

Elektrische Antriebe Optimieren

Die fünf wichtigsten Punkte

- Die Kosten für elektrische Energie dominieren die Lebenszykluskosten eines Antriebssystems; in der Regel mit einem Anteil von mehr als 90%.
- Richtig und nicht zu gross dimensionierte Antriebssysteme reduzieren die Investitions- und Betriebskosten.
- Pflichtenheft: Anforderungen des Prozesses an den Antrieb sorgfältig definieren, um Überdimensionierung zu vermeiden.
- Gesamtwirkungsgrad optimieren: alle Komponenten eines Antriebssystems müssen aufeinander abgestimmt und auf den (Produktions-)Prozess ausgelegt werden. Die Effizienz eines Antriebssystems hängt insbesondere auch vom tatsächlichen Betriebspunkt ab.
- Spezialisten beiziehen: Oftmals fehlt das Know-how über energieeffiziente Antriebssysteme im Betrieb und muss durch externe Fachleute ergänzt werden.

Einleitung

In der Schweiz verbrauchen Industriemotoren 27%, und elektrische Antriebssysteme insgesamt rund 50% der elektrischen Energie, wie Abbildung 1 aufzeigt.

Die Anzahl der in der Schweiz installierten Elektromotoren wurde 2006 mit 2.2 Millionen Stück abgeschätzt (Baumgartner, 2006). Es sind keine neueren Zahlen verfügbar. Eine im Rahmen des Förderprogramms «EASY» durchgeführte Untersuchung an mehr als 4 100 Motoren zeigte 2014 folgendes auf:

- 56.4% der erfassten Motoren sind älter als ihre technische Lebensdauer (< 1kW: 10 Jahre; 1 bis 10 kW: 12 Jahre, 10 bis 100 kW: 15 Jahre, > 100 kW: 20 Jahre). Die Motoren, welche ihre angenommene technische Lebensdauer bereits überschritten haben, sind im Mittel 99% zu alt.

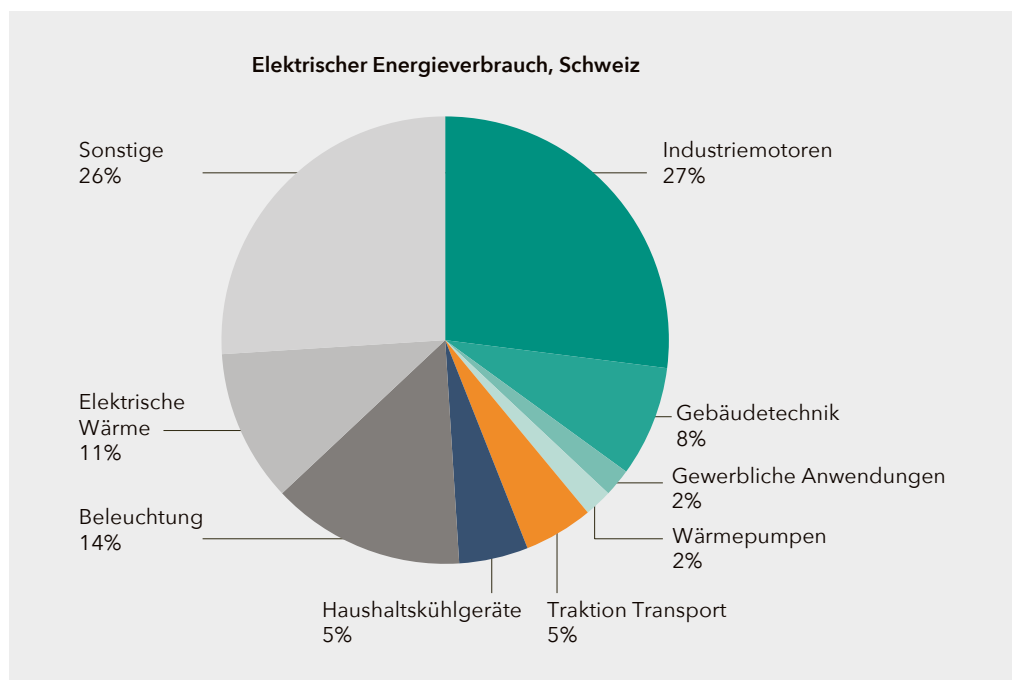


Abbildung 1: Anteil von Antriebssystemen am elektrischen Energieverbrauch der Schweiz (S.A.F.E./J. Nipkow, 2013). Elektrische Antriebssysteme sind in den Kategorien Industriemotoren, Gebäudetechnik, gewerbliche Anwendungen, Wärmepumpen, Traktion Transport und Haushaltsgeräte enthalten; diese umfassen 49% des Verbrauches.

- 19.8% der erfassten Motoren sind mit einem Frequenzumrichter (FU) ausgestattet.
- 68% der erfassten Motoren haben einen mittleren Lastfaktor von weniger als 60% und werden demnach als überdimensioniert angesehen.
- Der Anteil von Motoren am elektrischen Energieverbrauch der untersuchten Industriebetriebe betrug 86.8%.
- Weiter zeigen Untersuchungen von Topmotors, dass das Energieeinsparpotenzial von elektrischen Antriebssystemen oftmals 20 bis 30%, abhängig von der Ausgangslage, beträgt.

Abbildung 2 zeigt die Komponenten eines elektrischen Antriebssystems. Dieses besteht hauptsächlich aus den vier Komponenten Frequenzumrichter, Elektromotor, mechanische Komponenten (z.B. Keilriemen) und der Anwendung (z.B. Ventilator). Es besteht bei elektrischen Antriebssystemen nach wie vor ein beträchtliches Energie-sparpotenzial. Dieses wird zum Beispiel für die Redimensionierung mit 5 bis 15%, für die Prozessoptimierung mit 5 bis 50%, für Hochleistungs-komponenten für mechanische Komponenten (z.B. Riemen, Getriebe, Drosseln, etc.) und für die Anwendung (z.B. Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Transport) mit 2 bis 20% geschätzt (Zahlen BFE, Motor Summit 2021). Das Energiesparpotenzial kann durch zwei Herangehensweisen realisiert werden:

1. Mindestanforderungen: Die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz verhindern den Einsatz von Komponenten (z.B. Beispiel Motoren, Ventilatoren) mit geringer Energieeffizienz. Aufgrund der langen technischen Nutzungsdauer von Elektromotoren von 10 bis zu 20 Jahren (abhängig von der Nennleistung des Motors), welche in der Praxis zudem oft überschritten wird, sind die Mindestanforderungen von grosser Bedeutung für elektrische Antriebssysteme.

2. Erneuerung bestehender elektrischer Antriebssysteme: Diese ist bedeutend schwieriger zu bewerkstelligen. Es

zeigt sich, dass Investitionen in die Energieeffizienz von elektrischen Antriebssystemen oftmals nicht getätigt werden, obwohl diese wirtschaftliche Amortisationszeiten haben. Häufige Hindernisse sind zum Beispiel:

- Beim Einkauf des Systems wird auf tiefe Anschaffungskosten geachtet und die über die Lebenszeit anfallenden Betriebskosten werden nur selten mitberücksichtigt.
- Das Knowhow im Bereich elektrische Antriebssysteme ist, vor allem in KMU, oft nicht vorhanden.
- Produktionsunterbrüche haben einen grossen Einfluss auf das Tagesgeschäft sowie oft kostspielige und weitreichende Folgen. Vermeidbare Unterbrüche sind daher nicht erwünscht («never touch a running system»).
- Veränderungen an zertifizierten Prozessen sind nur sehr schwer zu erreichen und müssen aufwendig dokumentiert werden.
- Der Schutz von Betriebsgeheimnissen erschwert die Analyse von Produktionsdaten und Messergebnissen durch externe Fachkräfte.

Die Mindestanforderungen und die gesetzlichen Vorgaben sind für alle verbindlich und zielen heute darauf ab, die Energieeffizienz auf der Ebene der Komponenten zu verbessern. Weil das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Antriebssystem und die Abstimmung dessen auf den Prozess komplex und nicht an Mindestanforderungen betreffend Energieeffizienz geknüpft ist, können die heute geltenden Vorgaben aber eine optimale Gesamteffizienz auf Systemebene nicht garantieren. Bei der Erneuerung bestehender Anlagen können die Betreiber den Energieverbrauch und die Betriebskosten ihrer Antriebssysteme direkt, massgeblich und langfristig beeinflussen. Es ist daher besonders wichtig, immer das Antriebssystem als Ganzes und die verschiedenen Einsparpotenziale im Einzelfall zu betrachten.

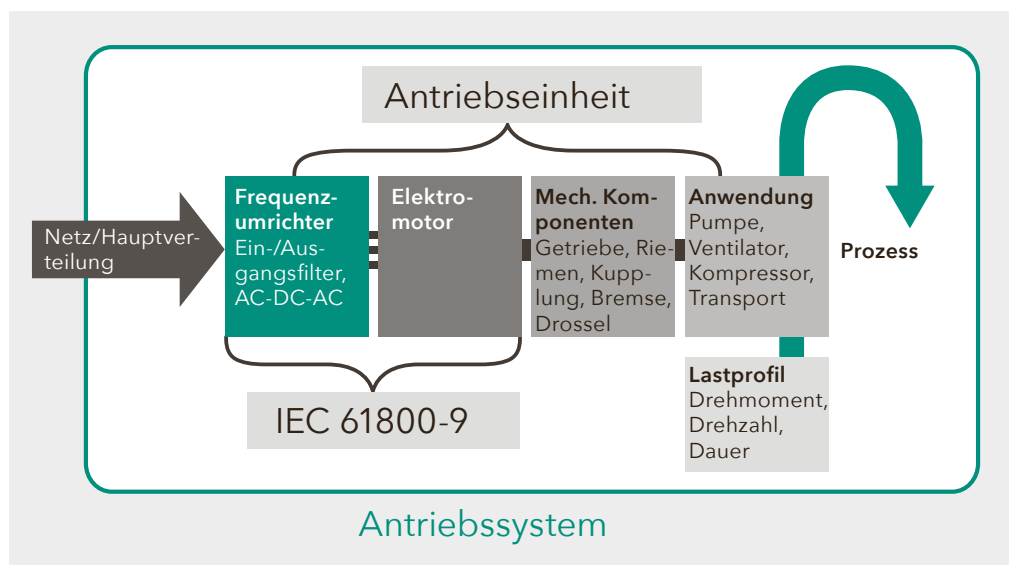


Abbildung 2: Definition eines Antriebssystems. (Quelle: Topmotors)

Aktuelle Mindestanforderungen

Die Website www.topmotors.ch/normen informiert ausführlich über Normen und Vorschriften betreffend Antriebssysteme. Folgend eine Kurzfassung:

Elektromotoren und Frequenzumrichter

Ab dem **1. Juli 2021** gilt für das Abgeben und in Verkehr bringen:

- **Effizienzklasse IE2 (oder besser) für Motoren** mit einer Nennleistung ab 0.12 kW bis weniger als 0.75 kW
- **Effizienzklasse IE3 (oder besser) für Motoren** mit einer Nennleistung ab 0.75 kW bis 1 000 kW
- **Effizienzklasse IE2 für Frequenzumrichter**, die für den Betrieb mit Motoren von 0.12 kW bis 1 000 kW ausgelegt sind

Ab dem **1. Juli 2023** müssen zudem in Verkehr gebrachte und abgegebene Motoren mit einer Nennleistung von mindestens 75 kW bis höchstens 200 kW die Anforderungen der Effizienzklasse IE4 (oder besser) erfüllen. Siehe:

- EnEV Anhang 2.7: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Motoren und Frequenzumrichtern [Download](#) (EnEV, 2017)
- Diese Informationen über die Vorschriften in der Schweiz und der EU finden Sie in kompakter Form auch in [Topmotors INFO Nr. 1: Strengere Anforderungen an die Energieeffizienz](#)
- Weitere Informationen zu Ausnahmen, Übergangsfristen und Abverkauf von IE1-, IE2- und IE3-Motoren welche die geltenden Vorschriften nicht erfüllen: [Topmotors INFO Nr. 2: Abverkauf von Motoren](#)

Umwälzpumpen

Seit 01. August 2015 wird für Nassläufer-Umwälzpumpen von 1 W bis 2 500 W hydraulischer Leistung einen Energieeffizienzindex (EEI) von 0.23 verlangt.

Siehe EnEV Anhang 2.8: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Nassläufer-Umwälzpumpen [Download](#) (EnEV, 2017)

Wasserpumpen

Seit 01. Januar 2015 müssen Wasserpumpen im Bestpunkt den erforderlichen hydraulischen Pumpenwirkungsgrad mit dem Mindesteffizienzindex (MEI) von 0.4 einhalten.

Siehe Anhang 2.9: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Wasserpumpen [Download](#) (EnEV, 2017)

Ventilatoren

Seit 01. Januar 2015 müssen Ventilatoren mit einer elektrischen Antriebsleistung zwischen 125 W und 500 kW die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz der zweiten Stufe erzielen.

Siehe EnEV Anhang 2.6: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Ventilatoren [Download](#) (EnEV, 2017)

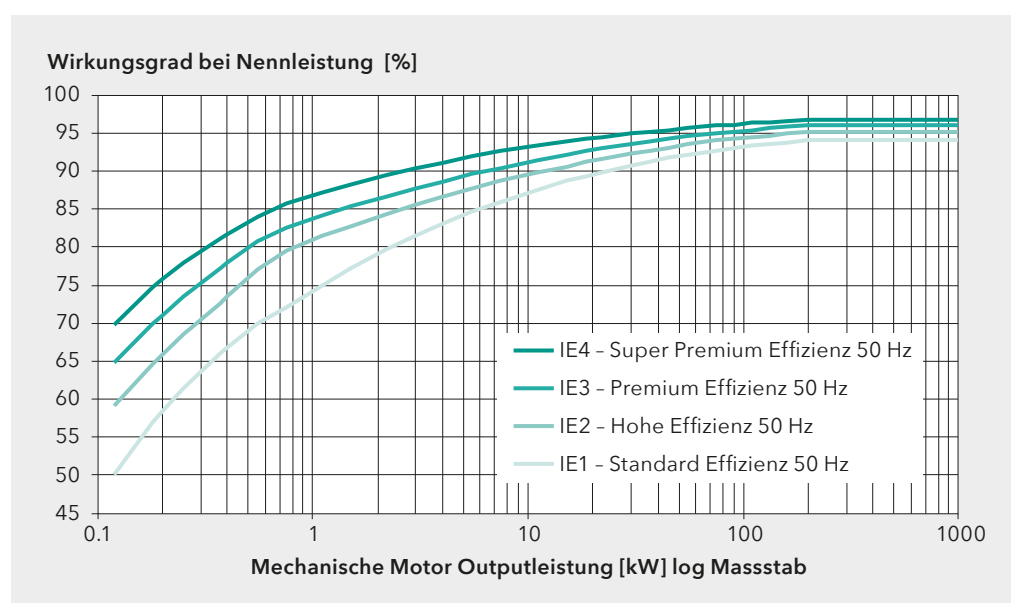


Abbildung 3: Wirkungsgrade von Elektromotoren mit 4 Polen gemäss IEC 60034-30-1:2014.

Energieeffizienzklassen für Elektromotoren, Frequenzumrichter und Antriebssysteme

Mit dem Ziel den Elektrizitätsverbrauch von elektrischen Antrieben zu reduzieren, wurden in der Schweiz Vorschriften betreffend der mindestens zu erreichenden Energieeffizienz von Elektromotoren und Frequenzumrichter (seit Juli 2021) erlassen. Dazu werden Elektromotoren und Frequenzumrichter aufgrund ihrer Verluste beziehungsweise ihres Wirkungsgrades in Effizienzklassen eingeteilt. Die Effizienzklassen sind durch internationale Normen der International Electrotechnical Commission IEC festgelegt, entsprechen daher einem weltweiten Konsens und werden gemäss dem International Efficiency code (IE-code) oder International Efficiency System code (IES-code) bezeichnet.

IE Effizienzklassen Motoren

Elektromotoren werden aufgrund ihres Wirkungsgrades in Effizienzklassen eingeteilt. Es wird zwischen netzbetriebenen Motoren mit konstanter Drehzahl und ausschliesslich mit FU drehzahlvariabel betriebenen Motoren unterschieden:

Netzbetriebene Antriebe mit konstanter Drehzahl

Die Norm IEC 60034-30-1:2014 definiert vier Effizienzklassen, siehe Tabelle 2. Der Referenzwert, für den in der jeweiligen Effizienzklasse mindestens zu erreichenden Wirkungsgrad, hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem sind diese:

- Nennleistung Motor (mechanisch) 0.12 bis 1000 kW
- Polzahl des Motors 2- bis 8-Pol Motoren

In der Norm ist unter Anhang A vorausschauend eine Effizienzklasse IE5 skizziert. Motoren dieser Effizienzklasse sollen voraussichtlich gegenüber IE4-Motoren ca. 20% geringere Verluste aufweisen. Diese Klasse IE5 ist aber nicht effektiv definiert und es gibt in der Schweiz keine Mindesteffizienzvorschriften welche auf diese Effizienzklasse Bezug nehmen (Stand Dezember 2021).

Drehzahlvariable Antriebe (ausschliesslich mit FU betrieben)

Für drehzahlvariable elektrische Antriebe wurde die technische Spezifikation IEC TS 60034-30-2:2016 publiziert. Gemäss dieser Technischen Spezifikation können auch drehzahlvariable, für Dauerbetrieb geeignete, Antriebe hinsichtlich ihrer Energieeffizienz in die fünf Klassen IE1, IE2, IE3, IE4, IE5 eingeteilt werden.

IE-Code Frequenzumrichter

Seit dem 1. Juli 2021 bestehen Mindesteffizienzanforderungen auch für Frequenzumrichter die für den Betrieb von Motoren mit einer Nennleistung von 0.12-1000 kW ausgelegt sind. Frequenzumrichter müssen demnach mindestens die Anforderungen der Energieeffizienzklasse IE2 erfüllen, siehe EnEV Anhang 2.7. Die Grundlage für die Einteilung in Effizienzklassen bildet die Norm IEC 61800-9-2:2017, in der die Internationalen Effizienzklassen IE0, IE1 und IE2 für Frequenzumrichter, definiert sind, siehe Tabelle 1. Die Einteilung in die drei Effizienzklassen erfolgt, indem die Verlustleistung des Frequenzumrichters mit der Verlustleistung eines Referenzumrichters, welcher den Stand guter Technik repräsentiert, verglichen wird, siehe Abbildung 4.

IE-Code	Effizienzklasse
IE4	Super Premium Effizienz
IE3	Premium Effizienz
IE2	Hohe Effizienz (früher Eff1)
IE1	Standard Effizienz (früher Eff2)

Tabelle 2: IE-Code für Effizienzklassen für nach Norm IEC 60034-30-1:2014.

Geltungsbereich		Code	Effizienzklassen	Norm oder technische Spezifikation (TS)
Motor	Motor mit konstanter Drehzahl, Netzbetrieb	IE-Code	IE1, IE2, IE3, IE4	IEC 60034-30-1:2014
Motor	Motor mit variabler Drehzahl, für Betrieb mit FU vorgesehen, kein direct on-line Betrieb	IE-Code	IE1, IE2, IE3, IE4, IE5	IEC TS 60034-30-2:2016
CDM	Frequenzumrichter	IE-Code	IE0, IE1, IE2	IEC 61800-9-2:2017
PDS	Antriebssysteme (umfasst Motor und CDM)	IES-Code	IES0, IES1, IES2	IEC 61800-9-2:2017
EP	Erweiterter Produktbereich	-	-	EN 50598-3:2015

Tabelle 1: IE-Code und IES-Code zur Klassifizierung von elektrischen Antrieben oder Frequenzumrichtern und Antriebssystemen.

IES-Code für Antriebssysteme

Ein elektrischer Antrieb, z.B. in einer Lüftungsanlage im Dauerbetrieb, kann beträchtliche jährliche Energiekosten verursachen. Mit dem Einsatz eines energieeffizienten Antriebssystems können Energiekosten langfristig niedrig gehalten werden. Die heute geltenden Anforderungen sind jeweils für einzelne Komponenten – Motoren, FU, Pumpen oder Ventilatoren – durch die Energieeffizienzverordnung festgelegt. Das gute Zusammenspiel aller Komponenten und somit auch der für die Stromkosten schlussendlich entscheidende Systemwirkungsgrad wird bei der Planung aber leider häufig vernachlässigt. Unter anderem weil oft mehrere Akteure mit Einzelaufträgen im Planungsprozess involviert sind und oftmals durch den Auftraggeber keine zusätzlichen Mindestanforderungen an die Energieeffizienz des gesamten Antriebssystems festgelegt werden. Ein nächster Schritt ist, diese Anforderungen bezüglich mehrerer Komponenten zu formulieren. Dies erfolgt im Rahmen des erweiterten Produktansatzes, siehe Abbildung 6. Tabelle 1 listet internationale Normen auf, welche dafür eine Basis bieten.

Die Einteilung in die drei IES-Effizienzklassen für Antriebssysteme erfolgt, indem die Verlustleistung des Systems mit der Verlustleistung eines Referenz-Antriebssystems verglichen wird, siehe Abbildung 5. Der Geltungsbereich der IES-Effizienzklassen umfasst unter anderem den Leistungsbereich 0.12 kW bis 1000 kW; den Spannungsbereich 100 V bis 1000 V; einachsige AC/AC-Antriebssysteme. Der Systemansatz ermöglicht es, den effektiven Wirkungsgrad beziehungsweise die Effizienzklasse eines Antriebssystems zu bestimmen. Die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten wird dabei berücksichtigt. Dies ermöglicht, präzisere Wirtschaftlichkeitsberechnungen und eine genauere Dimensionierung von Antriebssystemen. Die IES-Effizienzklassen sind ein wichtiger Schritt, dynamische Prozesse effizient zu gestalten und wertvolle Energie effizient einzusetzen. Für die Einführung von Vorschriften betreffend die Energieeffizienz von Antriebssystemen (PDS) ist zurzeit kein Terminplan bekannt.

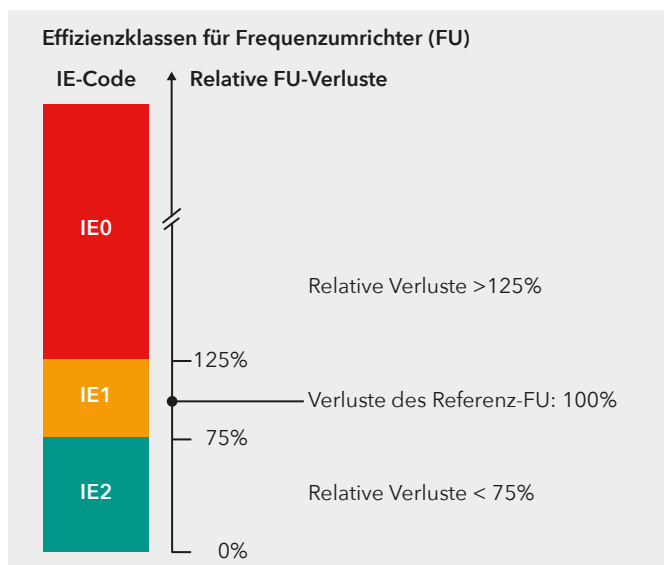


Abbildung 4: Effizienzklassen für Frequenzumrichter, nach Norm IEC 61800-9-2:2017. Die Energieeffizienz eines Frequenzumrichters wird vergleichend beurteilt. Als Referenz dienen in der Norm festgelegte Richtwerte für die Verlustleistung.

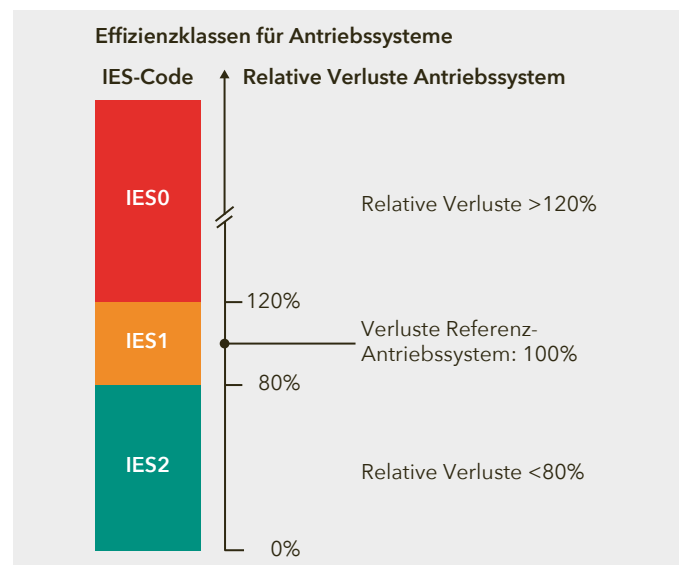


Abbildung 5: IES-Effizienzklassen für Antriebssysteme (PDS) nach IEC 61800-9-2:2017. Die Energieeffizienz eines Antriebssystems wird vergleichend beurteilt. Als Referenz dienen in der Norm festgelegte Richtwerte für die Verlustleistung.

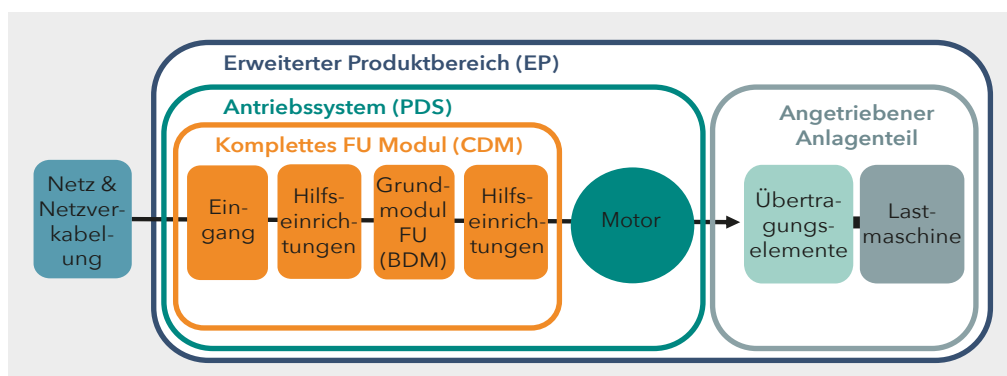


Abbildung 6: Erweiterter Produktansatz. (Quelle: Topmotors)

Systematische Optimierung von Antriebssystemen

Ein Antriebssystem kann nur effizient arbeiten, wenn alle Komponenten aufeinander abgestimmt sind und diese im optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Es sollte auch immer geprüft werden, ob Komponenten wie z.B. eine Transmission (z.B. Riemen) für die Anwendung nötig sind oder weggelassen werden können. Auf diese Weise können Kosten für die Anschaffung, den Unterhalt sowie durch den verbesserten Wirkungsgrad für Energie entfallen.

Die ausschlaggebende Grösse für die Dimensionierung aller Komponenten ist dabei immer der Prozess. Es ist daher unverzichtbar, den Prozess vorab so genau wie möglich zu erfassen. Welchen Druck brauche ich für meinen Prozess? Welcher Volumenstrom ist nötig? Gibt es Schwankungen? Ist die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter (FU) nötig und sinnvoll?

Bei einer Energieeffizienz-Optimierung sollen im Allgemeinen die folgenden Punkte angegangen werden:

1. Keine Überdimensionierung: das System auf den Bedarf auslegen und Sicherheitsmargen kritisch überprüfen.

2. Das System nur bei Bedarf betreiben. Betrieb ohne Nutzen, z.B. nachts, vermeiden.

3. Standby-Verluste vermeiden.

4. Wenn möglich Direktantrieb ohne Transmission (Keilriemen, Getriebe, etc.)

5. Leistungsregelung mit FU immer, wenn sinnvoll.

6. Hocheffiziente Komponenten einsetzen:

- Motoren: IE4 oder besser

- FU: IE2 oder besser (alle FU mit relativen Verlusten <75% gelten als IE2! Deswegen ist ein kritischer Blick auf die relativen Verluste des FU empfehlenswert.)

- Beste verfügbare Technologie für Pumpen, Ventilatoren, FU, etc.

Wirkungsgrad und Wirkungsgradketten

Beim Einsatz von elektrischen Antrieben im industriellen Umfeld geht es vorrangig um deren Kosten. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dabei das Verhältnis von Kosten und Nutzen wichtig. Aus technischer Sicht geht es um die bestmögliche Nutzung elektrischer Energie (nachfolgende wird dafür auch gleichwertig von Elektrizität gesprochen). Der Elektromotor ist ein Energiewandler: er wandelt Elektrizität in mechanisch nutzbare Energie um. Der Wirkungsgrad des Motors beschreibt, wie effizient – beziehungsweise mit wieviel Energieverlust – diese Umwandlung geschieht. Physikalisch wird das Verhältnis der abgegebenen mechanischen Leistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung betrachtet:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_{Verl}} = \frac{P_{auf} - P_{Verl}}{P_{auf}}$$

Wirkungsgrad	η	1
Abgegebene Leistung	P_{ab}	W
Aufgenommene Leistung	P_{auf}	W
Verlustleistung	P_{Verl}	W

Der Wirkungsgrad ist eine Verhältniszahl und liegt für einen Elektromotor zwischen 0 und 1. Er wird in der Regel in Prozent (0 – 100%) angegeben.

Ein hoher Wirkungsgrad bedeutet in Bezug auf einen Elektromotor:

- $\eta \geq 93,3\%$ für ein IE4-Motor mit Nennleistung 11 kW (IEC 60034-30-1:2014)
- Der Motor hat aufgrund seiner guten technischen Eigenschaften eine geringe Verlustleistung als Motoren mit niedrigerer Effizienzklasse.
- Der Motor kann sparsam betrieben werden und verursacht auch im Teillastbereich vergleichsweise niedrige Betriebskosten.

Beispiel: Gesamtwirkungsgrad von Antriebssystemen

Abbildung 7 zeigt den Leistungsfluss und Verluste, die bis zur Nutzleistung der Anwendung auftreten, für zwei verschiedene Antriebssysteme. Beide Antriebssysteme geben 6 kW Leistung an den Prozess ab, allerdings mit deutlich unterschiedlichem Energiebedarf. Die besseren Wirkungsgrade im effizienten Antriebssystem führen zu einer Reduktion der benötigten elektrischen Leistung (Input) von 3.2 kW (-24%). Während eines Jahres ergibt dies Einsparungen von CHF 2 185 (4 500 Betriebsstunden/Jahr, Strompreis 0.15 CHF/kWh). Oft fällt der Grossteil der Verluste in den vor- und nachgelagerten Komponenten des Elektromotors an. Daher ist es für eine gute allgemeine Energieeffizienz des elektrischen Antriebssystems wichtig, dass jede Komponente im Leistungsfluss möglichst wenig zu den Verlusten des Gesamtsystems beiträgt. Effiziente Komponenten wie z.B. IE4 Motoren haben einen hohen Wirkungsgrad und bieten die ideale Grundlage für ein effizientes Antriebssystem mit hohem Gesamtwirkungsgrad. Um den Gesamtwirkungsgrad η_{Tot} des Antriebssystems zu berechnen sind die Wirkungsgrade der Komponenten miteinander zu Multiplizieren. Für ein System bestehend aus FU (97%), Motor (92.6%), Transmission (100%) und Ventilator (63%) beträgt der Gesamtwirkungsgrad nur 56.6%:

$$\eta_{Tot} = \eta_{FU} \times \eta_{Motor} \times \eta_{Transmission} \times \eta_{Ventilator}$$

$$= 0.97 \times 0.926 \times 1.0 \times 0.63 = 0.566 = 56.6\%$$

Obwohl die einzelnen Komponenten teilweise einen relativ guten Wirkungsgrad vorweisen, ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 43.4% (ineffizientes Antriebssystem) und 56.6% (effizientes Antriebssystem). Für das ineffiziente Antriebssystem bedeutet dies, dass weniger als die Hälfte

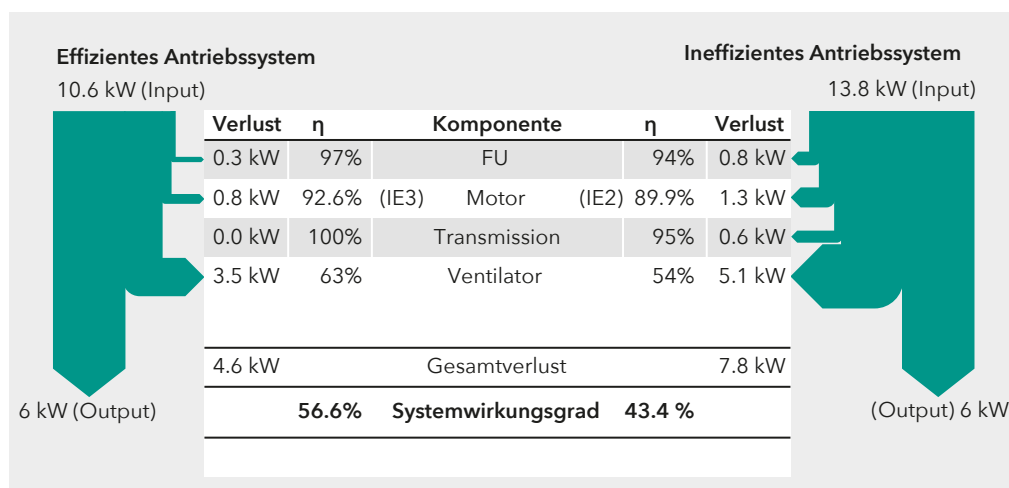


Abbildung 7: Systemaufbau und Leistungsfluss für zwei Antriebssysteme. Ausgehend von einer erforderlichen Leistung von 6 kW aus einem Ventilator werden zwei Beispiele verglichen: effiziente Anlage (links, mit IE3-Motor) und ineffiziente Anlage (rechts, mit IE2-Motor und Transmission).

der eingesetzten (und bezahlten!) elektrischen Energie im Prozess ankommt. Es gilt zudem zu berücksichtigen, dass es sich bei Angaben zum Wirkungsgrad von Komponenten in der Regel um die Effizienz im Nenn-Betriebspunkt handelt. Ein nicht optimaler Betriebspunkt hat aber oft einen negativen Einfluss auf den Wirkungsgrad der entsprechenden Komponente und beeinflusst dadurch den Systemwirkungsgrad noch zusätzlich.

Teillastfaktor

Läuft ein Motor im Teillastbetrieb, ist sein Wirkungsgrad in der Regel tiefer. Bei älteren Motoren ist dieser Effekt besonders ausgeprägt. Der Teillastfaktor ist das Verhältnis der effektiven Leistungsaufnahme des Motors zur Nennleistungsaufnahme. Er ist eine zeitabhängige Grösse, die der jeweiligen Leistungsaufnahme des Motors folgt. Für Analysen wird der Teillastfaktor über die Untersuchungsperiode gemittelt, zum Beispiel über einen Monat oder ein Jahr. Gemittelt wird über die Betriebszeit - nicht mit eingerechnet werden Zeiten, zu denen der Motor ganz abgeschaltet ist.

Indikator für die Motordimensionierung

Liegt der Teillastfaktor eines Jahres weit unter 1 (z.B. bei 0.5), wurde der Motor im Jahresschnitt meist im Teillastbereich betrieben. Wenn keine beabsichtigte Leistungsvariation vorliegt, ist dies ein Hinweis, dass ein zu leistungsstarker, überdimensionierter, Motor installiert wurde.

Vorsicht: Teillastbetrieb!

Teillast, d.h. eine kleinere mechanische Leistungsabgabe und/oder ein kleineres Drehmoment, reduziert den Wirkungsgrad. Die Einbusse ist je nach Motor und Effizienzklasse erheblich. Dies ist ein wichtiger Grund, weshalb eine Überdimensionierung von Motoren sowie der Komponenten eines Antriebssystems zu vermeiden ist (siehe S.6: Systematische Optimierung von Antriebssystemen).

Mit dem vermehrten Einsatz von Frequenzumrichtern gewinnt der Teillastbetrieb mit in der Regel reduziertem Wirkungsgrad bei der Auslegung von Antriebssystemen eine immer wichtigere Rolle. Die IEC hat daher die Technische Spezifikation IEC TS 60034-31:2021 und insbesondere die dazu verfügbare Kalkulationstabelle (.xls Datei, kostenpflichtig) zur Berechnung des Teillastwirkungsgrades von Normmotoren inklusive FU veröffentlicht.

Das Infoblatt [Topmotors Info Nr. 3](#) beschreibt die Wirkungsgradberechnung im Teillastbetrieb genauer.

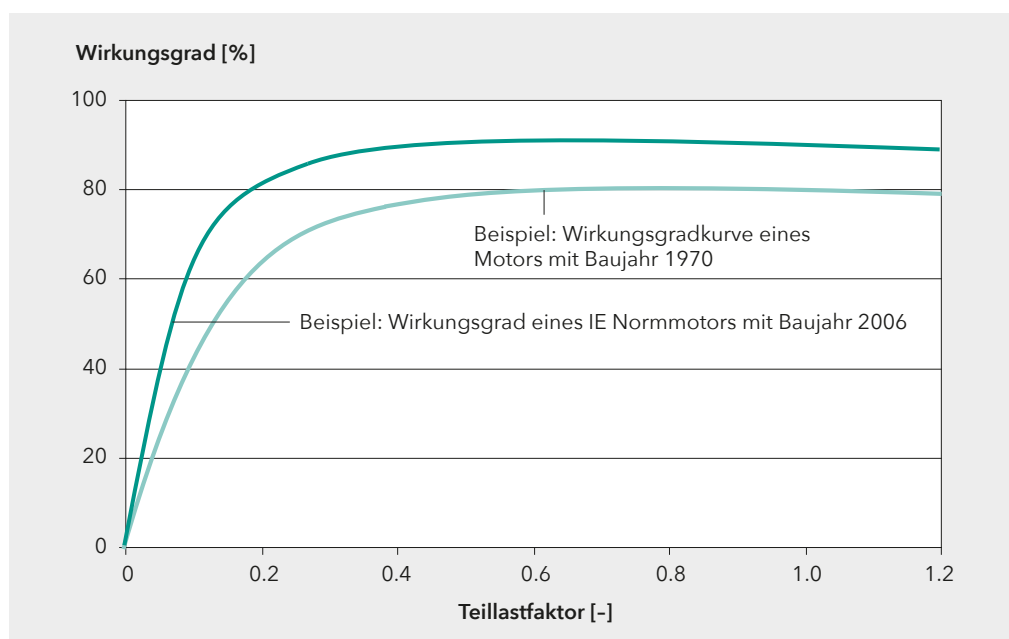


Abbildung 8: Bei älteren Motoren ist nicht nur der Nenn-Wirkungsgrad (bei gleicher Leistung) in der Regel tiefer, sondern auch der Wirkungsgradabfall hin zu kleineren Teillasten ist stärker ausgeprägt als bei neueren Motoren. (Quelle: Topmotors, 2014)

Messungen

Für die Optimierung bestehender elektrischer Antriebe liefern Messungen wichtige Informationen über die Betriebsweise und den Leistungsbedarf. Die Messung elektrischer Werte (z.B. elektrische Wirkleistungsaufnahme) sind verhältnismässig einfach durchzuführen und auszuwerten.

Messungen mechanischer Werte dagegen (Volumenstrom, Druck, Mediengeschwindigkeiten, Drehzahlen etc.) bedingen aufwändigere Einrichtungen, vor allem wenn Flüssigkeits- oder Luftkreisläufe dazu geöffnet werden müssen. Mittels Ultraschalles lässt sich häufig auch der Durchfluss von aussen an Rohren messen. Drehzahlen lassen sich häufig kontaktlos bestimmen und sind daher recht einfach zu messen. Das Erfassen von Drehmomenten ausserhalb eines Prüfstandes ist sehr aufwändig und nur in Ausnahmefällen sinnvoll und nötig. Bei Messaufträgen ist sorgfältig zu definieren, was genau (und wann, wie lange) zu messen ist und was der Nutzen und das Ziel der Messung ist. Oft genügen einfache (elektrische) Messungen zur ersten Beurteilung z.B. des Arbeitspunktes einer Pumpe oder eines Ventilators.

1. Schritt: Messkonzept

Für jede zu messende Maschine ist festzuhalten, was die Messung zeigen soll:

- Momentan-Leistungsaufnahme
- Anlauf (Leistung, Strom)
- Kurzzeit-Verhalten (Minuten, Stunden)
- Lastgang, Teillast-Faktor, ggf. Start/Anlauf

Damit kann der momentane Lastfaktor bestimmt und bei konstantem Betrieb allenfalls auf eine kleinere Motorengrösse hingewiesen werden. Bei Messungen zur Bestimmung des Lastfaktors, anhand derer eine Aussage zur Dimensionierung des Motors getroffen werden soll, muss sichergestellt sein, dass der maximale Belastungsfall gemessen wird. Nur wenn keine höheren Leistungen bei z.B. bei anderen Produkten nötig sind, kann eine verlässliche Aussage zur Dimensionierung getroffen werden und ein Motor gegebenenfalls verkleinert werden.

Vorab muss über folgende Punkte Klarheit bestehen:

- Sinnvolle/nötige Messdauer festlegen
- Welche zeitliche Auflösung der Messdaten (z.B. Anzahl Messungen pro Minute) ist erforderlich? Damit kann die Regelung überprüft und allenfalls der Einsatz eines FU empfohlen werden.
- Betriebszustand der Anlage während der Messung aufzeichnen (z. B. Auslastung, Produkt, Umgebungstemperatur (Saison), etc.)
- Welche weiteren Grössen müssen neben der elektrischen Leistung gemessen werden?

■ Gibt es einfach messbare oder verfügbare Hilfsgrössen wie Betriebsstunden, Produkt, Durchsatz, etc.? Damit kann anhand der Momentanmessung ein typischer oder maximaler Jahreszustand abgeleitet werden.

Betriebliche Randbedingungen

Je nach Art der Anlagen sind für die Messungen einzelne Maschinen oder ganze Anlagen anzuhalten, stillzulegen oder bei besonderen Parametern zu betreiben. Dies hat oftmals Einschränkungen des Betriebs zur Folge und muss gut abgesprochen werden. Die Zugänglichkeit zum Messobjekt ist zu klären (Motor? Elektrotabelleau?) und Sicherheitsaspekte (Stromschlag, Explosionsschutz, Blockierung von Fluchtwegen) sind zu berücksichtigen. Die Installation der Messgeräte sollte in jedem Fall von internem Fachpersonal mit entsprechender Anschlussbewilligung durchgeführt werden.

Messausrüstung

Viele Industriebetriebe verfügen über eigene Messausrüstungen zur Erfassung der Drehstrom-Wirkleistung mit

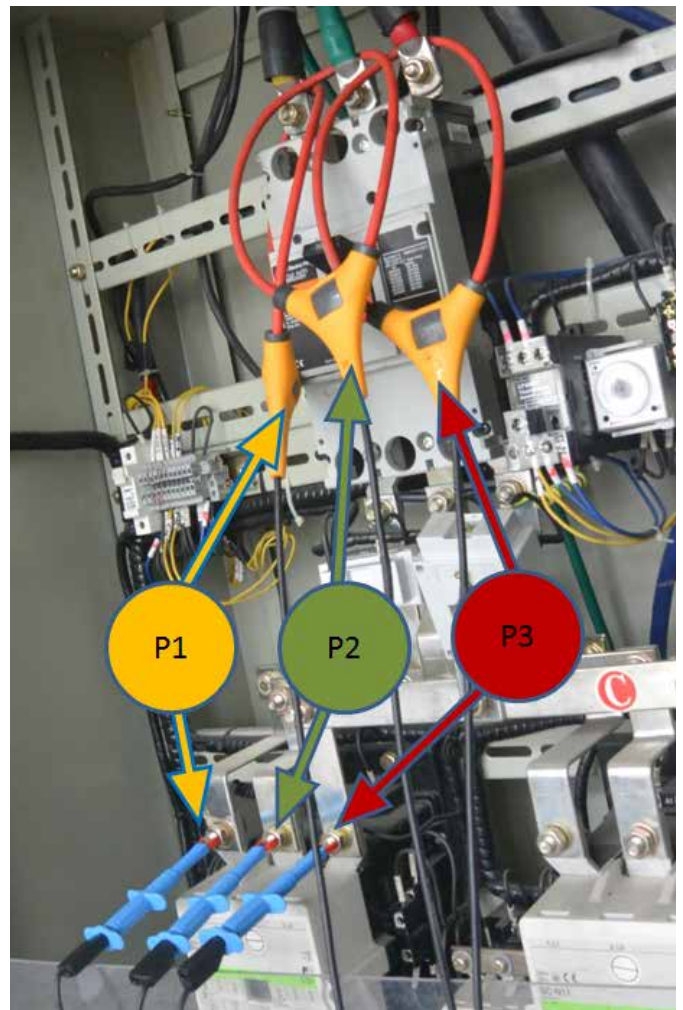


Abbildung 9: Beispiel Messinstallation (Quelle: Topmotors)

Stromzangen, oft sogar mit Datenlogger, um zeitliche Abläufe zu erfassen. Mit Stromzangen kann durch eine äussere Umfassung der Kabel (ohne Demontage von elektrischen Leitungen) der Strom gemessen werden. Falls die Messausrüstung ungenügend ist oder komplexere Messungen und Auswertungen vorgesehen sind, kann die Motorenservice-Firma des Betriebes oder der Motorenlieferant damit beauftragt werden. Für rasche Messungen ohne hohe Genauigkeitsansprüche lässt sich die Leistungsaufnahme mit einem einphasigen Leistungsmessgerät mit Stromzange ermitteln (Annahme einer symmetrischen Drehstromversorgung). In speziellen Fällen können mit Drehzahlmessungen zusätzliche Hinweise zum Arbeitspunkt eines Motors gewonnen werden.

2. Schritt: Messungen durchführen

Vorbereitung, Auftrag

Um Störungen des Betriebes und falsche oder nicht aussagekräftige Messungen zu vermeiden, ist der Ablauf einer Messung sorgfältig zu planen und involviertes Personal zu informieren. Bei komplexen Messreihen kann ein «Drehbuch» hilfreich sein.

Wichtig ist auch, dass die Messanordnung und der Ablauf z.B. mittels Fotos genau dokumentiert werden. Deshalb soll für jedes Messprojekt ein Auftrag definiert werden, ob es intern oder extern zu vergeben sei. Im Messauftrag sind, neben Kosten und Terminen, Ziel, zu messende Grössen, Genauigkeit, Randbedingungen und Art der Berichterstattung festzuhalten.

Vorsichtsmassnahmen gegen Stromschlag

Das Manipulieren an elektrischen Anlagen unter Spannung ist nur ausgebildeten Fachleuten erlaubt. Auch die Feststellung und Gewährleistung von Spannungsfreiheit

erfordert Fachkenntnisse. Fehler hierbei sind Ursache der meisten Elektrounfälle. Messungen sollen deshalb durch Betriebselektriker mit eigener oder gut bekannter Messausrüstung vorgenommen werden.

Anschlüsse und Fühler auf Richtigkeit prüfen

Bei allen Messungen müssen die Anschlüsse und Fühlerpositionen sorgfältig geprüft werden; vertauschte Phasen oder Stromflussrichtungen sind im Nachhinein schwierig zu deuten. Oft lohnt es sich, eine Pilotmessung auszuwerten, bevor eine längere Messreihe gestartet wird oder bevor die Einrichtung abgebaut wird.

3. Schritt: Auswertung

Berichterstattung

Aus den gewonnenen Messdaten sind die gemäss Zielsetzung bzw. Messkonzept gewünschten Resultate zu ermitteln. Die Rechenmethoden und Berechnungsschritte sind zu dokumentieren. Die Ergebnisse des Messprojekts sollen zusammen mit den Messprotokollen in einem Bericht zusammengefasst werden.

Teillast-Faktor aus Leistungsmessung

Da sich die Leistungsaufnahme im Nennbetrieb aus den Typenschild- oder Datenblatt-Daten ermitteln lässt, kann mit einer Messung der momentane Teillast-Faktor bestimmt werden. Der Quotient der elektrischen Grössen ergibt die elektrische Teillast; zur Bestimmung der mechanischen Teillast müssen zusätzlich die Wirkungsgrade eingerechnet werden. Die Leistungsangabe auf dem Typenschild und dem Datenblatt von Elektromotoren ist die vom Motor abgegebene mechanische Wellenleistung P_{output} . Die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung wird mit P_{input} bezeichnet.

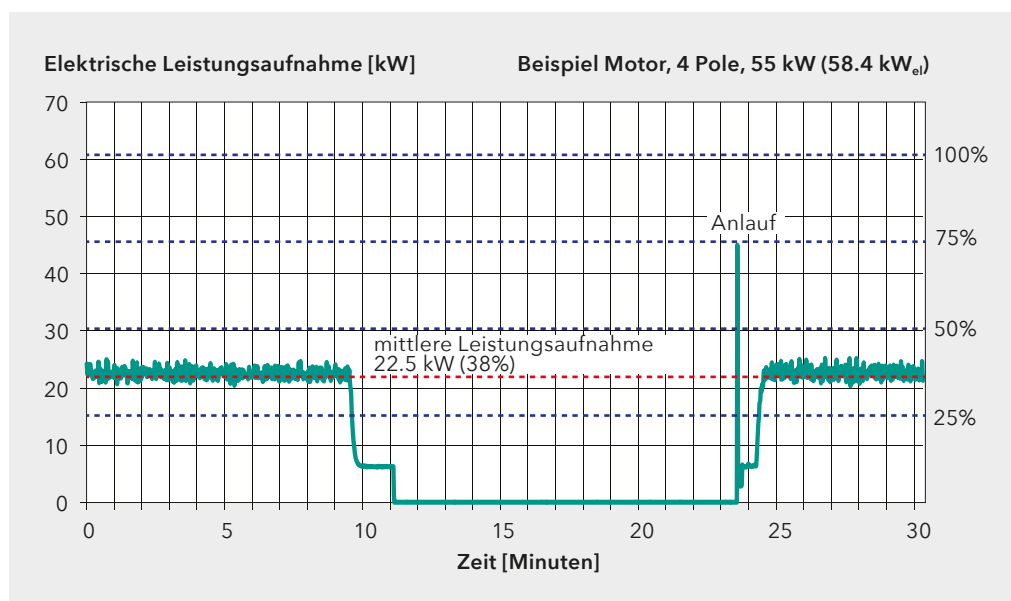


Abbildung 10: Beispiel eines Messdiagramms. Es zeigt die elektrische Leistungsaufnahme mit Lastschwankungen während des Betriebs, eine Pause sowie den Anlauf/Start des Motors. Auffällig ist die sehr niedrige mittlere Leistungsaufnahme (38%) - Überdimensionierung! (Quelle: Topmotors, 2014)

Smart Metering

Eine Messung der Leistungsaufnahme gibt einen guten Überblick über den aktuellen Einsatz von Motoren. Bisher handelt es sich dabei aber meistens um eine zeitlich beschränkte Momentaufnahme, die sich häufig nicht eignet, um ein Antriebssystem mit maximaler Wirkung zu optimieren. Mit Smart Sensors und IoT-Lösungen können heute Antriebssysteme mit geringem Aufwand permanent überwacht werden. Mit den über lange Zeit gewonnenen Datensätzen, lassen sich fundierte Aussagen zur Redimensionierung des Antriebssystems treffen. Deswegen lohnt sich auch die Nachrüstung auf älteren Antrieben, welche in den nächsten Jahren zu ersetzen sind. Zudem ermöglicht die lückenlose Erfassung der Betriebsparameter wie

zum Beispiel Temperatur, Vibration und Magnetisierung eine zustandsbasierte Wartung. Die optimale Wartung verlängert die Lebensdauer der Antriebssysteme und reduziert die Betriebskosten.

Frequenzumrichter bieten oft Schnittstellen für eine weitere Verwendung von Leistungsdaten. Diese bieten sich dementsprechend an, um ein kontinuierliches Energiemonitoring ohne Installation von weiteren Sensoren einzuführen. Falls also bereits ein FU installiert ist, kann dieser möglicherweise bereits für eine kontinuierliche Aufzeichnung von Messdaten verwendet werden. FU verfügen teilweise auch über Energiesparfunktionen. Durch deren Aktivierung können ohne weitere Investitionen Betriebskosten reduziert werden.

Beschaffung von Motoren, Auslegung und Realisierung von Antriebssystemen

In den Ausschreibungen von industriellen Anlagen und Maschinen werden Effizienzkriterien bisher oft nicht explizit aufgeführt. Damit bleibt die Deklaration von Effizienz-Eigenschaften dem Anbieter überlassen und ist bei verschiedenen Angeboten kaum vergleichbar. Mit den folgenden Hinweisen lassen sich in Ausschreibungen differenzierte Effizienz-Eigenschaften vorgeben.

Normen

In Tabelle 1 sind die für Antriebssysteme wichtigen Normen und Effizienzklassen aufgelistet. Aufgrund dieser Normen sind Anbieter von Maschinen und Anlagen heute in der Lage, die Effizienzklasse von Normmotoren, Frequenzumrichtern und Antriebssystemen präzise zu deklarieren. Deswegen sollte heute die jeweils höchste Effizienzklasse den Lieferanten vorgegeben werden. Bei Frequenzumrichtern übertreffen bereits viele Produkte die Anforderungen der heute höchsten Effizienzklasse IE2; deswegen ist ein genauer Vergleich der relativen Verluste des FU in verschiedenen Angeboten empfehlenswert.

Planung von Neuanlagen

Bei der Planung und Erstellung ganz neuer Anlagen bestehen ideale Voraussetzungen, die effizientesten Konzepte und Komponenten zu berücksichtigen. Damit die Effizienzziele von den Anlageplanern und Anbietern auch ernsthaft berücksichtigt werden, können folgende «Leitplanken» zu den (internen oder externen) Aufträgen gegeben werden:

■ Bei der konzeptionellen Planung und der Komponentenwahl für Produktionsanlagen sind die gesamten

Kosten inkl. Betrieb (Energie!) und Wartung über eine Anlagen-Betriebsdauer von x Jahren (z.B. 10) zugrunde zu legen (Total Cost of Ownership).

■ Der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind deutlich steigende Energiepreise zugrunde zu legen, zum Beispiel mit Basiswerten 2021 und Teuerungsraten für Elektrizität.

■ Wenn für Technologien oder Komponenten neue, effizientere Varianten verfügbar sind, die aber aktuell noch unwirtschaftlich scheinen, soll eine Planungs-/Angebots-Variante mit solchen erarbeitet werden.

Bei der Neuplanung oder Gesamt-Erneuerung von Infrastrukturanlagen wie Raumheizung, Raum-Lüftung/-Klimatisierung, Betriebswasser-/Kühlwasser-/Warmwasserversorgung, Druckluft, Transportanlagen sind folgende Besonderheiten zu beachten:

■ Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen soll in der Regel mit längeren Amortisationszeiten als Produktionsanlagen berechnet werden, z.B. 10 bis 15 Jahre.

■ Bei allen Anlagen zur Medienförderung sind die effizienten Regelungstechnologien mit Drehzahlregelung bzw. Frequenzumrichter einzusetzen. Drosseln oder ein Bypass sind Energieverschwender und sollen vermieden werden.

Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost)

Für einen vertieften Variantenvergleich ist eine vollständige Lebenszykluskosten-Analyse sinnvoll. Hier werden alle investiven und betrieblichen Massnahmen einer Veränderung quantifiziert. Bei einer Neuanlage heisst das:

- Planung und Kauf der Anlage respektive der Komponenten
- Installation und Inbetriebsetzung
- Betriebskosten (Energiekosten, Wartung & Unterhalt, Reparaturen) während der gesamten Nutzungsdauer von 10 bis 20 Jahren (siehe Abbildung 11)
- Demontage und Entsorgung.

Bei einer bestehenden Anlage wird zusätzlich der Restwert berücksichtigt, falls diese ihre technische Lebensdauer noch nicht erreicht hat.

Untersuchungen anhand der Lebenszykluskosten sind wenig verbreitet, da sie einen längeren Planungshorizont in Betracht ziehen.

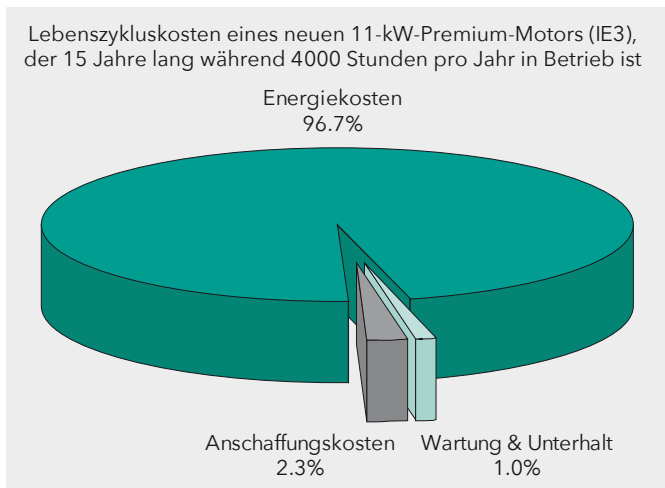


Abbildung 11: Beispiel Lebenszykluskosten eines Motors (Quelle: Topmotors)

Für Lebenszyklusanalysen ist es unumgänglich, die spezifischen Preise für Motoren und Frequenzumrichter sowie den Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems im Betriebspunkt zu kennen. Eine genaue (knappe) Dimensionierung der Motoren- und FU-Leistung spart sowohl Investitionskosten wie auch Verluste.

Motorenpreise

Preise für Motoren unterliegen einer grossen Schwankung. So ist es üblich, dass je nach Bestellvolumen und je nach Besteller aus unterschiedlichen Gründen verschiedene Rabattsätze gewährt werden. Das Diagramm zeigt die Motorenpreise in CHF/kW in Funktion der Nennleistung für IE2-, IE3- und IE4-Motoren. Die spezifischen Preise in CHF/kW nehmen bei Motoren über 10 kW praktisch nicht mehr ab. Dies bedeutet, dass eine genaue (knappe) Dimensionierung der Motorenleistung sowohl Investitionskosten wie auch Energiekosten spart.

Mehrkosten für effizientere Motoren

Bezüglich der Mehrkosten für effizientere Motoren wurden im Rahmen des Topmotors Market Report die Verkaufspreise von Motoren in der Schweiz analysiert und ausgewertet. Es wurde untersucht, welche Mehrkosten für hoch effiziente Motoren bei der Anschaffung zu erwarten sind. Als Referenzkosten dienen die Anschaffungskosten eines IE2 Motors (100%). Es zeigt sich, dass bezogen auf einen IE2-Motor die Mehrkosten für einen vergleichbaren IE3-Motor 15% und für einen IE4-Motor rund 33% betragen.

Effizienzklasse	IE2	IE3	IE4
Relativer Preis	100%	115%	133%

Tabelle 3: Preisvergleich der Effizienzklassen von Motoren: Mittelwert der spezifischen Preise IE2, IE3, IE4 von je 0.12 kW bis 1 000 kW (Quelle: Topmotors Market Report, 2020)

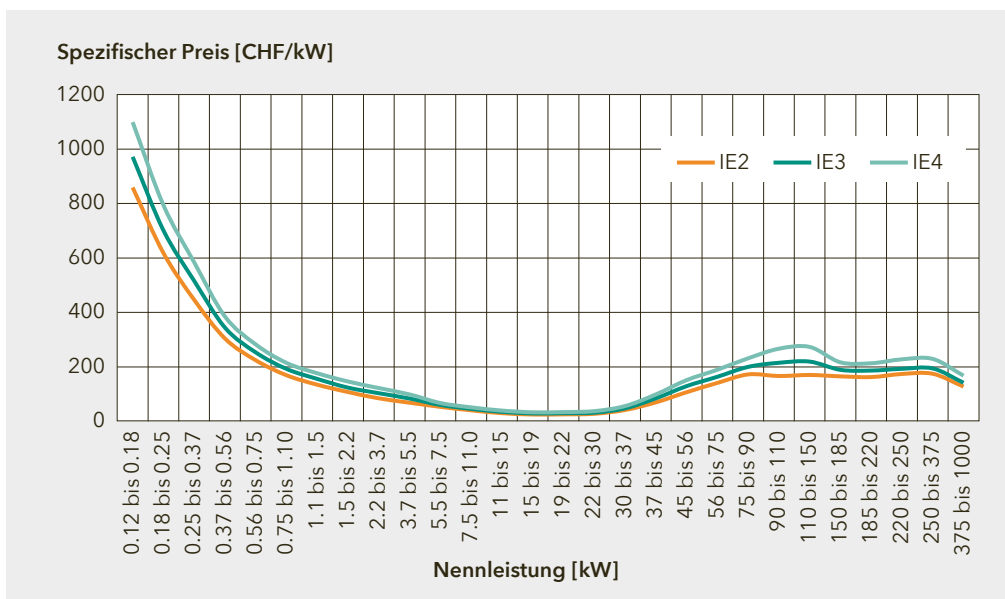


Abbildung 12: Spezifischer Motorpreis in CHF/kW, 2019. (Quelle: Topmotors Market Report 2020)

Massnahmenpaket

Ein wichtiger Schritt ist die Bildung eines Massnahmenpaketes aus den untersuchten Einzelmassnahmen. Die Einzelmassnahmen werden zusammen mit den analogen Massnahmen bei baugleichen Maschinen nach Payback und Energieeinsparung geordnet (siehe Abbildung 13). Das kumulierte Payback und die kumulierte Einsparung zeigen deutlich, bis zu welchem Punkt eine Anzahl von Massnahmen ein gutes Paket für die Umsetzung bilden. Die Erfahrungen zeigen, dass damit unterhalb einer kritischen Schwelle mit einem Payback von z.B. 3 Jahren, rund 80% aller untersuchten Massnahmen realisiert werden können. Massnahmen mit sehr kurzem Payback (unterhalb von 1 Jahr) tragen dabei auch wichtige Massnahmen mit 5 und mehr Jahren Payback mit.

Motorentechnologien

Die verschiedenen Motortechnologien werden im [Topmotors Merkblatt Nr. 29](#) ausführlich beschrieben. Es zeigt die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Motorentechnologien wie Asynchron-Motor (ASM, Abbildung 14), Permanentmagnet-Motor (PMM, Abbildung 15) oder Synchron-Reluktanz-Motor (SRM, Abbildung 16), vergleicht sie miteinander und beschreibt typische Anwendungsfälle für die jeweiligen Technologien. Nachfolgend ist eine Auswahl wichtiger Punkte wiedergegeben.

Für den Anwender gilt es zu klären, wann der Einsatz eines geregelten, hoch- effizienten Motors sinnvoll ist und welche Motorentechnologie für den Einsatzfall am besten geeignet ist. Die Technologien unterscheiden sich und haben ja nach Anwendungsfall Vor- und Nachteile. Die Unterschiede betreffen unter anderem folgende Punkte:

- Wirkungsgrad bei veränderter Drehzahl
- Wirkungsgrad bei veränderter Drehmoment
- Gewicht



Abbildung 14: Schemabild eines Asynchron-Motors (ASM). (Quelle: Danfoss)



Abbildung 15: Zwei Permanentmagnet-Motoren, oben mit eingebetteten, unten mit oberflächenmontierten Magneten. (Quelle: Danfoss)



Abbildung 16: Schemabild eines Synchron-Reluktanz-Motors (SRM). (Quelle: Danfoss)

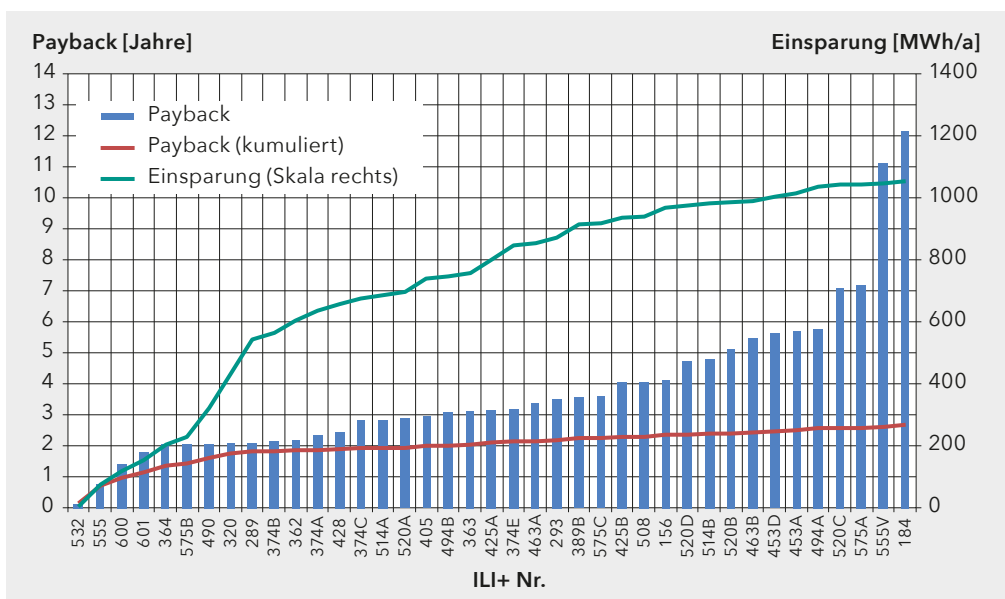


Abbildung 13: Beispiel eines Massnahmenpaketes: Ordnung der einzelnen Massnahmen nach Payback und energetischem Einsparbeitrag. Payback Gesamtpaket: 2.4 Jahre (kumuliert). (Quelle: Topmotors, Förderprogramm Easy, 2014)

- Eignung für häufige und rasche Starts
- Einsatz mit/ohne FU. SRM und PMM Motoren benötigen einen FU.

Vor- und Nachteile von modernen hocheffizienten Motoren

Eine höhere Effizienz des Motors ist grundsätzlich ein positiver Beitrag zur Einsparung von elektrischer Energie. Die dadurch oft entstehenden Mehrkosten werden durch die Energiekosteneinsparungen im Betrieb amortisiert. Dies ist meistens bei über 2000 Betriebsstunden pro Jahr in weniger als 5 Jahren der Fall. Zudem sind die korrekte Dimensionierung und ein lastangepasster Betrieb immer vorteilhaft und senken die Betriebskosten. Einige Motor-technologien bergen die Chance, bei gleicher Leistung und höherer Effizienz, kleinere und leichtere Motoren einzusetzen. Geringere Verluste und dadurch tiefere Temperaturen wirken sich meist positiv auf die technische Nutzungsdauer und die Betriebskosten aus.

Effiziente Motoren drehen schneller

Mit steigender Effizienz erhöht sich die Nenndrehzahl von ASM & PMM leicht. Dieser Effekt beruht auf dem geringeren Schlupf zwischen Netzfrequenz und Rotordrehzahl. Beim 1:1-Ersatz eines alten Motors durch einen gleich grossen, neuen Motor (ohne FU Betrieb) ist zu berücksichtigen, dass z.B. Pumpen und Ventilatoren mit leicht höherer Drehzahl laufen und somit mehr Luft bzw. Wasser als vorher fördern. Dies kann, trotz effizienterem Motor, zu einer höheren elektrischen Leistungsaufnahme (3. Potenz zur Drehzahl) führen. Dieser Effekt kann durch die Anpassung der Transmission (Übersetzungsverhältnis) oder dem Einsatz eines FU vermieden werden.

Frequenzumrichter (FU)

Was ist ein Frequenzumrichter?

Ein Frequenzumrichter (FU) ermöglicht eine Drehzahlsteuerung bei elektrischen Antrieben, indem aus der Wechselspannung des Netzes (z.B. 400 V) und der Netzfrequenz (50 Hz) eine in der Frequenz und Amplitude veränderbare Wechselspannung für die Speisung von elektrischen Motoren erzeugt wird. Damit kann ein Regelsystem mit Sensoren für Druck, Temperatur etc. aufgebaut werden, das im richtigen Moment die erforderliche (und nur die erforderliche) Leistung zum Beispiel als Volumenstrom einer Pumpe, eines Ventilators etc. abgibt. Das ermöglicht es, viel Energie im Vergleich zur bisherigen Variante mit Drosseln und Schiebern einzusparen.

Heute sind Frequenzumrichter bei vielen kleinen und grösseren Anwendungen nicht mehr wegzudenken, weil sie einen sanften Start bei hohem Drehmoment zulassen, eine ruckfreie und stufenlose Beschleunigung und eine lastabhängige Regelung zur elektrischen Energieeinsparung erlauben. Weiter kann ein Frequenzumrichter auch als Interface für die Einbindung von Antriebssystemen in IoT-Anwendungen dienen.

Einsparpotenzial von FU im geschlossenen Kreis

Bei Anlagen mit quadratischem Drehmomentverlauf wie Pumpen in geschlossenem Kreislauf, Luftförderungsanlagen, etc. haben Frequenzumrichter ein grosses Effizienzpotenzial: bereits eine geringe prozentuale Reduktion des Volumenstromes führt im Vergleich zu einer mechanischen Drosselung zu einer relativ grossen Energieeinsparung, wie die Abbildung 17 für eine Umwälzpumpe aufzeigt.

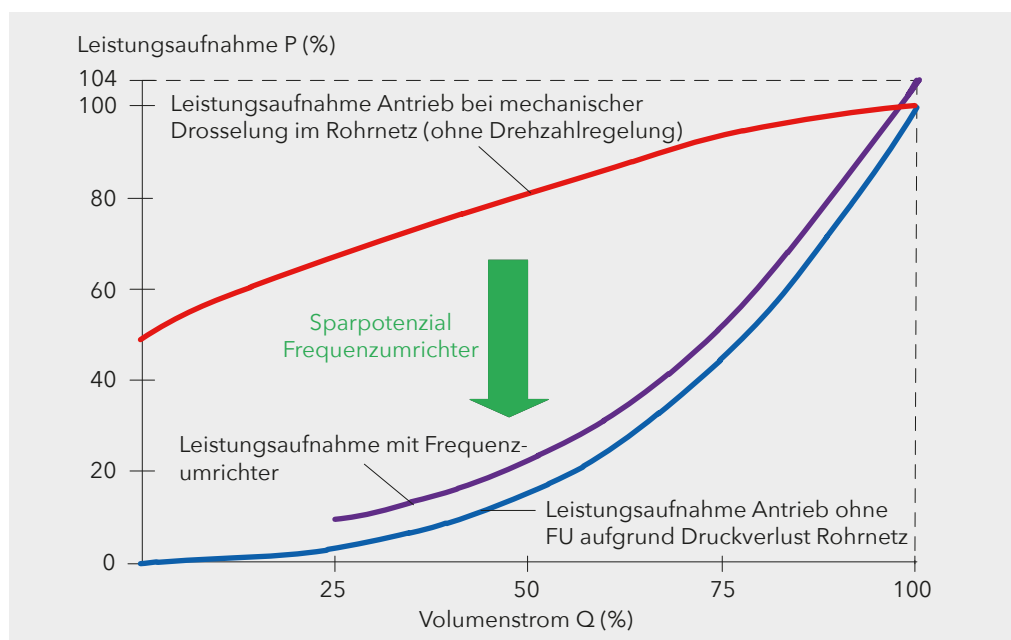


Abbildung 17: Sparpotenzial der Medienförderung mit Frequenzumrichter. (Quelle: Topmotors)

Weiter sind die Verluste des FU in der Abbildung 17 schematisch dargestellt. Auf Grund der Eigenverlusten des FU (in diesem Beispiel 4%) ist bei Nennlast ($Q = 100\%$) die Leistungsaufnahme des drehzahlvariablen Antriebes mit FU grösser ($P = 104\%$), als im direkten Netzbetrieb des Motors ohne FU ($Q = 100\%$, $P = 100\%$).

Eine Untersuchung von Topmotors bei 4 142 Antrieben in der Schweizer Industrie zeigte, dass rund 20% aller Antriebssysteme mit FU ausgerüstet sind, obwohl rund 50% dafür geeignet sind (Stand 2013).

Wichtige Hinweise zum Einsatz von Frequenzumrichtern

- Bei häufig vorkommendem, unterschiedlichem, Leistungsbedarf einer Anwendung: FU-Einsatz prüfen.
- FU nur für richtig dimensionierte Antriebe einsetzen; FU sind kein Heilmittel bei überdimensionierten Anlagen.
- Regelung der Drehzahl nach eindeutigem Bedarfskriterium mit entsprechenden Sensoren: Druck, Temperatur, Durchfluss, Volumen, etc.
- Ältere Motoren, die nicht für den Betrieb an Umrichtern gebaut wurden, sind dafür nicht unbedingt geeignet, da die Gefahr von Isolationsdefekten besteht.
- Sorgfältige Parametrierung der Sollwerte nach effektivem Bedarf.
- Lagerströme entstehen durch den Einsatz von FU bei elektrischen Antriebssystemen und können zu einem frühzeitigen Defekt der Lager führen. Weitere Informationen zu diesem Thema bietet das [Topmotors Merkblatt Nr. 31](#).

Nachteile von Frequenzumrichter

Frequenzumrichter an sich sparen keinen Strom ein- im Gegenteil. Sie haben einen Wirkungsgrad und generieren zusätzliche Eigenverluste, die es wieder einzusparen gilt. Zudem belasten Sie das elektrische Netz mit Oberwellen (Harmonische), die bei der Planung von Anlagen berücksichtigt werden müssen.

Das [Topmotors Merkblatt 25: Frequenzumrichter](#) liefert detaillierte Informationen über die Funktionsweise und Auswirkungen von FU.

Frequenzumrichter Preise

Frequenzumrichter (FU) werden zur kontinuierlichen Anpassung des Drehmomentes und der Drehzahl des Motors an die erforderliche mechanische Leistung eingesetzt. Da ein FU etwa gleich viel wie ein Motor kostet, ist sein Einsatz genau zu prüfen. Preise für FU unterliegen wie Motorenpreise einer grossen Schwankung. So ist es üblich, dass je nach Bestellvolumen und je nach Besteller aus unterschiedlichen Gründen verschiedene Rabattsätze gewährt werden. Abbildung 17 zeigt die FU-Preise in CHF/kW in Funktion der Nennleistung. Aktuelle Daten werden in Zukunft alle zwei Jahre im [Market Report](#) zur Verfügung gestellt.

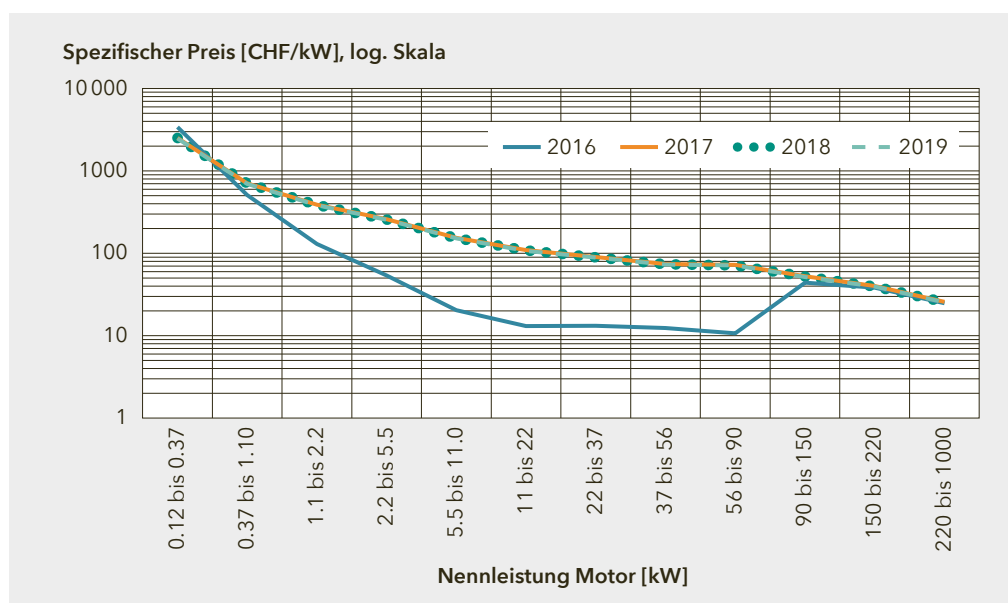


Abbildung 18: Spezifischer Preis für Frequenzumrichter in CHF/kW, 2016 - 2019, (Quelle: Topmotors Market Report, 2020)

Weiterführende Infos

Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Abkürzung, Formelzeichen	Einheit	Indizes und Erklärung
Antriebssystem	PDS		Englisch: power drive system. Besteht aus CDM und Motor
Erweiterter Produktbereich	EP		Englisch: extended product approach (EPA)
Frequenzumrichter	FU		Englisch: variable frequency drive (VFD), basic drive modul (BDM)
Komplettes FU-Modul	CDM		Englisch: complete drive module (CDM)
International Electrotechnical Commission	IEC		
Leistung	P	W	
Antriebssystem	PDS		Englisch: power drive system (PDS)
Wirkungsgrad	η	-	Angabe in % üblich

Normen, Gesetze, Verordnungen, Quellen

Normen

- IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code).
- IEC TS 60034-30-2:2016 Rotating electrical machines - Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code).
- IEC 61800-9-2:2017 Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics.
- EN 50598-3:2015 Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications - Part 3: Quantitative eco design approach through life cycle assessment including product category rules and the content of environmental declarations

Gesetze und Verordnungen

- Energiegesetz, Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte (SR 730.02 Energieeffizienzverordnung, EnEV) vom 1. November 2017 (Stand 1. Juli 2021), insbesondere Anhänge 2.6, 2.7 (Motoren und FU), 2.8 und 2.9
- Verordnung (EU) 2019/1781 vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Elektromotoren und Drehzahlregelungen, Geltungsbeginn betreffend die Energieeffizienz von Motoren und Frequenzumrichtern: 1. Juli 2021, siehe Art. 12. Die Verordnung (EG) Nr. 640/2009 wird per 1. Juli 2021 aufgehoben.

Quellen

- Baumgartner, W. Massnahmen zum Stromsparen bei elektrischen Antrieben, Bern, 2006
- Topmotors: Merkblätter Nr. 1-31, Website und Market Report 2020, Zürich, 2014 - 2020
- Förderprogramm EASY, Effizienz für Antriebssysteme, unveröffentlicht, Zürich, 2010 - 2014.

Weitere Informationen

- www.topmotors.ch - Die Informationsplattform für effiziente Antriebssysteme der Schweiz
- [Topmotors Merkblätter Nr. 1 bis 31](#), Zürich, 2014 bis 2020
- [Topmotors Market Report 2020](#), Zürich, 2021
- Topmotors INFO [Nr.1](#), [Nr.2](#) und [Nr.3](#), Zürich, 2021

Editorischer Vermerk

Das Topmotors Merkblatt Nr. 32 Leitfaden für die Optimierung elektrischer Antriebe wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Topmotors ist die Informationsplattform für effiziente Antriebssysteme der Schweiz und wird von EnergieSchweiz unterstützt. Das Merkblatt wurde von Rolf Tieben (iE) und Viktor Hangartner (iE) erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG. Das Merkblatt ist unter www.topmotors.ch in deutscher, französischer und englischer Sprache verfügbar.