

DIS-Projekt Nr. 45 857 DIS-Vertrag Nr. 85 917	Programm Elektrizität	Im Auftrag des <b>Bundesamtes für Energie</b>
--	-----------------------	--

Schlussbericht **Dezember 2003**

# OPAL-Erweiterung mit Lüfter- und Pumpensystemen

ausgearbeitet durch

Ronald Tanner  
Semafor Informatik & Energie AG  
Sperrstrasse 104 B  
CH-4057 Basel

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm "Elektrizität" des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung: [www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ausgangslage</b>	<b>6</b>
1.1 Bedeutung	6
1.2 Projektpartner	6
1.3 Projektziele	6
1.4 Vorgehen	7
<b>2 Durchgeführte Messungen und Auswertungen</b>	<b>8</b>
2.1 Wasserversorgung Frenkendorf	8
2.2 Umwälzpumpen Altersheim Weiherweg	9
2.3 Ventilatoren Tierräume	11
2.4 Druckerhöhungspumpe für Fabrikwasser	12
<b>3 Bewertung und Ausblick</b>	<b>14</b>
<b>A Test-Design-Spezifikation: Modultest Simulation OPAL V3.0</b>	<b>16</b>
A.1 Referenzen	16
A.2 Zu testende Merkmale und Funktionen (Features to be Tested)	16
A.3 Struktur und Ablauf (Approach Refinements)	16
A.4 Test-Identifikation (Test Identification)	17
A.4.1 Pumpendaten	17
A.4.2 Ventilatordaten	17
A.5 Eingabe-Spezifikation (Input Specifications)	18
A.5.1 Netzbetrieb	18
A.5.2 Umrichterbetrieb	18
<b>B Test-Report</b>	<b>19</b>
B.1 Pumpe 16-50	19
B.2 Pumpe 16-80	20
B.3 Pumpe 65-200/213	21

B.4	Pumpe 125-10	22
B.5	Pumpe 8-80	23
B.6	Pumpe 16-80	24
B.7	Pumpe 65-200/213	25
B.8	Pumpe 125-10	26
B.9	Ventilator RZR10-710	27
B.10	Ventilator ER63F..DN	28
B.11	Ventilator ER45F..KK	29
<b>C</b>	<b>Benutzerhandbuch</b>	<b>30</b>
C.1	Übersicht	30
C.1.1	Turbomaschinen	31
C.1.2	Asynchronmaschinen	34
C.2	Bestimmung der Energieeffizienz	38
C.2.1	Erfassung der Anlage	40
C.2.2	Evaluation der Massnahmen	44
C.3	Berechnungsmodelle	48
C.3.1	Turbomaschine	48
C.3.2	Asynchronmaschine	51

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde die bestehende Software OPAL zur energieoptimalen Auslegung von elektrischen Antrieben mit einem Pumpen- und Lüftermodul erweitert. Mit dieser neuen Version 3 ist es jetzt möglich die Energieeffizienz solcher Anlagen sowie die Wirtschaftlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen schnell und einfach zu beurteilen und zu vergleichen. Anhand von praktischen Beispielen aus der Wasserversorgung und der Gebäudetechnik (Umwälzpumpen, Lüftung und Druckerhöhung) wird die geforderte Funktionalität festgelegt und der Nutzen aufgezeigt.

Ab April 2004 kann die Software kostenfrei von unserer Web-Seite [www.semafor.ch](http://www.semafor.ch) heruntergeladen werden.

## Resumé

Dans le cadre de ce projet le logiciel OPAL existant, qui comprend le calcul de l'optimisation de l'énergie pour des entraînements électriques, a été prolongé par un module concernant l'application de pompe et de ventilateur. Avec cette nouvelle version 3, il est possible de juger la quantité de l'efficacité énergétique de ces systèmes. En outre la rentabilité de différentes mesures d'amélioration peut être évaluée d'une manière simple et rapide. Par la détermination du fonctionnement exigé par des exemples réels dans les domaines de l'approvisionnement en eau et de la technique de bâtiment (pompes de circulation d'eau, aération et augmentation de pression), le bénéfice et la fiabilité peuvent être démontrés.

Le logiciel peut être téléchargé gratuitement de notre site Web [www.semafor.ch](http://www.semafor.ch)

## Abstract

The existing software tool OPAL that supports the energy-efficient dimensioning of electrical drive systems has been extended by modules for pump and fan applications. With the new version 3 energy efficiency of such systems as well as the economic feasibility of many types of improvement actions can now be evaluated fast and accurate. The software has been designed and optimized by means of real world examples that can be found often within water supply and facility management such as heating pumps, air ventilation and pressure boosting. The practicability and benefit of the tool is demonstrated on these examples.

The software can be downloaded free of charge from our web site [www.semafor.ch](http://www.semafor.ch).

# 1 Ausgangslage

## 1.1 Bedeutung

Die knapp gewordenen Personal- und Know-How-Ressourcen in vielen Betrieben verhindern die Nutzung des oftmals erheblichen Einsparpotentials bei elektrischen Antrieben. Hinzu kommt der oftmals nicht unerhebliche Aufwand zur Beurteilung der Energieeffizienz einer Anlage und der anschliessenden Evaluation energiesparender Massnahmen. Mit diesem Projekt will Semafor einen wesentlichen Beitrag zur Senkung dieses Aufwandes leisten.

## 1.2 Projektpartner

- Semafor Informatik & Energie AG: R. Tanner, G. Amsler, H. Riesen
- Ryser Ingenieure AG: S. Kempf, B. Kobel
- Ayron Energy: S. Kenel
- Energieberatung IWB: R. Ruch

Die beteiligten Partner haben aktiv mitgeholfen geeignete Messobjekte zu vermitteln und das Projekt stets mit Rat und Tat unterstützt, wofür wir uns herzlich bedanken.

Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei Herrn Martin Herrmann (Herrmann & Partner) für die hilfreichen Hinweise und Kommentare zu den vorgeschlagenen Sanierungsmassnahmen.

## 1.3 Projektziele

Auf Basis des bestehenden Motorauswahl-Pakets OPAL soll in Zusammenarbeit mit Industrie- und Dienstleistungspartnern ein Softwarewerkzeug zur einfachen und zuverlässigen Identifikation des Energiesparpotentials von Pumpen- und Lüftersystemen entwickelt werden. Insbesondere sollen damit auch die MotorChallenge-Abläufe effizient unterstützt werden. Dies betrifft die Bestandesaufnahme der vorhandenen Antriebssysteme, die Evaluation und Bewertung energiesparender Massnahmen sowie die Erstellung von Aktionsplänen.

## 1.4 Vorgehen

Zur Umsetzung der oben erwähnten Ziele wurde wie folgt vorgegangen:

- Erstellung der Systemspezifikationen: Basierend auf den in den MotorChallenge-Dokumenten Modul Antriebe und Modul Pumpen (siehe: <http://www.motorchallenge.ch>) beschriebenen Abläufen sollen die SW-Anforderungen und die Systemarchitektur festgelegt werden
- Entwurf und Implementation eines Messverfahrens zur einfachen und raschen Identifizierung der notwendigen Parameter: Nach Möglichkeit soll ein zweistufiges Verfahren beschrieben werden. Für eine erste Analyse soll mit möglichst geringem Aufwand ein eventuell vorhandenes Potential abgeschätzt, und je nach erhaltenem Ergebnis in einem zweiten Schritt dieses dann detaillierter und genauer abgeklärt werden können.
- Durchführung von Messungen an verschiedenen Antrieben bei Industriepartnern: Die Ergebnisse sollen einerseits der Validierung der Berechnungs-Modelle dienen, andererseits aber auch eine Basis zur weiteren Verfeinerung des Messverfahrens liefern.
- Implementation der Berechnungsmodelle zur Energieoptimierung und zur Ermittlung der Amortisationskosten der gewählten Systeme
- Anpassung und Integration der erstellten Berechnungsmodule an das vorhandene Softwarepaket OPAL
- Erstellung der Bedienungsanleitung mit Berechnungsbeispielen

## 2 Durchgeführte Messungen und Auswertungen

### 2.1 Wasserversorgung Frenkendorf

An unten aufgelisteten Pumpen der Wasserversorgung Frenkendorf wurden von R. Tanner und S. Kempf am 5. Februar 2003 Kennlinienmessungen <sup>1</sup> durchgeführt.

Pumpe	Leistung [kW]	Förder strom [ m3/h ]	Förder höhe [m]	Messung				
				Förder- strom [m3/h]	Förder- höhe [m]	elektr. Leistung [kW]	Wirkungsgrad ist [%]	Wirkungsgrad soll [%]
Pumpwerk Buholz								
1	7.5	41.8	35	42.9	34.7	8.7	46.6	59.3
2	7.5	41.8	35	40.7	34.7	8.8	43.7	59.3
3	7.5	41.8	35	46.0	34.7	8.2	51.8	59.3
Pumpwerk Wanne								
1	26.5	52.6	120	51.6	113.1	28.3	56.2	64.4
2	30	50.1	130	57.8	111.1	30.3	57.8	62.8
Pumpwerk Adler								
1	5.6	16.2	60	15.0	72.1	6.2	47.5	47.2
2	11.2	34.2	60	31.9	71.5	9.5	65.5	59.1

Zu dem sich aus dem Verhältnis der hydraulischen und elektrischen Leistung ergebendem Wirkungsgrad berechnet OPAL einen Richt- respektive Sollwert (in obiger Tabelle grau hinterlegt), der aus dem Motor- und Pumpenwirkungsgrad gebildet wird:

$$\eta_G = \eta_P \cdot \eta_M \quad (1)$$

Für den Motorwirkungsgrad  $\eta_M$  wurde der minimale Wert der Wirkungsgradklasse EFF1 eingesetzt.

Der Pumpenwirkungsgrad wurde anhand des vom ANSI/HI-Standards 1.3-2000 angegebenen "optimalen, allgemein erreichbaren Wirkungsgrades" (optimum generally attainable efficiency) für einströmige Spiralgehäusepumpen (end-suction ANSI pumps) berechnet. Dies ermöglicht es, auf die aufwändige Erfassung und Verwaltung von Pumpendaten zu verzichten.

Bei bekannter Anzahl der Betriebsstunden  $t$  ergibt sich aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert des Wirkungsgrades und der hydraulischen Leistung  $P_{hydr}$  das Energieein-

<sup>1</sup> Alle Förderhöhen sind aus der Druckdifferenz zw. Saug- und Druckstutzen berechnet.



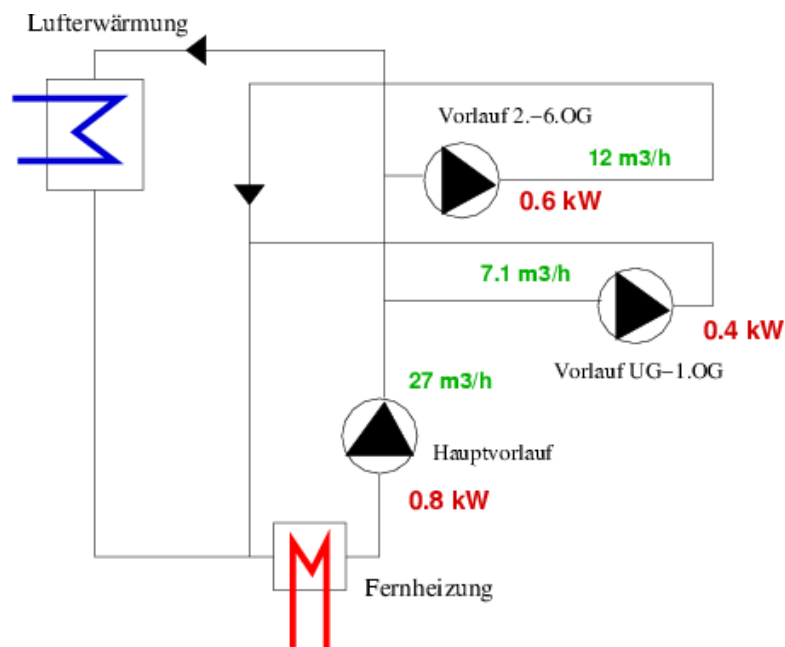
sparpotential:

$$\Delta E = t \cdot (\eta_{ist} - \eta_{soll}) \cdot P_{hydr} \quad (2)$$

## 2.2 Umwälzpumpen Altersheim Weiherweg

Motor	Betrieb [h/Jahr]	Typenschild				Messung			
		[kW]	[1/min]	[A]	[V]	[kW]	[A]	[V]	[Hz]
Hauptvorlauf	8760	0.95	1400.	1.8	380.	0.8	2.	388.	50.
Vorlauf 2-6.OG	5160	0.95	1400.	1.8	380.	0.6	1.6	392.	50.
Vorlauf UG-1.OG	5160	0.4	1350.	1.5	380.	0.4	1.1	388.	50.

Pumpe	Typenschild					Messung			
	[kW]	[1/min]	[%]	[m3/h]	[m]	[m3/h]	[m]	[kW]	[%]
Hauptvorlauf	0.95	1400.0	60.	27.0	3.2	27.0	3.2	0.23	30
Vorlauf 2-6.OG	0.95	1400.0	50.	12.0	6.0	11.0	6.5	0.2	33
Vorlauf UG-1.OG	0.4	1350.0	50.	7.1	4.5	7.1	4.5	0.09	22



Der Gesamtwirkungsgrad ist bei allen Pumpen gering und wie die meisten Umwälzpumpen bei Heizungsanlagen scheinen auch diese deutlich überdimensioniert zu sein. Der er-

forderliche Förderstrom berechnet sich aus der Gleichung:

$$Q = \frac{P_{\text{heiz}}}{\Delta T \cdot c_w \cdot \rho} \quad (3)$$

Mit der Heizleistung  $P_{\text{heiz}}$ , der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Vor- und Rücklauf sowie der spezifischen Wärme  $c_w$ . Abhängig von der Temperaturdifferenz ergeben sich für die Pumpen die folgenden Heizleistungen:

Pumpe	Förderstrom [m3/h]	Temperaturdifferenz (Grad Kelvin)		
		10°	15°	20°
Hauptvorlauf	27	313.3 kW	469.8 kW	626.4 kW
Vorlauf 2-6.OG	12	139.2 kW	208.8 kW	278.4 kW
Vorlauf UG-1.OG	7.1	82.4 kW	123.5 kW	164.7 kW

Darüberhinaus ist vermutlich auch die Förderhöhe zu hoch. Übliche Werte liegen bei Heizungsanlagen zwischen 1.5 - 2m.

Verschiedene Hersteller bieten heute Umwälzpumpen mit deutlich verbessertem Wirkungsgrad, sogenannte Hocheffizienz- oder Minenergie-Pumpen, an. Bei unveränderten Förderverhältnissen wären mit solchen Pumpen die folgenden mit OPAL berechneten Einsparungen zu realisieren:

	Leistung [kW]	Energie MWh/a	Einsparungen		Investition kCHF
Hauptvorlauf:	0.5	4,4	<b>2,6</b>	520.–	<b>4,0 - 5,0</b>
Vorlauf 2.-6. OG	0.3	1,3	<b>1,8</b>	360.–	<b>3,0 – 4,0</b>
Vorlauf UG -1. OG	0.15	2,1	<b>1,2</b>	240.–	<b>2,5 - 3,1</b>
Total		7,8	5,6	1'120.–	9,5 - 12,1

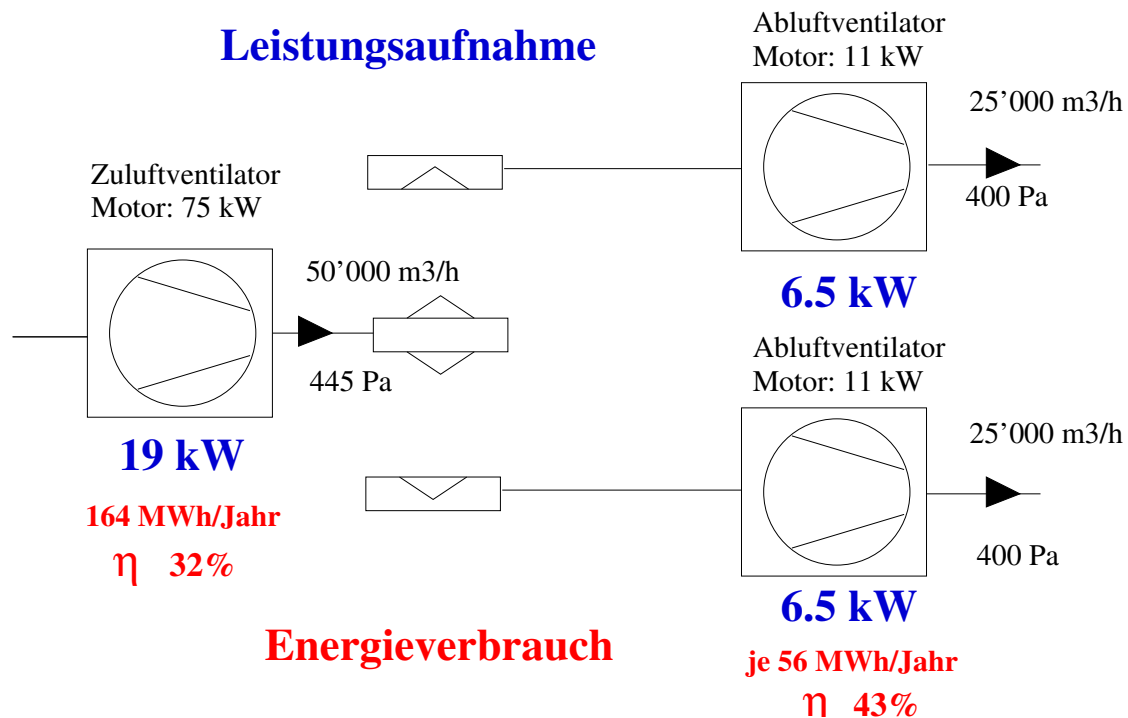
Die aufgeführten Investitionskosten basieren auf Lieferantenangaben und sind inklusive Einbaukosten.

Die daraus resultierende Amortisationsdauer ist eindeutig zu hoch. Akzeptable Werte könnten jedoch mit einer Halbierung des Förderstromes erreicht werden, da dies sowohl für eine Reduktion des Energieverbrauchs wie auch der Investitionskosten sorgt.

## 2.3 Ventilatoren Tierräume

Motor	Typenschild					Messung				
	[kW]	[1/min]	[cos]	[A]	[V]	[kW]	[A]	[V]	[cos]	[Hz]
QU 280 S4	75.	1475.	0.88	114.	500.	19.	47.	520.	0.45	50.
160 M R4a	11.	1450.	0.88	18.	500.	6.5	11.	508.	0.67	50.

Ventilator	Typenschild					Messung			
	[kW]	[1/min]	[%]	[m3/h]	[Pa]	[m3/h]	[Pa]	[kW]	
NVS 110-88	10.3	300.0	70.	64'800.	400.	50'000	445	6.2	
NVS 95-76	5.3	355.0	68.	32'140	400.	25'000	400	2.8	



Der Zuluft- und die beiden Abluftventilatoren sind ganzjährig 24h pro Tag in Betrieb. Die Luftmenge wird in den Räumen jeweils über Drosselklappen geregelt. Beim Zuluftventilator wurde 1999 durch einfaches Auswechseln der Poulies die Drehzahl von 560 auf 330 1/min reduziert, womit eine deutliche Reduktion des Energieverbrauches erzielt werden konnte. Diese zweifellos einfache Massnahme hat jedoch zur Folge, dass der Motor nun überdimensioniert ist, was sich auch in einem schlechten Leistungsfaktor von 0.45 äussert.

Für den Zuluftventilator wurden mit OPAL die folgenden Massnahmen untersucht und

verglichen:

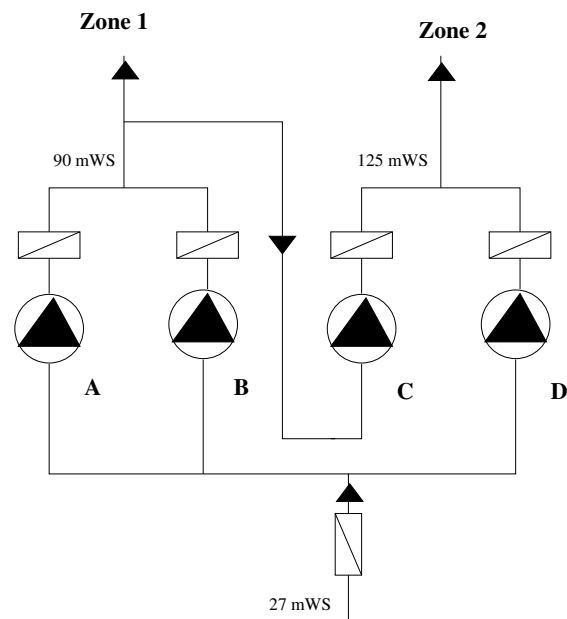
Massnahme	Einsparungen (mit OPAL berechnet)		Investition
	MWh/a	CHF/a	CHF
Ersatz des Motors (EFF1, 11 kW):	<b>12.7</b>	<b>1'200.–</b>	<b>1'500.–</b>
Ersatz des Ventilators u. Motors (Gebhardt):	<b>88</b>	<b>8'800.–</b>	<b>19'000.–</b>
Regelung der Luftmenge (Frequenzumrichter):	<b>16.8</b>	<b>1'680.–</b>	<b>3'600.–</b>

Die aufgelisteten Investitionskosten betreffen nur die Beschaffungskosten der Komponenten. Für die Montage des Ventilators rechnet der Betreiber mit ca. 20 kCHF zusätzlichen Kosten.

## 2.4 Druckerhöhungspumpe für Fabrikwasser

Motor	Typenschild					Messung				
	[kW]	[1/min]	[cos]	[A]	[V]	[kW]	[A]	[V]	[cos]	[Hz]
SR6E20	14.2	2940.	0.9	17.5	500.	8.8	11.8	518.	0.83	50.

Pumpe	Typenschild					Messung		
	[kW]	[1/min]	[%]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[kW]
NCP 6-200	6.75	2900.0	61.6	30.5	52.0	5.2	52	0.7



Bei dieser Anlage mit 4 identischen Pumpen fällt die etwas eigentümliche Verrohrung auf. Um ein höheres Druckniveau zu erzeugen ist die Pumpe C in Serie zu den beiden Pumpen A und B geschaltet. Das Druckniveau wird aber nur solange gehalten, wie die Pumpe C in Betrieb ist. Bei einer Umschaltung auf die Pumpe B sinkt der Druck wieder.

Pro Zone ist jeweils nur eine Pumpe im Einsatz, wobei nur bei Pumpe C der Durchfluss gemessen werden konnte. Ihr Energieverbrauch beträgt 75.4 MWh/Jahr.

Jede Pumpe hat eine Typenfördermenge von 30.5 m<sup>3</sup>/h bei 50m Förderhöhe, was eine hydraulische Leistung von 4.16 kW ergibt. Mit der angegebenen Typenleistung von 9 PS (6.75 kW) ergibt sich ein Wirkungsgrad von 61.6%. Die gemessene Fördermenge liegt zwischen 3 und 6,5 m<sup>3</sup>/h bei einem elektrischem Leistungsbezug von ca. 8 kW, woraus mit einem angenommenen Motorwirkungsgrad von 79% auf einen Pumpenwirkungsgrad von ca. 38% geschlossen werden kann. Dies bedeutet, dass sich der Wirkungsgrad im Laufe der Betriebsdauer von mehr als 30 Jahren um 23 Prozentpunkte verschlechtert hat. Es empfiehlt sich demnach, diese Pumpe zu ersetzen.

Für die Pumpen C und D wurden mit OPAL die folgenden Massnahmen untersucht:

Massnahme	Einsparungen [CHF/a]	Investition [CHF]	Payback
1. Frequenzumrichter bei bestehender Anlage	334.–	3'500.–	10,47
2. Ersatz des Motors, Netzbetrieb	710.–	1'500.–	2.11
3. Ersatz von Pumpe und Motor, Netzbetrieb	3'590.–	9'000.–	2.51
4. Ersatz von Pumpe und Motor, drehzahlvariabler Betrieb	4'554.–	12'000.–	2.64
5. Mehrpumpenanlage	4'800.–	18'000.–	3.75

Bei den angegebenen Investitionskosten handelt es sich um die Beschaffungskosten der Komponenten. Die Installationskosten, die sich laut Betreiber bei einem Ersatz der Pumpen auf ca. 24 kCHF belaufen würden, in dieser Aufstellung nicht enthalten. Dies führt dann auch zu wirtschaftlich kaum mehr begründbaren Amortisationszeiten.

Interessant ist hier die Feststellung, dass ein Frequenzumrichter alleine nicht unbedingt eine signifikante Einsparung bringt. Dies liegt daran, dass die Pumpe eine flache Kennlinie aufweist. Die durch Drehzahlreduktion erzielbare Energieeinsparung ist umso grösser je steiler die Pumpenkennlinie ist.

### 3 Bewertung und Ausblick

Das Projekt ermöglichte es uns äusserst wertvolle Hinweise zur Festlegung und Ausgestaltung des Funktionsumfanges von OPAL speziell für Pumpen und Ventilatoranlagen zu sammeln. Dies war eine wichtige Voraussetzung um OPAL noch weiter zu verbessern und damit ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, mit dem die Energieeffizienz von Pumpen- und Ventilatoranlagen einfach und schnell beurteilt werden kann. Für Linux-Systeme kann die Software ab Januar 04 kostenfrei von unserer Web-Seite [www.semafor.ch](http://www.semafor.ch) heruntergeladen werden. Und ab Februar 04 wird auch eine Windows-Version verfügbar sein.

Im kommenden Jahr wird Semafor im Rahmen des EU-SAVE-Projektes "ProMot" die Hauptmodule von OPAL in die EuroDEEM-Software integrieren und anschliessend noch Module für Kompressor- und Kühlsysteme implementieren. Mit Unterstützung der EU-Projektpartner soll das Werkzeug dann EU-weit lanciert und einem breiten Benutzerkreis bekannt gemacht werden.

## Anhänge

- A Test-Design-Spezifikation: Modultest Simulation OPAL V3.0
- B Test-Report
- C Benutzerhandbuch

## A Test-Design-Spezifikation: Modultest Simulation OPAL V3.0

### A.1 Referenzen

1. Grundfos-Webseite: [www.grundfos.com](http://www.grundfos.com)
2. Gebhardt-Webseite: [www.gebhardt.de](http://www.gebhardt.de)
3. Ziehl-Abegg-Webseite: [www.ziehl-abegg.de](http://www.ziehl-abegg.de)

### A.2 Zu testende Merkmale und Funktionen (Features to be Tested)

Die vom Simulationsmodul OPAL V3.0 bei vorgegebenem Volumenstrom und Förderhöhe resp. Druckerhöhung errechneten Werte der Leistungen sollen mit denjenigen der Berechnungsprogramme von Grundfos (WinCAPS Version 7 [1]) für Pumpen, Gebhardt (ProSelecta++ Version 1.9.4f [2]) und Ziehl-Abegg (ZRV32 Version 3.1. [3]) für Ventilatoren verglichen werden.

### A.3 Struktur und Ablauf (Approach Refinements)

Um diesen Modultest durchzuführen, muss wie folgt vorgegangen werden:

1. Für jeden Testfall müssen die entsprechenden Sollwerte von den Programmen WinCAPS, ProSelecta++ resp. ZRV32 berechnet werden und anschliessend in die beiden Perl-Skriptdateien:

- pumptests.pl
- fantests.pl

übertragen werden.

2. Man wechselt in das Test-Verzeichnis und gibt auf der Kommandozeile die folgende Anweisung ein:

```
% make check
```

Dadurch wird für jeden in den Skripten eingetragenen Testfall die Berechnung mit dem aktuellen OPAL-Modul durchgeführt und anschliessend die Soll- und Ist-Werte verglichen. Die Ergebnisse werden im Dokument testreport.ps abgelegt.



## A.4 Test-Identifikation (Test Identification)

Der Vergleich basiert auf den folgenden Pumpen- und Ventilatoraten:

### A.4.1 Pumpendaten

Pumpe	Motor- leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Wirkungs- grad [%]	Förder- strom [m3/h]	Förder- höhe [m]	Max. Förder- höhe [m]
65-200/213	30.0	2968	76.1	122	57.5	64.7
125-10	30.0	2955	74.1	133.0	53.6	69.0
16-80	7.5	2900	66.8	15.6	94.8	115.0
16-50	5.5	2900	66.3	16.0	58.1	72.0
8-80	3.0	2900	66.3	9.5	66.6	87.0

### A.4.2 Ventilatoraten

Ventilator	Motor- leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Wirkungs- grad [%]	Druck- erhöhung [Pa]	Volumen- strom [m3/h]	Max. Druck- erhöhung [Pa]
ER63F..DN	5.5	2294	69.1	1533	19440	2338
ER45F..KK	1.1	1911	65.8	577	5672	835
RZR10-710	11	1196	82.0	1149	28140	1235

## A.5 Eingabe-Spezifikation (Input Specifications)

### A.5.1 Netzbetrieb

Pumpe	H [m]	Förderstrom [m3/h]						Elektrische Leistung [kW]				
1 16-50	53	18.0	13.5	9.9	6.3	2.2		5.27	4.74	4.17	3.47	2.68
2 16-80	82	18.0	13.5	9.9	6.3	2.2		7.95	7.16	6.29	5.24	4.05
3 65-200/213	53	144.0	108.0	79.2	50.4	17.3		31.12	27.37	23.64	19.68	15.43
4 125-10	53	144.0	108.0	79.2	50.4	17.3		30.71	27.31	24.51	21.93	16.3

### A.5.2 Umrichterbetrieb

Pumpe	H [m]	Förderstrom [m3/h]						Elektrische Leistung [kW]				
5 8-80	53	18.0	13.5	9.9	6.3	2.2		4.7	3.63	2.6	1.72	0.68
6 16-80	82	18.0	13.5	9.9	6.3	2.2		7.21	5.49	4.36	3.41	2.46
7 65-200/213	53	144.0	108.0	79.2	50.4	17.3		32.15	25.08	20.39	16.41	12.73
8 125-10	53	144.0	108.0	79.2	50.4	17.3		31.40	25.05	20.29	17.64	14.89

Ventilator	Druckerhöhung	Volumenstrom	Drehzahl	Mech. Leistung
Ventilator	[Pa]	[m3/h]	[1/min]	[kW]
9 RZR10-710	1071	25000	1124	8.78
10 ER63F..DN	500	20000	1834	5.21
11 ER45F..DN	500	5000	1707	1.04

## B Test-Report

Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse liegen bei allen getesteten Pumpen und Ventilatoren innerhalb der tolerierbaren Grenzen ( $< \pm 10\%$  innerhalb des Betriebsbereiches 30 - 100%).

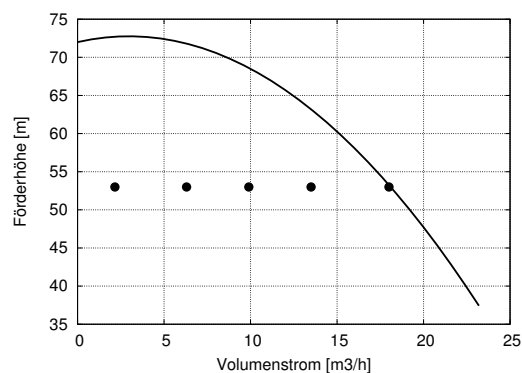
### B.1 Pumpe 16-50

Nennwerte					
Motorleistung	5.5	[kW]	Förderstrom	16.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	2900	[1/min]	Förderhöhe	58.1	[m]
Wirkungsgrad	66.3	[%]	Max. Förderhöhe	72.0	[m]

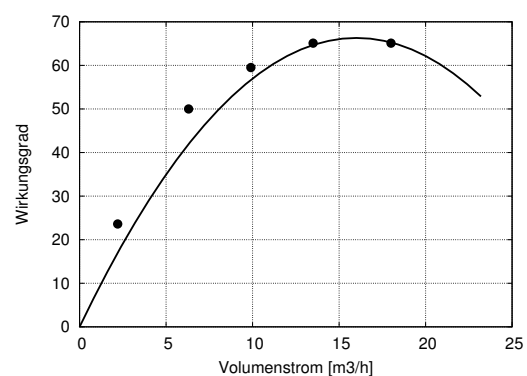
Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
18.0	53.0	2.60	4.00	4.80	5.27	54	8.9
13.5	53.0	1.95	3.60	4.35	4.74	45	8.4
9.9	53.0	1.43	3.27	3.98	4.17	36	4.4
6.3	53.0	0.91	2.94	3.62	3.47	25	-4.4
2.2	53.0	0.31	2.56	3.21	2.68	10	-19.8

<sup>a</sup>mit OPAL

#### Förderhöhe



#### Wirkungsgrad



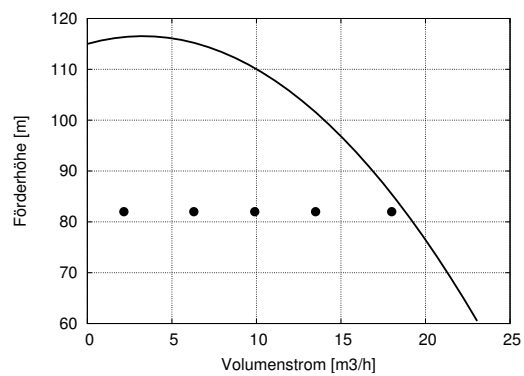
## B.2 Pumpe 16-80

Nennwerte			
Motorleistung	7.5 [kW]	Förderstrom	15.9 [m3/h]
Drehzahl	2881 [1/min]	Förderhöhe	93.7 [m]
Wirkungsgrad	66.8 [%]	Max. Förderhöhe	115.0 [m]

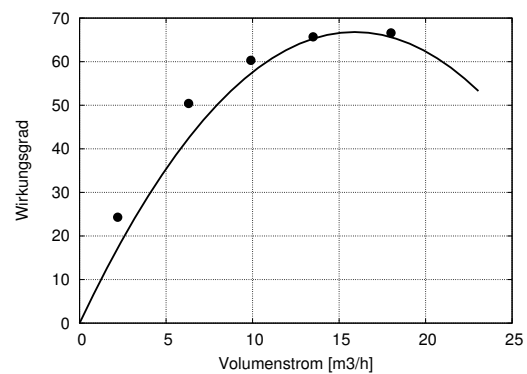
Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
[m3/h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
18.0	82.0	4.02	6.39	7.73	7.95	52	2.8
13.5	82.0	3.02	5.73	6.97	7.16	43	2.7
9.9	82.0	2.21	5.19	6.36	6.29	35	-1.1
6.3	82.0	1.41	4.66	5.76	5.24	24	-9.8
2.2	82.0	0.48	4.05	5.07	4.05	10	-25.2

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad



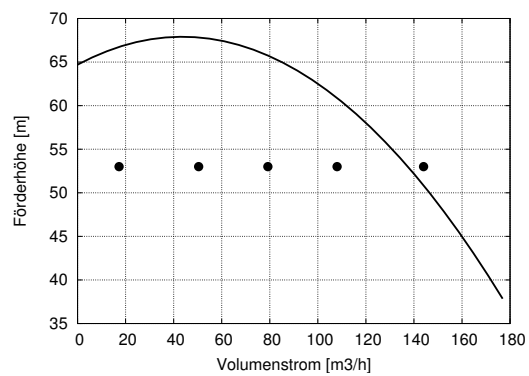
### B.3 Pumpe 65-200/213

Nennwerte			
Motorleistung	30.0 [kW]	Förderstrom	122.0 [m3/h]
Drehzahl	2968 [1/min]	Förderhöhe	57.5 [m]
Wirkungsgrad	76.1 [%]	Max. Förderhöhe	64.7 [m]

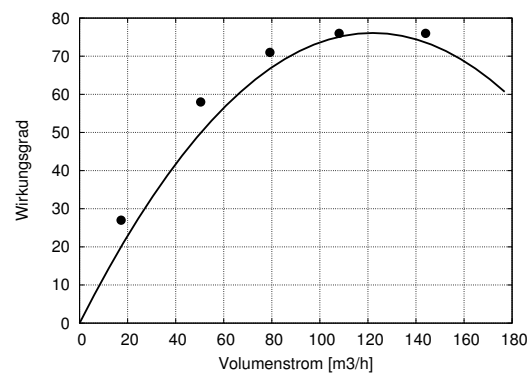
Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
[m3/h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
144.0	53.0	20.81	27.11	29.90	31.12	70	3.9
108.0	53.0	15.61	23.87	26.40	27.37	59	3.6
79.2	53.0	11.44	21.28	23.61	23.64	48	0.1
50.4	53.0	7.28	18.68	20.84	19.68	35	-5.9
17.3	53.0	2.50	15.70	17.67	15.43	14	-14.6

<sup>a</sup>mit OPAL

#### Förderhöhe



#### Wirkungsgrad



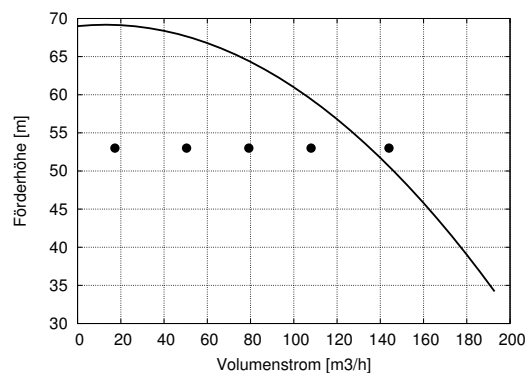
## B.4 Pumpe 125-10

Nennwerte					
Motorleistung	30.0	[kW]	Förderstrom	133.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	2955	[1/min]	Förderhöhe	53.6	[m]
Wirkungsgrad	74.1	[%]	Max. Förderhöhe	69.0	[m]

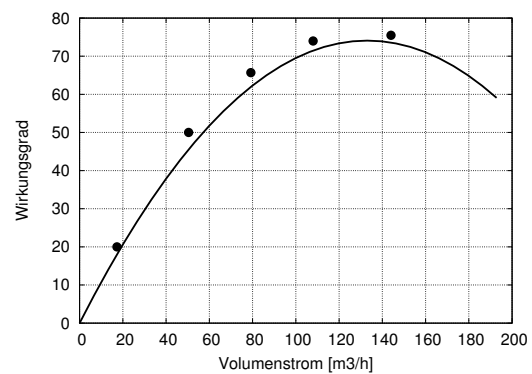
Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
144.0	53.0	20.81	27.00	29.91	30.71	70	2.6
108.0	53.0	15.61	24.47	27.16	27.31	57	0.5
79.2	53.0	11.44	22.45	24.97	24.51	46	-1.9
50.4	53.0	7.28	20.42	22.79	21.93	32	-3.9
17.3	53.0	2.50	18.10	20.30	16.30	12	-24.5

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad



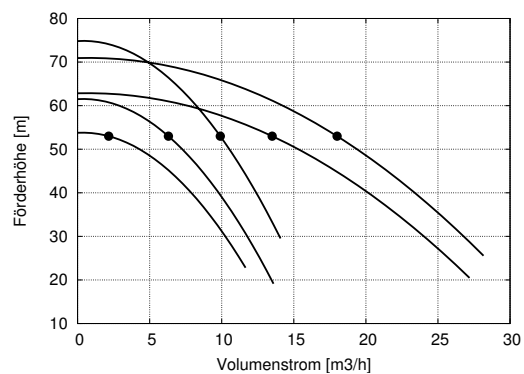
## B.5 Pumpe 8-80

Nennwerte					
Motorleistung	2.2	[kW]	Förderstrom	9.7	[m3/h]
Drehzahl	2861	[1/min]	Förderhöhe	66.5	[m]
Wirkungsgrad	72.0	[%]	Max. Förderhöhe	87.3	[m]

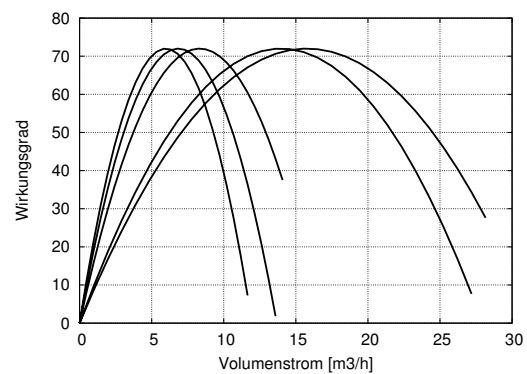
	N	Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
	[1/min]	[m3/h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
2	2578.6	18.0	53.0	2.60	3.69	5.11	4.70	51	-8.7
2	2427.2	13.5	53.0	1.95	2.71	3.83	3.63	51	-5.3
1	2648.6	9.9	53.0	1.43	2.06	2.85	2.60	50	-9.6
1	2401.4	6.3	53.0	0.91	1.27	1.80	1.72	50	-4.8
1	2245.4	2.2	53.0	0.31	0.73	1.12	0.68	28	-65.2

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad



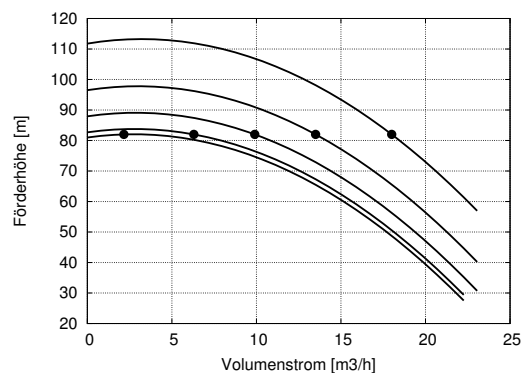
## B.6 Pumpe 16-80

Nennwerte					
Motorleistung	7.5	[kW]	Förderstrom	15.9	[m3/h]
Drehzahl	2881	[1/min]	Förderhöhe	93.7	[m]
Wirkungsgrad	66.8	[%]	Max. Förderhöhe	115.0	[m]

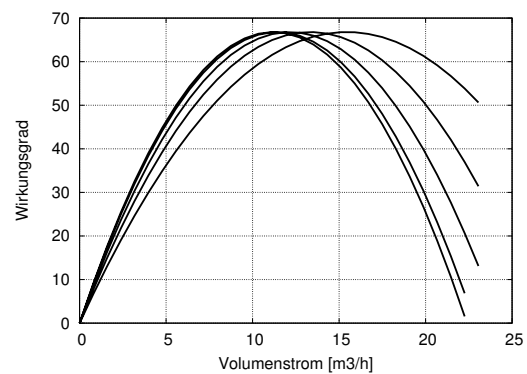
	N	Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
	[1/min]	[m3/h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
1	2840.1	18.0	82.0	4.02	6.19	7.91	7.21	51	-9.7
1	2639.2	13.5	82.0	3.02	4.52	5.86	5.49	52	-6.7
1	2519.1	9.9	82.0	2.21	3.43	4.54	4.36	49	-4.0
1	2442.8	6.3	82.0	1.41	2.64	3.59	3.41	39	-5.2
1	2417.4	2.2	82.0	0.48	2.07	2.92	2.46	17	-19.1

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad





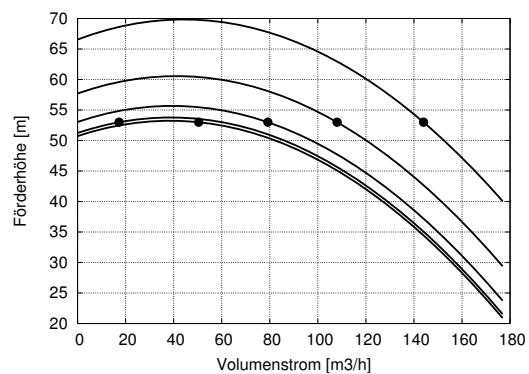
## B.7 Pumpe 65-200/213

Nennwerte					
Motorleistung	30.0	[kW]	Förderstrom	122.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	2968	[1/min]	Förderhöhe	57.5	[m]
Wirkungsgrad	76.1	[%]	Max. Förderhöhe	64.7	[m]

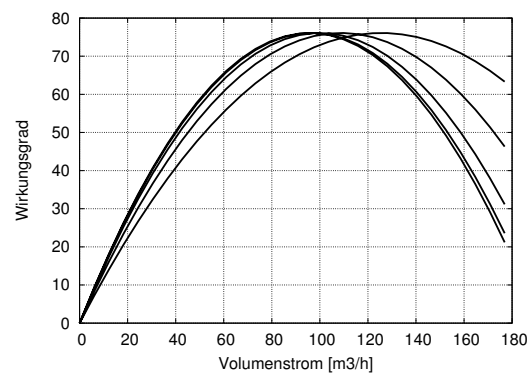
	N	Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
	[1/min]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
1	3009.7	144.0	53.0	20.81	27.95	33.18	32.15	63	-3.2
1	2802.5	108.0	53.0	15.61	20.51	24.43	25.08	64	2.6
1	2687.1	79.2	53.0	11.44	15.72	18.88	20.39	61	7.4
1	2627.7	50.4	53.0	7.28	12.33	14.98	16.41	49	8.7
1	2641.0	17.3	53.0	2.50	10.07	12.42	12.73	20	2.4

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad



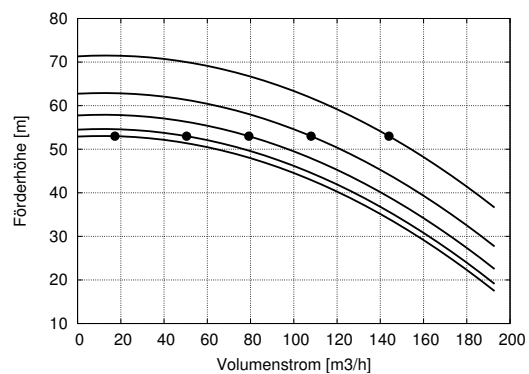
## B.8 Pumpe 125-10

Nennwerte					
Motorleistung	30.0	[kW]	Förderstrom	133.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	2955	[1/min]	Förderhöhe	53.6	[m]
Wirkungsgrad	74.1	[%]	Max. Förderhöhe	69.0	[m]

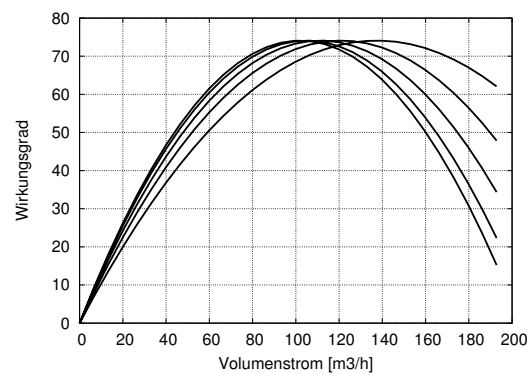
	N	Q	H	$P_{hydr}$	$P_{mech}$	$P_{el}$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$ (soll)	$\eta$	$\Delta$
	[1/min]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
1	3004.2	144.0	53.0	20.81	28.14	33.41	31.40	62	-6.4
1	2817.5	108.0	53.0	15.61	21.30	25.36	25.05	62	-1.2
1	2703.6	79.2	53.0	11.44	16.85	20.18	20.95	57	3.7
1	2626.1	50.4	53.0	7.28	13.47	16.29	17.64	45	7.7
1	2587.4	17.3	53.0	2.50	10.86	13.30	14.89	19	10.7

<sup>a</sup>mit OPAL

### Förderhöhe



### Wirkungsgrad



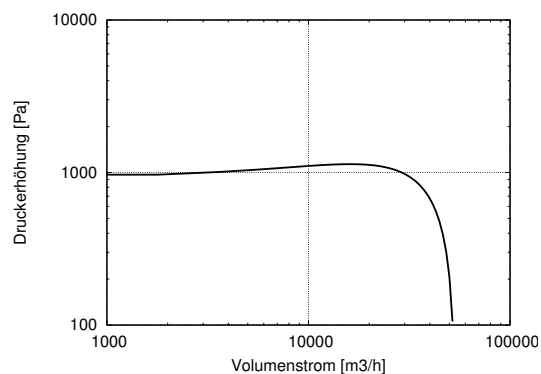
## B.9 Ventilator RZR10-710

Nennwerte					
Motorleistung	11.0	[kW]	Volumenstrom	28140.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	1196	[1/min]	Druckerhöhung	1149.0	[Pa]
Wirkungsgrad	82.0	[%]	Max. Druckerhöhung	1235.0	[Pa]
			Min. Volumenstrom	12546.0	[m <sup>3</sup> /h]

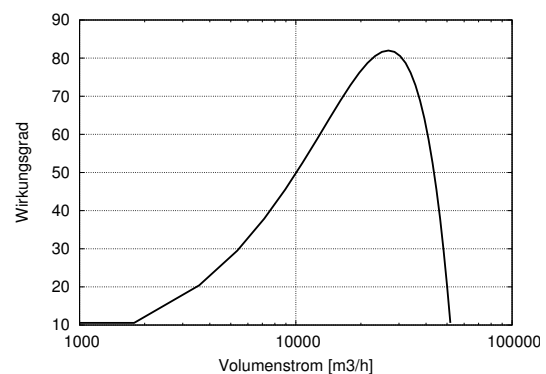
$V$	$p$	$n$ (soll)	$n$ (ber.)	$P_{fluid}$	$P_2$ (soll)	$P_2$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$	$\eta$	$\Delta$
[m <sup>3</sup> /h]	[Pa]	[1/min]	[1/min]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
25000	1071	1124	1139	7.44	8.78	9.11	10.26	72	-3.8

<sup>a</sup>mit OPAL

### Druckerhöhung



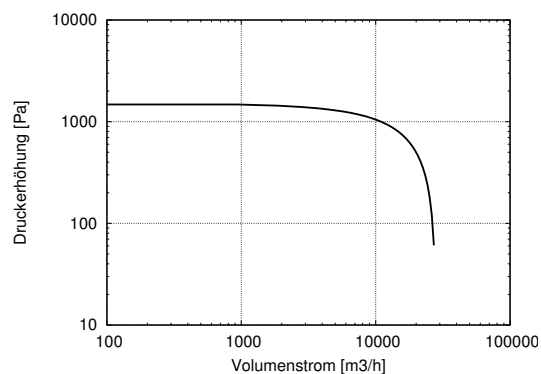
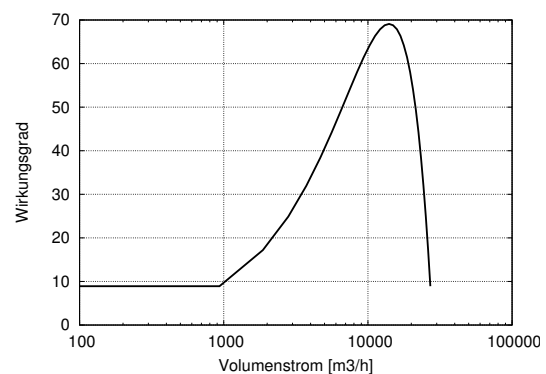
### Wirkungsgrad



**B.10 Ventilator ER63F..DN**

Nennwerte					
Motorleistung	5.5	[kW]	Volumenstrom	19608.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	2297	[1/min]	Druckerhöhung	1642.0	[Pa]
Wirkungsgrad	69.1	[%]	Max. Druckerhöhung	2824.0	[Pa]
			Min. Volumenstrom	2417.0	[m <sup>3</sup> /h]

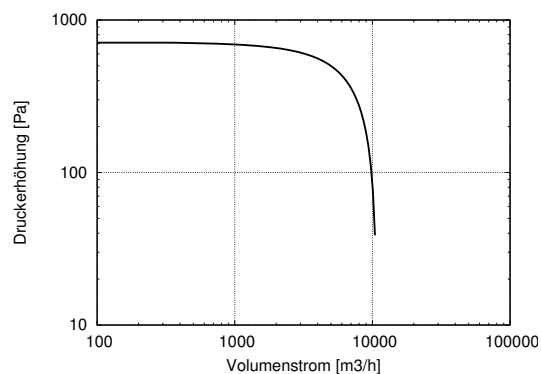
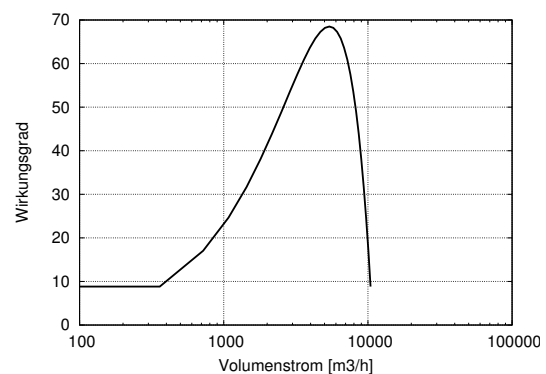
$V$	$p$	$n$ (soll)	$n$ (ber.)	$P_{fluid}$	$P_2$ (soll)	$P_2$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$	$\eta$	$\Delta$
[m <sup>3</sup> /h]	[Pa]	[1/min]	[1/min]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
20000.0	500.0	1825	1642	2.78	5.28	4.92	5.65	49	6.9

<sup>a</sup>mit OPAL**Druckerhöhung****Wirkungsgrad**

**B.11 Ventilator ER45F.KK**

Nennwerte					
Motorleistung	1.1	[kW]	Volumenstrom	9968.0	[m <sup>3</sup> /h]
Drehzahl	3197	[1/min]	Druckerhöhung	1618.0	[Pa]
Wirkungsgrad	68.5	[%]	Max. Druckerhöhung	2383.0	[Pa]
			Min. Volumenstrom	1439.0	[m <sup>3</sup> /h]

$V$	$p$	$n$ (soll)	$n$ (ber.)	$P_{fluid}$	$P_2$ (soll)	$P_2$ (ber.) <sup>a</sup>	$P_{el}$	$\eta$	$\Delta$
[m <sup>3</sup> /h]	[Pa]	[1/min]	[1/min]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
5000.0	500.0	1707	1731	0.69	1.04	1.02	1.30	53	2.0

<sup>a</sup>mit OPAL**Druckerhöhung****Wirkungsgrad**

## C Benutzerhandbuch

### C.1 Übersicht

Wir betrachten im Folgenden das in Abbildung 1 dargestellte System mit Pumpe oder Ventilator und elektrischem Antriebsmotor, die über eine Welle und allenfalls einem Getriebe oder Riemen mechanisch gekoppelt sind. Pumpen und Ventilatoren werden allgemein als Fluidmaschinen bezeichnet.

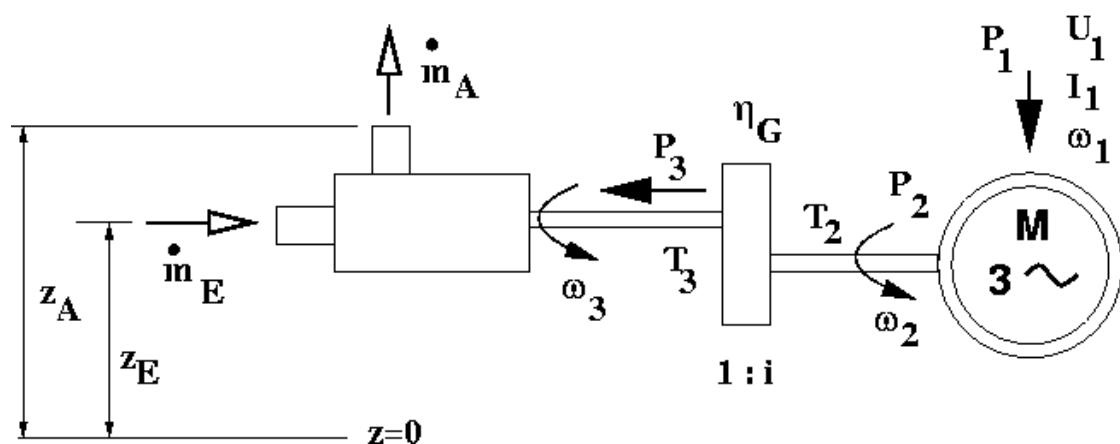


Abbildung 1: System mit Fluidmaschine und Antriebsmotor

Fluidmaschinen sind Energiewandler, die mechanische Energie in Fluidenergie wandeln, d.h. sie sorgen für die Änderung des Drucks, der kinetischen oder potentiellen Energie von Gasen oder Flüssigkeiten.

Fluidmaschinen können nach unterschiedlichen Kriterien kategorisiert werden. Basierend auf dem Energieübertragungsprinzip kann zum Beispiel zwischen Verdränger- und Turbomaschinen unterschieden werden:

**Verdrängermaschinen:** Volumenverdrängung

**Turbomaschinen:** Änderung des Drehimpulses

Im folgenden werden ausschliesslich die energetisch relevanteren Turbomaschinen betrachtet, also die Kreislumpen und die Axial-, resp. Radialventilatoren.

Das Fluid (Wasser, Luft etc.) strömt mit der Geschwindigkeit  $c_E$  und dem Massenstrom  $\dot{m}_E$  in die Eintrittsöffnung hinein und verlässt die Turbomaschine mit dem Massenstrom  $\dot{m}_A$  und der Geschwindigkeit  $c_A$  bei der Austrittsöffnung. Die beiden Öffnungen befinden sich auf der Höhe  $z_E$  resp.  $z_A$  gegenüber der Bezugshöhe  $z$ .

Die von der Welle übertragene Leistung  $P_3$  berechnet sich aus dem Motordrehmoment  $T_2$ , der Drehfrequenz  $\omega_2$  resp. der Drehzahl  $n_2$  und dem Getriebewirkungsgrad  $\eta_G$ :

$$P_3 = \omega_3 \cdot T_3 = 2\pi \cdot n_3 \cdot T_3 = -2\pi \cdot n_2 \cdot \frac{T_2}{\eta_G} \quad (4)$$

### C.1.1 Turbomaschinen

Unter der Annahme gleicher Massenströme bei Eintritt und Austritt: ergibt sich die Förderleistung: (Details siehe Abschnitt C.3.1)

$$P_{fluid} = \dot{m} \cdot g \cdot H = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (5)$$

mit der sogenannten Förderhöhe  $H$ , dem Förderstrom  $Q$ , und der spezifischen Dichte  $\rho$  des Mediums.

Bei Ventilatoren wird stattdessen die Druckerhöhung  $\Delta p$  verwendet:

$$P_{fluid} = Q \cdot \Delta p \quad (6)$$

Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis der nutzbaren Austrittsleistung zu der Eingangsleistung:

$$\eta = \frac{P_{fluid}}{P_3} = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H}{\omega_3 \cdot T_3} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\omega_3 \cdot T_3} \quad (7)$$

Zur Beurteilung der Wirkungsgrade existiert bei Pumpen und Ventilatoren kein allgemein anerkanntes Klassifikationsschema. Eine EU-Studiengruppe hat deshalb ein Verfahren ausgearbeitet, mit dem für bestimmte Pumpentypen anhand von Förderhöhe, Förderstrom und Drehzahl ein optimaler Wirkungsgrad bestimmt werden kann. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte:

1. Festlegung des Pumpentyps und der Förderhöhe  $H$  in  $m$ , der Förderstrom  $Q$  in  $m^3/h$  und der Drehzahl  $n$  in  $1/min$
2. Auswahl der Pumpe anhand der Katalogdaten oder auf der Basis von Herstellerofferten,
3. Bestimmung des Korrekturfaktors  $C'$  aus den Kennlinien oder mit Hilfe der Gleichung:

$$C' = 48 \cdot \left[ \log_{10} \left( 2650 \cdot \frac{H^{0.75}}{n \cdot Q^{0.5}} \right) \right]^2 \quad (8)$$

Diese Gleichung, ursprünglich von H. Anderson vorgeschlagen, wurde von der EU-Studiengruppe übernommen und leicht modifiziert.

4. Addition dieses Faktors mit dem Wirkungsgrad der Pumpe. Liegt die Summe 5 oder mehr Prozentpunkte unter der optimalen Kennlinie des entsprechenden Pumpentyps, sollte man sich um eine bessere Offerte bemühen.

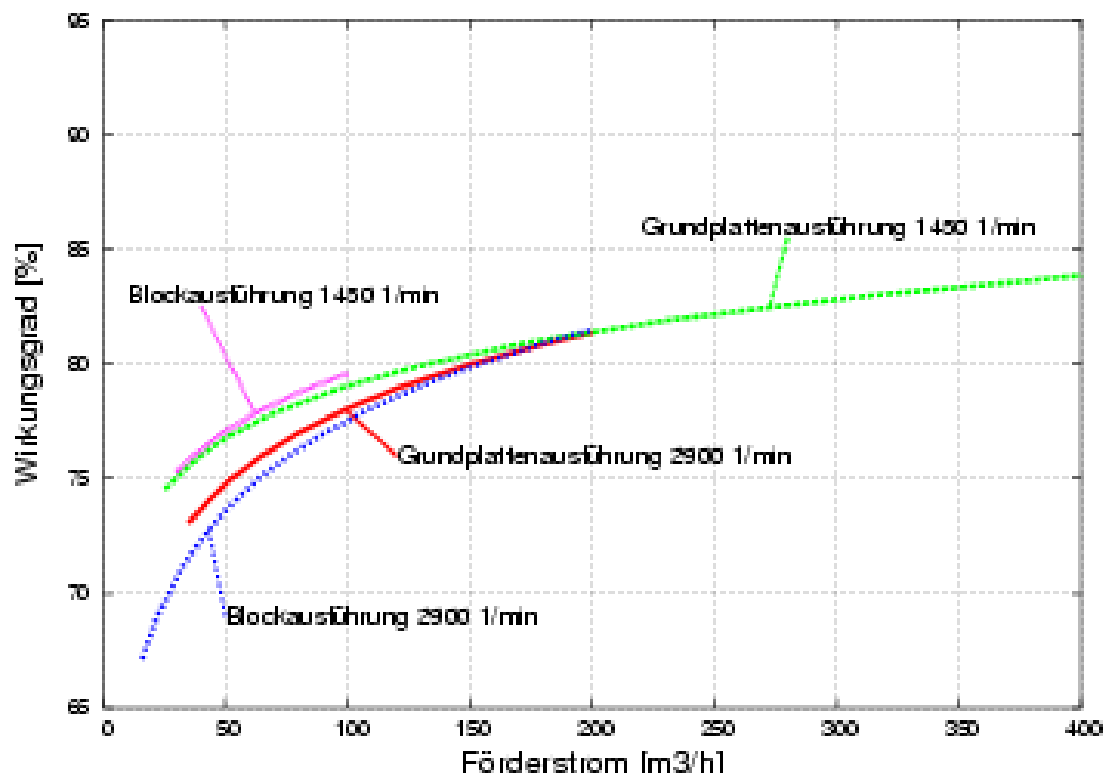


Abbildung 2: Erreichbarer Wirkungsgrad einstufiger, einströmiger Spiralgehäusepumpen

Mit Hilfe von Kennlinien die die Abhängigkeit der Förderhöhe  $H$  und des Wirkungsgrads  $\eta$  vom Förderstrom  $Q$  beschreiben, kann das Betriebsverhalten einer Pumpe genauer untersucht werden. In Abbildung 3 sind solche Kennlinien für die am weitesten verbreiteten Kreiselpumpen dargestellt. Man erkennt deutlich, dass sich der Wirkungsgrad bereits bei geringer Abweichung vom optimalen Betriebspunkt signifikant verschlechtert. Tatsächlich sind in der Praxis die meisten Pumpen überdimensioniert und werden demzufolge nicht bei ihrem optimalen Wirkungsgrad betrieben.



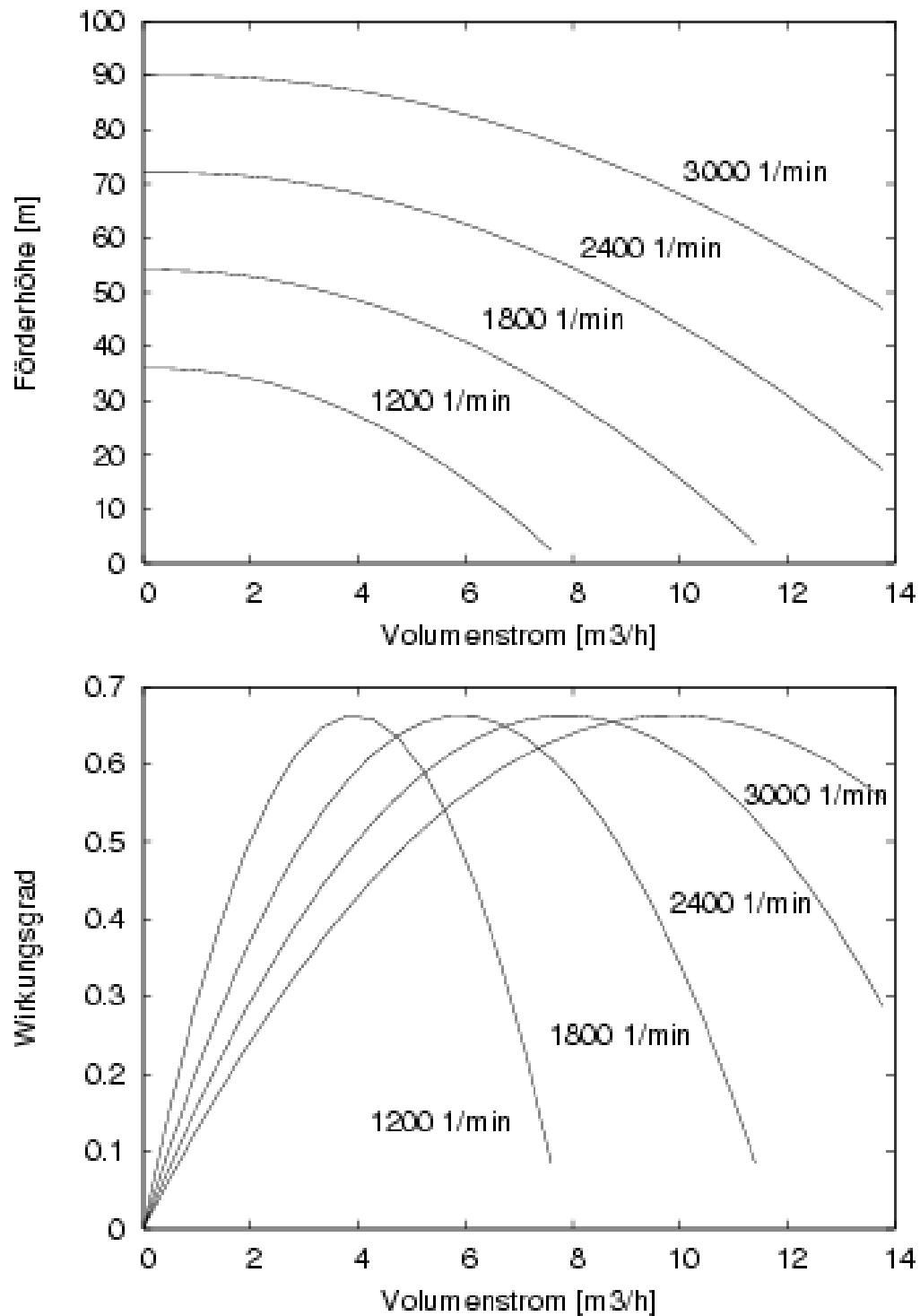


Abbildung 3: Pumpenkennlinien bei unterschiedlichen Drehzahlen

Die Ventilator Kennlinien werden meist in doppelt-logarithmischer Darstellung angegeben:

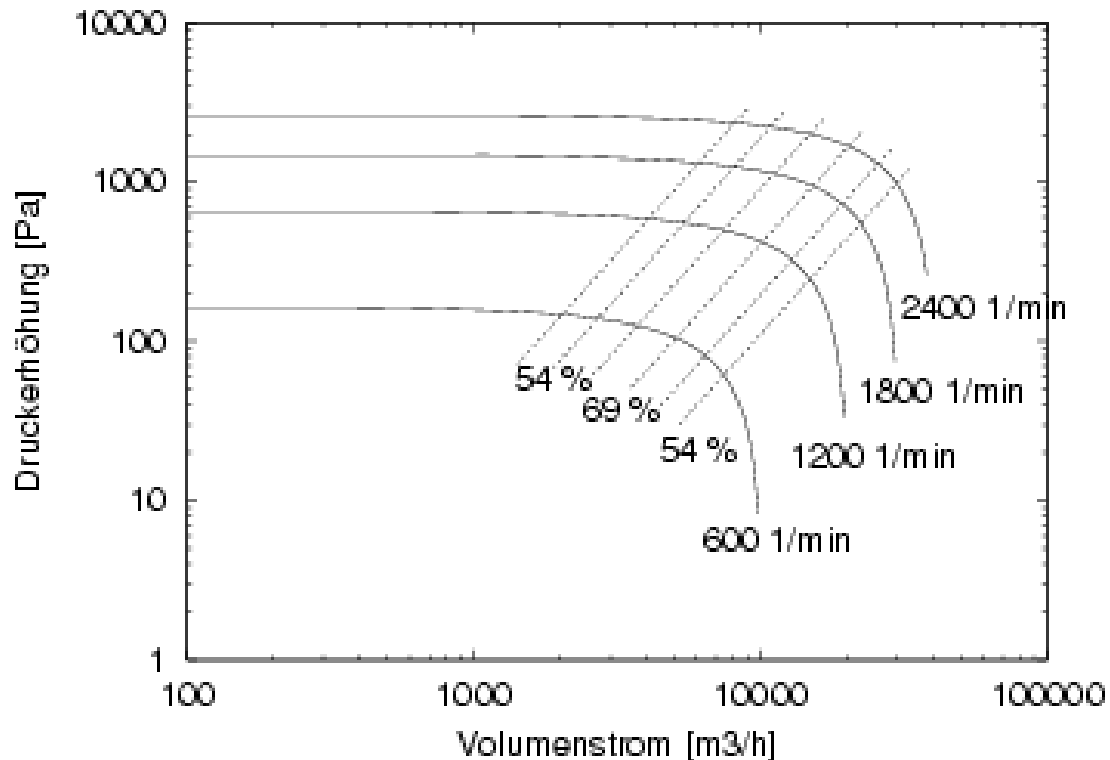


Abbildung 4: Ventilator kennlinien bei unterschiedlichen Drehzahlen

In der Abbildung 4 sind die Punkte mit gleichem Wirkungsgrad miteinander verbunden und als gerade Linien zu erkennen.

### C.1.2 Asynchronmaschinen

Die Asynchronmaschine ist ein elektrischer Energiewandler, der aus einem feststehendem, dem Stator und einem sich drehendem Teil, dem Rotor besteht. Sowohl im Stator wie auch im Rotor ist je eine mehrphasige Wicklung untergebracht, wobei die Rotorwicklung meist als Käfigwicklung ausgeführt ist. Längs der Welle in Nuten liegende Kupfer- oder Aluminiumstäbe sind über Ringe an den Enden kurzgeschlossen. Bei Speisung mit zeitlich phasenverschobenen Wechselströmen entsteht im Luftspalt zwischen Stator und Rotor ein Drehfeld, welches im Rotor abhängig von seiner Drehzahl eine Spannung induziert und damit einen Strom hervorruft.

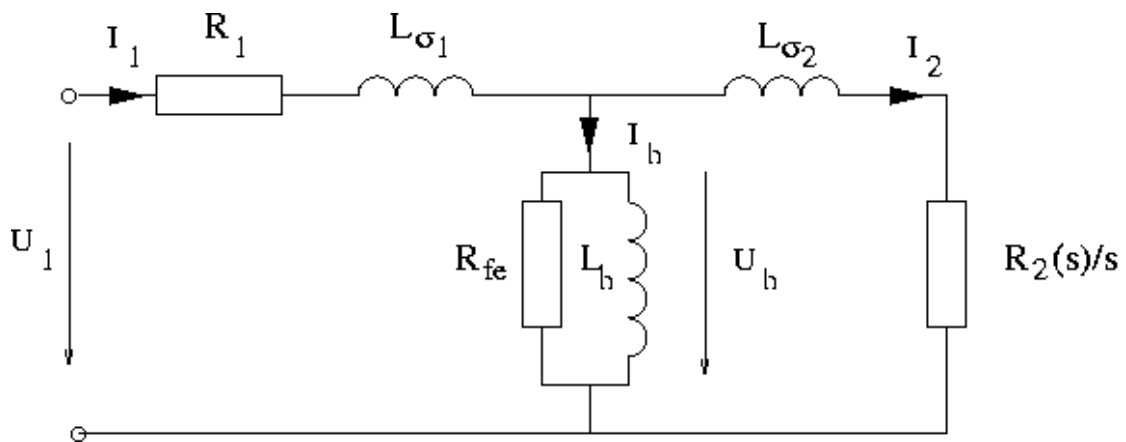


Abbildung 5: Ersatzschaltbild der Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine

Die Drehgeschwindigkeit  $\omega_d$  des Luftspaltfeldes ist von der Frequenz  $\omega_1$  des Statorstromes und der Polpaarzahl der Statorwicklung  $p$  abhängig. Sie beträgt:

$$\omega_d = \frac{\omega_1}{p} \quad (9)$$

Wenn der Rotor sich mit der derselben Geschwindigkeit wie das Drehfeld, also synchron, dreht, wird die induzierte Spannung und damit auch das Drehmoment null. Mit dem Schlupf  $s$  bezeichnet man die relative Abweichung der Rotordrehfrequenz von der Drehfrequenz des Drehfeldes:

$$s = \frac{\omega_d - \omega_r}{\omega_d} = \frac{\omega_s - p \cdot \omega_r}{\omega_s} \quad (10)$$

Für den Verlauf der induzierten Spannung  $U_r$  im Rotor kann damit geschrieben werden:

$$U_r = s \cdot U_s \quad (11)$$

Durch das Drehfeld entsteht mit dem im Rotor fließenden Strom das Drehmoment  $T_2$  und mit der Drehfrequenz  $\omega_2$  die mechanische Leistung:

$$P_2 = \Omega \cdot T_2 \quad (12)$$

Damit ergibt sich der in Abbildung 6 dargestellte Leistungsfluss: Die in die Statorwicklung eintretende elektrische Leistung  $P_1$  wird als magnetische Leistung  $P_d$  über den Luftspalt auf den Rotor übertragen und als mechanische Leistung  $P_m$  dem Arbeitsprozess zugeführt.

$$P_d = P_1 - P_{v1} \quad (13)$$

$$P_2 = P_d - P_{v2} \quad (14)$$

Es lässt sich zeigen, dass die Verlustleistung im Rotor proportional zum Schlupf  $s$  und der Drehfeldleistung  $P_d$  ist.

$$P_{v2} = s \cdot P_d \quad (15)$$

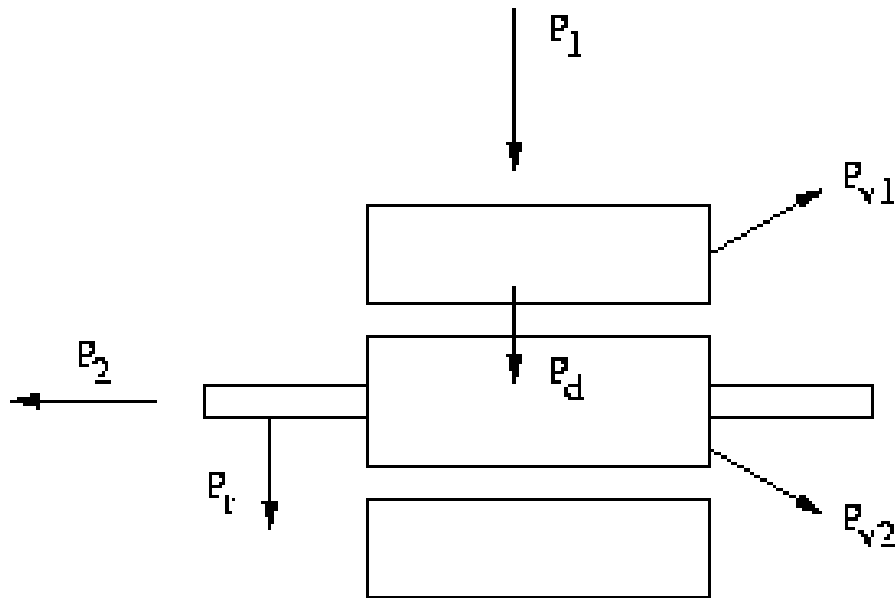


Abbildung 6: Leistungsfluss einer Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer

Der Wirkungsgrad kann damit wie folgt ausgedrückt werden:

$$\eta_{motor} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(1-s) \cdot P_d}{P_{v1} + P_d} \quad (16)$$

Er ist massgeblich vom Schlupf abhängig.

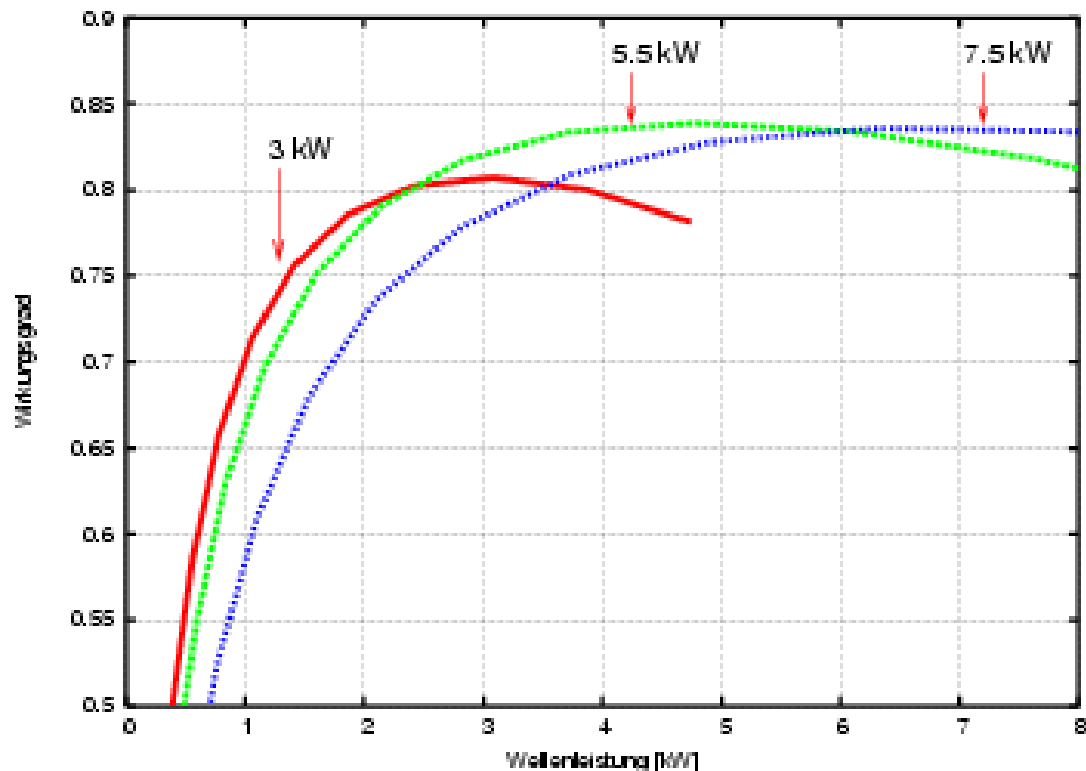


Abbildung 7: Wirkungsgrad unterschiedlicher Motoren in Funktion der Wellenleistung bei Netzspeisung

Zur vereinfachten Beurteilung der Motorenwirkungsgrade ist es der EU-Kommission gelungen sich mit den europäischen Motorherstellern auf ein Wirkungsgrad-Klassifikationsschema zu einigen, welches die 2 und 4-poligen Motoren im Leistungsbereich von 1.1 - 90 kW den drei Wirkungsgradklassen EFF1, EFF2, und EFF3 zuordnet. (siehe Abbildung 8). Ein weiterer Teil der Abmachung beinhaltet die Verpflichtung der Hersteller auf freiwilliger Basis für eine stärkere Verbreitung der Hocheffizienzmotoren besorgt zu sein.

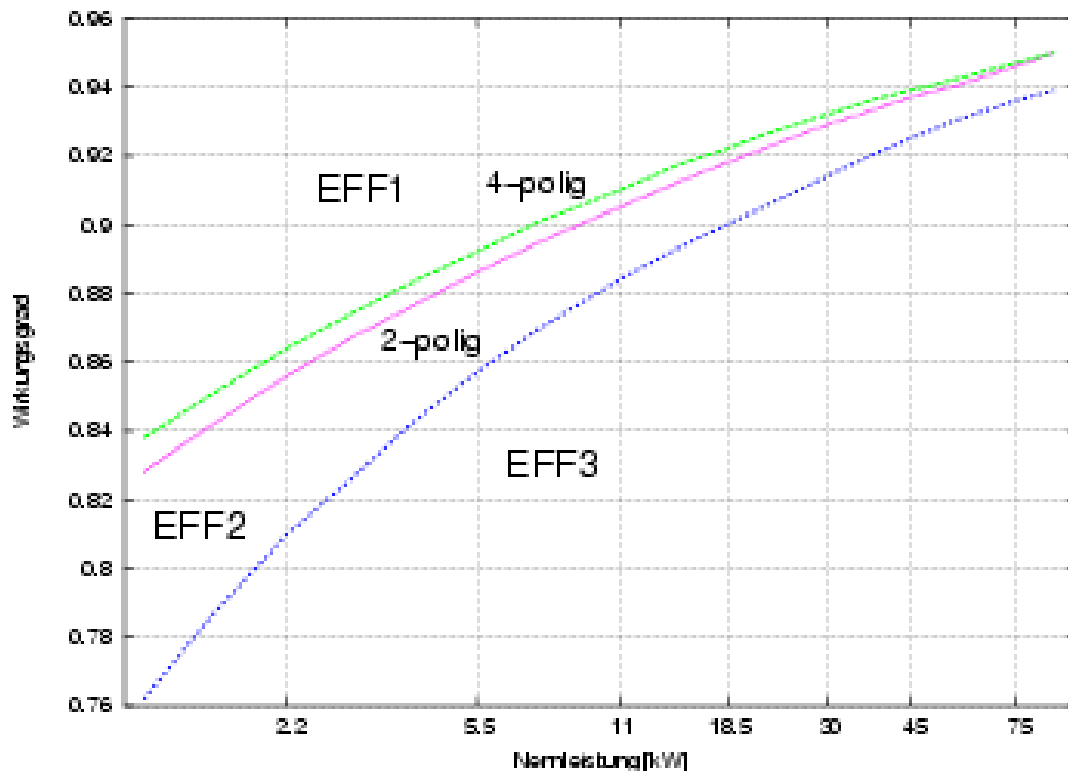


Abbildung 8: Die EU-Wirkungsgradklassen

Mit diesen Angaben können zumindest für den Nennbetriebspunkt die erreichbaren Einsparungen bei Ersatz des Motors abgeschätzt werden. Vorgängig muss jedoch abgeklärt werden, ob der betreffende Motor nicht im Teillastbereich betrieben wird. Eine bedarfsangepasste Motordimensionierung kann in einem solchen Fall rentabler sein als der Ersatz mit einem EFF1-Motor. In Abbildung 7 zum Beispiel lässt sich leicht erkennen, dass der 7.5kW-Motor bereits unterhalb von 60% der Nennleistung einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist, als der nächst kleinere Motor mit 5.5kW Nennleistung.

## C.2 Bestimmung der Energieeffizienz

Zur Bestimmung der Energieeffizienz eines Pumpen- oder Ventilatorantriebes geht man grundsätzlich wie folgt vor:

1. Man erfasst die Komponentendaten und das Lastprofil der Anlage.
2. Man untersucht verschiedene Massnahmen und vergleicht die Ergebnisse.

Dies soll im folgenden anhand zweier Beispiele gezeigt werden.

Nach dem Aufstarten von OPAL erscheint das in Abbildung 9 dargestellte Dialogfenster.

Abbildung 9: Hauptdialogfenster von OPAL

Es besteht aus den vier Tab-Gruppen:

**Prozessbeschreibung** : sie enthält den Anlagentyp: Pumpe oder Ventilator, die jährlichen Betriebsstunden und weitere allgemeine Angaben

**Motor/Umrichter** : sie beschreibt den Motor und Umrichter (soweit vorhanden)

**Last** : je nach Typ der Anlage wird hier die Pumpe oder der Ventilator zusammen mit dem Lastprofil und der Art der mechanischen Übertragung (Getriebe oder Riemmen) beschrieben.

**Massnahmen** : sie enthält eine Liste der untersuchten Massnahmen und bietet abhängig vom Typ der Anlage Möglichkeiten zur Auswertung der Massnahmen

In den weiss hinterlegten Feldern können Werte eingegeben werden, während die grauen Felder in der Regel nur zur Anzeige von Ergebnissen dienen, die vom Anwender nicht geändert werden können.

### C.2.1 Erfassung der Anlage

Man beginnt mit der Beschreibung des zu untersuchenden Prozesses. Die Prozessbezeichnung und der Name der Abteilung sind optional und dienen einer späteren Identifikation. Mit dem Menuknopf "Typ" wird der Anlagentyp und damit die in der Tab-Gruppe "Last" einzugebenden Daten festgelegt. Ebenso beeinflusst dieser Schalter die Auswahl der möglichen Massnahmen. Die weiteren Felder dienen der Energiekostenberechnung. Die Werte für den Energiepreis, die Anzahl der parallelen Antriebe, der Betriebstage und -stunden müssen hier eingegeben respektive angepasst werden.

**Festlegung der Motordaten** Mit einem Mausklick auf die Tab-Gruppe "Motor/Umrichter" wird die in Abbildung 10 dargestellte Feldgruppe angezeigt.

**OPAL für Pumpen- und Ventilatorantriebe**  
Energieeffizienz-Assessments (Version 3.0)

Datei Fenster Optionen Hilfe

Prozessbeschreibung | **Motor/Umrichter** | Last | Massnahmen

**Umrichter**  
P2 Nenn [kW]  
☐ ☐

**Motor**  
Typ  
**Auswahl** M-160  
Eta Klasse Baujahr  
EFF 3 1975

U1 nenn [V] f1 Nenn [Hz] Eta Nenn [%]

p2 nenn [kW] Eta Nenn [%] N Nenn [1/min] I1 nenn [A]  
 11  84  2940  21.7

	U1 [V]	P1 [kW]	I1 [A]	f1 [Hz]	Anteil	Drehzahl [1/min]	Moment [Nm]	P2 [kW]	Strom [A]	Wirkungsgrad [%]	Last-anteil	Energie [MWh]
0	400	7.983	15.66	50	0.500	2968.5	20.9	6.5	15.7	81.38	0.591	28.5
1	400	8.866	16.66	50	0.400	2964.4	23.5	7.3	16.7	82.26	0.663	25.6
2	400	10.66	18.83	50	0.100	2956.0	28.7	8.9	18.8	83.33	0.807	7.8
3												
4												

Variante 1 ☐

Abbildung 10: Tab-Gruppe zur Erfassung der Motordaten

Am besten macht man hier weiter mit der Auswahl des Motors. Dazu aktiviert man die Schaltfläche "Auswahl" und gibt in dem daraufhin angezeigten Dialogfenster die Polzahl und Wirkungsgradklasse vor (siehe Abbildung 11). Wenn keine Leistung ausgewählt wird, erscheint als Ergebnis nach dem Aktivieren des Suche-Schaltfläche eine Liste der verfügbaren Motoren. Nun kann man mit dem Mauszeiger die entsprechende



Zeile auswählen und mit einem Klick des linken Mausknopfes die Motordaten in das Motorfeld übernehmen. Wir wählen hier zum Beispiel den 2-poligen, 11 kW-Motor mit Wirkungsgradklasse EFF 3. Wenn die Betriebspunkte des Motors, d.h., Spannung U<sub>1</sub>, Wirkleistung P<sub>1</sub>, Strom I<sub>1</sub>, Statorfrequenz f<sub>1</sub> sowie die relative Zeitdauer (Anteil) bekannt sind, sollten die Werte in der Tabelle eingegeben werden. Sie können aber auch später unter Inkaufnahme von gewissen Ungenauigkeiten nach Eingabe des Lastprofils berechnet werden. Bei der Vorgabe der Anteilwerte muss darauf geachtet werden, dass die Summe kleiner oder gleich 1 ist. Anhand des Leistungen und der Zeitanteile wird nun automatisch der Jahresverbrauch berechnet, wie man sich leicht durch Aktivieren der Prozessbeschreibung überzeugen kann.

intens

Leistung [kW]  Polzahl  Eta Klasse

Id	Leistung	Eta Kl.	Pol.	Drehzahl	Eta [%]	Strom [A]	Leistung	Moment [N]
2	2.2	EFF 3	2	2830	78	4.85	0.85	7.42
3	3	EFF 3	2	2900	81	6.3	0.85	9.8
4	4	EFF 3	2	2900	83	8.1	0.86	13.1
5	5.5	EFF 3	2	2880	84	10.8	0.88	18.24
6	7.5	EFF 3	2	2905	83.7	14.2	0.92	24.65
7	11	EFF 3	2	2940	84	21.7	0.86	35.7
8	15	EFF 3	2	2955	86	28.9	0.86	48.5
9	18.5	EFF 3	2	2930	88	36.6	0.83	60
10	22	EFF 3	2	2940	90	38.1	0.92	71.47
11	30	EFF 3	2	2940	90	53.6	0.9	97.45

Suche Schliessen

Abbildung 11: Dialogfenster zur Auswahl des Motors

**OPAL für Pumpen- und Ventilatorantriebe**  
Energieeffizienz-Assessments (Version 3.0)

Datei Fenster Optionen Hilfe

Prozessbeschreibung | Motor/Umrichter | **Last** | Massnahmen

Übersetzung  
 Typ: **Kupplung**  
 Eta Nenn [%]: **100**  
 Uebersetzung: **1**

Pumpe  
 Auswahl: **P1-AX**    Hersteller: **ACME Inc.**    Baujahr: **1970**

Wirkungsgrad N Nenn [%]	Q Nenn [m3/h]	H nenn [m]	Max. Höhe [m]	P2 nenn [kW]
<b>38.1</b>	<b>2900.0</b>	<b>30.5</b>	<b>50.0</b>	<b>10.9</b>

Drehzahl [1/min]	H [m]	Q [m3/h]	Anteil	Eta Pumpe [%]	Leistung [kW]	Stat. Förderhöhe [m]
0	2900.0	53.9	4.5	0.5000	10.4	6.3
1	2900.0	55.8	9.0	0.4000	19.2	7.1
2	2900.0	56.3	18.0	0.1000	31.7	8.7
3						
4						

Variante 1 ☐ **Neu** **Berechne Betriebspunkte**

Abbildung 12: Tab-Gruppe zur Erfassung der Pumpendaten

**Festlegung der Pumpendaten** In der Regel sind Pumpen über eine Kupplung fest mit dem Motor verbunden. Man wird demzufolge in der Tab-Gruppe "Last" bei der mechanischen Übertragung den Typ "Kupplung" auswählen und anschliessend durch ein Aktivieren der Schaltfläche "Auswahl" die Felder der Pumpenkennwerte editierbar machen. Nun können wir die in Abbildung 12 gezeigten Werte, die man meist vom Typenschild der Pumpe ablesen kann, eingeben:

Wirkungsgrad	Eta	38.1	%
Nenndrehzahl	N nenn	2900	1/min
Nennförderstrom	Q nenn	30.5	m3/h
Nennförderhöhe	H nenn	50	m
Förderhöhe bei Q=0	H max	51	m

Wir stellen fest, dass die Wellenleistung P2 nenn bereits nach der Eingabe von Eta, Q und H berechnet worden ist. Dies funktioniert auch in der anderen Richtung: Wenn man hier einen Wert eingibt, wird aus Q, H und P2 der resultierende Wirkungsgrad berechnet und angezeigt:

$$\eta_{Pumpe} = 9815 \cdot H \cdot Q / P_2 \quad (17)$$

Anschliessend können die Werte des Lastprofils eingegeben werden. Dazu müssen Drehzahl der Welle, Förderstrom und jeweilige Zeitanteile bekannt sein. Nach dem Aktivieren der Schaltfläche "Berechnen der Betriebspunkte" werden die Lastprofilaten des Motors berechnet, sofern dort nicht bereits Werte eingegeben worden sind. Auch hier funktioniert die Berechnung auch in umgekehrter Richtung: wenn die Werte des Lastprofils der Pumpe fehlen, werden sie aus den Motorbetriebspunkten berechnet. Diese Werte sind eine Voraussetzung für den nächsten Schritt: die Evaluation der Massnahmen.

Abbildung 13: Tab-Gruppe zur Erfassung der Ventilatoraten

**Festlegung der Ventilatoraten** Im Gegensatz zu Pumpen sind Ventilatoren mechanisch meist über Riemen mit dem Motor gekoppelt. Zur Auswahl steht für den Typ der Übertragung: Keilriemen, Zahnriemen und Flachriemen, die sich hauptsächlich im Wirkungsgrad unterscheiden. Die Anpassung der unterschiedlichen Wellendrehzahlen erfolgt mit dem Übersetzungsverhältnis. Zum Beispiel:

$$\ddot{u} = \frac{1485 \text{ 1/min}}{330 \text{ 1/min}} = 4.5 \quad (18)$$

Die Typenschildangaben zum Ventilator können nach dem Aktivieren der Schaltfläche "Auswahl" festgelegt werden:

Wirkungsgrad	Eta	60	%
Nenndrehzahl	N nenn	330	1/min
Luftstrom	Q nenn	64 800	m3/h
Druckerhöhung	p nenn	400	Pa
Maximaldruck bei Q=0	p Max	500	Pa

In der darunter platzierten Tabelle können die Daten des Lastprofils eingegeben werden. Dazu müssen Luftstrom, Drehzahl und Zeitanteil bekannt sein. Die daraus resultierenden Betriebspunkte des Motors sowie die Leistung und den Druck werden nach Aktivieren der Schaltfläche "Berechnen der Betriebspunkte" berechnet und angezeigt. Selbstverständlich funktioniert die Berechnung auch, wenn nur die Lastdaten des Motors bekannt sind. Die Lastprofil-Werte müssen in beiden Tabellen jedoch vorhanden sein, bevor man mögliche Massnahmen evaluiert.

### C.2.2 Evaluation der Massnahmen

**OPAL für Pumpen- und Ventilatorantriebe**  
Energieeffizienz-Assessments (Version 3.0)

Datei Fenster Optionen Hilfe

Prozessbeschreibung | Motor/Umrichter | Last | Massnahmen

Massnahmen ändern:

Typauswahl: Ersatz von Motor/Pumpe Neue Massnahme .. Lösche Massnahme Detailanzeige

Verbesserungsmassnahmen

Id	Massnahme	Einsparungen [MWh/a]	Einsparungen	Rückzahl
0	Veränderbare Drehzahl	3.34	334.23	12.39
1	Ersatz des Motors	7.10	710.49	2.26
2	Ersatz der Pumpe	15.17	1517.40	1.65

Variante 1 Neu Berechne Betriebspunkte

Abbildung 14: Tab-Gruppe zur Erfassung und Ansicht der Massnahmen

In dieser Tab-Gruppe können die folgenden Massnahmen evaluiert werden:

**Einstellungen verbessern** : darunter fallen ganz allgemeine Anpassungen an der vorhandenen Anlage, wie zum Beispiel Reglereinstellungen, Reinigungen, Reduktion der Drehzahl etc.

**Reduktion der Betriebsstunden** : wenn eine Anlage bei Nichtgebrauch zum Beispiel nachts oder über das Wochenende abgeschaltet werden kann,

**Ersatz der Pumpe, des Ventilators** : wenn der Ersatz mit effizienteren Komponenten untersucht werden soll,

**Veränderbare Drehzahl** wenn die Verwendung eines Umrichters und allenfalls der Ersatz mit energie-effizienteren Komponenten in Betracht gezogen werden soll.

Man kann nun aus der Auswahlliste die gewünschte Massnahme auswählen und anschliessend die Schaltfläche "Neue Massnahme" aktivieren. Je nach gewählter Massnahme erscheint das entsprechende Dialogfenster.

**Massnahmen**  
Beschreibung: **Ersatz der Pumpe**

**Motor**

Eta Klasse	P2 nenn [kW]	Polzahl	Eta Nenn [%]	N Nenn [1/min]
Ersatz	EFF 1	7.5	2	90.5
				2930

**Pumpe**

Typ: **Ersatz**

Wirkungsgrad N Nenn [%]	Q Nenn [1/min]	H nenn [m3/h]	H nenn [m]	Max. Höhe P2 nenn [m]	Max. Höhe P2 nenn [kW]
38.1	2900.0	30.5	50.0	51.0	10.9

**Lastprofil**

	H [m]	Q [m3/h]	Drehzahl [1/min]	Anteil	Anzahl Pumpen	Leistung [kW]	P1/Motor [kW]
0	53.9	4.5	2900.0	0.5000	1	6.3	7.1
1	55.8	9.0	2900.0	0.4000	1	7.1	8.0
2	56.3	18.0	2900.0	0.1000	1	8.7	9.8
3							
4							
5							

**Ergebnisse**

Energie [MWh]	Einsparungen [MWh/a]	Einsparungen [%]
67.7	7.7	10.2

**Berechne Energieverbrauch** **Uebernehmen** **Schliessen**

Abbildung 15: Untersuchung der Einsparungen bei Ersatz von Pumpe und Motor

**Ersatz der Pumpe** Grundsätzlich hat man hier die Möglichkeit Pumpe und Motor entweder einzeln oder beide zusammen zu ersetzen und mit der Schaltfläche "Berechne Energieverbrauch" die jeweiligen Einsparungen zu berechnen. Die Ergebnisse werden im rechten Teil des Dialogfensters angezeigt.

Mit dem Aktivieren der Schaltfläche "Ersatz" beim Motor wird ein zur Pumpe passender EFF 1-Motor eingesetzt. Dieselbe Schaltfläche bei der Pumpe sorgt dafür, dass die Kenndaten editierbar werden und die Werte für Förderstrom und Förderhöhe an das Lastprofil angepasst werden. Zur Berechnung des Wirkungsgrades oder vielmehr für die Generierung eines Vorschlages kann das Auswahlmeneu des Pumpentyps verwendet werden. Es bietet eine Auswahl der folgenden Pumpentypen:

- einstufig-einströmige Spiralgehäusepumpe in Grundplattenausführung
- einstufig-einströmige Spiralgehäusepumpe in Blockausführung
- einstufig-zweistromige längsgeteilte Spiralgehäusepumpe

Je nach gewähltem Typ, Fördermenge, Förderhöhe und Drehzahl wird der erreichbare Wirkungsgrad berechnet und angezeigt. Alternativ dazu kann man auch direkt die Herstellerangabe einsetzen.

Wenn man mit der gewählten Konfiguration zufrieden ist, kann man die Schaltfläche "Uebernehmen" aktivieren, um sie in die Massnahmenliste aufzunehmen. Dadurch wird auch automatisch die Amortisationsdauer (resp. Rückzahlfrist) auf der Basis von gewissen Preisannahmen berechnet. Diese sollte man überprüfen und wo nötig korrigieren. Man wählt dazu die entsprechende Massnahme aus und aktiviert die Schaltfläche "Detailanzeige". In der rechten Tabelle "Investitionen" findet man die dazugehörigen Einträge, die nun ergänzt und korrigiert werden können. Ebenso sollte man in diesem Fenster auch die Beschreibung der Massnahme präzisieren.

The screenshot shows the 'intens' software interface for pump configuration and energy savings analysis. The window is divided into several sections:

- Massnahmen:** Description: 'Veränderbare Drehzahl'.
- Umrichter:**

P2 nenn [kW]	U1 nenn [V]	f1 Nenn [Hz]	Eta Nenn [%]
15	400	50	93
- Motor:**

Eta Klasse	P2 nenn [kW]	Polzahl	Eta Nenn [%]	N Nenn [1/min]
BFF 1	11	2	91	2945
- Pumpe:**

Typ:

Wirkungsgrad N Nenn [%]	Q Nenn [m3/h]	H nenn [m]	Max. Höhe P2 nenn [kW]
38.1	2900.0	30.5	51.0
- Lastprofil:**

	H [m]	Q [m3/h]	Drehzahl [1/min]	Anteil	Anzahl Pumpen	Leistung [kW]	P1/Motor [kW]
0	52.0	4.5	2846.3	0.5000	1	5.9	7.0
1	52.0	9.0	2797.1	0.4000	1	6.3	7.4
2	52.0	18.0	2789.6	0.1000	1	7.7	9.1
3							
4							
5							
- Ergebnisse:**

Energie [MWh]	Einsparungen [MWh/a]	Einsparungen [%]
64.7	10.6	14.1

Buttons at the bottom: 'Berechne Energieverbrauch', 'Uebernehmen', 'Schliessen'.

Abbildung 16: Untersuchung der Einsparungen bei drehzahlvariablem Betrieb der Pumpe

**Drehzahlvariabler Betrieb der Pumpe** Beim drehzahlvariablen Betrieb kann die Drehzahl der Pumpe so angepasst werden, dass die vom Lastprofil geforderte statische Förderhöhe erreicht wird. Allfällige Drosselverluste können hierdurch vermieden werden. Man kann in diesem Dialogfenster die Einsparungen untersuchen, die bei drehzahlvariablem Betrieb mit oder ohne Ersatz von Motor und Pumpe möglich sind. Ohne

Aktivierung der Ersatz-Schaltflächen werden die erzielbaren Einsparungen mit den unveränderten Komponenten jedoch mit vorgeschalteten geregeltem Frequenzumrichter berechnet. Die Schaltfläche "Uebernehmen" fügt die Massnahme der Liste hinzu und berechnet die Amortisationsdauer. Die dazu getroffenen Annahmen können wiederum mit "Detailansicht" angezeigt und editiert werden.

The screenshot shows the 'intens <2>' software interface. It is divided into several sections:

- Massnahmen:** Description: 'Ersatz des Ventilators'.
- Motor:**
  - Buttons: 'Ersatz', 'EFF 1', '15', '4', '92.1', '1460'.
  - Labels: Eta Klasse, P2 nenn [kW], Polzahl, Eta Nenn [%], N Nenn [1/min].
- Übersetzung:**
  - Typ: 'Flachriemen'.
  - Labels: Eta Nenn [%] (95), Übersetzung (4.5).
- Ventilator:**
  - Buttons: 'Ersatz', '330.0', '12.0', '60.0', '64800.0', '400.0', '500.0'.
  - Labels: N Nenn [1/min], P2 nenn [kW], Wirkungsgrad [%], Q Nenn [m3/h], p nenn [Pa], p max [m].
- Lastprofil:**

	Druck [m]	Q [m3/h]	Drehzahl [1/min]	Anteil	Leistung [kW]
0	409.1	50000.0	317.0	1.0000	9.9
1					
2					
3					
4					
- Ergebnisse:**

Energie [MWh]	Einsparungen [MWh/a]	Einsparungen [%]
121.1	147.7	55.0
- Buttons at the bottom:** 'Berechne Energieverbrauch', 'Uebernehmen', 'Schliessen'.

Abbildung 17: Untersuchung der Einsparungen bei Ersatz des Motors und Ventilators

**Ersatz des Ventilators** In diesem Fenster hat man die Möglichkeit Ventilator und Motor entweder einzeln oder beide zusammen zu ersetzen und mit der Schaltfläche "Berechne Energieverbrauch" die jeweiligen Einsparungen zu berechnen. Die Ergebnisse werden jeweils im rechten Teil des Dialogfensters angezeigt.

Mit dem Aktivieren der Schaltfläche "Ersatz" beim Motor wird ein zum Ventilator passender EFF 1-Motor eingesetzt. Dieselbe Schaltfläche beim Ventilator sorgt dafür, dass die Kenndaten editierbar werden und die Werte für Luftstrom Q und Gesamtdruck p an das Lastprofil angepasst werden.

Abgeschlossen wird dieser Schritt mit dem Aktivieren der Schaltfläche "Uebernehmen". Die Ergebnisse werden damit in die Massnahmenliste aufgenommen.

**Massnahmen**  
Beschreibung: Veränderbare Drehzahl

**Motor**

Eta Klasse	P2 nenn [kW]	Polzahl	Eta Nenn [%]	N Nenn [1/min]
EFF 3	11	2	84	2940

Ersatz:

**Übersetzung**  
Typ: Flachriemen  
Eta Nenn [%]: 95  
Uebersetzung: 4.5

**Ventilator**

N Nenn [1/min]	P2 nenn [kW]	Wirkungsgrad [%]	Q Nenn [m³/h]	p nenn [Pa]	p max [m]
330.0	12.0	60.0	64800.0	400.0	500.0

Ersatz:

**Lastprofil**

Druck [m]	Q [m³/h]	Drehzahl [1/min]	Anteil	Leistung [kW]
409.1	50000.0	317.0	1.0000	9.9

**Ergebnisse**

Energie [MWh]	Einsparungen [MWh/a]	Einsparungen [%]
200.4	68.4	25.5

Abbildung 18: Untersuchung der Einsparungen bei drehzahlvariablem Betrieb des Ventilators

**Drehzahlvariabler Betrieb des Ventilators** Der drehzahlvariable Betrieb ermöglicht die Anpassung der Ventilatordrehzahl, so dass der vom Lastprofil geforderte statische Druck erreicht wird. Allfällige Drosselverluste können hierdurch vermieden werden. Man kann in diesem Dialogfenster die Einsparungen untersuchen die bei drehzahlvariablem Betrieb mit oder ohne Ersatz von Motor und Ventilator möglich sind. Ohne Aktivierung der Ersatz-Schaltflächen werden die erzielbaren Einsparungen mit den unveränderten Komponenten jedoch mit vorgeschalteten geregelter Frequenzumrichter berechnet. Die Schaltfläche "Uebernehmen" fügt die Massnahme der Liste hinzu und berechnet die Amortisationsdauer. Anschliessend können die dazu getroffenen Annahmen mit "Detailansicht" angezeigt und editiert werden.

### C.3 Berechnungsmodelle

#### C.3.1 Turbomaschine

Unter der Annahme gleicher Massenströme bei Eintritt und Austritt: (siehe Abbildung 1 auf Seite 30)

$$\dot{m}_E = \dot{m}_A = \dot{m} \quad (19)$$

kann die Leistungsbilanz der Turbomaschine aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik gebildet werden:

$$P_3 + \sum_i \dot{W}_i - \dot{m} \cdot \left( h_A - h_E + \frac{c_A^2 - c_E^2}{2} + g \cdot [z_A - z_E] \right) = 0 \quad (20)$$



Darin ist die Änderung der spezifischen Enthalpie enthalten:

$$h_A - h_E = \int_E^A v \, dp + \int_E^A T \, ds = \int_E^A v \, dp + \frac{\sum_i \dot{W}_i + \sum P_v}{\dot{m}} \quad (21)$$

Mit der Verlustleistung  $\sum P_v$  kann die Leistungsbilanz geschrieben werden:

$$P_3 = P_{fluid} + \sum P_v \quad (22)$$

Wenn man mit  $H$  die bei Pumpen charakteristische Grösse Förderhöhe einführt:

$$H = \frac{1}{g} \int_E^A v \, dp + \frac{c_A^2 - c_E^2}{2g} + [z_A - z_E] \quad (23)$$

ergibt sich die Förderleistung:

$$P_{fluid} = \dot{m} \cdot g \cdot H = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (24)$$

Bei Ventilatoren wird stattdessen die Druckerhöhung verwendet:

$$\Delta p = \rho \cdot \left( \int_E^A v \, dp + \frac{c_A^2 - c_E^2}{2} + g \cdot [z_A - z_E] \right) = \rho \cdot g \cdot H \quad (25)$$

und kann damit schreiben:

$$P_{fluid} = Q \cdot \Delta p \quad (26)$$

Bei inkompressiblen Flüssigkeiten ist die Dichte und damit das spezifische Volumen konstant. Hiermit ergibt sich die folgende Vereinfachung:

$$\int_E^A v \, dp = v \cdot (p_A - p_E) = \frac{p_A - p_E}{\rho} \quad (27)$$

Diese Annahme ist auch für Gase zulässig, wenn die Druckänderungen  $\Delta p/p$  kleiner als 0.03 bleiben, was bei Ventilatoren in der Regel der Fall ist.

Sowohl Wirkungsgrad wie auch Förderhöhe resp. Druckerhöhung sind quadratisch vom Volumenstrom abhängig. Für die Modellierung des Betriebsverhaltens können deshalb die folgenden Beziehungen definiert werden:

$$H(Q, n) = (a \cdot q^2 + b \cdot q + c) \cdot H_n \quad (28)$$

$$\eta(Q, n) = \eta_n \cdot (d \cdot q^2 + e \cdot q) \quad (29)$$

$$\text{mit } q = \frac{Q}{Q_n} \quad (30)$$

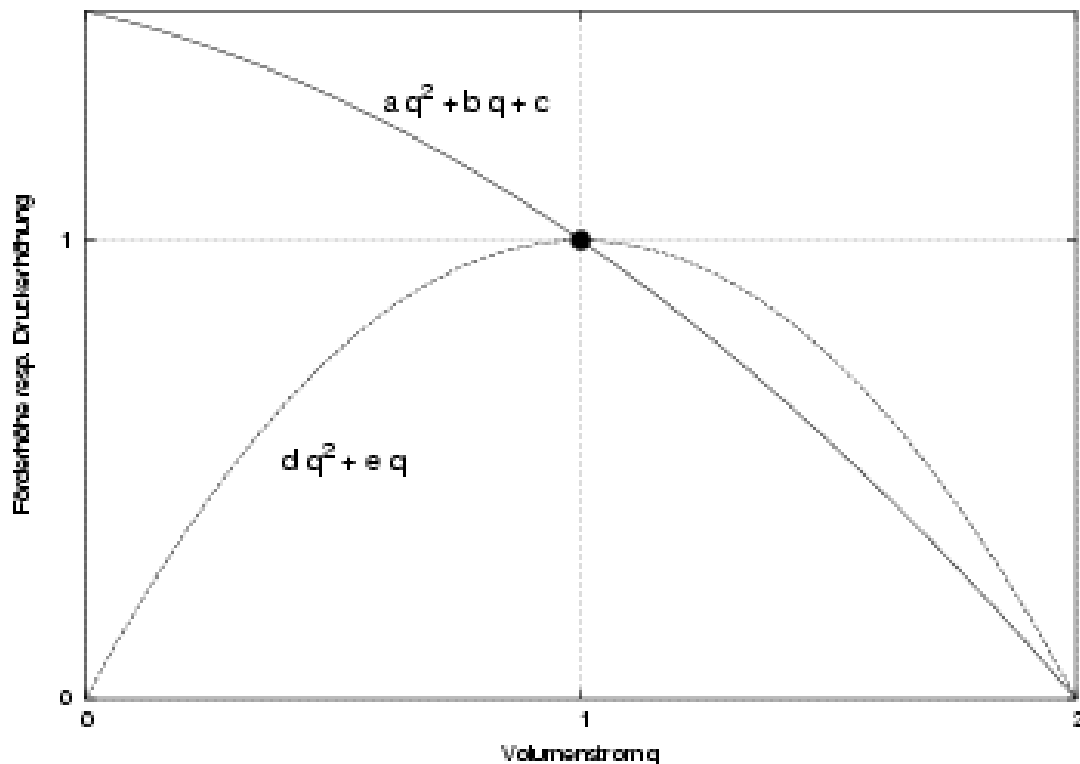


Abbildung 19: Normierte Kennlinien einer Fluidmaschine

Mit den Nennwerten des Volumenflusses  $Q_n$ , der Drehzahl  $n_n$  und des Wirkungsgrades  $\eta_n$ . Wenn nebst dem Nennpunkt, d.h. dem Betriebspunkt mit dem Maximalwert des Wirkungsgrades, noch ein weiterer Punkt:

$$h_x = H_x / H_n \quad (31)$$

$$q_x = Q_x / Q_n \quad (32)$$

gegeben ist, können die Parameter  $a, b, c, d$  und  $e$  im obigen Gleichungssystem bestimmt werden:

$$a = \frac{h_x + q_x - 2}{2 + q_x \cdot (q_x - 3)} \quad (33)$$

$$b = -1 - 3 \cdot a \quad (34)$$

$$c = -4 \cdot a - 2 \cdot b \quad (35)$$

$$d = -1 \quad (36)$$

$$e = 2 \quad (37)$$

Bezüglich der Drehzahlabhängigkeit gelten die folgenden Ähnlichkeitsbeziehungen:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (38)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (39)$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (40)$$

### C.3.2 Asynchronmaschine

Es werden für die Berechnungen die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen

- Die Netzspannung ist konstant, symmetrisch und sinusförmig.
- Die Statorimpedanzen sind konstant und symmetrisch und nur der Wicklungswiderstand ist von der Temperatur abhängig.

Die Spannungsgleichungen für das T-Ersatzschaltbild (Abbildung 5 auf Seite 35) lauten:

$$U_1 = [R_1(\vartheta) + j \cdot X_{1\sigma}] \underline{I}_1 + j\omega_1 \Psi \quad (41)$$

$$0 = \left[ \frac{R_2(\vartheta, s)}{s} + j \cdot X_{2\sigma}(s) \right] \underline{I}_2 + j\omega_1 \Psi \quad (42)$$

$$\omega_1 \Psi = \frac{R_{Fe} X_h}{R_{Fe} + jX_h} (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) \quad (43)$$

Das Drehmoment an der Welle berechnet sich aus der Leistungbilanz:

$$M_w(\vartheta, s) = \frac{p}{\omega_1} [P_1(\vartheta, s) - P_{cu1}(\vartheta, s) - P_{Fe}(\vartheta, s)] - M_{reib}(s) \quad (44)$$

wobei:

$s = 1 - p\Omega/\omega_1$	Schlupf
$R_1(\vartheta_{cu}, \vartheta_{Fe})$	Statorwiderstand
$R_2(\vartheta, s)$	schlupfabhängiger Rotorwiderstand
$\underline{I}_1$	komplexer Statorstrom
$\underline{I}_2$	komplexer Rotorstrom
$X_h$	Hauptreaktanz
$R_{Fe}$	Eisenwiderstand
$\Psi$	Hauptfluss
$X_{1\sigma} = \omega_1 L_{1\sigma}$	Streureaktanz des Stators
$X_{2\sigma}(s) = \omega_1 L_{2\sigma}(s)$	schlupfabhängige Streureaktanz des Rotors
$\omega_1 = 2\pi f_1$	Kreisfrequenz der Statorspannung
$\Omega = 2\pi n$	Kreisfrequenz der Welle
$p = pz/2$	Polpaarzahl
$P_1(\vartheta, s)$	Elektrische Leistung
$P_{cu1}(\vartheta, s)$	Statorkupferverlustleistung
$P_{Fe}(\vartheta, s)$	Statoreisenverlustleistung
$M_{reib}(s) = M_{reib0}(1 - s)^{1.7}$	Reibungsmoment des Motors (Lager, Ventilation etc.)

Die Schlupfabhängigkeit der Rotorimpedanzen wird durch folgende Beziehungen berücksichtigt:

$$R_{2o}(s) = \frac{R_{2N} - R_{2A}}{s_N - 1}(s - 1) + R_{2A} \quad (45)$$

$$X_{2\sigma}(s) = \frac{X_{2\sigma N} - X_{2\sigma A}}{s_N - 1}(s - 1) + X_{2\sigma A} \quad (46)$$

Mit:

$R_{2A}, X_{2\sigma A}$  Rotorwiderstand und -streuung im Stillstand

$R_{2N}, X_{2\sigma N}$  Rotorwiderstand und -streuung bei Nennschlupf

Die Temperaturabhängigkeit der Widerstände wird durch die Beziehungen:

$$R_1(\vartheta_{cu}, \vartheta_{Fe}) = R_{1o}[1 - \alpha((1.7 \cdot \vartheta_{cu} + 0.52 \cdot \vartheta_{Fe})/2.22 - \vartheta_o)] \quad (47)$$

$$R_2(\vartheta, s) = R_{2o}(s)[1 - \alpha(\vartheta - \vartheta_o)] \quad (48)$$



mit dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  berücksichtigt. Die Bezugstemperatur  $\vartheta_o$  beträgt  $20^\circ C$ .

Aus den in den Katalogdaten enthaltenen Angaben über das Anlaufmoment und den Anlaufstrom können die Impedanzen im Stillstand durch ein numerisches Näherungsverfahren bestimmt werden.

Die Verlustleistungen werden mit Hilfe der Beziehungen:

$$P_{cu1} = m R_1 I_1^2 \quad (49)$$

$$P_{cu2} = m R_2 I_2^2 + k_U U_h^2 \quad (50)$$

$$P_{Fe} = m U_h^2 / R_{Fe} + k_I I_1^2 - k_U U_h^2 \quad (51)$$

bestimmt. Wobei

$k_U = 0.33 / R_{Fe}$  Faktor für Zusatzverluste durch Flusspulsationen

$k_I = 0.005 \cdot p_{nenn} / i_{1nenn}^2$  Faktor für stromabhängige Zusatzverluste

$U_h = \omega_1 \Psi$  innere Spannung