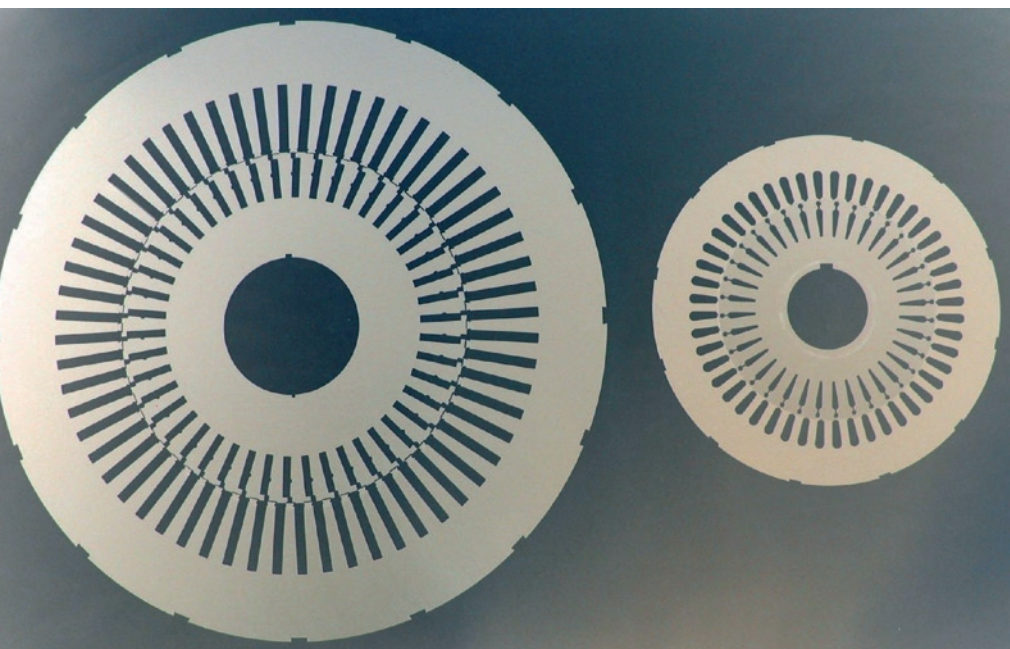


Sonderwünsche werden realisiert

Elektromotor-Design für spezielle Anforderungen



Thomas Fladerer, Dieter Seifert

Die Blechschnitte von Normmotoren und Transnormmotoren sind die Basis zur Erfüllung der meisten Anforderungen bezüglich ausreichendem Drehmoment, gutem Wirkungsgrad, hohem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$), geringer Geräuschentwicklung und der Einhaltung der Temperaturgrenzen. Neben den Standardanforderungen gibt es aber eine Vielzahl von Anforderungen, die technisch und wirtschaftlich optimiert nur mit einem speziellen Motor-Design erfüllt werden können.



Autor: Ing. Thomas Fladerer ist Leiter Elektrische Berechnung Industriemotoren der Loher GmbH in Ruhstorf



Autor: Prof. Dr.-Ing. Dieter Seifert lehrt im Fachbereich Elektrotechnik an der Fachhochschule Regensburg

1 Einleitung

Bei der Auslegung von Drehstrom-Asynchronmaschinen muss als erstes die Form der magnetisch aktiven Teile, das heißt der Blechschnitte von Ständer und Läufer festgelegt werden. Deren Dimensionierung hängt im Wesentlichen von folgenden Parametern ab:

- Leistung und Betriebsart;
- Polzahl und Frequenz;
- Kühlung (Oberflächen-, Innen-, Wasserkühlung);
- Spannung (Nieder-, Mittelspannung);
- Läuferart (Schleifring-, Käfigläufer).

Für ihre Standardtypen haben die Hersteller von elektrischen Maschinen optimierte Blechschnitte entwickelt. **Bild 1** zeigt jeweils ein typisches Beispiel für einen Transnormmotor und einen Normmotor.

2 Normmotoren und Transnormmotoren

Für die folgenden Betrachtungen ist es zweckmäßig, wenn man die Motoren in sogenannte Normmotoren und Transnormmotoren unterscheidet. Unter Normmotoren versteht man Drehstrom-Käfigläufermotoren nach der Norm DIN EN 50 347. In dieser Norm sind für die Baugrößen 56 bis 315 unter anderem die wesentlichen mechanischen Abmessungen festgelegt. Eine Baugröße kann dabei noch mit zwei unterschiedlichen Längen ausgeführt werden.

1: Typische Blechschnitte von Transnormmotor und Normmotor.

Dadurch entsteht für jede Polzahl eine Motortypenreihe mit abgestuften Leistungen. Der Leistungsbereich erstreckt sich zum Beispiel bei 4-poligen oberflächengekühlten Motoren von 60 W bis 132 kW.

Bei größeren Motoren wird die in IEC 60 072 definierte Baugrößenabstufung außerhalb der Norm DIN EN 50 347 fortgesetzt. Diese Motoren nennt man daher Transnormmotoren.

2.1 Optimierung der Blechschnitte

Für ihre Normmotoren haben die Motorhersteller optimierte Blechschnitte entwickelt, die für Standardanwendungen genügend Drehmoment erzeugen und außerdem die Basis sind zur Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich gutem Wirkungsgrad, hohem $\cos \varphi$, geringer Geräuschentwicklung und Einhaltung der Temperaturgrenzen.

Die technischen Anforderungen lassen sich optimal nur erfüllen, wenn für jede Baugröße und zumindest für jede der Polzahlen von zwei bis acht eigene Blechschnitte verwendet werden. Das bedeutet jedoch die Bereithaltung sehr vieler Stanzwerkzeuge und insgesamt einen erhöhten Investitions- und Fertigungsaufwand. Für das Produktspektrum mancher Hersteller kann es daher vorteilhaft sein, einen gemeinsamen Blechschnitt für mehrere Polzahlen zu verwenden. **Bild 2** zeigt die Magnetfelder eines Motors mit gleichem Blechschnitt bei 2-, 4- und 6-poliger Erregung. Man sieht, dass der Ständer- und der Läuferücken bei 2-poliger Erregung magnetisch am stärksten beansprucht wird. Sinnvoll lässt sich ein gemeinsamer Blechschnitt nur für 4- und 6-poligen Betrieb realisieren. Aber auch bei dieser Lösung muss man bei der Wahl des Blechschnittes Kompromisse finden, die für beide Polzahlen akzeptabel sind. Es ist einleuchtend, dass man gegenüber den optimierten Einzelschnitten mit Einbußen der technischen Daten rechnen muss. So kann es sein, dass man in einer bestimmten Wirkungsgrad-Klassifizierung [1] eine Stufe nach unten rutscht und dadurch Wettbewerbsnachteile erleidet. Bei kleineren Motoren bis zirka zur Baugröße 160 lassen sich diese Einbußen hinsichtlich Wirkungsgrad, $\cos \varphi$ und Geräusch vielleicht noch verschmerzen. Bei größeren Motoren sind die Nachteile allerdings oft zu deutlich. Hinzu kommt, dass man diese Motoren

Familienbande

Unendlich flexibel für
passgenaue Antriebslösungen



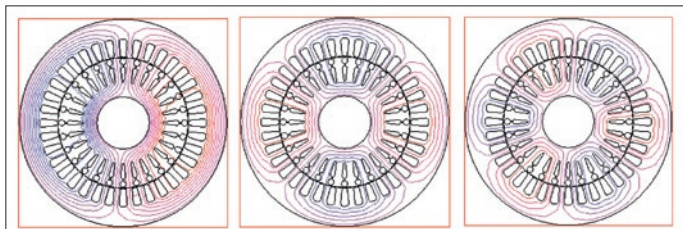
sinamics

DRIVES

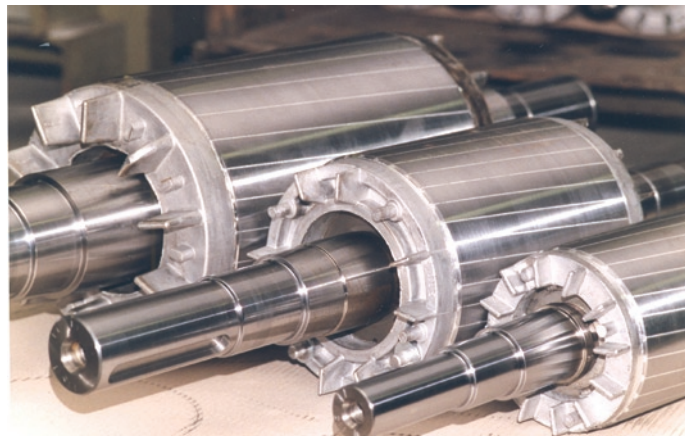


Setzen Sie für den besten Antrieb auf starke Familienbande. Denn mit SINAMICS® arbeiten eingespielte, modulare und skalierbare Talente für Sie: mit aufeinander abgestimmten Komponenten, einheitlichen Kommunikationsschnittstellen und durchgängigen Tools für Auswahl, Projektierung und Inbetriebnahme. Damit Ihre Anwendung wie am Schnürchen läuft, gibt es für alle SINAMICS-Antriebe nur ein gemeinsames Engineering-Tool. Einmal kennengelernt, gehören Sie zur Familie und bleiben auch in Zukunft unendlich flexibel.

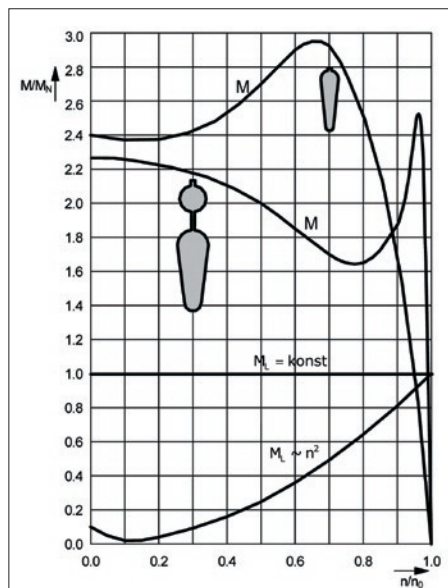
SIEMENS



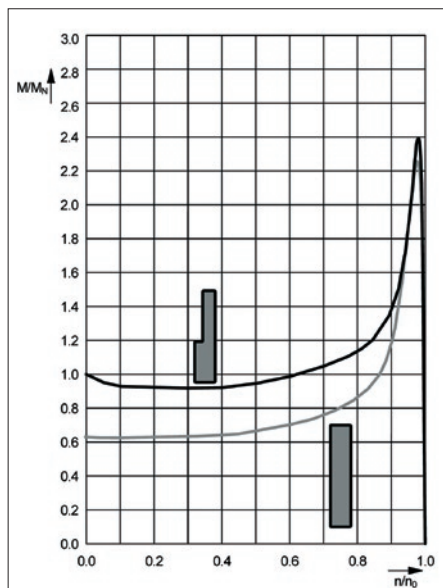
2: Magnetfeld eines Motors mit gleichem Blechschnitt bei 2-, 4- und 6-poliger Erregung.



3: Läufer von Normmotoren mit Aluminiumkäfig.



4: Typische Nutformen und Drehmomentverläufe von Normmotoren



5: Typische Nutformen und Drehmomentverläufe von Transnormmotoren



6: Läufer von Transnormmotoren mit Kupferkäfig

kaum mehr an erhöhte Anforderungen anpassen kann.

Eine Sonderstellung nehmen polumschaltbare Motoren ein. Für den Antrieb von Pumpen und Ventilatoren, die ein quadratisch mit der Drehzahl ansteigendes Drehmoment erfordern, wählt man den Blechschnitt der niedrigen Polzahl. Bei dieser ergibt sich die höchste Drehzahl und die höchste Leistung. Für die niedrige Drehzahlstufe mit geringer Leistung lässt sich die Ständerwicklung ohne Probleme an den

gewählten Blechschnitt anpassen. Bei Arbeitsmaschinen mit konstantem Lastmoment ergeben sich allerdings auch die erwähnten Schwierigkeiten beim Finden eines Kompromisses. In der Regel muss man einen speziellen Blechschnitt wählen. Es sind polumschaltbare Motoren mit bis zu drei verschiedenen Polzahlen üblich, die mit entsprechenden Wicklungen erzeugt werden. Zum Beispiel erhält ein 2/4/6-poliger Motor eine sogenannte Dahlander-Wicklung, mit der man den 2-poligen und

den 4-poligen Betrieb realisiert und eine von dieser galvanisch getrennte Wicklung für den 6-poligen Betrieb.

2.1.1 Ständer-Blechschnitt

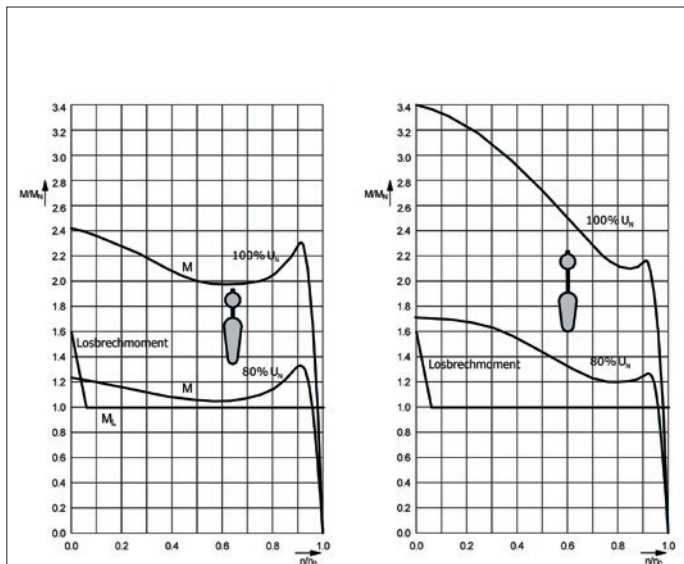
Mit dem Ständer-Blechschnitt wird vor allem festgelegt, welche Drehstromwicklung der Motor erhält. Die Normmotoren erhalten ebenso eine Träufelwicklung mit Runddrähten wie kleinere Transnormmotoren. Die Ständernut kann deshalb halb geschlossen, mit nur kleinem Nutschlitz ausgeführt werden. Dadurch ergibt sich ein günstiges Luftspalt-Magnetfeld. Mit einer speziellen Isolations- und Wickeltechnik werden heute Träufelwicklungen für Spannungen bis 4,16 kV ausgeführt. Bei größeren Transnormmotoren (ab zirka 800 kW) oder bei Mittelspannungsmotoren für 3 kV bis 11 kV wird die Wicklung aus Formspulen mit rechteckigen Kupferleitern aufgebaut. Der Einbau der Formspule erfordert einen breiten Nutschlitz (Bild 1).

2.1.2 Läufer-Blechschnitt

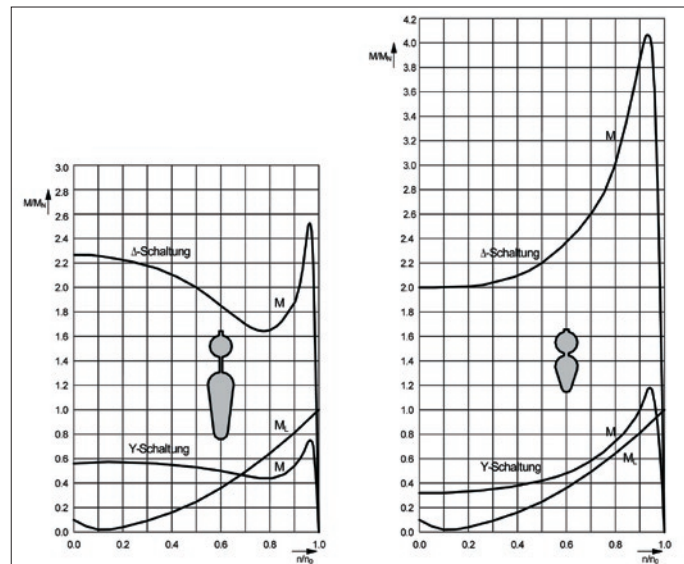
Mit der Wahl des Läufer-Blechschnittes legt man schon wesentliche Betriebseigenschaften des Motors wie Anlaufmoment, Anlaufstrom und Geräuschverhalten fest. Die Läufernuten von Normmotoren werden im Druckguss-Verfahren mit Aluminium ausgegossen und im gleichen Arbeitsgang stirnseitig mit Kurzschlussringen versehen (Bild 3). Auf diese kostengünstige Art entsteht ein äußerst robuster Käfigläufer, der eine lange Lebensdauer des Motors ohne großen Wartungsaufwand garantiert.

In jüngster Zeit wurde eine Technologie entwickelt, mit der das Ausgießen der Nuten mit Kupfer möglich ist. Da Kupfer eine bessere elektrische Leitfähigkeit als Aluminium hat, ist vor allem mit geringeren Verlusten und daher einem besseren Wirkungsgrad zu rechnen.

Nachteilig ist, dass man gegenüber dem Aluminium-Druckguss mit wesentlich höheren Temperaturen arbeiten muss. Dies wirkt sich aber zum Beispiel ungünstig auf die Lebensdauer der Gießformen aus. Ob sich diese Technik daher in einem größeren Ausmaß gegenüber dem Aluminium-Druckgussverfahren durchsetzt, ist derzeit noch ungewiss.



7: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien bei verringerter Motorspannung und großem Losbrechmoment. Links: Standard-Motor. Rechts: modifizierter Motor (längerer Streusteg zwischen Ober- und Unterstab).



8: Stern-Dreieck-Anlauf gegen Pumpe oder Ventilator. Links: Standard-Motor. Rechts: modifizierter Motor (geänderter Läuferstab und geänderte Ständerwicklung).

Bei kleinen Motoren bis zirka Baugröße 90 hat die Läufernut eine tropfenförmige Gestalt. Bei größeren Motoren muss man zur Erzielung eines ausreichenden Anlaufmomentes den Läufer mit einem Doppelstab ausrüsten. Bild 4 zeigt die beiden typischen Nutformen und die damit erzielbaren Drehmomentverläufe. In Bild 4 sind außer den Motordrehmomenten auch die wichtigsten Lastmomente der mechanischen Arbeitsmaschinen zu sehen. Zum Beispiel haben Kräne, Hebezeuge und Rührwerke ein von der Drehzahl unabhängiges konstantes Lastmoment. Bei Strömungsmaschinen wie Ventilatoren und Kreiselpumpen nimmt das Drehmoment dagegen quadratisch mit der Drehzahl zu. Man sieht, dass das Motordrehmoment bis zur Betriebsdrehzahl immer größer als das Lastmoment ist. Dies muss man bekanntlich bei der Projektierung eines Antriebs beachten, damit ein sicherer Hochlauf und ein darauf folgender ungestörter Betrieb des Antriebs gewährleistet ist [2].

Die Läufer-Blechschnitte und die entsprechenden Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien von Transnormmotoren sind in Bild 5 zusammengestellt. Bis etwa zur Baugröße 560 gibt es auch hier die Möglichkeit, die Läuferkäfige durch Aluminium-Druckguss herzustellen. In der Regel werden die Käfige aber mit Kupferstäben aufgebaut, die an den Stirnseiten mit Kupfer-Kurzschlussringen hart verlötet werden (Bild 6).

Für Lastmomente mit quadratischem Drehmomentverlauf sind einfache Hochstäbe ausreichend. Wenn allerdings größere Anlaufmomente gefordert werden oder sonstige erschwerte Anlaufbedingungen vorliegen (z.B. Kohlemühlen- oder Schrämmantriebe), wählt man sogenannte L-Stäbe oder Doppelstäbe. Für die L-Stäbe verwendet man Kupfer, während für die

Doppelstäbe Kupfer, Messing oder auch Bronze zum Einsatz kommen können [2].

3 Anpassung des Motor-Designs

Für ihre Normmotoren halten die Hersteller umfangreiche Motorenlisten bereit, aus denen man alle für die Normleistungen interessierenden Daten entnehmen kann [3, 4]. Dies sind z. B. Strom, $\cos\varphi$ und Wirkungsgrad für den S1-Bemessungsbetrieb (Dauerbetrieb) sowie Anlaufstrom, Anlaufmoment und Kippmoment. Diese Daten gelten für 400 V oder für einen Spannungsbereich von z. B. 380 V bis 420 V bei 50 Hz. Außerdem sind in den Motorenlisten auch die mechanischen Abmessungen, Gewichte und Trägheitsmomente angegeben sowie nützliche Projektierungshinweise. Für viele Anwendungen sind damit alle zur Lösung des Antriebsproblems und zur Auswahl eines geeigneten Motors notwendigen Daten gegeben. Es gibt aber auch eine Vielzahl von Anforderungen, die mit den Standard-

lösungen nicht mehr erfüllt werden können. In diesen Fällen müssen die Motoren durch eine gegenüber der Standardausführung veränderte Auslegung an das gegebene Antriebsproblem speziell angepasst werden. Da diese Antriebsprobleme am häufigsten im Leistungsbereich der Normmotoren auftreten, beschränken sich die folgenden Abschnitte auf diese Motorengruppe.

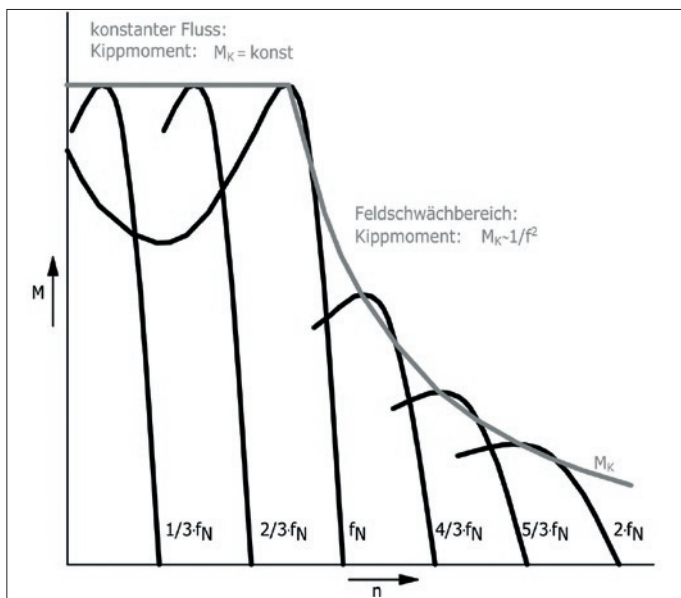
3.1 Änderung der Ständerwicklung

Die Änderung der Ständerwicklung ist bei Normmotoren eine relativ einfache Maßnahme mit nur geringem Mehraufwand. Falls die Anforderungen an den Motor gegenüber dem Standard abweichen, wird man daher als erstes versuchen, diese mit einer Anpassung der Ständerwicklung bei unverändertem Blechschnitt zu erfüllen. Sie ist z. B. dann notwendig, wenn die Anschlussspannung, die Netzfrequenz oder die Betriebsart von den Standardwerten abweichen.

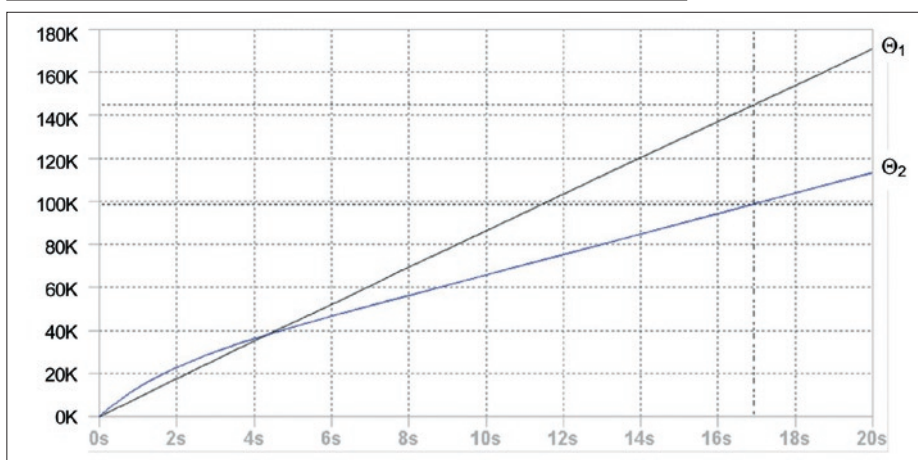
Die notwendigen Änderungen des Mo-

Isolation		Läuferstab		Explosionsschutz		
Wärmeklasse	B	F	Aluminium, Druckguss	300 °C	Zündtemperaturen	
Grenztemperatur	130 °C	155 °C			T1	450 °C
Kühlmitteltemperatur	40 °C	40 °C			T2	350 °C
Grenzübertemperatur	80 K (70 K)*	105 K (90 K)*	Kupfer, hart gelötet	400 °C	T3	200 °C
Kurzzeitige Grenztemperatur am Ende der Erwärmungszeit	185 °C	210 °C			T4	135 °C
					T5	100 °C
					T6	85 °C
Wärmeklassen: IEC 60034-1 Messmethode: Widerstandsmessung Kurzzeitige Erwärmung: DIN EN 60079-7 *Werte in Klammern: EEx e (DIN EN 60079-7)			Werksnormen der Hersteller (Beispiel: Loher)		Zündtemperaturen: Ex-Schutzrichtlinie 94/9/EG - ATEX 100a	

Tabelle 1: Grenztemperaturen für Asynchronmotoren (S1-Betrieb)



9: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie bei Betrieb am Frequenzumrichter mit konstantem Fluss und mit Feldschwächung.



10: Temperaturverlauf der Ständerwicklung Θ_1 und des Läufers Θ_2 bei Netzbetrieb mit blockiertem Läufer (Motor: ANGA-132MB-04).

tor-Designs beschränken sich darauf, dass die Windungszahl und der Drahtdurchmesser der Wicklung verändert werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob bei dieser Änderung die magnetischen Verhältnisse (Eisensättigung) gleich bleiben oder sich ebenfalls ändern.

3.1.1 Anpassung der Ständerwicklung bei gleicher Eisensättigung

Falls sich die Netzspannung oder die Netzfrequenz gegenüber dem Standard ändern, kann die Wicklung so abgeändert werden, dass die Sättigung gleich bleibt. Dies hat zur Folge, dass auch wichtige Daten wie $\cos\varphi$, Wirkungsgrad und die Verhältnisse Anlaufmoment/Bemessungsmoment (M_A/M_N), Kippmoment/Bemessungsmoment (M_K/M_N) sowie Anlaufstrom/Bemessungsstrom (I_A/I_N) gleich bleiben. Zum Beispiel ist die Umstellung von 400 V auf 500 V problemlos möglich, ebenso wie die Umstellung von 50 Hz auf 60 Hz. Durch die am 60 Hz-Netz höhere Drehzahl erhöht sich dabei sogar die zur Verfügung stehende Leistung. Je nach Polzahl und Baugröße steigt die Leistung um 12 % bis 20 % [3, 5].

3.1.2 Anpassung der Ständerwicklung mit geänderter Eisensättigung

Wenn die Wicklung bei gleich bleibender Spannung und Frequenz verändert wird, so ändern sich auch Eisensättigung und wesentliche Motordaten. Bei einer Verringerung der Windungszahl z.B. erhöhen sich die magnetischen Induktionen, der Leerlaufstrom und die Eisenverluste. Ob dadurch Motordaten wie Wicklungstemperatur und $\cos\varphi$ in akzeptablen Grenzen bleiben hängt vom jeweiligen spezifischen Anwendungsfall ab.

Ein Beispiel hierfür ist die Anpassung der Ständerwicklung an andere Betriebsarten. Die Listendaten der Motorhersteller beziehen sich meist auf den Dauerbetrieb, das heißt auf die Betriebsart S1. Falls ein Motor nur kurzzeitig mit seiner S1-Bemessungsleistung betrieben wird, so erreicht die Motorwicklung nicht ihre zulässige Temperaturgrenze. Gemessen an seiner thermischen Leistungsfähigkeit kann dieser Motor daher kurzzeitig mit einer größeren Leistung betrieben werden.

Für Normmotoren gilt als Richtwert, dass sie im Kurzzeitbetrieb von 30 Minuten Dauer (S2-30 min) gegenüber dem Dauerbe-

trieb um ein bis zwei Typensprünge höhere Leistungen abgeben können. Zum Beispiel erhöht sich bei einem 4-poligen Loher-Motor ANGA-250ME-04 die Leistung von 55 kW im S1-Betrieb auf 75 kW im S2-30 min-Betrieb.

Häufig kann man die erhöhte Leistung sogar mit Verzicht auf den Wellenlüfter erreichen. Das ist z. B. zur Verringerung der Betriebsgeräusche bei Bühnenmotoren eine willkommene und zudem kostengünstige Lösung. Für einen Betrieb der Motoren in den Betriebsarten S2, S3 oder S6 ändert man die Ständerwicklung so ab, dass die typischen Betriebsdaten $\cos\varphi$, M_A/M_N , M_K/M_N sowie I_A/I_N weitgehend unverändert bleiben.

Grundsätzlich gelten auch für Transnormmotoren die gleichen Zusammenhänge wie für Normmotoren. Allerdings wird es mit zunehmender Leistung und kleiner Polzahl immer schwieriger, ausführbare Windungszahlen zu finden. Aus diesem Grund sind größere 2-polige Motoren dann eventuell nur noch für eine größere Spannung von z. B. 690 V ausführbar.

3.2 Änderung des Läufer-Blechschnittes

Falls man die Antriebsanforderungen mit einer Änderung der Ständerwicklung nicht oder nur mit erheblichen Nachteilen erfüllen kann, ist eine Änderung des Läufer-Blechschnittes notwendig. Im Folgenden werden einige dieser speziellen Anforderungen und die dazu passenden Modifikationen des Läufer-Blechschnittes beschrieben.

3.2.1 Anpassung der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

Die Form und das Material des Läuferstabes haben entscheidenden Einfluss auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie. Die Kennlinien der Normmotoren werden so abgestimmt, dass sie den meisten Standardanforderungen genügen. Nach der Kennlinie von Bild 7, links (ANGA-225SE-04, 37 kW) kann der Motor z. B. auch gegen ein Lastmoment von 100 % des Bemessungsmomentes hochlaufen.

3.2.1.1 Großes Losbrechmoment

Eine relativ häufig auftretende Spezialanforderung weicht vom Standard dadurch ab, dass der Motor nicht mehr bei 100 % sondern bei nur noch 80 % der Bemessungsspannung anlaufen soll. Hier ist zu bedenken, dass das Drehmoment in erster Näherung vom Quadrat der Spannung abhängt. In der Praxis sinkt das Drehmoment wegen der Sättigung von Streuwegen meist stärker. Auch das würde der Motor bei konstantem Lastmoment noch verkraften. Ein Hochlauf wäre möglich. Beim Antrieb eines beladenen Förderbandes, einer Brechermühle oder eines Schraubenverdichters verschärft sich die Situation noch dadurch,

dass im Stillstand ein großes Losbrechmoment auftritt. In Bild 7 beträgt dieses 160 % des Bemessungsmoments. Wie man sieht, ist das Lastmoment dann größer als das Anlaufmoment des Motors, ein Hochlauf somit unmöglich.

Grundsätzlich könnte man dieses Problem dadurch lösen, indem man einen größeren Normmotor mit größerer Leistung und größerem Drehmoment einsetzt. Diese Lösung ist jedoch wegen der größeren Abmessungen und des größeren Gewichts des Motors oft unerwünscht. Außerdem nimmt dann auch der Anlaufstrom und der Bemessungsstrom zu. Dies aber sind die bestimmenden Größen bei der Projektierung der gesamten elektrischen Anlage und führen daher zu einer Verteuerung von Sicherungen, Leitungen, Schützen usw.

Die bessere Lösung ergibt sich durch die Verlängerung des Streustegs zwischen dem Ober- und dem Unterstab des Läufers. Bild 7, rechts zeigt, dass der Motor dann ein ausreichendes Anlaufmoment entwickelt. Geringe Abweichungen zum Standardmotor hinsichtlich $\cos\varphi$ und Wirkungsgrad können dabei hingenommen werden.

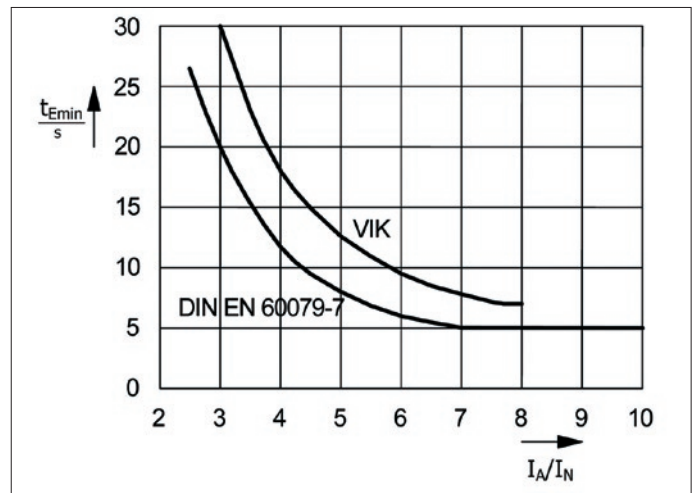
3.2.1.2 Stern-Dreieck-Anlauf gegen Pumpe oder Ventilator

Ein nicht ausreichendes Drehmoment kann sich auch beim Betrieb von Pumpen oder Ventilatoren ergeben, wenn die Motoren zur Verringerung des Einschaltstromes in der Stern-Schaltung anlaufen sollen. Gegenüber der Dreieck-Schaltung entwickeln diese Motoren nach vereinfachter Theorie nur ein Drittel des Drehmoments, in der Praxis ist es wegen der Sättigung noch geringer. Wie **Bild 8**, links zeigt, ist mit einem Standardmotor nur ein Hochlauf bis etwa 70 % der synchronen Drehzahl möglich. Wenn man den Motor jetzt auf Dreieck umschaltet, fließt trotz Stern-Anlauf ein zu großer Strom. Man löst dieses Problem indem man zwei Modifikationen vornimmt. Zum einen wird die Windungszahl der Ständerwicklung verringert (größere Sättigung), zum anderen ersetzt man den Standard-Doppelstab durch einen modifizierten Doppelstab mit geringerer Streuinduktivität (**Bild 8**, rechts).

3.2.1.3 Betrieb am Frequenzumrichter mit großer Feldschwächung

Für den Netzbetrieb gebaute Normmotoren und Transnormmotoren können ohne Änderungen am Motor-Design zur Drehzahlverstellung auch am Frequenzumrichter betrieben werden. Im Gegensatz zum Netzbetrieb sind die Motorspannungen und Motorströme nicht mehr rein sinusförmig, sondern enthalten Oberschwingungen. Durch diese entstehen zusätzliche Verluste und zusätzliche Wärme. Damit sich die Motoren bei Umrichterbetrieb nicht über ihre zulässigen Temperaturen erwärmen, werden vor allem bei großen Motoren die Leis-

11: Mindest-erwärmungszeiten t_{Emin} nach DIN EN 60 079-7 bzw. VIK .



tungen reduziert [5]. Darüber hinaus gibt es noch einige Besonderheiten, die beim Umrichterbetrieb beachtet werden müssen [2]. Eine dieser Besonderheiten ist der Betrieb mit Feldschwächung. Er tritt auf, wenn man bei konstanter Spannung die Frequenz über die Bemessungsfrequenz anhebt.

Bild 9 zeigt die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie bei Umrichterbetrieb. Man sieht, dass bei der Drehzahlverstellung mit konstantem Fluss das Kippmoment konstant bleibt, bei Feldschwächung sinkt es dagegen stark: $M_K \sim 1/f^2$. Um einen stabilen Betrieb zu erhalten, muss das geforderte Motormoment immer einen genügenden Abstand zum Kippmoment aufweisen. Für einen Betrieb mit konstanter Leistung ergibt sich folgende Forderung:

$$\frac{M_K}{M_N} > \frac{n_{max}}{n_N} \quad (1)$$

Die einzelnen Formelzeichen bedeuten: M_N = Bemessungsmoment, M_K = Kippmoment bei Bemessung, n_N = Bemessungsdrehzahl, n_{max} = maximale Drehzahl.

Bei einem Feldschwächebereich von $n_{max}/n_N = 2$ bedeutet das, dass das Kippmoment mindestens doppelt so groß wie das Bemessungsmoment sein muss. Mit einer Reserve von z. B. 30 % liegt das erforderliche Kippmoment dann bei 260 % des Bemessungsmoments. Bei vielen Normmotoren wird dieser Wert nicht erreicht. Falls man das höhere Kippmoment nicht durch eine Änderung der Ständerwicklung erreichen kann, wird man auch hier den vorhandenen Doppelstab durch einen Tropfenstab oder einen Hochstab ersetzen.

Die bei Umrichterbetrieb mögliche hohe Drehzahl kann der Grund für eine weitere Modifizierung des Blechschnittes sein. Dies hängt mit der Durchbiegung der Läuferwelle und der sich daraus ergebenden biegekritischen Drehzahl zusammen. Große 2-polige Motoren für Netzbetrieb legt man ab einer Leistung von zirka 800 kW üblicherweise mit überkritischer Welle aus, das heißt die Betriebsdrehzahl liegt über der ersten biegekritischen Drehzahl. Beim Hochlauf

des Motors am Netz wird die kritische Drehzahl so schnell durchfahren, dass sich keine gefährliche Resonanzschwingung ausbilden kann. Wenn am Umrichter auch ein Betrieb in der Nähe der kritischen Drehzahl möglich sein soll, muss der Motor mit einer dickeren und damit steiferen Welle ausgeführt werden. Um im Läuferücken weiterhin genügend Platz für den magnetischen Fluss zu haben, wird die Höhe des Läuferstabes reduziert.

3.2.2 Temperatur

Eine der wesentlichsten Anforderungen an eine elektrische Maschine ist die Einhaltung der zulässigen Temperaturen im Dauerbetrieb (S1-Betrieb, siehe **Tabelle 1**). Die Wicklungstemperatur und damit die Temperatur der Isolierung ist eine maßgebliche Größe, da vor allem von dieser die Lebensdauer der Isolierung abhängt.

Industriemotoren werden in der Regel nach Wärmeklasse B ausgenutzt, was einer Grenztemperatur von 130 °C entspricht. Setzt man eine maximale Kühlmitteltemperatur von 40 °C voraus und berücksichtigt örtliche Temperaturunterschiede (Hot Spots) mit 10 K, dann darf sich die Wicklung im Bemessungsbetrieb um 80 K erwärmen.



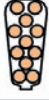





































Höhere Grenztemperaturen der Isolation als in der Tabelle angegeben, erreicht man mit Isoliersystemen der Wärmeklasse H und C. Hochtemperaturmotoren, wie spezielle Brandgasmotoren und Hermetic-Pumpen werden zum Beispiel mit einer C-Isolierung für 400 °C ausgerüstet.

3.2.2.1 Höhere Kühlmitteltemperatur

Steigt die Kühlmitteltemperatur z. B. auf 50 °C, so nutzt man den Motor nach Wärmeklasse F aus oder muss die Leistung um zirka 10 % reduzieren. Eine Modifizierung des Motors ist meist nicht erforderlich.

3.2.2.2 Schweranlauf

Die Grenztemperaturen der Wälzlager und Läuferstäbe werden bei Standardanwendungen und den Betriebsarten S1, S2, S3 und S6 nicht erreicht. Diese Grenzen sind

Anforderung		Standard	Modifikation
	Beispiel		
Anpassung an Netzspannung/ Netzfrequenz	440V / 60Hz		
Anpassung an Betriebsart	S2, S3, S6		
Großes Losbrechmoment niedrige Spannung	$M_{Last}(n=0) = 160\% M_N$ $U = 80\% U_N$		
Stern-Dreieck-Anlauf mit Belastung	Hochlauf von Pumpen oder Ventilatoren	 	 
Umrichterbetrieb mit großer Feldschwächung	$n_{max}/n_N = 2$		
Schweranlauf	Hochlaufzeit = 2 min		
EEx e-Motoren	$t_E > 8s$ bei $I_A/I_N = 6,7$ (gemäß VIK [6])	 	 
Alleinschutz	2-polger Motor: Baugröße 315 132 kW		
Begrenzung des Anlaufstromes	Häufige Forderung bei Projekten: $I_A/I_N \leq 600\%$		
Kleiner Schlupf (Kleine Drehzahländerung bei Belastung, harte M-n-Kennlinie)	Rotierende Umformer für unabhängige regelbare Netze		
Großer Schlupf (nachgiebige, weiche M-n-Kennlinie)	Stanz/Schmiedemaschinen (Stoßlast) Hebezeuge Windenergie-Generatoren		
Großer Wirkungsgrad	High-Efficiency-Motoren Asynchron-Generatoren		
Polumschaltbare Motoren	12/4/2-polig Windenmotoren Schiffswinden	 	 
Hochtemperaturmotoren	Spaltrohrmotoren für 400°C Brandgasmotoren	 	 
Kein Aluminium	Schiffsmotoren Motoren für Meerestechnik, bestimmte klimatische Umgebung, Gase		
Sondermotoren mit extremen Abmessungen	Tiefenrüttler (Rotorlänge = 610mm) Rotordurchmesser = 120mm)		

12: Modifikation von Standardmotoren zur Erfüllung spezieller Anforderungen.

damit nicht relevant. Dies kann sich bei erschweren Anlaufbedingungen jedoch ändern. Bei obigen Betriebsarten wird nämlich vorausgesetzt, dass die im Anlauf ent-

stehende Erwärmung vernachlässigt werden kann. Bei lang andauerndem Hochlauf (mit großem Strom und wegen der niedrigen Drehzahl schlechteren Kühlung) kön-

nen sowohl die zulässige Wicklungstemperatur als auch die zulässige Läufer-temperatur überschritten werden. Nach IEC 60 079-7 ist die Überschreitung der Wicklungstemperatur gemäß der Tabelle 1 am Ende der Erwärmungszeit (am Ende des Hochlaufs) kurzzeitig zulässig.

Erfolgt der Anlauf aus dem kalten Zustand, dann liegt zum Beispiel bei 2-poligen Loher-Normmotoren die erlaubte Anlaufzeit ART (Allowable Runup Time) im Bereich von 17 s bis 50 s. Erfolgt ein Anlauf aus dem betriebswarmen Zustand, so ist die erlaubte Anlaufzeit natürlich kürzer. Bei den genannten Motoren liegt sie zwischen 12 s und 30 s.

Einen Anlaufvorgang, der länger als 15s dauert, bezeichnet man in der Praxis als Schweranlauf. Wenn ein Schweranlauf vorliegt, ist zu prüfen, ob der Standardmotor ausreicht oder ob ein Motor zur Erfüllung der Anforderungen modifiziert werden muss.

3.2.2.3 Zentrifuge

Beim Anlauf von Zentrifugen müssen die Motoren oft sehr große Drehmassen gegen nur geringe Lastmomente beschleunigen. Ein Hochlauf mit Standardmotoren am Netz konstanter Spannung und Frequenz ist wegen der großen Wärmeentwicklung oft nicht mehr möglich. Mit der Kombination verschiedener Maßnahmen lassen sich aber auch extreme Anwendungsprobleme lösen. Außer dem Einsatz von Kupfer- oder Messingstäben werden häufig die Kurzschlussringe verstärkt, die Verbindung zwischen Stab und Ring durch Schweißen statt durch Löten hergestellt und die Ständerwicklung zur Erhöhung der Wärmekapazität mit einer Silikon-Masse vergossen. Damit lassen sich mit Stern-Dreieck-Anlauf Hochlaufzeiten bis zu 20 Minuten realisieren!

Es soll hier allerdings darauf hingewiesen werden, dass man die starke Wärmeentwicklung beim Anlauf mit dem Einsatz von Frequenzumrichtern vermeiden kann. Auch für extrem große Drehmassen und sehr lange Hochlaufzeiten kann man dann normale Standardmotoren (eventuell mit drehzahlunabhängigem Fremdlüfter) verwenden.

3.2.2.4 Alleinschutz

Eine häufige Antriebsforderung ist, dass die Grenztemperaturen gemäß Tabelle 1 auch im Störfall, z. B. bei blockiertem Läufer, eingehalten werden. Man kann dies mit Zusatzeinrichtungen wie Motorschutzschalter oder die direkte Temperaturüberwachung der Ständerwicklung (thermischer Motorschutz TMS), z. B. mit Kaltleitern, erreichen. Ob allerdings mit der Überwachung der Ständerwicklung auch der Läufer geschützt werden kann (Alleinschutz), hängt vom zeitlich-thermischen Verhalten des Motors ab. Um dieses zu ermitteln wird in

den Prüffeldern der Motorenhersteller der Temperaturanstieg bei blockiertem Läufer gemessen.

Als Beispiel ist in **Bild 10** der Anstieg der Wicklungstemperatur Θ_1 und der Läufertemperatur Θ_2 für einen Motor der Baugröße 132 bei blockiertem Läufer dargestellt. Man sieht, dass sich bei diesem kleinen Motor die Ständerwicklung schneller erwärmt als der Läuferstab. Nach zirka 17 s beträgt die Wicklungstemperatur 145 K und liegt damit bei einer Kühlmitteltemperatur von 40 °C an der Grenze des Zulässigen der Wärme Klasse B. Der Läufer erwärmt sich nur um zirka 100 K und liegt damit weit unter der Temperaturgrenze für Aluminium (Tabelle 1). Dieses Verhalten wird als „ständerkritisch“ bezeichnet. Motoren mit diesem Verhalten lassen sich allein durch die Überwachung der Wicklungstemperatur umfassend gegen unzulässige Erwärmung schützen. Dieser Alleinschutz ist allerdings nur bis zirka Baugröße 280 möglich. Bei größeren Motoren erreicht der Läuferstab schneller die zulässige Temperaturgrenze als die Wicklung. Diese Motoren sind dann „läuferkritisch“.

Aber auch bei großen Motoren ist der Alleinschutz ein häufiger Kundenwunsch. Diese Anforderung kann man durch den Austausch des Aluminiumläufers durch einen Kupferläufer erfüllen. Damit verbindet man zwei Vorteile. Zum einen kann Kupfer gegenüber Aluminium bei gleicher Temperatur etwa 40 % mehr Wärme speichern, zum anderen liegt die zulässige Temperaturgrenze gemäß Tabelle 1 um 100 °C höher. Mit dem Kupferläufer ist daher zum Beispiel ein Alleinschutz von zweipoligen Motoren bis zur Baugröße 315 mit einer Leistung von 200 kW möglich. Bei höheren Polzahlen lässt sich der Alleinschutz auf noch größere Motoren ausdehnen.

3.2.2.5 Motoren für EEx e

Explosionssgeschützte Motoren der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit (EEx e) müssen zur Gewährleistung des Explosionsschutzes vor allem die Zündtemperaturen gemäß der Tabelle 1 einhalten. Dies muss für sämtliche Motorteile gelten, insbesondere auch für den Läufer. Dies muss ferner in allen Betriebszuständen gelten und auch bei Störungen wie z. B. bei blockiertem Läufer.

Die maßgeblichen Normen [6] schreiben außerdem vor, dass die Wicklungserwärmung im Bemessungsbetrieb niedriger sein muss als durch die Wärme Klasse definiert. Für Wärme Klasse B bedeutet dies einen Abschlag von 10 K, für Wärme Klasse F einen Abschlag von 15 K (Klammerwerte in Tabelle 1). Das bedeutet für die meisten Motoren, dass EEx e-Motoren niedrigere Bemessungsleistungen haben als normale Motoren. Die Leistungsreduzierung ist vor allem bei 2- und 4-poligen Motoren deutlich und kann bis zu 30 % betragen.

Zur Einhaltung des Explosionsschutzes kann man – ähnlich wie unter „Alleinschutz“ beschrieben – Motorschutzschalter oder den thermischen Motorschutz mit Kaltleitern verwenden. Ein wichtiger Test hierzu ist wieder der Betrieb bei blockiertem Läufer (Bild 10). Aus den Temperaturverläufen und der Betriebserwärmung wird die Erwärmungszeit t_E ermittelt, bei der die kritische Temperatur eines Motorteils (Ständerwicklung oder Läufer) erreicht wird. Die Schutzeinrichtungen müssen den Motor vor Erreichen dieser Temperatur abschalten. Um standardisierte Schutzeinrichtungen verwenden zu können, müssen EEx e-Motoren so ausgelegt sein, dass die t_E -Zeit größer als eine vorgeschriebene minimale Erwärmungszeit $t_{E,min}$ ist. Für diese minimalen Erwärmungszeiten gibt es je nach Norm bzw. Spezifikation verschiedene

Vorgaben. In **Bild 11** sind die $t_{E,min}$ -Zeiten nach DIN EN 60 079-7 [6] bzw. VIK [7] in Abhängigkeit vom Verhältnis Anlaufstrom zu Bemessungsstrom I_A/I_N dargestellt.

Aus diesen Anforderungen wird deutlich, dass EEx e-Motoren anders als „normale“ Motoren ausgelegt werden. Diese Änderungen betreffen sowohl die Ständerwicklung als auch den Läufer. In letzterem wird zur Verringerung des Temperaturanstiegs bei blockiertem Läufer der Doppelstab häufig durch einen Tropfenstab oder einen Kupfer-Hochstab ersetzt.

4 Zusammenfassung

Es wurde an ausgewählten Beispielen beschrieben, mit welchen Änderungen im Motor-Design man spezielle Anforderungen erfüllt. In **Bild 12** sind diese Beispiele und weitere Anforderungen mit den dazu gehörenden Modifikationen zusammengefasst. Die angegebenen Modifikationen sind als mögliche Lösungen zu verstehen, die das Betriebsverhalten des Motors in die gewünschte Richtung verändern. Ob die angegebene Lösung ausreicht, oder ob weitere Maßnahmen notwendig sind muss im jeweiligen Einzelfall geprüft werden.

Literaturhinweise:

- [1] Greiner, H.: Weltweite Klassifizierung der Motorwirkungsgrade. *ema* 06/2006.
- [2] Technische Schrift: Drehzahlverstellung von Asynchronmaschinen. Loher GmbH 2005.
- [3] Technische Liste IM: Industriemotoren. Loher GmbH.
- [4] Niederspannungsmotoren – IEC Käfigläufermotoren 0,06 kW bis 1250 kW. Siemens AG 2006.
- [5] Technische Liste UN 04: Drehstrommotoren für drehzahlverstellbare Antriebe. Loher GmbH.
- [6] DIN EN 60079-7: Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Teil 7: Erhöhte Sicherheit „2e“
- [7] Drehstrom-Asynchronmotoren. VIK-Empfehlung 1, 2005.

LOHER

000

FLENDER LOHER
POWER AND INTELLIGENCE
 Loher Antriebe – seit Jahrzehnten im Einsatz, immer wenn höchste Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Antriebs im Vordergrund stehen.

Die wirtschaftliche Komplettlösung
 Umrichter und Motoren werden gemeinsam entwickelt, produziert und aufeinander optimiert.

Wir bringen Sie nach vorn!

FLENDER LOHER
 LOHER GMBH
 www.loher.de
 info@loher.com

Wir sind Ihr
EX - PERTE