

Simulationsbasierte Optimierung zur Energieersparnis und Verbrauchsflexibilisierung in der Hinterlandentwässerung

Simulation-Based Optimisation for Saving Energy and Increasing Flexibility in Hinterland Drainage Systems

Jens Heger, Thomas Voß, Leuphana Universität, Lüneburg (Germany),
jens.heger@leuphana.de, thomas.voss@leuphana.de

Abstract: The presented simulation study is used to reduce the energy consumption of pumps in a hinterland drainage system. Continuous and discrete event simulation are combined to calculate water levels, energy consumption and cost for the presented system. Simple pumping rules are compared and tested for usability. A parameter study is conducted to find optimal thresholds for the policies and shows the optimization potential. The paper shows, how a proactive pumping can reduce the cost for pumping and increase the flexibility of power consumption.

1 Motivation und Problemstellung

In Zeiten von starken Niederschlägen oder hohen Pegelständen muss insbesondere in den Deichregionen entlang der Küste und an großen Flüssen das Hinterland entwässert werden. Zu diesem Zweck werden umfangreiche Pumpsysteme verwendet, die unter hohem Energieaufwand das Regen- und Drängwasser in Flüsse zurück heben.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der simulationsbasierten Optimierung der Pumppläne, die in einem solchen Fall gefahren werden. Ziel des Beitrags ist die Herleitung und Prüfung konkreter Handlungsempfehlungen für die Flexibilisierung der Pumppläne und obendrein die Reduktion des Verbrauchs in Übereinkunft mit dem Stromangebot und die daraus resultierende Reduktion der CO₂ Emissionen.

Der zweite Abschnitt führt in das Thema von Energieverbräuchen in Produktionssystemen ein und schlägt die Brücke zu den Pumpsystemen. Der dritte Abschnitt stellt das untersuchte Szenario und die Modellierung in AnyLogic® ausführlich dar. Anschließend werden mehrere Verfahren für die Einsatzplanung des Pumpbetriebs erörtert. Ausgehend davon werden diese Verfahren in Parameterstudien, im Hinblick auf die unterschiedlichen Zielkriterien, untersucht und, basierend auf den Ergebnissen, optimiert. Ziel ist es, eine signifikante Reduktion der Energieverbräuche und weiterhin eine höhere Flexibilität zu erreichen. Diese spielt

im Rahmen der Energiewende eine große Rolle. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung und einem Literaturverzeichnis.

2 Stand der Technik

Generell ist das dynamische Ein- und Ausschalten von Maschinen im Rahmen der Betrachtung von Energieflexibilität aus der Produktion bekannt. Reinhart et al. (2012) definieren dies als die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und ohne merkliche Mehrkosten auf Schwankungen im Energiemarkt einzustellen. Ausgehend von einem Anreizsystem wie Demand Response (DR) können in der Produktion echtzeitfähige Produktionspläne genutzt werden, um kurzfristig auftretende Spitzen im Energiebedarf zu kompensieren (Li et al. 2012). Weitere Studien belegen, dass diese Flexibilität, Maschinen kurzfristig ein- und auszuschalten, sich nicht zwingend negativ auf die Auslastung auswirkt (Popp et al. 2018). Beier (2017) hat einen simulationsbasierten Ansatz entwickelt, mit dem die Komponenten und deren gegenseitige Beeinflussung eines Produktionssystems, bestehend aus Energieeinspeisung, Energiespeicherung und verbrauchenden Anlagen, analysiert werden können. Mit diesem Modell können Zusammenhänge und Interaktionseffekte z.B. zwischen der Erhöhung der Energiespeicherung oder Puffern im Produktionssystem analysiert werden, um so gesetzte Ziele der Energieverbrauchsflexibilisierung zu erreichen.

Das Konzept soll in diesem Beitrag auf Pumpen in der Entwässerung übertragen werden. Am Beispiel eines Pumpenverbundes mit mehreren Wasserspeichern wird das Anwendungsfeld der Simulationsstudie beschrieben. Das energieeffiziente Pumpen von Flüssigkeiten ist für mehrere Branchen relevant, zum Beispiel für die Wasserversorgung, die Wasserentsorgung oder die Entwässerung.

In der Literatur werden Pumpen mit konstanter Drehzahl üblicherweise als mathematisches Modell beschrieben und ein optimaler Plan kann statisch berechnet werden. Ziel der Optimierung ist dann die Reduzierung des Energieverbrauchs, der Einschaltvorgänge oder der Gesamtlaufzeit der Pumpen. Häufig werden diese Pläne dazu diskretisiert und mit unterschiedlichen Zeithorizonten (von 0,25 bis 0,5 Stunden) betrachtet (Zhuan und Xia 2013). Aufgrund der hohen Komplexität werden unter anderem auch heuristische Ansätze wie Particle Swarm Optimization in Kombination mit Simulation angewendet (Tang et al. 2014; Yazdi et al. 2016). Im Rahmen der technischen Weiterentwicklung sind moderne Pumpen inzwischen in der Lage, ihre Drehzahl zu regeln und an die Gegebenheiten anzupassen. Fecarotta et al. (2018) beschreiben den Anwendungsfall eines Stadtentwässerungssystems mit drehzahlgeregelten Pumpen, was das Problem hoch komplex macht. Die Autoren vernachlässigen bei ihrem Beitrag den Aspekt der Energieflexibilität ebenso wie den schwankenden Strompreis. Ausgehend von der Zunahme der regenerativen Energien und der daraus resultierenden Netzdynamik wird das dynamische Zu- und Abschalten von Verbrauchern im Rahmen des netzdienlichen Verhaltens jedoch hoch relevant und monetär attraktiv. Durch globale Optimierung mit Hilfe mathematischer Modelle, ausgelegt für Demand Response, können z.B. Wasser-Verteilungs-Systeme ihre Ausgaben und CO₂ Emissionen reduzieren (Menke et al. 2016). Das Potenzial wird noch zusätzlich verstärkt, wenn Pumpen mit dynamischer Drehzahl für DR genutzt werden, ungeachtet dem Zustand, dass dies das Problem zusätzlich komplex macht. Menke et al. (2017) beschreiben dies bereits für Verteilsysteme in der

Wasserversorgung. Entsprechende Beiträge für die Entwässerung von Städten und dem Hinterland sind bisher nicht bekannt.

Im Regelfall werden Niederschlags-Abfluss-Modelle als kontinuierliche Simulation (auch hydraulische Simulation genannt) mit einem hohen Detailgrad bzgl. des Gebietes, der Steigungen, Rohrleitungen, und hydrologischen Eigenschaften durchgeführt. Im Gegensatz dazu, sind Ein- und Ausschalten der Pumpen und der neue Strompreis, der alle 15 Minuten von der Leipziger Strombörse verfügbar ist, diskrete Ereignisse, die auch so modelliert werden.

Dieser Beitrag behandelt die Erstellung eines flexiblen Pumpplans. Dazu wird die Kombination aus kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulation eingesetzt, wie es bereits im Umfeld der Produktion vereinzelt stattfindet (Antonelli et al. 2018).

3 Szenario

In Abschnitt 3.1 wird das reale Szenario in Norddeutschland, inklusive der verwendeten Daten, die in das System integriert wurden, beschrieben. Es folgt in Abschnitt 3.2 die Notwendigkeit zur Kombination aus diskreter und kontinuierlicher Simulation gefolgt von der Beschreibung der unterschiedlichen Pumpszenarien in Abschnitt 3.3.

3.1 Technische Beschreibung des Szenarios

Der Unterhaltungsverband (UHV) Kehdingen ist einer von 114 Verbänden in Niedersachsen und betreibt Schöpfwerke an der Elbe und im Umland auf einer Fläche von 28.000 ha. Die wichtigste Aufgabe des Verbandes besteht darin, das Wasser aus dem natürlichen Niederschlagsgebiet abzuleiten. Für bis zu 900.000 € pro Jahr Energiekosten bzw. 1400 Millionen Gramm CO₂ (1400 Tonnen) betreibt der UHV Kehdingen 160 Schöpfwerke, die mit verschiedenen Pumpen ausgerüstet sind. Im Rahmen des Projektes „Schöpfwerk 4.0“ wird ein Testszenario in der Region um Hamburg untersucht, in dem folgende Messwerte erfasst werden: Pegelstände in den Poldern, Pegelstand in der Elbe, Energieverbrauch der einzelnen Pumpen und Wetterereignisse durch lokale Regenmessung. Ein Ausschnitt aus dem identifizierten Anwendungsgebiet wird in diesem Beitrag abgebildet.

Die Pumpen sind im Verbund angeordnet, zu erkennen in Abbildung 1. Es handelt sich um drei kleine und eine große Pumpe, gekennzeichnet durch die Häuser auf der Karte. Der Zulauf der drei Eingänge wird in diesem Modell mit einer exponentiellen Verteilung beschrieben, um Regenereignisse abzubilden. Die Pegelstände der Elbe werden als Sinus mit einer Periodenlänge von sechs Stunden und einer Amplitude von $\pm 1,5$ Meter modelliert. Die Leistungswerte der Pumpen sind ähnlich zu den vorhandenen Pumpen. Einzelne Kennlinien der Pumpen liegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor.



Abbildung 1: Ein Ausschnitt aus dem Gebiet des Unterhaltungsverband Kehdingen. Die Größe der Häuser repräsentiert die Leistung der Pumpe.

Die Modellierung der Pumpen beinhaltet unter anderem Faktoren wie den aktuellen Stromverbrauch. Dieser basiert auf der Höhendifferenz von vor- und nachgelagerten Tanks und wird stets neu berechnet. Die Pumpe arbeitet somit gegen unterschiedliche Wasserhöhen und hat folglich starke Schwankungen im Stromverbrauch. Wie in Abbildung 2 (Pumpe der Firma KSB) zu erkennen ist, beeinflusst das Verhältnis von Förderhöhe und Förderstrom auch den Wirkungsgrad der Pumpe. Dies ist entscheidend, da die Station in die nahegelegenen Flüsse pumpt, die von Ebbe und Flut beeinflusst werden und bis zu 1,5 Meter um den Mittelwert schwanken.

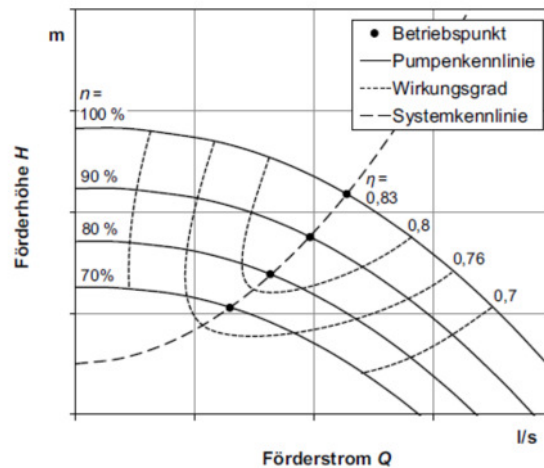


Abbildung 2: Ein Kennfeld für eine drehzahlgeregelte Pumpe mit Angaben zu Förderstrom, Förderhöhe, Wirkungsgrad und Drehzahl.

In vielen der aufgeführten Publikationen ist bereits eine Betrachtung der unterschiedlichen Strompreise integriert, so zum Beispiel die Betrachtung nach Lastprofilen mit Standardlast und Spitzenzeiten von 9 Uhr bis 13 Uhr und 19 Uhr bis 22 Uhr, die mit höheren Preisen versehen sind. Die „Off Peak“-Zeiten von 22 Uhr bis 8 Uhr hingegen sind vergleichsweise günstig. Es wird hierbei jedoch in den seltensten Fällen von dynamisch schwankenden Strompreisen ausgegangen. In diesem Beitrag werden die Strompreise der Leipziger Strombörse nachempfunden. Diese werden im 15-Minuten-Intervall aktualisiert, was auch für diesen Beitrag übernommen wird. In Abbildung 3 ist ein beispielhafter Ausschnitt der Preise an der Strombörse, European Energy Exchange (EEX), aus dem Mai 2018 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die gemittelten Werte für eine Stunde.

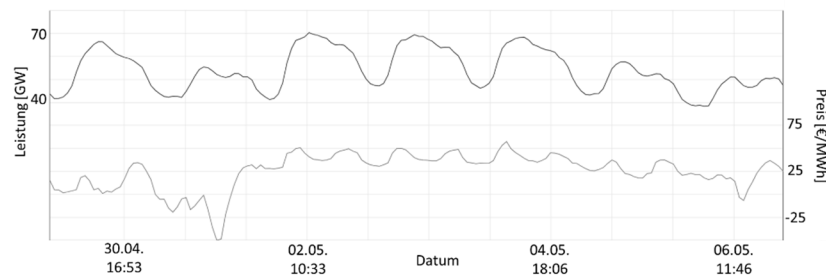


Abbildung 3: Die Werte für den Strompreis (unten, Ordinaten-Achse rechts) und Lastgang (oben, Ordinaten-Achse links) aus dem Mai 2018.

3.2 Kombination aus kontinuierlich und diskreter Simulation

Die Verknüpfung aus kontinuierlicher und diskreter Simulation wird genutzt, um die Kombination aus getaktetem Strompreis und dem Pegelstand des Gewässers zu modellieren. Wird der Pegelstand betrachtet, so handelt es sich um einen kontinuierlichen Wert. Da die Pumpen eingeschaltet werden müssen, wenn 90 % des maximalen Wassertandes erreicht sind, muss dieses entsprechend modelliert werden. Eine Betrachtung des Wasserstandes in diskreten Zeitabständen könnte zu einem Überlaufen des Reservoirs und zu massiven Schäden in der Umgebung führen. In Gegensatz dazu werden alle 15 Minuten neue Strompreise abgerufen. Für alle Ereignisse im dem 15-Minuten-Intervall wird also der letzte gültige Strompreis verwendet. Ein kürzeres Intervall ist, wenn auch theoretisch möglich, in der Praxis nicht realisierbar.

3.3 Pump-Szenarien

In diesem Beitrag sind vier Szenarien mit entsprechenden Pumpverfahren implementiert. Im ersten Fall „S-I“ werden Pumpen betrieben, wenn ein definierter Wasserstand erreicht ist. Unabhängig von Stromkosten und Energieverfügbarkeit werden die Pumpen an ihrem ausgelegten Leistungspunkt betrieben. Dieses Verfahren ist grundsätzlich aktiv und stellt eine notwendige Entwässerung der Region sicher.

Im zweiten Szenario „S-II“ werden die Pumpen betrieben, wenn der Strom zum aktuellen Zeitpunkt günstig ist, d.h. er unterhalb eines definierten Preises pro kWh liegt. Zusätzlich bleibt die Füllstandsregelung aus S-I als Sicherheitsmaßnahme aktiv.

Im dritten Szenario „S-III“ werden die Pumpen betrieben, wenn die relative Förderhöhe und somit die benötigte Energie gering ist. Es wird also bei einem niedrigen Außenpegelstand gepumpt. Zusätzlich bleibt auch hier die Füllstandsregelung als Sicherheitsmaßnahme aktiv.

Die unterschiedlichen Verfahren ermöglichen auch eine Mischform, d.h. ein Pumpen, wenn der Strom günstig ist und zusätzlich, wenn das Wasser unter einem gewissen Pegelstand steht. Diese Politik ist mit „S-IV“ benannt.

4 Ergebnisse der Simulationsstudie

Ausgehend vom einfachsten aller Szenarien, dem Ein- und Ausschalten wenn maximale Pegelstände erreicht sind, werden verschiedene Strategien mit Hilfe der Simulation verglichen. Für die Abbildungen der Kosten über die Zeit und zur Verdeutlichung der Zusammenhänge wurden für die ersten drei Verfahren dieselben Zufallszahlen verwendet. Die Betrachtung der Ergebnisse wird in Abschnitt 4.1 durchgeführt.

Die Betrachtung der Schwellwerte im Rahmen einer Vorstudie, hat ergeben, dass die Schwellwerte für niedrige Gesamtkosten bei einem Preis-Schwellwert im Bereich um 1 Cent pro kWh und bei einem Pegelstand von etwa 7 Meter liegen. Das Verhalten und die Optimierung der Werte müssen im Detail noch näher untersucht werden. Diese Parameterstudie zum Verhalten der Kosten bei verschiedenen Schwellwerten ist in Abschnitt 4.2 gezeigt.

Ausgehend vom 7-tägigen Simulationsmodell, das mit 30 Replikationen wiederholt wurde, werden im Folgenden die vier Verfahren und die resultierenden Vergleichswerte gegenübergestellt. Die verwendeten Kennzahlen sind die Menge an verbrauchtem Strom, die entstandenen Kosten sowie die Betriebsstunden. Ein Maß für den Flexibilitätsgrad wurde nicht eingeführt. Die Tabelle 1 zeigt, dass für das Szenario II die günstigsten Kosten mit dem höchsten Energieverbrauch erreicht werden können. In Szenario III werden geringfügig höhere Kosten erzeugt, jedoch ist der Energieverbrauch signifikant geringer. Weiterhin ist auffällig, dass im kombinierten Szenario bei allen Indikatoren nur mittelmäßige Ergebnisse erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass bei den verwendeten Parametern für die Schwellwerte eine Interaktion stattfindet, die zu entsprechenden Ergebnissen führt. Eine Analyse der variierten Schwellwerte wird kurz in Abschnitt 4.3 behandelt.

Tabelle 1: Die Kennzahlen der unterschiedlichen Verfahren im Mittelwert.

Szenario	Betriebsstunden [h]	Kosten [€]	Energieverbrauch [kWh]
Szenario-I (IO)	234,83	21,66	887,55
Szenario-II (bei 0,9 Cent)	239,30	17,72	1016,2
Szenario-III (bei 7,1 Meter)	232,59	17,75	749,25
Szenario-IV (kombiniert)	236,26	18,25	920,75

4.1 Verlauf der Simulation

Um die Strategien über ihre Laufzeit vergleichen zu können, wurden diese zusätzlich mit derselben Reihenfolge von Zufallszahlen simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 zu sehen. Hier ist zusätzlich zum Strompreis (vorletzte Zeile der Abbildung) und dem Außenpegelstand (letzte Zeile) über die Zeit der Lastgang einer Pumpe im System für die drei Pumpverfahren abgebildet. Deutlich ist der zyklische Einfluss von Ebbe und Flut auf die Last der Pumpe zu erkennen. Weiterhin sind Bereiche zu identifizieren, die in sehr günstigem Pumpen resultieren. Exemplarisch kann hier der Bereich zwischen den Nummern (1) und (2) genannt werden, wobei sowohl hoher Stromverbrauch an der Pumpe als auch niedriger (negativer) Strompreis zusammenfallen.

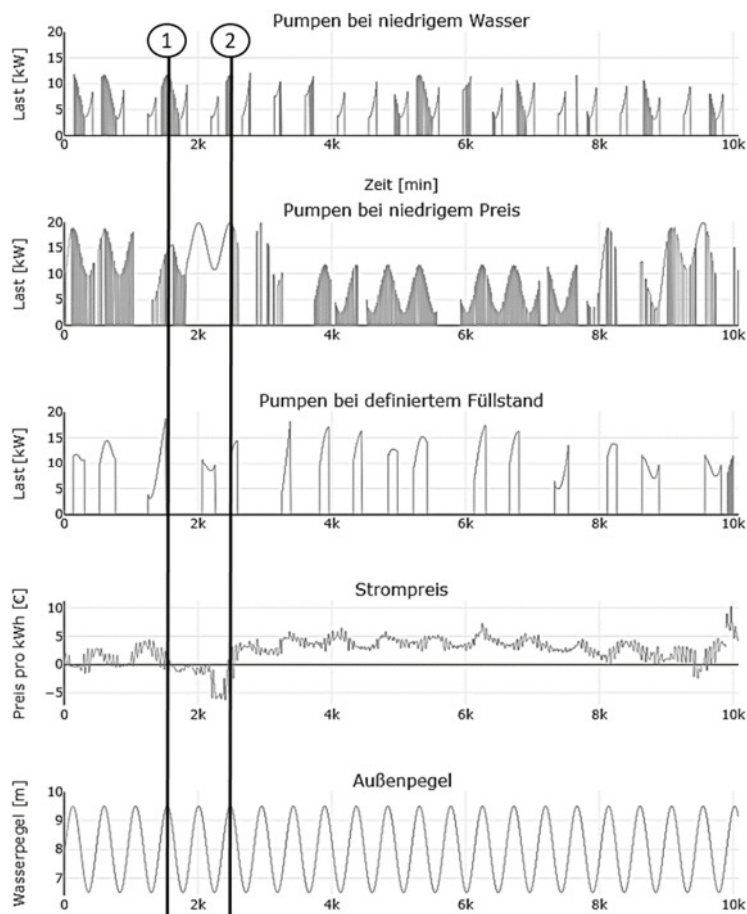


Abbildung 4: Energieverbrauch und Stromkosten für einen einzelnen Simulationslauf.

Für das Verfahren S-I (dritte Zeile der Abbildung 4) ergeben sich Kosten von 22,12 €, bei einem Stromverbrauch von 955 kWh und 239,26 Betriebsstunden. Die Lastspitzen liegen bei etwa 17 kW.

Im Vergleich der einzelnen Szenarien in Abbildung 4 ist deutlich zu erkennen, dass die Menge der Pumpvorgänge in S-III (zweite Zeile von oben) mehr geworden ist. Es sind jedoch deutlich geringere Lastniveaus und weniger stark ausgeprägte Spitzen zu erkennen. Die längsten Pumpvorgänge sind eindeutig in den Bereichen anzuordnen, in denen niedrige Stromkosten (unter dem Wert von 1 Cent pro kWh) zu finden sind. In diesem Szenario werden Kosten von 18,59 € mit 931 kWh und 241,28 Betriebsstunden erzeugt. Die Lastspitzen liegen bei bis zu 20 kW.

In der obersten Zeile wird die Pumpe bei niedrigem Wasserstand betrieben. Das Verhalten führt zu vielen kurzen Pumpzyklen, unabhängig von den Kosten. In diesem Szenario entstehen Kosten von 17,14 € bei einem Verbrauch von 774 kWh mit 240,96 Betriebsstunden. Im Vergleich zu S-I wird ähnlich lange gepumpt, jedoch mit geringerer Last und somit zu einem geringeren Gesamtpreis. Die Lastspitzen liegen bei 12 kW.

4.2 Betrachtung der Schwellwerte

Für die Parameterstudie der Schwellwerte, beim Einschalten der Pumpe bei einem geringen Strompreis, zeigt die Abbildung 5 einen kontinuierlich steigenden Trend von wachsenden Kosten mit zunehmendem Preis-Niveau. Ausgehend von einem längeren Pumpbetrieb ist dies jedoch plausibel zu erklären. Die Annäherung an ein Minimum bei geringen Strompreisen kann durch das seltene Vorkommen der einzelnen Vorfälle erklärt werden.

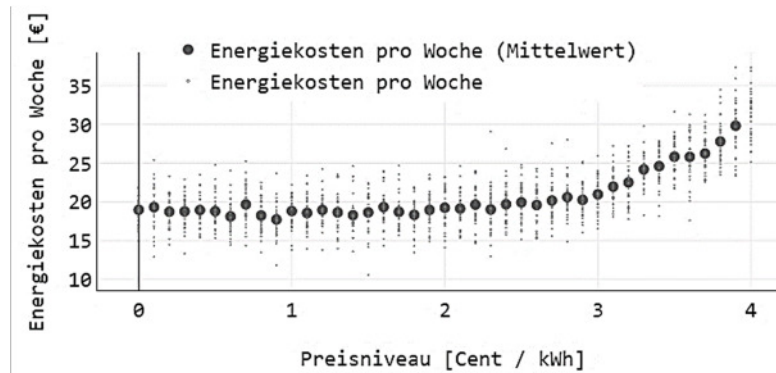


Abbildung 5: Energiekosten für das jeweilige Preisniveau, ab dem gepumpt wird.

In der Abbildung 6 ist zu erkennen, dass ein ähnliches Verhalten zum Szenario II vorliegt. Bei höheren Außenpegelständen wird grundsätzlich länger gepumpt. Es ist jedoch offensichtlich, dass ein Pumpen bei niedrigen Wasserständen ebenfalls hohe Kosten verursacht. Es ist also davon auszugehen, dass in diesem Fall der Wasserabtransport nicht ausreichend ist. An dieser Stelle sollten die Häufigkeit der S-I Anteile und eine Betrachtung der Verbrauchten kWh ansetzen, da ein Pumpen gegen niedrigere Wasserpegel generell zu einem energiereduzierten Gesamtergebnis führen sollte.

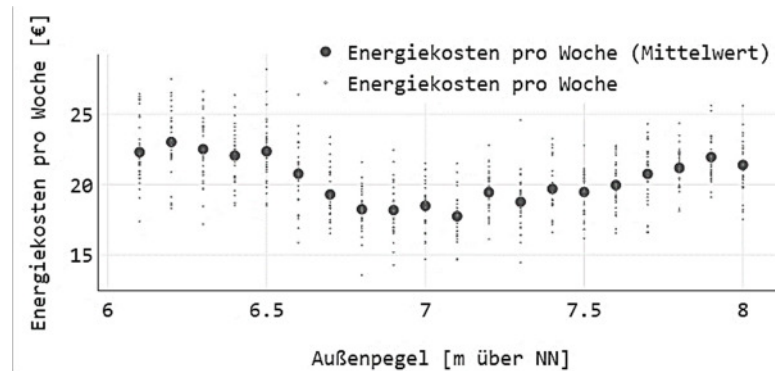


Abbildung 6: Energiekosten für die unterschiedlichen Außenpegelstände, ab denen gepumpt wird.

4.3 Eine Kombination aus S-II und S-III:

Ausgehend von einem Pumpen bei niedrigem Wasserpegel, um Energie zu sparen, und einem Pumpen bei niedrigem Preis-Niveau, um Geld zu sparen, wurde eine Mischpolitik getestet. Da davon auszugehen ist, dass sich die einzelnen Verfahren gegenseitig beeinflussen, wurde eine Parameterstudie für die Kombination der verschiedenen Parameter aus S-II und S-III durchgeführt. Die jeweiligen Schwellwerte der beiden Politiken wurden variiert und in Kombination getestet. In der Abbildung 7 sind die Parameterkombinationen als Punkte dargestellt. Auf der Abszisse sind die unterschiedlichen Preis-Schwellwerte von null bis vier dargestellt, gleiche Symbole repräsentieren gleiche Pegel-Schwellwerte. Wie schon die einzelnen Verfahren zeigten, sind mit steigenden Schwellwerten höhere Kosten verbunden. Es ist jedoch auffällig, dass der Pegel-Schwellwert einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkosten sowie den Trend der Kosten hat. Die Abbildung bietet ebenfalls die Möglichkeit die in Abschnitt 4.2 gefundenen Parameter im Vergleich zu anderen Lösungen in Kontext zu setzen. So scheint es, als könnten in der Interaktion andere Kombinationen bessere Ergebnisse liefern. Die genauen Interaktionseffekte sollen im Rahmen des Forschungsprojektes und zukünftiger Publikationen erarbeitet und analysiert werden.

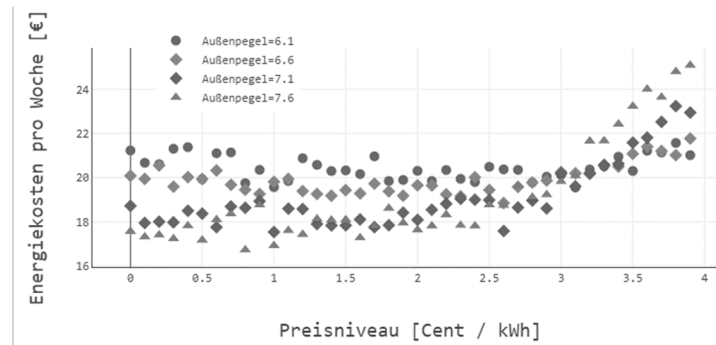


Abbildung 7: Die unterschiedlichen Kombinationen aus Preisniveau und Außenpegelstand resultieren aus signifikant unterschiedlichen Energiekosten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Beitrags wurde eine Simulationsstudie mit dem Ziel der Optimierung der Energieersparnis in der Hinterlandentwässerung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden kontinuierliche und ereignisdiskrete Simulation in einem Modell kombiniert, das Wasserstände, Energieverbräuche und Kosten berechnen kann. Ausgehend von einer Basislösung wurden unterschiedliche Verfahren verglichen, die zu einer Reduktion der Kosten und Energieverbräuche führen können. Die Parameterstudie ermöglicht es, Aussagen über das Systemverhalten zu treffen und zeigt Optimierungspotenziale auf. Das beste Verfahren, das proaktive Pumpen bei einem definierten Wasserstand, führt zu einer Reduzierung der Verbräuche. Das Skalieren der Lösung sowie die Optimierung der Verfahren können nächste Schritte sein.

Anmerkungen

Dieser Beitrag wird durch das Verbundvorhaben „Schöpfwerk 4.0“ unter der Nummer 03EN2008A im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Literatur

- Antonelli, D.; Litwin, P.; Stadnicka, D.: Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP* 78 (2018), S. 178–183.
- Fecarotta, O.; Carravetta, A.; Morani, M.; Padulano, R.: Optimal Pump Scheduling for Urban Drainage under Variable Flow Conditions. *Resources* 7 (2018) 4, S. 73.
- Li, L.; Sun, Z.; Tang, Z.: Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems: Challenges and a case study. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2012, Seoul, Korea (South), 8/20/2012 - 8/24/2012, 2012, S. 353–357.
- Menke, R.; Abraham, E.; Parpas, P.; Stoianov, I.: Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling. *Applied Energy* 170 (2016), S. 377–387.
- Menke, R.; Abraham, E.; Parpas, P.; Stoianov, I.: Extending the Envelope of Demand Response Provision through Variable Speed Pumps. *Procedia Engineering* 186 (2017), S. 584–591.
- Popp, R.S.H.; Liebl, C.; Zaeh, M.F.: A Multi-level Procedure to Evaluate the Energy Flexibility Potential of Production Machines. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 75–80.
- Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme. *Einführungen zur Bewertung der Energieeffizienz von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online* 102 (2012) 9, S. 622–628.
- Tang, Y.; Zheng, G.; Zhang, S.: Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 55 (2014), S. 572–580.
- Yazdi, J.; Choi, H.S.; Kim, J.H.: A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems. *Journal of Hydro-environment Research* 11 (2016), S. 101–112.
- Zhuan, X.; Xia, X.: Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps. *Applied Energy* 104 (2013), S. 250–257.