

Energieeffizienz bei Elektromotoren

Elektrische Antriebe für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren und vielfältige mechanische Prozesse in der Industrie und in der Gebäudetechnik machen 40% des elektrischen Energieverbrauches in der Schweiz aus. Sie werden in Fahrzeugen des öffentlichen (und neuerdings auch des privaten) Verkehrs, in Haushaltapparaten, in der Haustechnik, in grossen Infrastruktursystemen und in industriellen Prozessen überall eingesetzt. Dabei werden hauptsächlich 3-phasige Asynchronmotoren im Leistungsbereich zwischen 0,5 kW und 200 kW eingesetzt. Viele dieser Antriebe sind heute nicht auf dem aktuellen Stand der Technik: Sie sind überdimensioniert, laufen oft im ungünstigen Teillastbereich, sind nicht vor Spannungsschwankungen und ungleicher Phasenbelastungen geschützt und sind mit wenig effizienten Mitteln zur Lastanpassung sowie zur Kraftübertragung ausgestattet.

VON CONRAD U. BRUNNER UND
JÜRIG NIPKOW

Das wirtschaftliche Effizienzpotenzial im Bereich der elektrischen Antriebe ist gross und wird auf 20% bis 30% im Durchschnitt (10% bis 80% im Einzelfall) veranschlagt. Sowohl in industriellen Anwendungen wie auch in der Gebäudetechnik wurde in den letzten 20 Jahren bei Neuanlagen und im Ersatz wenig auf eine effiziente Antriebs-technik geachtet. Im Schatten der vielfältigen Effizienzprogramme für Gebäude, Beleuchtung, Haushaltgeräte, Motorfahrzeuge und elektronische Geräte ist dieser Anwendungsbereich etwas zurückgefallen, es wurde wenig neues Know-how geschaffen und verbreitet. Die freiwillige «Motor Challenge»-Kampagne hat bisher offenbar

Conrad U. Brunner

Dipl. Arch. ETH/SIA, ist als selbständiger Energieplaner in Zürich tätig. Seine aktuelle Tätigkeit sind Arbeiten zur Umsetzung der Energieeffizienzpolitik in Europa und in China. Er koordiniert das internationale Harmonisierungsprojekt für Motoren SEEM (Kontakt: cub@cup.ch, www.cub.ch).

Jürg Nipkow

Dipl. El.-Ing. ETH/SIA, ist Inhaber der Beratungsfirma Arbeitsgemeinschaft Energie-Alternativen ARENA in Zürich. Er ist in der Energieberatung und -forschung tätig, Dozent für «Elektrische Energie im Hochbau» am Nachdiplomstudium Energie der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) und Präsident der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E.

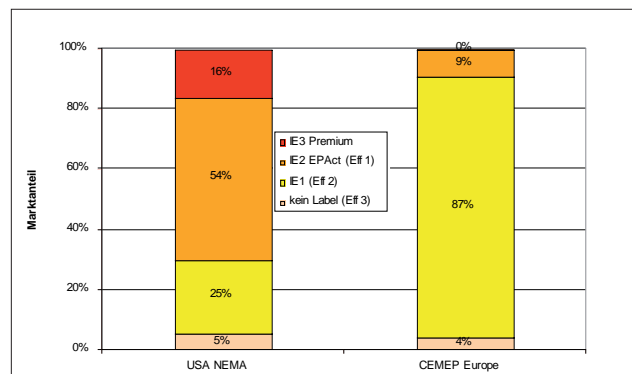


Bild 1: Marktanteile von verschiedenen Motoren-Effizienzklassen in den USA (2004) und Europa (2005).
Quelle: SEEM

noch keine Grundwelle auszulösen vermocht.

Hindernisse einer raschen Umsetzung der unbestrittenen technischen Sparpotenziale sind einerseits Strukturen und Abläufe bei den Betreibern der Elektroantriebe: über Investitionen – auch schon zur Evaluierung von Sparpotenzialen – wird nicht im Einflussbereich der Technikfachleute entschieden, welche ihre Systeme kennen und an Verbesserungen interessiert wären. Andererseits fehlt den Ingenieuren der Durchblick bei den Motorwirkungsgraden wegen international schlecht aufeinander abgestimmten Normen (Prüfung des Wirkungsgrades, Labels und Effizienzklassierung). Ein weiteres Hindernis ist die europäische und speziell auch schweizerische Hemmung, verpflichtende Mindestvorschriften für die Antriebe zu erlassen.

Markttransfer

Moderne hoch effiziente Premium-Motoren (IE3-Stern) und -Antriebssysteme, die in den USA und Kanada

mittlerweile bereits einen Marktanteil von gegen 25% erobert haben, werden für viele Anwendungen mit einer kontinuierlichen Lastanpassung mittels elektronischer Drehzahlregelung sowie mit Spannungsreglern und Phasenausgleich ausgestattet (Bild 1). Solche Systeme laufen weniger heiss, ruhiger, mit weniger Vibrationen und leben damit länger. Und sie haben 30% bis 40% geringere Verluste.

Die amerikanische Entwicklung ist einerseits begünstigt durch die grosse Bedeutung der Industrie und deren hohen Energieverbrauchsanteil, andererseits wird die hohe Effizienz durch die dortige 60-Hz-Netzfrequenz (gegenüber den 50 Hz in Europa) etwas erleichtert. 70% der elektrischen Energie wird in der Industrie durch Elektromotoren verbraucht. Der grosse Teil dieser Antriebe sind 3-phasige asynchrone Induktionsmotoren mit 2-, 4- oder 6-Polen. Seit 1992 ist im Energy Policy Act (EPA Act [1]) die Mindestenergieeffizienz für alle normalen Elektromotoren zwischen 0,7 und 200 kW im Dauerbetrieb verpflichtend

vorgeschrieben. Diese verpflichtende EPAct-Vorschrift entspricht in Europa etwa dem freiwilligen «Eff 1»-Standard. Seit 1997 ist die Übergangsfrist vorbei und der Marktanteil der neu verkauften Motoren im Bereich der Mindestvorschriften beträgt in den USA mittlerweile 70%. Wenn Motoren, die nicht für Dauerbetrieb konstruiert sind (bzw. andere spezielle Eigenschaften aufweisen) abgezogen werden, so kann praktisch von einer vollständigen Umsetzung dieser Mindestverpflichtung ausgegangen werden. Bereits haben die USA zum nächsten Schritt angesetzt: Im März 2007 hat der Verband der Motorenhersteller Nema zusammen mit der Umweltfachorganisation Aceee dem US-Kongress vorgeschlagen, innert dreier Jahren die Premium-Motoren (IE3-Stern) verpflichtend einzuführen.

Die europäische Marktentwicklung hat erst 1999 mit der Freiwilligen Vereinbarung zwischen der europäischen Industrie Cemep [2] und der

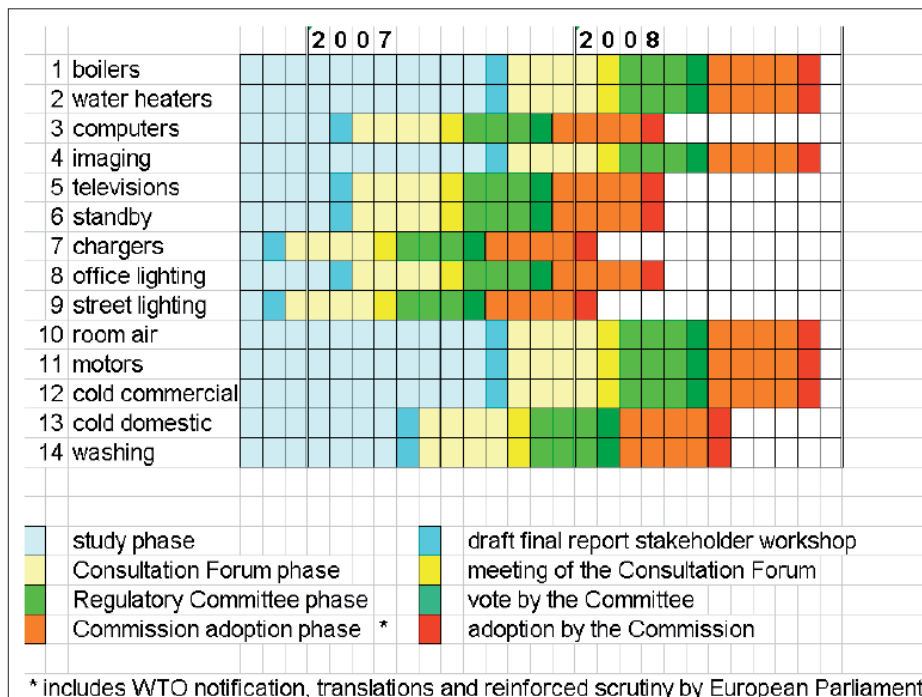


Bild 3: EU Energy using Products Directive: Zeitplan für die Umsetzung der Mindestanforderungen. Quelle: EC EuP

nischen Geräten nur stiefmütterlich behandelt wurden. Die diesbezüglichen Grundlagenuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprogramms Elektrizität liegen nun vor [3]. Zudem hat das BFE am Motor Summit 2007 vom 10. und 11. April in Zürich dargelegt, dass es im Gleichschritt mit der EU auch verpflichtende Mindestanforderungen für Motoren einführen will. Die Schweizerische Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.) wird bereits in diesem Jahr beginnen, mit Mustersanierungsprojekten in der Industrie die Grundlagen für eine standardisierte Systemverbesserung von Motoren

aufzubauen. Europa gibt jetzt aber Gas und will aufholen. Die von der EU im Rahmen der neuen europäischen Effizienzkampagne lancierten Projekte für Ecodesign für 14 Gerätekategorien Energie verbrauchender Produkten umfassen auch Elektromotoren (vgl. Bild 3). Bis Ende 2007 sollen die Grundlagenarbeiten abgeschlossen und bis Ende 2008 soll die EU-Kommission die entsprechenden Beschlüsse für zwingende Mindestanforderungen fassen. Damit fallen allfällige WTO-[4]-Hemmnisse (Technical Barriers to Trade) weg, so dass die Schweiz gemäss der im Energiegesetz

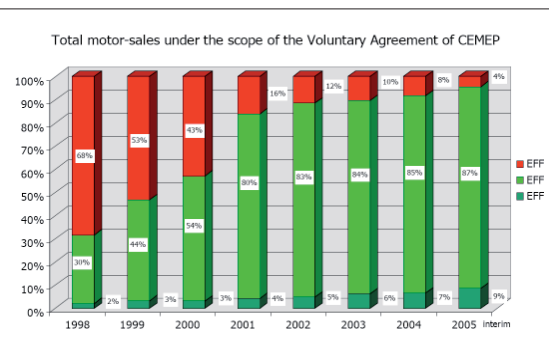


Bild 2: Offizielle Entwicklung der Marktanteile der Motoren der Europäischen Cemep-Vereinigung. Quelle: Cemep

Europäischen Union (EU) begonnen. Damals war das Ziel, eine eindeutige Energieeffizienzklassifizierung zu lancieren und dabei die schlechteste Klasse der «Eff 3»-Motoren rasch aus dem Markt zu drängen. Dies ist zwar innert drei Jahren tatsächlich gelungen, aber der Fortschritt auf der Seite der effizienteren europäischen Motoren ist nicht vom Fleck gekommen und stagniert heute bei einem Marktanteil von 9% (vgl. Bild 2). Die effizienteren Motoren haben einen Mehrpreis von 20% bis 30% und wurden bisher angeblich von den industriellen Kunden nicht gekauft, obwohl der geringere elektrische Energieverbrauch die Mehrkosten innert einem bis drei Jahren zurückbezahlt.

Das Bundesamt für Energie (BFE) plant im Rahmen von EnergieSchweiz im neuen Schwerpunkt Energieeffizienz eine umfassende Kampagne für den Bereich der elektrischen Antriebe, die bisher neben den Haushaltapparaten, der Beleuchtung und den elektro-

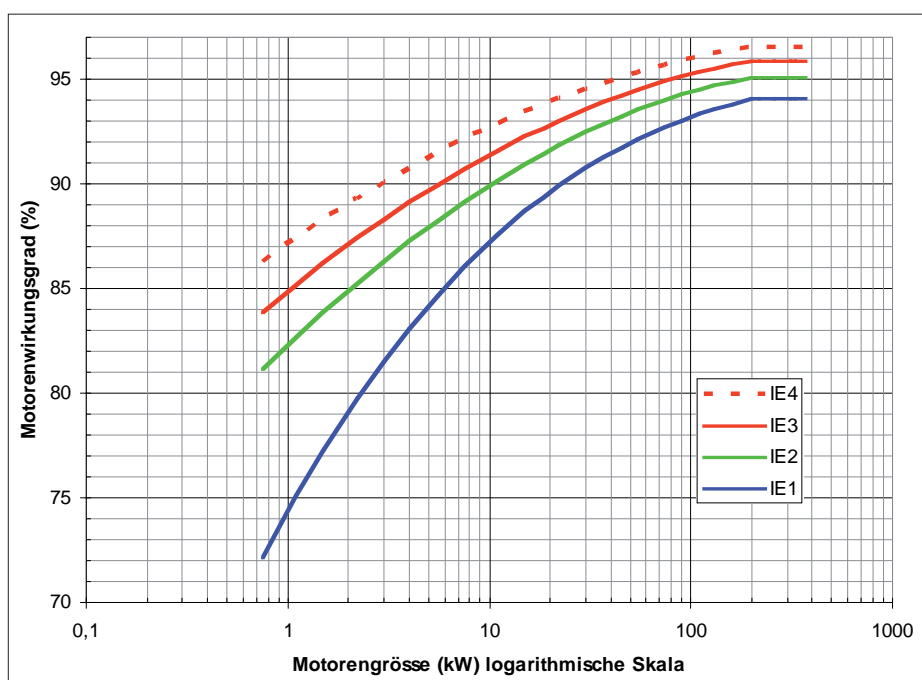


Bild 4: Entwurf der neuen Motoren-Effizienzklassifizierung nach IEC 60034-30 (logarithmische Darstellung). Quelle: M. Doppelbauer

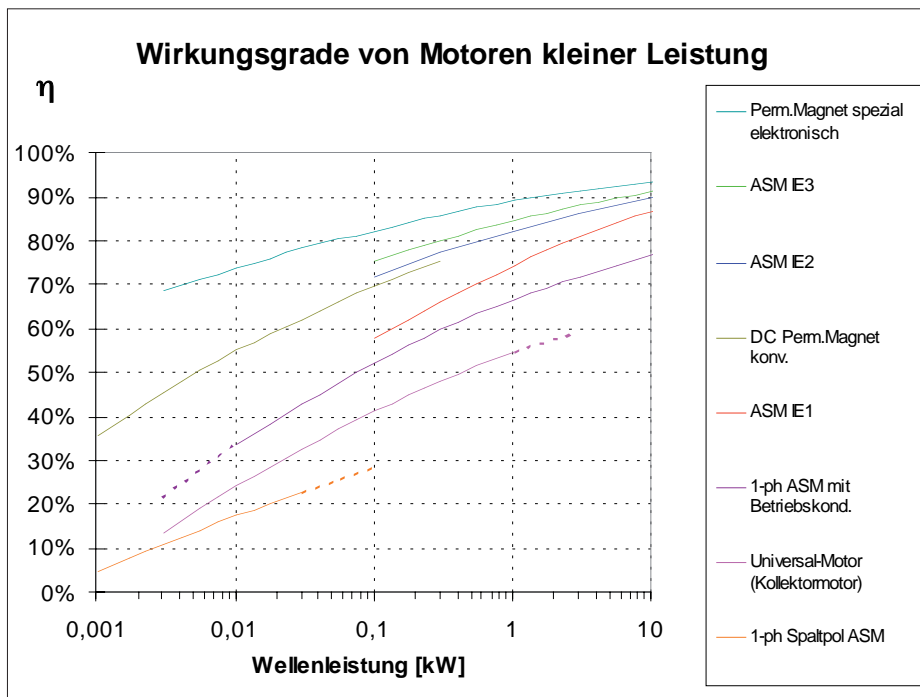


Bild 5: Wirkungsgrade verschiedener Motoren kleiner Leistung. Quelle: J. Nipkow

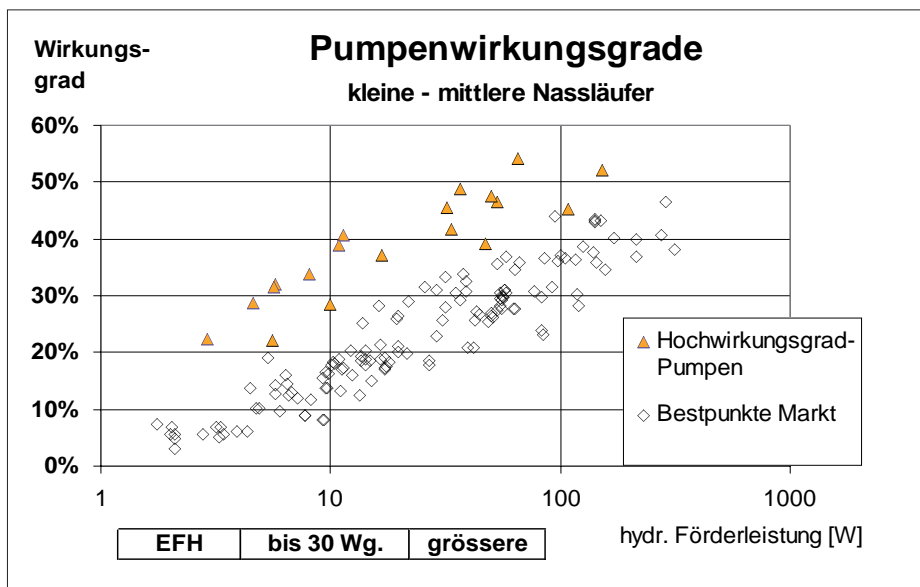


Bild 6: Wirkungsgrade von Hochwirkungsgrad-Pumpen im Vergleich mit dem Marktangebot. Quelle: J. Nipkow

verankerten nationalen Kompetenzen für serienmässig hergestellte elektrische Geräte hier bei Elektromotoren Mindestvorschriften erlassen kann. Erfreulicherweise haben namhafte europäische Motorenhersteller zwischenzeitlich verlauten lassen, dass sie eine gesetzliche Mindestanforderung unterstützen werden.

Standards sind nicht harmonisiert

In Bild 4 sind die Wirkungsgrade verschiedener Motorentypen aufgeführt. Die mangelnde Harmonisierung in den Standards aufgrund der nachfolgend aufgeführten Gründe hat die weltweite Marktentwicklung hin zu energieeffizienteren Motoren gestört

und verzögert.

Die Prüfnormen zur Messung der Energieeffizienz: Im amerikanischen Bereich wird gemäss IEEE 112 B der vollständige Verlust (inklusive die zusätzlichen Streulastverluste) erfasst, während gemäss IEC 60034-2 bisher in Europa nur ein schematischer Zuschlag von 0,5% dafür eingesetzt wird. Dadurch werden die Wirkungsgrade – je nach Grösse der Motoren – rund 1% bis 2% zu hoch veranschlagt. Erst die revidierte IEC 60034-2 (Ed. 4) wird im Jahr 2008 diesen Makel korrigieren.

Klassierung der Effizienzklassen: Die Klassierung der Effizienzklassen und der entsprechenden Wirkungsgradkurven sind in USA/Kanada, Australien und Neuseeland sowie in China durch bindende Vorschriften

Motorenkampagne

Als Auftakt für die neue Motorenkampagne fand am 10. und 11. April 2007 in Zürich der von S.A.F.E. zusammen mit EnergieSchweiz und SEEEM (Standards for Energy Efficiency of Electrical Motor Systems, vgl. www.seeem.org) veranstaltete Motor Summit 2007 statt. Dabei wurden den 130 Teilnehmern aus 20 Ländern internationale Strategien vorgestellt und Erfahrungen mit Effizienzkampagnen für Industriemotoren ausgetauscht (Ergebnisse und Präsentationen siehe unter www.energieeffizienz.ch).

Das internationale Harmonisierungsprogramm SEEEM setzt die Erkenntnisse der führenden Industrieländer weltweit um. Unterschiedliche Testmethoden und Labels sind immer ein Handelshemmnis und eine Bremse für die rasche Marktentwicklung. Die Erfahrung mit zwingenden Mindestanforderungen in den USA, Kanada, Neuseeland, Australien und China sind durchwegs positiv: Nur so liess sich in kurzer Zeit der Marktanteil der Eff-1-Motoren von wenigen Prozent auf über 70% anheben. Bereits sind die Anpassungen der internationalen Standards im Gang (vgl. Bild 4). Künftig werden Labels mit IE3-Stern-, IE2-Stern- und IE1-Stern-Motoren auf dem Schweizer Markt erscheinen. SEEEM führt am 13. und 14. Juni 2007 an der Eemods' 07 in Peking, China (www.eemods.cn) eine spezielle Veranstaltung für die Harmonisierung der internationalen Standards und Energiepolitik bei Motoren durch.

geregelt. Die europäische Cemep-Regelung ist dagegen nur freiwillig. Die Bezeichnungen und die Effizienzklassen sind aber nicht aufeinander abgestimmt. Erst die neue IEC 60034-30 wird ebenfalls ab 2008 die drei neuen Effizienzklassen IE3-Stern, IE2-Stern und IE1-Stern international harmonisieren (vgl. Bild 5).

Gewichtige Kleinantriebe: Neben den von Elektromotoren im industriellen Bereich abgedeckten Anwendungen zwischen 0,5 und 200 kW gibt es folgende Antriebe kleinerer Leistung, welche mit sehr grossen Stückzahlen, langen Betriebszeiten und grossen Effizienzpotenzialen eine besondere energetische Bedeutung [5] haben:

- ☛ Umwälzpumpen in Haustechnikanlagen
- ☛ Kleinventilatoren in verschiedensten Anlagen, auch Komfortlüftungen
- ☛ Klein-Kompressoren in Kühl- und Gefriergeräten.

Haustechnische Umwälzpumpen beanspruchen rund 10% des Motoren-Elektrizitätsverbrauchs, was 4% des Schweizer Elektrizitätsverbrauchs entspricht. Die über 2 Millionen Nassläufer-Pumpen bis 150 W elektrischer

Leistungsaufnahme sind grösstenteils stark überdimensioniert und weisen Gesamtwirkungsgrade von nur 5% bis 20% auf (vgl. Bild 6). Seit einigen Jahren sind Hochwirkungsgrad-Pumpen mit elektronisch geregelten Permanentmagnet-Motoren auf dem Markt, welche bis viermal effizienter sind als herkömmliche Motoren. Es ist zu hoffen, dass sie Dank einer – noch freiwilligen – Energie-Etikette für Pumpen bald verbreitet eingesetzt werden. Die Grundlagen richtiger Dimensionierung sind bekannt, werden aber beim Ersatz meist zu wenig eingesetzt, da es bei Ersatz einfacher ist, mittels «Austauschspiegel» wieder die gleiche Leistung einzubauen. Das längerfristige Effizienzpotenzial beim Austausch aller Nassläufer-Pumpen beträgt rund 65%.

Ähnlich wie bei kleinen Umwälzpumpe enthalten auch herkömmliche kleine Ventilatoren Kondensator-Asynchronmotoren oder gar Spaltpolmotoren mit noch schlechterem Wirkungsgrad. Millionen solcher Ventilatoren finden sich in Bad- und WC-Abluftanlagen, als Hilfsaggregate in verschiedensten Geräten - vom Backofen über Wäschetrockner und kleinen Klimageräten bis zu gewerblichen Kühlmöbeln. Neue Ventilatoren mit Permanentmagnetmotor (analoge Technik wie bei Pumpen) werden bereits in Wohnungslüftungsgeräte besserer Qualität (Stichwort: Gleichstrommotor) eingebaut. Das technische Sparpotenzial liegt auch hier über 50%, ist aber wegen der kleineren Leistungsaufnahmen insgesamt weniger ergiebig als bei den Pumpen.

Die Effizienz von Kühl- und Gefriergeräten konnte in den letzten Jahren erfreulich verbessert werden, was die Einführung der «Superklassierung» A+/+ bei der Energie-Etikette notwendig machte. Die eingebauten hermetischen Kältekompressoren weisen Leistungsaufnahmen von etwa 60 W bis 200 W auf und enthalten noch fast immer Kondensator-Asynchronmotoren. Auch kann mit Permanentmagnet-Motoren ein weiteres Sparpotenzial von 25% bis 40% realisiert werden. Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten sind diese auch wirtschaftlich, führen aber zu leicht höheren Gerätekosten. Wegen der grossen Stückzahlen – in der Schweiz über 4 Mio. – ist ihre energetische Bedeutung gross: Kühl- und Gefriergeräte konsumieren rund 4% des Schweizer Elektrizitätsverbrauchs.

Wirtschaftlichkeit

Effizientere Antriebssysteme erfordern etwas teurere Elektromotoren, die mehr Kupfer benötigen und

in höherer Genauigkeit und Qualität gefertigt sind. Zudem sind je nach Anwendung zusätzlich elektronische Geräte wie etwa Frequenzumrichter zur Lastanpassung nötig, die ebenfalls verteuern wirken.

Auf der anderen Seite sind effiziente Antriebe genauer bemessen und damit häufig eine bis zwei Grössen kleiner und damit wieder preisgünstiger (oder jedenfalls nicht teurer). Es entfallen zudem zusätzliche Komponenten für die Last- und Drehzahlanpassung wie Getriebe, Drosseln usw., die ebenfalls Kosten verursachen.

Ein effizienter Antrieb läuft mit einem deutlich höheren Wirkungsgrad über den gesamten Teillastbereich, verursacht geringere Blindströme, läuft kühler und ruhiger und hat eine höhere technische Nutzungsdauer als herkömmlich verwendete Standardmotoren.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von effizienteren Elektromotoren sind die folgende Voraussetzungen:

- ☞ hohe Laufzeit (über 3000 Stunden pro Jahr)
- ☞ gute Dimensionierungsgrundlagen für Anlauf und Betriebszustand
- ☞ gute Wartung und Unterhalt

Je nach Anwendung können folgende Elemente die Wirtschaftlichkeit bedeutend verbessern:

- ☞ geeignete Mittel für Lastanpassung (meist Frequenzumrichter) und Abschaltung im Leerlauf
- ☞ Vorkehrungen für geringe Spannungsschwankungen und gleiche Phasenbelastung

Wichtig sind aber auch die notwendigen Verbesserungen auf der Nutzungsseite der Antriebe wie etwa:

- ☞ Reduktion der Leckagen bei Druckluftsystemen in Luftleitungen und Speichern
- ☞ Reduktion der Druckverluste in Lüftungskanälen und Flüssigkeitsleitungen durch richtige Dimensio-

Hinweise

- [1] www.energy.gov/about/EPAAct.htm
- [2] CEMEP: Comité Européen de Constructeurs de Machines Electriques et d'Electronique de Puissance, www.cemep.org
- [3] Aktuelle Forschungsberichte des Bundesamts für Energie aus dem Bereich Elektrizität: www.electricity-research.ch
- [4] WTO: World Trade Organization. Diese in Genf ansässige internationale Organisation regelt internationalen die Handels- und Wirtschaftsbeziehungen mit dem Ziel, Handelshemmnissen abzubauen.
- [5] Jürg Nipkow: Den heimlichen Energiefressern im Heizungsraum geht es an den Kragen. Bulletin SEV/VSE Nr.3/2001

nierung, sorgfältige Abstimmung der Nebenaggregate (Lufterhitzer, Wärmetauscher, Schieber, Filter usw.)

- ☞ auf die effektiv notwendige Leistung (Wärme-/Kälte- bzw. Volumenstrom bei Pumpen und Ventilatoren) abgestimmter Antrieb (keine Überdimensionierung)

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit sind die Lebenszykluskosten (vgl. Bild 7), d.h. Anschaffungspreis (inkl. Montage), Betriebskosten (Energie, Wartung und Unterhalt, Reparaturen) sowie Entsorgungskosten. Bei heutigen Elektrizitäts- und Ölpreisen beim Nutzer sowie Kupfer- und Stahlpreisen beim Hersteller ergibt sich für die meisten Anwendungen ein Optimum bei knapp dimensionierten hoch-effizienten Motoren mit Frequenzumformer. Die Energiekosten können dabei fast halbiert werden.

Links:

- www.energieeffizienz.ch
- www.druckluft.ch
- www.motorchallenge.ch
- www.seem.org
- www.electricity-research.ch
- www.eemods.cn

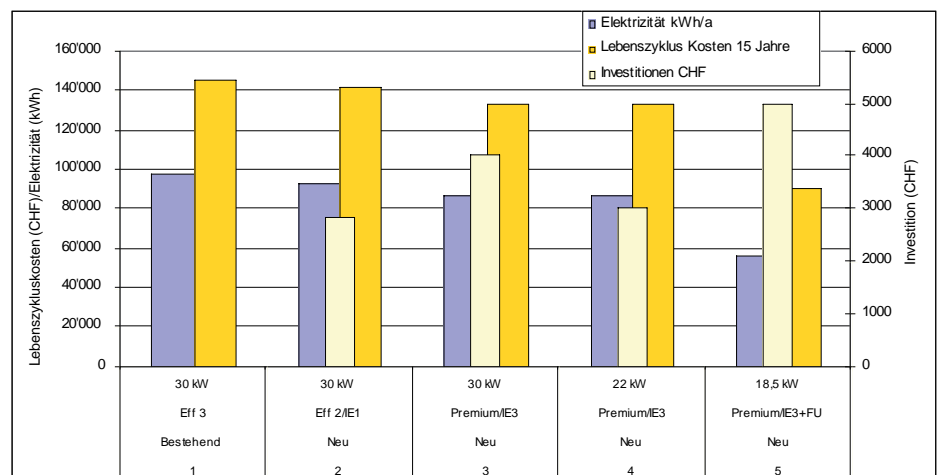


Bild 7: Lebenszykluskosten von neuen Antriebssystemen mit effizienteren Motoren, besserer Dimensionierung und Frequenzumformern. Quelle: A+B International