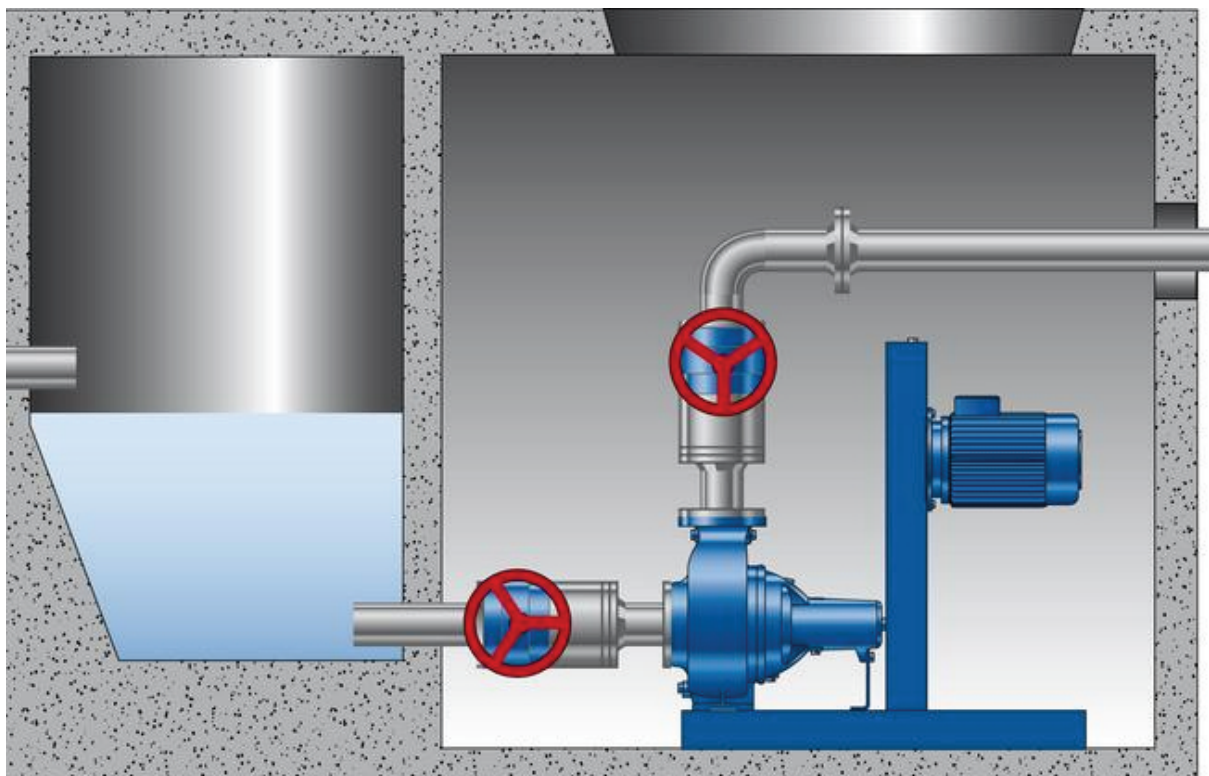


P4 - 10054

Energieeffizienz von Abwasserpumpen

Projektbericht



Projektteam	Simon Birkenstock	
	Lucas Fuchs	
	Lukas Iseli	
	Henri Kappenthuler	
	Andreas Bucher	
Auftraggeber	ERZ	Grundfos
	Roger Künzli	Herbert Hirsiger
		Stefan Schläpfer
Projektstart	14.03.2014	
Projektende	19.06.2014	

1 Management Summary

1.1 Ausgangslage

In der Abwasseraufbereitung werden viele Pumpen eingesetzt, die einen wesentlichen Anteil des Gesamtstromverbrauches der Schweiz ausmachen. ERZ Entsorgung + Recycling Zürich hat die Fachhochschule Nordwestschweiz damit beauftragt, an Pumpen, die einerseits typisch sind und andererseits Potential zu Verbesserungen haben, Untersuchungen vorzunehmen. Die durchgeführten Volumenstrom-, Druck- und Leistungsmessungen sollen auf Plausibilität geprüft und mit den Auslegungsdaten verglichen werden. Es soll eine Übersicht über die gemessenen Pumpen und deren Verbesserungspotential erstellt werden.

Ein Vorgängerprojekt entwickelte bereits ein Tool zur Analyse der Lauf- und Stillstandzeiten von ausgewählten Pumpen der ERZ.

1.2 Vorgehensweise

ERZ hat im Vorfeld zum Projekt vier Pumpstationen ausgewählt, die dem Projektteam für praktische Messungen zur Verfügung gestellt wurden. An allen vier Pumpstationen wurden Volumenstrom-, Druck- und Leistungsmessungen während dem Pumpbetrieb durchgeführt.

Die Messungen in den Pumpstationen wurden mit den Daten des Vorgängerprojektes, Pumpenkenndaten und Fremdstudien verglichen. Dies erlaubt, eine Aussage über die Effizienz der einzelnen Pumpen zu machen.

1.3 Hauptergebnisse

Die Untersuchungen der vier Pumpstationen ergaben, dass nicht alle Pumpen am geplanten Betriebspunkt betrieben werden. Aus den Berechnungen der spezifischen Energie kann ein Einsparpotential von bis zu 129% ausgemacht werden.

Bei Reduktion der Fliessgeschwindigkeiten sind mindestens 2.6% Energieeinsparung möglich. Die Reduktion der Fliessgeschwindigkeit würde längere Pumpzeiten bedeuten, wodurch die Pumpen weniger oft eingeschaltet werden müssten. Dies hätte wiederum einen positiven Effekt auf den Energieverbrauch durch die Start-/Stopp-Phasen.

1.4 Ausblick

Um ein genaues Bild der vorhandenen Energiesparpotentiale aufzuzeigen, können unsere Messmethoden und Berechnungen auf weitere Pumpstationen angewandt werden. Falls Bedarf zur Handlung besteht kann bei den ineffizientesten Pumpen begonnen werden Massnahmen umzusetzen. Bei Pumpstationen mit hohem Energieeinsparpotential könnte es sich lohnen nebst dem optimalen Betriebspunkt der Pumpen auch deren Steuerung zu Untersuchen. Einerseits um Verluste durch zu hohe Fliessgeschwindigkeiten zu reduzieren und andererseits um die Ein- und Ausschalt-Vorgänge zu minimieren.

Inhalt

1	Management Summary	2
1.1	Ausgangslage.....	2
1.2	Vorgehensweise	2
1.3	Hauptergebnisse	2
1.4	Ausblick	2
2	Einleitung.....	5
3	Firmenportraits.....	6
3.1	ERZ – Entsorgung + Recycling Zürich.....	6
3.2	Grundfos Schweiz.....	6
4	Datenerhebung.....	7
5	Methoden	7
5.1	Einarbeitung in das Projekt	7
5.2	Projektspezifische Methoden	7
5.3	Beschreibung der Messtechnik.....	8
5.4	Begriffsdefinition.....	10
6	Übersicht der vier untersuchten Pumpstationen	11
6.1	Kurzbeschreibung der Pumpstationen.....	12
7	Spezifische Energie	13
8	Jahresvergleich der Pumpstationen.....	14
8.1	Bellevue.....	14
8.2	Wollishofen	15
8.2.1	Übersicht Schaltungen Bellevue 2012	16
9	Pumpenkennlinien und Q-H Diagramme.....	17
9.1	Q-H Diagramm der Pumpstation Bellevue.....	18
9.2	Q-H Diagramm der Pumpstation Giesshübel	19
9.3	Q-H Diagramm der Pumpstation Wollishofen.....	20
9.4	Q-H Diagramm der Pumpstation Zürich-Horn	21
10	Übersicht und Vergleich mit Empfehlungen des BFE.....	22
11	Analyse Start-/Stopp-Phasen.....	24
12	Vergleich der geplanten und gemessenen Daten.....	27
12.1	Wirkungsgrade der einzelnen Pumpen.....	27
12.2	Betrieb der Anlagen anhand spezifischer Energie	28

12.3	Förderhöhe und Volumenstrom.....	29
13	Kritische Würdigung der Daten	30
13.1	Volumenstrommessung	30
13.2	Druckmessung.....	30
13.3	Leistungsmessung	31
13.4	Berechnungen	31
13.5	Fazit	31
14	Schlussfolgerungen & Empfehlungen.....	32
15	Reflexion und Ausblick.....	33
15.1	Reflexion.....	33
15.2	Ausblick	33
16	Ehrlichkeitserklärung	34
17	Verzeichnisse	35
17.1	Abbildungen	35
17.2	Diagramme.....	35
17.3	Tabellen	35
18	Anhang.....	37
18.1	Glossar.....	37
18.2	Berechnungen Volumen- und Druckmessungen.....	38
18.3	Berechnung elektrische Messungen	43
18.4	Übersicht Schaltungen pro Pumpstation	45
18.4.1	Übersicht Schaltungen Bellevue 2012	45
18.4.2	Übersicht Schaltungen Bellevue 2013	45
18.5	Verwendete Messgeräte	47
18.6	Projektskizze.....	48
18.7	Projektauftrag	48
18.8	Datenverzeichnis CD.....	48

2 Einleitung

Der Stromverbrauch von Pumpen macht einen wesentlichen Anteil des Gesamtstromverbrauches der Schweiz aus. In der Abwasseraufbereitung sind viele Pumpen im Einsatz, wodurch der Energieverbrauch entsprechend hoch ist. Beim Betrieb von Abwasserpumpen variieren die Fördermengen stark, da diese meistens vom Wetter abhängig sind. Die Pumpen müssen bei massiven Niederschlägen grosse Wassermengen bewältigen können, was die Dimensionierung der Pumpen entsprechend schwierig gestaltet. Die teilweise überdimensionierten Pumpen machen eine Untersuchung des Energiespar- und Verbesserungspotentials lohnenswert. Wird eine Pumpe nicht im optimalen Bereich betrieben, verschlechtert sich deren Wirkungsgrad. Dies kann der Fall sein, wenn nach der Auslegung und Errichtung der Pumpstationen bauliche Veränderungen vorgenommen wurden oder auch durch Verschleiss der Schaufelräder und Ablagerungen in den Rohrleitungen.

In einem ersten Studienprojekt wurde der Betrieb der Abwasserpumpen anhand von vier Pumpstationen der ERZ analysiert. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Ein- und Ausschaltzeiten der Pumpen gelegt und ein Programm entwickelt, dass aus den Rohdaten der Pumpenüberwachung die Betriebs- und Stillstandzeiten der Pumpen berechnet. Daraus konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die untersuchten Abwasserpumpen am häufigsten 1 bis 5 Minuten pro Schaltung im Betrieb sind. Ausserdem wurde der theoretische Betriebspunkt der Pumpen ermittelt. Das Studienprojekt kam zum Schluss, dass für eine Aussage über den Wirkungsgrad der Pumpen Messungen vor Ort durchgeführt werden müssen.

Lieferobjekte dieser Projektarbeit sind grafisch aufbereitete Messdaten der einzelnen Pumpen und Aussagen über deren Energieeffizienz. Zusätzlich werden die gemessenen Daten mit den Auslegungsdaten und den idealen Kennwerten verglichen. Des Weiteren werden Richtlinien und Empfehlungen des BFE berücksichtigt und eine Aussage über das Erreichen dieser Werte gemacht. Bei zwei Pumpstationen werden zudem die gemessenen Werte mit dem Vorgängerprojekt verglichen.

3 Firmenportraits

3.1 ERZ – Entsorgung + Recycling Zürich

ERZ Entsorgung + Recycling Zürich entsorgt und verwertet Abfall, erzeugt Strom und Wärme und hält das Wasser in der Stadt, genauso wie den öffentlichen Grund, private Strassen und Betriebs- und Festareale sauber. ERZ ist massgeblich daran beteiligt, dass die Stadt Zürich ihre Energie- und Umweltziele erreicht. Mit rund 900 Mitarbeitenden ist ERZ Entsorgung + Recycling Zürich die grösste Dienstabteilung des Tiefbau- und Entsorgungsdepartements der Stadt Zürich



Abbildung 1: Logo ERZ

3.2 Grundfos Schweiz

Grundfos ist einer der führenden Anbieter für Pumpen und Pumpensysteme weltweit. Das Unternehmen wurde 1945 unter dem Namen „Bjerringbro Pressestøberi og Maskinfabrik“ in Dänemark gegründet und 1967 in Grundfos umbenannt. Heute ist Grundfos mit weltweit mehr als 80 Gesellschaften vertreten und beschäftigt rund 17'000 Mitarbeiter.

Die Grundfos Pumpen AG wurde 1978 mit dem Firmensitz in Dietlikon (ZH) gegründet und beschäftigt heute fast 70 Mitarbeiter.



Abbildung 2: Logo Grundfos

4 Datenerhebung

Für das Projekt standen verschiedene Quellen zur Verfügung:

- Das Pumpenhandbuch von Grundfos
- Das Vorprojekt P3-10049 der FHNW
- Die Funktionsbeschreibungen der untersuchten Pumpstationen
- Fremdstudien
 - “Entwicklung von Sparmassnahmen, Optimierungsmöglichkeiten oder neuen energiesparenden Techniken bzw. Konzeptionen der bzw. in der Kanalisation”, FiW an der RWTH Aachen, März 2013
 - “Der Weg energetisch optimierten Pumpwerken”, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen, Mai 2013
- Eigens durchgeführte Messungen in den vier Pumpstationen

5 Methoden

5.1 Einarbeitung in das Projekt

Die Einarbeitung in das Projekt und die Thematik Abwasserpumpen erfolgte mit einer Projektskizze und dem letztjährigen Projekt P3-10049. Das Wissen über die Pumpentechnik wurde durch weitere Literatur und eine eintägige Einführung durch den Grundfos Mitarbeiter Herbert Hirsiger gefestigt.

Als Ergänzung wurde ein Besuch beim Pumpenspezialisten Aran AG in Lausen organisiert. Weitere Fragen und Unklarheiten konnten dort direkt geklärt werden. Mit einer Besichtigung der vier ausgewählten Pumpstationen konnte ein Überblick über die Messmöglichkeiten an den Pumpen gewonnen werden.

Mit der Erarbeitung des Projektauftrages wurden die Rahmenbedingungen festgelegt und die Projektphasen mit den einzelnen Arbeitspaketgruppen sowie der Projektablauf und der Zeitplan erstellt. Als Werkzeug für die Planung diente Microsoft Excel. Der informative Austausch unter den Projektmitarbeitern erfolgte über Protokolle und wöchentliche Sitzungen. Der Projektcoach, Klaus Eisele, wurde mittels Statusberichten und Anwesenheit an Projektsitzungen über den momentanen Stand der Projektarbeit informiert. Der Auftraggeber nach Bedarf per E-Mail.

5.2 Projektspezifische Methoden

Die Messgeräte wurden durch das Institut für Thermo- und Fluid-Engineering und das Institut für Aerosol- und Sensortechnik zur Verfügung gestellt. Eine Einarbeitung in die Funktion der Geräte wurde durch die Projektmitarbeiter selber vorgenommen.

Die Auslegung der Pumpen wurde mit Funktionsbeschrieben der Pumpstationen und den spezifischen Pumpenkenndaten zusammengetragen. Die durch die ERZ zur Verfügung gestellten und durch das Projektteam gemessenen Rohdaten wurden mit Hilfe des Tools des Vorprojektes und eines eigen erstellten Excel-Tools aufgearbeitet und visualisiert. Ebenso wurden die Pumpenkennlinien zur Veranschaulichung der Betriebsdaten modifiziert und finden sich im Kapitel 9.

5.3 Beschreibung der Messtechnik

5.3.1 Volumenstrommessung

Die Volumenstrommessung erfolgte mit dem Ultraschallmessgerät „Ultrasonic 93“ der Firma Endress+Hauser. Zwei Ultraschall Messsensoren werden wenn möglich, an einer Vertikalen stelle an dem zu messenden Rohr montiert. Der Abstand der Sensoren steht in einem vorgegebenen Verhältnis zum Durchmesser und wird mithilfe einer Lochlehre sichergestellt. Die Daten werden an eine Recheneinheit mit einem kleinen Display weitergeleitet. Vor der Messung müssen folgende Parameter an der Recheneinheit eingegeben werden: Rohr Innen- und Aussen-Durchmesser, Material des Rohres sowie Temperatur und Dichte des Fluides.

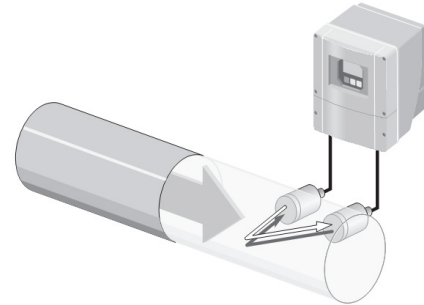


Abbildung 3: Schema Ultrasonic 93

Die Ultraschall-Durchflussmessung macht sich zunutze, dass die Laufzeit eines Ultraschallpulses zwischen Sender und Empfänger in der Flüssigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist. Läuft der Puls mit der Strömung, so ist die Laufzeit etwas kürzer als bei ruhendem Fluid.¹

Eine zeitliche Aufzeichnung war aus technischen Gründen nicht möglich, die Werte mussten manuell abgelesen werden.

5.3.2 Elektrische Leistungsmessung

Um den Wirkungsgrad der Pumpen zu bestimmen ist die elektrische Leistung P_{el} eine wichtige Grösse. Nebst der aufgenommenen Leistung im stationären Betrieb sind auch die Leistung beim Starten und Stoppen der Pumpen interessant. Beim Starten und teilweise auch beim Stoppen der Pumpen wird kurzfristig eine grössere Leistung benötigt, da die Pumpen erst auf Vollast hochfahren und dann für den stationären Betrieb mittels einem Frequenzumrichter auf eine niedrigere Drehzahl gedrosselt werden.



Abbildung 4: Leistungsmessung

¹ FHNW, mstU_FS14_9.5_Durchflussmessung, 2014

Messschaltung:

Bei allen Pumpstationen sind Elektroschaltschränke vorhanden, an welchen die elektrischen Messungen mit dem Messgerät Chauvin Arnoux C.A 8335 durchgeführt wurden. Zur Durchführung der Leistungsmessung wird der Strom mit Stromzangen an allen drei Phasen gemessen, die Spannung jeweils zwischen den Phasen. Mit dem beschriebenen Messgerät sind weitere Installationen oder Berechnungen nicht nötig. Der $\cos(\phi)$ und die verschiedenen Leistungen können direkt ausgelesen werden.

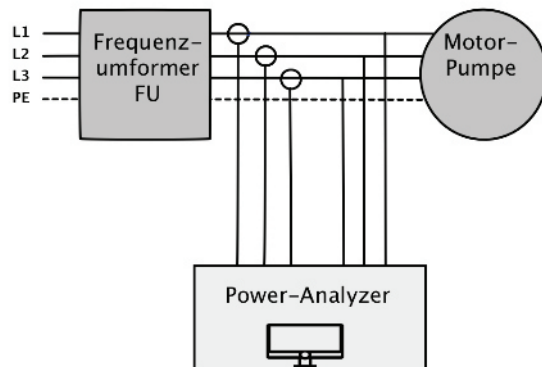


Abbildung 5: Schema Leistungsmessung

Mit der Computersoftware PAT2 wurden die Daten vom Messgerät ausgelesen und für jede Pumpe in eine separate Excel Datei exportiert. Dank der Aufzeichnung über eine gesamte Schaltung mit Start- und Stopp-Phasen konnten interessante Zusatzinformationen gewonnen werden. Die erfassten Daten sind im Anhang auf der CD abgespeichert.

5.3.3 Druckmessung

Die Druckmessung fand mit einem piezoresistiven Drucksensor der Firma Keller AG statt. Gemessen wurde der statische Druck. Die Messergebnisse werden per USB auf ein Notebook übertragen und lassen sich in Echtzeit darstellen bzw. speichern. Die Abtastrate des Messgerätes beträgt 6 Messungen pro Sekunden bei einer Messunsicherheit von 0.05 % auf den gesamten Druckbereich. Die Datentabelle kann zur Weiterverarbeitung in eine Excel Datei übertragen werden. Wo möglich wurde der Druck vor und nach der Pumpe gemessen. Falls vor der Pumpe keine für die Druckmessung erforderliche Bohrung vorhanden war, wurde die Druckdifferenz anhand des Drucks der Druckseite, dem statischen Druck in Abhängigkeit zur Höhe des Füllstandes im Pumpensumpf und der Fließgeschwindigkeit des Fluides berechnet.

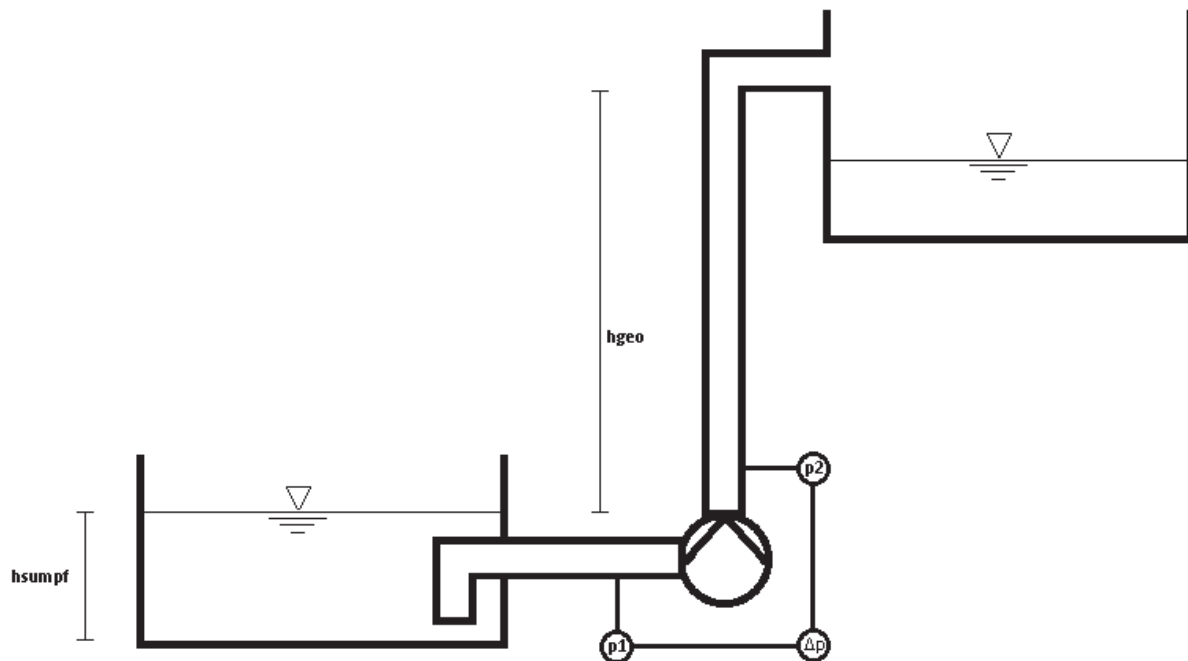


Abbildung 6: Schema Druckmessung

5.3.4 Datenerfassung und Berechnungen

Die gemessenen Werte konnten alle für weitere Berechnungen in Excel Dateien exportiert werden. Mit dem gemessenen Druck und des Pegelstandes im Pumpensumpf konnte die von der Pumpe geleistete Förderhöhe berechnet werden. Mit der Druckdifferenz und dem gemessenen Volumenstrom wurde die hydraulische Leistung der Pumpen ermittelt. Die hydraulische Leistung besteht ausschliesslich aus gemessenen Werten und gegebenen Umweltkonstanten. Sie zeigt die effektiv benötigte Leistung zur Förderung des Fluides mit einer gewissen Unsicherheit auf („Kapitel 13 Kritische Würdigung“). Aus der hydraulischen Leistung und der gemessenen elektrischen Leistung konnte der Totale- bzw. der Pumpen-Wirkungsgrad ermittelt werden. Ausserdem war die aus dem Druck ermittelte Höhe wichtig für den Eintrag des Betriebspunktes der Pumpen ins Q-H-Diagramm und zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs der Pumpen.

Der gemessene Volumenstrom wurde für die Leistungsberechnung, den Eintrag des Betriebspunktes in das Q-H-Diagramm und für die Fließgeschwindigkeitsberechnung benötigt.

5.4 Begriffsdefinition

Um den Fachbericht für ein breites Publikum verständlich zu formulieren, enthält er ein Glossar mit den wichtigsten Begriffsdefinitionen. Dieses befindet sich im Anhang unter dem Kapitel „18.1 Glossar“.

6 Übersicht der vier untersuchten Pumpstationen

Der folgende Kartenausschnitt zeigt die Standorte der vier untersuchten Pumpstationen.



Abbildung 7: Karte Pumpstationen

In folgender Tabelle sind die eingesetzten Pumpentypen und deren Kenndaten aufgelistet.

	Bellevue	Giesshübel	Wollishofen	Zürich-Horn
Anzahl Pumpen	3 Stück	3 Stück	4 Stück	3 Stück
Hersteller Pumpe	Häny	Häny	Häny	Flygt
Modell Pumpe	2208-250/200 Form 7	2206-GC Form 7	2225-HB Form 8	NP 3202.090
Motorenleistung	11 kW	13 kW	110 kW	22 kW
Fördermenge				
Typenschild	110 l/s	100 l/s	260 l/s	120 l/s
Fördermenge				
Steuerungssoftware	110 l/s	112 l/s	250 l/s	130 l/s
Förderhöhe Auslegung	6 m	5.75 m	28 m	8.3 m
Förderhöhe laut Plan	6.8 m	5.5 m	28 m	8.1 m
WKG laut Kennlinie	76 %	45 %	76 %	44 %
Umdrehungen /min	1445 U/min	1440 U/min	1480 U/min	970 U/min
Ansaugung	400.65 müM	-	401 müM	401.69 müM
Entleerung	407.45 müM	-	429 müM	409.79 müM

Tabelle 1: Übersicht Pumpstationen

6.1 Kurzbeschreibung der Pumpstationen

6.1.1 Bellevue

Mittels 3 trocken aufgestellten Abwasserpumpen wird das anfallende Regenwasser aus einem Regenüberlaufbecken gepumpt. Die Steuerung der Pumpen erfolgt über eine Drucksonde. Um eine gleichmässige Abnutzung der Pumpen zu gewährleisten, wird nach jeder Schaltung die Pumpenreihenfolge geändert.

6.1.2 Giesshübel

Die Regen- und Grundwasser-Pumpstation Giesshübel entwässert eine wichtige Unterführung in der Stadt Zürich. Zum Einsatz kommen Pumpen zur Trockenaufstellung. Zur Pumpstation Giesshübel existiert altersbedingt kein Funktionsbeschreibung.

6.1.3 Wollishofen

Mittels 4 trocken aufgestellten Abwasserpumpen wird nach dem „First In – First Out“ Prinzip das Abwasser aus einem Sammelraum abgepumpt. Bei höherem Wasserstand werden die Pumpen gleichzeitig betrieben.

6.1.4 Zürich-Horn

Das Mischwasserpumpwerk Zürich-Horn entwässert ein Einzugsgebiet von ca. 36.6 ha. Drei nassaufgestellte Abwasserpumpen fördern das Wasser vom Pumpensumpf in einen Überlaufschacht, welcher das Abwasser in einer Freispiegelleitung an der Dufourstrasse ableitet. Die drei Pumpen können gleichzeitig betrieben werden.

6.1.5 Schematische Darstellung

Folgendes Bild zeigt die Schematische Darstellung einer Pumpstation mit einer Pumpe.

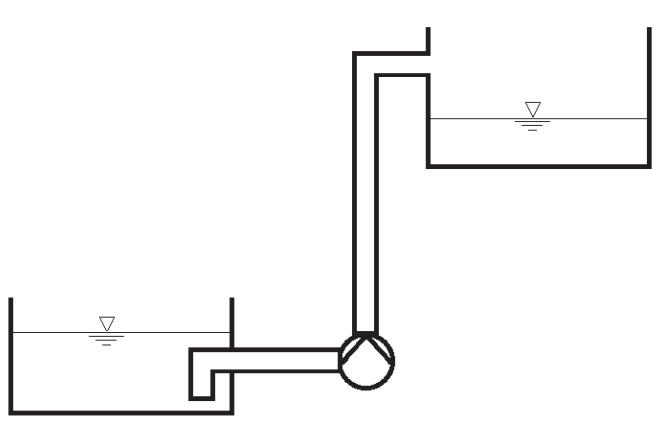


Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Pumpstation

7 Spezifische Energie

Die Spezifische Energie stellt die jährlich aufgewendete elektrische Energie mit der geförderten Fluidmenge und der Förderhöhe ins Verhältnis. Für alle gemessenen Pumpen wurde die spezifische Energie berechnet und in folgendem Diagramm abgebildet.

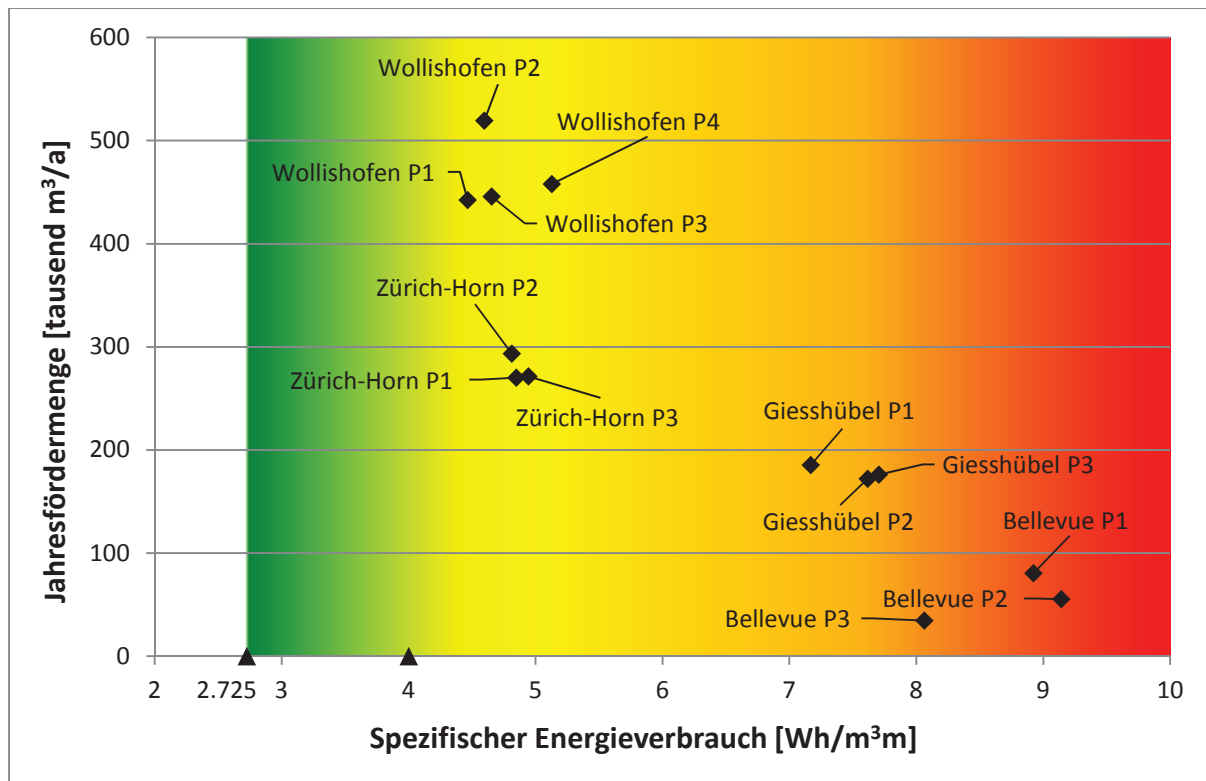


Diagramm 1: Spezifischer Energieverbrauch

Die theoretisch minimale Energie, die notwendig ist um einen Kubikmeter Wasser um einen Meter anzuheben, ist 2.725 Wh. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 100%. Das Bundesamt für Energie publizierte im Jahre 2008 einen Richtwert von 4 Wh/m³m als erreichbares Optimum.

Untersuchungen in der Schweiz zeigten, dass für Motor-Pumpe-Systeme Wirkungsgrade von 30% bis 75% möglich sind, dies entspricht einem Energiebedarf von 3.6 Wh/m³m bis 9.0 Wh/m³m.²

Von den untersuchten Pumpen liegen alle ungefähr in diesem Wertebereich. Energiesparpotentiale zeigen sich vor allem bei den älteren und kleineren (d.h. mit geringer Jahresfördermenge) Pumpen. Bei diesen Pumpen wäre eine Halbierung des Energieverbrauches theoretisch möglich. Als Beispiel benötigt die Pumpe 2 der Station Bellevue 13kW elektrische Leistung um 4kW hydraulische Leistung zu liefern. Die 9kW Differenz entsprechen den gesamten Verlusten in diesem Pumpenstrang. Die Berechnungsdetails finden sich im Anhang unter dem Kapitel „18.2. Berechnungen“.

² „Entwicklung von Sparmaßnahmen, Optimierungsmöglichkeiten oder neuen energiesparenden Techniken bzw. Konzeptionen der bzw. in der Kanalisation“, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW), März 2013

8 Jahresvergleich der Pumpstationen

An den untersuchten Stationen, welche sich mit jenen des Vorprojektes überschneiden, wurden mit den Daten der Jahre 2012 und 2013 ein Vergleich vorgenommen. Dies erlaubte eine Aussage über die Abhängigkeit der Laufzeit von meteorologischen Gegebenheiten.

8.1 Bellevue

In den folgenden Diagrammen werden die Laufzeiten der Pumpstation Bellevue der Jahre 2012 und 2013 nach Häufigkeit abgebildet.

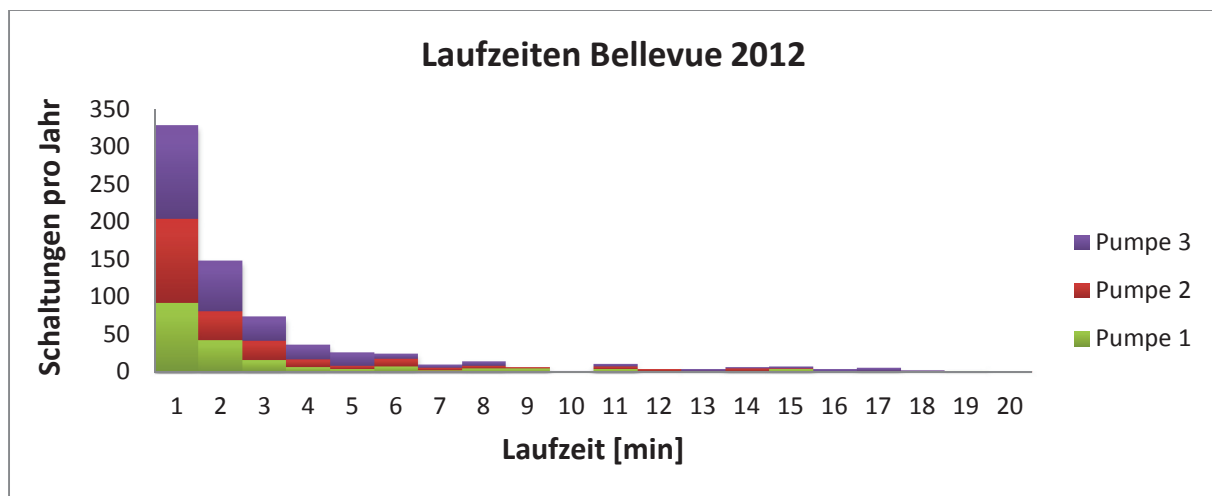


Diagramm 2: Laufzeiten Bellevue 2012

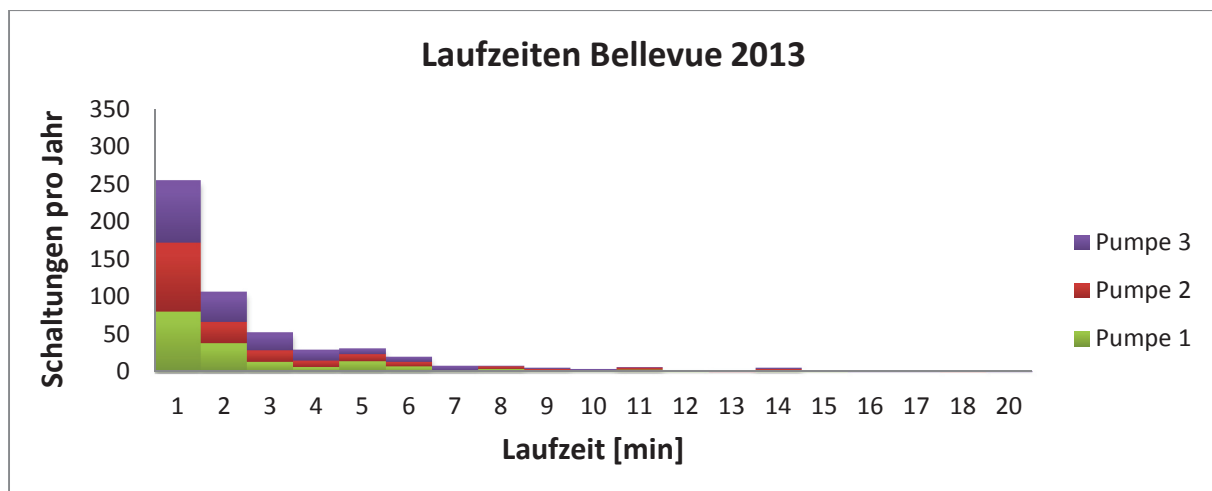


Diagramm 3: Laufzeiten Bellevue 2013

Zu erkennen ist in beiden Jahren die häufigste Laufzeit von einer Minute. Im Jahr 2012 gab es insgesamt mehr Schaltungen als im Jahr 2013. Während einer längeren Regenperiode Ende Oktober, anfangs November 2013 wurde eine Laufzeit von knapp 100 Stunden gemessen. Aus Gründen der Übersicht bilden die erzeugten Histogramme nur die häufigsten, kurzen Laufzeiten ab.

8.2 Wollishofen

Die Abwasserpumpen der Station Wollishofen fördern vor allem Schmutzwasser. Die anfallenden Abwässer fallen relativ kontinuierlich an. In den folgenden Diagrammen werden die Laufzeiten der Pumpstation Wollishofen der Jahre 2012 und 2013 nach Häufigkeit abgebildet.

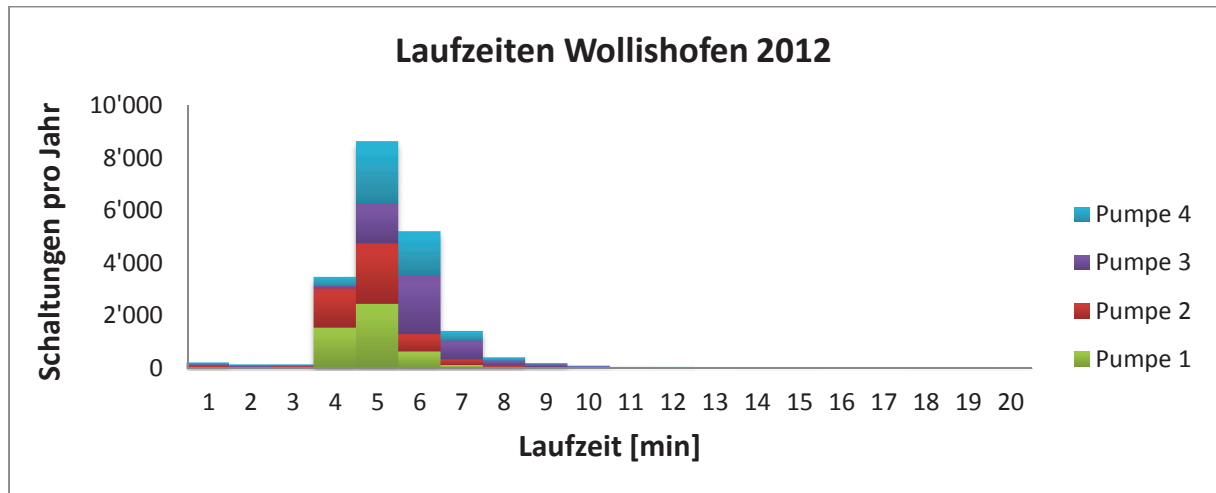


Diagramm 4: Laufzeiten Wollishofen 2012

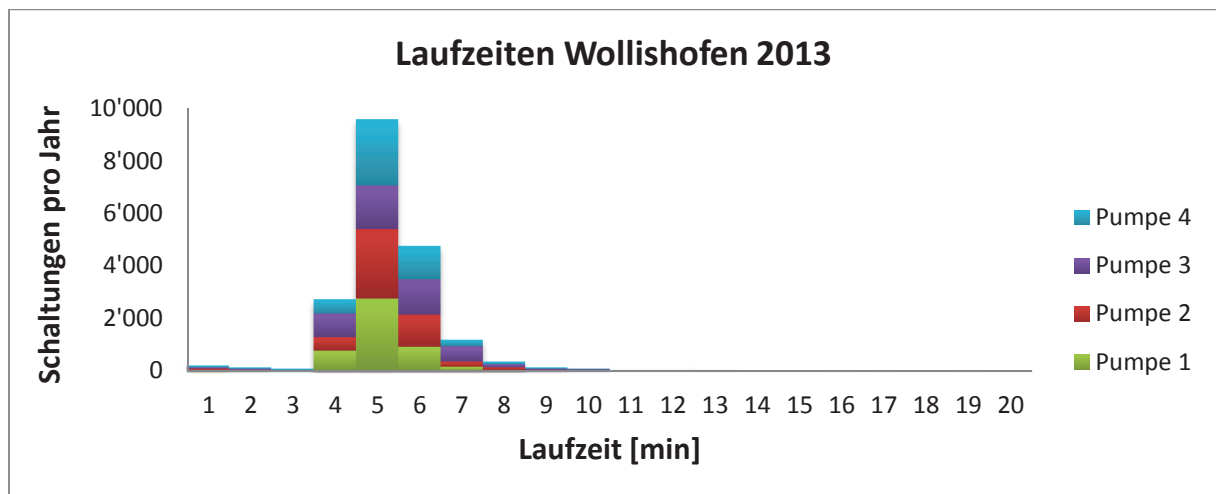


Diagramm 5: Laufzeiten Wollishofen 2013

Auf den Histogrammen sind lediglich die kurzen Laufzeiten abgebildet. Es gibt jeweils noch einzelne Laufzeiten von bis zu 70 Stunden im Jahr 2012 und bis zu 100 Stunden im Jahr 2013. Die Laufzeiten der Jahre 2012 und 2013 haben die grösste Häufigkeit bei fünf Minuten. Die Histogramme der beiden Jahre sind sehr ähnlich, die Abweichungen sind auf das regenreiche Jahr 2012 zurückzuführen. Bei höherer Niederschlagsmenge erhöht sich automatisch auch der Mittelwert der Laufzeiten.

8.2.1 Übersicht Schaltungen Bellevue 2012

Die folgende Tabelle zeigt die Lauf- und Stillstandzeiten aller Pumpen der Pumpstationen Bellevue und Wollishofen in den Jahren 2012 und 2013. Eine detaillierte Tabelle pro Pumpstation befindet sich im Anhang Kapitel „18.4 Übersicht Schaltungen pro Pumpstation“

	Bellevue 2012	Bellevue 2013	Wollishofen 2012	Wollishofen 2013
Schaltungen pro Jahr	865	631	20806	19759
Laufzeit [Min]	25807	34421	133590	124042
Stillstandzeit [Min]	1550246	1542379	1974570	1978358
Häufigste Laufzeit [Min]	1	1	5.25	5
Mittlere Laufzeit [Min]	31.32	54.44	6.42	6.28
Mittlere Stillstandzeit [Min]	1808	2433	95	100
Maximale Laufzeit [Min]	817	6140	1513	4454
Maximale Stillstandzeit [Min]	57592	57619	13280	7623

Tabelle 2: Übersicht Schaltungen der Pumpen

Insgesamt unterscheiden sich die Schaltzeiten der Pumpen in den beiden betrachteten Jahren nur mässig. Wichtig ist die Erkenntnis, dass die Stillstandzeiten der Pumpen eine sehr grosse Streuung haben. Die berechnete mittlere Stillstandzeit der Pumpstation Bellevue ist recht lang, dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Pumpstation lediglich Regenwasser und wenig Grundwasser fördert und die Pumpen somit an trockenen Tagen nicht im Einsatz sind. Die mittleren Stillstandzeiten der Pumpstation Wollishofen sind relativ kurz, dies, weil die Pumpstation vor allem grosse Mengen Abwasser fördert und das Regenwasser nur einen kleinen Anteil ausmacht.

Anhand der Tabelle 2 wird ersichtlich, dass die Anzahl der Minuten in denen mehrere Pumpen eingeschaltet sind im Jahr 2012 einen Prozentual grösseren Anteil ausgemacht haben. Die Summe der Laufzeiten war im ersten ausgewerteten Jahr grösser.

Die Gesamtniederschlagsmenge in Zürich im Jahr 2012 betrug 1291.7mm. Im Jahr 2013 war der Niederschlag mit einer Gesamtniederschlagsmenge von 1093.8mm um etwa 20% geringer. Durchschnittlich regnet es in Zürich 1136mm pro Jahr. Es wird davon ausgegangen, dass die zu befördernden Niederschlagsmengen in den Einzugsgebieten der Stationen Bellevue und Wollishofen im Jahr 2013 auch um etwa 20% geringer waren als im Vorjahr.³

Die erhöhte Anzahl von Schaltungen im Jahr 2012 ist folglich auf die Jahresniederschlagsmenge zurückzuführen. Der Anteil kurzer Laufzeiten war im Jahr 2013 dementsprechend auch leicht höher als im Vorjahr. Lohnenswert wäre eine Auswertung über weitere Jahre, um noch mehr Erkenntnisse gewinnen zu können. Sehr interessant wäre auch die Auswertung eines Jahres mit langen starken Niederschlagsperioden. Damit könnten Aussagen über die Dimensionierung der Pumpwerke für grosse Niederschlagsmengen gemacht werden.

³ http://www.meteoschweiz.admin.ch/files/kd/homogreihen/homog_mo_SMA.txt

9 Pumpenkennlinien und Q-H Diagramme

Die Förderleistung einer Kreiselpumpe wird durch eine Kennlinie im Q-h-Diagramm angegeben. Darin sind die Fördermenge Q (auch $\dot{V}$) in [l/s] oder [m³/h] und die Förderhöhe h in [m] der Pumpe aufgezeichnet. Die Q-H-Diagramme mit eingetragenen Betriebs- und Auslegungspunkten der vier Pumpentypen finden sich auf den folgenden Seiten.

Der Verlauf der Pumpenkennlinie ist gekrümmt und fällt im Diagramm von links nach rechts mit zunehmender Fördermenge ab. Jede Änderung der Förderhöhe hat stets auch eine Änderung der Fördermenge zur Folge.⁴

- Grosse Fördermenge -> geringe Förderhöhe
- Kleine Fördermenge -> grosse Förderhöhe

Die benötigten Diagramme wurden zum Teil von ERZ und zum Teil direkt bei den Pumpenherstellern bezogen. Pro Pumpstation wird nur ein Pumpentyp eingesetzt. In die Pumpenkennlinien wurden die gemessenen Werte und die für die Stationen geplanten Werte eingetragen. Das ermöglicht einen direkten Vergleich und zeigt allfällige Abweichungen auf.

Für die Fördermenge wurde der gemessene Volumenstrom auf der X-Achse eingetragen. Die Förderhöhe h wurde, wenn nichts anderes vermerkt ist, berechnet und in die Y-Achse eingetragen.

Da sich die Pumpen in der Pumpstation Zürich-Horn im Wasser befinden und daher die Druckmessungen über dem Pumpensumpfpegel vorgenommen wurden, musste die Förderhöhe speziell berechnet werden.

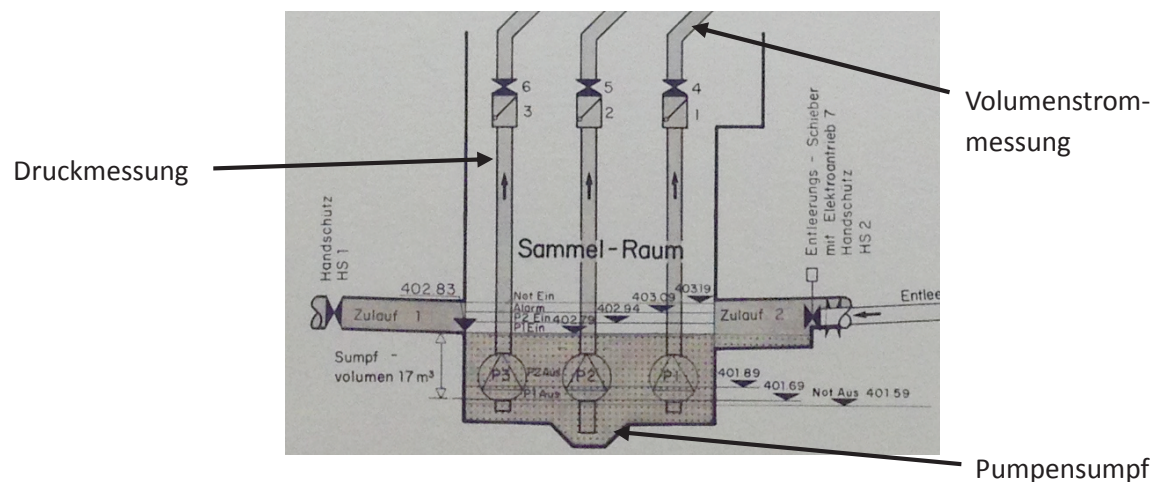


Abbildung 9: Schema Pumpstation Zürich-Horn

⁴ http://impeller.net/magazine/enc_de/doc27x.asp

9.1 Q-H Diagramm der Pumpstation Bellevue

Die folgende Abbildung zeigt die Planungsdaten und die gemessenen Werte der einzelnen Pumpen der Pumpstation Bellevue.

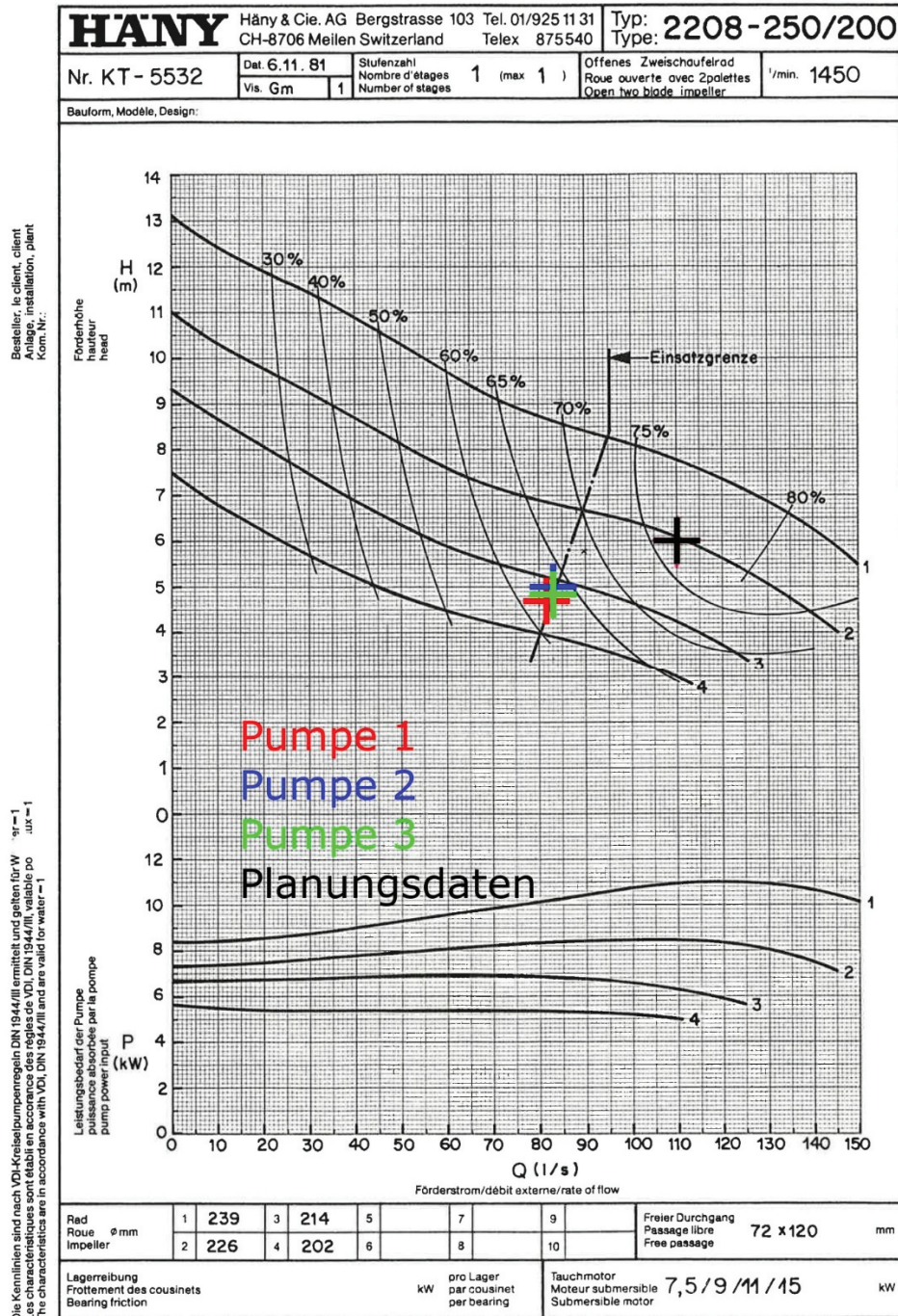


Abbildung 10: Pumpenkennlinie Bellevue

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die geleistete Förderhöhe niedriger ist als die geplante. Ebenfalls ist die geleistete Fördermenge kleiner als geplant. Eine Erklärung für die Abweichung kann eine Differenz der geplanten und der in den Berechnungen benutzte Referenzhöhe des Pumpensumpfes sein.

9.2 Q-H Diagramm der Pumpstation Giesshübel

Die folgende Abbildung zeigt die Planungsdaten und die gemessenen Werte der einzelnen Pumpen der Pumpstation Giesshübel.

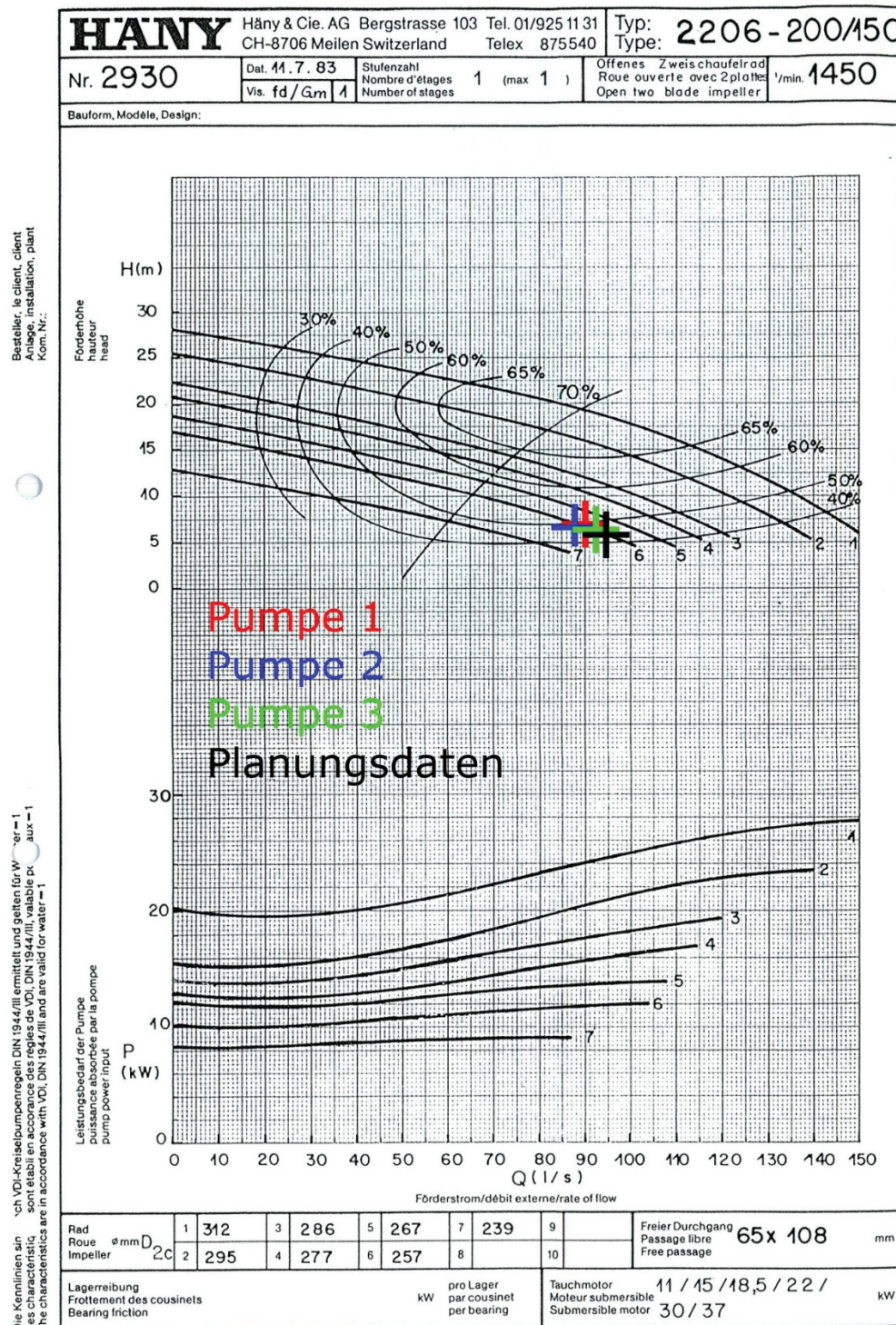


Abbildung 11: Pumpenkennlinie Giesshübel

Die eingetragenen Messpunkte unterscheiden sich wenig von den Planungsdaten. Die gemessene Förderhöhe ist etwas höher und die Fördermenge etwas tiefer als geplant.

9.3 Q-H Diagramm der Pumpstation Wollishofen

Die folgende Abbildung zeigt die Planungsdaten und die gemessenen Werte der einzelnen Pumpen der Pumpstation Wollishofen.

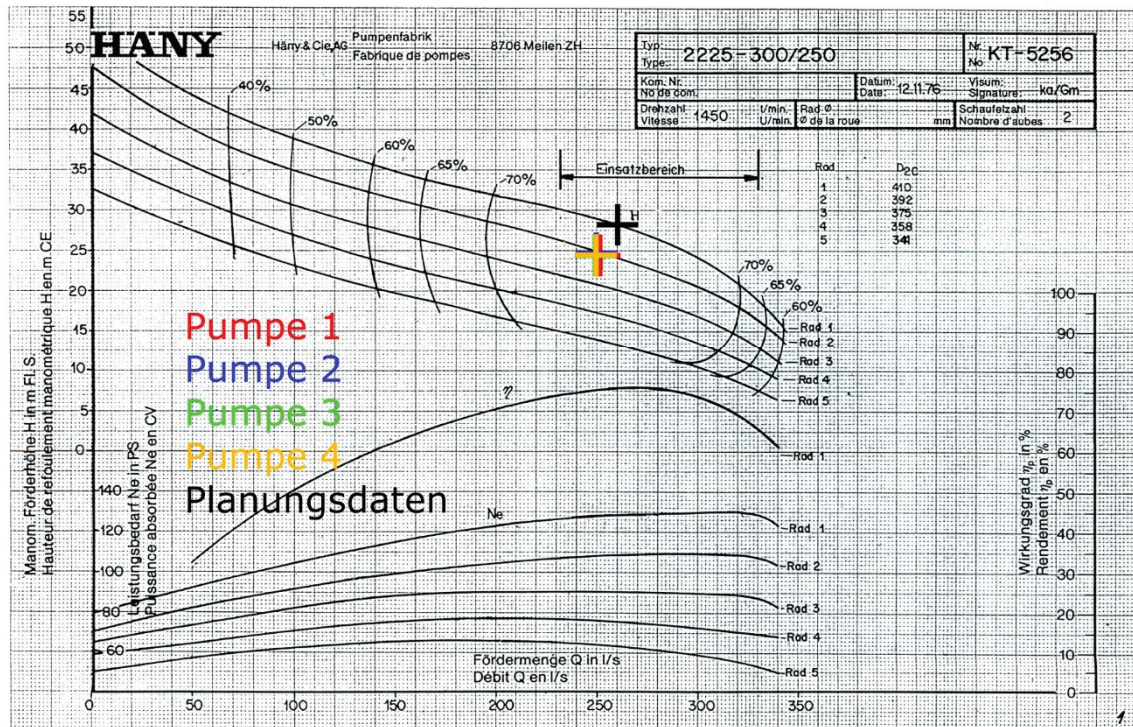


Abbildung 12: Pumpenkennlinie Wollishofen

Die Messwerte der Pumpen liegen nahe beieinander, der gemessene Förderstrom und die Förderhöhe sind nur wenig tiefer als die Werte der Planungsdaten.

9.4 Q-H Diagramm der Pumpstation Zürich-Horn

Die folgende Abbildung zeigt die Planungsdaten und die gemessenen Werte der einzelnen Pumpen der Pumpstation Zürich-Horn.

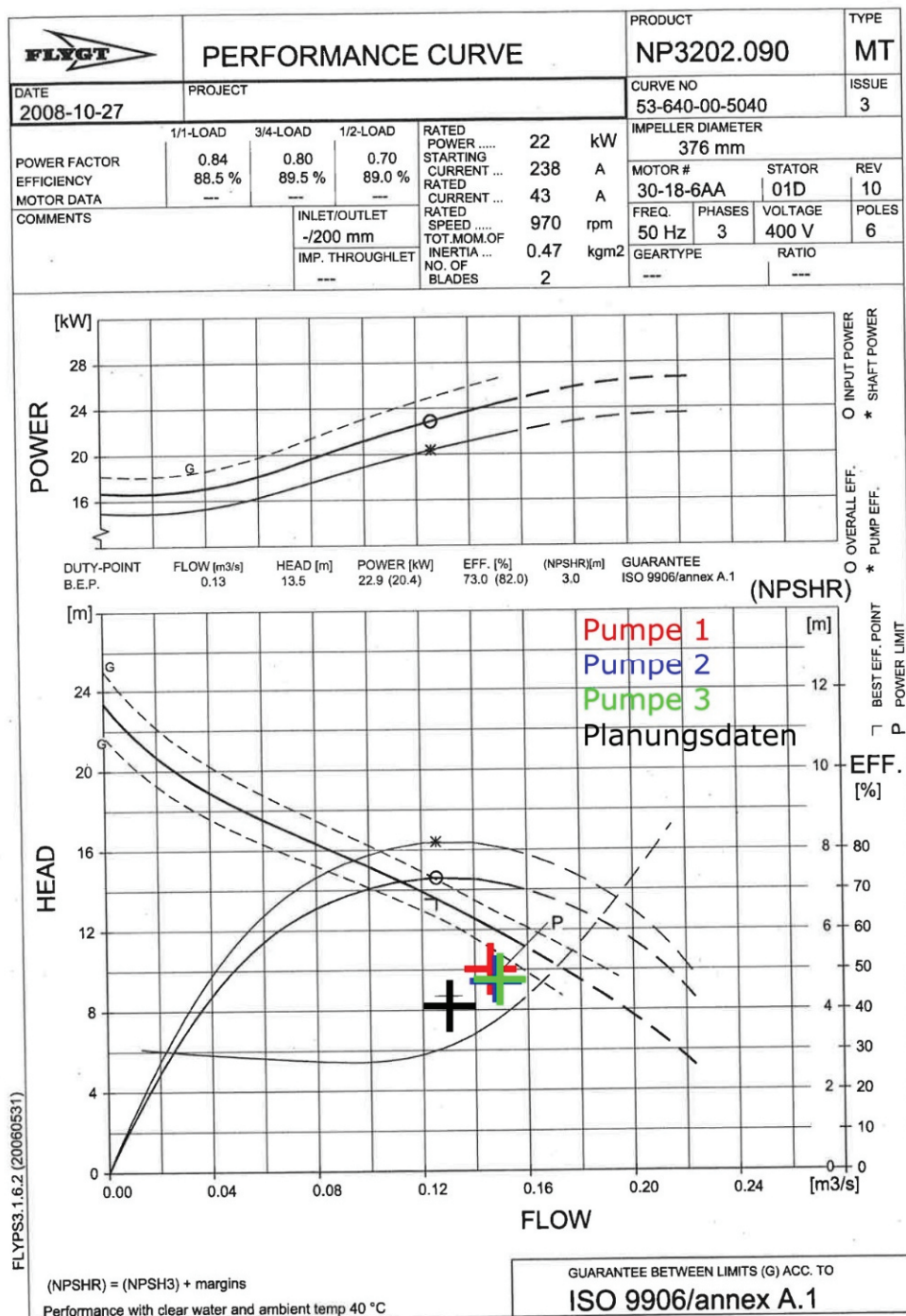


Abbildung 13: Pumpenkennlinie Zürich-Horn

Die Messwerte der Pumpen liegen nahe beieinander, die gemessene Fördermenge und Förderhöhe sind leicht grösser als die geplanten Daten. Allerdings liegen die gemessenen Werte realistisch an der Pumpenkennlinie. Die Planungsdaten scheinen dem Diagramm nicht zu entsprechen.

10 Übersicht und Vergleich mit Empfehlungen des BFE

Das Bundesamt für Energie hat im Jahre 2008 eine Empfehlung für die Fliessgeschwindigkeit von Abwasser in Druckrohren publiziert⁵. Die publizierten Werte in folgender Tabelle berücksichtigen die Reibungsverluste und die Gefahr von Ablagerungen, Verstopfungen und Gasbildung in Druckrohren und sind als optimale Werte zu verstehen.

Grobe Grenzwerte für die Einhaltung der Betriebssicherheit	
Leitungen mit kurzen Förderzeiten und lange Ruhephasen	min. 1,0 m/s
Leitungen mit langen Förderzeiten und kurze Ruhephasen	min. 0,7 m/s
Waagrecht verlegte Leitungen	0,8 bis 1,0 m/s
Senkrecht verlegte Leitungen	1,3 bis 1,5 m/s
Dückerleitungen	2,0 bis 3,0 m/s
Richtwerte für einen wirtschaftlichen Betrieb der Grundlastpumpe	
Leitungen bis 150 mm (lichte Weite)	max. 1,2 m/s
Leitungen über 150 mm	max. 1,5 m/s
Grenzwert für Spitzenlastbetrieb (Vermeidung hoher Energiekosten)	
Leitungen bis 150 mm	max. 2,0 m/s
Leitungen über 150 mm	max. 2,5 m/s
Vermeidung von Druckstößen in Leitungen über 500 m Länge	max. 2,0 m/s

Abbildung 14: Empfohlene Fliessgeschwindigkeiten in Abwasser-Druckleitungen bei Trockenwetter

An allen vier Pumpstationen wurden die Fliessgeschwindigkeiten an trockenen Tagen gemessen und mit den empfohlenen Werten verglichen. Als Referenzwerte wurden die Richtwerte für „Leitungen mit kurzen Förderzeiten und langen Ruhephasen“ und für „einen wirtschaftlichen Betrieb der Grundlastpumpe mit einer Leitung über 150mm“ herangezogen.

Pumpstation	Gemessene mittlere Fliessgeschwindigkeit	Empfohlene Fliessgeschwindigkeit
Bellevue	1.77 m/s	1.0 – 1.5 m/s
Giesshübel	2.53 m/s	1.0 – 1.5 m/s
Wollishofen	3.90 m/s	1.0 – 1.5 m/s
Zürich-Horn	4.13 m/s	1.0 – 1.5 m/s

Tabelle 3: Fliessgeschwindigkeiten

Wie in der Tabelle 5 ersichtlich ist, befindet sich die Fliessgeschwindigkeit des Mediums bei allen vier Pumpstationen über dem empfohlenen Wert. Eine Anpassung an die empfohlenen Werte könnte die Reibungsverluste und somit den Energieverbrauch der Pumpen senken.

⁵ BFE (2008): Handbuch Energie in ARA. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) und Bundesamt für Energie. Bern/Zürich

Eine grobe Berechnung der Energieeinsparung wird anhand des Beispiels der Pumpe 1 in der Pumpstation Zürich-Horn aufgezeigt. Der Energieverbrauch wurde mit der Bernoulligleichung berechnet:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m} \cdot \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} + g \cdot h_{geo} + \frac{\bar{w}_i^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \right)$$

Annahmen, Messungen und Berechnungen

Massenstrom	m	145.2 kg/s
Druck Saugseite	p _i	8'440 Pa
Druck Druckseite	p _e	106'980 Pa
Dichte Wasser	ρ	1000 kg/m ³
Erdbeschleunigung	g	9.81 m/s ²
Geodätische Höhe	h _{geo}	7.24 m
Rohrreibungszahl	λ	0.01962
Länge Rohrleitung	L	8.1 m bzw. 12 m
Durchmesser Rohrleitung ⁶	D	0.250 m

Tabelle 4: Annahmen, Messungen und Berechnungen für die Fließgeschwindigkeit

		Gemessen	Empfohlen
Geschwindigkeit Fluid	w	4.09 m/s	1.5 m/s
Leistung (8.1 m Rohrlänge)	E	25'393 W	24'725 W
Leistung (12 m Rohrlänge)	E	25'765 W	24'775 W

Tabelle 5: Berechnung Energieaufwand

Die verwendeten Werte wurden aus den Messdaten während einem annähernd stationären Betrieb entnommen. Weitere Berechnungsdetails finden sich im Anhang im Kapitel „17.2 Berechnungen“.

Die Rohrlänge in den Pumpstationen ist leider nicht bekannt. Exemplarisch wurden 8.1 m (Förderhöhe Anlage) und 12 m berechnet. Rohrkrümmer und weitere mögliche Verluste wurden nicht mit eingerechnet.

	Energieeinsparung	Prozentuale Einsparung
Rohrlänge 8.1 m	668 W	2.63 %
Rohrlänge 12 m	990 W	3.84 %

Tabelle 6: Energieeinsparung anhand zwei Beispielen

Wie aus den Rechnungen ersichtlich wird, hat die Rohrlänge einen wesentlichen Einfluss auf die Rohrreibungsverlustes. Bereits bei einer minimalen Rohrlänge kann rund 2.6 % Energie eingespart werden, wenn die Fließgeschwindigkeit an den empfohlenen Wert angepasst wird. Diese Einsparungen sind real sicherlich noch höher, wenn zusätzliche Verluste in Rohrkrümmern und weiteren Komponenten mit einbezogen werden.

⁶ [http://de.wikipedia.org/wiki/Rohr_\(Technik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Rohr_(Technik))

11 Analyse Start-/Stopp-Phasen

In den vorangegangenen Betrachtungen wurde der stationäre Pumpenbetrieb analysiert. Im Folgenden werden ganzen Pumpenzyklen betrachtet.

Anhand der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme ist es möglich, Aussagen über den Verbrauch elektrischer Energie der Pumpen zu machen. Über einen Pumpenzyklus gemessen ist die Leistung nicht konstant, da es nebst dem stationären Betrieb eine dynamische Start- und Stopphase gibt. In der folgenden Abbildung ist ein solcher Pumpzyklus anhand der Leistungskurven dargestellt. Die Pumpzyklen der untersuchten Pumpen unterscheiden sich in der Höhe und Dauer der Anlaufströme.

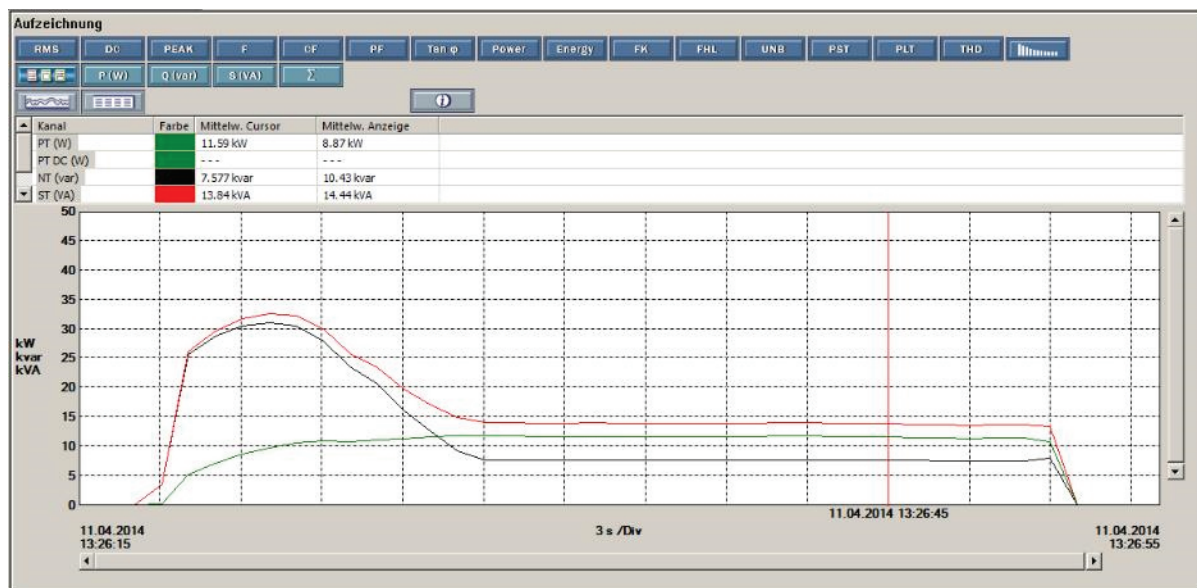


Abbildung 15: Schein-, Wirk- und Blindleistung einer Pumpe

Während der Startphase erkennt man, dass die Blindleistung (schwarz) und somit auch die Scheinleistung (rot) teilweise dreimal so gross sind wie die Wirkleistung (grün). Man spricht diesbezüglich auch vom Anlaufstrom.

Beim Starten hat ein Drehstrom- Elektromotor noch einen geringen ohmschen Widerstand, was einen hohen Anlaufstrom zur Folge hat. Mit höherer Drehzahl steigt der Induktive Widerstand des Motors, wodurch der Strom folglich sinkt und sich auf den Nennstrom einstellt.

Für das Beschleunigen der rotierenden Schwungmasse auf die Nenndrehzahl wird ein grösseres Moment benötigt als im stationären Betrieb. Dies ist ein weiterer Grund für den hohen Anlaufstrom. Der hohe Anlaufstrom kombiniert mit dem niedrigen $\cos\phi$ stellt für Netzbetreiber und den Stromproduzenten eine Zusatzbelastung dar.

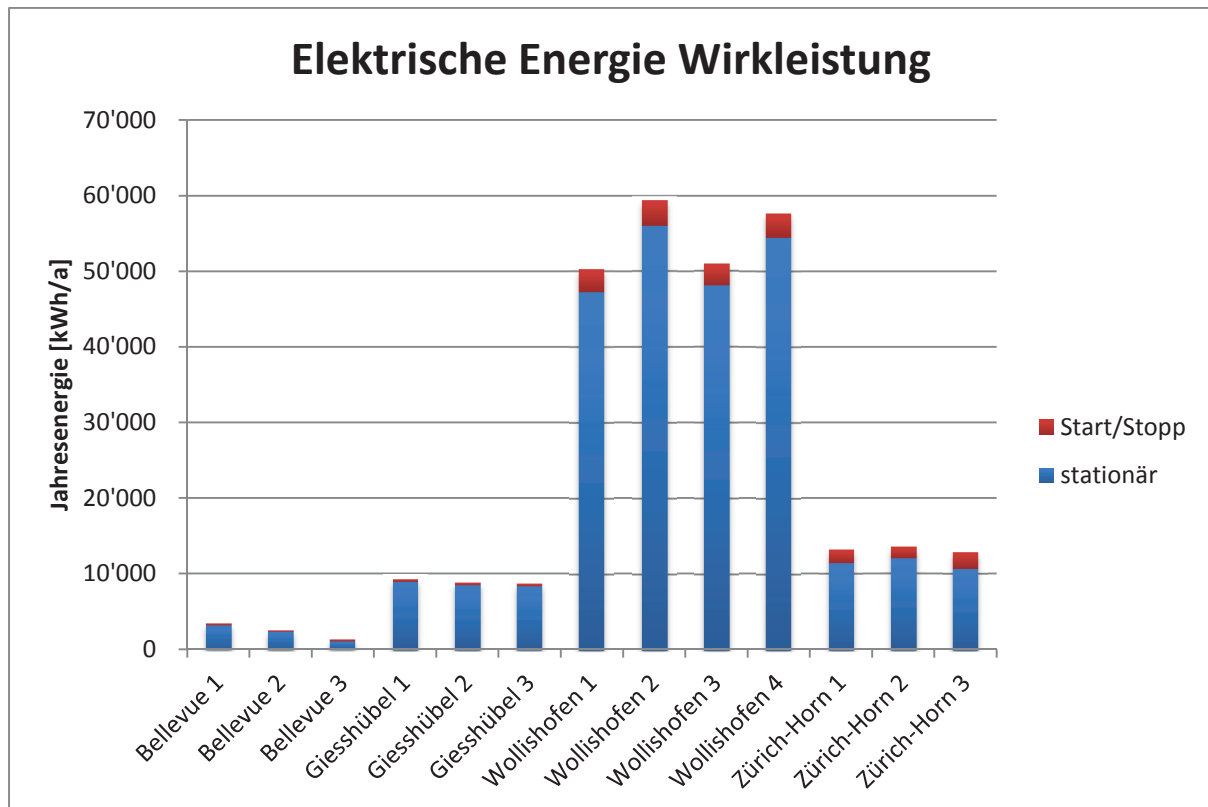


Diagramm 6: Elektrische Energie Wirkleistung

Die Anteile Energie der Start- und Stopphase beziehen sich auf die häufigsten Einschaltzeiten der jeweiligen Pumpen und betragen zwischen 4-19% des elektrischen Energieverbrauches bezogen auf Wirkleistung. Die Wirkleistung ist der Anteil der elektrischen Leistung, der Arbeit verrichtet und die Pumpen in Bewegung versetzt. Werden die Einschaltzeiten Im Jahresmittel betrachtet, sinkt dieser Anteil ein wenig. Gerade bei den grossen Pumpen der Station Wollishofen ist der Anteil der Energie der Start- und Stopphase mit etwa 3'100 kWh im Jahr ein nicht unwesentlicher Energieanteil. Unter der Annahme, dass während der Start/Stopphase der Pumpenwirkungsgrad wesentlich tiefer ist als im Stationären Betrieb und somit die Hydraulische Leistung gering ist dieser Aufmerksamkeit zu schenken.

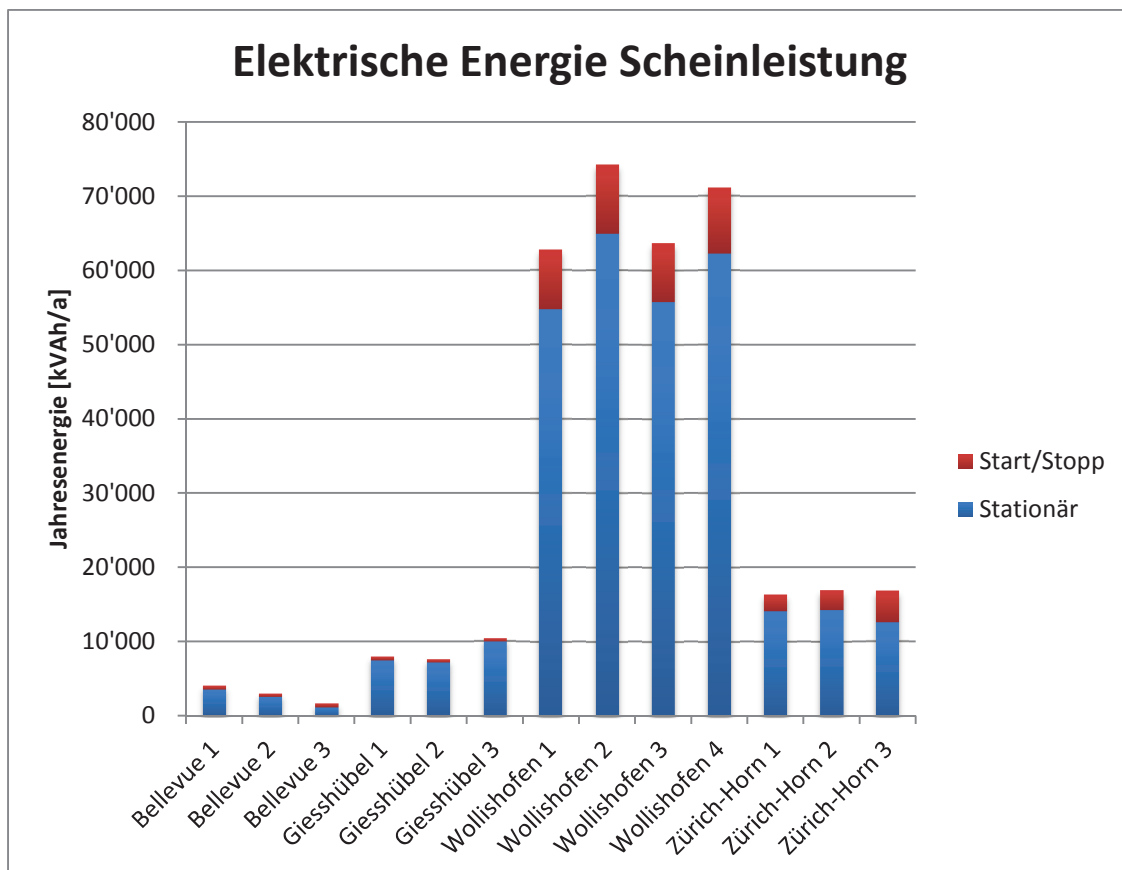


Diagramm 7: Elektrische Energie Scheinleistung

In der Scheinleistung ist die Blindleistung mit einbezogen. Somit wird auch der hohe Anlaufstrom und der Teil elektrischer Energie die keine Arbeit verrichtet in dieser Betrachtung berücksichtigt. Die Aufteilung der Balken wurde für die häufigsten Einschaltzeiten der jeweiligen Pumpen erstellt. Bezogen auf die mittlere Einschaltdauer des Jahres beziehen die Start- und Stopphasen einen geringeren Anteil der Jahresenergie.

Bei der Berücksichtigung der Scheinleistung wird der Anteil der Energie für die Start- und Stopphase höher als bei der Analyse in Bezug auf die Wirkleistung und beträgt 5-33%. Der höchste Anteil wurde an der Pumpe 3 der Station Bellevue ermittelt. Diese hat eine längere Start-Phase als die anderen beiden Pumpen derselben Station, was den hohen Anteil des Energieverbrauches in der Startphase zur Folge hat. Diese Pumpe unterscheidet sich von den anderen durch die tiefere Ansaugung im Pumpensumpf und häufige Ausfälle.

Eine Untersuchung der Möglichkeiten zur Reduzierung der Ein/Aus-Phasen wäre wünschenswert. Hier könnte man bei grossen Pumpstationen wie Wollishofen ansetzen, da dort das grösste Einsparpotential liegt.

12 Vergleich der geplanten und gemessenen Daten

12.1 Wirkungsgrade der einzelnen Pumpen

Die Tabelle zeigt eine Übersicht der gemessenen Wirkungsgrade der einzelnen Pumpen. Der angegebene totale Wirkungsgrad umfasst die Wirkungsgrade des Elektromotors, der Welle und der Pumpe.

Pumpe	Wirkungsgrad η_{tot}
Bellevue Pumpe 1	30.5%
Bellevue Pumpe 2	29.8%
Bellevue Pumpe 3	33.7%
Giesshübel Pumpe 1	38.0%
Giesshübel Pumpe 2	35.8%
Giesshübel Pumpe 3	35.4%
Wollishofen Pumpe 1	61.0%
Wollishofen Pumpe 2	57.3%
Wollishofen Pumpe 3	58.6%
Wollishofen Pumpe 4	53.3%
Zürich-Horn Pumpe 1	56.9%
Zürich-Horn Pumpe 2	55.9%
Zürich-Horn Pumpe 3	54.1%

Tabelle 7: Wirkungsgrade der Pumpen

12.2 Betrieb der Anlagen anhand spezifischer Energie

Die folgende Tabelle zeigt die Abweichungen für den spezifischen Energieverbrauch der gemessenen Pumpen gegenüber dem Empfohlenen Wert des BFE.

Spezifische Energie [Wh/m ³ m] – Optimal 4.00 Wh/m ³ m			
	Gemessen	Abweichung	Prozentual
Bellevue Pumpe 1	8.92	5.23	+123%
Bellevue Pumpe 2	9.14	5.45	+129%
Bellevue Pumpe 3	8.06	4.34	+102%
Giesshübel Pumpe 1	7.17	3.17	+79%
Giesshübel Pumpe 2	7.62	3.62	+90%
Giesshübel Pumpe 3	7.70	3.70	+93%
Wollishofen Pumpe 1	4.46	0.60	+12%
Wollishofen Pumpe 2	4.60	0.74	+15%
Wollishofen Pumpe 3	4.65	0.84	+17%
Wollishofen Pumpe 4	5.13	1.29	+28%
Zürich-Horn Pumpe 1	4.85	0.85	+21%
Zürich-Horn Pumpe 2	4.81	0.81	+20%
Zürich-Horn Pumpe 3	4.94	0.94	+24%

Tabelle 8: Vergleich spezifische Energie

Die gemessenen Pumpen weichen für den spezifischen Energieverbrauch von + 12% bis + 129% vom optimalen, durch das BFE publizierten, Wert ab. Es bestehen Verbesserungspotentiale um den Energieverbrauch von einzelnen Pumpen zu halbieren.

12.3 Förderhöhe und Volumenstrom

Die folgende Tabelle zeigt die Abweichungen der geplanten, in den Pumpenkennlinien hinterlegten, Förderhöhen und Volumenströme zu den gemessenen Werten.

	Max. Förderhöhe [m]			Fördermenge [l/s]		
	Geplant	Gemessen	Differenz	Geplant	Gemessen	Differenz
Bellevue Pumpe 1	6	4.7	-28.0%	110	82	-34.1%
Bellevue Pumpe 2	6	5.0	-20.8%	110	82.5	-33.3%
Bellevue Pumpe 3	6	4.8	-24.6%	110	83	-32.5%
Giesshübel Pumpe 1	6.35	6.9	+8.4%	100	90	-11.1%
Giesshübel Pumpe 2	6.35	6.7	+4.8%	100	88	-13.6%
Giesshübel Pumpe 3	6.35	6.3	-0.6%	100	92	-8.7%
Wollishofen Pumpe 1	28	25.5	-10.0%	260	252.5	-3.0%
Wollishofen Pumpe 2	28	24.8	-12.7%	260	250	-4.0%
Wollishofen Pumpe 3	28	24.6	-14.0%	260	249.9	-4.0%
Wollishofen Pumpe 4	28	24.5	-14.1%	260	250	-4.0%
Zürich-Horn Pumpe 1	8.1	10.0	+19.4%	140	145.2	+3.6%
Zürich-Horn Pumpe 2	8.2	9.5	+14.1%	140	147	+4.8%
Zürich-Horn Pumpe 3	8.1	9.6	+15.4%	140	147.9	+5.3%

Tabelle 9: Vergleich Förderhöhen und Volumenströme

Bei der Pumpstation Bellevue fällt eine grosse Differenz der Förderhöhe und der Fördermenge zwischen geplanten und gemessenen Daten auf.

Die Pumpen der Pumpstation Giesshübel liefern eine deutlich kleinere Fördermenge als geplant ist.

Die Pumpen der Station Wollishofen werden fast optimal am geplanten Betriebspunkt betrieben. Dass die geplanten Volumenströme nicht erreicht werden, lässt sich durch Verluste und Abnutzung in den Rohren und Pumpen erklären.

Die Pumpen in Zürich-Horn überwinden eine deutlich höhere Förderhöhe als geplant. Jedoch wird auch die geplante Fördermenge überschritten. Dies wird auch im Q-H-Diagramm ersichtlich.

13 Kritische Würdigung der Daten

13.1 Volumenstrommessung

13.1.1 Parameter Einstellungen

Die für die Volumenstrommessung erforderliche Wandstärke konnte nicht exakt ermittelt werden. Hierfür wurden Erfahrungswerte eines ERZ Mitarbeiters verwendet. Es wurden zwei Probemessungen an einer DN200 Rohrleitung mit je einer eingestellten Wandstärke von 3.2mm bzw. 6.2mm durchgeführt. Ein Vergleich der beiden Messungen zeigte eine geringe Abweichung unter 5%.

Weitere Unsichere Parametereinstellungen sind Wassertemperatur und die Dichte des Mediums. Die Wassertemperatur wurde auf 15 Grad geschätzt. Für die Dichte wurde 1000kg/m^3 verwendet.

13.1.2 Montage Ultraschallsensoren

Aufgrund mangelnden Platzes konnte die erforderliche Distanz der Ultraschallsensoren zu Krümmern und Rückschlagventilen von 2m nicht überall eingehalten werden. Eingehalten wurde der Abstand in der Station Giesshübel. In den anderen Stationen betrug die Distanz mindestens 1m.

13.1.3 Volumenstrom Messung

Der Angezeigte Volumenstrom auf dem Messgerät schwankte im Bereich von ± 5 Prozent. Diese Ungenauigkeit bezieht sich auf den stationären Betrieb der Pumpen. Da die automatische Aufzeichnung nicht möglich war, wurde beim Ablesen darauf geachtet, dass der Wert welcher am häufigsten erschien, notiert wurde.

Während der letzten Messung stellte sich heraus, dass die Gerätesoftware des Volumenstrommessgerätes, gemäss Hersteller, für Rohrleitungen mit einem Durchmesser grösser als 200mm nicht geeignet ist. Zu diesem Zeitpunkt waren die Messungen jedoch bereits durchgeführt.

Zur Analyse des möglichen Messfehlers wurden an der Fachhochschule Nordwestschweiz Vergleichsmessungen an einer DN300 Leitung durchgeführt. Der Vergleich mit einem zweiten, magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät, zeigte minimale Abweichungen, die stets kleiner als 1% waren.

13.2 Druckmessung

Zu Beginn der Messung wurde ein Keller Drucksensor mit einem Messbereich von 0 bar bis 25 bar verwendet. Die Messunsicherheit für diesen Sensor beträgt 0.05% auf den gesamten Messbereich. In den Stationen Wollishofen und Zürich-Horn konnte eine Vergleichsmessung mit einem 1.25 bar Sensor durchgeführt werden. Der gemittelte Druckunterschied der zwei Sensor-Typen im stationären Betrieb beträgt 4.2%.

Ebenfalls entscheidend für eine Ermittlung der Messunsicherheit sind die verwendeten Messbohrungen der vier Pumpstationen, sowie die Höhenlage des Drucksensors während der Messung. Angaben zu den Messbohrungen konnten nicht ausfindig gemacht werden. Bei der Höhenlage des Drucksensors wurde darauf geachtet, dass der Drucksensor stets auf der Höhe der Pumpe positioniert war.

13.3 Leistungsmessung

Gemäss Hersteller Chauvin Arnoux hat das Messgerät C.A 8335 eine Messunsicherheit von kleiner als 1% ohne die Ungenauigkeit der Stromwandler.

13.4 Berechnungen

Für die Berechnungen der spezifischen Energie und der Betriebspunkte der Pumpen wurden vereinfachende Annahmen getroffen. Vernachlässigt wurde der Druckverlust auf der Saugseite der Pumpe. Ebenso mussten teilweise fehlende Messdaten durch statistische Berechnungen ergänzt werden. Die entsprechenden Werte wurden in den Excel Dateien je nach Berechnung rot und gelb markiert.

Die Berechnung der Reibungsverluste in Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit ist sehr grob gehalten, sie berücksichtigt lediglich die Rohrreibungsverluste einer senkrechten Leitung. Genaue Berechnungen der Energieeinsparung von Reibungsverlusten sind aufgrund zu vieler Unsicherheiten wie unbekannte Viskosität des Mediums, der Rohrrauigkeit, Verluste in Rohrkrümmern und der unbekannten Rohrlänge nicht möglich. Wie bereits im Kapitel 9 erwähnt, werden die realen Energieeinsparungen höher sein als die berechneten, da beispielsweise der Reibungsverlust eines Rohrkrümmers ebenfalls von der Fliessgeschwindigkeit des Mediums abhängt.

13.5 Fazit

Unsicherheiten bei Messungen und Berechnungen konnten mit dem Grundfos Mitarbeiter Herbert Hirsiger, dem Projektcoach Klaus Eisele und dem Fluidmechanik-Dozenten Prof. Dr. Beat Ribi geklärt werden.

14 Schlussfolgerungen & Empfehlungen

Durch die Ermittlung der spezifischen Energie der untersuchten Pumpen wurde ersichtlich, dass gerade die kleineren Pumpen ein Verbesserungspotential von über $5 \text{ Wh/m}^3\text{m}$ besitzen. Eine genauere Untersuchung der Pumpen in den Pumpstationen Bellevue und Giesshübel wäre lohnenswert. Der Betriebspunkt der Pumpen in den Stationen Wollishofen und Zürich-Horn ist nahe an dem vom BFE empfohlenen Wert von $4 \text{ Wh/m}^3\text{m}$.

Da die häufigsten Laufzeiten aller untersuchten Pumpen mit 1-5 Minuten eher kurz sind, bilden die Start- und Stoppphasen einen wesentlichen Anteil am Energieverbrauch des Pumpenbetriebes. Bei den häufigsten Laufzeiten der untersuchten Pumpen beträgt der Anteil der elektrischen Energie (bezogen auf elektrische Wirkleistung) beim Starten und Stoppen zwischen 5-15%. Um den Anteil des Energieverbrauches der Start- und Stoppphase des Gesamtenergieverbrauchs zu verkleinern können die Laufzeiten verlängert werden. Erreichen könnte man dies mit einer Erhöhung des Pumpensumpfpegels, bei der die Pumpen eingeschaltet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Reduktion der Fliessgeschwindigkeit, was den Volumenstrom senken und die Laufzeit verlängern würde und ebenfalls einen positiven Effekt auf die Verluste durch die Rohrreibung hätte. Eine Untersuchung des Potentials zur Energieeinsparung durch eine Laufzeitverlängerung wäre lohnenswert.

Aus den Q-H Diagrammen wurde ersichtlich, dass gewisse Pumpen nicht am optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Die drei Pumpen der Pumpstation Bellevue fördern einen geringeren Volumenstrom als in der Auslegung berechnet. Eine mögliche Ursache dafür könnten erhöhte Reibungsverluste in den Rohren sein.

Die gemessenen Fliessgeschwindigkeiten betragen bis zu 4.1 m/s und liegen somit teilweise weit über dem vom BFE empfohlenen Wert von 1.5 m/s . Mit einer tieferen Fliessgeschwindigkeit könnten die Rohrreibungsverluste gesenkt und die Effizienz der Pumpen verbessert werden. Bei der Station Zürich-Horn liegt das Energieeinsparpotential über 2.6% pro Pumpe. Eine Senkung der Fliessgeschwindigkeit könnte mit einer tieferen Pumpendrehzahl erreicht werden.

Aus Sicht des Projektteams wäre ein Ansatzpunkt in den Pumpstationen Pumpen unterschiedlicher Grösse einzusetzen. Eine kleinere Pumpe könnte das täglich anfallende Abwasser fördern und bei Niederschlägen würden zwei bzw. drei grosse Pumpen zusätzlich zum Einsatz kommen. Auch bei Ausfall der kleinen Pumpe können die grösseren als Reserve dienen. Eine alternierende Schaltung der Pumpen kann weiterhin betrieben werden, aber wo möglich mit längeren Intervallen. Diese Option hätte jedoch eine Anpassung der Schalt-Strategie der ERZ und einen höheren Wartungsaufwand der kleinen Pumpe zur Folge.

Ausserdem wurden beim Besuch der Pumpstationen weitere Verbesserungspotentiale gefunden. Zum Beispiel sind in der Pumpstation Giesshübel 2 Elektroheizungen mit je ungefähr 4.5 kW Heizleistung installiert. Zusätzlich läuft ein Entfeuchter. Wie die ERZ bereits beim Rundgang erwähnt hat, werden diese Geräte bei der Revision der Pumpstation entfernt oder durch energiesparendere Geräte ersetzt. Es wäre sinnvoll, auch andere Pumpstationen auf solche Geräte zu prüfen.

15 Reflexion und Ausblick

15.1 Reflexion

Der an uns gestellte Auftrag wurde von Anfang an positiv aufgenommen. Die interessante Thematik Pumpentechnik, welche verschiedene Aufgabenbereiche mit sich brachte, bot die Basis für eine vielseitige Arbeit.

Dank hervorragender Unterstützung konnten wir die anspruchsvolle Aufgabe angehen. Herbert Hirsiger von der Firma Grundfos AG vermittelte uns das notwendige Wissen für die theoretische und praktische Anwendung von Pumpen. Dieses erlangte Wissen vereinfachte uns die Vorbereitungsphase unserer Messung sowie in die Bearbeitung der Daten. Ebenfalls grossen Dank gilt unserem Auftraggeber Roger Küenzi. Dank seiner Hilfestellung konnten die Messungen an den Stationen erfolgreich ausgeführt werden. Eine Herausforderung stellte die Berechnung der Messergebnisse dar. Dank genügend eingeplanter Zeit konnten die Schwierigkeiten bewältigt werden.

Die Zusammenarbeit im Projektteam war ausserordentlich gut. Stets wurden alle Probleme als Team lösungsorientiert und zielstrebig angegangen.

15.2 Ausblick

Unsere Arbeit bietet die Grundlage für die Überprüfung und Analyse der Ist- Situation weiterer Pumpstationen. Ein möglicher nächster Schritt wäre nun die Ausarbeitung verschiedener Lösungsvarianten für einen effizienten Pumpenbetrieb der Pumpstationen. Eine weiterführende Arbeit könnte aufzeigen, welche Massnahmen an einer Pumpstation zu effektiven Energieoptimierungen führen. Dabei könnten ebenfalls Umsetzbarkeit und Kosten mit in Betracht gezogen werden. Die Lösungsvarianten können konkrete Massnahmen für eine bereits analysierte Pumpstation sein. Denkbar ist auch das Entwerfen eines allgemeinen Schemas, welches als Entscheidungshilfe zukünftiger Massnahmen dient.

16 Ehrlichkeitserklärung

Das Projektteam bestätigt hiermit, dass sämtliche Texte selbst verfasst sind, sowie die Grafiken und Tabellen selbst zusammengestellt wurden. Nicht selbst erstelltes Datenmaterial wurde im Quellenverzeichnis angegeben.

Projektleiter:
Simon Birkenstock
Datum, Unterschrift

.....

Projektmitarbeiter:
Andreas Bucher
Datum, Unterschrift

.....

Projektmitarbeiter:
Henri Kappenthuler
Datum, Unterschrift

.....

Projektmitarbeiter:
Lucas Fuchs
Datum, Unterschrift

.....

Projektmitarbeiter:
Lukas Iseli
Datum, Unterschrift

.....

17 Verzeichnisse

17.1 Abbildungen

Abbildung 1: Logo ERZ - http://www.autohilfe.ch/partner.htm	6
Abbildung 2: Logo Grundfos - http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Grundfos_Logo.svg	6
Abbildung 3: Schema Ultrasonic 93	8
Abbildung 4: Leistungsmessung.....	8
Abbildung 5: Schema Leistungsmessung	9
Abbildung 6: Schema Druckmessung.....	10
Abbildung 7: Karte Pumpstationen	11
Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Pumpstation.....	12
Abbildung 9: Schema Pumpstation Zürich-Horn.....	17
Abbildung 10: Pumpenkennlinie Bellevue	18
Abbildung 11: Pumpenkennlinie Giesshübel	19
Abbildung 12: Pumpenkennlinie Wollishofen.....	20
Abbildung 13: Pumpenkennlinie Zürich-Horn.....	21
Abbildung 14: Empfohlene Fliessgeschwindigkeiten in Abwasser-Druckleitungen bei Trockenwetter – Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW), „Abschlussbericht Energieoptimierung Kanalisation“, März 2013	22
Abbildung 15: Schein-, Wirk- und Blindleistung einer Pumpe	24
Abbildung 16: Schema Druckmessung.....	48

17.2 Diagramme

Diagramm 1: Spezifischer Energieverbrauch	13
Diagramm 2: Laufzeiten Bellevue 2012	14
Diagramm 3: Laufzeiten Bellevue 2013	14
Diagramm 4: Laufzeiten Wollishofen 2012	15
Diagramm 5: Laufzeiten Wollishofen 2013	15
Diagramm 6: Elektrische Energie Wirkleistung.....	25
Diagramm 7: Elektrische Energie Scheinleistung.....	26

17.3 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht Pumpstationen	11
Tabelle 2: Übersicht Schaltungen der Pumpen	16
Tabelle 3: Fliessgeschwindigkeiten.....	22

Tabelle 4: Annahmen, Messungen und Berechnungen für die Fliessgeschwindigkeit	23
Tabelle 5: Berechnung Energieaufwand.....	23
Tabelle 6: Energieeinsparung anhand zwei Beispielen	23
Tabelle 7: Wirkungsgrade der Pumpen	27
Tabelle 8: Vergleich spezifische Energie	28
Tabelle 9: Vergleich Förderhöhen und Volumenströme	29
Tabelle 10: Weitere Berechnungen für Rohrreibungsverluste	43
Tabelle 11: Übersicht Schaltungen Bellevue 2012	45
Tabelle 12: Übersicht Schaltungen Bellevue 2013	45
Tabelle 13: Übersicht Schaltungen Wollishofen 2012	46
Tabelle 14: Übersicht Schaltungen Wollishofen 2013	46
Tabelle 15: Verwendete Messgeräte	47

18 Anhang

18.1 Glossar

Abwasserpumpen:	Sind Pumpen, die dafür ausgelegt sind, Wasser mit Verunreinigungen zu fördern.
Anlagenhöhe:	Zu überwindende Höhe von Ansaugung bis zur Entleerung
Ansaugung:	Höhe des Wassereintritts beim Rohr auf der Saugseite der Pumpe.
Auslegungsdaten:	Durch die ERZ festgelegte Werte, die bei der früheren Planung der Pumpstationen berechnet wurden.
Entleerung:	Austritt des Wassers auf der Druckseite der Pumpe.
Fördermenge:	Damit wird die Menge des Mediums beschrieben, die über eine bestimmte Zeit durch eine Rohrleitung oder eine Pumpe fliesst. Andere Begriffe dafür sind Volumenstrom, Massenstrom oder Durchsatzmenge.
Freispiegelleitung:	Rohrleitung, in der das Fördermedium gemäss dem Gesetz der Schwerkraft von einem höher gelegenen Anfangspunkt zu einem tiefer gelegenen Endpunkt gelangt.
Geodätische Höhe:	Differenz des Wasserspiegels im Pumpensumpf zur Höhe der Entleerung.
Hydraulische Leistung:	Leistung, die eine Pumpe aufbringen muss um die Fördermenge des Fluides durch die gesamte Anlage mit Verlusten von Höhe des Pumpensumpfes auf die Höhe der Entleerung zu bringen.
Laufzeit:	Zeit, in welcher eine Pumpe aktiv in Betrieb ist.
Pumpen:	Eine Pumpe besteht aus einem Elektromotor und einer hydraulischen Pumpeneinheit.
Pumpstation:	Ein tief gelegener Raum, in welchem sich Pumpen und Steuerelemente befinden. Hier wird das Fördermedium mit Hilfe von Pumpen auf ein höheres Niveau gefördert.
Pumpensumpf:	Raum, in dem sich das Fördermedium einer zugehörigen Pumpe sammelt.
Schaltung:	Einschaltung, Betrieb und Ausschaltung einer Pumpe
Stillstandzeit:	Zeit, in welcher eine Pumpe inaktiv ist.

18.2 Berechnungen Volumen- und Druckmessungen

18.2.1 Berechnung der Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit in den Rohrleitungen liess sich anhand des gemessenen Volumenstromes und der durch den Innendurchmesser bekannten Querschnittsfläche des Rohres berechnen. Bei den untersuchten Pumpen ist der Querschnitt an Pumpen-Ein und –Austritt gleich gross.

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

- v : Fließgeschwindigkeit Pumpen Eintritt/Austritt [m/s]
- $\dot{V}$: Gemessene Fördermenge [m³/s]
- A : Fläche des Rohquerschnitts [m²]

18.2.2 Berechnung der mittleren Sumpfhöhe

Um die mittlere Höhe des Pegelstandes des Pumpensumpfes zu bestimmen, wurde vereinfacht der Mittelwert der Start- und End-Höhe während des Messversuches verwendet.

$$\bar{h}_{\text{Sumpf}} = \frac{h_{\text{Sumpf,Start}} - h_{\text{Sumpf,Ende}}}{2}$$

- $\bar{h}_{\text{Sumpf}}$: Mittlere Pumpensumpfhöhe [m]
- $h_{\text{Sumpf,Start}}$: Pumpensumpfhöhe zur Startzeit der Volumenstrommessung [m]
- $h_{\text{Sumpf,Ende}}$: Pumpensumpfhöhe zur Endzeit der Volumenstrommessung [m]

18.2.3 Berechnung des Saugdruckes

Mit der Höhe des Pegelstandes im Pumpensumpf, der Dichte und Erdbeschleunigung lässt sich der statische Druck p_1 vor der Pumpe berechnen. Die Rohrreibung am Saugrohr wurde aufgrund der Kürze des Saugrohres vernachlässigt.

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot \bar{h}_{\text{Sumpf}} - \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

- p_1 : Druck Pumpeneintritt [Pa]
- $\bar{h}_{\text{Sumpf}}$: Mittlere Pumpensumpfhöhe [m]
- v : Geschwindigkeit Pumpenaustritt [m/s]
- ρ : Dichte Fördermedium 1000 [kg/m³]
- g : Erdbeschleunigung 9.81 [m/s²]

18.2.4 Berechnung der Druckdifferenz

Die Druckdifferenz berechnet sich aus dem gemessenen Druck p_2 und dem teilweise berechneten Druck p_1 .

$$\Delta p = p_2 - p_1$$

- Δp : Druckdifferenz [Pa]
- p_1 : Druck Pumpeneintritt [Pa]
- p_2 : Druck Pumpenaustritt [Pa]

18.2.5 Berechnung der geleistete Förderhöhe Pumpe

Für die Förderhöhe h_p gilt die folgende Formel.

$$h_p = (h_2 - h_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{g \cdot \rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot g}$$

- h_p : geleistete Förderhöhe Pumpe [m]
- h_1 : Höhe Pumpeneintritt [m]
- h_2 : Höhe Pumpenaustritt [m]
- p_1 : Druck Pumpeneintritt [Pa]
- p_2 : Druck Pumpenaustritt [Pa]
- v_1 : Geschwindigkeit Pumpeneintritt [m/s]
- v_2 : Geschwindigkeit Pumpenaustritt [m/s]
- ρ : Dichte Fördermedium 1000 [kg/m³]
- g : Erdbeschleunigung 9.81 [m/s²]

In diesem Projekt wurde die geleistete Förderhöhe auf Grund kleinem und nicht messbarem Höhenunterschied und konstanter Geschwindigkeit des Fluides beim Pumpen-Eintritt und –Austritt wie folgt berechnet:

$$h_p = \frac{\Delta p}{g \cdot \rho}$$

18.2.6 Berechnung der hydraulischen Leistung

Zur Berechnung der hydraulischen Leistung wird der Volumenstrom mit dem Druckunterschied vor und nach der Pumpe multipliziert. Da der Druck p_2 in der Druckleitung gemessen wurde, sind in diesen Werten auch sämtliche Druckverluste der Druckseite miteinbezogen.

$$P_{hydr} = \Delta p \cdot \dot{V}$$

- P_{hydr} : hydraulische Leistung [W]
- $\dot{V}$: gemessener Volumenstrom [m³/s]
- Δp : Berechnete Druckdifferenz [Pa]

18.2.7 Berechnung der Leistungsabgabe Motor

Um die Leistung an der Welle, zwischen Motor und Pumpe zu bestimmen, wird die elektrische Leistung mit dem Wirkungsgrad multipliziert.

$$P_{Welle} = \eta_{Motor} \cdot P_{el}$$

- η_{Motor} : Wirkungsgrad Motor []
- P_{el} : gemessene Leistungsaufnahme Motor (Wirkleistung) [W]
- P_{Welle} : Leistung an der Welle [W]

18.2.8 Berechnung Wirkungsgrad Motor

Für die Stationen Bellevue und Giesshübel wurde der Wirkungsgrad Motor aus den Pumpenkenndaten (Typenschild) ermittelt. Für Wollishofen wurde der Wirkungsgrad der Motoren beim Hersteller angefragt. Für die Station Zürich-Horn wurde der Wirkungsgrad Motor aus den Kenndaten (Typenschild) für 100% Last verwendet.

$$\eta_{Motor} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

- η_{Motor} : Wirkungsgrad Motor []
- P_{ab} : abgegebene Wellenleistung Motor aus Kenndaten [W]
- P_{zu} : aufgenommene Leistung Motor aus Kenndaten [W]

18.2.9 Berechnung Wirkungsgrad Pumpe

Aus den berechneten hydraulischen Leistung und der Leistung an der Welle wurde der Wirkungsgrad der Pumpe berechnet.

$$\eta_{Pumpe} = \frac{P_{hydr}}{P_{Welle}}$$

- η_{Pumpe} : Wirkungsgrad Motor []
- P_{hydr} : hydraulische Leistung [W]
- P_{Welle} : Leistungsabgabe Motor [W]

18.2.10 Berechnung des gesamten Wirkungsgrades

Der totale Wirkungsgrad wird durch die hydraulische Leistung und der gemessenen elektrischen Leistung berechnet. Der gesamte Wirkungsgrad zeigt das Verhältnis zwischen der geförderten Leistung der Wassermenge zur bezogenen elektrischen Wirkleistung.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{hydr}}{P_{el}}$$

- η_{tot} : totaler Wirkungsgrad []
- P_{hydr} : hydraulische Leistung [W]
- P_{el} : gemessene Leistungsaufnahme Motor (Wirkleistung) [W]

18.2.11 Berechnung der spezifischen Energie

Theoretisches Minimum

Das physikalisch mögliche Minimum an Energie, das aufgewendet werden muss im 1 Kubikmeter Wasser um einen Meter anzuheben, berechnet sich wie folgt:

$$e_{\text{spezifisch},\min} = \frac{m \cdot g \cdot h}{V \cdot h}$$

$$e_{\text{spez.}\min} = \frac{1000\text{kg} \cdot 9.810 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\text{m}}{1\text{m}^3 \cdot 1\text{m} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 2.725 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$$

- $e_{\text{spezifisch},\min}$: Notwendige spezifische Energie [Wh/m³m]
- m : Masse von 1 Kubikmeter Wasser 1000 [kg]
- g : Erdbeschleunigung 9.81 [m/s²]
- h : Anzuhebende Höhe 1 [m]
- V : Volumen des Wassers 1 [m³]

Messung

$$e_{\text{spezifisch}} = \frac{E_{\text{el}}}{\dot{V} \cdot h_{\text{förder}}}$$

- $e_{\text{spezifisch}}$: Spezifische Energie [Wh/m³m]
- E_{el} : Gemessene elektrische Energie [Wh/a]
- $h_{\text{förder}}$: Förderhöhe [m]
- $\dot{V}$: Gemessene Jahresfördermenge [m³/a]

18.2.12 Weitere Berechnung der Rohrreibungsverluste

Zusätzliche Berechnungen zum Kapitel 10 „Übersicht und Vergleich mit Empfehlungen des BFE“.

Rohrreibungszahl (Berechnung nach Nikuradse)	λ	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k}{3.71 \cdot D}\right)$
Rauhigkeitshöhe einer Druckrohrleitung ⁷	k	0.00025 m
Viskosität Wasser (10°C) ⁸	μ	0.001307 Ns/m ²
Massenstrom	$\dot{m}$	$0.1452 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 145.2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Tabelle 10: Weitere Berechnungen für Rohrreibungsverluste

Die Berechnungen wurden mit der Excel Datei „Berechnung Reibungsverluste.xlsx“, die sich im Anhang auf der CD befindet, durchgeführt.

18.3 Berechnung elektrische Messungen

Die Wirkleistung ist der Anteil der elektrischen Leistung, welcher Arbeit verrichten kann. Die Wirkleistung eines Elektromotors wird wie folgt berechnet:

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot \sqrt{3}$$

Für die Pumpenwirkungsgradberechnungen wurde der Mittelwert der gemessenen Wirkleistungen der gesamten stationären Betriebsdauer der jeweiligen Pumpe verwendet:

$$\bar{P}_{el} = \frac{\sum P_i}{n}$$

Die Scheinleistung wird wie folgt berechnet:

$$S = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

Um den jährlichen Energieverbrauch der Pumpen zu bestimmen, wurde die jährliche Laufzeit aus dem Excel-tool (Ein- und Ausschaltzeiten) mit der Wirkleistung multipliziert. Diesen Energieverbrauch wurde weiter in Stationärbetrieb und Start/Stop-Phase aufgeteilt.

⁷ <http://www.ikz.de/1996-2005/1997/05/9705072.php>

⁸ http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html#kap06

Energie Stationärbetrieb

Wirkenergie:

$$E_{\text{wirk,stat}} = P_{\text{el}} \cdot t_{\text{stat}}$$

Scheinenergie:

$$E_{\text{schein,stat}} = S \cdot t_{\text{stat}}$$

Energie Start- Stopp-Phase

Wirkenergie:

$$E_{\text{wirk,dyn}} = \int_{t_{\text{Start,Ein}}}^{t_{\text{Ende,Ein}}} P_{\text{el}} \cdot dt + \int_{t_{\text{Start,Aus}}}^{t_{\text{Ende,Aus}}} P_{\text{el}} \cdot dt$$

Scheinenergie:

$$E_{\text{schein,dyn}} = \int_{t_{\text{Start,Ein}}}^{t_{\text{Ende,Ein}}} S \cdot dt + \int_{t_{\text{Start,Aus}}}^{t_{\text{Ende,Aus}}} S \cdot dt$$

Die Energie der Start- und Stopp-Phasen wurde bereits mit der Analysesoftware PAT2 aufsummiert. Diese Werte konnten direkt aus den exportierten Daten ausgelesen werden.

18.4 Übersicht Schaltungen pro Pumpstation

18.4.1 Übersicht Schaltungen Bellevue 2012

Folgende Tabelle zeigt die Schaltungen der einzelnen Pumpen der Station Bellevue im Jahre 2012.

	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	ALLE
Schaltungen pro Jahr	252	280	333	-	865
Laufzeit [Min]	10979	10323	4505	-	25807
Stillstandzeit [Min]	514372	515028	520846	-	1550246
Häufigste Laufzeit [Min]	1	1	1	-	1
Mittlere Laufzeit [Min]	43.57	36.87	13.53	-	31.32
Mittlere Stillstandzeit [Min]	2033	1833	1559	-	1808
Maximale Laufzeit [Min]	817	739	665	-	817
Maximale Stillstandzeit [Min]	53562	57592	40333	-	57592
Laufzeit 0 Pumpen [Min]	501769			Anteil der Gesamtzeit	95.21%
Laufzeit 1 Pumpe [Min]	24807			Anteil der Gesamtzeit	4.71%
Laufzeit 2 Pumpen [Min]	392			Anteil der Gesamtzeit	0.07%
Laufzeit 3 Pumpen [Min]	72			Anteil der Gesamtzeit	0.01%

Tabelle 11: Übersicht Schaltungen Bellevue 2012

18.4.2 Übersicht Schaltungen Bellevue 2013

Folgende Tabelle zeigt die Schaltungen der einzelnen Pumpen der Station Bellevue im Jahre 2013.

	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	ALLE
Schaltungen pro Jahr	214	206	211	-	631
Laufzeit [Min]	16364	11157	6900	-	34421
Stillstandzeit [Min]	509236	514443	518700	-	1542379
Häufigste Laufzeit [Min]	1	1	1	-	1
Mittlere Laufzeit [Min]	76.47	54.16	32.70	-	54.44
Mittlere Stillstandzeit [Min]	2369	2485	2447	-	2433
Maximale Laufzeit [Min]	6140	2727	3481	-	6140
Maximale Stillstandzeit [Min]	57619	38430	50322	-	57619
Laufzeit 0 Pumpen [Min]	493285			Anteil der Gesamtzeit	93.60%
Laufzeit 1 Pumpe [Min]	33156			Anteil der Gesamtzeit	6.29%
Laufzeit 2 Pumpen [Min]	532			Anteil der Gesamtzeit	0.10%
Laufzeit 3 Pumpen [Min]	67			Anteil der Gesamtzeit	0.01%

Tabelle 12: Übersicht Schaltungen Bellevue 2013

18.4.3 Übersicht Schaltungen Wollishofen 2012

Folgende Tabelle zeigt die Schaltungen der einzelnen Pumpen der Station Wollishofen im Jahre 2012.

	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	ALLE
Schaltungen pro Jahr	5170	5095	5245	5296	20806
Laufzeit [Min]	30011	31513	37729	34337	133590
Stillstandzeit [Min]	497029	495527	489311	492703	1974570
Häufigste Laufzeit [Min]	5	5	6	5	5.25
Mittlere Laufzeit [Min]	5.80	6.19	7.19	6.48	6.42
Mittlere Stillstandzeit [Min]	96	97	93	93	95
Maximale Laufzeit [Min]	159	1325	1513	196	1513
Maximale Stillstandzeit [Min]	4416	13280	3088	1402	13280
Laufzeit 0 Pumpen [Min]	398150		Anteil der Gesamtzeit		75.54%
Laufzeit 1 Pumpe [Min]	124809		Anteil der Gesamtzeit		23.68%
Laufzeit 2 Pumpen [Min]	3468		Anteil der Gesamtzeit		0.66%
Laufzeit 3 Pumpen [Min]	607		Anteil der Gesamtzeit		0.12%
Laufzeit 4 Pumpen [Min]	6		Anteil der Gesamtzeit		0.00%

Tabelle 13: Übersicht Schaltungen Wollishofen 2012

18.4.4 Übersicht Schaltungen Wollishofen 2013

Folgende Tabelle zeigt die Schaltungen der einzelnen Pumpen der Station Wollishofen im Jahre 2013.

	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	ALLE
Schaltungen pro Jahr	4888	4924	4959	4988	19759
Laufzeit [Min]	29152	34634	29728	30528	124042
Stillstandzeit [Min]	496448	490966	495872	495072	1978358
Häufigste Laufzeit [Min]	5	5	5	5	5
Mittlere Laufzeit [Min]	5.96	7.03	5.99	6.12	6.28
Mittlere Stillstandzeit [Min]	102	100	100	99	100
Maximale Laufzeit [Min]	190	4454	167	520	4454
Maximale Stillstandzeit [Min]	7623	4887	4921	4874	7623
Laufzeit 0 Pumpen [Min]	406246		Anteil der Gesamtzeit		77.08%
Laufzeit 1 Pumpe [Min]	117982		Anteil der Gesamtzeit		22.39%
Laufzeit 2 Pumpen [Min]	2382		Anteil der Gesamtzeit		0.45%
Laufzeit 3 Pumpen [Min]	424		Anteil der Gesamtzeit		0.08%
Laufzeit 4 Pumpen [Min]	6		Anteil der Gesamtzeit		0.00%

Tabelle 14: Übersicht Schaltungen Wollishofen 2013

18.5 Verwendete Messgeräte

Für die Messungen in den Pumpstationen wurden folgende Messgeräte verwendet.

Volumenstrommessgerät
Endress+Hauser
Typ: Ultrasonic 93
Volumenstrommessung
Messgenauigkeit: Ausgabewert auf $\pm 5\%$ ablesbar
Rechnereinheit mit Digitalanzeige

Druckmessgerät
Keller Druckmesstechnik
Typ: PD-39S/80932.5-1
Druckmessung
Messgenauigkeit: 0.5% auf gesamten Messbereich
Software: Control Center Serie 30

Leistungsmessgerät
Chauvin Arnoux
Typ: C.A 8335
Elektrische Leistungsmessung
Messgenauigkeit: maximale Abweichung 1%
Software: PAT2

Tabelle 15: Verwendete Messgeräte

Folgendes Bild zeigt das Schema der durchgeführten Druckmessung.

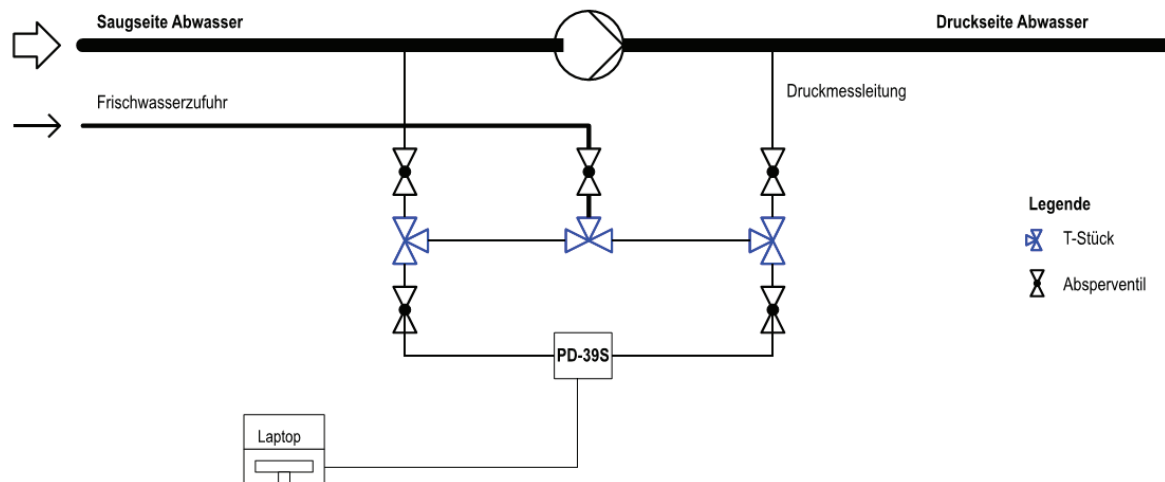


Abbildung 16: Schema Druckmessung

18.6 Projektskizze

18.7 Projektauftrag

18.8 Datenverzeichnis CD