

Reduktion des Energieverbrauchs eines Pumpwerkes durch Verbesserung der Pumpenstaffelung

Bachelorarbeit von Simon Kramer



Verantw. Professor: Prof. Dr. Eberhard Morgenroth
Betreuung: Dipl.-Ing. Philipp Beutler
MSc ETH Umwelt-Ing. Sara Engelhard
Externe Betreuung: Dr. David Dürrenmatt
Dr. Kris Villez

29. Mai 2015
ETH Zürich



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

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):

Reduktion des Energieverbrauchs eines Pumpwerkes durch Verbesserung der Pumpenstaffelung

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Kramer

Vorname(n):

Simon

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, 29.05.15

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.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei jenen bedanken, die mir bei der Bachelorarbeit geholfen haben. Insbesondere danke ich meinen beiden externen Betreuer Dr. David Dürrenmatt von der Rittmeyer AG und Dr. Kris Villez von der EAWAG für die kompetente Betreuung, die zur Verfügung gestellten Informationen und die hilfreichen Anregungen. Sie haben mir sehr geholfen, die inhaltliche Auseinandersetzung auf ein hohes Niveau zu bringen. Ein weiterer Dank geht an die Betreuerin Sarah Engelhard, welche mir vor allem am Anfang meiner Arbeit gutes Feedback gab. Meinem Betreuer Philipp Beutler danke ich sehr für die Zeit, die er mir zur Verfügung stellte um meine formellen Fragen zu beantworten und mir hilfreiches Feedback zu geben. Einen herzlichen Dank geht auch an Prof. Dr. Eberhard Morgenroth für die kritischen Fragen und die Ermutigung genug früh mit dem Berichteschreiben zu beginnen.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin für das mir entgegengebrachte Verständnis und die Motivation auch in schwierigen Phasen dranzubleiben. Ihr habt mich viel ermutigt und mich emotional sehr unterstützt.

Diese Arbeit wurde mit \LaTeX erstellt. Ich danke allen die an der Entwicklung dieses hilfreichen Schreibprogrammes mitgeholfen haben. Es hat das Verfassen und das Formatieren meiner Bachelorarbeit um einiges erleichtert. Ein Dank geht auch an die Entwickler von $\text{BIB}\TeX$, durch welche das Zitieren strukturierter gestaltet werden konnte. Zudem möchte ich mich auch bei den Entwicklern von MATLAB bedanken. Ohne ihre ausgeklügelten Hilfsprogramme hätte ich viel mehr Zeit für die Datenauswertung und das finden der richtigen Optimierungstoolbox gebraucht.

Kurzfassung

Der Betrieb von Pumpenanlagen macht einen grossen Anteil des Energieverbrauches einer Gemeinde aus. Durch geschickte Regelung parallel installierter Pumpen kann die Effizienz erhöht werden. Ziel dieser Arbeit ist die Implementierung eines Optimierungsalgorithmus, welcher einerseits die Staffelung paralleler Kreiselpumpen, andererseits die Drehzahlregulierung und die Ausnützung des Speichers im Pumpensumpf beachtet, um den Energieverbrauch und die Schalthäufigkeit zu minimieren. Als Datengrundlage dienen Messreihen und wichtige Pumpenkennblätter von drei Abwasserpumpwerken. Mit Hilfe dieser Daten kann der erarbeitete Algorithmus praktisch getestet und kalibriert werden. Die erhaltene optimierte Betriebsweise wird mit der bisherigen Betriebsweise der Pumpwerke verglichen und Empfehlungen für einen verbesserten Betrieb abgegeben.

Eine Zielfunktion, welche den Energieverbrauch in Abhängigkeit der Fördermenge und der Drehzahl der Kreiselpumpen berücksichtigt, sucht in jedem Zeitschritt nach dem Betriebspunkt, der alle Nebenbedingungen einhält und am wenigsten Energie verbraucht. Die geschickte Wahl einer Nebenbedingung, dass nur beim maximalen oder minimalen Füllstand im Pumpensumpf geschaltet wird, reduziert zusätzlich die Schalthäufigkeit. Die Optimierungstoolbox in MATLAB kann durch einen genetischen Algorithmus das gemischt-ganzzahlige nichtlineare Minimierungsproblem lösen.

Durch Anwendung des Algorithmus über einen gewissen Zeitraum (03.01.15, 8:00 Uhr bis 04.01.15, 8:00 Uhr) kann beim Pumpwerk, welches bereits die Drehzahl reguliert, 12% an Energie und 11% an Schaltvorgängen gespart werden. Beim Pumpwerk, welches keine Drehzahlregulierung aufweist, findet der Algorithmus sogar eine Betriebsweise, welche 32% weniger Energie verbraucht. Die Speicherfunktion durch den Pumpensumpf kann häufige Schaltwechsel abfangen, aber die grösste Ersparnis ist auf die Drehzahlregulierung zurückzuführen. Je mehr parallele Pumpen vorhanden sind, desto grösser ist die Schalthäufigkeitsreduktion durch Regulierung der Drehzahl. Es empfiehlt sich jedes Pumpwerk mit einer Drehzahlregulierung auszustatten. Durch die lange Betriebszeit einzelner Pumpen ist schon bei einer kleinen Energiereduktion eine grosse Kosteneinsparungen zu erwarten.

Der Optimierungsalgorithmus weist einige Vereinfachungen auf, welche Unsicherheiten im Resultat hervorrufen. So wird zum Beispiel die Annahme getroffen, dass über verschiedenen Drehzahleinstellungen der Wirkungsgrad konstant bleibt. Es ergeben sich zudem Unsicherheiten aus den Näherungen der Pumpenkennlinien. Der Optimierungsalgorithmus kann weiter verfeinert werden, so dass er zum einen die Realität besser abbildet und zum anderen durch Prognosen der ankommenden Abwassermenge bessere Optimierungsergebnisse berechnet. Es besteht die Vision diesen Optimierungsalgorithmus in das Regulierungssystem aktueller Pumpwerke einzubinden, um deren Betriebsweise nachhaltig zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	iv
1. Einführung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Ziel der Arbeit	1
1.3. Grundlagen zu Kreiselpumpen	2
1.4. Datengrundlage	3
2. Methode	4
2.1. Optimierungsgerüst	4
2.2. Übersicht der Parameter der Pumpwerke	9
3. Resultate	12
3.1. Anwendung des Optimierungsgerüst	12
3.2. Pumpwerk 61	12
3.3. Pumpwerk 41	14
3.4. Ablaufpumpwerk der ARA	16
4. Diskussion	18
4.1. Analyse des Optimierungsalgorithmus	18
4.2. Erkenntnisse für den optimierten Betrieb der Pumpwerke	19
4.3. Literaturvergleich	20
4.4. Wirtschaftliche Betrachtung	20
5. Schlussfolgerung und Ausblick	21
Literaturverzeichnis	22
A. Anhang	23
A.1. Herleitung der Zielfunktion und der Massenbilanz	23
A.2. Kennlinienblätter	24
A.3. Messdaten der Pumpwerke	27
A.4. Grund- und Aufrisse der Pumpwerke	30
A.5. Abbildungen für den Betriebsvergleich	33
A.6. Symbolverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

1.	Übersicht der wichtigsten Regelungsmöglichkeiten	3
2.	Übersicht des Optimierungsgerüsts	4
3.	Systematisch Darstellung eines Pumpwerkes	5
4.	Systematische Darstellung der Betriebspunkte	7
5.	Vergleich der Betriebsweise vom Pumpwerk 61 mit Szenario „Flexibel“ . .	13
6.	Energieverbrauch und Schalthäufigkeit vom Pumpwerk 61	14
7.	Vergleich der Betriebsweise vom Pumpwerk 41 mit Szenario „fixer Füllstand“	15
8.	Energieverbrauch und Schalthäufigkeit vom Pumpwerk 41	16
9.	Vergleich der Betriebsweise vom Ablaufpumpwerk der ARA mit Szenario „fixe Drehzahl“	17
10.	Energieverbrauch und Schalthäufigkeit vom Pumpwerk 61	17
11.	Kennlinienblatt vom Pumpwerk 41	24
12.	Kennlinienblatt vom Pumpwerk 61	25
13.	Kennlinienblatt vom Ablaufpumpwerk der ARA	26
14.	Verteilung der Parameter vom Pumpwerk 41	27
15.	Verteilung der Parameter vom Pumpwerk 61	28
16.	Verteilung der Parameter vom Ablaufpumpwerk der ARA	28
17.	Messreihe vom Ablaufpumpwerk der ARA	29
18.	Grundriss vom Ablaufpumpwerk der ARA	30
19.	Grund- und Aufriss vom Pumpwerk 41	31
20.	Grund- und Aufriss vom Pumpwerk 61	32
21.	Aufriss vom Ablaufpumpwerk der ARA	33
22.	Vergleich der Betriebsweise vom Pumpwerk 61 mit Szenario „fixer Füll- stand“ und „fixe Drehzahl“	34
23.	Vergleich der Betriebsweise vom Pumpwerk 41 mit Szenario „Flexibel“ und „fixe Drehzahl“	35
24.	Vergleich der Betriebsweise vom Ablaufpumpwerk der ARA mit Szenario „Flexibel“ und „fixer Füllstand“	36

Tabellenverzeichnis

1.	Datengrundlage der Pumpwerke für die Optimierung	4
2.	Eingangsparameter für die Optimierung	11
3.	Kostenabschätzung für Pumpwerk 41 und 61	20

1. Einführung

Die Wasserver- und entsorgung macht bei Kommunen etwa ein Fünftel des totalen Energieverbrauchs aus. Dabei verbrauchen Pumpen 90% dieser Energie (Schmied u. a., 2004). Die Anschaffungskosten von Pumpen sind im Vergleich zu den Betriebskosten sehr gering. Aus diesem Grund ist dem Betrieb von Pumpen hohe Beachtung zu schenken. Viele Pumpwerke in einem Einzugsgebiet weisen mehrere parallel geschaltete Pumpen auf. So können Redundanzen im Betrieb aufrecht erhalten werden. Zusätzlich wird die Möglichkeit geschaffen sich dem variablen Zustrom anzupassen. Einem Bericht zufolge sind von 65 in der Schweiz untersuchten Pumpwerken nur zwei innerhalb des festgesetzten Energieoptimums von $4.0 \text{ Wh/m}^3/\text{m}$. Zudem konnte gezeigt werden, dass in Nordrhein Westfalen 63 Mio. kWh/a durch eine Effizienzsteigerung von 40% eingespart werden können (Bolle, 2013). Die Energieproblematik und die Treibhausgasthematik verstärken zusätzlich die Nachfrage nach einer energieeffizienten Gestaltung von Pumpwerken.

1.1. Problemstellung

Eine hydraulische Pumpe soll durch regelungstechnische Massnahmen möglichst am besten Betriebspunkt laufen. Die Kavitation hat an diesem Punkt ihr Minimum und der Wirkungsgrad sein Maximum. Um jeder Zeit beim optimalen Betriebspunkt zu arbeiten, muss häufig geschaltet werden. Durch jedes anschalten entstehen allerdings hohe Stromaufnahmen, die die Kupferwicklung von Motoren thermisch belasten. Die Isolation des Kupferdrahtes wird spröde und das Risiko für einen Kurzschluss steigt (Bolle, 2013). Zudem kann die Lebenszeit einer Pumpe verkürzt werden, weil anderer Komponenten durch den Verschleiss in Mitleidenschaft gezogen werden.

1.2. Ziel der Arbeit

Ein Pumpwerk weist viele zusammenwirkenden Komponenten auf, welche alle einen Einfluss auf die Effizienz eines Pumpwerkes ausüben (Bolle, 2013, S. 30). Die Energieeffizienz des gesamten Systems zu analysieren und zu verbessern würde den Inhalt dieser Arbeit sprengen. Ziel soll es sein, durch einen optimierten Betrieb von installierten Kreiselpumpen, insbesondere durch die Staffelung, die Drehzahlregulierung und den Füllstand im Pumpensumpf den Energieverbrauch eines Abwasserpumpwerkes zu minimieren. Es soll dabei ein zusätzliches Augenmerk auf die Schaltvorgänge gelegt werden. Hierfür wird ein Algorithmus erarbeitet, welcher anhand gegebener Daten drei Abwasserpumpwerke zu optimieren versucht. So kann die Tauglichkeit des Algorithmus getestet werden und durch einen Vergleich der optimierten Betriebsweise mit der bisherigen Betriebsweise Empfehlungen für den praktischen Betrieb abgeleitet werden.

1.3. Grundlagen zu Kreiselpumpen

1.3.1. Anforderungen und Funktionsweise von Kreiselpumpen

Pumpen sind Maschinen, die Fluide oder Gase durch mechanische Arbeit fördern. Sie müssen folgende vier Kategorien erfüllen um im Markt zu bestehen: Energieeffizienz, Betriebssicherheit, Verstopfungsfreiheit und Automatisierungsfähigkeit (Bolle, 2013). Hydraulische Pumpen können grundsätzlich in zwei Gruppierungen unterteilt werden: Verdrängerpumpen und Strömungspumpen. Kreiselpumpen, welche im Abwassersektor am häufigsten eingesetzt werden, gehören zur zweiten Gruppe. Sie erfüllen die nötigen Anforderungen, weil sie sehr robust sind und eine kleine Verstopfungsgefahr aufweisen. Sie zeichnen sich zudem durch einen hohen Wirkungsgrad aus. Laufräder drücken das Medium durch die Zentrifugalkraft nach aussen. Es entsteht eine Druckkraft, welche das Wasser in die Höhe befördert.

1.3.2. Regelung von Kreiselpumpen

Um möglichst beim optimierten Betriebspunkt zu arbeiten und sich den gegebenen Zuflussveränderungen anzupassen, hat eine Kreiselpumpe die folgende Regelungsmöglichkeiten (KSB, 2010):

Drosselung: Die Pumpe fährt immer am Betriebspunkt mit dem besten Wirkungsgrad. Hierfür wird der Förderstrom gedrosselt. Es entstehen hohe Druckverluste, welche sich in einem schlechten hydraulischen Wirkungsgrad niederschlagen.

Zu-/Abschalten von Pumpen: Durch die Serie- oder Parallelschaltung kann die Förderhöhe bzw. der Förderstrom variiert werden. Die Pumpen können so gestaffelt werden, dass sie am Energieoptimum arbeiten. Der Vorteil ist eine grosse Betriebsvarianz der Förderhöhen und der Fördermengen. Bei einer schlechten Dimensionierung und Regelung kommt es allerdings häufig zu unerwünschten Schaltwechseln.

Bypass-Regelung: Die Pumpe wird am optimalen Betriebspunkt gefahren. Durch einen hydraulischen Kurzschluss wird das zu viel gepumpte Wasser, in den Pumpensumpf zurückgefördert. Das System hat darum einen schlechten volumetrischen Wirkungsgrad.

Drehzahl-Regelung: Ein Frequenzumrichter (FU) kann die Drehzahl der Pumpe stufenlos verstellen, sodass der Betriebspunkt immer beim Optimum liegt. Durch FU's kann sich die Pumpe sehr schnell und energieeffizient an neue Bedingungen anpassen. Bei grösseren Abweichungen von der Nenndrehzahl kann sich der Wirkungsgrad verschlechtern. FU's sind in der Anschaffung jedoch relativ teuer.

Laufschaufelverstellung: Der Winkel der Laufräder wird verstellt. Das Wasser erhält so eine andere Druckkraft, was eine grosse Regelungsvarianz erlaubt. Es entsteht jedoch eine erhöhte Kavitationsgefahr.

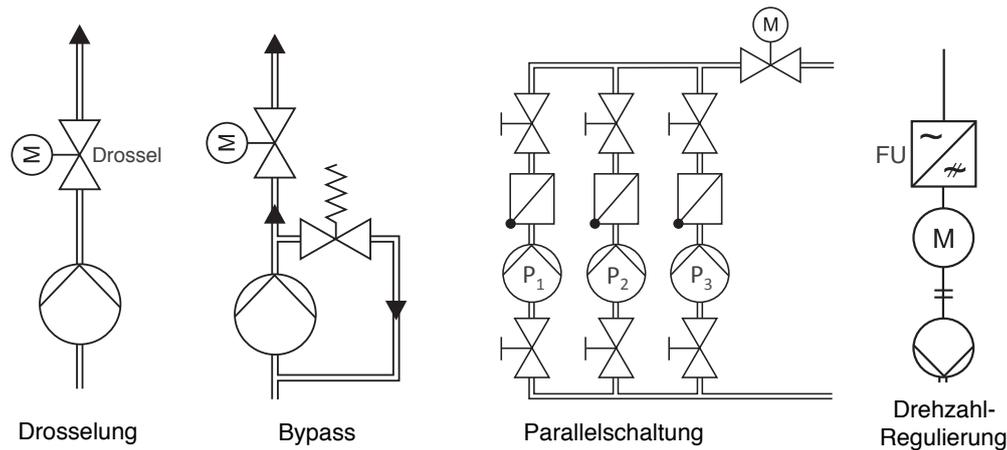


Abbildung 1: Übersicht der wichtigsten Regelungsmöglichkeiten für Kreiselpumpen.

Abbildung 1 veranschaulicht die Funktionsweise der wichtigsten Regelungsmöglichkeiten. Die Regelung hängt von zwei Faktoren ab. Entweder ist die Regelgröße vom Füllstand im Pumpensumpf abhängig oder vom Förderstrom der Pumpe. Im ersten Fall wird bei einem über- oder unterschreiten eines Füllstand-Schwellenwertes eine Regelung (z. B. eine Drehzahländerung) vorgenommen. Diese Methode wird auch bei den untersuchten Pumpwerken angewendet. Der zweite Fall möchte den Förderstrom konstant halten, dabei müssen Widerstände und Druckschwankungen ausgeglichen werden (KSB, 2010).

1.4. Datengrundlage

Die Pumpenbetreiber werden an dieser Stelle nicht namentlich erwähnt, deshalb werden die Pumpwerke in dieser Arbeit Pumpwerk 41 (PW 41), Pumpwerk 61 (PW 61) und Ablaufpumpwerk der ARA (PW ARA) genannt. Für die Arbeit sind von diesen Pumpwerken Messreihen zur Verfügung gestellt worden. Insbesondere sind im besten Fall minütliche Messungen der gepumpten Fördermenge, der Drehzahlen der Pumpen, des Energieverbrauches, der Schaltung und des Füllstandes im Pumpensumpf gegeben. Sind diese nicht gegeben, müssen sie berechnet oder abgeschätzt werden. Weitere wichtige Infos zu den installierten Pumpen sind den Kennlinienblättern vom Pumpenhersteller zu entnehmen (siehe Anhang A.2). Die Auf- und Grundrisse der Pumpwerke (siehe Anhang A.4) liefern weitere wichtige Informationen für die Optimierung. Die Tabelle 1 stellt die genaue Datenlage der drei Pumpwerke dar.

Tabelle 1: Datengrundlage der Pumpwerke für die Optimierung. Ps=Pumpensumpf, FU=Frequenzumrichter

Daten	PW 41	PW 61	PW ARA
Durchflussmessung	minütlich	minütlich	minütlich
Schaltungsaufzeichnung	nur die Schaltwechsel sind aufgezeichnet		
Drehzahlmessung	keine	minütlich	alle 8 Minuten
Füllstandsmessung im Ps	minütlich	minütlich	minütlich
Energiezähler	minütlich	minütlich	keine
Pumpenkennlinie	ist bei allen PW's gegeben		
Leistungskennlinie	nicht gegeben	gegeben	gegeben
Drehzahlregelung	kein FU	FU mit 30-50 Hz	FU mit 25-50 Hz

2. Methode

2.1. Optimierungsgerüst

Um einen effizienten Betrieb zu erhalten wird durch eine Optimierung der Energieverbrauch minimiert. Das Minimierungsproblem weist mehreren Nebenbedingungen auf. Die grobe Struktur des Optimierungsgerüsts ist in Abbildung 2 aufgeführt. Die im Optimierungsalgorithmus implementierte Zielfunktion und die implementierten Nebenbedingungen stellen das Grundgerüst dar. Mit Hilfe einer Massenbilanz kann anhand der Messung der Fördermenge und des Füllstandes der Abwasserzufluss in den Pumpensumpf berechnet werden. Dieser wird für den Input benötigt. Weitere Eigenschaften von Pumpwerken „füttern“ den Optimierungsalgorithmus. Dieser generiert anschliessend einen optimierten Output, namentlich eine optimierte Fördermenge und eine optimierte Schaltung. Aus dieser Information können durch verschiedene Kennlinien und Gesetze die Drehzahl, die Förderhöhe und die Energie abgeleitet werden. Durch eine neue Massenbilanz entsteht ein neuer Füllstand im Pumpensumpf, welcher als Grundlage für die Optimierung des nächsten Zeitschrittes dient.

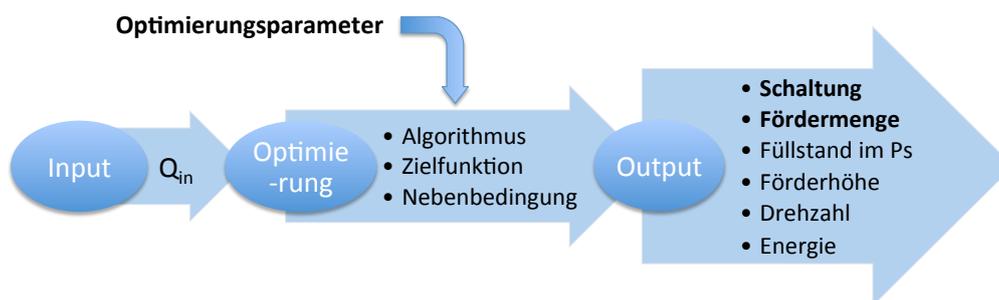


Abbildung 2: Übersicht des Optimierungsgerüsts: Der Abwasserzufluss Q_{in} ist aus der Massenbilanz im Pumpensumpf (Ps) bestimmt.

2.1.1. Optimierungsparameter

Abbildung 3 zeigt eine systematische Skizze des zugrundeliegenden Optimierungsproblems. Es sind N Pumpen (hier drei) parallel angeordnet, welche Abwasser vom Pumpensumpf in ein höher gelegenes Ziel fördern. Je nachdem, wieviel Abwasser in den Pumpensumpf (Q_{in}) gelangt, sind keine, eine oder zwei Kreiselpumpen im Betrieb. Eine dritte Pumpe ist zur Reserve eingebaut, falls eine Pumpe ausfiel. Viele Pumpenhersteller verweisen darauf, dass jede Pumpe alternierend in Betrieb sein soll, so dass keine Pumpe lange Standzeiten (Sz) aufweist. (KSB Pumpenlexikon, 2015) Jede Pumpe kann mit einer gewissen Drehzahl n einen Förderstrom Q auf eine Förderhöhe H_p pumpen. Sie ist dafür eine bestimmte Dauer Lz in Betrieb. Die Schaltung der Pumpen wird durch eine Variable $S \in \{0, 1\}$ beschrieben. Bei $S=1$ ist die Pumpe in Betrieb, bei $S=0$ ausser Betrieb. Die Änderung des Füllstandes im Pumpensumpf (ΔH_{Ps}) kann durch eine einfache Druckmessung erfasst werden. Daraus berechnet sich über eine Massenbilanz die zugeführte Menge Q_{in} . Im folgenden Kapitel wird gezeigt wie für ein zuvor aus den Messdaten berechnetes Q_{in} die energieeffizienteste Schaltung und Fördermenge gefunden werden kann. Alle anderen Parameter, wie zum Beispiel die Drehzahl oder die Förderhöhe stehen durch verschiedene Gesetze und Nebenbedingungen in Abhängigkeit.

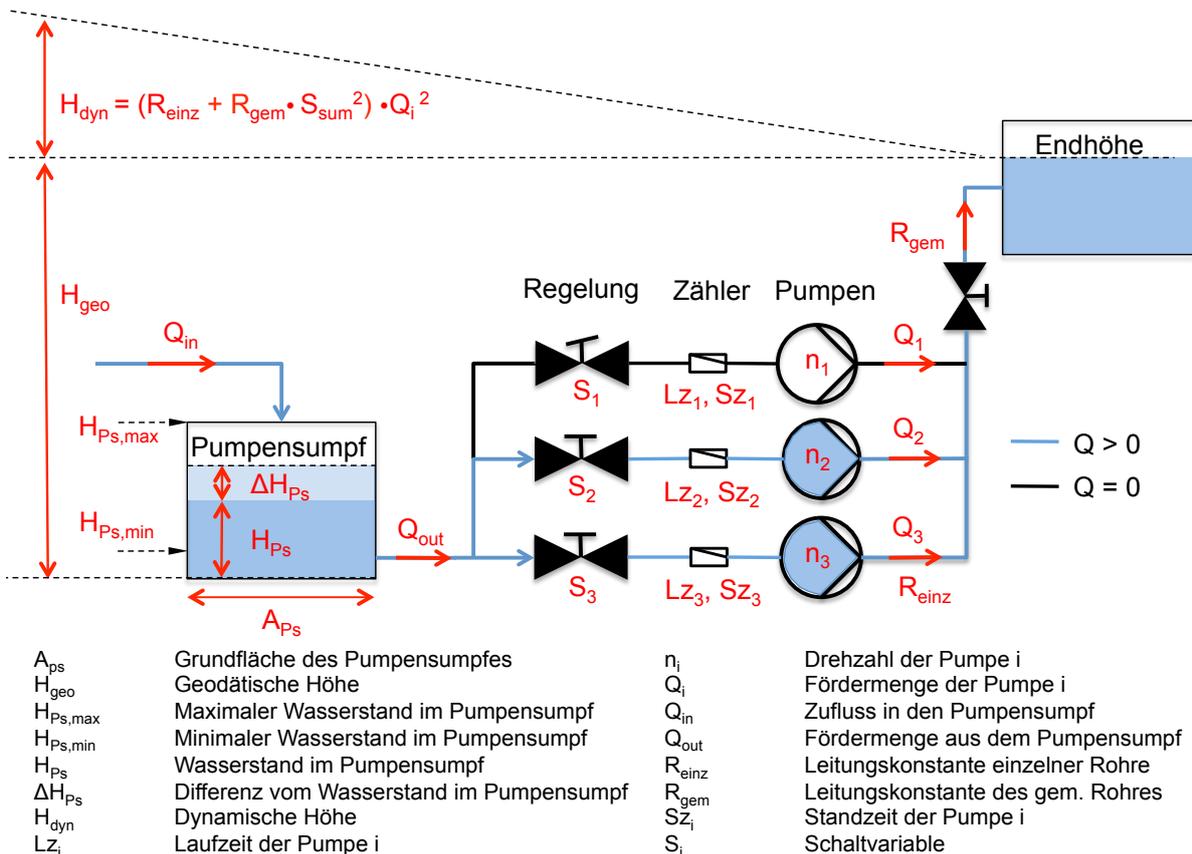


Abbildung 3: Systematisch Darstellung eines Pumpwerkes mit drei parallel geschalteten Pumpen.

2.1.2. Zielfunktion

Für das Optimierungsproblem muss die zu optimierende Variable (Durchfluss und Schaltung) in einer Zielfunktion dargestellt werden. Hierfür werden die Kennlinien der Pumpen benötigt. Die Beziehung zwischen dem Durchfluss Q und der Förderhöhe H_p , wie auch der Leistungsaufnahme P der Pumpe ist im Kennlinienblatt vom Pumpenhersteller gegeben. Die verwendeten Kennlinienblätter von den drei Abwasserpumpwerken sind im Anhang A.2 ersichtlich. Diese Kennlinien können durch folgende Parabeln mit den Parametern a_i und b_i angenähert werden:

$$H_P = a_0 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q + a_2 \quad (1)$$

$$P = b_0 \cdot Q^2 + b_1 \cdot Q + b_2 \quad (2)$$

Durch eine Veränderung der Drehzahl der Pumpe variiert die Kennlinie. Durch folgende Affinitätsgesetze kann jeder Punkt im Kennfeld mit der Drehzahl n_0 auf einen Punkt mit Drehzahl n transformiert werden (KSB, 2010).

$$Q_0 = Q \cdot \frac{n_0}{n} \quad H_{P,0} = H_P \cdot \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 \quad P_0 = P \cdot \left(\frac{n_0}{n}\right)^3 \quad (3)$$

Für drehzahlgeregelte Pumpen können unter Verwendung dieser Affinitätsgesetze die Gleichungen (1) und (2) wie folgt umgeformt werden, wobei n_0 die Nenndrehzahl und n die geregelte Drehzahl darstellt (Hähnlein, 2008):

$$H_P = a_0 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (4)$$

$$P = b_0 \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 + b_1 \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 + b_2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (5)$$

Löst man Formel (4) nach der Drehzahl n auf und setzt sie in die Gleichung (5) ein, erhält man die Leistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom und der Förderhöhe. Diese Gleichung ergänzt mit der Schaltvariable $S \in \{ 0, 1 \}$ ergibt folgende abgewandelte Gleichung von Broll und Mannel (2010) (Die genaue Herleitung ist in Kapitel A.1 einzusehen).

$$\text{Min } P = \sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \left(b_{0,i} \cdot Q_i^2 \cdot \frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} + \right. \right. \\ \left. \left. b_{1,i} \cdot Q_i \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. b_{2,i} \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^3 \right) \right) \quad (6)$$

2.1.3. Nebenbedingungen

Für den Betrieb sind einige lineare, wie nichtlineare Nebenbedingungen einzuhalten. Sie grenzen den Lösungsbereich der Zielfunktion ein. Die erste Nebenbedingung ist durch den Betriebspunkt definiert, welcher wie in Abbildung 4 ersichtlich im Schnittpunkt der Anlagekennlinie mit der Pumpenkennlinie liegt (Gujer, 2007). Die Zielfunktion soll nur diese Punkte als angehendendes Optimum betrachten, welche genau die erforderlichen Förderhöhe H_p erreichen. Diese ist wie in Formel (7) ersichtlich von der geodätischen Höhe H_{geo} , vom Füllstand im Pumpensumpf H_{ps} und von der dynamischen Verlusthöhe H_{dyn} abhängig. Da die Optimierung dynamisch betrachtet wird, variieren die Parameter über die Zeit t . Für jeden Zeitpunkt t gilt:

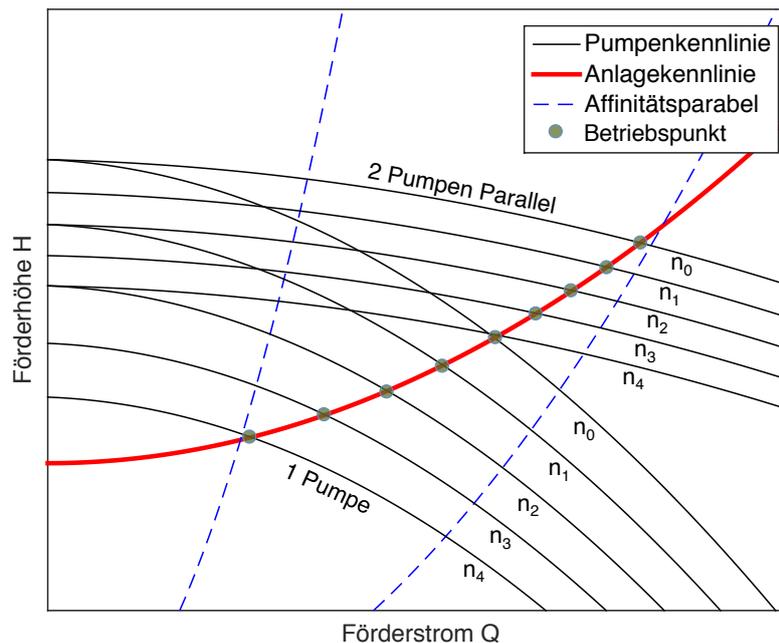


Abbildung 4: Systematische Darstellung der Betriebspunkte, welche auf dem Schnittpunkt der regulierten Pumpenkennlinie mit der Anlagekennlinie liegen.

$$H_{p,t} = H_{geo} + \Delta H_{Ps,t} + H_{dyn,t} \quad (7)$$

Die Förderhöhe H_p soll mit der gepumpten Fördermenge in Abhängigkeit gebracht werden, weil schliesslich diese mit der Schaltung zusammen als optimierende Variablen in den Algorithmus einfließen sollen. Der dynamische Höhenanteil entspricht einer Funktion vom Durchfluss Q und zwei Leitungsconstanten R_{gem} und R_{einz} (Gülich, 2013). N bezeichnet die Anzahl der installierten Pumpen und $S_{sum,t}$ die Anzahl der Pumpen, welche effektiv parallel im Betrieb sind. Es gilt:

$$H_{dyn,t} = (R_{einz} + S_{sum}^2 \cdot R_{gem}) \cdot Q_{i,t}^2, \quad \text{wobei } S_{sum,t} = \sum_{i=1}^N S_{i,t} \quad (8)$$

Der Füllstand im Pumpensumpf kann durch eine Massenbilanzierung bestimmt werden. Wenn mehr gepumpt wird wie der Zufluss in den Pumpensumpf, sinkt der Füllstand, andernfalls steigt er. Der Füllstand $H_{ps,t}$ kann durch ein hohes Niveau die Förderhöhe verringern. Es gilt aufgrund der Massenbilanz (genaue Herleitung im Anhang A.1, unten):

$$\Delta H_{Ps} = \frac{(Q_{in} - Q_{tot}) \cdot T}{A_{Ps}} \quad , \quad \text{wobei} \quad Q_{tot,t} = \sum_{i=1}^N S_{i,t} \cdot Q_{i,t} \quad (9)$$

Die erforderliche Förderhöhe in Abhängigkeit vom Förderstrom ist durch die Pumpenkennlinien eingegrenzt. Die beiden Affinitätsparabeln, welche in Abbildung 4 zu sehen sind, schränken den möglichen Betriebspunkt ein. Zudem müssen die Drehzahlen der einzelnen Pumpen innerhalb von n_{min} und n_{max} liegen. Um fixierte Drehzahlen zu simulieren werden die Grenzen einfach sehr eng gewählt. Die maximale und minimale Drehzahl wird mit der Schaltvariable S_i multipliziert, damit wenn die Pumpen ausser Betrieb ist, die Drehzahl Null ist. Das gleiche gilt auch für die Förderhöhe, wenn die Pumpe aus ist. Es gelten also folgende Nebenbedingungen:

$$H_{p,t} \leq H_{p,max} \cdot \frac{Q_{i,t}^2 \cdot S_{i,t}}{Q_{i,max}^2} \quad (10)$$

$$H_{p,t} \geq H_{p,min} \cdot \frac{Q_{i,t}^2 \cdot S_{i,t}}{Q_{i,min}^2} \quad (11)$$

$$S_{i,t} \cdot n_{i,min} \leq n_{i,t} \leq n_{i,max} \cdot S_{i,t} \quad (12)$$

Weiter gilt für die Schaltungsvariable S , dass sie nur den Wert 0 oder 1 annehmen kann. Die Betriebs- und Wartungsanleitungen der Pumpenhersteller schlagen alle 200 bis 300 Betriebsstunden eine Wartung vor und raten von langen Standzeiten ab. Zudem soll eine maximale Betriebszeit pro Tag nicht überschritten werden. Die Laufzeit Lz bzw. die Standzeit Sz jeder Pumpe i soll also zu jeder Zeit t den Maximalwert nicht überschreiten. Es gilt:

$$S \in \mathbb{N}_0 \quad (13)$$

$$0 \leq S_{i,t} \leq 1 \quad (14)$$

$$Lz_{i,t} \leq Lz_{i,max} \quad (15)$$

$$Sz_{i,t} \leq Sz_{i,max} \quad (16)$$

Da der Füllstand im Pumpensumpf (H_{Ps}) mitberücksichtigt wird, braucht es für die Modellierung des Pumpensumpfes weitere Nebenbedingungen. Der Füllstand im Pumpensumpf darf einen gewissen Pegel ($H_{Ps,max}$, $H_{Ps,min}$) nicht über oder unterschreiten. Falls der Oberflächenspiegel zu tief ist, kann durch die kleine Differenz zwischen Wasserspiegel und Eintauchtiefe der Pumpe ein Wirbel entstehen. Dieser saugt Luft an, welches den Wirkungsgrad der Pumpe um einiges verschlechtert (Gülich, 2013, S. 844). Bei zu

hohem Pegel wird der Zulauf zu stark eingestaut. Des Weiteren darf der Pegel für eine optimale Berechnung vom Algorithmus innerhalb eines Zeitschrittes nicht zu stark schwanken. Es gilt also:

$$H_{Ps,min} \leq H_{Ps,t-1} + \Delta H_{Ps,t} \leq H_{Ps,max} \quad (17)$$

$$|\Delta H_{Ps,t}| \leq \Delta H_{Ps,max} \quad (18)$$

Um häufige Schaltvorgänge zu vermeiden soll nur geschaltet werden, wenn der Algorithmus durch Variieren der Drehzahl nicht mehr die Nebenbedingung des maximalen oder minimalen Füllstandes im Pumpensumpf einhalten kann. Bei einer Unterschreitung soll die Anzahl der laufenden Pumpen (S_{sum}) reduziert, bei einer Überschreitung erhöht werden. Zudem dürfen zur gleichen Zeit nicht mehrere Pumpen gleichzeitig an- oder abgeschaltet werden, da es sonst zu grossen Spannungsspitzen im Netz kommt. Die folgenden Nebenbedingungen sorgen für diesen Sachverhalt:

$$S_{sum,t} = \begin{cases} S_{sum,t-1} - 1 & \text{falls } H_{Ps,t-1} \leq H_{Ps,max} \text{ und } S_{sum,t-1} < N_{max} \\ S_{sum,t-1} & \text{falls } H_{Ps,min} < H_{Ps,t-1} < H_{Ps,max} \\ S_{sum,t-1} + 1 & \text{falls } H_{Ps,t-1} \geq H_{Ps,min} \end{cases} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^N (|S_{i,t} - S_{i,t-1}|) \leq 1 \quad (20)$$

2.1.4. Optimierungsalgorithmus in MATLAB

Die Optimierungsaufgabe stellt mathematisch ein gemischt-ganzzahliges nichtlineares Minimierungsproblem dar, welches mit Hilfe einer Optimierungstoolbox in MATLAB gelöst werden kann. Der genetischen Algorithmus kann den Anforderungen eines solchen Problems gerecht werden. Er wird genetisch genannt, weil es sich auf die natürliche Selektion der Evolution abstützt. Durch mutieren eines bestimmten Teils einer Lösungspopulation wird die Population so verändert, dass die optimale Lösung für das Problem gefunden wird. Dabei wird durch eine systematische Vorgehensweise auf die günstigste Mutation geschlossen (Gerdes, Klawonn und Kruse, 2013). Durch verändern der Populationsgrösse und der Abbruchbedingung kann der Algorithmus so optimiert werden, dass er möglichst schnell ein globales Optimum findet, welches alle Nebenbedingungen einhält. Es hat sich gezeigt, dass mit einer Populationsgrösse, die 60 mal der Anzahl der zu optimierenden Variablen entspricht, die genauesten Resultate geliefert werden.

2.2. Übersicht der Parameter der Pumpwerke

Der Optimierungsalgorithmus bedient sich vieler Parameter, die vorher für jedes Pumpwerk festgelegt und kalibriert werden müssen. Die Aufgabe, jeden Parameter abzuschätzen oder zu messen, nimmt viel Zeit in Anspruch. Die Tabelle 2 fasst die für die Optimierung benötigten Parametern zusammen. Mit Hilfe der Kennlinien im Anhang A.2,

der abgebildeten Histogramme im Anhang A.3, und den Auf- und Grundrissen im Anhang A.4 können die Optimierungsparameter bestimmt werden. Die Leitungskonstanten werden so kalibriert, dass die Anlagekennlinie mit den Messdaten übereinstimmen. Die Kennlinie der Leistungsaufnahme der Pumpe muss so kalibriert werden, dass bei gleicher Betriebseinstellung wie in den Messdaten (gleiche Drehzahl, gleicher Förderstrom, gleiche Schaltung) die gleiche Energie verbraucht wird. Nur so sind alle mechanischen Verluste, zum Beispiel hervorgerufen durch Frequenzumrichter, berücksichtigt. Die Grundflächen und die geodätische Höhen jedes Pumpwerkes kann in den Auf- und Grundrissen der Pumpwerke ausgelesen werden.

2.2.1. Pumpwerk 61

Pumpwerk 61 weist drei parallele Pumpen auf, welche das Abwasser auf eine 3.6 Meter höher gelegene Kanalisation pumpen. Die dafür verwendeten Kreiselpumpen sind vom Hersteller „Caprari“. Das zugehörige Kennlinienblatt ist in Abbildung 12 im Anhang A.2 ersichtlich. Es sind höchstens zwei Pumpen parallel im Einsatz. Die dritte Pumpe dient als Reserve, soll aber auch im Betrieb miteinbezogen werden, sodass keine der Pumpen für längere Zeit ausser Betrieb bleibt. Jede der Pumpen ist mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, der eine Drehzahl zwischen 700 und 1465 U/min bestimmt. Der Abwasserstand im Pumpensumpf variiert üblicherweise zwischen 0.6 und 2 Meter. In Extremfällen kann er bis zu 4.5 Meter betragen. Hier wird jedoch der Zulauf völlig eingestaut (siehe Abbildung 20 im Anhang A.4).

2.2.2. Pumpwerk 41

Im Pumpwerk 41 sind drei Abwasserpumpen vom Hersteller „Häny“ parallel geschaltet. Die Kennfelder der installierten Pumpen sind in Abbildung 11 im Anhang A.2 ersichtlich. Wie in Pumpwerk 61 gilt die dritte Pumpe als Reserve. Die Pumpen sind nicht durch die Drehzahl regulierbar. Die Drehzahl bleibt ungefähr auf 950 U/min. Die Pumpen weisen allerdings einen Sanftanlasser auf, welcher keinen schlagartigen Anstieg der Drehzahlen zulässt, um die Pumpen zu schonen. Der Abwasserstand im Pumpensumpf variiert zwischen 0.4 und 1.3 Meter (siehe Abbildung 14 im Anhang A.3).

2.2.3. Ablaufpumpwerk der ARA

Da der Vorfluter über dem Niveau der ARA liegt, kann mit fünf parallelen Kreiselpumpen vom Hersteller „KSB“ das Abwasser über 4.75 Höhenmeter gefördert werden. Der Pumpensumpf wird möglichst auf einem konstanten Niveau von 2.75 Meter gehalten. Die Drehzahlen sind in acht minütlicher Auflösung. Meist wird summarisch aus der ganzen Kläranlage der Energieverbrauch ermittelt (Bolle,2013). So sind vom Ablaufpumpwerk der ARA keine spezifischen Energieverbrauchswerte aufgezeichnet. Für den Vergleich des Energieverbrauches der aktuellen Betriebsweise mit der optimierten Betriebsweise ist nur eine qualitative Aussage möglich. Aus den vorhandenen Schaltungen und Drehzahlen der bisherigen Betriebsweise wird der Energieverbrauch aus der Kennlinie der Leistungsaufnahme und mit Hilfe der Affinitätsgesetze berechnet.

Tabelle 2: Alle Eingangsparameter für die Optimierung. Die Zahlen, welche mit einem Querbalken getrennt sind, stehen für die einzelnen Szenarien (siehe Kapitel 3.1). Ps = Pumpensumpf

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Pumpwerk		
			41	61	ARA
Eigenschaften jedes Pumpwerkes					
Anzahl Pumpen	N	(-)	3	3	5
max. parallele Pumpen	N_{max}	(-)	2	2	5
geodätische Höhe	H_{geo}	(m)	1.88	3.6	4.75
einzelne Leitungskonstante	R_{einz}	(s^2/m^5)	200	4050	20
gem. Leitungskonstante	R_{gem}	(s^2/m^5)	0	360	1.2
Grundfläche Pumpensumpf	A_{Ps}	(m^2)	16.6	12.75	51.5
min. Füllstand im Ps	$H_{Ps,min}$	(m)	0.4/1	0.6/1.3	1/2.7
max. Füllstand im Ps	$H_{Ps,max}$	(m)	1.35/1.1	2.0/1.4	3.5/2.8
Eigenschaften jeder Pumpe					
minimale Fördermenge	Q_{min}	(l/s)	30	30	57
maximale Fördermenge	Q_{max}	(l/s)	70	120	164
minimale Förderhöhe	$H_{P,min}$	(m)	9.1	9.9	4.5
maximale Förderhöhe	$H_{P,max}$	(m)	15	26	6.5
Nenn Drehzahl	n_0	(U/min)	950	1465	970
minimale Drehzahl	n_{min}	(U/min)	600/940	700/1454	990/600
maximale Drehzahl	n_{max}	(U/min)	950/950	1465/1465	1000/1000
Kennlinienparameter	a_1	(-)	0.00033	0.00022	$-7.14 \cdot 10^{-5}$
Kennlinienparameter	a_2	(-)	-0.19	-0.21	-0.026
Kennlinienparameter	a_3	(-)	20.55	32.06	8.21
Kennlinienparameter	b_1	(-)	-0.00015	-0.00056	-0.00024
Kennlinienparameter	b_2	(-)	0.063	0.14	0.052
Kennlinienparameter	b_3	(-)	3.30	9.64	3.01
maximale Laufzeit	LZ_{max}	(h)	12	12	12
maximale Standzeit	SZ_{max}	(d)	3	3	3
Eigenschaften für den Algorithmus					
Zeitschritt	T	(s)	60	60	480
max Diff. Füllstand im Ps	$\Delta H_{Ps,max}$	(m)	0.2	0.3	0.03

3. Resultate

3.1. Anwendung des Optimierungsgerüst

Der beschriebene Optimierungsalgorithmus wird mit den zuvor vorgestellten Parametern auf drei Szenarien angewendet. Der Sinn hinter den Szenarien ist die Untersuchung, wie sich die drei Regulierungsmöglichkeiten An- und Abschalten, Drehzahlregulierung und Regelung des Pumpensumpfes auf den Energieverbrauch auswirken. Zudem kann so die Flexibilität des Optimierungsalgorithmus getestet werden.

Szenario „Flexibel“: Die Pumpen sollen möglichst immer am besten Betriebspunkt laufen. Hierfür kann der Füllstand im Pumpensumpf und die Drehzahl der Pumpen innerhalb der Toleranzwerte frei variieren.

Szenario „fixer Füllstand“: Die Füllstandsschwankungen werden durch eine engere Definition der Füllstandsgrenzen eingeschränkt. Die Drehzahl kann jedoch gleich wie im Szenario „Flexibel“ variiert werden.

Szenario „fixe Drehzahl“: Es soll hier ein Szenario simuliert werden, wo die Drehzahl nicht regulierbar ist, also kein FU eingebaut ist. Dafür kann der Füllstand gleich wie im Szenario „Flexibel“ verändert werden.

Der Algorithmus braucht zwei bis zehn Sekunden Berechnungszeit, um aus allen Möglichkeiten den optimalen Betriebspunkt zu finden. Beim Szenario „Flexibel“ findet er innerhalb dieser Zeit immer ein Optimum, welches alle Bedingungen einhält. Sobald Einschränkungen gemacht werden (z. B. fixierte Drehzahl) kann es vorkommen, dass bei extremen Zuflüssen nicht alle Nebenbedingungen eingehalten werden. Der Füllstand im Pumpensumpf geht in diesem Fall über die festgesetzten Grenzen hinaus.

3.2. Pumpwerk 61

Für die Optimierung wird ein Zeitabschnitt gewählt der den normalen Tagesgang aufzeigt und ein Regenereignis enthält. Diese Bedingung ist am 3. und 4. Januar 2015 gegeben. Die Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Parameter im optimierten und bisherigen Zustand für das Szenario „Flexibel“ über einen Zeitraum von etwa 5 Stunden.

Aus dem Zufluss in den Pumpensumpf (Q_{in}) erkennt man deutlich, dass vor 18:00 Uhr ein Regenereignis stattgefunden haben muss. In diesem Regenereignis ist der Füllstand im Pumpensumpf bei der optimierten, wie auch beim Ist-Zustand beim Maximum. Beim optimierten Betrieb werden jedoch bei kleineren Zuflüssen die Grenzbereiche des Füllstandes mehr erreicht. Was dazu führt, dass über einen längere Zeitabschnitt keine Pumpe im Betrieb ist. Zudem ist zu erkennen das in diesem Szenario die Drehzahl stärker variiert als im Ist-Zustand. Daraus ergibt sich, dass häufiger zwei Pumpen parallel geschaltet werden, welche je eine tiefere Drehzahl aufweisen. Dies führt zu einer Energieeinsparung, unter der Annahme, dass der Wirkungsgrad bei Drehzahländerungen konstant sei.

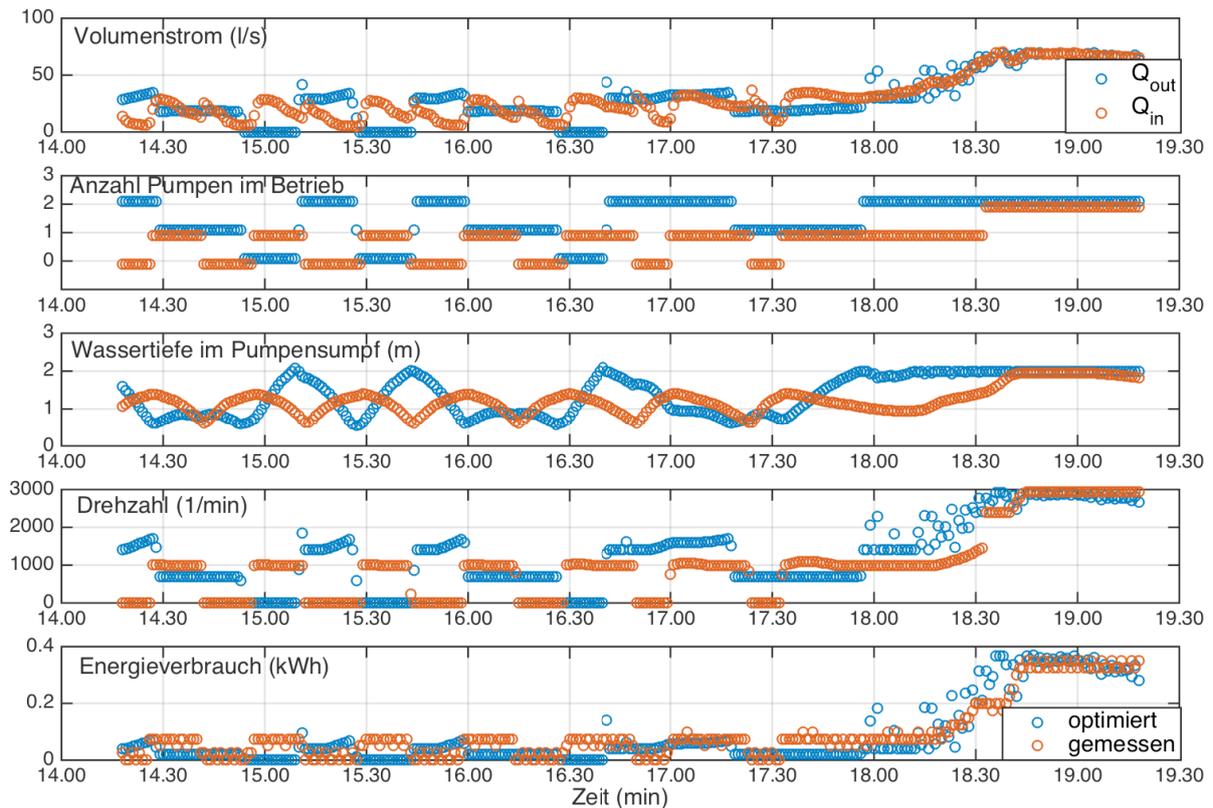


Abbildung 5: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Pumpwerk 61 mit der Betriebsweise des Szenarios „Flexibel“.

In Abbildung 6 sind die Schaltvorgänge und der Energieverbrauch jedes Zeitschrittes vom 3. Januar 2015 um 8.00 Uhr bis zum 4. Januar 2015 um 8:00 Uhr für jedes Szenario aufsummiert. Das Szenario „Flexibel“ weist im untersuchten Zeitintervall mit 12% die grösste Energieeinsparung auf. Die Schalthäufigkeit ist zudem im Vergleich zum Ist-Zustand um 11% geringer. Die Optimierung mit fixiertem Füllstand bringt immer noch eine Energieeinsparung von 9%. Doch es wird mehr als das Fünffache des Ist-Zustandes geschaltet. Wie erwartet lohnt sich die Fixierung der Drehzahl nicht, da ein erhöhter Energiebedarf entsteht.

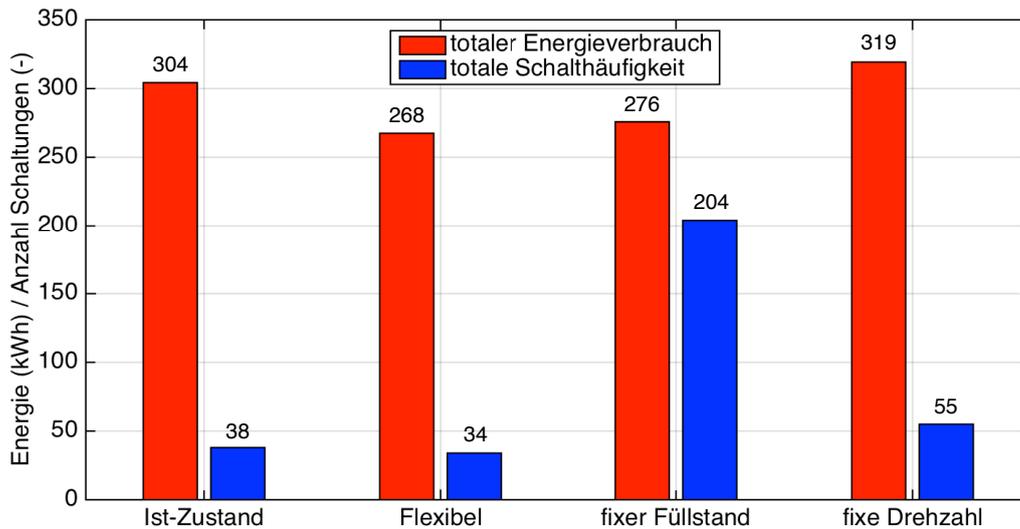


Abbildung 6: Energieverbrauch und Schalthäufigkeit der aktuellen Betriebsweise vom Pumpwerk 61 verglichen mit dem Energieverbrauch und der Schalthäufigkeit der drei optimierten Szenarien. Betrachteter Zeitraum: 3. Januar 2015, 8:00 Uhr - 4. Januar 2015, 8:00 Uhr.

3.3. Pumpwerk 41

Für Pumpwerk 41 wird derselbe Zeitabschnitt gewählt, wie bei Pumpwerk 61. Der zeitliche Verlauf der Parameter für Szenario „fixer Füllstand“ ist in Abbildung 7 über einen Zeitraum von 10 Stunden abgebildet. Die zeitlichen Verläufe der anderen beiden Szenarien können wie auch bei PW 61 und PW ARA im Anhang Kapitel A.5 eingesehen werden. Die Anzahl der Pumpen, die im Betrieb sind, variieren im optimierten Zustand extrem oft. Durch das Regenereignis, welches um 16.00 Uhr das Pumpwerk erreicht, steigt der Pumpensumpf in der aktuellen Betriebsweise über den Grenzwert an, weil die Drehzahlen im Ist-Zustand schon auf dem Maximalwert sind. Die optimierte Variante kann den Füllstand mit geringerer Drehzahl der Pumpen einhalten, weil die Pumpen im Optimierungsmodell besser dimensioniert sind.

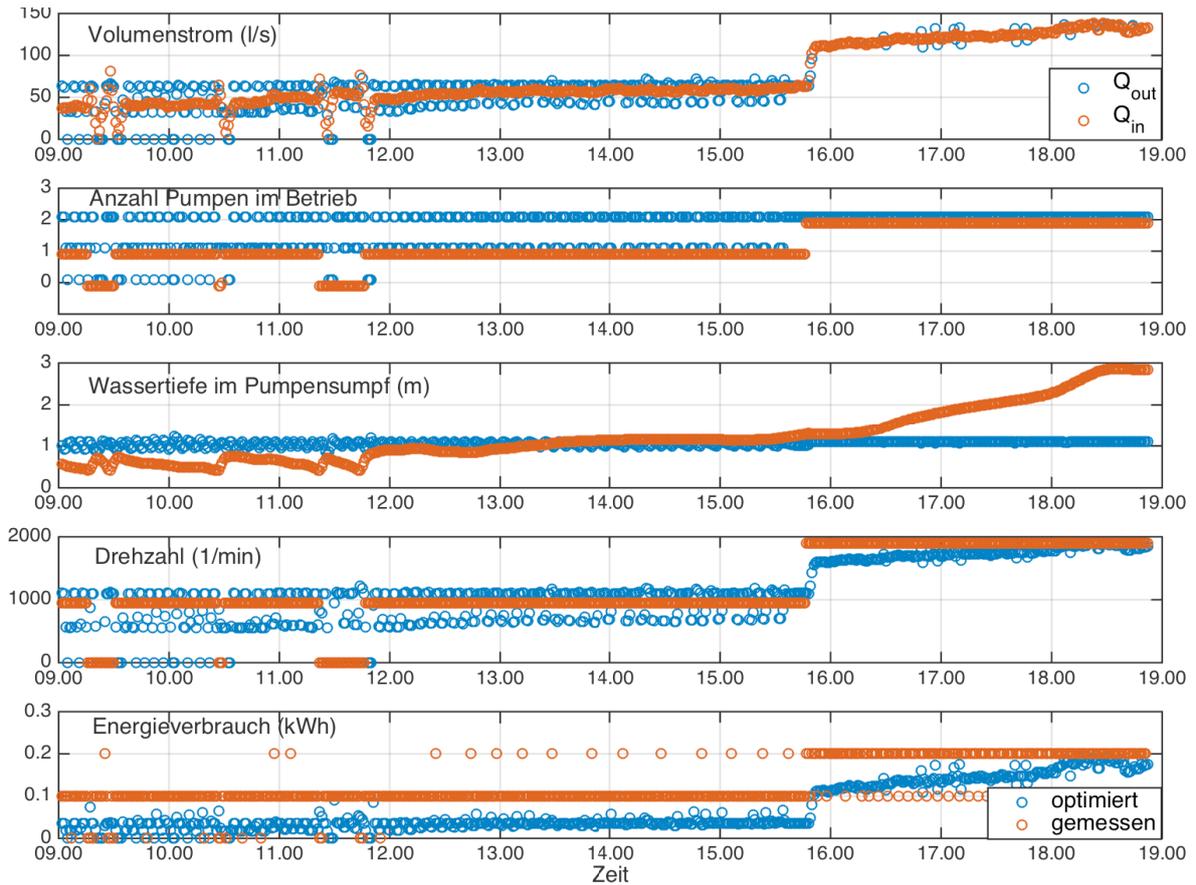


Abbildung 7: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Pumpwerk 41 mit der Betriebsweise des Szenarios „fixer Füllstand“. Betrachteter Zeitraum: 3. Januar 2015, 8:00 Uhr - 4. Januar 2015, 8:00 Uhr.

Die summierte Schalthäufigkeit und der Energieverbrauch sind in Abbildung 8 für jedes Szenario dargestellt. Durch die Regulierung des Füllstandes und der Drehzahlregulierung könnte im Vergleich zum aktuellen Betrieb ohne FU 32% eingespart werden. Unter der gleichen Voraussetzung, dass die Drehzahl nicht regulierbar ist, verbraucht die optimierte Variante 14 kWh weniger Energie. Dabei wird die Schalthäufigkeit um ein X-faches erhöht. Es muss bei jedem Szenario mehr geschaltet werden als im Ist-Zustand.

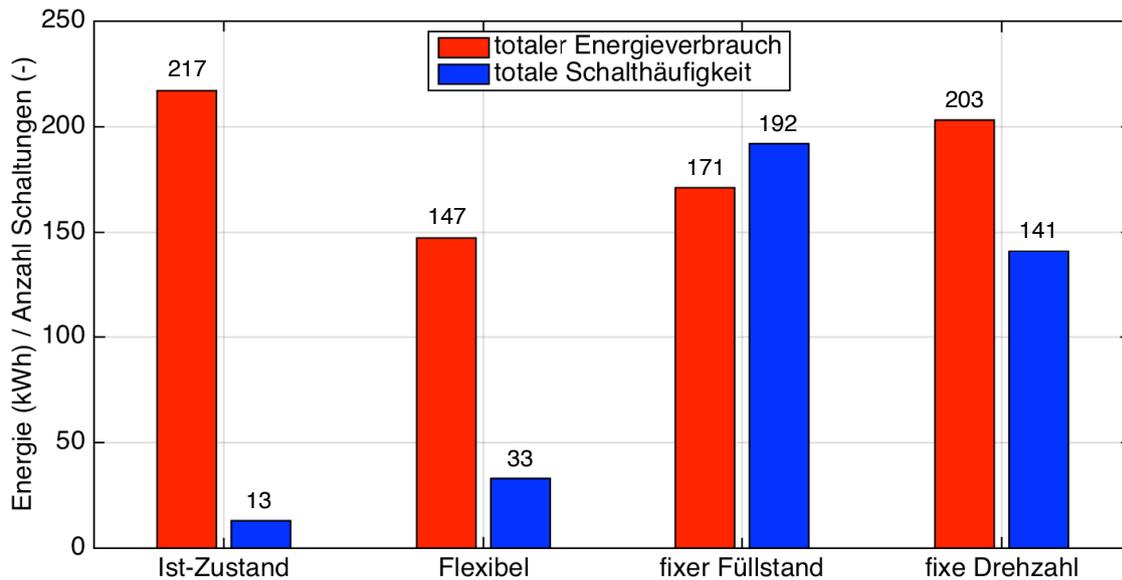


Abbildung 8: Energieverbrauch und Schaltheufigkeit der aktuellen Betriebsweise vom Pumpwerk 41 verglichen mit dem Energieverbrauch und der Schaltheufigkeit der drei optimierten Szenarien. Betrachteter Zeitraum: 3. Januar 2015, 7:54 Uhr - 4. Januar 2015, 8:02 Uhr.

3.4. Ablaufpumpwerk der ARA

Der betrachtete Zeitabschnitt ist hier doppelt so lange, wie bei PW 41 und 61. Es ist im Vergleich zu den anderen Pumpwerken zu beachten, dass zwischen zwei Zeitschritten acht Minuten vergehen und nicht eine Minute. Aus Abbildung 9 kann der Unterschied der Betriebsweise mit einer Drehzahlregulierung und ohne Drehzahlregulierung ersichtlich gemacht werden. Da die Drehzahl bei der optimierten Betriebsweise konstant gehalten wird, muss der Füllstand im Pumpensumpf mehr variiert werden. Die Drehzahl im vierten Subplot in Abbildung 9 verändert sich für den optimierten Fall nur, wenn die Anzahl paralleler Pumpen variiert wird.

Aus der Abbildung 10 kann für das Szenario „Flexibel“ der kleinste Energieverbrauch ausgemacht werden. Er ist nur qualitativ mit dem Verbrauch des Ist-Zustandes zu vergleichen, weil dieser nicht gemessene, sondern durch Affinitätsgesetze berechnete Energiewerte aufweist. Die Schaltungen sind jedoch Messgrößen, welche verglichen werden können. Die beiden Szenarien „Flexibel“ und „fixer Füllstand“ benötigen bis zu 85% weniger Schaltungen, jedoch sind die Energiewerte höher.

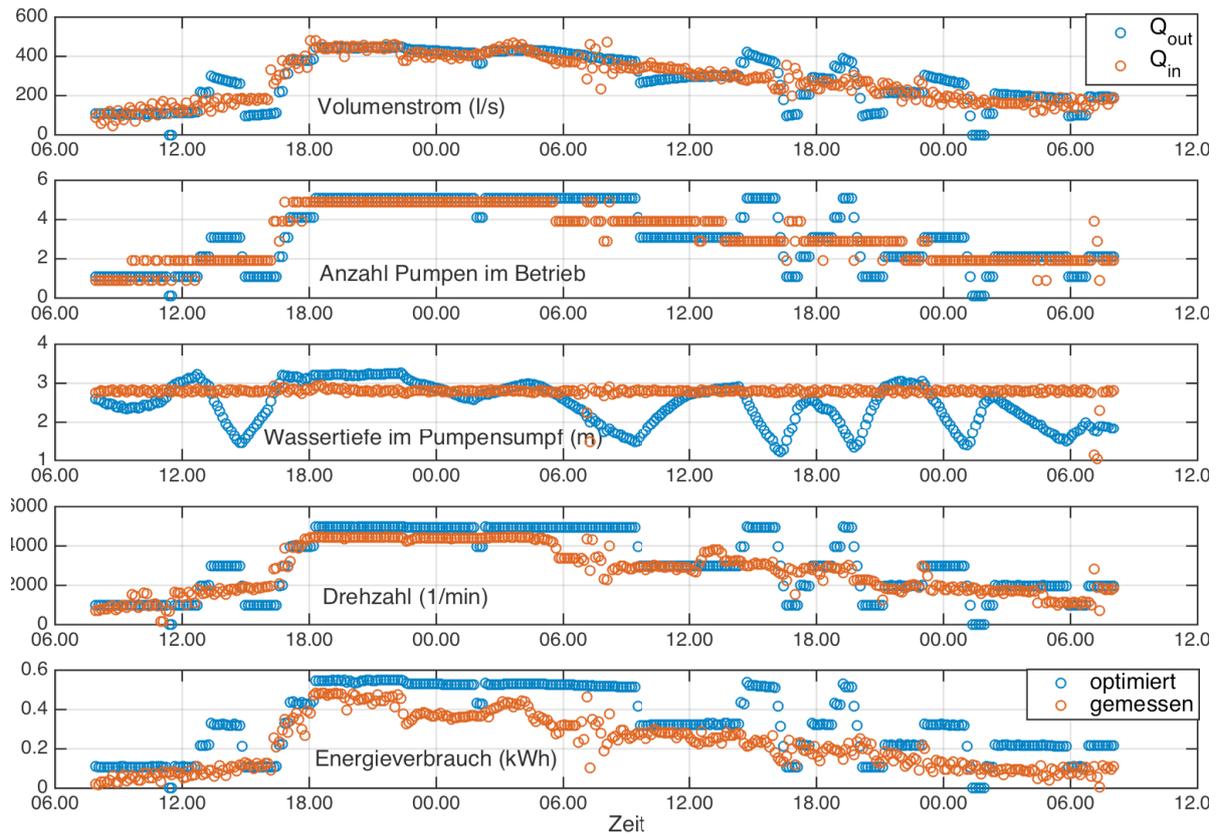


Abbildung 9: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Ablaufpumpwerk der ARA mit der Betriebsweise des Szenarios „fixe Drehzahl“.

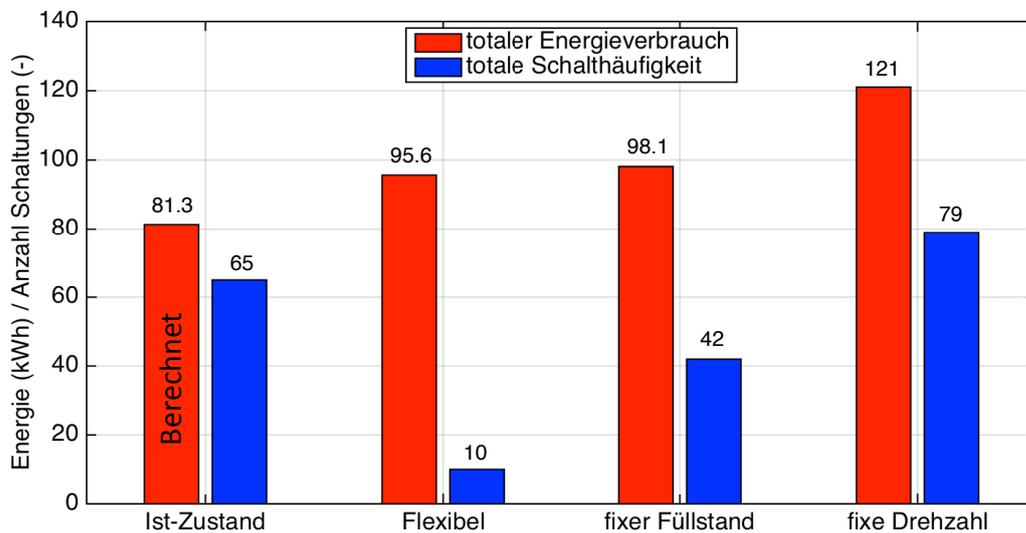


Abbildung 10: Berechneter Energieverbrauch und Schaltheufigkeit der aktuellen Betriebsweise vom Ablaufpumpwerk der ARA verglichen mit dem Energieverbrauch und der Schaltheufigkeit der drei optimierten Szenarien.

4. Diskussion

4.1. Analyse des Optimierungsalgorithmus

Der Algorithmus zeigt realitätsnahe Ergebnisse und scheint auch bei mehreren parallel simulierten Pumpen zuverlässig zu funktionieren. Das Szenario „Flexibel“ weist bei allen Pumpwerken den kleinsten Energieverbrauch auf, weil der Algorithmus durch die Speicherfunktion des Pumpensumpfes und gleichzeitiger Drehzahlregulierung den grössten Spielraum für die Optimierung hat. Das Szenario „fixer Füllstand“ hebt sich bei allen Pumpwerken durch eine grössere Schalthäufigkeit ab. Dies ist auf die Implementierung einer Nebenbedingung zurückzuführen. Die Bedingung, dass geschaltet wird, wenn die maximale oder minimale Grenze des Füllstandes erreicht ist, ist häufiger gegeben, weil Grenzen in diesem Szenario enger gehalten sind. Es kann in Abbildung 10 gesehen werden, dass durch dieselbe Nebenbedingung bei einer grossen Anzahl parallel laufender Pumpen und genügendem Spielraum des Füllstandes die Schalthäufigkeit verglichen mit dem Ist-Zustand um 85% verringert wird. Diese grosse Reduktion der Schalthäufigkeit ist vom Umstand abhängig, dass durch die Regulierung der Drehzahlen von mehreren Pumpen, auch eine grössere Bandbreite an Fördermengen ohne zusätzliche Staffelung bewältigt werden kann. Die Füllstandsgrenzen werden daher seltener erreicht, was sich in einer kleineren Schalthäufigkeit niederschlägt.

Es werden viele Vereinfachungen getroffen, welche die Realität des Algorithmus nur zum Teil abbilden. Die Pump- und Anlagekennlinien sind anhand der Kennlinienblätter durch Polynome 2. Ordnung approximiert. Die Realität weicht jedoch immer ein wenig von den Kennlinieblättern ab. Meistens werden die Kennlinien mit einer gewissen Marche abgebildet, so dass die Energieeinsparung eher unterschätzt wird. Es wird zudem angenommen, dass der Wirkungsgrad bei verschiedenen Drehzahlen konstant bleibt. Dies ist nur näherungsweise gegeben. Hier überschätzt der Algorithmus die Effizienz der Kreiselpumpen. Eine weitere Unsicherheit ist aus der Abschätzung der Grundfläche des Pumpensumpfes gegeben. Insgesamt fallen diese Unsicherheiten nicht all zu fest ins Gewicht, weil sie sich zum Teil gegenseitig aufheben.

Es gibt viele Möglichkeiten den Optimierungsalgorithmus weiter zu konfigurieren. Folgende Punkte erhöhen die Wahrscheinlichkeit für ein besseres und schnelleres Finden des Optimums und den Realitätsbezug des Modells:

- Nebenbedingungen können noch besser an gewisse Situationen angepasst werden. Zum Beispiel muss ein Pumpwerk mit fünf parallelen Pumpen andere Kriterien an den Schaltvorgang erfüllen, als ein Pumpwerk mit zwei parallel betriebenen Pumpen. Auch sind bei Trockenwetter andere Bedingungen gegeben wie bei Regenwetter.
- Durch die Prognose der ankommenden Zuflussmenge können Regelungsmassnahmen vorgenommen werden. Wenn oberhalb eines Pumpwerkes A ein Pumpwerk B

vorhanden ist, kennt man über die gepumpte Fördermenge in B die zeitverschobene ankommende Wassermenge in A.

- Die Pumpenregelung kann mit der Wetterprognose verbunden werden. Ein auftretender Starkniederschlag kann so durch ein vorbereitetes Vermindern des Füllstandes im Pumpensumpf abgefangen werden. Genügt dies nicht, kann eine weitere Pumpe vorsorglich zugeschaltet werden.
- Der Optimierungsalgorithmus kann durch eine dynamische Betrachtung der Pumpenkennlinie über die Betriebszeit verfeinert werden. Durch eine Sensitivitätsanalyse kann anschliessend aufgezeigt werden, wie sich diese dynamische Betrachtung auf die optimale Schaltung und den Energieverbrauch der Pumpen auswirkt.
- Der Optimierungsalgorithmus kann weiter konfiguriert werden, so dass er die Dynamik der Drehzahl im Aus- und Einschaltvorgang mitberücksichtigt. Der jetzige Algorithmus vernachlässigt das Anfahren der Kreiselpumpe, da die Pumpe innerhalb von einem simulierten Zeitschritt die maximale Drehzahl erreichen kann.
- Der Pumpensumpf kann nicht nur als Quader modelliert werden, sondern durch eine Fläche-Höhe Funktion der Wirklichkeit angenähert werden.

4.2. Erkenntnisse für den optimierten Betrieb der Pumpwerke

Es können beim PW 41 und PW 61 Energiesparpotentiale ausgemacht werden, welche mit 12% bis 32% beträchtlich sind. Vergleicht man die Energieeinsparung zwischen dem Szenarien „Flexibel“ und „fixe Drehzahl“ kann durch eine Drehzahlregulierung 16% (bei PW 61) 28% (bei PW 41) und 21% (bei PW ARA) an Energie gespart werden. Zudem verkleinert sich die Schalthäufigkeit drastisch. Aus diesem Grund sollten die Pumpen im Pumpwerk 41, welche nur über einen Sanftanlasser verfügen, mit einem Frequenzumrichter versehen werden. Bei PW 61 ist dieser installiert, darum ergibt sich eine kleinere Energieeinsparung als in PW 41.

PW61 kann wie in Abbildung 5 ersichtlich den Pumpensumpf weiter ausnützen. Der Schwellenwert, der im Ist-Zustand besagt, ab welchem Füllstand eine weitere Pumpe hinzugeschalten wird, sollte etwa um einen halben Meter erhöht werden.

Beim Ablaufpumpwerk der ARA können Schaltvorgängen gespart werden, wenn die Pumpen ihre Drehzahlregulierung vermehrt ausnützen. Die Regelung vom PW ARA sollte weniger schnell eine zusätzliche Pumpe hinzu- oder abschalten, sondern zuerst die Drehzahl der aktiven Pumpen erhöhen respektive verkleinern. Der Füllstand im Pumpensumpf der ARA wird im Ist-Zustand konstant gehalten. Es könnte jedoch eine weitere Energiereduktion zur Folge haben, wenn die Variabilität des Füllstandes im Pumpensumpf vergrössert wird. In Abbildung 10 erkennt man eine Reduktion zwischen den Szenarien „Flexibel“ und „fixer Füllstand“ von 2.5 kWh.

4.3. Literaturvergleich

Die erhaltenen Energieeinsparungen decken sich mit den Resultaten eines Abschlussberichtes vom Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft von Aachen. Die Bearbeiter fanden heraus, dass durch den Einsatz von Frequenzumrichtern in Abhängigkeit mit der Regulierung des Füllstandes im Pumpensumpf eine Energieeinsparung von bis zu 20% erreicht werden kann (Bolle, 2013, S. 24). Dieser Bericht liefert auch empirische Werte für die Schaltheufigkeit. Bei Pumpen bis zu einer Leistung von 7.5 kW (solche sind in den drei Pumpwerken installiert) sollten 15 Schaltungen pro Stunde nicht überschritten werden. Dieser Richtwert wird im Ist-Zustand und in allen Szenarien über dem betrachteten Zeitraum nie überschritten.

4.4. Wirtschaftliche Betrachtung

Bei Kreiselpumpen haben die Energie-, Betriebs- und Instandhaltungskosten meist den größten Anteil an den Kosten. (KSB, 2010). Eine Einsparung im Betrieb von 12% und darüber ist gross, wenn man bedenkt, dass Pumpen in Pumpwerken bis zu 20 Stunden am Tag über 365 Tage im Jahr laufen. Die Tabelle 3 zeigt eine grobe Kostenabschätzung unter der Annahme, dass der betrachtete Zeitraum für das gesamte Jahr repräsentativ ist. Innerhalb kurzer Zeit sind die Installations- und Anschaffungskosten für Frequenzumrichter amortisiert. Eine Investition für Pumpwerk 41 lohnt sich also alleweil. Bei Pumpwerk 61 lohnt sich die Umrüstung noch mehr, weil schon Frequenzumrichter installiert sind, die bisher als Sanftanlasser benützt wurden. Für das Ablaufpumpwerk der ARA konnte keine Kostenabschätzung gemacht werden, weil der effektive Energieverbrauch nicht gemessen wird und durch die starke Minimierung der Schaltung kein Energieeinsparung mehr auszumachen sind. Für diesen Umstand müsste eine finanzielle Wertung zwischen der Schaltheufigkeit und dem Energieverbrauch gemacht werden.

Tabelle 3: Kostenabschätzung für Pumpwerk 41 und 61. Der Strompreis stammt von der Eidgenössischen Elektrizitätskommission ElCom (ElCom). Die Anschaffungskosten für einen Frequenzumrichter werden aus Erfahrungswerten auf CHF 2000.-, die Einrichtungskosten auf CHF 1000.- pro Pumpe geschätzt.

Bezeichnung	Einheit	PW 41	PW 61
Einparung mit Szenario „Flexibel“	(%)	12	32
Einsparung über 1 Jahr	(kWh)	13'140	25'550
Kosten für Anschaffung und Installation der FUs	(CHF)	3'000	9'000
Strompreis (Verbrauchskategorie C3)	(Rp/kWh)	16.5	16.5
Eingesparte Kosten	(CHF)	2'170	4'220
Amortisationszeit	(Jahre)	1.4	2.1

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Forschung hat in letzter Zeit viele Fortschritte beim Bau von Kreiselpumpen gebracht. Der Antrieb vom Motor ist einiges effizienter geworden und die neusten Frequenzumrichter weisen viel kleinere Verluste auf. Doch durch verbesserte Regelung der teilweise schon älteren Kreiselpumpen kann genauso Energie eingespart werden. Es kann durch einen Optimierungsalgorithmus gezeigt werden, dass durch geschicktes Ausnützen des Füllstandes im Pumpensumpf und der Drehzahlregulierung ungefähr 20% weniger Energie verbraucht wird verglichen mit dem Betrieb ohne Drehzahlregulierung. Jedoch muss mit einer leicht erhöhten Schalthäufigkeit gerechnet werden. Eine solche Einsparung hat wegen der langen Betriebszeiten eines Pumpwerkes grosse wirtschaftliche Auswirkungen. In Zukunft wird die Nachfrage der Pumpenbetreiber nach neuen Mitteln zur Energieoptimierung steigen. Es besteht darum die Vision, den Optimierungsalgorithmus weiter zu verfeinern, damit er in Echtzeit in vielen Pumpwerken das Regulierungssystem nachhaltig verbessert und so den Energieverbrauch und die Schalthäufigkeit verringert.

Literaturverzeichnis

- Bolle, F.-W. (2013). *Entwicklung von Sparmassnahmen, Optimierungsmöglichkeiten oder neuen energiesparenden Techniken bzw. Konzeptionen der bzw. in der Kanalisation*. Abschlussbericht. TWTH Aachen.
- Broll, Dr. Johannes und René Mannel (2010). *Energetische Optimierung und Automatisierung von Kreiselpumpen im Parallelbetrieb*. Techn. Ber. 10179 Berlin: Berliner Wasserbetriebe.
- Eidgenössischer Elektrizitätskommission ElCom (2015). URL: <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>.
- Gerdes, Ingrid, Frank Klawonn und Rudolf Kruse (2013). *Evolutionäre Algorithmen*. Springer Verlag.
- Gujer, Willi (2007). *Siedlungswasserwirtschaft*. 3. Auflage. Springer Verlag.
- Gülich, Johann Friedrich (2013). *Kreiselpumpen: Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*. 4. Auflage. Springer Verlag.
- Hähnlein, Christian (2008). „Numerische Modellierung zur Betriebsoptimierung von Wasserverteilnetzen“. Diss. Technische Universität Darmstadt.
- Hydraulische Strömungsmaschinen, Technische Universität Graz*. URL: http://www.hfm.tugraz.at/fileadmin/user_upload/pdf/skripten/hysm/hysm_kap7_4_Pumpen_2013.pdf.
- Kreiselpumpenlexikon*. URL: www.ksb.com/Kreiselpumpenlexikon_de.
- KSB (2010). *Pumpenregelung / Anlagenautomation*. Techn. Ber. Band 4. Frankenthal: KSB Aktiengesellschaft.
- Kutzner, Rüdiger und Sönke Schoof (2012). *MATLAB/Simulink*. 4. Auflage. RRZN Handbücher.
- Schmied, F u. a. (2004). *Handbuch Energie in der Wasserversorgung, Ratgeber zur Energiekosten- und Betriebsoptimierung*.
- Sturm, Thomas F. (2012). *Latex:Einführung in das Textsatzsystem*. 9. Auflage. RRZN-Handbücher.

A. Anhang

A.1. Herleitung der Zielfunktion und der Massenbilanz

Aus den Affinitätsgesetzen und der Pumpenkennlinien bzw. der Kennlinie der Leistungsaufnahme sind folgende Gleichungen geben:

$$H_p = a_0 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (21)$$

$$P = b_0 \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right) + b_1 \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 + b_2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (22)$$

Für die Berechnung der Zielfunktion muss die Gleichung 23 nach der Drehzahl n aufgelöst und in Gleichung 22 eingesetzt werden. Zuerst wird Gleichung 23 wie folgt nach n aufgelöst.

$$H_p = a_0 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (23)$$

$$H_p \cdot n_0^2 = n^2 \cdot a_2 + n_0 \cdot n \cdot a_1 \cdot Q + n_0^2 \cdot a_0 \cdot Q^2 \quad (24)$$

$$0 = a_2 \cdot n^2 + a_1 \cdot n_0 \cdot Q n + n_0^2 \cdot (a_0 \cdot Q^2 - H) \quad (25)$$

$$n = \frac{-a_1 \cdot n_0 \cdot Q \pm \sqrt{(a_1 \cdot n_0 \cdot Q)^2 - 4 \cdot a_2 \cdot n_0^2 \cdot (a_0 \cdot Q^2 - H)}}{2 \cdot a_2} \quad (26)$$

Bei der Gleichung (26) wird nur das Resultat mit der positiven Drehzahl beachtet. Diese Gleichung in 22 eingesetzt ergibt:

$$P = \left(b_{0,i} \cdot Q^2 \cdot \frac{-a_{1,i} \cdot Q \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} + \right. \\ \left. b_{1,i} \cdot Q \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^2 + \right. \\ \left. b_{2,i} \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^3 \right) \quad (27)$$

Werden nun alle installierten Pumpen mit den jeweiligen Parametern a und b und den jeweiligen Förderströmen Q addiert, falls sie in Betrieb sind, d.h $S=1$ ist, ergibt sich die vollständige Funktion, welche minimiert werden kann:

$$P = \sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \left(b_{0,i} \cdot Q_i^2 \cdot \frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} + \right. \right. \\ \left. \left. b_{1,i} \cdot Q_i \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. b_{2,i} \cdot \left(\frac{-a_{1,i} \cdot Q_i \pm \sqrt{(a_{1,i} \cdot Q_i)^2 - 4 \cdot a_{2,i} \cdot (a_{0,i} \cdot Q_i^2 - H_p)}}{2 \cdot a_{2,i}} \right)^3 \right) \right) \quad (28)$$

Die Nebenbedingung (9) im Kapitel 2.1.3 folgt aus der Massenbilanz im Pumpensumpf. Es gilt durch die Massenbilanz, dass der Zufluss in den Pumpensumpf (Q_{in}) gleich dem Abfluss aus dem Pumpensumpf (Q_{out}) plus der Speicheränderung im Pumpensumpf (ΔS_{Ps}) ist.

$$Q_{in} = Q_{out} + \Delta S_{Ps} \quad (29)$$

Mit der Betrachtung dass Q_{out} gerade der totalen gepumpten Menge Q_{tot} entspricht und der Speicherterm ΔS_{Ps} die Differenz des Füllstandes über die Zeitspanne T ist, gilt:

$$Q_{in} = Q_{tot} + \frac{\Delta H_{Ps} \cdot A}{T} \quad (30)$$

A.2. Kennlinienblätter

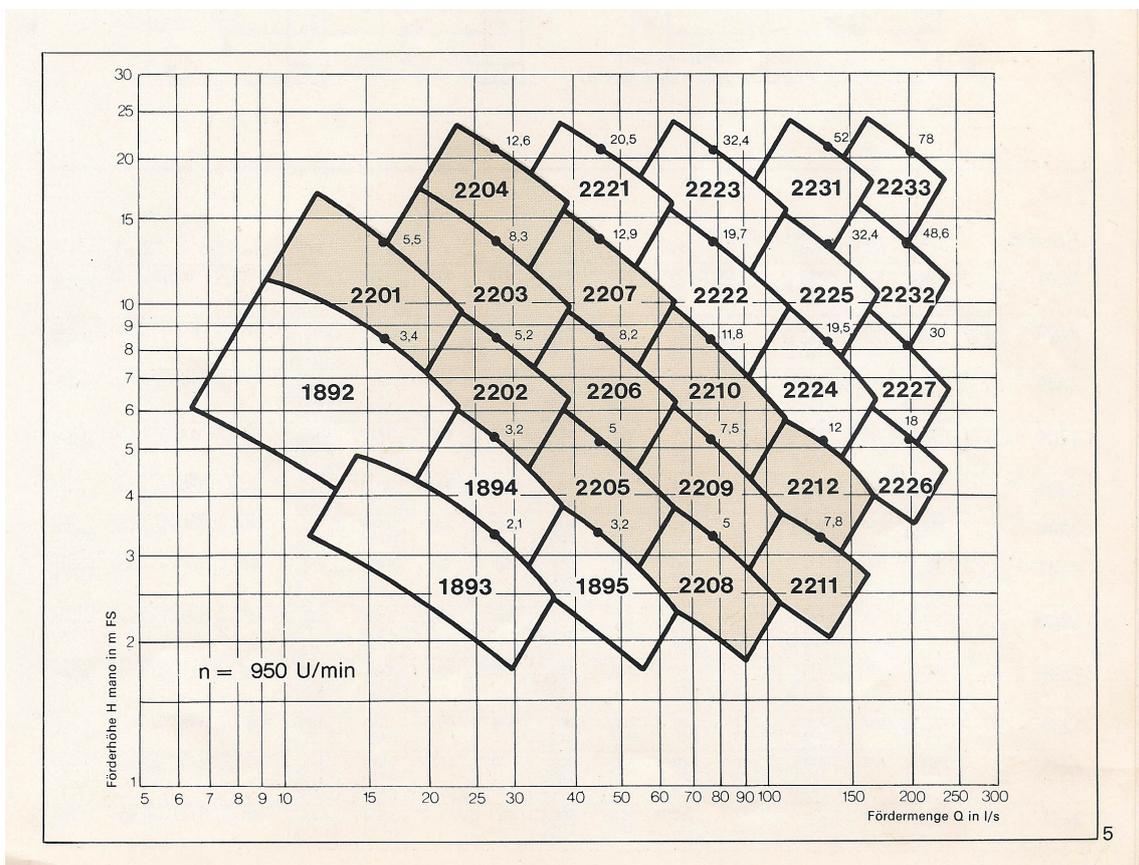


Abbildung 11: Kennlinienblatt vom Pumpwerk 41. Der installierte Pumpentyp trägt die Nummer 2210. Die Leistungsaufnahme ist hier nicht gut ersichtlich und wird darum aus Messdaten abgeschätzt.

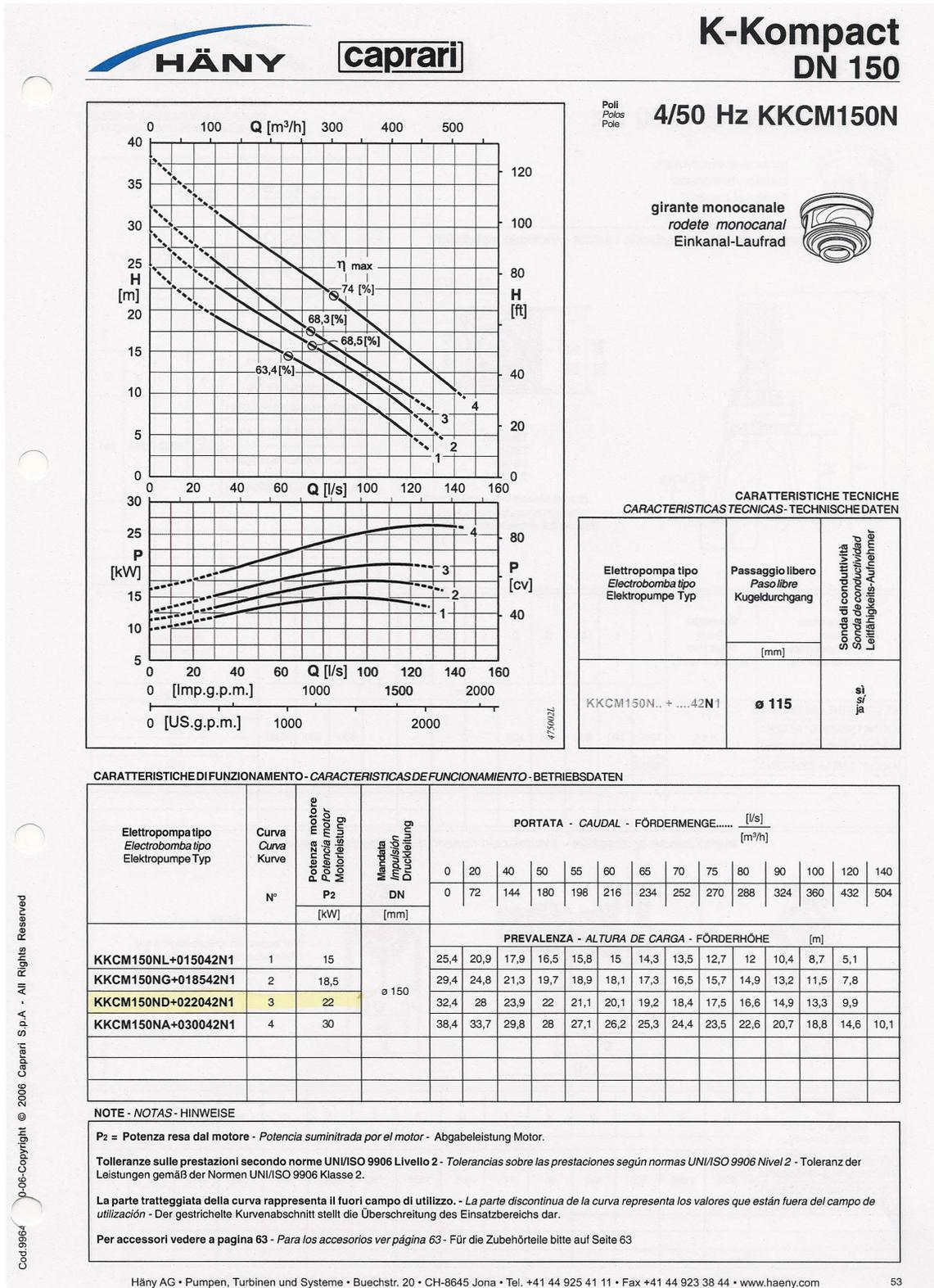


Abbildung 12: Kennlinienblatt vom Pumpwerk 61. Die installierten Pumpen sind vom Typ 3.

Hydraulische Kennlinie

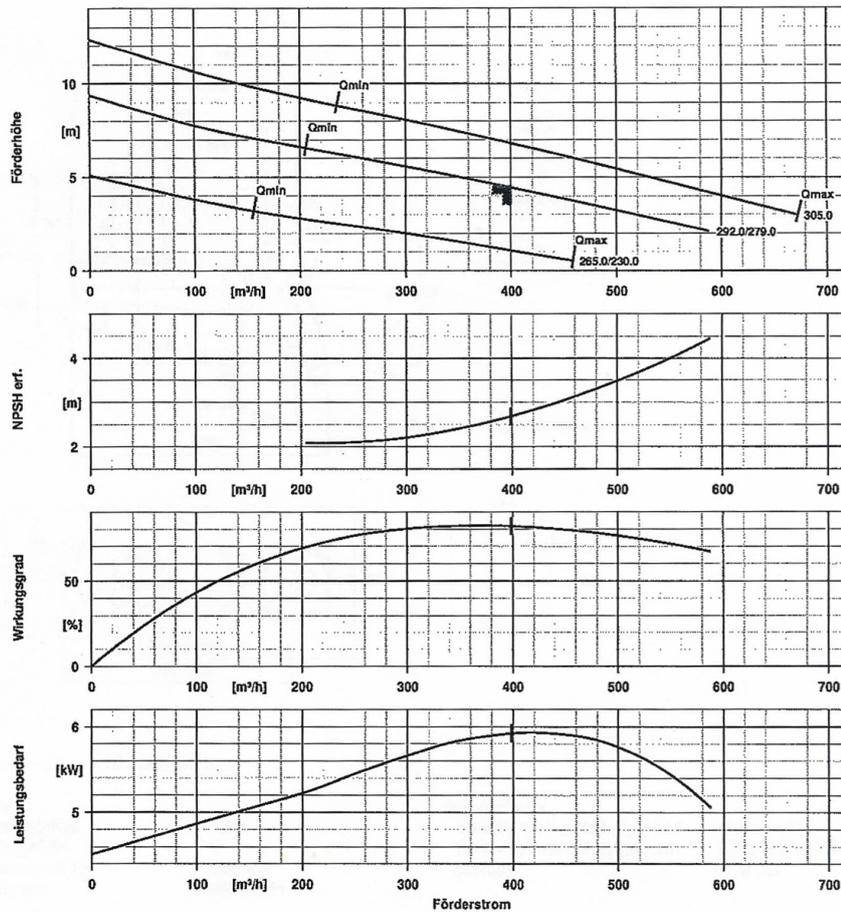


Kunden Pos Nr.:
 Bestell-Datum: 2010-04-21
 Bestell-Nr.: Tauchmotorpumpen
 Menge: 5,000

Nummer: 9971715278 - 695
 Pos.Nr.: 000300
 Datum: 2010-04-21
 Seite: 5 / 6

Amarex KRTK 200-316/96UG-S

Versions-Nr.: 3



Kurvendaten

Drehzahl	970 1/min	Wirkungsgrad	81,8 %
Mediumdichte	1000 kg/m^3	Leistungsbedarf	5,93 kW
Viskosität	0,66 mm^2/s	NPSH erforderlich	2,68 m
Fördermenge	400,00 m^3/h	Kurvennummer	K42079s
Angefragte Fördermenge	400,00 m^3/h	Laufreddurchmesser	279,0 mm
Förderhöhe	4,50 m	Abnahmenorm	ohne, Toleranzen gemäss ISO 9906 Klasse 2 Anhang A
Angefragte Förderhöhe	4,50 m		

Abbildung 13: Kennlinienblatt vom Ablaufpumpwerk der ARA. Die mittlere Kennlinie der Q-H-Beziehung ist die Kennlinie der installierten Pumpen.

A.3. Messdaten der Pumpwerke

Für die Charakterisieren der Pumpwerke wird zusätzlich die Verteilung der einzelnen Messparametern betrachtet. Die Abbildungen 14 - 16 zeigen die Verteilung der Zuflüsse in den Pumpensumpf, die Anzahl paralleler Pumpen im Betrieb, der Füllstand im Pumpensumpf und wo gegeben die Drehzahl der Kreiselpumpen. Aus diesen Verteilungen kann ein Teil der Parameter für die Simulation abgeschätzt werden.

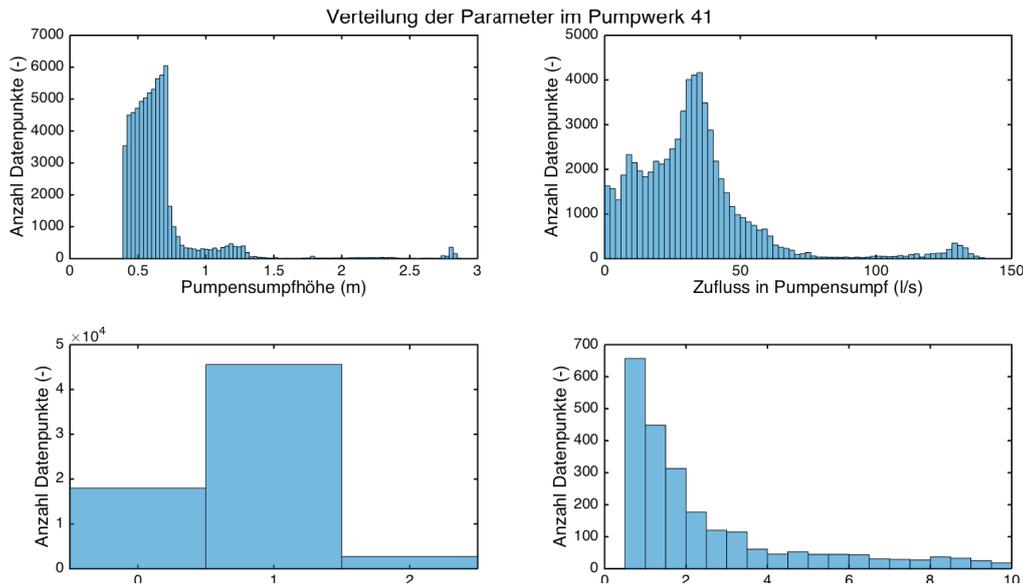


Abbildung 14: Verteilung der Parameter vom Pumpwerk 41

Die Messungen verschiedenen Parametern Durchfluss, Drehzahl, Schaltung, Energie und Füllstand der Pumpwerkes weisen verschiedene zeitliche Auflösungen auf. Mit Matlab wird eine Matrix erstellt welche auf einen gemeinsamen Zeitstrahl die Messdaten abbildet und gegebenenfalls interpoliert. Gewisse Messdaten waren als Zählvariablen abgebildet und mussten daher zuerst diskretisiert werden. Die ersten 75 Messdaten vom Ablaufpumpwerk der ARA sollen als Beispiel hier aufgeführt werden. Die letzte Spalte „Zufluss in Ps“ ist aus der Massenbilanz berechnet worden, der Energieverbrauch wurde aus den Affinitätsgesetzen berechnet.

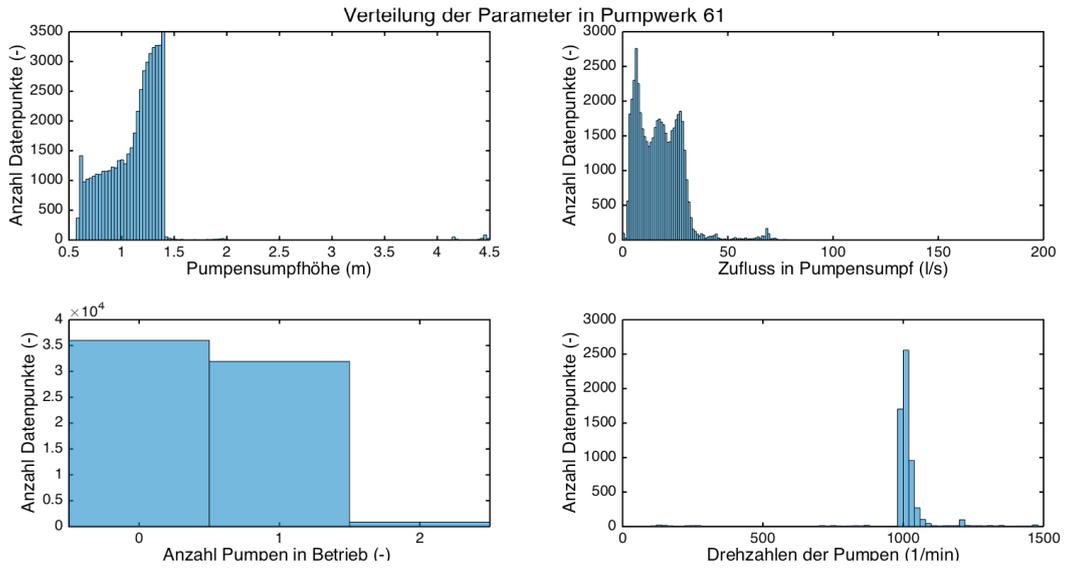


Abbildung 15: Verteilung der Parameter vom Pumpwerk 61

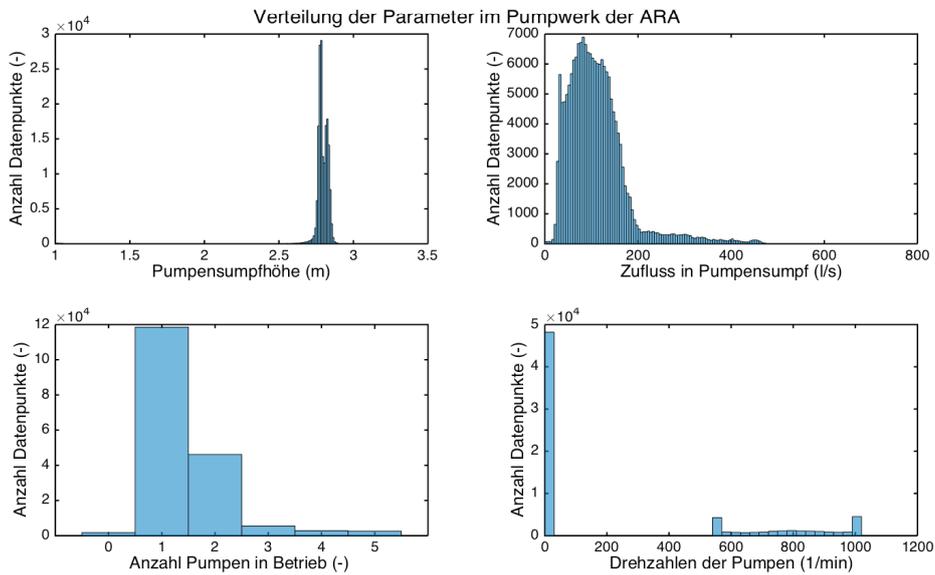
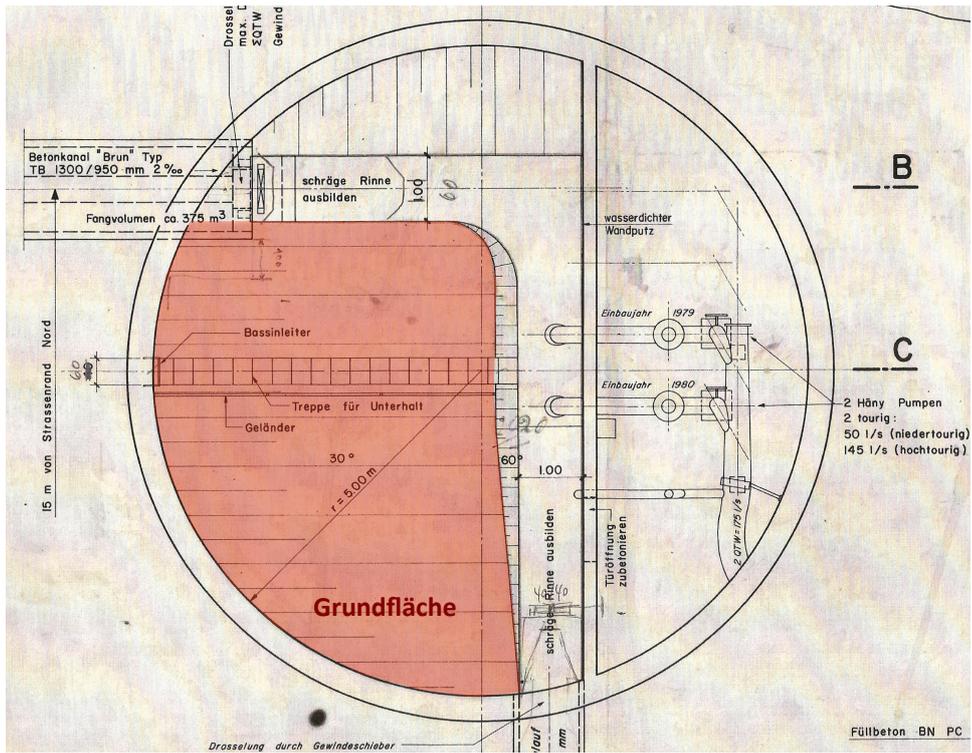


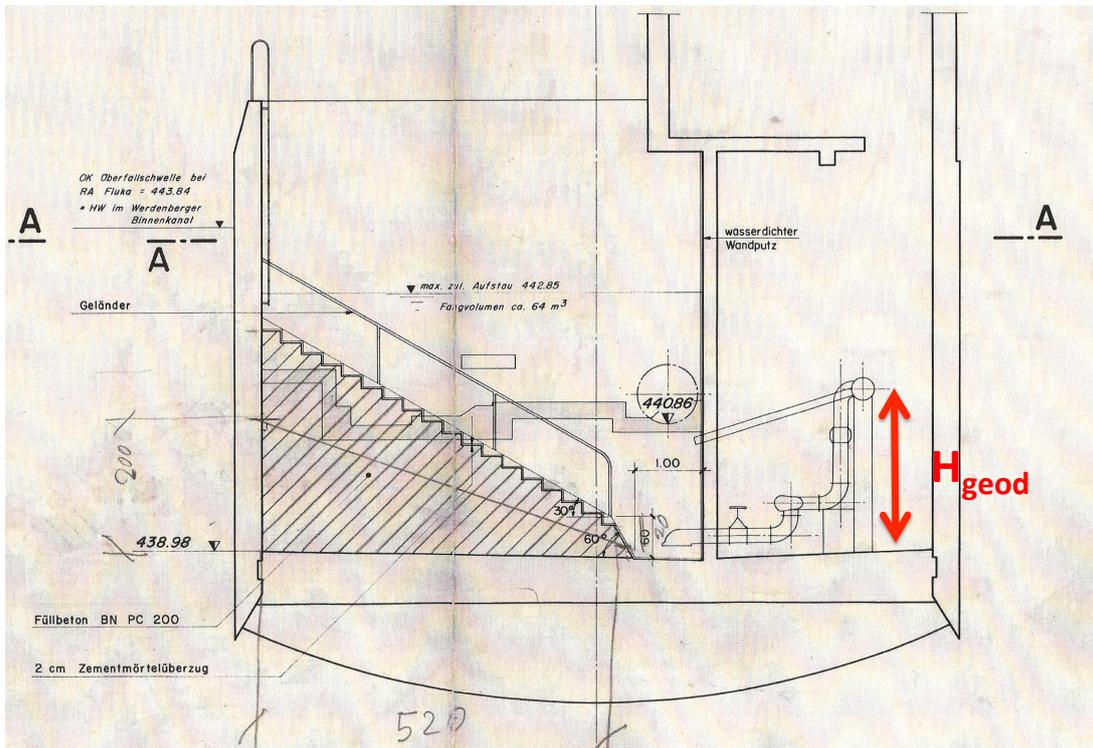
Abbildung 16: Verteilung der Parameter vom Ablaufpumpwerk der ARA

Zeit	Energieverbrauch (kWh)	Füllstand Ps (m)	Fördermenge (l/s)	Schaltung 1 (-)	Schaltung 2 (-)	Schaltung 3 (-)	Schaltung 4 (-)	Schaltung 5 (-)	Drehzahl 1 (U/min)	Drehzahl 2 (U/min)	Drehzahl 3 (U/min)	Drehzahl 4 (U/min)	Drehzahl 5 (U/min)	Zufluss in Ps (l/s)
15 07:55	0.02	2.75	83	0	0	0	1	0	0	5	0	611	1	90
15 08:03	0.02	2.78	105	0	0	0	1	0	0	5	0	612	1	105
15 08:11	0.03	2.82	60	0	0	0	1	0	0	5	0	713	0	59
15 08:19	0.03	2.80	78	0	0	0	1	0	0	5	0	691	1	73
15 08:27	0.03	2.79	102	0	0	0	1	0	0	5	0	685	1	112
15 08:35	0.04	2.82	124	0	0	0	1	0	0	5	0	769	0	122
15 08:43	0.07	2.83	58	0	0	0	1	0	0	5	0	902	0	47
15 08:51	0.03	2.77	74	0	0	0	1	0	0	5	0	668	1	74
15 08:59	0.03	2.78	120	0	0	0	1	0	0	4	0	698	1	124
15 09:07	0.06	2.83	96	0	0	0	1	0	0	5	0	838	0	97
15 09:15	0.07	2.82	79	0	0	0	1	0	0	5	0	888	1	79
15 09:23	0.04	2.77	114	0	0	0	1	0	0	5	0	738	0	114
15 09:31	0.05	2.82	139	0	0	0	1	0	0	5	0	832	1	141
15 09:39	0.07	2.83	134	0	1	0	1	0	0	550	0	844	1	125
15 09:47	0.06	2.82	74	0	1	0	1	0	0	550	0	827	1	70
15 09:55	0.04	2.77	101	0	1	0	0	0	0	747	0	5	1	109
15 10:03	0.04	2.79	139	0	1	0	0	0	0	799	0	5	1	143
15 10:11	0.08	2.84	139	0	1	1	0	0	0	910	551	5	1	131
15 10:19	0.07	2.82	98	0	1	1	0	0	0	936	551	5	0	92
15 10:27	0.05	2.76	118	0	0	1	0	0	0	6	826	4	1	129
15 10:35	0.05	2.79	148	0	0	1	0	0	1	5	857	4	1	158
15 10:43	0.08	2.83	113	0	0	1	0	1	1	5	940	4	551	117
15 10:51	0.06	2.78	111	0	0	1	0	1	0	5	846	4	551	102
15 10:59	0.03	2.76	145	0	0	0	0	1	1	5	0	4	768	156
15 11:07	0.08	2.83	161	0	0	0	0	1	1	5	0	4	982	172
15 11:15	0.08	2.83	143	1	0	0	0	1	549	5	0	4	937	136
15 11:23	0.08	2.81	120	1	0	0	0	1	550	5	0	4	965	109
15 11:31	0.07	2.78	159	1	0	0	0	0	929	5	0	4	2	165
15 11:39	0.09	2.83	137	1	0	0	1	0	976	5	0	548	2	141
15 11:47	0.08	2.79	138	1	0	0	1	0	915	5	0	548	1	132
15 11:55	0.08	2.80	120	1	0	0	1	0	928	5	0	548	1	117
15 12:03	0.05	2.76	132	1	0	0	1	0	739	5	0	548	1	127
15 12:11	0.06	2.79	156	0	0	0	1	0	2	5	0	883	1	165
15 12:19	0.09	2.84	124	0	1	0	1	0	2	551	0	995	1	122
15 12:27	0.07	2.78	126	0	1	0	1	0	1	551	0	841	1	129
15 12:35	0.07	2.79	170	0	1	0	0	0	1	946	0	5	1	179
15 12:43	0.11	2.85	154	0	1	1	0	0	1	999	667	5	1	148
15 12:51	0.09	2.81	130	0	1	1	0	0	1	999	582	5	1	124
15 12:59	0.07	2.77	171	0	1	1	0	0	1	861	552	5	1	168
15 13:07	0.07	2.81	165	0	1	1	0	0	1	895	552	5	1	179
15 13:15	0.09	2.82	148	0	1	1	0	0	1	999	568	5	1	144
15 13:23	0.09	2.80	129	0	1	1	0	0	1	1000	558	5	1	120
15 13:31	0.06	2.76	168	0	1	1	0	0	1	813	552	5	1	167
15 13:39	0.08	2.82	173	0	1	1	0	0	1	926	552	4	1	187
15 13:47	0.11	2.84	144	0	1	1	0	0	1	1000	682	5	1	145
15 13:55	0.09	2.78	140	0	1	1	0	0	1	1000	562	5	1	139
15 14:03	0.06	2.76	176	0	1	1	0	0	1	819	552	5	1	181
15 14:11	0.10	2.83	180	0	1	1	0	0	1	1000	595	4	1	186
15 14:19	0.11	2.83	167	0	1	1	0	0	1	1000	656	5	1	162
15 14:27	0.11	2.81	162	0	1	1	0	0	1	1000	650	4	1	154
15 14:35	0.09	2.78	182	0	1	1	0	0	1	989	552	5	1	184
15 14:43	0.12	2.83	182	0	1	1	0	0	1	1000	690	5	1	182
15 14:51	0.12	2.81	188	0	1	1	0	0	1	1000	675	5	1	186
15 14:59	0.13	2.82	182	0	1	1	0	0	1	1000	747	5	1	179
15 15:07	0.12	2.80	179	0	1	1	0	0	1	1000	713	5	1	174
15 15:15	0.11	2.78	181	0	1	1	0	0	1	1000	669	5	1	185
15 15:23	0.10	2.77	186	0	1	1	0	0	1	1000	594	5	1	183
15 15:31	0.13	2.82	169	0	1	1	0	0	1	1000	733	5	1	175
15 15:39	0.11	2.78	186	0	1	1	0	0	1	1000	655	5	1	185
15 15:47	0.12	2.80	186	0	1	1	0	0	1	1000	682	5	1	183
15 15:55	0.13	2.82	185	0	1	1	0	0	1	1000	734	5	1	186
15 16:03	0.13	2.81	176	0	1	1	0	0	1	1000	739	5	1	180
15 16:11	0.09	2.79	294	0	1	1	0	0	1	1000	652	5	1	333
15 16:19	0.26	2.93	270	1	1	1	0	1	550	1000	1000	5	972	260
15 16:27	0.21	2.82	301	1	1	1	0	1	550	1000	999	5	712	280
15 16:35	0.24	2.83	298	1	0	1	0	1	793	7	1000	5	999	304
15 16:43	0.30	2.89	299	1	0	1	1	1	1000	6	1000	683	999	379
15 16:51	0.35	2.90	328	1	1	1	1	1	1000	576	1000	997	1000	310
15 16:59	0.28	2.77	348	1	1	0	1	1	1000	603	1	998	1000	364
15 17:07	0.34	2.83	374	1	1	0	1	1	999	833	1	997	1000	380
15 17:15	0.36	2.86	378	1	1	1	1	1	1000	988	558	998	1000	388
15 17:23	0.38	2.84	371	1	1	1	1	1	1000	1000	657	999	1000	363
15 17:31	0.35	2.79	350	1	1	1	1	1	999	989	554	997	1000	338
15 17:39	0.30	2.73	372	1	1	1	1	0	1000	1000	667	1000	3	382
15 17:47	0.27	2.84	387	1	1	1	1	1	1000	998	990	1000	109	404
15 17:55	0.39	2.86	302	1	1	1	1	1	1000	999	1000	1000	795	344
.
.
.

Abbildung 17: Betriebsdaten vom Ablaufpumpwerk der ARA vom 3.1.15 bis zum 4.1.15. Die Daten sind in einer zeitlichen Auflösung von 8 Minuten abgebildet.

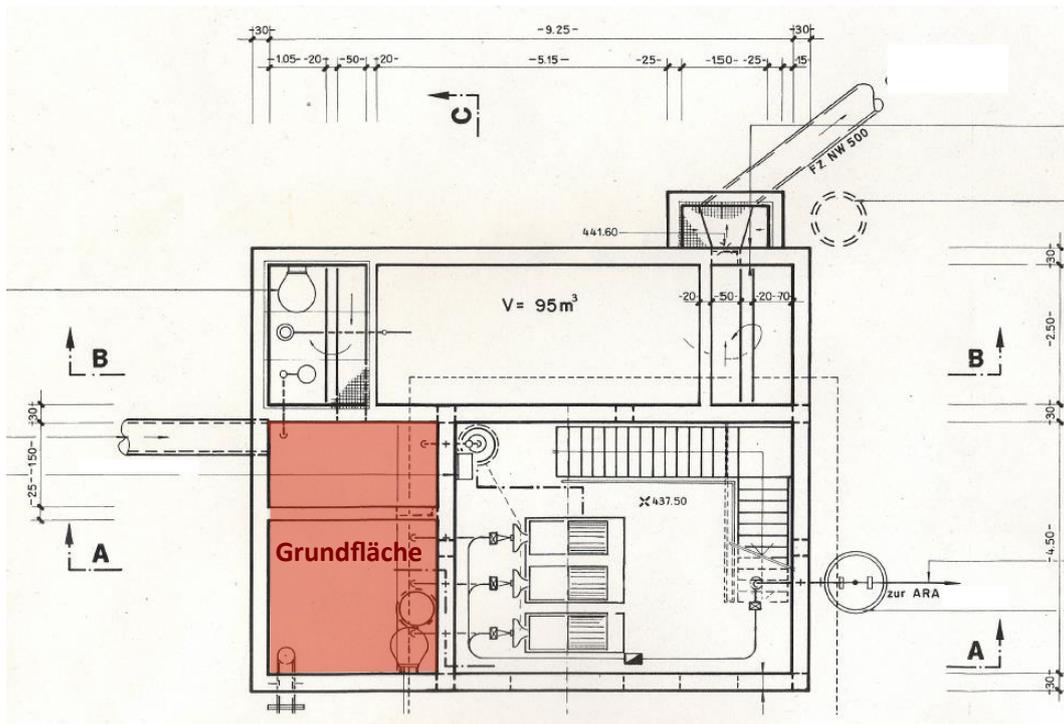


(a) Grundriss

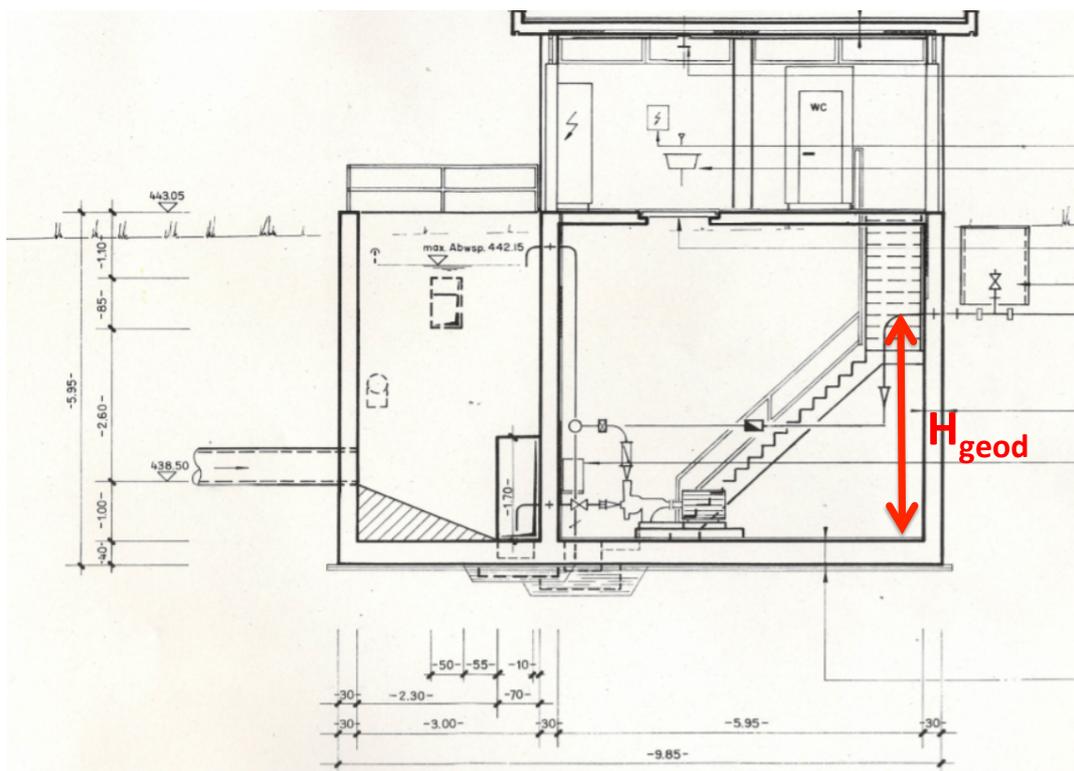


(b) Aufriss

Abbildung 19: Grund- und Aufriss vom Pumpwerk 41



(a) Grundriss



(b) Aufriss

Abbildung 20: Grund- und Aufriss vom Pumpwerk 61

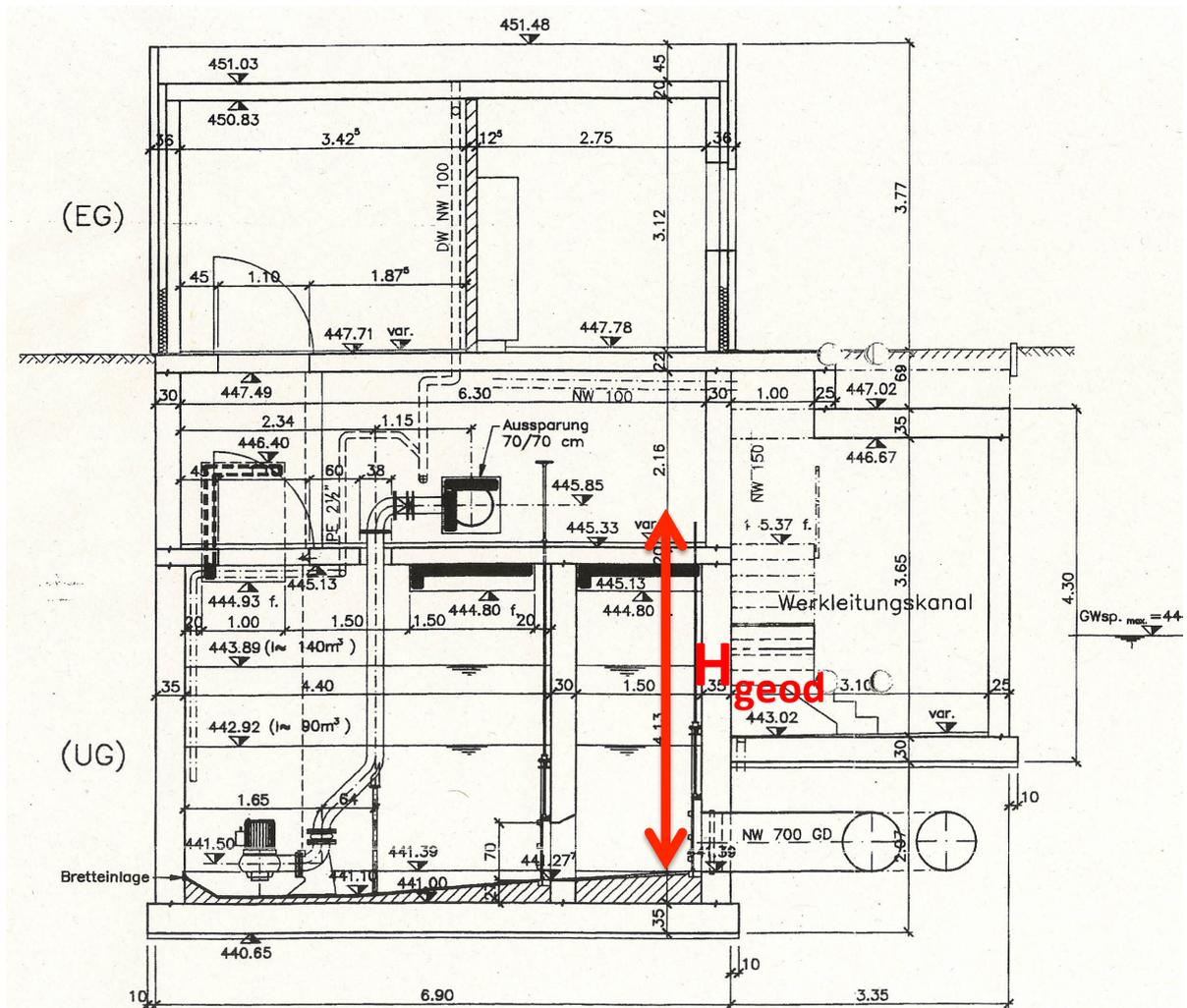


Abbildung 21: Aufriss vom Ablaufpumpwerk der ARA

A.5. Abbildungen für den Betriebsvergleich

Im folgendem Kapitel sind die weiteren Grafiken für den Vergleich des optimierten Betriebs mit dem Ist-Zustand abgebildet, welche im Kapitel 3 unterlassen wurden. Abbildung 22 ergänzt die beiden Szenarien zu Abbildung 5, Abbildung 23 ergänzt die Szenarien zu Abbildung 7 und die Abbildung 24 ergänzt die Szenarien zu Abbildung 9.

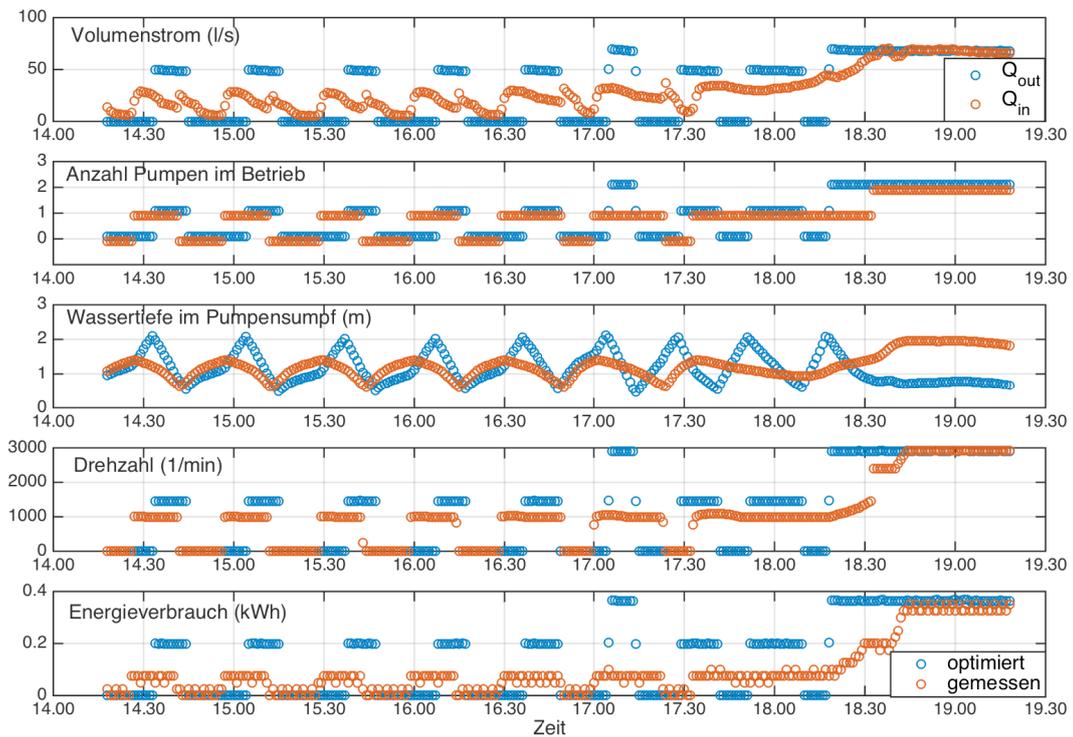
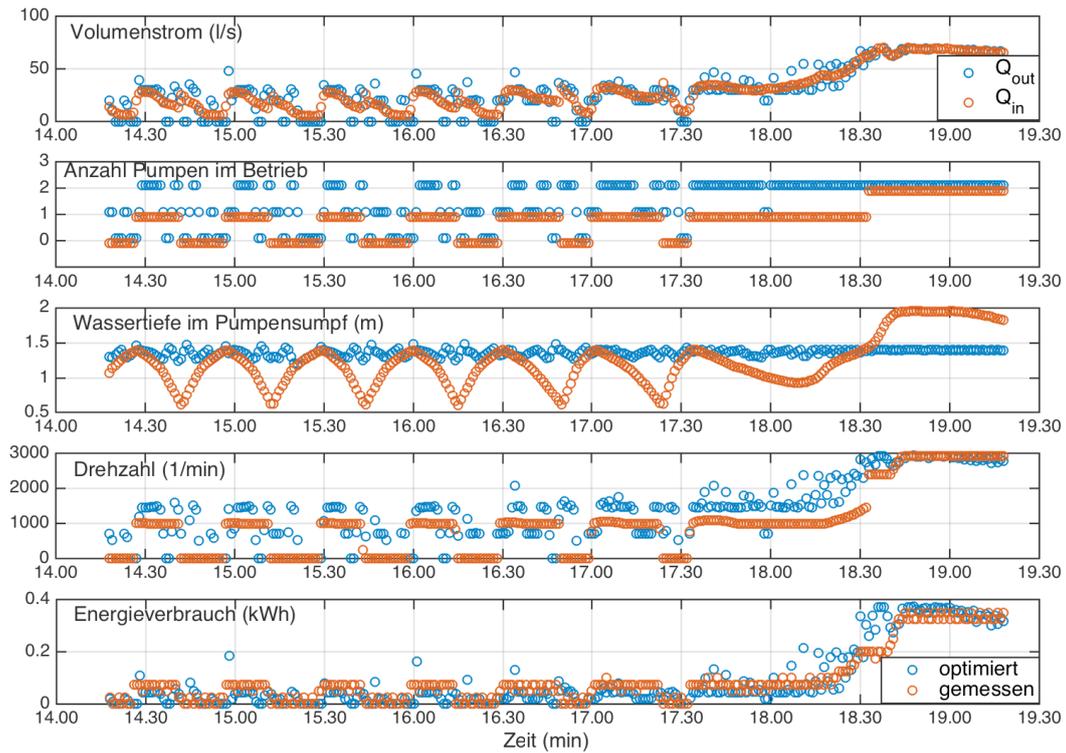
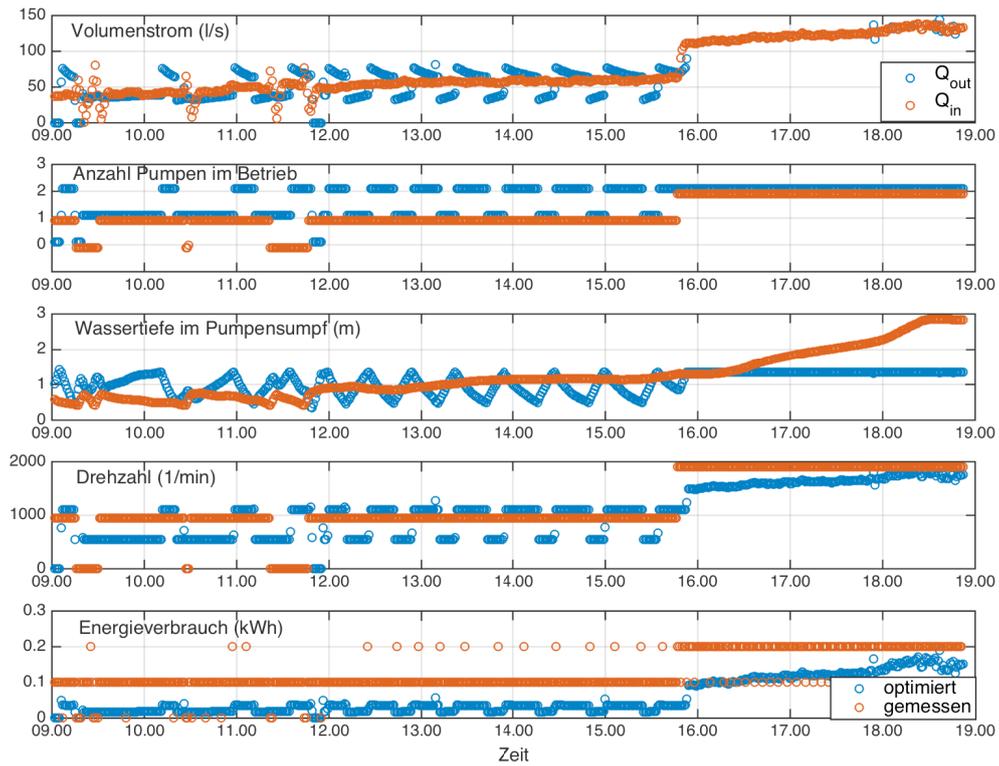
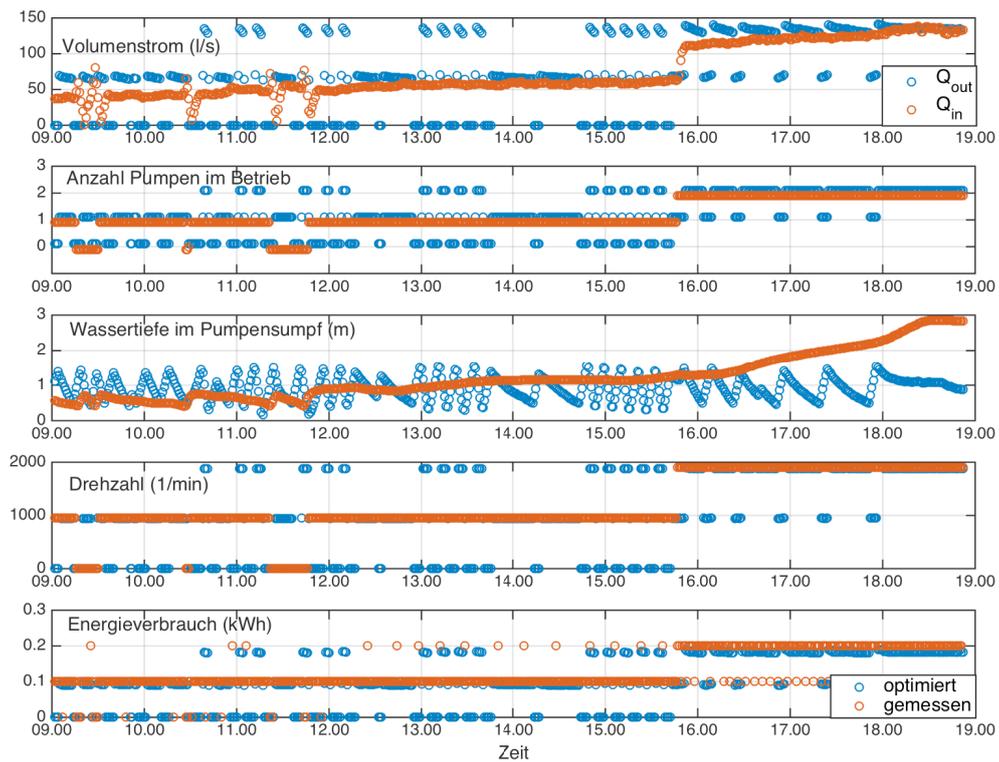


Abbildung 22: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Pumpwerk 61 mit der Betriebsweise von Szenario „fixer Füllstand“ und „fixe Drehzahl“.

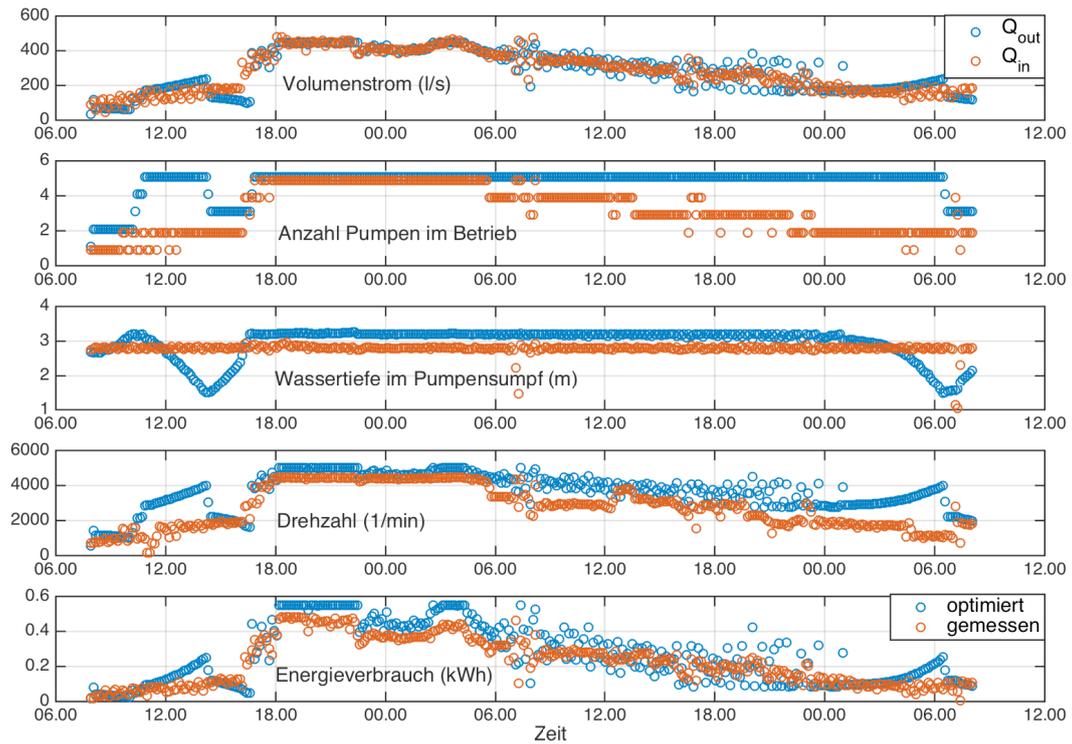


(a) Vergleich mit Szenario „Flexibel“.

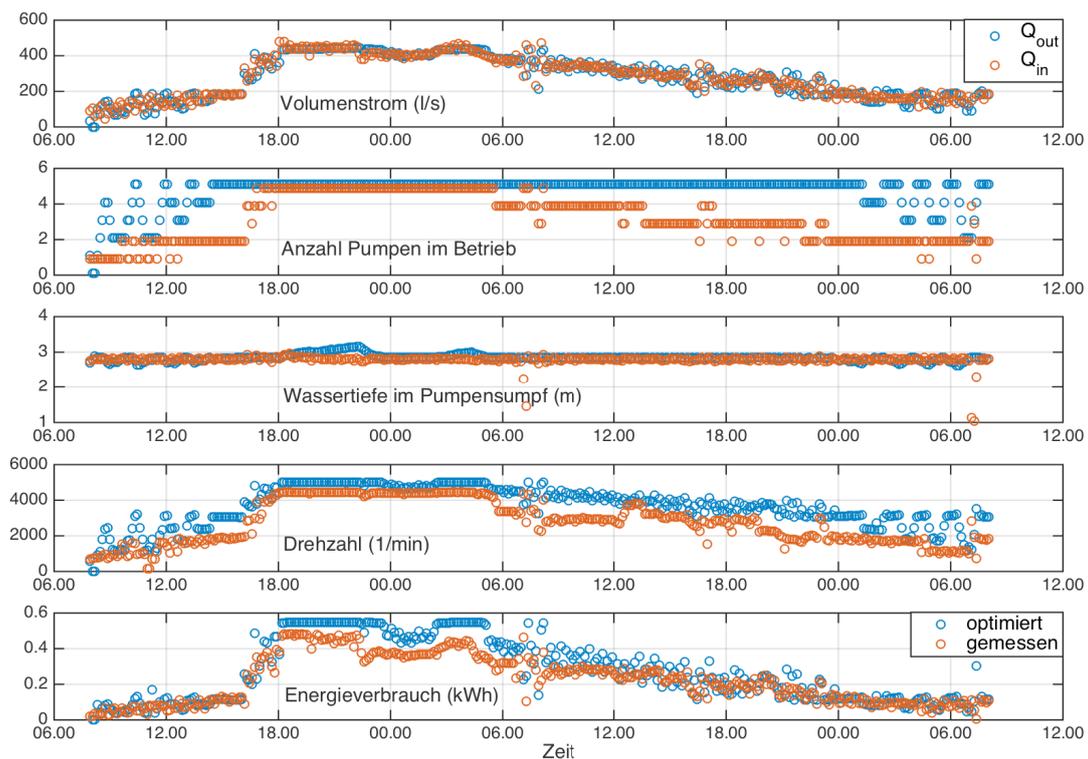


(b) Vergleich mit Szenario „fixe Drehzahl“.

Abbildung 23: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Pumpwerk 41 mit der Betriebsweise von Szenario „Flexibel“ und „fixe Drehzahl“.



(a) Vergleich mit Szenario „Flexibel“.



(b) Vergleich mit Szenarios „fixer Füllstand“.

Abbildung 24: Vergleich des bisherigen Betriebs vom Ablaufpumpwerk der ARA mit der Betriebsweise des Szenarios „Flexibel“ und „fixer Füllstand“.

A.6. Symbolverzeichnis

A_{Ps}	m^2	Grundfläche des Pumpensumpfes
a_0, a_1, a_2	s/m^2	Parameter des Polynoms der Pumpenkennlinie
b_0, b_1, b_2	$kW s/m^3$	Parameter des Polynoms der Leistungskennlinie
E	kWh	Energieverbrauch
H_{dyn}	m	Dynamischer Höhenanteil
H_{geo}	m	Geodätische Höhe
H_p	m	Förderhöhe
$H_{p,max}, H_{p,min}$	m	Maximale/Minimale mögliche Förderhöhe
$H_{Ps,max}, H_{Ps,min}$	m	Maximaler/Minimaler Füllstand im Pumpensumpf
H_{ps}	m	Füllstand im Pumpensumpf
ΔH_{Ps}	m	Differenz des Füllstandes im Pumpensumpf zwischen zwei Zeitschritten
$\Delta H_{Ps,max}$	m	Maximale Differenz des Füllstandes im Pumpensumpf zwischen zwei Zeitschritten
LZ_i	h	Laufzeit der Pumpe i
$LZ_{i,max}, LZ_{i,min}$	h	Maximale/Minimale Laufzeit der Pumpe i
N	-	Anzahl der Pumpen, die parallel geschaltet sind
n_i	U/min	Drehzahl der Pumpe i
n_{max}, n_{min}	U/min	Maximale/Minimale Drehzahl der Pumpe i
n_0	U/min	Nenn Drehzahl einer Pumpe
P	kW	Pumpleistung
Q_i	m^3/s	Förderstrom der Pumpe i
$Q_{i,max}, Q_{i,min}$	m^3/s	Maximal/Minimal möglicher Förderstrom der Pumpe i
Q_{in}	m^3/s	Zufluss in den Pumpensumpf
Q_{out}	m^3/s	Abfluss aus dem Pumpensumpf
R_{einz}	s^2/m^3	einzelne Leitungskonstante
R_{gem}	s^2/m^3	gemeinsame Leitungskonstante
S_i	-	Schaltungsvariable $\{0,1\}$ der Pumpe i
SZ_i	h	Standzeit der Pumpe i
$SZ_{i,max}, SZ_{i,min}$	h	Maximale/Minimale Standzeit der Pumpe i
T	s	Dauer eines Zeitschrittes
t	T	Zeitpunkt in der Simulation