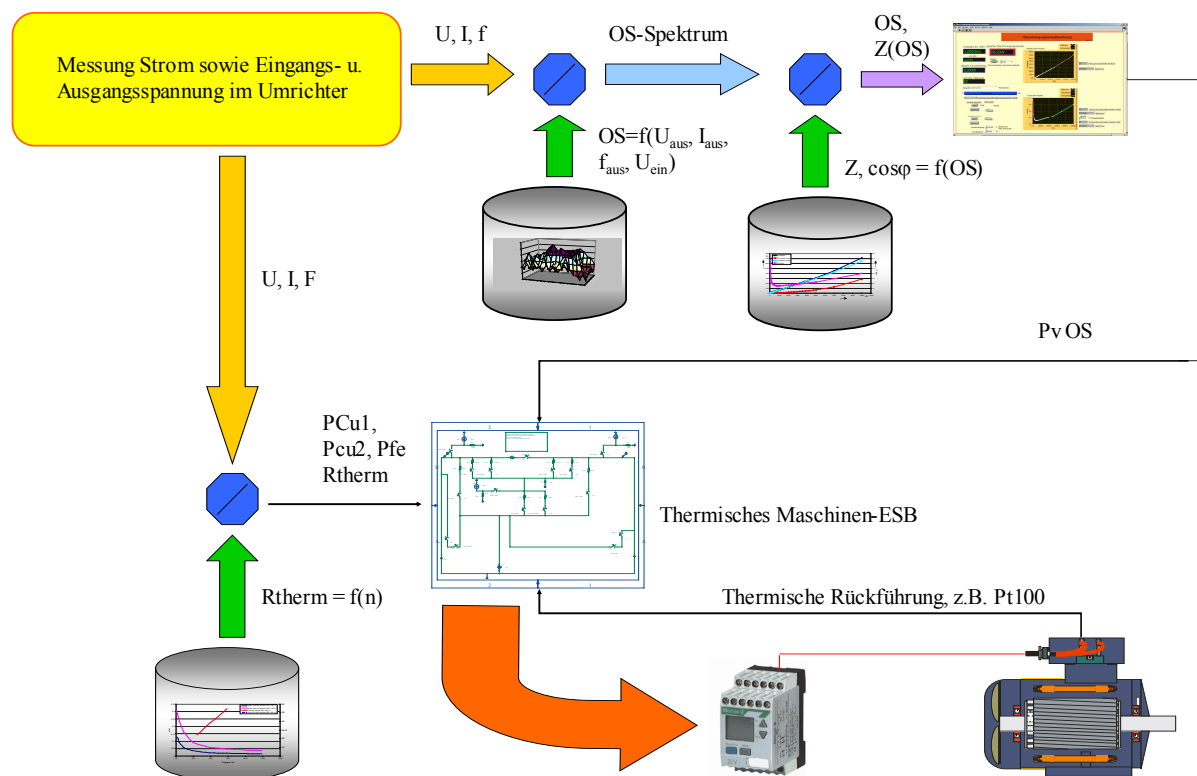


Abbildung 8: Aufbau eines möglichen Schutzkonzeptes

Ein mögliches Schutzkonzept ist in Abbildung 8 dargestellt. In diesem Ansatz werden zunächst die einfach messbaren Betriebsdaten wie Maschinenstrom, Frequenz, Eingangs- u. Ausgangsspannung des Umrichters usw. gemessen. Es wird dann für diese Parameter aus einer Datenbank das wahrscheinlichste Oberschwingungsspektrum der Umrichterausgangsspannung geladen und es werden für dieses Spektrum die Oberschwingungsverluste berechnet. Über den Maschinenstrom werden analog zu einem herkömmlichen Motorschutzschalter die Grundschwingungsverluste abgeschätzt. Zusammen mit dem drehzahlabhängigen Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung kann dann über ein thermisches Maschinenersatzschaltbild die Temperatur während des Betriebes abgeschätzt und der Maschinenschutz sichergestellt werden.