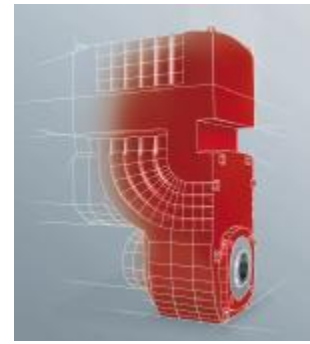


# Energieeffiziente Antriebslösungen – Vom Getriebe bis zum mechatronischen System

Dipl.-Ing. (FH), Claus Wieder, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, 76646 Bruchsal



## Kurzfassung

Knapper werdende Ressourcen, steigende Energiepreise, Klimawandel – weltweit beginnt in den Unternehmen ein Umdenken hin zu energieeffizienter Investitionsplanung. Zentrale Frage ist dabei: Wie lassen sich auch nachträglich Energiesparpotentiale aufdecken und nutzen oder gleich Energiesparlösungen von Beginn an realisieren? Bei diesen Betrachtungen spielen elektrische Antriebe eine nicht unwesentliche Rolle. Ein Großteil dieser Anwendungen, z.B. im Bereich der Fördertechnik, wird über Getriebemotoren umgesetzt. Der klassische Antriebsstrang, bestehend aus Getriebe und Motor, bietet vielfältige Möglichkeiten die auftretenden Verluste zu reduzieren und somit die Energieeffizienz zu erhöhen. Weitere Einsparpotentiale können durch den Einsatz von Antriebselektronik in Form von Frequenzumrichtern erschlossen werden. Die weiteren Innovationsschritte zu energieeffizienten Antriebslösungen führen zur Integration der Elektromechanik (Motor + Getriebe) mit der Elektronik zu einem mechatronischen System.

## 1 Getriebe – Wandler für Drehmoment und Drehzahl

Die Mechanikkomponente Getriebe ist ein zentraler Baustein des Getriebemotors. Über das Getriebe wird die Drehzahl und das Drehmoment auf die Applikationsanforderung angepasst. Dabei unterscheidet man, abhängig von der Richtung des Kraftflusses, zwischen Koaxial- bzw. Parallelwellengetriebe und Winkelgetriebe. Bei Koaxial- und Parallelwellengetrieben liegen die eintreibende und abtreibende Welle in einer Ebene – der Kraftfluss ist geradlinig. Bei Winkelgetrieben stehen eintreibende und abtreibende Welle senkrecht zueinander – der Kraftfluss wird rechtwinklig umgelenkt.

Abhängig vom gewünschten Drehmoment und Übersetzungsbereich kommen verschiedene Konstruktionsprinzipien bei den Getrieben zum Einsatz (s. Bild 1 + 2):

- • Stirnrad-Getriebe
- • Flach-Getriebe
- • Planeten-Getriebe
- • Kegelrad-Getriebe
- • Schneckenrad-Getriebe
- • Spiroplan-Getriebe

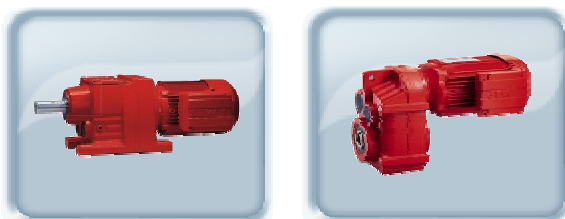


Bild 1 Stirnradgetriebe, Flachgetriebe

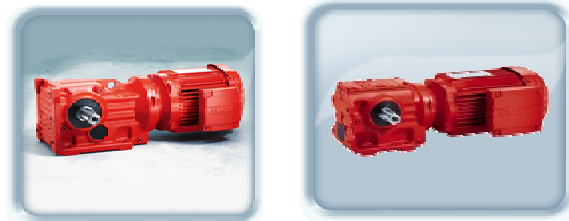


Bild 2 Kegelradgetriebe, Schneckenradgetriebe

Basierend auf den unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien der einzelnen Getriebetypen ergeben sich Wirkungsgrade zwischen 40% bis 98%. Bei dieser Bandbreite der Getriebe-Wirkungsgraden wird ersichtlich, dass bereits bei der Auswahl des Getriebes ein wesentlicher Grundstein zu einer energieeffizienten Antriebslösung gelegt wird.

Die Wirkungsgrade der Getriebe werden durch die folgenden Verluste (s. Bild 3) bestimmt:

- • Verzahnung
- • Wellendichtung
- • Lagerung
- • Schmierung

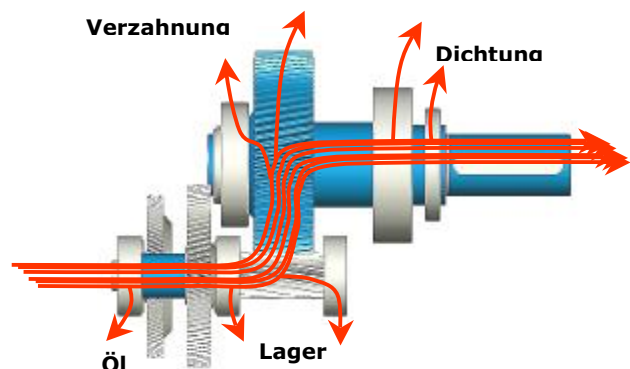


Bild 3 Verluste im Getriebe

Der größte Anteil an den Gesamtverlusten wird durch die Verzahnung der Getriebezahnräder verursacht. Verzahnungskonzepte, welche bei der Kraftübertragung auf Basis der Rollreibung arbeiten, bieten die geringsten Verluste. Bei Stirnrad-Getrieben können somit Wirkungsgrade bis zu 98% erzielt werden. Bei Schneckenrad-Getrieben erfolgt die Kraftübertragung über Gleitreibung, welche erhöhte Verluste mitbringt. Bei diesen Konstruktionsprinzipien werden die auftretenden Verluste sehr stark über die Drehzahl und die Übersetzung beeinflusst. Somit können bei Schneckenrad-Getrieben Wirkungsgrade von 40% bis 93% auftreten.

Weitere verlustbringende Teile in einem Getriebe sind die Lagerung und Abdichtung der Wellen und Zahnräder. Bei der Lagerung werden die Verluste über die Art der Lagerung (Kugellager, Rollenlager o.a.) maßgeblich bestimmt. Bei der Abdichtung der Welle bestimmen ebenfalls Art und Material der Wellendichtringe die Höhe der auftretenden Verluste.

Ein weiterer Verlustanteil wird über die Schmierung der Getriebe verursacht. Einflussgrößen stellen hierbei die Art des verwendeten Schmierstoffes z.B. mineralisches oder synthetisches Öl und auch die Einbaulage dar.

Die aufgezeigte Bandbreite von Wirkungsgraden zwischen 40% bis 98% bei Getrieben belegen, dass bei der Auswahl und Auslegung der Getriebe ein entscheidender Grundstein für eine energieeffiziente Antriebslösung gelegt wird. Neben rein technischen Aspekten sind bei einer Antriebslösung auch die wirtschaftlichen Gesichtspunkte zu beachten und zu bewerten. Höhere Investitionskosten z.B. bei Kegelrad-Getrieben mit synthetischem Öl werden durch die höhere Energieeffizienz während der gesamten Betriebsdauer ausgeglichen.

## 2 Elektromotor – die antreibende Kraft

In der Antriebstechnik verwendet man in der Regel Motoren, die nach dem elektrischen Prinzip des Drehstrom-Asynchronmotors, des synchronen oder asynchronen Servomotors oder Gleichstrommotors arbeiten, um den Getriebemotor zu komplettieren. Bei den genannten Motorprinzipien ist ein deutlicher Trend zu den synchronen und asynchronen Drehstromantrieben zu sehen. Diese Drehstromantriebe zeichnen sich aus durch

- • Einfachen, robusten Aufbau
- • Große Betriebssicherheit
- • Wartungsfreiheit
- • Günstiger Preis

Der einfache und robuste Aufbau der Drehstrommotoren wird durch die Motorteile Rotor, Stator, Rotorwelle, Gehäuse und Lagerschilde gebildet. Das Grundprinzip des Elektromotors als Wandler der elektrischen Energie (Spannung + Strom) zur mechanischen Energie (Drehzahl + Drehmoment) bringt verschiedene Verlustfaktoren mit.

Diese Verluste sind durch die folgenden Einflüsse begründet /s. Bild 4):

- • Reibungsverluste
- • Eisenverluste
- • Widerstandsverluste
- • Zusatzverluste

Der absolute Wert dieser Verluste ist stark von der Motorgröße/-Leistung abhängig. So sind z.B. bei großen Motorleistungen (110 kW) die Widerstandsverluste deutlich höher, als bei kleinen Leistungen (1,1 kW).

Diese Widerstandsverluste in Stator und Rotor stellen einen Hauptanteil dar und bieten somit die besten Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz im Motor. Diese Optimierung des Motorwirkungsgrades wird verstärkt durch gesetzliche Regularien und Richtlinien vorgegeben. Dadurch sind verschiedene Wirkungsgradklassen für Drehstrom-Asynchronmotoren festgelegt und normativ verankert. Diese Wirkungsgradklassen sind in Europa über die Kennzeichnung eff1, eff2 und eff3 abgebildet, wobei eff1 den höchsten Wirkungsgrad bietet. Neben diesen Wirkungsgradklassen werden für noch höhere Anforderungen die high-efficiency bzw. premium efficiency Motoren angeboten. Der Wirkungsgrad der Drehstrommotoren ist stark von der Motorleistung abhängig. Bei kleinen Motorleistungen (1,1 kW) können über die verschiedenen eff-Klassen Wirkungsgrade von 73% bis 83% erreicht werden. Im oberen Leistungsbereich (110 kW) sind Wirkungsgrade zwischen 94% bis 97% umsetzbar.

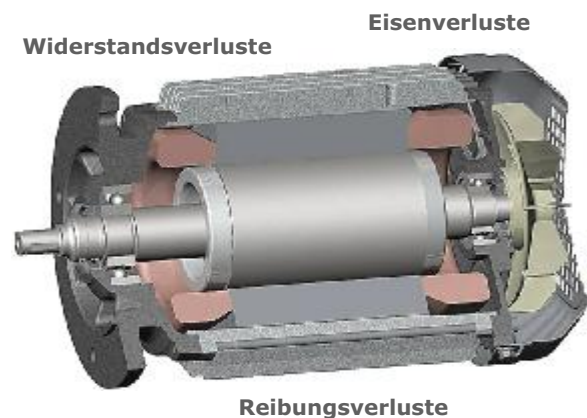


Bild 4 Verluste im Drehstrom-Asynchron-Motor

Der Nutzen dieser erhöhten Wirkungsgrade ist aber nur bei einem Dauerbetrieb (S1-Betrieb) im vollen Umfang nutzbar. Bei Antrieben im Taktbetrieb ist der energetische Einspareffekt deutlich niedriger.

Die Reduzierung der Verluste im Motor zur Steigerung des Wirkungsgrades kann über verschiedene Wege umgesetzt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass mehr Eisen und Kupfer in den Motor eingebracht wird und somit die Verluste reduziert werden. Bezogen auf eine gleiche Abgabeleistung wird bei diesem Weg der Energiespar-Motor in seinen Abmessungen größer, als ein vergleichbarer Standard-Motor.

Die gleiche Reduzierung der Motorverluste kann auch darüber erreicht werden, indem man das verwendete Rotor-

material (• Aluminium) gegen einen Kupfer-Rotor austauscht. Der bessere Leitwert von Kupfer bringt die Reduzierung der Widerstandsverluste im Rotor, bei gleicher Baugröße wie ein Standard-Motor (s. Bild 5).



Bild 5 Energiespar-Motor mit Kupfer-Rotor

Beide Wege werden heute zur Herstellung der Energiespar-Motoren angewendet. Durch den erhöhten Materialeinsatz bei Energiespar-Motoren liegen die Kosten ca. 15-20% über den Standard-Motoren. Aber auch hier zeigen Vergleichsrechnungen auf, dass die Mehrkosten bei der Investition sich innerhalb einer Betriebsdauer von < 2 Jahren amortisieren.

Neben dem bewährten Prinzip des Drehstrom-Asynchronmotors bieten jedoch auch die folgenden Elektromotor-Prinzipien energieeffiziente Eigenschaften:

- • Drehstrom-Synchronmotor
- • Linear-Motoren
- • LSPM-Motoren

Beim Drehstrom-Synchronmotor, oft auch als Servomotor bezeichnet, werden die Verluste im Rotor durch den Einsatz von Permanent-Magneten deutlich reduziert. Durch weitere konstruktive Maßnahmen kann beim Synchronmotor ein Wirkungsgrad von > 90% erzielt werden. Für den Betrieb dieser Motoren ist eine Elektronik (Servo-Umrichter) erforderlich.

Bei Linearmotoren können von der elektrischen Seite ähnliche Wirkungsgrade wie bei den Synchronmotoren erreicht werden. Der Hauptvorteil dieser Motortechnologie liegt jedoch darin, dass keine mechanischen Umzeugs-einrichtungen (• Verluste) erforderlich sind, welche eine rotatorische Bewegung in eine lineare Bewegung umsetzen.

Die LSPM-Motoren (Line Start Permanent Magnet Motor) stellen eine Kombination zwischen den Drehstrom-Asynchronmotor und dem Synchronmotor dar. Bei diesem Prinzip werden in einen Asynchron-Rotor (Käfigläufer) zusätzliche Permanentmagnete eingebracht, um die Verluste im Rotor zu reduzieren. Durch diese Maßnahme wird der Wirkungsgrad im Vergleich zum Asynchronmotor

erhöht und der direkte Betrieb am Netz ohne Unrichter-elektronik ermöglicht.

Die Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Drehstrom-motoren wurden in den letzten Jahren am breitesten kommuniziert und auch diskutiert. Die Festlegung (Normung) der Wirkungsgradklassen (eff1 - eff3) bildeten auch die Grundlage, dass regionale Gesetze den Einsatz von Energiespar-Motoren vorschreiben. Dabei ist zu erwähnen, dass bereits seit mehreren Jahren solche Gesetze in USA, Brasilien und Australien existieren. Bedingt durch die begrenzte Verfügbarkeit der Energiequellen und die fortschreitenden Umweltprobleme, wird zunehmend der Einsatz von energieeffizienten Antrieben über gesetzliche Regelungen vorgeschrieben.

### 3 Frequenzumrichter – Drehzahl-Verstellung und Flexibilität

Als weitere Komponente bei Antriebslösungen haben Frequenzumrichter einen wichtigen Platz eingenommen. Über diese Antriebselektronik (Frequenzumrichter, Servoumrichter) können in Verbindung mit Getriebe- und Elektromotor drehzahlveränderbare Antriebslösungen realisiert werden.

Prinzipiell erfolgt beim Frequenzumrichter eine variable Umsetzung der Eingangsfrequenz (Netzfrequenz 50/60Hz) zu einer einstellbaren Ausgangsfrequenz (z.B. 0-400 Hz). Über diese Frequenzvorgabe wird die Drehzahl des Motors gesteuert und über die Vorgabe des Motorstromes kann das Drehmoment eingestellt werden.

Unter dem Gesichtspunkt der Energieeinsparung bei Antrieben bringt zunächst der Einsatz eines Frequenzumrichters keine Vorteile. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Komponente mit entsprechenden Verlusten (Wärme-, Zusatzverluste u.a.) würde sich bei einer ersten Betrachtung der Gesamtwirkungsgrad verringern.

Die Vorteile der Frequenzumrichtertechnik liegen in der Möglichkeit, den Motor während der Betriebsphase entsprechend den auftretenden Applikations-Bedingungen einzustellen. Durch die Verringerung von Frequenz und Motorstrom über den Frequenzumrichter werden die Verluste im Motor reduziert und somit ein positiver Beitrag zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades erzielt.

Moderne Frequenzumrichter bieten auch die Fähigkeit über spezielle Gerätefunktionen, wie Energiesparfunktionen, Lüfterkennlinien u.a., den Motor in einen optimalen Betriebspunkt zu steuern und somit die Motorverluste weiter zu reduzieren.

Über die Frequenzumrichtertechnologie ist es auch möglich, auftretende generatorische Energie vom Motor (z.B. bei Hubwerken) nicht nur über einen Bremswiderstand zu verheizen, sondern diese Energie in das einspeisende Netz zurückzuführen. Neben diesem Prinzip der Netzrückspeisung mit Frequenzumrichtern werden zur Zeit auch technische Möglichkeiten der Energiespeicherung z.B. über Kondensatormodule untersucht bzw. bereits angewendet.

Ein weiterer Vorteil der Antriebselektronik liegt darin, dass diese elektronischen Geräte in intelligente Automati-

sierungslösungen einbezogen und integriert werden können.

Diese Vorteile können zwar sehr schlecht in einem verbesserten Gesamtwirkungsgrad erfasst werden, unterstützen jedoch die Feststellung, dass eines der größten Energieeinsparpotentiale in der Prozessauslegung bzw. -optimierung liegt.

## 4 Mechatronik – Innovation und Optimierung der Antriebslösungen

Die klassischen Komponenten (Getriebe, Motor, Antriebs-elektronik) für Antriebslösungen, sowie die Möglichkeiten einer optimierten Prozess-/Anlagengestaltung bieten ausreichende Stellgrößen um eine Verbesserung der Energiebilanz zu erzielen. Geänderte Technologien und Technologietrends bieten aber auch weiterhin ein Innovationspotential für energieeffiziente Antriebssysteme.

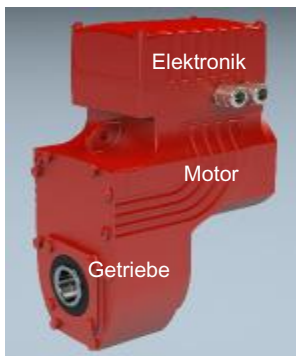


Bild 6 Mechatrisches Antriebssystem MOVIGEAR

Eine einfache, aber auch konsequente Lösung ist die Zusammenführung der Komponenten Motor, Getriebe und Elektronik zu einem mechatrischen Antriebssystem (s. Bild 6). Die Integration und Optimierung energieeffizienter Einzelkomponenten wie Flachgetriebe, Synchronmotor und intelligente Antriebs-elektronik zu einem mechatrischen System ergibt einen vollkommen neuen Lösungsansatz in der Antriebstechnik.

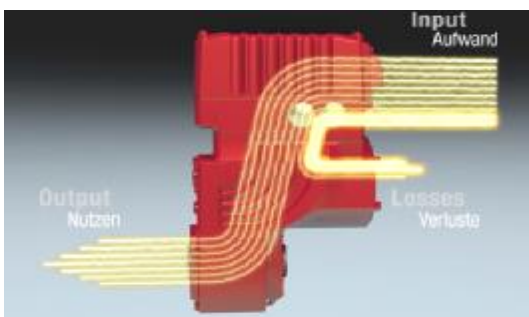


Bild 7 Verluste

Der Gesamtwirkungsgrad eines solchen Antriebssystems liegt in Abhängigkeit der Vergleichskomponente und des vorliegenden Betriebspunktes um 10-25% höher als her-

kömmliche Antriebslösungen. Bei konkreten Applikationen ergeben sich über diese Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades Kosteneinsparpotential von 15-20% im Vergleich zu konventionellen Installationen. (s. Bild 7)

Neben den positiven Auswirkungen auf die Energieeffizienz, bietet eine solche mechatronische Lösung noch folgende Vorteile:

- Dezentrale Steuerungs- und Installationskonzepte
- Kompakte Bauformen, Abmessungen
- Variantenreduzierung
- Verbessertes Anlauf-/Überlastverhalten
- Geräuschoptimierung durch lüfterlosen Betrieb
- Oberflächengestaltung für Hygienic und erhöhter Schutzart (IP69K)
- Erweiterte Diagnose für Mechanik und Elektronik

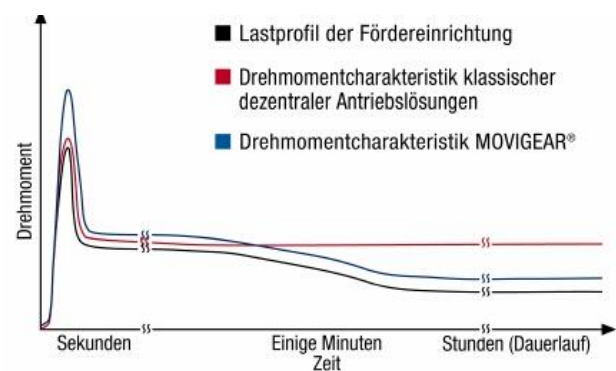


Bild 8 Lastprofile bei Fördereinrichtungen

Ein wesentlicher Anteil zur Energieeinsparung bei dem mechatrischen System MOVIGEAR bringt der eingesetzte Synchronmotor. Neben den deutlich reduzierten Verlusten, stellt der Synchronmotor auch ein erhöhtes Überlastmoment zur Verfügung. Dieses Verhalten beim Anlauf mit einem erhöhten Drehmoment (• Losbrechmoment bei Fördereinrichtungen, s. Bild 8) erlaubt es bei der Projektierung auf eine Überdimensionierung zu verzichten. Somit kann bereits bei der Antriebsauslegung auf eine kleinere Leistungsstufe projektiert werden.

Mechatronische Systeme wie MOVIGEAR erlauben bereits heute die Realisierung von energieeffizienten Antriebslösungen und bieten die Basis für weitere Innovationen in der Antriebstechnik.

## 5 Literatur

[1] SEW-Eurodrive: Getriebemotoren, Die Bibliothek der Technik Band 87, 2001