



Durch Frequenzumrichter gespeiste Antriebe in der Zünd- schutzart ›Erhöhte Sicherheit‹

Schutzmaßnahmen für den sicheren Betrieb

von Dr.-Ing. Christian Lehrmann



Umrichtergespeiste Antriebe ermöglichen besonders beim Antrieb von Strömungsmaschinen große Potenziale, Energie einzusparen. Es besteht daher der Anreiz, auch bestehende Anlagen umzurüsten. Da im explosionsgefährdeten Bereichen sehr häufig gerade für größere Antriebe Motoren in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit ›e‹ verwendet werden, ist es für den Betreiber von großem Interesse, für diese Antriebe eine wirtschaftliche und flexible Lösung für den Umrichterbetrieb zu finden.

Bei der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit ›e‹ beruht der Explosionsschutz des Betriebsmittels darauf, durch geeignete Maßnahmen mit erhöhter Sicherheit eine Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre zu vermeiden. Da die explosionsfähige Atmosphäre in das Innere des Betriebsmittels eindringen kann, müssen auch innerhalb des Betriebsmittels mögliche Zündquellen sicher verhindert werden.

Die möglichen Zündquellen bei einem Asynchronmotor sind heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken und elektrische Entladungen. [1] Zu deren Vermeidung gelten bei explosionsgeschützten Motoren erhöhte Anforderungen an die mechanische Konstruktion und deren Auslegung, an die Dimensionierung des elektrischen Isolationssystems sowie an den Schutz vor unzulässigen Erwärmungen. Bei durch Frequenzumrichter gespeisten Maschinen kommen zu den möglichen Zündquellen, wie Funken, heiße Oberflächen und elektrische

Entladung 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 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 1). Die im Klemmenkasten der Maschine vorhandenen Luftstrecken müssten auf diese transienten Überspannungen ausgelegt werden, wohingegen die Kriechstrecken gemäß EN 60079-7 [2] nur für den Effektivwert der Ausgangsspannung des Umrichters ausgelegt werden müssen, da kurzzeitige Spannungsspitzen nicht zur Ausbildung von Erosionen durch Kriechströme an der Oberfläche führen.

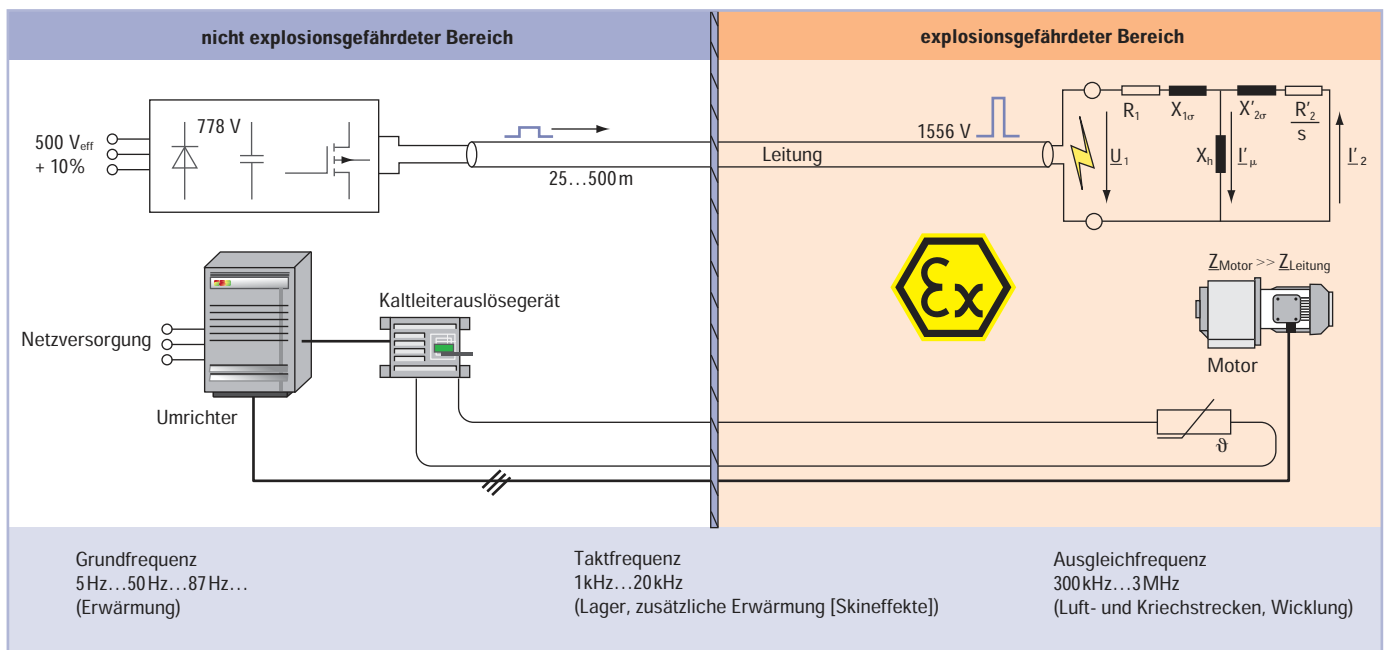


Bild 1: Entstehung von transienten Überspannungen an einem mittels Frequenzumrichter gespeisten Antrieb

Praktisch bewährt hat sich bei Niederspannungsmaschinen, die Bemessungsspannung des Klemmenkastens auf die Eingangsspannung des Frequenzumrichters auszulegen, solange keine transienten Überspannungen mit einer Amplitude größer der doppelten Zwischenkreisspannung auftreten. Ist mit Mehrfachreflexionen und somit höheren Spannungen zu rechnen, muss für den Klemmenkasten die nächsthöhere Bemessungsspannungsstufe gewählt werden. Diese Vorgehensweise wird von der PTB empfohlen.

Sehr 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 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. bei Unterspannung, sein.

Diese Effekte müssen durch technische Schutzeinrichtungen und in der EG-Baumusterprüfbescheinigung festgelegte Grenzen der Betriebsparameter beherrscht und so 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 bei Einhaltung der zulässigen Grenzen der Betriebsparameter 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 Widerstandes 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 in dem neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept für mit Frequenzumrichtern gespeiste Antriebe der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit »e« 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 geprüfte und zugelassene 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 geprüftem 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 Grundsicherungsspannung 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. Ein Spannungsabfall muss auch in jedem Fall berücksichtigt werden, wenn zwischen Motor und Umrichter zur Verminderung von Überspannungen ein Sinus-Ausgangsfiler geschaltet wird. Bild 4 verdeutlicht die Situation.

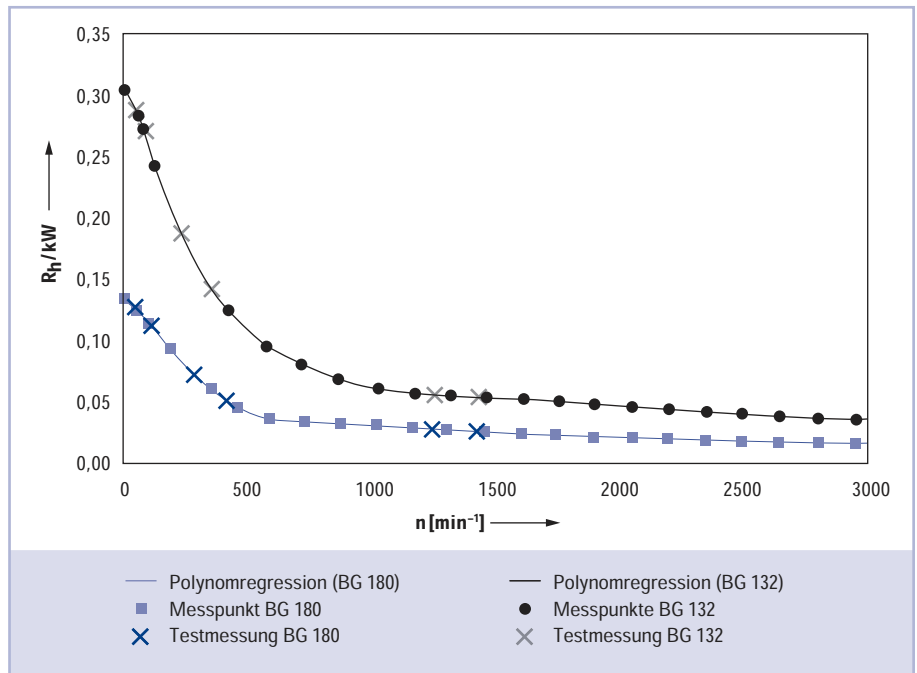


Bild 2: Verlauf des thermischen Widerstandes zur Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl

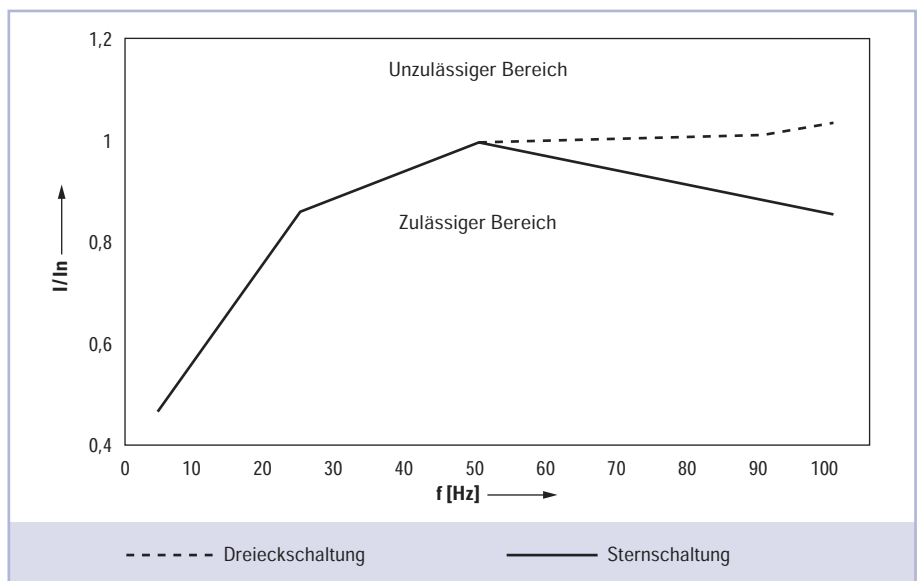


Bild 3: Drehzahlvariable Strombegrenzung, aus der EG-Baumusterprüfbescheinigung

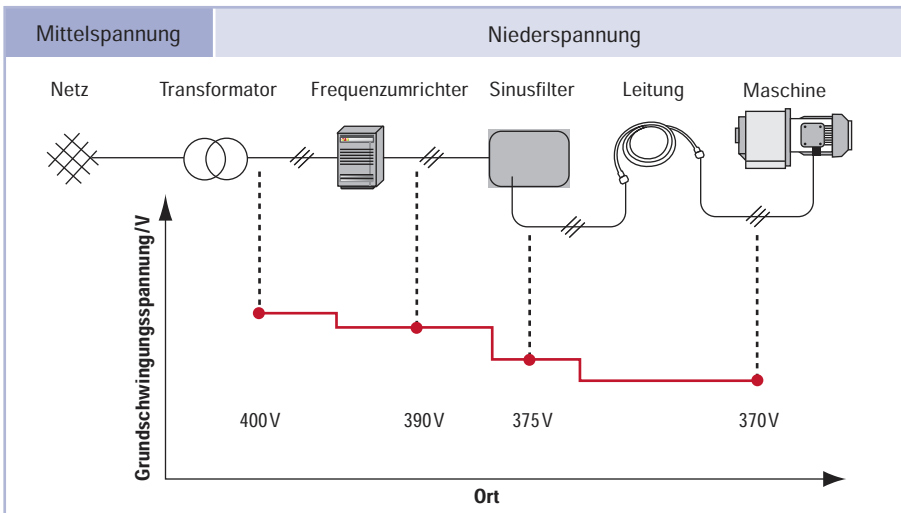


Bild 4: Spannungsabfälle zwischen Netz und Maschine

Oberschwingungsverluste

Eine weitere Quelle der Verluste und somit der Erwärmungen bei Betrieb an einem Frequenzumrichter sind die durch die Frequenzumrichterspeisung bedingten Oberschwingungsverluste. Die Ursache hierfür sind die in der Versorgungsspannung des Motors enthaltenen Spannungsüberschwingungen, die nicht 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 und dem Läuferkäfig führen (ohmsche Verluste). Bildlich vorgestellt kann die Maschine aufgeteilt werden in eine das Drehmoment bildende »Grundschwingungsmaschine« und mehrere auf der Welle angeordnete »Oberschwingungsmaschinen«, wobei aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen das Superpositionsprinzip anwendbar ist. Aus dieser bildlichen Vorstellung wird sehr gut ersichtlich, dass die Oberschwingungsverluste sowohl mit der Zahl der auftretenden Oberschwingungen als auch mit deren Amplitude ansteigen. Hierbei wird deutlich, dass die Eingangsspannung des Frequenzumrichters bzw. die Differenz zwischen dem Effektivwert und dem Grundschwingungswert 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-Baumusterprübscheinigung aufgeführt. Bei Einhaltung dieser Vorgaben sind die Oberschwingungsverluste klein gegenüber den Grundschwingungsverlusten (unter 10 %) und führen nicht zu unzulässigen Erwärmungen. →

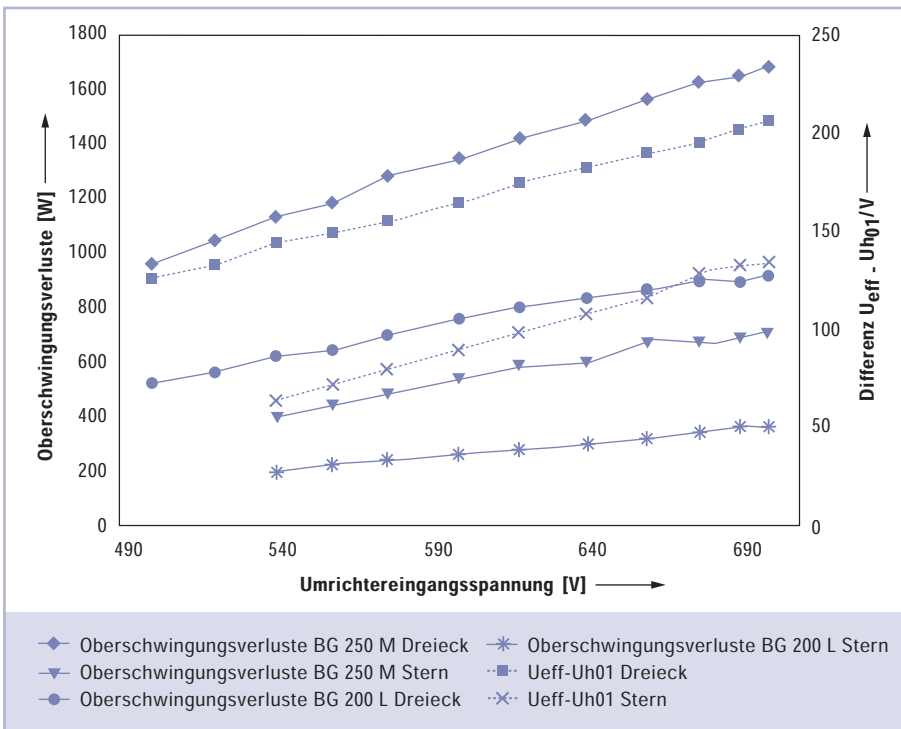


Bild 5: Abhängigkeit der Oberschwingungsverluste von der Umrichtereingangsspannung

Steigerung der Energieeffizienz

Dieser neue Ansatz wird mit dazu beitragen, den Anteil durch Frequenzumrichter gespeister Antriebe auch in der chemischen Industrie weiter zu steigern, wodurch sich gerade beim Antrieb von Strömungsmaschinen sehr große Energieeinsparungspotenziale ergeben. Das Ergebnis eines Vergleiches der Energieeffizienz der Förderleistungsverstellung über Bypass bzw. Reduzierventile und der direkten Drehzahlverstellung der Pumpe mittels Frequenzumrichter ist in Bild 6 dargestellt. Die angenommenen Randbedingungen sind dabei eine Bemessungsförderleistung der Pumpe von 50 m³/h bei einem Druck von 7 bar. Für die Betrachtung in Bild 6 wurde eine vom Prozess benötigte Fördermenge von 30 m³/h angesetzt. Bei angenommenen 5.000 Teillastbetriebsstunden pro Jahr und einer Motor-Bemessungsleistung 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 hingegen ständig mit ihrer Bemessungsförderleistung betrieben, ist eine Nachrüstung von Frequenzumrichtern nicht sinnvoll. Bild 7 zeigt die abgeschätzte Amortisationszeit für einen Frequenzumrichter in Abhängigkeit von der Fördermenge zur Bemessungsmenge.

Nun wird es in der Praxis sehr unwahrscheinlich sein, dass die Pumpe über die

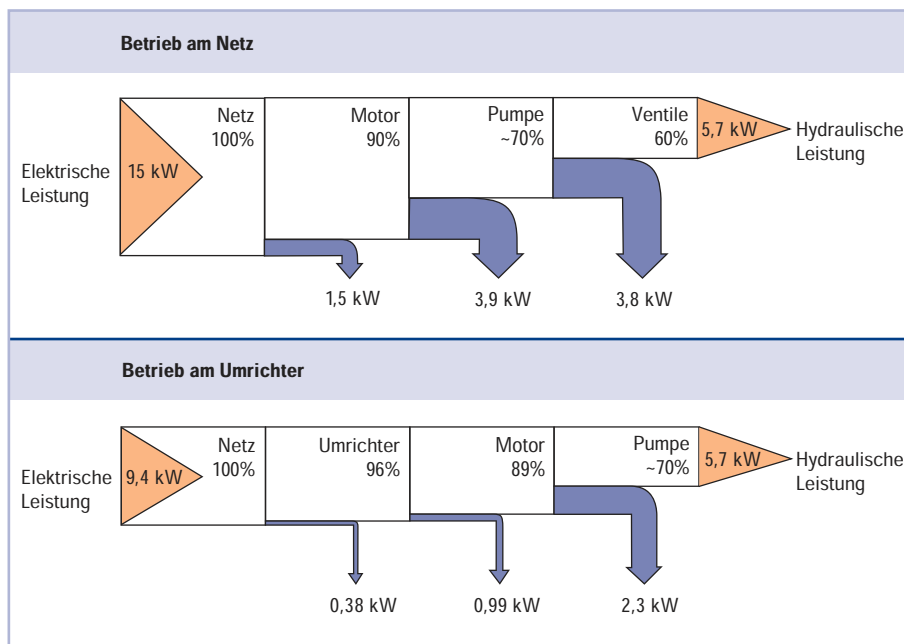


Bild 6: Von der elektrischen zur hydraulischen Leistung

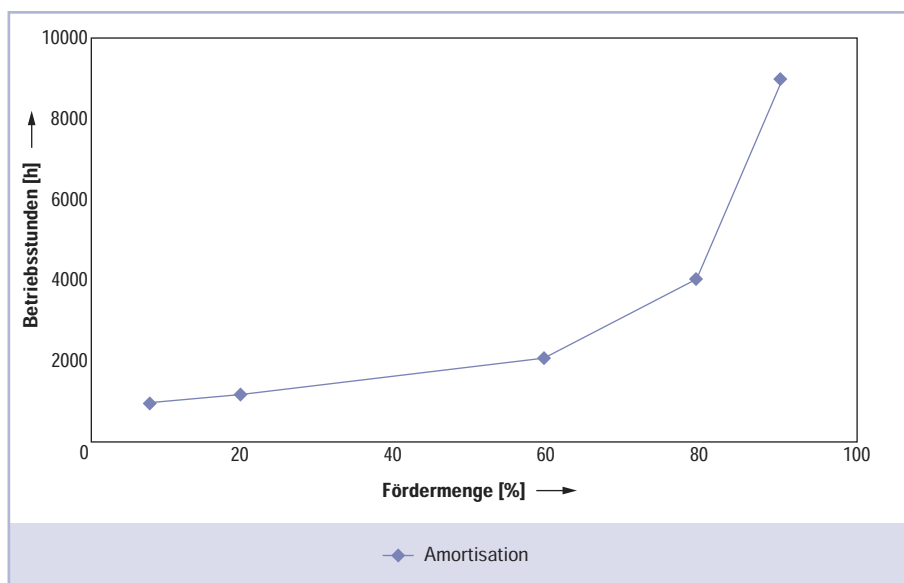


Bild 7: Amortisationszeit des Frequenzumrichters (Anschaffungspreis 2000 Euro) in Abhängigkeit des Verhältnisses Fördermenge zu Bemessungsfördermenge (Motorleistung 18 kW, Arbeitspreis 0,19 € / kWh)

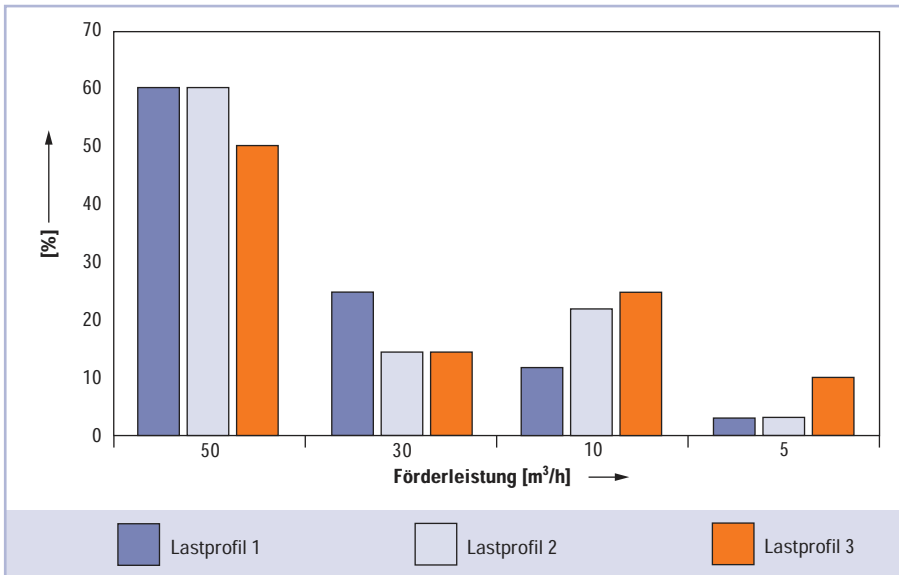


Bild 8: Zeitliche Aufteilung der hydraulischen Auslastung

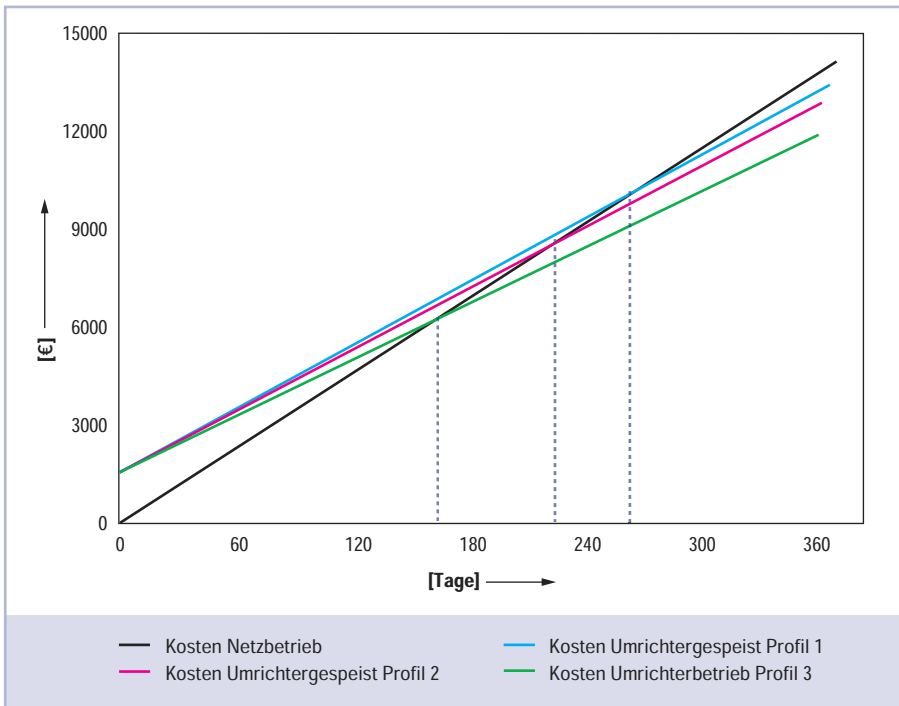


Bild 9: Energiekostenverlauf über der Zeit für den Betrieb am Netz und für den Frequenzumrichterbetrieb. Anschaffungskosten des Frequenzumrichters: 2.000 Euro

Zeit konstant mit derselben hydraulischen Auslastung betrieben wird. Deutlich praxisnäher ist es, verschiedene Lastprofile für eine Abschätzung des Einsparpotentials der Energie 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 drei Lastprofile angenommen. Dabei wird von einer Betriebsdauer der Pumpe von insgesamt 5.000 Stunden 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 beträgt.

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 durch Umrichter gespeisten Antriebe bereits bei der Zeit $t = 0$ entstandenen Kosten in Höhe von 2.000 € 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

›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 und anderen Vorteilen wie z.B. Optimierung der Prozessführung und Vermeidung von Spannungseinbrüchen beim Anlauf von Pumpen großer Leistung verbunden.

Umrichterbetrieb im explosionsgefährdeten Bereich

Die bisherigen Erfahrungen mit dem neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept für durch Frequenzumrichter gespeiste Antriebe der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit ›ex‹ 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 jedoch, dass die im Datenblatt spezifizierten Betriebsparameter des Motors eingehalten werden und die Wicklung für die auftretenden Spannungsimpulse geeignet ist. Zur Zeit erfolgt gerade zusammen mit einem Unternehmen die Entwicklung eines Motorschutzgerätes für durch 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. Bild 10 zeigt den möglichen Einsatz des Schutzgerätes.

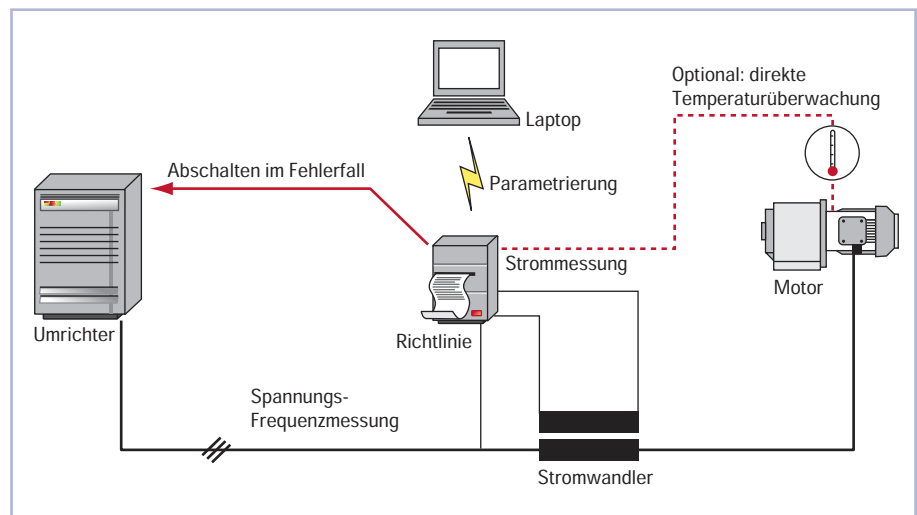


Bild 10: Überwachung des Motors bei Umrichterbetrieb

Literaturhinweise

- [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 ›ex‹; 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. Lehrmann: Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart ›Erhöhte Sicherheit‹; Dissertation Leibniz-Universität Hannover 2006; erschienen im Shaker-Verlag, Aachen.
- [5] C. Lehrmann, 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.
- [6] C. Lehrmann: Umrichtergespeiste Antriebe für den Ex-Bereich; *Bulletin SEV/VSE*, 2/2009, S. 29–23