

# Umrichtergespeiste Antriebe für den Ex-Bereich

## Schutzmassnahmen für den sicheren Betrieb

Frequenzumrichtergespeiste Antriebe eröffnen besonders beim Antrieb von Strömungsmaschinen grosse Energieeinsparungspotenziale, und es besteht daher ein Anreiz, auch bestehende Anlagen mit Frequenzumrichtern nachzurüsten. Werden die Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt, kommt der Beherrschung der Zündgefahren und der Sicherstellung des Explosionsschutzes eine besondere Bedeutung zu. Bei elektrischen Maschinen können als Zündquellen elektrische Entladungen, heisse Oberflächen sowie mechanisch erzeugte Funken auftreten. Durch ein geeignetes Schutzkonzept und eine entsprechende konstruktive Ausführung der Maschine ist es möglich, diese Zündquellen auch bei einer frequenzumrichtergespeisten Asynchronmaschine zu eliminieren.

Bei der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» beruht der Explosionsschutz des Betriebsmittels darauf, eine Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre zu vermeiden, die auch ins Innere des Betriebsmittels ein-

*Christian Lehrmann*

gedrungen sein kann. Die möglichen Zündquellen bei einem Asynchronmotor sind heisse Oberflächen, mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken und elektrische Entladungen [1]. Zur Vermeidung solcher Vorkommnisse gelten bei explosionsgeschützten Motoren erhöhte Anforderungen an die mechanische Konstruktion und Auslegung, an das elektrische Isolationssystem sowie den Schutz vor unzulässigen Erwärmungen. Bei frequenzumrichtergespeisten Maschinen kommen bei den beiden Zündquellen elektrische Entladungen und heisse Oberflächen gegenüber dem Betrieb am Netz zusätzliche Zündgefahren 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 sich die für die hochfrequenten Vorgänge wirksa-

men Eingangsimpedanzen des Motors und des Umrichterausgangs vom Wellenwiderstand der Leitung unterscheiden. Im Allgemeinen gilt  $Z_{\text{Motor}} \gg Z_{\text{Leitung}}$ , sodass 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 Mo-

torklemmen auftreten (Bild 1). Die im Klemmenkasten der Maschine vorhandenen Luftstrecken müssten auf die transienten Überspannungen dimensioniert werden, wohingegen die Kriechstrecken gemäss EN 60079-7 [2] nur für den Effektivwert der Umrichterausgangsspannung ausgelegt werden müssen. Gemäss EN 60079-7 führen kurzzeitige Spannungsspitzen nicht zur Ausbildung von Erosionen durch Kriechströme an der Oberfläche.

Praktisch bewährt hat sich bei Niederspannungsmaschinen, die Bemessungsspannung des Klemmenkastens auf die Frequenzumrichtereingangsspannung auszuliegen, solange keine transienten Überspannungen mit einer Amplitude grösser der doppelten Zwischenkreisspannung auftreten. Ist mit Mehrfachreflexionen und somit höheren Spannungen zu rechnen, sollte für den Klemmenkasten die nächsthöhere Bemessungsspannungsstufe gewählt werden. Diese Vorgehensweise wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) empfohlen.

Wichtig ist es jedoch auch, dass die Isolation der Wicklung für diese hohen, steilflankigen Spannungsimpulse ausgelegt ist [3]. Stark belastet wird auch die Windungsisolation im Eingangsbereich der Wicklung, da sich hier ein Grossteil der Spannung

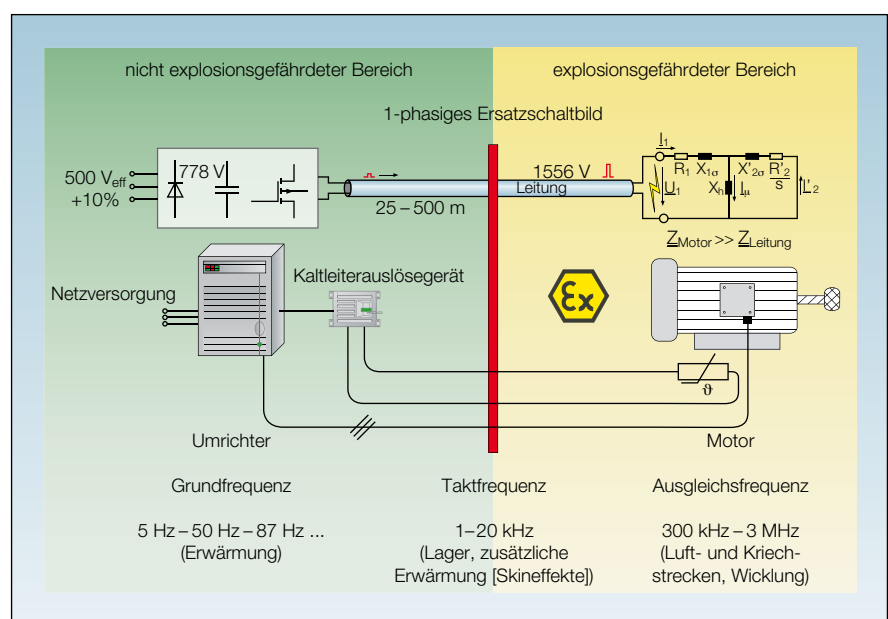
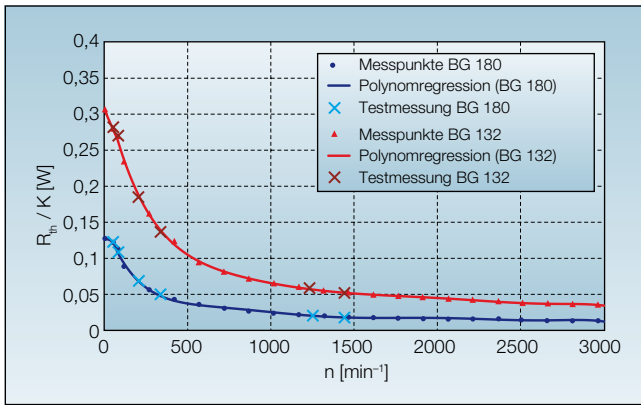
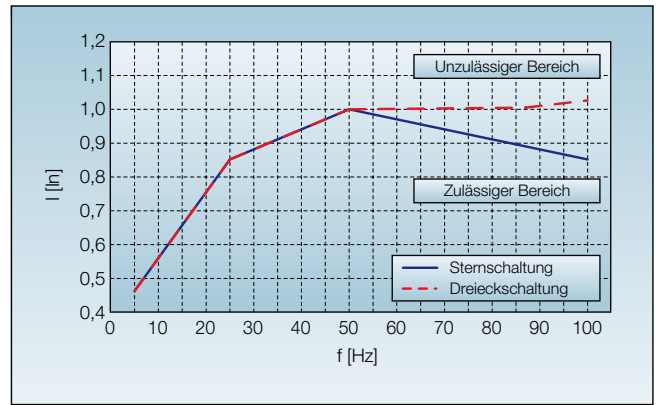


Bild 1 Entstehung von transienten Überspannungen an einem frequenzumrichtergespeisten Antrieb.



**Bild 2** Verlauf des thermischen Widerstands zur Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl.



**Bild 3** Drehzahlvariable Strombegrenzung aus der EG-Baumusterprüfbescheinigung.

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.

### 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 wer-

den, Zündgefahren sind auszuschliessen. Neben der durch die Temperaturklasse gegebenen Begrenzung dürfen auch die Dauerbetriebstemperaturen der Wicklungsisolation, der Dichtungen sowie anderer Anbauteile nicht überschritten werden, um eine vorzeitige Alterung mit eventuell zündfähigem Ausfall zu vermeiden.

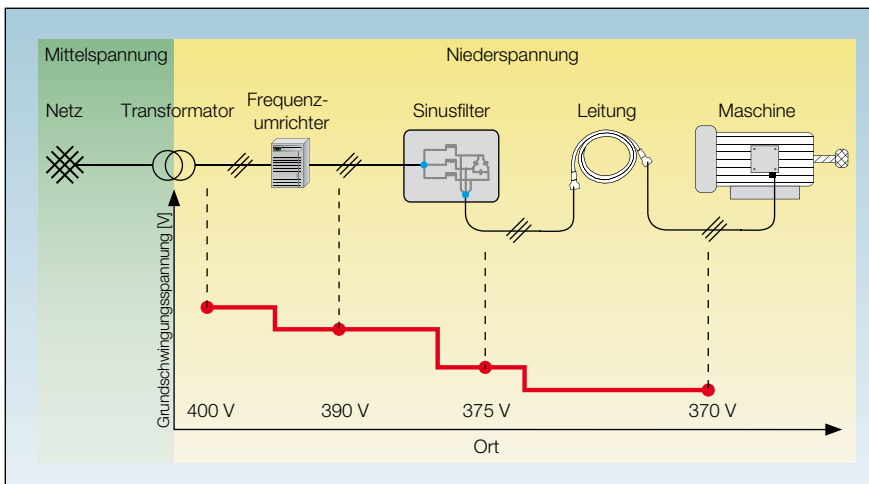
Bei den heute üblicherweise eingesetzten Spannungszwischenkreisumrichtern sind auch ohne Sinusausgangfilter die zusätzlichen Erwärmungen des Motors durch die Oberschwingungen gering und liegen bei den in der PTB untersuchten Motoren bei Einhaltung der zulässigen Betriebsparametergrenzen in den meisten Fällen unter 10 K. 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 Widerstands zur Umgebung mit abnehmender Drehzahl bei eigenbelüfteten Maschinen. In

Bild 2 ist dieser Zusammenhang für zwei Maschinen der Baugrössen 180 und 132 aufgetragen.

Dieser Effekt wird im neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept für frequenzumrichtergespeiste Antriebe der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» durch eine drehzahlvariable Strombegrenzung des Frequenzumrichters berücksichtigt. In Bild 3 ist als Beispiel der maximale Maschinenstrom bezogen auf den Bemessungsstrom 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].

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 ist und das von den Herstellern auch nicht gewünscht wird. Diese Schutzeinrichtung ist in den meisten Fällen eine direkte Temperaturüberwachung über Drillingskaltleiter mit geprüfem Kaltleiterauswertegerät. Die direkte Temperaturüberwachung hat den weiteren Vorteil, dass auch andere Störungen wie ein verstopftes Lüftergitter oder zu hohe Umgebungstemperaturen erkannt werden.

Wichtig für den sicheren Betrieb ist auch die Einhaltung der im Datenblatt des Motors spezifizierten Betriebsparameter, wobei besonders der Grundschnungsspannung 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



**Bild 4** Spannungsabfälle zwischen Netz und Maschine.

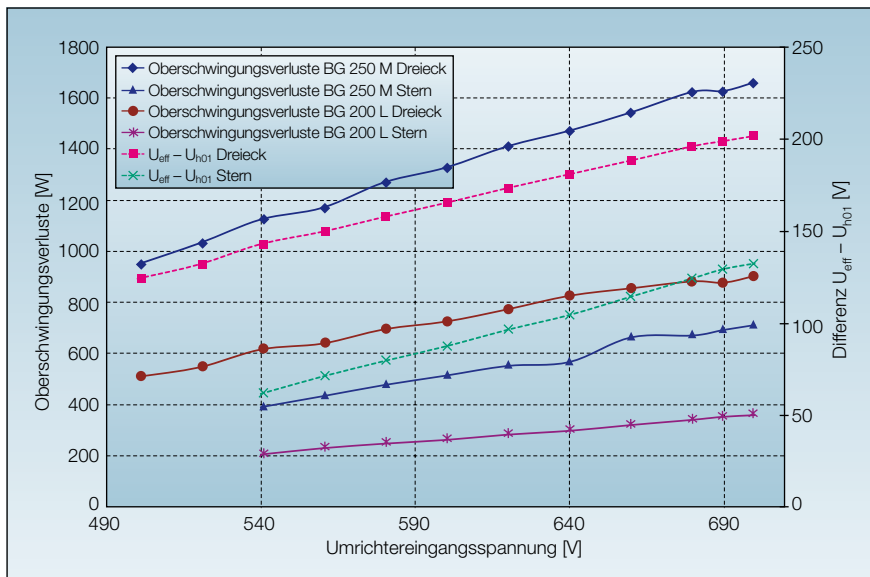


Bild 5 Abhängigkeit der Oberschwingungsverluste von der Umrichtereingangsspannung.

Motors, und insbesondere der Rotor erhitzt sich stark. Der Spannungsabfall muss auch in jedem Fall berücksichtigt werden, wenn zwischen Motor und Umrichter zur Verminderung von Überspannungen ein Sinusausgangsfiler geschaltet wird; Bild 4 verdeutlicht diese Situation.

### Oberschwingungsverluste

Eine weitere Quelle der Verluste und somit der Erwärmungen bei einem frequenzumrichter gespeisten Antrieb sind die durch die Frequenzumrichterspeisung bedingten Oberschwingungsverluste. Die Ursache hierfür sind die in der Versorgungsspannung des Motors enthaltenen Spannungsüberschwingungen, die nichts zur Drehmomentbildung des Motors beitragen, aber dennoch zu einem Stromfluss durch den Motor führen und somit zu Verlusten sowohl im Eisen (Wirbelstromverluste) als auch in der Statorwicklung sowie dem Läuferkäfig führen (ohmsche Verluste). Bildlich vorgestellt kann die Maschine aufgeteilt werden in eine das Drehmoment bildende «Grundschiwingungsmaschine» und mehrere auf der Welle angeordnete «Oberschwingungsmaschinen», wobei aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen das Superpositionsprinzip anwendbar ist. Aus dieser bildlichen Vorstellung wird gut ersichtlich, dass die Oberschwingungsverluste sowohl mit der Zahl der auftretenden Oberschwingungen als auch deren Amplitude ansteigen. Hierbei wird deutlich, dass die Frequenzumrichtereingangsspannung bzw. die Differenz zwischen dem Effektivwert und dem Grundschiwingungswert der Motorspannung einen direkten Einfluss auf die Oberschwingungsverluste nehmen, wie die in Bild 5 dargestellte Messung zeigt.

Zur Begrenzung der Oberschwingungsverluste ist es daher erforderlich, die Versorgungsspannung des Umrichters zu limitieren. Dieser Wert wird daher auch in der EG-Baumusterprüfbescheinigung aufgeführt. Bei Einhaltung dieser Vorgaben sind die Oberschwingungsverluste klein gegenüber den Grundschiwingungsverlusten (unter 10%) und führen nicht zu unzulässigen Erwärmungen.

### Steigerung der Energieeffizienz

Dieser neue Ansatz wird mit dazu beitragen, den Anteil frequenzumrichterspeiseter Antriebe auch in der chemischen Industrie weiter zu steigern, wodurch sich gerade beim Antrieb von Strömungsmaschinen

grosse Energieeinsparungspotenziale ergeben. Das Ergebnis eines Vergleichs der Energieeffizienz der Förderleistungsverstellung über Bypass- bzw. Reduzierventile und der direkten Drehzahlverstellung der Pumpe mittels Frequenzumrichter ist in Bild 6 dargestellt. Die angenommenen Randbedingungen waren dabei eine Bemessungsförderleistung der Pumpe von 50 m<sup>3</sup>/h bei einem Druck von 7 bar. Für die Betrachtung in Bild 6 wurde eine vom Prozess benötigte Fördermenge von 30 m<sup>3</sup>/h angesetzt. Bei angenommenen 5000 Teillastbetriebsstunden pro Jahr und einer Motorbemessungsleistung von 18 kW liegt bei den heutigen Energiepreisen die Amortisationszeit für den Frequenzumrichter oftmals unter einem Jahr.

Zusammenfassend betrachtet, nimmt die Energieeinsparung gegenüber der Förderleistungsverstellung mittels Ventilen mit steigender Drosselung der Pumpe, d.h. abnehmender Förderleistung, zu. Wird die Pumpe ungedrosselt betrieben, so ergeben sich gegenüber dem direkten Betrieb am Netz hingegen wegen der Verluste des Umrichters und der Oberschwingungsverluste des Motors geringfügig höhere Verluste. Wird die Pumpe prozessbedingt jedoch ständig mit ihrer Bemessungsförderleistung betrieben, ist eine Frequenzumrichternachrüstung nicht sinnvoll. Bild 7 zeigt die abgeschätzte Amortisationszeit für einen Frequenzumrichter (Anschaffungspreis 2000 €) in Abhängigkeit der Förderleistung (Motorleistung 18 kW, Arbeitspreis 0,19 €/kWh).

Nun wird es in der Praxis sehr unwahrscheinlich sein, dass die Pumpe über die Zeit konstant mit derselben hydraulischen Auslastung betrieben wird. Deutlich praxisnäher ist es, verschiedene Lastprofile für

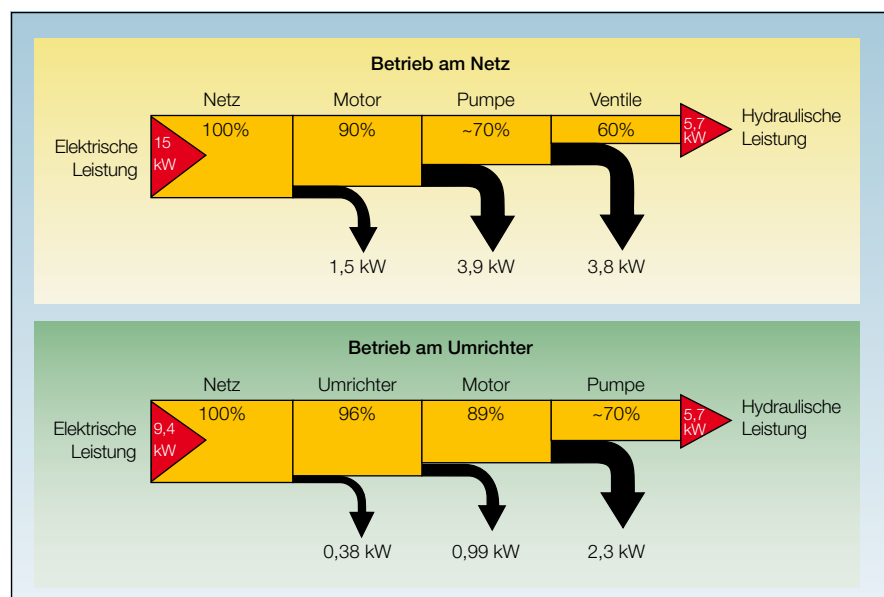
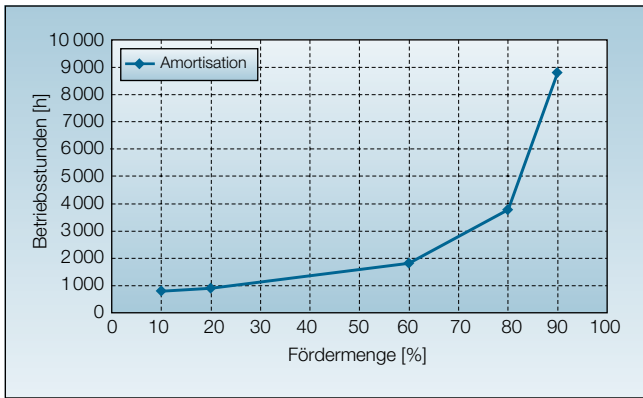
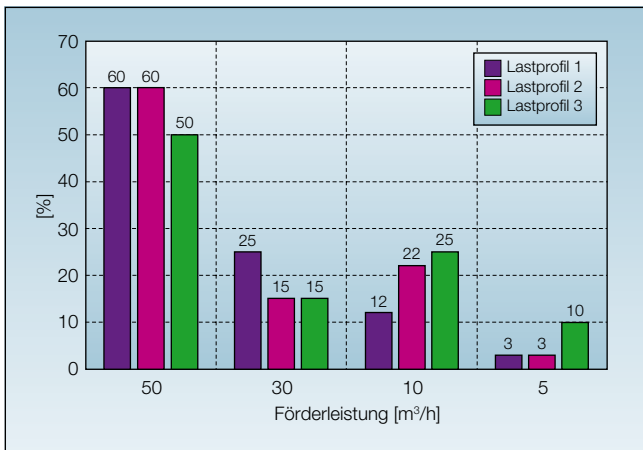


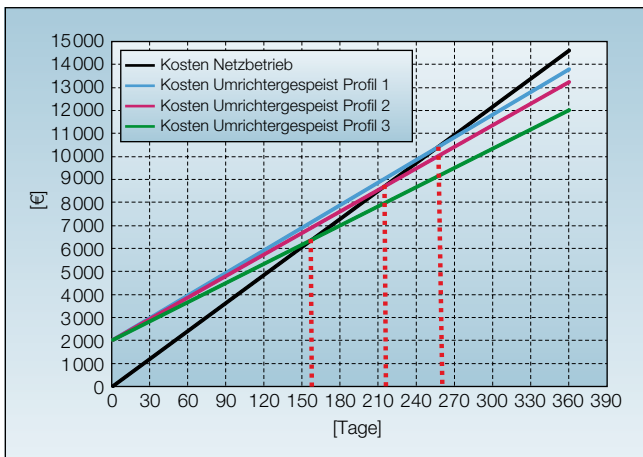
Bild 6 Von der elektrischen zur hydraulischen Leistung.



**Bild 7**  
Amortisationszeit des Frequenzumrichters (Anschaffungspreis 2000 €) in Abhängigkeit des Verhältnisses Fördermenge zu Bemessungsfördermenge.



**Bild 8**  
Zeitliche Aufteilung der hydraulischen Auslastung.



**Bild 9**  
Energiekostenverlauf über die Zeit für den Betrieb am Netz und für den Frequenzumrichterbetrieb. Anschaffungskosten des Frequenzumrichters: 2000 €.

eine Abschätzung der Energieeinsparpotenziale anzunehmen, wobei jedes die Aufteilung verschiedener Auslastungen auf die gesamte Betriebszeit eines Jahres ausdrückt. Für die hier durchgeführten Betrachtungen wurden die in Bild 8 dargestellten 3 Lastprofile angenommen. Dabei wird von einer Betriebsdauer der Pumpe von insgesamt 5000 h innerhalb eines Jahres ausgegangen. Die Balken stellen dort den zeitlichen Anteil der hydraulischen Auslastungen dar (50, 30, 10, 5 m³/h) dar, wobei die Bemessungsfördermenge 50 m³/h trägt.

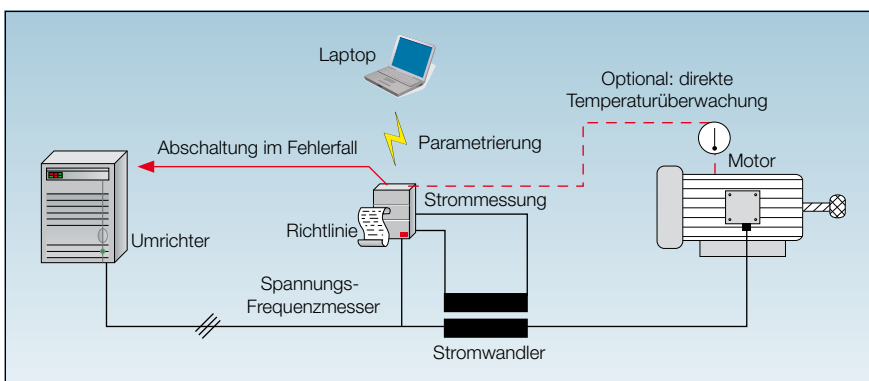
Werden nun die über die Zeit anfallenden Kosten für den Betrieb am Netz und für den Betrieb am Frequenzumrichter unter Annahme der in Bild 8 dargestellten Lastprofile berechnet, so ergibt sich unter der vereinfachenden Annahme konstanter Motorleistung für den Betrieb am Netz (Förderleistungsverstellung über ein Bypassventil) eine durch den Koordinatenursprung laufende Gerade mit den Energiekosten pro Zeiteinheit als Steigung (Kosten Netzbetrieb).

Die für die umrichter gespeisten Antriebe bereits bei der Zeit  $t = 0$  entstandenen Kosten in Höhe von 2000 € entsprechen den angenommenen Anschaffungskosten des Frequenzumrichters. Aus den Schnittpunkten der Geraden für den Umrichterbetrieb und dem Netzbetrieb ergeben sich direkt die Amortisationszeiten in Tagen, wie durch die gestrichelten Linien angedeutet wurde. Über den in Bild 9 dargestellten Zusammenhang lassen sich die Amortisationszeiten für beliebige Investitionskosten (Parallelverschiebung der «Umrichtercurven») sowie für andere, eventuell energetisch günstigere Methoden zur konventionellen Förderleistungseinstellung (Abflachung der «Netzcurve») 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 Geräts mit grossen finanziellen Einsparungen und anderen Vorteilen wie z.B. Optimierung der Prozessführung und Vermeidung von Spannungseinbrüchen beim Anlauf von Pumpen grosser Leistung verbunden.

### Umrichter auch im Ex-Bereich

Die bisherigen Erfahrungen mit dem neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept für frequenzumrichtergespeiste Antriebe der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» sind vielversprechend, und es zeigte sich, dass bis zur Temperaturklasse T3 eine Zertifizierung für den Betrieb am Umrichter problemlos möglich ist. Voraussetzung für den



Bilder: PTB

**Bild 10** Überwachung des Motors bei Umrichterbetrieb.

sicheren Betrieb ist jedoch, dass die im Datenblatt spezifizierten Betriebsparameter des Motors eingehalten werden und die Wicklung für die auftretenden Spannungsimpulse geeignet ist.

Zurzeit erfolgt gerade zusammen mit einem Unternehmen die Entwicklung eines Motorschutzgeräts für umrichter gespeiste Antriebe. Beim Einsatz des Geräts können dann auch Frequenzumrichter ohne drehzahlvariable Strombegrenzung eingesetzt werden, und der Kaltleiter ist auch nicht mehr zwingend erforderlich. Bild 10 zeigt den möglichen Einsatz des Schutzgeräts.

## Referenzen

- [1] PTB-Prüfregel; Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart «Erhöhte Sicherheit» Ex e, Band 3, zweite Ausgabe 2007.
- [2] DIN EN 60079-7, Explosionsfähige Atmosphäre Teil 7: Geräteschutz durch erhöhte Sicherheit «e»; Beuth-Verlag Berlin, 2007.
- [3] M. Berth, M. Eberhardt, J. Kaufhold, J. Speck: Elektrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung; erschienen in: *Elektrie*, Band 49, 1995.
- [4] C. Lehmann: Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart «Erhöhte

Sicherheit»; Dissertation Leibniz-Universität Hannover 2006; erschienen im Shaker-Verlag, Aachen.

- [5] C. Lehmann, H. Pape, U. Dreger, F. Lienesch: Umrichtergespeiste Antriebe – ein neuartiges Schutzkonzept für Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen; *Ex-Zeitschrift R. Stahl Schaltgeräte GmbH*, Heft 38/2006, S. 36–47.

## Angaben zum Autor

Dr.-Ing. **Christian Lehmann** studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Braun-

schweig und ist seit 1999 Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe 3.72 (Explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Die Dissertation mit dem Titel «Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» wurde im August 2006 erfolgreich abgeschlossen. Im Juni 2008 wurde dem Autor der Adolf-Martens-Preis für ein neues Explosionsschutzkonzept für umrichtergespeiste Antriebe der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» verliehen.

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, D-38116 Braunschweig, christian.lehmann@ptb.de*

## Résumé

### Entraînements alimentés par onduleur pour zones explosibles

*Mesures de protection pour la sécurité en service.* Les entraînements alimentés par des convertisseurs de fréquence offrent des potentiels considérables d'économie d'énergie, en particulier pour l'entraînement des turbomachines, et il est dès lors intéressant d'en équiper les installations existantes. Lorsque les entraînements sont installés en zone explosible, la maîtrise des risques d'amorçage et la protection intrinsèque jouent un rôle de prime importance. Avec les machines électriques, les décharges électriques, les surfaces chaudes et les étincelles d'origine mécanique peuvent être autant de sources d'amorçage. Un concept de protection approprié et une construction adaptée de la machine permet d'éliminer ces risques également sur une machine asynchrone alimentée par convertisseur de fréquence.