

Der bisher effizienteste Antrieb für die Extruder-Branche

Dipl.-Ing. (FH) **Gernot Pankratz**, Pikatron GmbH, Usingen;

Kurzfassung

Antriebslösungen für Extruder, die sich aus Elektromotor und Getriebe zusammensetzen, sind weitläufig bekannt. Auch direktangetriebene Extruder (ohne Getriebe- oder Riemenuntersetzung) kommen zum Einsatz. In dieser Ausarbeitung geht es darum, ein neues, patentiertes Torque-Motor-Konzept vorzustellen, das sich vom herkömmlichen, hochpoligen, energetisch unwirtschaftlichen Synchron-Torquemotor weit abhebt. Es ist deshalb gerade für langsam drehende Antriebe, wie sie bei Extrudern erforderlich sind, sehr gut geeignet. Dieses bereits vielfach bewährte Direktantriebskonzept mit dem Cool-Torquemotor bietet die bisher beste Möglichkeit, den gesetzlichen und betrieblichen Anforderungen in Bezug auf Energieverbrauch und Kostensenkung (Energiekosten, Wartungskosten) gerecht zu werden.

1. Motorprinzipien

Der elektrische Motor ist ein Energiewandler: aus elektrischer Energie entsteht mechanische (Rotations-)Energie. Dies gelingt durch Wechselwirkung zwischen statischen, meist permanentmagnetisch erregten und dynamischen, elektrisch erzeugten Magnetfeldern im feststehenden Stator und im drehbar gelagerten Anker (oder Rotor genannt). Die durch Abstoßung gleichnamiger Magnetpole gewonnene Rotationsenergie im Rotor wird entweder direkt oder über ein Getriebe und/oder Riemen zur Drehzahlanpassung auf die Extruderschnecke übertragen.

Zu diesem generellen Ergebnis führen eine Vielzahl von Lösungen mit elektrischen Antrieben, die auf den ersten Blick sehr ähnlich aussehen, sich in ihrer Funktionsweise jedoch grundlegend unterscheiden. Damit ergeben sich auch Unterschiede in den charakteristischen Eigenschaften.

Eine gut überlegte Auswahl unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist hier angebracht. Dazu seien zunächst kurz die folgenden Antriebssysteme, die in der Extrudertechnik verbreitet im Einsatz sind, vorgestellt. Da aus vielen Gründen die Gleichstromtechnik heute zunehmend von der Drehstromtechnik abgelöst wird, soll diese hier nicht mehr behandelt werden.

1.1 Asynchronmotor

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist als Käfigläufermotor der Drehstrommotor mit dem einfachsten Aufbau (Bild 1). Seine Robustheit, die geringen Herstellkosten, die hohe Lebensdauer und der geringe Wartungsaufwand (keine Bürsten) sind einige seiner bestechenden Eigenschaften, weshalb er in vielen Industriebereichen eingesetzt wird. Er ist sehr Überlastfähig und besitzt bei Betrieb mit Frequenzumrichtern eine relativ hohe Leistungsausbeute durch den Betrieb über die Nenndrehzahl hinaus in dem sogenannten Feldschwächbereich.

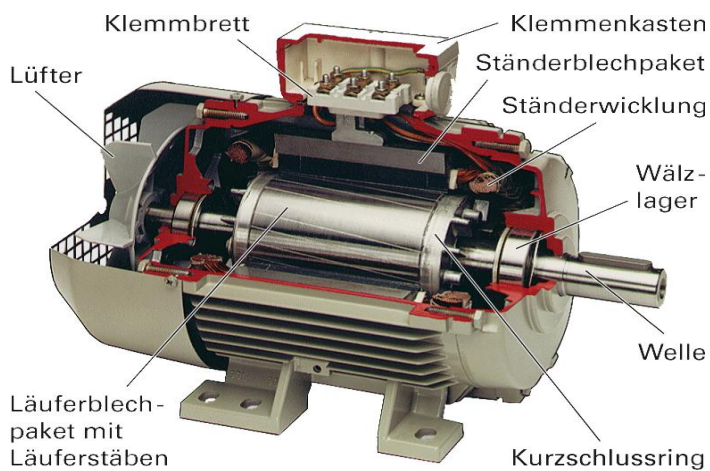


Bild 1: Aufbau eines Asynchronmotors (Käfigläufer) [2]

Zur Vermeidung von Wirbelströmen sind Stator (Ständer) und Rotor (Läufer) des Motors aus Blechen zusammengesetzt. In die Nuten des Stators ist eine symmetrische Drehstromwicklung eingebracht. Mittels des dreiphasigen Statorstroms wird ein umlaufendes Drehfeld erzeugt. Eine Kommutierung über verschleißbehaftete Bürsten, wie sie in der Gleichstromtechnik noch üblich waren, ist damit nicht mehr notwendig. Der ebenfalls genutete Rotor trägt eine sogenannte Kurzschlusswicklung. Sie besteht aus massiven Aluminium- oder Kupferstreben, die stirnseitig durch sogenannte Kurzschlussringe aus dem gleichen Material verbunden sind. Das rotierende Magnetfeld des Stators induziert einen Strom in der Kurzschlusswicklung des Rotors, der wiederum ein Magnetfeld im Rotor hervorruft, das in Wechselwirkung mit dem Statorfeld ein Drehmoment erzeugt, das einen Ausgleich der Kräfte anstrebt. Mit der Annäherung an diesen Fall nimmt das Drehmoment ab. Bei diesem Motor folgt der Rotor also nicht synchron dem Statorfeld, was ihm den Namen Asynchronmotor einbringt. Es stellt sich ein belastungsabhängiger Schlupf ein, ohne den dieses Prinzip nicht funktioniert. Der Anspruch, Drehzahl und/oder Drehmoment konstant zu halten, erhöht die Anforderung an eine gute Regelung, der sich in der Software

niederschlägt. Erst durch den Einsatz der Vektorregelung ist das Drehmoment M bestimmt durch den Statorstrom I :

$$M \sim I$$

Die Drehzahl n ist von der Anzahl der Drehstromwicklungen, der Polpaarzahl p , abhängig und wird über die Frequenz f gesteuert. Durch mehrfache Anordnung des 3-phasigen Wicklungssystems und Reihenschaltung der entsprechenden Phasen entstehen Motoren mit mehr als einem magnetischen Polpaar. Mit der Verdopplung der Polpaarzahl halbiert sich die Drehfrequenz des Statorfeldes und damit reduziert sich auch die Drehzahl des Rotors, ohne dass sich die Frequenz des Stromes ändert. Aufgrund des Schlupfes s (in Prozent) ist die Drehzahl des Asynchronmotors im Lastfall immer kleiner als die Drehfrequenz:

$$n = (1 - s / 100) \times 60 \times f / p \quad (\text{Einheit 1/min})$$

Vorteile:

- Einfacher, kostengünstiger Aufbau
- Wartungsarm (keine Bürsten!)
- Läuft auch ohne Ansteuerung direkt am 3-phasigen Netz

Nachteile:

- Relativ hohe Verluste im Rotor
- Hohe Verluste im Teillastbereich
- Hohe Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich
- Hoher Regelungsaufwand
- Kein Haltemoment im Stillstand
- Bei größeren Leistungen ist eine Anfahrhilfe oder Umrichter erforderlich

1.2 Synchronmotor

Der Stator eines Synchronmotors hat prinzipiell den gleichen Aufbau wie der eines Asynchronmotors. Der Rotor unterscheidet sich durch die auf seinem Umfang dicht an dicht geklebten Permanentmagneten, die für eine dauerhafte und konstante Felderregung sorgen. Heute werden dazu meist Neodymium-Eisen-Bohr-Magnete verwendet, die inzwischen durch den extremen Preisverfall relativ günstig zu beschaffen sind (Bild 2).

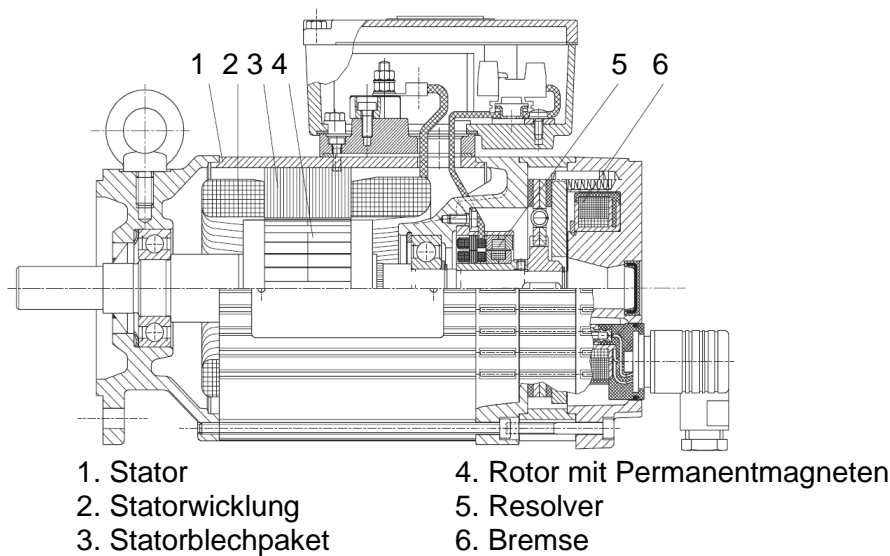


Bild 2: Teilschnittbild eines permanentenerregten Synchronmotors [3]

Die Erzeugung des Drehfeldes geschieht hier in ähnlicher Weise wie beim Asynchronmotor. Durch die Wechselwirkung zwischen drehendem Statorfeld und permanentem Rotorfeld entsteht ein Drehmoment mit dem Bestreben, den Rotor in den Bereich des stärksten magnetischen Feldes des Stators zu drehen. Um diesen Fall möglichst schnell und optimal zu erreichen, setzt man Gebersysteme (Resolver Pos. 5 in Bild 2) ein, die den Winkel des Rotors im Statormagnetfeld registrieren und über den Statorstrom dafür sorgen, dass diese Position gehalten wird. Wie der Name des Motors schon aussagt, folgt hier der Rotor der Drehfeldfrequenz synchron, also ohne Schlupf. Dabei ist das Drehmoment dem Statorstrom proportional. Rotor und Stator treten in eine konstante Winkelbeziehung, die sich unter Last im Bereich des Polradwinkels vergrößert, der durch die Größe der Permanentmagneten und die Anordnung der Spulen im Stator bestimmt ist. Die Strombegrenzung des Reglers bestimmt das maximale Drehmoment. Erreicht das Drehmoment diese Grenze, bleibt der Motor stehen, das heißt, er liefert volles Drehmoment im Stillstand. Die Drehzahl berechnet sich zu

$$n = 60 \times f / p \quad (\text{Einheit 1/min})$$

Tabelle 1: Drehzahlen die sich abhängig von der Polpaarzahl und einer Drehfeldfrequenz von 50 Hz ergeben

Polpaarzahl	1	2	3	4	5	6	7	8
n bei 50Hz	3000/min	1500/min	1000/min	750/min	600/min	500/min	429/min	375/min

Hinsichtlich der maximal möglichen Polpaarzahl sind durch die Baugröße Grenzen gesetzt.

Vorteile:

- Keine Verluste bei der Felderregung durch stromlose Permanenterregung
- Dadurch geringerer Kühlungsbedarf als bei Asynchronmotoren
- Kleinere Baugröße und geringeres Gewicht bei gleicher Leistung aufgrund des Wegfalls der Rotorwicklung
- Starre Kopplung zwischen Drehfeld und Drehzahl, sehr gute Regelbarkeit und Positionierung mit hoher Genauigkeit
- Wartung nur in Bezug auf die Lager notwendig
- Saubere Drehmomentregelung auch im Stillstand möglich

Nachteile:

- Aufwendigerer Aufbau als Asynchronmotor, dadurch teurer
- Nur begrenzter Feldschwäcbereich
- Ansteuerung durch Umrichter erforderlich, ermöglicht aber exakte Regelung und Positionierung
- Wegen der Permanentmagneterregung entsteht eine kleine Drehmomentwelligkeit (Ripplemoment), die von einem guten Regler ausgeglichen werden kann
- Geringere Verluste im Teillastbereich als Asynchronmotor

1.3 Direktantrieb mit dem Synchron-Torquemotor

Eine innovative Antriebslösung stellt der Direktantrieb über einen Synchron-Torquemotor dar. Der Antrieb eines Extruders hat die prozessbedingte Anforderung einer niedrigen Drehzahl bei sehr hohem Drehmoment. Auf das Prinzip des oben beschriebenen Synchronmotors übertragen, bedeutet dies zunächst die Realisierung einer hohen Polpaarzahl zur Reduzierung der Drehzahl, was folglich eine kleinere Polteilung erfordert. Um Berührung der Pole zu vermeiden, muss der Durchmesser vergrößert werden. Jedoch führt eine kleinere Polteilung zu einer räumlichen Konzentration der Kupferverluste und damit zu einer höheren thermischen Belastung. Eine Anpassung des maximal zulässigen Stromes würde wieder ein geringeres Drehmoment nach sich ziehen, was sich kontraproduktiv auf den Einsatz als Extruderantrieb auswirkt. Soll aber die thermische Belastbarkeit beibehalten werden, muss entweder eine bessere Kühlung der Wicklung erfolgen oder der Umfang der Maschine weiter vergrößert werden. Damit entsteht ein hochpoliger Synchronmotor, der sogenannte Synchron-Torquemotor.

Wie beim Synchronmotor ist die Drehzahl umgekehrt proportional zur Polpaarzahl und das Drehmoment proportional zum Strom. Die Polpaarzahl liegt üblicherweise bei 20 bis weit über 100.

Der höhere Anschaffungspreis gegenüber einer vergleichbaren Synchronmotor-Getriebe-Kombination liegt in der Größe und dem Herstellungsaufwand begründet.

Aufgrund seiner Größe ist es gut möglich, ihn mit einer Hohlwelle und entsprechender Lagerung (Drucklager) auszustatten, was die direkte Aufnahme der Extruderschnecke und Zylinder ermöglicht.

Man findet ähnliche Vor- und Nachteile wie beim Synchronmotor. Darüber hinaus sind die folgenden zu nennen:

Vorteile:

- Hohlwelle möglich
- Spielfreier Antrieb (ohne Getriebe)
- Höhere Lebensdauer der Lager
- Hohe Leistungsdichte
- Wartungsarm, aufgrund der kleinen Drehzahl ist die Beanspruchung der Lager wesentlich geringer

Nachteile:

- Große Baugröße, daher auch hohe Wellenhöhe
- Hoher ohmscher Widerstand der Wicklungen, dadurch hohe Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich, meist Wasserkühlung
- Kleinste Baugröße 132
- Hoher Anschaffungspreis

1.4 Zusammenfassung der Eigenschaften der bisher beschriebenen Motortypen

Eine Gemeinsamkeit der ersten zwei beschriebenen Motortypen hinsichtlich der Verwendung für den Extruderantrieb ist auf den ersten Blick die Notwendigkeit eines Getriebes zur Anpassung der Drehzahl an die Schneckendrehzahl. Es gibt eine Vielzahl von Getriebelösungen, auf deren detaillierte Beschreibung verzichtet werden soll. Wichtig zu erwähnen ist, dass es bei einer wirtschaftlichen Betrachtung des Systems auf dessen Verluste ankommt. In diesem Zusammenhang sind Reibungsverluste an den Zahnflanken und sogenannte Planschverluste durch das Ein- und Austreten der Zähne im Getriebeöl zu nennen. Außerdem wirkt sich das Zahnflankenspiel in jeder Getriebestufe negativ auf die Regelstrecke aus (Schwingneigung). Der beschriebene Synchron-Torquemotor dagegen benötigt kein Getriebe, da er aufgrund seiner hochpoligen Statorwicklung für eine dem Extruderbetrieb angepasste Drehzahl ausgelegt werden kann.

Eine weitere Gemeinsamkeit ist die unerwünschte Wärmeproduktion der Motoren, die im Dauerbetrieb schon unter Nennbedingungen zum Schutz vor Defekten abgeführt werden muss. Dies wird mittels einer Fremdkühlung durch Luft oder Wasser realisiert, die wiederum wartungsbedürftige Pumpen und Wärmetauscher erfordert.

Die Eigenschaften der bisher beschriebenen Antriebsarten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht der in Kapitel 1 beschriebenen Antriebstypen

Asynchronantrieb	Synchronantrieb	Synchron-Torqueantrieb
Hohe Wärmeentwicklung auch im Nennbetrieb, Kühlung erforderlich	Mittlere Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich	Hohe Wärmeentwicklung auch im Nennbetrieb, Kühlung erforderlich
Wartungsarm	Wartungsarm	Wartungsarm
Einfacher Aufbau, kostengünstig	Aufwendiger Aufbau, teuer	Aufwendiger Aufbau, teuer
		Große Baugröße, hohe Wellenhöhe
Niederohmige Wicklung	Niederohmige Wicklung	Hoher ohmscher Widerstand der Wicklung
Ungeregelte Ansteuerung direkt am Netz möglich, Einsatz f. Extruder nur mit Umrichter möglich	Ansteuerung nur durch Umrichter möglich	Ansteuerung nur durch Umrichter möglich
Kein Ripplemoment	Ripplemoment	Ripplemoment
Aufwendige Regelung, besonders im Teillastbereich und Stillstand	Gute Regelbarkeit, auch im Stillstand, volles Dauermoment im Stillstand möglich	Gute Regelbarkeit, volles Dauermoment bei kleinen Drehzahlen nicht möglich
Getriebe erforderlich, Wartung + Verluste!	Getriebe erforderlich, Wartung + Verluste!	Kein Getriebe erforderlich

Aus den Beschreibungen der Motorprinzipien geht hervor, welche Eigenschaften zu Verlusten und damit zur Reduzierung des Wirkungsgrades führen.

Die Verluste eines Motors entstehen im Kupfer der Wicklung durch unvermeidbare Stromwärmeverluste und im Eisen durch Wirbelströme und Ummagnetisierung im magnetischen Kreis.

Kupferverluste

Kupferverluste entstehen durch den ohmschen Widerstand der Kupferwicklung als stromdurchflossenen Leiter und können mit der Formel:

$$P=I^2 \times R$$

berechnet werden, wobei I für den Spulenstrom und R für den Wicklungswiderstand steht. Je hochohmiger die Wicklung des Motors ist, desto höher sind die Verluste. Wicklungslänge und Drahtquerschnitt bestimmen diesen Wert. Eine dem Statorstrom proportionale Drehmomenterhöhung führt zu einer quadratischen Erhöhung der Verlustleistung.

Eisenverluste

Der Wechselstrom durch die Wicklungen eines Motors erzeugt in dem Eisenkern (Rotor und/oder Stator) einen magnetischen Fluss, der im periodischen Takt seine Richtung ändert. Das bedeutet eine ständige Ummagnetisierung des Eisens und damit Wirbelströme im Eisen, die sich diesem Fluss entgegenstellen. Man spricht hier von frequenzabhängigen Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten, die durch die Verwendung von geblechten Kernpaketen reduziert werden können. Diese Verluste steigen mit der Drehzahl.

Kupfer- und Eisenverluste verringern sich mit steigender Baugröße bei gleicher Leistung, weil die Querschnitte für Kupfer und Eisen ebenfalls steigen.

Zusammenfassung:

- Kleinere Drehzahl → niedrigere Wirbelstromverluste
- Höheres Drehmoment → höherer Strom, quadratisch zum Strom steigende Verluste
- Bei kleineren Drehzahlen aber gleichem Drehmoment bleiben die Verluste aufgrund des gleichbleibenden Stromes im Stator gleich, aber die abgegebene Leistung fällt, damit steigt der Anteil der Verluste gemessen an der abgegebenen Leistung, damit sinkt der Wirkungsgrad.
- Größere Bauform → geringere Verluste

Außer diesen motorspezifischen Verlusten findet man im Antriebsstrang weitere Verluste durch den Einsatz von Getrieben / Riemen und Lüftern bzw. Kühlaggregaten.

Es ergibt sich die in Bild 3 dargestellte Aufteilung der Verluste:

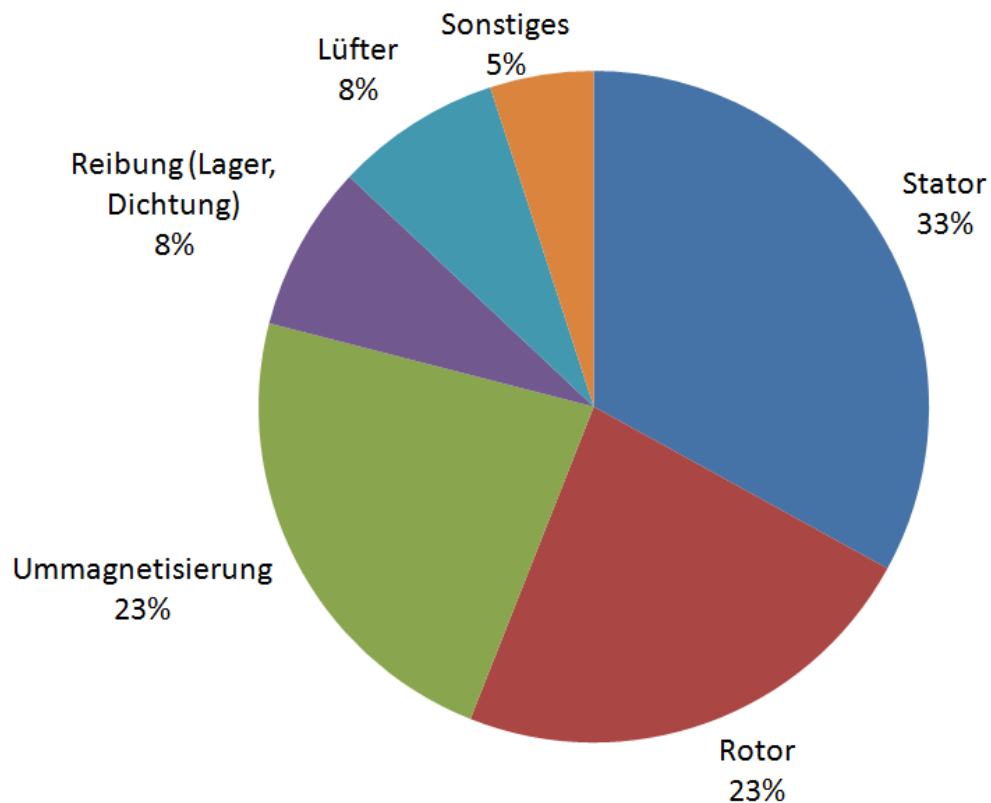


Bild 3: Exemplarische Aufteilung der Verluste eines Asynchronmotors [1]

Bei einem Synchronmotor entfallen die Rotorverluste. Dadurch ergeben sich für die Stator- und Ummagnetisierungsverluste höhere Anteile.

2. Der Begriff „Effizienz“ und seine Bedeutung für die Auswahl eines Antriebssystems in der Extruder-Branche

Früher befasste sich die technische Entwicklung in der Kunststoffextrusion eher mit der Optimierung der Prozesse, mit dem Ziel, den Durchsatz und die Qualität zu steigern. Heute gewinnen mehr und mehr auch ökologisch-ökonomische Aspekte bei der Auslegung von Maschinen Bedeutung. Auch politische Vorgaben, wie zur Einsparung des CO₂ – Ausstoßes, müssen eingehalten werden.

Nach Umfragen des Gesamtverbandes Kunststoffverarbeitende Industrie (GKV) bei den Kunststoffverarbeitern ergibt sich von Jahr zu Jahr ein erheblicher Anstieg der Energiekosten [1]. Mehr als 70% des Stromverbrauchs in der Industrie fallen auf elektrische Antriebe. Energieeinsparungen in der Antriebstechnik wirken sich daher sehr effektiv aus und erfordern entsprechende Maßnahmen schon bei der Entwicklung von neuen Maschinen.

Leider erfolgt noch in vielen Fällen die Auswahl des Antriebssystems dem Kriterium der geringsten Anschaffungskosten. Das ist sehr kurzsichtig gehandelt, da auch Lebenszykluskosten der Maschine berücksichtigt werden müssen. Denn gerade für Antriebe im Dauerbetrieb, wie sie in der Extrudertechnik üblich sind, spielen die Stromkosten eine primäre Rolle. Das Verhältnis von anfallenden Lebenszykluskosten zueinander bei einer Laufzeit von 10 Jahren zeigt das Diagramm in Bild 4.

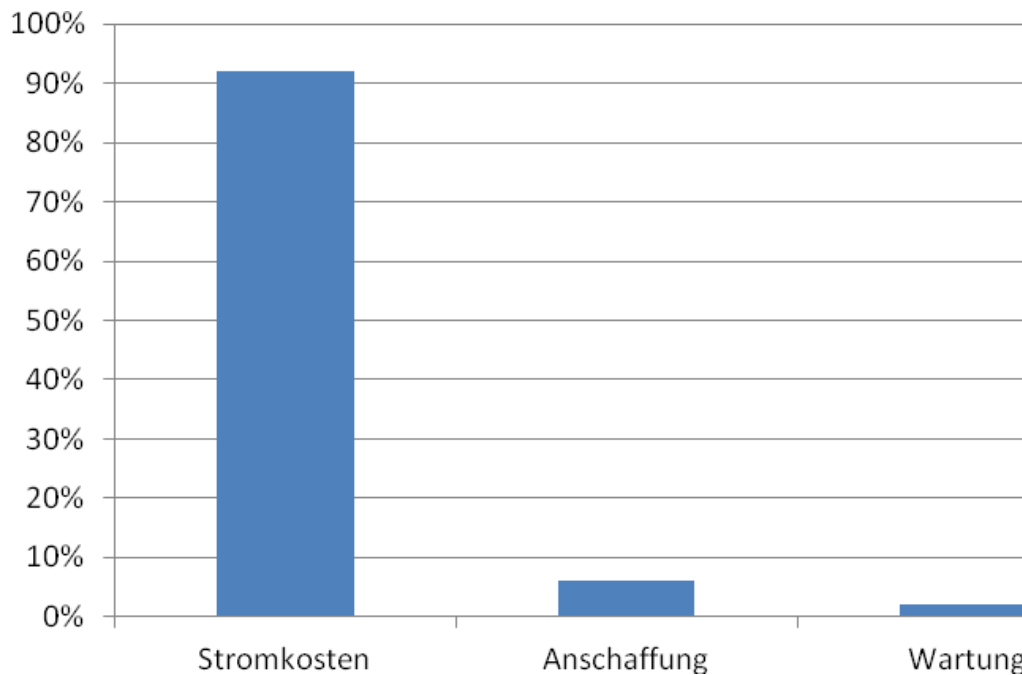


Bild 4: Aufteilung der Gesamtkosten eines 70 kW Extruderantriebes bei einer Laufzeit von 10 Jahren bei Nennlast und einem Wirkungsgrad von 90% [1]

Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist die Energieeffizienz. Aufgrund der steigenden Energiekosten führt eine Verbesserung der Effizienz der Maschinen zu kürzeren Amortisationszeiten. Das Maß für die Effizienz eines Antriebs ist eine messbare Größe, der Wirkungsgrad. Setzt man die vom Netz aufgenommene Leistung zu der von der Welle abgegebenen Leistung ins Verhältnis, erhält man den Wirkungsgrad. Aufgrund der Verluste eines Antriebssystems ist dieser immer kleiner als 1 (< 100%):

$$\eta = P_{\text{Welle}} / P_{\text{Netz}}$$

Die aufgenommene Leistung wird anhand des aufgenommenen Phasenstromes und der Spannung ermittelt. Die abgegebene Leistung ist durch die Drehzahl und das Drehmoment bestimmt.

In diesem Wirkungsgrad sind alle Verluste des Antriebssystems, einschließlich des Umrichters, berücksichtigt, wenn die Messdaten der abgegebenen (Wellen-)Leistung direkt vor der Extruderschnecke aufgenommen werden. Oft jedoch werden die Daten unmittelbar vor und hinter dem Motor erfasst, womit der Wirkungsgrad des Motors allein bestimmbar ist. Um dann aber einen Überblick über den Wirkungsgrad des gesamten Antriebssystems zu bekommen, muss man die Verluste durch den Umrichter, das Getriebe, alle Kühlungsmaßnahmen (meistens sind dazu auch elektrische Antriebe erforderlich) abschätzen und berücksichtigen. Folgendes Diagramm (Bild 5) zeigt die Wirkungsgrade der beschriebenen Motortypen bei 100% Last (Nenn-Drehmoment)

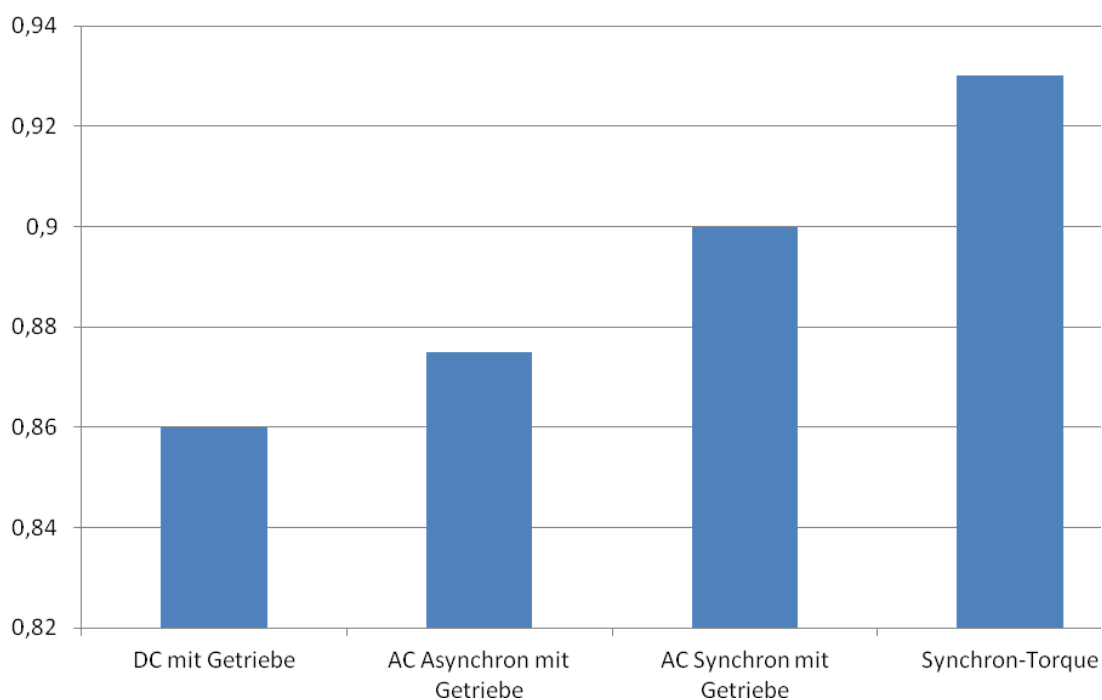


Bild 5: Wirkungsgradvergleich unterschiedlicher 100 kW Antriebe mit Umrichter im Nennbetrieb

Dieser Wert wird in den meisten Datenblättern angegeben. Man findet erhebliche Unterschiede der Motoren hinsichtlich ihrer Energieeffizienz, sowohl im maximal erreichbaren Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt, als auch durch unterschiedliches Wirkungsgradverhalten in Abhängigkeit vom gewählten Betriebspunkt.

Für Antriebe in der Extrudertechnik reicht es daher nicht, nur den Wirkungsgrad im Nennbetrieb zu kennen und zur Entscheidung heranzuziehen, da oft auch der Teillastbereich ausgenutzt wird und daher eine möglichst hohe Effizienz im gesamten Regelbereich benötigt

wird. Bild 6 zeigt deutlich die Grenzen der verglichenen Motortypen. Eine genaue Kenntnis über die Art und Herkunft der im elektrischen Antrieb anfallenden Verluste und deren Abschätzung ermöglicht erst eine fundierte Auswahl des Motors.

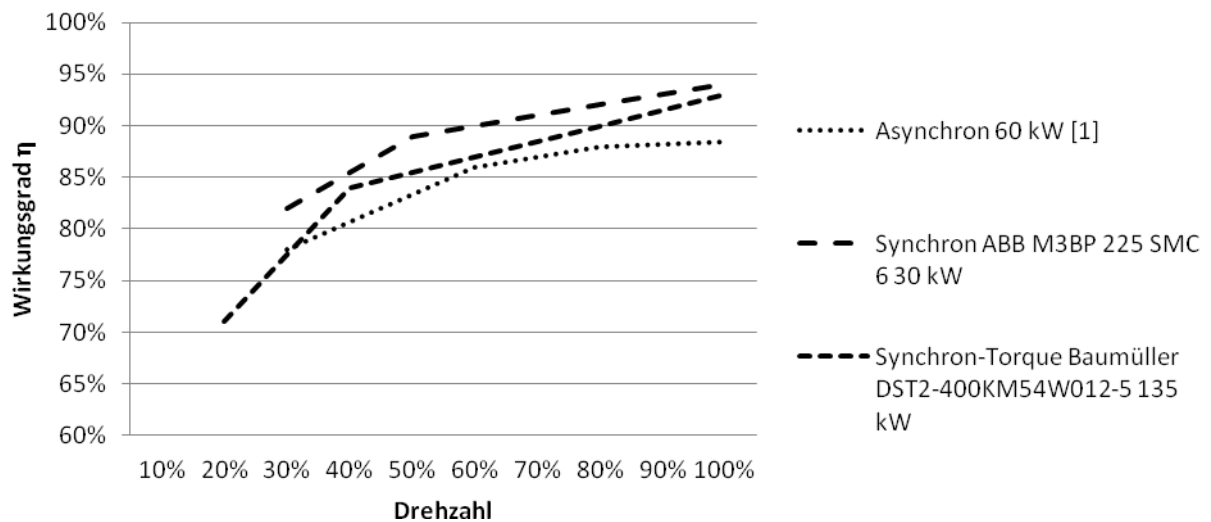


Bild 6: Wirkungsgradvergleich unterschiedlicher Motoren bei unterschiedlichen Drehzahlen

Nur im Nennbetrieb hat der jeweilige Motor seinen höchsten Wirkungsgrad.

Möchte man neben der typischen Extruderanforderung hoher Drehmomente bei niedriger Drehzahl auch Energiekosten senken, so scheint der Synchronmotor hier das bessere Ergebnis zu erzielen, denn er hat auch im Teillastbereich den höchsten Wirkungsgrad. Außerdem zeichnet er sich durch seine Wartungsfreiheit aus.

Allerdings wirken sich Getriebe mit ca. 4%, der oft verwendete Riemen mit ca. 2% und die notwendige Kühlung mit weiteren Verlusten wieder negativ auf die Gesamtbilanz aus.

Der Synchron-Torquemotor ist trotz seines innovativen Konzeptes (Direktantrieb, kein Getriebe mit entsprechenden Verlusten) aufgrund seines schlechten Wirkungsgradverlaufes zusätzlich zum Kühlungsbedarf nicht konkurrenzfähig.

Nur mit dem im folgenden Kapitel vorgestellten Cool-Torquemotor (EMF-Motors, TAE-Antriebstechnik) ist die Gesamtbilanz eines Extruderantriebes noch weiter zu verbessern.

3. Die effizienteste Antriebslösung mit dem Cool-Torquemotor

Wie eingangs erwähnt soll hier nun eine Lösung präsentiert werden, die in bisher unerreichter Weise den technischen wie auch den wirtschaftlichen Anforderungen in der Extruder-Branche gerecht wird.

In der Extruder-Technik benötigt man ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl. Auf Verluste durch Umformung der mechanischen Leistung durch Getriebe oder Riemen soll dabei verzichtet werden. Diese Bedingungen können schon mit einem Synchron-Torquemotor als Direktantrieb umgesetzt werden. Im Nennbetrieb stellt die dabei erreichbare Energiebilanz gegenüber Asynchron- oder Synchronmotor-Getriebe-Kombinationen eine gewisse Verbesserung dar, die allerdings bei weitem noch überschritten werden kann. Darüber hinaus schafft der im folgenden beschriebene Cool-Torquemotor eine vergleichsweise gute Nutzungsmöglichkeit im unteren Teillastbereich von bis zu 20% der Nennlast.

Dieser Motor arbeitet nach dem aus deutscher Entwicklung stammenden, patentierten *LiProKa*-Prinzip (Patent Nr. EP0910154). Sein Stator ist ähnlich aufgebaut wie bei einem herkömmlichen Synchronmotor oder Asynchronmotor. Auch der Rotor ähnelt dem eines Synchronmotors mit wechselseitig aufgeklebten Permanentmagneten aus Neodymium-Bor-Eisen-Legierung. Die Erzeugung des Drehfeldes und dessen Wirkungsweise ist bereits in den vorigen Kapiteln erläutert worden. Der Unterschied liegt in der Anzahl der Magnete auf dem Rotor, die bei diesem Motorprinzip kleiner ist, als die Anzahl der Statorpole. Dadurch ergibt sich der typische Versatz der Rotorpole gegenüber den Statorpolen. Dadurch wird auch mit einer niederpoligen Wicklung ein sehr hohes Drehmoment erzeugt [4].

In Bild 7 ist eine 2-polige Drehstromwicklung im Stator dargestellt. Die Drehfeldrichtung wird mit dem äußeren Pfeil angezeigt. Die resultierende magnetische Hauptflussrichtung liegt immer zwischen den Spulen, die am stärksten vom Strom durchflossen werden. Durch die Magnetisierung der Flussführungselemente (FE) im Stator (Zähne des Stators) haben die Permanentmagnete (FEs des Rotors) das Bestreben, sich im Drehfeld nach dieser Hauptflussrichtung auszurichten. Das gilt gleichermaßen für den vorher bereits beschriebenen Synchronmotor und den Cool-Torquemotor. Verfolgt man jedoch die Drehung der Hauptflussrichtung in Bild 7B um einen Zahn weiter, so fällt auf, dass der nächste im Zugriff stehende Permanentmagnet auf dem Rotor in Drehfeldrichtung versetzt ist und sich demnach um nur einen kleinen Winkelbetrag und – einzigartiger Weise – entgegen der Drehfeldrichtung bewegen muss. Die hohe Zahl der gleichzeitig im Zugriff stehenden Permanentmagnete bewirkt eine enorme Drehmomentsteigerung gegenüber dem Synchronmotor mit dem gleichen Wicklungsaufbau und gleicher Baugröße! Außerdem erhält

man durch den Versatz der Magnete einen besonders ruhigen Rundlauf, da das Ripplemoment weitestgehend aufgehoben ist.

Welche Drehzahl stellt sich nun ein? Maßgeblich ist zunächst auch die Frequenz des Drehfeldes. Außerdem muss man das Verhältnis der Polzahlen von Rotor und Stator berücksichtigen. Wie bei einem Getriebe rechnet man hier auch mit einem Übersetzungsverhältnis i . Die Drehzahl des Rotors berechnet sich zu

$$n = 60 \times f \times [p_R - p_S] / p_R = 60 \times f / i \quad (\text{Einheit 1/min})$$

p_R ist die Polpaarzahl des Rotors und p_S die Polpaarzahl des Stators des Cool-Torquemotors.

Das Übersetzungsverhältnis i ist negativ und beträgt:

$$i = p_R / [p_R - p_S]$$

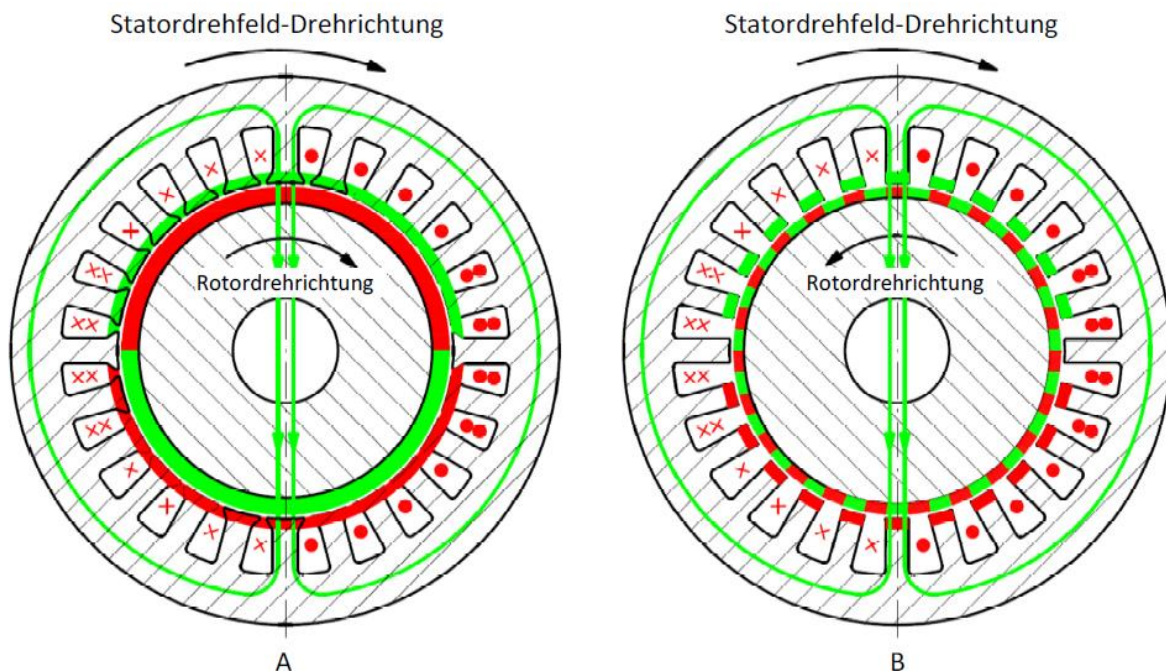


Bild 7: A: Standard-Synchronmotor-Prinzip 2 polige Statorwicklung
 2 Pole im Stator, 2 Pole im Rotor
 Drehfeldgeschwindigkeit im Stator: 3000/min bei 50 Hz
 Rotorgeschwindigkeit ebenfalls 3000/min
 Die Übersetzung ist 1

B: Cool-Torque-Prinzip, 2-polige Statorwicklung
 48 Pole im Stator, 46 Pole im Rotor
 Drehfeldgeschwindigkeit im Stator: 3000/min bei 50 Hz
 Rotorgeschwindigkeit 130,43/min bei 50Hz
 Die Übersetzung ist -23

Die Drehzahl des in Bild 7 skizzierten elektrisch 2-poligen Torquemotors entspricht der einer 46-poligen Maschine! Eine Simulation dieses Motorprinzips ist auf der Homepage der TAE-Antriebstechnik zu betrachten [6].

Bei Belastung der Welle erfolgt, ähnlich dem Synchronmotor, ein zusätzlicher Versatz zwischen den Flussführungselementen des Rotors und des Stators, der nicht größer wird, als die Hälfte ihrer Breite (max. mögl. Drehmoment bis zum Durchrutschen). Dieser Polradwinkel ist wesentlich kleiner als der des Synchronmotors. Dadurch ist eine sehr steife Regelung des Cool-Torquemotors möglich. Bild 8 zeigt das typische Belastungsdiagramm eines Cool-Torquemotors.

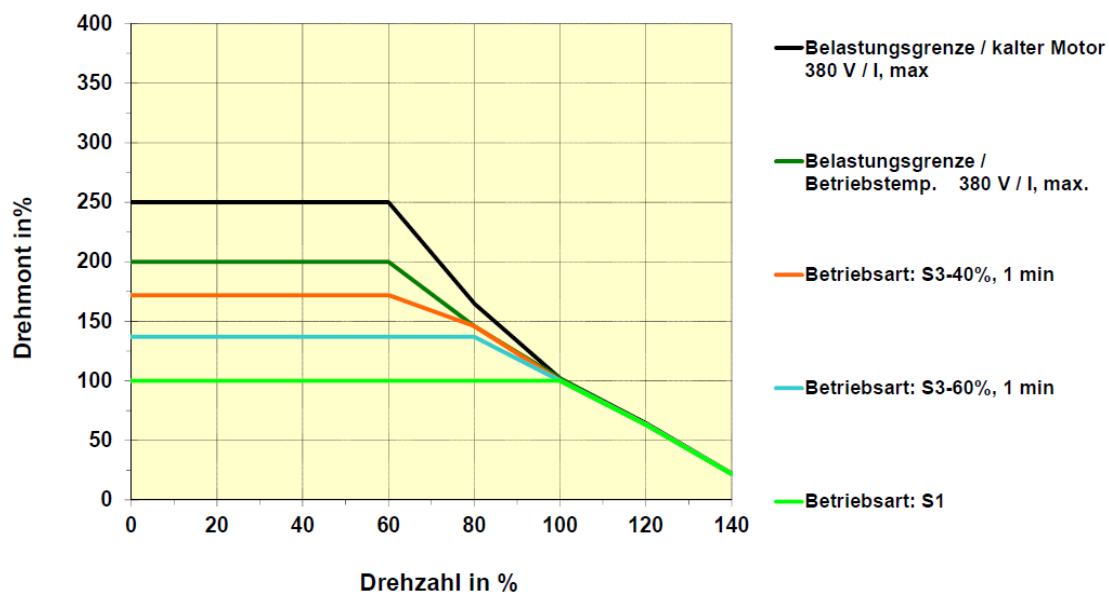


Bild 8: Typisches Belastungsdiagramm eines Cool-Torquemotors

Wegen der niederpoligen Wicklung und ihres niedrigen ohmschen Widerstandes sind die Kupferverluste sehr gering im Vergleich zu den herkömmlichen Torquemotoren. Sie entsprechen in etwa denen des Synchronmotors und liegen im mΩ-Bereich. In der Energiebilanz wirken sich in erster Linie nur noch die Ummagnetisierungsverluste im Statorblechpaket (Hystereseverluste) negativ aus, wodurch ein extrem hoher Wirkungsgrad ermöglicht wird.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Cool-Torquemotoren ist, dass der Wirkungsgrad ab 20% Last und ab 20% der Nenndrehzahl nahezu konstant ist (Bild 9). Die Bereitstellung des hohen Drehmomentes dieses Motors schon bei Stillstand der Welle ermöglicht das Anfahren des Prozesses nach dem Einschalten und Aufwärmen der Maschine, sowie für viele unterschiedliche Prozesspunkte im Dauerbetrieb der Extrusionsmaschine. So ist ein sicheres

und schnelles Hochfahren nach einem geplanten oder ungeplanten Stillstand des Prozesses sogar mit zäher Schmelze möglich.

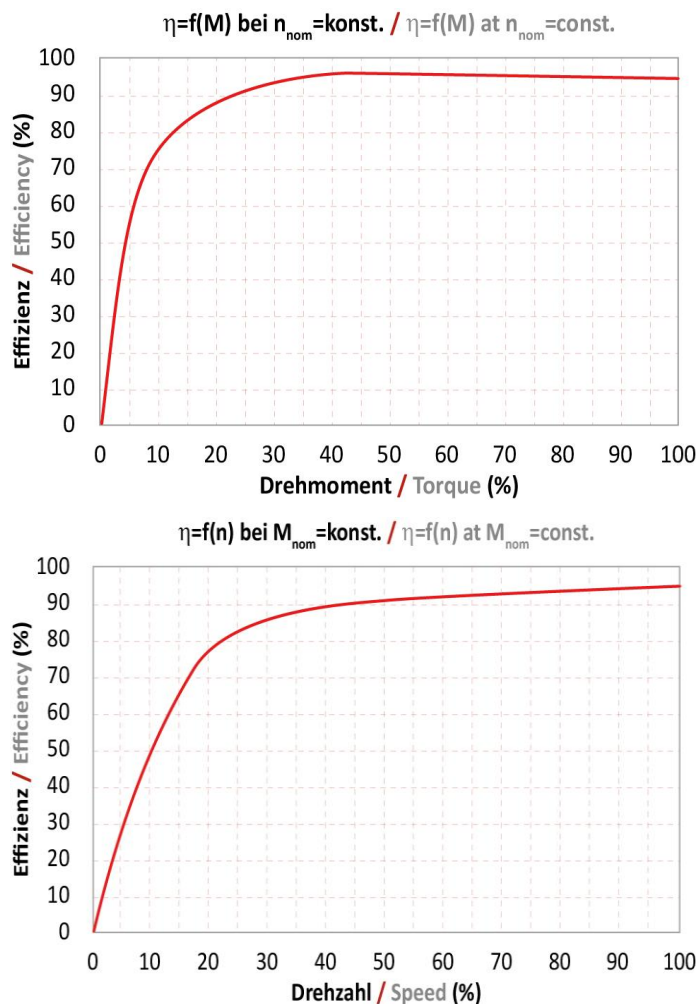


Bild 9: Typischer Wirkungsgradverlauf des Cool-Torquemotors [5]

Im Teillast- bis Nennbetrieb kommen diese Motoren in der Regel ohne Kühlung aus und können daher für den Einsatz in erschwerten Umgebungsbedingungen in der Schutzklasse IP54/55 ausgeführt werden. Die Ergebnisse bezüglich der Höhe des Wirkungsgrades und dem hohen Verhältnis von Drehmoment zu Motorgewicht werden von keinem anderen Motorprinzip auch nur annähernd erreicht.

Vorteile:

- 4 bis 6 polige Wicklung; hohe Polzahl wird durch Magnete bestimmt (44 – 110 Pole)
- Hohlwelle und Drucklagerung möglich
- Sehr steife Regelung möglich

- Gutes Anlaufverhalten (unter Last)
- Hohe Überlastfähigkeit (bis zum 2,5-fachen Nennmoment)
- Hohe Lebensdauer bei Dauerbetrieb
- Sehr kleine Kupferverluste
- Mit Abstand höchster Wirkungsgrad (bis zu 98% möglich)
- Keine Kühlung erforderlich, kein Getriebe erforderlich
- Wartungsfrei, geringe Lebenszykluskosten
- Ab Baugröße 47 mit 44 Polen verfügbar (Wicklung: 4-polig)

Nachteil:

- Vergleichsweise hoher Anschaffungspreis

Eigene Vergleichstests auf unserem Motorprüfstand haben die herausragende Position des Cool-Torquemotors bestätigt.

Das Diagramm in Bild 10 ermöglicht den Vergleich der Wirkungsgradkennlinien der beschriebenen Motoren.

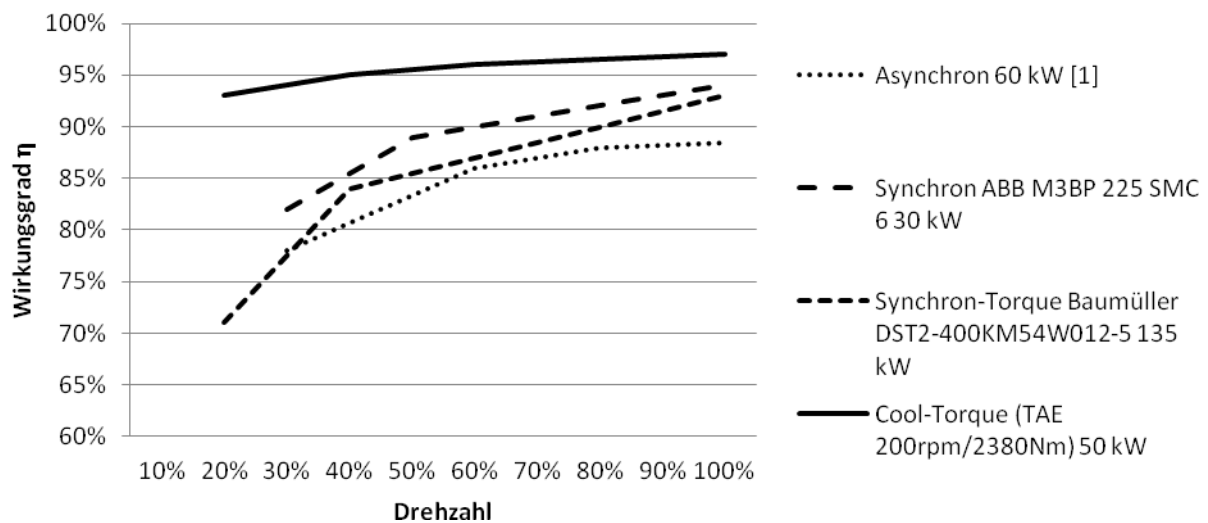


Bild 10: Bild 6 ergänzt um den Wirkungsgradverlauf des Cool-Torquemotors

Vergleich des Energieverbrauchs/Betriebswirtschaftlichkeitsberechnungen:

Berechnungsgrundlagen:

Die übliche Extruderauslastung mit einem 70 kW Antriebssystem ergibt eine Wellenleistung von 49 kW bei 70% der max. Drehzahl und 100% Last.

Ausgehend von einem S1-Betrieb in 24 Stunden am Tag in einer 6-Tage-Woche rechnet man mit ca. 7500 Betriebsstunden im Jahr.

Dieser Vergleich basiert auf einem Antriebssystem jeweils mit einem Umrichter der TAE-Antriebstechnik (U-Drive).

Tabelle 3: Vergleich der Energiekosten

	Cool-Torque-System mit U-Drive	Synchronmotor, Getriebe, Riementrieb und U-Drive	Asynchronmotor, Getriebe, Riementrieb und U-Drive
Gesamtwirkungsgrad in %	96	88	83
Aufgenommene Leistung in kW	51	55,7	59
Energie pro Jahr in kWh	382500	417750	442500
Energiekosten: € 0,10 pro kWh	38.250,00 €	41.775,00 €	44.250,00 €

Schon allein durch die Betrachtung der direkten Kosten ist folgende Ersparnis realisierbar [5]:

- Cool-Torquemotor gegenüber Synchronmotor € 3525,00 / Jahr - Ersparnis in 3 Jahren: 10.575,- €
- Cool-Torquemotor gegenüber Asynchronmotor € 6000,00 / Jahr - Ersparnis in 3 Jahren: 18.000,- €

Sie wird noch größer, bezieht man auch bei der Synchron- und Asynchron-Getriebekombination die Wartungskosten, Ölwechsel und Kühlungsaufwand und deren Wartung mit ein.

4. Zusammenfassung

Ein erheblicher Anteil der in der Extruder-Technik benötigten Energie wird im Antriebsstrang umgesetzt. Aufgrund des stetig steigenden Energiebedarfes und der gleichzeitigen Verknappung der fossilen Energieträger wird die Auswahl des Antriebssystems zu einem zentralen Thema bei der Entwicklung von Extruderanlagen. Die weitläufig bekannten Antriebskonzepte, bestehend aus Asynchron-, Synchronmotor mit Getriebe oder Synchron-Torquemotor ohne Getriebe erreichen ihre besten Wirkungsgrade erst mit Kühlung und nur in einem bestimmten Betriebspunkt. Dagegen übersteigt der zuletzt beschriebene Cool-Torquemotor deren erreichte Wirkungsgrade und ist zudem noch in einem weiten Lastbereich mit hoher Effizienz regelbar. Wie der Name schon ausdrückt, ist dabei keine Kühlung erforderlich. Eine Amortisation des höheren Anschaffungspreises kann bereits in wenigen Jahren erreicht werden.

5. Literaturangaben

- [1] Dipl.-Ing. Gehring,A., Forschungsstelle der SKZ.: Bewertung von Antriebskonzepten für Extrusionsmaschinen aus ökonomischer und ökologischer Sicht. Abschlussbericht. Würzburg 2010.
- [2] Europa Lehrmittel: Fachkunde Elektrotechnik, 28. Auflage 2012
- [3] SEW Antriebstechnik, Praxis der Antriebstechnik Band 1 Ausgabe 06/97
- [4] Patentschrift EP0910154 LiProKa Motor-Principle
- [5] Produktbeschreibung TAE-Antriebstechnik http://www.tae-antriebstechnik.de/fileadmin/user_upload/tae/downloads/Broschueren/Motoren/TAE_W_B_Energiesparen_Torquemotor_DE.pdf
- [6] Produktbeschreibung TAE-Antriebstechnik <http://www.tae-antriebstechnik.de/produkte/cool-torque-motoren/>