Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 108 (1990)

Heft: 38

Artikel: Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad: Auslegung, wirtschaftliche Aspekte und Entwicklungstendenzen

Autor: Berg, Fritz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77508

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad

Auslegung, wirtschaftliche Aspekte und Entwicklungstendenzen

Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad leisten einen Beitrag für den effizienten Umgang mit elektrischer Energie und senken damit die Stromkosten des Anwenders, besonders bei langen Betriebszeiten. Im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten konzentriert man sich in Europa vorwiegend auf eine Verbesserung der Standardausführungen. Darüber hinaus besteht für spezielle Applikationen eine Alternative in Form von Sonder-Reihen mit Höchstwirkungsgraden auf der Basis von permanent erregten Synchronmotoren.

VON FRITZ BERG, DIETIKON

Der überwiegende Teil aller eingesetzten Elektroantriebe besteht aus Drehstrom-Asynchron-Motoren. Nach einer Studie des amerikanischen Department of Energy wird mehr als die Hälfte sämtlicher für Elektroantriebe benötigten Energie von Motoren im Leistungsbereich von 4 bis 110 kW verbraucht. Dieses Motorsegment bietet somit das grösste Potential, über den Einsatz geeigneter Motoren Energie zu sparen.

Vor dem Hintergrund des arabischen Ölembargos der siebziger Jahre und einem wachsenden Energiebewusstsein wurde speziell in den Vereinigten Staaten, aber auch in Europa, mit der Entwicklung energiesparender Motoren, also von Antrieben mit hohem Wirkungsgrad, begonnen.

Als Folge dieser Aktivitäten sind seit einiger Zeit neben Motoren der normalen Reihe mit verbesserten Wirkungsgraden alternative Ausführungen mit nochmals erhöhtem Wirkungsgrad verfügbar. Der nachfolgende Beitrag befasst sich mit der Auslegung energiesparender Motoren, geht auf wirtschaftliche Aspekte ein und zeigt auf, nach welchen Gesichtspunkten diese Motoren ausgewählt werden.

Auslegung energiesparender Motoren

Der Elektromotor, speziell in der Ausführung als Drehstrom-Asynchron-Motor mit Käfiganker, ist hinsichtlich Aufbau und Funktionssicherheit ein sehr einfacher und robuster Antrieb, der sich grundsätzlich durch hohen Wirkungsgrad auszeichnet und sich darin von den meisten anderen Antrieben positiv abhebt.

Bei der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie entstehen Verluste, welche in Form von Wärme verlorengehen. Bei einem Induktionsmotor unterscheidet man dabei fünf Verlustkomponenten:

- Verluste im Statorkreis, verursacht durch den fliessenden Strom und den ohmschen Widerständen der Wicklung, ausgedrückt durch $J_1^2 \times R_1$
- Ummagnetisierungsverluste im Stator- und Rotorblechpaket
- Verluste im Rotorkreis, verursacht durch den fliessenden Rotorstrom und den ohmschen Widerstand der Rotorwicklung, ausgedrückt durch $J_2^2 \times R_2$
- Reibungs- und Ventilationsverluste
- Streuverluste.

Das Energieflussdiagramm eines Elektromotors (Bild 1) fasst die bei dem Umwandlungsprozess von elektrischer in mechanische Energie auftretenden Verluste grafisch zusammen.

Alle Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Motors zielen auf eine Reduktion dieser Verluste ab:

□ Die ohmschen Verluste im Statorkreis, hervorgerufen durch den fliessenden Strom und den durch die Statorwicklung gegebenen Widerstand, können durch eine Reduktion des Widerstandes selbst vermindert werden.

Da heute nahezu alle Normmotoren mit Kupferwicklung ausgeführt werden und da ein Übergang auf Leiterwerkstoffe mit höherer Leitfähigkeit praktisch nicht möglich ist, konzentriert man sich auf eine Verringerung des Statorwiderstandes durch die Erhöhung der Leiterquerschnitte, also durch den Einbau von mehr Kupfer.

□ Die Ummagnetisierungsverluste entstehen zum überwiegenden Teil durch den Effekt von Hysterese- und Wirbelstromverlusten im Statorblechpaket. Diese Verluste sind eine Folge des Statorfeldes, welches mit der Netzfrequenz oszilliert. Die Ummagnetisierungsverluste oder sogenannten Eisenverluste hängen von der Dichte des magnetischen Flusses im Eisen ab. Eine Reduktion der Eisenverluste ist also über eine Absenkung des magnetischen Flusses möglich, was praktisch durch eine Verlängerung des Blechpaketes erreicht wird. Energiesparende Motoren weisen also in der Regel mehr Kupfer und Eisen als Standardmotoren gleicher Leistung auf. Eine weitere und zunehmend genutzte Möglichkeit zur Beeinflussung der Ummagnetisierungsverluste besteht darin, die Dicke der einzelnen Bleche zu reduzieren und hochwertiges Magnetblech mit kleiner Verlustziffer einzusetzen.

□ Die dritte Verlustkomponente betrifft die Rotorverluste $J_2^2 \times R_2$. Eine Reduktion dieser Rotorverluste durch die Verringerung des Widerstandes der Rotorwicklung über eine Erhöhung der Leiterquerschnitte oder die Wahl eines anderen Leitermaterials mit höherer Leitfähigkeit ist bei Asynchronmotoren ohne massive Beeinflussung der Drehmomentcharakteristik und damit des Betriebsverhaltens des Motors nicht möglich. Dies wird verständlich, wenn man sich vor Augen führt, dass das Anzugsmoment des Motors von der Höhe des Sekundärwiderstandes abhängt. Deshalb wird ein Eingriff in den Rotorkreis immer die zuletzt gewählte Massnahme zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Motors sein.

□ Die vierte Verlustkomponente, d.h. die Reibungs- und Ventilationsverluste, hängen von der Drehzahl des Motors ab. Der Hauptteil dieser Verluste rührt vom Motorlüfter her, weshalb bei energiesparenden Motoren Sonderlösungen gewählt werden, welche darauf abzielen, die erforderliche Kühlluftmenge mit einem Minimum an Lüfterleistung sicherzustellen. Der Lagerreibung begegnet man durch verfeinerte Lagerausführungen und Wahl geeigneter Schmierfette. Ein erfreulicher Nebenaspekt ist die damit verbundene Reduktion des Geräuschniveaus des Motors.

□ Die fünfte Verlustkomponente betrifft die sogenannten Streuverluste des Motors. Die Streuverluste eines Motors, definiert als Differenz der Gesamtverluste minus der vier zuvor behandelten Verlustkomponenten, sind am schwierigsten zu beherrschen und hängen zudem von verschiedenen Faktoren ab. Die Eingrenzung der Streuverluste muss durch eine Kombination verschiedener Massnahmen und einen

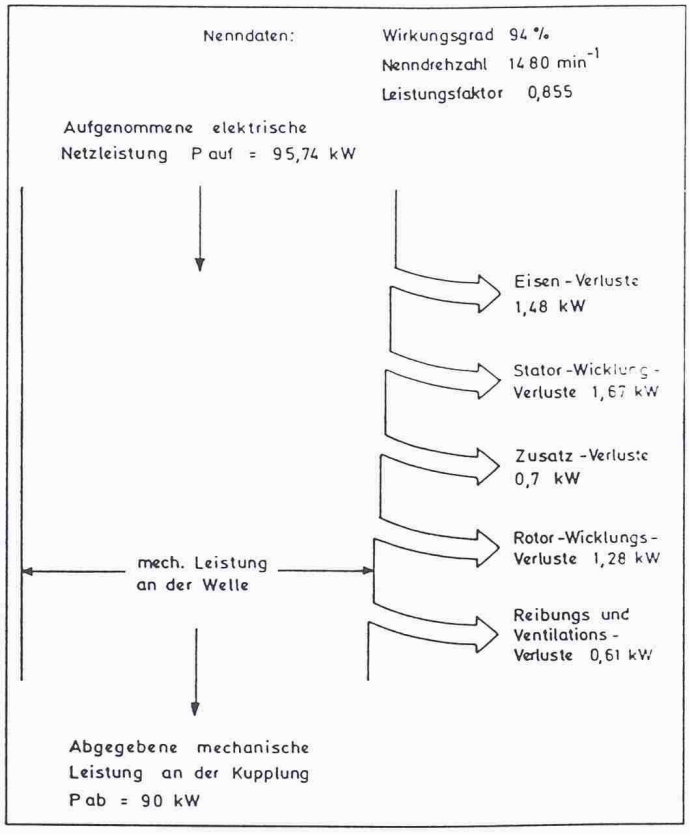

Bild 1. «Leistungsfluss» eines 90-kW-Standardmotors in 4poliger Ausführung

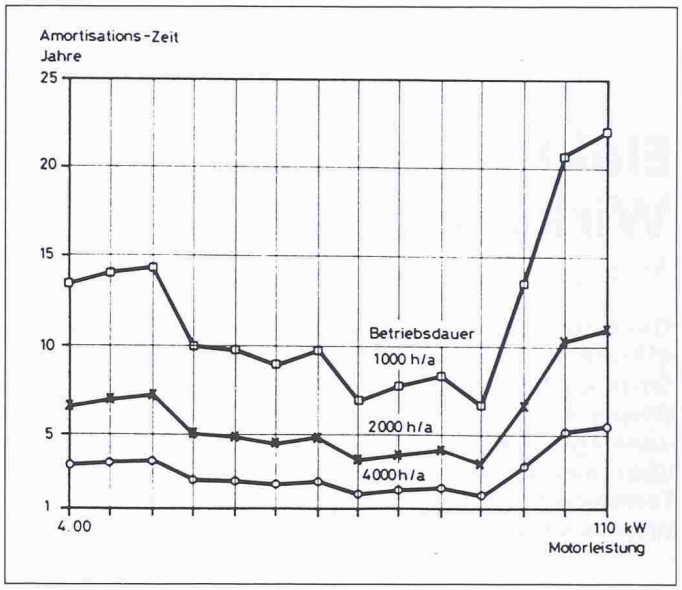

Bild 3. Amortisationszeit bei Motoren verschiedener Leistungsgrössen in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Betriebsdauer pro Jahr

sehr sorgfältigen Fabrikationsprozess gesichert werden. Da die Streuverluste einen wesentlichen Teil der Gesamtverluste ausmachen, ist eine Reduktion dieser Verlustkomponente von Wichtigkeit. Um einen praktischen Eindruck über die Verlustbilanz eines Motors in Normal- und energiesparender Ausführung zu geben, zeigt Tabelle 1 am Beispiel zweier 4poliger Asynchron-Motoren mit 37 kW Wellenleistung die entsprechende Aufteilung der Verluste.

Bei den einleitend erwähnten Höchstwirkungsgrad-Motoren auf der Basis von Synchron-Motoren mit Permanent-Magneten besteht ein zusätzliches Potential zur Einsparung elektrischer Energie. Die erzielbaren Verbesserungen beruhen darauf, dass für den Aufbau und den Unterhalt des magnetischen Feldes dem speisenden Netz praktisch keine «Blindenergie» mehr entnommen werden muss, sondern dem Motor durch eingebaute Magnete zur Verfügung steht.

Durch die Entwicklung und Konfektionierung neuer Magnet-Werkstoffe wie z.B. Samarium-Kobalt- oder Eisen-Bor-Verbindungen in Kombination mit neuen Fertigungs-Technologien erschliessen sich hier für die Zukunft grosse Möglichkeiten. Zum Vergleich haben wir die entsprechende Verlustbilanz in die Tabelle 1 mit eingetragen.

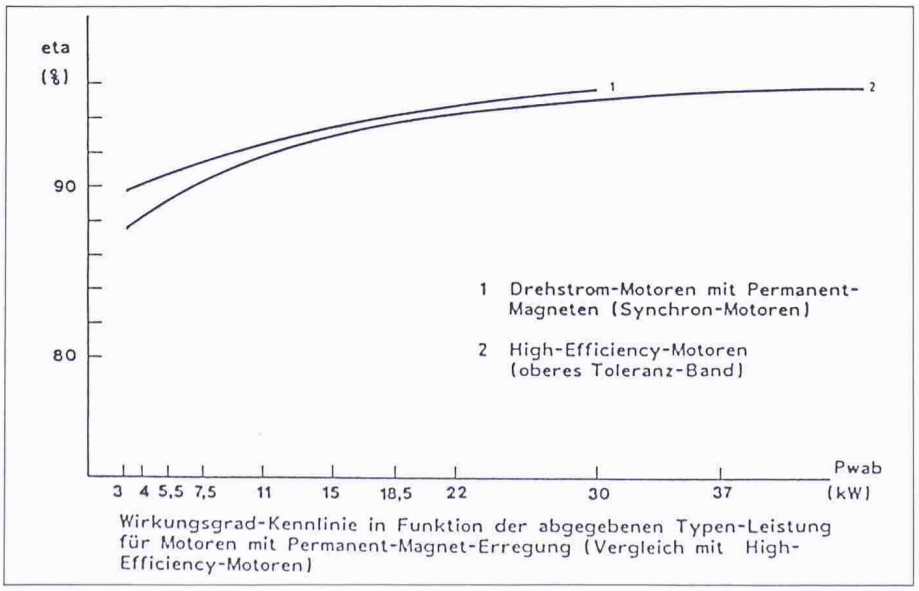

Bild 2. Wirkungsgrad-Kennlinien

Wirtschaftliche Aspekte

Aus diesen Ausführungen ist ersichtlich, dass eine Verbesserung des Wirkungsgrades und damit eine Reduktion der bei der Umformung von elektrischer in mechanische Energie entstehenden Verluste immer mit einem Mehraufwand auf der Materialseite und damit mit höheren Investitionskosten verbunden ist.

Die Entscheidung, ob für einen gegebenen Antriebsfall ein normaler Motor eingesetzt werden soll oder ob einem Motor mit erhöhtem Wirkungsgrad der Vorzug zu geben ist, fällt also in der Regel nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Wichtige Elemente zur Beurteilung der Situation leiten sich dabei aus folgenden Kriterien ab:

- Realisierbare Energieeinsparung durch die Wahl des geeigneten Motors
- Finanzieller Aufwand hinsichtlich Mehrinvestitionen
- Effektiver Leistungsbedarf
- Energiekosten
- Tatsächliche Betriebsdauer des Motors.

Die mit einem energiesparenden Motor gegenüber einem Normalmotor einzusparende Energie ist aus dem Vergleich der beiden Motor-Wirkungsgrade nach folgender Beziehung gegeben.

$$(1) \quad E_s = P_{ab} \left(\frac{1}{\eta_N} - \frac{1}{\eta_E} \right)$$

E_s Energieeinsparung in kW
P_{ab} Abgegebene Motorwellenleistung in kW
η_N Wirkungsgrad des Normalmotors als Dezimalwert
η_E Wirkungsgrad des energiesparenden Motors als Dezimalwert

Die Energieeinsparung E_s in kW kann auch in Energiekosteneinsparungen angegeben werden, wenn die Betriebsdauer pro Jahr und die Energiekosten pro kWh Energieverbrauch bekannt sind. Folgende Beziehung stellt den Zusammenhang dieser Grössen her:

(2) $S = E_s \times H \times K$

S Energiekosteneinsparungen, z.B. in Franken
E_s Energieeinsparung in kW gemäss vorstehender Gleichung
H Betriebszeit in Stunden pro Jahr
K Energiekosten pro kWh, z.B. in Franken

Mit den bekannten Mehrkosten eines Motors in energiesparender Ausführung gegenüber einem Normalmotor kann die Zeitdauer, nach welcher sich die höheren Anfangsinvestitionen eines derartigen Antriebes amortisiert haben, berechnet werden.

(3) $AZ = DK / S$

AZ Amortisationszeit, z.B. in Jahren
DK Kostendifferenz zwischen energiesparendem Motor und Normal-Motor (Mehrkosten)
S Energiekosteneinsparung, z.B. in Franken aus vorheriger Gleichung

Bei dieser vereinfachten Berechnung wird der Einfluss der Kapitalkosten für die höhere Anfangsinvestition ausser acht gelassen.

Das in Bild 3 dargestellte Diagramm lässt unter Beachtung gewisser Parameter wie Betriebszeit pro Jahr und Motorgrösse bzw. Leistungsbedarf klare Aussagen darüber zu, ob sich der Einsatz energiesparender Motoren für einen gegebenen Antriebsfall lohnt.

Auswahl und Einsatz energiesparender Motoren

Im Hinblick auf Energieverbrauch und Energiekosten besteht grundsätzlich die Tendenz, Antriebe einzusetzen, welche einen möglichst hohen Anteil der zugeführten elektrischen Energie in mechanische Leistung umsetzen. Wie aus den zuvor angestellten wirtschaftlichen Betrachtungen hervorgeht, ist der Einsatz energiesparender Motoren überall dort sinnvoll, wo längere Zeit im Dauerbetrieb mit Nennlast gefahren wird und wo hohe Kosten für die Energie aufzuwenden sind. Die erzielbaren Energieeinsparungen sind dabei um so grösser, je höher die Leistungsabgaben der eingesetzten Motoren sind. Für die Wahl geeigneter Antriebslösungen ist also eine genaue Kenntnis der auftretenden Betriebsverhältnisse unerlässlich.

	Normalmotor 37 kW eta = 90,4% Verluste (kW)	Energiesparender Motor 37 kW eta = 94% Verluste (kW)		Synchron-Motor 37 kW eta = 95,7% Verluste (kW)
Stator-Wicklungsverluste $I_1^2 \times R_1$	1,319	0,911		0,840
Eisenverluste	0,725	0,18		0,28
Rotor-Wicklungsverluste $I_1^2 \times R_1$	0,646	0,668		-
Reibungs- und Ventilationsverluste	0,373	0,281		0,23
Streuverluste	0,852	0,229		0,23
Totalverluste	3,915	2,339		1,630

Tabelle 1. Typische Verluste eines 4poligen Motors, 37 kW

Im allgemeinen sind jedoch auch mit normalen Motoren Energieeinsparungen möglich, falls diese Motoren richtig dimensioniert und sinnvoll eingesetzt werden. Grundsätzlich gilt dabei, dass sich der Einsatz leistungsmässig überdimensionierter Motoren unter dem Aspekt des geringstmöglichen Energieverbrauches ungünstig auswirkt. Dies ist eine Folge des Wirkungsgradverlaufes eines Elektromotors in Funktion von der abgegebenen Wellenleistung: Maximalwerte des Wirkungsgrades werden im Bereich zwischen halber Nennleistung und Nennleistung erreicht, bei Betrieb des Motors im Teillastbereich unterhalb der halben Nennleistung sinkt der Wirkungsgrad stark ab.

Bei Antrieben, welche auf Grund eines Produktions-Prozesses mit wechselnder Belastung arbeiten, ist darauf zu achten, dass der Wirkungsgrad der Motoren nicht nur bei Nennlast ein Optimum erreicht, sondern auch bei Teillast ein höheres Niveau aufweist.

Diese Forderungen sind bei neueren Motor-Entwicklungen dadurch berücksichtigt worden, dass die erzielbaren Höchstwirkungsgrade bei Nennlast zu Gunsten eines optimalen Wirkungsgrad-Verlaufes im Teillast-Bereich geopfert worden sind.

Eine weitere Möglichkeit, Energie und damit Betriebskosten zu sparen, besteht auch in der Verwendung drehzahlvariabler Antriebe. Von dieser Lösung macht man mit Vorteil bei Einsatzfällen Gebrauch, wo vom Arbeitsprozess her nicht ständig die volle Drehzahl und damit Antriebsleistung benötigt wird. Ein typisches Beispiel sind Antriebe zur Volumenstrom-Förderung (Lüfter, Pumpen).

Im Vergleich zu klassischen Regelungen mit mechanischer Drosselung oder Bypass-Regelung des Volumenstromes lassen sich durch den Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben je nach Regelbereich Energie-Einsparungen bis zu 70% erzielen.

Schlussbetrachtung

Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad leisten mehr als nur einen Beitrag zur Lösung unserer Energieprobleme. Richtig eingesetzt, sorgen energiesparende Motoren für niedere Stromkosten des Anwenders.

Nachdem die Entwicklung elektrischer Motoren in der Vergangenheit hauptsächlich von den Gesetzen der rationellen Massenfabrikation und der Materialkostenseite bestimmt wurde, ist seit einiger Zeit ein deutlicher Trend zu Antriebsmotoren mit höheren Wirkungsgraden spürbar. Im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten, wo neben der Standardreihe normaler Motoren eine Parallelreihe energiesparender Motoren entwickelt wurde, bestand in Europa eher die Grundtendenz, die Wirkungsgrade der Standardreihe durch entsprechende Modifikationen und mehr Einsatz an Material zu verbessern.

Neueste Entwicklungen, die auch vor dem Hintergrund ökologischer Forderungen erfolgt sind, bestätigen diesen Trend. Die aktuelle Norm-Motoren-Reihe der Serie QU-K von ABB Motors wird dem Anspruch nach energiesparenden Antrieben gerecht, sei es nun mit variabler Drehzahl in Verbindung mit Frequenzumrichtern oder als Einzelkomponenten mit fester Drehzahl.

Die als Sonderausführungen zusätzlich erhältlichen Synchron-Motoren mit nochmals verbesserten Wirkungsgraden bleiben somit Spezialanwendungen mit Forderungen nach höchst rationellem Umgang mit elektrischer Energie vorbehalten.

Adresse des Verfassers: *Fritz Berg*, ABB Normelec AG, Riedstrasse 6, 8953 Dietikon.