



IEA 4E: Electric Motor Systems

Energieeffizienz- Leitfaden für Elektromotoren

Motor Leitfaden

November 2017

Ein Projekt im Rahmen der IEA-Forschungskooperation im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.

IEA FORSCHUNGS
KOOPERATION



Informationen zum Projekt

Durch die Finanzierung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie wird die Teilnahme Österreichs am Annex Motorsystems des Technology Cooperation Programme Energy Efficient Electric End-Use Equipment (IEA 4E) der Internationalen Energieagentur ermöglicht.

Projekttitel: IEA-4E: Annex Electric Motor Systems

Die Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA) hat im Jahr 2008 eine Technology Cooperation Programm zur Steigerung der Energieeffizienz von elektrischen Geräten mit hohem Energieverbrauch in die Wege geleitet.

Die Übereinkunft zielt auf die überstaatliche Zusammenarbeit ab, um politische Instrumente zur Forcierung der Energieeffizienz von Elektrogeräten zu etablieren. Das Technology Cooperation Programme on Energy Efficient End-use Equipment (IEA 4E) setzt daher beim Informationsaustausch im Technologiebereich und bei bereits bestehenden Programmen und politischen Instrumenten an.

Kernthema des internationalen Übereinkommens ist die Energieeffizienz von elektrischen Geräten für Verbraucher. Das Augenmerk liegt dabei besonders auf Gerätetechnologien, deren Energieverbrauch hoch ist und die gleichzeitig stark am Markt vertreten sind

Hier sollen weltweit nach neuen Technologien, Normen und Messmethoden im Bereich Motorsysteme geforscht und neue Entwicklungen präsentiert werden.

Österreich beteiligt sich innerhalb der überstaatlichen Vereinbarung zur Steigerung der Energieeffizienz u.a. am Projekt „Annex Electric Motor Systems“. Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie beauftragte über die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH als unmittelbarer Vertreter die Österreichische Energieagentur mit der Projektleitung für Österreich.

Dieser Leitfaden dient zur Verbreitung interessanter Erkenntnisse aus dem Annex.

Impressum

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency,
Mariahilfer Straße 136, A-1150 Wien; Tel. +43 (1) 586 15 24, Fax +43 (1) 586 15 24 - 340;
E-Mail: office@energyagency.at, Internet: <http://www.energyagency.at>

Für den Inhalt verantwortlich: DI Peter Traupmann

Autor: Mag. DI Konstantin Kulterer

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency

Verlagsort und Herstellungsort: Wien

Nachdruck nur auszugsweise und mit genauer Quellenangabe gestattet. Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis

1. Motorpolitik	2
1.1 Beschaffungsvorgaben.....	2
1.2 Motoreninventurliste	6
1.3 Richtlinie zum Ersatz	6
1.4 Technische Abnahme	7
1.5 Reparatur	8
2. Motortechnologien	10
2.1 Drehstrom-Asynchronmotor	10
2.2 Permanentmagnet-Motoren.....	12
2.3 Synchronreluktanz-Motoren.....	12
2.4 Switched Reluctance Motoren	13
3. Auslegung/Auslastung.....	14
4. Installation und Energieeffizienz.....	17
4.1 Mangelnde Ausrichtung.....	17
4.2 Nicht ausreichende Belüftung.....	18
5. Antrieb	19
5.1 Riemenantrieb.....	19
6. Regelung	22
6.1 Lastverlauf	22
6.2 Regelungsvarianten für Pumpen und Ventilatoren	22
6.3 Vergleich der Regelungsvarianten bei quadratischer Last.....	24
6.4 Energieeinsparung bei linearer Last	25
7. Frequenzumformer	27
7.1 Zu berücksichtigende Aspekte	28
8. Analyse	34
8.1 Basissystembeschreibung.....	34
8.2 Grobanalyse 1: 1-2-3 Test.....	35
8.3 Dokumentation und Messung der Systembetriebsparameter	35
8.4 Audit- Fragen	36
9. Empfehlungen zur Wartung von E-Motoren	37
10. Quellen	41
11. Annex-Mindestwirkungsgrade nach der Ökodesign-Richtlinie43	

1. Motorpolitik

Die Motorpolitik gibt mittel- und langfristig den Rahmen für den effizienten Einsatz von Motorsystemen im Unternehmen vor. Das Ziel ist der Einsatz von Motorsystemen der höchsten Effizienz unter ökonomischen Bedingungen. Sie vermeidet daher den Einsatz von Motoren geringerer Effizienz aus zeitlichen, Kosten- oder organisatorischen Gründen.

Eine Motorpolitik definiert die Aspekte

- Definition von Beschaffungskriterien
- Erstellung einer Motoreninventurliste
- Richtlinien zum Ersatz
- Vorgaben zur technischen Abnahme
- Abläufe zur Reparatur

1.1 Beschaffungsvorgaben

Lebenszykluskosten

Die Betriebskosten eines Elektromotors verursachen über 90% der Lebensdauerkosten. Die Wahl des Motorsystems mit dem geringsten Energieverbrauch ist daher in der Regel auch die ökonomisch günstigste Lösung.

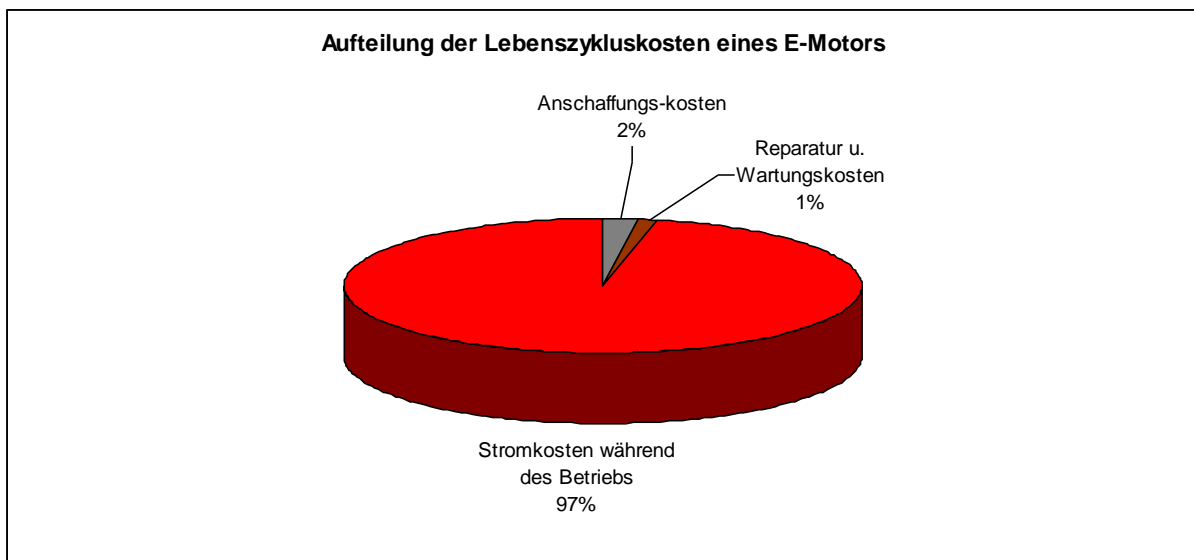


Abbildung 1 Lebenszykluskosten eines Elektromotors: IE3 Motor, 11 kW, 4.000 h, 15 Jahre (Almeida, et.al, 2008)

Bestandteile der Lebenszykluskosten:

- **Beschaffungspreis und Installationskosten** (evt. Planungskosten, Kosten eines FU)
- **Betriebskosten**
 1. Überprüfung der tatsächlich erforderlichen Leistung, Überprüfung der maximal auftretenden Last bzw. des max. Drehmoments (die meisten Motoren sind stark überdimensioniert)
 2. Erstellung eines Lastprofils (erwartete Auslastung in Abhängigkeit der Produktion), Jahresbetriebsstunden
 3. Erhebung der Wirkungsgrade für die wichtigsten Auslastungszustände
 4. Errechnung der Stromkosten über Lebensdauer und Strompreis und entsprechender Abzinsung.
- **Wartungskosten**, Reparaturkosten, Kosten für Schmiermittel

Energieeffizienz

Die Energieeffizienz von Elektromotoren werden mit dem neuen Standard (IEC 60034-30) in vier Klassen mit steigender Effizienz (IE1 bis IE4) eingeteilt. IE3 Motoren ab einer Laufzeit von 2.000 h haben geringere Lebenszykluskosten als IE1 oder IE2 Motoren. IE5 Motoren zeichnen sich durch nochmals geringere Verluste aus als IE4 Motoren..

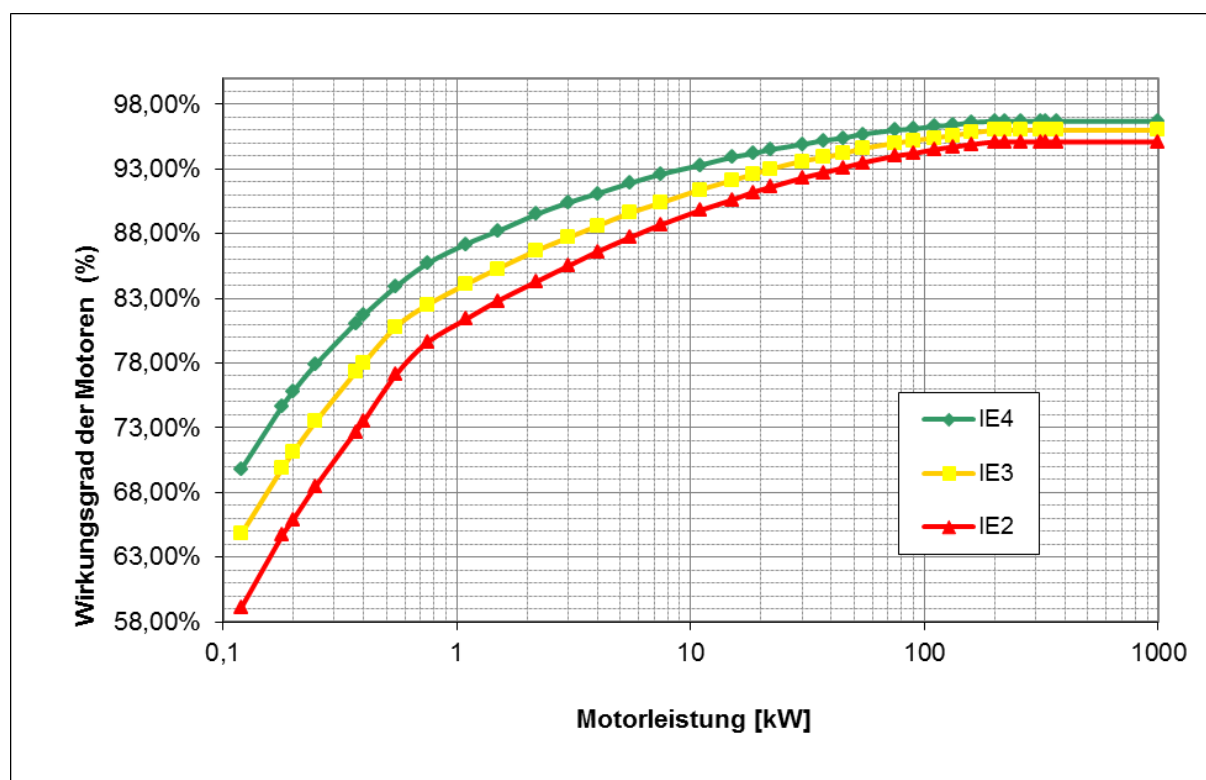


Abbildung 2 Wirkungsgradanforderungen für Elektromotoren (als Beispiel für 4-polige AC-Motoren) lt. IEC Standard 60034-30, 2014, eigene Darstellung

Beispiel 1: Berechnung der statischen Amortisationszeit der Mehrkosten eines IE3 Motors gegenüber einem IE2 Motor

Tabelle 1 Einsparbeispiel-Berechnung, Neukauf

Motor	Leistung [kW]	Auslastung	Laufzeit [h]	Wirkungs-grad	Jährl. Stromkosten [EUR]*	Invest. kosten [EUR]
IE2 Motor	15	75%	4.500	90,60%	6.705	700
IE3 Motor	15	75%	4.500	92,10%	6.596	900
Differenz					109	-200
Amortisation (statisch)						1,8 Jahre

* Strompreis 12 Cent/kWh

Lebensdauer

Die durchschnittliche Lebensdauer eines Motors bis zum ersten Ausfall beträgt ca. 10 Jahre. Die tatsächliche Lebensdauer kann aber über 20-30 Jahre betragen. Das heißt, dass die Effizienz eines Elektromotors langfristige Auswirkungen hat und hocheffiziente Motoren nach Erreichen der Amortisationszeit jedes Jahr Geld sparen („Golden End“).

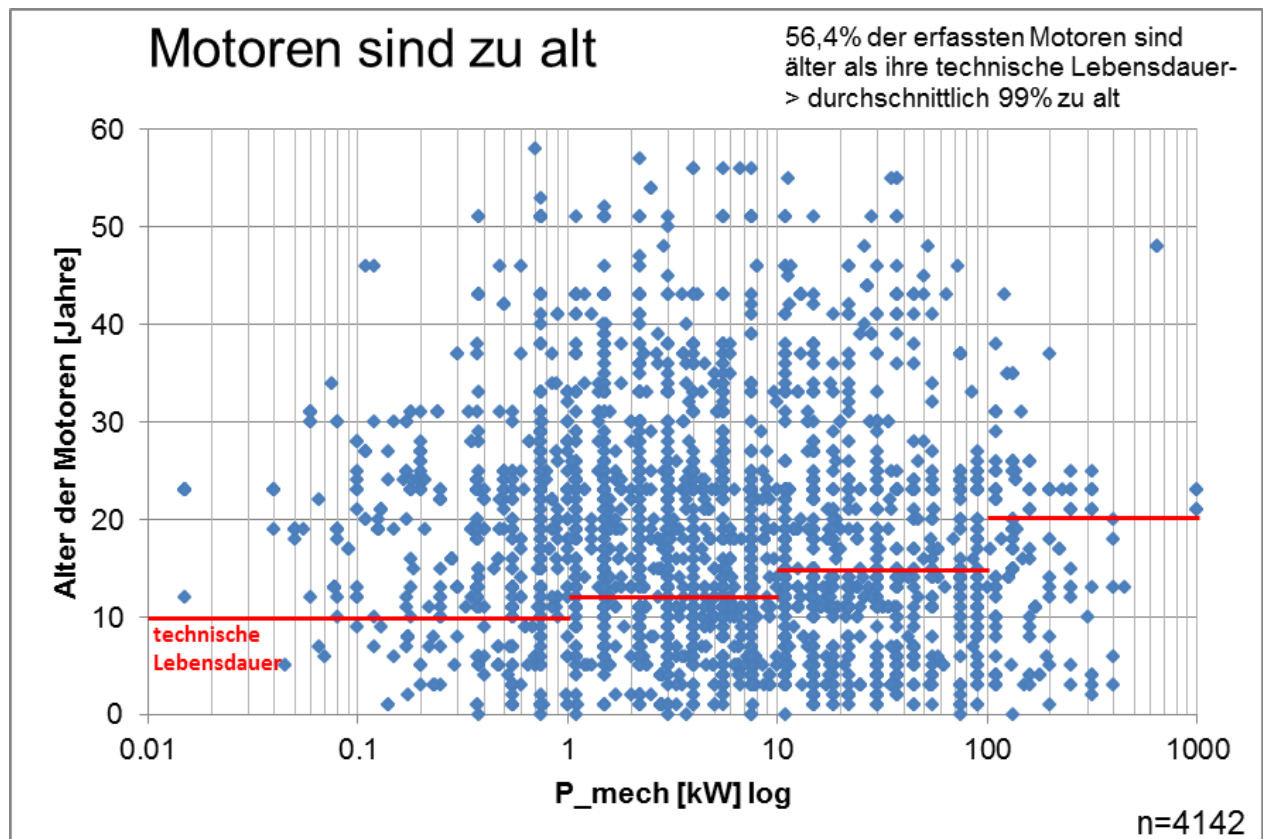


Abbildung 3 Alter von 4.142 erfassten Motoren im Rahmen des Topmotors-Programm in Abhängigkeit der Leistung (S.A.F.E. 2014)

Tabelle 2 Durchschnittliche Lebensdauer eines AC-Motors in Abhängigkeit der Leistung (IEC, 2009, S 29)

Lebensdauer	0,75 bis 1,1 kW	1,1 bis 11 kW	11 bis 110 kW	110 bis 370 kW
In Jahren	10	12	15	20

Weitere wichtige Punkte für die Definition von Beschaffungsvorgaben

- Vergleich der Lebenszykluskosten (wie oben beschrieben)
- **Beschaffung eines IE4 Motors** (IEC 60034-30) bzw. jenes **Motors mit den geringsten Lebenszykluskosten** und höchsten Wirkungsgraden in den vorgegeben Teillastbereichen
- Auswahl eines Lieferanten nach Erfahrungswerten, Branchenerfahrung, Qualität, Lieferumfang, Lieferzeit
- Verhandlung von Rabatten für Motorenbestellungen bei Auswahl eines einzigen Lieferanten bzw. über die Konzernzentrale
- Berücksichtigung moderner Regelsysteme bei variablen Lasten (unbedingt bei Pump- und Lüftungsanwendungen)
- Einsatz von hocheffizienten Antriebsarten (Direktantrieb, hocheffiziente Riemen), Vermeidung von Schneckenradantrieben
- Einfordern von Unterlagen auf Deutsch: Technische Beschreibung, Maßzeichnung, Montage- und Betriebsanleitung, Konformitäts- bzw. Herstellererklärung, Baumusterprüfbescheinigung für EEx e und EEx de; Weiters: Ersatzteillisten, div. Prüfprotokolle, Wickelschema und Leerlaufstrom und Strangwiderstand;
- Korrekte Installation: Fluchtung, ausreichende Kabelquerschnitte usw.

Ex-Schutz

Festlegung der Anforderungen hinsichtlich Explosions-Schutzes sind in vielen Fällen notwendig. Die Normalausführung ist für die Zündschutzart Non Sparking „EEx nA“ Betrieb am Netz in Zone 2 Temperaturklasse T3 geeignet.

Grundsätzlich gilt der IEC Standard IEC 60034-30 auch für Motoren höherer Ex-Schutzanforderungen. Allerdings ist es möglich, dass Motoren für bestimmte Anforderungen höhere IEC Standards (IE2 oder IE3) nicht erreichen können. Z.B. erhöhte Sicherheit „e“ aufgrund der Anforderungen an den Luftspalt und Anlaufstrom; Motoren mit Gehäusen zum Staubschutz mit „t“ oder „tD“ Kennzeichnung haben zusätzliche Wellendichtungen, was sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirken kann.

Schmierung

Fordern Sie bei Motoren mit Lager mit Lebensdauerschmierung folgende Gebrauchsdauer ein (bei 40°C Kühlmitteltemperatur):

- 2 polige Motore: 20.000 h
- 4 und mehrpolige Motore: 10.000 h

Tabelle 3 Empfehlung für Nachschmierfristen für Motoren ab Achshöhe 250 mit Nachschmiereinrichtung (VIK, 2005)

Empfehlung für einzufordernde Nachschmierfristen	2 polig	4 und mehrpolig
Kühlmitteltemperatur 40°C	2.500 h	4.000 h
Kühlmitteltemperatur 25 °C	5.000 h	10.000 h (bis zu 40.000 h)

1.2 Motoreninventurliste

Defekte Motoren werden vielfach repariert oder über den Lagerbestand ersetzt. Effizientere Motoren kommen daher nicht zum Einsatz. Für den raschen Austausch alter Motoren durch neue Hocheffizienz-Motoren sind daher folgende Schritte notwendig:

- Erarbeitung einer Motoren-Liste der eingesetzten Motoren mit den wichtigsten Parametern (Schwerpunkt auf Motoren mit Laufzeiten über 8 Stunden am Tag)
- Inventur der Motoren auf Lager (Typenschilddaten, Anwendungsmöglichkeit)
- Erstellung einer einfachen Regel ab wann Reparatur oder Ersatz sinnvoll ist, nach Leistungsklassen, Laufzeit und Stromkosten, Reparaturkosten (z.B. bis 30 kW)
- Plan zum Ersatz der Motoren, je nach Alter, Wartungsaufwand, Leistung, Laufzeit (Reparatur, IE2, IE3 Motoren vom Lager oder zu bestellen):
 - Rascherer Ersatz von laufenden Motoren (bei schlechten Wirkungsgraden, hohem Energieverbrauch) während Betriebsstillständen
 - Ersatz von Standard-Effizienz (evt. auch eff2!) Motoren durch IE3 Motoren bei Ausfall
- Absprache mit dem Lieferanten über Lieferzeiten bzw. Lagerhaltung von hocheffizienten Motoren (IE3) je Leistungsklassen
- Für bestimmte kritische Motoren und gewisse Leistungsklassen (z.B. bis 30 kW) Lagerhaltung von hocheffizienten Motoren (falls Lager des Lieferanten diese nicht umfasst)
- Evt. Verkauf der weniger effizienten Motoren aus dem Lagerbestand

1.3 Richtlinie zum Ersatz

Die Regel, ab wann Reparatur oder Ersatz sinnvoll ist, ist abhängig von den jeweiligen Kosten für den Motorersatz (Kosten für Kauf und Installation), den alternativen Reparaturkosten, dem Wirkungsgrad des IE3 Motors und des alten Motors (nach Reparatur), der Laufzeit und den Stromkosten. Die Regel könnte z.B. wie folgt aussehen.

Motoren bis 30 kW werden ersetzt, 50 kW Motoren ab einer Laufzeit von ca. 3.000 h, 75 kW Motoren ab 3.500 h, 100 kW Motoren ab 4.000 h, 150 kW Motoren ab 5.000 h.

Ein neuer Motor hat aber auch eine längere Garantie.

1.4 Technische Abnahme

Eine technische Abnahme sollte bei Neuinstallation, nach umfangreicher Reparatur oder wenn sich die technischen Parameter des Prozesses wesentlich geändert haben, erfolgen.

Die Standort-Techniker müssen dazu die erforderliche Zeit und die entsprechende Verantwortung für diese Tätigkeit erhalten. Außerdem sollten sie eine entsprechende Unterweisung oder Ausbildung erhalten und die Ergebnisse entsprechend dokumentieren.

Bei der Abnahme muss die Übereinstimmung des gelieferten Geräts mit den definierten Prozessparametern und den Herstellerangaben hinsichtlich mechanischer und elektrischer Aufstellung erfolgen. Die vollständige Dokumentation (Installationsanforderungen, Betriebshandbuch und Wartungsspezifikationen) ist ebenfalls zu überprüfen.

Beispiele für Themen, die bei der Abnahme beachtet werden sollten, sind:

Ein Hineinfallen von Anschlussteilen in das Motorinnere muss vermieden sein. Anschlussraum und Klemmen müssen zum Anschluss von Kabeln bzw. Leitungen ausreichend bemessen sein.

Eine korrekte Ausrichtung bzw. Fluchtung der Motoren mit den angetriebenen Komponenten ist wesentlich. Nach erfolgten Schweißarbeiten (z.B. Flanschen von Pumpen) sollte die Ausrichtung daher überprüft werden.

Weitere Punkte:

- Passendes Fundament und Unterkonstruktion
- Motoren-Füße individuell unterlegt
- geeignete Umgebungstemperatur
- ausreichende Beflüftung
- geeignete Erdung
- saubere elektrische Anschlüsse
- passende Riemenscheiben und ausreichende Spannung der Riemen

Außerdem ist auf die Unterweisung bzw. das Training der Arbeiter vor Ort mit dem Gerät zu achten.

1.5 Reparatur

Das Neubewickeln eines Motors ist in der Industrie weit verbreitet. Dies ist manchmal billiger und rascher, als einen neuen Motor zu kaufen allerdings abhängig von folgenden Faktoren:

Ursache des Ausfalls, Alter und Wirkungsgrad des ausgefallenen Motors, jährliche Betriebszeiten des Motors, Qualität der Reparatur und damit Wirkungsgrad nach der Reparatur.

Der Wirkungsgrad des bestehenden Motors kann aber (auch aufgrund des Alters) bereits relativ niedrig sein. Schlechtes Neubewickeln des Motors kann diesen Wirkungsgrad um 0,5 % (manchmal um 4%) weiter reduzieren.

Die Mehrkosten des neuen Motors gegenüber einer Reparatur können sich daher unter Umständen aufgrund des höheren Wirkungsgrades und der hohen Laufzeit rasch rechnen.

Das Wickeln lohnt sich jedenfalls nur bei Sondermotoren und Drehstrom-Normmotoren ab einer Leistung von 15 bis 30 kW, weil neue kleine Normmotoren preisgünstiger sind als die Lohnkosten und das Material für Reparatur.

Besondere Aufmerksamkeit muss dabei der Reparatur und der ausführenden Firma geschenkt werden, die vom Motorhersteller anerkannt sein muss. Die Spezifikation für die Reparatur sollte enthalten, dass der reparierte Motor dem Original-Motor entspricht. Sie sollten die Ergebnisse der durchgeführten Tests einfordern (evt. auch Angabe der verwendeten Geräte). Außerdem könnte eine Übereinstimmung getroffen werden, wenn nach Überprüfung statt der Reparatur ein neuer Motor von einem anderen Lieferanten gekauft wird.

Kriterien für die Auswahl der Reparatur-Werkstätte könnten sein:

- ISO 9001 Zertifikat, in manchen Ländern (Australien, USA) existieren Standards oder „Codes of Practice for Rewinders“;
- Fehlerreporting des ausgefallenen Motors;

Berechnung der Amortisationszeit bei Kauf eines Hocheffizienzmotors im Vergleich zur Reparatur eines alten Motors:

Wie lange benötigt der Hocheffizienzmotor, um seine Mehrkosten gegenüber der Reparatur durch seinen geringeren Energieverbrauch im Vergleich zum reparierten Motor zu "verdienen"?

$$\text{Amortisationszeit (Jahre)} = \frac{\text{KostenIE3} - \text{KostenREP.}}{\text{Leistung} \times \text{Laufzeit} \times \text{Strompreis} \times \left[\frac{100}{\eta_{\text{REP.}}} - \frac{100}{\eta_{\text{IE3}}} \right]}$$

Annahmen:

Grob wird mit Mehrkosten des IE3 Motors von ca. 25% (gegenüber IE2, eff1) gerechnet, die Reparaturkosten betragen ca. 40% der Kosten eines neuen Motors. Dafür nimmt die Effizienz um rund 1% ab.

Beispiel: Errechnung Amortisationszeit der Mehrkosten eines IE3 Motors gegenüber Reparatur eines IE1 Motors

Wirkungsgrad IE1 (88,7%) minus dem Wirkungsgradverlust durch Reparatur (0,9%): 87,8%

Tabelle 4 Einsparbeispiel-Berechnung, Reparatur

Motor	Leistung [kW]	Auslastung	Laufzeit [h]	Wirkungsgrad	Jährl. Stromkosten [EUR]*	Einmal-Kosten [EUR]
IE1 Motor (nach Reparatur)	15	75%	4.500	87,8%	6.919	220 (Reparatur)
IE3 Motor	15	75%	4.500	92,1%	6.596	900 (Neu)
Differenz					+323	-680
Amortisation (statisch)						2,1 Jahre

*Strompreis: 12 Cent/kWh

Ergebnis: Nach 2,1 Jahren hat der effiziente Motor seine Mehrkosten gegenüber den Kosten zur Reparatur des alten Motors durch die geringeren Energiekosten „verdient“.

2. Motortechnologien

In diesem Kapitel gibt einen Überblick über die derzeit mit Abstand weitverbreitetste Motortechnologie (Drehstrom-Asynchronmotor) und beschreibt auch die Vor- und Nachteile weiterer Motortechnologien, die in den letzten Jahren aufgrund von Effizienzvorteilen insbesondere im Teillastbereich wieder an Marktanteil gewinnen.

2.1 Drehstrom-Asynchronmotor

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist der am meisten verwendete Industriemotor. Er wird ans Netz geschaltet und mit nahezu konstanter Drehzahl in Abhängigkeit der Polzahl am 50 Hz-Netz mit knapp 3000/min, knapp 1500/min, knapp 1000/min oder knapp 750/min betrieben. (Formel: $n = f \times 60 / \text{Polpaarzahl} - \text{Schlupf}$). Er ist sehr robust gegenüber elektrischer und mechanischer Überlastung.

Die wichtigsten Bestandteile eines Drehstrom-Asynchronmotors sind in Abbildung 4 ersichtlich.

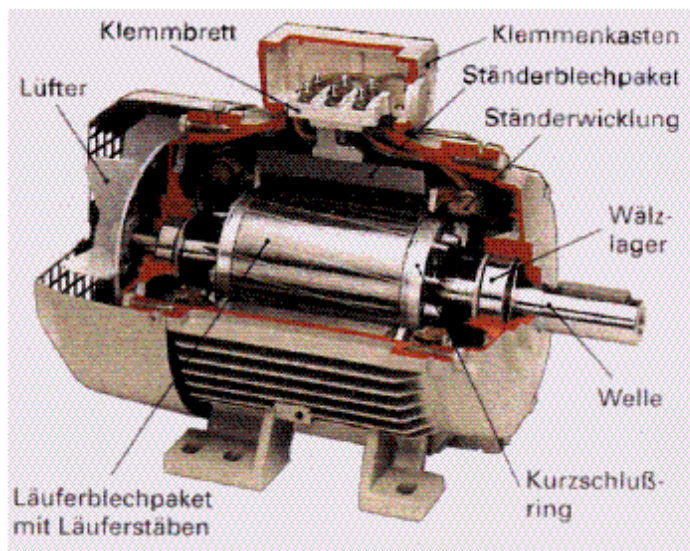


Abbildung 4 Komponenten eines Drehstrom-Asynchronmotors, (SEW Eurodrive, 2004, S4)

In der einfachsten, am häufigsten vorkommenden Bauart (Käfigläufer) besteht der Läufer aus einem auf die Welle aufgetragenen Blechpaket und den in Nuten eingesetzten oder eingegossenen Leiterstäben aus Aluminium oder Kupfer. Jeweils an den Stirnseiten sind die Leiterstäbe durch Kurzschlussringe verbunden und bilden damit die Läuferwicklung. Aufgrund der Form der Läuferwicklung nennt man den Läufer auch Kurzschlussläufer.

Im Rotor wird ein Magnetfeld induziert, das mit dem Statorfeld interagiert. Der Asynchronmotor hat seinen Namen von der Tatsache, dass er sich nicht genau mit dem Drehfeld des Ständers dreht. Die Geschwindigkeit des Drehfeldes wird von der Frequenz der Spannung bestimmt. Er entwickelt nur Drehmoment, wenn seine Drehzahl von der Drehfeldfrequenz abweicht. Im Betriebsbereich ist das Drehmoment proportional zu dieser Abweichung, welche als Schlupf bezeichnet wird.

Im Anlauf wirkt bereits das 2–3 fache Drehmoment (Anlaufmoment) des Nenn-Drehmoments, das den Läufer aus dem Stillstand in Bewegung setzt. Es entsteht ein Anlaufstrom vom 3,5–7-fachen des Nennstroms.

Der Drehstromasynchronmotor ist sehr robust, praktisch wartungsfrei und im Vergleich zu anderen Elektromotorarten die preiswerteste Lösung. Die Betriebseigenschaften bei Netzbetrieb, abhängig von Nennleistung PN (Bemessungsleistung) und Polzahl, sind:

- Hoher Anlaufstrom I_A (3,5–7-faches des Nennstroms)
- Hohes Anlaufmoment M_A (2–3-faches des Nenn-Drehmoments)
- Lastabhängige Drehzahl n (Schlupfwerte 2 bis 8 %, das entspricht einem Drehzahlfall von 30 bis 120 Umdrehungen pro Minute bei Nenn-Drehmoment, bezogen auf 1500 min⁻¹ bei einem 4-poligen Motor)
- Zulässiges Drehmoment – Überlastbarkeit zwischen dem 1,6- bis 1,8-fachen des Nenn-Drehmoments. Bei höherer Belastung steigt die Kippgefahr, der Motor bricht in der Drehzahl ein und wird innerhalb kurzer Zeit (zwischen 10 und 30 Sekunden) seine maximal zulässige Grenztemperatur erreichen.
- Begrenzte Schalthäufigkeit (thermisch zulässige Anzahl von Einschaltungen pro Stunde) abhängig vom Massenträgheitsmoment
- Kippmoment beträgt das ca. 2,2- bis 3-fache des Nenn-Drehmoments.

Einsatz Hoch-Effizienter Asynchron-Elektromotoren

Hocheffiziente Elektromotoren sind besonders sinnvoll in Anwendungen mit einer hohen Anzahl von Betriebsstunden in einem Lastbereich von über $\frac{3}{4}$ der Last.

Aufgrund besseren Temperaturmanagements im Motor halten die Motoren kurzfristig Überlastungen besser aus, sie können daher für bestimmte Anwendungen besser an den tatsächlichen Anwendungsfall angepasst werden.

Weitere Vorteile sind die geringere Temperaturentwicklung und die leisere Belüftung.

Beim Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren sind zu beachten:

- Effizientere Motoren (z.B. IE3 Motoren) haben einen geringeren Schlupf als ineffiziente Motoren (IE1 oder IE2) und damit eine höhere Drehzahl um 1 bis 5%. Das kann den unerwünschten Effekt haben, dass bei Ersatz des Motors ein höherer Förderstrom bzw. Volumenstrom gefördert wird und sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Bei Anwendungen mit quadratischem Verlauf des Drehmoments (Pumpen, Ventilatoren) führt dies zu einer Erhöhung der Leistungsaufnahme mit der 3. Potenz des Volumenstroms. Ohne Kompensation dieses Effektes geht der Effizienzgewinn des neuen Motors wieder verloren. Durch bessere Auswahl des Ersatzventilators oder der Ersatzpumpe oder durch Anpassung der Transmissionsübersetzung (oder Einsatz eines Frequenzumrichters) lässt sich dieser Effekt vermeiden. (Merkblatt 24 Luftförderung topmotors)
- Hocheffiziente Asynchronmotoren verringern die Verluste durch besser leitendes Rotormaterial (z.B. Kupfer anstatt Aluminium). Aufgrund der der höheren Trägheit (Masse) vergrößert sich die Anlaufzeit und der Leistungsbedarf beim Wegdrehen.

Damit verbunden sind auch eine Reduktion der maximal möglichen Starts pro Stunde und eine höhere Anforderung an Bremsen.

2.2 Permanentmagnet-Motoren

Permanentmagnet-Motoren (PM-Motor) haben im Gegensatz zum Asynchronmotor einen magnetisierten Rotor, es muss also kein dem Stator-Magnetfeld entgegengesetztes Feld im Rotor induziert werden. Das heißt, dass die im Asynchronmotor durch Ummagnetisierung des Eisens im Rotor entstehenden Induktionsverluste beim PM-Motor entfallen und der Rotor sich synchron mit dem Statorfeld dreht. Auf Grund der fehlenden Ummagnetisierungsverluste reduziert sich die Stromaufnahmen des Motors, was wiederum zur Verringerung der Stromwärmeverlusten in der Statorwicklung führt. Der PM-Motor hat dadurch eine höhere Effizienz und kann auf Grund der geringeren Verluste und der höheren Energiedichte kompakter gebaut werden als ein in der Leistung vergleichbarer Asynchronmotor. Die Verwendung eines Permanentmagnet-Motors erfordert allerdings den Betrieb mit einer elektronischen Steuerung (Frequenzumrichter).

Einsatzgebiete von Permanentmagnet-Motoren

- Überall, wo hohe Einschaltzeiten zu erwarten sind und der Motor nicht direkt am Netz betrieben wird.
- Pumpen, Ventilatoren, Extruder, usw.

Permanent-Motoren sind nicht einzusetzen

- Bei direktem Netzanschluss (ohne FU), also bei konstantem Nennlastbetrieb ist ein Asynchronmotor besser geeignet.

Vorteile der Permanent-Motoren

- Kosteneffizienz - insbesondere bei hoher Einschaltdauer und im Teillastbereich, wie z.B. bei Pumpen, Lüftern, Förderanlagen geht man von einer Amortisation der höheren Anschaffungskosten innerhalb von 1,5 Jahren (je nach Anwendungsfall) aus.
- Kompakte Bauform – bei gleicher Leistung ca. eine Motor-Baugröße kleiner und damit auch leichter als ein Asynchronmotor, was zu geringeren Montage- und Transportkosten führt.
- Es gibt auch PM-Motoren für den Ex-Bereich.

2.3 Synchronreluktanz-Motoren

Derzeit finden Synchronreluktanz-Motoren aufgrund ihrer Effizienz, die der höheren Effizienzklasse (IE4) entspricht, vor allem in Pumpen-, Ventilator- und Kompressorenmaschinen Anwendung.

Ein Synchronreluktanz-Motor hat einen Rotor (Läufer), der als Blechpaket aus Elektroblechen ausgeführt ist. Diese Bleche weisen eine besondere Schnittgeometrie (Flusssperrenschnitt) auf, um eine möglichst stark ausgeprägte magnetische Achsigkeit zu erreichen. Der Stator ist wie bei anderen Drehfeldmaschinen aufgebaut, und die drei Strangwicklungen werden von drei um 120° elektrisch versetzte Wechselspannungen angespeist.

Der Reluktanzmotor in der üblichen Ausführung - ohne Anlaufkäfig im Rotor - kann nicht asynchron anlaufen und ist daher für den Betrieb am normalen Stromnetz nicht geeignet. Er muss mittels Frequenzumrichter betrieben werden.

Vorteile

- Höherer Wirkungsgrad, keine Verluste im Läufer
- Geringe Lagertemperaturen, daher höhere Standzeiten
- Hohe Dynamik, da kleines Schwungmoment

Nachteile

- Betriebsweise nur mit Frequenzumrichter

2.4 Switched Reluctance Motoren

Bei einer geschalteten Reluktanz Maschine (SRM) sind die Statorzähne mit Spulen bewickelt, die abwechselnd ein- und ausgeschaltet werden. Der Rotor besteht aus magnetischem Stahl. Die Zähne mit den bestromten Wicklungen ziehen jeweils die nächstgelegenen Zähne des Rotors wie ein Elektromagnet an und werden abgeschaltet, wenn (oder kurz bevor) die Zähne des Rotors den sie anziehenden Statorzähnen gegenüberstehen. In dieser Position wird die nächste Phase auf anderen Statorzähnen eingeschaltet, die andere Rotorzähne anzieht. Diese Motoren sind mit elektronischen Steuerungen (FU) ausgestattet, was Vorteile für den kontrollierten Motorstart, die Geschwindigkeitskontrolle u.a. ergibt.

Vorteile

- Einfache, robuste Stahlkonstruktion des Rotors (keine Bürsten, Wicklungen oder Magnete) mit minimalen Rotorverlusten und keine Grenze für Anfahrvorgänge
- Reduzierte Schaffttemperaturen, daher höhere Lebensdauer
- Keine Magnete im Stator, einfache Wicklungen
- Großer Drehzahlbereich von wenigen Umdrehungen bis 100.000 Umdrehungen
- Einfaches Design ermöglicht Einsatz unter schwierigen Umgebungsbedingungen, z.B. sehr hohen Umgebungstemperaturen

Nachteile

- Möglicherweise lauter durch akustisches Rauschen, dies kann über die elektronische Steuerung reduziert werden
- Stärkere Vibrationen

3. Auslegung/Auslastung

Die nachfolgenden Bilder zeigen die verschiedenen Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien von Antriebsmaschinen. Diese Eigenschaften beeinflussen die Auswahl eines Antriebes. Es gilt:

$$P = (M \cdot n) / 9550$$

mit P [kW], M [Nm], n [min⁻¹]

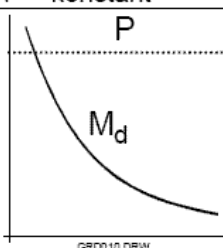
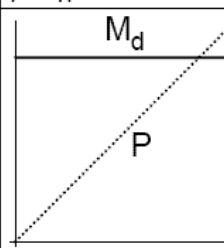
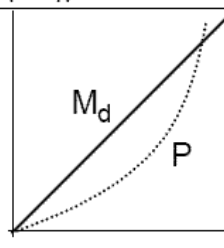
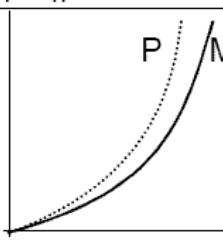
$M_d \sim \frac{1}{n}$	$M_d = \text{konstant}$	$M_d \sim n$	$M_d \sim n^2$
P = konstant	$P \sim n$	$P \sim n^2$	$P \sim n^3$
			
Wickelantriebe Spindelantriebe, für: Plandrehen Rundschalen	Hebezeuge Förderbänder Walzwerke Hobelmaschinen Verarbeitungsmasch.	Kalander mit viskoser Reibung Wirbelstrombremsen	Pumpen Lüfter Zentrifugen

Abbildung 5 Drehzahl-Drehmomenten Kennlinien von Antriebsmaschinen (SEW Eurodrive 2004, S3)

Zur Dimensionierung muss das vom Motor geforderte Last- und Beschleunigungsmoment mit dem zur Verfügung stehenden Motormoment verglichen werden. Hierzu müssen die Drehmomentkennlinien eines Motors herangezogen werden. Diese sind jeweils in den Motorenkatalogen abgebildet. Der Schnittpunkt dieser Linien sollte so nahe wie möglich am Nenndrehmoment des Motors liegen. Bei angetriebenen Maschinen mit einer abfallenden Drehmomentlinie ist darauf zu achten, dass das Wegdrehen des Motors möglich ist.

Unter 40% der vollen Leistung arbeitet ein Elektromotor nicht mehr unter optimalen Bedingungen und der Wirkungsgrad fällt dann rasch ab, bei größeren Motoren ab ca. 15 kW liegt dieser Wert bei ca. 30%.

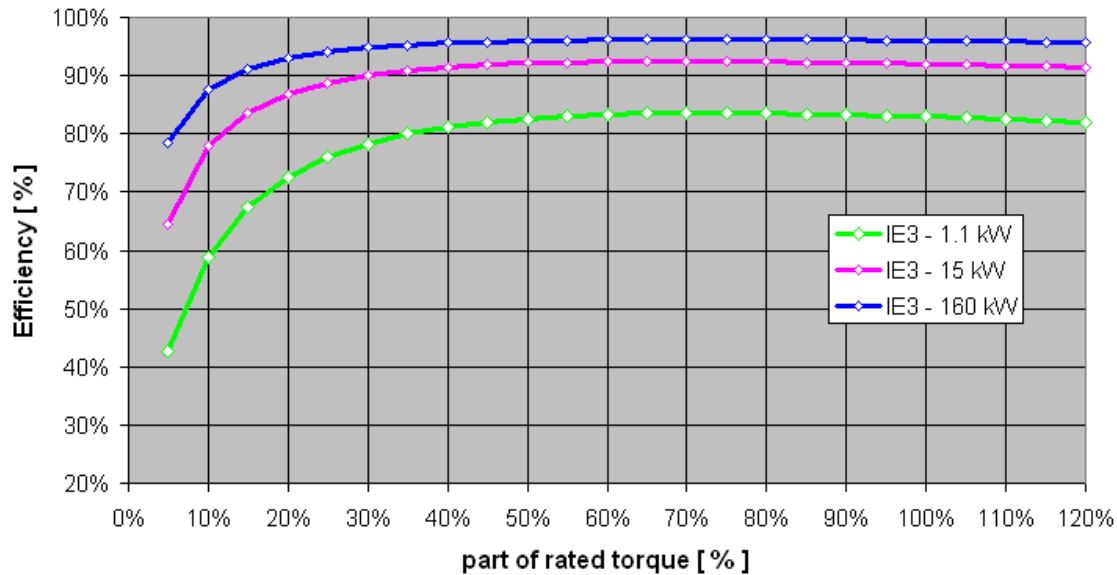


Abbildung 6 Wirkungsgrad von IE3 Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen in Abhängigkeit von der Auslastung (A. Almeida, 2014a, S.6)

Eine Überdimensionierung eines Motors führt zu:

- Erhöhung der Kapitalkosten aufgrund des größeren Motors
- Verminderung des operativen Wirkungsgrades (s.u.)
- Erhöhung der Drehzahl, falls keine Regelung vorhanden ist. Dies führt zu einer maßgeblichen Änderung in der Last und des Jahresenergieverbrauchs. Beispielsweise führt ein schmaler Anstieg der Drehzahl (zB von 1440 U/min auf 1460 U/min (+1,4%) bei einem Ventilator oder einer Pumpe zu einem 4% Anstiegs des Leistungsbedarfs und des Energieverbrauchs.
- Der Leistungsfaktor sinkt mit abnehmender Auslastung. (s.u.)

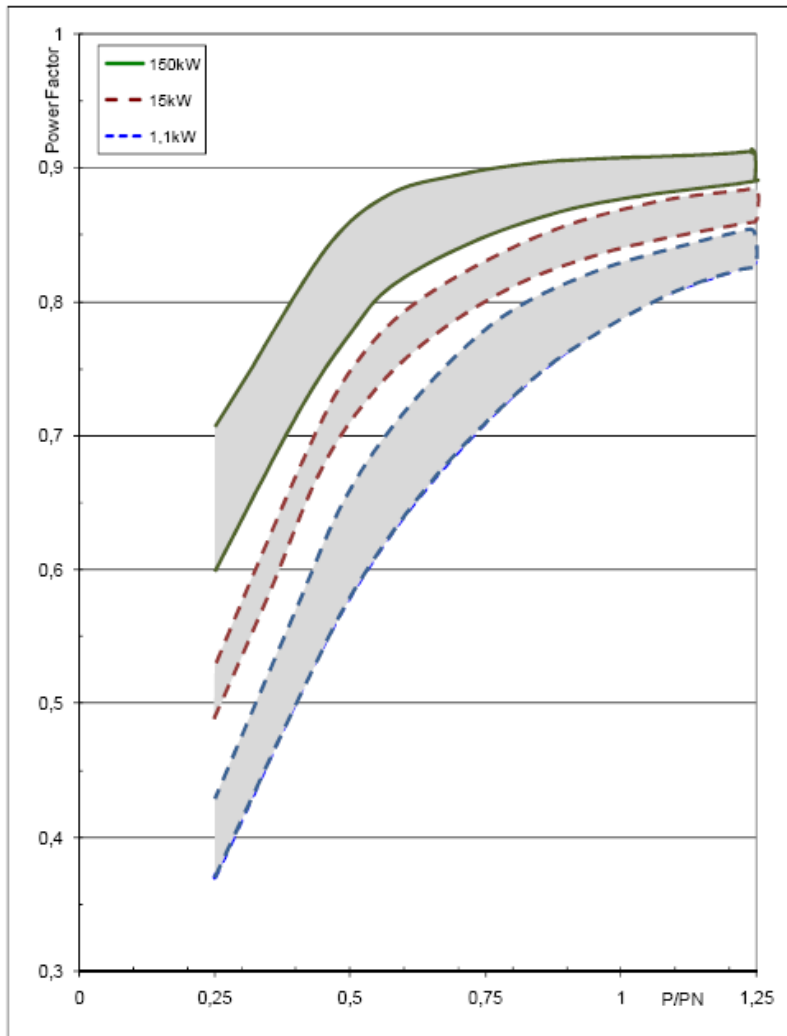


Abbildung 7 Zusammenhang Leistungsfaktor und Auslastung eines AC-Motors (A. Almeida, et. al., 2014b, S. 16)

Prüfen Sie vorab die tatsächlich geforderte Leistung und richtige Dimensionierung unter Beachtung der erforderlichen maximalen Last bzw. des max. Drehmoments (z.B. beim Wegdrehen von Mühlen). Hocheffiziente Motoren können durchschnittlich stärker überlastet werden und bieten daher wenig Grund zur Überdimensionierung. Bei Ersatz eines überdimensionierten Motors durch einen passenden Motor kann es aufgrund der kleineren Baugröße zu erforderlichen Umbauarbeiten kommen. Bei variablen Lasten sollten Sie geeignete Regelungssysteme berücksichtigen!

Leistungsfaktor

Ein Elektromotor benötigt zur Funktion Wirk- und Blindleistung. Die Blindleistung wird zur Magnetisierung der Spule benötigt. Der Anteil der Blindleistung nimmt mit abnehmender Auslastung zu, d.h. der Leistungsfaktor nimmt ab. Ab einer Auslastung von 50% nimmt dieser stark ab, bei kleineren Motoren bereits früher. Schlecht ausgelastete AC-Motoren sind der Hauptgrund für einen geringen Leistungsfaktor in einigen Industrieanlagen. Damit sind gegebenenfalls höhere Kosten bei der Strombeschaffung verbunden. Außerdem entstehen zusätzliche Verluste an den Leitungen und im Transformator, reduzierte Verfügbarkeit von Transformatoren und Leitungen und höhere Spannungsabfälle. Eine Analyse des elektrischen Systems zeigt, ob eine Verbesserung des Leistungsfaktors und damit eine Installation von (z.B. lokalen) Kompensation nötig ist.

4. Installation und Energieeffizienz

Folgende Tabelle zeigt die Auswirkungen eines sogenannten Kipp-Fußes (Motorfuß liegt nicht auf), z.B. durch schlechtes Auflegen der Ausgleichsscheiben. Wie ersichtlich nimmt in Folge der Leistungsbedarf und damit der Stromverbrauch gegebenenfalls stark zu.

Tabelle 5 Änderung der Last aufgrund eines Kippfußes (DCCEE, 2010)

Parameter	Mit Kippfuß	Ohne Kippfuß	Differenz
Impedanz-Assymetrie	12,96%	0,86%	12,1%
Temperatur Anstieg	81C	53C	28C
Strom	85A	72A	13A
Leistung	287,82 kW	245,07 kW	42,76 kW

4.1 Mangelnde Ausrichtung

Die Drehachsen müssen unter Betriebsbedingungen fluchten. Mangelnde Fluchtung führt zu Schäden an der Welle und Lager und ebenfalls zu erhöhten Wicklungstemperaturen. Man unterscheidet dabei Versatz und Klaffung, je nach Art der Abweichung. Bei einer Fehlausrichtung von z.B. 0,75 mm beträgt der Energieverlust rund 2%, bei 0,2 mm 0,5%. Aufgrund thermischen Wachstums, d.h. die angetriebene Maschine vergrößert sich aufgrund der thermischen Belastung stärker als der Motor, kann es erst während des Betriebes zu einer Fehlausrichtung kommen. Empfohlen wird daher eine Laserausrichtung. (Quelle: Prüftechnik Alignment Systems). Außerdem führt die exakte Ausrichtung zu geringerem Verschleiß an Lagern, Dichtungen, Wellen und Kupplungen.

Viele Ausrichtungsprobleme werden durch fehlerhafte Installation verursacht, daher ist eine Kontrolle nach Schweißarbeiten oder Installation der Pumpe erforderlich (nach Anschluss des Flansches an das Rohrnetz).

Eine weitere Ursache liegt in Änderungen der angetriebenen Maschine, z.B. aufgrund einer kavitierenden Pumpe oder aufgrund korrodierender Ventilatorblätter.

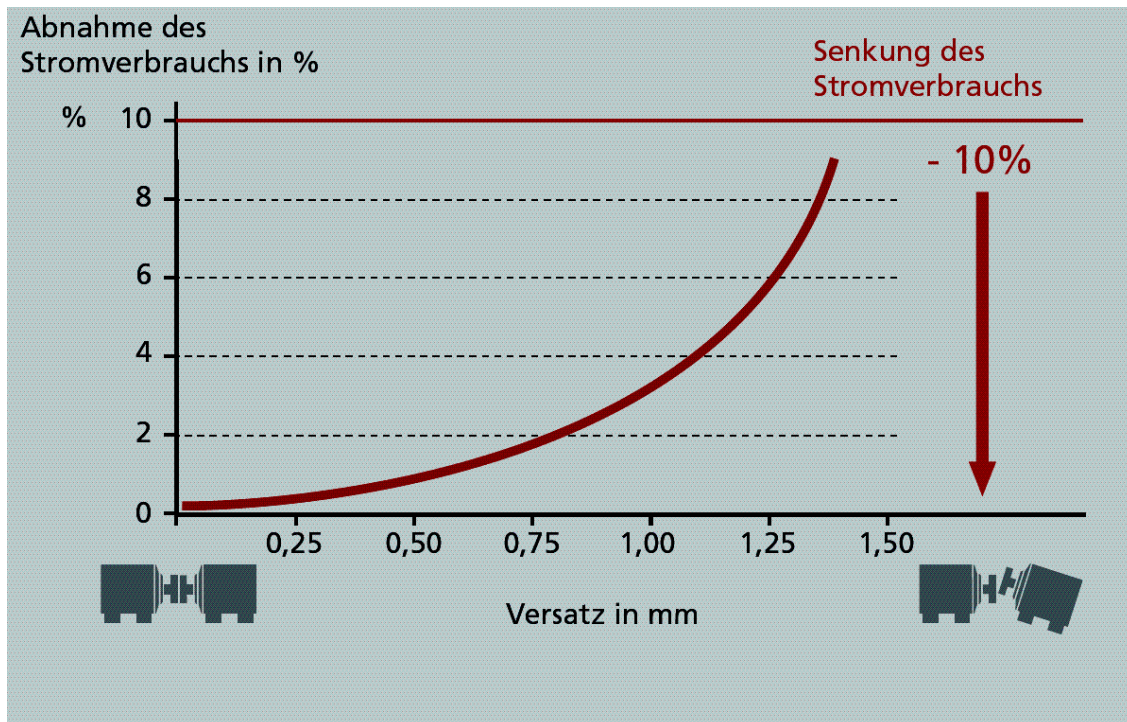


Abbildung 8 Zusammenhang Stromverbrauchsanstieg in Prozent mit dem Versatz in mm (www.pruftechnik.com)

4.2 Nicht ausreichende Belüftung

Manche Motoren benötigen vor dem Lufteintritt mindestens einen Freiraum in der Größe eines Viertels der Achshöhe des Motors. Sonst führt dies zu einer Wärmeentwicklung in den Motorwicklungen, der Wicklungswiderstand und die Leistungsaufnahme werden dadurch erhöht.

Phasenungleichgewichte führen ebenfalls zu erhöhten Wicklungstemperaturen und geringeren Wirkungsgraden.

5. Antrieb

Die Drehzahl von Drehstrommotoren liegt je nach Polpaarzahl und Netzfrequenz zwischen 750 und 3.000 Umdrehungen pro Minute. Für die meisten Antriebsaufgaben werden aber geringere Drehzahlen benötigt. Für die Anpassung an diese geringeren Drehzahlen sind Getriebe erforderlich, wobei auch das Drehmoment erhöht wird. Dieses Übertragungssystem vom Motor zur Last beinhaltet viele Quellen von Verlusten zwischen Motor und Getriebe. Die Verluste betragen zwischen 0% bis 45%. Grundsätzlich sollten daher wenn möglich Direktantriebe eingesetzt und Übertragung vermieden werden.

Tabelle 6 Wirkungsgrade von verschiedenen Antrieben und maximale Untersetzung (ZVEI, 2006; Radgen, et.al., 2008, weitere)

	Wirkungsgrad	Max. Untersetzung
Direktantrieb	100%	1
Flachriemen	99%	5
Zahnriemen	96-98%	8
Kette	96-98%	6
Stirnrad	96%	7
Kegelrad	97%	5
Keilriemen	95-98% (unter 1 kW 75%)	8-10
Schnecke	65-85%	50

5.1 Riemenantrieb

Rund ein Drittel der elektrischen Motoren im industriellen und tertiären Sektor nutzen Riemenantriebe, sie gewährleisten eine flexible Verbindung zwischen Motor und Last und erleichtern Wartungsarbeiten an Maschinen. Riemenscheiben unterschiedlicher Durchmesser erlauben auch die Geschwindigkeit des angetriebenen Gerätes zu erhöhen oder zu vermindern. Der Wirkungsgrad von Riemen kann aber im Betrieb stark abnehmen.

Keilriemen weisen eine maximalen Effizienz von rund 95% bis 98% zum Zeitpunkt der Installation auf, erreichen, falls sie nicht gewartet und die Riemen nicht regelmäßig nachgespannt werden, eine Effizienz von nur rund 90-93%. In Teillast nimmt der Wirkungsgrad von Keilriemen stark ab, die Anzahl der Rillen erhöht den Wirkungsgradverlust um ca. 0,2 bis 0,5% pro Rille.

Verzahnte Keilriemen sind um rund 2% effizienter als Keilriemen, sie haben Kerben senkrecht zur Riemenlänge, die den Biege- und Dehnwiderstand der Riemen reduziert. Verzahnte Riemen können mit denselben Riemenscheiben wie ähnliche Keilriemen betrieben werden, laufen bei geringeren Temperaturen und halten dadurch länger.

Synchronriemen (oder Zahnriemen) (für hohe Drehmomente) sind verzahnt und erfordern die Installation einer Zahnscheibe. Sie können eine bessere Effizienz von rund 98% aufweisen und eine hohe Effizienz über einen weiten Lastverlauf erhalten. Im Gegensatz dazu haben Keilriemen bei hohen Drehmomenten einen großen Schlupf. Synchronriemen erfordern geringere Wartung und seltenere Nachspannung und laufen auch in nasser oder

ölicher Umgebung. Nachteile: Zahnriemen dürfen niemals in einer Zahnscheibe mit einem anderen Profil laufen, sie sind lauter, ungeeignet für Schockbelastung und übertragen Vibrationen. Durch das Verhindern des Schlupfes kann es sein, dass eine Last (Pumpen, Ventilatoren) nach Umstellung des Antriebs mit einer etwas höheren Geschwindigkeit angetrieben wird, dies ist bei der Auslegung zu berücksichtigen.

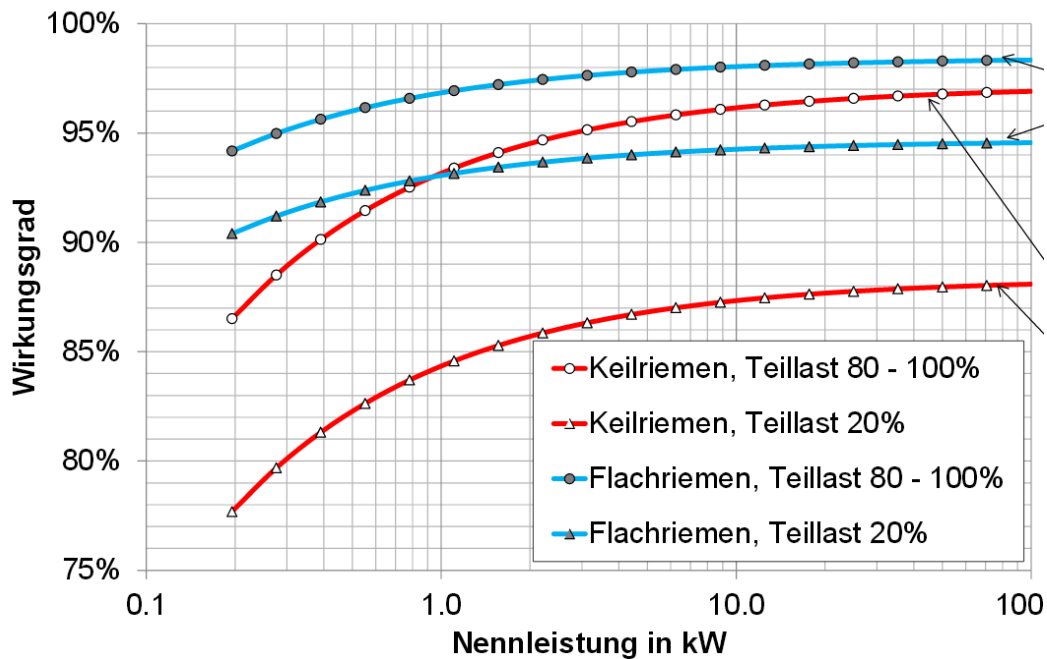


Abbildung 9 Wirkungsgrad von Keil- und Flachriemen in verschiedenen Lastzuständen (80-100% und 20%) in Abhängigkeit der Leistung (Huber, 2013)

Flachriemen: Flachriemen haben Wirkungsgrade von über 99%. Bei der Umstellung von über 2.500 Anlagen von Keil- auf Flachriemen wurden Energieeinsparungen zwischen 4 und 6 % nachgewiesen. Flachriemenantriebe weisen 10 bis 15 K tiefere Wellentemperaturen als Keilriemen auf, was auf höhere Lebensdauer hinweist (2-5 mal höher als bei Keilriemen). Flachriemen können bei Schlupf von der Scheibe fallen und werden daher im Vergleich zu Keilriemen stärker gespannt, d.h. die Wellenbelastung ist höher. Flachriemen müssen nach der etwas anspruchsvolleren Montage nicht mehr nachgespannt werden.

In Ventilatorsystemen kann die Drehzahl des Motors um den Faktor vier größer sein als die des angetriebenen Ventilators. Bei kleinen Anwendungen unter 2 kW beträgt diese Grenze ca. die 10-fache Drehzahl. Diese Grenze entsteht durch die Größe der verfügbaren Riemenscheiben und den Umschlingungswinkel. Riemen sollten an die höchste normale Betriebstemperatur angepasst sein. Ein hoher Gummianteil reduziert die Beständigkeit des Riemens gegenüber der Temperatur.

Der sog. „Service Factor“ (Korrekturfaktor) berücksichtigt die Belastung während Beschleunigung durch das Anfahren und bei Laständerung. Er beträgt z.B. für die meisten Ventilatoren 1,2 bis 1,4. Die erforderliche Ventilatorleistung ist um diesen Faktor zu erhöhen. Weiters ist je nach Umschlingungswinkel (Auflagefläche der Riemen auf der Scheibe) die Leistungsangabe der Riemen um die folgenden Faktoren zu reduzieren.

Tabelle 7 Korrekturfaktor für die Leistungsangabe eines Keilriemens, abhängig vom Umschlingungswinkel

Umschlingungswinkel	180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°
Korrekturfaktor	1	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86	0,83	0,79	0,74	0,69

6. Regelung

Elektromotoren treiben im Normalfall Maschinen an, deren Auslastung sehr oft schwankt. Die im veränderten Betriebszustand aufgenommen Leistung hängt einerseits vom Lastverlauf andererseits von der Regelungsart der angetriebenen Maschine ab.

6.1 Lastverlauf

Bei **Anwendung mit konstanter Leistung**, wie z.B. Antriebe für Rundschalen, Drehmaschine, Bohren, Fräsen nimmt das Drehmoment mit der Drehzahl ab. Für diese Anwendungen ergibt sich keine Einsparung aufgrund einer Änderung der Drehzahl.

Bei **Anwendungen mit konstantem Drehmoment** (Förderbänder, Hebeeinrichtungen, Kräne, Kompressoren, Kolbenpumpen, Brecher) ändert sich das Drehmoment mit der Geschwindigkeit nicht, die Leistung nimmt daher linear mit der Drehzahl zu. Drehzahländerung zur Energieeinsparung kann daher sinnvoll sein.

Bei **Anwendung, in denen das Drehmoment mit der Drehzahl linear** zunimmt (Wirbelstrombremsen, Kalande mit viskoser Reibung) nimmt die Leistung quadratisch zu, eine verminderte Drehzahl führt daher zu überproportionaler Energieeinsparung.

Bei Anwendungen wie Zentrifugen, Pumpen oder Lüftern nimmt das Drehmoment quadratisch mit der Drehzahl zu, die **Leistungsaufnahme ändert sich daher kubisch**. Eine Veränderung der Drehzahl zur Anpassung der Leistung verringert daher die Leistungsaufnahme und damit den Strombedarf um die 3. Potenz. Für solche Anlagen mit variablem Volumenstrom kann die Absenkung der Drehzahl daher entscheidend zur Energieeinsparung beitragen:

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Änderung der Pumpenkennwerte bei Drehzahländerung in geschlossenen Systemen mit guter Näherung (vergleichbares gilt für Ventilatoren):

$$\frac{Q_n}{Q_x} = \frac{n_n}{n_x} \quad \frac{H_n}{H_x} = \left[\frac{n_n}{n_x} \right]^2 \quad \frac{P_n}{P_x} = \left[\frac{n_n}{n_x} \right]^3$$

Die Formeln zeigen, dass der Förderstrom (Q) proportional zur Pumpendrehzahl (n) ist. Die Förderhöhe (H) ist proportional zum Quadrat der Drehzahl, während die Leistung (P) proportional zur 3. Potenz der Drehzahl ist. Bei halber Fördermenge ist die erforderliche Leistung acht mal kleiner.

6.2 Regelungsvarianten für Pumpen und Ventilatoren

Zur Regelung von Strömungsmaschinen bestehen grob mehrere Möglichkeiten:

- Ventile, Drosselklappen (Drosselregelung) oder Drallregelung verändern die Anlagenkennlinie und damit den Betriebspunkt der Maschine. In Folge ändern sich Förderstrom und Versorgungsdruck.
- Veränderte Schaufelstellung verändern die Kennlinie der Maschine (insbesondere bei Axialventilatoren)

- Änderung der Drehzahl über eine Übersetzung (z.B. unterschiedliche Größe der Riemenscheiben) oder über Getriebe. Die Drehzahl der angetriebenen Maschine lässt sich dabei allerdings entweder nicht variabel oder unter größeren Verlusten verändern.
- Änderung der Drehzahl des Elektromotors: Entweder über elektronische Steuerung (Frequenzumrichter) oder durch polumschaltbare Motoren, deren Drehzahl stufenförmig verändert werden kann.

Welche dieser Regelungen optimal ist, hängt von technischen und wirtschaftlichen Überlegungen ab. In diesem Leitfaden werden die Auswirkungen auf den Energiebedarf dargestellt. Nachstehend wird auf einige dieser Regelungen näher eingegangen.

Drosselregelung

Durch eine entsprechende punktuelle Querschnittsverringerung innerhalb des Rohr- oder Kanalsystems entsteht am Drosselorgan ein zunehmend hoher Druckabfall. Bei einer Drosselung auf die Hälfte des Volumenstroms, steigt der Druck am Gebläse auf 125 % seines Nennwertes an. Die erforderliche Antriebsleistung des Gebläses sinkt daher trotz halben Volumenstroms nur auf 72% des Nennwertes. Diese Möglichkeit ist nach der By-Pass Regelung die mit Abstand ineffizienteste Regelung des Volumenstromes. Vor allem wenn das System viel in Teillast arbeitet, sollten derartige Regelungen ausgetauscht bzw. bei Neuinstallationen nicht verwendet werden.

Beseitigung Klappen in Pumpensystemen:

Die Beseitigung von Klappen/Drosseln in (Kreisel-)Pumpensystemen ist grundsätzlich eine Einsparmaßnahme, da dadurch unnötiger Druckverlust und damit einhergehend Förderhöhe vermieden wird. Allerdings ist zu beachten, dass Drosseln in Pumpensystem eingesetzt werden, um den Förderstrom z.B. auf 70% des Nennförderstroms zu verringern. Die Leistungsaufnahme (Produkt aus Förderstrom und Förderhöhe) ist dadurch z.B. für eine bestimmte Pumpenkennlinie 23% geringer als diese bei 100% des Nennförderstroms wäre.

Werden einfach nur Klappen/Drosseln oder andere hydraulische Komponenten entfernt und die Förderhöhe nimmt ab, verschiebt sich der Betriebspunkt entlang der Pumpenkennlinie und führt bei Kreiselpumpen zu einer Erhöhung des Förderstroms. Die Leistungsaufnahme nimmt daher zu! Bei Einsatz einer Drehzahlregelung zur Steuerung der Fördermenge kann dieser Effekt vermieden werden und führt (Annahme Anteil statische Förderhöhe 20%) bei einer Fördermenge von 70% des Nennförderstroms zu einer Reduktion der Leistungsaufnahme um fast 60%.

Drallregelung

Bei der Drallregelung wird der Einfluss einer drallbehafteten Zuströmung auf das Gebläse auf die Ventilator-kennlinie ausgenutzt. Ein Gleichdrall im Drehsinn des Laufrades führt gegenüber drallfreier Zuströmung zu einem Abfall der Kennlinie, d.h. Erhöhung des Volumenstromes. Ein Gegendrall entgegen dem Drehsinn des Laufrades zu einer Anhebung der Kennlinie, d.h. Absenkung des Volumenstromes bei gleicher Motorleistung. Der Vordrall wird bei dieser Regelung durch Verstellung des Anstellwinkels eines aus mehreren Vorleitschaufeln bestehenden Schaufelgitters (Umstaffelungsgitter) vor dem Laufrad erzeugt.

Schaufelstellung

Bei größeren Ventilatoren ist die Einstellung der Schaufelstellung ein übliches Verfahren zur Anpassung des Luftstromes. Diese Variante kann auch mit Drallregelung zwecks einer Verbesserung der Regelmöglichkeiten und des Wirkungsgrades verwendet werden. Diese Regelungsvariante stellt für Anwendungen mit einer hohen Regelbreite die beste Möglichkeit dar, der Leistungsbedarf ist ähnlich dem bei Drehzahländerung.

Drehzahlregelung

Mit einem Frequenzumrichter kann die Drehzahl eines Asynchronmotors stufenlos verändert werden. Die Pump- oder Ventilatorleistung wird durch die Drehzahlregelung an die Anlagenerfordernisse angepasst, Druck- und Förderhöhenüberschüsse vermieden und Energie eingespart. Besonders geeignet für Drehzahlregelung sind Anlagen mit variablen Bedarf und Anlagen, deren Anteil an statischer Höhe nicht zu hoch ist. Bei Antriebsaufgaben mit quadratischem Verlauf des Antriebsmoments sinkt die erforderliche Antriebsleistung bei einer Halbierung des Volumenstroms auf 12,5%. Dies gilt insbesondere für Anwendungen mit geringem statischen Anteil, d.h. z.B. Ventilatoren in Kühltürmen, Dachlüfter und geschlossenen Pumpsystemen, z.B. Heizsystemen. Real sinkt daher die Leistungsaufnahme daher oft „nur“ quadratisch, d.h. bei halben Volumen wird ein Viertel der Leistung benötigt. Außerdem ist zu beachten, dass bei Pumpsystemen mit einem Anteil an statischer Förderhöhe (also offene Systeme) die Drehzahl nur soweit reduziert werden kann, solange diese Förderhöhe gewährleistet ist. Die Energieeinsparung ist daher jedenfalls geringer als in geschlossenen Systemen. Der optimale Regelbereich eines Frequenzumrichters liegt zwischen 30 und 75%. Wenn die Drehzahl mittels eines Frequenzumrichters variiert wird, ist zu beachten, dass dieser zusätzliche Verluste (typischerweise etwa 5%) aufweist.

Wenn es nicht nötig oder möglich ist, die Drehzahl zu variieren, sollte auf den Einsatz eines Frequenzumrichters verzichtet werden. Eine andere Möglichkeit der (groben) Drehzahlstellung ist der Einsatz von polumschaltbaren Motoren, sie sind kostengünstiger in der Anschaffung auf Grund ihrer fixen Drehzahlvorgaben ist der Einstellungsbereich jedoch begrenzt, für einfache Aufgaben eignen sie sich jedoch perfekt.

6.3 Vergleich der Regelungsvarianten bei quadratischer Last

In nachstehender Abbildung sind drei unterschiedliche Regelungsvarianten für Ventilatoren dargestellt. Die Grafik zeigt den jeweiligen Leistungsbedarf am Betriebspunkt 50% des Volumenstromes im Auslegungszustandes im Vergleich zum Auslegungspunkt (100%).

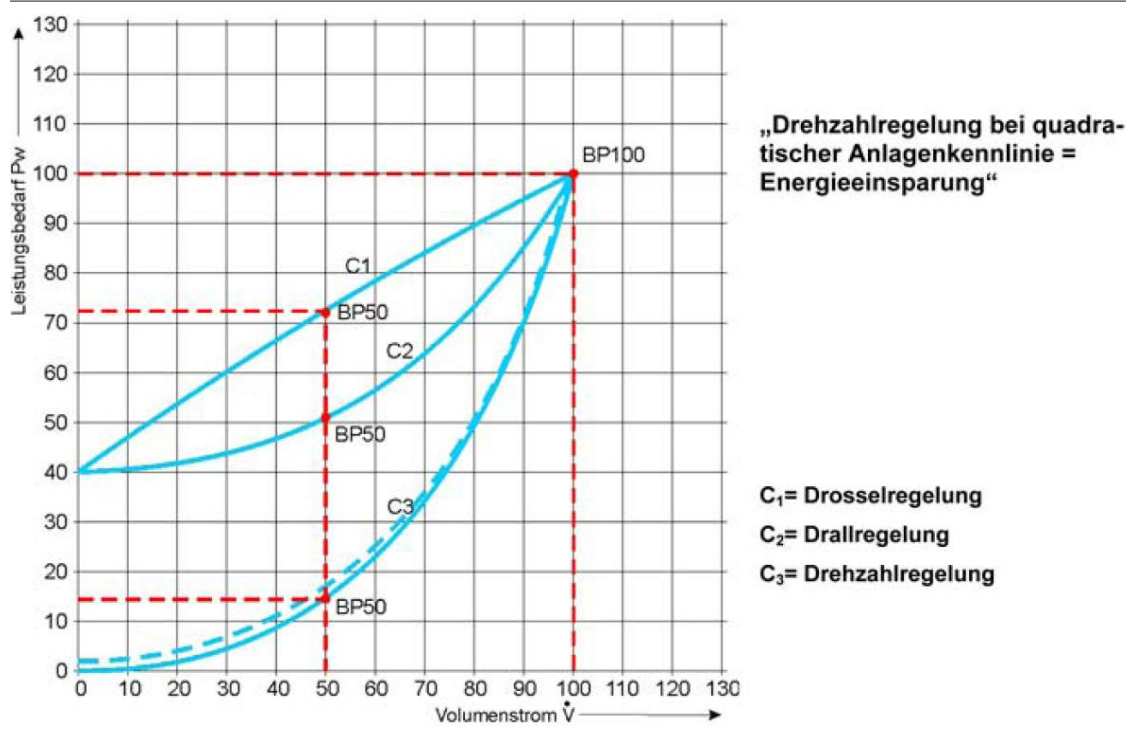


Abbildung 10 Gegenüberstellung der Leistungsbedarfskurven C in Abhängigkeit des Volumenstroms bezogen auf den Auslegungspunkt (Quelle: Benderoth, 2008)

Wie ersichtlich reduziert sich die Leistungsaufnahme auch bei Drosselregelung, allerdings nicht so stark wie bei anderen Regelungsvarianten. Die optimale Art der Regelung ist daher auch abhängig von der notwendigen Regelbreite. In der Regel ergeben sich die größten wirtschaftlichen Einsparpotenziale wenn die Volumenstromregelung durch Drosselung auf eine Drallregelung bzw. FU Regelung umgestellt wird. Wird ein Motor häufig im Teillastbereich unter 75% der Nennlast betrieben, so ist auch der Umstieg von einer Drallregelung auf eine Frequenzumformer - Regelung sinnvoll.

Wird konstant weniger Leistung benötigt, ist z.B. die Änderung des Laufraddurchmessers bei Pumpen die sinnvollste Methode.

6.4 Energieeinsparung bei linearer Last

Bei der Steuerung von **Hebebühnen, Förderbändern, Kränen, Pressen, Zentrifugen** kann mit einem Frequenzrichter die Geschwindigkeit beispielsweise der Förderbändern verändert und damit der Stromverbrauch proportional zur Geschwindigkeit gesenkt werden.

Bei Antriebsaufgaben mit periodischen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen sowie Hebe- und Absenkvorgängen kann die freiwerdende kinetische Energie oder die beim Absenken der Last freiwerdenden potenziellen Energie ins Netz rückgespeist werden. Dabei werden Umrichter mit geregelterm Netzgleichrichter verwendet. Diese erzeugen zunächst höhere Verluste durch einen höheren Steueraufwand und erfordern auch Hochfrequenzfilter, um EMC Probleme netzseitig (mögliche Resonanzüberhöhung durch die eingangsseitige Taktung) zu bedämpfen.

Sie bieten jedoch folgende Vorteile:

- Energierückspeisung ins Netz

- fast sinusförmige Stromaufnahme aus dem Netz, die deutlich weniger niederfrequente Oberschwingungen aufweist
- schnelles Umschalten zwischen motorischem und generatorischem Betrieb

7. Frequenzumformer

Werden Asynchronmotoren direkt am Wechselspannungsnetz betrieben, haben sie eine von ihrer Polzahl und der Netzfrequenz abhängige feste Nenndrehzahl. Beim Anlauf entstehen hohe Stromspitzenwerte und das Drehmoment ist gering.

Frequenzumrichter ermöglichen es demgegenüber, stufenlos Drehzahlen von null bis zur Nenndrehzahl zu erreichen, ohne dass das Drehmoment sinkt. Die Drehzahl kann auf bis zu ca. 120% erhöht werden (bei entsprechend höherem Energiebedarf), das Drehmoment bei verringerter Drehzahl sogar auf 150% der Nenndrehzahl.

Im Prinzip besteht ein elektronischer Frequenzumrichter aus vier Elementen:

- Der **Gleichrichter** wandelt den Wechsel- in Gleichstrom um. Sein Design beeinflusst auch das Ausmaß, ob harmonische Wellen das Versorgungsnetz beeinflussen.
- Der **Zwischenkreis** besteht aus einem Kondensator zur Glättung der Gleichspannung und einer Induktivität zur Entstörung.
- Im **Wechselrichter** werden am häufigsten Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) als leistungselektronische (Halbleiter-) Schalter eingesetzt. Dieser steuert die Stromzufuhr zu den Motorwicklungen durch die sog. sinuskommutierte Pulsweitenmodulation (PWM) und kann damit die Ausgangsspannung und auch deren Frequenz (und damit die Drehzahl des Motors) regeln.
- Die **Steuerungseinheit** überwacht den Betrieb des Frequenzumrichters, um die richtige Ausgangsspannung in Abhängigkeit von einem externen Signal zu gewährleisten (z.B. Druck).

Durch Anwendung des Frequenzumformers ergeben sich neben der Energieeinsparung eine Vielzahl von weiteren Vorteilen:

- Einfache und genaue Regelung der Fördermenge
- Verbesserung der Effizienz über weiten Einsatzbereich
- geringe Beanspruchung der Komponenten im Teillastbereich
- Eliminierung von Verschmutzungsproblemen im Vergleich zu mechanischen Kontrollsystemen
- Reduktion von Luftstromgeräuschen
- gutes Anlaufverhalten
- geringerer Einschaltstrom
- Möglichkeit der Vermeidung von überdimensionierten Motoren bei Anwendungen mit hoher Massenträgheit während des Anlaufens
- verbesserter elektrischer Leistungsfaktor

7.1 Zu berücksichtigende Aspekte

Energieeffizienzklassen für Frequenzumrichter

Frequenzumrichter haben typischerweise Wirkungsgrade von 92 bis 98%. Zwei bis acht Prozent Verluste entstehen aufgrund der Wärmeabstrahlung der Hochfrequenz-Schaltung und zusätzlichen Leistungsbedarf der elektronischen Komponenten.

Die EN 50598 legt Energieeffizienzklassen für sog. Complete Drive Modules (Frequenzumrichter) fest. Für den Referenz CDM werden für acht Betriebspunkte Werte in Abhängigkeit der Leistung festgelegt, für die Klassifizierung wird der Betriebspunkt 100 Prozent Drehmomenten Strom und 90 Prozent Drehzahl herangezogen.

Tabelle 8: Verlustleistung von Frequenzumrichtern in Abhängigkeit der Leistung nach Effizienzklassen (Quelle: EN 50598, Tabelle 20, eigene Berechnung (AEA))

Frequenzumrichter (CDM) Leistung [kW]	Verlustleistung in [W] für IE1	Verlustleistung in [W] für IE2 [-25 % im Vergl. zu IE1]*	Verlustleistung in [W] für „IE3“-bereits erhältlich*,**
1,5	188	141	85
3	299	224	135
5,5	477	358	215
7,5	581	436	261
11	781	586	351
15	1.010	758	455
18,5	1.207	905	543
22	1.408	1.056	634
30	1.858	1.394	836
37	2.253	1.690	1.014
45	2.700	2.025	1.215

*gerundete Werte

**IE3 ist noch nicht definiert, die Verlustleistung sollte jedoch max. bei ca. 45 Prozent des Wertes für IE1 betragen. Diese Werte werden (zumindest in gewissen Leistungsbereichen) bereits von am Markt erhältlichen Frequenzumrichtern erreicht.

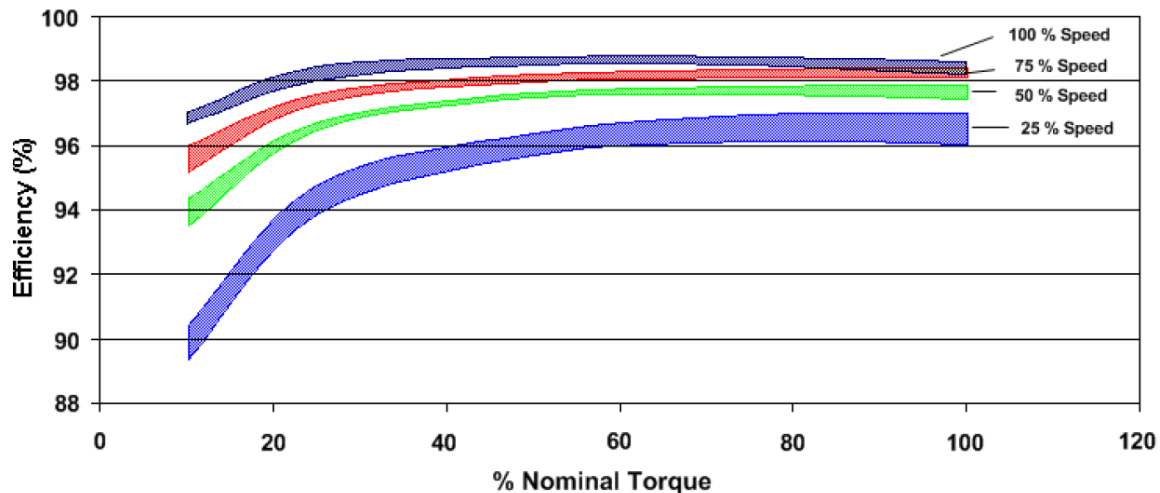


Abbildung 11 Wirkungsgrad eines 35 kW Frequenzumrichter in Abhängigkeit der Drehzahl (Speed) und des Drehmoments (Torque) (Almeida et.al. 2014b, S 11)

Folgende Gründe sprechen teilweise gegen eine Umrüstung auf eine Drehzahlregelung:

- die Investitionskosten (zur ökonomischen Bewertung ist allerdings eine Investitionsrechnung mit Berücksichtigung des Lastprofils und ein Vergleich mit anderen Regelvarianten notwendig)
- die größere Störanfälligkeit durch Einbau der Leistungselektronik, - heutzutage nicht mehr so relevant!
- bei externen Ausführungen der erforderliche Platz im Schaltschrank
- die Netzverunreinigung durch Oberwellen – Filter schaffen hier Abhilfe!
- die erhöhte Temperaturentwicklung (in Hallen mit Arbeitsplätzen zu beachten)
- die Verluste des Motors können sich erhöhen

Ausreichende Isolation erforderlich

Das kontaktlose Schalten eines Frequenzumformers kann zu Spannungsspitzen führen, die die Motorwicklungstemperatur erhöhen. Dies führt zu einem beschleunigten Isolationsabbau.

Daher wird die Anwendung für Motoren mit Motorwicklungsisolation gem. DIN VDE 0530 Bbl.2:1999-01 empfohlen. Bei Motoren für Nassläuferpumpen, bei älteren Motoren und Ex-Motoren, müssen deshalb zusätzliche Maßnahmen getroffen werden (z.B. Drossel oder Filter).

Harmonische Oberschwingungen

Durch die nichtlineare Stromaufnahme eines Frequenzumrichters entstehen an den Netzimpedanzen der Versorgungsnetze Oberschwingungsspannung (Überlagerung der Grundspannung), die die Netzspannung verzerren. Weitere nicht-lineare Lasten in Industriebetrieben sind z.B. Lichtbogenschweißgeräte, Lichtregelung und Unterbrechungsfreie Stromversorgung.

Oberwellen bewirken Fehlfunktionen in elektronischen Steuerungen, zusätzliche Verlustleistung in Transformatoren, Motoren, Leitungen, usw.. Beispielsweise erzeugt eine

negative drehende Oberschwingung ein Drehfeld mit einem Drehmoment entgegen der Drehrichtung. Dadurch entstehen zusätzliche Wirbelströme, Ummagnetisierungen, die zu Motorüberhitzung führen können.

Idealerweise sollen über „Power harmonic analyzers“ die Größe individueller harmonischer Oberschwingungen von einem Experten bestimmt werden. Mögliche Gegenmaßnahmen, nach Prüfung der Übereinstimmung mit elektrotechnischen Vorschriften und geeigneten Erdungsmaßnahmen sind:

- Getrennte Versorgung von Lasten, die Oberschwingungen erzeugen, über eigene Leitungen und Transformatoren.
- Einsatz von Trenntransformatoren und Netzdrosseln (3-5% Impedanz) zum Schutz des Umrichters und des Motors.
- Einsatz von Filtern, um die Amplitude von einer oder mehreren Hochfrequenzschwingungen zu verringern und vor Ausbreitung in das elektrische System zu verhindern.
- Geringe Kabellänge (unter 15 Metern wenn möglich)

Reflexionen, Überschwingung

Die Spannungswellenform wird durch eine Serie von Pulsen kontrolliert, die Breite und Länge ist so eingestellt, dass sie sich einer sinusförmigen Spannung annähert.

Bei Pulsweitenmodulation (PWM) treten hohe maximale Spannungsbelastung auf das Isolationssystem auf. Aufgrund von mehrfacher Reflexions- oder Resonanzeffekten, die vom Zusammenspiel der Takt (Puls-) frequenz und Wellenform der PWM, der Kabellänge zum Motor und der Induktanz des Motors abhängen, kann es zum Überspringen der Spannung kommen. Bei Kabellängen von mehr als 15 m sind diese besonders problematisch. Insbesondere die ersten Motorwicklungen werden extrem beansprucht, Kurzschlüsse und Schäden an der Isolierung sind die Folge.

Viele FUs ermöglichen die Auswahl der PWM - Taktfrequenz durch den Anwender. Diese kann zwischen 50 Hz und 20 kHz betragen. Diese Auswahl definiert auch die Anzahl der Spannungsüberschüsse, die in einem Motor zu einem bestimmten Zeitraum auftreten können. Höhere Frequenzen erhöhen diese Überschüsse und beanspruchen die Isolation des Motors. Bei hohen Taktfrequenzen ist dafür die Spannung nahezu sinusförmig.

Bei niedrigen Taktfrequenzen ist der Motorstrom nicht sinusförmig und es kann zu Geräuschen am Motor führen, die insbesondere bei Lüftungsanlagen unerwünscht sind.

Abhilfen für diese Probleme schaffen:

- Ausgangsfilterdrosseln (1-3% Impedanz)
- Reduzierte Kabellänge
- Evt. geringere Taktfrequenz
- Verbesserte Isolierung für reparierte Motoren

Erdung, Schirmung

Vor Einsatz eines FU ist es wichtig, bei Motoren mit häufigen oder ungewöhnlichen Lagerschäden auf mögliche Ströme in der Motorwelle zu achten. Normalerweise sind diese Ströme kein Problem, bei Spannungen von mehr als 0.3 bis 0.5 Volt können diese aber bei großen Motoren, die mit FU ausgestattet werden sollen, zu potenziellen Problemen führen. Die Welle sollte in so einem Fall über eine Bürste geerdet werden oder die Lager isoliert haben, bei Pumpenanwendungen ist dies nicht notwendig, da die Welle mit der Erde verbunden ist. (Quelle Natural Resources Canada (2009), S 41ff)

Die gesetzlichen Vorschriften der EMV- und Niederspannungs-Richtlinien müssen sämtliche Hersteller einhalten. Eine Reduktion der gestrahlten Störenergie auf benachbarte Anlagen erfolgt daher durch geeignete Schirmmaßnahmen.

Zusätzliche Filter erhöhen grundsätzlich die Verluste eines FUs. Filter bieten allerdings Schutz vor hochfrequenten leitungsgebundenen Störgrößen zum Gerät und vom Gerät zum Netz.

Bei der Installation von Hochfrequenz-Filtern müssen diese möglichst dicht am Gerät montiert sein, Leitungen zwischen Filter und Gerät müssen geschirmt sein.

Filter verursachen allerdings auch leitungsgebundene Störungen, wodurch Spannungen auftreten, die sich ausbreiten können:

- Interne Eingangfilter sollten daher nicht zu nahe am Gleichstromzwischenkreis geschaltet sein. (gilt für Hersteller!)
- Am Ausgangsfilter kann es insbesondere bei kleinen Motoren passieren, dass sich diese Spannungen mit der Ausgangsspannung überlagern (z.B. zusätzlich 120V bei 400V).

Einsatz von Drosseln

Diese werden sowohl auf der Ein-, und Ausgangsseite, als auch im Gleichstrom-Zwischenkreis verwendet. Auf der Eingangsseite reduzieren sie die Netzurückwirkung und verbessern Leistungsfaktor. Sie führen zur Reduktion des Stromoberwellengehalts (THD) und zur Verbesserung der Netzspannungsverzerrung und Netzqualität.

Überhitzung des Motors

Größere Motoren, die mit Frequenzrichter betrieben werden, sollten einen Lüfter mit konstanter Drehzahl haben, um Überhitzung bei geringer Drehzahl zu vermeiden. Allerdings sinkt beim Einsatz für Pumpen und Lüftern bei niedrigerer Drehzahl auch die Leistungsaufnahme mit der 3. Potenz, was die Gefahr einer Überhitzung minimiert.

Bei höherer Drehzahl steigt allerdings die Leistung überproportional, was zu erhöhtem Kühlungsbedarf führt. Z.B. führt eine Erhöhung der Drehzahl bei quadratischer Kennlinie (z.B. Pump- und Lüfteranwendungen) um 10% zu einer Erhöhung der Leistungsaufnahme um 33%.

Langsamer drehende Motoren bis 3 Hz müssen ebenfalls durch Fremdlüfter über ein so genanntes Fremdnetz gekühlt werden.

Bei Mixern kann das Drehmoment mit niedrigerer Drehzahl steigen und daher auch die benötigte Kühlleistung. Der integrierte Lüfter kann dann nicht mehr ausreichend sein. Insbesondere bei solchen Anwendungen mit konstanter Last bzw. Leistung muss das

Motordrehmoment bei reduzierter Drehzahl schon bei der Auslegung begrenzt werden, um Überhitzung zu vermeiden.

Kühlung

Große Schalthäufigkeit erhöht die Wärmeleistung, zusätzliche Filter verursachen ebenfalls thermische Verluste. Auf effiziente Kühlung ist daher zu achten (z.B. FU mit großer Leistung, mehrere FU in einem Schaltschrank)

Resonanz

Eine Minderung der Drehzahl kann zu Resonanzproblemen bei den angetriebenen Maschinen führen. Im Vorfeld müssen bei den einzustellenden Frequenzen die Resonanzfrequenzen ausgegrenzt werden, dies gilt insbesondere für Maschinen mit hoher Drehzahl deren Drehzahl zwischen der ersten und zweiten kritischen Drehzahl liegt.

Eine starke Reduktion der Drehzahl kann z.B. bei Axialventilatoren zu instabilem Betrieb führen. Kennlinie und Leistungskurven sollten hier bei der Ventilatorauswahl betrachtet werden.

Spannungsabfall an Leitung prüfen

Bei der Positionierung von Frequenzumrichtern am Ende einer Leitung wird der dort auftretende Spannungsabfall durch erhöhten Strom ausgeglichen. Da Frequenzumrichter für bestimmte Leistungen ausgelegt sind, kann dies zu Problemen führen. Eine Lösung wäre ein zusätzlicher Transformator um die Leitungslänge zu verkürzen.

Mehrere gesteuerte Maschinen im parallelen Betrieb

Beim Antrieb mehrerer Motoren und Maschinen für die gleiche Anwendung ist zu beachten, dass eine übergeordnete Regelung die Einschaltreihenfolge oder Drehzahl der einzelnen Motoren steuert, z.B. wenn mehrere Druckluft- oder Kältekompressoren, Pumpen- oder Ventilatoren in Parallel- oder Serienschaltung ein gemeinsames Netz versorgen.

Sonst kann es passieren, dass mehrere Anlagen parallel im ungünstigen Betrieb (unter 20-30%) laufen.

Hoher statischer Druck ohne geeignete Sensorplatzierung

Bei Pumpen mit hohem statischen Anteil (also in offenen Systemen) kann eine zu geringe Drehzahl nicht mehr den entsprechenden Druckunterschied (Förderhöhe) aufbringen.

Ebenso kann bei Lüftungssystemen der statische Druck (z.B. Schalldämpfer) höher als der vom Ventilator erzeugte sein. Hier ist auf eine geeignete Sensorplatzierung zu achten.

Wirkungsgradverlust

Theoretisch bewirkt der Einsatz eines Frequenzumrichters zur Verringerung der Drehzahl das Verschieben der Wirkungsgradlinie sowohl des Motors als auch der Pumpe. Dabei verringern sich die Wirkungsgrade dieser Maschinen etwas.

Der Wirkungsgradverlust folgt jedoch nicht dem Verlauf der Kennlinie bei konstanter Drehzahl (wo z.B. bei halber Fördermenge größere Wirkungsgradverluste auftreten). D.h. der Wirkungsgradverlust der Pumpe ist viel geringer bei variabler Drehzahl als bei konstanter Drehzahl.

Wartung

Ein Frequenzrichter ist weitgehend wartungsfrei, der Elektrolytkondensator im Zwischenkreis hat eine Lebensdauer abhängig von der Arbeitstemperatur.

8. Analyse

Zur Optimierungsanalyse der Motoren im Unternehmen finden sich nachfolgend einige Tipps. Im wesentlichen ist eine Motorinventarisierung notwendig an die im zweiten Schritt eine nähere Analyse (1-2-3 Test) erfolgt. Auf Basis dieser Analyse können Motoren identifiziert werden, für die dann eine ganz exakte Aufnahme der Daten erfolgen sollte.

8.1 Basissystembeschreibung

Die **Basissystembeschreibung** umfasst im Wesentlichen folgende (Typenschild-) Daten, die aus Firmenunterlagen oder mit Hilfe einfacher Messungen erhoben werden können. In vielen Unternehmen können betriebliche Mitarbeiter die meisten oder gar alle genannten Informationen zusammenstellen.

Tabelle 9 Zu erfassende Daten am Beginn zur Erstellung einer Motorenliste und der Feinanalyse (topmotors.ch, das Europäische Motor Challenge Programm, Modul Antriebe, Brüssel 2003)

	Zu erhebende Daten
Arbeitszeit, Arbeitsplätze	Anzahl Schichten
Energieverbrauch	Gesamtverbrauch: Jahr und Monat
	Tagesgang: Werktag und Feiertag
Motorenliste	Alter des Motors (Typenschild)
	Nennleistung (Typenschild)
	Anwendung: Pumpe, Ventilator, Kompressor, Förderanlage etc.
	Betriebsstunden pro Jahr (Schätzung)
	Mittlere Auslastung (Schätzung)
	Regelung
	Getriebeart
Feinanalyse	Wartungsintervalle (Getriebe, Motor)
	Spannung, Strom, Leistung, Cosinus.phi, Drehzahl, Frequenzanalyse
	Geräusch, Vibration
	Wärmestrahlung
	Verunreinigungen, Ölstand

8.2 Grobanalyse 1: 1-2-3 Test

Der 1-2-3 Test kann sehr schnell und unkompliziert durchgeführt werden. Die Bewertung erfolgt über leicht ermittelbare Daten (nur Typenschild des Motors notwendig).

Dabei werden Alter, Nennleistung und Laufzeit des Motors berücksichtigt. Durch ein Punktesystem erfolgt die Bewertung. Der Motor mit der höchsten Punktzahl sollte möglichst rasch einer Feinanalyse unterzogen werden.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Punktvergabe sowie die Ergebnisklassen:

Tabelle 10 1-2-3 Test Übersicht (topmotors.ch)

1,2,3 Grobanalyse						Punkte
Alter [Jahre]	über 20	bis 20	bis 15	bis 10	bis 5	
Punkte	5	4	3	2	1	
Nennleistung [kW]	bis 50	bis 150	bis 500	bis 1.500	über 1.500	
Punkte	5	4	3	2	1	
Laufzeit pro Jahr [h/a]	über 5.000	bis 5.000	bis 4.000	bis 3.000	bis 2.000	
Punkte	5	4	3	2	1	
Summe						
bis 5 Punkte		keine Vorkehrung				
6 bis 10 Punkte		Motor überprüfen				
ab 11 Punkte		Motor rasch überprüfen				

8.3 Dokumentation und Messung der Systembetriebsparameter

Die Dokumentation bzw. Messung der folgenden Parameter 1. bis 4. sollte nach Möglichkeit bei allen Motorsystemen Ihres Unternehmens erfolgen. Die Positionen 5. bis 7. sollten darüber hinaus bei Systemen mit Leistungen von mehr als 25 kW erfolgen.

1. Gesamtantriebsstromverbrauch für die gesamte Anlage
2. Spannungsasymmetrie für die gesamte Anlage
3. Gesamte harmonische Verzerrung für die gesamte Anlage
4. Leistungsfaktor für die gesamte Anlage
5. Überdimensionierung und Lastfaktor für jeden Motor
6. Bedarfsprofil: geschätzte Schwankung während eines Tages/einer Woche für jeden Motor
7. Für große Motoren sollten ein Datenlogger und geeignete Strom- und Spannungssensoren verwendet werden (wahrscheinlich nur für die Bewertungsperiode installiert). Für kleinere Systeme sind die besten verfügbaren Daten zu benutzen.

8.4 Audit- Fragen

Bei der Optimierung Ihrer Anlage, können auch folgende Fragen zur Hilfestellung beantwortet werden:

Laufen Motoren zu Zeiten, in denen Prozesse oder die Anlagen, die sie antreiben nicht in Betrieb sind?

Reduktion der Gerätelaufzeit auf das erforderliche Minimum. Ausschalten der Motoren während der Mittags- und Pausenzeit oder zu Zeiten, wenn die Anlagen nicht benötigt werden; diese Maßnahme ist so verlässlich wie die Mitarbeiter.

Gemeinsames Schalten der Antriebe mit dem Prozess. Sobald ein Teil der Anlage ausgeschaltet wird, werden alle Antriebe dieser Anlage automatisch abgeschaltet

Diskontinuierlicher (Batch-) Betrieb von Maschinen wie z.B. Mahlmaschinen, Abschalten in der Zwischenzeit. Geräte wie Mahlmaschinen sind oft durchgehend eingeschaltet, obwohl sie nur zeitweise mit Rohstoffen beschickt werden. Eine Alternative wäre das Sammeln des Materials in einem Puffer und jemanden zu bestimmen, der die Maschine von Zeit zu Zeit einschaltet; falls die Materialsammlung unbeaufsichtigt geschieht, kann der Sammelbehälter übergehen; diskontinuierliche Prozesse können höhere Leistungsspitzen erzeugen, wenn die Anlagen stärker belastet wird

Installation von Zeitschaltern, Füllstandsmessern, Materialsensoren oder anderen automatische Kontrollmechanismen, um die Anlagen, wenn erforderlich, abzuschalten.

Sind besonders alte Motoren im Einsatz?

Sind Standard Keilriemen installiert?

Einsatz von Riemen mit hoher Effizienz (zB Synchronriemen, Zahnriemen)

Sind Motoren im Einsatz, die zur Gänze im Teillastbereich angetrieben werden?

Ersatz von überdimensionierten Motoren durch energieeffiziente Motoren in der passenden Größe. Vor dem Ersatz muss festgestellt werden, ob nicht Zeitpunkte auftreten, in denen die Belastung des Motors kurzfristig erhöht wird.

Sind im Betrieb Motoren im Einsatz, deren Lastverlauf stark schwankt?

Durch entsprechende Regelung kann oft Energie gespart werden.

9. Empfehlungen zur Wartung von E-Motoren

Einige Motorkomponenten nützen sich mit der Zeit und unter Betriebsbelastung ab. Isolierungen werden aufgrund von Spannungsasymmetrie, Über- und Unterspannung, plötzlicher Spannungsabfälle und höherer Temperatur schwächer. Kontakte zwischen sich bewegenden Flächen verursachen Abnutzung. Die Abnutzung wird durch Schmutz, Feuchtigkeit und korrosiven Nebel beeinflusst und wird rasch beschleunigt, wenn die Schmierung falsch aufgebracht wird, überhitzt oder verschmutzt oder nicht regelmäßig ausgetauscht wird.

Motoren, die außer Betrieb sind, sollten jedenfalls vor Feuchtigkeit, Vibration und Korrosion geschützt werden.

Die Lebensdauer eines Motors kann zwischen 30.000 und 40.000 Betriebsstunden liegen, bei geeigneter Wartung wird die Lebensdauer jedenfalls erhöht. Unter bestimmten Umständen - in besonders korrosiver oder aggressiver (Stäube!) Umgebung - geschieht die Abnutzung besonders rasch. In solchen Fällen sollten Spezialmotoren mit besonderer Schutzklasse beschafft werden.

Jede Temperaturerhöhung um 10°C in der Betriebstemperatur verkürzt die Lebensdauer um die Hälfte. Der Kauf von neuen Motoren mit höherer Isolierungstemperatur führt allerdings nicht unbedingt zu längerer Lebensdauer, weil diese Motoren bei höheren internen Temperaturen laufen. Die beste Vorbeugung gegen Wärmeschäden sind der Schutz vor Schmutz, Über- oder Unterspannung, Spannungsasymmetrie, Oberschwingungen, vor zu hoher Umgebungstemperaturen, zu geringer Belüftung und vor Überlastungen.

Lagerversagen stellen neben Überlastung, Verschmutzung und Korrosion die Hauptursache für Motorversagen dar. Falls sie nicht zur rechten Zeit entdeckt werden, können sie zur Überhitzung führen und die Isolierung zerstören oder dem Motor irreparable mechanische Schäden zuführen. Daher sollten immer die Herstellerinformationen bezüglich der Schmierung befolgt werden.

Tabelle 11 Empfehlungen zur Wartung von E-Motoren

Zeitintervall	Tätigkeit
Wöchentlich	Kontrolle des Schmierzustandes, z.B. Ölstand, Fettaustritt
	Inspektion der Motorwelle (Verunreinigungen können auf Leckagen hinweisen)
	Prüfung der Starter, Schalter und Sicherungen
	Kontrolle der Anlaufzeit des Motors
	Bei Bürstenmotoren: Inspektion der Bürsten
Halbjährlich	Prüfung der Lager und der Dichtungen
	Reinigen, um Schmiermittelverunreinigungen und Lagerschäden zu vermeiden. Schmutzanreicherung auf dem Motorgehäuse, am Kühlventilator oder an Öffnungen erhöht die Motortemperatur.
	Überprüfung der ausreichenden Kühlung des Motors (kann sich z.B. durch Verbauung ändern) bzw. Vermeidung von zu hoher Luftfeuchtigkeit.
Jährlich bzw. lt. Herstellerangaben	Schmieren gemäß Herstellerangaben: Qualität und Menge des Schmiermittels beachten, Überschmieren führt zu rascherem Verschleiß (Widerstand nimmt zu oder Wicklungen werden beeinträchtigt)
	Kontrolle der elektrischen Anschlüsse
	Kontrolle auf abnormale oder asymmetrische Spannung
	Vermeidung von zu hoher Last (über 10%)
	Insbesondere bei fliegender Lagerung ist die exakte Ausrichtung von Motor und Getriebe zu beachten.
	Prüfung der Vibration: Diese kann auf Lagerprobleme, Ungleichgewichte in der Last, elektrische Versorgungsprobleme, verbogene Motorwelle, falsche Ausrichtung, oder ungeeignete Keilriemenspannung hinweisen.

Keilriemen

- Überprüfung, Justierung der Keilriemen (jedenfalls nach 40 Betriebsstunden, da hier der überwiegende Teil der Dehnung erfolgt).
- Falsche Ausrichtung führt zu frühzeitigem Verschleiß
- Korrekte Ausrichtung der Riemenscheiben
- Ein zu loser gespannter Keilriemen verrutscht und erhitzt sich rasch
- Ein überspannter Keilriemen verursacht Druck auf Lager, führt zu Überhitzung

Verorgungsnetz

Prüfung des Versorgungsnetzes auf Über- oder Unterspannung, Spannungsasymmetrie (3,5% Spannungsasymmetrie erhöht Motorverluste um ca. 20%), Oberschwingungen; Geeignete Kabel, Trafos oder Blindleistungskompensatoren können Abhilfe schaffen. Gleichmäßige Aufteilung von einphasigen Verbrauchern im Drei-Phasen System ermöglichen symmetrische Spannung.

Präventive Wartung

Einfluss auf den Umfang der Wartung haben die Laufzeit, das Alter, die Umgebungsbedingungen (Staub, Feuchtigkeit, korrosive Umgebung) und die Relevanz des Motors im Betriebsablauf.

Beispiele für Methoden zur präventiven Motorwartung sind:

Schmiermittelüberprüfung: Verschmutzung zeigt mechanische Schäden an Lagern an (Schmiermittel werden durch Überhitzung langfristig verändert, dadurch können auch im abgekühlten Zustand Schäden aufgezeigt werden)

Spannungsüberprüfung: Ungleichmäßige Phasenspannung kann extrem hohe Rotorströme verursachen.

Prüfung des Isolationswiderstandes:

Durch Messung des Widerstandswertes kann über längere Zeiträume die Abnahme der Isolation beobachtet werden.

- Die Messung sollte nicht bei hoher Luftfeuchte oder Temperaturen erfolgen.
- Die Temperatur bewirkt eine exponentielle Veränderung des Isolationswiderstandes (Messung von E-Motoren unter gleichen Temperaturbedingungen, bzw. eine Korrektur um Temperaturabweichung ist für Zeitreihen notwendig)
- Bei starker Verschmutzung ist die Guard Technik anzuwenden.

Thermobilder: zeigen Heißläufer, schlecht fluchtende Lager oder asymmetrische Wicklungsüberlastung.

10. Quellen

Almeida, Angers, Brunner, Doppelbauer (2009): Motors with Adjustable Speed Drives, Testing Protocol and Efficiency Standard, Konferenzbeitrag, www.eemods09.fr

Almeida, A., Ferreira, F., Fong, J., Fonseca, P. (2008): EuP Lot 11: Motors, Final Report, University of Coimbra

Almeida, A., Falkner, H., Fong, J. (2014a): EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, Task 3 Report, University of Coimbra, Atkins

Almeida, A., Falkner, H., Fong, J. (2014b): EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, Task 4 Report, University of Coimbra, Atkins

Almeida, Ferreira, Fonseca, Chretien, Falkner, Reichert, West, Nielsen, Both: VSDs for Electric Motor Systems, SAVE-Study Final Report, Europäische Kommission, o.J.

Benderoth, H. (2008): Regelung von Ventilatoren, Reitz Ventilatoren

Das Europäische Motor Challenge Programm, Modul Ventilatorsysteme, Brüssel, 2003

<http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge/index.htm>

Das Europäische Motor Challenge Programm, Modul Antriebe, Brüssel, 2003:

<http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge/index.htm>

IEC 60034-30 (2008): Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)

IEC 60034-31 (2009): Rotating electrical machines – Part 31: Guide for the selection and application of energy-efficient motors incl. Variable-speed applications, draft, 4.3.2009 (date of circulation)

Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australian Government (DCCEE) Electric Motors Reference Manual:

<http://www.climatechange.gov.au/what-you-need-to-know/appliances-and-equipment/electric-motors/reference-manual/commissioning.aspx>, abgerufen am 13. Dezember 2010

Huber, H. (2013): Transmission am Beispiel der Luftförderung, FHNW, IEBau, Muttenz; Vortrag bei Topmotors Workshop "Transmissionen - effiziente Riemen und Getriebe", Zürich, 25.11.2013

Kuh, C. (2009): Effizienzmaßnahmen in lufttechnischen Anlagen, Technische Universität Wien

Kutzendörfer (2008): Vorbeugende Wartung von industriellen Antriebsriemen und Antrieben <http://www.kutzendoerfer.at/files/vorbeugende-wartung-20087.pdf>

Natural Resources Canada (2004): Energy-Efficient Motor Systems Assessment Guide

Natural Resources Canada (2009): Variable Frequency Drives, Energy Efficiency Reference Guide

Prüftechnik, Alignment Systems GmbH; Warum Ausrichten?: www.pruftechnik.com, am 14. Dezember 2010

Radgen, P. Oberschmidt, J., Cory, W.T. (2008): EuP Lot 11: Fans for ventilation in non residential buildings. Final report, Fraunhofer ISI

SEW Eurodrive, DriveAcademy (2004): Grundlagen Antriebstechnik, Version 3, T_DE_002

The Energy Research Institute: How to save energy and money in electrical systems, Cape Town

Umweltbundesamt, Allplan: Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen, Wien 2005

U.S Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (2005): Energy Tips – Drives

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (2008): Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry

U.S Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (2003): Improving Fan System Performance, a sourcebook for industry, Washington, D.C.

http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/fan_sourcebook.pdf

Website: www.topmotors.ch

VIK (2005): VIK-Empfehlung 1: Drehstrom-Asynchronmotoren – Technische Anforderungen, 4.2005

ZVEI (2006): Energiesparen mit elektrischen Antrieben, Frankfurt am Main

11. Annex-Mindestwirkungsgrade nach der Ökodesign-Richtlinie

Der IEC Standard 60034-30 der Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) spezifiziert Energieeffizienzklassen für Elektromotoren im Leistungsbereich zwischen 0,12 und 1000 kW. Er gilt für 2, 4 6 und 8-polige Motoren. Ausgenommen sind u.a. Motoren, die komplett in Maschinen wie Pumpen, Ventilatoren oder Kompressoren integriert sind, und somit nicht getrennt getestet werden können.

Folgende vier Effizienzklassen wurden definiert. Ein Effizienzklasse 1 Motor entspricht ungefähr dem Standard von IE 2, Effizienzklasse 2 ungefähr IE1 (wobei auf die neue Messmethodik zur Bestimmung der Verluste gemäß IEC 60034-2-1 verwiesen wird):

- IE1 – Standard Efficiency.
- IE2 – High Efficiency
- IE3 – Premium Efficiency
- IE4 – Super Premium

Die Europäische Kommission übernimmt in der Umsetzungsverordnung zur Ökodesign Richtlinie für Elektromotoren im Wesentlichen die Definitionen des IEC 60034 Standards. Allerdings gilt diese Verordnung nur für Motoren mit der Betriebsart Dauerbetrieb S1. Motoren, die für den Betrieb in Temperaturbereichen von über 60°C oder unter -30°C (0°C im Falle von Wasserkühlung) gebaut sind, sind ausgenommen.

Folgende Vorgaben gelten gemäß Ökodesign Richtlinie:

- Ab 16. Juni 2011 sollen Elektromotoren dem Effizienzstandard IE2 gemäß dem IEC 60034-30 Standard entsprechen.
- Seit Jänner 2017 müssen Elektromotoren im Leistungsbereich 0,75 kW – 375 kW der Effizienzklasse IE3 entsprechen oder dem IE2 Standard entsprechen und mit Frequenzumrichter ausgestattet sein.
- Als Informationserfordernis sollen ab 16. Juni 2011 folgende Daten am oder nahe dem Typenschild angegeben werden: das Baujahr, die Effizienz bei Volllast und die IE Einordnung.

Tabelle 12 Mindestwirkungsgrade IE2-Motoren

IE2 (50 Hz)	Anzahl der Pole			
	2	4	6	8
Nennausgangsleistung (kW)				
0,12	59,1	50,6	39,8	39,8
0,18	64,7	56,6	45,9	45,9
0,20	65,9	58,2	47,4	47,4
0,25	68,5	61,6	50,6	50,6
0,37	72,7	67,6	56,1	56,1
0,40	73,5	68,8	57,2	57,2
0,55	77,1	73,1	61,7	61,7
0,75	77,4	79,6	75,9	66,2
1,1	79,6	81,4	78,1	70,8
1,5	81,3	82,8	79,8	74,1
2,2	83,2	84,3	81,8	77,6
3	84,6	85,5	83,3	80,0
4	85,8	86,6	84,6	81,9
5,5	87,0	87,7	86,0	83,8
7,5	88,1	88,7	87,2	85,3
11	89,4	89,8	88,7	86,9
15	90,3	90,6	89,7	88,0
18,5	90,9	91,2	90,4	88,6
22	91,3	91,6	90,9	89,1
30	92,0	92,3	91,7	89,8
37	92,5	92,7	92,2	90,3
45	92,9	93,1	92,7	90,7
55	93,2	93,5	93,1	91,0
75	93,8	94,0	93,7	91,6
90	94,1	94,2	94,0	91,9
110	94,3	94,5	94,3	92,3
132	94,6	94,7	94,6	92,6
160	94,8	94,9	94,8	93,0
200 bis 1000	95,0	95,1	95,0	93,5

Annex-Mindestwirkungsgrade nach der Ökodesign-Richtlinie

Tabelle 13 Mindestwirkungsgrade IE3-Motoren

IE3 (50 Hz)	Anzahl der Pole			
	2	4	6	8
Nennausgangsleistung (kW)				
0,12	60,8	64,8	57,7	50,7
0,18	65,9	69,9	63,9	58,7
0,20	67,2	71,1	65,4	60,6
0,25	69,7	73,5	68,6	64,1
0,37	73,8	77,3	73,5	69,3
0,40	74,6	78,0	74,4	70,1
0,55	77,8	80,8	77,2	73,0
0,75	80,7	82,5	78,9	75,0
1,1	82,7	84,1	81,0	77,7
1,5	84,2	85,3	82,5	79,7
2,2	85,9	86,7	84,3	81,9
3	87,1	87,7	85,6	83,5
4	88,1	88,6	86,8	84,8
5,5	89,2	89,6	88,0	86,2
7,5	90,1	90,4	89,1	87,3
11	19,2	91,4	90,3	88,6
15	91,9	92,1	91,2	89,6
18,5	92,4	92,6	91,7	90,1
22	92,7	93,0	92,2	90,6
30	93,3	93,6	92,9	91,3
37	93,7	93,9	93,3	91,8
45	94,0	94,2	93,7	92,2
55	94,3	94,6	94,1	92,5
75	94,7	95,0	94,6	93,1
90	95,0	95,2	94,9	93,4
110	95,2	95,4	95,1	93,7
132	95,4	95,6	95,4	94,0
160	95,6	95,8	95,6	94,3
200 bis 1000	95,8	96,0	95,8	94,6

Tabelle 13 Mindestwirkungsgrade IE4-Motoren

IE3 (50 Hz)	Anzahl der Pole			
Nennausgangsleistung (kW)	2	4	6	8
0,12	66,5	69,8	64,9	62,3
0,18	70,8	74,7	70,1	97,2
0,20	71,9	75,8	71,4	98,4
0,25	74,3	77,9	74,1	70,8
0,37	78,1	81,1	78,0	74,3
0,40	78,9	81,7	78,7	74,9
0,55	81,5	83,9	80,9	77,0
0,75	83,5	85,7	82,7	78,4
1,1	85,2	87,2	84,5	80,8
1,5	86,5	88,2	85,9	82,6
2,2	88,0	89,5	87,4	84,5
3	89,1	90,4	88,6	85,9
4	90,0	91,1	89,5	87,1
5,5	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	91,7	92,6	91,3	89,3
11	92,6	93,3	92,3	90,4
15	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	93,7	94,2	93,4	91,7
22	94,0	94,5	93,7	92,1
30	94,5	94,9	94,2	92,7
37	94,8	95,2	94,5	93,1
45	95,0	95,4	94,8	93,4
55	95,3	95,7	95,1	93,7
75	95,6	96,0	95,4	94,2
90	95,8	96,1	95,6	94,4
110	96,0	96,3	95,8	94,7
132	96,2	96,4	96,0	94,9
160	96,3	96,6	96,2	95,1
200	96,5	96,7	96,3	95,4

Annex-Mindestwirkungsgrade nach der Ökodesign-Richtlinie

250	96,5	96,7	96,5	95,4
315 bis 1000	96,5	96,7	96,6	95,4



*Bundesministerium
für Verkehr,
Innovation und Technologie*



ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR – AUSTRIAN ENERGY AGENCY
A-1150 Vienna, Mariahilfer Straße 136 | Phone +43-1-586 15 24 | Fax +43-1-5861524-340
office@energyagency.at | www.energyagency.at