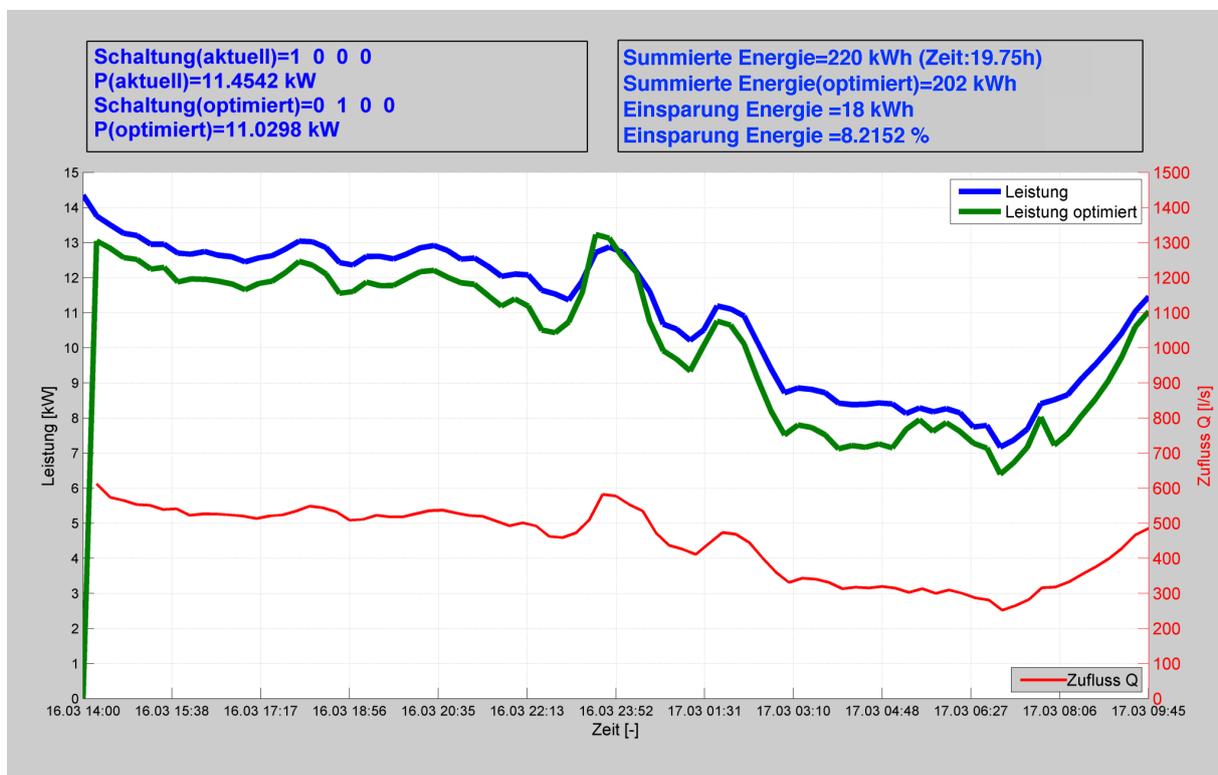


Energieeinsparung durch optimale Staffelung von Pumpen auf Kläranlagen



Verfasst von:
Florian Howald

Leitung: Prof. Dr. Eberhard Morgenroth
Betreuung: Sara Engelhard, Dr. David Dürrenmatt, Christian Thürlimann, Dr. Kris Villez

Mai 2014

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Energieeinsparung durch optimale Staffelung von Pumpen auf Kläranlagen

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Howald

Vorname(n):

Florian

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

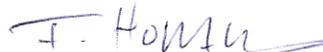
- Ich habe keine im Merkblatt [„Zitier-Knigge“](#) beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 28. Mai 2014

Unterschrift(en)



Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.

Zusammenfassung

Bei der Siedlungsentwässerung und auf Abwasserreinigungsanlagen werden Pumpsysteme eingesetzt, welche viel Energie brauchen. Das Ziel dieser Arbeit ist die Ausarbeitung einer Methodik, um die Effizienz von gestaffelten Pumpen, insbesondere Schneckenpumpen, zu beurteilen, die optimale Betriebsweise zu ermitteln und diese in verständlicher Form zu präsentieren.

Ein Beispiel solcher Pumpsysteme sind Hebewerke mit parallel betriebenen Schneckenpumpen. Diese Pumpen zeichnen sich durch eine konstante Förderhöhe und eine lineare Beziehung zwischen dem Leistungsbedarf und dem Zufluss aus. In Hebewerken sind Schneckenpumpen parallel angeordnet um den stark variierenden Zuflüssen gerecht zu werden. Eine optimale Staffelung des Pumpenbetriebes wird erreicht, wenn der Leistungsbedarf minimiert ist und dabei alle Nebenbedingungen wie Schalthäufigkeit, Betriebsdauer und gleichmässiger Betrieb eingehalten sind.

Das in dieser Arbeit entwickelte Framework zur Ermittlung der optimalen Betriebsweise ist in fünf Teile aufgebaut. Zuerst werden die Daten eingelesen. Im zweiten Schritt wird die theoretische Leistungskennlinie mit den Betriebsdaten verglichen. Es folgt eine erste Optimierung um das statische Schaltschema zu generieren, so dass der Leistungsbedarf minimiert wird. Im vierten Teil wird der Betrieb des Pumpsystems auf Basis von Zulaufwerten über einen Zeitraum optimiert. Dabei werden Nebenbedingungen wie Betriebsdauer, gleichmässiger Betrieb und Schalthäufigkeit berücksichtigt. Die Effizienzanalyse und Präsentation der Resultate zeigt dem Betreiber das Potential der Optimierung auf.

Das Praxisbeispiel mit einer Datenreihe aus dem Hebewerk der ARA Hard in Winterthur hat gezeigt, dass die beiden grossen Schneckenpumpen energieeffizienter arbeiten als die beiden Kleinen. Der optimierte Betrieb des Hebewerkes führt zu einer Einsparung von rund 420 kWh über neun Tage, was rund 14% entspricht. Damit können auf das Jahr hochgerechnet rund 2600 CHF an Stromkosten eingespart werden.

Das Framework gibt einen Überblick über die Effizienz von gestaffelten Schneckenpumpen und liefert Anhaltspunkte, wie der Betrieb optimiert werden kann. Die Weiterentwicklung des Frameworks mit zusätzlichen Nebenbedingungen und mit Berücksichtigung des Tagesganges ist denkbar. Auch die Anwendbarkeit auf Systeme mit weiteren Pumpentypen wäre interessant.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Pumpen in der Siedlungswasserwirtschaft	2
2.1.1 Typen	2
2.1.2 Verluste	3
2.1.3 Kennlinien	4
2.1.4 Betrieb Pumpsysteme	5
3 Framework	6
3.1 Daten Einlesen	6
3.2 Vergleich Kennlinie Theorie und Betrieb	6
3.3 Optimierung Statisch	6
3.4 Optimierung Dynamisch	7
3.5 Visualisierung	8
4 Resultate	9
4.1 Datenreihe ARA Hard Winterthur	9
4.1.1 Vergleich Kennlinie Theorie und Betrieb	9
4.1.2 Optimierung Statisch	10
4.1.3 Optimierung Dynamisch	11
4.1.4 Effizienzanalyse	12
4.1.5 Kosteneinsparung	13
5 Diskussion	14
5.1 Vergleich Kennlinie	14
5.2 Optimierung Statisch	14
5.3 Optimierung Dynamisch	15
5.4 Effizienzanalyse	15
6 Schlussfolgerungen	17
6.1 Ausblick	17
7 Literatur	18
Anhang	19
Anhang 1: Berechnung des Übersturzpunktes	19
Anhang 2: Berechnung der jährlichen Kosteneinsparung	19

1 Einleitung

In der heutigen Zeit mit der kommenden Energiewende wird in allen Disziplinen der Wissenschaft nach Lösungen gesucht um Energie zu sparen. Auch die Siedlungswasserwirtschaft ist davon betroffen. Die Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung sind in heutiger Zeit nicht mehr wegzudenken. Gemäss dem Bundesamt für Energie ist es jedoch so, dass Abwasserreinigungsanlagen über 10% des Stromverbrauches für öffentliche Aufgaben benützen (BfE, 2014). Ein grosser Teil dieser Energie wird dabei auf Kläranlagen von Pumpen benützt, sei es in Hebewerken oder zur Belüftung der Belebungsbecken. Auch bevor das Wasser auf die Kläranlage kommt verbrauchen Pumpwerke an gewissen Stellen in der Kanalisation viel Energie. In solchen Pumpwerken sind oft mehrere Pumpen parallel angeordnet und können je nach Fördermenge gestaffelt betrieben werden. In der vorliegenden Arbeit soll der Betrieb von solchen Pumpwerken unter dem Aspekt der Energieoptimierung betrachtet werden.

Im Handbuch Energie in ARA (Müller et al., 2008) im Kapitel 2 „heben und pumpen“ wird unter anderem die Strategie „Förderanlagen intelligent betreiben“ vorgestellt. Ein Pumpwerk intelligent betreiben heisst zum Beispiel die Pumpen so zu staffeln, dass der Energieverbrauch optimiert und so die Betriebskosten minimiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der sichere Betrieb stets gewährleistet ist und Randbedingungen wie Verschleiss und Schaltvorgänge eingehalten werden. In (Broll, 2013) werden diese Ideen für parallel betriebene Kreiselpumpen umgesetzt und anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie dem Betreiber Visualisierungen helfen das Werk optimiert zu betreiben.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Ausarbeitung einer Methodik, um die Effizienz von gestaffelten Pumpen, insbesondere Schneckenpumpen, zu beurteilen, die optimale Betriebsweise zu ermitteln und diese in verständlicher Form zu präsentieren.

Der erste Teil soll eine Übersicht über die in der Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung eingesetzten Pumpentypen geben. Es wird die Frage nach den verschiedenen Parametern zur Charakterisierung des Betriebs von Pumpsystemen beantwortet.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Framework zur Bestimmung des optimalen Pumpenbetriebes bei parallel betriebenen Schneckenpumpen vorgestellt. Anhand eines Beispiels soll das Potential der Optimierung aufgezeigt werden und eine Effizienzanalyse durchgeführt werden.

Der letzte Teil der Arbeit soll dem Betreiber vor Ort helfen, den Betrieb der Pumpen zu analysieren und das Einsparpotential der optimalen Betriebsweise aufzuzeigen.

2 Grundlagen

2.1 Pumpen in der Siedlungswasserwirtschaft

In der Siedlungswasserwirtschaft werden an verschiedenen Orten Pumpen eingesetzt. Bereits in der Kanalisation gibt es Pumpwerke, wo Kreiselpumpen das Wasser von einem Ort auf einen höher gelegenen Ort bringen. Es können auch Verdrängerpumpen verwendet werden. Auf Abwasserreinigungsanlagen kommen oftmals sogenannte Schneckenpumpen (Archimedes-Schraube) beim Zulauf-Hebwerk zum Einsatz. Später auf der Kläranlage in der Biologie-Stufe werden Turboverdichter verwendet um die Belebungsbecken zu belüften.

Im Folgenden werden die Pumpentypen kurz vorgestellt, jedoch liegt der Fokus in diesem Kapitel bei den Schneckenpumpen.

2.1.1 Typen

2.1.1.1 Kreiselpumpen

Kreiselpumpen oder Zentrifugalpumpen werden am meisten eingesetzt. Die Energie wird dem Wasser durch ein rotierendes Laufrad zugefügt, wobei je nach Anordnung die Radialpumpe, Diagonalspumpe und Axialpumpe unterschieden werden. Kreiselpumpen sind robust, relativ einfach regelbar und preisgünstig.

2.1.1.2 Turbo-Verdichter

Turbo-Verdichter sind im Aufbau und der Funktionsweise ähnlich wie eine Kreiselpumpe. Das zu fördernde Medium ist jedoch ein Gas. Im Gegensatz zur Kreiselpumpe wird es im Verdichter komprimiert. Turbo-Verdichter kommen auf Kläranlagen bei den Belüftungsbecken zum Einsatz und tragen so einen grossen Anteil am Energieverbrauch der Anlage.

2.1.1.3 Verdrängerpumpen

Verdrängerpumpen (wie zum Beispiel Kolbenpumpen) werden eingesetzt, wenn der Förderstrom gering bleibt aber die Förderhöhe gross ist. Durch periodische Volumenänderungen von Arbeitsräumen wird Wasser angesaugt, in die Druckleitung gepresst und so gefördert.

2.1.1.4 Schneckenpumpen

Das Funktionsprinzip der Schneckenpumpe soll bereits vom griechischen Mathematiker und Ingenieur Archimedes erfunden worden sein, was sie zum ältesten Pumpsystem macht. Der grosse Vorteil gegenüber den oben vorgestellten Pumpen ist die Förderung mit freiem Wasserspiegel. Es kann so problemlos Wasser mit Schwimmstoffen ohne Verstopfungen gefördert werden. Der Betrieb ist sicher, zuverlässig und wartungsarm. Zudem besitzen Schneckenpumpen selbstregelnde Eigenschaften. Sie sind sehr unempfindlich gegenüber Zulaufschwankungen und somit optimal eingesetzt bei Zulaufwerken zu Kläranlagen.

In Abbildung 1 ist eine Schneckenpumpe und die dazugehörigen Bezeichnungen schematisch aufgezeigt.

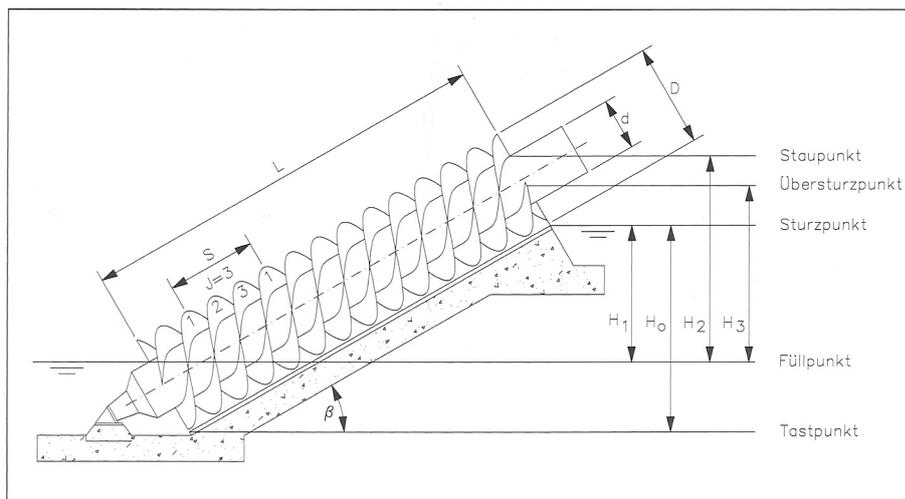


Abbildung 1. Schema einer Schneckenpumpe mit Bezeichnungen, aus (Kantert, 2008), Seite 14

Die wichtigen Bezeichnungen lauten wie folgt.

D: Durchmesser Beschaukelung, d: Durchmesser Tragrohr, J: Gangzahl, L: Beschaukelte Länge, β : Aufstellwinkel.

Der Wirkungsgrad einer Schneckenpumpe ist neben der Qualität der Komponenten entscheidend vom Füllungsgrad der Schnecke abhängig. Der Füllungsgrad und somit auch der Wirkungsgrad kann dabei durch eine hohe Gangzahl oder einen geringen Aufstellwinkel gesteigert werden. Die Schnecke muss jedoch länger werden und auch die Fertigung wird teurer. Der Wirkungsgrad einer Schneckenpumpe liegt im Bereich von 0.6 bis 0.75 (Kantert, 2008).

Für die vorliegende Arbeit sind die verschiedenen Förderhöhen H aus Abbildung 1 wichtig.

H_0 : konstruktive Förderhöhe (Sturzpunkt-Tastpunkt)

H_1 : Wasserspiegeldifferenz oder nutzbare Förderhöhe (Sturzpunkt-Füllpunkt)

H_2 : maximal mögliche Wasserspiegeldifferenz oder Förderhöhe (Staupunkt-Füllpunkt)

H_3 : tatsächlich erforderliche Förderhöhe (Übersturzpunkt-Füllpunkt)

H_1 ist dabei durch das System oder die Anlage vorgegeben. H_3 wird später für die Berechnung der Leistung wichtig werden. Diese Höhe wird vom Übersturzpunkt festgelegt, welcher sich im Betrieb bei konkreter Fördermenge unterschiedlich einstellt. H_3 liegt zwischen H_1 und H_2 .

2.1.2 Verluste

Bei Schneckenpumpen kommt es zu Spaltverlusten (auch Leckverluste genannt). Da sich die Schnecke mit den Schaufeln und der Trog nicht berühren, kommt es bei diesen langen Bauwerken zur Durchbiegung der Schnecken. Um die Spaltverluste gering zu halten, soll der Spalt zwischen Schnecke und Trog möglichst gering ausfallen. Andererseits muss jedoch die Durchbiegung berücksichtigt werden.

Durch den Verschleiss nehmen die Spaltverluste im Laufe der Zeit zu, was zu einer Sanierung führt. Dabei können einerseits die Schaufeln neu aufgeschweisst und so der Durchmesser etwas erhöht werden. Andererseits kann der Trog saniert und so dessen Durchmesser verringert werden. Statt einer kostenintensiven Sanierung ist kurzfristig auch eine Absenkung des unteren Lagers denkbar, da der Verschleiss im unteren Bereich der Schnecken oft

grösser ist als im oberen Bereich. Weitere Verluste werden durch Wasserreibung und Lagerreibung verursacht.

2.1.3 Kennlinien

Pumpen werden durch verschiedene Kennlinien charakterisiert, welche oft vom Pumpenlieferanten zur Verfügung gestellt werden. Wichtig ist beispielsweise die Q-H-Kennlinie, welche die mögliche Förderhöhe H in Funktion der Fördermenge Q darstellt. Bei Kreiselpumpen beschreibt die Kennlinie eine nach unten geöffnete Parabel. Je mehr Q von einer Kreiselpumpe gefördert werden muss, umso stärker nimmt die mögliche Förderhöhe ab. Im Gegensatz dazu ist die Förderhöhe bei Schneckenpumpen (H_3) von der Fördermenge nahezu unabhängig, da sie durch das System und geodätische Höhen vorgegeben ist. Auf der untenstehenden Abbildung 2 sind die beiden Kennlinien schematisch dargestellt.

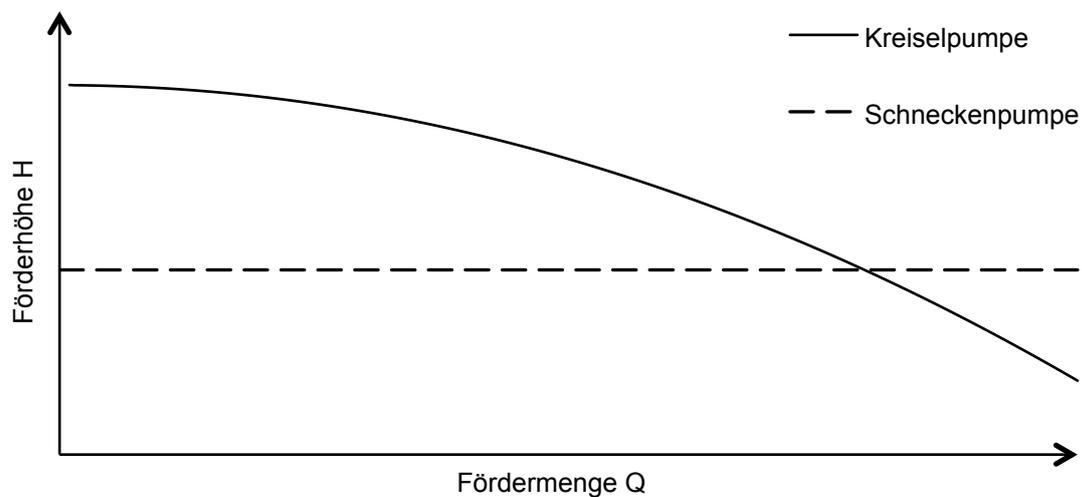


Abbildung 2. Schematische Q-H Kennlinie für Kreiselpumpe und Schneckenpumpe

Bei Kreiselpumpen sind weitere Kennlinien wichtig, welche beispielsweise den Wirkungsgrad oder den NPSH (Net Positive Suction Head) in Beziehung zur Fördermenge Q aufzeigen.

Für diese Arbeit ist die Leistungskennlinie einer Schneckenpumpe wichtig. Sie setzt den Leistungsbedarf des Motors (P) der Schneckenpumpe in Beziehung mit der Fördermenge Q. Wie unten gezeigt wird, ist diese Q-P-Kennlinie eine lineare Beziehung.

2.1.3.1 Leistungsbedarf Schneckenpumpe

Die erforderliche Motorleistung zum Antrieb einer Schneckenpumpe ist, wie bereits erwähnt, vom Wirkungsgrad und der tatsächlichen Förderhöhe H_3 abhängig. Dazu kommt noch die Fördermenge Q. Daraus folgt gemäss Literatur (Kantert, 2008) folgende Formel zur Berechnung des Leistungsbedarfs.

$$P = \frac{H_3}{\eta \cdot 102} \cdot Q \quad (1)$$

- P = Motorleistung [kW]
- H_3 = Tatsächliche Förderhöhe [m]
- η = Wirkungsgrad [-]
- Q = Fördermenge [l/s]

2.1.4 Betrieb Pumpsysteme

Damit die Pumpen in der Siedlungswasserwirtschaft den sich stetig ändernden Betriebsbedingungen gerecht werden, sind in einem Pumpwerk oft mehrere Pumpen installiert. Kreiselpumpen werden oft entweder parallel nebeneinander oder seriell hintereinander geschaltet. Im ersten Fall wird durch die Parallelschaltung die Fördermenge des Gesamtsystems erhöht. Beim Seriebetrieb von Pumpen hingegen kann eine grössere Förderhöhe erreicht werden.

Bei Schneckenpumpen ist der Seriebetrieb zur Förderung über grosse Höhen grundsätzlich auch denkbar, viel wichtiger ist jedoch der Parallelbetrieb. In einem Zulaufhebwerk zur Kläranlage können so beispielsweise vier Schnecken unterschiedlicher Grösse nebeneinander stehen und je nach Bedarf an- oder abgeschaltet werden. Die Fördermenge des Pumpsystems kann so sehr flexibel dem stark schwankenden Zufluss angepasst werden. Zudem kann bei Ausfall oder Revision einer Pumpe der Betrieb weitergeführt werden.

Die Regelung von Pumpsystemen kann auf Grund von verschiedenen Parametern geschehen. Erstens ist eine druckabhängige Regelung denkbar. Je nach Druck an den Verbraucherstellen wird vom System mehr oder weniger gefördert. Zweitens können die Pumpen abhängig vom Füllstand im Pumpensumpf geregelt werden. Drittens ist eine Regelung abhängig vom Förderstrom Q denkbar.

Schneckenpumpen werden oft abhängig vom Zufluss zur Kläranlage hin geregelt. Die Regelung erfolgt dann durch Zu- oder Abschalten von einzelnen parallelen Pumpen.

3 Framework

Zur Analyse des Pumpenbetriebs eines Systems und dessen Optimierung wurde ein Framework entwickelt. Das Framework kann für beliebige Systeme aus parallel betriebenen Schneckenpumpen eingesetzt werden. Es ist stufenweise aufgebaut und besteht aus fünf Matlab-Dateien.

3.1 Daten Einlesen

Das erste Matlab-Script „A_DatenEinlesen.m“ liest die Daten ein und stellt sie in Matlab zur Verfügung. Die Dateneingabe erfolgt dabei in drei Excel-Dateien. In der ersten Datei „daten-schnecken.xlsx“ wird das System des Hebewerks definiert. Pro Zeile werden für eine Schneckenpumpe deren Kennwerte (Förderleistung, Aufstellwinkel, Durchmesser, Länge, Tastpunkt, Füllpunkt, Sturzpunkt und Wirkungsgrad) eingegeben. In der Datei „daten-leistung.xlsx“ kann eine Datenreihe aus dem Betrieb des Systems eingegeben werden. Drei Spalten (Datum, Zufluss und Leistung) stehen zur Verfügung. In der dritten Datei „daten-schaltung.xlsx“ werden die Schaltungen der jeweiligen Schneckenpumpen eingelesen. Pro Pumpe stehen 2 Spalten zur Verfügung (Datum und Schaltungen).

3.2 Vergleich Kennlinie Theorie und Betrieb

Wie in Kapitel 2 erwähnt, ist die Leistungs-Kennlinie einer Schneckenpumpe entscheidend für den Energieverbrauch. In der zweiten Stufe des Frameworks („B_VergleichDatenTheorie.m“) wird diese Kennlinie erstens gemäss Theorie (Kapitel 2.1.3.1) und zweitens aus dem Betrieb ermittelt werden. Der Vergleich der beiden Kennlinien zeigt dem Betreiber auf, wie gross die Verluste in Folge von Verschleiss sind. Dabei muss beachtet werden, dass der Wirkungsgrad und oft auch der Übersturzpunkt auf Annahmen basieren. Die Annahmen können auf dieser Stufe des Frameworks überprüft werden.

3.3 Optimierung Statisch

In der nächsten Stufe („C_OptimierungStatisch.m“) wird ein einfaches Optimierungsproblem gelöst. Das Ziel ist die Ausgabe eines Schaltschemas, wo ersichtlich wird bei welchem Zufluss Q welche Schneckenpumpe laufen muss, damit die Leistungsabgabe minimiert wird. Dabei wird noch nicht auf Nebenbedingungen wie Betriebszeit und Schaltzyklen eingegangen. Das Optimierungsproblem sieht folgendermassen aus:

$$\min \sum_{i=1}^n s_i \cdot (m_i \cdot Q_i + c_i)$$

unter der Nebenbedingung:

$$\sum_{i=1}^n s_i \cdot Q_i \geq Q_{zu}$$
$$s_i \in \{0; 1\}$$

(2)

s = Schaltvariable (0 für aus, 1 für an), n = Anzahl Schneckenpumpen

m, c = Parameter der Kennlinie

Q_{zu} = Zufluss [l/s]

Q_i = Teilförderstrom pro Schnecke [l/s]

Der Gesamtzufluss Q_{zu} wird dabei so auf die Schneckenpumpen verteilt, dass alle zugeschalteten Pumpen dasselbe Verhältnis zu ihrer maximalen Förderleistung haben. So wird der Teilförderstrom zu:

$$Q_i = \frac{s_i \cdot q_{max,i}}{\sum_{j=1}^n (s_j \cdot q_{max,j})} \cdot Q_{zu} \quad (3)$$

$$\left| \begin{array}{l} q_{max} = \text{Maximaler Förderstrom pro Schnecke [l/s]} \end{array} \right.$$

In dieser Stufe des Frameworks kann ausgewählt werden, ob die Leistungskennlinie nach Theorie oder nach den Betriebsdaten gebildet werden soll. Im ersten Fall wird $m = \frac{H_3}{\eta \cdot 102}$ und $c = 0$. Im zweiten Fall werden die aus Stufe 2 ermittelten Parameter eingesetzt.

Um das optimale Schaltschema bei allen möglichen Zuflüssen zu ermitteln, wird nun Q_{zu} beginnend bei 0 l/s schrittweise bis zum maximalen Zulauf erhöht und jeweils die obenstehende Optimierung gerechnet.

3.4 Optimierung Dynamisch

Der vierte Teil des Frameworks ist die wichtigste Stufe. Im Gegensatz zu oben werden nun mehrere Nebenbedingungen angegeben. Erstens soll die Betriebsdauer einer einzelnen Pumpe einen gewissen Wert nicht überschreiten. Zudem sollen sich die verschiedenen Gesamtbetriebsdauern pro Pumpe nicht stark unterscheiden. Dazu wird die Gesamtbetriebsdauer einer Schnecke mit der Summe der Gesamtbetriebsdauern über alle Schnecken ins Verhältnis gesetzt. Für diesen Wert wird ein Limit als Prozentwert angegeben. Die dritte Nebenbedingung beschränkt die Schalzhäufigkeit. Dazu wird die Ruhezeit angegeben, welche mindestens zwischen dem Abschalten und Anschalten einer Pumpe eingehalten werden muss.

Für die Leistungskennlinie wird bei dieser Optimierung der Ansatz der Theorie gewählt. Das Optimierungsproblem sieht folgendermassen aus:

$$\min \sum_{i=1}^n s_i \cdot m_i \cdot Q_i$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{i=1}^n s_i \cdot Q_i \geq Q_{zu} \quad (4)$$

$$s_i \cdot BD_i \leq BD_{max}$$

$$s_i \cdot BDG_i \leq BDG_{Limit}$$

$$s_i \cdot Rh_i = 0$$

$$s_i \in \{0; 1\}$$

BD = Betriebsdauer [h], BD_{max} = Maximalwert [h]

BDG = Verhältnis Einzel-Gesamtbetriebsdauer zu Summe [%]

BDG_{Limit} = Limit der Gesamtbetriebsdauer [%]

Rh = Wert für Ruhezeit [h]

Als Basis für die Optimierung des Pumpenbetriebs dient nun die im ersten Schritt eingelesene Datenreihe. Aus dieser Reihe wird zu jedem Zeitschritt der aktuelle Zufluss-Wert Q_{zu} ausgelesen, die Werte der Nebenbedingungen aktualisiert und das Optimierungsproblem gelöst.

3.5 Visualisierung

Das Ziel der Arbeit besteht nicht nur darin, einen optimalen Pumpenbetrieb zu finden. Die optimale Betriebsweise soll in verständlicher Form präsentiert und das Einsparpotential aufgezeigt werden. Dazu dient die letzte Stufe des Frameworks. Die Resultate aus den vorangehenden Stufen werden graphisch angegeben. So kann die aktuelle Betriebsweise mit der optimalen Konfiguration verglichen werden und die eingesparte Energie wird aufgezeigt.

4 Resultate

4.1 Datenreihe ARA Hard Winterthur

Um die Praxistauglichkeit des oben beschriebenen Frameworks nachzuweisen, wurde es mit realen Daten getestet. Die Datenreihe stammt dabei von der Abwasserreinigungsanlage Hard vom Stadtwerk Winterthur. Auf dieser Kläranlage ist nach der mechanischen Reinigung ein Hebewerk vorhanden, welches das Abwasser rund zwei Meter zum Verteilbauwerk und den Belüftungsbecken hebt. Das Hebewerk setzt sich aus 4 parallelen Schneckenpumpen zusammen, wobei Pumpe 1 und 4 sowie Pumpe 2 und 3 die jeweils identische Geometrie und Eigenschaften besitzen. In der folgenden Tabelle 1 sind die verschiedenen Parameter aufgeführt.

Tabelle 1. Daten zu den 4 Schneckenpumpen des Hebewerks auf der ARA Hard Winterthur

Schnecke		1	2	3	4
Q	[l/s]	600	1000	1000	600
β	[°]	30	30	30	30
D _{schnecke}	[mm]	1600	1900	1900	1600
d _{rohr}	[mm]	778.7	755.8	755.8	778.7
L	[mm]	4300	3900	3900	4300
η^1	[-]	0.7	0.7	0.7	0.7
Tastpunkt	[m.ü.M.]	395.80	395.90	395.90	395.80
Füllpunkt	[m.ü.M.]	396.83	397.05	397.05	396.83
Sturzpunkt	[m.ü.M.]	397.95	397.85	397.85	397.95
Übersturzpunkt ²	[m.ü.M.]	398.64	398.67	398.67	398.64
H ₀	[mm]	2150	1950	1950	2150
H ₁	[mm]	1120	800	800	1120
H ₂	[mm]	1120	800	800	1120
H ₃	[mm]	1812.8	1622.7	1622.7	1812.8

¹ basierend auf einer Annahme, ² Berechnung gemäss Anhang 1

Die von der ARA Hard zur Verfügung gestellte Datenreihe umfasst den Zeitraum vom 15.3. um 14:00 bis zum 24.3. um 10:15. In diesen 9 Tagen wurden alle 15 Minuten der Gesamtzufluss Q_{zu} (in l/s) zum Hebewerk sowie die Wirkleistung P (in kW) der Motoren der Pumpen aufgezeichnet. Zusätzlich sind die Schaltungen pro Schneckenpumpen vorhanden.

Mit diesen Datensätzen als Eingabe liefert das Framework die untenstehenden Resultate.

4.1.1 Vergleich Kennlinie Theorie und Betrieb

Nachdem im ersten Schritt die Daten eingelesen wurden, macht die zweite Stufe des Frameworks einen Vergleich der Leistungskennlinie nach Theorie und nach Betriebsdaten. Auf Abbildung 3 wird dies ersichtlich.

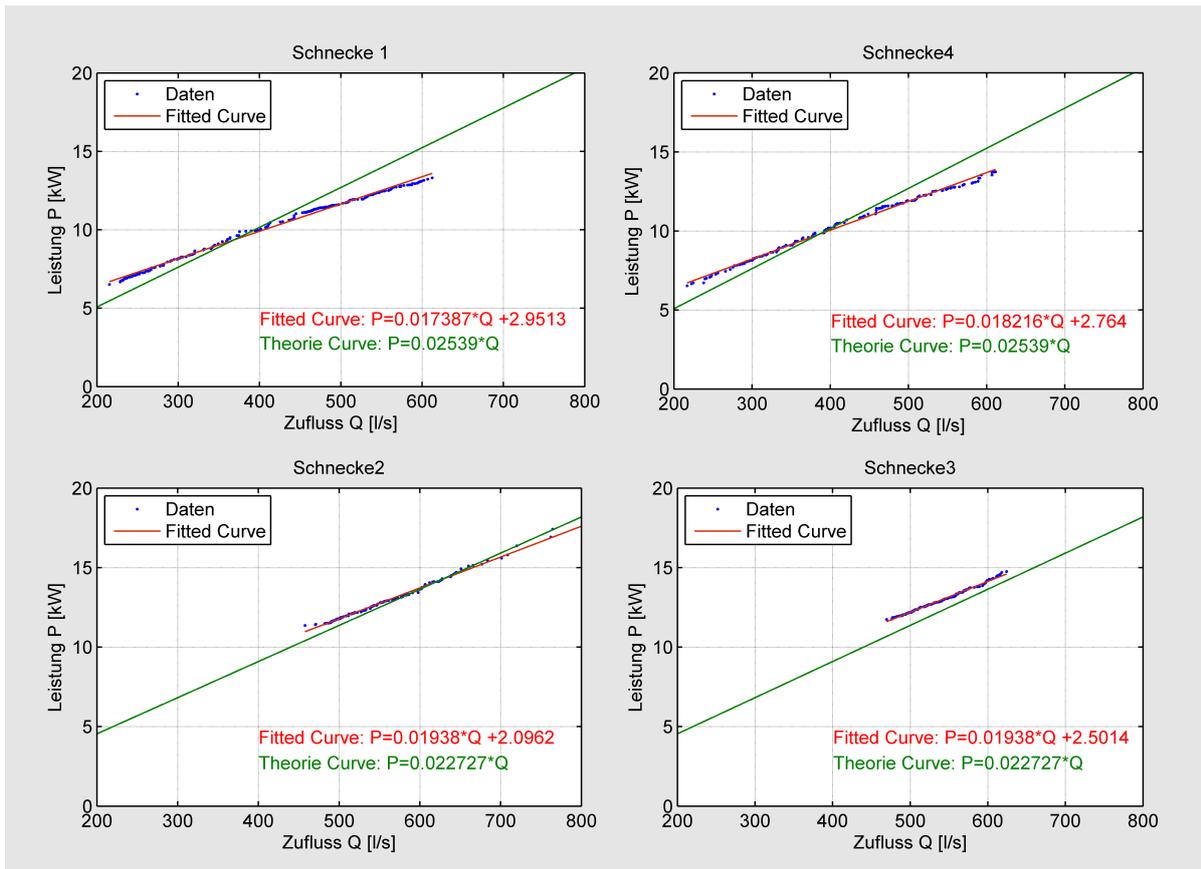


Abbildung 3. Vergleich Kennlinie nach Theorie und von Betriebsdaten

Pro Schneckenpumpe wird ein Diagramm gezeigt, wo die erforderliche Leistung gegen den Zufluss aufgetragen wird. Die grüne Linie zeigt die Leistungskennlinie gemäss Theorie (Kapitel 2.1.3.1). Die rote Linie ist eine linear angegliche Kurve zu den Betriebsdaten (blaue Punkte) und zeigt die Leistungskennlinie gemäss Betrieb.

4.1.2 Optimierung Statisch

Auf der dritten Stufe wird ein einfaches Optimierungsproblem gelöst, um das optimale Schaltschema mit minimierter Leistung zu generieren. Neben der Sicherstellung des Betriebes wird hier keine weitere Nebenbedingung verwendet. Die Leistungskennlinie kann entweder gemäss Theorie oder gemäss Betriebsdaten gewählt werden. Auf Abbildung 4 und Abbildung 5 ist das optimale Schaltschema für das Hebewerk der ARA Hard ersichtlich.

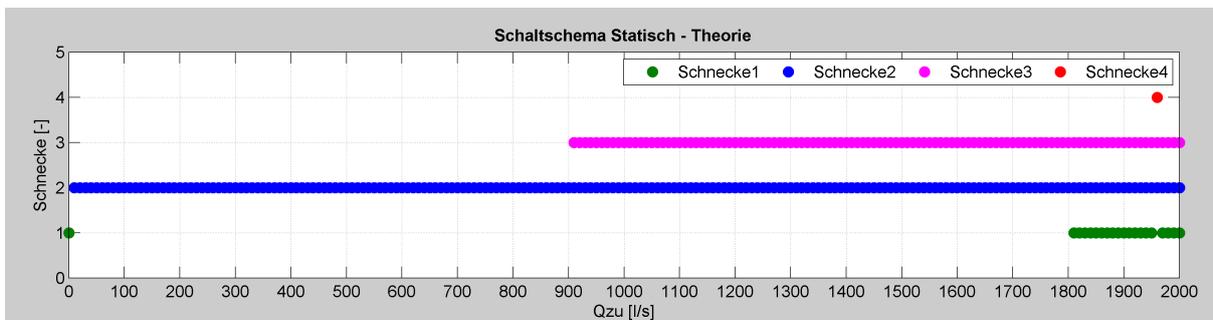


Abbildung 4. Schaltschema statisch, optimiert mit Kennlinie gemäss Theorie

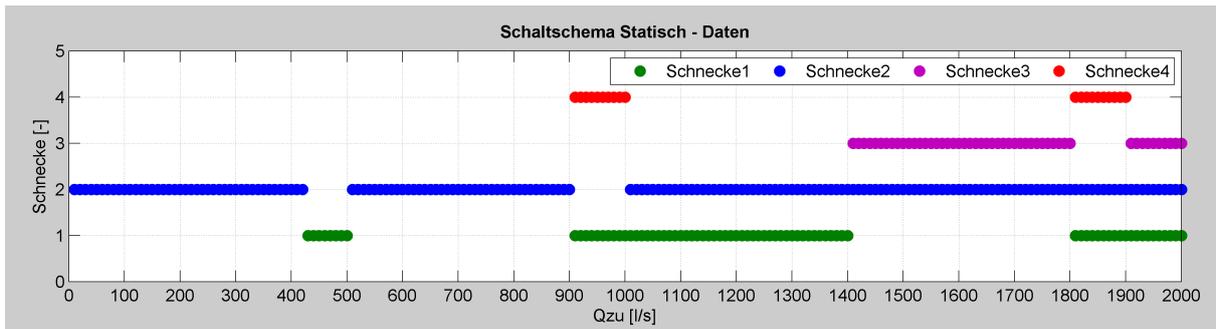


Abbildung 5. Schaltschema statisch, optimiert mit Kennlinie gemäss Betriebsdaten

Die beiden Abbildungen sind so zu lesen, dass für unterschiedliche Zuflüsse Q_{zu} die jeweiligen Schnecken angeschaltet sein müssen, um den Leistungsbedarf minimiert zu halten.

4.1.3 Optimierung Dynamisch

Bei der Optimierung Dynamisch kommen nun weitere Nebenbedingungen für die Betriebsdauer, für die Gesamtbetriebsdauer sowie für die Schalzhäufigkeit der Schneckenpumpen dazu. Zusätzlich basiert die Optimierung auf der Datenreihe und es wird für jeden Zeitschritt die optimale Staffelung der Schneckenpumpen gefunden.

Für die Parameter der Nebenbedingungen können im Framework die Grenzen gewählt werden. Die Resultate mit einer maximalen Betriebsdauer (BD_{max}) von 30 h, einer Beschränkung der Gesamtbetriebsdauer (BDG_{Limit}) von 50% und einer Ruhezeit (Rh) von 10 h sind in Abbildung 6 ersichtlich.

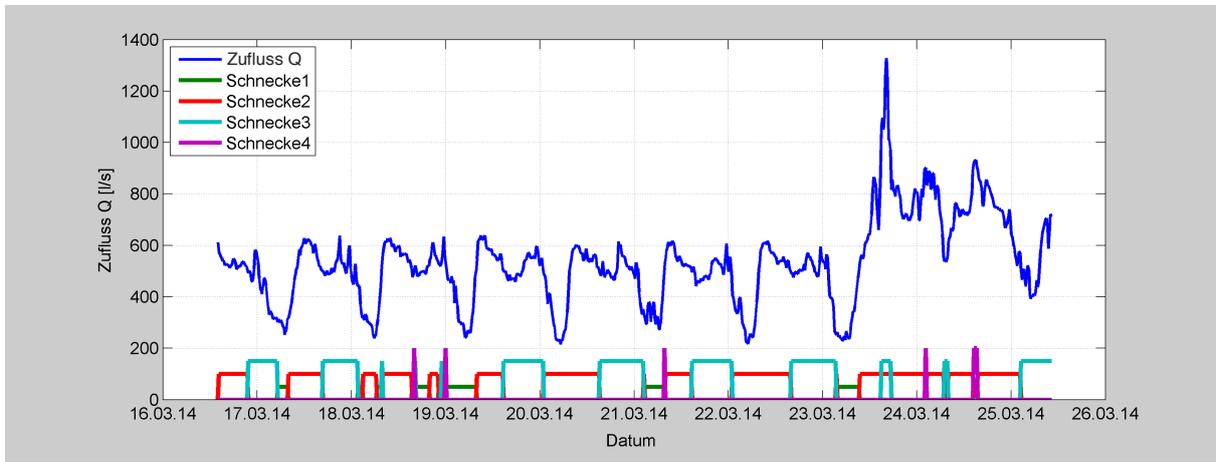


Abbildung 6. Optimierung dynamisch

In Blau ist über den gesamten Zeitraum der Zufluss Q aufgeführt. Darunter wird für die einzelnen Schneckenpumpen 1-4 ersichtlich, wann sie zugeschaltet oder abgeschaltet werden müssen, sodass die erforderliche Leistung des Hebewerks minimiert und dabei die Nebenbedingungen eingehalten und der sichere Betrieb gewährleistet werden.

In Abbildung 7 ist das Resultat der Optimierung für die gleiche Datenreihe wie oben mit den wie folgt abgeänderten Werten ersichtlich: $BD_{max} = 10$ h, $BDG_{Limit} = 40\%$, $Rh = 5$ h.

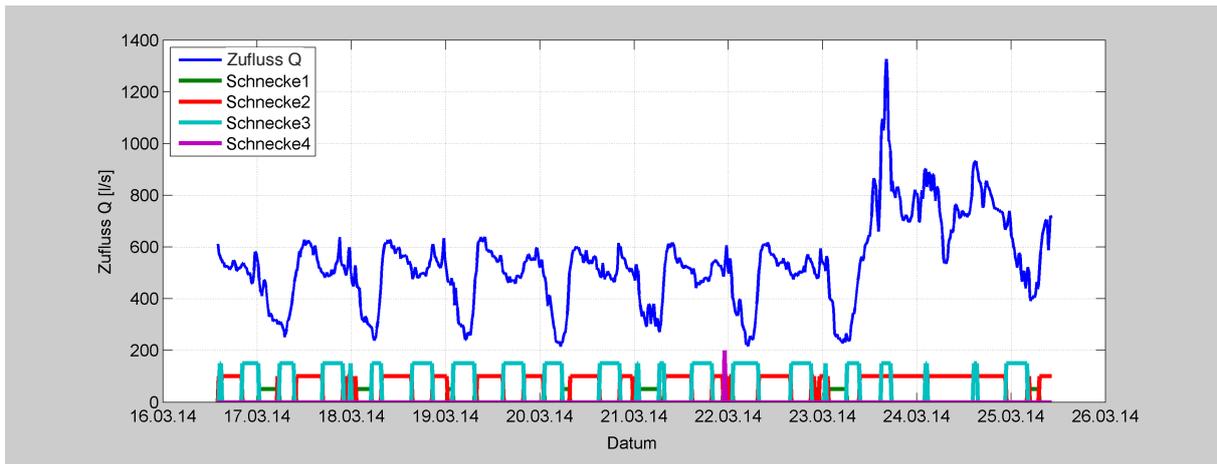


Abbildung 7. Optimierung dynamisch, andere Werte

4.1.4 Effizienzanalyse

Der letzte Teil des Frameworks wertet die Resultate aus der dynamischen Optimierung aus und zeigt dem Betreiber des Hebwerks das Einsparpotential auf. Basierend auf der Datenreihe kann ein Zeitpunkt ausgewählt werden und für diesen Zeitraum werden die Resultate und Berechnungen schliesslich präsentiert. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel davon.

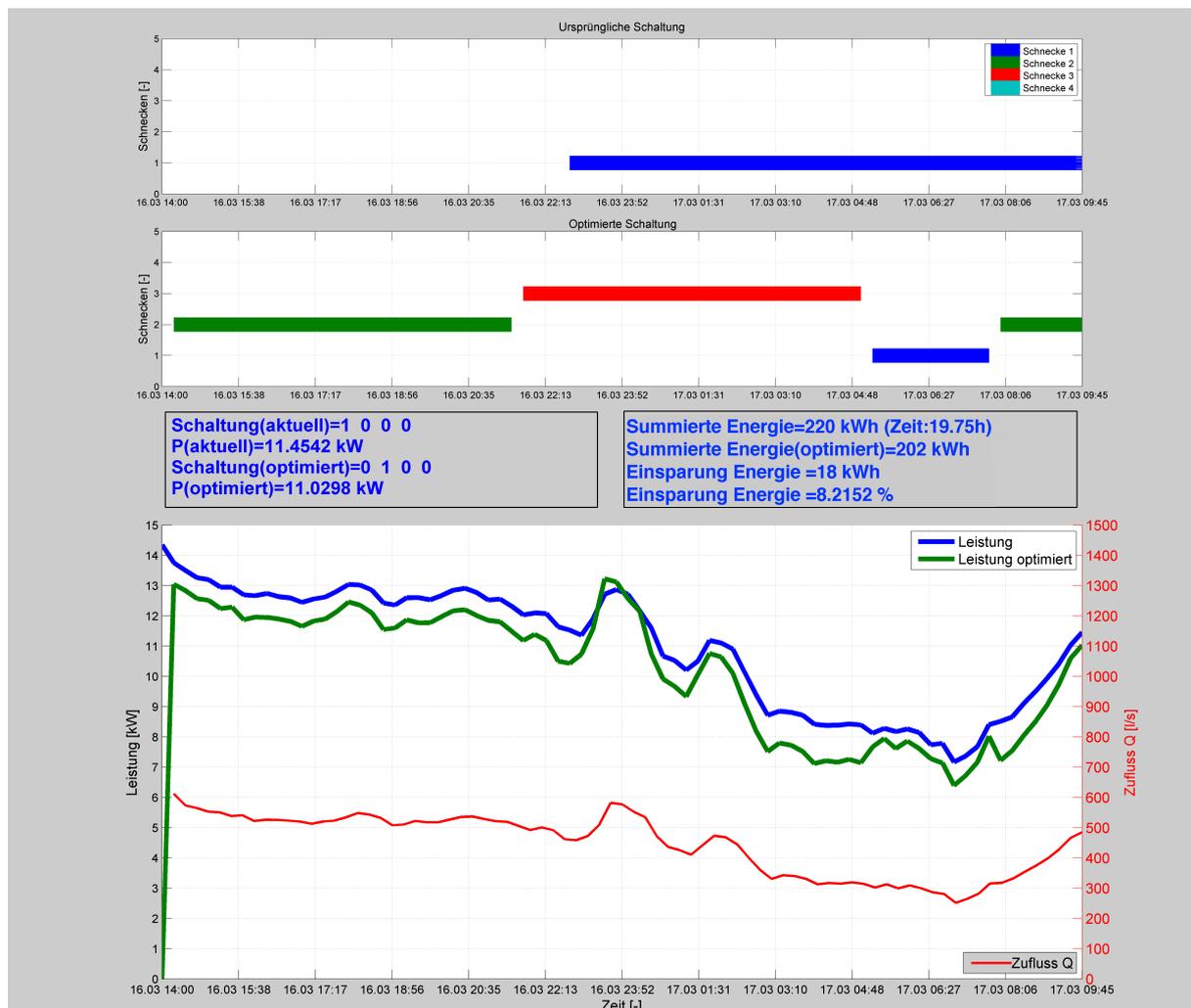


Abbildung 8. Resultat der fünften Stufe des Frameworks (Visualisierung)

Im oberen Bereich der Abbildung sind die Schaltungen der Schneckenpumpen über den ausgewählten Zeitraum ersichtlich. Zuerst findet sich die ursprüngliche Schaltung gemäss Eingangsdatenreihe. Darunter wird die Schaltung aus der dynamischen Optimierung angezeigt. Das Diagramm unten zeigt für diese beiden Schaltungen den Leistungsbedarf des Hebewerks, wobei die blaue Kurve die ursprüngliche und die grüne Kurve die optimierte Konfiguration aufzeigt. In Rot wird der Zufluss dargestellt.

Über dem Diagramm im mittleren Teil der Abbildung ist eine Effizienzanalyse ersichtlich. Links werden Schaltung und Leistung für den ursprünglichen und den optimierten Fall zum End-Zeitpunkt beschrieben. Im rechten Teil wird der summierte Energiebedarf über den gesamten Zeitraum für den ursprünglichen Fall mit dem summierten Energiebedarf für die optimierte Schaltung verglichen. Die Leistung wurde dabei in Energie umgerechnet.

4.1.5 Kosteneinsparung

In der untenstehenden Abbildung 9 werden die Resultate für die ganze Datenreihe aus dem Hebewerk der ARA Hard aufgezeigt.

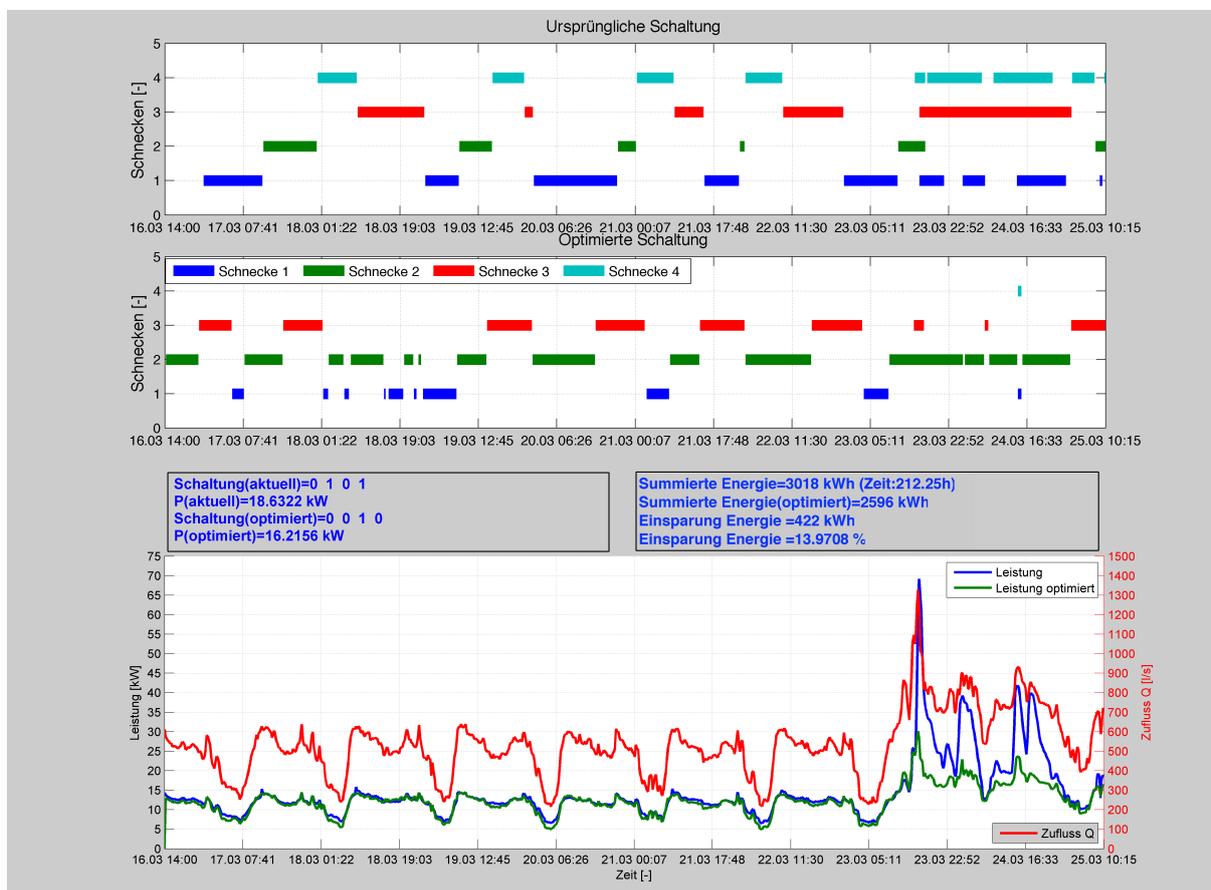


Abbildung 9. Effizienzanalyse der gesamten Datenreihe aus der ARA Hard

Daraus kann in einer Hochrechnung die Einsparung an Kosten pro Jahr abgeschätzt werden. Gemäss Berechnung im Anhang 2 folgt für das Hebewerk in der ARA Hard eine jährliche Einsparung von rund 2'600 CHF an Energiekosten, falls die Schneckenpumpen gemäss optimierter Schaltung gesteuert werden.

5 Diskussion

In Tabelle 1 sind die vier Schneckenpumpen des Hebewerkes der ARA Hard in Winterthur aufgeführt. Bei Trockenwetter beträgt der Zufluss rund 1000 l/s und der maximale Zufluss liegt bei 2000 l/s. Mit zwei Pumpen mit je 600 l/s und zwei Pumpen mit je 1000 l/s Fördermenge kann also auch der maximale Zufluss mit nur drei Pumpen bewältigt werden. Diese Redundanz im Pumpenbetrieb ist wichtig, damit auch bei Ausfall einer Pumpe der Betrieb sichergestellt werden kann.

Der Wirkungsgrad der Schneckenpumpen wird in Tabelle 1 mit einem Wert von 0.7 angenommen. Dies deckt sich mit Werten aus der Literatur (Kapitel 2.1.1.4). Weiter wird der Übersturzpunkt auf Höhe der Schnecken-Achse angenommen (Anhang 1). Diese Annahme kann weiter unten bestätigt werden. Bereits in Tabelle 1 kann anhand von der berechneten tatsächlichen Förderhöhe H_3 erkannt werden, dass die beiden grösseren Pumpen 2 und 3 weniger Leistung zum Betrieb brauchen. Obwohl die Pumpen 2 und 3 einen grösseren Durchmesser als die Pumpen 1 und 4 besitzen, ist durch die kürzere Länge ihre tatsächliche Förderhöhe etwas geringer und damit folgt nach Formel (1) auf Seite 4 ein kleinerer Leistungsbedarf.

5.1 Vergleich Kennlinie

Dieser Umstand zeigt sich auch in Abbildung 3, wo die Leistungskennlinien nach Theorie und Betriebsdaten verglichen werden. Der Vergleich der theoretischen Kennlinien (grüne Linien) zeigt, dass die Linien für Pumpen 2 und 3 stets tiefer liegen als die Linien für die kleineren Pumpen 1 und 4, womit der Leistungsbedarf geringer ausfällt. Daneben kann grundsätzlich gesagt werden, dass der Ansatz einer linearen Beziehung zwischen Leistung P und Zufluss Q gerechtfertigt ist. Die Datenpunkte in Blau liegen bei allen Pumpen auf einer Linie und werden durch die rote Linie gut linear angeglichen. Weiter zeigt der Vergleich zwischen der Kennlinie nach Theorie (grün) und der Kennlinie gemäss Betriebsdaten (rot), dass die beiden Ansätze bei beiden Schneckentypen in einen ähnlichen Bereich zu liegen kommen. Damit ist einerseits gezeigt, dass die beiden oben genannten Annahmen sinnvoll sind. Andererseits kann der Betreiber des Hebewerks davon ausgehen, dass die Schneckenpumpen noch in einem guten Zustand sind, die Verluste durch Verschleiss nicht zu gross sind und der Leistungsbedarf noch verhältnismässig ist. Falls die rote Kennlinie deutlich über der grünen Kurve liegen würde, wäre der Leistungsbedarf der Pumpe sehr viel höher als nach Theorie. Dann müssten weitere Untersuchungen zu den möglichen Verlusten und eine Sanierung der Schneckenpumpen in Betracht gezogen werden.

5.2 Optimierung Statisch

Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die Resultate der statischen Optimierung und zeigen das Schaltschema. Wie erwartet ist auf Abbildung 4 klar zu erkennen, dass bereits bei einem geringen Zufluss eine der beiden grösseren Pumpen 2 oder 3 eingesetzt werden soll, weil sie wie oben beschrieben den Leistungsbedarf minimieren. Ab 900 l/s vermag eine einzelne Pumpe alleine den Zufluss nicht mehr zu fördern und es muss vorzugsweise die zweite grosse Pumpe im Parallelbetrieb zugeschaltet werden. Ab 1800 l/s müssen drei Schneckenpumpen im Einsatz sein. Abbildung 5 zeigt das Schaltschema gemäss der angeglichenen Kennlinie an die Betriebsdaten. Es ist erkennbar, dass das Schema ähnlich bleibt. Bei einem Zu-

fluss von rund 420 l/s bis 500 l/s benötigt jedoch die Pumpe 1 weniger Leistung als Pumpe 2. Zudem sollen zwischen 1000 l/s und 1400 l/s Zufluss im Vergleich zu vorher Pumpe 1 und Pumpe 2 und nicht beide grossen Pumpen verwendet werden.

5.3 Optimierung Dynamisch

Bei der nächsten Stufe des Frameworks wird mit der theoretischen Leistungs-Kennlinie gerechnet. Der Grund dafür ist, dass man bei der Betrachtung eines geplanten Pumpwerks noch keine Betriebsdaten besitzt um die Kennlinie zu generieren. Auf der Abbildung 6 ist das Resultat der dynamischen Optimierung mit den Grenzen $BD_{\max} = 30$ h, $BDG_{\text{Limit}} = 50\%$ und $R_h = 10$ h ersichtlich. Das bedeutet, dass eine einzelne Schneckenpumpe höchstens 30 Stunden am Stück laufen darf. Wenn sie einmal abgeschaltet ist, dann darf sie während 10 Stunden nicht mehr angeschaltet werden. Zudem soll für eine gleichmässige Nutzung die Gesamt-Betriebsdauer jeder Schnecke nicht mehr als 50% von der Summe aller Gesamt-Betriebsdauern aller Schnecken betragen. Die Schalthäufigkeit wird mit diesen Eingabewerten also klein gehalten. Es kommt im betrachteten Zeitraum zu rund vier Schaltungen pro Tag. Anhand der Zufluss-Kurve ist während dem grössten Teil der Zeit ein Tagesgang ersichtlich, der sich täglich wiederholt. Der Zufluss beträgt in diesen sechs Tagen höchstens 600 l/s. Es handelt sich wohl um Trockenwetter-Tage und das Hebewerk kann das Wasser im Einzelbetrieb fördern. Wie erwartet sind die grossen Pumpen 2 und 3 in Betrieb und, um die Nebenbedingung zur Gesamtbetriebsdauer einzuhalten, wechseln sie sich ab. Gegen Schluss des Zeitraumes kommt ein Regenereignis. Der Zufluss steigt bis 1400 l/s an und es muss für kurze Zeit im Parallelbetrieb gefördert werden. Am 24.3.14 um etwa 9 Uhr zeigt sich, dass nicht immer eine Lösung der Optimierung gefunden werden kann, die alle Nebenbedingungen einhält. Man kann erkennen, dass Pumpe 2 abgeschaltet und gleich wieder angeschaltet wird, was gegen die Nebenbedingung zur Ruhezeit verstösst.

Für die Abbildung 7 wurden die Grenzen angepasst. Der Vergleich mit dem vorangehenden Resultat zeigt, dass nun die Schalthäufigkeit grösser sein darf; sie beträgt rund 8-10 Schaltungen pro Tag. Ansonsten zeigt sich ein ähnliches Bild. Es werden vor allem die grossen Pumpen 2 und 3 eingesetzt um den Leistungsbedarf des Hebewerks über diesen Zeitraum zu optimieren.

5.4 Effizienzanalyse

Abbildung 8 und Abbildung 9 lassen nun einen Vergleich des optimierten und des ursprünglichen Betriebes zu. Im oberen Bereich der Abbildung können zuerst die beiden Schaltungen verglichen werden. In dem vom Framework optimierten Betrieb ist die Schalthäufigkeit etwas höher. Die beiden Pumpen 2 und 3 sind dabei mehr im Einsatz als beim ursprünglichen Fall. Damit wird der Leistungsbedarf kleiner gehalten. Grundsätzlich sind im optimierten Fall die Betriebsdauern gleichmässig verteilt mit Ausnahme der Pumpe 4, welche kaum angeschaltet wird. Neben einer oberen Grenze für die Nebenbedingung zur Gesamtbetriebsdauer wäre also auch eine untere Grenze sinnvoll.

Vergleicht man nun den Leistungsbedarf der ursprünglichen und der optimierten Schaltung miteinander, dann fällt auf, dass zu Beginn (bei Trockenwetter) die Optimierung nur einen kleinen Vorteil bringt. Im Einzelbetrieb ist das Hebewerk der ARA Hard also gut eingestellt und wie bereits erwähnt, könnte einzig mit dem Einsatz der grösseren beiden Schneckenpumpen etwas Energie gespart werden. Anders sieht das gegen Ende des Zeitraumes aus,

wenn mehr Wasser zufließt und das Hebewerk im Parallelbetrieb fördert. Die Optimierung des Pumpenbetriebs bringt eine grössere Leistungseinsparung.

Die Effizienzanalyse im Mittelteil der Abbildung 9 kann verwendet werden um die oben erwähnten Erkenntnisse zusammenfassend zu betrachten. Über einen Zeitraum von rund neun Tagen verbrauchte das Hebewerk in der ARA Hard rund 3000 kWh Energie. Das Framework schlägt einen optimierten Betrieb vor, der etwas mehr als 400 kWh an Energie einsparen würde. Diese Einsparung entspricht auf ein Jahr hochgerechnet mit einem Energiepreis von 0.15 CHF/kWh nur rund 2600 CHF. Das ist zwar sehr wenig, andererseits konnte mit dem Framework fast 14% an Energie eingespart werden. Hinzu kommt, dass über den betrachteten Zeitraum vor allem Trockenwetter-Tage vorhanden waren. Es ist zu erwarten, dass über das ganze Jahr hinweg im Durchschnitt mehr Wasser zufließt und das Hebewerk öfters im Parallelbetrieb fördern müsste. Ein optimierter Betrieb des Hebewerks kann in diesem Falle noch mehr Energie einsparen.

6 Schlussfolgerungen

Schneckenpumpen werden in der Siedlungswasserwirtschaft vor allem in Hebe- und Zulaufwerken zu Abwasserreinigungsanlagen eingesetzt. Die parallele Anordnung mehrerer Pumpen lassen Spielraum für eine optimale Staffelung der Pumpen, sodass der Energiebedarf des Werkes und somit auch die Betriebskosten minimiert werden können. In der Arbeit wurde gezeigt, dass die lineare Beziehung zwischen dem Leistungsbedarf einer Schneckenpumpe und dem Zufluss eine charakteristische Grösse ist. Sie wird durch Parameter wie den Wirkungsgrad und die tatsächliche Förderhöhe beeinflusst.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Framework bietet dem Betreiber eines Hebewerks aus parallelen Schneckenpumpen einen Überblick über den Leistungsbedarf. Das statisch optimierte Schaltschema kann dem Betreiber aufzeigen, wann welche Schneckenpumpen angeschaltet werden sollen um den Leistungsbedarf zu minimieren. Mit der dynamischen Optimierung wird schliesslich auf einfache Weise das Potential der Optimierung aufgezeigt. Die Visualisierungen präsentieren diese Resultate und die Effizienz wird mit einfachen Mitteln analysiert.

Die einzelnen Stufen des Frameworks wurden in der Arbeit anhand eines Beispiels mit einem System von vier Schneckenpumpen und einer Datenreihe über einen kurzen Zeitraum vorgestellt. Das Framework ist jedoch so aufgebaut, dass sehr einfach die Anzahl und Art der Schneckenpumpen auf andere Systeme angepasst werden können, zudem sind auch längere Zeiträume berechenbar.

6.1 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurden nicht alle Ziele erreicht und es bleiben noch einige offene Fragen.

Auf der einen Seite kann die vorliegende Formulierung des Optimierungsproblems mit den Nebenbedingungen noch verbessert werden. Beispielsweise ist denkbar, dass bei einem Berechnungszeitraum von mehreren Monaten die Nebenbedingung zur Gesamtbetriebsdauer ein Problem darstellen wird, da sich die Prozentzahlen nach langer Laufzeit nur noch geringfügig ändern. Dieser Parameter müsste also periodisch auf Null gestellt werden, um so die Vergangenheit zu vergessen. Auch wäre eine Gewichtung der Nebenbedingungen praktisch, damit die bevorzugte Bedingung ganz sicher eingehalten wird, wenn keine Optimierung unter Berücksichtigung aller Grenzen möglich ist.

Auf der anderen Seite soll ein solches Framework nicht nur für Schneckenpumpen, sondern auch für die vorgestellten Pumpentypen wie Kreiselpumpen und Verdrängerpumpen, einsetzbar sein. Grundsätzlich bleiben die Prinzipien bei allen Pumpentypen gleich. Es müsste jedoch berücksichtigt werden, dass bei Kreiselpumpen im Gegensatz zu Schneckenpumpen die Förderhöhe abhängig von der Fördermenge ist. Bei Berücksichtigung aller Pumpentypen wäre - als weiterer Parameter zur Optimierung - der Pegel im Pumpensumpf denkbar. Das Volumen des Pumpensumpfes könnte als Speicher genutzt werden und so die Fördermenge ausgeglichen werden.

Schliesslich bleibt zu sagen, dass auch die Berücksichtigung der Zukunft interessant wäre. Während das in dieser Arbeit vorgestellte Framework den Betrieb nur basierend auf der vergangenen Zeit optimiert, wäre es sinnvoll, von einem Modell-Tagesgang auszugehen und den Betrieb mit dieser zusätzlichen Information zu optimieren.

7 Literatur

Broll, J. (2013): Energetische Optimierung und Automatisierung von Kreiselpumpen im Parallelbetrieb; DWA Gemeinschaftstagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“; Fulda

Bundesamt für Energie (2014): Energie in Kläranlagen; <http://www.bfe.admin.ch/infrastruktur-anlagen/01076/>, zuletzt am 11.5.2014

KSB (2010): Pumpenregelung / Anlagenautomation; KSB Know-how, Band 4; KSB Aktiengesellschaft; Frankenthal

Kantert, P. (2008): Praxishandbuch Schneckenpumpe; F. Hirthammer Verlag GmbH; Oberhaching/München

Müller, E.; Kobel, B.; Schmid, F. (2008): Handbuch Energie in ARA; Bundesamt für Energie; Schweiz

Anhang

Anhang 1: Berechnung des Übersturzpunktes

Zur Berechnung des Übersturzpunktes wird die Annahme gemacht, dass er sich auf Höhe der Achse des Zentrumsrohres befindet (rote Linie in Abbildung 10). au

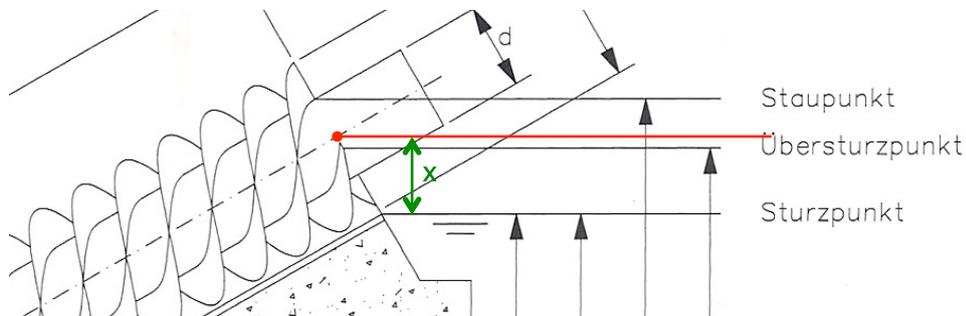


Abbildung 10. Detailansicht zur Berechnung des Übersturzpunktes

Damit folgt aus der Geometrie folgende Formel für den Übersturzpunkt:

$$\text{ÜSP} = \text{Sturzpunkt} + x = \text{Sturzpunkt} + \cos \beta \cdot \frac{D}{2} \quad (5)$$

ÜSP = Übersturzpunkt [m.ü.M.]

β = Aufstellwinkel [°]

D = Durchmesser Schnecke [m]

Anhang 2: Berechnung der jährlichen Kosteneinsparung

Die jährliche Kosteneinsparung errechnet sich mit folgender Formel. Die Daten stammen dabei aus Abbildung 9.

$$\Delta K = \Delta E \cdot \frac{8760 \text{ h}}{t} \cdot p = 422 \text{ kWh} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{212.25 \text{ h}} \cdot 0.15 \text{ CHF/kWh} \approx 2600 \text{ CHF} \quad (6)$$

ΔK = Jährliche Kosteneinsparung [CHF]

ΔE = Einsparung Energie in Zeitraum t [kWh]

t = Zeitraum [h]

p = Energiepreis [CHF/kWh]