Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad : Auslegung, Applikation und wirtschaftliche Aspekte

Autor(en): **Berg, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **78 (1987)**

Heft 4

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903822

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad – Auslegung, Applikation und wirtschaftliche Aspekte

F. Berg

Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad können einen Beitrag zur Entschärfung unserer Energieprobleme und zur Senkung der Stromkosten des Anwenders leisten. Ihr Einsatz ist vor allem bei Anwendungen mit langen Betriebszeiten interessant.
Im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten, wo die Standardmotoren niedrigere Wirkungsgrade aufweisen, sind die Unterschiede zwischen Energiespar- und Normalmotoren in Europa geringer und damit auch die Einsparmöglichkeiten klein.

Les moteurs électriques peuvent contribuer par un rendement élevé à atténuer nos problèmes énergétiques et à diminuer les frais d'électricité de l'usager. Leur emploi est particulièrement intéressant pour des applications de longue durée.
Contrairement aux Etats-Unis où les moteurs standards ne présentent qu'un faible rendement, il y a moins de différences en Europe entre les moteurs économiques en énergie et normaux. Les possibilités d'économies sont par conséquent plus faibles.

Leicht gekürzter Text eines Referates, gehalten anlässlich der 4. Fachmesse für Elektromaschinenbauer (SEMA) vom 14. bis 16. August 1986 in Dietikon.

Adresse des Autors
Fritz Berg, BBC-Normelec AG, Riedstrasse 6, 8953 Dietikon

1. Einleitung

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 alternative Ausführungen mit 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 und eingesetzt werden. Zusätzlich werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie auch durch den Einsatz normaler Motoren Energie gespart werden kann, wobei Elektromotoren europäischer Provenienz aufgrund ihrer Auslegung sehr gute Möglichkeiten bieten.

2. 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.

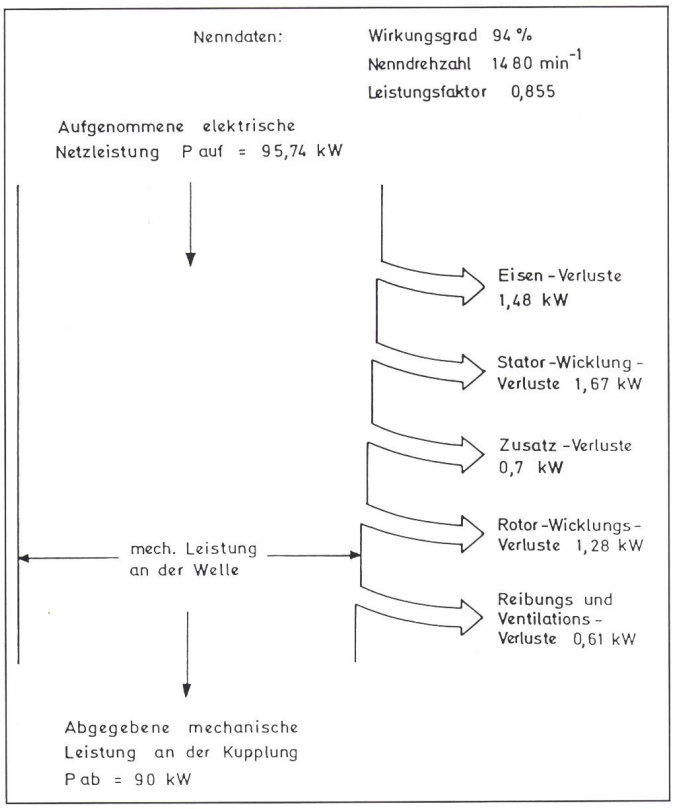
Bei einem Induktionsmotor unterscheidet man dabei fünf Verlustkomponenten:

- 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 (Fig. 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 weil 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*.



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

- 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 Möglichkeit zur Beeinflussung der Ummagnetisierungsverluste besteht darin, die Dicke der einzelnen Bleche zu reduzieren und hochwertiges *Magnetblech mit kleiner Verlustziffer* einzusetzen. Auch von dieser Massnahme wird bei energiesparenden Motoren Gebrauch gemacht.
- 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 ohne massiven Eingriff in die Drehmomentcharakteristik und damit das Betriebsverhalten 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 Hauptanteil 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.*
- 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 Beherrschung und Eingrenzung der Streuverluste muss durch eine Kombination verschiedener Massnahmen und einen 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 I am Beispiel zweier 4poliger 37-kW-Motoren die entsprechende Aufteilung der Verluste.

3. 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

	Normalmotor 37 kW Verluste (kW)	Energiesparender Motor 37 kW Verluste (kW)	Verlust-einsparung (kW)
Stator-Wicklungsverluste $I_1^2 \times R_1^2$	1,319	0,911	0,408
Eisenverluste	0,725	0,18	0,545
Rotor-Wicklungsverluste $I_2^2 \times R_2^2$	0,646	0,668	(0,022)
Reibungs- und Ventilationsverluste	0,373	0,281	0,092
Streuverluste	0,852	0,229	0,553
Totalverluste	3,915	2,339	1,576

Tabelle I Typische Verluste eines 4poligen Motors, 37 kW

Auswahl von Drehstrommotoren mit dem PC

Zur anwender- und anwendungsorientierten Auswahl von Drehstrommotoren stehen neuerdings verschiedene Software-Programme für Personal-Computer zur Verfügung, mit denen die Anwender selbst die technisch und wirtschaftlich optimale Antriebslösung ermitteln können.

Diese Programme gehen von den Kenndaten der angetriebenen Maschinen aus, wie Leitungsbedarf bei Vollast, Gegenmomentverlauf in Funktion der Drehzahl, Trägheitsmoment, Betriebsart und erforderliche Drehzahl. Sie berücksichtigen Umweltbedingungen wie Umgebungs- und Kühllufttemperatur und schliessen auch mechanische Grössen wie Schutzart, Bauform, mechanische Belastungen usw. in die Berechnung ein.

Für beliebige Arbeitsmaschinen oder speziell für Lüfter- sowie für Pumpenantriebe gibt es spezielle Programme. Zudem steht ein weiteres Programm für die Dimensionierung von Drehstrommotoren für variable Drehzahlen in Verbindung mit Frequenzumrichtern zur Verfügung.

Die Dimensionierung des für den vorgesehenen Anwendungsfall unter Beachtung wirtschaftlicher Kriterien bestgeeigneten Motors erfolgt unter Abstützung auf die in der Motorendatei enthaltenen Standardmotoren. In einigen Fällen werden Optimierungsvorschläge ausgearbeitet. Damit ist normalerweise auch in kommerzieller Hinsicht die preisgünstigste Lösung gegeben.

Für spezielle Anforderungen kann es jedoch möglich sein, mit Standardmotoren durch geeignete Modifikationen «optimalere» Lösungen zu realisieren. Derartige Untersuchungen sind jedoch nicht mit den CD-Programmen möglich, sondern bleiben wie bisher erfahrenen Projektierungs- oder Berechnungsingenieuren vorbehalten.

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.

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

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:

$$S = E_s \times H \times K$$

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.

$$AZ = DK / S$$

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

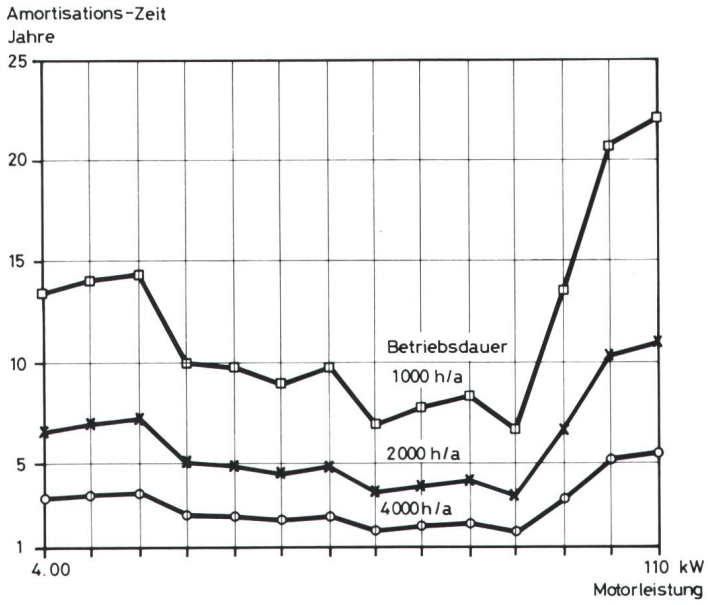
Bei dieser vereinfachten Berechnung wird der Einfluss der Kapitalkosten für die höhere Anfangsinvestition ausser acht gelassen.

Das in Figur 2 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.

4. Auswahl und Einsatz energiesparender Motoren

Im Hinblick auf Energieverbrauch und Energiekosten besteht grundsätzlich die Tendenz, Antriebe einzusetzen, welche einen möglichst hohen Anteil der zugeführten Energie in mechanische Leistung umsetzen.

Figur 2
Amortisationszeit bei Motoren verschiedener Leistungsgrössen in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Betriebsdauer pro Jahr



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 Belastungen und der tatsächlichen Betriebsverhältnisse unerlässlich.

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 dagegen stark ab.

Eine weitere Möglichkeit, Energie und damit Kosten zu sparen, besteht in der Verwendung polumschaltbarer Motoren mit zwei oder mehreren festen Drehzahlstufen oder von drehzahlvariablen Motoren, z. B. in Form von Drehstrommotoren im Frequenzumformer-Betrieb. Von dieser Möglichkeit macht man bei Einsatzfällen Gebrauch, wo vom Arbeitsprozess her nicht ständig die volle Drehzahl und damit Antriebsleistung benötigt wird. Ein typisches Beispiel sind Lüfterantriebe, bei denen die Möglichkeit besteht, in bestimmten Phasen die Luftfördermenge zu reduzieren.

Bei genauer Kenntnis der auftretenden Belastungsverhältnisse in Form des Leistungsbedarfes in Funktion der Zeit und der eigentlichen Belastungsdauer sind durch entsprechende Auslegung des Motors weitere Möglichkeiten zur Einsparung elektrischer Energie gegeben. Hierzu zwei Beispiele:

- In einem Anwendungsfall treten periodische Belastungen auf, die sich mit Phasen abwechseln, in denen vom Motor keine Leistung benötigt wird. Hier ist eine Untersuchung sinnvoll, ob nicht durch Abschalten des Motors zwischen den Belastungsphasen Energie eingespart werden kann.
- In einem anderen Fall wird ein Motor im intermittierenden Betrieb eingesetzt und führt pro Stunde mehrere Schaltungen aus. Der Motor ist z. B. bei einem Antrieb eingesetzt, wo im Hochlauf grosse Gegenmomente zu überwinden oder grosse Schwungmassen zu beschleunigen sind. Bei diesem Applikationsfall kann es sinnvoll sein, den Motor dauernd laufenzulassen, falls die für die Anlaufarbeit aufgewendete Energie grösser als die im Motorleerlauf benötigte Energie ist.

5. 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.

Dies bedeutet, dass Standardmotoren europäischer Provenienz in der Regel dem Anspruch energiesparender Motoren gerecht werden und die als Sonderausführungen auch in Europa erhältlichen Motoren mit nochmals verbesserten Wirkungsgraden ausnahmsweise und nur in bestimmten Sonderfällen eingesetzt werden.