

Effizienz ist wichtig

Pumpen

■ Die wichtigsten Fakten zur Auswahl und zum Einsatz von Förderpumpen

Effiziente Pumpen – die fünf wichtigsten Punkte zur richtigen Systemauslegung:

- **Auslegung:** Anlage auf effektive Rahmenbedingungen auslegen (Wasserbedarf, Wärmebedarf)
- **Verluste:** Anlage auf minimale Energieverluste auslegen (kurze Leitungen mit grossem Querschnitt, keine unnötigen Drosseln und Bögen)
- **Variabler Betrieb:** Wassermenge und Druck dem Bedarf anpassen (bedarfsabhängige Steuerung)
- **Frequenzumrichter:** Drehzahl des Antriebsmotors regulieren (statt Drossel oder Stufenschaltung)
- **Effizienter Motor:** Antriebsleistung und Drehzahl an Pumpe und Bedarf anpassen



Per 1. Januar 2013 tritt die Verordnung der EU für Wasserpumpen in Kraft (Nr. 547/2012 vom 25. Juni 2012).

Sie macht Vorgaben für Kreiselpumpen für sauberes Wasser, insbesondere für fünf Typen:

- Wasserpumpe mit axialem Eintritt, eigene Lagerung (ESOB); 1450 U/min und 2900 U/min
- Wasserpumpe mit axialem Eintritt, Blockausführung (ESCC); 1450 U/min und 2900 U/min
- Block-Wasserpumpe mit axialem Eintritt, Inlineausführung (ESCCi); 1450 U/min und 2900 U/min
- Mehrstufige vertikale Wasserpumpe (MS-V); 2900 U/min
- Mehrstufige Tauch-Wasserpumpe (MSS); 2900 U/min

Um der EU-Konformität zu entsprechen, müssen diese Pumpen gemäss Anhang III der Verordnung in drei Betriebspunkten minimale Wirkungsgrade erreichen:

- Im Punkt der maximalen Effizienz (η_{BEP}). Die geforderten Werte sind je nach Pumpentyp unterschiedlich und werden per 1. Januar 2015 verschärft.
- Bei Teillast muss der Wirkungsgrad mindestens 94,7 % des η_{BEP} , bei Überlast mindestens 98,5 % des η_{BEP} betragen.

Grundlagen

Pumpen sind Strömungsmaschinen, mit denen Flüssigkeiten (inkompressible Fluide) gefördert werden. Dafür wird Antriebsarbeit durch mechanische Leistung in Bewegungsenergie des Mediums (Volumenstrom und Druck) umgewandelt.

■ **Im geschlossenen Kreis** steht der Transport von Wärme und Druckenergie im Vordergrund. Beispiele: Heizung, Klima- und Kühlanlage.

■ **Im offenen Kreis** ist meist der Materialtransport der Zweck. Beispiele: Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, Kühlmittel.

Pumpen sind im Verbund mit ihrem Antriebsmotor oder von diesem getrennt als Solitäre erhältlich.

Dieses Merkblatt richtet sich an Bauherrschaften, Planer und ausführende Installateure der Gebäudetechnik, von industriellen und kommunalen Betrieben und von Dienstleistungsunternehmen.

In diesem Merkblatt werden hauptsächlich mittlere und grössere Kreiselpumpen der Gebäudetechnik und der Industrie behandelt, bei denen der Motor vom Pumpenrad getrennt ist. Kleine integrierte Pumpen (sogenannte «Nassläufer»), grosse Pumpen über 1000 kW, Tauchpumpen und diverse Spezialanwendungen (Hydraulikpumpen) werden nicht explizit behandelt.

8 % des Stromes für Pumpen

Der Elektrizitätsverbrauch der Pumpen in der Schweiz beträgt total 4757 GWh/a. Darin ist der Verbrauch der Pumpen in Wasserkraftwerken mit knapp 3000 GWh nicht eingerechnet (Tabelle 1 und Abbildung 1). Bezogen auf den gesamten Elektrizitätsverbrauch der Schweiz (Endverbrauch) entsprechen diese 4757 GWh 8%.

Der Elektrizitätsverbrauch der neuen haustechnischen Umwälzpumpen wird in den nächsten Jahren deutlich abnehmen, da aufgrund der verschärften Energieverordnung ab 2013 nur noch hocheffiziente Umwälzpumpen verkauft werden dürfen und ab etwa 2015 auch strenge Vorschriften für grössere Pumpen gelten werden. Diese Bestimmungen wirken sich zuerst in der Kategorie der Nassläufer bis 2500 W aus; sie machen den grössten Teil dieser Kategorie aus. Auch bei anderen Pumpen-Anwendungen werden Einsparungen erwartet, welche über längere Zeit realisiert werden können.

Grundbegriffe

Der Volumenstrom Q ist der in einer Zeiteinheit von der Pumpe durch ihren Austrittsquerschnitt (Druckstutzen) geförderte nutzbare Volumenstrom (in m³/s, häufig in m³/h oder l/s angegeben).

Die Förderhöhe H definiert die von der Pumpe auf die Förderflüssigkeit übertragene nutzbare mechanische Arbeit. Als Stutzenarbeit wird die Energie pro kg gefördertes Fluid bezeichnet: $Y = g H_f$

	GWh	%
Industrie und verarbeitendes Gewerbe	2300	48,3 %
Umwälzpumpen Armaturen-/Heizgruppen	1000	21,0 %
Umwälzpumpen übrige Haustechnik	600	12,6 %
Wasserversorgungen (öffentliche)	400	8,4 %
Abwasserreinigungsanlagen (öffentliche)	300	6,3 %
Geschirrspüler Haushalt	55	1,2 %
Tankstellen inklusive Flugverkehr	36	0,8 %
Fernwärmeversorgungen	27	0,6 %
Geschirrspüler Gastrogewerbe	11	0,2 %
Waschmaschinen Laugenpumpen	11	0,2 %
Landwirtschaft	10	0,2 %
Schwimmbäder, Wellness (öffentlich, privat)	7,5	0,2 %
Total	4757	100 %

Tabelle 1: Elektrizitätsverbrauch der Pumpen in der Schweiz. Im Total sind die Aggregate in den Pumpspeicherwerken der Elektrizitätswerke nicht enthalten.

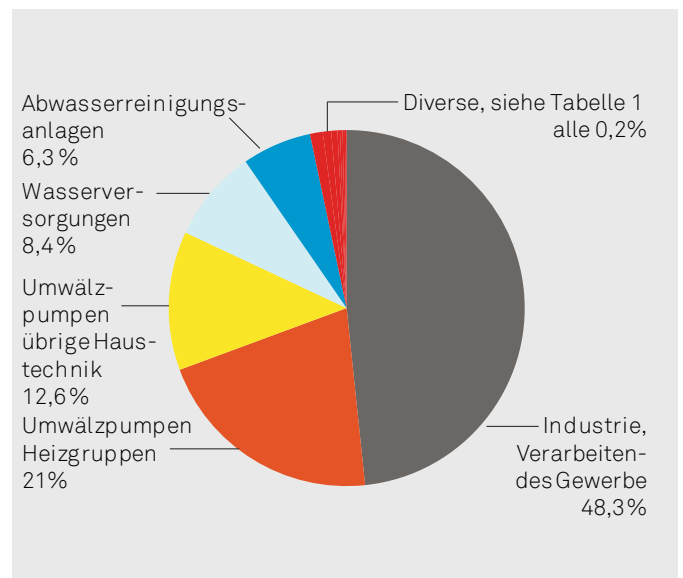


Abbildung 1: Elektrizitätsverbrauch von Pumpen in der Schweiz (Quelle: Nipkow 2011)

Die Stutzenarbeit und somit die Förderhöhe kann durch Messen der statischen Drücke in Saug- und Druckstutzen sowie der geodätischen Höhendifferenz und durch Berechnen der Geschwindigkeiten in Saug- und Druckstutzen bei einem definierten Q bestimmt werden.

$$gH_f = Y = g(z_d - z_s) + \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{v_d^2 + v_s^2}{2}$$

$$H = z_d - z_s + \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 + v_s^2}{2g}$$

Hydraulische Leistung (Förderleistung) P_h : Die dem System zugeführte hydraulische Leistung ist das Produkt von Massenstrom und Stutzenarbeit.

$$P_h = \dot{m} Y = \rho Q Y = \rho Q g H_f$$

Wellenleistung (mechanische Leistung) P_{Welle} : Die mechanische Leistung, welche der Pumpe an der Welle zugeführt wird, ist aufgrund der mechanischen Verluste und der Strömungsverluste in der Pumpe grösser als die hydraulische Leistung. Die mechanische Leistung wird vom Elektromotor aufgebracht:

$$P_{Welle} = \frac{P_h}{\eta} = M\omega = P_{el} \eta_{Motor}$$

Zur Typologie der Pumpen

Radialpumpen, Halbaxialpumpen (auch als Diagonalpumpen bezeichnet) und Axialpumpen gehören zur Kategorie der Kreiselpumpen. In Abbildung 3 sind die

Einsatzgebiete der einzelnen Pumpentypen eingetragen. Die spezifische Drehzahl n_q charakterisiert die jeweilige Pumpenbauform.

Beispiel Industrie

Bei einer Untersuchung in 5 Industriebetrieben in der Schweiz mit insgesamt 1500 elektrischen Antrieben sind Anwendungen von Pumpen mit einem Anteil am elektrischen Gesamtverbrauch von durchschnittlich 18% sehr wichtig (Abbildung 2). In diesen Betrieben sind die Pumpen in hydraulischen und Vakuumsystemen eingebaut; sie fördern Wasser und andere Flüssigkeiten. Die 400 untersuchten Pumpen weisen eine mittlere Grösse von 16 kW auf, sie laufen 3800 Stunden pro Jahr und sind 16 Jahre alt. Nur 12% sind mit einem Frequenzumrichter zur Drehzahlregulierung und damit zur Lastanpassung ausgerüstet.

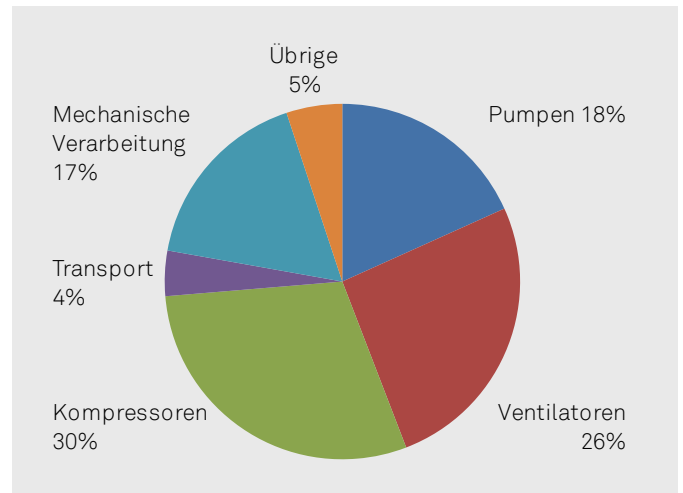


Abbildung 2: Anwendungen von elektrischen Motoren bei 5 grossen Industrieunternehmen (Quelle: Easy 2012)

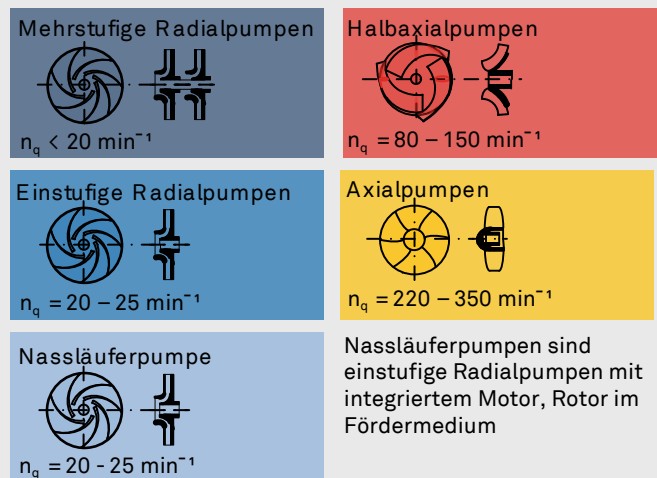
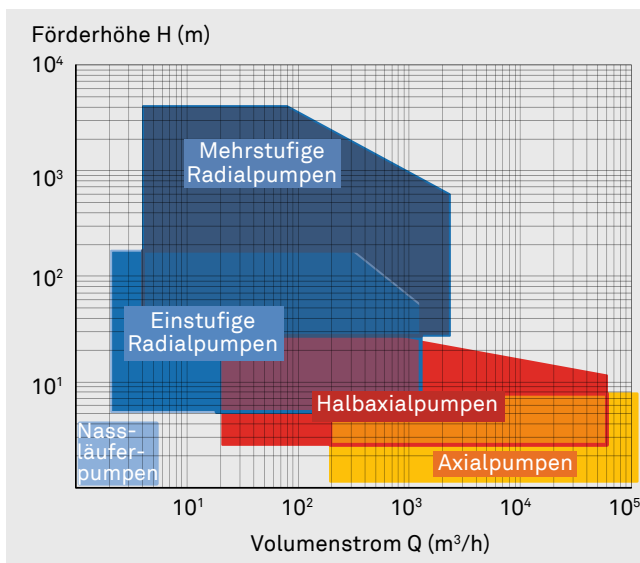


Abbildung 3: Typologie von Pumpen, nach Förderhöhe und Volumenstrom geordnet (Q-H-Diagramm)

Wahl der Pumpe

Auswahlkriterien

Betriebsdaten

■ Volumenstrom, Eintrittsdruck, Austrittsdruck, NPSH-Wert der Anlage

Förderflüssigkeit (Medium)

■ Zusammensetzung, falls ein Gemisch vorliegt, Dichte, Viskosität und Dampfdruck bei definierten Arbeitstemperaturen

■ Feststoffgehalt, korrosive und erosive Bestandteile

■ Ungelöste Gasanteile

■ Gefährdungspotenzial, wie z.B. explosiv, brennbar, giftig, ätzend, etc.

■ Höhere Viskosität benötigt höheren NPSH-Wert, reduziert die hydraulische Nutzleistung und erfordert eine grössere Antriebsleistung. Der Motor muss allenfalls neu dimensioniert werden.

Arbeitsbedingungen

■ Maximale und minimale Mediumtemperatur

■ Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit

Normen und Gesetze

■ Berücksichtigung normativer Vorgaben

Werkstoffwahl

■ Neben den Festigkeitseigenschaften ist die Korrosionsbeständigkeit gegenüber den zu fördernden Flüssigkeiten eines der wichtigsten Kriterien für die Werkstoffauswahl. Die Korrosionsbeständigkeit ist beeinflusst durch Temperatur, Konzentration, Gehalt an Verunreinigungen und abrasiven Feststoffen sowie durch die maximale Geschwindigkeit und die Strömungsführung in der Pumpe.

Pumpendimensionierung

■ Die Kapazität der Pumpe muss auf das System, in welchem sie betrieben wird, abgestimmt sein. Hierzu ist eine Pumpe mit geeigneter Pumpenkennlinie und passendem Motor zu wählen.

■ Die in einem System benötigte hydraulische Leistung hängt von den zu überwindenden statischen Höhen oder Drücken und den Strömungsverlusten in den Leitungen ab. Das System wird durch seine Anlagenkennlinie charakterisiert.

■ Strömungsverluste im System sind – soweit es hinsichtlich Systemlebensdauer und Anzahl Betriebsstunden ökonomisch sinnvoll ist – zu minimieren. Verluste in der Pumpe können durch Wahl einer Pumpe mit hohem Wirkungsgrad klein gehalten werden.

■ Die Pumpe ist dann optimal ausgelegt und energieeffizient, wenn sie nicht mehr als $\pm 20\%$ (Volumenstrom) vom Bestpunkt entfernt betrieben wird.

Das Verhältnis von Volumenstrom Q [m^3/s] und Förderhöhe H [m], die Drehzahl n [Umdrehungen/min] und die physikalischen Eigenschaften des Fördermediums bestimmen die zu wählende Bauart der Pumpe und den Laufradtyp. Die charakteristische Kenngrösse für den Laufradtyp ist die spezifische Drehzahl n_q :

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

NPSH

NPSH (Haltedruckhöhe) ist ein aus den USA stammender Begriff (Net Positive Suction Head) und ist ein Mass für den minimal zulässigen Druck vor der Pumpe, um Kavitationschäden zu vermeiden. Es wird zwischen Haltedruckhöhe der Pumpe ($\text{NPSH}_{\text{erforderlich}}$) und Haltedruckhöhe der Anlage ($\text{NPSH}_{\text{Anlage}}$ oder $\text{NPSH}_{\text{vorhanden}}$) unterschieden.

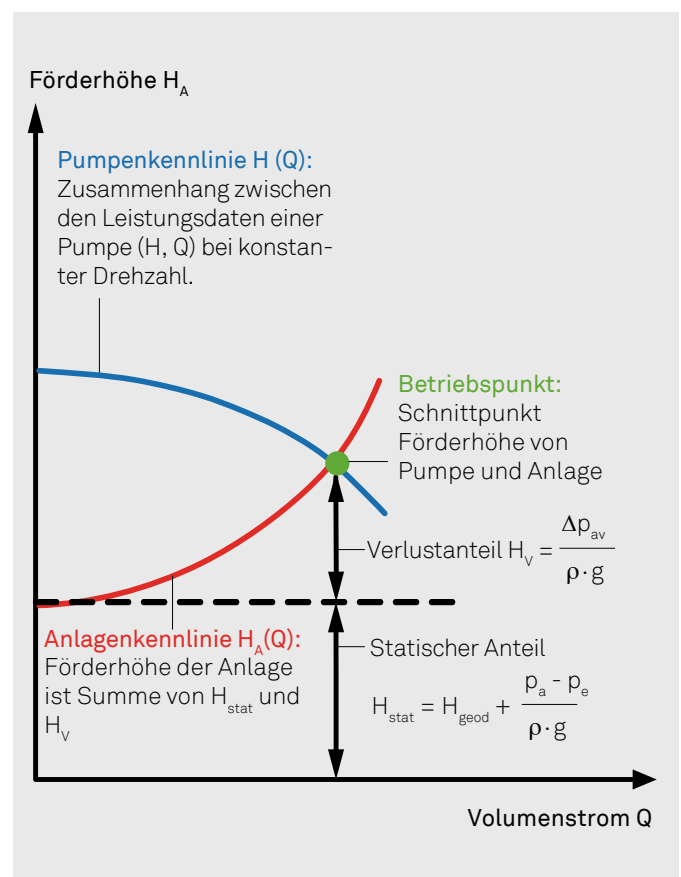


Abbildung 4: Anlagenkennlinie mit statischem Anteil

Beispiel: Zentrifugalpumpe

Vor der Pumpenauswahl muss die Pumpenkennlinie analysiert werden. Sie gibt Auskunft über:

- Volumenstrom im Verhältnis zu überwindener Höhe
- Wirkungsgrad und Bestpunkt
- Wellenleistung (benötigte Energiezufuhr)
- Saughöhenanforderungen zur Vermeidung von Dampfblasen (Kavitation, $NPSH_{erforderlich}$)
- Pumpengrösse und Pumpentyp
- Laufradgrösse
- Drehzahl

Auslegung

- Betriebspunkt: Schnittpunkt von Anlagenkennlinie und Pumpenkennlinie
- Auslegung betreffend Vermeidung von Kavitationschäden mit $NPSH_{erforderlich} < NPSH_{Anlage}$ oder direkt aus den in s gemessenen Grössen. Wobei: p_v der Verdampfungsdruck (Sättigungsdruck) des Wassers bei der gegebenen Temperatur ist und H_{vs} die saugseitigen Höhenverluste vom Systemeintritt bei e bis zur Pumpe darstellen.

Pumpe: $NPSH_{erforderlich}$ wird vom Pumpenhersteller in Funktion des Betriebspunktes angegeben.

Auswahl effizienter Antriebsmotoren

Je nach erforderlicher Drehzahl des Pumpenantriebs können Asynchron-Motoren mit unterschiedlichen Polzahlen eingesetzt werden. Nominale Synchrondrehzahl (Umdrehungen pro Minute): 2-Pole mit 3 000 U/min; 4-Pole mit 1 500 U/min; 6-Pole mit 1 000 U/min; 8-Pole mit 750 U/min.

Die Effizienzklassen der Motoren mit 0,12 kW bis 1 000 kW richten sich nach der IEC-Norm 60034-30 (Abbildung 5). Bei kleinen Leistungen bis 10 kW sind die Effizienzgewinne von IE4 zu IE1 prozentual sehr hoch. Bei grösseren Leistungen von 100 kW bis 1000 kW sind die prozentualen Verbesserungen zwar gering, die Verminderung der Verluste in kW aber sehr bedeutend. Ab 2012 sind in der Schweiz nur noch Elektromotoren mit einer Effizienzklasse von IE2 (oder IE3 und IE4) zugelassen. Die höchsten Wirkungsgrade können mit elektronisch kommutierten Permanentmagnet- oder Reluktanzmotoren erreicht werden.

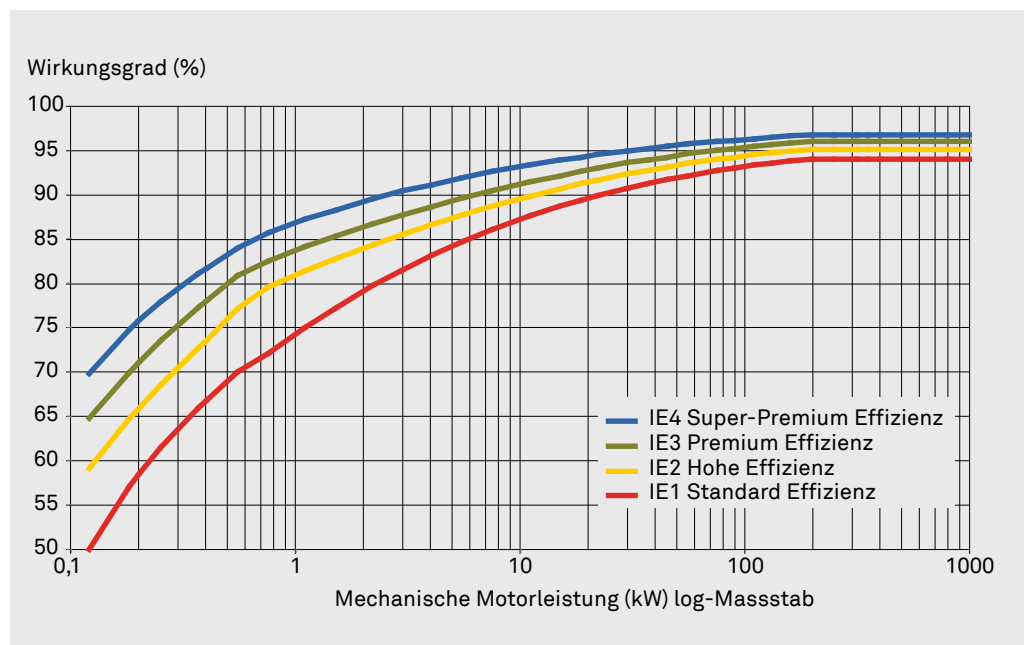
Achtung: Motoren einer höheren Effizienzklasse (IE3) haben vielfach weniger Schlupf als ältere, ineffiziente Motoren (IE1 /eff2). Dadurch ergibt sich eine um 1 % bis 5 % höhere Nenndrehzahl. Bei gleichem Laufraddurchmesser ergibt sich dadurch eine um 3 % bis 15 % höhere Wellenleistung der Pumpe (die hydraulische Leistung steigt bei Drehzahlveränderungen mit der 3. Potenz!). Dieser bei einem Motorenaustausch nicht beabsichtigte Effekt führt in geschlossenen Systemen dazu, dass der gewünschte Effizienzgewinn durch eine unnötige Leistungserhöhung wegen des vergrösserten Förderstroms zunichte gemacht wird. Bei offenen Systemen (Materialförderung) führt der erhöhte Förderstrom zu kürzeren Einschaltzeiten. Die Effizienzsteigerung kann also realisiert werden. Durch die erhöhte Wellenleistung kann sich die Stromaufnahme des an sich effizienteren Motors vergrössern. Dies führt in Einzelfällen dazu, dass die Dimensionierung der Elektroinstallation überprüft werden muss.

Vergleich Drehzahl und Leistung

Erhöhung Drehzahl	Erhöhung Leistungsaufnahme
1 %	3 %
2 %	6 %
3 %	9 %
4 %	12 %
5 %	16 %

Tabelle 2: Die Wellenleistung steigt in der 3. Potenz mit der Drehzahl.

Abbildung 5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Motorleistung von 4-poligen Elektromotoren der Effizienzklassen nach IEC 60034-30-1 (Entwurf Revision 2012)



Energieeffiziente Pumpen bei neuen Anlagen

Ausschreibung von neuen Anlagen

Wichtig ist die Anpassung der Pumpenkennlinie an die Systemanforderungen. Das bedeutet:

- In Serie oder parallel geschaltete Pumpen einsetzen
- Kleinere Zusatzpumpen einsetzen
- Laufraddurchmesser anpassen (Abdrehen)
- Einsatz eines Antriebes mit veränderlicher Drehzahl
- Ersetzen des vorhandenen Motors durch einen Motor anderer Drehzahl (Polpaare)

Weicht der Einsatz der Pumpen von ihrer Auslegung ab, sind Energieverluste mit nicht energieeffizienten Regelungen und erhöhte Kosten die Folge:

- Drosselregelung
- Bypass-Regelung

Lastanpassung an Bedarf

Bei sehr vielen Pumpenanlagen sind variable Volumenströme gefordert, sei es, dass der Prozess selber dies voraussetzt (z.B. Temperaturregelung) oder dass häufig ein reduzierter Volumenstrom ausreicht (z.B. Heizung, Kühlung). Das Sparpotenzial durch Drehzahlreduktion ist bei geschlossenen Kreisläufen sehr gross (Abbildung 6). Die Pumpenleistung (Motor: Drehmoment und Drehzahl; Pumpe: Volumenstrom und Druck) lässt sich durch verschiedene Massnahmen anpassen.

Anpassung Pumpenleistung

- Folgeschaltung von mehreren Pumpen in Serie oder parallel
- Laufraddurchmesser der Pumpe anpassen (Abdrehen)
- Drosseln (energetisch ungünstig)
- Bypass (energetisch ungünstig)
- Transmission (Riemenscheiben)
- Getriebe (bei Pumpen selten)
- Schaufel-Verstellung (nur sehr grosse Aggregate)

Anpassung der Drehzahl bei Elektromotoren

- Drehzahlregelung durch Frequenzumrichter (Asynchron-, Synchron- oder Permanentmagnetmotor)
- Spannungsabsenkung (Asynchronmotor)
- Drehzahlstufen durch andere Polpaar-Zahl oder Polumschaltung

Drehzahlregelung ist nicht immer sinnvoll

Es gibt Anwendungen in der Medienförderung, bei denen eine Drehzahlregelung nicht sinnvoll ist; der unreflektierte Einsatz kann auch Energieverschwendung und Fehlinvestitionen zur Folge haben. Ein typisches Beispiel dafür sind Hebepumpen in Abwasserreinigungsanlagen oder Wasserversorgungen, welche in der Regel mehrfach parallel installiert sind und über

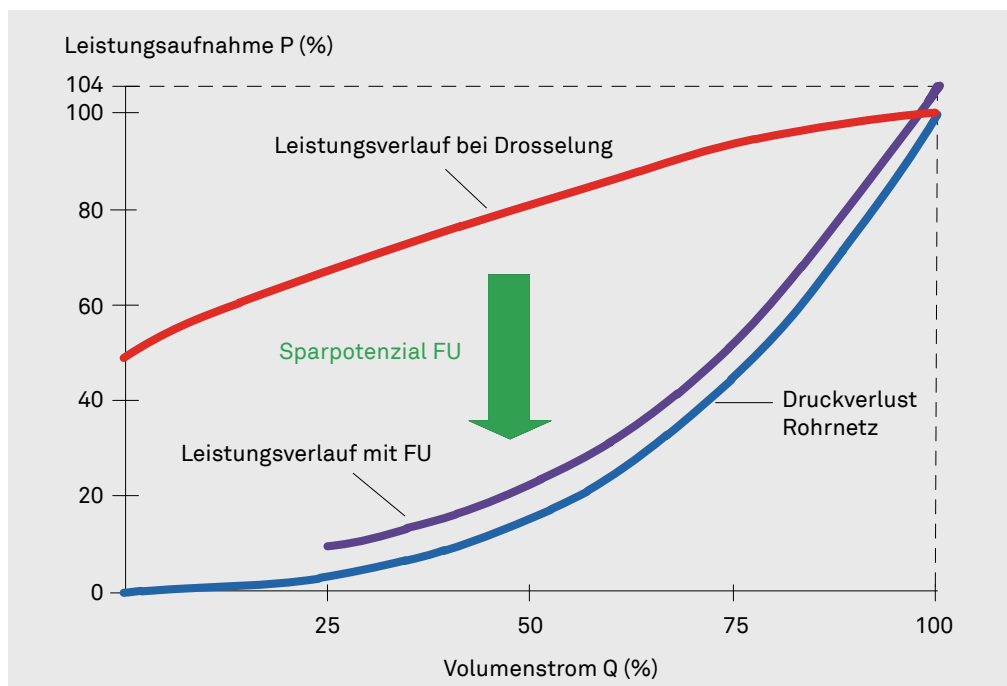


Abbildung 6: Sparpotenzial der Medienförderung in geschlossenen Kreisläufen

Speicherbecken verfügen, also keine feine Anpassung des Volumenstroms erfordern. Hier wird der bescheidene Effizienzgewinn aus der Druckverlust-Reduktion bei kleinerem Fördervolumen durch die Wirkungsgradeinbussen bei Pumpe und Motor sowie durch den Eigenverbrauch des Frequenzumrichters (FU) in der Regel übertrifft.

Für geschlossene Kreisläufe gelten die charakteristischen Druck-Volumenstrom-Verhältnisse gemäss Abbildung 6. Der Volumenstrom ist praktisch proportional zur Drehzahl der Pumpe, die erforderliche Förderdruckdifferenz (Förderhöhe) verhält sich quadratisch dazu und als Folge davon ändert sich die erforderliche Förderleistung (entspricht Volumenstrom mal Förderhöhe) mit der dritten Potenz des Volumenstroms.

Beispiel: eine Reduktion des Volumenstroms um 20 % ergibt eine Reduktion der Förderhöhe um ca. 36 % ($1 - 0,8 \cdot 0,8$), die Antriebsenergie reduziert sich um ca. 49 % ($1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,8$). Bei vielen Prozessen ist ein um 20 % reduzierter Volumenstrom während eines grossen Anteils der Betriebszeit möglich. Bei Raumheizungen ist beispielsweise ein 20 % reduzierter Volumenstrom bei der Wärmeabgabe kaum bemerkbar.

Lastregelung mit Frequenzumrichter

Ein Frequenzumrichter wandelt Netzstrom mit einer Frequenz von 50 Hz Drehstrom (bei kleinen Leistungen auch 1-phasig) elektronisch in einen Drehstrom mit veränderbarer Frequenz um. Damit kann ein der Anwendung angepasstes variables Verhältnis von Spannung und Frequenz programmiert werden. Für die

Medienförderung in geschlossenen Kreisläufen wird die Spannung (massgebend für die Magnetisierung) bei abnehmender Drehzahl überproportional reduziert, weil die Last einer Strömungsmaschine mit der 3. Potenz der Drehzahl abnimmt (Abbildung 6).

Weil die Ausgangsleistung von Frequenzumrichtern nicht ganz sinusförmig ist (auch mit Filtern nicht), verursachen die verbleibenden Oberwellen zusätzliche Verluste im Motor. Diese müssen bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung ebenfalls berücksichtigt werden.

Nachteile von Frequenzumrichtern

Die Frequenzumformung ist nicht umsonst zu haben (Abbildung 7):

- Ein FU kostet ungefähr so viel wie der damit versorgte Motor.
- Der Wirkungsgrad ist bei Nennlast 95 % bis 98 %.
- Bei Teillast unter 20 % sinkt der Wirkungsgrad je nach Motor- oder FU-Grösse auf 70 % bis 20 %.

Motorkühlung: Bei tiefen Drehzahlen kann die Eigenkühlung des Motors (Lüfterrad) ungenügend sein, da wegen der Oberwellen die Verluste in der Wicklung trotzdem recht hoch sein können. Ein Motor, der mit FU längere Zeit unter 50 % Drehzahl betrieben wird, braucht eine drehzahlunabhängige Kühlung (z.B. Fremdlüfter oder Wasserkühlung).

Ein Motorbetrieb über FU ist nur sinnvoll, wenn tatsächlich variable Leistungen und Drehzahlen über einen nennenswerten Teil der Betriebszeit erforderlich

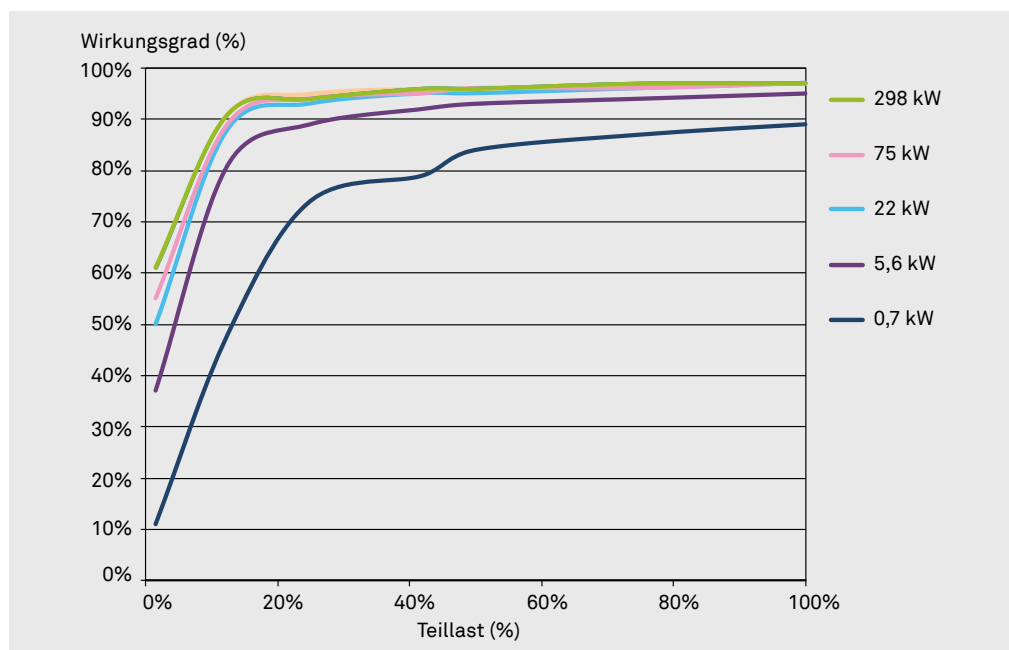


Abbildung 7: Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern
(Quelle: DOE EERE / CUB)

sind. Wenn dies nur für den Maschinen-Hochlauf nötig ist, lassen sich vielleicht andere Lösungen finden. In manchen Fällen ist es sinnvoll, den FU bei überwiegend konstanter Drehzahl zu überbrücken (Bypass) und den Motor nur bei Bedarf über den FU zu starten.

Besonders zu beachten beim Einsatz von Drehzahlregelung

Elektromagnetische Felder (EMF): FU verursachen immer relativ starke EMF. Um Störungen anderer (elektronischer) Geräte zu vermeiden und die Vorschriften einzuhalten, sind entsprechende Filter oder Abschirmungen erforderlich. Je näher Motor und FU zusammengebaut sind, umso einfacher sind die EMF zu beherrschen, weshalb FU häufig mit dem Motor zusammengebaut sind statt in Schaltschränken installiert werden. Bezüglich Abschirmung und Einsatz von Filtern sind bei der Installation die Richtlinien der FU-Hersteller zu berücksichtigen. Bei grösseren Motoren (> 50kW) kann es auf Grund von Wirbelströmen, verursacht durch die hochfrequenten Oberwellen der Frequenzumformer, zu Lagerschäden kommen. Als Vorbeugungsmassnahmen sind isolierte Lager oder Sinus-Filter zu empfehlen.

Spannungsabsenkung

Anbieter von einfacheren elektronischen Motorsteuergeräten versuchen gelegentlich, das enorme Sparpotenzial der Drehzahlregelung auch ihren Geräten zuzuschreiben. Zwar erlaubt eine Spannungsabsenkung (was diese Geräte meist ermöglichen) in gewissen Fällen auch eine Energieeinsparung, nämlich durch Reduktion der Magnetisierung, wenn ein kleineres Drehmoment benötigt wird. Aber die elektrische Drehzahl wird nicht reduziert, was den Effekt gemäss Abbildung 6 ausschliesst.

Ein klassischer Anwendungsfall für Spannungsregelung ist ein überdimensionierter Motor, der somit stets bei Teillast läuft. Damit ist ein effizienter Betrieb mit reduzierter Magnetisierung möglich und kann durch Spannungsabsenkung erreicht werden. Bevor aber ein solches Gerät angeschafft wird, sollte eine eingehende Abklärung zeigen, ob nicht ein Ersatz des Motors durch ein richtig dimensioniertes Aggregat mit höherem Wirkungsgrad (IE3) wirtschaftlicher ist. Da die Lebenszykluskosten eines Motors zu über 90 % durch die Stromkosten gegeben sind, macht die Investition in einem höheren Motorwirkungsgrad meist mehr Sinn als in ein Hilfsmittel für begrenzte Einsparungen beim alten ineffizienten Motor.

Es gibt auch sinnvolle Anwendungen für Spannungsregler, insbesondere als Anlaufhilfe bei Antrieben, die sonst bei konstanter Drehzahl laufen. Mit einem Sanftanlauf kann unter Umständen der Hochlauf der angetriebenen Maschine schonender erfolgen und damit unnötigen Verschleiss vermeiden.

Pumpen-Folgeschaltung

Bei vielen Pumpen-Anwendungen arbeiten mehrere Pumpen parallel im selben Kreislauf. Pumpen in Anlagen mit flacher Kennlinie (hoher statischer Anteil, z.B. Wasserversorgung, Abwasserreinigungsanlagen) arbeiten oft zwischen unterem und oberem Speicherbecken, womit sich eine genaue Regelung des Förderstroms erübrigt.

Parallel arbeitende Pumpen erfordern jedoch in jedem Fall eine Folgeschaltung. Dies ist im einfachsten Fall, nämlich bei einer Reservepumpe für die Redundanz, ein Handschalter oder ein Umschaltrelais. Wenn zwei oder mehrere Pumpen auch parallel im Betrieb sind, ist eine differenzierte Folgeschaltung bzw. Folgeregelung gefragt: In Abhängigkeit des Bedarfes sollen die Pumpen möglichst gut und effizient zusammenarbeiten. Kriterien können sein:

- Zulässige Abweichungen des Volumenstroms oder der geförderten Menge innerhalb definierter Zeitintervalle
- Betriebssicherheit (automatische Ersatzschaltung bei Ausfall einer Pumpe)
- Energieeffizienz
- Gleichmässige oder anders definierte Aufteilung der Laufzeit auf mehrere Pumpen
- Definierte zeitliche Verschiebung von Pumpvorgängen (z.B. Niedertarif)
- Zulässige Anlaufvorgänge pro Zeiteinheit jeder Pumpe
- Zusammenwirken mit Frequenzumrichtern
- Maximal zulässige Druckstösse (vor allem für den Anlauf)

Vorgehen zur Optimierung einer Steuer- bzw. Regel-Logik

1. Definition eines Sets von harten Bedingungen oberster Priorität:

- Volumenstrom bzw. geförderte Menge (zeitlicher Verlauf) und zulässige Abweichungen von Nennwerten
- Betriebssicherheit (Redundanz erforderlich? Für welche Leistung?)

2. Definition eines Sets von Optimierungskriterien:

- Energieeffizienz (Wirkungsgrad der Pumpen und Motoren, Verluste insgesamt minimieren)
- Betriebskosten (Energie, Tarife und Tarifzeiten, Bean-

spruchung respektive Verschleiss, etc.)

- Qualität respektive Gleichmässigkeit des Outputs
- Automatisierungsgrad bzw. Flexibilität der Steuerung respektive Regelung; welche manuellen Eingriffe sind möglich?

3. Steuer- bzw. Regelstrategien erstellen und Varianten vergleichen.

Einsatz mehrerer Pumpen

Bei der Anlagenplanung ist der Einsatz mehrerer paralleler Pumpen in Betracht zu ziehen. In vielen Fällen ist dies schon aus Gründen der Betriebssicherheit erforderlich: wenn bei Ausfall einer Pumpe sofort ein Ersatz verfügbar sein muss. Dies soll aber nicht mit energetischen Nachteilen verbunden sein. Bei manchen Anlagearten bringt der Einsatz paralleler Pumpen energetische Vorteile:

- Bessere Effizienz und präzisere Steuerung bei stark variierendem Arbeitsbereich von Volumenstrom oder Förderhöhe
- Einsparung von Frequenzumrichtern zur Mengenregelung

Je nach Anlageart müssen bauliche und technische Komponenten sinnvoll kombiniert werden. Speicherbecken (bei offenen Anlagen) oder Membran-Druckbehälter (Druckerhöhung) ermöglichen einen stufenweisen Betrieb in Folgeschaltung oder einen Intervall-Betrieb der Pumpen. Nebst anderen Vorteilen verursachen bauliche Massnahmen auch Kosten. Die Steuerung respektive Regelung des Gesamtsystems ist schon bei der Planung von baulichen Massnahmen und der Hydraulik einzubeziehen.

Drehzahlvariation

Die Drehzahlvariation erlaubt bei Antrieben Betriebspunkte mit geringeren Volumenströmen respektive niedrigeren Förderhöhen anzusetzen. Ein Antrieb mit variabler Drehzahl bringt bei richtigem Einsatz folgende Vorteile mit sich:

- Energieeinsparung
- Regelung der Drehzahl erlaubt konstante Betriebsbedingungen.
- Sanfter Anlauf, was wiederum die thermische und mechanische Abnützung reduziert.
- Geringere Traglasten
- Reduzierte Wellendurchbiegung
- Geringere Unterhaltskosten

Einsatz von in Serie oder parallel geschalteten Pumpen:

- Durch parallel laufende Pumpen kann bei konstanter Förderhöhe der Volumenstrom verdoppelt werden. Es ist zu beachten, dass die Druckverluste mit dem Quadrat des Volumenstroms zunehmen.
- Alle parallel laufenden Pumpen mit Einrichtungen zur Drehzahlvariation auszurüsten, macht keinen Sinn. Es reicht, wenn ein Pumpenantrieb über einen Frequenzumrichter angesteuert wird.
- Solange eine Pumpe die Anforderungen im Betrieb erfüllt, sollte paralleler Pumpenbetrieb vermieden werden, ausser wenn kurzfristig hohe Maximalleistungen gefordert sind (z.B. wegen Feuerwehr).

Ideal ist der Einsatz von Pumpen mit veränderlicher Drehzahl in Anlagen mit stark variierenden Volumenströmen und geringem statischen Anteil in der Anlagekennlinie (Abbildung 9). Nicht geeignet ist die variable Drehzahl in Systemen mit hohem statischen Anteil (Abbildung 10). Pumpen mit variabler Drehzahl lohnen sich vor allem in Systemen mit:

- grosser und häufiger Lastvariation
- grosser Nennleistung
- Einsatzdauer von mehr als 2000 Stunden pro Jahr.

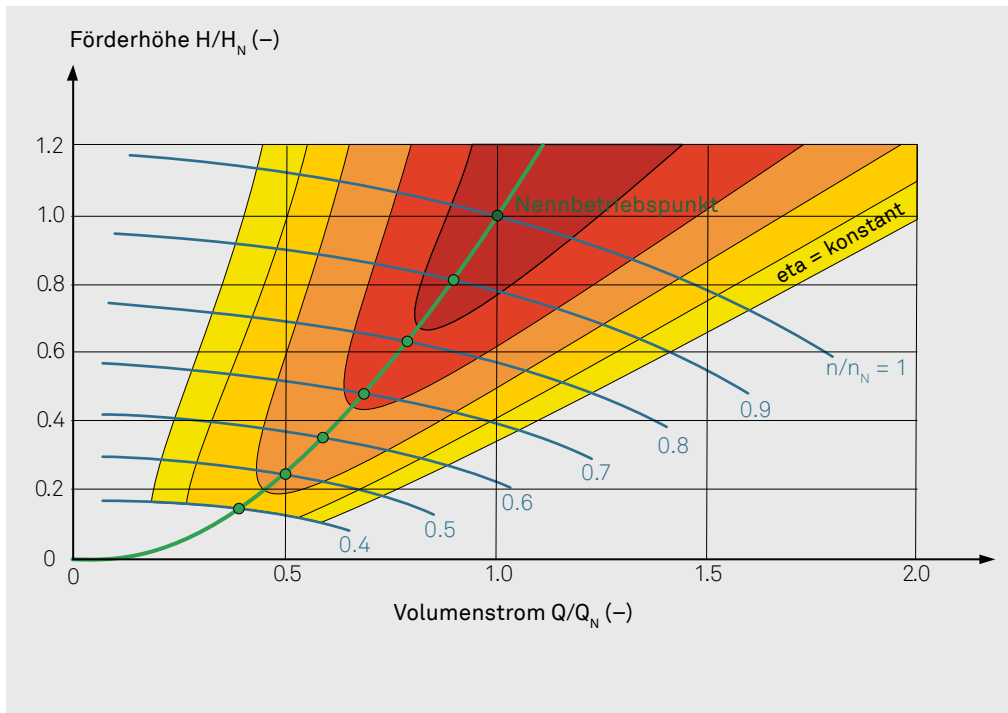


Abbildung 9: Variable Drehzahl ergibt bei Anlagenkennlinie ohne H_{stat} einen grossen Arbeitsbereich.

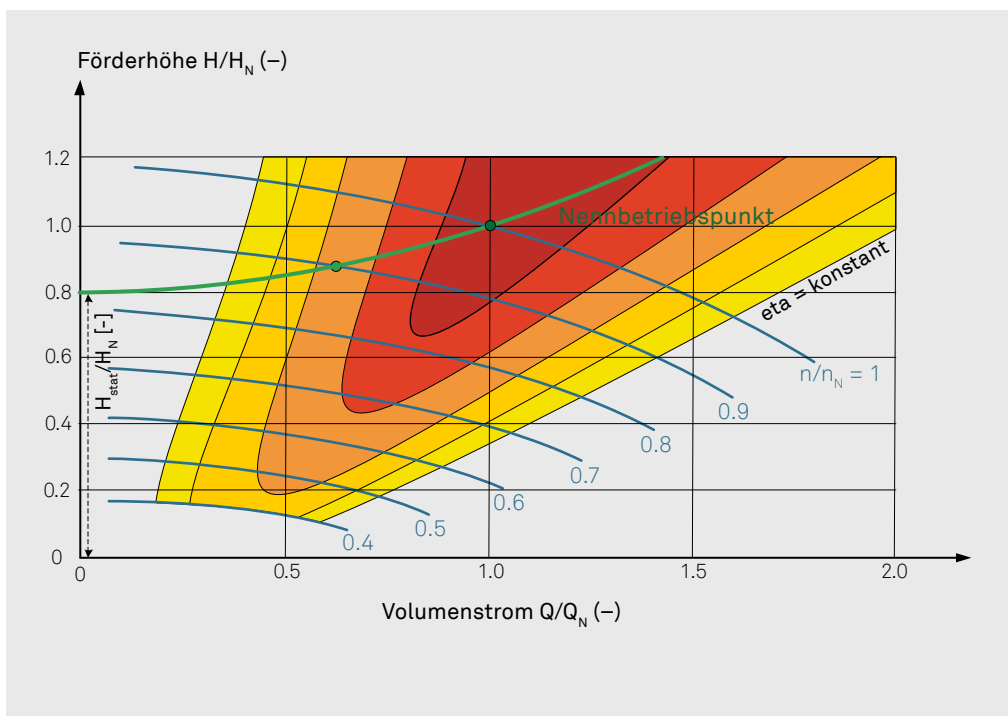


Abbildung 10: Variable Drehzahl macht bei flacher Anlagenkennlinie (überwiegendes H_{stat}) keinen Sinn.

Beurteilung und Optimierung alter Anlagen

Die fünf häufigsten Mängel:

- Überdimensionierte Motoren und Pumpen arbeiten in schlechtem Betriebspunkt.
- Drosselsteuerung statt Regelung mit Frequenzumrichter
- Betrieb ohne Nutzen, keine Zeitabschaltung
- Unnötig grosse Förderströme und Förderhöhe
- Alte ineffiziente Motoren und Pumpen

Bewertung bestehender Pumpsysteme

Pumpen

- Durch die Bewertung von Pumpenanlagen lassen sich ineffiziente Aggregate orten und das Energieeinsparpotenzial abschätzen.
- Der Bewertung einer Pumpenanlage dienen Angaben zum Betrieb, Pumpenkennlinie, Volumenstrom, Systemdruck, Drehzahl, Stufenzahl und Eigenschaften des geförderten Fluides.
- Zur Erhöhung der Effizienz werden unnötige Pumpen abgeschaltet, überdimensionierte Pumpen werden ersetzt und – sofern sinnvoll – Frequenzumrichter für variable Drehzahl eingesetzt.
- Die Lastzyklen der Pumpe im Prozess zeigen das Energiesparpotenzial in jedem Arbeitspunkt. Mit einem drehzahlvariablen Antrieb kann für jeden Arbeitspunkt die optimale Energiezufuhr eingestellt werden (gilt nur bei hohem Verlustanteil in der Anlagenkennlinie).

Verluste im System

- Regelung des Betriebspunktes über eine Drossel oder einen Bypass erlaubt die Anlagenkennlinie an die Pumpe anzupassen, was die Energieeffizienz reduziert.
- Beim – höchst ineffizienten – Einsatz von Regelventilen zur Drosselregelung ist darauf zu achten, dass ein Ventiltyp gewählt wird, der bei geöffnetem Zustand minimale Druckverluste aufweist.
- Erhöhte Druckverluste durch Korrosion und Kalkablagerungen steigern den Energieverbrauch massiv.
- Die Druck- und Reibungsverluste hängen vom Durchmesser und der Länge der Rohrleitungen ab, von deren Oberflächenbeschaffenheit, vom Volumenstrom und der Viskosität der Flüssigkeit.
- Das Energiesparpotenzial kann auch mithilfe von Softwaretools, wie z.B. «DOE's Pumping System Assessment Tool», ermittelt werden.

Systemwartung

Es wird zwischen präventiver und prädiktiver Wartung unterschieden:

- **Präventive Wartung** beinhaltet Kupplungsausrichtung, Schmierung, Wartung und Ersetzen von Dichtringen sowie die Kontrolle des Pumpenmotors.
- **Prädiktive Wartung** minimiert ungeplante Anlagenausfälle. Sie beinhaltet Vibrationsanalyse, Motorentwicklungsanalyse, Schmierölanalyse und periodisches Testen des Wirkungsgrades.

Allgemeine Wartungsdcheckliste

- Kontrolle auf Undichtigkeiten
- Kontrolle der mechanischen Dichtungen
- Kontrolle der Lager
- Kontrolle von Dampfblasenschäden (Kavitation)
- Motor- und Pumpenausrichtung
- Zustand des Motors

Energieeffizienz der eingesetzten Pumpe ermitteln

Tests helfen, ineffiziente Systeme zu identifizieren und Energiesparpotenziale zu ermitteln. Dazu werden im System installierte Messinstrumente genutzt oder mobile Geräte eingesetzt. Mithilfe der Messdaten können Massnahmen zur Optimierung der Pumpeneffizienz evaluiert werden:

- Reinigung des Systems
- Revision der Pumpe, Ersatz von beschädigten Buchsen, Dichtungen, Laufrädern, etc.
- Ersatz der Pumpe oder Nachrüstung mit einem Frequenzumrichter.

Messungen an Pumpen

- Auswertung der Angaben auf den Typenschildern der Pumpe und des Motors (Herstellerangaben)
- Bestimmen der zugeführten Leistung: Elektrische Messung
- Bestimmen der abgeführten Leistung: Messung von Volumenstrom und Druckdifferenz



Weiterführende Infos

Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Erklärung
Dampfdruck Fluid	p_v	Pa	
Dichte	ρ	kg/m ³	Rho
Drehmoment	M	Nm	
Druck (absolut)	p	Pa	
Druck am Austritt der Anlage (des hydraulischen Systems)	p_a	Pa	
Druck am Eintritt der Anlage (des hydraulischen Systems)	p_e	Pa	
Erdbeschleunigung	g	m/s ²	
Förderhöhe	H_f	m	
Geschwindigkeit	v	m/s	
Index _d	d		druckseitiger Stutzen der Pumpe
Index _s	s		saugseitiger Stutzen der Pumpe
Leistung	P	W	hydraulisch, mechanisch oder elektrisch
Massenstrom	\dot{m}	kg/s	
Net Positive Suction Head	NPSH	Pa	Haltedruckhöhe wegen Kavitation
spezifische Drehzahl	n_q	-	
spezifische Stutzenarbeit	$Y = g \cdot H_f$	m ² /s ²	
Verlusthöhe	H_v	m	
Volumen	V	m ³	
Volumenstrom	Q	m ³ /s	
Winkelgeschwindigkeit	ω	s ⁻¹	Omega
Wirkungsgrad	η	-	Eta

Editorischer Vermerk

Das Merkblatt Pumpen wurde von S.A.F.E. im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner, S.A.F.E., Jürg Nipkow, S.A.F.E., Peter Gyger, Biral, Prof. Thomas Staubli, HSLU, erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten

Das Merkblatt ist unter www.topmotors.ch in deutscher und französischer Sprache verfügbar. Topmotors wird von EnergieSchweiz unterstützt.

Normen, Gesetze und Quellen

Gesetzliche Anforderungen Schweiz

Energieverordnung (Revision 2011):

- Anhang 2.10: Netzbetriebene Elektromotoren von 0,75 kW bis 375 kW
- Anhang 2.13: Elektrische Nassläufer-Umwälzpumpen von 1 W bis 2500 W

Normen Schweiz

- SIA 380/4:2006: Elektrische Energie im Hochbau (in Revision)
- SIA 384/1:2009: Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen

Gesetzliche Anforderungen Europa (EU)

Ecodesign-Richtlinie, Verordnungen:

- Nr. 640 (2009): Elektromotoren von 0,75 kW bis 375 kW
- Nr. 641 (2009): Nassläufer-Umwälzpumpen von 1 W bis 2500 W
- Nr. 547 (2012): Wasserpumpen

Internationale Standards

- ISO 2858:1975: End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) – Designation, nominal duty point and dimensions
- IEC 60034-30: 2008. Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code). (in Revision)

Quellen

- Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy: Energy tips: Motors and pumping systems, Tip sheets Nr. 1–12, Industrial Technologies Program, Washington DC, 2006–2008
- Jürg Nipkow: Elektrizitätsverbrauch von Pumpen in der Schweiz, Arbeitspapier S.A.F.E./Topmotors, 2011
- Easy: Förderprogramm für effiziente Antriebe, Auswertung von 1500 Motoren in 5 Unternehmen, Zürich 2012 (unveröffentlicht)
- Conrad U. Brunner, Jürg Nipkow, Rolf Tieben, Rita Werle: Energieeffiziente elektrische Antriebe; in: Bulletin electrosuisse/VSE, Nr. 8/2012