

# Motoren in Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ am Frequenzumrichter – ein neuer Ansatz für die Prüfung und Zertifizierung

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

## **Motors in the type of protection “increased safety“ on the frequency converter – a new approach for testing and certification**

This contribution deals with a concept which has been developed on the basis of the determination of the higher harmonics losses which additionally occur in the case of an operation on the frequency converter and on the basis of the speed-depending surface thermal resistances to the environment. The new concept allows the motor to be tested and certified in the type of protection “increased safety“ for operation on the frequency converter without having to specifically stipulate a concrete frequency converter type. In a further step it is shown which cases of failure must be reckoned with during operation and how inadmissible machine heating can be avoided. An important aspect is the speed-variable current limitation. Finally, the planned further development of the protection concept is presented.

### **Einleitung**

Umrichtergespeiste Antriebe erobern sich aufgrund der mit ihrem Einsatz verbundenen Energieeinsparungspotentiale immer weitere Einsatzgebiete in der industriellen Anwenderpraxis. Auch in explosionsgefährdeten Bereichen steigt deren Anteil, so dass dem Prüf- und Zertifizierungsaufwand eine immer größere Bedeutung zukommt. Bezüglich der mechanischen Ausführung lassen sich Motoren in der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ in der Regel deutlich kostengünstiger fertigen als Motoren der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“.

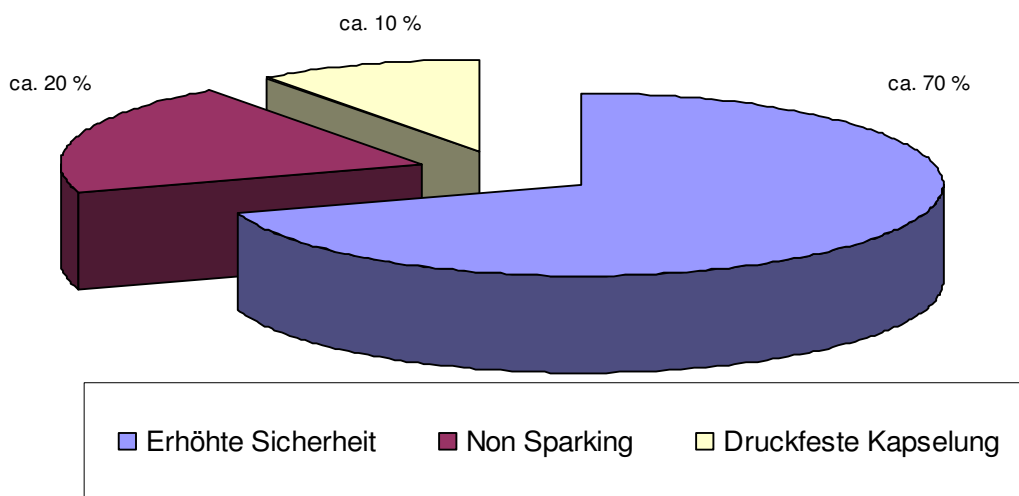


Bild 1: Verteilung der Zündschutzarten bei netzgespeisten Motoren kleiner Leistung in Deutschland. Quelle: Schätzung PTB

Der Prüfaufwand ist hier jedoch deutlich höher als bei der druckfesten Kapselung, da zur Zeit Motor und Umrichter nur in Kombination zusammen geprüft werden können, die Anpassungsmöglichkeiten durch den Betreiber sind daher begrenzt. Bei Reparaturen können Motor und Umrichter nur durch baugleiche Teile ersetzt werden, ansonsten ist eine neue Prüfung des Antriebssystems nötig.

Das Bild 1 zeigt die geschätzte Verteilung der Zündschutzarten bei netzgespeisten Motoren kleinerer Leistung in Deutschland. Bei frequenzumrichtergespeisten Motoren kehrt sich das Verhältnis zwischen der „Druckfesten Kapselung“ und der „Erhöhten Sicherheit“ um.

Oberste Prämisse bei der Entwicklung eines neuen Ansatzes muss dabei aber auch sein, dass das Sicherheitsniveau insgesamt auf keinen Fall abgesenkt wird.

Es muss nach wie vor sichergestellt sein, dass sowohl im störungsfreien Betrieb als auch bei auftretenden Störungen (z.B. Überlast) keine Gefahr entsteht. Außerdem muss das System auch dann noch sicher sein, wenn Überwachungseinrichtungen ausfallen, die im Rahmen der Zulassung nicht zertifiziert worden sind. In diesem Fall müssen unzulässige Erwärmungen prinzipiell ausgeschlossen sein oder aber es muss ein zweites, zertifiziertes Überwachungssystem vorhanden sein, das den ersten Fehler abfängt, wobei hierzu auch eine andere physikalische Größe überwacht werden kann.

### **Die zusätzlichen Verluste bei Frequenzumrichterspeisung**

Bei der Betrachtung der frequenzumrichterbedingten zusätzlichen Erwärmungen muss zwischen den Erwärmungen unterschieden werden, die bei einer korrekten Auslegung des Antriebssystems unvermeidlich sind und nur durch aufwändige Maßnahmen wie z.B. Filterung der Umrichterausgangsspannung vermindert werden können, und den um ein Vielfaches größeren Erwärmungen deren Ursache in einer fehlerhaften Auslegung des Antriebssystems liegen.

Die immer vorhandenen Oberschwingungsverluste machen üblicherweise nur maximal 10 Prozent der Grundschwingungsverluste aus, so dass hierdurch allein nicht mit unzulässigen Erwärmungen zu rechnen ist. /1/

Die angegebenen 10 % Oberschwingungsverlustanteil an den gesamten Maschinenverlusten beziehen sich auf den Betrieb mit Bemessungsdrehmoment. Bei Betrieb mit reduziertem Drehmoment vergrößert sich dieser Anteil, die Gesamtverluste nehmen jedoch deutlich ab, so dass hier nicht mit unzulässigen Erwärmungen zu rechnen ist. Der Absolutwert der Oberschwingungsverluste ist belastungsunabhängig.

Werden jedoch bei der Projektierung des Antriebssystems nicht alle Randbedingungen korrekt berücksichtigt und dadurch der Motor nicht im Rahmen seiner zulässigen Bemessungsdaten betrieben, ist mit sehr hohen Erwärmungen zu rechnen, siehe Bild 2.

Für diese unzulässige Spannungsreduzierung an der Maschine muss nicht unbedingt eine schlechte Projektierung (z.B. „vergessen“ der Spannungsabfälle an einem dem Umrichter nachgeschalteten Filter) ursächlich sein, sondern es kann auch z.B. durch eine (unbemerkte) Absenkung der Netzspannung zu diesem unerwünschten Betriebszustand kommen. Die Ursache hierfür kann unter Umständen die Inbetriebnahme leistungsstarker Verbraucher in einem nur schwach vermaschten Netz sein.

Wird der Motor mit seinem Bemessungsdrehmoment belastet, steigen Rotorströme und Schlupf stark an, um auch bei verminderter magnetischer Statorinduktion das geforderte Drehmoment zu liefern. Die Folge sind extrem hohe Erwärmungen bei deutlich über den Bemessungswerten liegenden Statorströmen. Dieser Betriebsfall muss unter allen Umständen vom Maschinenschutz erkannt und abgefangen werden

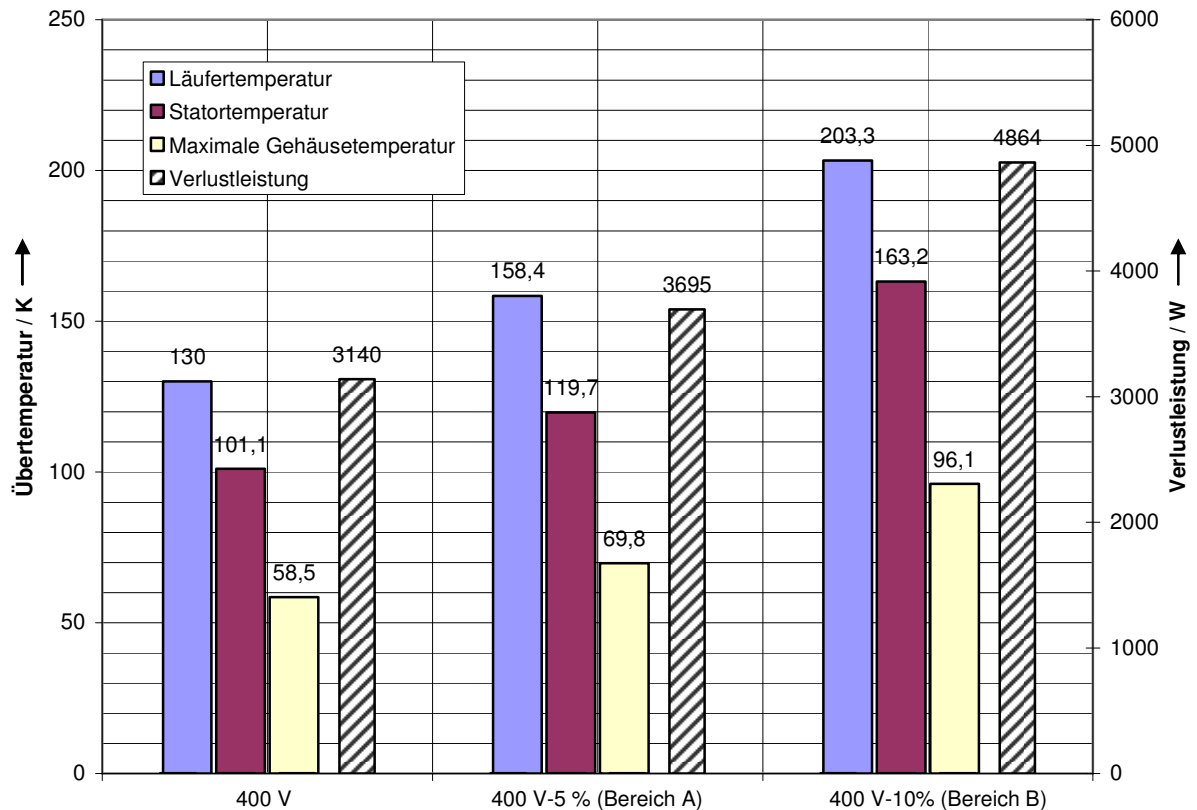


Bild 2: zusätzliche Erwärmungen bei Unterspannungsbetrieb

Das thermische Verhalten des Motors kann über ein Netzwerk aus Wärmekapazitäten, Wärmeübergangswiderständen, Wärmeleitwiderständen und Wärmequellen nachgebildet werden, wobei der Wärmeübergangswiderstand Gehäuse – Umgebung bei eigenbelüfteten Motoren drehzahlveränderlich ist. Für die hier untersuchten Motoren kann für den Bereich Stillstand – Bemessungsdrehzahl der Wärmeübergangswiderstand zwischen Rotor und Statorbohrung gemäß Veröffentlichung [2] als drehzahlunabhängig angesehen und unter der Annahme ruhender Luft berechnet werden. Der Wärmeleitwiderstand zwischen Statorwicklung und Statorblechpaket sowie Statorblechpaket und Gehäuse wird hier ebenfalls als drehzahlunabhängig angesehen. In einer weiteren Vereinfachung wird der Wärmeabtransport über die Welle vernachlässigt. Aus der Sicht des Explosionsschutzes ist das zulässig, da die Wärmeableitung über die gekuppelte Arbeitsmaschine undefiniert ist und somit der Worst-Case-Fall betrachtet wird. Eine Ausnahme stellen Arbeitsmaschinen da, deren Temperaturniveau an der Welle höher als das des Motors ist, z.B. Pumpen für heiße Flüssigkeiten in der chemischen Industrie.

Das thermische Ersatzschaltbild kann durch Anwendung der Theorie elektrischer Netzwerke in ein elektrisches Ersatzschaltbild umgewandelt werden, wobei die Wärmekapazitäten durch Kondensatoren, die Wärmeübergangswiderstände als elektrische Widerstände und die Wärmequellen über eine Stromeinprägung in die entsprechenden Knoten realisiert werden. Das thermische Ersatzschaltbild des Motors kann daher mit handelsüblicher Software zur Simulation elektrischer Netzwerke berechnet werden, Bild 3.

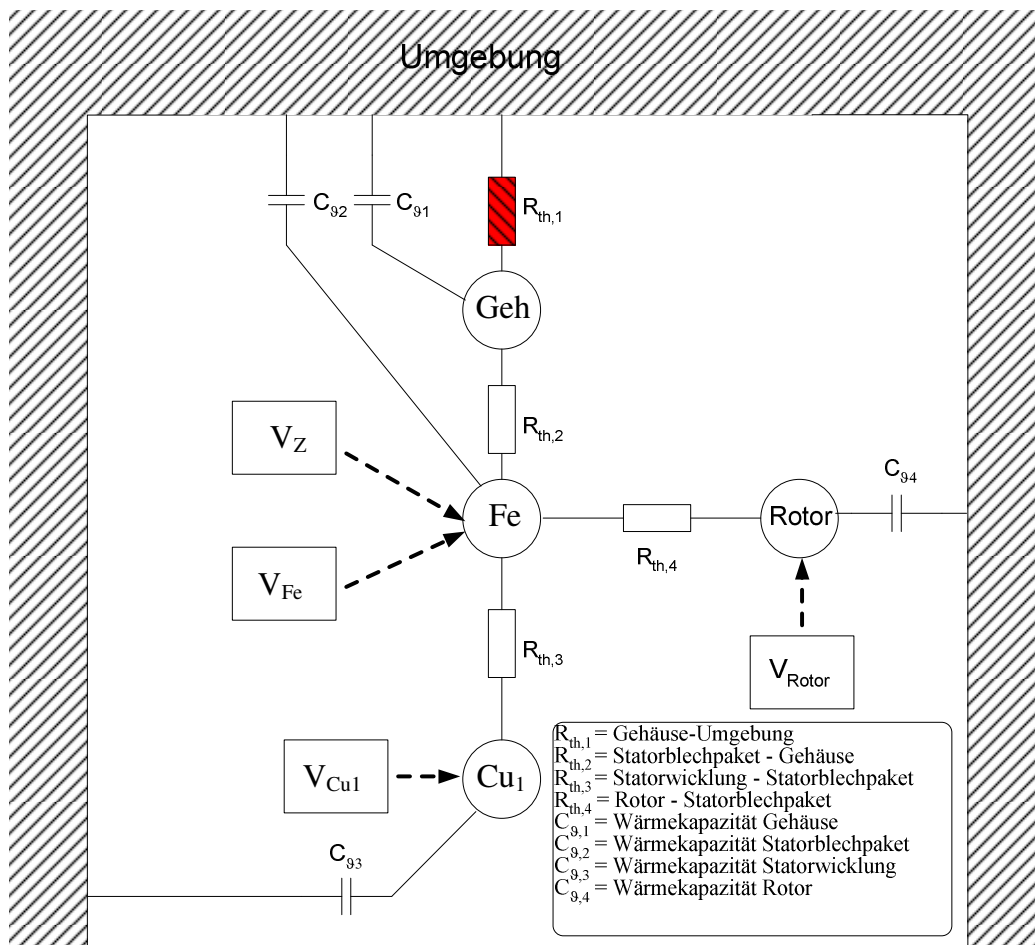


Bild 3: vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild eines Induktionsmotors, Wärmeableitung über die Welle vernachlässigt

Die Werte der Ersatzschaltbildelemente können durch Versuche oder bei den Wärmekapazitäten auch über das Gewicht und die spezifische Wärmekapazität der verarbeiteten Materialien bestimmt werden. Als Alternative ist auch eine Ermittlung durch Bestimmung der thermischen Zeitkonstanten analog zur Zeitkonstante eines elektrischen R-C-Gliedes möglich.

Die Wärmeübergangswiderstände ergeben sich aus den Temperaturen des Statorgehäuses, der Statorwicklung, des Statorblechpaketes und des Rotors sowie den in diesen Teilen umgesetzten Verlustleistungen. Hierzu muss jedoch der thermische Beharrungszustand des Motors erreicht worden sein. Zur Vereinfachung werden Statorwicklung, Statorblechpaket und Rotor jeweils als ein Körper aufgefasst und jeweils eine mittlere Temperatur angegeben. Für das Statorblechpaket werden dabei auch die Verluste, die sich in der Realität aus den Jochverlusten und Zahnverlusten zusammensetzen, als eine Verlustquelle betrachtet.

Zur Abschätzung der zu erwartenden Erwärmungen wird zunächst der drehzahlabhängige Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung bestimmt (in Bild 3 schraffiert dargestellt). Danach können die nicht drehzahlabhängigen inneren Wärmekapazitäten und Wärmeübergangswiderstände durch Auswertung von Erwärmungsmessungen bestimmt werden. Die Wärmeübergangswiderstände ergeben sich dabei aus der Temperaturdifferenz zum Maschinenteil, über das die in diesem Teil erzeugte Verlustleistung abfließt und die Temperaturdifferenz zu diesem benachbarten Teil. Die Temperatur des Blechpaketes wurde durch eine in die Nut eingeschobene Kupferplatte mit aufgelötetem Thermoelement ermittelt. Für die Berechnung wird jedes Maschinenteil dann als Körper homogener Wärmekapazität und Temperatur aufgefasst. Dieser Ansatz wird auch als Einkörper-Ersatzschaltbild

bezeichnet. Die Wärmekapazitäten sind zur Berechnung der Dauerbetriebsübertemperatur  $\vartheta_{\infty}$  unbedeutend und werden nur zur Berechnung der Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge benötigt.

Der Wärmeübergangswiderstand zwischen der Gehäuseoberfläche und der Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl kann z.B. durch Temperaturmessung bei mit variabler Drehzahl fremdangetriebenem Rotor und definierter Verlufterzeugung innerhalb des Motors bestimmt werden. /2/

Der drehzahlabhängige Verlauf des in Bild 3 rot eingezeichneten Wärmeübergangswiderstand ist für zwei beispielhaft untersuchte Maschinen in der folgenden Abbildung dargestellt:

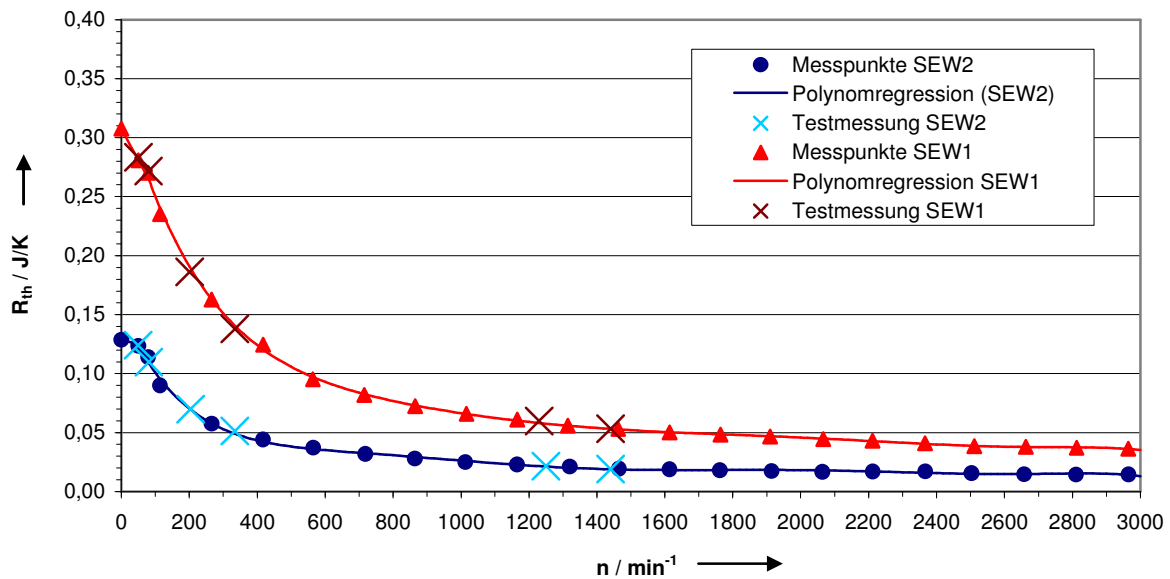


Bild 4: Verlauf des thermischen Widerstandes zur Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl

Diese Kurvenverläufe lassen sich auch über ein Polynom ausdrücken:

Für die Maschine „SEW1“ lautet der Ausdruck z.B.

$$f(x) = -7,81 \cdot 10^{-24} x^7 + 9,39 \cdot 10^{-20} x^6 - 4,73 \cdot 10^{-16} x^5 + 1,27 \cdot 10^{-12} x^4 - 2 \cdot 10^{-9} x^3 + 1,88 \cdot 10^{-6} x^2 - 1,03 \cdot 10^{-3} x + 3,37 \cdot 10^{-1}$$

Durch Einsetzen der aktuellen Drehzahl (x-Wert) kann darüber für jede Drehzahl zwischen 0 und 3000  $\text{min}^{-1}$  der thermische Widerstand berechnet werden. Zusammen mit der Verlustleistung und den in erster Näherung als konstant angenommenen inneren Wärmeübergangswiderständen können die Temperaturen mit für den Explosionsschutz ausreichenden Genauigkeit berechnet werden.

Werden die Wärmekapazitäten einbezogen, kann der Temperaturverlauf z.B. auch bei kurzzeitigen Überlastungen berechnet und somit maximale Überlastzeiten festgelegt werden, die sich dann im Zertifikat niederschlagen.

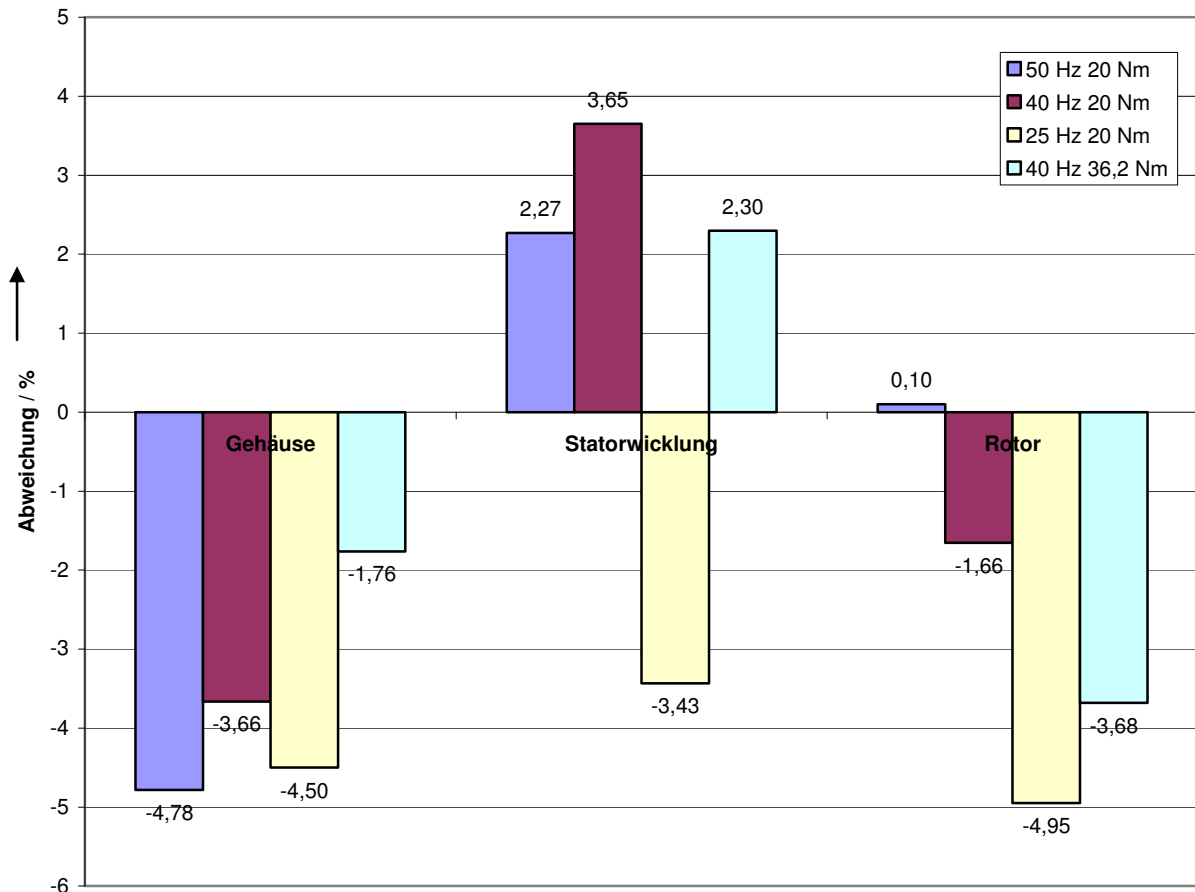


Bild 5: Vergleich der berechneten Temperaturen mit einer Messung

Die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen liegen im thermischen Beharrungszustand dabei durchweg unter 5 %

### Berücksichtigung der Erkenntnisse im neuen Zulassungsverfahren

Ziel des neuen Verfahrens ist es, zum einen die feste Kopplung des Motors an den Umrichter über das Zertifikat bei gleichem oder sogar verbessertem Sicherheitsniveau aufzuheben, zum anderen die gewonnenen Erkenntnisse in dem Zulassungsverfahren umzusetzen, so dass das Verfahren in der Praxis mit vertretbarem Aufwand anwendbar ist.

### Es wurden daher die folgenden Vereinfachungen vorgenommen:

Die Oberschwingungsverluste bewegen sich bei Verwendung aktueller Umrichter üblicherweise im Bereich bis 10 % der im Bemessungsbetrieb auftretenden Grundschwingungsverluste. Hieraus folgen zusätzliche Erwärmungen im Bereich unter 10 K. Es wurde daher auf eine Angabe von Grenzwerten für die einzelnen Oberschwingungsanteile in der Umrichtereingangsspannung verzichtet, sondern vereinfachend eine Untergrenze für die Taktfrequenz und eine Obergrenze für die Frequenzumrichtereingangsspannung und somit die Zwischenkreisspannung festgelegt. Durch diese Bedingungen werden die Oberschwingungsverluste in ihrer Höhe limitiert. /1/ Die Begrenzung der Zwischenkreisspannung ist auch nötig, um eine unzulässige Spannungsbeanspruchung der

Wicklungsisolation zu vermeiden. Wird auf Ausgangsfilter verzichtet, können bei langen Motorleitungen durch Reflexionsvorgänge bedingt durch unterschiedliche Wellenwiderstände von Motor und Leitung am Motor Spannungsspitzen mit mehr als der doppelten Zwischenkreisspannung auftreten. Gemäß /3/ besteht dann neben der Gefahr des elektrischen Durchschlages der Wicklungsisolation auch die Möglichkeit zündfähiger Vorentladungen. Eine weitere Forderung ist die Beschränkung auf Pulswechselrichter. Die bei den ersten Umrichtergenerationen eingesetzte Blocksteuerung führt zu einem deutlich höheren Oberschwingungsgehalt der Frequenzumrichter Ausgangsspannung und somit auch deutlich höheren Maschinenverlusten.

Die nächste tragende Säule des neuen Schutzkonzeptes ist eine Überwachung des Maschinenstromes. Bei der in Bild 2 dargestellten Auswertung ist sehr deutlich zu sehen, dass bei einer unzulässigen Spannungsreduzierung der Maschinenstrom deutlich über den Bemessungswert ansteigt. Der Spannungseinbruch würde also in diesem Fall über den Strom erkannt und eine den Explosionsschutz in Frage stellende Erwärmung verhindert werden.

Wie in Bild 4 weiterhin gezeigt wurde, ist der Wärmeübergangswiderstand zwischen Gehäuse und Umgebung bei eigenbelüfteten Maschinen stark drehzahlabhängig. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeit bildet die dritte Säule des Überwachungskonzeptes.

In der Theorie müsste bei abnehmender Drehzahl die in der Maschine umgesetzte Verlustleistung gemäß dem Kurvenverlauf in Bild 4 reduziert werden.

Nun wäre in der Praxis die Hinterlegung des die Kurve repräsentierenden Polynoms im Zertifikat und die Übertragung in den Frequenzumrichter bei der Inbetriebnahme aufwändig und somit auch fehleranfällig. Aus diesem Grund wurde der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Wärmeübergangswiderstand linear angenähert, wobei sich der gesamte Verlauf aus mehreren Geraden unterschiedlicher Steigung zusammensetzt. Ein Beispiel zeigt die folgende Abbildung:

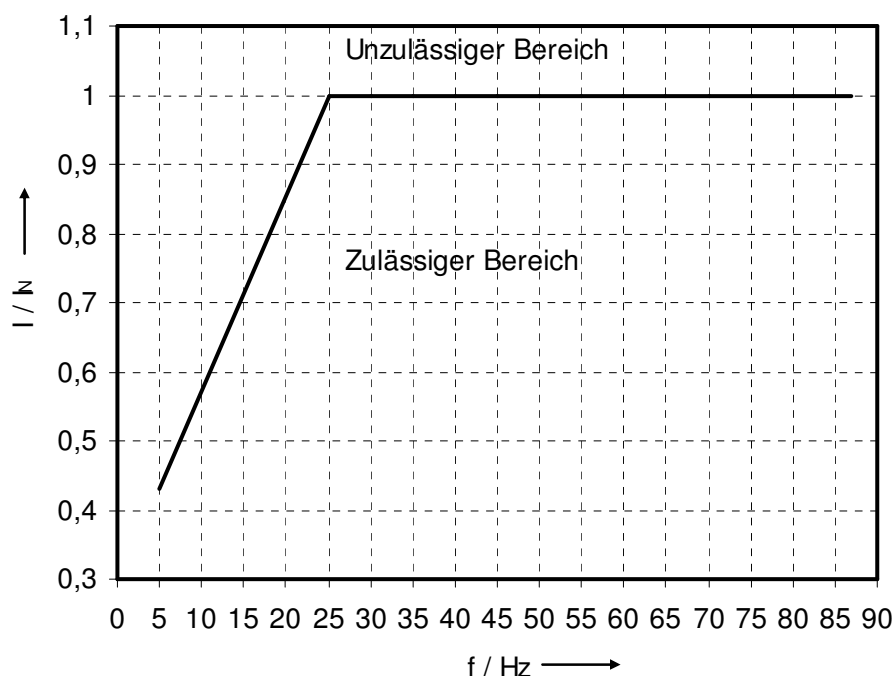


Bild 6: die drehzahlvariable Strombegrenzung

In diesem Beispiel kann die Maschine im Frequenzbereich 25 Hz bis 87 Hz mit konstantem Belastungsdrehmoment betrieben werden, im Bereich 25 Hz bis 5 Hz muss das Belastungsdrehmoment linear reduziert werden. Da während des späteren Betriebes eine direkte Messung des Drehmomentes praktisch nicht möglich ist, muss die Überwachung auf eine einfach messbare Größe zurückgeführt werden, z.B. auf den Maschinenstrom. Auf diese Größe wird sich dann im Zertifikat bezogen.

Bedingt durch diese im Sinne der Handhabbarkeit erforderlichen Vereinfachungen ist die Ausnutzung der Maschine gerade bei geringen Drehzahlen schlechter als bei einer exakten Betrachtung.

### **Ablauf des Zulassungsprozesses**

In diesem Beispiel soll von einer neu entwickelten Maschine ausgegangen werden, die bisher noch nicht in explosionsgeschützter Ausführung vertrieben wird.

In einem ersten Schritt werden die mechanische Ausführung des Motors, die Qualität des Maschinenlüfters aus Kunststoff sowie die Alterungseigenschaften der verwendeten Dichtungsmaterialien überprüft. Ein wichtiges Prüfkriterium ist z.B. die Einhaltung des Mindestluftspaltes und der Kriech – und Luftstrecken im Klemmenkasten, wie sie in der EN 60079 Teil 7 gefordert werden. Der Mindestluftspalt muss dabei auf die am Frequenzumrichter maximal auftretende Drehzahl ausgelegt werden.

Danach wird die Maschine für den Erwärmungslauf mit Thermoelementen am Gehäuse und einer Bohrung im Lagerschild für den Temperaturfühler zur Messung der Rotortemperatur präpariert.

Der anschließende Erwärmungslauf erfolgt zunächst bei Bemessungsleistung und danach an den Endpunkten und den Knickpunkten der vom Hersteller gewünschten Kennlinie für die drehzahlvariable Strombegrenzung. Alle Temperaturen an Gehäuse, Statorwicklung und Rotor müssen sowohl die beantragte Temperaturklasse als auch die höchstzulässigen Dauerbetriebstemperaturen der verwendeten Isolationsmaterialien und Anbauteile der Maschine unterschreiten. Ist dieses nicht der Fall, muss die Kennlinie in Abstimmung mit dem Hersteller angepasst werden.

In einem nächsten Schritt wird dann zur Überprüfung der Schutzwirkung des Kaltleiters ein Überlastversuch durchgeführt, d.h. der Motor wird unter Überlast bis zum Ansprechen des Kaltleiters in der Statorwicklung betrieben. Danach erfolgt eine Bestimmung der mittleren Statorwicklungstemperatur, der Rotortemperatur sowie der Gehäusetemperatur analog zum Erwärmungslauf. Auch hier dürfen keine unzulässigen Temperaturen auftreten.

Der letzte Schritt ist dann eine Bestimmung der Abschaltzeit des Kaltleiters (Zeit  $T_A$ ) /4/ Diese Größe ist für das Schutzkonzept direkt nicht erforderlich, kann aber z.B. nach einer Maschineninstandsetzung zur Kaltleiterüberprüfung herangezogen werden, Bild 7.

Auf die bei netzgespeisten Maschinen übliche Überprüfung des thermischen Alleinschutzes durch den Kaltleiter im Blockierfall kann verzichtet werden, da der Frequenzumrichter bei Auslegung gemäß den Anforderungen des Zertifikates nur Ströme liefern kann, die deutlich unterhalb des Anzugsstromes bei direkter Netzeinspeisung liegen. Die Erwärmungsvorgänge verlaufen daher deutlich langsamer, und die thermische Ankopplung des Kaltleiters an die Wicklung besitzt nur eine untergeordnete Bedeutung.



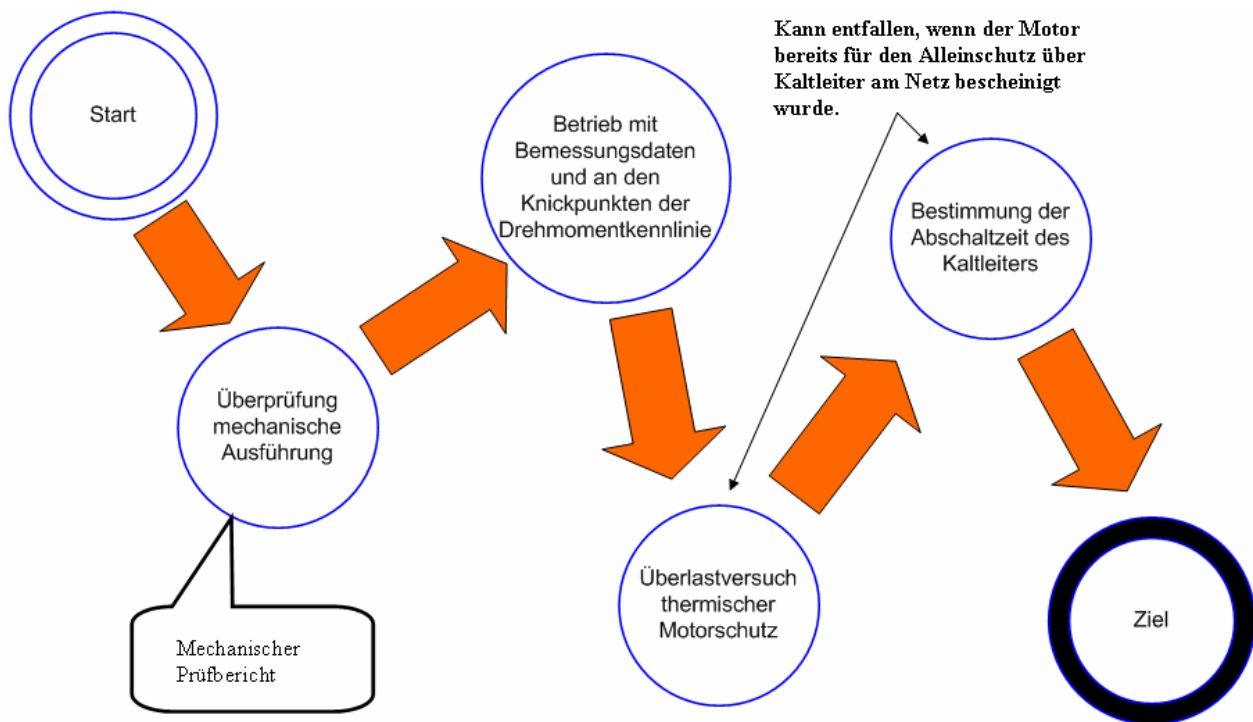


Bild 7: Flussdiagramm des Zulassungsprozesses

### Bisherige Erfahrungen

Bisher liegen mit dem hier beschriebenen neuen Zulassungskonzept Erfahrungen bis zur Baugröße 180 bzw. einer Leistung von 22 kW vor. Die kleinste bisher untersuchte Leistung betrug 5 kW. Bei den durchgeführten Messungen zeigte sich, dass bei Betrieb mit Bemessungsspannung und korrekter Parametrierung des Frequenzumrichters nicht mit unzulässigen Erwärmungen zu rechnen ist. Es ergab sich weiterhin, dass bis herab zu 25 Hz ein Betrieb mit Bemessungsdrehmoment möglich ist. Bei kleineren Drehzahlen muss das Drehmoment mindestens linear mit der Drehzahl reduziert werden. Die an den Knick- und Endpunkten der Kennlinie gemessenen Temperaturen liegen deutlich unterhalb der zulässigen Grenzen.

Bei den bisher untersuchten Motoren lässt sich die Einhaltung der vorgegebenen Belastungskennlinie über den Maschinenstrom einfach überwachen. Gleiches gilt für den Betrieb bei Unterspannung. Bei Motoren sehr kleiner Leistung, z.B. 0,1 kW, ist dieses eventuell nicht mehr möglich. Um derartige Maschinen in das Schutzkonzept einbeziehen zu können, wäre dann eine Überwachung der von der Maschine aufgenommene Wirkleistung erforderlich. Eine einfach zu messende Größe wäre z.B. auch die Leistung im Gleichspannungszwischenkreis des Umrichters.

### Ausblick

Das hier näher beleuchtete neue Zulassungsverfahren soll in einem ersten Schritt sowohl auf Maschinen größerer Leistung als auch auf den kleineren Leistungsbereich ausgedehnt werden. Mit den für jede Baugröße gewonnenen Erkenntnissen soll zukünftig eine Datenbank aufgebaut werden, so dass bereits bei der Antragstellung für eine bestimmte Maschine

abgeschätzt werden kann, ob die vom Hersteller gewünschte Belastungskennlinie realistisch ist oder zur Reduzierung des Prüfaufwandes schon vorab reduziert werden sollte.

Bisher wird zusätzlich zur Stromüberwachung über den Frequenzumrichter noch eine Temperaturüberwachung mittels Kaltleiter und nach der Richtlinie 94/9/EG funktionsgeprüftem Auslösegerät gefordert. Der Grund hierfür ist, dass die Stromüberwachung durch den Frequenzumrichter über eine reine Softwarelösung realisiert wird, wobei die Funktionalität praktisch in die Steuersoftware des Frequenzumrichters integriert ist. Eine Zertifizierung der Software unter den Aspekten der Richtlinie 94/9/EG ist daher sehr aufwändig und müsste außerdem nach jedem Firmwareupdate wiederholt werden. Um zukünftig auf den Kaltleiter verzichten zu können und auch Frequenzumrichter verwenden zu können, die die Funktionalität der drehzahlvariablen Stromgrenze nicht besitzen, soll ein externes Schutzgerät entwickelt werden, das zwischen Frequenzumrichter und Motor geschaltet wird (Bild 8) und die Einhaltung der zulässigen Motorbetriebsparameter überwacht. Dieses Gerät würde dann auch von der PTB zertifiziert, so dass es als Alleinschutz für den in Zone 1 betriebenen Motor ausreichend ist. Der dann mögliche Verzicht auf den Kaltleiter ist vor allem bei Nachrüstungen bereits in Betrieb befindlicher Antriebssysteme mit einem Frequenzumrichter interessant.

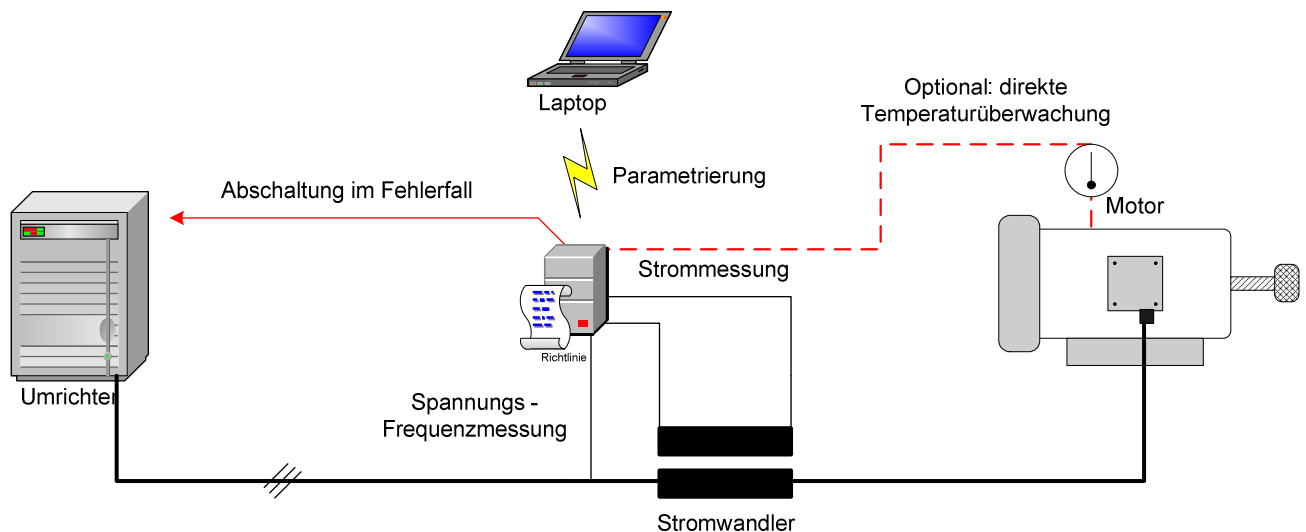


Bild 8: Funktionsdiagramm eines externen Schutzgerätes

### Literatur:

- /1/: Lehrmann, C. : Ex-Geschützt: Antriebe mit Frequenzumrichter, Vorschlag für ein neues Zulassungskonzept, Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, 2004, Heft 24/25, S. 17 – 23
- /2/ Lehrmann, C., Pape, H., Dreger, U., Lienesch, F.: Umrichter gespeiste Antriebe – ein neuartiges Schutzkonzept für Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen; Ex-Zeitschrift R. Stahl Schaltgeräte GmbH, Heft 38/2006, S. 36 - 47
- /3/ Lienesch, F.; Untersuchungen zum Durchschlag brennbarer Gase als Beitrag zum Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel; VDI-Verlag Düsseldorf, 1999
- /4/ PTB-Prüfregel; Explosionsschutzte Maschinen der Schutzart „Erhöhte Sicherheit“ Ex e, 1969