



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ENERGIEEFFIZIENTE ELEKTRISCHE ANTRIEBE IN DER AUSBILDUNG

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Ronny Bachmann, Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik
Institut Power and Signal Processing
Gründenstrasse 40
CH-4132 Muttenz
Telefon: 061/467'46'78
E-mail: ronny.bachmann@fhnw.ch
www.fhnw.ch

Kontaktperson

Rolf Gutzwiller, Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik
Institut Power and Signal Processing
Gründenstrasse 40
CH-4132 Muttenz
Telefon: 061/467'42'84
E-mail: rolf.gutzwiller@fhnw.ch
www.fhnw.ch

Impressum

Datum: 22. März 2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, felix.frey@bfe.admin.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 101796 / 152214

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Resumé	4
Abstract	4
1. Ausgangslage	5
2. Ziel der Arbeit	5
3. Methode	5
4. Ergebnisse	5
4.1 Fachwissen	5
4.2 Ist-Stand in der Ausbildung	5
4.2.1 Vorgehen	5
4.2.2 Antworten	6
4.2.2.1 Berufslehre	6
4.2.2.2 Technikerschulen	6
4.2.2.3 Fachhochschulen	7
4.3 Modellausbildungsmodul	7
5. Einbezug des Themas Energieeffizienz in der Ausbildung	8
6. Diskussion	8
7. Schlussfolgerungen	8
8. Danksagung	8
9. Anhang	9
Anhang 1: Inhaltsverzeichnis Modul Antriebstechnik	9
Anhang 2: Umfrageresultate	11

Zusammenfassung

Elektrische Antriebe machen rund 45% des gesamten Stromverbrauchs in der Schweiz aus. Durch den Einsatz von energieeffizienter Antriebstechnik liegen die erwarteten Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 20%. Es macht Sinn, während der Ausbildung angehender Berufsleute, Techniker und Ingenieure das Bewusstsein für diese Thematik zu fördern. Die Umfrage an Fachhochschulen, Technikerschulen und bei einem Berufsverband ergab, dass momentan zu wenig über diese Sparte vermittelt wird. Die angefragten Dozenten und Studiengangleiter zeigten Interesse. Es ist denkbar und wünschenswert, dass in Zukunft der energieeffizienten Antriebstechnik mehr Raum in der Lehre eingeräumt wird. Um einen leichten Einstieg zu gewähren, sind drei Unterrichtsmodule und zwei Übungen als separate Dateien diesem Bericht angehängt.

Resumé

Les entraînements électriques représentent environ 45 % de la consommation électrique en Suisse. On espère réaliser des économies de 10 à 20% en employant des techniques plus efficaces. Il est important d'en faire prendre conscience, déjà durant leur formation, aux futurs hommes de métier, techniciens et ingénieurs. Pour cela il faut intégrer ce savoir dans les formations de base. Un sondage auprès de Hautes Ecoles Spécialisées, Ecoles de Techniciens et d'une Organisation Professionnelle a montré le peu d'importance actuellement accordé dans l'enseignement à ce sujet. Cependant les Enseignants et Directeurs de Formation contactés sont très intéressés. Il est pensable et souhaitable d'accorder plus d'importance dans l'enseignement d'entraînements électriques à haut rendement. Pour faciliter le travail, trois modules d'enseignement et deux exercices pouvant être directement utilisés pendant les cours sont joints à ce courrier.

Abstract

Electric drive systems constitute approximately 45% of Switzerland's entire electricity consumption. By employing more energy-efficient drive systems, however, this amount could be reduced by 10-20%. In future, this fact should be taken into account (by professors and teachers in their courses) at all levels of education for technicians and electrical engineers. In order to facilitate the integration of this subject in educational curricula, three teaching modules have been elaborated.

1. Ausgangslage

Der elektrische Gesamtenergieverbrauch der Schweiz betrug im Jahr 2005 57,3 Milliarden Kilowattstunden (kWh). Durch den Einsatz von energieeffizienterer Antriebstechnik liesse sich dieser Betrag um bis zu 5 Milliarden Kilowattstunden reduzieren. Das entspricht etwa der 1,7 fachen Jahresleistung des Kernkraftwerkes Mühleberg (2,950 Milliarden Kilowattstunden).

2. Ziel der Arbeit

Es galt festzustellen was in der Lehre über diese Sparte vermittelt wird. Personen, die bei ihrer Arbeit mit elektrischen Maschinen in Berührung kommen, sollen auf die Aspekte der energieeffizienten Antriebstechnik sensibilisiert werden. Wenn in der Grundausbildung der betreffenden Berufe das erforderliche Fachwissen vermittelt und gefördert wird, ist viel erreicht.

3. Methode

Das Projekt enthält drei Teilschritte. Im ersten Teilschritt wird vorhandenes Fachwissen zur Energieeffizienz von Antrieben zusammengetragen, bewertet und strukturiert. Im nächsten Teilschritt ist abzuklären, was von diesem Fachwissen in der schweizerischen Bildungslandschaft in welchem Rahmen vermittelt wird. Ebenfalls wird punktuell die internationale Bildungslandschaft überprüft. Der letzte Teilschritt des Projekts kreiert Grobkonzepte für Ausbildungsmodule.

4. Ergebnisse

4.1 Fachwissen

Es existiert umfangreiches Fachwissen über die Energieeffizienz von elektrischen Antrieben. Vor allem staatliche Institutionen oder elektrische Interessengruppen verfassten zahlreiche Unterlagen in Form von Broschüren. Speziell erwähnt sei das Programm Energie Schweiz sowie das europäische und das amerikanische Motor-Challenge-Programm, deren erklärtes Ziel es ist, interessierte Firmen bei der Verbesserung der Energieeffizienz wirkungsvoll zu unterstützen. Bücher explizit zum Thema Energieeffizienz bei elektrischen Antriebssystemen wurden nicht gefunden.

Das gesammelte Material diente für das Erstellen der Prototypen-Unterrichtsunterlagen.

4.2 Ist-Stand in der Ausbildung

In der Schweiz wurden 28 Abteilungen von Fachhochschulen, 5 Technikerschulen und ein Berufsverband angefragt. In Deutschland wurde eine Fachhochschule sowie eine Technische Universität befragt, ebenso eine Universität in Portugal.

4.2.1 VORGEHEN

Die erste Kontaktaufnahme erfolgte nach Möglichkeit telefonisch. Darauf folgte ein Email mit folgenden Fragen:

Die aufgeführten Punkte waren zu bewerten mit ++ (viel behandelt im Unterricht) bis - - (gar nicht behandelt im Unterricht).

Elektromotoren: AC, DC	[+,+,-,-]
Frequenzumrichter	[+,+,-,-]
Antriebsauslegung	[+,+,-,-]
Energieeffizienz	[+,+,-,-]
Einbettung möglich	[Ja/Nein]
Einbettung erwünscht	[Ja/Nein]

Mit Einbettung ist die Betrachtung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben im Unterricht gemeint. Konkret: Ist es möglich und oder erwünscht, mehr Zeit für diesen Aspekt zu investieren?

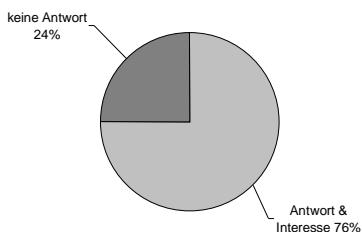
Anzahl Lektionen für das Fach Motoren und Antriebe [xx]

Schlussbericht und Resultate dieses Projektes erwünscht [Ja/Nein]

4.2.2 ANTWORTEN

Die letzte Frage wurde von allen 27 Institutionen die geantwortet haben, bejaht. Neun mehrfache Anfragen bleiben unbeantwortet. Die Rücklaufquote betrug 76%.

Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den kompletten Resultaten der Befragung.



Figur 1: Rücklauf der Anfragen an die Bildungsstätten

Zwei Kriterien sind wichtig für das Beurteilen des Ist-Standes bezüglich Energieeffizienz bei Elektroantrieben.

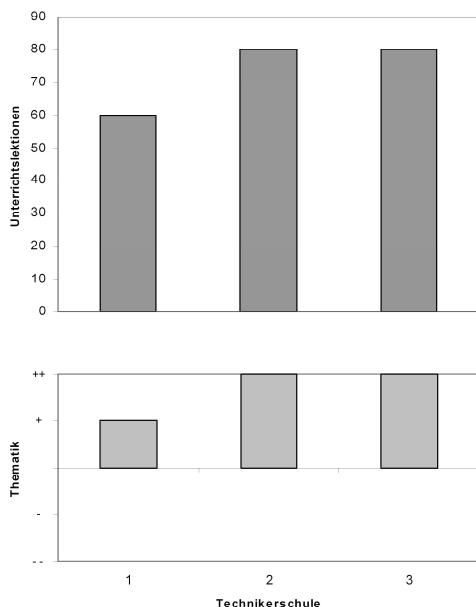
1. Wie viel Zeit steht für das Fach Motoren und Antriebe zur Verfügung?
2. Wie viel wird, aus Sicht der lehrenden Person bereits über Energieeffizienz vermittelt?

4.2.2.1 Berufslehre

Der Automatiker (vormals Elektromechaniker) kommt häufig mit elektrischen Antrieben in Kontakt. In der Schweiz schliessen pro Jahr ungefähr 700 Personen diese Ausbildung ab. Die Energieeffizienz von Elektroantrieben ist im Modellelehrgang und im Bildungsplan für die Gewerbeschule nicht vertreten.

4.2.2.2 Technikerschulen

Im nachfolgenden Diagramm sind die drei Technikerschulen aufgeführt. Die Spalten beschreiben die einzelnen Technikerschulen. In den Zeilen sind die Anzahl Unterrichtslektionen für die Fächer Antriebstechnik und Motoren, sowie der Stand bezüglich der Thematik Energieeffizienz (++ viel behandelt im Unterricht bis -- gar nicht behandelt im Unterricht).

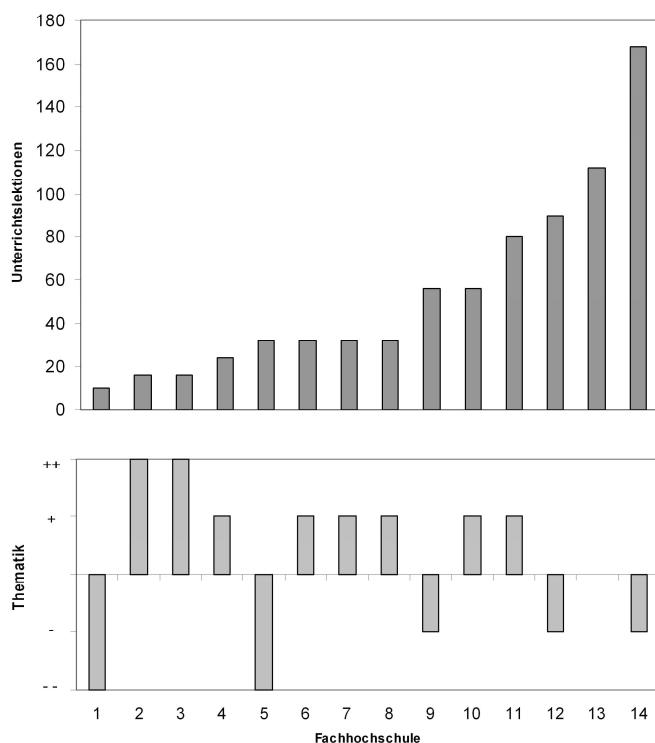


Figur 1: Übersicht der Antworten der Technikerschulen 1 bis 3

Die befragten Technikerschulen mit der Fachrichtung Automation und Energietechnik, investieren zwischen 60 und 80 Lektionen für das Fach Motoren und Antriebe. Der Bereich Energieeffizienz ist schon gut vertreten, da die Praxisbezogene Anwendung im Vordergrund steht.

4.2.2.3 Fachhochschulen

Bei den Fachhochschulen bestehen grosse Unterschiede, die sich durch die unterschiedlichen Studiengänge erklären lassen. Es wurden die Fachrichtungen Systemtechnik, Maschinenbau, Mechatronik, Haustechnik und Elektrotechnik angefragt. Generell hat man in der Fachrichtung Elektrotechnik am meisten Lektionen zur Verfügung, es stehen aber das Funktionsprinzip von Motoren und die Leistungselektronik im Vordergrund. Dass der Energieeffizienz allgemein wenig Beachtung geschenkt wird hat ihren Grund in der mangelnden Unterrichtszeit und / oder dem Setzen anderer Prioritäten. Bereits 1994 fand eine umfangreiche Diplomarbeit in einer Fachhochschule zum Thema Antriebe in ökonomischer Sicht statt.



Figur 1: Übersicht der Antworten der Fachhochschulen 1 bis 14

Bei den Fachhochschulen ist Bedarf vorhanden, der Thematik der Energieeffizienz von Antriebssystemen mehr Unterrichtszeit einzuräumen. Das Interesse, dies zu tun, ist erfreulicherweise schon vorhanden.

4.3 Modellausbildungsmodul

Mit Hilfe von erfahrenen Fachleuten (Gloor Engineering & Semafor AG Basel) ist ein Inhaltsverzeichnis für das Fach Antriebstechnik entstanden. Im Wesentlichen sind die Lehrinhalte eines Standard-Kurses für Motoren und Antriebstechnik mit Inhalten der Energieeffizienz erweitert worden. Das komplette Inhaltsverzeichnis ist im Anhang aufgeführt. Die neuen Punkte sind schwarz hervorgehoben:

Einzelne Unterkapitel dieses Inhaltsverzeichnisses sind ausgearbeitet worden. Es besteht Material für circa acht Stunden Unterricht, die Hälfte in Form von zwei grossen Übungen. Alles steht zur freien Verfügung in Form von Beilagedokumenten.

5. Einbezug des Themas Energieeffizienz in der Ausbildung

Bei der Berufslehre ist der Berufsverband für die Definition der Bildungsinhalte zuständig. Der Verband gestaltet den Modellelehrgang, sowie den Unterricht an der Gewerbeschule. Wird der Thematik Energieeffizienz von Antriebenen genügend Gewicht gegeben, könnte sie in die Bildungsinhalte einfließen. Bei der Firmenspezifischen Zusatzausbildung liegt es im Ermessen der Ausbildner (Lehrmeistern), was sie den Auszubildenden vermitteln.

Dozenten an Fachhochschulen verfügen über Freiheiten, die Lehrinhalte ihres Kursus, in gewissem Rahmen, selber zu bestimmen. Die Fragen sind: Wie viel Zeit hat man zur Verfügung? Was hat Priorität? Der Energieeffizienz von Antrieben ist vielfach bis jetzt keine hohe Priorität eingeräumt worden. Es gibt Fachgremien z.B. Leistungselektronik oder Energietechnik wo sich die jeweiligen Dozenten der Schweiz treffen. Eine Diskussion im Fachgremium über die Thematik der Energieeffizienz von Elektroantrieben wird empfohlen.

Da das Lehrprogramm in allen Bildungsstufen im Wesentlichen stark durch die Lehrenden beeinflusst wird, ist Lobbying erforderlich. Diese Einflussnahme muss periodisch geschehen, bis das Unterrichten der Energieeffizienzfrage Standard ist. Eine starkes Instrument bei den Fachhochschulen wäre ein Fürsprecher in den jeweiligen Fachgremien.

Ein Webportal speziell zum Thema Energieeffizienz bei elektrischen Antriebssystemen ist mit www.motorchallenge.ch schon vorhanden. Konkrete Berechnungsbeispiele und Fachwissen sollte darauf angeboten werden. Pro Thema (z.B. Pumpenantriebe) sind eventuell zwei Dokumente mit unterschiedlicher Informationstiefe anzubieten. Ein einheitliches und ansprechendes Design der Unterlagen ist anzustreben.

6. Diskussion

Mit dem geschärften Umweltbewusstsein unserer Gesellschaft ist es nur eine Frage der Zeit bis die Thematik der Energieeffizienz bei Elektroantrieben mehr Raum in der Ausbildung einnimmt. Wärmere Winter zeigen, dass ein sinnvoller und effizienterer Umgang mit Energie von Nöten ist.

Die Schweiz verbraucht Jahr für Jahr mehr elektrische Energie. In naher Zukunft wird eine Deckungslücke prognostiziert. Mit dem Bau neuer Grosskraftwerke um die Stromproduktion zu erhöhen, soll diese Lücke gefüllt werden (erhöht sich der Verbrauch, wird die Produktion auch erhöht). Ein anderer Ansatz wäre die vorhandene elektrische Energie effizienter zu nutzen. Wird die Energie im Antriebssektor besser genutzt, lässt sich einiges einsparen.

Erstrebenswert wäre die Sensibilisierung der Auszubildenden für die Thematik der energieeffizienten Antriebstechnik auf allen Bildungsebenen (Berufslehren, Fachhochschulen und Technikerschulen).

7. Schlussfolgerungen

Bei der telefonischen Abklärung der erreichten Institutionen (Berufsverband, Fachhochschulen und Technikerschulen) stiess man mit der Thematik auf offene Ohren. Die Verantwortlichen Personen sind an den Resultaten des Projektes und dem Schlussbericht interessiert. Es ist also möglich, dass dieses erste „an die Türe klopfen“ schon in naher Zukunft Früchte trägt.

8. Danksagung

Es sei an dieser Stelle allen gedankt die an diesem Projekt beteiligt waren. Speziell Ronald Tanner, Rolf Gloor, Roland Brüniger und Rolf Gutzwiller. Für die stets freundlichen Auskünfte danke ich den Kontaktpersonen an den einzelnen Lehrstätten.

9. Anhang

ANHANG 1: INHALTSVERZEICHNIS MODUL ANTRIEBSTECHNIK

Das Inhaltsverzeichnis basiert auf bestehenden Modulen. Das grau Geschrieben wird vielfach schon unterrichtet.

Inhalte	Lektionen
Motoren	
DC Motor	4
AC Motoren	
Asynchronmotor	8
Synchronmotor	1
Reluktanzmotor	1
Spaltpolmotor	1
Universalmotor	1
Schrittmotor	6
Torquemotor	1
Linearmotor	1
Antriebsmechanik	
Übersetzung	1
Getriebe: Schneck, Planeten, Stirnrad	
Riemen: Flach, Keil, Zahn	
Kette	
Lastkennlinien Arbeitsmaschine: Pumpen, Ventilatoren, Walzen, Malwerke, Fahrzeuge...	2
Elektrotechnik	
Leistungshalbleiter	
Halbleiter: Transistor, Thyristor, IGBT, MOSFET,	8
Triac, Solid State Relais	
Frequenzumrichter	6
Sanftanlasser	1
Sicherungselemente	
Wärmepacket	1
Sicherungen	1
Motorschutzschalter	1
Schützen	
Allgemein, Stern Dreieck Umschaltung	1
Antriebsauslegung	
Mechanik	2
Elektrik, Zuleitung, Absicherung	1
Software	1
Kosten innerhalb eines Lebenszyklus (Life Cycle Costs)	1
Energieeffizienzverbesserung bei Anrieben	
Übersicht & Einsparmöglichkeiten	1
Effizienzklassen von Asynchronmotoren	1
Effizienz unterschiedlicher Motorentypen	1
Auslastung von Asynchronmotoren	2
Netzqualität (Unterspannung, Symmetrie)	1
PF Kompensation	1
Systembeurteilung	
Pumpen (Fluid, Vakuumpumpe, Wärmepumpe)	2
Ventilatoren	1
Antriebe Fahrzeuge (Traktion)	2
Antriebe Kompressoren (Druckluft)	1

Antriebe Kompressoren (Hydraulik)	1
Antriebe Mühlen	1
Antriebe Zentrifugen	1
Rührer	1
Förderbänder	1
Lift	1
Prozesse und Kennwerte (z.B. Brauerei kWh/l -> Energie für 100 Liter Bier)	2

Total Theorie 72

Übungen

Ventilatorantrieb	4
Pumpenantrieb	2

Total Übungen 6

Labor

0..120% Last PF (ASM); ASM als Motor z.B. GM als Bremse	4
Messen: Strom, PF	4
Anlauf (ASM); ASM als Motor z.B. GM als Bremse	4
Messen: Strom, vergleichen mit Softstarter oder FU	4
FU 0..100% Last (ASM); ASM als Motor z.B. GM als Bremse	4
Messen: Strom, PF	4
Netzrückwirkungen FU; ASM als Motor z.B. GM als Bremse	4
Messen: Spannung (KO an FU Einspeisung und Motorenausgang)	4
Pumpenregelung mit Drosselventil vs. Pumpenregelung mit FU	4
Betriebsstrom Ventilator (Gebäudelüftung)	4
Ist der Motor überdimensioniert? Ist das System überdimensioniert?	

Total Labor 24

ANHANG 2: UMFRAGERESULTATE

Lehrstätten Projekt Energieeffiziente Antriebe in der Ausbildung	Art	Fachrichtung	Name	Adresse	Tel.	Ansprechpartner	Email	Stand: Februar 2007	Thematik schon im Unterricht
Schlüsselbegriffe erwünscht									
FH	Prozess-/Anlagentechnik Automation	HTW Chur	Hochschule für Technik und Wirtschaft	Ringstrasse 57 7003 Chur	081 286 24 62 081 630 90 10	Prof. Dr. Bruno Bachmann Rolf Gloor	bruno.bachmann@fh-hwchur.ch gloor@energie.ch		++ + ++ + 32 Ja Ja
FH	Prozess-/Anlagentechnik Maschinenbau	HTW Chur	Hochschule für Technik und Wirtschaft	Ringstrasse 57 7003 Chur	081 286 24 62 081 630 90 10	Prof. Dr. Bruno Bachmann Rolf Gloor	bruno.bachmann@fh-hwchur.ch gloor@energie.ch		++ + ++ + 32 Ja Ja
FH	Prozess-/Anlagentechnik Wirtschaftsingenieur	HTW Chur	Hochschule für Technik und Wirtschaft	Ringstrasse 57 7003 Chur	081 286 24 62 081 630 90 10	Prof. Dr. Bruno Bachmann Rolf Gloor	bruno.bachmann@fh-hwchur.ch gloor@energie.ch		++ + ++ + 32 Ja Ja
FH	Nachdiplomstudium Mechatronik	FHS St.Gallen	Hochschule für Technik und Wissenschaften	Rosenbergstrasse 22 9001 St.Gallen	081 755 32 00 081 630 90 10	Prof. Günter Nagel Rolf Gloor	guenter.nagel@fhbt.ch gloor@energie.ch		++ + ++ + 24 Ja Ja
FH	Bachelorstudium Mechatronik	FHS St.Gallen	Hochschule für Angewandte Wissenschaften	Rosenbergstrasse 22 9001 St.Gallen	081 755 32 00 081 630 90 10	Prof. Josef Graf Rolf Gloor	josef.graf@fhbt.ch gloor@energie.ch		++ + ++ + 30 Ja Ja
FH	Elektro- und Informationstechnik	Fachhochschule Nordwestschweiz	Fachhochschule Nordwestschweiz	Steinackerstrasse 5 5210 Windisch	056 452 42 14 056 452 42 40	Prof. Dr. Martin Meyer Dr. Heinz Burscher	martin.meyer@fhnw.ch heinz.burscher@fhnw.ch		++ + - - 90 Ja Ja Ja
FH	Maschinenbau	Fachhochschule Nordwestschweiz	Fachhochschule Nordwestschweiz	Steinackerstrasse 5 5210 Windisch	056 452 45 56 056 452 42 08	Prof. Dr. Jochen Müller Martin Wiedenkehr Jakob Zellweger	jochen.mueller@fhnw.ch martin.wiedenkehr@fhnw.ch		++ + + - - 32 Ja Ja Ja
FH	Mechatronik	Fachhochschule Nordwestschweiz	Fachhochschule Nordwestschweiz	Gründenstrasse 40 4131 Muttenz	061 457 45 93	Prof. Markus Baertschi Prof. Hans Gysin	markus.baertschi@fhbt.ch hans.gysin@fhbt.ch		
FH	Systemtechnik	Fachhochschule Nordwestschweiz	Fachhochschule Nordwestschweiz	Steinackerstrasse 5 5210 Windisch	056 452 46 78 058 566 87 33	Prof. Dr. Peter Zysset Keller Robert	pete.zysset@fhnw.ch robert.keller@fhnw.ch		++ ++ 40 Ja
FH	Systemtechnik	Hochschule Wallis	HEVS	Poststrasse 2134 1950 St. Gallen 2	027 606 85 11 027 606 87 50	Marcel Maurer Biner Pierre Boferi	marcel.maurer@hevs.ch biner@hevs.ch pierre.boferi@hevs.ch		++ ++ + - 168 Ja Ja Ja
FH	Elektro- und Kommunikationstechnik	BFH	Berner Fachhochschule	Pestalozzistrasse 20 3400 Burgdorf	034 426 68 23 032 321 63 72	Alfred Kaufmann Dr. Andrea Vazzini	alfred.kaufmann@bfh.ch andrea.vazzini@bfh.ch		++ ++ ++ + 16 Ja Ja Ja
FH	Elektro- und Kommunikationstechnik	BFH	Berner Fachhochschule	Quellgasse 21 2501 Biel/Bienne	034 426 68 23 032 321 63 72	Alfred Kaufmann Dr. Andrea Vazzini	alfred.kaufmann@bfh.ch andrea.vazzini@bfh.ch		++ ++ ++ + 16 Ja Ja Ja
FH	Elektrotechnik	HTA	Hochschule für Technik+Architektur Luzern	Technikumstrasse 21 6048 Hitzkirch	041 349 33 02 041 349 33 63	Marcel Joss Adrian Omlin	mjoss@hta.hitz.ch adrian-onlin@hta.hitz.ch		++ + + - 56 Ja Ja Ja
FH	Haustechnik	HTA	Hochschule für Technik+Architektur Luzern	Technikumstrasse 21 6048 Hitzkirch	041 349 33 03	Prof. Urs Rieder	urieder@hta.hitz.ch		
FH	Systemtechnik	HTA	Hochschule für Technik+Architektur Luzern	Technikumstrasse 21 6048 Hitzkirch	041 349 33 13	Prof. Vinzenz Härrig	vhaeiri@hta.hitz.ch		
FH	Systemtechnik	HTB	Hochschule für Technik Buchs	Werdenbergstrasse 4 9471 Buchs	081 755 34 20	Dr. Andreas Heinzelmann	andreas.heinzelmann@fhbt.ch		++ + + - 10 Ja Ja Ja
FH	Elektrotechnik	HSZ	Hochschule für Technik Zürich	Lagerstrasse 41 8021 Zürich	044 905 65 44 056 450 01 34 044 318 12 13	Dr. Peter Fostier Adolf Spitznagel Grzegorz Skarpatowski	pfoster@bitcs.ch adolf.spitznagel@gmx.ch		

Lehrstätten Projekt Energieeffiziente elektrische Antriebe in der Ausbildung		Adresse	Tel.	Stand: Februar 2007	Thematik schon im Unterricht	Ergebnissebericht erwünscht							
Art	Fachrichtung					+	++	+++	++	+	-	Ja	Nein
FH	Elektrotechnik	Zürcher Hochschule Winterthur ZH-WIN	Hochschulekretariat Technikunstr. 9 8401 Winterthur	052 267 71 71 052 267 75 06	Studierangleiter Dozent Dozent	Prof. Dr. Roland Büchi Prof. Dr. Jakob Lattmann	roland.buechi@zhwin.ch ltt@zhwin.ch	+++	++	++	++	Ja	Ja
FH	Mechatronik	Zürcher Hochschule Winterthur ZH-WIN	Hochschulekretariat Technikunstr. 9 8401 Winterthur	052 267 75 06 051 830 90 10	Prof. Dr. Jakob Lattmann Rolf Storj Wild Prof. Jürg Wild	ltt@zhwin.ch glor@energie.ch	+++	++	++	++	Ja	Ja	
FH	Maschinenbau	Zürcher Hochschule Winterthur ZH-WIN	Hochschulekretariat Technikunstr. 9 8401 Winterthur	052 267 72 26 052 267 75 06	Prof. Klaus Brügger Prof. Dr. Jakob Lattmann	bgs@zhwin.ch ltt@zhwin.ch	+++	++	++	+	Ja	Ja	
TS	Konstruktionstechniker HF Energietechnik HF	ABB Technikerschule 5400 Baden	Fabrikstrasse 1 5400 Baden	058 585 33 02	Dr. Peter Bossart	p.bossart@abbts.ch	+++	+	+	+	80	Ja	
TS	Elektronik Automatisierung	Technikerschule Basel	Vogelsangstrasse 15 Postach 4005 Basel	061 695 63 33 079 704 51 64	Peter Meier Guy Rebschung	peter.meier@edub.ch guy.rebschung@darfoss.ch	+++	++	+	+	80	Ja	
TS	Automation	Höhere Fachschule für Technik HF Solothurn	Sponstrasse 2 2540 Grenchen	032 654 28 28	Armin Zeindler	armin.zeindler@hft-so.ch	+++	++	+	+	60	Ja	
AGS	Automatischer Swissmem Berufsbildung	Kirchenweg 4 8008 Zürich	052 260 55 30	Hüpi			+++	++	+	+	60	Ja	
PSI	Elektrotechnik	PSI Paul Scherrer Institut 5232 Villigen PSI	056 310 31 17	Dr. Felix Jemli	felix.jemli@psi.ch		+++	++	+	+	60	Ja	
ETH	Elektrotechnik	ETH Zürich	044 632 11 11	Dr. Peter Radgen			+++	++	+	+	26	Ja	
Deutschland													
FH	Elektro- und Informationstechnik	Fraunhofer Institut Lohstraße 64 80335 München	0049 72 16 80 92 95 Peter Radgen	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	0049 89 12 65 34 01 Prof. Dr. Hermann Mader	
Uni	Technische Universität Kaiserslautern	Kaiserslautern	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	0049 631 205 27 60 Prof. Hellmann	
Uni	Universidade de Coimbra 3000 Coimbra Portugal	Universidade de Coimbra 3000 Coimbra Portugal	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	00351 239 796 218 Anibal de Almeida	
Anzahl FH Abteilungen	21	Sonstige	2										
Anzahl TS	3	Total	25										
Berufsverbände	1	keine Antwort	9										

Effizienzklassen von normierten Asynchronmotoren

Anzahl Lektionen:	1 bis 2
Nötiges Vorwissen:	Elektrische und mechanische Grundkenntnisse, Asynchronmaschine
Autor:	Ronny Bachmann
Quellen:	[1] www.energie.ch ; [2] www.sew-eurodrive.de ; [3] www.wikipedia.org ; [4] www.motor-challenge.ch ; [5] www.abb.com ; [6] www.danfoss.ch ;

Bei zusätzlichen Investitionskosten von 20 - 30% bieten energieeffiziente Motoren, auch Hoch-Effizienz-Motoren genannt, einen 2 bis 6% höheren Wirkungsgrad als konventionelle Elektromotoren. Dies führt insbesondere bei hohen Betriebszeiten zu erheblichen Energie- und Kosteneinsparungen. [4] Generell sind die Betriebskosten 8 bis 10 mal grösser als die Anschaffungskosten eines Motors.

Der Motorwirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der abgegebenen mechanischen Leistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung.

Bei den normierten Asynchronmotoren gibt es 3 Wirkungsgradklassen. Der nicht näher bezeichnete Asynchronmotor gehört in die Klasse **EFF3** und hat den schlechtesten Wirkungsgrad. Die Motoren der Klasse **EFF2** sollen Standard werden und haben mindestens den Wirkungsgrad, wie er in der untenstehenden Tabelle aufgeführt ist. Die besten Motoren haben die Klasse **EFF1**, für 2 und 4-poligen Motoren gelten hier leicht unterschiedliche Werte. [1]

Nennleistung kW	Nennwirkungsgrad	
	EFF2	EFF1
2 + 4	2	4
>%	>%	>%
1,1	76,2	82,8
1,5	78,5	84,1
2,2	81	85,6
3	82,6	86,7
4	84,2	87,6
5,5	85,7	88,6
7,5	87	89,5
11	88,4	90,5
15	89,4	91,3
18,5	90	91,8
22	90,5	92,2
30	91,4	92,9
37	92	93,3
45	92,5	93,7
55	93	94
75	93,6	94,6
90	93,9	95

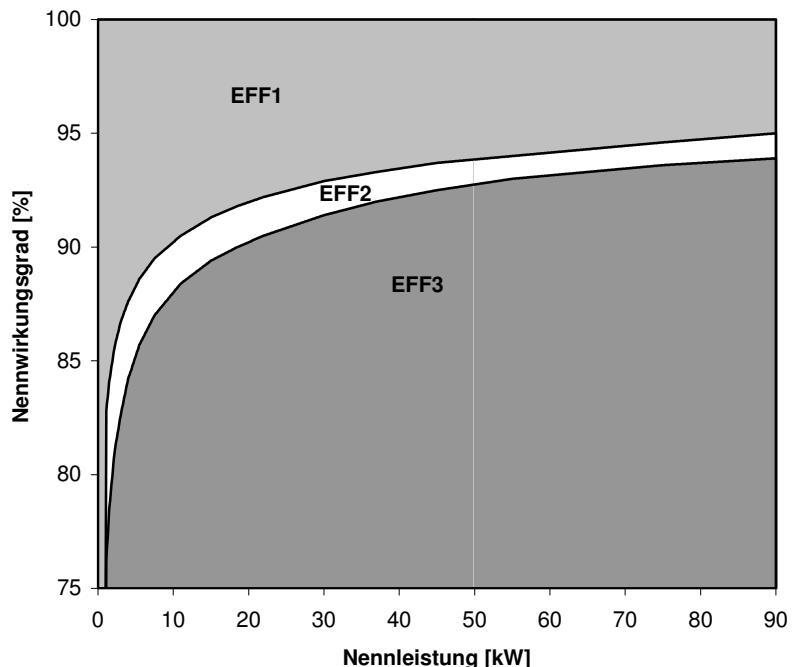


Fig 1 Nennwirkungsgrade von 2 und 4-poligen Asynchronmotoren. [1]

Die Effizienzklassen EFF1, EFF2 und EFF3 wurden in einer freiwilligen Vereinbarung zwischen dem europäischen Sektorkomitee für elektrische Antriebe (CEMEP) und der Europäischen Kommission für folgende Motoren definiert: Drehstrom Asynchronmotoren mit Lüfter (IP 54 oder IP 55) im Bereich 1,1 bis 90 kW, 2- oder 4-polig, Nennspannung 400 V, 50 Hz, Betriebsart S1, Standard-Ausführung.

Da mit den geringeren Verlusten ein geringerer Temperaturanstieg im Motor einhergeht, erhöht sich die Lebensdauer der Motorwicklungsisolierung und der Lager, so dass sich in vielen Fällen

- die Zuverlässigkeit erhöht,
- die Ausfallzeit und die Wartungskosten verringern,
- die Toleranz gegen Wärmeverlastungen erhöht,
- die Toleranz gegenüber Überlastung verbessert,
- die Beständigkeit gegen abnorme Betriebsbedingungen – z.B. Unter- und Überspannung Phasenäsymmetrie, schlechtere Spannungs- und Stromwellenformen (z.B. Harmonische), usw. – verbessert,
- der Leistungsfaktor verbessert und
- der Geräuschpegel verringert. (weniger Lüfterleistung, da geringere Verluste) [4]

Aus der Differenz der Nennverlustleistung kann die Energieeinsparung abgeschätzt werden. Ein guter (EFF1) 11 kW Motor hat etwa 0,4 kW weniger Verluste, als ein mittelmässiger (EFF2). Bei 4000 Jahresbetriebsstunden und einem Strompreis von 12,5 Rp./kWh ergibt sich eine jährliche Einsparung von 200 Franken. Ein EFF1 Motor kostet etwa 200 Franken mehr, als ein 11 kW Standardmotor (rund 1000 Franken). Der teurere Motor macht sich also schon nach einem Jahr Betrieb bezahlt. [1]

Wie baut man einen Energiesparmotor?

Bei einem Energiesparmotor reduziert man die anfallenden Verluste. Betrachtet man einen Asynchronmotor so teilen sich die Verluste in folgende Teile auf:

Leiterverluste in den ohmschen Widerständen der Stator- und Rotorwicklungen. Diese Verluste können verringert werden durch vergrössern des Leiterquerschnittes, der Motor wird dadurch allerdings ebenfalls grösser und teurer. Aus herstellungstechnischen Gründen besteht der Leiter im Rotor meistens aus Aluminium. Ersetzt man das Aluminium durch Kupfer, welches einen um ca. 40% besseren Leitwert hat, können die Verluste im Rotor gesenkt werden. Da Kupfer eine ca. dreimal so hohe Dichte hat, wird die Massenträgheit des Rotors grösser. Bei hoch dynamischen Antrieben kann die gewonnene Einsparung durch die kleineren Leitverluste wider herabgesetzt werden durch den Energiebedarf für Beschleunigungen.

Eisenverluste bestehen aus Hystereseverlusten und Wirbelstromverlusten. Die Hystereseverluste entstehen, wenn das Eisen von einem Wechselstrom magnetisiert wird. Das Eisen muss ständig ummagnetisiert werden, bei einer 50 Hz Versorgungsspannung 100 mal in der Sekunde. Das erfordert Energie für die Magnetisierung und für die Entmagnetisierung. Der Motor nimmt eine Leistung auf, um die Hystereseverluste abzudecken. Diese steigen mit der Frequenz und der magnetischen Induktion. Die Fläche innerhalb der Hystereseschlaufe ist ein Mass für die Ummagnetisierungsverluste. Durch bessere Blechqualität können diese Verluste verringert werden.

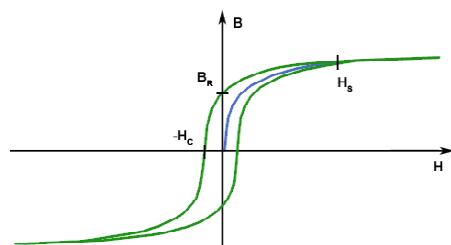


Fig 2 Hysteresekurve [3]

Bei gleichbleibender magnetischer Induktion verhalten sich die Hystereseverluste proportional zur Frequenz.

Wirbelstromverluste entstehen, weil die Magnetfelder elektrische Spannungen im Eisenkern wie in jedem anderen Leiter induzieren. Diese Spannungen verursachen Ströme, die Wärmeverluste verursachen. Die Ströme verlaufen in Kreisen um die Magnetfelder. Durch die Aufteilung des Eisenkerns in dünne Bleche lassen sich die Wirbelstromverluste deutlich verringern. Je dünner die Bleche, desto kleiner werden die Wirbelstromverluste. Die Orientierung der Blechpakete wird dabei so gewählt, dass die magnetischen Feldlinien nicht behindert werden, die Wirbelstrombahnen jedoch einen möglichst hohen

Widerstand besitzen. Die Wirbelstromverluste verhalten sich proportional zur Frequenz im Quadrat. Die induzierte Spannung ändert sich gemäss Induktionsgesetz proportional zur Frequenz, die Leistung an einem Widerstand steigt proportional zur Spannung im Quadrat. Bei doppelter Frequenz resultieren also vier Mal so hohe Wirbelstromverluste.

Reibung entsteht beim Ventilator, durch den Luftwiderstand, und bei den Lagern des Motors. Ein Energiesparmotor verfügt generell über einen kleineren Lüfter, da er sich weniger erwärmt. Dadurch spart man doppelt Energie.

Zusätzlich treten Verluste durch Streuung (Magnetischer Fluss verläuft nicht dort wo man ihn will), Stromverdrängung in den Wicklungen des Stators, Oberwellen (nicht netzfrequente Ströme) u.s.w. auf.

Eine konstruktive Massnahme für die Verbesserung des Leistungsfaktors (Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung) ist die **Grösse des Luftspalts** zwischen Läufer und Ständer. Ein grosser Luftspalt verringert die Herstellungskosten, ein kleinerer Luftspalt führt dagegen zu einem höheren Wirkungsgrad und Leistungsfaktor. Grundsätzlich steigt der Leistungsfaktor mit zunehmender Verkleinerung des Luftspalts weiter an, ab einem gewissen Punkt verschlechtert sich jedoch der Wirkungsgrad und es besteht die Gefahr, dass Schwingungsprobleme auftreten.

Betrachtet man die **Zuleitungsverluste**, welche nichts mit dem Motorwirkungsgrad zu tun haben schneiden Energiesparmotoren durch ihren geringeren Wirkleistungsbedarf und den besseren Leistungsfaktor quasi doppelt besser ab. [2] [3] [5] [6]

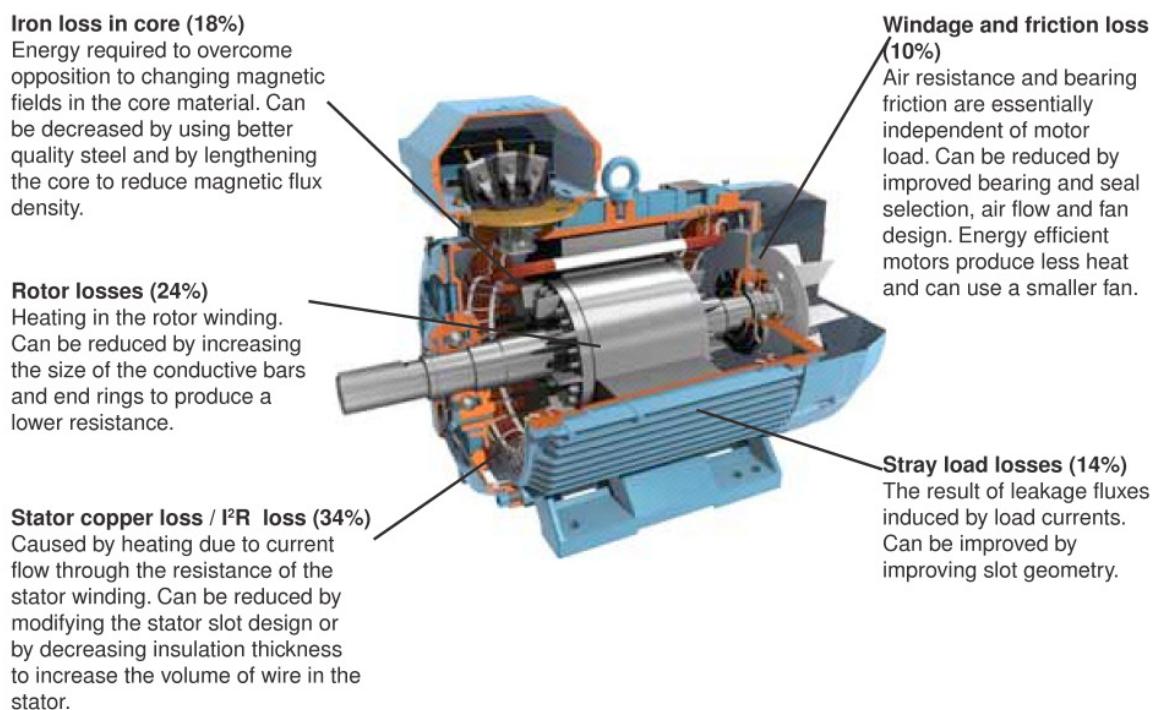


Fig 3 Verluste beim ABB M3BP Asynchronmotor [5]

ÜBUNG:

Ein vierpoliger 4kW EFF2 Motor läuft 8 Stunden am Tag, 5 Tage pro Woche. Der Standardmotoren kostet 370 CHF, der Energiesparmotor 30% mehr. Der Strompreis beträgt 0,15 CHF/kWh.
Wie sieht die Amortisationszeit (in Jahren) bei einer Neuinstallation und bei einem Austausch aus?

LÖSUNG:

$$\text{Energieverbrauch } \text{EFF2} = \text{Gesamtaufzeit pro Jahr} \cdot \frac{\text{Motorenleistung}}{\text{Motorenwirkungsgrad}} = 8h \cdot 5d \cdot 52 \text{ Wochen} \cdot \frac{4kW}{0.842} = 9881kWh$$

$$\text{Energieverbrauch } \text{EFF1} = \text{Gesamtaufzeit pro Jahr} \cdot \frac{\text{Motorenleistung}}{\text{Motorenwirkungsgrad}} = 8h \cdot 5d \cdot 52 \text{ Wochen} \cdot \frac{4kW}{0.883} = 9422kWh$$

$$\text{Energieersparnis} = \text{Energieverbrauch } \text{EFF2} - \text{Energieverbrauch } \text{EFF1} = 9881kWh - 9422kWh = 459kWh$$

$$\text{Kosteneinsparung pro Jahr} = \text{Energieersparnis} \cdot \text{Stromkosten} = 459kWh \cdot 0,15 \text{ CHF / kWh} = 69 \text{ CHF pro Jahr}$$

$$\text{Amortisationszeit Neuinstalation} = \frac{\text{Kosten } \text{EFF1} - \text{Kosten } \text{EFF2}}{\text{Kosteneinsparung pro Jahr}} = \frac{370 \text{ CHF} \cdot 1,3 - 370 \text{ CHF}}{69 \text{ CHF}} \approx 1,7 \text{ Jahre}$$

$$\text{Amortisationszeit Motoraustrausch} = \frac{\text{Kosten } \text{EFF1}}{\text{Kosteneinsparung pro Jahr}} = \frac{370 \text{ CHF} \cdot 1,3}{69 \text{ CHF}} \approx 7 \text{ Jahre}$$

Beim Motorenaustausch sind die Installationskosten und der Restwert des alten Motors noch zu berücksichtigen.

Für die Berechnung des Restwertes kann eine Lebensdauer eines Motors zwischen 30'000 und 40'000 Betriebsstunden angenommen werden. Bei geeigneter Wartung wird die Lebensdauer erhöht. [4]

Formel für die Amortisationszeit: [4]

$$\text{Amortisationszeit in Jahren} = \frac{\text{Kosten HEM} - \text{Kosten Standard}}{P_N \cdot t \cdot \text{Stromkosten} \cdot \left(\frac{1}{\eta \text{ St}} - \frac{1}{\eta \text{ HEM}} \right)}$$

Kosten HEM: Kosten eines Hocheffizienzmotor [CHF]

Kosten Standard: Kosten eines Standardmotors [CHF]

P_N : Leistungsangabe des Motors [kW]

t: Jährliche Laufzeit [h]

Stromkosten [CHF/kWh]

η St: Wirkungsgrad des Standardmotors (z.B. 0,84)

η HEM : Wirkungsgrad eines Hocheffizienzmotors

Übersicht: Effizienzverbesserung bei elektrischen Antrieben

Anzahl Lktionen:	1
Nötiges Vorwissen:	Elektrische und mechanische Grundkenntnisse
Autor:	Ronny Bachmann
Quellen:	[1] www.electricity-research.ch. ; [2] www.motor-challenge.ch ; [3] www.bfe.admin.ch ; [4] www.vse.ch ; [5] www.zvei.de ; [6] www.electrosuisse.ch [7] DETR Good Practice Gide II, Energy savings with electric motors and drives;

Elektrische Antriebe machen rund 45% des gesamten Stromverbrauchs in der Schweiz aus. Durch den Einsatz von energieeffizienter Antriebstechnik liegen die erwarteten Einsparungen in der Größenordnung von 10 bis 20%. [2]

Kundengruppen	Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz 2005 [4]	Anteil elektrische Antriebe	Maschinentypen
Industrie	33.0%	68.5% [2]	Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Förderantriebe, Rührer, u.s.w.
Haushalt	30.7%	11% [6] 8% [6] 7% [6]	Kühlschrank, Gefriertruhe, Umwälts- und Wärme-pumpe
Gewerbe	26.3%		Lüftung, Kühlen
Verkehr	8.2%		Schienenverkehr, Tunnelbelüftung
Landwirtschaft	1.8%		Mechanische Antriebe, Heubelüftung

Tabelle 1 Auszug aus der schweizerischen Elektrizitätsstatistik 2005

Der elektrische Gesamtenergieverbrauch der Schweiz betrug im Jahr 2005 57,3 Milliarden Kilowattstunden (kWh). Durch den Einsatz von energieeffizienterer Antriebstechnik liesse sich dieser Betrag um bis zu 5 Milliarden Kilowattstunden reduzieren. Das entspricht etwa der 1,7 fachen Jahresleistung des Kernkraftwerkes Mühleberg (2,950 Milliarden Kilowattstunden).

Betrachtet man das Effizienzsteigerungspotential, so haben die verschiedenen Massnahmen folgende Anteile: [5]

- Einsatz von Energiesparmotoren 10%
- Elektronische Drehzahlregelung 30%
- Mechanische Systemoptimierung 60%

Die Erhöhung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben bringt nicht nur ökologische Vorteile, es ist wirtschaftlich. Vom Käufer oder Planer einer Anlage ist allerdings eine gewisse Weitsicht und die Be reitschaft einen höheren Anschaffungspreis zu bezahlen erforderlich.

Der Kaufpreis eines billigen Motors kann trügerisch sein. Eine 11kW Standardmotor kosten ca. 700 CHF, aber innerhalb von 10 Jahren können sich die Betriebskosten auf 70'000 CHF aufsummiert haben. Alleine die Stromrechnung eines Motors für nur einen Monat kann höher sein als sein Kaufpreis.

CHECKLISTE FÜR DAS ENERGIESPAREN BEI ELEKTRISCHEN ANTRIEBEN [7]

1. Wird die Anlage noch gebraucht?

- Haben geänderte Anforderungen die Anlage überflüssig gemacht

2. Den Antrieb ausschalten wenn er nicht gebraucht wird.

- Fixe Schaltzeiten z.B. am Tag an und in der Nacht aus.
- Überprüfung der System Bedingungen z.B. hohe oder tiefe Temperatur. Der Antrieb wird ausgeschaltet wenn er nicht gebraucht wird.

3. Motorlast reduzieren, Systembetrachtung

Wenn die getriebene Last mit einem schlechten Wirkungsgrad arbeitet oder etwas Unnötiges tut, macht es keinen Sinn den Motor zu optimieren. Die Betrachtung des Gesamtsystems birgt die grösste Effizienzsteigerung.

- Erledigt das System etwas Nützliches und Nötiges?
- Ist die angetriebene Apparatur effizient?
- Ist die Kraftübertragung zwischen Motor und angetriebener Apparatur effizient?
- Ist die Wartung angemessen?
- Sind die Verluste im angeschlossenen Rohrnetz, Lüftungskanäle u.s.w. minimiert.
- Ist die Kontrollinstanz (z.B. Energiebeauftragter) effizient?

4. Verkleinerung der Motorverluste

- Nach Möglichkeit immer einen Hocheffizienz-Motor einsetzen.
- Motoren nicht überdimensionieren.
- Stark überdimensionierte Motoren permanent in Stern verschalten. (Diese Massnahme kosten praktisch nichts)
- Netzasymmetrie, zu hohe oder tiefe Spannung, harmonische Verzerrungen oder ein schlechter Leistungsfaktor sollen nicht zu übermässigen Verlusten führen.

5. Drehzahl der Last reduzieren

Bei Pumpen und Ventilatoren kann eine kleine Geschwindigkeitsreduktion eine grosse Effizienzsteigerung bewirken.

- Werden mehrere Geschwindigkeiten (Durchfluss, Volumenstrom) benötigt, ist der Einsatz eines Frequenzumrichters empfohlen.
- Bei Riemenbetriebenen Lasten kann durch Pully-Austausch die mechanische Last herabgesetzt werden.

BEISPIELE [2]

1. Einsatz von Energiesparmotoren

Bei Delta Extrusion (einem britischen Messing-Walzwerk) wurden fünf Motoren als sinnvoller Querschnitt des Spektrums von Gusseisen-Motoren durch solche mit höheren Wirkungsgraden ersetzt. Drei von ihnen liefen im Dauerbetrieb, die anderen beiden fünf Tage die Woche im Drei-Schicht-Betrieb. Messungen ergaben eine Einsparung von 12 MWh/a für diese fünf Motoren. Die gemittelte Amortisationszeit für die Investitionen in diese fünf Hochwirkungsgrad-Motoren betrug 1,6 Jahre. Der Bereich der Amortisationszeiten erstreckte sich von 9 Monaten bis 3,4 Jahre.

2. Optimierung der Druckluft-Versorgung eines Automobil-Herstellers

1997 bestand das Druckluftsystem im Werk 2 des deutschen Automobil-Herstellers Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG in Stuttgart aus einem Wasser gekühlten Schraubenkompressor ($22,2 \text{ m}^3/\text{min}$ freier Luftstrom, FAD) und 4 Wasser gekühlten Kolbenkompressoren zu je $15 \text{ m}^3/\text{min}$. Der höchste Betriebsdruck betrug 8,7 bar. Druckluft-Fachleute eines Kompressoren-Herstellers ermittelten in einer Analyse, dass der Druckluft-Bedarf zwischen $15 \text{ m}^3/\text{min}$ und $65 \text{ m}^3/\text{min}$ schwankte. Nachdem alle relevanten Daten in die Energiespar-Datenbank des Herstellers eingegeben waren, wurde eine neue Auslegung mit optimierter Energie-Ausnutzung vorgenommen. Durchgeführte Massnahmen Die neue, ausschliesslich mit Luft gekühlten Schraubenkompressoren ausgeführte Anlage wurde in zwei Stufen eingebaut. Die Grundlast wird von 3 Maschinen mit je $5,62 \text{ m}^3/\text{min}$ gedeckt, während weitere 4 Kompressoren zu je

16,4 m³/min. die Spitzenlast abdecken. Der Einsatz aller 7 Kompressoren wird in Abhängigkeit von der relativen Last mittels einer speziellen Druckluft-Leittechnik koordiniert. Die Optimierung der Druckluft-Anlage hat zu eindeutigen Energie- und Kosten-Einsparungen geführt. Dank besserer Ausnutzung der Kompressoren und der Möglichkeit, den höchsten Betriebsdruck von 8,7 bar auf 7,5 bar zu senken, liess sich der spezifische Anschlusswert insgesamt von 8,19 kW/(m³/min) auf 6,19 kW/(m³/min) reduzieren. Die gesamte Energie-Ersparnis beläuft sich auf 483 MWh Strom jährlich, natürlich zuzüglich etwa 55.000 € jährlich durch Einsparungen am Kühlwasser. Somit hat sich die Optimierung der Druckluft-Anlage im wahrsten Sinn bezahlt gemacht.

3. Last ausschalten

Eine Werkstatt setzte eine Reihe von Prozessluft-Absauglüftern ein, um die Konzentration von Luftsabstoff-Partikeln und Chemikalien zu Gunsten der Belegschaftsgesundheit zu reduzieren. Die Lüfter waren mit manuellen Ein-Aus-Schaltern ausgestattet. Die Selbstdisziplin der Arbeiter liess jedoch zu wünschen übrig, was das Abschalten der Lüfter nach Gebrauch oder bei Schichtende betraf. Durchgeführte Massnahmen: Die Gebläse, 20 an der Zahl, wurden mit Zeitschaltern ausgerüstet, über die sie nach einer voreingestellten Zeit nach Feierabend ausgeschaltet wurden. Ergebnisse: Der Stromverbrauch wurde um 280 MWh pro Jahr reduziert, was zu Einsparungen von jährlich 12.800 € führte. Zusätzlich fiel der Verbrauch für die Heizung um 350 MWh im Jahr, was zu weiteren Einsparungen von etwa 10.500 € jährlich führte. Die Investition belief sich auf insgesamt 9.600 €. Die Amortisationszeit betrug näherungsweise 0,4 Jahre.

4. Energie-Ersparnis durch verkleinerte Rotorblätter

In einer Fabrik wird beim Prozess anfallendes Kondensat mittels einer Kreiselpumpe zum Kessel zurückgeführt. Eine Untersuchung der Betriebsbedingungen zeigte, dass der von der Pumpe erzeugte Druck erheblich höher war als erforderlich. Der erforderlich werdende hohe Drosselungsgrad führte zur Instabilität der Anlage, was Störungen und hohe Betriebskosten zur Folge hatte. Nach Rücksprache mit dem Pumpen-Hersteller entschied sich das Unternehmen, den Pumpenrad-Durchmesser von 320 mm auf 280 mm herab zu setzen, wodurch sich die Pumpe ungedrosselt betreiben liess. Der verminderte Leistungsbedarf der Pumpe erlaubte auch den Einsatz eines kleineren Motors, wodurch sich eine weitere Energie-Einsparung ergab.

Die durchgeführten Massnahmen behoben die genannte Instabilität (Kavitation) und ergaben erhebliche Energie-Einsparungen. Der Leistungsbedarf der Pumpe fiel nach Austausch des Laufrades um nahezu 30%. Eine Analyse ergab eine Einsparung von 197 MWh pro Jahr mit einer jährlichen Kosten-Ersparnis von 12.714 €. Darüber hinaus liessen sich durch Vermeidung der Kavitation jährliche Wartungskosten in Höhe von 4.285 € einsparen. Das kleinere Laufrad ermöglichte den Ersatz des 110-kW-Antriebsmotors durch einen 75-kW-Motor. Dieser kleinere Motor, der überdies näher am Betriebspunkt des optimalen Wirkungsgrads lief, sparte noch einmal 1.071 € ein. Die sich ergebenden Umbauarbeiten durch Aus- und Einbau der Pumpe hielten sich in Grenzen, und das Abdrehen des Laufrads war ein leichtes Spiel. Die Kosten am Laufrad beliefen sich auf 371 €. Der Ersatz des 110-kW-Motors durch den neuen 75-kW-Motor erforderte zusätzliche Investitionen in Höhe von 3.600 €. Die Reduktion der Kavitation am Drosselventil reduzierte zugleich die übermässigen Vibrationen und den nicht hinnehmbaren Lärm. Die gesamte Amortisationszeit der Laufrad-Bearbeitung sowie der Verkleinerung des Motors errechnete sich zu 11,4 Wochen. Der jährlichen Einsparung von 18.070 € stand eine Investitionssumme von insgesamt 3.971 € gegenüber.

5. Frequenzumrichter

Die Firma Hanson Brick reduzierte ihren Stromverbrauch pro Ziegelstein durch Einsatz von Umrichter-Anrieben um 8,7%. Die Amortisationszeit der gesamten Investition betrug 1,4 Jahre.

Auslastung von Asynchronmotoren

Anzahl Lektionen:	2
Nötiges Vorwissen:	Elektrische und mechanische Grundkenntnisse, Asynchronmaschine
Autor:	Ronny Bachmann
Quellen:	[1] www.energie.ch ; [2] U.S. Department of Energy; [3] DETR Good Practice Gide II, Energy savings with electric motors and drives; [4] www.zvei.de Energiesparen mit elektrischen Antrieben; [5] Heymann & Sauerwein, Elektrotechnik Fachstufe Energietechnik [6] www.eu-promot.org ; [7] www.wikipedia.org ; [8] www.danfoss.ch ; [9] www.semafor.ch

Die meisten modernen Asynchronmotoren sind konstruiert für das Arbeiten mit einer Belastung im Bereich von 50 bis 100% ihrer Nennlast. Der maximale Wirkungsgrad, d.h. das Verhältnis zwischen der abgegebenen mechanischen Leistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung liegt üblicherweise im Bereich von 75 bis 110% der Nennlast. Unter 25% Belastung sinkt der Wirkungsgrad steil ab. Der Bereich für einen guten Wirkungsgrad variiert von Motor zu Motor, er vergrössert sich mit steigender Nennleistungen. Generell weisen grössere Motoren einen besseren Wirkungsgrad als kleine auf. [2] [6]

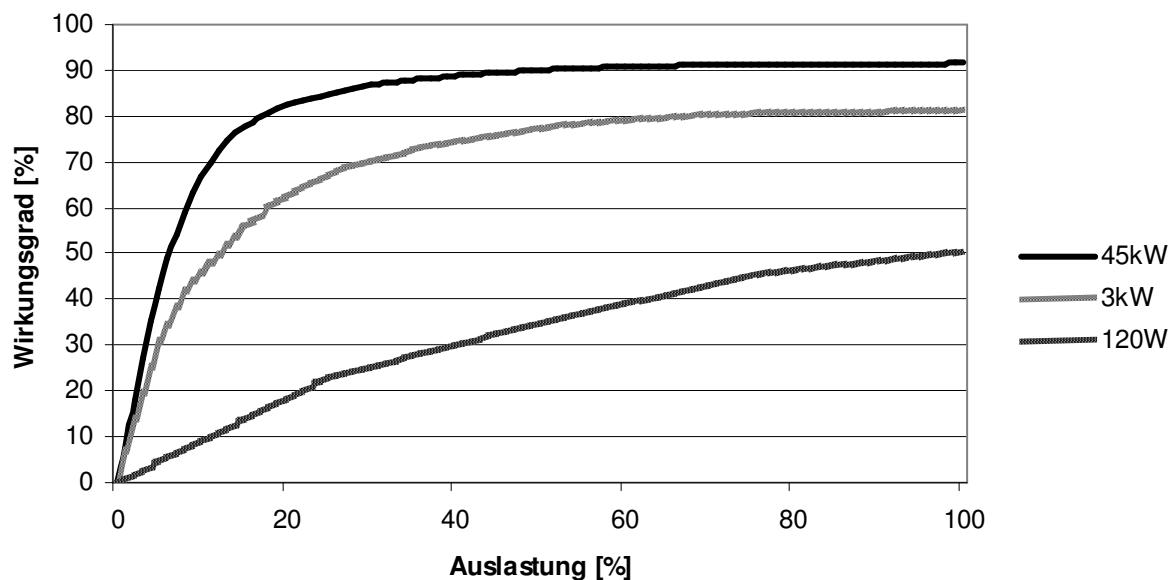


Fig 1 Teillasteffizienz von Motoren EFF3 [9]

Elektrische Motoren sind im Verhältnis zur Last, die sie antreiben, sehr oft überdimensioniert. Feldversuche der Europäischen Union haben gezeigt, dass Elektromotoren in der Industrie durchschnittlich bei etwa 60% ihrer Nennlast arbeiten. [6]

Betrachtet man nur den Wirkungsgrad, scheint es sinnvoll Motoren mit der Belastung zu betreiben, wo sie ihren maximalen Wirkungsgrad aufweisen. Bei einigen Motoren liegt dieser Punkt bei 75% Nennlast. Mit einem höheren Kaufpreis erwirbt man Leistungsreserven, eine grössere Lebensdauer (der Motor erwärmt sich bei Teillast nicht so stark) und benötigt am wenigsten Wirkstrom (Motor arbeitet mit seinem maximalen Wirkungsgrad). Da Asynchronmotoren neben der Wirkleistung auch noch Blindleistung benötigen und diese sich ebenfalls mit der Belastung ändert muss diese auch berücksichtigt werden.

Asynchronmotoren benötigen für die Magnetisierung Blindleistung. Das Verhältnis zwischen der aufgenommenen elektrischen Wirkleistung [W] und der Leistung und der aufgenommenen elektrischen Scheinleistung [VA] wird als Leistungsfaktor (englisch Power Factor PF) bezeichnet.

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

Sind Spannungen und Ströme rein sinusförmig, so ist der Leistungsfaktor der Cosinus des Winkels zwischen Spannung und Strom. In Datenblättern und auf Typenschildern von Motoren ist der Leistungsfaktor meistens als "cos φ " angegeben.

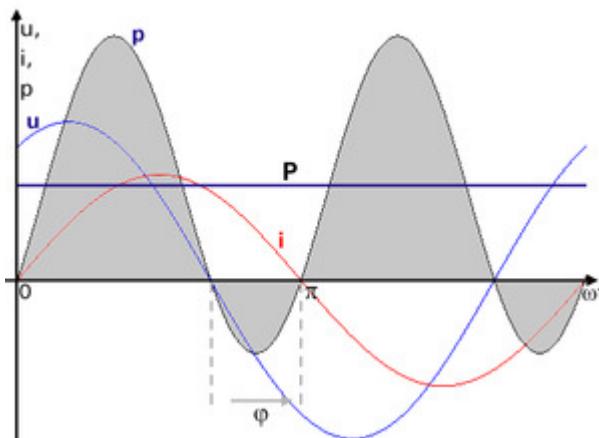


Fig 2 Zeitlicher Verlauf von Spannung Strom und Leistung [7]

Der Leistungsfaktor sinkt mit abnehmender Last, verglichen mit dem Wirkungsgrad früher dafür weniger steil. [2]

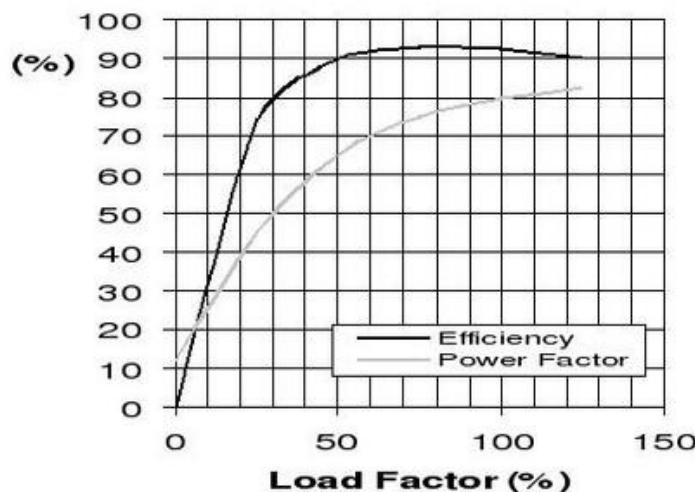


Fig 3 Leistungsfaktor [6]

Asynchronmotoren sind so ausgelegt, dass bei Nennbetrieb (Nennleistung) das Produkt von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor möglichst gross wird. Da unterbelastete Motoren im Allgemeinen einen geringeren Leistungsfaktor und Wirkungsgrad haben, sollte die Nennleistung des Motors dem Leistungsbedarf der Arbeitsmaschine möglichst angepasst werden. Besonders bemerkenswert ist der schlechte Leistungsfaktor bei Teillast des Asynchronmotors. Im Leerlauf des Motors fliesst nur der verhältnismässig geringe Leerlaufstrom, dessen Wirkstromanteil (Eisenverluststrom) sehr gering ist. Bei Belastung des Motors wird der Wirkstromanteil grösser. Es muss ja Wirkleistung an der Welle des Motors abgegeben werden.

ben werden. Der Leistungsfaktor wird somit grösser und erreicht bei Nennlast annähernd seinen Höchstwert. Bei Überlastung des Motors nimmt der Leistungsfaktor bis zum Kippmoment erst langsam und dann schneller wieder ab. Damit ist erklärlich, dass bei Überlastung des Motors der Strom schneller als die Leistung ansteigt und der Motor zu warm wird.

Ein Asynchronmotor sollte stets mit Volllast betrieben werden. Ist der Motor für den Antrieb überdimensioniert arbeitet er mit einem geringeren Leistungsfaktor. [5]

Kurzzeitig dürfen Asynchronmotoren überlastet werden. Hersteller geben einen Servicefaktor an, welcher multipliziert mit der Nennleistung die kurzzeitige Spitzenleistung angibt. Ein 11kW Motor mit einem Servicefaktor von 1,15 kann kurzzeitig 12.65kW liefern ohne bleibenden Schaden zu nehmen. [2]

Neben Auswirkungen auf den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor kann der Teillastbetrieb eines Asynchronmotors sich auch nachteilig auf die Last auswirken. Bei einem Ventilator, angetrieben durch einen zu grossen Asynchronmotor, erhöht sich die Drehzahl, falls keine Regelung vorhanden ist. Dies führt zu einer massgeblichen Änderung in der Last und des Jahresenergieverbrauchs. Beispielsweise führt ein schmäler Anstieg der Drehzahl (z.B. 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. [4] Als Annäherung gilt: 20% weniger Luft = 50% weniger Leistung.

WIESO WERDEN MOTOREN ÜBERDIMENSIONIERT?

Vielfach wird Sicherheit in Form von Leistungsreserven verbaut. Falls man die mechanische Last nicht genau kennt, bewegt man sich immer auf die sichere Seite. Als Beispiel ein Ventilator der 15kW benötigt. Man könnte ihn mit einem 22kW Motor betreiben und das System würde funktionieren, allerdings nicht sehr effizient. Betreibt man ihn mit einem 11kW Motor wird dieser zu heiss und setzt eines Tages aus. Die Person die den Motor auslegt hat dagegen nur wirklich Ärger am Hals, falls das System nicht arbeitet, also wenn der Motor unterdimensioniert ist. Es ist eine Kunst den richtigen Motor zu wählen und man bewegt sich auf einem schmalen Grad.

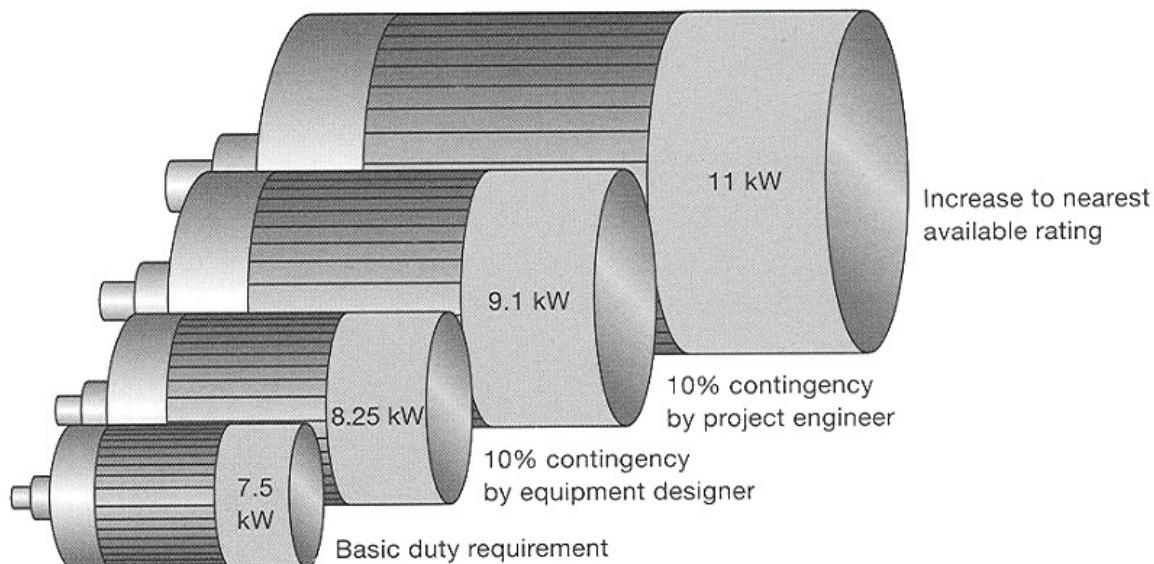


Fig 4 Überdimensionieren von Motoren [3]

In Betrieben ist es üblich, dass beim Ersatz von Motoren, falls die gleiche Grösse nicht erhältlich ist, die nächste Grösse installiert wird, um auf der sicheren Seite zu sein. [4]

Das Überdimensionieren und die damit gewonnenen Leistungsreserven sind unter Umständen gerechtfertigt. Beispielsweise eine Fluidpumpe die ein Medium fördert, dass sich je nach Temperatur stark verdicken kann. Fällt die Pumpe aus ist der teure Inhalt des Reaktors verloren. Die Mehrkosten für den Strom durch überdimensionierte Motoren, stellen in diesem Fall eine Art Versicherungspolice dar.

MASSNAHMEN

Es empfiehlt sich alle Motoren in einer Firma zu testen, die mehr als 1000 Stunden im Jahr arbeiten und sich im Leistungsbereich zwischen 10kW bis 100kW ansiedeln. [2]

Die einzelnen Maschinen können in folgende Kategorien eingeteilt werden: [2]

- Stark überdimensionierte Motoren: Durch richtig dimensionierte energieeffiziente Motoren ersetzen, oder permanente Verschaltung in Stern prüfen.
- Leicht überdimensionierte Motoren: Bei Ausfall durch richtig dimensionierte energieeffiziente Motoren ersetzen.
- Richtig dimensionierte Standardmotoren: Bei Ausfall durch energieeffizientere Motoren ersetzen.

Der effizienteste Antriebsystem liefert bei Bedarf genau die erforderliche mechanische Leistung und ist sonst ausgeschalten (Beispiel: Richtig dimensionierter Abluftventilator in einer Tiefgarage). Bei gewissen Antrieben schwankt der Bedarf (Beispiel: Rührer für Flüssigkeiten die ihre Viskosität je nach Prozess verändern). Bei den Messungen für die Motorenauslastung ist das Bedarfsprofil zu berücksichtigen. Der Motor sollte bei der maximalen erforderlichen Leistung nicht überdimensioniert sein. Differieren die Maximal- und die Minimaleistung stark, kann ein neues Lastmanagement oder der Einsatz eines Frequenzumrichters (verbessert bei Teillast den Leistungsfaktor) die Effizienz des Systems verbessern.

Ein richtig dimensionierter Motor bedeutet noch lange nicht, dass das Gesamtsystem effizient ist. In der Chemie werden bei zu starken Förderpumpen Blenden in die Druckleitung montiert. Der Motor der Pumpe ist in diesem Fall gut ausgelastet und arbeitet mit einer guten Effizienz, der Gesamtwirkungsgrad des Systems ist allerdings schlecht.

Liegt die Motorenauslastung bei einem Drittel der Nennleistung und darunter, kann der Motor permanent in Stern verschaltet werden. Je nach Wirkungsgrad im Teillastbetrieb, kann diese Grenze auch bei 45% liegen (Motoren bis ca. 3kW). Der Motorschutz ist auf 58% des Dreieck Nennstroms einzustellen. Zu bedenken ist, dass der Motor nur noch $\frac{1}{3}$ des Dreieck Startmomentes liefert. Andererseits arbeitet der Motor mit einem besseren Wirkungsgrad und benötigt weniger Blindleistung. Diese Massnahme kann nach wenigen Eingriffen überprüft werden.

BESTIMMUNG DER MOTORENAUSLASTUNG

Es gibt mehrere Möglichkeiten die aktuelle Motorenauslastung zu bestimmen oder abzuschätzen. Es hängt davon ab was für Messgeräte zur Verfügung stehen und welcher Aufwand betrieben wird. Die Motorenauslastung ist der Quotient von aktueller mechanischer Leistung zur Nennleistung:

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_N}$$

P_{mech} = mechanische Leistung an der Welle [W]

P_N = Nennleistung des Motors [W]

Die mechanische Leistung an der Welle ist das Produkt von Winkelgeschwindigkeit und Drehmoment:

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = 2\pi \cdot \frac{N}{60} \cdot M$$

ω = Winkelgeschwindigkeit [rad^{-1}]

M = Drehmoment [Nm]

N = Umdrehungen pro Minute

Für die direkte Bestimmung der mechanischen Leistung an der Welle sind also ein Drehzahlmessgerät und ein Drehmomentsensor nötig. Für die Drehzahlmessung empfehlen sich Reflexions- oder Stroboskop-tachometer. Vielmals ist die Welle nicht zugänglich (Pumpe, Ventilator), sodass der Lüfterdeckel abgeschraubt werden muss. Eine Drehmomentmessung ist nur mit grossem Aufwand realisierbar, da man den Motor von der Last trennen muss. Der Drehmoment Sensor kuppelt die beiden Einheiten wieder zusammen. Die Motorenauslastung direkt über die mechanische Leistung zu bestimmen ist in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich. Es gibt indirekte Verfahren, die allerdings nicht so genaue Resultate liefern.

Bestimmung der Motorauslastung über den Schlupf

Ist eine Drehzahlmessung möglich, kann die Motorauslastung mit Hilfe des Schlupfs abgeschätzt werden. Die Drehzahl von Asynchronmotoren sinkt mit steigender Belastung. Die Leerlaufdrehzahl entspricht annähernd der synchronen Drehzahl des Statordrehfeldes. Die synchrone Drehzahl hängt von der Netzfrequenz und der Anzahl Poolen, also wie der Motor gewickelt wurde ab.

Anzahl Pole	Drehzahl bei 50 Herz Netzfrequenz [rpm]	Drehzahl bei 60 Herz Netzfrequenz [rpm]
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Tabelle 1 Synchrone Drehzahl

Betrachtet man die Drehzahl-Drehmomentkennlinie eines Asynchronmotors, ändert sich die Drehzahl zwischen Nennleistung (Nennmoment M_N) und Leerlauf (Drehmoment = 0) nur um wenige Prozent.

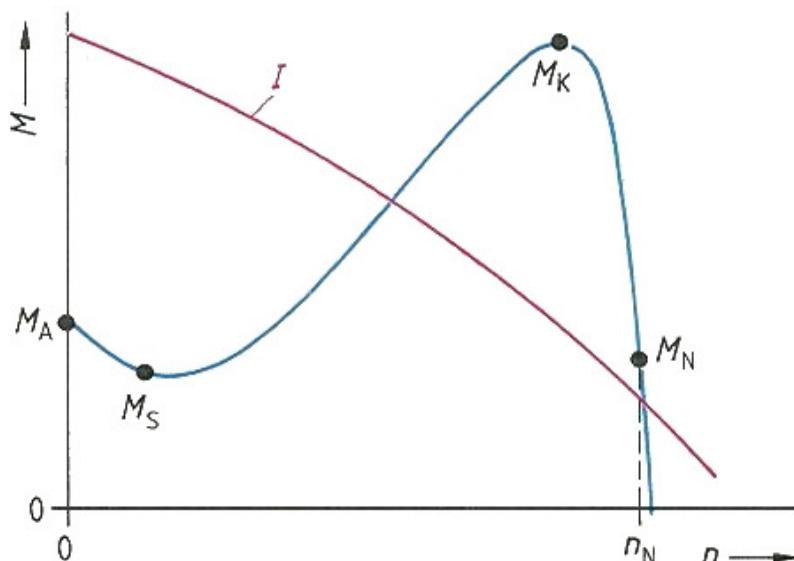


Fig 5 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie [5]

Das Drehmoment ändert sich annähernd linear. Mit diesen Vereinfachungen ändert sich auch die Leistung nahezu linear, von Leistung 0 bei der Synchronen Drehzahl bis zur Nennleistung bei Nenndrehzahl. Über den Schlupf kann als die Motorauslastung abgeschätzt werden.

Die Genauigkeit dieser Art von Lastbestimmung ist limitiert. Die Angabe für die Nenndrehzahl auf dem Typenschild ist gerundet und unterliegt einer Toleranz. Differiert die Angabe auf dem Typenschild um 5 Umdrehungen pro Minute auf einen Bereich von 50 Umdrehungen pro Minute ist das Resultat mit einem Fehler von 10% behaftet. [2]

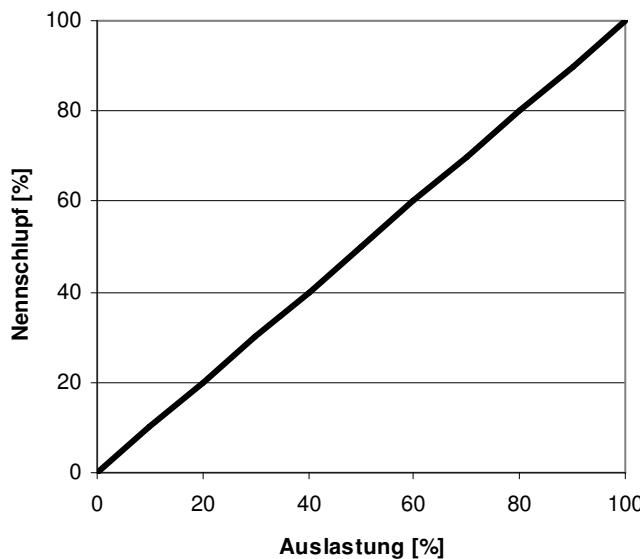


Fig 6 Schlupf in Abhängigkeit zur Belastung [2]

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{N_{\text{Synchron}} - N}{N_{\text{Synchron}} - N_N} \quad [2]$$

N = Umdrehungen pro Minute im Betrieb

N_{Synchron} = Synchrone Drehzahl

N_N = Nenndrehzahl

Das Drehmoment einer Asynchronmaschine nimmt mit dem Quadrat ihrer Statorspannung zu. $M \sim U_s^2$. Der Schlupf verhält sich im Bereich der Nenndrehzahl proportional zum anliegenden Moment. Wird der Motor nicht mit Nennspannung betrieben, muss obige Formel mit einem Korrekturfaktor erweitert werden.

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{N_{\text{Synchron}} - N}{N_{\text{Synchron}} - N_N} \cdot \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \quad [2]$$

N = Umdrehungen pro Minute im Betrieb

N_{Synchron} = Synchrone Drehzahl

N_N = Nenndrehzahl

U = RMS Statorspannung [V]

U_N = Nennspannung [V]

Bestimmung der Motorauslastung über die aufgenommene elektrische Leistung

Mit der aufgenommene elektrische Leistung und den Wirkungsgrad kann die abgegebene mechanische Leistung bestimmt werden. Die elektrische Leistung bestimmt sich am einfachsten mit einem drei Phasen-Leistungsmessgerät mit Stromzangen. Den Nennwirkungswirkungsgrad schätzt man mit Hilfe von Tabellen, auf den Typenschildern fehlt die Angabe meistens.

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{P_{\text{elektrisch}} \cdot \eta}{P_N}$$

P_{el} = Aufgenommene elektrische Leistung [W]

η = Wirkungsgrad aus dem Datenblatt oder Tabellen bei geschätzter Belastung

P_N = Nennleistung [W]

Die Bestimmung der Motorauslastung ist ein iterativer Prozess, da man den Wirkungsgrad nicht kennt. Dieser ist ja selber von der Motorenauslastung abhängig. Rechnet man mit dem Wirkungsgrad bei 100% Belastung und ist die so ermittelte Motorauslastung gering, ist zu erwarten, dass die effektive Motorauslastung noch tiefer liegt. Der Wirkungsgrad verschlechtert sich ja mit abnehmender Belastung.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt von der Kenntnis des Wirkungsgrades ab. Bei einem alten wenig effizienten Motor wird es schwierig sein Daten zu finden. Mit Wirkungsgraden aus Tabellen bekommt man Resultate die zu hoch ausfallen. Bei Ersatz des Motors befindet man sich auf der sicheren Seite. Das Verfahren berücksichtigt die Änderung des Leistungsfaktors.

Steht kein Leistungsmessgerät zur Verfügung, kann mit einem Multimeter und einem Zangenampemeter ebenfalls eine Aussage gemacht werden. Im Bereich der Nenndrehzahl verhält sich der Strom etwa proportional zur mechanischen Belastung. $M \sim I$. Ebenso verhält sich der Strom proportional zur Spannung, die mechanische Leistung verhält sich proportional zu Produkt von Strom und Spannung.

$$P_{\text{mech}} \sim I \cdot U$$

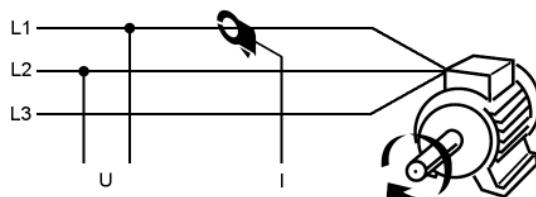


Fig 7 Motorenmessung

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{I}{I_N} \cdot \frac{U}{U_N} \quad [2]$$

Bei dieser Abschätzung wird weder der sich mit der Belastung verändernde Wirkungsgrad, noch der variable Leistungsfaktor berücksichtigt. Die Aussage ist also sehr ungenau. Als Annäherung gilt: Halber Nennstrom = Motor im Leerlauf.

- I = RMS Phasenstrom [A]
- I_N = Nennstrom [A]
- N_N = Nenndrehzahl
- U = RMS Statorspannung [V]
- U_N = Nennspannung [V]

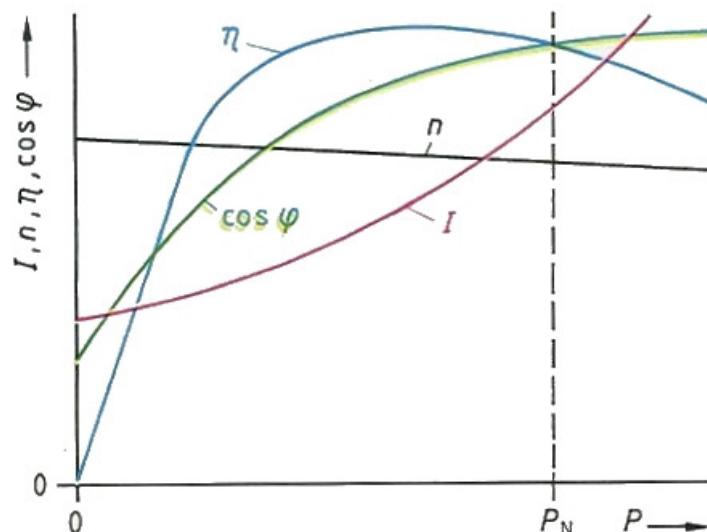


Fig 8 Teillast

Bestimmung der Motorauslastung mit Hilfe von Software

Bei der Bestimmung der Motorauslastung ist man auf Tabellen oder Diagramme angewiesen, da sich der Wirkungsgrad mit der Belastung ändert. Es gibt Softwarepakete, die umfangreiche Daten von Motoren gespeichert haben und einem das Nachschlagen oder Abschätzen des Wirkungsgrades abnehmen. Es ist nur noch erforderlich die elektrische Leistungsaufnahme des Motors zu messen. In der Software wählt man dann einen ähnlichen Motor und das Programm bestimmt die Auslastung.

Beispiel Gratissoftware Opal von Semafor AG Basel.

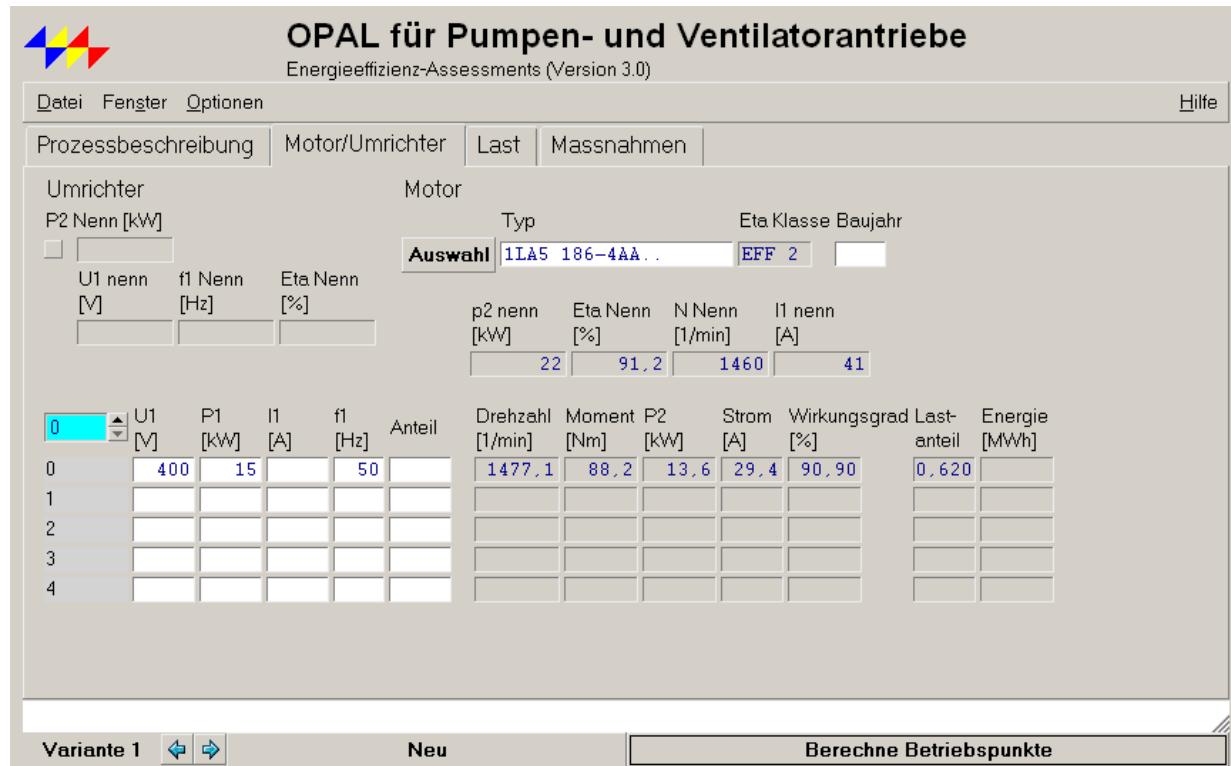


Fig 9 Opal Antriebssystem Software [9]

ÜBUNG:

An einem 22kW Motor einer Mühle wird eine elektrische Leistungsaufnahme von 11kW gemessen. Wie gross ist die Motoreauslastung? Wie gross sind die Einsparungen mit einem neuen Motor bei einem Stromtarif von 0,014CHF/kWh und 0,005CHF/kVarh bei 2000 Betriebsstunden pro Jahr?

Daten des bestehenden Antriebsmotors:

Bemessungsleistung	[kW]	22
Polzahl	[-]	4
Bemessungsfrequenz	[Hz]	50
Bemessungsdrehzahl	[min ⁻¹]	1'465
Bemessungsspannung	[V]	400
Bemessungsstrom	[A]	42
Lastzustand	[%]	100 75 50 25
Leistungsfaktor	[-]	0,84 0,8 0,7 0,48
Wirkungsgrad	[%]	90,5 90,5 89 82

Zum Austausch stehen Motoren mit den Leistungen 3; 4; 5,5; 7,5; 11; 15 und 18,5kW zur Verfügung. Ihr Wirkungsgrad verhalte sich gleich wie der des bestehenden Motors.

LÖSUNG:

Die elektrische Nennleistung des bestehenden Motors beträgt 24,31kW. Gemessen werden nur 11kW, die Auslastung ist kleiner als 50% trotz abfallendem Wirkungsgrad.

$$\text{Motorenauslastung} = \frac{P_{\text{elektrisch}} \cdot \eta}{P_N} = \frac{11\text{kW} \cdot 89\%}{22\text{kW}} \approx 45\%$$

Der Wirkungsgrad liegt bei der berechneten Auslastung unter 89% und würde diese ebenfalls nach unten drücken. Da keine genaueren Daten vorhanden sind wird ein Teillastwirkungsgrad von 89% angenommen. Der Austauschmotor wird so sicher nicht zu klein. Eine Linearisierung der Wirkungsgradkurve ist nicht zulässig (die einzelnen Punkte mit Geraden verbinden), da der effektive Wirkungsgrad höher ist.

Mit dieser Auslastung würde ein 9,9kW Motor genügen. Es wird ein 11kW gewählt, welcher dann zu 90% ausgelastet ist. Sein Wirkungsgrad beträgt für diesen Arbeitspunkt 90,5%. Er bezieht bei gleicher mechanischer Belastung noch 10,82kW vom Stromnetz.

Die jährlichen Einsparungen für die Wirkleistung betragen:

$$\text{Gesamtaufzeit} \cdot \text{Stromtarif} \cdot \text{Wirkleistungseinsparung} = 2000\text{h} \cdot 0,14\text{CHF} / \text{kWh} \cdot (11\text{kW} - 10,82\text{kW}) \approx 50\text{CHF}$$

Der Leistungsfaktor verbessert sich mit dem kleineren Motor von 0,7 auf etwa 0,824 (Leistungsfaktorkurve linearisiert). Eine Linearisierung ist zulässig, da der effektive Leistungsfaktor höher liegt und das Resultat noch verbessern würde. Die Blindleistung reduziert sich von 11,2kvar auf 7,4kvar.

$$\text{Blindleistungsbedarf 22kW Motor} = \tan(\varphi) \cdot P_{\text{el}} = \tan(a \cos(0,7)) \cdot 11\text{kW} = 11,22\text{k var}$$

$$\text{Blindleistungsbedarf 11kW Motor} = \tan(\varphi) \cdot P_{\text{el}} = \tan(a \cos(0,824)) \cdot 10,82\text{kW} = 7,44\text{k var}$$

Die jährlichen Einsparungen für die Blindleistung betragen (Keine Blindstromkompensationsanlage):

$$\text{Gesamtaufzeit} \cdot \text{Stromtarif} \cdot \text{Blindleistungseinsparung} = 2000\text{h} \cdot 0,05\text{CHF} / \text{k var h} \cdot (11,22\text{k var} - 7,44\text{k var}) \approx 378\text{CHF}$$

Bei grossen Motoren fällt der Wirkungsgrad erst bei grosser Unterlast stark ab. Die Wirkleistungseinsparungen sind gering bei einem Motorenaustausch. Der Leistungsfaktor fällt früher ab. Werden die Antriebsmotoren mit ihrer Nennleistung betrieben, sich die Kosten für die Kompensationsanlagen minimal.

Übung: Pumpenantrieb

Anzahl Lektionen:	2
Nötiges Vorwissen:	Elektrische und mechanische Grundkenntnisse, Asynchronmotor
Autor:	Ronny Bachmann
Quellen:	[1] www.energie.ch ; [2] www.elektromotoren.de ; [3] www.semafor.ch [4] www.elektromotorenmarkt.de ; [5] www.sterling.ch

Bei einem Industriehochhaus werden mittels einer Druckerhöhungspumpe die höherliegenden Stockwerke mit Brauchwasser versorgt. Der Bedarf an Brauchwasser schwankt stark und ist nicht vorhersehbar. Die bestehende Pumpe ist am 400V Netz angeschlossen und läuft im Dauerbetrieb. [3]

PFLICHTENHEFT

Betriebsbedingungen

- Medium: Wasser
- Der Brauchwasserbedarf liegt im Bereich zwischen $100\text{m}^3/\text{h}$ und $250\text{m}^3/\text{h}$
- Förderhöhe: 50m

Rahmenbedingungen

- Die Wellen des Motors und der Pumpe sind starr verbunden.
- Der Drucktransmitter kostet 1'000CHF.
- Die Installationskosten betragen 5'000CHF.
- 8'000h Betriebsdauer pro Jahr
- Stromtarif: 0,1CHF pro kWh
- Teuerung und Zins sind 0%
- Keine Wartungskosten

Fragen

- Lohnen sich die Investitionskosten für die Nachrüstung eines drehzahlvariablen Antriebs?
- Wann hat sich dieser amortisiert?

LÖSUNGSVORGABEN

Das bestehende System arbeitet mit einer festen Drehzahl. Der Bedarf ergibt sich durch das Öffnen und Schliessen der vielen "Wasserhähnen". Wird wenig Wasser verbraucht erhöht sich der Druck im Rohrsystem.

Mit der geplanten Systemerweiterung soll der Druck in der Versorgungsleitung konstant gehalten werden. Bei niedrigem Brauchwasserbedarf senkt sich die Drehzahl der Pumpe. Gewisse Frequenzumformer können Steuer- und Regelaufgaben übernehmen. Sie verfügen über digitale und analoge Eingänge sowie intelligente Logik. In dem vorliegenden Fall kann das Ausgangssignal des Drucktransmitters auf den Frequenzumrichter geführt werden. Nach Übergabe der Regelparameter und des Sollwertes regelt dieser den Druck in der Steigleitung.

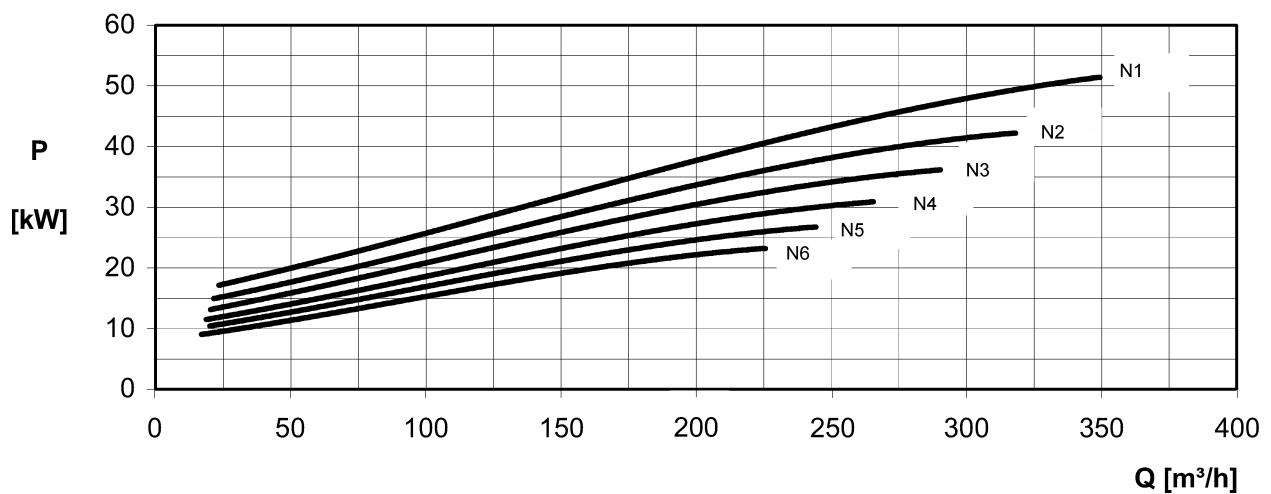
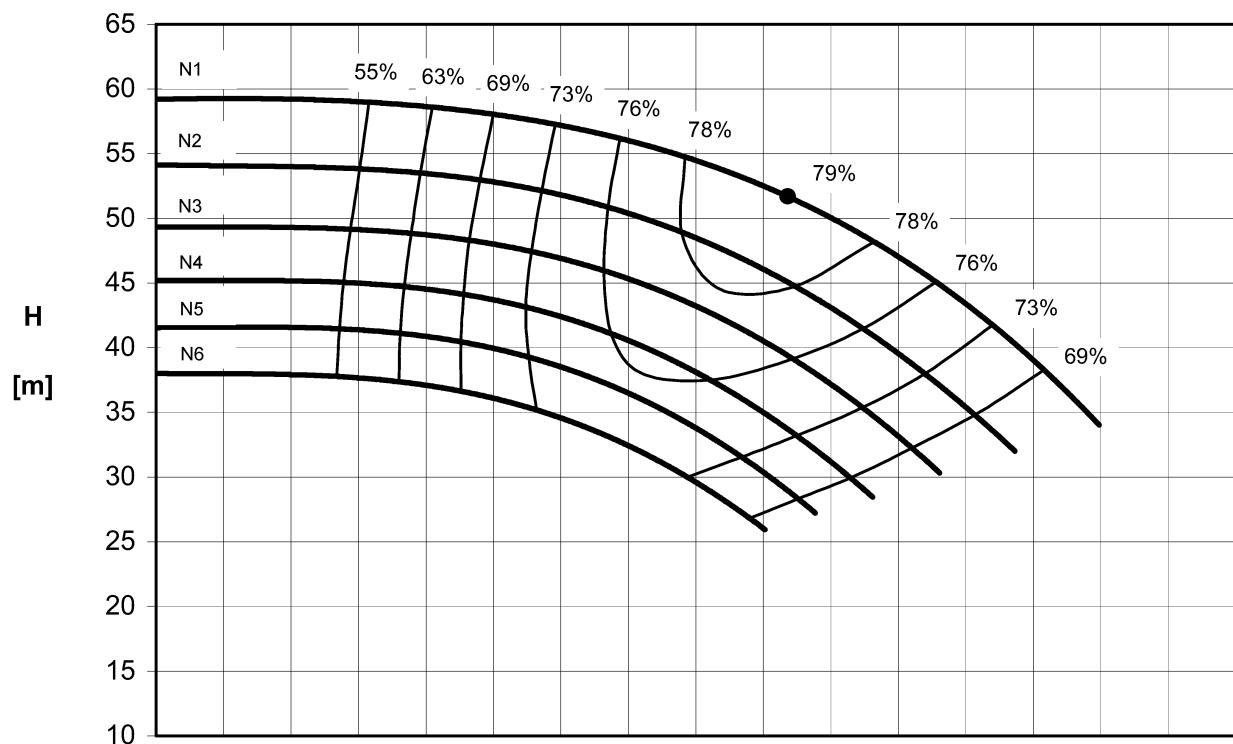
Für die Berechnung gelte: Während 20% der Betriebsdauer sei der Brauchwasserbedarf $250\text{m}^3/\text{h}$, beim Rest $100\text{m}^3/\text{h}$.

DATENBLATT PUMPE CBSD 125400 [5]

Die Kennlinie ist durch den Autor für diese Übung marginal angepasst worden.

 Nenndrehzahl: 1450U/min
 Temperatur: 20°C
 N1: 1450U/min
 N4: 1250U/min

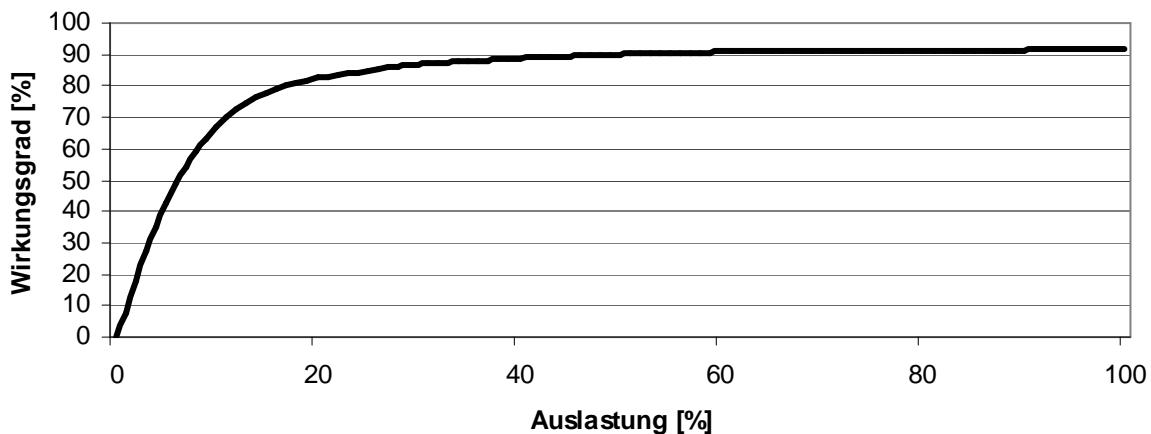
 Laufraddurchmesser: 409mm
 Viskosität: 1,01mm²/s
 N2: 1370U/min
 N5: 1200U/min

 Medium: Wasser H₂O
 Dichte: 998, 2kg/m³
 N3: 1310U/min
 N6: 1150U/min


DATEN DES EFF3 ANTRIEBSMOTORS

Nennleistung: 45kW
 Nennstrom bei 400V: 82,5A
 Nenndrehzahl: 1'450
 Wirkungsgrad bei Nennlast: 91,5%
 Leistungsfaktor : 0,86

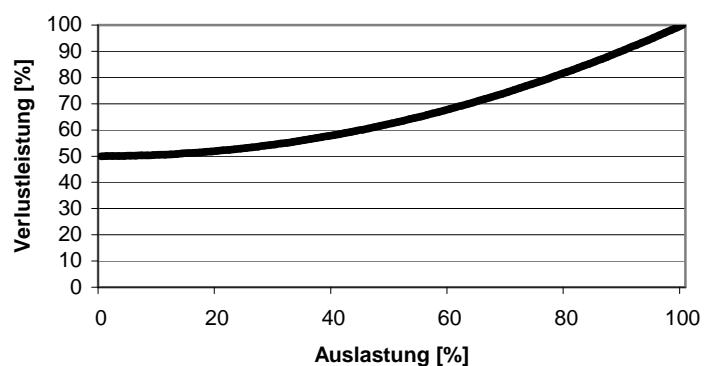
Bei Teillast reduziert sich der Wirkungsgrad eines Motors. Beim vorliegenden Motor geschieht dies nach folgendem Diagramm:



DATEN UND PREISE FÜR FREQUENZUMRICHTER [5]

Der Wirkungsgrad eines Frequenzumrichters ist von seiner Auslastung abhängig. Etwa die Hälfte seiner Verlustleistung bei Nennlast benötigt er für die Versorgung der Steuerelektronik. Dieser Teil bleibt konstant. Die restlichen Verluste fallen als Leitverluste in den Halbleitern an, sie steigen quadratisch mit linearem Stromanstieg ($P_v \sim I^2 \cdot R$).

Motorenleistung [kW]	Ausgangsleistung [kVA]	Ausgangstrom [A]	Eingangsspannung [V]	Wirkungsgrad bei Nennlast [%]	Preis (2007) [CHF]
4,0	6,4	9	3 x 400	95	1'260
5,5	9,3	13	3 x 400	95	1'686
7,5	12	18	3 x 400	95	2'001
11	17	24	3 x 400	95	2'647
15	21	30	3 x 400	95	3'122
18,5	28	39	3 x 400	95	3'592
22	32	45	3 x 400	95	4'403
30	43	60	3 x 400	97	2'361
37	53	75	3 x 400	97	6'868
45	65	91	3 x 400	97	7'400
55	80	112	3 x 400	98	8'351



BERECHNUNG

	BESTEHEND		DREHZAHLVARIABLE		
					Einheit
Anschaffungskosten					
Frequenzumrichter					CHF
Drucktransmitter					CHF
Installation					CHF
Total Anschaffungskosten					CHF
Betriebskosten pro Jahr	100m ³ /h	250m ³ /h	100m ³ /h	250m ³ /h	
Benötigte Wirkleistung					kW
System Wirkungsgrad					%
Verlustleistung					kW
Betriebsstunden					h
Strompreis	0.1	0.1	0.1	0.1	CHF/kWh
Stromkosten					CHF
Total Betriebskosten					CHF
Amortisationszeit					Jahre

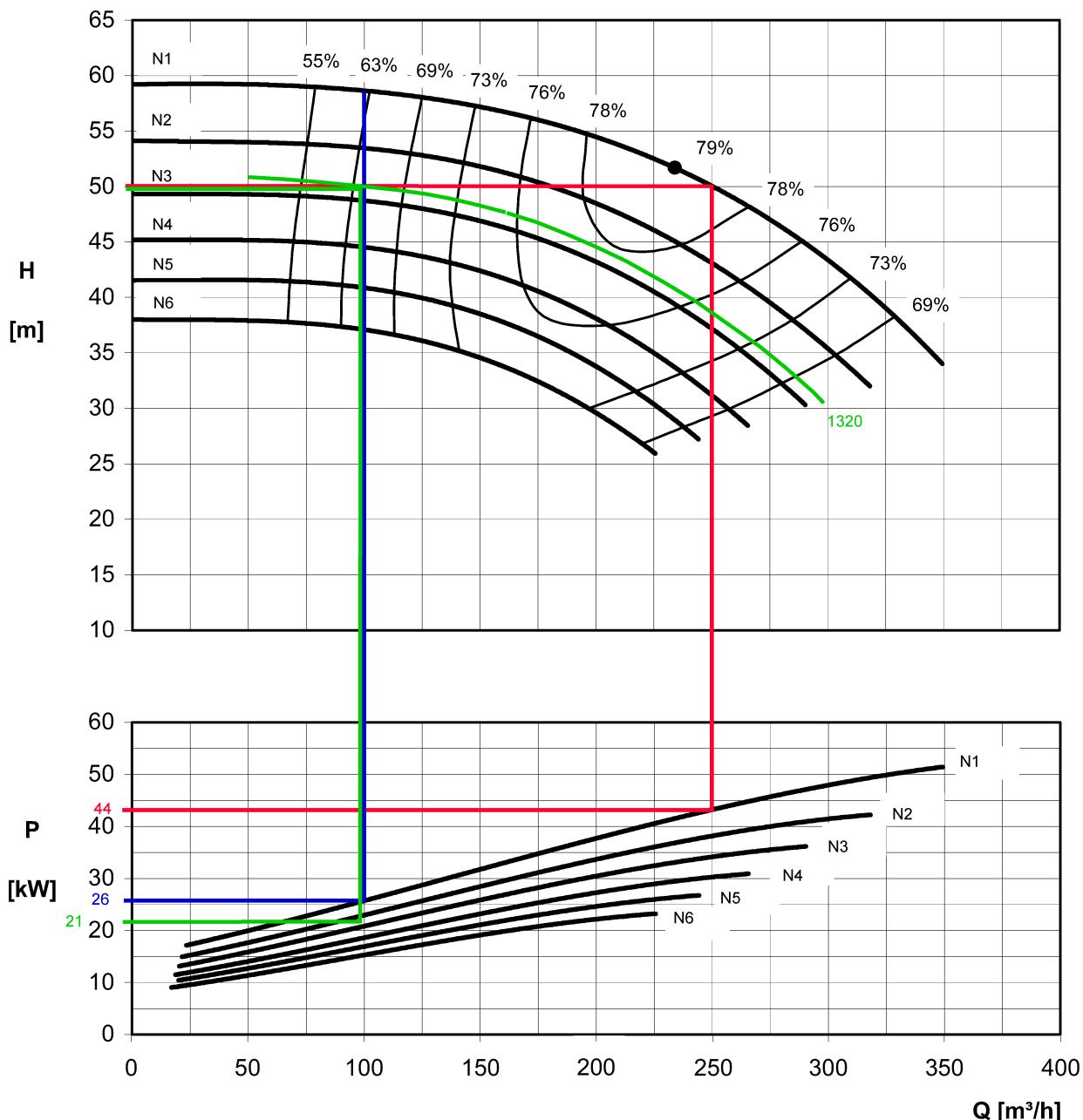
LÖSUNGSVARIANTE

Die drei Arbeitspunkte im Diagramm der Pumpe:

Für einen Volumenstrom von $250\text{m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von 50m werden 44kW Antriebsleistung benötigt. Die Pumpe arbeitet mit einem Wirkungsgrad von $78,5\%$. Die Drehzahl liegt bei 1450U/min .

Mit gleicher Drehzahl werden $100\text{m}^3/\text{h}$ gefördert. Der Druck in den Leitungen erhöht sich, was einer Förderhöhe von 59m entspricht. Die Pumpe arbeitet mit einem Wirkungsgrad von 62% .

Für einen Volumenstrom von $100\text{m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von 50m werden 21kW Antriebsleistung benötigt. Die Pumpe arbeitet mit einem Wirkungsgrad von 64% . Die Drehzahl liegt bei 1320U/min .



Bestehende Anlage:

Für einen Volumenstrom von $250\text{m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von 50m sind beim Medium Wasser $34,1\text{kW}$ Leistung erforderlich. Die Pumpe benötigt für diesen Betriebspunkt circa 44kW . Der Antriebs-

motor hat einen Wirkungsgrad von 91,5% und entzieht dem Stromnetz 48,1kW Wirkleistung. Die gesamten Verluste betragen 14kW, der Systemwirkungsgrad 71%.

Bei annähernd unverminderter Drehzahl (die Drehzahl erhöht sich in Tat und Wahrheit leicht, weil der Motor weniger belastet wird) werden 100m³/h gefördert. Die Pumpe benötigt 26kW. Der Antriebsmotor hat bei dieser Auslastung einen Wirkungsgrad von 90% und bezieht selber 28,9kW. Für den Volumenstrom von 100m³/h bei einer Förderhöhe von 50m sind beim Medium Wasser 13,6kW Leistung erforderlich. Der Systemwirkungsgrad ist 47%, die Verluste betragen 15,3kW.

	BESTEHEND	DREHZAHLVARIABLE			
Anschaffungskosten					Einheit
Frequenzumrichter	10'000				CHF
Drucktransmitter	1'000				CHF
Installation	5'000				CHF
Total Anschaffungskosten	15'000				CHF
Betriebskosten pro Jahr	100m ³ /h	250m ³ /h	100m ³ /h	250m ³ /h	
Benötigte Wirkleistung	28.9	48.1	24.0	49.1	kW
System Wirkungsgrad	47.0	70.8	56.0	70.0	%
Verlustleistung	15.3	14.0	10.6	14.7	kW
Betriebsstunden	6'400	1'600	6'400	1'600	h
Strompreis	0.1	0.1	0.1	0.1	CHF/kWh
Stromkosten	18'496	7'696	15'360	7'856	CHF
Total Betriebskosten	26'192			23'216	CHF
Amortisationszeit	5.0				Jahre

Drehzahlvariable Regelung:

Pumpe benötigt für diesen Betriebspunkt 250m³/h Volumenstrom und 50m Förderhöhe circa 44kW. Der Antriebsmotor hat einen Wirkungsgrad von 91,5% und entzieht dem Stromnetz 48,1kW Wirkleistung. Der Frequenzumformer ist nahezu ausgelastet und verursacht 1kW Verluste. Die Gesamtverluste betragen 15kW, der Systemwirkungsgrad 69%.

Beim Betriebspunkt 100m³/h Volumenstrom und 50m bringt die Drehzahlreduktion Vorteile. Die Pumpe benötigt nur noch 21kW Leistung. Ihr Wirkungsrad verbessert sich auf circa 64%. Der Antriebsmotor hat einen Wirkungsgrad von 89,5% bei dieser Belastung. Der Frequenzumformer verursacht Verluste von 540W. Es resultiert ein Systemwirkungsgrad von 56%, und Verluste von 10,7kW.

Jährlich lassen sich mit dieser Verbesserung etwa 3'000CHF Betriebskosten einsparen. Die Investition macht sich nach 5 Jahren bezahlt. Muss ein Pumpensystem kurzzeitige Spitzen abdecken lohnt sich der Einsatz eines Drehzahlvariablen Antriebs.

Die Einsparungen mit einem Drehzahlvariablen Antrieb werden umso grösser:

- je kleiner die statische Förderhöhe ist (Bei einer Umwälzpumpe ist die Förderhöhe 0m).
- je grösser der Anteil des Betriebs bei reduzierter Fördermenge ist.

Übung: Ventilatorantrieb

Anzahl Lktionen:	4
Nötiges Vorwissen:	Elektrische und mechanische Grundkenntnisse, Asynchronmotor
Autor:	Ronny Bachmann
Quellen:	[1] www.energie.ch ; [2] www.elektromotoren.de ; [3] www.semafor.ch [4] www.elektromotorenmarkt.de ; [5] www.antriebstech.ch

Verschiedene Antriebsvarianten eines vorgegebenen Ventilators sollen auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Massgebend sind die Investitions- und Betriebskosten im Betrachtungszeitraum von vier Jahren. [1]

PFLICHTENHEFT

Tagesbetrieb

- Betriebsdauer: 12h pro Tag (Hochtarif)
- Volumenstrom: 30'000m³/h
- Druckabfall im System: 1'000Pa

Nachtbetrieb

- Betriebsdauer: 12h pro Tag (Niedertarif)
- Volumenstrom: 20'000m³/h
- Druckabfall im System: 450Pa

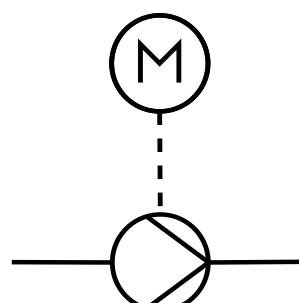
Rahmenbedingungen

- Ventilatortyp: RZR-800 Preis mit Rahmen, Keilriemenantrieb, Riemenspannvorrichtung und Rienschutz 10'000CHF.
- Verbindung zwischen Motor und Ventilator: Keilriemen mit 93% Wirkungsgrad und 1% Schlupf oder Flachriemen mit 97% Wirkungsgrad ebenfalls 1% Schlupf. Der Flachriemenantrieb ist 600CHF teurer als der Keilriemenantrieb.
- Installationskosten: 5'000CHF
- 8'000h Betriebsdauer pro Jahr
- Hochtarif: 0,15CHF pro kWh
- Niedertarif: 0,1CHF pro kWh
- Teuerung und Zins sind 0%
- Keine Wartungskosten

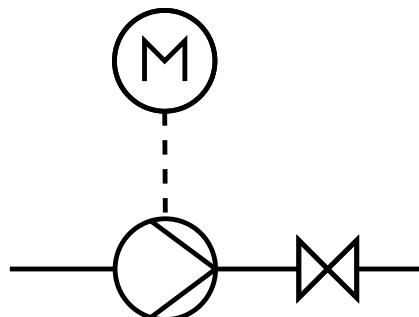
Ziel: Minimale Gesamtkosten für die Anschaffung und vier Jahre Betrieb

LÖSUNGSVORGABEN

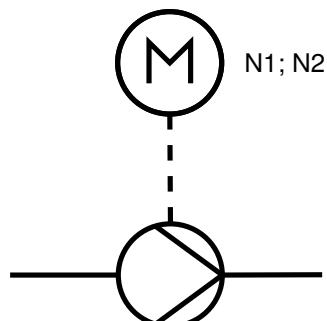
Variante 1: Betrieb mit einer festen Drehzahl. Zwischen Tag und Nacht wird nicht unterschieden.



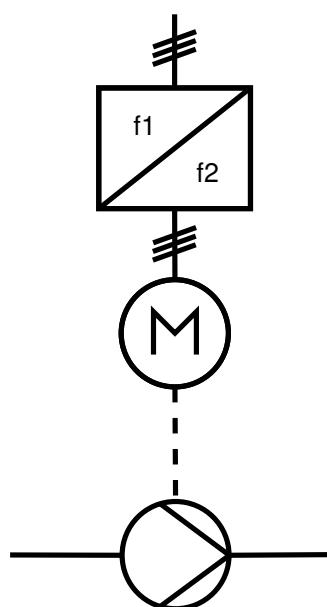
Variante 2: Betrieb mit einer festen Drehzahl, Volumenregelung mittels Drosselklappe.
Die Drosselklappe und deren Ansteuerung kosten 1'000CHF.



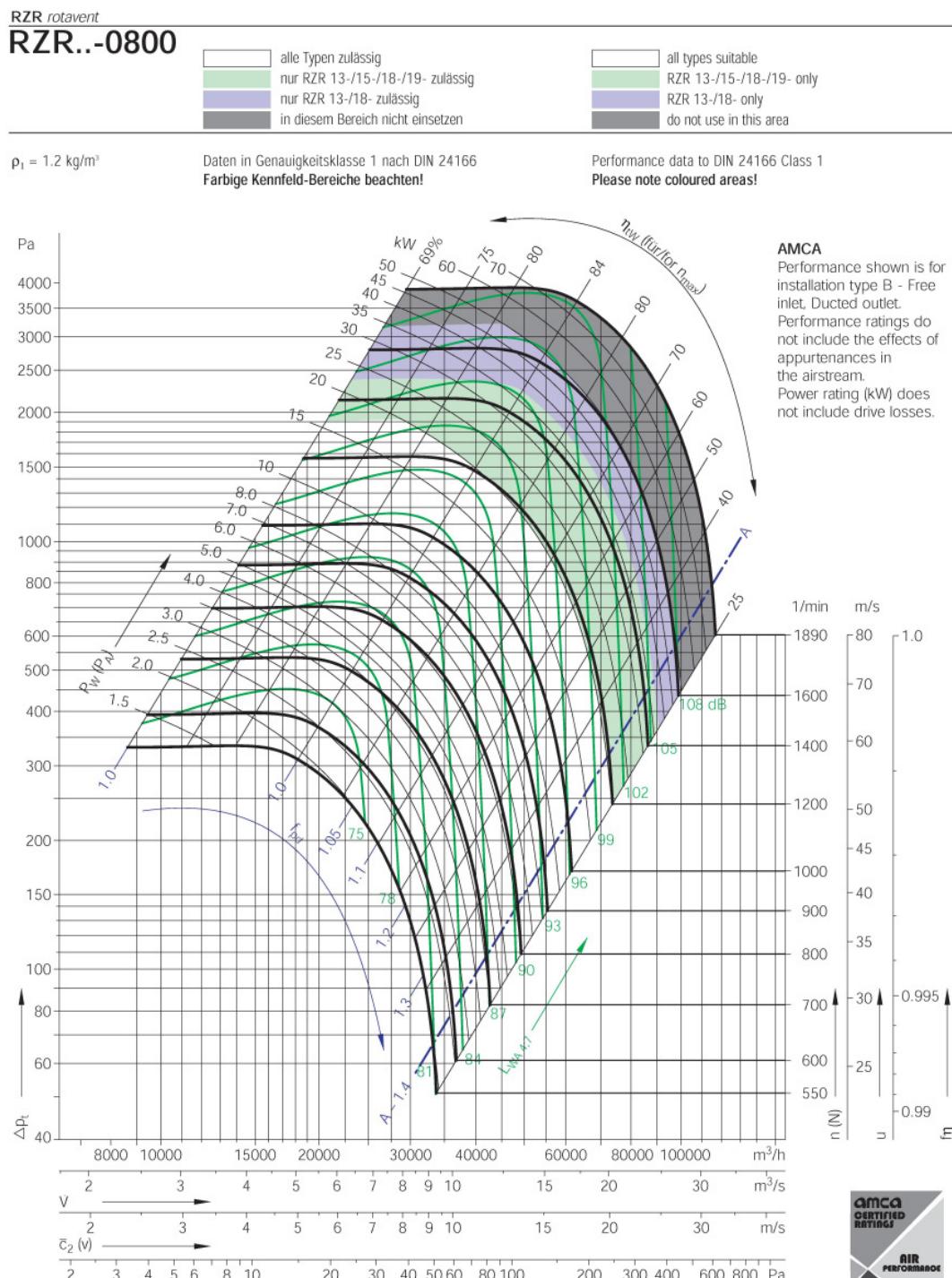
Variante 3: Betrieb mit zwei festen Drehzahlen (Motor mit zwei Drehzahlen).



Variante 4: Volumenregelung mittels Drehzahl (Frequenzumrichter).



DATENBLATT VENTILATOR RZR-800

 P_w (P_A) [kW] = Antriebsleistung, Eingang Ventilatorwelle


Formelzeichen-Einheiten siehe Seite 23/Formulae-Units see page 23

D = 363 mm

Laufraddurchmesser/Impeller diameter

z = 12

Schaufelzahl/Number of Blades

 J = 0,22 kgm²

Massenträgheitsmoment/Moment of Inertia

 $\Delta p_{t0} = \Delta p_t - p_{d2}$

statische Druckerhöhung bei Kanalanschluss/Static pressure – ducted

 $\Delta p_{t0} = \Delta p_t - f_{pd} \times p_{d2}$

Druckerhöhung frei ausblasend/Available Pressure – free discharge

AMCA

Gebhardt Ventilatoren certifies that the Centrifugal Fans shown here is licensed to bear the AMCA Seal. The ratings shown are based on tests and procedures performed in accordance with AMCA Publication 211 and comply with the requirements of the AMCA Certified Ratings Program. The AMCA Certified Ratings Seal applies to air performance ratings only.



DATEN UND PREISE FÜR EFF2 MOTOREN [2]

Energiesparmotoren (EFF1) seien 30% teurer als EFF2 Motoren, bieten dafür einen um 3% besseren Wirkungsgrad.

Nennleistung [kW]	Nennmoment [Nm]	Nennstrom bei 400V [A]	Nenndrehzahl [min ⁻¹]	cos(φ)	η bei Nennlast [%]	Trägheits- moment [kgm ²]	Anzugs- strom I _A /I _N	Anzugs- moment M _A /M _N	Kipp- moment M _K /M _N	Gewicht [kg]	Preis (2007) [CHF]
----------------------	--------------------	------------------------------	--------------------------------------	--------	--------------------------	---	--	---	---	-----------------	-----------------------

 2 Polig (Synchrongdrehzahl 3000 min⁻¹)

0,09	0,31	0,37	2730	0,70	62,0	53 ⁶	4,0	2,3	2,4	3,2	71
0,12	0,42	0,48	2755	0,68	64,0	57 ⁶	4,0	2,3	2,4	3,4	75
0,18	0,62	0,49	2740	0,74	66,0	100 ⁶	4,5	2,3	2,5	5,1	91
0,25	0,87	0,79	2790	0,77	69,0	113 ⁶	4,5	2,3	2,5	5,7	96
0,37	1,28	1,00	2820	0,80	71,0	348 ⁶	5,5	2,0	2,4	6,3	102
0,55	1,89	1,55	2820	0,81	74,0	400 ⁶	5,5	2,0	2,4	8,5	107
0,75	2,52	1,75	2850	0,82	76,0	0,8 ³	6,0	2,2	2,5	8,5	130
1,10	3,70	2,53	2850	0,84	78,0	0,9 ³	6,0	2,3	2,5	9,5	141
1,50	5,04	3,20	2855	0,80	79,0	1,2 ³	6,0	2,4	2,8	13,0	156
2,20	7,40	4,43	2855	0,81	81,5	1,4 ³	6,5	2,4	2,8	16,0	197
3,00	10,1	6,07	2860	0,86	83,5	2,9 ³	6,5	1,9	2,1	20,7	261
4,00	13,4	8,00	2860	0,87	85,5	5,5 ³	7,0	2,5	2,8	26,0	351
5,50	18,4	10,9	2870	0,85	86,5	10,4 ³	7,5	2,5	3,6	36,0	466
7,50	24,7	14,6	2875	0,83	87,1	12,1 ³	8,5	3,0	3,6	43,0	487
11,0	35,9	19,9	2940	0,90	88,0	37,0 ³	8,0	2,1	2,3	115	702
15,0	48,8	26,8	2940	0,90	89,0	43,2 ³	8,0	2,1	2,3	125	890
18,5	60,3	32,2	2940	0,90	90,0	52,5 ³	8,2	2,1	2,3	145	1'047
22	71,2	38,3	2950	0,90	90,5	71,0 ³	8,2	2,1	2,3	173	1'309
30	72,5	52,6	2950	0,90	91,2	119 ³	7,6	1,9	2,3	232	1'731
37	89,5	63,5	2960	0,90	92,0	133 ³	7,6	1,9	2,3	250	2'246
45	145	77,8	2970	0,90	92,3	221 ³	7,6	1,7	2,3	312	2'720
55	177	96,0	2975	0,90	92,5	305 ³	7,6	1,5	2,3	387	2'546
75	241	128	2975	0,91	93,2	584 ³	7,6	1,5	2,3	515	4'576
90	289	151	2975	0,91	93,8	665 ³	7,6	1,5	2,3	566	5'479
110	353	184	2980	0,91	94,0	1,13	7,1	1,8	2,2	922	7'552

Nennleistung [kW]	Nennmoment [Nm]	Nennstrom bei 400V [A]	Nenndrehzahl [min ⁻¹]	cos(φ)	η bei Nennlast [%]	Trägheits- moment [kgm ²]	Anzugs- strom I _A /I _N	Anzugs- moment M _A /M _N	Kipp- moment M _K /M _N	Gewicht [kg]	Preis (2007) [CHF]
----------------------	--------------------	------------------------------	--------------------------------------	--------	--------------------------	---	--	---	---	-----------------	-----------------------

 4 Polig (Synchrongdrehzahl 1500 min⁻¹)

0,06	0,44	0,27	1300	0,65	56,0	64 ³	4,0	1,6	2,0	3,2	62
0,09	0,66	0,37	1300	0,73	58,0	70 ⁶	4,0	1,6	2,0	3,4	84
0,12	0,85	0,65	1320	0,67	59,0	117 ⁶	4,0	1,6	2,0	5,1	86
0,18	1,28	0,65	1320	0,64	62,0	136 ⁶	2,7	1,7	2,0	5,7	91
0,25	1,72	0,83	1395	0,80	67,3	423 ⁶	5,5	2,0	2,1	6,9	102
0,37	2,55	1,14	1400	0,81	70,0	468 ⁶	5,5	2,0	2,4	7,5	107
0,55	3,79	1,51	1390	0,75	71,8	1,8 ³	5,5	2,3	2,4	8,5	128
0,75	5,17	1,57	1400	0,77	73,5	2,1 ³	5,5	2,3	2,4	9,8	133
1,10	7,58	2,78	1410	0,78	76,5	2,1 ³	6,0	2,2	2,4	13,5	145
1,50	10,3	3,61	1410	0,79	78,6	2,7 ³	6,0	2,2	2,4	15,0	161
2,20	14,9	5,07	1425	0,80	82,0	5,4 ³	6,5	2,0	2,2	19,5	203
3,00	20,3	6,66	1425	0,81	83,0	6,7 ³	6,5	2,2	2,4	23,0	239
4,00	26,7	8,55	1430	0,82	85,1	8,6 ³	7,5	2,4	2,6	30,0	361
5,50	36,5	11,4	1440	0,83	86,6	20,5 ³	6,5	2,0	2,8	41,0	554
7,50	49,4	15,0	1450	0,84	87,6	29,6 ³	7,0	2,2	2,4	52,0	520
11,0	72	20,6	1470	0,85	88,0	72,4 ³	7,7	2,1	2,3	122	708
15,0	98	28	1475	0,85	89,0	92,9 ³	7,7	2,1	2,3	142	911
18,5	120	33,5	1475	0,86	90,5	135 ³	7,7	2,1	2,3	174	1'134
22	142	39,8	1480	0,86	91,0	136 ³	7,7	2,1	2,3	192	1'333
30	193	54,1	1480	0,86	92,0	245 ³	7,3	2,1	2,3	257	1'827
37	237	66,0	1480	0,87	92,5	390 ³	7,3	1,7	2,3	294	2'207
45	290	79,2	1480	0,87	92,8	450 ³	7,3	1,8	2,3	327	2'697
55	354	96,5	1485	0,87	93,0	640 ³	7,3	1,8	2,3	381	3'662
75	483	131	1485	0,87	93,8	1,045	7,3	2,0	2,3	535	4'877
90	580	157	1485	0,87	94,2	1,396	7,3	2,0	2,3	634	5'181
110	709	191	1485	0,88	94,5	2,98	6,9	2,1	2,2	912	7'086

Nennleistung	Nennmoment	Nennstrom bei 400V	Nenn-drehzahl	cos(φ)	η bei Nennlast	Trägheitsmoment	Anzugsstrom	Anzugsmoment	Kippmoment	Gewicht	Preis (2007)
[kW]	[Nm]	[A]	[min ⁻¹]		[%]	[kgm ²]	I _A /I _N	M _A /M _N	M _K /M _N	[kg]	[CHF]

6 Polig (Synchrongeschwindigkeit 1000 min⁻¹)

0,06		820				1,8	1,9	1,7		91	
0,09	0,31	820	0,52	30,0		1,8	1,9	1,7	5,1	104	
0,12	0,45	810	0,50	34,0		2,2	1,7	1,8	5,7	107	
0,18	1,92	0,82	850	0,78	57,0	423 ⁻⁶	4,0	1,7	1,8	6,4	96
0,25	2,67	1,09	850	0,80	60,0	468 ⁻⁶	4,0	1,7	1,8	6,5	102
0,37	3,93	1,24	940	0,67	63,0	1,6 ⁻³	4,0	1,7	2,1	8,5	127
0,55	5,84	1,81	940	0,68	66,0	2,1 ⁻³	4,5	1,8	2,1	9,2	130
0,75	7,96	2,25	940	0,70	70,0	2,9 ⁻³	4,5	1,8	2,0	12,0	174
1,10	11,6	3,20	940	0,71	73,3	3,5 ⁻³	4,5	2,0	2,2	14,0	195
1,50	15,7	3,90	940	0,70	77,5	6,9 ⁻³	5,5	2,0	2,3	19,5	232
2,20	22,4	5,50	940	0,74	80,0	12,9 ⁻³	6,5	2,1	2,3	28,0	336
3,00	30,2	7,21	950	0,67	82,1	27,4 ⁻³	6,5	2,0	3,8	50,0	437
4,00	40,0	9,26	955	0,76	83,0	34,3 ⁻³	6,0	1,8	2,1	58,0	460
5,50	55,0	12,26	955	0,77	85,4	43,1 ⁻³	6,0	1,9	2,1	65,0	500
7,5	74	15	970	0,77	86,0	80 ⁻³	7,0	1,9	2,1	116	835
11	108	22	970	0,78	87,5	108 ⁻³	7,0	1,9	2,1	139	989
15	146	29	980	0,80	89,0	167 ⁻³	7,0	1,9	2,1	182	1'374
18,5	180	35	980	0,81	90,0	302 ⁻³	7,0	1,9	2,1	228	1'509
22	214	40	980	0,81	90,0	342 ⁻³	7,0	1,9	2,1	246	1'632
30	292	55	985	0,83	91,5	525 ⁻³	7,0	1,8	2,1	294	2'090
37	360	67	985	0,85	92,0	807 ⁻³	7,0	1,8	2,1	395	2'702
45	438	80	985	0,86	92,5	1,334	7,0	1,8	2,1	505	4'127
55	535	99	985	0,86	92,8	1,598	7,0	1,8	2,0	566	5'028
75	730	136	990	0,86	93,5	3,94	7,0	2,0	2,0	850	7'555
90	877	163	990	0,86	93,8	4,58	7,0	2,0	2,0	965	8'856
110	1071	193	990	0,86	94,0	5,23	6,7	2,0	2,0	1028	10'962

Nennleistung	Nennmoment	Nennstrom bei 400V	Nenn-drehzahl	cos(φ)	η bei Nennlast	Trägheitsmoment	Anzugsstrom	Anzugsmoment	Kippmoment	Gewicht	Preis (2007)
[kW]	[Nm]	[A]	[min ⁻¹]		[%]	[kgm ²]	I _A /I _N	M _A /M _N	M _K /M _N	[kg]	[CHF]

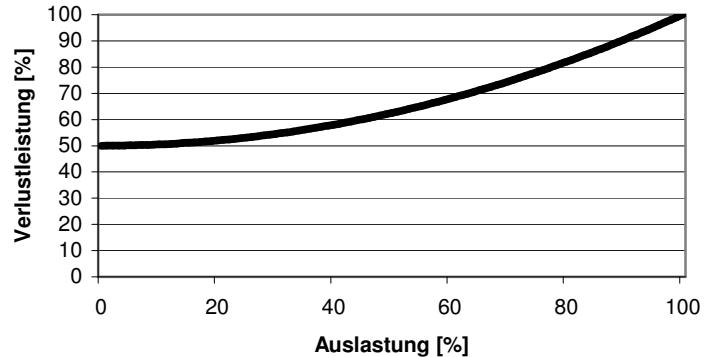
8 Polig (Synchrongeschwindigkeit 750 min⁻¹)

0,04	0,96	0,38	530	0,68	42	0,30 ⁻³	1,3	1,3	1,6	3,5	244
0,05	0,75	0,34	640	0,53	40	0,29-3	2,0	1,5	1,6	5,0	260
0,07	1,04	0,43	640	0,54	44	0,39 ⁻³	2,0	1,5	1,6	5,0	276
0,09	1,50	0,65	670				2,0	1,5	1,6	6,0	209
0,12	2,0	0,83	670				2,1	1,6	1,6	6,5	219
0,18	2,57	0,90	670	0,53	50	1,6 ⁻³	4,0	1,8	2,5	8,0	132
0,25	3,54	1,04	670	0,52	58	2,1 ⁻³	4,0	2,0	2,4	10,7	138
0,37	5,23	1,34	690	0,66	58	2,9 ⁻³	3,5	1,8	2,0	13,5	179
0,55	7,78	2,21	690	0,66	59	3,5 ⁻³	3,5	1,9	2,1	16,0	190
0,75	10,1	2,75	700	0,60	68	6,3 ⁻³	4,5	2,0	2,5	21,5	237
1,10	14,8	3,72	700	0,67	63	7,7 ⁻³	4,0	2,0	2,2	21,5	266
1,50	20,3	4,46	705	0,68	72	13,8 ⁻³	5,5	1,7	2,0	30,5	338
2,20	29,6	6,05	710	0,77	75	29,0 ⁻³	5,0	1,9	2,5	37,0	451
3,00	40,4	8,25	710	0,77	78	38,0 ⁻³	5,5	2,0	2,2	44,0	536
4,0	53	9,3	720	0,75	82,3	64,9 ⁻³	5,0	2,0	2,1	94	755
5,5	72	12,4	720	0,76	85,0	82,1 ⁻³	6,0	2,0	2,0	115	950
7,5	99	16	720	0,76	86,0	114 ⁻³	5,5	2,0	2,0	140	1'112
11	145	23	730	0,78	87,5	167 ⁻³	6,0	1,7	2,0	180	1'445
15	196	31	730	0,78	87,5	325 ⁻³	6,0	1,8	2,0	228	1'903
18,5	242	39	730	0,76	89,5	481 ⁻³	6,0	1,7	2,0	265	2'330
22	287	45	730	0,79	90,0	531 ⁻³	6,0	1,8	2,0	296	2'678
30	392	58	730	0,8	90,5	809 ⁻³	6,0	1,8	2,0	391	3'027
37	484	71	740	0,82	91,0	1,381	6,0	1,8	2,0	500	4'334
45	588	89	740	0,79	91,7	1,721	6,0	1,8	2,0	562	5'148
55	719	106	740	0,81	92,0	4,59	6,5	1,6	2,0	875	5'500
75	967	143	740	0,81	92,5	5,36	6,5	1,6	2,0	1008	6'090
90	1161	167	740	0,83	93,0	6,11	6,5	1,6	2,0	1065	10'925
110	1419	205	740	0,82	93,3	6,55	6,5	1,6	2,0	1195	

DATEN UND PREISE FÜR FREQUENZUMRICHTER [5]

Der Wirkungsgrad eines Frequenzumrichters ist von seiner Auslastung abhängig. Etwa die Hälfte seiner Verlustleistung bei Nennlast benötigt er für die Versorgung der Steuerelektronik. Dieser Teil bleibt konstant. Die restlichen Verluste fallen als Leitverluste in den Halbleitern an, sie steigen quadratisch mit linearem Stromanstieg ($P_v \sim I^2 \cdot R$).

Motorenleistung	Ausgangsleistung	Ausgangstrom	Eingangsspannung	Wirkungsgrad bei Nennlast	Preis (2007)
[kW]	[kVA]	[A]	[V]	[%]	[CHF]
0,4	1	1,5	3 x 400	95	597
0,75	1,7	2,5	3 x 400	95	726
1,5	2,6	3,7	3 x 400	95	851
2,2	3,9	5,5	3 x 400	95	1'053
4,0	6,4	9	3 x 400	95	1'260
5,5	9,3	13	3 x 400	95	1'686
7,5	12	18	3 x 400	95	2'001
11	17	24	3 x 400	95	2'647
15	21	30	3 x 400	95	3'122
18,5	28	39	3 x 400	95	3'592
22	32	45	3 x 400	95	4'403



DATEN UND PREISE FÜR POLUMSCHALTBARE MOTOREN [4]

Steigt bei Lasten das benötigte Antriebsmoment quadratisch bei linearem Drehzahlanstieg (Lüfterantriebe) empfiehlt sich die Y/YY Dahlanderschaltung. Motoren mit Y/YY Schaltung haben ein Leistungsverhältnis von 1:4 und ein Drehmomentverhältnis von 1:2. Polumschaltbaren Motor hat einen etwas tieferen Wirkungsgrad wie ein gleich starker EFF2 Motor. Für das Abschätzen des Wirkungsgrades gelte: Maximalleistung des Polumschaltbaren Motors = Nennleistung EFF2 Motor. Wirkungsgrad Polumschaltbarer Motor = Wirkungsgrad EFF2 Motor -3%.

Nennleistung	Nenn-drehzahl	Preis (2007)
[kW]	[min ⁻¹]	[CHF]
4 / 2 Polig		
Synchrondrehzahl 1500 / 3000 min⁻¹		
0,08/0,30	1415/2830	187
0,12/0,48	1405/2795	208
0,17/0,75	1410/2875	172
0,25/0,95	1440/2880	195
0,18/0,70	1415/2830	231
0,25/0,90	1405/2840	265
0,30/1,40	1420/2760	218
0,37/1,50	1440/2840	335
0,40/1,90	1445/2855	229
0,50/2,00	1430/2840	390
2,80/12,50	1450/2920	961
3,30/12,00	1450/2890	1'272
3,80/16,50	1470/1920	1'161
4,30/17,00	1460/2915	1'840
5,50/20,00	1460/2930	1'356
5,50/20,00	1470/2920	2'188
6,40/24,0	1465/2925	1'575
6,40/24,00	1480/2935	2'581
7,80/30,00	1465/2925	1'959
7,80/30,00	1475/2940	3'576
9,50/37,00	1465/2950	2'425
9,50/37,00	1485/2950	4'198
12,00/45,00	1470/2950	2'680
12,00/45,00	1480/2950	4'801
15,00/55,00	1470/2960	3'190
15,00/55,00	1480/2950	5'971
20,00/75,00	1475/2970	4'166
24,00/90,00	1475/2970	4'357

Nennleistung	Nenn-drehzahl	Preis (2007)
[kW]	[min ⁻¹]	[CHF]
6 / 4 Polig		
Synchrondrehzahl 1000 / 1500 min⁻¹		
0,06/0,18	940/1415	203
0,08/0,25	945/1405	218
0,12/0,40	950/1410	244
0,16/0,55	955/1425	270
0,32/1,10	965/1435	213
0,25/0,75	950/1425	336
0,45/1,40	935/1420	224
0,37/1,10	955/1425	395
0,70/2,20	965/1435	296
0,90/2,50	960/1420	325
0,50/1,50	965/1440	469
0,75/2,00	970/1440	526
1,10/3,20	965/1460	412
1,00/3,00	965/1440	651
1,50/4,70	975/1460	555
1,50/3,70	970/1445	818
2,20/6,70	975/1455	625
2,20/6,00	975/1460	1'121
3,10/9,50	975/1465	965
3,00/8,20	975/1445	1'363
4,00/12,00	980/1460	1'114
4,40/13,00	975/1450	1'933
5,10/15,50	985/1475	1'382
5,40/16,00	982/1450	2'272
6,20/18,50	985/1470	1'470
6,70/20,00	980/1470	2'645
8,70/26,00	980/1475	1'933
9,00/26,00	985/1470	3'615
11,00/33,00	985/1480	2'386
12,00/34,00	982/1475	4'356

Nennleistung	Nenn-drehzahl	Preis (2007)
[kW]	[min ⁻¹]	[CHF]
8 / 4 Polig		
Synchrondrehzahl 750 / 1500 min⁻¹		
0,05/0,20	680/1430	206
0,075/0,30	670/1425	208
0,12/0,50	695/1400	231
0,18/0,70	685/1405	265
0,22/1,00	705/1395	211
0,25/1,00	700/1420	335
0,30/1,30	695/1375	218
0,37/1,50	690/1400	390
0,55/2,20	690/1420	296
0,65/2,40	695/1420	320
0,50/2,00	700/1415	427
0,65/2,50	710/1440	518
0,90/3,20	695/1435	411
0,90/3,60	710/1440	643
1,10/4,50	740/1445	551
1,50/6,30	725/1460	622
1,10/4,50	715/1450	885
1,80/6,50	710/1440	1'043
2,00/8,90	730/1450	961
2,30/9,00	720/1445	1'218
2,70/12,00	730/1455	1'109
3,50/12,50	725/1465	1'801
4,00/16,00	730/1470	1'376
4,50/16,00	725/1470	2'214
5,00/19,50	725/1465	1'466
5,00/20,00	730/1475	2'645
7,50/29,00	730/1475	1'928
7,20/26,00	730/1470	3'589
9,50/35,00	735/1478	4'198
9,50/40,00	740/1480	2'658

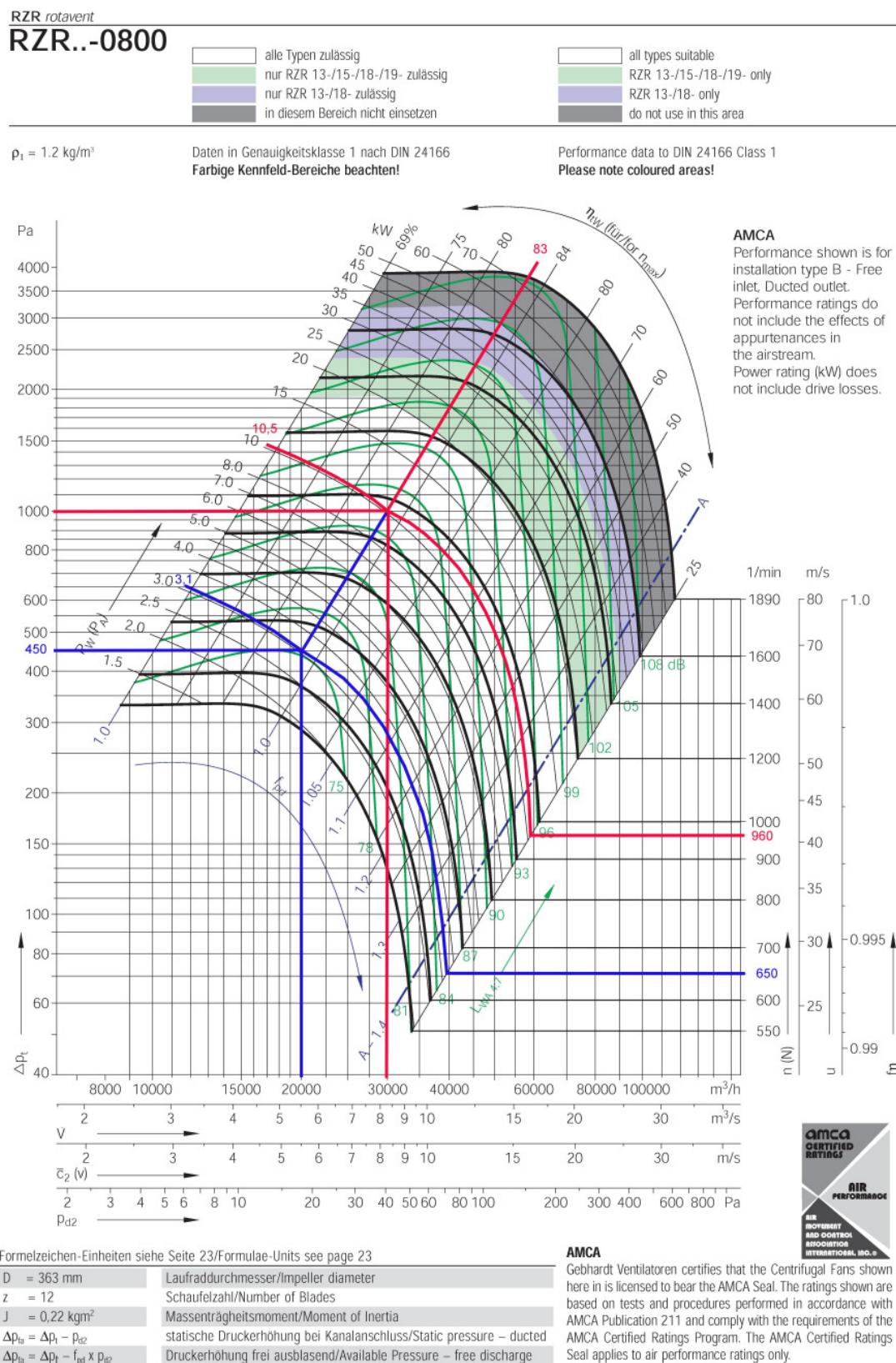
BERECHNUNG

	VARIANTE 1		VARIANTE 2				
					Einheit		
Anschaffungskosten							
Ventilator	10'000		10'000		CHF		
Motortyp							
Motorkosten					CHF		
Installation	5'000		5'000		CHF		
Total Anschaffungskosten					CHF		
Betriebskosten	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb			
Benötigte Wirkleistung					kW		
System Wirkungsgrad					%		
Verlustleistung					kW		
Betriebsstunden					h		
Strompreis	0.15	0.1	0.15	0.1	CHF/kWh		
Stromkosten					CHF		
Total Betriebskosten					CHF		
Gesamtkosten					CHF		

	VARIANTE 1		VARIANTE 2				
					Einheit		
Anschaffungskosten							
Ventilator	10'000		10'000		CHF		
Motortyp							
Motorkosten					CHF		
Installation	5'000		5'000		CHF		
Total Anschaffungskosten					CHF		
Betriebskosten	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb			
Benötigte Wirkleistung					kW		
System Wirkungsgrad					%		
Verlustleistung					kW		
Betriebsstunden					h		
Strompreis	0.15	0.1	0.15	0.1	CHF/kWh		
Stromkosten					CHF		
Total Betriebskosten					CHF		
Gesamtkosten					CHF		

LÖSUNGSVARIANTE

Die zwei Arbeitspunkte im Diagramm des Ventilator:



Variante 1:

 Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt 30'000m³/h und 1'000Pa:

- Mechanische Leistung an der Welle = 10,5kW
- Drehzahl = 960U/min
- Wirkungsgrad = 83%

Mit einem Flachriemenantrieb werden 10,8kW Antriebsleistung benötigt. Bei einem Schlupf von 1% muss der Motor mit 970U/min drehen (Untersetzung 1). Ein EFF2 Motor benötigt bei diesen Eckwerten 12.4kW elektrische Leistung. Dieser gegenüber stehen 8.7kW mechanische Lüfterleistung. Es resultieren so 3.7kW Verlustleistung. Der Systemwirkungsgrad liegt bei 70% bei Tagesbetrieb.

	VARIANTE 1	VARIANTE 2		
				Einheit
Anschaffungskosten				
Ventilator	10'000		10'000	CHF
Motortyp	6 Polig; P = 11kW; N = 970		6 Polig; P = 11kW; N = 970	
Motorkosten	989		989	CHF
Installation	5'000		5'000	CHF
Flachriemen	600		600	CHF
Drosselklappe			1'000	CHF
Total Anschaffungskosten	16'589		17'589	CHF
Betriebskosten	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb
Benötigte Wirkleistung	12.4	12.4	12.4	8.6 kW
System Wirkungsgrad	70	70	70	64 %
Verlustleistung	3.7	3.7	3.7	3.1 kW
Betriebsstunden	16'000	16'000	16'000	16'000 h
Strompreis	0.15	0.1	0.15	0.1 CHF/kWh
Stromkosten	29'760	19'840	29'760	13'760 CHF
Total Betriebskosten	49'600		43'520	CHF
Gesamtkosten	66'189		61'109	CHF

Variante 2:

 Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt 30'000m³/h und 1'000Pa:

- Mechanische Leistung an der Welle = 10,5kW
- Drehzahl = 960U/min
- Wirkungsgrad = 83%

 Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt 20'000m³/h und 970U/min:

- Mechanische Leistung an der Welle = 7,3kW
- Wirkungsgrad = 76%

Bei Nachtbetrieb erhöht sich die Ventilatordrehzahl, weil der Motor weniger belastet wird. Mit einem Flachriemenantrieb werden circa 7,5kW Antriebsleistung benötigt. Der EFF2 Motor ist für diesen Arbeitspunkt überdimensioniert und hat einen schlechteren Wirkungsgrad 87,3% (Daten aus der Software OPAL) [5]. Er bezieht 8,6kW elektrische Leistung. Es resultieren so 3,1kW Verlustleistung. Der Systemwirkungsgrad liegt bei 64% bei Nachtbetrieb.

Variante 3:

 Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt $30'000\text{m}^3/\text{h}$ und $1'000\text{Pa}$:

- Mechanische Leistung an der Welle = $10,5\text{kW}$
- Drehzahl = 960U/min
- Wirkungsgrad = 83%

Mit einem Flachriemenantrieb werden $10,8\text{kW}$ Antriebsleistung benötigt. Bei einem Schlupf von 1% muss der Motor mit 970U/min drehen. Als Antriebsmotor wird ein 8/4 poliger Motor mit 2,7 beziehungsweise 12kW Leistung gewählt. Der Übersetzungsfaktor des Riemenantriebs beträgt $\frac{2}{3}$. Bei einem geschätzten Wirkungsgrad von $84,5\%$ benötigt der Motor $12,8\text{kW}$ elektrische Leistung. Die Verlustleistung beträgt $4,1\text{kW}$, der Systemwirkungsgrad ist 68% .

 Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt $\approx 480\text{U/min}$ und $\approx 15'000\text{m}^3/\text{h}$:

- Druck $\approx 250\text{Pa}$
Der Volumenstrom in einem Rohrsystem verhält sich proportional zum Quadrat des Drucks.
 $(30'000\text{m}^3/\text{h})^2 = \text{Konstante} \cdot 1000\text{Pa} \rightarrow$ bei 250Pa ergeben sich circa $15'000\text{m}^3/\text{h}$
- Mechanische Leistung an der Welle $\approx 1,25\text{kW}$
- Wirkungsgrad $\approx 83\%$

Die Vorgabe von $20'000\text{m}^3/\text{h}$ und 450Pa lässt sich mit dieser Variante nicht erfüllen.

Mit einem Flachriemenantrieb werden $1,3\text{kW}$ Antriebsleistung benötigt. Der Motor ist für diesen Arbeitspunkt überdimensioniert und hat einen schlechteren Wirkungsgrad. Bei einem geschätzten Wirkungsgrad von 82% benötigt der Motor $1,6\text{kW}$ elektrische Leistung. Die Verlustleistung beträgt 560W , der Systemwirkungsgrad ist 66% .

	VARIANTE 3		VARIANTE 4		
Anschaffungskosten					Einheit
Ventilator	10'000		10'000		CHF
Motortyp	8/4 Polig; N = 720/1455		6 Polig; P = 11kW; N = 970		
Motorkosten	1'109		1'300		CHF
Installation	5'000		5'000		CHF
Flachriemen	600		600		CHF
Frequenzumrichter			2'647		CHF
Total Anschaffungskosten	16'709		19'547		CHF
Betriebskosten	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb	Tagesbetrieb	Nachtbetrieb	
Benötigte Wirkleistung	12.8	1.6	12.6	3.93	kW
System Wirkungsgrad	68	66	69	65	%
Verlustleistung	4.1	0.56	3.9	1.36	kW
Betriebsstunden	16'000	16'000	16'000	16'000	h
Strompreis	0.15	0.1	0.15	0.1	CHF/kWh
Stromkosten	30'720	2'560	30'240	6'288	CHF
Total Betriebskosten	33'280		36'528		CHF
Gesamtkosten	49'989		56'075		CHF

Variante 4:

Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt $30'000\text{m}^3/\text{h}$ und $1'000\text{Pa}$:

- Mechanische Leistung an der Welle = $10,5\text{kW}$
- Drehzahl = 960U/min
- Wirkungsgrad = 83%

Betriebsdaten des Ventilators im Arbeitspunkt $20'000\text{m}^3/\text{h}$ und 450Pa :

- Mechanische Leistung an der Welle = $3,1\text{kW}$
- Drehzahl = 650 U/min
- Wirkungsgrad = 83%

Mit dem Frequenzumformer können beide Arbeitspunkte angefahren werden. Die Kraftübertragung Motor Ventilator erfolge mittels Flachriemenantrieb. Anstatt des EFF2 Motors von Variante wird ein gleich starker EFF1 Motor (Wirkungsgrad 90,5%) eingesetzt.

Für den Tagesbetrieb ergeben sich:

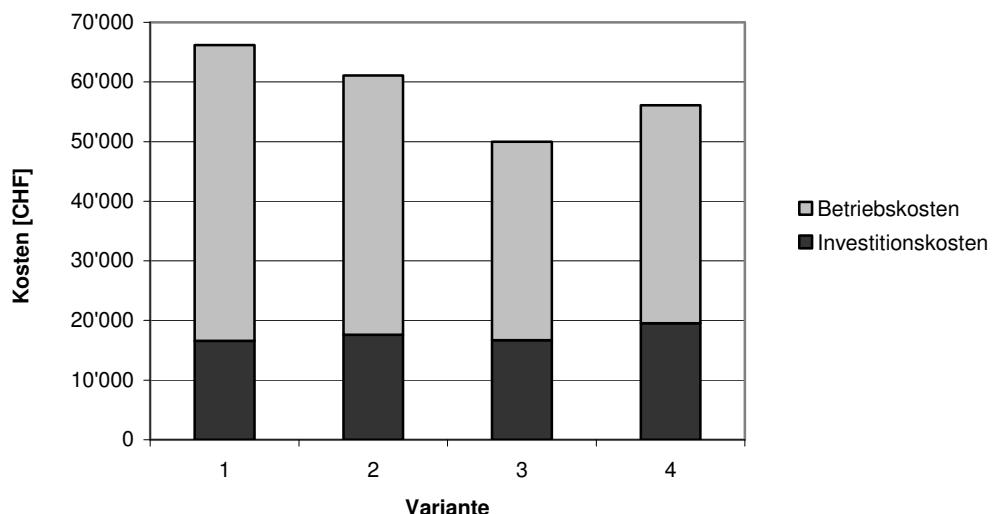
- Elektrischer Leistungsbezug des Motors = 12kW
- Elektrischer Leistungsbezug des Frequenzumrichters = $12,6\text{kW}$
- Verlustleistung total = $3,9\text{kW}$
- Wirkungsgrad total = 69%

Bei Nachtbetrieb:

- Elektrischer Leistungsbezug des Motors = $3,63\text{kW}$ (Motorwirkungsgrad Teillast = 88%)
- Elektrischer Leistungsbezug des Frequenzumrichters = $3,93\text{kW}$ (Aus Tabelle → Auslastung 30%)
- Verlustleistung total = $1,36\text{kW}$
- Wirkungsgrad total = 65%

Gegenüberstellung:

Variante 3 schneidet bezüglich Gesamtkosten am besten ab, erfüllt allerdings die Anforderungen des Nachtbetriebs nicht.



Die Bereitschaft bei den Investitionskosten nicht zu sparen, kann sich durchaus auszahlen. Generell sind bei hohen Betriebszeiten Flachriemen dem Keilriemen und EFF1 Motor dem EFF2 Motor vorzuziehen.