

Nachrüstung von Frequenzumrichtern – Energieeinsparungspotentiale beim Antrieb von Strömungsmaschinen in der chemischen Industrie

Dr.-Ing. Christian Lehrmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Arbeitsgruppe 3.72 (Explosionssgeschützte elektrische Antriebssysteme)

Retrofitting of frequency converters – energy saving potentials on pumps and fans in the chemical industry

The new testing and certification concept for frequency-converter-fed motors developed at PTB has clearly increased the attractiveness of their use in potentially explosive atmospheres and opens up large energy saving potentials. The experience made so far with the new testing and certification concept for frequency-converter-fed motors of the type of protection "increased safety" is extremely promising, and it turned out that a certification for operation on the converter is possible without any problems up to temperature class "T3".

Keywords: Converter-fed machines, Increased safety, Energy efficiency

Einleitung

Eine Grundvoraussetzung für eine effektive Produktion und eine hohe, gleichbleibende Produktqualität in der chemischen und petrochemischen Industrie ist eine genaue Dosierung und Regelung der Mengen der an dem Prozess direkt und indirekt beteiligten Medien, z.B. Reaktionspartner, Wärmetauscherdurchfluss zum Kühlen und Beheizen der Reaktionsgefäße, usw.

Zur Förderung dieser Medien werden in der Regel Strömungsmaschinen eingesetzt, also Ventilatoren und Pumpen. Werden diese Strömungsmaschinen mit einer direkt am Netz betriebenen Asynchronmaschine angetrieben, so kann die Fördermenge der Pumpe entweder durch ein Verstellgetriebe zwischen Motor und Pumpe oder aber durch Bypassventile und / oder Drosselventile eingestellt werden. Der Einsatz von Verstellgetrieben ist wegen der hohen Anschaffungskosten und des Wartungsaufwandes nur auf sehr wenige Einsatzfelder beschränkt.

Fördermengeneinstellung mittels Drosselventil

Ein prinzipieller Nachteil des Einsatzes von Bypass – und Drosselventilen ist die Tatsache, dass in den Ventilen je nach eingestellter Fördermenge teilweise sehr hohe hydraulische Verlustleistungen auftreten, die den Systemwirkungsgrad stark absinken lassen.

Eine mögliche Konfiguration zur Fördermengeneinstellung mittels Bypass- und Drosselventil ist in Bild 1 dargestellt.

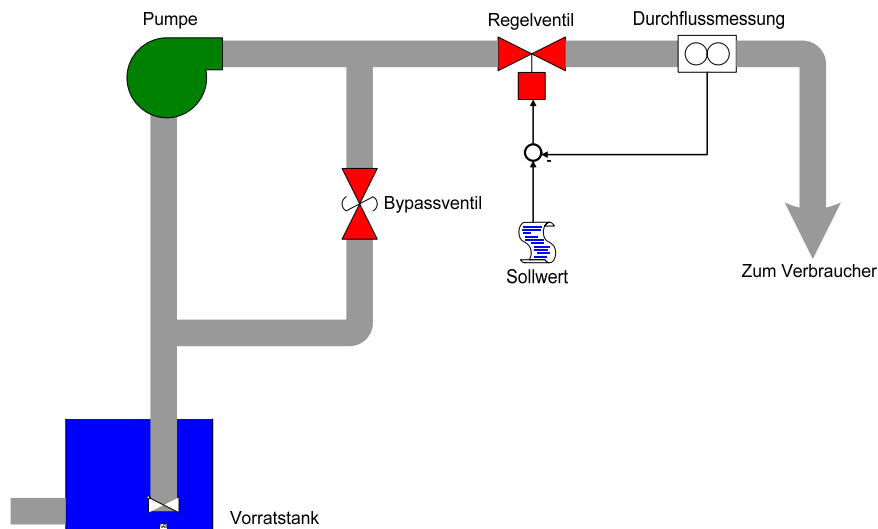


Bild 1: Einstellung der Förderleistung mittels Drosselventil

Prinzipiell wird dieser Aufbau auch in Heizungsanlagen angewandt, wobei das Drosselventil durch die Thermostatventile in den Räumen ersetzt wird. Das Überströmventil dient dann dazu, die Druckdifferenz im Heizungssystem zu begrenzen und störende Pfeifgeräusche in den Thermostatventilen zu vermeiden. In Anlagen zur Be- und Entlüftung werden Drosselklappen zur Luftmengeneinstellung ebenfalls sehr häufig eingesetzt. /2/, /3/

In Bild 2 wurde ausgehend von der in Bild 1 dargestellten Anordnung für einen Teillastbetrieb mit 60 % der Bemessungsfördermenge eine Betrachtung der in den einzelnen Teilen des Systems auftretenden Verluste durchgeführt. Auffällig und letztendlich für den schlechten Gesamtwirkungsgrad des Systems verantwortlich sind die hohen Verluste in Drossel- und Überstromventil. Der schlechte Wirkungsgrad ist jedoch nicht der einzige Nachteil dieser Art der Förderleistungseinstellung: Gerade bei der Förderung von abrasiven Medien, wie es z.B. in der Farbenindustrie bei den Pigmentsuspensionen der Fall ist, kommt es zu hohem Verschleiß an den Ventilen.

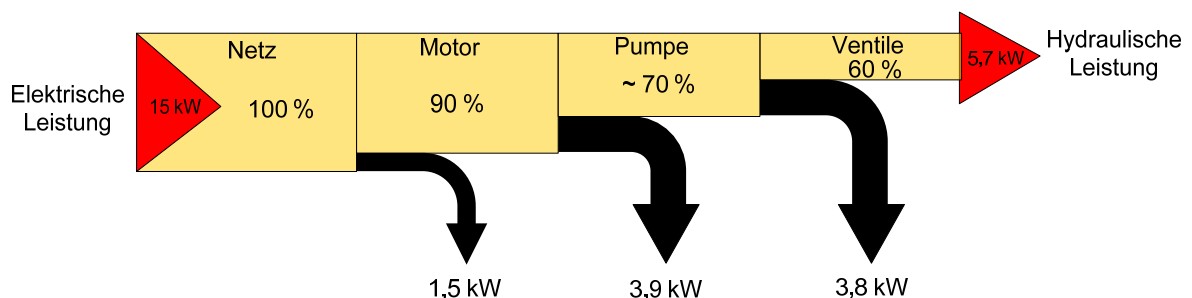


Bild 2: Quellen der Verluste bei der Förderleistungseinstellung bei 30 m³/h mittels Drosselventil, Auslegungsfördermenge 50 m³/h

Förderleistungseinstellung mittels Frequenzumrichter

Die energetisch sehr viel bessere Methode zur Förderleistungsanpassung von Strömungsmaschinen ist der Weg über die Drehzahlverstellung der Antriebsmaschine. Hierbei können Drossel- und Überströmventile entfallen, und die Pumpe fördert nur die Flüssigkeitsmenge, die zum aktuellen Zeitpunkt im Produktionsprozess benötigt wird. Bei den heute üblicherweise eingesetzten Asynchronmaschinen ist eine wirtschaftliche Drehzahlverstellung nur über eine Veränderung der Speisefrequenz mit üblicherweise proportionaler Verstellung der Maschinenspannung möglich. Durch die großen technologischen Fortschritte in der Leistung- und –Mikroelektronik sind heute sehr kompakte und preisgünstige Frequenzumrichter am Markt erhältlich. Hierbei wird an die Dynamik im Gegensatz zu anderen Anwendungen wie z.B. bei Positionierantrieben nur eine sehr geringe Anforderungen gestellt, so dass ein Frequenzumrichter mit einfacher U/f – Steuerung vollkommen ausreichend ist. In Bild 3 ist das Blockschaltbild einer Anlage zur Förderung von Flüssigkeiten mittels drehzahlgesteuerter Pumpe dargestellt. Hierbei fallen prinzipbedingt die Verlustquellen in den Bauteilen „Drosselventil“ und „Regelventil“ weg, es ist jedoch zu beobachten, dass sich die Wirkungsgrade der Pumpe und des Antriebsmotors geringfügig verschlechtern.

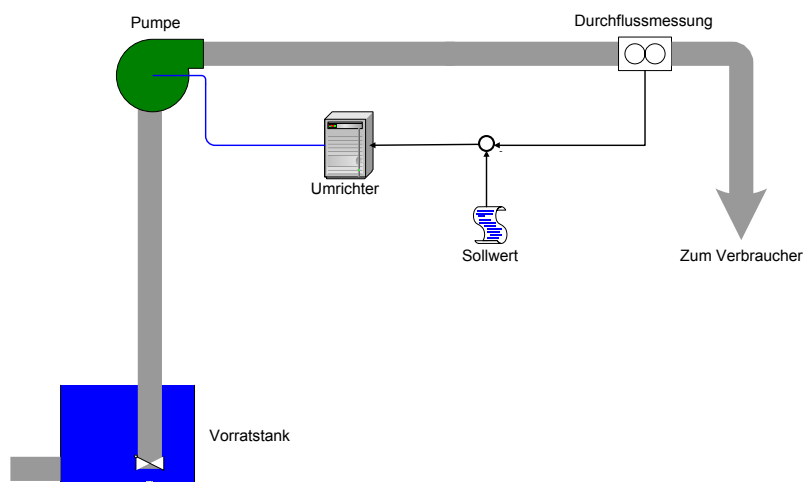


Bild 3: Einstellung der Förderleistung mittels Frequenzumrichter

Unter energetischen Gesichtspunkten haben sich bei der in Bild 3 dargestellten Anordnung die Schwerpunkte der Verlustentstehung verändert, wobei insgesamt der Systemwirkungsgrad im Teillastbereich, wie in Bild 4 ersichtlich, deutlich angestiegen ist. Die Ursache der Wirkungsgradverschlechterung bei der Pumpe liegt darin begründet, dass sie nicht mehr in ihrem Auslegungsdrehzahlbereich betrieben wird und daher schlechtere hydraulische Eigenschaften aufweist. Bei der Maschine ergeben sich zusätzliche Verluste durch die in der Umrichterausgangsspannung enthaltenen Oberschwingungen. Diese Verluste sind im Vergleich zu den Grundschwingungsverlusten bei Bemessungsbetrieb jedoch gering. Global betrachtet muss dabei auch berücksichtigt werden, dass die gesamte an die Pumpe abgegebene Leistung kubisch mit der Drehzahl abnimmt, sodass die sich mit

fallender Drehzahl und gegenüber dem Betrieb am Netz verschlechternden Wirkungsgrade von Motor und Pumpe nicht in einer Verlustleistungszunahme dieser beiden Komponenten auswirkt, sondern absolut betrachtet die Verlustleistung drastisch sinkt. Als zusätzliche Verlustquelle ist bei der Förderleistungsverstellung mittels Frequenzumrichter jedoch der Frequenzumrichter selbst zu sehen. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades (üblicherweise zwischen 0,96 und 0,98) können die zusätzlichen Verluste des Umrichters im Verhältnis zu den eingesparten Verlusten durch den Fortfall des Drosselventils als sehr gering bezeichnet werden.

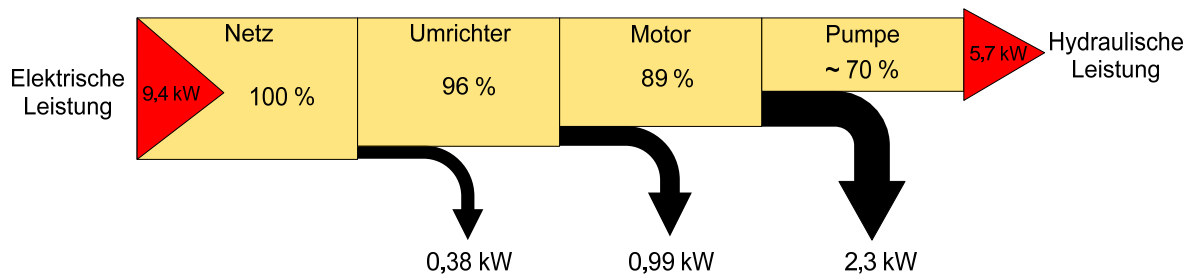


Bild 4: Quellen der Verluste bei der Förderleistungsverstellung einer Pumpe mittels Frequenzumrichter. Eingestellte Fördermenge 30 m³/h, Bemessungsfördermenge 50 m³/h

Als weitere Vorteile der Frequenzumrichterspeisung des Pumpenmotors sei hier noch zu erwähnen, dass beim Einschalten der Pumpe das Netz vor Spannungseinbrüchen geschützt wird, was besonders bei leistungsstarken Pumpen an Wichtigkeit gewinnt. Desweiteren treten in den angeschlossenen Rohrleitungen und Armaturen keine Druckstöße auf, wenn die Pumpendrehzahl langsam gesteigert wird. Durch den Fortfall der Drossel und –Regelventile entfallen auch Quellen möglicher Undichtigkeiten, was bei der Förderung von Stoffen mit Gefahrenpotential die Sicherheit der Anlage erhöht.

Kosten der Frequenzumrichternachrüstung

Bei der Ausstattung von neu errichteten Anlagen mit einem frequenzumrichtergespeisten Antrieb fallen zunächst einmal die Kosten für den Frequenzumrichter an. Der Pumpenantrieb stellt an den Motor wie eingangs bereits erläutert keine hohen Anforderungen bezüglich der Dynamik oder Positioniergenauigkeit, so dass ein Frequenzumrichter in einfacher Ausführung für diese Antriebsaufgabe ausreichend ist. Für den in Bild 4 beschriebenen Antrieb (18 kW Bemessungsleistung) würde ein Frequenzumrichter gemäß Herstellerangabe ab ca. 2000 € zu erhalten sein. Hinzu kämen noch die Kosten für die Montage und Inbetriebnahme, die eventuelle Anbindung an das Prozessleitsystem sowie den eventuell erforderlichen Schaltschrank. Für die folgenden Betrachtungen wird zur Vereinfachung von den reinen Umrichteranschaffungskosten ausgegangen.

Bisher war es bei der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ unumgänglich, den Motor zusammen mit dem Frequenzumrichter zu prüfen und den Frequenzumrichtertyp in der EG-Baumusterprüfbescheinigung des Motors festzuschreiben. Hierdurch bedingt

war der Aufwand bei der Prüfung deutlich höher, und der spätere Ausfall einer Komponente zog oft den Austausch des gesamten Antriebssystems nach sich, wenn die ausgefallene Komponente nicht mehr typgleich erhältlich war.

Bei der Betrachtung des Motors ist bei Anwendung des im weiteren Verlauf dieses Beitrages beschriebenen neuen Zertifizierungskonzeptes für Motoren der Zündschutzart „Erhöhte

Sicherheit“ am Frequenzumrichter gegenüber der netzgespeisten Maschine mit nur geringfügig höheren Kosten für den Motor zu rechnen, und der spätere Tausch einer Komponente ist problemlos möglich.

Amortisation des Frequenzumrichtereinsatzes

Für den Verantwortlichen bei der Planung einer neuen Anlage sind bei der Entscheidung für oder gegen den Einsatz eines Frequenzumrichters die zusätzlichen Kosten, die Amortisationszeit, eventuelle Folgekosten sowie die Einflüsse auf die Betriebsweise der Anlage von Bedeutung.

Zur überschlägigen Bestimmung der Amortisationszeit sind im wesentlichen die Energiekosten pro kWh, das Lastprofil, mit dem der Antrieb später betrieben werden soll, die gesamte Jahresbetriebszeit, eventuelle andere Einflüsse auf den Produktionsprozess sowie die Kosten für den Frequenzumrichter relevant.

Für das in diesem Vortrag herangezogene Beispiel wird wie bereits beschrieben, von zusätzlichen Kosten für den Frequenzumrichter von € 2000,- ausgegangen. Für den Motor können bei der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ in erster Näherung die selben Kosten angesetzt werden wie für einen netzgespeisten Motor. Zusätzlich ist ein gemäß Richtlinie 94/9/EG funktionsgeprüftes Kaltleiterauswertgerät erforderlich, gleichzeitig entfällt jedoch der bei Betrieb am Netz erforderliche Motorschutzschalter. Bei den Energiekosten wird für das hier betrachtete Beispiel ein Arbeitspreis von 0,194 € / kWh angenommen. Diese Arbeitspreis wird von vielen Energieversorgern zur Zeit bei Gewerbekunden in Rechnung gestellt. Bei Industriekunden, die teilweise auch eigene Kraftwerke betreiben, sind die Energiekosten deutlich geringer, was sich in einer Verlängerung der Amortisationszeiten für den Frequenzumrichtereinsatz niederschlägt.

Zur realitätsnahen Abschätzung der Amortisationszeiten wurden zunächst, wie in Bild 5 dargestellt, mehrere Lastprofile definiert, wobei der zeitliche Anteil der Auslastungsgrade an der gesamten Jahresbetriebszeit von 5000 h in drei Beispielen variiert wurde.

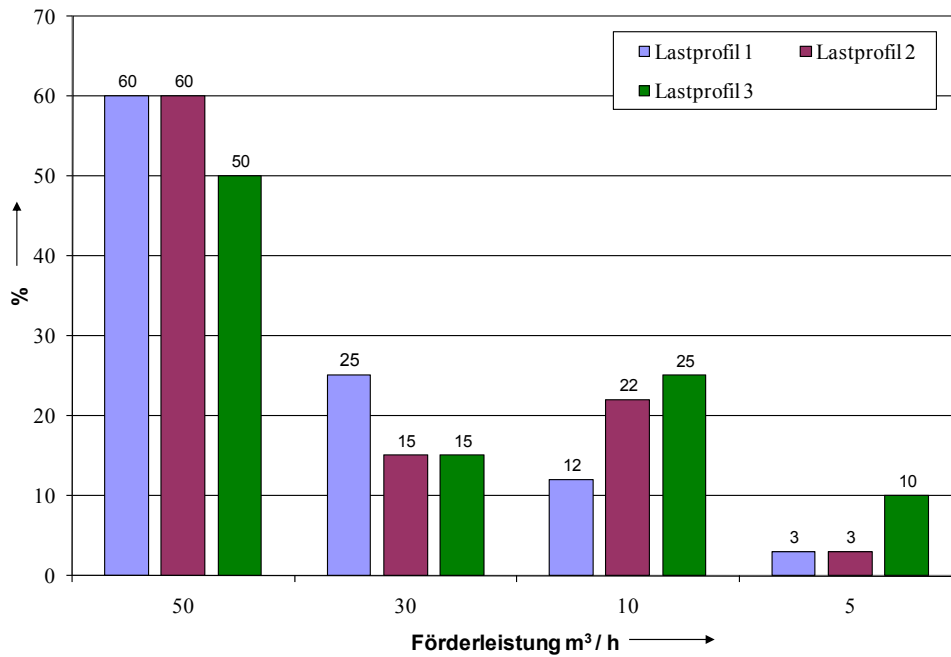


Bild 5: angenommene Lastprofile für die Berechnung der Amortisationszeiten

Ausgehend von den in Bild 5 dargestellten Lastprofilen können die zu erwartenden Energiekosten für den Betrieb am Netz und am Frequenzumrichter jetzt für die verschiedenen Lastprofile aufgetragen werden.

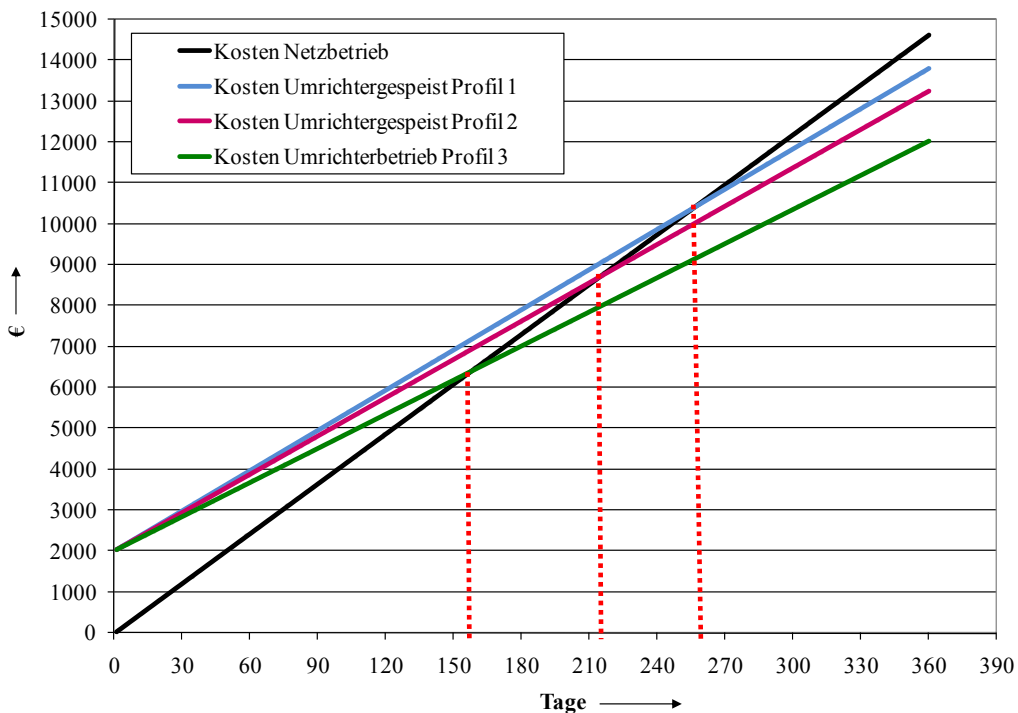


Bild 6: Energiekostenverlauf über der Zeit für den Betrieb am Netz und für den Frequenzumrichterbetrieb. Anschaffungskosten des Frequenzumrichters: € 2000,-

Die für die umrichter gespeisten Antriebe bereits bei der Zeit $t=0$ entstandenen Kosten in Höhe von € 2000,- entsprechen den Anschaffungskosten des Frequenzumrichters. Aus den Schnittpunkten der Kurven für den Umrichterbetrieb und dem Netzbetrieb ergeben sich direkt die Amortisationszeiten in Tagen, wie durch die gestrichelten Linien angedeutet wurde. Über den in Bild 6 dargestellten Zusammenhang lassen sich die Amortisationszeiten für beliebige Investitionskosten (Parallelverschiebung der „Umrichterkurven“) sowie für andere als in Bild 1 dargestellte, eventuell energetisch günstigere Methoden zur konventionellen Förderleistungseinstellung (Abflachung der „Netzkurve“) ermitteln.

Aber selbst bei einer deutlichen Verlängerung der Amortisationszeiten ist der Einsatz von Frequenzumrichtern für den Antrieb von Strömungsmaschinen in den meisten Fällen über die Nutzungsdauer des Gerätes mit großen finanziellen Einsparungen verbunden.

Wird für das hier betrachtete Beispiel eine konstante Auslastung angenommen, ergeben sich die in Bild 7 dargestellten Amortisationszeiten in Betriebsstunden in Abhängigkeit der Förderleistung bezogen auf die Auslegungsförderleistung der Pumpe.

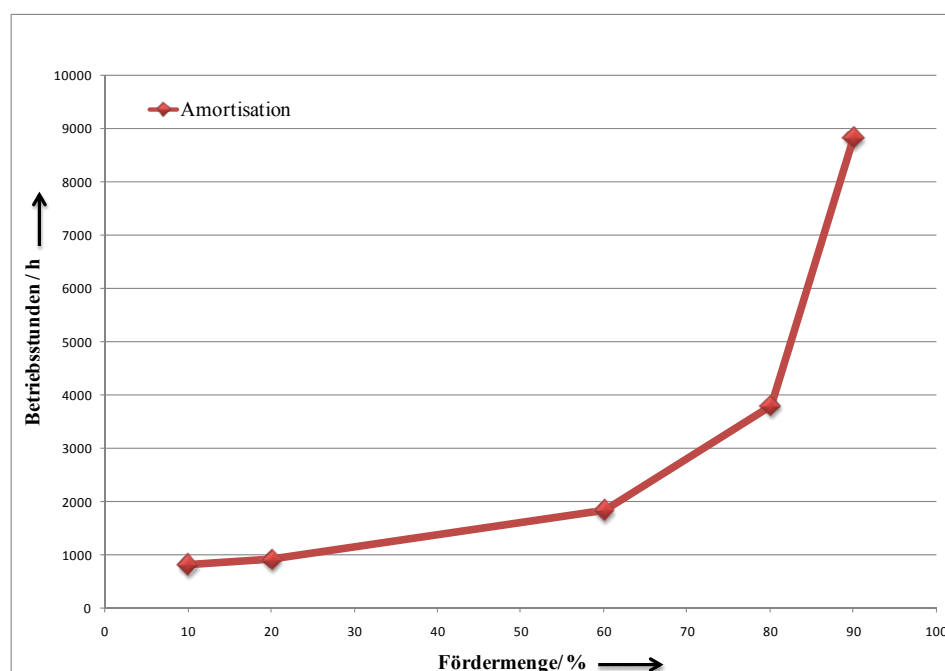


Bild 7: Amortisationszeit des Frequenzumrichters in Abhängigkeit der prozentualen Fördermenge bezogen auf die Auslegungsfördermenge der Pumpe

Aus Bild 7 wird sehr eindrucksvoll ersichtlich, dass der Einsatz von Frequenzumrichtern besonders lohnend ist, wenn die Pumpe häufig und langandauernd deutlich geringere Fördermengen als ihre Bemessungsfördermenge bereitstellen muss.

Es besteht Nachholbedarf

Betrachtet man den Anteil der Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen in der chemischen und petrochemischen Industrie, so wird deutlich, dass bei bestehenden Anlagen der Anteil frequenzumrichter gespeister Antriebe an der Gesamtzahl der Antriebe deutlich geringer ist als bei Neuanlagen, was jetzt auch nicht anders zu erwarten gewesen wäre. Hieraus wird aber auch ersichtlich, dass gerade in der Nachrüstung bestehender Anlagen mit Frequenzumrichtern global betrachtet noch sehr große Energieeinsparungspotentiale stecken. In Bild 8 ist als Beispiel die Verteilung zwischen netzgespeisten und umrichter gespeisten Antrieben in einem großen deutschen Chemieunternehmen dargestellt. /6/ Die Daten stammen aus dem Jahr 2006 und können näherungsweise auch auf andere Unternehmen der Chemie und Petrochemie übertragen werden.

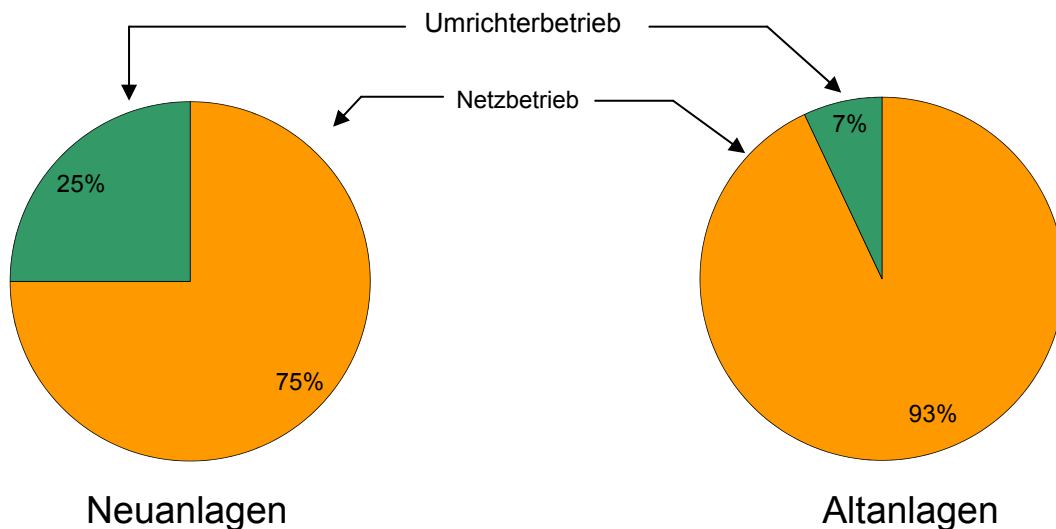


Bild 8: Anteile umrichter gespeister Antriebe in der chemischen Industrie

Der sichere Betrieb von frequenzumrichter gespeisten Antrieben der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“

Bei der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ beruht der Explosionsschutz des Betriebsmittels darauf, eine Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre zu vermeiden, wobei die explosionsfähige Atmosphäre auch in das Innere des Betriebsmittels eindringen kann, Bild 9

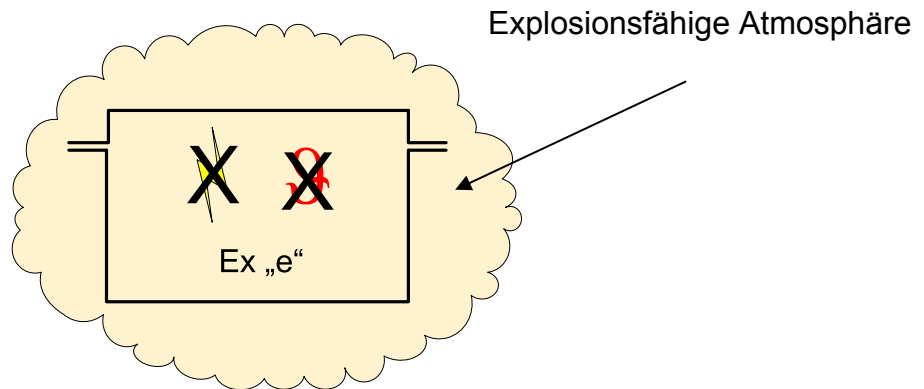


Bild 9: Das Prinzip der Zündschutzart „e“

Die möglichen Zündquellen bei einem Asynchronmotor sind heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken und elektrische Entladungen. /7/ Zu deren Vermeidung gelten bei explosionsgeschützten Motoren erhöhte Anforderungen an die mechanische Konstruktion und Auslegung, an das elektrische Isolationssystem sowie den Schutz vor unzulässigen Erwärmungen. Bei frequenzumrichter gespeisten Maschinen kommen bei den Zündquellen „Elektrische Entladungen“ und „heiße Oberflächen“ gegenüber dem Betrieb am Netz zusätzliche „Risikofaktoren“ hinzu, die bei der Auslegung der Maschine und der Zertifizierung berücksichtigt werden müssen.

Elektrische Entladungen

Bedingt durch die schnellen Schaltvorgänge der Leistungstransistoren und damit hohen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten bilden sich auf der Leitung zum Motor Wanderwellenvorgänge aus, wobei die für die hochfrequenten Vorgänge wirksamen Eingangsimpedanzen des Motors und des Umrichterausgangs sich von dem Wellenwiderstand der Leitung unterscheiden. Im allgemeinen gilt $Z_{\text{Motor}} \gg Z_{\text{Leitung}}$, so dass sich für die in Richtung Motor laufende Spannungswelle ein Reflexionsfaktor nahe 1 ergibt, und die Welle reflektiert wird. Bei im Verhältnis zur Frequenz dieser Wanderwellenvorgänge elektrisch langen Leitungen können dabei transiente Spannungsspitzen bis zur doppelten Zwischenkreisspannung an den Motorklemmen auftreten, Bild 10. Die im Klemmenkasten der Maschine vorhandenen Luftstrecken müssen auf die transienten Überspannungen dimensioniert werden, wohingegen die Kriechstrecken gemäß EN 60079-7 nur für den Effektivwert der Umrichterausgangsspannung ausgelegt werden müssen. Gemäß EN60079-7 führen kurzzeitige Spannungsspitzen nicht zur Ausbildung von Erosionen durch Kriechströme an der Oberfläche.

Sehr wichtig ist es jedoch, dass die Isolation der Wicklung für diese hohen, steilflankigen Spannungsimpulse ausgelegt ist. Stark belastet wird auch die Windungsisolation im Eingangsbereich der Wicklung, da sich hier ein Großteil der Spannung abbaut. Treten hier Teilentladungen auf, führt das über längere Zeiträume zu einer Zerstörung der organischen Lackdrahtisolation und letztendlich zu einem zündfähigen Durchschlag und zu einem Ausfall des Motors. Kann die

Teilentladungsfreiheit vom Motorhersteller nicht garantiert werden, so ist ein Filter vorzuschalten, um die Spannungsbelastung der Wicklung zu vermindern. /1/

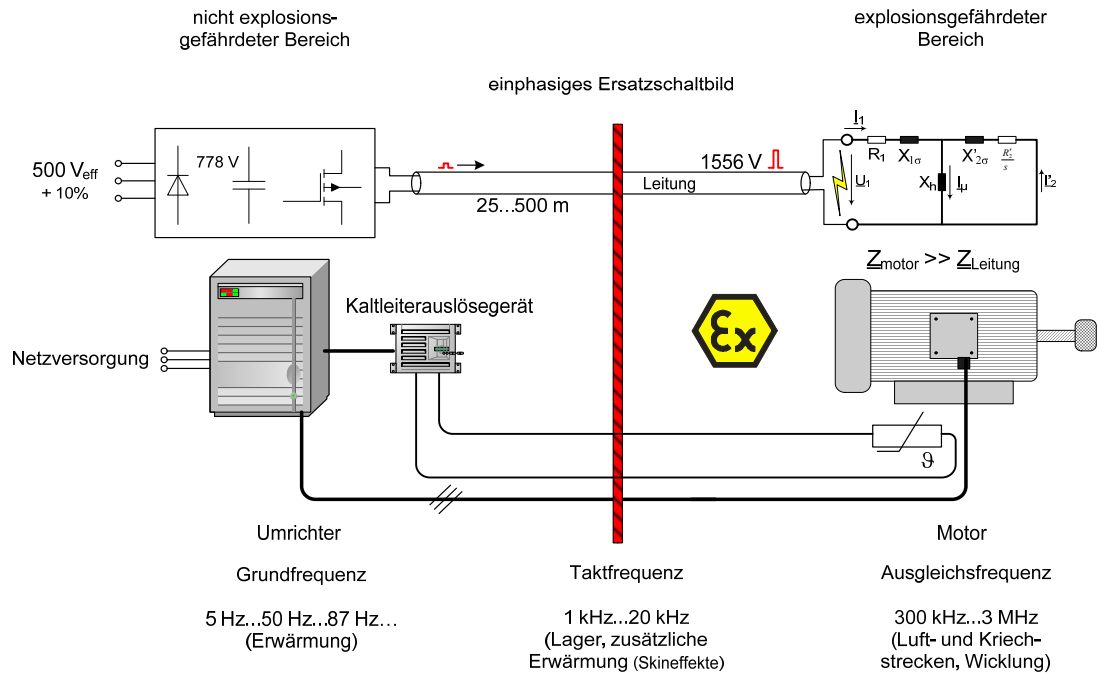


Bild 10: Entstehung von transienten Überspannungen an einem frequenzumrichter-gespeisten Antrieb

Heiße Oberflächen

Nimmt eine elektrische Maschine eine unzulässige Temperatur an, so sind die Ursachen dafür entweder eine zu hohe Verlustleistung innerhalb der Maschine, z.B. durch Überlastung, oder eine unzureichende Kühlwirkung. Ursachen für eine unzulässig hohe Verlustleistung besonders im Rotor der Maschine kann auch ein Betrieb außerhalb der Spezifikationen des Motors, z.B. mit Unterspannung, sein.

Diese Effekte müssen durch technische Schutzeinrichtungen und in der EG-Baumusterprüfbescheinigung festgelegte Betriebsparametergrenzen beherrscht und Zündgefahren ausgeschlossen werden. Neben der durch die Temperaturklasse gegebenen Begrenzung dürfen auch die Dauerbetriebstemperaturen der Wicklungsisolation, Dichtungen und anderer Anbauteile nicht überschritten werden, um eine vorzeitige Alterung mit eventuell zündfähigem Ausfall zu vermeiden.

Bei den heute üblicherweise eingesetzten Spannungszwischenkreisumrichtern sind auch ohne Sinusausgangfilter die zusätzlichen Erwärmungen des Motors durch die Oberschwingungen sehr gering und liegen bei den in der PTB untersuchten Motoren allesamt unter 10 K (Motorbemessungsspannung 400V, maximale Umrichtereingangsspannung 500 V). Bei Auslegung des Umrichters gemäß den Vorgaben der EG-Baumusterprüfbescheinigung für den Motor braucht der Störfall „blockierter Motor“ nicht berücksichtigt zu werden und daher kann auch die dafür vorgehaltene Temperaturreserve deutlich verkleinert werden. Ein ganz wichtiger Punkt ist hingegen die Zunahme des thermischen Widerstandes zur Umgebung mit

abnehmender Drehzahl bei eigenbelüfteten Maschinen. In Bild 11 ist dieser Zusammenhang für zwei Maschinen der Baugrößen 180 und 132 dargestellt.

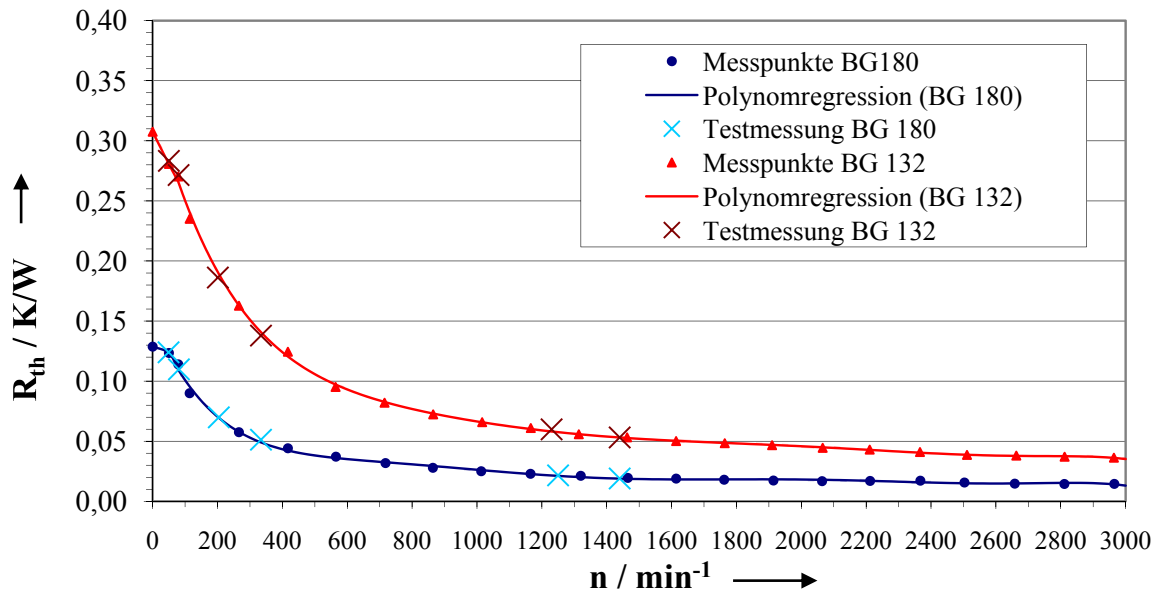


Bild 11: Verlauf des thermischen Widerstandes zur Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl

Dieser Effekt wird in dem neuen Prüf- und – Zertifizierungskonzept für frequenzumrichter gespeiste Antriebe der Zündschutzart „e“ durch eine drehzahlvariable Strombegrenzung des Frequenzumrichters berücksichtigt. In Bild 12 ist beispielhaft der maximale Maschinenstrom bezogen auf den Nennstrom für eine Maschine der Baugröße 132 dargestellt. Alle Betriebspunkte unterhalb der Kurve sind dauerhaft zulässig, oberhalb der Linie jedoch nur für eine begrenzte, in Abhängigkeit der Überlastung berechnete Zeit. Bei einem Maschinenstrom größer dem 1,5 – fachen Bemessungsstrom erfolgt eine sofortige Abschaltung. /4/, /5/

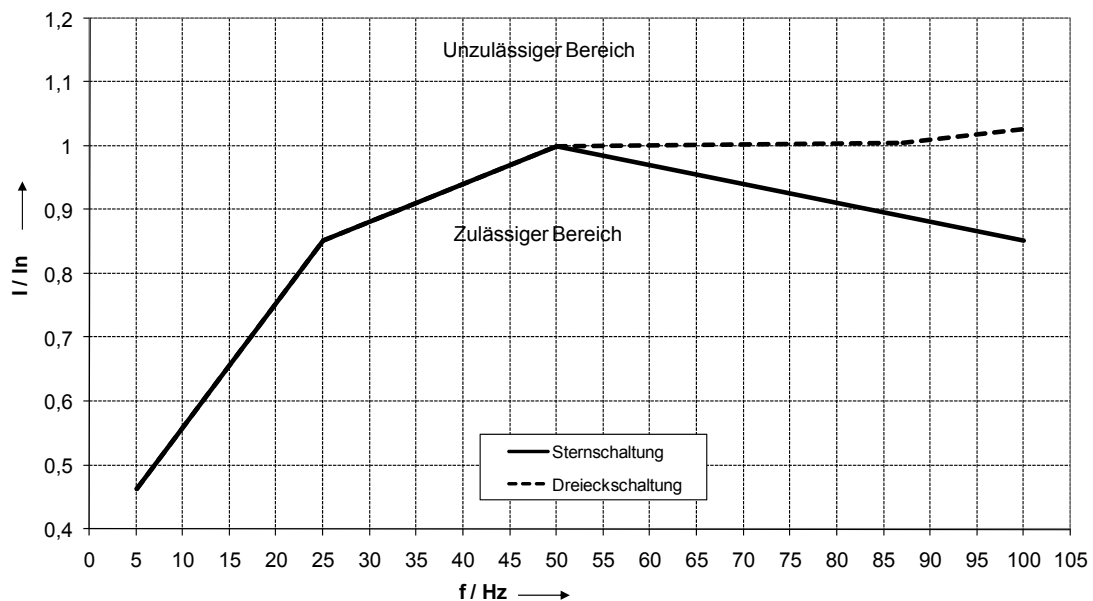


Bild 12: Drehzahlvariable Strombegrenzung

Die Stützstellen der Kurven wurden durch Messungen in der PTB ermittelt. Zusätzlich zu diesem Schutz über eine frequenzabhängige Stromüberwachung wird noch eine zweite, gemäß der Richtlinie 94/9/EG als Überwachungsgerät zertifizierte Schutzeinrichtung gefordert, da der Frequenzumrichter nicht zertifiziert wird und das vom Hersteller auch nicht gewünscht wird. Diese Schutzeinrichtung ist in der Regel eine direkte Temperaturüberwachung über Drillingskaltleiter mit geprüftem Kaltleiterauswertegerät. Die direkte Temperaturüberwachung hat den weiteren Vorteil, dass auch andere Störungen wie ein verstopftes Lüftergitter oder zu hohe Umgebungstemperaturen erkannt werden.

Sehr wichtig für den sicheren Betrieb ist auch die Einhaltung der im Datenblatt des Motors spezifizierten Betriebsparameter, wobei besonders der Grundschiwingungsspannung an den Motorklemmen eine besondere Bedeutung zukommt. Wird z.B. der Spannungsabfall am Umrichter und den Motoranschlusskabeln nicht ausreichend berücksichtigt, so vergrößert sich bei unverändertem Drehmoment der Schlupf des Motors, und insbesondere der Rotor erhitzt sich sehr stark. Der Spannungsabfall muss auch in jedem Fall berücksichtigt werden, wenn zwischen Motor und Umrichter zur Verminderung von Überspannungen ein Sinus-Ausgangfilter geschaltet wird. Bild 13 verdeutlicht die Situation:

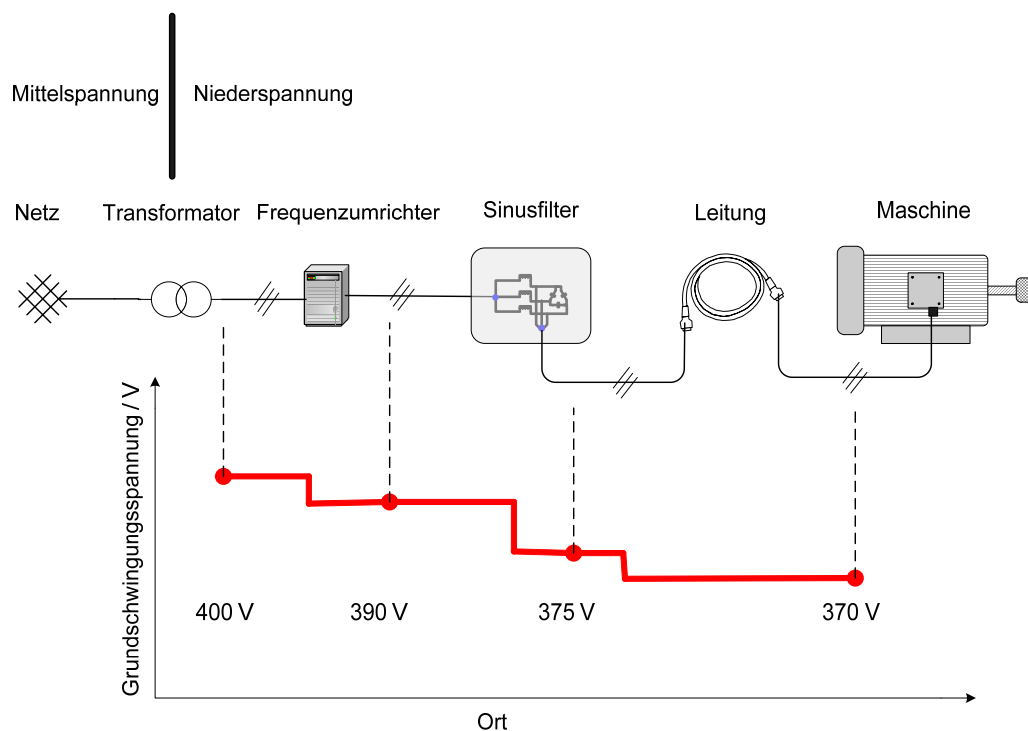


Bild 13: Spannungsabfälle zwischen Netz und Maschine

Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Erfahrungen mit dem neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept für frequenzumrichter gespeiste Antriebe der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ sind äußerst vielversprechend, und es zeigte sich, dass bis zur Temperaturklasse „T3“ eine Zertifizierung für den Betrieb am Umrichter problemlos möglich ist. Voraussetzung für den sicheren Betrieb ist dabei jedoch, dass die im Datenblatt spezifizierten Betriebsparameter des Motors eingehalten werden und die Wicklung für die auftretenden Spannungsimpulse geeignet ist.

Durch das in der PTB entwickelte neue Prüf und –Zertifizierungskonzept für frequenzumrichter gespeiste Antriebe konnte die Attraktivität für deren Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen deutlich gesteigert und damit große Energieeinsparungspotentiale eröffnet werden. Durch die jetzt nicht mehr erforderliche Kopplung des Umrichters an den Motor bei der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ wurde mit deutlich geringeren Kosten für den Motor nahezu die gleiche Flexibilität erreicht wie bei der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“.

Zur Zeit erfolgt gerade zusammen mit einem Unternehmen die Entwicklung eines Motorschutzgerätes für umrichter gespeiste Antriebe. Beim Einsatz des Gerätes können dann auch Frequenzumrichter ohne drehzahlvariable Strombegrenzung eingesetzt werden, und der Kaltleiter ist auch nicht mehr zwingend erforderlich.

Literatur

- /1/ Berth, M., Eberhardt, M., Kaufhold, J., Speck, J.; Elektrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung; erschienen in: Elektrie, Band 49, 1995
- /2/ Gawol, M.; Drehzahlregelung von Pumpen und Lüftern mit Frequenzumrichtern, Teil 2; IKZ-Haustechnik, Heft 2, 1994
- /3/ Gawol, M.; Drehzahlregelung von Pumpen und Lüftern mit Frequenzumrichtern; IKZ-Haustechnik, Heft 1, 1994
- /4/ Lehrmann, C. : Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichter gespeiste Käfigläufer der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“; Dissertation Leibniz-Universität Hannover 2006; erschienen im Shaker-Verlag, Aachen
- /5/ 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
- /6/ Linnenbrink, H. ; Vortrag VIK-Fachtagung am 17.11.2005
- /7/ PTB-Prüfregel; Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart „Erhöhte Sicherheit“ Ex e, Band 3, zweite Ausgabe 2007