

Energieeffizienz bei Elektromotoren

Bis Ende 2008 wird die EU-Kommission zwingende Mindestanforderungen festlegen

Elektrische Antriebe für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren und vielfältige mechanische Prozesse in der Industrie und in der Gebäudetechnik machen 40% des elektrischen Energieverbrauchs in der Schweiz aus. Sie werden in Fahrzeugen des öffentlichen und 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 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 ungleichen Phasenbelastungen geschützt und mit wenig effizienten Mitteln zur Lastanpassung – etwa mit Getrieben und Drosseln – sowie zur Kraftübertragung – etwa mit Keilriemen und Getrieben – ausgestattet.

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

Conrad U. Brunner, Jürg Nipkow

bei Neuanlagen und im Ersatz wenig auf eine effiziente Antriebstechnik 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 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 hocheffiziente Premium-Motoren (3-Stern) und -Antriebssysteme, die in den USA und in Kanada mittlerweile bereits einen Marktanteil von 20% 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 (EPAAct¹) die Mindestenergieeffizienz für alle normalen Elektromotoren zwischen 0,7 und 200 kW im Dauerbetrieb verpflichtend vorgeschrieben. Diese verpflichtende EPAAct-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 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.

Die europäische Marktentwicklung hat erst 1999 mit der freiwilligen Vereinbarung zwischen der europäischen Industrie CEMEP² und der EU begonnen. Damals war das Ziel, eine eindeutige Ener-

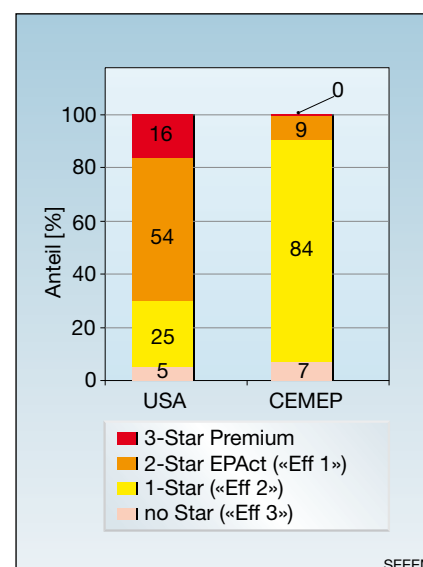


Bild 1 Marktanteile von verschiedenen Motoreffizienzklassen in den USA (2004) und Europa (2005)
Branchenkennern gehen für die USA im Jahr 2007 von einem Anteil von 20% aus

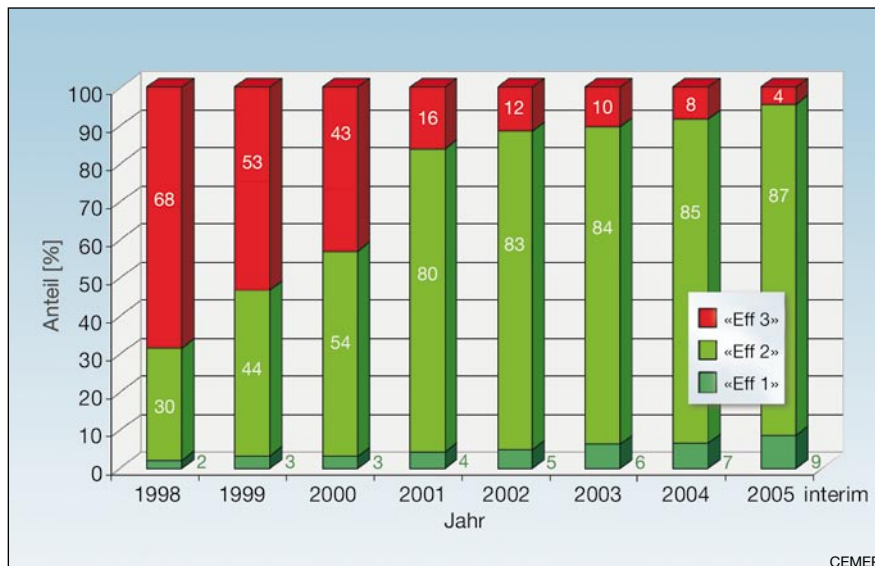


Bild 2 Offizielle Entwicklung der Marktanteile der Motoren der europäischen CEMEP-Vereinigung

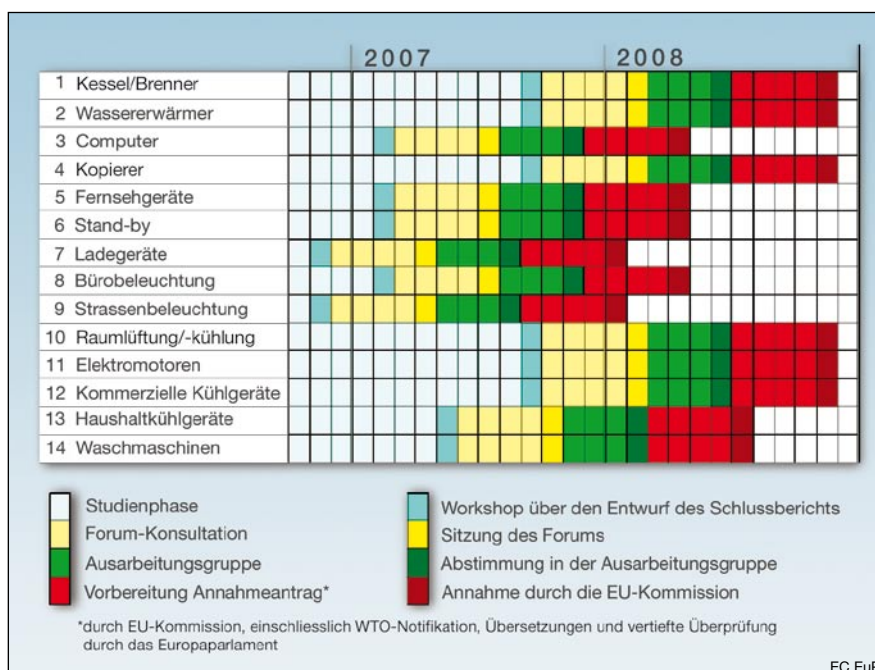


Bild 3 EU Energy using Products Directive: Zeitplan für die Umsetzung der Mindestanforderungen

gieeffizienzklassifizierung 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% (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 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 elektronischen Geräten nur stiefmütterlich behandelt wurden. Die diesbezüglichen Grundlagenuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprogramms Elektrizität liegen nun vor.³⁾

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 energieverbrauchender

Produkte umfassen auch Elektromotoren (Bild 3). Bis Ende 2007 sollen die Grundlagenarbeiten abgeschlossen sein, und bis Ende 2008 soll die EU-Kommission die entsprechenden Beschlüsse für zwingende Mindestanforderungen fassen. Damit fallen allfällige WTO⁴⁾-Hemmnisse (Technical Barriers to Trade) weg, sodass die Schweiz gemäss der im Energiegesetz verankerten nationalen Kompetenzen für serienmässig hergestellte elektrische Geräte hier bei Elektromotoren Mindestvorschriften erlassen kann.

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 600234-2 (Ed. 4) wird im Jahr 2008 diesen Makel einigermaßen korrigieren.

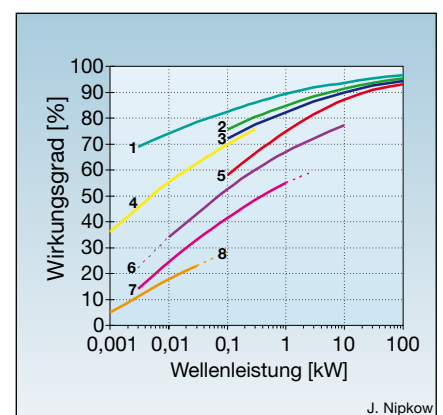


Bild 4 Wirkungsgrade verschiedener Motoren kleiner Leistung

- 1 Permanentmagnetmotor spezial, elektronisch
- 2 Asynchronmotor, 3-Stern ***
- 3 Asynchronmotor, 2-Stern **
- 4 Gleichstrom-Permanentmagnetmotor, konventionell
- 5 Asynchronmotor, 1-Stern *
- 6 Einphasiger Asynchronmotor, Betriebskondensator
- 7 Universalmotor (Kollektormotor)
- 8 Einphasiger Spaltpol-Asynchronmotor

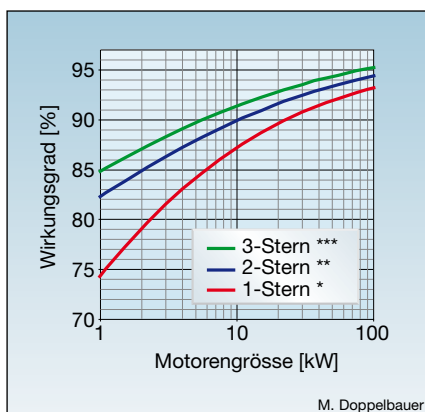


Bild 5 Entwurf der neuen Motoreffizienzklassifizierung nach IEC 60034-30
Logarithmische Darstellung

Klassierung der Effizienzklassen

Die Klassierung der Effizienzklassen und der entsprechenden Wirkungsgradkurven sind in USA/Kanada, Australien und Neuseeland sowie in China durch bindende Vorschriften 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 3-Stern, 2-Stern und 1-Stern international harmonisieren (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 Bedeutung⁵⁾ haben

- Umwälzpumpen in Haustechnikanlagen.
- Kleinventilatoren in verschiedensten Anlagen, auch Komfortlüftungen.
- Kleinkompressoren in Kühl- und Gefriergeräten.

Haustechnische Umwälzpumpen beanspruchen rund 10% des Motoren-Elektrizitätsverbrauchs, was 4% des Schweizer Elektrizitätsverbrauchs entspricht. Die über 2 Mio. Nassläuferpumpen bis 150 W elektrischer Leistungsaufnahme sind grösstenteils stark überdimensioniert und weisen Gesamtwirkungsgrade von nur 5 bis 20% auf (Bild 6). Seit einigen Jahren sind Hochwirkungsgradpumpen mit elektronisch geregelten Permanentmagnetmotoren auf dem Markt, welche bis viermal effizienter sind als herkömmliche Motoren. Es ist zu

hoffen, dass sie Dank einer – noch freiwilligen – Energieetikette für Pumpen bald verbreitet eingesetzt werden. Die Grundlagen richtiger Dimensionierung sind bekannt, werden aber beim Ersatz meist zu wenig eingesetzt, da es einfacher ist, mittels «Austauschspiegel» wieder die gleiche Leistung einzubauen. Das längerfristige Effizienzpotenzial beim Austausch aller Nassläuferpumpen beträgt rund 65%.

Ähnlich wie bei Kleinumwälzpumpen enthalten auch herkömmliche Kleinventilatoren 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 Kleinklimageräte 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 Energieetikette notwendig machte. Die eingebauten hermetischen Kältekompressoren weisen Leistungsaufnahmen von etwa 60 bis 200 W auf und enthalten noch fast immer Kondensator-Asynchronmotoren. Auch hier kann mit Per-

Motor Summit 2007

Als Auftakt für die neue Motorenkampagne findet am 10. und 11. April 2007 in Zürich der von S.A.F.E. zusammen mit EnergieSchweiz und SEEEM[®]) veranstaltete Motor Summit 2007 statt. Dabei werden internationale Strategien vorgestellt und Erfahrungen mit Effizienzkampagnen für Industriemotoren ausgetauscht. Onlineanmeldung unter www.energie-effizienz.ch.

manentmagnetmotoren 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 zusätzliche elektronische Geräte wie etwa Frequenzumrichter zur Lastanpassung nötig, die ebenfalls verteuern wirken.

Auf der anderen Seite sind effiziente Antriebe genauer bemessen und damit

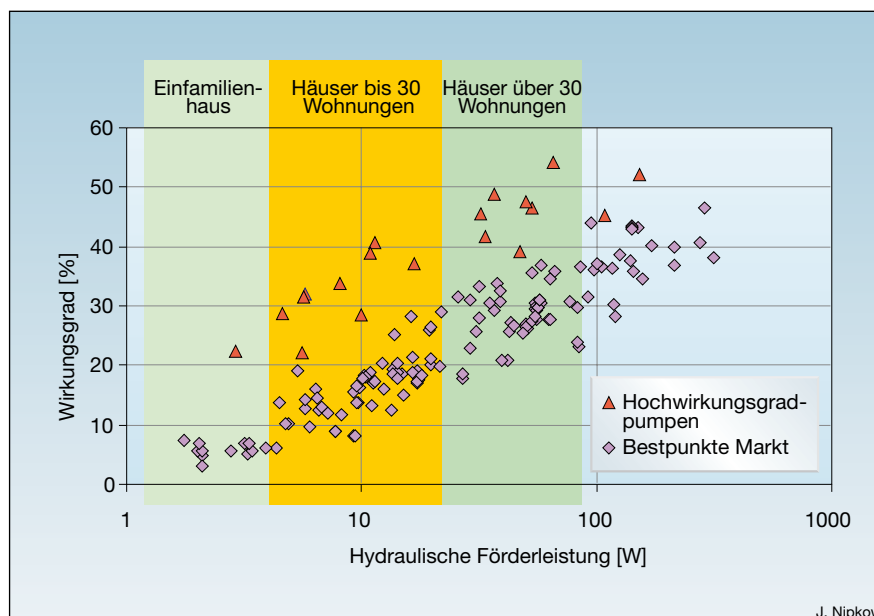


Bild 6 Wirkungsgrade von Hochwirkungsgradpumpen im Vergleich mit dem Marktangebot
Pumpenwirkungsgrade für kleine und mittlere Nassläufer für verschiedene Gebäudekategorien

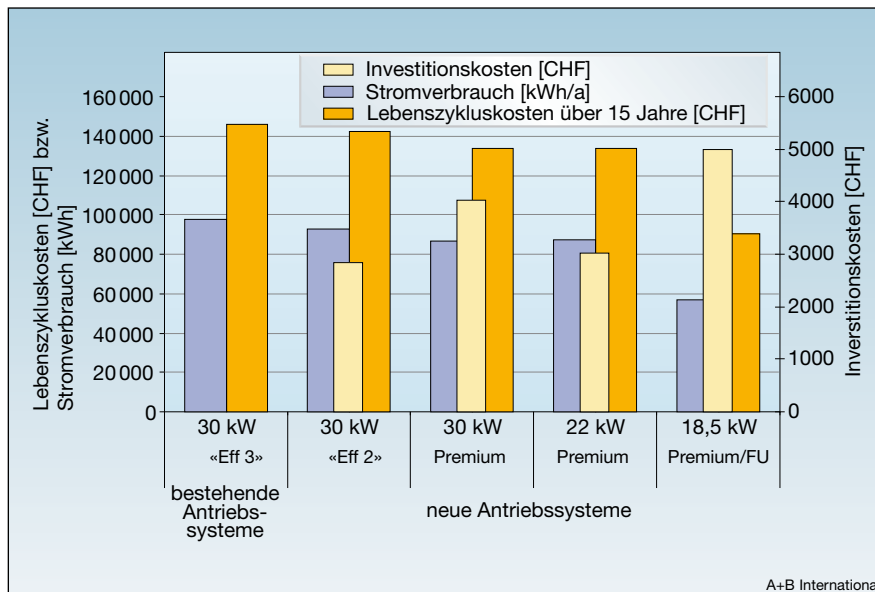


Bild 7 Lebenszykluskosten von neuen Antriebssystemen mit effizienteren Motoren, besserer Dimensionierung und Frequenzumformern (FU)

häufig eine bis zwei Grössen kleiner und damit wieder preisgünstiger (oder jedenfalls nicht mehr 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 folgenden 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 Flüssigkeitsleitun-

gen durch richtige Dimensionierung, sorgfältige Abstimmung der Nebenggregate (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 (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 hocheffizienten Motoren mit Frequenzumformer. Die Energiekosten können dabei fast halbiert werden.

Résumé

Efficacité énergétique des moteurs électriques

D'ici fin 2008, la commission de l'UE fixera des exigences minimales obligatoires. Les entraînements électriques pour pompes, ventilateurs, compresseurs et de nombreux processus mécaniques de l'industrie et de la technique domotique représentent 40% de la consommation d'énergie électrique en Suisse. Ils sont utilisés dans les véhicules des transports publics et privés, les appareils électroménagers, la technique domotique, les grands systèmes d'infrastructure et les processus industriels. Il s'agit en grande partie de moteurs asynchrones triphasés dans la plage de puissance de 0,5 à 200 kW. Beaucoup de ces moteurs ne correspondent plus à l'état actuel de la technique: ils sont surdimensionnés, tournent souvent dans la plage défavorable de charge partielle, ne sont pas protégés contre les fluctuations de la tension et les charges non équilibrées des phases et dotés de moyens peu efficaces d'adaptation de la charge – par exemple avec des engrenages et des selfs – et de transmission des forces – par exemple courroies et engrenages.

Links

www.motorchallenge.ch
www.seeem.org
www.electricity-research.ch
www.eemods.cn

Angaben zu den Autoren

Conrad U. Brunner, dipl. Arch. ETH/SIA, ist seit 30 Jahren als selbstständiger Energieplaner in Zürich tätig. Er wirkt in verschiedenen SIA-Kommissionen und Expertengremien der Schweiz mit und ist Mitbegründer und Vorstandsmitglied der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E. Seine aktuelle Tätigkeit sind Arbeiten zur Umsetzung der Energieeffizienzpolitik in Europa und in China. cub@cub.ch, www.cub.ch

Jürg Nipkow, dipl. El.-Ing. ETH/SIA, ist Inhaber der Beratungsfirma Arbeitsgemeinschaft Energie-Alternativen ARENA in Zürich. Er ist seit 30 Jahren in der Energieberatung und -forschung tätig, ist Dozent für «Elektrische Energie im Hochbau» am Nachdiplomstudium Energie der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW und seit 1999 Präsident der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E. juerg.nipkow@arena-energie.ch, www.arena-energie.ch

¹⁾ www.energy.gov/about/EPAAct.htm.

²⁾ CEMEP: Comité européen de constructeurs de machines électriques et d'électronique 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 international die Handels- und Wirtschaftsbeziehungen mit dem Ziel, Handelshemmnisse abzubauen.

⁵⁾ Jürg Nipkow: Den heimlichen Energiefressern im Heizungsraum geht es an den Kragen. Bulletin SEV/VSE Nr. 3/2001.

⁶⁾ SEEM: Standards for Energy Efficiency of Electrical Motor Systems (www.seeem.org). Dieses internationale Harmonisierungsprogramm 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 Gange (Bild 4): Künftig werden Labels mit 3-Stern-, 2-Stern- und 1-Stern-Motoren auf dem Schweizer Markt erscheinen.