

Universität Rostock
Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft
Professur für Numerische Mathematik

**Untersuchung der Möglichkeiten eines energieeffizienten Betriebsmanagements von
Abwasserfördersystemen**

Kurztitel: Energieeffiziente Abwasserfördersysteme

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert unter dem Az: 29356-24/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Hartmut Eckstädt

Prof. Dr. Klaus Neymeyr

M.Sc. Anita Krause

Dipl.-Math. Alexander Fricke

März 2013

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis	3
II.	Tabellenverzeichnis.....	4
III.	Abkürzungsverzeichnis/Symbolverzeichnis.....	5
1.	Zusammenfassung	6
2.	Einleitung	7
3.	Umrüstung einer Pumpstation	11
3.1	Wahl einer Pumpstation	11
3.2	Wahl einer Pumpe	12
3.3	Umrüstung des HPW Prerow	14
3.3.1	Installation und Inbetriebnahme	14
3.3.2	Erste Tests der Drehzahlregelung.....	17
4.	Analyse historischer Daten.....	17
4.1	Jahresganglinie	17
4.2	Einfluss von Niederschlag.....	18
4.3	Tagesganglinien.....	20
4.4	Zulaufprognosen.....	25
4.5	Betrieb der Pumpen und Rohrleitungen	28
4.5.1	Betriebszustände.....	28
4.5.2	Förderhöhen und –drücke.....	29
4.5.3	Ein- und Ausschaltpegel in der Pumpenvorlage.....	30
5.	Optimierung der Pumpenbetriebsweise.....	31
5.1	Optimierung eines typischen Anwendungsfalls	32
5.2	Lösung des Optimierungsproblems	35
5.3	Optimierung weiterer Szenarien.....	40
5.4	Regelbasierte Steuerstrategien.....	43
5.5	Anpassung der optimalen Strategie	46
6.	Ökologische, technische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse.....	49
6.1	Ökologische Bewertung	49
6.2	Technische Bewertung	49
6.3	Ökonomische Bewertung	50
7.	Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse	51
8.	Fazit.....	51
9.	Literaturverzeichnis.....	53

I. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vom Menschen verursachte Treibhausgas-Emissionen [Oek13]	7
Abb. 2: Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung 2012	7
Abb. 3: Druckentwässerungssystem auf dem Darß [AWK]	11
Abb. 4: Pumpen- und Leistungskennlinien	13
Abb. 5: Schaltschrank	15
Abb. 7: Inbetriebnahme der Pumpe.....	15
Abb. 6: Pumpenfuß montiert auf Stahlfuß	15
Abb. 8: Modellaufbau zum Test der Steuerung eines	15
Abb. 9: Jahresganglinie des Schmutzwasseranfalls	18
Abb. 10: Jahresganglinie des Schmutzwasseranfalls und Tagesniederschläge	19
Abb. 11: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Juli 2011.....	20
Abb. 12: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Oktober 2011	21
Abb. 13: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Juli 2011 mit mehr als 9 mm Niederschlag.....	22
Abb. 14: Tagesganglinie des Schmutzwasseranfalls am 05.09.2011.....	24
Abb. 15: Tagesganglinie des Schmutzwasseranfalls am 19.01.2011.....	24
Abb. 16: Darstellung des Zulaufes zum HPW Prerow im Monat Juli 2011 pro Zeitintervall .	25
Abb. 17: Zulaufprognose für den 04.05.2012	27
Abb. 18: Zulaufprognose für den 26.05.2012	27
Abb. 19: Dauer der Betriebszustände der 9 definierten Fälle pro Monat	29
Abb. 20: Förderleistung der Pumpe 1 und Druck in der Leitung DN 400.....	29
Abb. 21: Förderleistung der Pumpe 2 und Druck in der Leitung DN 400.....	30
Abb. 22: Zweipunktsteuerung am 23.6.2011	31
Abb. 23: Typisches Szenario.....	32
Abb. 24: Wirkungsgradkennfeld	33
Abb. 25: Lösung des Optimierungsproblems.....	37
Abb. 26: Vergleich von optimaler und regelbasierter Strategie.....	37
Abb. 27: Lösung des relaxierten Problems	39
Abb. 28: Lösung nach Rundung und Optimierung der Zeitschritte	40
Abb. 29: Reihenschaltung von Fördersystemen mit Druckunterbrechung	40
Abb. 30: Zustandsbäume bei Reihenschaltung	42
Abb. 31: Optimale Steuerung von in Reihe geschalteter Pumpen	43
Abb. 32: Alternatives Szenario	43
Abb. 34: Vergleich von optimaler und regelbasierter Strategie.....	45
Abb. 35: Optimale Steuerung bzgl. Zulaufprognose.....	47
Abb. 36: Angepasste Strategie	48

II. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Arbeitspakete der ersten Projektphase	10
Tab. 2: Spannweiten der Monate Juli und Oktober 2011 pro Stunde; größte Spannweiten umrahmt	22
Tab. 3: Spannweiten der Monate Juli und Oktober 2011 pro Stunde ohne Tage mit Niederschlag über 9 mm und Hafenfest; größte Spannweiten umrahmt	23
Tab. 4: Betriebszustände der Pumpen und Druckrohrleitungen; Summe der Betriebsstunden im gesamten Messzeitraum	28
Tab. 5: Ein- und Ausschaltpegel der Pumpen im HPW Prerow über den Beobachtungszeitraum	30
Tab. 6: Vergleich Energieeinsparung	46
Tab. 7: Hochrechnung der Einsparung der CO ₂ -Emission in MV und Deutschland bei unterschiedlichen Energieeinsparungen	49

III. Abkürzungsverzeichnis/Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
d	Durchmesser	[m]
DM	Druckmessgerät	
DN	Nennweite	[mm]
E	Energiekosten	[€]
FU	Frequenzumformer	
h	Wasserstand	[m]
H	manometrische Förderhöhe	[m]
HPW	Hauptpumpwerk	
IDM	Induktives Durchflussmessgerät	
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change	
n	Drehzahl	[min ⁻¹]
NPSH	Nettosaugdruckhöhe	[m]
NPSHA	Nettosaugdruckhöhe der Anlage	[m]
Q	Durchfluss	[m ³ h ⁻¹]
p	Druck	[Pa]
P	Leistung	[W]
PE-HD	Polyethylen „high density“	
r	Korrelationskoeffizient	[-]
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
t	Zeit	[s]
v	Fließgeschwindigkeit	[ms ⁻¹]
V	Volumen	[m ³]
z	Schaltvariable	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]

1. Zusammenfassung

Das Projekt zum energieeffizienten Betriebsmanagement von Abwasserfördersystemen wird an der Universität Rostock an der Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Eckstädt sowie an der Professur für Numerische Mathematik unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Neymeyr in Kooperation mit der Firma WILO SE und dem Abwasserzweckverband Darß durchgeführt.

Gefördert wird das Vorhaben mit dem Aktenzeichen 29356-24/0 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Höhe von 125.000 €.

In diesem Projekt wurden mit Methoden der dynamischen Optimierung neue Techniken für eine energetisch optimale Steuerung von Abwasserpumpen durch Drehzahlregelung entwickelt. Die optimale Steuerung wurde für einfache Abwasserfördersysteme durch regelbasierte Strategien validiert. Die theoretischen Untersuchungen prognostizieren ein erhebliches Energieeinsparpotential von etwa 26% durch die optimale Steuerung.

Für die praktische Erprobung der Pumpensteuerung wurde eine Abwasserpumpstation in Prerow, auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst, ausgewählt. Diese Station ist durch die vorhandene technische Ausstattung und durch das sich im Jahresverlauf stark ändernde Abwasseraufkommen hervorragend für die Erprobung und Weiterentwicklung von optimalen Förderstrategien geeignet. Im Förderzeitraum wurde in dieser Station eine drehzahlregelbare Pumpe der Firma WILO SE, ein Frequenzumformer mit Sinusfilter, ein Energiezähler sowie ein netzangebundener Steuercomputer installiert. Der praktische Einsatz dieser Technik unter Betriebsbedingungen steht nun an.

Zusätzlich konnten bereits ab April 2011 über die in dieser Pumpstation vorhandene Pegelsonde, über den induktiven Durchflussmesser sowie über ein Druckmessgerät umfangreiche Daten zu den Abwasserströmen erhoben werden. Durch Einzelereignisse (wie Starkniederschläge oder Hafenfest) wurden besondere Belastungssituationen aufgezeichnet. Numerische Rechnungen für diese Datensätze weisen ein energetisches Einsparpotential zwischen 23 und 26 Prozent nach und bestätigen damit die Modellprognose.

Das Ziel der geplanten zweiten Projektphase ist der Nachweis der prognostizierten Energieeinsparungen unter Betriebsbedingungen. Die Strategien sind hinsichtlich der Gewährleistung der Betriebssicherheit weiter zu entwickeln. Durch den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Strategien unter Praxisbedingungen und auch durch die begleitende Veröffentlichung der Ergebnisse soll die Basis für eine möglichst breite Anwendung der optimalen Steuerstrategien gelegt werden. Eine Energieeinsparung von rund 25% bei Abwasserfördersystemen wäre ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und begünstigt die Erreichung der Klimaziele des Kyoto2-Protokolls.

2. Einleitung

In den Berichten des IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) Berichten wird stets der anthropogene Treibhauseffekt als Hauptursache für die globale Erwärmung genannt [Ipc07]. Die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre sind aufgrund menschlicher Aktivitäten seit der vorindustriellen Zeit gestiegen [Ipc01]. Das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) hat dabei den größten Anteil (siehe Abb. 1).

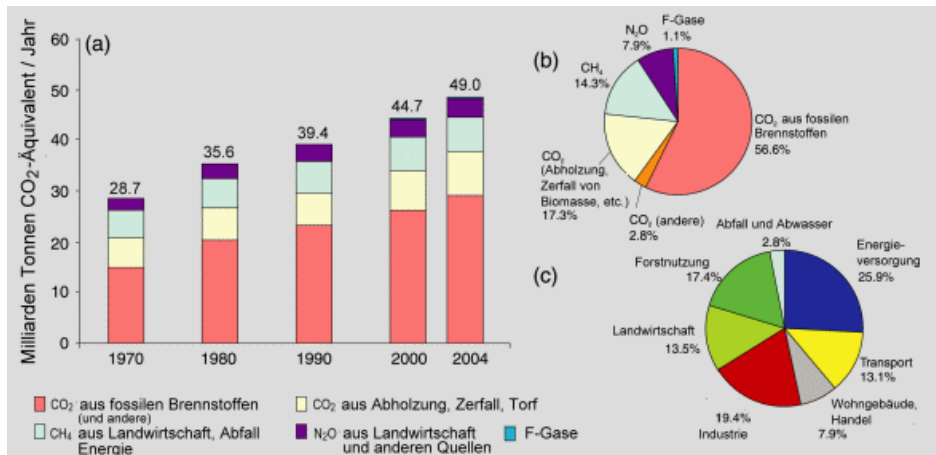


Abb. 1: Vom Menschen verursachte Treibhausgas-Emissionen. (a) Globale jährliche Treibhausgasemissionen von 1970 bis 2004, (b) Anteil der verschiedenen Treibhausgase an den Emissionen im Jahr 2004, (c) Anteil der verschiedenen Sektoren an den Treibhausgas-Emissionen (Forstnutzung beinhaltet Abholzung von Wäldern) [Oek13]

Beim UN-Klimagipfel in Doha 2012 wurde Kyoto 2, als Verlängerung des im Jahr 1997 beschlossenen Kyoto-Protokolls, mit 27 EU-Staaten und weiteren Ländern verabschiedet [Gre12]. Beide Kyoto-Protokolle haben zum Ziel Treibhausgas-Emissionen, vor allem CO₂, drastisch zu senken.

Wie auch schon in Abb. 1 zu erkennen, hat die Energieversorgung einen immensen Anteil (25,9 %) an den Treibhausgas-Emissionen. In der Abb. 2 wird deutlich, dass noch immer sehr viele Energieträger zur Stromerzeugung genutzt werden, die einen hohen CO₂-Ausstoß zur Folge haben (bspw. Braun- und Steinkohle).

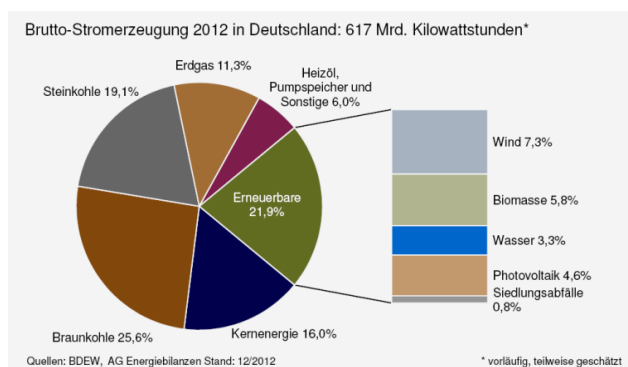


Abb. 2: Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung 2012 in Deutschland [Nic12]

Um die Ziele des Kyoto 2-Protokolls zu unterstützen wird in diesem Projekt das Augenmerk auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen durch einen energieeffizienten Betrieb von Abwasserfördersystemen gelegt. Realisiert werden soll die Energieeinsparung durch eine Drehzahlregelung der Abwasserpumpen mit Hilfe von optimalen Steuerstrategien.

Es gibt bereits Projekte, die sich mit dem Thema der Drehzahlregelung von Abwasserpumpen beschäftigen. Die Initiative „Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe“ beschäftigt sich dabei speziell mit den Energiekosten von Systemen und mit Maßnahmen für die Energiesenkung. Maßnahmen zur Senkung der Energiekosten waren unter anderem der Austausch von Pumpen bzw. Motoren, die Änderung der Rohrleitungsführung und -dimensionierung sowie die Einführung oder Aufhebung von Drosselungen. Es kamen auch Frequenzumrichter für den Betrieb der Pumpen mit veränderter Drehzahl zum Einsatz. Durch diese Veränderungen konnten durchschnittlich 30% der Energiekosten eingespart werden [Dea09]. Auf eine konkrete Strategie zum optimalen Einsatz des Frequenzumrichters wird hier jedoch nicht eingegangen.

An der TU Berlin bspw. werden Versuche zur Verstopfungsneigung von Pumpen bei verringerter Drehzahl durchgeführt (Projektname *OKADAR*). Für die Untersuchungen wurde ein Versuchsstand aus Plexiglas aufgebaut, der die Komponenten eines Abwasserfördersystems abbildet. Der Pumpenvorlage werden Schmutzfrachten hinzu gegeben, die in der Praxis häufige Verstopfungen an den Pumpen auslösen [TB12]. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt sind in der zweiten Projektphase sehr interessant. Dort wird die Betriebssicherheit von Abwasserfördersystemen mit drehzahlregelbaren Pumpen mit in den Vordergrund gestellt.

Ein weiteres Projekt der TU Darmstadt und weiteren Partnern (*Odysseus*) befasst sich mit der diskret-kontinuierlichen Optimierung komplexer dynamischer Wasserver- und Entsorgungssysteme. Hier wird eine Betriebsoptimierung mit modernen Methoden aus der Mathematik verbunden. Die Forschungsschwerpunkte liegen bei den Themen der Optimierung der Betriebsführung von Wasserversorgungsnetzwerken, bei der Echtzeit- und Multikriteriellen Optimierung in der Abwasserentsorgung sowie der Rohrströmung [Tud13]. Dieses Projekt ist hinsichtlich der entwickelten Lösungsalgorithmen interessant, allerdings fehlt der direkte Bezug zur Betriebsweise von Pumpen.

Inhalt der zuvor genannten Projekte ist einerseits die Optimierung ganzer Kanalsysteme und andererseits die Reduzierung des Energiebedarfs. Dies erfolgt jedoch unter anderem durch den Austausch von Pumpen, Drosselung von Förderströmen und Neudimensionierung von Rohrleitungen. Der Einsatz von Frequenzumrichtern wird hier zwar als Mittel zur Energieeinsparung erwähnt, auf optimale Strategien zum Einsatz des Frequenzumformers wird aber nicht eingegangen.

Das Projekt „Energieeffiziente Abwasserfördersysteme“ gliedert sich in drei Phasen – Vorphase, erste Projektphase und zweite Projektphase.

Die Vorphase, finanziert durch die Fa. WILO SE, wurde vom 01.03.2010 bis 30.06.2010 an der Universität Rostock, an der Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft sowie an der Professur für Numerische Mathematik, durchgeführt.

Nach erfolgreicher Beantragung bei der Deutschen Bundesumweltstiftung wurde die erste von zwei geplanten Projektphasen vom 01.04.2012 bis zum 31.03.2013 durchgeführt. Diese Phase des Projektes diente der Entwicklung von Strategien zur intelligenten Steuerung drehzahlregelbarer Abwasserpumpen und der Umrüstung einer Abwasserpumpstation für die in der zweiten Projektphase geplante Umsetzung der entwickelten Ideen. Somit schließt das zweite Projektjahr thematisch direkt an die erste Projektphase an.

In der in diesem Abschlussbericht beschriebenen ersten Projektphase war es u.a. Ziel, eine Abwasserpumpstation in der näheren Umgebung von Rostock zu finden, die zielführend umgerüstet werden kann. Dazu sollte notwendige Messtechnik sowie die zur Steuerung einer Pumpe benötigten Elementen (Frequenzumformer, PC, Energiemessgerät) installiert werden. Dies sollte vorbereitend für die zweite Projektphase dienen, die derzeit erneut bei der Deutschen Bundesumweltstiftung beantragt wird. Die Umrüstung einer Pumpstation (Kapitel 3) soll der praktischen Anwendung, der in der Theorie entwickelten Strategien zur Regelung einer Abwasserpumpe dienen. Die praktische Anwendung dieser Strategien und die Beachtung der Betriebssicherheit der Abwasserableitung sollen in der zweiten Projektphase geschehen.

Nach der Umrüstung sollen Daten, die zum Verständnis des vorhandenen Druckrohrsystems beitragen, aufgenommen und analysiert werden. Zu den Daten gehören der Wasserstand in der Pumpenvorlage, der Durchfluss sowie der Druck in der Druckrohrleitung. Diese Analyse findet sich in Kapitel 4 „Analyse historischer Daten“.

Im Rahmen der ersten Projektphase fand die Entwicklung von Strategien zur energieeffizienten Steuerung von Abwasserpumpen statt. Dazu werden verschiedene Strategien zur Lösung von Optimierungsproblemen, bezogen auf typische Abwassertopologien, entwickelt. Die Strategien und die Szenarien, an denen die Strategien theoretisch getestet werden, werden im Kapitel 5 „Optimierung der Pumpenbetriebsweise“ näher vorgestellt.

Erste Tests einer Steuerung konnten bereits nach Fertigstellung der Umrüstung bereits am Hauptpumpwerk in Prerow durchgeführt werden.

Die detaillierten Arbeitspakete und deren Fristen sind im nachfolgenden Abschnitt dargestellt. Die im Projektantrag aufgeführten Arbeitspakete wurden zu Beginn des Projektes noch einmal in ihrer Reihenfolge verändert. Dies hatte jedoch keine Auswirkung auf den im Projektantrag genannten zeitlichen Rahmen. Die Änderung der Arbeitspakete kam durch den Wechsel eines Kooperationspartners zustande. Nachdem zunächst die Abwasserpumpstation in Rostock/Hinrichsdorf als Referenzobjekt vorgesehen war, wurde das Pumpwerk in Prerow auf dem Darß ebenfalls als Versuchsstation in Betracht gezogen. Ein Vergleich beider Pumpwerke brachte die Erkenntnis, dass zwar beide Pumpstationen für eine Umrüstung zum Zweck eines drehzahlgeregelten Betriebs in Frage kommen. Da die Pumpstation in Prerow jedoch bereits über eine gewisse Grundausstattung an Messtechnik verfügt, wurde eine Entscheidung aufgrund der höheren Mehrkosten und des größeren Zeitrahmens zur Umrüstung gegen die Pumpstation in Rostock getroffen. Die Pumpstation in Prerow liegt jedoch nicht im Zuständigkeitsbereich der Fa. Eurawasser Nord GmbH. Aus diesem Grund

wurde der Abwasserzweckverband Darß als neuer Kooperationspartner in das Projekt involviert. Zudem musste der zeitliche Rahmen einzelner Arbeitspakete neu abgesteckt werden.

Die neue Strukturierung der Arbeitspakete sowie die Bearbeitungszeiträume sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Arbeitspakete der ersten Projektphase

Arbeitspaket	Frist
1. Umrüstung einer Pumpstation	15.06.2012
2. Auswertung historischer Daten	30.06.2012
3. Erweiterte Datenaufnahme	31.03.2013
4. Analyse von Tagesganglinien	31.07.2012
5. Entwicklung von Strategien zur Erstellung von Zuflussprognosen	30.09.2012
6. Entwicklung von regelbasierten Steuerstrategien	30.04.2012
7. Entwicklung von Anpassungsalgorithmen	30.06.2012
8. Auswertung und Vergleich der Ergebnisse	31.07.2012
9. Analyse typischer Abwassertopologien	30.11.2012
10. Modellierung typischer Szenarien	31.12.2012
11. Formulierung problemangepasster mathematischer Optimierungsaufgaben	31.12.2012
12. Auswertung von Optimierungsansätzen	31.01.2013
13. Lösung der Optimierungsprobleme	28.02.2013
14. Schreiben des Abschlussberichts	31.03.2013

Die Frist für das Arbeitspaket 1 „Umrüstung einer Pumpstation“ musste im Laufe des Projektjahres auf Grund von Behinderungen in der technischen Installation verlängert werden. Die Ursachen werden im nachfolgenden Kapitel verdeutlicht.

Für die nachfolgenden Arbeitspakete hatte dies jedoch keine Auswirkung.

3. Umrüstung einer Pumpstation

3.1 Wahl einer Pumpstation

Die Abwasserpumpstation, die als Referenzobjekt für die praktische Umsetzung der entwickelten Strategien zur drehzahlgeregelten Steuerung von Abwasserpumpen (siehe Kapitel 5) dienen soll, befindet sich auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst nahe dem Ort Prerow und wird vom Abwasserzweckverband Darß betrieben.

Auf dem Darß befindet sich eine Druckentwässerung, die die Gemeinden Born, Wieck und Prerow einschließt. Das anfallende Schmutzwasser der drei Orte wird über die Kläranlage in Wieck gereinigt. Das Abwasser, das in Prerow (Prerow Ost/West) und dem Campingplatz in Prerow (Prerow Nord) anfällt, wird über das Hauptpumpwerk (HPW) Prerow in die Kläranlage Wieck gefördert.

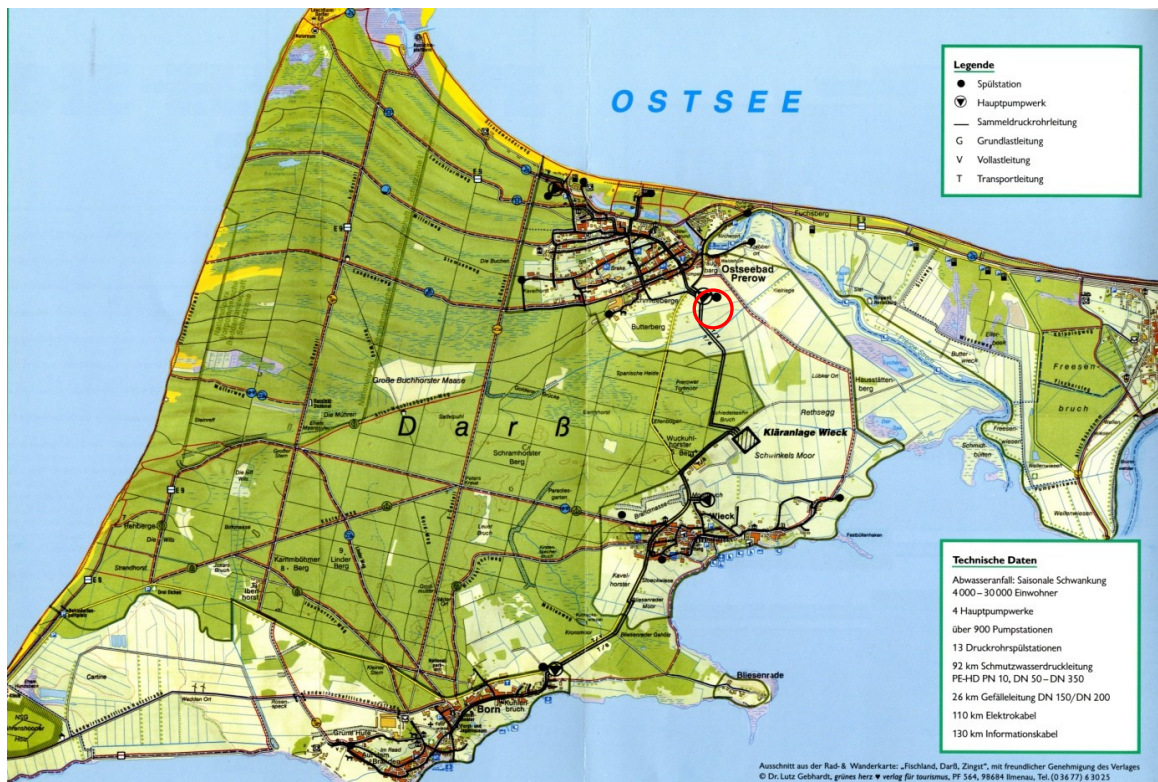


Abb. 3: Druckentwässerungssystem auf dem Darß; Ortslagen Born, Wieck und Prerow und die Kläranlage Wieck; HPW Prerow rot markiert [AWK]

Zwei Pumpen mit je 27 kW fördern das Abwasser durch zwei Druckrohrleitungen (DN 400 und DN 250) zur Kläranlage in Wieck. Die Druckrohrleitung DN 400 (PE-HD 400x36,4) wird als Grundlastleitung und die DN 250 (PE-HD 250x22,8) als Vollastleitung betrieben.

Der Einfluss von Tourismus ist in dieser Region sehr hoch. Im Sommer sind ca. 16.000 und im Winter ca. 2.800 Einwohner an die Pumpstation angeschlossen. Schneidräder an den Tauchmotorpumpen der Haushalte sorgen dafür, dass keine groben Verunreinigungen in das Pumpwerk gelangen.

Ein Stauraumkanal vor der Pumpenvorlage ermöglicht eine Speicherung des Abwassers im Havariefall über 3-4 h. Dieser Stauraumkanal bietet ein zusätzliches Potential zur Energieeinsparung, das im Rahmen der Entwicklung und Umsetzung der Strategien unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit des Entwässerungssystems genutzt werden kann. Eine Druckluftspülstation sorgt für die Einhaltung der vorgegebenen Aufenthaltszeiten des Wassers in der abgehenden Druckrohrleitung.

Ein großer Vorteil dieser Pumpstation ist, dass alle für das Projekt notwendigen Messgeräte (Geräte zur Erfassung des Wasserstandes in der Pumpenvorlage, des Durchflusses und des Druckes in den Druckrohrleitungen) bereits verbaut sind und Messwerte über den Wasserstand, den Durchfluss und den Druck aufzeichnen, die zur Untersuchung der Energieeinsparpotentiale herangezogen werden können.

Des Weiteren ist von Vorteil, dass beim Bau der Abwasserpumpstation ursprünglich ein Einsatz von vier Pumpen geplant war. Installiert wurden jedoch nur zwei, sodass zwei Pumpensteckplätze noch zur Verfügung stehen, von denen einer für das hier geplante Vorhaben genutzt werden kann.

Einen weiteren Vorteil bietet das Bypass-System dieser Anlage. In Havariefällen kann das anfallende Abwasser direkt an der Pumpstation vorbei der Kläranlage Wieck zugeführt werden. Dies kann durch die Schneidradpumpen eines jeden Hausanschlusses realisiert werden.

Eine Alternative zum HPW Prerow stellte die Pumpstation in Rostock/Hinrichsdorf dar, welche ursprünglich zur Umsetzung der entwickelten Strategien dienen sollte. Sie wurde 1992 erbaut und wird von der Eurawasser Nord GmbH betrieben. Die Vorteile dieser Anlage liegen in der geringen Entfernung zum Arbeitsort (14 km) und der Tatsache, dass ein Einfluss von Tourismus zu verzeichnen ist. Im Sommer sind ca. 13.000 Einwohner an die Pumpstation angeschlossen, wohingegen es im Winter nur ca. 5.500 Einwohner sind.

Von Nachteil ist, dass in dieser Anlage lediglich die Pegelsonde zur Überwachung des Wasserstandes vorhanden ist. Durchflussmessgeräte müssten mit aufwändigen und teuren Erdarbeiten nachgerüstet werden. Außerdem sind kaum Unterlagen dieser Pumpstation und seiner Elemente vorhanden.

Aufgrund dieser Nachteile wurde die Pumpstation in Prerow zur Umrüstung gewählt. Da diese Abwasserpumpstation außerhalb des Zuständigkeitsbereichs der Eurawasser Nord GmbH liegt, war ein Wechsel des Kooperationspartners von der Eurawasser Nord GmbH zum Abwasserzweckverband Darß notwendig.

3.2 Wahl einer Pumpe

Eine Anfrage bei der Fa. JUNG ergab, dass die in Prerow vorhandenen Pumpen nicht in Kombination mit einem Frequenzumformer zur Drehzahlregelung betrieben werden sollten. Da die Pumpstation mit vier Pumpensteckplätzen erbaut wurde, jedoch nur mit zwei Pumpen betrieben wird, fiel die Entscheidung auf die Investition in eine neue Pumpe, welche von der Fa. WILO zur Verfügung gestellt werden sollte.

Eine Simulation aus den Zuflüssen zum HPW Prerow und den Leistungskennlinien der Pumpen der Fa. JUNG ergab einen Energieverbrauch beider Pumpen in Summe von 19.622 kWh/a.

Um eine passende Pumpe auszuwählen wurden zunächst die Anlagenkennlinien für DN 400 und DN 250 ermittelt. Daraufhin wurden Pumpen von der Fa. WILO herausgesucht, die einen ähnlichen Betriebspunkt bezüglich der größeren Druckrohrleitung wie die zu dieser Zeit installierten JUNG-Pumpen aufwiesen. Diese waren die Pumpen FA 15.66 und FA 15.95. Alternativ wurde eine Pumpe FA 10.94 in Betracht gezogen, die auf die Rohrleitlinie für DN 250 ausgelegt wurde.

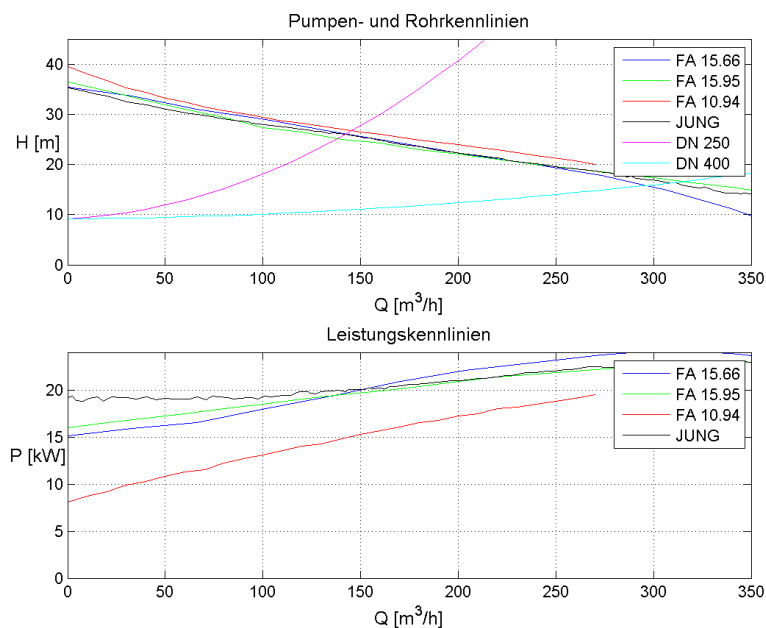


Abb. 4: Pumpen- und Leistungskennlinien der alten Pumpen, der Pumpen FA 15.66, FA 15.95 und FA 10.94 sowie die Anlagenkennlinie der Druckrohrleitung vom HPW Prerow zur Kläranlage Wieck

Auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten konnten Zuflussganglinien über mehr als ein Jahr erstellt werden. Eine numerische Simulation mit den berechneten Zuflüssen und den Leistungsdaten der angebotenen Pumpen über einen Zeitraum von genau einem Jahr erbrachte folgende Energieverbräuche bei herkömmlicher Zweipunktsteuerung:

	FA 10.94	FA 15.66	FA 15.95
DN 250	33003 kWh	37010 kWh	42755 kWh
DN 400	-	22434 kWh	22352 kWh

Die Pumpe FA 10.94 ist nicht für eine Verwendung mit der Grundlastleitung ausgelegt, da der Förderstrom von ihr zu gering wäre.

Eine weitere Simulation errechnete die möglichen Energieverbräuche aller drei Pumpen bei einer drehzahlgeregelten Steuerung dieser. Für die Simulation wurde die entwickelte Steuerstrategie auf Basis der dynamischen Optimierung verwendet (siehe Kapitel 5.1). Folgende Verbräuche ließen sich simulieren:

	FA 10.94	FA 15.66	FA 15.95
DN 250	24803 kWh	29689 kWh	35484 kWh
DN 400	-	16561 kWh	18192 kWh

Prozentual ergeben sich damit folgende Einsparungen durch die intelligente Drehzahlregelung gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung:

	FA 10.94	FA 15.66	FA 15.95
DN 250	24,8 %	19,8 %	17,0 %
DN 400	-	26,2 %	18,6 %

Zunächst fiel die Entscheidung die DN 400 weiter als Grundlastleitung zu wählen, da sie ganzjährig betrieben werden kann. Als Grundlage für diese Entscheidung diente folgendes Berechnungsbeispiel mit den beiden höchsten Energieeinsparpotentialen bei Kombination aus Pumpe und Förderleistung aus vorhergehender Tabelle:

- Pumpe FA 10.94 auf Leitung DN 250
Der Zufluss übersteigt den Maximalförderstrom der Pumpe an etwa 104 Tagen im Jahr für insgesamt ca. 158 Stunden.
- Pumpe 15.66 auf Leitung DN 400
Der Zufluss übersteigt den Maximalförderstrom der Pumpe an etwa 17 Tagen im Jahr für insgesamt ca. 4,5 Stunden.

Da die Sicherstellung des Abflusses des HPW Prerow in jedem Fall die höchste Priorität hatte, wurde die Entscheidung für die Förderung auf die Leitung DN 400 gefestigt.

Zur Disposition standen letztendlich die Pumpen FA 15.66 bzw. FA 15.95. Die Wahl fiel dabei auf die Pumpe FA 15.66, da eine Energieeinsparung *in Höhe von 26,2 %* bei ganzjährigem Betrieb dieser mit einem Frequenzumformer zu erwarten ist, während das Einsparpotential bei der Alternativpumpe lediglich 18,6% beträgt.

3.3 Umrüstung des HPW Prerow

3.3.1 Installation und Inbetriebnahme

Die Lieferung der Pumpe erfolgte am 04.09.2012. Der anschließende Einbau wurde jedoch bis zum 15.11.2012 unterbrochen, da ein Adapterteil (Kupplungsklaue GR 151 der Fa. JUNG; siehe Abb. 2) zwischen dem Pumpenfuß und der Pumpe (Druckstutzen) der Fa. WILO nicht passte. Die Kupplungsklaue dient dazu, die Pumpe, die mithilfe von Führungsstangen in den Pumpensumpf hinuntergelassen wird, in den Pumpenfuß einzuhaken und so die Verbindung zwischen Druckstutzen der Pumpe und Pumpenfuß zu schaffen.



Abb. 5: Schaltschrank mit FU, Sinusfilter und Energiezähler

Die Lieferung und Installation des Frequenzumformers und des dazugehörigen Sinusfilters zur Realisierung der Drehzahlregelung des Pumpenmotors sowie des Energieverbrauchsmessgerätes und des Schaltschranks (siehe Abb. 5) wurde von der Fa. WE3 aus Bentwisch nahe Rostock nichtsdestotrotz am 04.09.2012 durchgeführt.

Am 15.11.2012 konnten der Einbau und die erste Inbetriebnahme der Pumpe fortgesetzt werden. Der Zulaufschieber zur Pumpstation Prerow wurde geschlossen, sodass der Bypass das Abwasser an der Pumpstation vorbei zur Kläranlage Wieck leitete. Nachdem der Pumpensumpf geleert wurde, konnte der Einbau der Pumpenelemente von Anlagentechnikern der Fa. WILO SE beginnen. Das vorhandene Druckrohr wurde abgelenkt, damit eine neue Verbindung



Abb. 6: Inbetriebnahme der Pumpe FA 15.66 am 15.11.2012

zwischen dem Druckrohr und dem Druckstutzen der Pumpe geschaffen werden konnte. Ein Stahlfuß wurde angefertigt, um die vorhandenen Bohrungen im Pumpensumpf zu nutzen. Dadurch mussten keine neuen Löcher in die Innenverkleidung der Pumpenvorlage gebohrt werden. Auf diesen Stahlfuß konnte der zur Pumpe FA 15.66E dazugehörige Pumpenfuß montiert werden (siehe Abb. 6). Dies ermöglichte auch die Verwendung der zur Pumpe passenden Kupplungsklaue.

Nachdem die Pumpe von der Fa. WE3 an den Frequenzumformer angeschlossen wurde, erfolgte die Inbetriebnahme der Pumpe (siehe Abb.7). Zudem wurde ein PC mit passenden Schnittstellenkarten und der Software Matlab der Fa. The Mathworks aufgestellt. Die Software ermöglicht neben der Aufnahme der Messdaten auch die Berechnung der optimalen Steuerung und die direkte Ansteuerung des Frequenzumrichters. Dies wurde zuvor durch einen Modellaufbau (siehe Abb. 8) an der Universität Rostock erfolgreich getestet. Dazu wurde an einen Motor mit einer Nennleistung von 0,3 kW ein passender Frequenzumrichter angeschlossen. Dieser wurde über eine serielle Schnittstelle mit dem PC verbunden. Die Kommunikation erfolgte mit Hilfe der Software Matlab, die auf dem PC installiert war, über das Protokoll



Abb. 7: Pumpenfuß montiert auf Stahlfuß

Nachdem die Pumpe von der Fa. WE3 an den Frequenzumformer angeschlossen wurde, erfolgte die Inbetriebnahme der Pumpe (siehe Abb.7). Zudem wurde ein

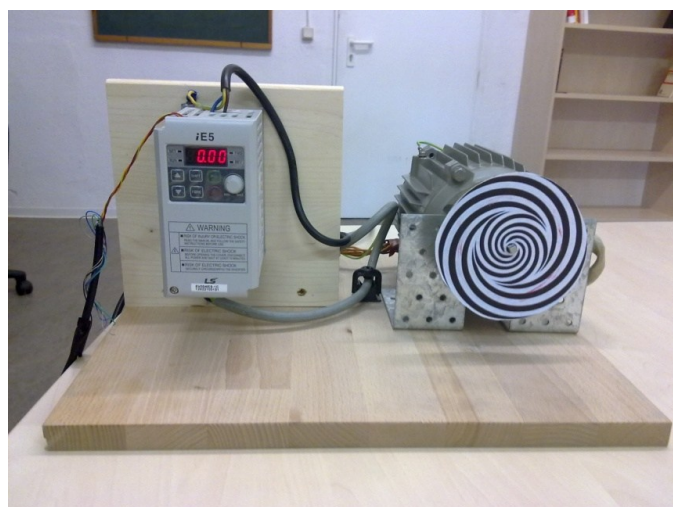


Abb. 8: Modellaufbau zum Test der Steuerung eines Frequenzumformers an der Universität Rostock

Modbus RTU. Dies ermöglicht das Starten, Stoppen und Einstellen aller nötigen Parameter des Frequenzumrichters auf Basis der berechneten optimalen Steuerung. Durch die Installation eines Mobilfunkrouters in Prerow kann vom Arbeitsplatz in Rostock auf die Steuereinheit in Prerow zugegriffen werden und erhobene Messdaten können auf den PC am Arbeitsplatz, sowie überarbeitete Steuerstrategien auf die Steuereinheit übertragen werden. Zur sicheren Übertragung aller Daten wurde ein VPN (Virtual Private Network) eingerichtet.

Am 06.12.2012 sollte die endgültige Inbetriebnahme der Pumpe mit Steuerung über den Frequenzumformer erfolgen. Die Umprogrammierung der vorhandenen SPS erfolgte, um die neue Steuereinheit in das aktuelle System zu integrieren und die direkte Übertragung der Messdaten von der SPS an die Steuereinheit zu ermöglichen. Außerdem wurde ein Last- und Störfallmanagement integriert. Kontrollsignale der Steuereinheit sowie eine Kontrolle der Prozessdaten der SPS teilen mit, wann ein Störfall eintritt (z.B. Pegelstand in der Pumpenvorlage zu hoch oder zu niedrig), sodass Gegenmaßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit eingeleitet werden können. Dazu findet ein ständiger Datenaustausch zwischen dem PC und der SPS statt. Werden nicht in regelmäßigen Abständen Daten vom PC an die SPS gesendet, so nimmt die SPS eine Störung des PCs an und das Abwasser wird mit den Bestandspumpen gefördert. Der PC kann auch selbstständig eine Störung melden, wenn z.B. der Frequenzumrichter nicht betriebsbereit ist. Dies wird ständig überprüft. Liegt hingegen keine Störung vor, sendet der PC eine Anfrage an die SPS, wenn die Pumpe angeschaltet werden soll. Sobald die Freigabe der SPS eintritt, sendet der PC das Signal zum Starten des Frequenzumrichters und Setzen der Frequenz. Der PC kann dem Umrichter im Anschluss jederzeit das Signal zum Stoppen senden. Liegt hingegen eine Störung vor, sodass der PC kein Signal sendet und ein Minimalpegel unterschritten wird, so übernimmt die SPS das Abschalten der Pumpe.

Die Inbetriebnahme der Steuerung musste jedoch auch an diesem Tag wieder abgebrochen werden, da die bestehende Schaltschrankanlage erhebliche Mängel an den vorhandenen Kabeln aufwies, sodass es mehrfach zu Störungen im Stromkreislauf kam.

Im Januar erneuerte die Fa. WE3 alle im Schaltschrank vorhandenen Kabel, sodass die Steuerung am 13.02.2013 erstmals komplett getestet werden konnte. Seitdem wird das anfallende Schmutzwasser über die Pumpe der Fa. WILO SE in Zweipunktsteuerung mittels Frequenzumformer gefördert. Darüber hinaus werden alle fünf Sekunden folgende Daten erhoben und gespeichert: Uhrzeit, Förderströme aller Pumpen, Drücke in beiden Leitungen und Wasserstand in der Pumpenvorlage. Zudem werden für die drehzahlregelbare Pumpe Leistung (Schein-, Wirk- und Blindleistung), Spannung, Strom, Frequenz und Drehzahl aufgezeichnet.

Die Fa. WILO SE finanzierte alle zur Umrüstung notwendigen Fremdleistungen (WE3 und Industry Soft) sowie die installierte Hardware. Dies schließt folgende Positionen ein: Pumpe, Frequenzumrichter, Sinusfilter, Energiezähler, PC (inkl. Matlab), Mobilfunkrouter und Mobilfunkvertrag.

3.3.2 Erste Tests der Drehzahlregelung

In einem ersten Test der Frequenzregelung wurde die Drehzahl um 10% reduziert. Statt der Zweipunktsteuerung bei einer Nenndrehzahl von 1450 U/min (wie am Vortag) wurde diese Strategie bei einer Drehzahl von 1305 U/min verfolgt. Die Ein- und Ausschaltpegel blieben unverändert. Diese hatte zwar geringere Förderströme zur Folge, jedoch konnte noch eine Fließgeschwindigkeit von mehr als 0,7 m/s realisiert werden, so dass sich das Risiko für die Bildung von Ablagerungen nicht wesentlich erhöht. Während am Vortag des Tests 325,98 m³/h bei einer Gesamtleistungsaufnahme von 26,51 kWh gefördert wurden, wurden am Folgetag bei reduzierter Drehzahl 338,36 m³/h bei einer Leistungsaufnahme von 25,43 kWh gefördert. Bei einem Vergleich der Leistungsaufnahme je gefördertem Kubikmeter Abwasser ergibt sich eine Energieeinsparung durch Verminderung der Drehzahl um lediglich 10 % von bereits 7,6%. Bei einer größeren Senkung der Drehzahl und einer intelligenten Steuerstrategie sind deutlich größere Einsparungen zu erwarten.

4. Analyse historischer Daten

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt ist bereits Messtechnik im HPW Prerow vorhanden, die für eine Auswertung die notwendigen Daten liefert. Die Pegelsonde misst die Wasserstände in der Pumpenvorlage, die induktiven Durchflussmessgeräte ermitteln den Durchfluss in den Druckrohrleitungen noch bevor eine Gabelung in die Grund- und die Vollastleitung stattfindet und die Drucksonden erfassen den Druck jeweils in der DN 400 und DN 250.

Die SPS des HPW Prerow erfasst alle 10 Sekunden die Werte der 5 Messgeräte. Die Daten werden in einem Umlaufarchiv gespeichert, d.h. sie werden für ca. 1 Jahr archiviert und dann überschrieben. So war es möglich einen Datensatz vom 24.04.2011 bis 26.05.2012 auszuwerten.

4.1 Jahresganglinie

Zur Erstellung der Jahresganglinie des täglichen Schmutzwasseranfalls an der Pumpstation Prerow wurde der Zufluss zur Pumpstation ermittelt. Dieser wurde ermittelt mit:

$$Q_{in} = \Delta V + Q_{out}$$

- Q_{in} - Input HPW Prerow je Zeitintervall $\Delta t = 10s$
- ΔV - Volumenänderung in der Pumpenvorlage je Zeitintervall $\Delta t = 10s$
- Q_{out} - Fördermenge der Pumpe(n) je Zeitintervall $\Delta t = 10s$

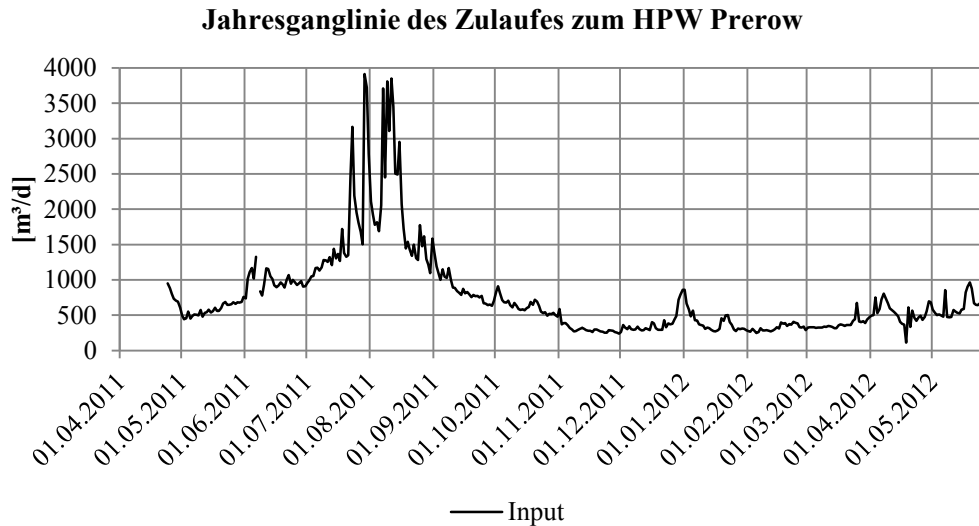


Abb. 9: Jahresganglinie des Schmutzwasseranfalls am HPW Prerow ohne Ausreißer am 07.06.2011

Das Diagramm lässt die Ferienzeiten in Deutschland gut erkennen. In diesen Zeiten ist der Anteil an Touristen in Prerow deutlich höher als in der Nebensaison. Dies betrifft vor allem die Sommer-, Weihnachts-, Oster- und Pfingstferien. In den Sommermonaten ist der Schmutzwasseranfall mit bis zu 3800 m³/d fast 10-mal so hoch wie in der Nebensaison in den Monaten November, Januar und Februar. Das stellt eine besondere Herausforderung an den Pumpenbetrieb dar.

Der Messwert des 07.06.2011 wurde als Ausreißer angesehen und im Vorfeld aussortiert. Dieser zeigte einen extrem hohen Schmutzwasseranfall auf. Die Ursache dafür liegt in einem Fehler in der Datenbank. Der Durchfluss dieses Tages ist dreimal höher als an den benachbarten Tagen. Dieser Sachverhalt ist auch nicht durch einen bestimmten Wochen- oder Feiertag oder ein besonderes Fest in Prerow zu erklären.

4.2 Einfluss von Niederschlag

In einer Druckentwässerung wird das Schmutzwasser getrennt vom Niederschlagswasser transportiert. Auf dem Darß ist die Druckentwässerung lediglich für den Schmutzwassertransport dimensioniert. Anfallendes Niederschlagswasser soll vor Ort versickert werden. Jedoch ist auch bei einem Trennsystem ein Fremdanschluss oder ein Eindringen von Niederschlagswasser in die Druckrohrleitungen nicht auszuschließen.

Aufgrund der starken Regenereignisse im Jahr 2011 war es sinnvoll zu überprüfen, ob der Niederschlag sich auf das Abflussgeschehen auf dem Darß ausgewirkt haben könnte. Bereits [Doh04] bemerkte, dass die Anwohner in Prerow das Niederschlagswasser zum Teil direkt in die Pumpenschächte einleiteten.

In Abb. 10 sind die Jahresganglinie und die täglichen Niederschläge dargestellt. Optisch besteht ein gewisser Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und dem Schmutzwasseranfall an einem Tag. Die Niederschlagsdaten wurden von Herrn Thomas Meyer aus Prerow zur Verfügung gestellt. Die Daten werden im 2-Minuten Intervall

aufgezeichnet. Die Station befindet sich bei den Koordinaten 54° 27' N und 12° 34' E [Dar13].

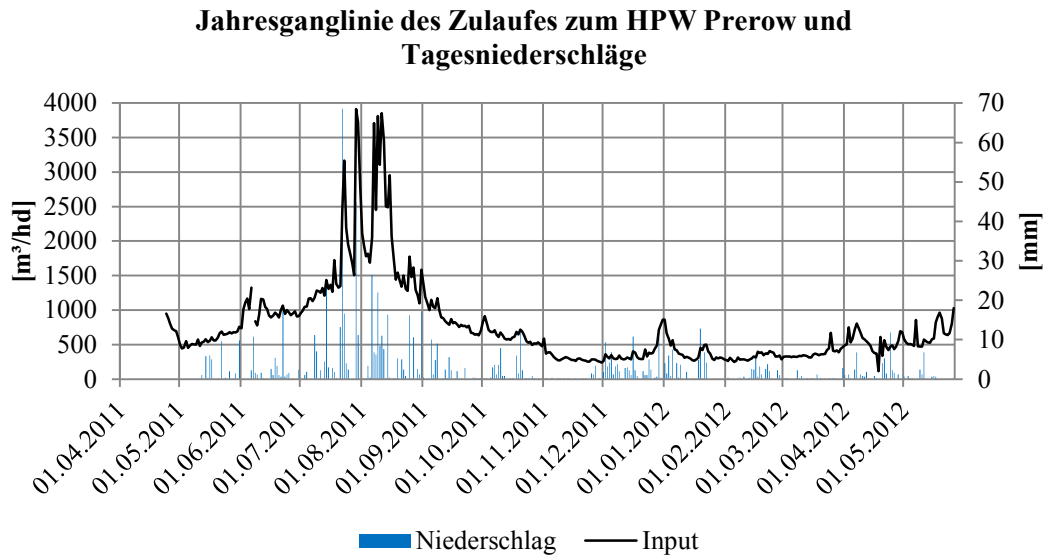


Abb. 10: Jahresganglinie des Schmutzwasseranfalls am HPW Prerow und Tagesniederschläge der Wetterstation Prerow

Um den Zusammenhang zwischen dem Schmutzwasseranfall am HPW Prerow und den Niederschlagsereignissen wissenschaftlich zu überprüfen, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Dazu wurden der Tagesdurchfluss und der Tagesniederschlag miteinander verglichen. Die Korrelationsanalyse ergab einen Koeffizienten von $r = 0,5$. Dies ist ein mittlerer Zusammenhang, der auch durch einen Hypothesentest bestätigt wurde. Somit war nicht auszuschließen, dass der Niederschlag einen Einfluss auf die Zulaufganglinien hat.

In einem Gespräch mit dem Planer des Entwässerungssystems auf dem Darß, Herrn Dr. Karl-Friedrich Ortmann, wurde der Einfluss des Niederschlags bestätigt. Die Starkniederschläge aus dem Jahr 2011 wurden gezielt über das Druckentwässerungssystem abgeleitet. Westlich der Ortslage Prerow befindet sich der Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft. Der Boden des Nationalparks weist eine hohe Sättigung von Wasser auf. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Grabensysteme aufgrund von Umweltschutzauflagen erst ab dem 15. Juli bewirtschaftet werden dürfen. Deshalb sind diese im Hochsommer stark verkrautet [Mec12]. Dadurch verursachen Starkniederschläge, wie in 2011, einen Oberflächenabfluss, der nicht mehr von dem vorhandenen Grabensystem des Nationalparks abgeleitet werden kann, sondern die Ortslage Prerow überschwemmt.

Derzeit werden Maßnahmen entwickelt, wie zukünftige Starkniederschläge südlich von Prerow abgeleitet werden sollen. Jedoch wird die Analyse der Daten auch weiterhin mit dem Einfluss des Niederschlages durchgeführt, da die Maßnahmen eventuell erst nach dem Ende des Projektes (2014) umgesetzt werden.

4.3 Tagesganglinien

Die Betrachtung der Tagesganglinien ist ein sehr wichtiger Bestandteil für die Ermittlung einer optimalen Förderstrategie. Es ist von großer Bedeutung, dass die Ganglinien reproduzierbar sind und somit für Zulaufprognosen genutzt werden können.

Beispielhaft seien hier zwei Diagramme aufgezeigt, die die Verläufe der Tagesganglinien jeweils in einem Monat darstellen (Abb. 11 und 12).

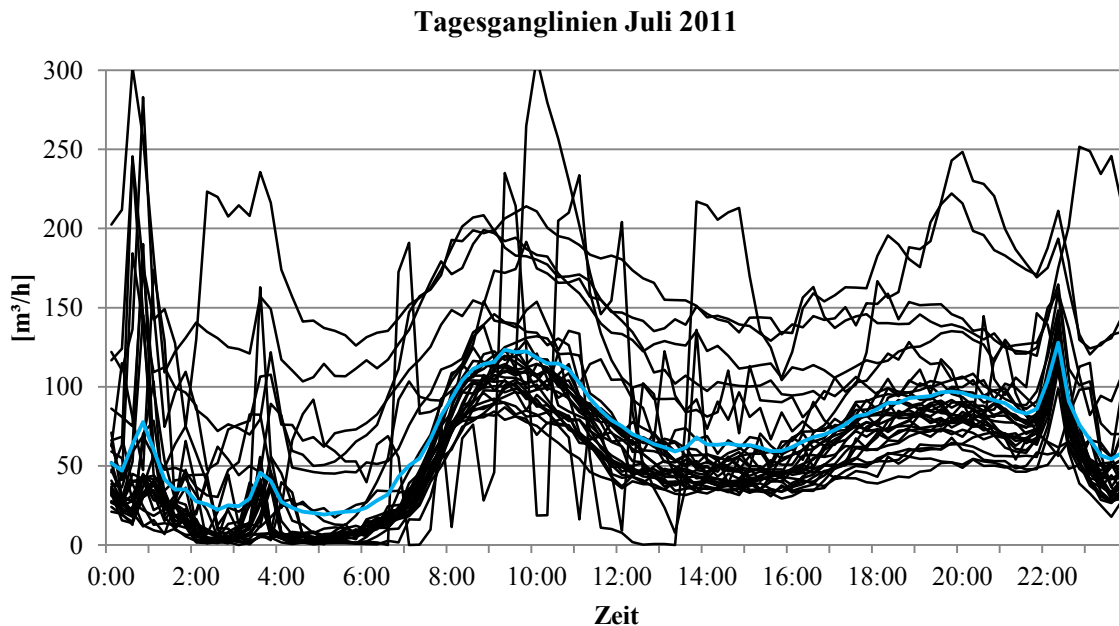


Abb. 11: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Juli 2011 an der Pumpstation Prerow; viertelstündlich gemittelte Werte mit Mittelwert (blau)

Im Juli 2011 schwankte der Zufluss des Abwassers zur Pumpstation an den verschiedenen Tagen sehr stark. Der Großteil der Ganglinien verläuft in der Nähe der blau dargestellten Ganglinie des Mittelwertes. Jedoch sind mehrere Ausreißer bzw. Spitzenwerte zu erkennen, die den Mittelwert stark übersteigen. Zusammenhänge mit diesen Ausreißern lassen sich durch die Abb. 14 herstellen.

Anders verhält es sich mit den Ganglinien des Oktobers 2011.

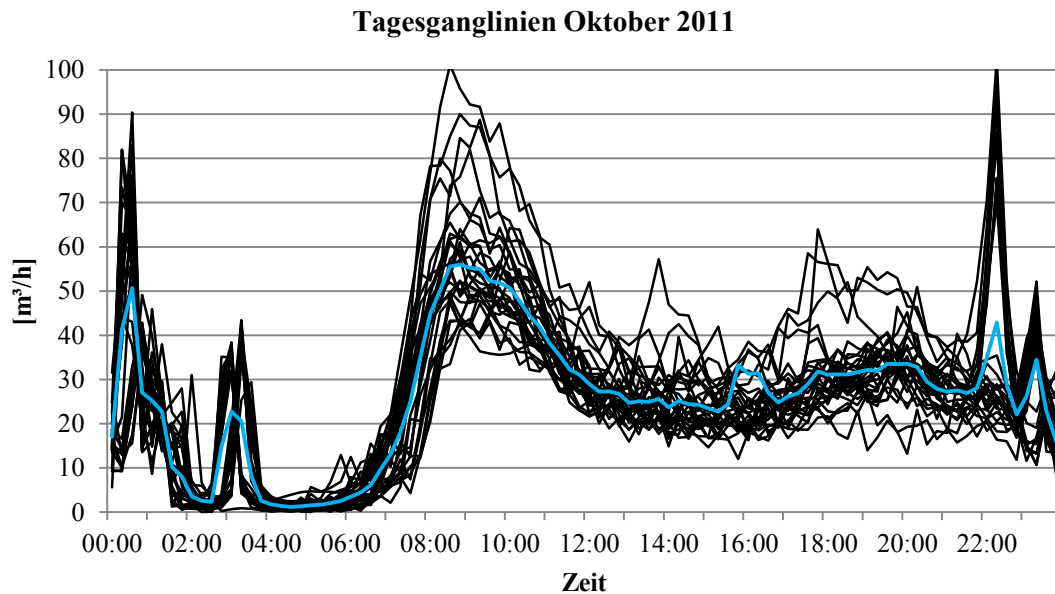


Abb. 12: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Oktober 2011 am HPW Prerow; viertelstündlich gemittelte Werte mit Mittelwert (blau); Ausreißer 24.10.2011 bereits im Vorfeld aussortiert

Ein Ausreißer (24.10.2011) wurde bereits im Vorfeld eliminiert, da dieser durch eventuelle Messfehler oder eine nicht nachzuvollziehende Pumpensteuerung zustande kam. Die Ganglinien des Oktobers schwanken deutlich weniger um den Mittelwert als im Monat Juli.

Die Spitzen des Schmutzwasserzulaufes zum HPW Prerow, die nachts zu verzeichnen sind, resultieren aus der pneumatischen Spülung des Entwässerungsnetzes in Prerow. Diese Druckluftspülung wird einmal täglich nachts in allen Abschnitten des Netzes durchgeführt [Doh04]. Auch werden Druckleitungen, die durch saisonale Schwankungen Stillstandzeiten in der Abwasserförderung haben nach Bedarf durch Druckluftspülungen teilentleert oder entleert. Dadurch wird ein Anfaulen des Abwassers verhindert [Jun96] Das Schmutzwasser wird dabei zum HPW Prerow befördert, wodurch die Pumpen auch in den Nachtstunden fördern.

Durch die Betrachtung der Spannweiten (Differenz zwischen Maximal- und Minimalzufluss jeder Viertelstunde) werden die Unterschiede des Zulaufes zur Pumpstation in der Haupt- und Nebensaison sehr deutlich. Während in der Nebensaison mit Schwankungen bis ca. 60 m³/h zu rechnen ist, sind die Schwankungen in der Hauptsaison sehr viel höher, zum Teil bis 220 m³/h. In der folgenden Tabelle sind die Spannweiten pro Stunde für die Monate Juli und Oktober 2011 dargestellt.

Tab. 2: Spannweiten der Monate Juli und Oktober 2011 pro Stunde; größte Spannweiten umrahmt

Uhrzeit	Spannweite Juli [m ³ /h]	Spannweite Okt. [m ³ /h]	Uhrzeit	Spannweite Juli [m ³ /h]	Spannweite Okt. [m ³ /h]
0:00-0:59	220,36	27,00	12:00-12:59	169,48	21,57
1:00-1:59	124,82	17,70	13:00-13:59	120,73	26,31
2:00-2:59	192,96	9,71	14:00-14:59	176,69	25,67
3:00-3:59	215,32	18,52	15:00-15:59	108,51	19,80
4:00-4:59	152,29	3,33	16:00-16:59	114,68	20,41
5:00-5:59	131,54	6,01	17:00-17:59	119,50	32,08
6:00-6:59	134,62	9,83	18:00-18:59	145,79	33,30
7:00-7:59	139,33	34,17	19:00-19:59	160,20	36,35
8:00-8:59	155,29	59,44	20:00-20:59	181,04	26,06
9:00-9:59	126,56	52,03	21:00-21:59	135,54	23,24
10:00-10:59	201,46	34,56	22:00-22:59	138,93	46,93
11:00-11:59	138,05	24,85	23:00-23:59	210,13	18,83

Die maximalen Spannweiten der beiden Monate sind eingerahmt. Dabei wurden die Nachtstunden bewusst außen vor gelassen, da die Schwankungen dort aufgrund von Spülvorgängen zustande kommen.

Da in einem vorherigen Abschnitt der Niederschlag als Einflussgröße für die Zulaufganglinien genannt wurde, sei im Folgenden beispielhaft für den Juli 2011 das Diagramm der Tagesganglinien erneut dargestellt. Es wurden die Ganglinien der Tage, an denen mehr als 9 mm Niederschlag gemessen wurde, gestrichelt dargestellt.

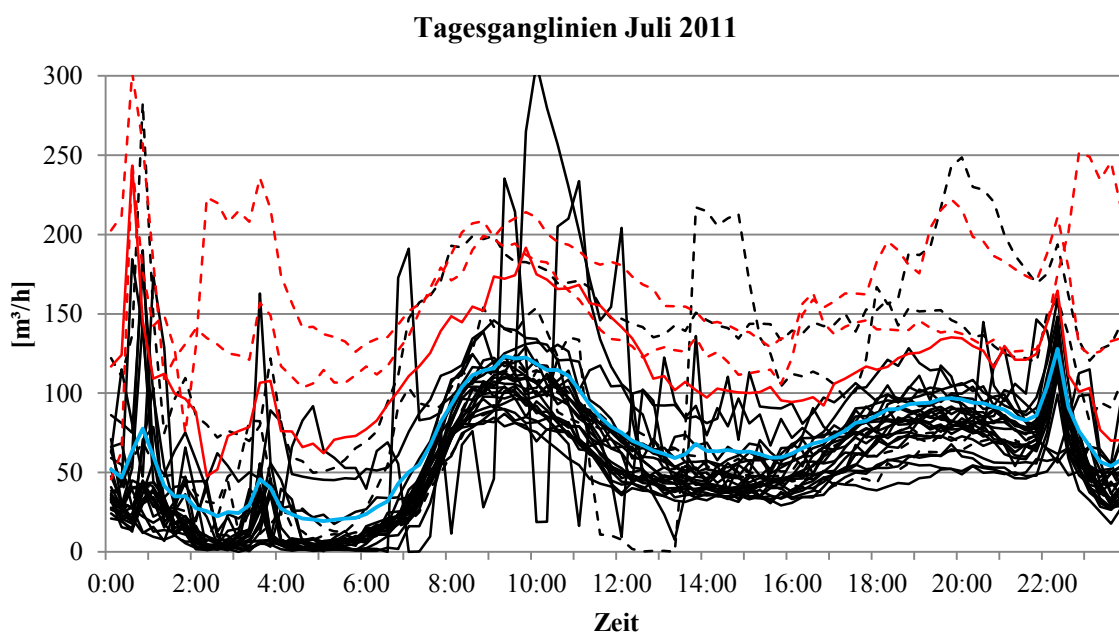


Abb. 13: Tagesganglinien des Schmutzwasseranfalls im Juli 2011 am HPW Prerow, viertelstündlich gemittelte Werte mit Tagen mit mehr als 9 mm Niederschlag (gestrichelte Linien) und Tagen mit Hafenfest (rote Linien)

Es ist ein optischer Zusammenhang zwischen den hohen Zulaufwerten und dem Niederschlagsgeschehen zu erkennen.

Außerdem fand am 29. und 30.07.2011 ein Hafenfest in Prerow statt. Die roten Linien stellen diese beiden Tage dar. Auch der 31.07.2011 wurde noch als Hafenfest markiert, da der Besucherstrom in Prerow auch an diesem Tag noch erhöht war. Diese drei Tage waren durch ein erhöhtes Schmutzwasseraufkommen an der Pumpstation Prerow geprägt.

In der folgenden Tabelle sind die Spannweiten des Julis und Oktobers erneut dargestellt. Jedoch sind hier die Tage mit einem Niederschlag über 9 mm und im Juli die Tage des Hafenfestes außen vor gelassen.

Tab. 3: Spannweiten der Monate Juli und Oktober 2011 pro Stunde ohne Tage mit Niederschlag über 9 mm und Hafenfest; größte Spannweiten umrahmt

Uhrzeit	Spannweite		Uhrzeit	Spannweite	
	Juli [m ³ /h]	Okt. [m ³ /h]		Juli [m ³ /h]	Okt. [m ³ /h]
0:00-0:59	134,26	26,15	12:00-12:59	89,15	21,57
1:00-1:59	93,04	17,70	13:00-13:59	72,24	26,31
2:00-2:59	62,98	9,71	14:00-14:59	66,43	25,67
3:00-3:59	88,92	18,52	15:00-15:59	67,54	19,80
4:00-4:59	70,46	3,33	16:00-16:59	60,08	20,41
5:00-5:59	68,27	5,07	17:00-17:59	69,32	32,08
6:00-6:59	87,07	9,83	18:00-18:59	78,20	33,30
7:00-7:59	101,34	34,17	19:00-19:59	81,28	36,35
8:00-8:59	104,19	59,44	20:00-20:59	76,02	26,06
9:00-9:59	97,23	52,03	21:00-21:59	76,24	23,24
10:00-10:59	201,46	34,56	22:00-22:59	76,49	46,93
11:00-11:59	122,42	24,85	23:00-23:59	56,55	18,83

Die größten Spannweiten sind äquivalent zu denen aus Tabelle 2. Auch verändern sich die Spannweiten im Oktober kaum. Jedoch ist eine deutliche Verkleinerung der Spannweiten im Juli im Tagesverlauf zu erkennen.

Werden also alle Tage, die durch Regenereignisse oder besonders viele Besucher gekennzeichnet waren, außen vor gelassen, so scheinen die Tagesganglinien reproduzierbar zu sein. Eine Erstellung von realistischen Zulaufprognosen ist deshalb möglich und kann bei der Ermittlung einer optimalen Förderstrategie mit Hilfe eines Frequenzumformers hilfreich sein.

Des Weiteren war von Interesse, die Tagesganglinien mit dem Niederschlag zu vergleichen. Hierzu wurden Tage ausgewählt, an denen mehr als 9 mm Niederschlag fielen. Die Ganglinien des Schmutzwasseranfalls wurden mit der Niederschlagsverteilung des Tages im zeitlichen Aspekt verglichen. Als Beispiel dienen im Folgenden die Tage 05.09.2011 und 19.01.2012.

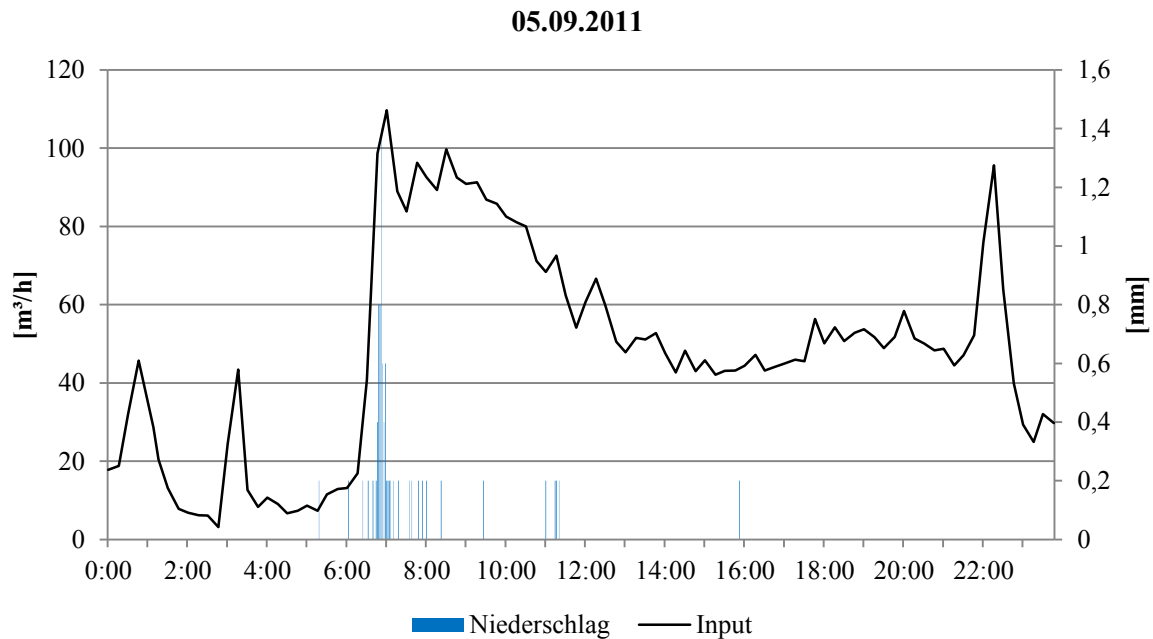


Abb. 14: Tagesganglinie des Schmutzwasseranfalls am 05.09.2011 am HPW Prerow, viertelstündlich gemittelte Werte, und Niederschlag, viertelstündlich summiert

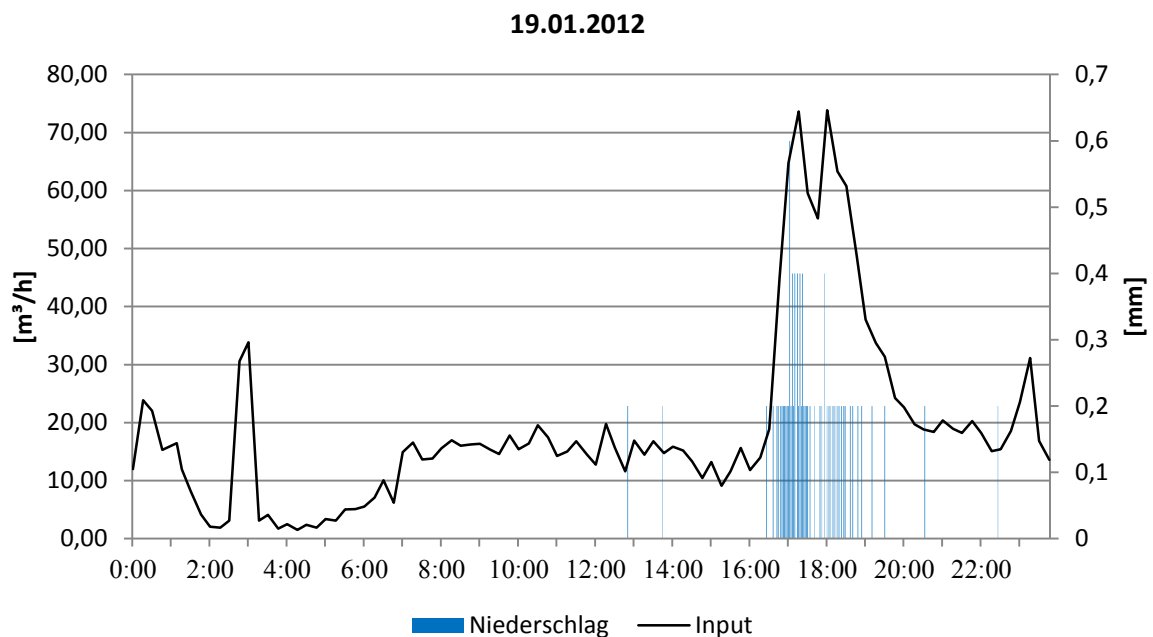


Abb. 15: Tagesganglinie des Schmutzwasseranfalls am 19.01.2011 am HPW Prerow, viertelstündlich gemittelte Werte, und Niederschlag, viertelstündlich summiert

Anhand beider Diagramme ist zu erkennen, dass kaum eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Niederschlagsgeschehen und dem erhöhten Zulauf zum HPW Prerow zu verzeichnen ist. Daher ist es für die weitere Arbeit am HPW Prerow von großer Bedeutung die Zulaufprognosen mit den Vorhersagen für das Niederschlagsgeschehen zu verbinden.

4.4 Zulaufprognosen

Zulaufprognosen können durch Betrachtung von drei Bedingungen erstellt werden:

Bedingung 1:

Für den Fall, dass im Einzugsgebiet innerhalb des letzten Jahres keine gravierenden Maßnahmen vorgenommen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Zulaufganglinie für den aktuellen Zeitpunkt und die Ganglinie des gleichen Tages des vergangenen Jahres, verschoben um ein oder zwei Tage (je nach Schaltjahr), ähneln. Es ist notwendig den Tag zu verschieben, damit nicht das Datum, sondern der Wochentag jeweils zueinander passt. Die Zulaufganglinie des vergangenen Jahres kann also in die Zulaufprognose einfließen.

Bedingung 2:

Analog zur Vorjahresganglinie fließt die Vortagesganglinie in die Berechnung der Zuflussprognose ein.

Bedingung 3:

Des Weiteren können die Zuläufe jedes Tages über die aktuelle Uhrzeit betrachtet werden. Beispielhaft sei dies für den Monat Juli 2011 und die Uhrzeiten 12 Uhr, 12:15 Uhr, 12:30 Uhr und 12:45 Uhr dargestellt.

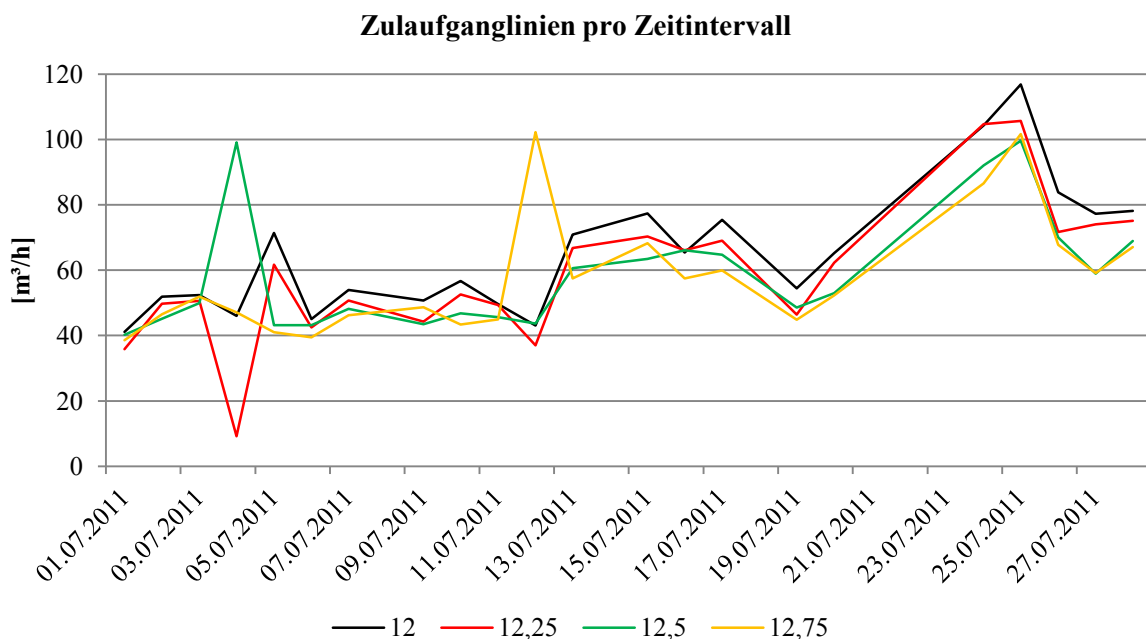


Abb. 16: Darstellung des Zulaufes zum HPW Prerow im Monat Juli 2011 pro Zeitintervall (12 Uhr, 12.15 Uhr, 12.30 Uhr, 12.45 Uhr)

So ist in dem Diagramm zu erkennen, dass die Ganglinien einem gewissen Trend folgen. Zu Ende Juli steigen die gemessenen Zuläufe bis auf einige Ausnahmen. Dadurch ist zu erwarten, dass der erwartete Zulauf des aktuellen Tages, ein wenig höher sein wird als der Zulauf des

vorherigen Tages. Da sich der Trend ständig ändern kann (insbesondere zu Beginn und am Ende der Hauptsaison), muss dieser für jeden Tag, an dem eine Zulaufprognose benötigt wird, neu bestimmt werden. Dabei stellte sich heraus, dass ein Trend auf Basis der vergangenen vier Wochen am aussagekräftigsten war.

Eine Zulaufprognose kann nun berechnet werden, indem das gewichtete Mittel pro Zeitintervall aus den entsprechenden Ganglinien der Bedingungen 1, 2 und 3 gebildet wird.

Bedingung 4:

Die resultierende Ganglinie kann jedoch bezüglich des Gesamttageszuflusses von den vorherigen Tagen oder dem Vorjahreswert deutlich abweichen. In diesem Fall wird die Prognose so angepasst, dass die Werte übereinstimmen. Dazu wird der Zufluss für jedes Zeitintervall prozentual entsprechend angepasst.

Test der Zulaufprognose:

Da vom 24. April bis 26. Mai sowohl von 2011 als auch von 2012 Daten vorhanden sind, kann ein Test der vorher genannten Bedingungen zur Erstellung von Zulaufprognosen mit zwei Tagen im Mai 2012 getestet und mit real gemessenen Daten des Tages verglichen werden.

Als Beispiel sollen Zulaufprognosen für Freitag den 04.05.2012 und Samstag den 26.05.2012 erstellt werden:

- Bedingung 1: Die Zulaufganglinien ähneln jeweils den Zulaufganglinien vom Freitag den 06.05.2011 bzw. Samstag den 28.05.2011.
- Bedingung 2: Die Zulaufganglinien ähneln jeweils den Zulaufganglinien vom Donnerstag den 03.05.2012 bzw. Freitag den 25.05.2012.
- Bedingung 3: Die Zuläufe pro 15 min Zeitintervall entsprechen dem extrapolierten Wert des ermittelten Trends der vergangenen 30 Tage.
- Das aus den Bedingungen 1, 2 und 3 bestimmte gewichtete Mittel wird so angepasst, dass der Gesamttageszulauf mit einem gewichteten Mittelwert aus Vortages- und Vorjahreswert übereinstimmt.

Um zu überprüfen, ob der erwartete berechnete Zulauf mit dem realen Zulauf übereinstimmt wurden die beiden Ganglinien in den folgenden Diagrammen gegenübergestellt.

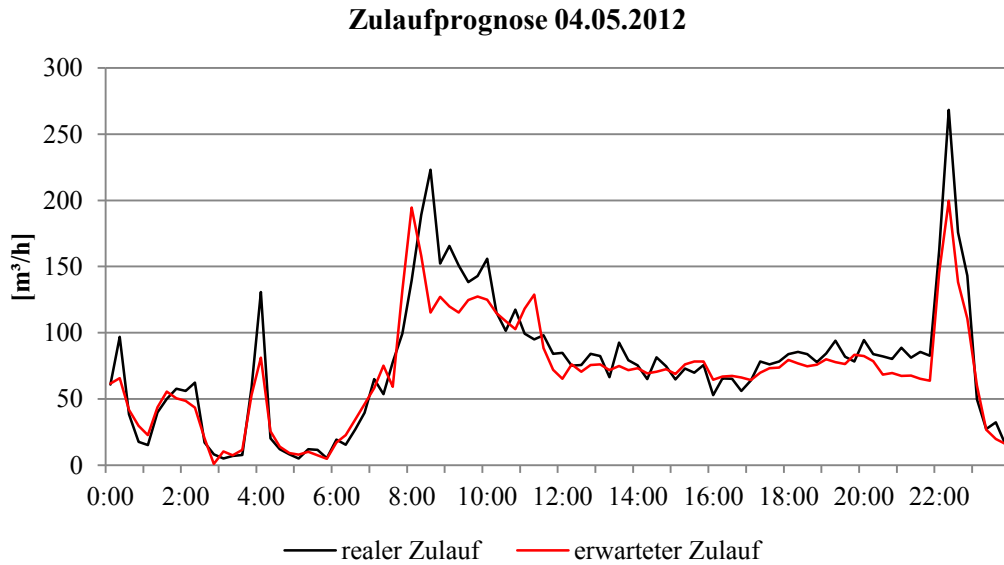


Abb. 17: Zulaufprognose für den 04.05.2012, ermittelt aus dem gewichteten Mittel des Trend des vergangenen Monats und dem gleichen Tag (Wochentag) im vergangenen Jahr, und realer Zufluss des gleichen Tages

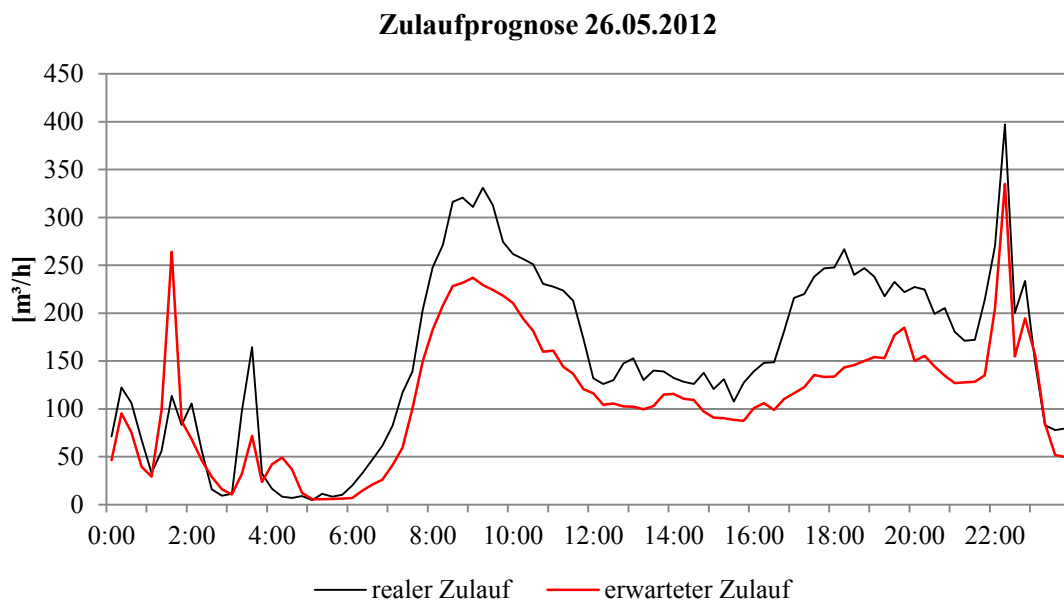


Abb. 18: Zulaufprognose für den 26.05.2012, ermittelt aus dem gewichteten Mittel des Trend des vergangenen Monats und dem gleichen Tag (Wochentag) im vergangenen Jahr, und realer Zufluss des gleichen Tages

Die realen Zulaufganglinien ähneln stark den Verläufen der prognostizierten Zulaufganglinien. Jedoch ist anhand der Prognose für den 26.05.2012 zu erkennen, dass der reale Zulauf zu bestimmten Tageszeiten auch von der Prognose deutlich abweichen kann.

4.5 Betrieb der Pumpen und Rohrleitungen

4.5.1 Betriebszustände

Zur Veranschaulichung der Betriebsbedingungen des Systems wurden 9 Fälle definiert, wie die Pumpen auf die Rohrleitungen gefördert haben können. Durch den Aufbau des Rohrleitungssystems und der Messtechnik im HPW Prerow lässt sich eindeutig bestimmen, welche Pumpe und welche Leitung in Betrieb waren. So geben die Durchflussmessgeräte Auskunft über die fördernde Pumpe (IDM1 = Pumpe 1, IDM2 = Pumpe 2). Die Drucksensoren beschreiben, auf welche Leitung die jeweilige Pumpe förderte (DM1 = DN 400, DM2 = DN 250)

Tab. 4: Betriebszustände der Pumpen und Druckrohrleitungen; Summe der Betriebsstunden im gesamten Messzeitraum

Fall	IDM 1 [m ³ /h]	IDM 2 [m ³ /h]	DM 1 [bar]	DM 2 [bar]	Wortlaut	Betriebsstunden (24.04.11-26.05.12) [h]
1	>0	0	>1	<1	Pumpe 1 auf DN 400	791,8
2	>0	0	<1	>1	Pumpe 1 auf DN 250	15,6
3	0	>0	>1	<1	Pumpe 2 auf DN 400	306,7
4	0	>0	<1	>1	Pumpe 2 auf DN 250	5,1
5	>0	0	>1	>1	Pumpe 1 auf DN 400 und DN 250	39,8
6	0	>0	>1	>1	Pumpe 2 auf DN 400 und DN 250	38,4
7	>0	>0	>1	<1	Pumpe 1 und 2 auf DN 400	16
8	>0	>0	<1	>1	Pumpe 1 und 2 auf DN 250	0,1
9	>0	>0	>1	>1	Pumpe 1 und 2 auf DN 400 und DN 250	3,7

Leitung 1 stellt dabei die Druckrohrleitung DN 400 dar, wohingegen Leitung 2 DN 250 ist.

In der Tab. 4 wird deutlich, dass im Normalbetrieb (Fälle 1 und 3) die Pumpe 1 mehr als doppelt so häufig auf die Leitung DN 400 förderte, als die Pumpe 2.

Im folgenden Diagramm sind die Dauern der 9 zuvor genannten Fälle (Betriebszustände) zu erkennen. Dabei sind die Betriebsstunden pro Monat zusammen gefasst. Aufgrund der Kürze der Daten im April 2011 und Mai 2012 wurden diese beiden Monate außer Acht gelassen.

Dauer der Betriebszustände pro Monat

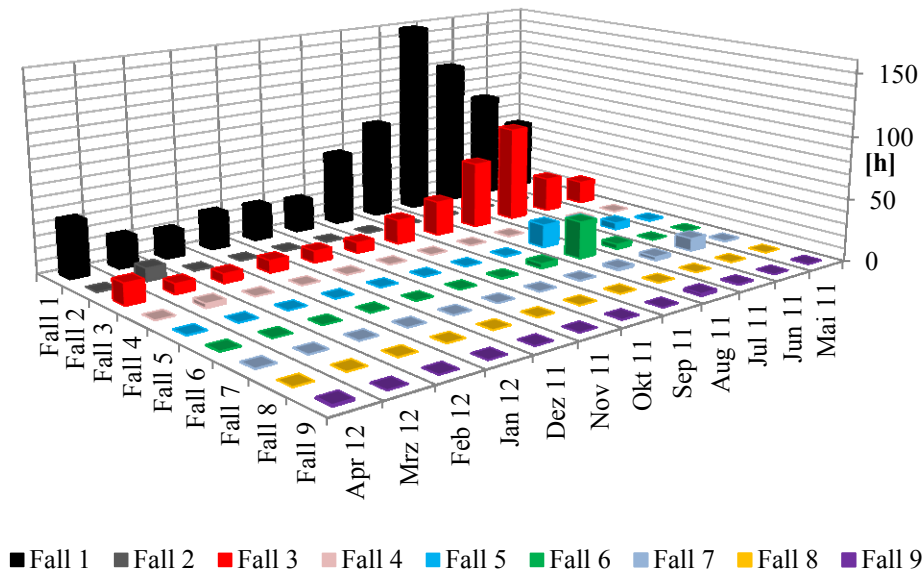


Abb. 19: Dauer der Betriebszustände der 9 definierten Fälle pro Monat

Normalerweise sollten die Balkenhöhen für den Fall 1 und Fall 3 nahezu identisch sein, da es die Förderung der Pumpen (einzeln) auf die Grundlastleitung darstellt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das zeigt wiederum, dass die Pumpe 1 deutlich häufiger betrieben wurde als die Pumpe 2. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Fälle 5 und 6 in den Monaten Juni 2011 August 2011 vermehrt auftraten.

4.5.2 Förderhöhen und -drücke

Von großem Interesse war das Verhalten von Förderstrom und Förderdruck. In den folgenden Diagrammen sind die beiden Normalbetriebe (Fälle 1 und 3 der Tabelle 4) aufgezeigt.

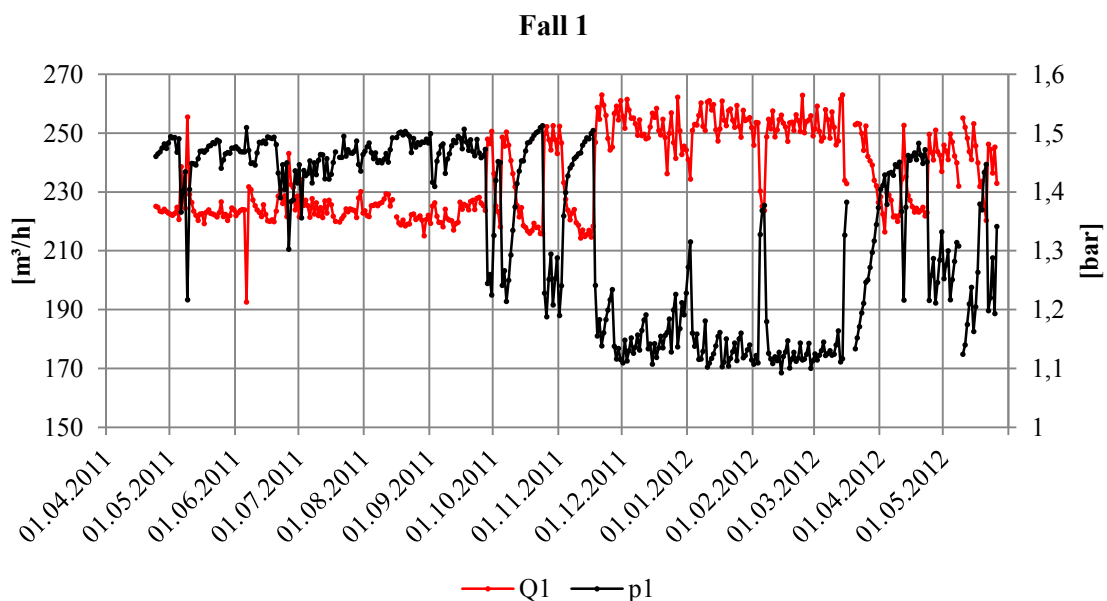


Abb. 20: Täglich gemittelte Werte der Förderleistung der Pumpe 1 und des Druckes in der Leitung DN 400

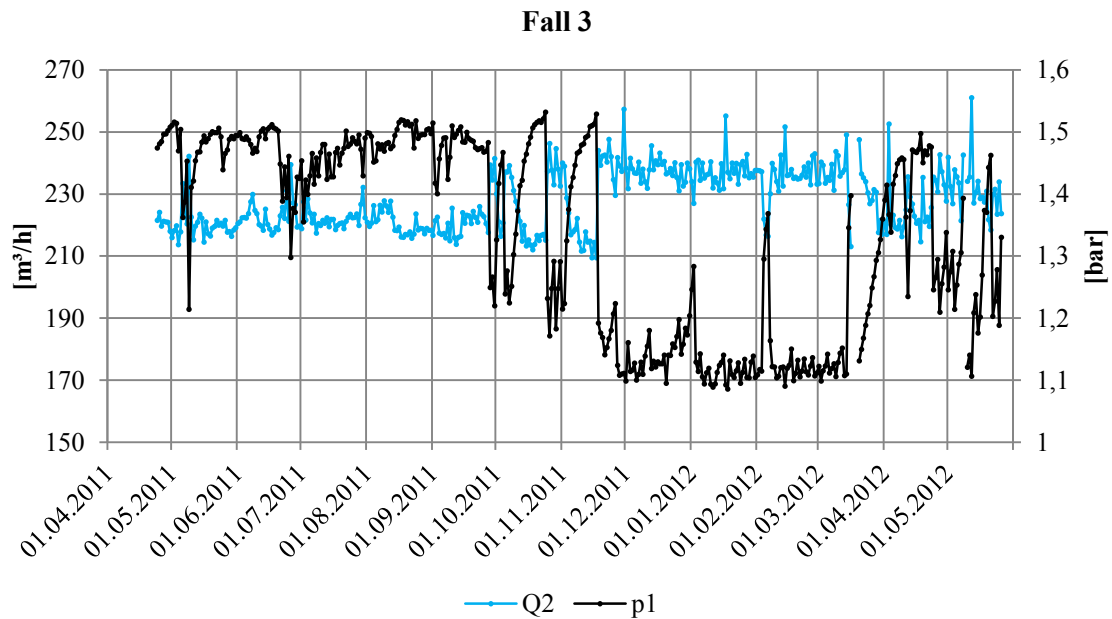


Abb. 21: Täglich gemittelte Werte der Förderleistung der Pumpe 2 und des Druckes in der Leitung DN 400

Auffällig ist, dass bei geringen Förderströmen ($Q \approx 220 \text{ m}^3/\text{h}$) ein höherer Druck ($p \approx 1,5 \text{ bar}$) vorhanden ist, als bei höheren Förderströmen ($Q \approx 250 \text{ m}^3/\text{h}$ und $p \approx 1,15 \text{ bar}$). Dies ist durchaus plausibel, da die Förderleistung einer Kreiselpumpe vom Druck in der Leitung bestimmt wird [Bau98].

Die Förderleistungen und dazugehörigen Drücke in den Wintermonaten (Dezember 2011 bis März 2012) sind den berechneten Zuständen der Anlagenkennlinie (Kapitel 3.2., siehe Abb. 4) ähnlich, erreichen jedoch keine vollständige Übereinstimmung.

4.5.3 Ein- und Ausschaltpegel in der Pumpenvorlage

Die bestehenden Pumpen wurden in Zweipunktregelung gesteuert. D.h. sie beginnen die Förderung bei einem definierten Maximalwasserstand (Einschaltpegel) und beenden sie bei einem Minimalwasserstand (Ausschaltpegel).

Folgende Verteilung ließ sich im Beobachtungszeitraum erfassen:

Tab. 5: Ein- und Ausschaltpegel der Pumpen im HPW Prerow über den Beobachtungszeitraum

Zeitraum	Maximalwasserstand [m]	Zeitraum	Minimalwasserstand [m]
24.04.2011- 17.11.2011	0,65	24.04.2011- 14.06.2011	0,22
18.11.2011- 26.03.2012	0,55	15.06.2011- 26-05-2012	0,25
27.03.2012- 01.05.2012	0,65		
02.05.2012- 26.05.2012	0,55		

In den Wintermonaten, in denen in Prerow kaum Tourismus vorhanden ist, wurde der Einschaltpegel auf 0,55 m herunter gesetzt, damit das Schmutzwasser keine zu hohe Aufenthaltszeit in der Pumpenvorlage hat. Über die Osterfeiertage 2012 wurde der Einschaltpegel wieder auf 0,65 m erhöht, da hier mit einem erhöhten Besucherstrom zu rechnen war.

5. Optimierung der Pumpenbetriebsweise

Bislang werden die Pumpen im HPW Prerow abwechselnd in Zweipunktsteuerung betrieben. Dabei wird eine der beiden Pumpen angeschaltet, wenn der Pegel in der Pumpenvorlage einen zuvor definierten Maximalwasserstand erreicht. Im Anschluss fördert die Pumpe solange Abwasser bis ein festgelegter Minimalwasserstand angenommen wird. Die Pumpe wird dann abgeschaltet bis der Maximalpegel erneut erreicht wird. Um zu gewährleisten, dass beide Pumpen ständig betriebsbereit sind, werden die Pumpen nahezu abwechselnd betrieben. In Abb. 22 ist diese Steuerung für den 23.6.2011 dargestellt.

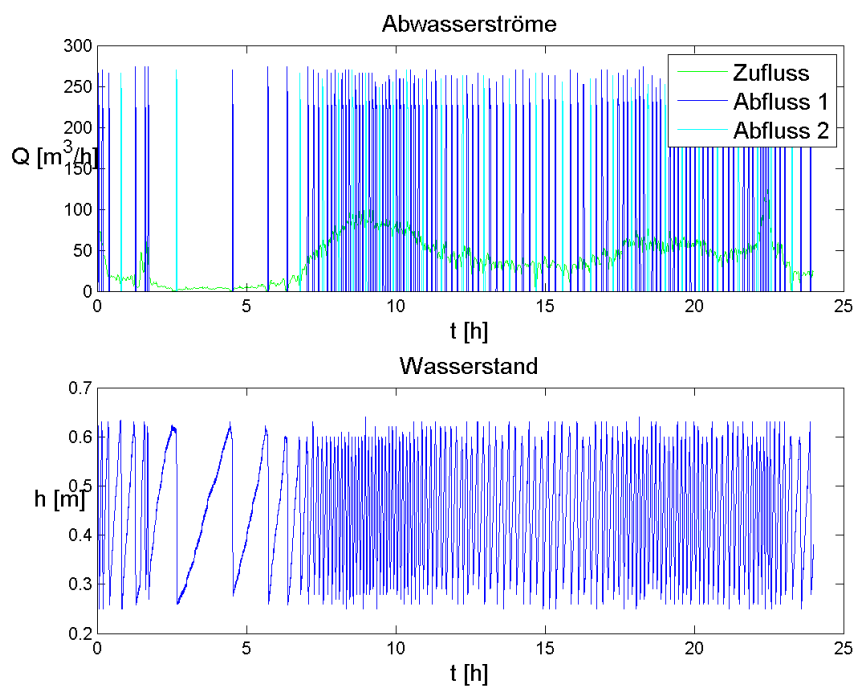


Abb. 22: Zweipunktsteuerung am 23.6.2011

Bei Realisierung der Zweipunktsteuerung können die Abwasserpumpen zwar mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden, jedoch ist dies mit hohen Reibungsverlusten verbunden, da der Pumpenbetrieb bei vollem Volumenstrom erfolgt. Dies verursacht sehr hohe Energiekosten. Zudem werden Pumpe, Motor und Stromnetz durch die häufigen Schaltvorgänge belastet, was den Verschleiß von Anlagenteilen erhöht. Durch Frequenzumrichter ist es möglich einen beachtlichen Anteil der Energiekosten durch Drehzahlregelung einzusparen. Aufgrund der Ähnlichkeitsgesetze

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

zwischen Förderstrom Q , Förderhöhe H , NPSH-Wert, Leistungsbedarf P und Drehzahl n ist die Drehzahländerung die verlustärmste Art der Anpassung des Förderstromes an die aktuellen Betriebsverhältnisse [Ste00]. Bei Reduzierung der Drehzahl um 20% lässt sich die Leistungsaufnahme unter Verwendung der Affinitätsgesetze theoretisch bereits auf fast 50% senken. Das enorme Einsparpotential wird auch durch die Berücksichtigung eines abnehmenden Pumpenwirkungsgrades bei reduzierender Drehzahl nicht wesentlich gemindert. Zudem wird die Pumpe sanfter gestartet und gestoppt, wodurch Druckstöße vermieden werden können und die Lebensdauer der Pumpe erhöht werden kann.

5.1 Optimierung eines typischen Anwendungsfalls

Um das Einsparpotential von drehzahlregelbaren Abwasserpumpen zu untersuchen, wurde ein in der Praxis häufig vorkommendes Szenario untersucht (siehe Abb. 23).

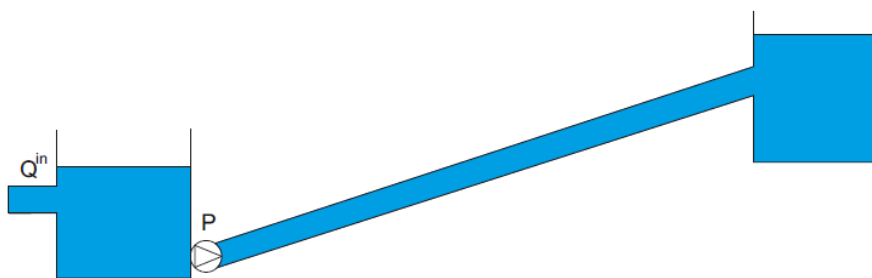


Abb. 23: Typisches Szenario

Einem Pumpensumpf wird dabei ständig Abwasser zugeführt während die drehzahlregelbare Pumpe das Abwasser über eine Druckleitung fördert. Dieses Szenario liegt auch in Prerow vor, lediglich mit dem Unterschied, dass die Druckleitung nicht in einen weiteren Pumpensumpf führt oder in eine Freigefälleleitung übergeht. In Prerow gelangt das Abwasser über die Druckleitung direkt in die Kläranlage. Unter Annahme der Kenntnis des Abwasserzulaufs soll dieses Szenario nun modelliert und ein Optimierungsproblem formuliert werden, dessen Ziel die Minimierung der Energiekosten unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen ist.

Gesucht wird also die optimale Steuerung über einen Zeitraum $[0, T]$. Es wird angenommen, dass die Zuflussmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten $0 =: t_0 < t_1 < \dots < t_m =: T$ vorliegen und auf den Intervallen $[t_{i-1}, t_i], i = 1, \dots, m$, der gleichen Länge Δt_i , konstant sind. Ziel ist es nun Förderströme Q^F für jedes Intervall zu bestimmen, die die Gesamtenergiekosten minimieren.

Zur Bestimmung der Energiekosten muss zunächst das Leistungskennfeld der gegebenen Pumpe definiert werden. Bei Nenndrehzahl n_0 werde die Leistungskennlinie durch eine Funktion $P_0(Q)$ beschrieben und wird vom Pumpenhersteller bereitgestellt. Kommt nun ein Frequenzumrichter zum Einsatz kann die Drehzahl n der Pumpe bis zu einer Mindestdrehzahl

n_{min} nach unten geregelt werden und die Pumpenleistung kann in Abhängigkeit vom Durchfluss Q und der Drehzahl n aufgrund der Affinitätsgesetze durch

$$P(Q, n) := \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_0\left(\frac{n_0}{n} Q\right)$$

angegeben werden. Mit dem Arbeitspreis p_i sowie den Wirkungsgraden für Frequenzumrichter η_{FU} , Motor η_M und Kupplung η_K fallen in der i -ten Periode Energiekosten in Höhe von

$$E(Q_i^F, n_i) := \frac{\Delta t_i P(Q_i^F, n_i) p_i}{\eta_{FU} \eta_M \eta_K f_\eta(n_i)}$$

an. Durch die Funktion f_η wird hier bereits eine Anpassung des Pumpenwirkungsgrades berücksichtigt. Wie sich der Wirkungsgrad bei reduzierter Drehzahl vermindern kann, zeigt Abb. 24.

Damit sind in jeder Periode eine Fördermenge Q_i^F und eine Drehzahl n_i zu bestimmen, die die Summe der Energiekosten über alle Perioden minimieren. Es sind jedoch eine Vielzahl von Nebenbedingungen zu beachten. Es ist einerseits sicher-zustellen, dass die Pumpe immer im Betriebspunkt arbeitet. Dazu müssen sich die Pumpen- und Anlagenkennlinie schneiden.

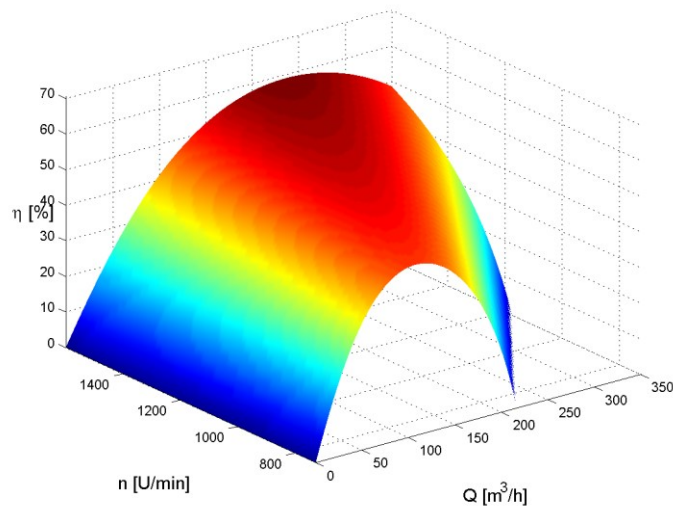


Abb. 24: Wirkungsgradkennfeld

Die Pumpenkennlinie sei bei Nenndrehzahl n_0 eine Funktion $H_0^P(Q)$ und kann bei zusätzlicher Abhängigkeit von der Drehzahl n durch

$$H^P(Q, n) := \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 H_0^P\left(\frac{n_0}{n} Q\right)$$

beschrieben werden. Die Rohrkenlinie werde durch die Funktion $H^R(Q, h)$ angegeben. Zu beachten ist dabei die Abhängigkeit vom Wasserstand h in der Pumpenvorlage, der eine Änderung der geodätischen Höhe und damit eine Verschiebung der Anlagenkennlinie bewirkt. Mit dem Wasserstand h_{i-1} zu Beginn der i -ten Periode muss

$$H^P(Q_i^F, n_i) = H^R(Q_i^F, h_{i-1})$$

in jeder Periode gelten, um den Arbeitspunkt der Pumpe einzustellen.

Neben der Leistungs- und Pumpenkennlinie kann auch die NPSH-Wert-Kennlinie im Optimierungsmodell berücksichtigt werden, die bei Nenndrehzahl die Funktion $NPSH_0(Q)$ sei. Bei veränderlicher Drehzahl lautet das NPSH-Wert-Kennfeld

$$NPSH(Q, n) := \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 NPSH_0\left(\frac{n_0}{n} Q\right).$$

Zur Vermeidung von Kavitation sollte der NPSH-Wert der Anlage $NPSHA$ in jeder Periode deutlich unterschritten werden:

$$NPSH(Q_i^F, n_i) \leq \frac{NPSHA(Q_i^F)}{1.3}.$$

Eine weitere Nebenbedingung stellt der Mindest- und Maximalpegel h_{min} und h_{max} in der Pumpenvorlage dar. Der Wasserstand h_i muss sich zu jeder Zeit zwischen diesen Grenzen befinden, d.h.

$$h_i \in [h_{min}, h_{max}] \quad \text{für alle } i = 0, \dots, m.$$

Mit einem bekannten Wasserstand \underline{h} zu Beginn des Simulationszeitraums t_0 und einer Vorgabe eines Füllstandsbereiches, der zum Ende des Simulationszeitraumes t_m angenommen werden soll, ist außerdem

$$h_0 = \underline{h} \quad \text{bzw.} \quad h_m \in [\bar{h}_{min}, \bar{h}_{max}] \subseteq [h_{min}, h_{max}].$$

Die Volumenänderung im Pumpensumpf mit einer Grundfläche A von jedem Zeitpunkt t_{i-1} zu t_i muss außerdem mit der Differenz aus Zu- und Abfluss übereinstimmen:

$$Q_i^Z - Q_i^F = A \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta t_i}.$$

Darüber hinaus gilt es gewisse Flussrestriktionen einzuhalten. Einerseits sind die durch den Pumpenhersteller angegebenen Mindest- und Maximalförderströme Q_{min}^P und Q_{max}^P zu berücksichtigen und andererseits dürfen zur Vermeidung von Ablagerungen oder Beschädigungen des Rohres Fließgeschwindigkeiten von v_{min} bzw. v_{max} nicht unter- bzw. überschritten werden. Durch Umrechnung der Restriktionen für die Fließgeschwindigkeit ergeben sich die Flussbeschränkungen

$$Q_{min}^v := \frac{v_{min} \pi d^2}{4} \quad \text{bzw.} \quad Q_{max}^v := \frac{v_{max} \pi d^2}{4}$$

für eine Druckrohrleitung eines Durchmessers d .

Da zudem ein Abschalten der Pumpe möglich ist, muss

$$Q_i^F \in \{0\} \cup [\max\{Q_{min}^v, Q_{min}^P\}, \min\{Q_{max}^v, Q_{max}^P\}] =: [Q_{min}, Q_{max}]$$

in jeder Periode gelten.

Damit ist das folgende Optimierungsproblem zu lösen:

Minimiere

$$\sum_{i=1}^m \frac{\Delta t_i P(Q_i^F, n_i) p_i}{\eta_{FU} \eta_M \eta_K f_\eta(n_i)}$$

unter den Nebenbedingungen:

Schnittpunkt von Pumpen- und Anlagenkennlinie:

$$H^P(Q_i^F, n_i) = H^R(Q_i^F, h_{i-1})$$

NPSH-Wert:
$$NPSH(Q_i^F, n_i) \leq \frac{NPSHA(Q_i^F)}{1.3}$$

Flussbeschränkung:
$$Q_i^F \in \{0\} \cup [Q_{min}, Q_{max}]$$

Drehzahlbeschränkung:
$$n_i \in [n_{min}, n_0]$$

Wasserstandsbeschränkung:
$$h_i \in [h_{min}, h_{max}]$$

Anfangsbedingung:
$$h_0 = \underline{h}$$

Endbedingung:
$$h_m \in [\bar{h}_{min}, \bar{h}_{max}]$$

Volumenänderung:
$$Q_i^Z - Q_i^F = A \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta t_i}$$

5.2 Lösung des Optimierungsproblems

Pontryaginsches Minimumprinzip:

Im oben formulierten Optimierungsproblem wurde der Simulationsbereich in m Intervalle unterteilt. Theoretisch können optimale Steuerungsprobleme auch ohne diesen Schritt gelöst werden. In diesem Fall kann das Pontryaginsche Minimumprinzip verwendet werden, wodurch Exaktheit der Lösung erhöht werden kann. Die Förderströme, Drehzahlen und Zuflüsse sind in diesem Fall nicht mehr stückweise konstant, sondern zeitabhängige Funktionen

(ebenso der Wasserstand in der Pumpenvorlage). Die Zielfunktion lautete in diesem Fall:

$$\int_0^T \frac{P(Q^F(t), n(t), t) p(t)}{\eta_{FU} \eta_M \eta_K f_\eta(n(t))} dt.$$

Die Volumenänderung ergäbe sich dann durch:

$$Q^Z(t) - Q^F(t) = Ah'(t).$$

Aufgrund der Tatsache, dass ein Abschalten der Pumpe möglich ist, ist die Leistungsfunktion nicht stetig und die Förderströme sind aus einem nichtzusammenhängenden Bereich. Die Problemlösung gestaltet sich für dieses Problem deshalb als sehr schwierig. Eine Diskretisierung der Zeit ist deshalb für dieses Problem unausweichlich.

Dynamische Optimierung:

Das oben formulierte diskretisierte Problem kann in verschiedene Perioden zerlegt werden, wobei jedem Anfang bzw. Ende einer Periode ein Wasserstand im Pumpensumpf zugeordnet wird. Es ist zudem in jeder Periode eine Entscheidung über die zu fördernde Abwassermenge Q_i^F bzw. die einzustellende Drehzahl n_i zu fällen, wodurch in Abhängigkeit von der

getroffenen Entscheidung jeweils verschiedene Wasserstände erreicht werden. Außerdem sind mit jeder Entscheidung auch gewisse Energiekosten verbunden. Um eine gute Entscheidung in einer Periode zu fällen, die dazu beiträgt die Gesamtenergiekosten zu minimieren, ist damit abzuwägen, ob in dieser Periode kostenminimal gefördert wird und damit einen für spätere Perioden ungünstigen Wasserstand in Kauf genommen wird oder ob es sinnvoll ist in der aktuellen Periode eine größere Abwassermenge zu fördern, um so in zukünftigen Perioden Energie einzusparen.

Die hier entwickelte Aufgabe stellt daher ein diskretes dynamisches Optimierungsproblem dar. Diese Klasse von Optimierungsaufgaben wurde erstmals in den 50er Jahren von Richard Bellman untersucht, der erkannte, dass die optimale Entscheidungsfolge bei gegebenem Zustand (Wasserstand) für den Rest des Problems unabhängig von den zuvor getroffenen Entscheidungen ist. Daraus ergibt sich ein rekursiver Lösungsalgorithmus.

Die Wasserstände können dabei in jeder Periode einen beliebigen Wert zwischen h_{min} und h_{max} annehmen. Um Rechenzeit einzusparen wird das Intervall $[h_{min}, h_{max}]$ hier in Abhängigkeit von der gewünschten Rechenzeit und -genauigkeit geeignet diskretisiert, sodass nur eine endliche Anzahl von Wasserständen angenommen werden kann:

$$h_i \in \{h_{min}, \dots, h_{max}\} \quad \text{für alle } i = 0, \dots, m.$$

Dies wird analog für den Endzeitpunkt $t_m = T$ durchgeführt:

$$h_m \in \{\bar{h}_{min}, \dots, \bar{h}_{max}\} \subseteq \{h_{min}, \dots, h_{max}\}.$$

Zur Lösung des Problems werden zunächst für jede Periode die möglichen Zustände und Zustandsübergänge auf Basis der Nebenbedingungen des Optimierungsproblems bestimmt. Werden nun die Zustände jeder Periode mit den möglichen Folgezuständen verbunden, ergibt sich ein Zustandsbaum, dessen Äste (Zustandsübergänge) Energiekosten zugeordnet werden, die aufgewendet werden müssen, um einen Zustand in einen anderen zu überführen. Es ist schließlich der Pfad durch den Baum mit minimalen Kosten zu bestimmen.

Die Suche beginnt in der letzten Periode, in der für jeden Anfangswasserstand der Folgezustand mit minimalen Übergangskosten bestimmt wird. Davon ausgehend wird für die Anfangszustände der vorherigen Periode jeweils der Folgezustand bestimmt, sodass die Folgekosten (Übergangskosten der aktuellen und der darauf folgenden Periode) minimal sind. Die Berechnung wird solange durchgeführt bis der Anfangswasserstand h_0 erreicht ist. Es sind dann die optimalen Wasserstände für jede Periode bekannt und die optimalen Förderströme bzw. Drehzahlen können bestimmt werden.

Die Lösung solcher Probleme soll anhand eines konstruierten Anwendungsfalls in Abb. 25 veranschaulicht werden.

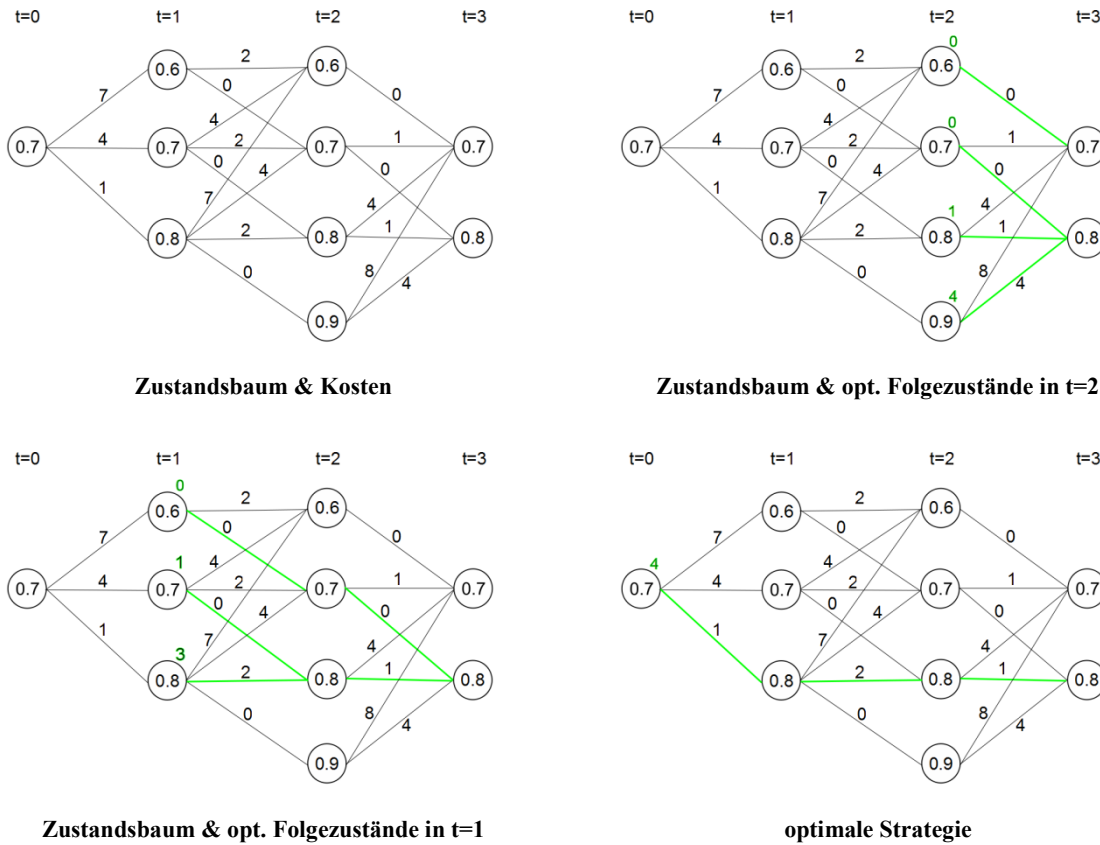


Abb. 25: Lösung des Optimierungsproblems

Wird nun die optimale Steuerstrategie für einen typischen Sommertag (02.08.2011) der Zweipunktsteuerung gegenübergestellt, so ergibt sich eine Energieeinsparung in Höhe von 27,5%. Die Implementierung der Strategien erfolgte mit der Software Matlab. Ein Vergleich der geförderten Abwasserströme und Wasserstände im Pumpensumpf bei herkömmlichem und optimalem drehzahlgeregeltem Pumpenbetrieb zeigt Abb. 26.

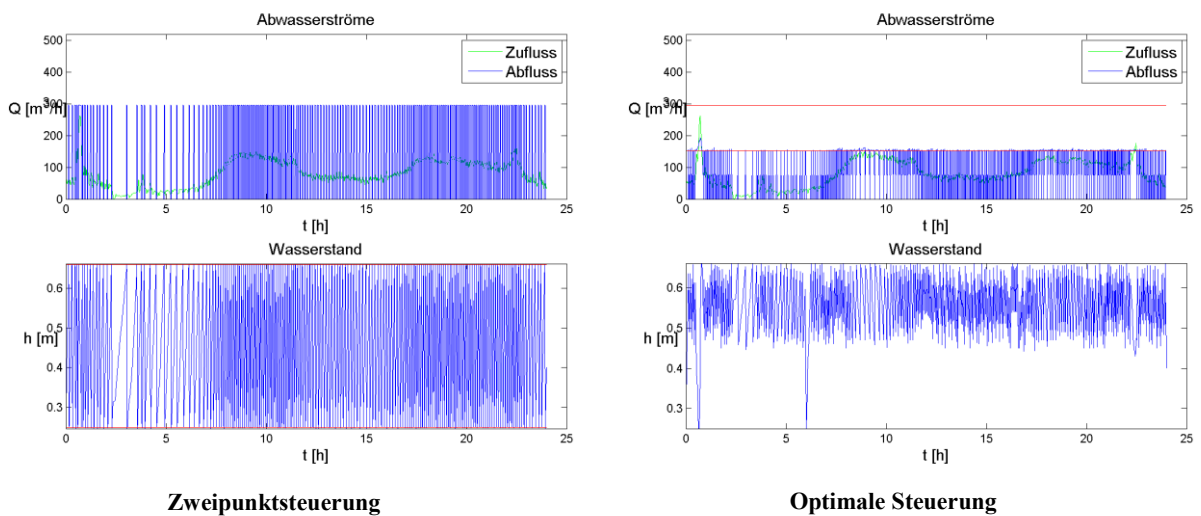


Abb. 26: Vergleich von Zweipunktsteuerung und optimaler Steuerung

Die kleinste Abwassermenge, die von der Pumpe gefördert wird, liegt hier bei 151 m³/h. Dies entspricht gerade einer Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Kleinere Förderströme würden zwar aus energetischen Betrachtungen Sinn machen, jedoch würde dies das Risiko von

Ablagerungen in der Druckrohrleitung erhöhen. Zu beachten ist zudem, dass hier mit einem Hoch- und Niedertarif gearbeitet wurde. Aus diesem Grund wird der Pumpensumpf zum Ende des Zeitraumes für den Niedertarif komplett entleert. Zur Vermeidung von zu langen Aufenthaltszeiten des Abwassers in der Pumpenvorlage kann die Entleerung des Pumpensumpfes in regelmäßigen Abständen (z.B. 3 Stunden) erfolgen. In diesem Fall beträgt die Energieeinsparung noch 27,4%.

Für Anwendungsfälle mit einer steileren Rohrkenlinie oder bei einer großen Schwankungsbreite der Zuflüsse, sind deutlich größere Energieeinsparungen zu erwarten.

Nichtlineare Optimierung:

Mit Hilfe der dynamischen Optimierung kann das hier gestellte Problem zwar gelöst werden, jedoch kann die Berechnung des globalen Minimums mit Rechenzeiten von mehreren Minuten verbunden sein. Dies ist insbesondere bei der modellprädiktiven Regelung problematisch. Hier wird zunächst eine optimale Steuerung für einen Zeitraum $[0, T]$ berechnet. Diese wird jedoch nur für den nächsten Zeitschritt Δt verwendet. Der Zeitraum zur Optimierung wird nun um Δt verschoben und der Vorgang wird wiederholt. Wird eine solche Strategie zur Steuerung einer Pumpe verwendet, wird der Zeitschritt Δt durch die Rechenzeit zur Lösung des Optimierungsproblems beschränkt. Insbesondere für den Fall der Optimierung der Steuerung mehrerer vernetzter Pumpen bedeutet dies, dass der Zeitschritt Δt sehr groß gewählt werden muss.

Soll die Lösung nicht mit der dynamischen Optimierung erfolgen, kann das Problem auch als nichtlineares Optimierungsproblem aufgefasst werden. Aufgrund der oben beschriebenen Möglichkeit die Pumpe zeitweise abzuschalten, handelt es sich jedoch um ein nichtkonvexes Optimierungsproblem, deren Zielfunktion zudem nicht stetig ist. Die Standardverfahren zur Lösung solcher Probleme sind jedoch ebenfalls mit hohen Rechenzeiten verbunden. Aus diesem Grund wird eine Schaltvariable z eingeführt, die angibt ob die Pumpe im entsprechenden Zeitschritt ein- oder ausgeschaltet ist. Dies wird realisiert, indem der Variable die Werte 0 oder 1 zugeordnet werden. Da die Berechnung der optimalen Steuerung auch für dieses Problem immense Rechenzeiten in Anspruch nimmt, werden für die Schaltvariable zunächst auch Zustände zugelassen, die nicht direkt darüber Auskunft geben, ob die Pumpe im entsprechenden Zeitschritt Abwasser fördert oder nicht. Die Schaltvariable z hat in diesem Fall einen Wert zwischen 0 und 1 (Relaxierung des Problems). Zur Formulierung des Problems aus Kapitel 3.3.1 wird nun in der Zielfunktion Q_i^F durch \tilde{Q}_i^F ersetzt, wobei $\tilde{Q}_i^F \in [Q_{min}, Q_{max}]$ und $z_i \in [0, 1]$. Die Zielfunktion lautet dann:

$$\sum_{i=1}^m z_i \frac{\Delta t_i P(\tilde{Q}_i^F, n_i) p_i}{\eta_{FU} \eta_M \eta_K f_\eta(n_i)}$$

Überall sonst wird $Q_i^F := z_i \tilde{Q}_i^F$ gesetzt. Die Lösung des nun resultierenden Optimierungsproblems lässt sich mit Hilfe eines Innere-Punkt-Verfahrens (z.B. Open Source Software IPOPT) schnell bestimmen und kann folgende Gestalt haben:

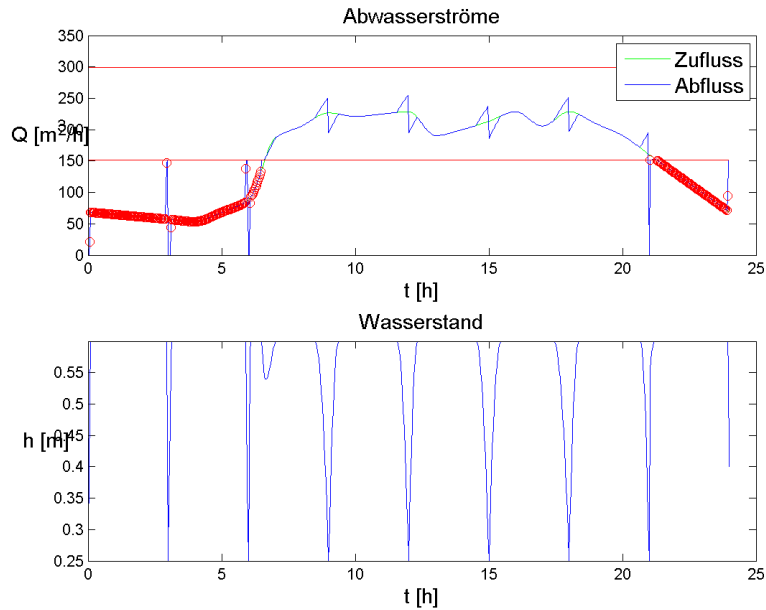


Abb. 27: Lösung des relaxierten Problems

In Abb. 27 sind alle Zeitpunkte gekennzeichnet, in denen die Schaltvariable einen Wert zwischen 0 und 1 annimmt. Diese Bereiche sind nicht zulässig, da dann $Q_i^F := z_i \tilde{Q}_i^F \in (0, Q_{min})$. Die übrigen Bereiche bilden eine Teillösung des Problems.

Um auch in den nicht zulässigen Bereichen eine Lösung für das Ausgangsproblem zu erhalten, müssen den Variablen $0 < z_i < 1$ nun ganzzahlige Werte zugeordnet werden. In [Sag05] wird dazu folgende Rundungsregel vorgeschlagen:

$$\tilde{z}_j := \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum_{i=1}^j z_i - \sum_{i=1}^{j-1} \tilde{z}_i \geq 0.5 \\ 0 & \text{falls } \sum_{i=1}^j z_i - \sum_{i=1}^{j-1} \tilde{z}_i < 0.5 \end{cases} .$$

Auf diese Weise wird festgelegt in welchen Zeitschritten die Pumpe aktiv ist und welche Abwassermenge sie zu fördern hat. Durch die vollzogene Rundung können jedoch Restriktionen bezüglich des Pegels in der Pumpenvorlage unter Umständen nicht mehr eingehalten werden. Aus diesem Grund wird im finalen Schritt dieses Lösungsverfahrens ein Optimierungsproblem aufgestellt und gelöst, dessen Ziel die Bestimmung der Länge jedes Zeitschrittes ist, sodass sämtliche Restriktionen eingehalten werden. Dabei wird beachtet, dass für Pumpen schädliche kurze Schaltintervalle vermieden werden. In Abb. 28 ist Lösung nach Rundung und Optimierung der Zeitschritte zu sehen.

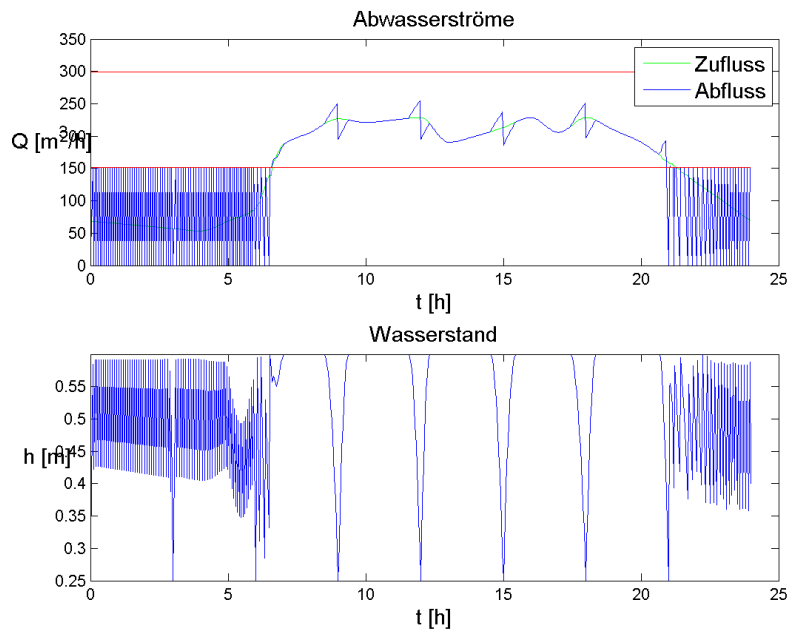


Abb. 28: Lösung nach Rundung und Optimierung der Zeitschritte

Die Rechenzeitersparnis gegenüber der dynamischen Optimierung für dieses ausgewählte Beispiel beträgt ca. 50%. In Einzelfällen können sogar 99% der Zeit eingespart werden, wobei die Energiekosten der berechneten Steuerstrategie sogar leicht unter dem mit der dynamischen Optimierung ermittelten Wert lagen. In einigen Fällen konvergiert jedoch das Verfahren zur Bestimmung der optimalen Schrittweiten nicht. Bei einer Fortsetzung des Projektes soll der hier vorgestellte Ansatz deshalb weiter verbessert werden.

5.3 Optimierung weiterer Szenarien

Nachdem ein einfaches Szenario modelliert und ein Optimierungsproblem aufgestellt und gelöst wurde, soll nun die Reihenschaltung von Pumpstationen mit Druckunterbrechung untersucht werden.

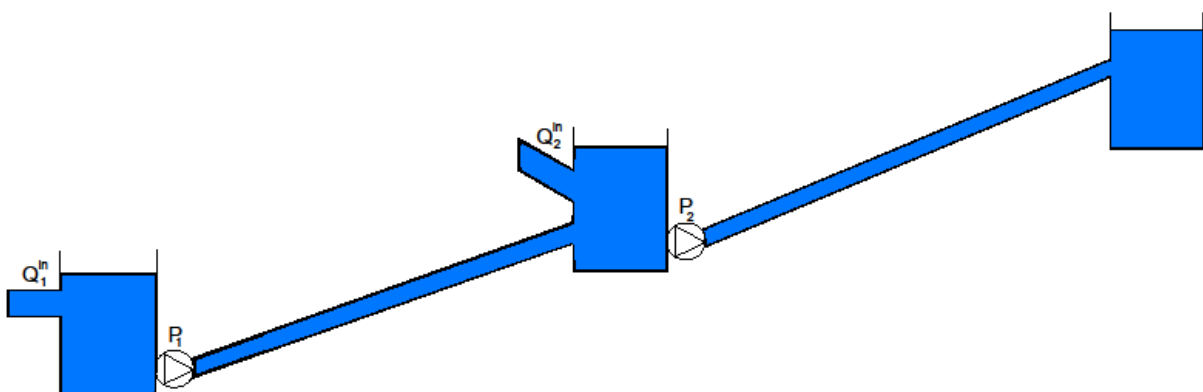


Abb. 29: Reihenschaltung von Fördersystemen mit Druckunterbrechung

Dabei fördert eine Pumpe das Abwasser über eine Druckleitung in den Pumpensumpf einer weiteren Pumpe, welche wiederum in eine weitere Druckleitung fördert. Darüber hinaus fließt beiden Pumpenvorlagen Abwasser aus einer separaten Quelle zu. Eine Reihenschaltung von Fördersystemen ohne Druckunterbrechung kommt in der Praxis faktisch nicht vor. Die

Modellierung dieses Szenarios und Formulierung des zugehörigen Optimierungsproblems erfolgt ähnlich zum einfachen Szenario in Kapitel 5.1.

Minimiere

$$\sum_{i=1}^m \Delta t_i p_i \left(\frac{P_1(Q_i^{F_1}, n_i^1)}{\eta_{FU}^1 \eta_M^1 \eta_K^1 f_\eta^1(n_i^1)} + \frac{P_2(Q_i^{F_2}, n_i^2)}{\eta_{FU}^2 \eta_M^2 \eta_K^2 f_\eta^2(n_i^2)} \right)$$

unter den Nebenbedingungen:

Schnittpunkt von Pumpen- und Anlagenkennlinien:

$$H_1^P(Q_i^{F_1}, n_i^1) = H_1^R(Q_i^{F_1}, h_{i-1}^1, h_{i-1}^2)$$

$$H_2^P(Q_i^{F_2}, n_i^2) = H_2^R(Q_i^{F_2}, h_{i-1}^2)$$

NPSH-Wert:
$$NPSH(Q_i^{F_1}, n_i^1) \leq \frac{NPSHA(Q_i^{F_1})}{1.3}$$

$$NPSH(Q_i^{F_2}, n_i^2) \leq \frac{NPSHA(Q_i^{F_2})}{1.3}$$

Flussbeschränkung:
$$Q_i^{F_1} \in \{0\} \cup [Q_{min}^1, Q_{max}^1]$$

$$Q_i^{F_2} \in \{0\} \cup [Q_{min}^2, Q_{max}^2]$$

Drehzahlbeschränkung:
$$n_i^1 \in [n_{min}^1, n_0^1]$$

$$n_i^2 \in [n_{min}^2, n_0^2]$$

Wasserstandsbeschränkung:
$$h_i^1 \in [h_{min}^1, h_{max}^1]$$

$$h_i^2 \in [h_{min}^2, h_{max}^2]$$

Anfangsbedingung:
$$h_0^1 = \underline{h}^1$$

$$h_0^2 = \underline{h}^2$$

Endbedingung:
$$h_m^1 \in [\bar{h}_{min}^1, \bar{h}_{max}^1]$$

$$h_m^2 \in [\bar{h}_{min}^2, \bar{h}_{max}^2]$$

Volumenänderung:
$$Q_i^{Z_1} - Q_i^{F_1} = A_1 \frac{h_i^1 - h_{i-1}^1}{\Delta t_i}$$

$$Q_i^{Z_2} + Q_i^{F_1} - Q_i^{F_2} = A_2 \frac{h_i^2 - h_{i-1}^2}{\Delta t_i}$$

Im Gegensatz zum einfachen Szenario aus Kapitel 5.1 muss hier berücksichtigt werden, dass sich der Zufluss zur Pumpenvorlage der zweiten Pumpen aus dem Abwasserzufluss der angeschlossenen Siedlung und dem Förderstrom der ersten Pumpe zusammensetzt. Zudem ändert sich die geodätische Höhe der ersten Rohrleitungskennlinie mit jeder Änderung des Wasserstandes in beiden Pumpensümpfen. Geht die zweite Druckrohrleitung in eine Freigefälleleitung über, ändert sich die geodätische Höhe der zweiten Rohrleitungskennlinie nur bei einer Änderung des Pegels in der zweiten Pumpenvorlage.

Die Lösung des Problems kann wieder mit Hilfe der dynamischen Optimierung erfolgen. Dazu werden zunächst die Zustandsbäume für beide Pumpen aufgestellt. Zu beachten ist, dass sich der Zustandsbaum der zweiten Pumpe mit jeder Entscheidung bzgl. der ersten Pumpe ändert, da sich der Zufluss zur zweiten Pumpenvorlage in diesem Fall ändert. Die Suche des Weges mit minimalen Kosten gestaltet sich hier ebenfalls etwas schwieriger als beim einfachen Szenario. Für jeden Zustand und für jede Entscheidung im ersten Zustandsbaum

sind für alle möglichen Zustände des zweiten Baumes in der entsprechenden Periode die minimalen Folgekosten (für beide Pumpen) zu bestimmen. In Abb. 30 ist dies für einen Zustand und eine Entscheidung des ersten Baumes anhand eines konstruierten Beispiels dargestellt.

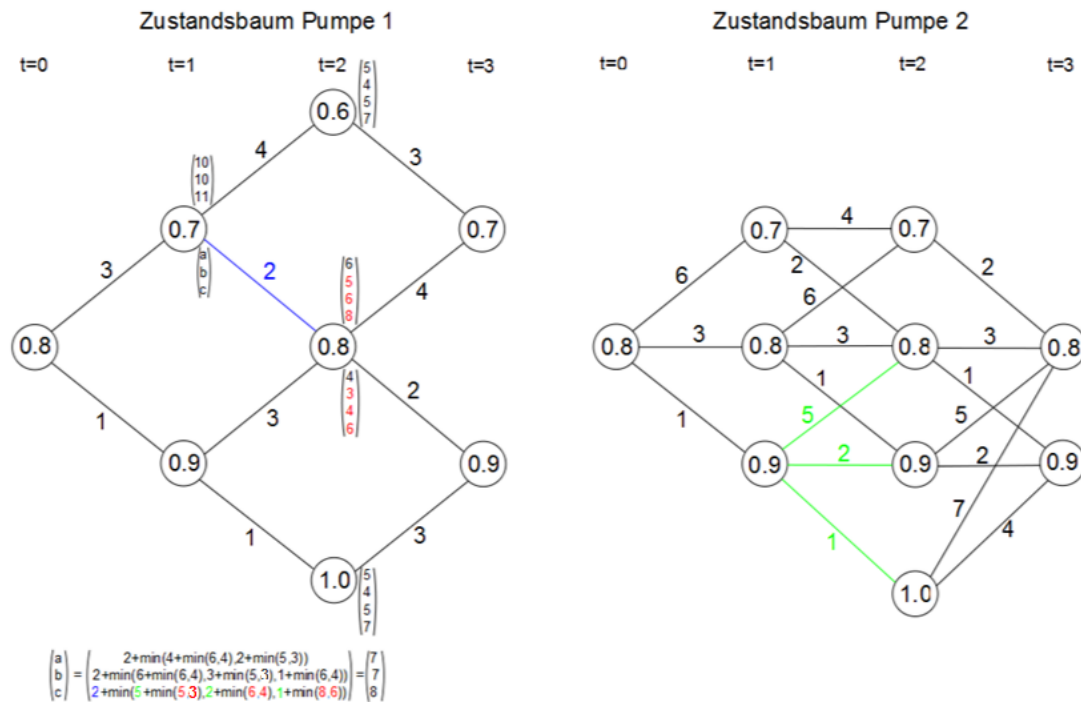


Abb. 30: Zustandsbäume bei Reihenschaltung

Bei der Betrachtung diverser Anwendungsfälle mit verschiedenen Pumpen-, Rohr- und Zulaufcharakteristika zeigte sich jedoch, dass die Einsparung gegenüber der getrennten Optimierung der einzelnen Pumpenbetriebsweisen (Anwendung der Methoden aus Kapitel 5.1 auf beide Teilsysteme) sehr gering ausfallen kann. So ergab sich bei dem in Abb. 31 gezeigten Beispiel eine Energieeinsparung von nur 0,1%.

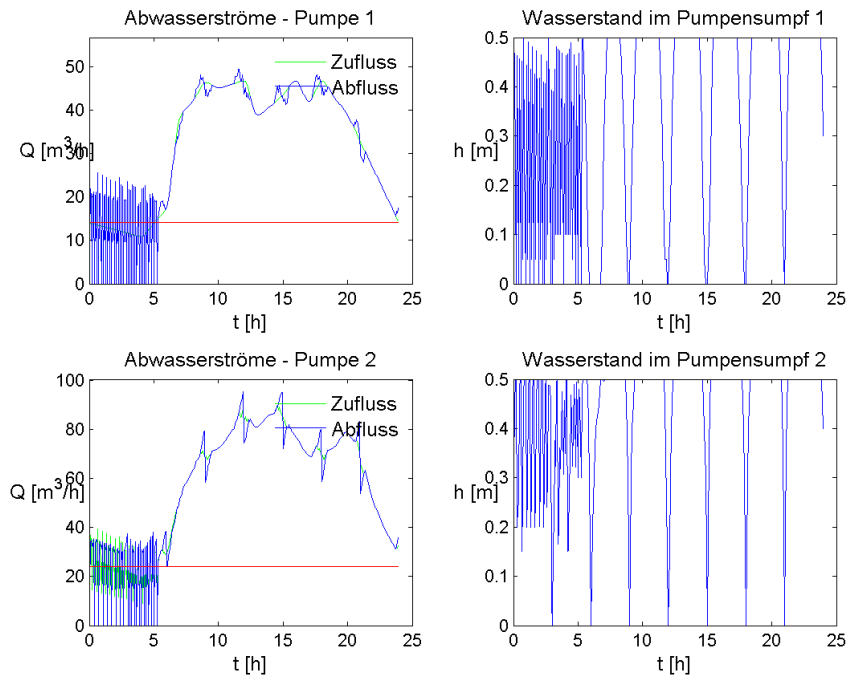


Abb. 31: Optimale Steuerung von in Reihe geschalteter Pumpen

Die Vorgehensweise zur Optimierung von mehr als zwei in Reihe geschalteter Pumpe oder bei einem Szenario wie es in Abb. 32 zu sehen ist, verläuft analog.

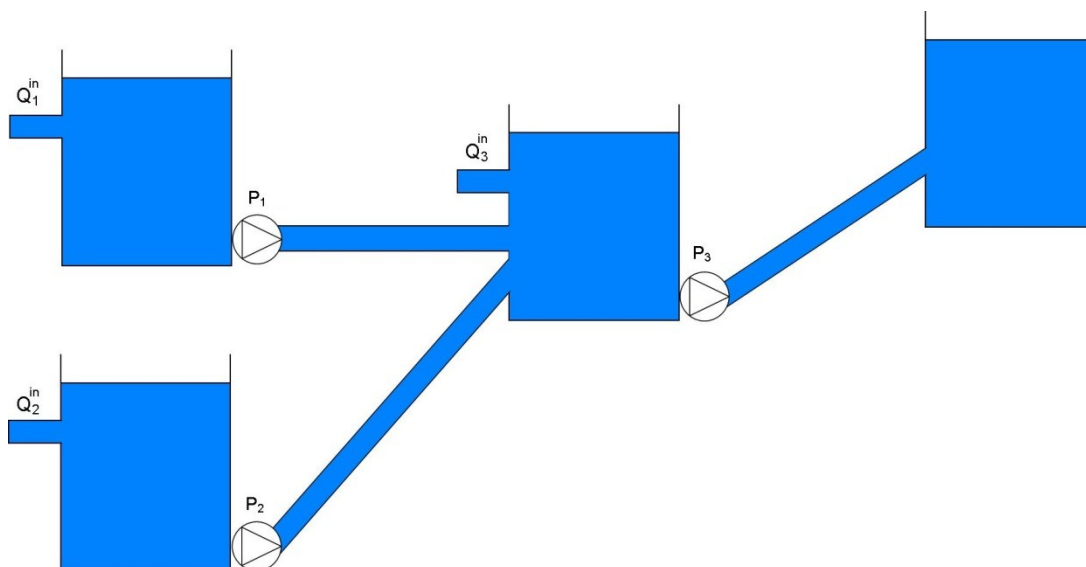


Abb. 32: Alternatives Szenario

Jedoch muss hier statt einem Vektor für jeden Zustand und jede Entscheidung des ersten Zustandsbaumes eine Matrix abgespeichert werden. Die Matrix hat gerade N Spalten und M Zeilen, wenn der Zustandsbaum der zweiten Pumpe N Zustände und der Zustandsbaum der dritten Pumpe M Zustände für den entsprechenden Zeitschritt aufweist.

5.4 Regelbasierte Steuerstrategien

Durch die Lösung des dynamischen Optimierungsproblems lässt sich eine optimale Entscheidungsfolge zur Förderung des Abwasseraufkommens bei Kenntnis der

Zulauffunktion bestimmen. Jedoch ist die Berechnung in einigen Fällen mit hohen Rechenzeiten verbunden und der Zulauf unsicher. Daher wird nach Strategien gesucht, die auf Zulaufprognosen und komplexe mathematische Algorithmen weitestgehend verzichten können. Zielsetzend ist dabei die Ermittlung einer Förderstrategie, deren Energiekosten mit denen der optimalen Entscheidungsfolge vergleichbar sind, ohne den Zulauf zum HPW vorher exakt zu kennen.

Die erste Regel ergibt sich durch die Fragestellung, wie ein vollgefüllter Behälter energieminimal entleert werden kann. Der Behälter habe das Volumen V und $P(Q, h)$ sei das Leistungskennfeld der drehzahlregelbaren Pumpe, das für jeden Förderstrom Q und jeden Wasserstand h die aufgenommene Leistung angibt. Das Leistungskennfeld berücksichtigt dabei neben der Realisierung des Betriebspunktes (Schnittpunkt aus Pumpen- und Rohrkenlinie) auch die Wirkungsgrade der Pumpe, des Motors, der Kupplung und des Frequenzumrichters und die durch den Einsatz eines Frequenzumrichters verbundene Veränderung des Gesamtwirkungsgrades bei abnehmender Drehzahl.

Zur Entleerung eines Behälters bei minimalem Energieaufwand ist damit $V/Q P(Q, h)$ zu minimieren, wobei V/Q die Zeit zur Entleerung des Behälters ist. Dies ist äquivalent zur Minimierung von spezifischer Energie:

$$E_{spez} = \frac{P(Q, h)}{Q} \rightarrow \min.$$

Das Minimum dieser Funktion kann für jeden Wasserstand h in der Regel leicht berechnet werden und ist insbesondere davon abhängig wie stark sich der Gesamtwirkungsgrad bei abnehmender Drehzahl reduziert. Da es nicht sinnvoll ist weniger als den Förderstrom, der der geringsten spezifischen Energie entspricht zu fördern, lautet die erste Regel:

1. *Fördere mindestens die Abwassermenge, die der geringsten spezifischen Energie entspricht oder gar nicht.*

Wird von flexiblen Strompreisen ausgegangen, ergibt sich eine weitere Energieeinsparmöglichkeit, indem ein geringerer Strompreis genutzt wird, um möglichst viel Abwasser zu fördern. Ebenso kann die Pumpe vermehrt abgeschaltet und der Pumpensumpf gefüllt werden, wenn der Tarif besonders hoch ist. Daraus ergibt sich Regel 2:

2. *Berücksichtige flexible Strompreise bei der Bestimmung der Pumpensteuerung.*

Je größer das Pumpensumpfvolumen ist, desto besser kann die Regel ihr Potential entfalten. Hier ist zudem eine Zuflussprognose hilfreich, um den Pumpensumpf exakt zu gewünschten

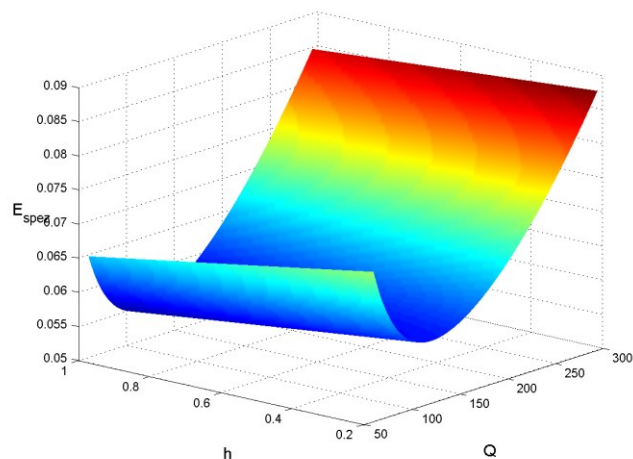


Abb. 33: Spezifische Energie

Zeitpunkten entleeren zu können. Die Zeitspanne des Entleerungsaktes des Pumpensumpfes muss zuvor vom Anwender definiert werden.

Eine weitere Regel, die zur Energieeinsparung beiträgt, ist:

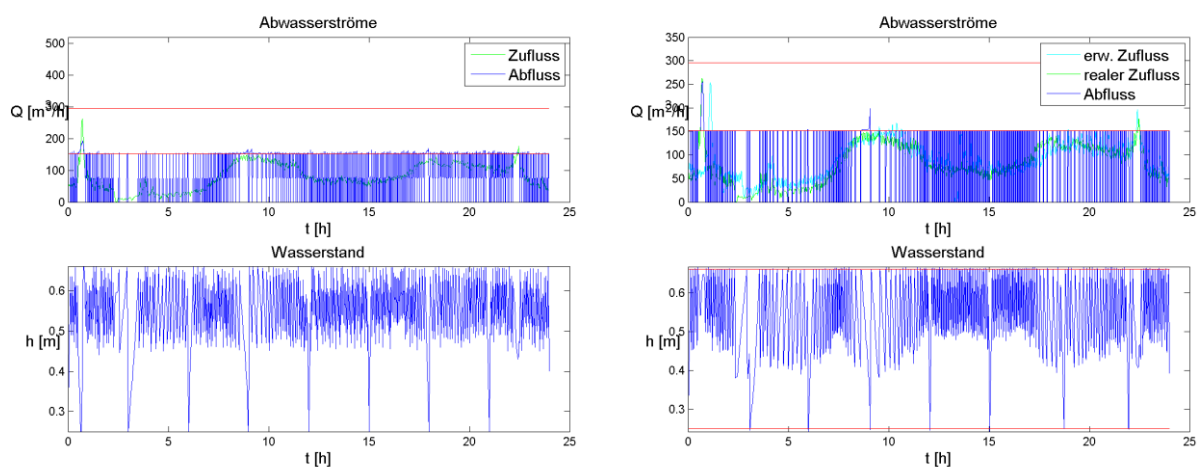
3. *Wenn möglich, ist der Wasserstand in der Pumpenvorlage am Maximum zu halten.*

Je höher der Wasserstand im Pumpensumpf ist, desto weniger Höhenunterschied muss überwunden werden. Dies zieht geringere Reibungsverluste im Rohr nach sich und bewirkt geringere Energiekosten. In der Praxis kann es jedoch zu Problemen durch Geruchsbelästigung, Korrosion und Ablagerungen im Pumpensumpf und im angeschlossenen Rohr durch die Erzwingung des hohen Wasserstandes und die geringeren Fließgeschwindigkeiten kommen. In diesem Fall kann auch eine Regel zur regelmäßigen Entleerung der Pumpenvorlage definiert werden:

4. *Entleere regelmäßig (z.B. alle 3 Stunden) den Pumpensumpf (bei maximaler Drehzahl).*

Aufgrund der damit verbundenen größeren Förderströme und längeren Zeiträume mit niedrigerem Wasserstand sinkt zwar die Energieeinsparung geringfügig, jedoch kann dies die Betriebssicherheit wesentlich erhöhen.

Um die Energiekosten der regelbasierten Strategie mit dem Optimum zu vergleichen, wurde eine typische Ganglinie eines Sommertages der zur Verfügung stehenden Daten für Prerow gewählt. Die Berechnung der energieminimalen Strategie mithilfe der dynamischen Optimierung ergab eine Energieeinsparung gegenüber der Zweipunktregelung ohne Frequenzrichter in Höhe von 27,4%. Dabei wurde der Pumpensumpf alle drei Stunden geleert. Während für die Bestimmung der optimalen Strategie die Kenntnis des Abwasserzustroms vorausgesetzt wurde, wurde bei Einsatz der festen Regeln die Zuflussganglinie des Vortages zur Prognose des zukünftigen Zustroms verwendet. Obwohl die Prognose nicht exakt eingetroffen ist, ergab sich hier ein Einsparpotential in Höhe von 27,3% und ist damit nur geringfügig kleiner als der Optimalwert.



optimale Strategie

regelbasierte Strategie

Abb. 33: Vergleich von optimaler und regelbasierter Strategie

Ähnlich verhält es sich auch an typischen Wintertagen oder an Tagen mit extremen Zuflussganglinien, wie z.B. beim jährlichen Hafenfest Prerow:

Tab. 6: Vergleich Energieeinsparung

	Wintertag	Sommertag	Hafenfest
Energieeinsparung bei optimaler Strategie	27,0%	27,4%	23,6%
Energieeinsparung bei regelbasierter Strategie	26,9%	27,3%	23,5%

Das Beispiel zeigt, dass die Energiekosten der regelbasierten Steuerstrategie nur unwesentlich höher ausfallen als bei der Strategie, die sich durch die dynamische Optimierung ergibt.

Wird der Pumpensumpf bei maximaler Drehzahl entleert, so sinkt die Energieeinsparung bei Anwendung der regelbasierten Strategie gegenüber der Zweipunktsteuerung um 2 - 2,5 Prozentpunkte.

Die hier entwickelten Regeln können verwendet werden, wenn sehr kleine Ausschnitte von Kanalnetzen betrachtet werden, da in diesem Fall nur geringe Einsparungen durch die geschickte Abstimmung der Pumpen zu erreichen sind. Die Regeln können dann jeweils für alle beteiligten Pumpen verwendet werden. Mit zunehmender Komplexität des betrachteten Abwassernetzes vergrößert sich jedoch die Differenz der Energiekosten zwischen beiden Strategien. Eine Realisierung der regelbasierten Steuerstrategie ist dann zwar der herkömmlichen Zweipunktsteuerung energetisch überlegen, jedoch wird die intelligente Abstimmung der Pumpen untereinander nicht ausgenutzt und Einsparpotential wird verschwendet. Darüber hinaus kann die regelbasierte Strategie in weiteren Fällen versagen. Liegt ein größerer Pumpensumpf vor, ist eine schnelle Steigung des Pegels zur Erreichung des Maximalpegels (Regel 3) nicht ratsam. Eine langsame Steigung des Pegels liefert hier energetische Vorteile (insbesondere bei einer regelmäßigen Entleerung der Pumpenvorlage).

Die Einsetzbarkeit der regelbasierten Strategie liegt also insbesondere bei sehr einfachen Systemen, bestehend aus einer Pumpenvorlage, einer Pumpe und einer Druckrohrleitung. Es ist hier möglich mit einfachen Mitteln signifikante Energieeinsparungen gegenüber der Zweipunktregelung zu erreichen. Die Steuerstrategie ist dabei annähernd optimal bezüglich der entstehenden Energiekosten. Ein weiterer Vorteil liegt in der Tatsache, dass Betreiber von Abwasserpumpstationen die hier entwickelten Regeln in die bereits vorhandene SPS integrieren können. Dies reduziert die Kosten zur Umrüstung der Pumpstation auf die Kosten für den Frequenzumrichter und den Sinusfilter. Die gute Verständlichkeit der Regeln und einfache Umsetzbarkeit kann zudem eine schnelle Verbreitung der Drehzahlregelung in der Abwassertechnik fördern.

5.5 Anpassung der optimalen Strategie

Im Gegensatz zur regelbasierten Strategie, bei der die optimale Strategie nur indirekt zur Entwicklung solcher Regeln verwendet wurde, kann die optimale Strategie direkt bei der

Steuerung der Pumpe Anwendung finden. Es müssen jedoch Anpassungen vorgenommen werden, da die auf einer Zuflussprognose basierende bestimmte Steuerstrategie nicht exakt zur tatsächlichen Steuerung genutzt werden kann. In der Regel gibt es Abweichungen des realen Zuflusses von der Prognose. Ziel war es also einen Algorithmus zur Anpassung der optimalen Strategie an reale Zuflüsse, bei möglichst wenig energetischem Mehraufwand im Vergleich zur exakten Kenntnis des Zulaufes, zu entwickeln.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung einer in der Praxis umsetzbaren Steuerung teilt sich dabei in drei Schritte.

Schritt 1 – Erstellung einer Zuflussprognose:

Zunächst wird über einen Zeitraum von z.B. 24 Stunden eine Zuflussprognose erstellt. Dazu werden die Methoden aus Kapitel 4.4 verwendet.

Schritt 2 – Bestimmung der optimalen Steuerstrategie:

Auf Basis der Zuflussprognose wird über den gegebenen Zeitraum die optimale Steuerstrategie bestimmt. Die optimalen Förderströme und die optimalen Wasserstände über diesen Zeitraum bezüglich des prognostizierten Abwasserzulaufes können z.B. mit der dynamischen Optimierung berechnet werden (siehe Kapitel 5.2) und können wie in Abb. 35 aussehen.

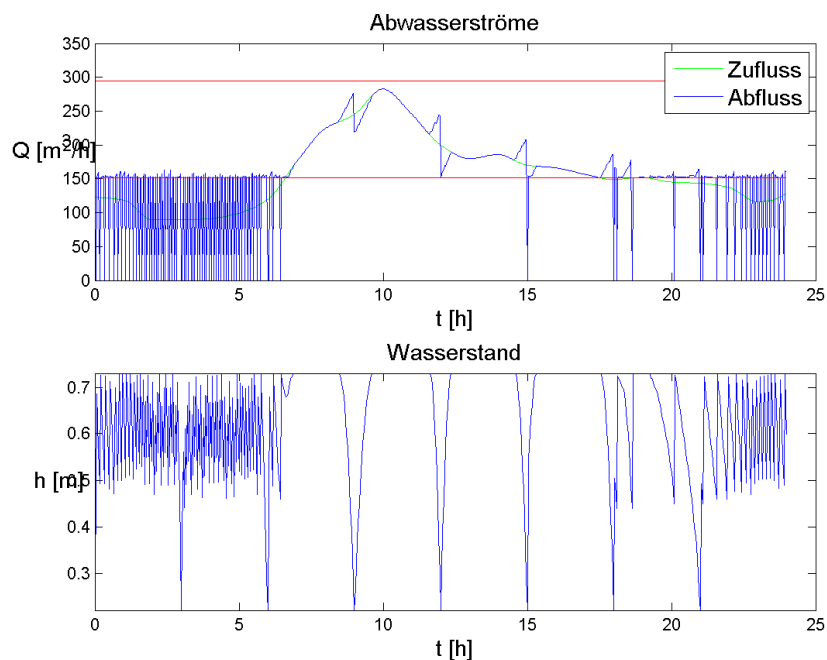


Abb. 34: Optimale Steuerung bzgl. Zulaufprognose

Schritt 3 – Anpassung der Optimalstrategie an reale Zuflüsse:

Würde die optimale Strategie, bestehend aus den optimalen Drehzahlen bzw. Förderströmen, nun in der Realität exakt umgesetzt werden, könnte es zu einer Verletzung der Pegelbeschränkungen kommen, da die realen Zuflüsse nicht mit den erwarteten Zuflüssen übereinstimmen müssen. Aus diesem Grund werden die optimalen Wasserstände als Referenz verwendet und die Förderströme bzw. Drehzahlen werden aus dem realen Zufluss und dem

aktuellen Wasserstand in der Pumpenvorlage in jedem Zeitschritt der umgesetzten Steuerung jeweils so bestimmt, dass die optimalen Wasserstände angenommen werden. Ist dies aufgrund von Restriktionen bezüglich der Drehzahl oder des Förderstroms nicht möglich, werden Abweichungen in Kauf genommen und zu dem nächstmöglichen Zeitpunkt korrigiert. Zwar ist der Zufluss für den nächsten Zeitschritt, für den der angepasste Förderstrom bestimmt werden soll nicht bekannt, jedoch kann bei genügend kleinen Zeitschritten der Zufluss der vorherigen Periode als Zufluss verwendet werden. Die Unterschiede sind in diesem Fall marginal.

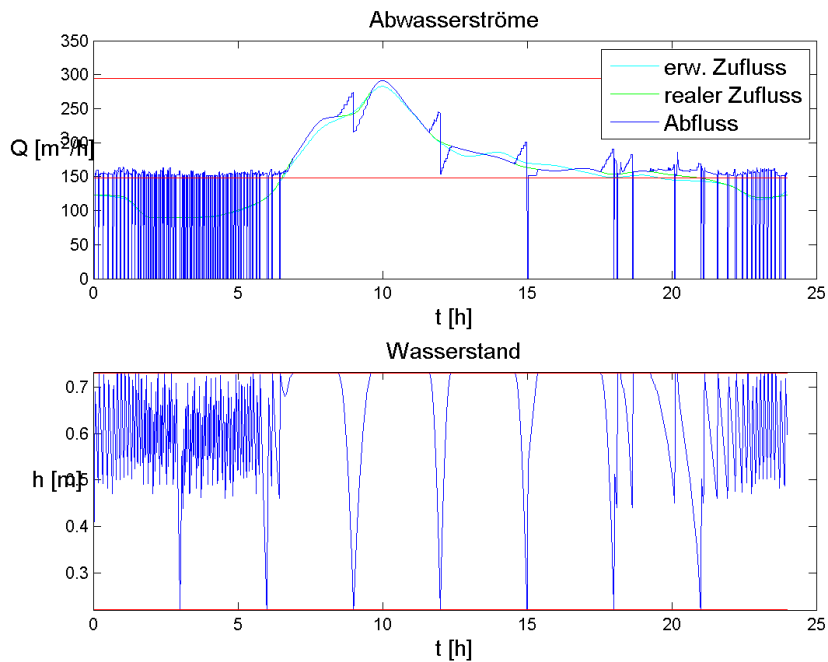


Abb. 35: Angepasste Strategie

In Abb. 36 ist zu erkennen, dass die realen Wasserstände in der Pumpenvorlage nahezu mit den optimalen Wasserständen (siehe Abb. 35) übereinstimmen. Lediglich die Förderströme unterscheiden sich aufgrund der Abweichungen des realen Abwasserzulaufs von der Prognose.

Diese Strategie hat gegenüber der regelbasierten Strategie den Vorteil, dass sich bei kleinen Abweichungen der realen Zuflüsse von der Prognose bezüglich des Wasserstandes und der einzustellenden Drehzahl an der optimalen Strategie orientiert wird. Aus diesem Grund kann die optimale Strategie verfolgt werden, wenn die Zuflussprognose in der Praxis eintritt. Die Energiekosten liegen deshalb unter den mit Hilfe der regelbasierten Strategie entstandenen Energiekosten. Zudem entfällt eine separate Berechnung des Förderstroms, der der geringsten spezifischen Energie entspricht. Weichen die realen Zuflüsse von der Prognose jedoch genügend stark ab, ist eine Orientierung an der optimalen Strategie bezüglich einer schlechten Zuflussprognose nicht sinnvoll und führt zu Energiekosten, die über denen der regelbasierten Strategie liegen.

6. Ökologische, technische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

6.1 Ökologische Bewertung

In der ersten Projektphase konnte der theoretische Energiebedarf bei Einsatz einer optimalen Steuerung bei einer Simulation auf Basis der Messdaten über ein Jahr um 5.873 kWh reduziert werden.

Laut einem Bericht des Umweltbundesamtes, betrug die Kohlenstoffemission bei der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2011 304 Mio t. Durch den Strommix in der Stromerzeugung ergibt sich für das Jahr 2011 ein CO₂-Emissionsfaktor von 559 g/kWh [Umw12]. Im HPW Prerow könnten damit in einem Jahr CO₂-Emission von ca. 3.283 kg eingespart werden.

Da in Prerow ein starker saisonaler Einfluss vorhanden ist, sind die Pumpen auf den Sommerbetrieb ausgelegt. Fände dieser Betrieb das ganze Jahr über statt, wären Energieeinsparungen von etwa 15.000 kWh pro Jahr und Pumpstation zu erwarten. Für die Hochrechnung wurde daher für die Hälfte der Pumpstationen in Mecklenburg Vorpommern (1.500) und Deutschland (25.000) diese Einsparung angenommen. Für die andere Hälfte wurde eine Energieeinsparung von 5.900 kWh pro Jahr und Pumpstation angenommen. Aus diesem Grund wurde ein Mittelwert der Energieeinsparung von 10.450 kWh pro Jahr errechnet. Die folgende Tabelle 7 zeigt die möglichen Energie- und CO₂-Einsparungen, die diese Anzahl von Pumpstationen erbringen können. Zusätzlich wurde zur Anschaulichkeit die Einsparung der CO₂-Emission in Pkw umgerechnet. Dabei wurde ein privat genutzter Pkw mit einer durchschnittlichen Fahrstrecke von 15.000 km pro Jahr betrachtet. Der genannte Pkw erzeugt in einem Jahr 2.655 kg CO₂ [Act12].

Tab. 7: Hochrechnung der jährlichen Einsparung der CO₂-Emission in MV und Deutschland

	Anzahl Pumpstationen	Energieeinsparung [kWh/a]	Einsparung CO ₂ -Emission [kg/a]	Anzahl Pkw
Mecklenburg V.	3.000	31.350.000	17.524.650	6.600
Deutschland	50.000	522.500.000	292.077.500	110.009

6.2 Technische Bewertung

Zur Umrüstung einer Pumpstation mit dem Ziel eine intelligente Drehzahlregelung zu realisieren ist die Installation eines zur Pumpe passenden Frequenzumrichters sowie eines Sinusfilters notwendig. Darüber hinaus wurde in diesem Projekt ein PC zur ständigen Berechnung der Drehzahlvorgabe und der Steuerung des Frequenzumrichters verwendet. Um den Energieverbrauch jederzeit und für beliebige Steuerstrategien quantifizieren zu können, wurde ein Energiezähler installiert, der vom PC ständig ausgelesen werden kann. Zudem war eine Integration der neuen Steuereinheit in das vorhandene System notwendig.

Bei Übertragung der hier entwickelten Steuerstrategien auf andere Pumpstationen kann auf einige Schritte der hier durchgeführten Umrüstung verzichtet werden. So ist die Installation eines Energiezählers nicht nötig, da die Verbrauchswerte im Regelfall auch aus dem

Frequenzumrichter ausgelesen werden können. Um die Energieeinsparung gegenüber der Zweipunktsteuerung ohne Frequenzumrichter ermitteln zu können, war ein solches Verbrauchsmessgerät jedoch für dieses Projekt notwendig.

Für den Fall, dass die regelbasierte Strategie implementiert werden soll, kann auf die Installation eines PCs verzichtet werden. Hier kann die Steuerung der drehzahlregelbaren Pumpe auf Basis der verschiedenen Regeln auch von der bereits vorhandenen SPS übernommen werden kann. In diesem Fall sind lediglich die in diesem Projekt entwickelten Regeln in die SPS zu integrieren und ein Frequenzumrichter und ein Sinusfilter zur Umsetzung der Steuerung nachzurüsten.

Ist ein Einsatz der regelbasierten Strategie nicht vorteilhaft oder soll der Betrieb mehrerer Pumpen in einem Abwassernetz optimiert werden, wird zusätzlich ein PC benötigt, der die Lösung der entsprechenden Optimierungsprobleme ermöglicht. Zudem muss ein System zur ständigen Übermittlung der durch den PC ermittelten Steueranweisungen für alle drehzahlregelbaren Pumpen implementiert werden.

In Prerow musste zusätzlich eine neue Pumpe angeschafft werden, da die Bestandspumpen für die Drehzahlregelung nicht geeignet sind. Auf diese Anschaffung kann unter Umständen in anderen Pumpwerken verzichtet werden. Ist dies nicht der Fall sollte bei einem geplanten Ersatz der vorhandenen Pumpe durch ein neues Exemplar auf die Eignung für die Drehzahlregelung geachtet werden, sodass eine Nachrüstung mit einem Frequenzumrichter ermöglicht wird.

6.3 Ökonomische Bewertung

Die zu erwartende jährliche Energieeinsparung in Prerow gegenüber der herkömmlichen Zweipunktsteuerung beträgt etwa 26% und entspricht einer Verbrauchseinsparung von etwa 5.900 kWh. Bei einem Strompreis von 0,15 €/kWh können somit jährlich fast 900 € eingespart werden. Die Kosten für die Installation eines zur Pumpe passenden Frequenzumrichters und eines Sinusfilters betragen mindestens 4.000 €, sodass sich die Umrüstung nach etwa 4,5 Jahren amortisiert. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei der Pumpstation in Prerow aufgrund des hohen Einflusses des Tourismus um einen Spezialfall handelt. Die Pumpe müssen hier auf die Hochsaison ausgelegt werden. Während dieser Zeit befinden sich im Raum Prerow etwa fünfmal so viele Einwohner wie in der Nebensaison. Dies hat zur Folge, dass der Zufluss zur Pumpstation in der Nebensaison wesentlich kleiner ist, was wiederum längere Stillstandszeiten der Pumpe zur Folge hat. Die absolute Energieeinsparung fällt deshalb wesentlich geringer aus als in der Hochsaison. Andere Pumpstationen in Deutschland unterliegen einer solch großen Schwankungsbreite in der Regel nicht. Wird in der Nebensaison eine ähnliche Zulaufcharakteristik wie in der Hochsaison unterstellt, so ergibt sich eine Energieeinsparung von ca. 15.000 kWh/a. Dies entspricht etwa 2.300 €/a. Die Amortisationszeit beträgt dann nur noch 1,7 Jahre. Auch bei einer zusätzlichen Installation eines PCs zu einem Preis von 1.000 € zur besseren Steuerung der Pumpe, würde sich die Amortisationszeit auf nur 2,2 Jahre erhöhen. Wird außerdem berücksichtigt, dass die Lebensdauer der Pumpe durch den Einsatz eines Frequenzumrichters erhöht werden kann, hat dies einen weiteren positiven Effekt auf die Lebenszykluskosten.

Zudem ist mit einer weiteren Steigung der Strompreise zu rechnen, wodurch die Umstellung auf drehzahlregelbare Pumpen und die Umsetzung der in diesem Projekt entwickelten Steuerstrategien noch attraktiver wird.

7. Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Um die Verbreitung der entwickelten Ideen voranzutreiben wird derzeit ein Artikel zur Einreichung bei den Fachzeitschriften „wvt - Wasserwirtschaft Wassertechnik“ und „KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall“ vorbereitet. Dieser beinhaltet die Gegenüberstellung der regelbasierten und der optimalen Strategie und soll die Möglichkeit der Energieeinsparung mittels drehzahlregelbarer Abwasserpumpen unter Verwendung einfacher Regeln verdeutlichen. Darüber hinaus wurde das Projekt beim Assistententreffen der deutschsprachigen siedlungswasserwirtschaftlichen Institute in Braunschweig im September 2012 und im Rahmen des 10. Symposium an der Universität Rostock im Mai 2012 einem breiten Publikum vorgestellt. Dazu wurde eine Posterpräsentation durchgeführt, die auf der 13. Regionalen Nachhaltigkeitsausstellung in Rostock und an folgenden Orten als Wanderausstellung stattfand:

- Rathausfoyer Rostock (04.06. - 18.06.2012)
- Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Güstrow (18.06. – 02.07.2012)
- Natur- und Umweltpark Güstrow (02.07. – 20.08.2012)
- Rathaus Graal-Müritz (20.08. – 14.09.2012).

Bei einer Fortsetzung des Projektes und Umsetzung der entwickelten Strategien sollen zudem die reale Energieeinsparung im Pumpwerk Prerow und die getesteten Maßnahmen zur Sicherstellung der Betriebssicherheit in Fachzeitschriften publiziert werden.

Die Pumpstation in Prerow soll außerdem als Referenzstation dienen, die von interessierten Abwasserbetreibern besichtigt werden kann. Diese können dann Einblick in die notwendigen Schritte zur Umrüstung der Pumpstation und Steuerung der Drehzahl bekommen. Auf diese Weise soll die schnelle Umsetzung der Drehzahlregelung auch in anderen Anlagen gefördert werden.

8. Fazit

In dem hier bearbeiteten Projekt konnten für verschiedene Anwendungsfälle Möglichkeiten zur Berechnung des Energieeinsparpotentials beim Einsatz von drehzahlgeregelten Pumpen in der Abwassertechnik entwickelt werden. Darüber hinaus wurden Strategien entwickelt, die dieses Einsparpotential größtmöglich ausschöpfen. So kann auf Basis einer Zuflussprognose die optimale Steuerstrategie bestimmt werden. Diese muss in der Realität lediglich an die tatsächlichen Zuflüsse angepasst werden, indem die optimalen Wasserstände in der Pumpenvorlage als Referenz verwendet werden. Es zeigte sich, dass in Abhängigkeit von der Güte der Zuflussprognose das Energieeinsparpotential sehr gut ausgeschöpft werden kann. Insbesondere bei der Optimierung vieler vernetzter Pumpstationen sind die Zuflüsse aufgrund

der Kenntnis der Förderströme der beteiligten Pumpen zu einem Teil bekannt. Auch für den Fall, dass die Zuflüsse auf diese Weise nicht bestimmt werden können, wurde in diesem Projekt eine Möglichkeit zur Erstellung von Zuflussprognosen entwickelt, die sehr gute Ergebnisse lieferte.

Für einfache Szenarien genügen in einigen Fällen wenige Regeln zur Steuerung des Frequenzumrichters, um die optimale Steuerstrategie annähernd nachzubilden. Eine solche Strategie kann durch eine einfache SPS realisiert werden, die bereits in Pumpstationen vorhanden ist. Diese Tatsache kann zu einer schnelleren Umsetzung der hier entwickelten Ideen in der Praxis auch an anderen Pumpstationen beitragen. Ein Einsatz einer solchen Strategie ist jedoch nur für sehr einfache Szenarien sinnvoll. Insbesondere bei wachsender Komplexität der betrachteten Abwassernetze kann eine Abstimmung der Pumpen zur intelligenten Steuerung der Förderströme bzw. Zuflüsse mit dieser Methode nicht erfolgen.

In diesem Projekt haben sich die Bearbeiter auf sehr kleine Kanalnetzausschnitte beschränkt. Diese treten deutschlandweit in einer Vielzahl von Fällen auf, sodass die Strategien und Regelungen häufig zum Einsatz kommen können. Die Überlegungen waren dabei bisher vorwiegend theoretischer Natur. Aus diesem Grund ist ein Praxistest der entwickelten Steuerstrategien vorgesehen. Dazu wurde eine Pumpstation in Prerow mit einem Frequenzumrichter und einem Sinusfilter ausgestattet. Eine numerische Simulation auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten der Pumpstation Prerow zeigte, dass durch eine intelligente Drehzahlregelung mit einer jährlichen Energieeinsparung gegenüber der derzeit vorwiegend zum Einsatz kommenden Zweipunktsteuerung ohne Drehzahlregelung in Höhe von etwa 26% zu rechnen ist. Es ist zu erwarten, dass diese Einsparung auch in anderen Pumpstationen realisiert werden kann. Wird die Hälfte der etwa 100.000 Pumpstationen in Deutschland mit der in diesem Projekt entwickelten Steuerung ausgestattet, bedeutet dies eine Energieeinsparung von über 500 Mio. kWh pro Jahr. Zudem amortisieren sich die Kosten für eine Umrüstung schnell.

Ein Praxistest der entwickelten Strategien konnte bisher nicht durchgeführt werden. Dieser ist jedoch zur Weiterentwicklung der Strategien, insbesondere hinsichtlich der Gewährleistung der Betriebssicherheit, notwendig. Durch die Verringerung der Drehzahl werden die Förderströme zeitweise vermindert, was veränderte Betriebsverhältnisse zur Folge hat. In dem bei der DBU beantragten Folgeprojekt sollen die entwickelten Steuerstrategien in der Praxis getestet werden und zur Gewährleistung der Betriebssicherheit an die neuen Betriebsverhältnisse angepasst werden. Nur wenn die Betriebssicherheit gewährleistet werden kann, werden Betreiber von Abwasserpumpstationen die energiesparenden Steuerstrategien auch tatsächlich umsetzen.

9. Literaturverzeichnis

- [Act12] ACTIV FÜRS KLIMA: *CO₂-Emissionen im Individualverkehr*, Stadt Aachen, URL: http://www.aachen.de/de/stadt_buerger/energie_klimaschutz/klimaschutz/activ_fuersklima_poster/co2_einsparung_mobilitaet.pdf, Stand: 05.03.2013
- [AWK] ABWASSERZWECKVERBAND DARSS, WASTRA-PLAN, KLÖCKNER MÖLLNER, JUNG PUMPEN: *Der Darß – Abwasserentsorgung mit Druckentwässerung*, Informationsbroschüre
- [Bau98] BAUR, H.: *Druckentwässerungsanlagen*, Universität Rostock, 1998
- [BGS05] BURGSCHWEIGER, J., GNÄDIG, B. & STEINBACH, M.: *Optimierte Tagesplanung im Berliner Trinkwassernetz*, ZIB-Report, 2005
- [BGS08] BURGSCHWEIGER, J., GNÄDIG, B. & STEINBACH, M.: *Optimization models for operative planning in drinking water networks*, Springer, 2008
- [BGS09] BURGSCHWEIGER, J., GNÄDIG, B. & STEINBACH, M.: *Nonlinear Programming Techniques for Operative Planning in Large Drinking Water Networks*, The Open Applied Mathematics Journal, 2009
- [Dea09] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GmbH: *Initiative Energieeffizienz*, 2009, URL: <http://www.industrie-energieeffizienz.de/technologien/pumpensysteme.html>, Stand 24.02.2013
- [Doh04] DOHSE, C.: *Untersuchungen zur Dimensionierung und zum Betrieb von Druckentwässerungsanlagen*, Dissertation, Universität Rostock, 2004
- [Gre12] GREENPEACE: *UN-Klimagipfel 2012, Zurück aus Doha – der Blick nach vorn*, 2012
- [Dar13] DARSSER WETTER: *Standort der Wetterstation Prerow*, URL: http://www.darsserwetter.de/dw_station.html, Stand 23.02.2013
- [Ipc01] IPCC Intergovernmental Panel on climate change: *Climate Change 2011, Synthesis Report, Summary for Policymakers*, Wembley, United Kingdom, 2001, URL: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/english/pdf/spm.pdf, Stand 23.02.2013
- [Ipc07] IPCC Intergovernmental Panel on climate change: *Climate Change 2007, Synthesis Report - Drivers of climate change*, URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/mains2-2.html, Stand 23.02.2013

- [Jun96] JUNG PUMPEN: *Prozessbeschreibung der Kommunalen Umweltschutzmaßnahme – Abwassertechnische Erschließung der Darß Gemeinden Born, Wieck und Prerow mit Abwasserüberleitung zur Kläranlage Wieck*, Darß, 1996
- [Mec12] MECK-POMM-HITS: *Der Darß schwimmt – Ostseebad Prerow steht immer noch unter Wasser*, URL: <http://www.meck-pomm-hits.de/2011/der-darsschwimmt-ostseebad-prerow-steht-immer-noch-unter-wasser/>, Stand: 23.02.2013
- [Moo11] MOORE, G: *Intelligent Control of sewage pumps*, World Pumps, Juni 2011
- [Nic12] NICKEL, M.: *Entwicklungen in der deutschen Stromwirtschaft 2012*, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Sitzung der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Hamburg, 2012
- [Oek13] ÖKOSYSTEM-ERDE: *Das Zeitalter der Industrie – Der 4. UN-Klimareport 2007*, URL: <http://www.oekosystem-erde.de/html/ipcc-4-sum.html>, Stand 23.02.2013
- [Rau091] RAUWALD, H. & KRÖBER, W.: *Automatische Abwasserförderung (Teil 1)*, wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik, Ausgabe 5, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin, 2009, URL: <http://www.p2mberlin.de/gfx/uploads/wwt0509.pdf>
- [Rau092] RAUWALD, H. & KRÖBER, W.: *Automatische Abwasserförderung (Teil 2)*, wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik, Ausgabe 6, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin, 2009, URL: <http://www.p2mberlin.de/gfx/uploads/wwt0609.pdf>
- [Sag05] SAGER, S.: *Numerical methods for mixed–integer optimal control problems. Der andere Verlag, Tönning, Lübeck, Marburg, 2005*
- [Ste00] STERLING FLUID SYSTEM GRUPPE: *Grundlagen für die Planung von Kreiselpumpenanlagen*, Itzehoe, 2000
- [TB12] THAMSEN, P. & BASHINSKIY, S.: *Abwehr von Verstopfungsereignissen – Forschung an der TU Berlin: Die Änderung der Drehzahlsequenz als Möglichkeit zur Beseitigung von Störungen in Abwasserpumpen*, wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik, Ausgabe 7-8, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin, 2012
- [Tud13] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT: *BMBF-Projekt „Odysseus“*, URL: <http://www.odysseus.tu-darmstadt.de/>, Stand: 24.02.2013
- [Umw12] UMWELTBUNDESAMT: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011*, Dessau-Roßlau, 2012, URL: <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>, Stand: 28.02.2013