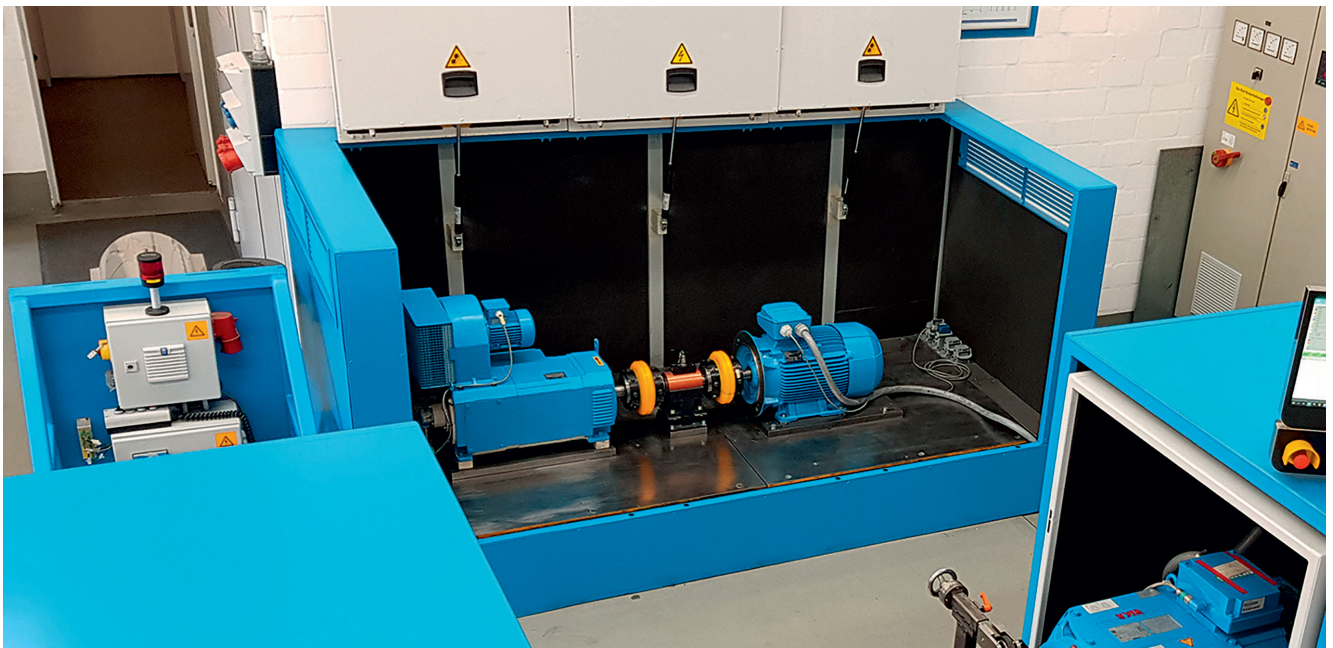


Antriebe energieeffizient einsetzen

Prozessorientierte Auslegung des Hauptantriebs für den Extruder

Hersteller von Standardextrudern wählen für die Auslegung ihrer Maschinen teilweise überdimensionierte Antriebe, um ein breites Anforderungsspektrum abdecken zu können. In Zeiten hoher Energiepreise ist das jedoch nicht mehr wirtschaftlich. Eine Extrusionsmaschine sollte mit einem auf Getriebe und Verfahrenseinheit abgestimmten Antriebspaket ausgestattet sein. Doch welche Anforderungen stellen sich bei der Auslegung des Antriebssystems?



Antriebe auf dem Prüfstand: Auf einem solchen Motorprüfstand sammelt Veka Erfahrungen, um die in den weltweiten Produktionsstätten eingesetzten etwa 700 Doppelschneckenextruder sowie 300 Einschneckenextruder im günstigsten Betriebspunkt betreiben zu können (© Veka)

Der Extruderhauptantrieb macht bei der Anschaffung eines Extruders oft nur einen geringen Teil der Gesamtinvestition aus [1]. Die Kosten, die sich mit dem Betrieb der Maschine ergeben, lassen dem Hauptantrieb bei der Auswahl jedoch eine deutlich wichtigere Rolle zukommen. Bei der Auslegung und Beschaffung darf daher nicht nur der Kaufpreis des Antriebspakets zugrunde gelegt werden, sondern die Gesamtkosten für die Lebensdauer des Antriebs sind entscheidend.

Die Veka AG beschäftigt sich bereits seit Jahrzehnten intensiv mit der An-

triebstechnik. Energieeffizienz, die Qualität der ausgegebenen Signale, Wartung und Verschleiß haben nach den Erfahrungen des Unternehmens einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Antriebssystems und den gesamten Prozess.

Seit dem Jahr 2000 betreibt das Unternehmen auch Motorprüfstände [2], um Antriebssysteme zu untersuchen (**Titelbild**) und die Antriebe der in der Veka Gruppe weltweit betriebenen rund 1000 Doppel- und Einschneckenextruder zu optimieren – mit Erfolg: Die Einsparungen an Energiekosten durch die intensiven Untersuchun-

gen sind jährlich deutlich höher als die gesamten Aufwendungen für den Eigenbau und den Betrieb der Prüfstände.

Anforderungen an den Extruderhauptantrieb

Innerhalb der Verfahrenseinheit hat der Antrieb die Aufgabe, die Schnecke im Schneckenzyylinder zu drehen. Er sorgt für die Förderung des Materials, das Aufschmelzen, das Mischen und die Homogenisierung sowie das Austragen des Kunststoffs. In den Nachfolgeeinrichtungen wird das heiße, instabile Profil kalibriert.

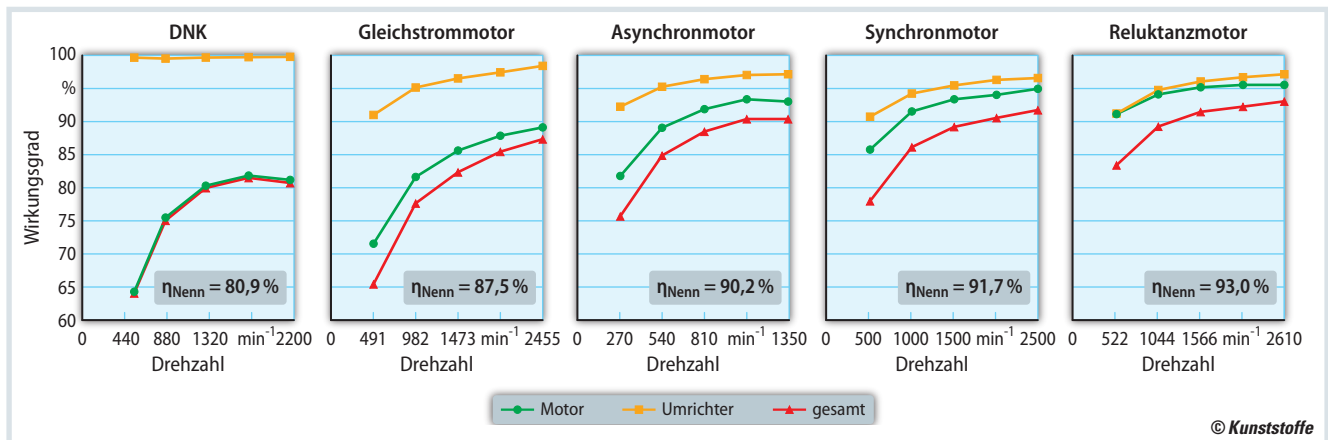


Bild 1. Wirkungsgrade der betrachteten Motorarten im Nennpunkt bei einer Motornennleistung von ca. 45 kW (Quelle: Veka)

briert, gekühlt, abgezogen und abgelängt. Dieser Funktionsablauf ist dem aktuellen Durchsatz des Extruders bzw. Werkzeugs angepasst. Prozessbedingte Drehmomentschwankungen dürfen sich deshalb nicht auf die Drehzahlkonstanz auswirken. Eine schnelle, überschwingungsfreie Drehzahlregelung für einen Einstellbereich von 1:100 gewährleistet ein stabiles und konstantes Durchsatzverhalten (siehe auch **Tabelle 1** auf S. 170).

Die Produktion von PVC-Profilen kann nur dann wirtschaftlich erfolgen, wenn der Extrusionsprozess in Abstimmung mit Material und Werkzeug beherrscht wird. In erster Linie kommt es bei der Extrusion auf eine definierte Plastifizierung, gute Entgasungsleistung und einen schonenden Aufbau des Ausformdrucks an. Diese Punkte werden im We-

sentlichen durch die vom Motor angetriebene Schnecke beeinflusst. Ein entscheidender Parameter bei der Bewertung ist die spezifische Antriebsenergie. Diese ist das Verhältnis aus der Antriebsleistung (Drehmoment, Drehzahl) und dem Durchsatz. Zur Steuerung und Beurteilung des Prozesses sind die vom Frequenzumrichter exakt ausgegebene Drehzahl und Drehmomentsignale unabdingbare Größen.

Gibt der Motor weniger Drehmoment ab als vom Frequenzumrichter angezeigt, kann unter Umständen ein nahe am Grenzdrehmoment liegender Betriebspunkt nicht mehr angefahren werden, da der Antrieb abregelt. Anders herum kann ein zu gering angezeigtes Drehmoment das Getriebe und die Verfahreseinheit unzulässig überbeanspruchen. Eine Dreh-

momentabweichung von 2% sollte daher nicht überschritten werden [3]. Die Drehzahlgenauigkeit stellt durch Drehzahlrückführung in der Praxis keine Herausforderung dar. Drehzahlabweichungen von kleiner 0,1% sind realisierbar und üblich.

Der Extruder ist ein Dauerläufer. Eine hohe Energieeffizienz ist somit eine zwingende Voraussetzung. Um nicht zu überhitzen, muss der Motor für Dauerbetrieb S1 (mit konstanter Belastung) geeignet sein. Um eine hohe Standzeit zu erreichen, sollte der eingesetzte Antrieb wartungsarm sein und eine hohe Haltbarkeit aufweisen.

Die größten Schwachpunkte des Motors sind die beweglichen Teile und die Lager. Die Motorlager müssen der Belastungsart entsprechend dimensioniert sein. So muss eine doppelte oder verstärkte Lagerung bei einem Betrieb mit erhöhter radialer Belastung, zum Beispiel »

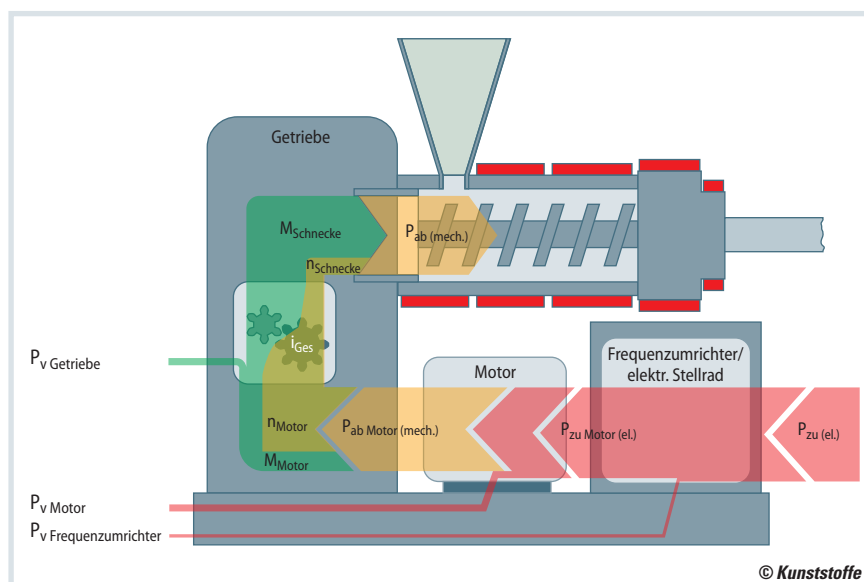
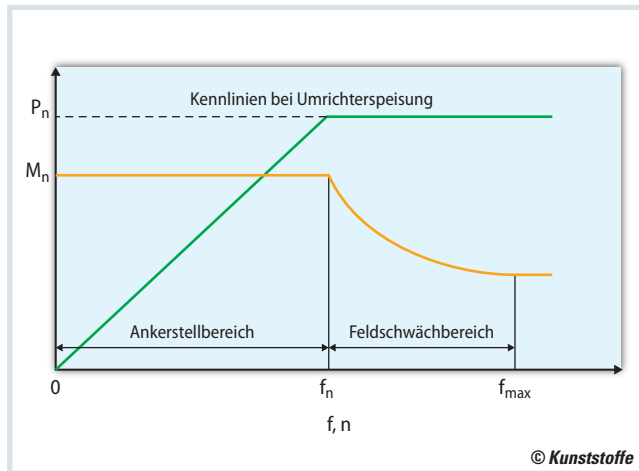


Bild 2. Leistungsfluss des Extruderhauptantriebs: Verluste treten im Frequenzumrichter, Motor und Getriebe auf (Quelle: Veka)

Im Profil

Die Veka AG, Sendenhorst, ist Marktführer in der Produktion von Kunststoff-Profilsystemen für die Herstellung von Fenstern, Türen und Rollläden sowie von Platten aus PVC-U. Neben ihrem Hauptsitz im Münsterland hat die Veka Gruppe 41 Standorte mit insgesamt 24 Produktionswerken und betreibt weltweit rund 700 Doppelschneckenextruder sowie 300 Einschneckenextruder. Der Umsatz der familiengeführten Gruppe liegt über einer Milliarde Euro. Weltweit sind rund 6000 Mitarbeiter auf vier Kontinenten für das Unternehmen beschäftigt, davon 1400 am Stammsitz der Unternehmensgruppe in Sendenhorst.

Bild 3. Feldschwächbereich: Während bei einem Drehstrom-Asynchronmotor bei Umrichterereinspeisung die Motorleistung zunächst linear mit der Drehzahl ansteigt, bleibt sie ab der Nennfrequenz (f_n) konstant. Darüber fällt das zuvor konstante Drehmoment etwas ab (Quelle: Westermann Tabellenbuch)



beim Keilriemenantrieb, berücksichtigt werden. Bei zu erwartenden Lagerströmen, insbesondere bei schlechter EMV-technischer Installation (elektromagnetische Verträglichkeit), müssen Maßnahmen ergriffen werden, da die Lagerlebensdauer hierdurch dramatisch sinkt [4].

Normalerweise sind die Platzverhältnisse im Extruder, bedingt durch Getriebe, Verfahrenseinheit und Schaltschrank, eng begrenzt. Eine kompakte Baugröße bei hoher Schutzart des Motors ist auch durch die rauen Bedingungen im Extrusionsbereich wünschenswert. Um die Geräuschkulisse der Extrusionslinie nicht zu vergrößern, sollte auf einen niedrigen Schalldruckpegel geachtet werden.

Eigenschaften unterschiedlicher Motorarten

Mit der Forderung nach drehzahlvariablen Antrieben für Extruder etablierten sich über die Jahrzehnte einige Motorvarianten mit unterschiedlichem Aufbau und Eigenschaften. Zu den früheren Lösungen zählen der **DNK-Motor** (Drehstromnebenschlusskommutatormotor) und der fremderregte **Gleichstrommotor**. Den bekannten Vorteilen vom Netzbetrieb des DNK-Motors und der exakten und einfachen Regelbarkeit des Gleichstromers stehen bei beiden Motortypen erhebliche Nachteile entgegen. Die Maschinen sind energetisch sehr ineffizient und bauen im Vergleich zu modernen Antriebssystemen sehr groß. Beide Motorarten arbeiten mit einem Kommutator, der über Schleifkontakte, meistens Kohlebürsten, versorgt wird. Die Kohlebürsten verschleiben und müssen in regelmäßigen Abständen gewartet werden.

Mit Weiterentwicklung der Umrichtertechnologie wurde der Einsatz von **Synchronmotoren** in der Extrusion möglich. Der Synchronmotor besteht durch seine hohe Genauigkeit der Signalanzeige und einen hervorragenden Wirkungsgrad über den gesamten Leistungsbereich (**Bild 1**). Durch die verbauten Seltenen Erden im Permanentmagnet sind die Anschaffungskosten allerdings sehr hoch. Die Synchronmaschinen mit Permanentmagneten benötigen einen kleinen Luftspalt zwischen Rotor und Stator. Die Instandsetzung ist dadurch erschwert und dementsprechend aufwendig.

Die genannten Motorarten sind im Normalfall innenbelüftet. Dies kommt der Baugröße zugute, allerdings muss eine niedrige Schutzart in Kauf genommen werden.

Derzeit auf dem Markt etabliert ist der für den Umrichterbetrieb optimierte **Asynchronmotor**. Er hat einen guten Wirkungsgrad bei relativ geringen Anschaffungskosten. Im Teillastbereich besitzt er einen schlechteren Wirkungsgrad als der Synchronmotor. Dieser Nachteil wird durch geschickte Auslegung des Antriebs im Feldschwächbereich (siehe **Kasten S. 170**) nahezu neutralisiert [3]. Durch die Außenbelüftung erreicht der Motor eine hohe Schutzart, baut dadurch allerdings etwas größer als ein innenbelüfter Synchronmotor.

Aktuell in der Antriebstechnik auf dem Vormarsch ist der **Reluktanzmotor**. Vom Aufbau des Stators her handelt es sich um eine Drehfeldmaschine. Anstatt mit einem Käfigläufer ist er mit einem geblechten Rotor ohne Wicklungen versehen. Der Motor funktioniert rein nach dem Reluktanzprinzip, bei dem das Magnetfeld nach dem geringsten magnetischen Widerstand strebt. Der Rotor richtet sich synchron mit dem Drehfeld im Stator aus, ein Drehmoment entsteht. Im Vergleich zum Asynchronmotor erzeugt der Reluktanzmotor keine Läuferverluste durch die Kurzschlussströme im Käfig. Dies steigert die Effizienz gerade im Teillastbereich. Gepaart mit der Möglichkeit eines Betriebs mit 87 Hz (siehe **Kasten S. 170**) ergibt sich ein großer Leistungsbe- reich mit verhältnismäßig konstantem Wirkungsgradverlauf. Der ausschließlich für den Frequenzumrichterbetrieb geeignete Motor benötigt weder Drehgeber noch Fremdbelüftung. Dies wirkt sich

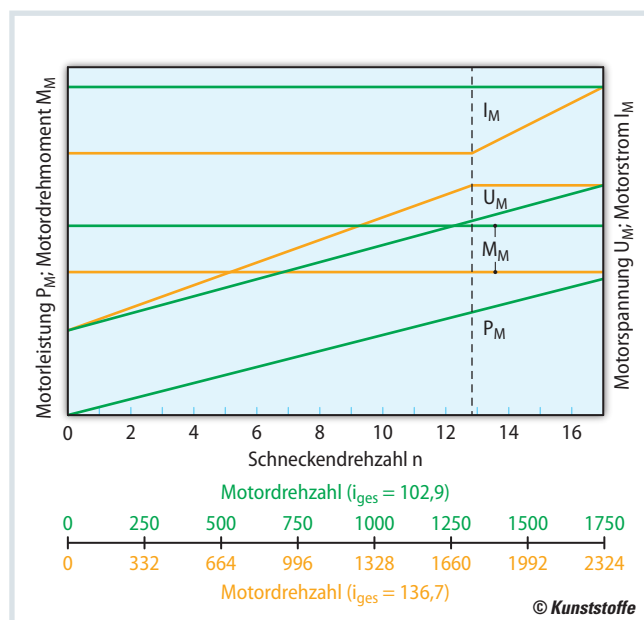


Bild 4. Fahrweise des gleichen Motors ohne und mit Feldschwächung bei optimierter Gesamtübersetzung

(Quelle: [3])

sehr positiv auf den Kaufpreis aus. Aktuell ist der Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) noch etwas schlechter; häufig muss ein um eine Leistungsstufe größeres Umrichterlastteil gewählt werden, um die etwas höhere Scheinleistung zur Verfügung zu stellen.

Betrachtet man die Historie der Antriebsarten, so fallen mit Blick auf die Wartungsfreundlichkeit zwei Entwicklungen auf: Die Effizienz der Antriebe steigt, und die Anzahl der beweglichen Teile nimmt ab. Natürlich bewirkt eine Steigerung der Energieeffizienz sinkende Energiekosten, aber sie hat auch direkte Auswirkungen auf Wartung und Verschleiß. Denn eine höhere Effizienz verursacht weniger Verlustleistung im Motor. Die verringerte Erwärmung des Motors erhöht die Standzeit der Lager, da das Schmierfett sich langsamer zersetzt und ebenso verläuft die thermische Alterung der Wicklungsisolation langsamer.

Maschinenbezogene Antriebsdimensionierung

Die Dimensionierung des Antriebs wird in erster Linie durch die maximale Schneckendrehzahl und das benötigte Drehmoment bestimmt. Die maximale Schneckendrehzahl ($n_{\max \text{ Schnecke}}$) ergibt sich aus der von der Verfahrenstechnik vorgegebenen Schneckenumfangsgeschwindigkeit ($v_{u \max}$) und dem Schneckendurchmesser (D). Multipliziert mit dem Gesamtübersetzungsverhältnis (i_{ges}) aus Getriebe- und ggf. Keilriemenübersetzung (Bild 2) ergibt sich die benötigte Motorgrenzdrehzahl ($n_{\text{Grenz Motor}}$).

$$n_{\text{Grenz Motor}} = n_{\max \text{ Schnecke}} \cdot i_{\text{ges}} \text{ mit} \\ n_{\max \text{ Schnecke}} = \frac{v_{u \max}}{D \cdot \pi} \quad (1)$$

Wird das Begrenzungsmoment des Getriebes überschritten, regelt der Antrieb die Drehzahl solange herunter bis das eingestellte Begrenzungsmoment ausreicht oder der Antrieb stehenbleibt und abschaltet. In der Praxis sollte das Begrenzungsmoment etwas höher sein als das zulässige Moment. Ein Begrenzungsfaktor (f_b) von etwas größer als 1 lässt das Anfahren des Antriebs zu ohne dass beim Erreichen des zulässigen Moments sofort heruntergeregt wird. Der Begrenzungsfaktor wird entweder aufgrund von Betriebserfahrung und Versuchen [5] oder

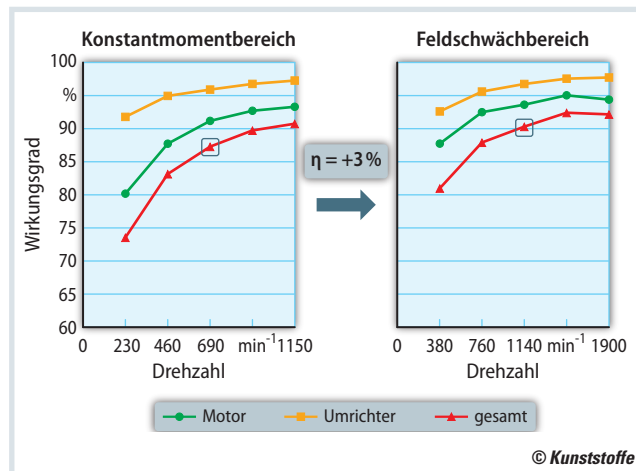


Bild 5. Einstellung Konstantmomentbereich zu Feldschwächbereich (gleicher Antrieb, erhöhte Übersetzung) (Quelle: Veka)

nach Rücksprache mit dem Extruderbauer festgelegt.

Die Drehmomentübertragung über den Keilriemen und das Getriebe ist verlustbehaftet. Diese Übertragungsverluste (η_{Getriebe}) sollten also bei der Berechnung des Motorgrenzdrehmoments ($M_{\text{Grenz Motor}}$) auf das zulässige Schneckendrehmoment berücksichtigt werden. Insgesamt ergibt sich das Motorgrenzdrehmoment zu

$$M_{\text{Grenz Motor}} = \frac{M_{\text{Schnecke}} \cdot f_b}{i_{\text{ges}} \cdot \eta_{\text{Getriebe}}} \quad (2)$$

Leistungsoptimierte Auslegung

Extruder laufen meistens mit unterschiedlicher Durchsatzleistung. Der Antrieb wird gewöhnlich im Teillastbereich betrieben. Der Wirkungsgrad gerade von Gleichstrom- und Drehstrom-Asynchronmaschinen ist in diesem Bereich geringer als bei Volllast. Durch eine Überdimensionierung ergeben sich erhebliche wirtschaftliche Nachteile bei den Energiekosten, da der Motor noch tiefer in den verlustreichen Teillastbereich getrieben wird.

Der perfekt ausgelegte Hauptantrieb nutzt den Feldschwächbereich bereits in der Auslegung [3]. Die Reduzierung des magnetischen Flusses im Erregerfeld ermöglicht das Betreiben des Motors mit einer höheren Drehzahl als der Motornennndrehzahl. Bis zum Erreichen des Feldschwächbereichs (also noch im Konstantmomentbereich) ist das Nenndrehmoment über den gesamten Drehzahlverlauf abfahrbar. Die Leistung steigt linear bis zur Nennleistung (Bild 3).

Auch im Feldschwächbereich darf der

Motor nicht überlastet werden. Das Drehmoment des Motors muss demnach bei einer Erhöhung der Drehzahl sinken, die Motorleistung bleibt konstant. Damit bei verringertem Drehmoment des Motors im Feldschwächbereich das Schnecken-nennmoment erreicht wird, ist hierbei ein höheres Übersetzungsverhältnis notwendig [3]. Ist das Übersetzungsverhältnis vorgegeben, muss zum Erreichen der Feldschwächung im oberen Schneckendrehzahlbereich bei der Motorauswahl darauf geachtet werden, dass die Motornennndrehzahl nicht zu hoch ist.

Der entscheidende Vorteil bei der Auslegung des Antriebs im Feldschwächbereich ist, dass das Fenster des Betriebspunktes aus dem niedrigen Drehzahlbereich zur Nenndrehzahl verschoben und ein deutlich höherer Wirkungsgrad im Betriebspunkt erzielt wird (Tabelle 2, Bilder 4 und 5). »

Die Autoren

Dieter Drescher ist Leiter Elektrotechnik der Veka AG in Sendenhorst; ddrescher@veka.com

Christian Angsmann ist Techniker Antriebsprüfung bei der Veka AG in Sendenhorst; cangsmann@veka.com

Literatur & Digitalversion

» Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2019-09

English Version

» Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

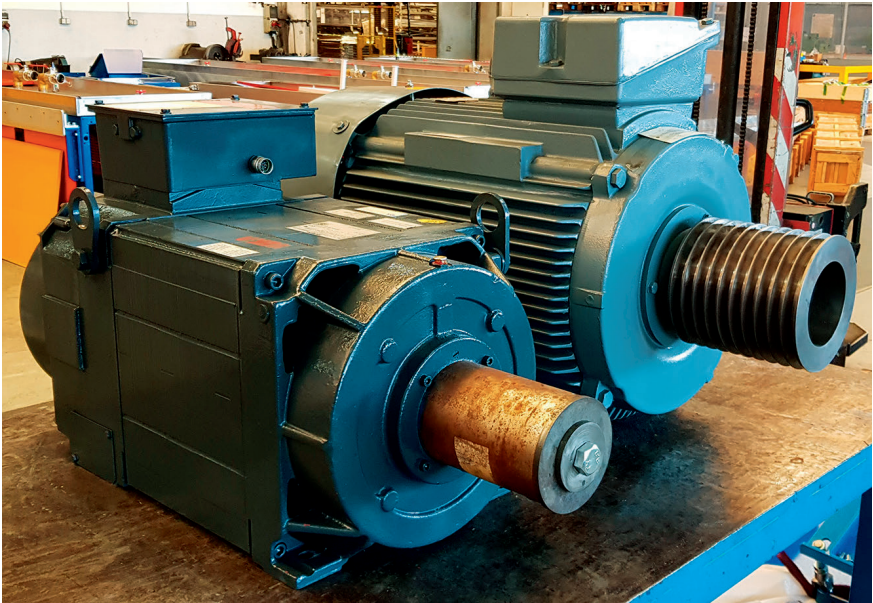


Bild 6. Vergleich der Ständerbauform: Ein Umrichter-optimierter Drehstromasynchronmotor (links) mit 44 kW Leistung fällt aufgrund des maßgeschneiderten Ständers deutlich kompakter aus als der mit 45 kW nur unwesentlich leistungsfähigere Normmotor dahinter (© Veka)

schen Wirkungsgrades und des wartungsintensiven Aufbaus heute meist nicht mehr die erste Wahl sind. Synchron-, Asynchron- und Reluktanzmotoren sind hier fast immer die wirtschaftlichere Alternative.

Bei weiterer Analyse in Bezug auf den Anschaffungspreis sowie Instandhaltungs- und Wartungsaufwand hat der Reluktanzantrieb beste Chancen, das Konzept der Zukunft zu werden. Ein Nachteil ist derzeit noch, dass durch den kleineren Leistungsfaktor $\cos \varphi$ des Motors und der damit einhergehenden höheren Scheinleistung oftmals ein etwas größerer Umrichter als bei Synchron- und Asynchronmotoren notwendig ist. Darüber hinaus wird bei den meisten Herstellern von Reluktanzantrieben die Baugröße durch den verwendeten „Standard-“Ständer der Drehstromasynchronmaschine vorgegeben und ist somit größer als z. B. bei „maßgeschneiderten“ Ständern von Drehstromasynchronmotoren (**Bild 6**).

Daher darf man gespannt sein, über welche Weiterentwicklungen und Zukunftstendenzen die Antriebshersteller auf der nächsten SKZ-Fachtagung über Antriebe von Ein- und Doppelschneckenextrudern berichten werden, die voraussichtlich im Mai 2020 stattfindet [7]. ■

Technik im Detail

Die 87-Hz-Kennlinie

In Sternschaltung liegt der Nennpunkt des Motors bei 50Hz und 400V, in Dreieckschaltung bei 50Hz und 230V. Da der Frequenzumrichter Spannungen bis 400V bereitstellt, kann man diese auch bei Dreieckschaltung nutzen und den Motor mit einer größeren Spannung als 230V betreiben. Die Kennlinie bei Dreieckschaltung wird also linear verlängert und erreicht bei 87Hz die maximale Ausgangsspannung des Umrichters von 400V. Mit dieser Maßnahme wird eine Leistungserhöhung erreicht, da der Motor in Dreieckschaltung auch bei 87 Hz noch sein Nennmoment abgibt.

Der Feldschwäcbereich von Motoren

Als Feldschwächung wird bei rotierenden elektrischen Maschinen eine Verringerung des magnetischen Flusses der Erregerwicklung bezeichnet, welche als Folge eine Drehzahlveränderung verursacht. Durch den abnehmenden magnetischen Fluss erhöht sich die Drehzahl, das Drehmoment nimmt ab und die Leistung bleibt konstant.

Fazit

Betrachtet man die Lebenszykluskosten aller für einen Extruderhauptantrieb infrage kommender Systeme, so stellt man schnell fest, dass Antriebslösungen wie der DNK-Motor oder der Gleichstrommotor aufgrund des schlechten energeti-

Notwendige Anforderungen	Zusätzliche Anforderungen
variabler Drehzahlbereich (1:100)	kompakte Baugröße
konstantes Drehmoment	hohe Schutzart
hohe Drehzahl und Drehmomentgenauigkeit	geringer Schalldruckpegel
hohe Energieeffizienz	
hohe Standzeit, geringer Wartungsaufwand	
Betriebsart (S1)	

Tabelle 1. Anforderungen an den Extruderhauptantrieb (Quelle: Veka)

Extrudertyp:	paralleler gegenläufiger Doppelschneckenextruder ($D \approx 130 \text{ mm}$)	
Nenndrehmoment:	55 000 Nm	max. Schneckendrehzahl: 17 min^{-1}
Begrenzungsfaktor:	1,05	Getriebewirkungsgrad: 94 %
=> benötigte Motor-Nennleistung: 109,4 kW		
=> Listenmotor mit 100 kW Motornennleistung und einer Motornendrehzahl von 1750 min^{-1}		
Auslegung des Antriebs		
	ohne Feldschwächung	mit Feldschwächung
Motornendrehzahl	bei $n_{\text{max}} = 17 \text{ min}^{-1}$	bei $0,75 n_{\text{max}} = 12,8 \text{ min}^{-1}$
Gesamtübersetzung	$i_G i_R = 102,9$	$i_G i_R = 136,7$
max. Motordrehzahl ^{1), 2)}	1750 min^{-1}	2324 min^{-1}

¹⁾ maximale Drehzahl bei der noch 30 % Drehmomentreserve zur Kippgrenze besteht = 4500 min^{-1}
²⁾ mechanische Grenzdrehzahl = 4500 min^{-1}

Tabelle 2. Beispiel: Auslegung eines Drehstromantriebs mit und ohne Feldschwächung (Quelle: [3])