

Drehstrommotoren an der neuen Normspannung 400 V

Teil 1 : Normmotoren ohne Explosionsschutz

H. Greiner, Aichwald

Dieses Jahr endet die Frist für die Umstellung der Netzspannung auf 400 V. Doch wie reagieren die für ihre lange Gebrauchsdauer bekannten 380-V-Drehstrommotoren auf die Überspannung? Wie bewerten z. B. Sachversicherer, Gewerbeaufsicht oder Berufsgenossenschaften die Diskrepanz zwischen den Bemessungswerten von Netz und Motorwicklung? Der Beitrag enthält einige technische Antworten zu diesem Fragenkomplex.

1 Normen

Im ersten Abschnitt wird zunächst ein Überblick zur Normung der Bemessungsspannungen und zur Zielrichtung der neuen Norm gegeben.

1.1 Entwicklung der Norm für Netze

Die Bemühungen um weltweite Normspannungen haben im Jahr 1983 mit IEC 60038 (frühere Bezeichnung: IEC 38) einen vorläufigen Abschluss gefunden. Die identische nationale Norm DIN IEC 60038 ist 1987 erschienen. In einer auf 20 Jahre veranschlagten Übergangszeit sollten die in 50-Hz-Netzen üblichen Spannungen von 380 V, 415 V, 420 V und 440 V durch die Normspannung 400 V abgelöst werden. Für Einphasennetze gilt dann sinngemäß 230 V. Die neuen Nennwerte sollten bis zu diesem Jahr übernommen werden. Im Memorandum No.14 des CENELEC (Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung) war sogar empfohlen, die neuen Nennspannungen bis 1993 einzuführen. Da aber Großbritannien mit Netzspannungen von 415 V, 420 V und 440 V erst 1993 formal zugestimmt hat und dort die Umstellung mit den Ende 1994 eingeführten Ergänzungen zu den „Wire regulations“ BS 7671 erst spät begann, konnte das eigentliche Ziel einer Welt-Normspannung bei 50 Hz noch nicht erreicht werden.

Bis zu diesem Jahr waren + 6/- 10 % Netzspannungstoleranz vorgesehen; danach ± 10 %. Diese Frist wurde auf deutschen Antrag durch das Technische Büro (BT) des CENELEC um fünf Jahre verlängert. Für die nach 2008 angestrebte Einengung auf ± 6 % bestehen derzeit geringe Aussichten.

Autor

Obering. Helmut Greiner, Aichwald, war Mitglied in verschiedenen DKE- und IEC-Komitees und ist heute als beratender Ingenieur tätig.

1.2 Bedeutung der Spannungsangabe 230 V

Nach Auskunft der VDEW kommen Drehstromnetze 3 x 220 V in den alten Bundesländern nicht mehr vor. In den neuen Bundesländern soll es jedoch noch einige wenige Drehstromnetze 3 x 220 V geben, die so bald wie möglich auf 3 x 400 V umgestellt werden sollen.

Die Spannung 230 V ist fast immer eine Einphasenspannung für Licht- und Steuer-netze. Eine Spannungsangabe 230/400 V kann daher nur als Netzbezeichnung 1~ 230 V/3~ 400 V verstanden werden.

Für die Bestellung und Beschilderung von Motoren für Netzbetrieb macht die Bezeichnung 230/400 V Δ/Y (also 3~ 230 V/3~ 400 V Δ/Y) keinen Sinn und sollte daher vermieden werden. Nur bei Umrichterbetrieb kann eine Auslegung für 3 x 230 V vorkommen.

1.3 Akzeptanz der „Eurospannung“ in europäischen Ländern

Trotz CENELEC-Memorandum ist gegen Ende der 20-jährigen Übergangsfrist eine insgesamt unbefriedigende praktische Akzeptanz der „Eurospannung“ festzustellen: Dies gilt vor allem für Großbritannien, des-

sen Sondernetz mit 415 V bzw. 420 V ein wichtiger Grund für die Einführung der neuen Spannung 400 V war.

Aus der Erhebung nach Bild 1 ist allerdings nicht erkenntlich, welcher Anteil an „genormten“ 400-V-Motoren im jeweiligen Land verwendet werden soll und welcher Anteil zum Export in Länder mit weiterhin verwendeten 380 V bestimmt ist.

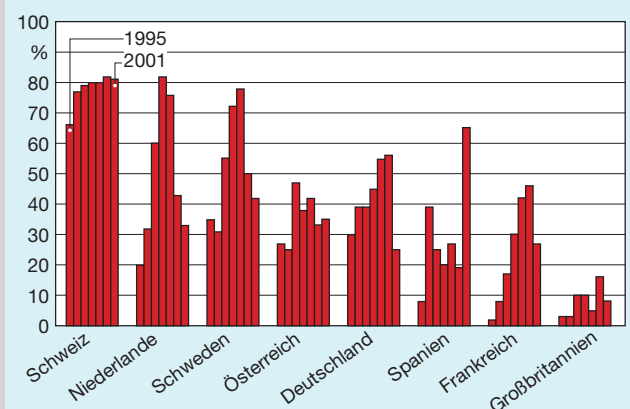
2 Zulässige Spannungsschwankung bei elektrischen Maschinen

Für elektrische Maschinen gilt nach wie vor DIN VDE 0530-1 (ist gleich EN 60 034-1), die mit IEC 60034-1 harmonisiert und in deren Abschnitt 12.3 eine zulässige Spannungsschwankung von ± 5 % genormt ist. Diese Toleranz bezieht sich auf die jeweils auf dem Leistungsschild genannte Spannung, d. h., ein für 380 V benannter Motor kann für 361 V bis 399 V, ein mit 400 V benannter von 380 V bis 420 V, verwendet werden. Die genormte Toleranz von ± 5 % wird auf dem Leistungsschild nicht angegeben (vgl. DIN VDE 0530-1, Abschnitt 12.3). Für elektrische Maschinen ist also – im Gegensatz zu den Festlegungen für die Netzspannung und Toleranzen vieler anderer Betriebsmittel – eine relativ enge Schwankung der Anschlussspannung zulässig. Dies hat technische Gründe: Kleine Motoren (z. B. < ca. 1,1 kW) und hochpolige Motoren arbeiten häufig nahe der magnetischen Sättigung und reagieren daher auf Überspannung relativ empfindlich.

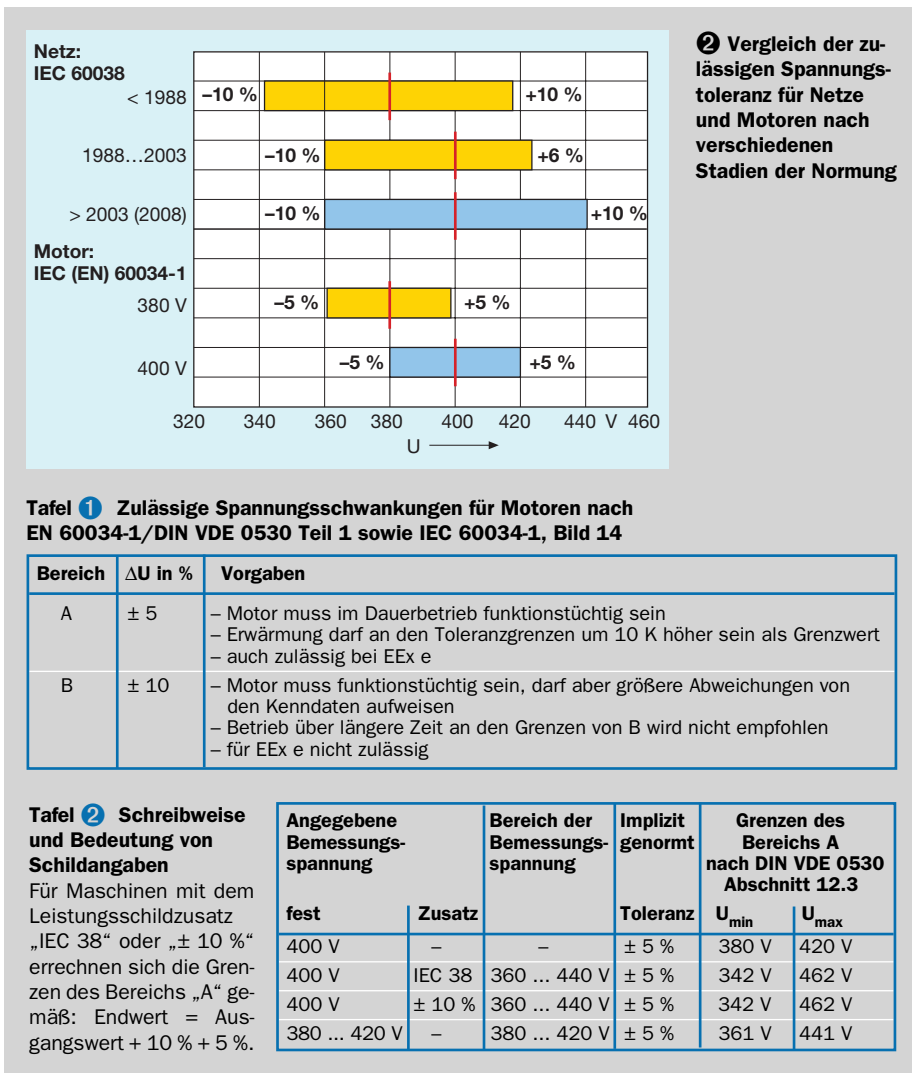
Der Tatbestand, dass für Motoren mit dem üblichen Toleranzbereich „A“ von ± 5 % eine engere Spannungstoleranz gilt als für Netze mit ± 10 % Toleranz ist nicht neu – er galt auch schon vor der Diskussion um DIN IEC 60038, wie Bild 2 zeigt.

Dieser Diskrepanz ist in der Norm für die Motoren Rechnung getragen, indem ein erweiterter Toleranzbereich „B“ geschaffen wurde. Die erheblichen Einschränkungen

1 Relative Akzeptanz bei Bestellungen von Motoren der „Eurospannung 400 V“ in acht europäischen Ländern nach einer Hersteller-Lieferstatistik 1995 bis 2001



Quelle: Danfoss-Bauer



gen für die Ausnutzbarkeit dieses Bereichs machen aber deutlich, dass die besonderen physikalischen Gegebenheiten bei einem Motor gewisse Grenzen für die Spannungstoleranz setzen (Tafel ①).

Für einen Betrieb mit Spannungsschwankungen, die über den Bereich „A“ hinausgehen, ist in DIN VDE 0530-1 vorgesehen, dass Motoren funktionstüchtig sein sollen: Sie können ihr Bemessungsdrehmoment abgeben, wobei die übrigen Kenndaten (z. B. auch die Erwärmung) größere Abweichungen von den für die Bemessungsspannung festgelegten Daten haben dürfen. Der Toleranzbereich „B“ stellt für normale, nicht explosionsgeschützte Maschinen eine Konzession dar, von der Hersteller und Betreiber nach Abwägung der Auswirkung auf die Betriebsdaten und die Lebensdauer der Wicklungsisolierung eigenverantwortlich Gebrauch machen können.

Da besonders bei explosionsgeschützten Motoren die Sicherheit tangiert ist, muss hier die Umstellung auf die Spannung 400 V unter Beachtung einschlägiger Normen (z. B. EN 50018 und EN 50019) und

der speziellen Motorauslegung vorgenommen und dokumentiert werden (s. Teil 2 des Beitrags).

3 Wicklungen für einen Bereich der Bemessungsspannung

3.1 Notwendigkeit für Spannungsbereiche

Länder, die nicht der CENELEC-Vereinbarung unterliegen, werden auf unbestimmte Zeit bei der Spannung 380 V bleiben. Hierzu gehören z. B. alle Länder des früheren Ostblocks. Für den exportorientierten Anlagenhersteller, der sich großzügig mit Elektromotoren bevorraten, und für den Motorenhersteller, der seine Wicklungen in wirtschaftlichen Losgrößen produzieren will, ergibt sich daraus die Notwendigkeit, drei statt bisher zwei Wicklungsauslegungen einzuplanen: 380 V, 400 V und 415 V. Maschinenfabriken und Motorenhersteller haben daher nach Lösungen mit Weitbereichswicklungen gesucht, z. B. 380 ... 400 V oder gar 380 ... 420 V.

3.2 Schreibweise für den Spannungsbereich

Ein Spannungsbereich ist nach Norm zum Beispiel mit 380 ... 400 V anzugeben. Die Verwendung eines Schrägstriches ist einer Umschaltung vorbehalten, z. B. bei Spannungsumschaltung (220/380 V) oder Drehzahl-(Pol-)umschaltung (1420/2840 r/min).

3.3 Toleranz des Spannungsbereichs

Wie ist das Leistungsschild eines Motors mit Weitbereichswicklung zu lesen? Ist 380 ... 420 V nur eine andere Schreibweise für 400 V $\pm 5\%$? Die Normen und die kompetenten Kommentare sagen eindeutig, dass dies nicht so ist. Sowohl für die Einzelangabe einer Bemessungsspannung (z. B. 400 V) als auch für die Angabe eines Spannungsbereichs gilt grundsätzlich die normale Toleranz von $\pm 5\%$. Für die Angabe 380 ... 420 V ergibt sich also rechnerisch ein Bereich von 361 ... 441 V.

3.3.1 Angabe der Spannungstoleranz bei elektrischen Maschinen

In Tafel ② sind einige Beispiele für Angaben auf elektrischen Maschinen und deren Bedeutung genannt, basierend auf

- EN 60034-1 = DIN VDE 0530 -1 (1995)
- Erläuterungen zu DIN VDE 0530, VDE-Schriftenreihe 10 (1997)
- Bestätigung v. 18.02.1991 durch den Obmann des für VDE 0530 zuständigen Gremiums K 311.

3.3.2 Angabe einer von $\pm 5\%$ abweichenden Toleranz

Für die Angabe einer von der Norm abweichenden Spannungstoleranz (z. B. $\pm 6\%$ nach alten British Standards) gibt es unterschiedliche Verfahren. Im Zweifelsfall empfiehlt sich daher eine klare Absprache zwischen Hersteller und Anwender.

Bei der Angabe „400 V $\pm 1\%$ “ auf dem Leistungsschild ergibt sich nach DIN VDE 0530 und K 311 unter Berücksichtigung der impliziten Toleranz von $\pm 5\%$ eine Gesamttoleranz von $\pm 6\%$.

Nach PTB-Prüfregel (1969), Abschnitt 5.7.1, und nach Praxis vieler Hersteller bezeichnet jedoch die Angabe 400 V $\pm 6\%$ eine gesamte Toleranz von $\pm 6\%$.

3.3.3 Konsequenzen aus der Toleranzangabe

Ein Motor mit der Angabe 380 ... 420 V muss also bei jeder Spannung zwischen 380 V und 420 V die seiner Wärmeklasse entsprechende Grenzübertemperatur einhalten und auch bei 380 V ein Kippmoment entwickeln, das mindestens 160 % des Bemessungsmoments beträgt. Er muss darüber hinaus bei 380 V $-5\% = 361$ V sowie bei 420 V $+5\% = 441$ V funktionstüchtig (wenn auch bei einer um 10 K erhöhten Erwärmung) sein. Bei 380 V $-10\% = 342$ V (also an der unteren Grenze

des Bereichs „B“ nach Tafel 1) muss er noch sein Bemessungsmoment abgeben können. Die Einhaltung dieser Forderung ist gerade für kleine Maschinen nicht ganz leicht.

4 Grenzen und Risiken eines Weitspannungsbereichs

Im Abschnitt 5 wird gezeigt, dass relativ kleine Maschinen auf Überspannung empfindlich reagieren und an den Grenzen der normalen Spannungstoleranz schon im Leerlauf relativ warm werden können. Grundsätzlich gilt, dass sich Anzugsmoment und Kippmoment quadratisch mit der angelegten Spannung ändern – unabhängig vom Drehmomentbedarf oder Auslastungsgrad. Die Risiken einer Auslegung für einen „Weitspannungsbereich“ sollen an drei Beispielen gezeigt werden:

Beispiel 1:

Ein kleiner Motor wurde z. B. in England gefertigt und daher optimiert für 420 V. Er wird in östlichen Ländern betrieben. Die Schildangabe lautet 380 ... 420 V. Unter der Annahme, dass bei 420 V das Verhältnis $M_K/M_N = 1,6$ beträgt, gilt beim Betrieb an 361 V (= 380 V – 5 %):

$$M_K/M_N = 1,6 \times (361/420)^2 = 1,18$$

Der Motor ist so „weich“, dass bei Nennmoment ein Schlupf von 20 ... 30 % zu erwarten ist, der bei Erwärmung rasch gegen 100 % geht – der Motor kippt ab und ist nicht mehr funktionstüchtig.

Beispiel 2:

Ein großer Motor wurde z. B. in östlichen Ländern gefertigt und daher optimiert für 380 V. Er wird in England betrieben. Die Schildangabe lautet 380 ... 420 V. Unter der Annahme, dass bei 380 V das Verhältnis $M_K/M_N = 3,0$ beträgt, gilt beim Betrieb an 441 V (= 420 V + 5 %):

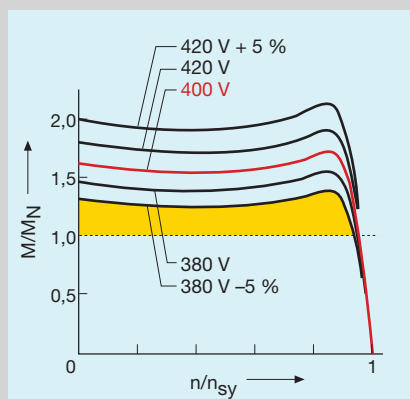
$$M_K/M_N = 3,0 \times (441/380)^2 = 4,0$$

Derart hohe Anzugs- und Kippmomente beanspruchen die mechanischen Übertragungsmittel. Die zwangsläufig hohe Stromdichte im Kurzschluss ist bei festgebremstem Läufer eine thermische Gefahr für die Wicklung.

Beispiel 3:

Ein Motor beliebiger Größe hat die Schildangabe 400 V ± 10 % oder IEC 38. Damit liegt die Schwankungsbreite von M_A und M_K im Bereich „A“ mit $(462/342)^2 = 1,82$ (s. Tafel 2).

Mit diesem Faktor zwischen den Endwerten ergeben sich Bereiche für das Momentenverhältnis M_K/M_N von beispielsweise 1,6 ... 2,9 oder 0,9 ... 1,6. Eine optimale Anpassung der Drehmomente an den



3 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien eines für 400 V ausgelegten und für 380 ... 420 V deklarierten Käftgläufers bei verschiedenen Spannungen im gesamten Toleranzbereich. Der gelb gekennzeichnete Bereich repräsentiert die Beschleunigung bei gleichbleibenden Lastverhältnissen.

konkreten Anwendungsfall erscheint sehr schwierig oder unmöglich.

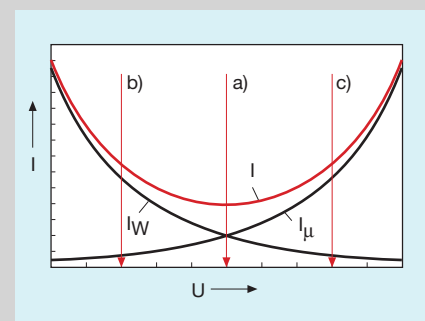
Bild 3 zeigt die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien eines mit 380 ... 420 V deklarierten Motors. Der gelb markierte Bereich ist repräsentativ für die Beschleunigung, also für den Reziprokwert der Anlaufzeit. Diese kann an den Grenzen des Toleranzbereichs der Spannung bei gleichen Lastverhältnissen etwa im Verhältnis 1 : 3 (also z. B. von 0,5 bis 1,5 s) variieren.

Es ist zwar kaum anzunehmen, dass ein bestimmter Motor dieser Schwankungsbreite der Spannung ausgesetzt ist. Typen mit großem Spannungsbereich suggerieren aber dem Hersteller und dem Anwender einer Maschine, dass sich der gleiche Antriebsmotor unter stark veränderlichen Spannungsverhältnissen (also z. B. in England wie in Russland) auch gleich verhält. Diese Erwartung ist aus physikalischen Gründen offensichtlich nicht erfüllbar.

Motoren für große Spannungsbereiche sind fast immer Kompromisslösungen – es sei denn, der aktive Materialaufwand (also die Typgröße) wird gegenüber der Normalausführung vergrößert.

5 Betriebsverhalten bei Spannungsänderung

Zur Beurteilung des Betriebsverhaltens von Drehstrom-Asynchronmotoren bei Änderung der Anschlussspannung kann eine Versuchsreihe herangezogen werden, die häufig im Rahmen der Typenprüfung zur Feinabstimmung der Wicklungsauslegung durchgeführt wird: konstante Leistungsabgabe bei verschiedenen Spannungen. Im Grunde ermittelt man hier bei der



4 Tendenz der Stromaufnahme I von Motoren bei Änderung der Anschlussspannung U (qualitative Darstellung)

Zuordnung der Bemessungsspannung U_N bei:

- a) mittleren Motoren (1,1 kW ... 11 kW) im Optimum
- b) großen Motoren (etwa > 11 kW) unterhalb des Optimums
- c) kleinen Motoren (etwa < 1,1 kW) oberhalb des Optimums

Typprüfung die magnetische Flussdichte (Induktion), bei der sich die günstigsten Betriebseigenschaften ergeben. Die Wicklung wird für die Serie dann so ausgelegt, dass sich bei Betrieb mit Bemessungsspannung eben diese günstigste Flussdichte einstellt. Wenn irgend möglich, wählt man die Flussdichte so, dass bei Bemessungsspannung die niedrigsten Verluste auftreten. Bei dieser Auslegung hat der Motor im Bemessungspunkt die geringste Erwärmung. Dieser Betriebspunkt wird nachfolgend als Optimum bezeichnet.

Es gibt jedoch zwingende Gründe dafür, die Flussdichte niedriger oder höher als das Optimum zu wählen.

Die Diagramme in Bild 4 sind rein qualitativ zu betrachten. Durch eine vereinfachte und überzeichnete Darstellung soll die Tendenz besonders deutlich werden. Sie eignen sich nicht für eine quantitative Auswertung. Dennoch lassen sich folgende grundsätzlichen Aussagen treffen:

- Der Wirkstrom I_W (der zur mechanischen Leistungsabgabe beiträgt) hat bei steigender Spannung (Flussdichte) eine fallende Tendenz (u. a. weil der Schlupf kleiner wird).
- Der Magnetisierungsstrom I_μ (welcher den magnetischen Fluss bildet) hat bei steigender Spannung (Flussdichte) eine steigende Tendenz, die vor allem bei Erreichen der Sättigungsgrenze überproportional steil ist.
- Der Gesamtstrom I (der in der Zuleitung zu messen ist) setzt sich geometrisch aus den Komponenten I_W und I_μ zusammen.
- Das Minimum des Gesamtstromes I (der auch die Verluste repräsentiert) charakterisiert das Optimum der Flussdichte. Zu den drei in Bild 4 markierten Betriebspunkten ist Folgendes festzustellen:

a) Bemessungsspannung (Flussdichte) im Optimum

Diese Auslegung ist nach Möglichkeit anzustreben und typisch für Motoren mit Bemessungsleistungen von 1,1 kW bis 11 kW.

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsänderungen im Rahmen üblicher Toleranzen wirken sich relativ wenig auf die Stromaufnahme (Erwärmung) aus.
- Weiterbetrieb an der neuen Bemessungsspannung 400 V ist i. Allg. zulässig.

b) Bemessungsspannung (Flussdichte) unterhalb Optimum

Diese Auslegung ist typisch für Motoren mit Bemessungsleistungen über ca. 11 kW, weil sich bei optimaler Flussdichte zu hohe Anzugsmomente und Anzugsströme ergeben würden. Während die Anzugsmomente nur für nachgeschaltete Übertragungselemente (Getriebemotoren) und Arbeitsmaschinen eine Gefahr darstellen, führen hohe Kurzschlussstromdichten im Blockierungsfall zu gefährlich raschem und starkem Temperaturanstieg, der z. B. durch Thermistoren nicht mehr erfasst werden kann.

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsverminderung führt zu höherer Stromaufnahme (Erwärmung).
- Spannungsanhebung führt zu niedrigerer Stromaufnahme (Erwärmung).
- Weiterbetrieb an der neuen Bemessungsspannung 400 V ist zulässig, falls ein erhöhtes M_A und M_K für die Arbeitsmaschine unbedenklich ist.

c) Bemessungsspannung (Flussdichte) oberhalb Optimum

Diese kritische Auslegung kann für Motoren mit Bemessungsleistungen unter etwa 1,1 kW erforderlich sein, weil mit der optimalen Flussdichte die genormte Überlastbarkeit $M_K/M_N = \pm 1,6$ nicht erreicht würde.

Für den Weiterbetrieb von 380-V-Motoren am neuen Netz mit 400 V ist dies die kritische Gruppe!

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsverminderung führt zu geringerer Stromaufnahme, doch ist die nach Norm verlangte Überlastbarkeit $M_K/M_N = \pm 1,6$ in Frage gestellt.
- Spannungsanhebung führt wegen der Sättigung zu (viel) höherer Stromaufnahme (Erwärmung). Der Leerlaufstrom ist oft größer als der Bemessungsstrom!
- Weiterbetrieb an der neuen Bemessungsspannung 400 V ist i. Allg. infrage gestellt. Die Stromaufnahme und Erwärmung im tatsächlichen Betrieb ist zu prüfen und der Hersteller zu konsultieren.

In Teil 2 des Beitrags wird gezeigt, wie mit Hilfe des Leistungsfaktors eine Vorentscheidung über das voraussichtliche Betriebsverhalten eines bestimmten 380-V-Antriebs an 400 V möglich ist.

6 Empfehlung zum Weiterbetrieb an 400 V

Die nachfolgenden Empfehlungen sind unter Berücksichtigung des jeweiligen Einzelfalls in eigener Verantwortung anzuwenden. Sie gelten für Maschinen mit den Eigenschaften:

- Drehstrom-Asynchronmotoren mit Wicklung für 380 V, 50 Hz
- übliche Auslegung, z. B. Katalog-Typen
- ohne Explosionsschutz
- Betrieb nahe der Betriebsart S1 oder bei Bemessungsleistung.

Bei kleinen Drehstrommotoren (unter etwa 1,1 kW und/oder mit einem Leistungsfaktor $< 0,7$) kann die Stromaufnahme je nach Auslegung teilweise schon bei geringer Belastung über den Bemessungsstrom

ansteigen. Ein Motorschutzschalter kann – wenn er nicht vorsorglich höher eingestellt wurde – auslösen und Gefahr melden. Bei dieser Motorengruppe wird sich im Allgemeinen eine höhere Wicklungstemperatur einstellen, die je nach den thermischen Reserven zu einer Verminderung der Lebensdauer führen kann. Es wird empfohlen, kleine Drehstrommotoren und die zugehörigen Motorschutzschalter zu überprüfen und – falls erforderlich – vorsorglich auf die neue Bemessungsspannung 400 V umwickeln zu lassen oder einen Ersatzmotor für 400 V zu bestellen.

Für jeden Motor – auch für die mittleren und großen Leistungen – empfiehlt sich eine Umstellung auf 400 V, falls eine Neuwicklung aus anderen Gründen erforderlich wird.

Möglicherweise zeigt eine Kostenanalyse unter Berücksichtigung der jährlichen Laufzeit, dass sich ein neuer Energiesparmotor mit verbessertem Wirkungsgrad schon nach wenigen Jahren amortisiert.

Sind allerdings explosionsgeschützte Motoren betroffen, so ist die Anpassung an die neue Spannung keine Ermessensfrage: Diese Motoren müssen unabhängig von Größe und Auslastung – eventuell unter Einschaltung eines Ex-Sachverständigen – an die neue Netzspannung angepasst werden.

Ob dazu eine Umwicklung erforderlich ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden.

H. Greiner

Heft 3/2003  ELEKTRO
PRAKTIKER

**Ex-Motoren in den
Zündschutzarten „d“ oder „e“**