

ABSCHLUSSBERICHT

H₂Opt

Interaktive Entscheidungsunterstützung für das Betriebs- und Energiemanagement von Wasserversorgungsbetrieben auf der Grundlage von mehrkriteriellen Optimierungsverfahren

PROJEKTLAUFZEIT: 04/2014 - 06/2017

PROF. DR.-ING. M. BÖHLE

DIPL.-ING. C. GEIL

DR.-ING. H. ROCLAWSKI

DIPL.-ING. A. KNAPP

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02WER1324 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



**Lehrstuhl für Strömungsmechanik
und Strömungsmaschinen**

Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
1 Kurze Darstellung des Projektes.....	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Voraussetzungen.....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2 Eingehende Darstellung des Projektes.....	8
2.1 Erzielte Projektergebnisse.....	8
2.1.1 AP1: Projektsteuerung und -koordination	8
2.1.2 AP2: Erstellung der Datenbasis	10
2.1.3 AP3, 4 & 7: Modellbasierte Simulation mit Interaktiver Entscheidungsunterstützung 14	
2.1.4 AP5: Validierung der Simulation	33
2.1.5 AP6: Optimierung.....	40
2.1.6 AP8: Pilotprojekt	44
2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	50
2.2.1 Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM)	50
2.2.2 Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM).....	51
2.2.3 SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG (SWK)	51
2.2.4 EWR Netz GmbH (EWR).....	51
2.2.5 Obermeyer Planen + Beraten GmbH (OPB)	51
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit.....	52
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse	52
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	53
2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse	54
3 Literatur.....	58

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Skizze des Zusammenwirkens der Softwarekomponenten. Die Grafiken im Kopf der Abbildung sind von links nach rechts: Ausschnitt des Wasserwerkes, Beispiel für ein Rohrleitungsnetz aus EPANET, Slider-Funktionalität in der interaktiven Entscheidungsunterstützung. Die rot eingefärbten Module stellen die graphischen Schnittstellen (GUIs) zum Anwender dar.....	1
Abb. 2: Graphische Benutzeroberfläche zur Datenbankkommunikation	11
Abb. 3: Optimierungspotentiale aus Sicht der Betreiber.....	12
Abb. 4: Art der Wassergewinnung – H ₂ Opt-Umfrage (oben) und Statistisches Bundesamt 2010 (18) (unten).....	13
Abb. 5: Skizze Anlagenmodell EWR.....	14
Abb. 6: Schema des Anlagenkennfeldes: (a) Abhängigkeit des Kennlinienverlaufs von Behälterstand und Netzverbrauch (b) aufgespanntes Anlagenkennfeld.....	15
Abb. 7: Förderhöhen- und Wirkungsgradverlauf bei reduzierter Drehzahl.....	16
Abb. 8: Anlagenschema der Normalzone inklusive deren Anschlüsse ans Wasserwerk Barbarossastraße, an die Hochbehälter und an die Hochzone.....	18
Abb. 9: Tiefensuche im Entscheidungsbaum (Branch-and-Bound)	20
Abb. 10: Vergleich der Trübungswerte der einzelnen Spülprogramme	21
Abb. 11: Energieeinsparpotentiale pro Jahr an der Filteranlage im Wasserwerk Barbarossastraße (SWK).....	22
Abb. 12: EPANET-Modell des Stadtgebietes Dansenberg.....	23
Abb. 13: Einfluss der Absenkung des Wasserspiegels auf die Anlagenkennlinie.....	23
Abb. 14: Zeitliches Absenkverhalten am Beispiel von Brunnen H (SWK, PLS-Daten vom Januar 2015)	24
Abb. 15: Brunnenskizze (oben) und EPANET-Modell (unten) für Brunnen D (SWK)	25
Abb. 16: Netzverbrauchsprofil eines Werktages (Mi. 17.07.2013) für das Versorgungsgebiet der EWR; Messdaten und Fourier-geglätteten Daten.....	26
Abb. 17: Tagesverbrauchsprofile des EWR Versorgungsnetz, gemittelt für die Gesamtverbrauchscluster	27
Abb. 18: Tagesverbrauchsprofil, Modellverlauf und Unterteilung exemplarisch für ein Gesamtverbrauchscluster	27
Abb. 19: Gegenüberstellung prognostiziertes und reales Verbrauchsprofil.....	28
Abb. 20: Abbildung Versorgungsschema EWR im Drag&Drop-Editor der H ₂ Opt Software.....	29
Abb. 21: Startfenster der H ₂ Opt Software	30
Abb. 22: Verbrauchsdaten Editor der H ₂ Opt Software	31
Abb. 23: Darstellung der Lösungsmöglichkeiten zwei- (links) und dreidimensional (rechts) in der H ₂ Opt Software	31

Abb. 24: Pumpenfahrpläne in der H ₂ Opt Software - Softwarelösung (oben) vs. modifizierte Lösung (unten).....	32
Abb. 25: Fördermengenvergleich zwischen Messung und Simulation (SWK, Brunnen 17).....	34
Abb. 26: Validierung des Anlagenkennfeldes des Wasserwerkes Bürstadt.....	35
Abb. 27: Validierung des Anlagenkennfeldes des Wasserwerkes Barbarossastraße	35
Abb. 28: Erstellter Pumpenfahrplan für das Wasserwerk Barbarossastraße.....	36
Abb. 29: Automatisierte Fahrweise der Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße	36
Abb. 30: Fördermengenverläufe der Brunnen im Gewinnungsgebiet KL-Ost am 08.08.2015	38
Abb. 31: Fördermengenverläufe der Brunnen 12a, 17, D, E und G während der Durchführung des Messprogrammes am 21.06.2017 zwischen 10:00 und 16:00 Uhr.....	39
Abb. 32: Fördermengenverläufe der Brunnen 12a, 17, B, D, E und G während der Durchführung des Messprogrammes am 22.06.2017 zwischen 08:15 und 13:45 Uhr	39
Abb. 33: Vergleich Betriebsweise alte und aktuell verbaute Pumpen.....	40
Abb. 34: Gegenüberstellung Kosteneffizienz und Energieeffizienz	41
Abb. 35: Gegenüberstellung täglicher Wasseraustausch und Wasseraustausch alle drei Tage.....	41
Abb. 36: Auswahl eines Fahrplans.....	42
Abb. 37: Gegenüberstellung vorgesehener und modifizierter Fahrplan	43
Abb. 38: Pumpenfahrpläne im täglichen Betrieb.....	43
Abb. 39: Schematische Übersicht Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost (SWK)	45
Abb. 40: Kennlinienvergleich Brunnen 12a: Förderhöhe (links) und Wirkungsgrad (rechts)	46
Abb. 41: Kennlinienvergleich Brunnen I: Förderhöhe (links) und Wirkungsgrad (rechts)	46
Abb. 42: Kennlinien der alten Pumpe mit Betriebsspektrum von Brunnen D	47
Abb. 43: Kennlinien der neu ausgewählten Pumpe mit Betriebsspektrum von Brunnen D.....	47
Abb. 44: Virtuelles Speichervolumen in Abhängigkeit vom Behälterstand Rohwasserbehälter Salingsmühle	48
Abb. 45: Reaktionsverhalten des Behälterstandes im Rohwasserbehälter Salingsmühle.....	49

1 Kurze Darstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt „Interaktive Entscheidungsunterstützung für das Betriebs- und Energiemanagement von Wasserversorgungsbetrieben auf der Grundlage von mehrkriteriellen Optimierungsverfahren“ (H₂Opt) hatte das Ziel eine Software zu erstellen, die es ermöglicht, eine Optimierung von Anlagen zur Trinkwasserversorgung unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten durchzuführen. Die Software soll dabei eine ganzheitliche Betrachtung der Anlage ermöglichen. Somit können alle Komponenten einer Trinkwasserversorgungsanlage, aus den Bereichen Wassergewinnung, Wasseraufbereitung, Wasserspeicherung und Wassertransport, die bedeutsam für den Energieverbrauch sind, virtuell abgebildet werden.

Der Aufbau der Software ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

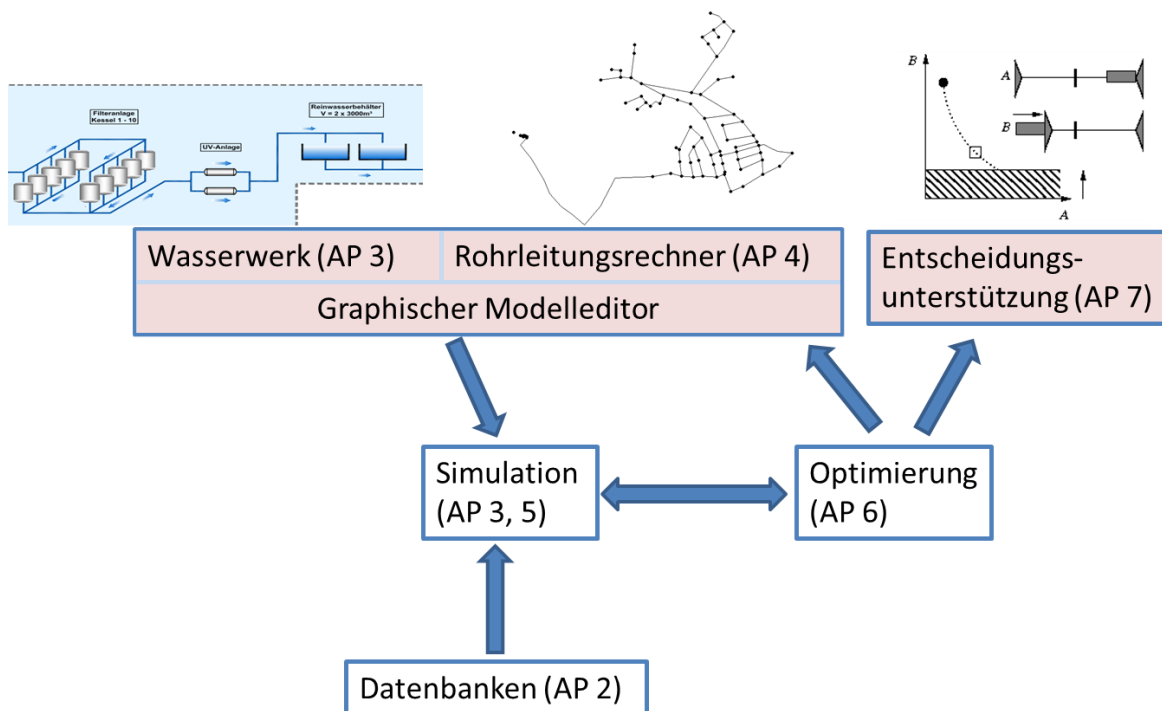


Abb. 1: Skizze des Zusammenwirkens der Softwarekomponenten. Die Grafiken im Kopf der Abbildung sind von links nach rechts: Ausschnitt des Wasserwerkes, Beispiel für ein Rohrleitungsnetz aus EPANET, Slider-Funktionalität in der interaktiven Entscheidungsunterstützung. Die rot eingefärbten Module stellen die graphischen Schnittstellen (GUIs) zum Anwender dar.

Der Ansatz, der in diesem Projekt verfolgt wurde, erlaubt dem Anwender, die betrachteten Zeitskalen (z.B. stündlich, täglich,...) selbst zu definieren. Anhand von charakteristischen kann Verbrauchsprofilen eine Optimierung für den täglichen Betrieb anhand eines umfangreichen Modells einer Trinkwasserversorgungsanlage durchgeführt werden. Eine Online-Optimierung des Betriebs in Kombination mit der entsprechenden Messtechnik war im Rahmen des Verbundprojektes zunächst nicht vorgesehen.

Der Schwerpunkt lag in dem Verbundprojekt H₂Opt auf der Entwicklung der Software zur Entwurfsplanung von Trinkwasserversorgungsanlagen.

Die entwickelte Software bietet als Alternative zum Rohrleitungsnetz die Möglichkeit ein Lastprofil und das Anlagenkennfeld in Form von Messdaten anzugeben. Diese Daten liegen bei jedem Wasserwerk vor, sind leicht messbar und können von der Software zur Optimierung der Betriebsführung oder Auslegung von einzelnen Komponenten verwendet werden. Neben dem Rohrleitungsnetz sollte vor allem auch das Wasserwerk mit den Pumpen als Hauptverursacher der Energiekosten betrachtet werden. Dem Anwender der H₂Opt Software stehen somit viel mehr Parameter für die Optimierung der Anlage zur Verfügung. Weitere wesentliche Unterscheidungsmerkmale zu konventionellen Rohrleitungsrechnern sind die integrierte Komponentendatenbank, maßgeschneiderte Optimierungsalgorithmen, die Lebenszykluskostenanalyse und die graphische Oberfläche zur Entscheidungsunterstützung.

1.2 Voraussetzungen

Der Betrieb eines Wasserwerkes ist charakterisiert durch über den Tag verteilte starke Schwankungen in der Trinkwasserabnahme durch die Verbraucher und durch eine schwankende Verfügbarkeit der Brunnenkapazitäten. Weiterhin müssen Anlagenplaner und -betreiber konkurrierende Zielvorgaben erfüllen: Einerseits sind die Versorgungssicherheit und die Trinkwasserqualität sicherzustellen. Andererseits muss auf möglichst hohe Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit geachtet werden. Dies ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen geboten: Eine hohe Kosteneffizienz entlastet das Gemeinwesen; eine hohe Energieeffizienz im Anlagenbetrieb und eine Nachhaltigkeit in der Wasserbewirtschaftung beschränken den Ressourcenverbrauch auf ein Minimum. Gerade dieser letzte Punkt ist mit der angestrebten Energiewende der Bundesregierung und dem Bewusstsein um den hohen ökologischen Wert von Energieeinsparungen sowie dem zu erwartenden klimatischen und demographischen Wandel zu einem Imperativ geworden. Da etwa 20 % des Stromverbrauchs der öffentlichen Ausgaben auf die Trinkwasserversorgung entfallen (1), haben Einsparungen hier einen beträchtlichen Stellenwert.

Trotz dieser eindeutigen Zielvorgaben findet zurzeit nur ansatzweise eine Optimierung von Trinkwasserversorgungsanlagen unter diesen Aspekten statt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass das Potential beträchtlich ist: Eine Studie anhand von Messungen von 2500 Brunnenpumpen zeigt, dass ca. 37 % aller Brunnen zu hohe Energiekosten aufweisen, da die Pumpen nicht im optimalen Betriebsbereich betrieben werden (2). Dass derart offensichtliche Einsparpotentiale nicht genutzt werden, hat verschiedene Gründe (3). Oft sind zwar Energieeinsparpotentiale bekannt, jedoch werden diese aus Zeitgründen nicht genauer betrachtet bzw. umgesetzt. Auf Grund der Vielzahl an Parametern und deren komplexen Korrelationen wird die mehrkriterielle Optimierungsaufgabe in der Praxis nur unzureichend gelöst: Oft genug findet nur ein Optimierungsversuch mit empirischen „Trial & Error“-Methoden statt, die zeitaufwändig sind, sehr stark von Erfahrungswerten abhängen und keine Optimalität garantieren. Das Betriebspersonal ist dann auf eine Einzellösung beschränkt, die nicht objektiv beurteilt werden

kann und im Allgemeinen noch ungenutztes Optimierungspotential bietet. Eine lokale Betrachtung und Verbesserung einzelner Komponenten wie z.B. der Pumpen ist nur dann zielführend, wenn diese auch optimal im Kontext der gesamten Anlage betrieben werden.

Auf Grund der Komplexität der Anlagen können die Einsparpotentiale kurzfristig nicht so aufbereitet werden, dass auch Entscheidungsträger ohne detailliertes Fachwissen in der Lage sind, die Ergebnisse zu beurteilen. Hinzu kommt, dass die einzelnen Kostenpositionen meistens nicht detailliert aufgeschlüsselt werden können, da viele Unternehmen nur den Energieverbrauch der gesamten Anlage kennen, aber nicht den jeder einzelnen Komponente. Ineffizient arbeitende Komponenten einer Anlage können somit nicht identifiziert und optimiert werden. Neben solchen methodischen und datenbezogenen Defiziten liegen Gründe für ineffiziente Betriebsführungen und Planungen auch in unvollständigen Bewertungskriterien für die Anlagen. Betreiber scheuen oft vor Investitionen zurück, weil diese vordergründig zunächst bei den Kosten zu Buche schlagen. Angemessener ist jedoch eine Betrachtung der Lebenszykluskosten (LCC), die alle auftretenden Kostenkomponenten berücksichtigen. Studien zeigen, dass die Investitionskosten im Schnitt nur ca. 10 % der Lebenszykluskosten ausmachen, während der Anteil der Energiekosten bei Industrieanlagen ca. 45 % und bei wasserführenden Anlagen sogar 80 % beträgt (4). Die Aufschlüsselung der einzelnen Kostenkomponenten leistet einen wesentlichen Beitrag zur Entscheidungsfindung im Fall einer Neuplanung oder eines Umbaus einer Anlage. Können bei einer LCC-Analyse die Investitions- und Energiekosten noch relativ einfach ermittelt werden, so ist die Bestimmung von Betriebs-, Wartungs-, Reparatur- sowie Ausfallkosten schon sehr viel schwieriger. In der Regel ist man auf statistische Daten angewiesen, mit denen Kostenfunktionen für die betriebswirtschaftliche Bewertung der einzelnen LCC-Komponenten erstellt werden können.

Zur Durchführung einer schnellen und unkomplizierten LCC-Analyse von Pumpen wurde in der Vergangenheit bereits am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der Technischen Universität Kaiserslautern Software für die Firmen Siemens (5), (6) und KSB (7), (8) entwickelt. Durch eine Datenbank, in der Durchschnittswerte für verschiedene Pumpen hinterlegt sind, wird eine realistische LCC-Analyse ermöglicht. Mit der Software kann bisher jedoch nur eine Pumpe und nicht eine komplette Anlage mit allen Komponenten und deren Wechselwirkung analysiert werden. Im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt wurde dieser Ansatz weiter ausgebaut und auf Trinkwasserversorgungsanlagen angewendet. Erste Ansätze dazu wurden bereits von SAM und EWR in der Vergangenheit durchgeführt (9) ohne jedoch das Potential von mehrkriteriellen Optimierungsverfahren und Entscheidungsunterstützung zu nutzen. Zudem war die Betrachtung nur auf die Netzpumpen im Wasserwerk Bürstadt eingeschränkt. In dem damaligen Vorhaben wurde die gesamte Trinkwasserversorgungsanlage nicht mit einbezogen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt H₂Opt wurde vom 01. April 2014 bis zum 30. Juni 2017 durch das BMBF gefördert. Die Arbeiten gliederten sich in acht Arbeitspakete:

- AP1: Projektsteuerung und -koordination (**SAM**)
- AP2: Erstellung der Datenbasis (**SAM**, ITWM, EWR, SWK, OPB)
- AP3: Modellbasierte Simulation des Wasserwerkes (**SAM**, ITWM, EWR, SWK, OPB)
- AP4: Modellbasierte Simulation des Rohrleitungsnetzes (**SAM**, ITWM, EWR, SWK, OPB)
- AP5: Validierung der Simulation (**SAM**, ITWM, EWR, SWK)
- AP6: Optimierung (SAM, **ITWM**, EWR, SWK, OPB)
- AP7: Interaktive Entscheidungsunterstützung (SAM, **ITWM**, EWR, SWK, OPB)
- AP8: Pilotprojekt (**SAM**, ITWM, SWK; OPB)

Die Gesamtkoordination des Verbundprojektes H₂Opt lag bei Prof. Dr.-Ing. M. Böhle an der Technischen Universität Kaiserslautern. An den meisten Arbeitspaketen waren alle Projektpartner beteiligt. Der für ein Arbeitspaket hauptverantwortliche Projektpartner ist in der obigen Aufzählung hervorgehoben.

Das Ziel des Arbeitspaketes 2 war eine breite Datenbasis für die weitere Projektbearbeitung zu schaffen. Diese Datenbasis bildete die Grundlage für alle weiteren Arbeitspakete. Die Arbeitspakete 3–7 umfassten den eigentlichen Entwicklungs- und Verbesserungsprozess der H₂Opt Software, sowie deren Benutzertests und Einsatz vor Ort in den Wasserwerken Bürstadt (EWR) und Barbarossastraße (SWK). Im Arbeitspaket 8 sollte die entwickelte H₂Opt Software zur Optimierung der Betriebsführung im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost (SWK) eingesetzt werden.

Die Vernetzung und Koordination innerhalb des Projektes erfolgte über gemeinsame Projekttreffen, Telefonkonferenzen und Mailinglisten, sowie über einen Dateiserver. Des Weiteren nahmen die Projektpartner sowohl an lokalen und nationalen Tagungen als auch an internationalen Konferenzen teil.

Die Außendarstellung des Verbundprojektes erfolgte über den Webauftritt <https://www.mv.uni-kl.de/sam/forschung/h2opt>, der die wesentlichen Ziele und Arbeitsschritte des Verbundprojektes darstellte. Der Webauftritt wurde ebenfalls zur zusätzlichen Verbreitung der im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt durchgeführten Betreiberumfrage genutzt. In einem vom Projektkoordinator organisierten Workshop wurde zudem die H₂Opt Software Vertretern der Öffentlichen Wasserversorgung präsentiert. Die Verbesserungsanregungen und die Expertise der teilnehmenden Fachkräfte floss in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess mit ein. Wie bereits oben erwähnt, nutzten die Projektpartner zudem Tagungen und Konferenzen um das Verbundprojekt lokal, national und international zu präsentieren.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Bei vielen Trinkwasserversorgungsunternehmen steht kein detailliertes und gut kalibriertes Modell des Rohrleitungsnetzes zur Verfügung. Die Gründe dafür sind vielfältig. Der Aufwand zur Ermittlung der Verlustbeiwerte der Rohrleitungen ist sehr hoch. Es müssen an vielen Stellen im Netz Messungen durchgeführt werden. Weiterhin sind die Positionen von Schiebern im Netz nicht bekannt, da oftmals keine ausreichende Dokumentation des Rohrleitungsnetzes vorliegt. Bei Messungen werden sehr hohe Druckverluste ermittelt, wenn Schieber ganz oder teilweise geschlossen sind. Durch die Vermaschung der Netze können Stellen, an denen die Schieber für die Druckverluste verantwortlich sind, oft nur mit sehr hohem Aufwand detektiert werden. In der Praxis wird dieser Aufwand von den Unternehmen nicht betrieben. Häufig werden nur die Hauptversorgungsleitungen im Rohrleitungsrechner abgebildet und Standardwerte bzw. sehr hohe Werte (im Fall von z.B. geschlossenen Schiebern) für die Verlustkoeffizienten angegeben. Bei vielen Trinkwasserversorgungsunternehmen kann somit die Simulation der Rohrleitungsnetze nicht oder nur eingeschränkt zur Optimierung der Pumpen verwendet werden.

In der Vergangenheit wurden bereits numerische Optimierungsverfahren mit konventionellen Rohrleitungsrechnern gekoppelt, um den Betrieb der Pumpen in Trinkwasserversorgungsnetzen zu optimieren (10). Dabei wird in (10) zwischen Kurzzeitoptimierung, Optimierung auf mittlere Sicht und Langzeitoptimierung unterschieden. Unter der Kurzzeitoptimierung versteht man im Wesentlichen eine Optimierung des Betriebs bzw. der Steuerung einer bestehenden Trinkwasserversorgungsanlage, bei der online die Betriebszustände erfasst und optimale Regelparameter vorgegeben werden. Berücksichtigt werden somit die Veränderungen der Betriebspunkte der Trinkwasserversorgungsanlage im täglichen Betrieb. Voraussetzung dafür ist eine Messtechnik, die online den Druck und den Verbrauch an bestimmten Stellen im Rohrleitungsnetz bestimmt. Bei der Optimierung auf mittlere Sicht betrachtet man Prozesse, die im Zeitraum von mehreren Wochen und Monaten ablaufen und z.B. die Bewirtschaftung von Brunnen oder die Lieferung von Trinkwasser an benachbarte Versorgungsunternehmen beinhalten. Auch hier wird nur die Betriebsführung bestehender Komponenten optimiert. Bei der Erweiterung, einem Umbau oder einer Neuplanung einer Trinkwasserversorgungsanlage wird eine Langzeitoptimierung bzw. Entwurfsoptimierung durchgeführt. In diesem Fall kann der Planer neben den Regelparametern mehrere Variablen wie z.B. Pumpen, Durchmesser von Rohrleitungen, Größe von Trink- oder Rohwasserspeicherbehältern etc. bei der Optimierung verändern.

Optimierungsverfahren haben auch schon Einzug in kommerzielle Rohrleitungsrechner erhalten. In STANET® (11) können mit Hilfe von genetischen Optimierungsalgorithmen optimale Rohrleitungsdurchmesser bestimmt werden. Die am Karlsruher Institut für Technologie entwickelte Software KANET (12) berechnet kostenoptimale Durchmesser der Rohrleitungen und optimale Einspeisedrücke für die modellierten Rohrleitungsnetze. Diese Optimierungszugänge sind jedoch lediglich auf eine Zielfunktion beschränkt, eine Analyse des Trade-Offs von mehreren

Optimierungsparametern durch eine multikriterielle Optimierung und die Darstellung der Optimierungslösungen mit einer graphischen Benutzeroberfläche zur Entscheidungsunterstützung ist nicht möglich. Zudem liegt auch hier der Schwerpunkt eindeutig auf den Rohrleitungen und die Software enthält keine Komponentendatenbank sowie keine Möglichkeit zur Analyse der Lebenszykluskosten. Die Umsetzung dieser Punkt stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Verbundprojektes H₂Opt dar.

Ein weiterer interessanter Ansatz wird mit der Software Optnet verfolgt. Die Software erlaubt in Kombination mit STANET® die Bestimmung eines kostenoptimalen Netzes unter Berücksichtigung von hydraulischen Randbedingungen. Durch ein Modell zur Prognose der Lebensdauer ist eine Vorhersage des kostenoptimalen Zeitpunktes für eine Rehabilitation der Rohrleitungen möglich. Ebenso kann beim Austausch von Rohrleitungen mit Optnet der optimale Rohrlösungsdurchmesser bestimmt werden. Bei Optnet liegt der Schwerpunkt ebenfalls ausschließlich auf dem Rohrleitungsnetz.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung einer Trinkwasserversorgungsanlage besteht in der Kopplung eines Simulationsmodells der Anlage mit einer Optimierungssoftware. Dabei wird das Modell der Anlage von der Software als Black Box betrachtet und die Ein- und Ausgabegrößen für die Optimierung verwendet. Der mehrkriterielle Aspekt der Optimierung wird bei diesen kommerziellen Programmen wie modeFrontier (13) oder OptiSlang (14) nur „blind“, also ohne Anpassung der Optimierungsmethoden auf das Problem, unterstützt. Aus Erfahrungen in der Projektarbeit am ITWM resultiert daraus in der Praxis, insbesondere bei diskreten Entscheidungsgrößen, das Verschwenken von Optimierungspotential durch den Versuch, alle Entscheidungsgrößen gleichzeitig im Zuge einer Optimierung anzupassen. Dieses Optimierungspotential kann jedoch durch ein dem Problem angepasstes, heuristisches Vorgehen gehoben werden.

Es ist nicht untypisch, dass Einsparpotentiale bei Planern und Betreibern von Trinkwasserversorgungsanlagen zwar bekannt sind, aber auf Grund der Komplexität der Anlage und Vielzahl an Parametern nicht genutzt werden. In der Abteilung Optimierung des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern werden seit zehn Jahren erfolgreich sehr effiziente Optimierungsalgorithmen und Lösungen für derartige Probleme aus verschiedensten Branchen entwickelt. Beispiele hierzu sind die multikriterielle Optimierung chemischer Produktionsanlagen (15) oder die Erstellung von radiologischen Behandlungsplänen für die Therapie von Krebspatienten (16). Im Rahmen dieser Projekte wurde bereits der Vorteil von problemspezifischen Optimierungsverfahren in Kombination mit einer interaktiven Entscheidungsunterstützung demonstriert. Es konnten deutliche Einsparungen bzw. Verbesserungen erzielt werden. Mehrkriterielle Optimierungsverfahren bieten heute die Möglichkeit ein komplexes Problem, wie z.B. eine Trinkwasserversorgungsanlage, mit vielen Parametern sowohl modular als auch ganzheitlich zu betrachten, die besten Kompromisse zwischen konkurrierenden Zielen zu analysieren und eine unter gewissen Randbedingungen optimale Lösung zu ermitteln.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im kompletten Projektverlauf erfolgte eine kontinuierliche Zusammenarbeit mit dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW). Zum einen wurde zu Beginn des Verbundprojektes die Betreiberumfrage in den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Hessen durch den DVGW verbreitet. Zum anderen bot der DVGW dem Verbundprojekt regelmäßig eine Plattform das Projekt Versorgungsunternehmen außerhalb des Projektverbundes zu präsentieren.

Stellvertretend ist der Zweckverband für Wasserversorgung Germersheimer Südgruppe Kö.d.ö.R. zu nennen. Im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt führte der Projektpartner SAM zunächst eine Bestandsaufnahme vor Ort durch. Die in der Bestandsaufnahme gesammelten Daten wurden im Anschluss für eine umfangreiche Betriebsanalyse verwendet. Die Untersuchungen zeigten, dass bei einem Austausch der Netzpumpen im Wasserwerk Kuhardt und im Anschluss gleicher Betriebsweise im Durchschnitt 34,1 % an Energie eingespart werden könnte. Bei einem durchschnittlichen Strompreis von 0,1712 €/kWh für die Industrie (17) würde diese eine jährliche Einsparung an Energiekosten von 22.905 €/a alleine durch den Austausch von drei Netzpumpen in dem untersuchten Wasserwerk bedeuten.

Während des Verbundprojektes bestand zudem ein Kontakt zur Next Kraftwerke GmbH, die den Projektpartnern Daten zu variablen Strompreisen (Best of 96) freundlicher Weise zur Verfügung stellte. Diese Daten wurden zur Entwicklung von Optimierungsstrategien und Fallstudien verwendet. Auf die Ergebnisse dieser Fallstudie wird in Abschnitt 0 näher eingegangen.

2 Eingehende Darstellung des Projektes

2.1 Erzielte Projektergebnisse

2.1.1 AP1: Projektsteuerung und -koordination

Die Projektsteuerung und -koordination lag im Aufgabenbereich des Lehrstuhls für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK). Der Projektleiter übernahm dabei die Organisation und Einberufung von regelmäßigen Meetings. Die Meetings wurden sowohl in kleiner als auch in größerer Runde durchgeführt. Diese Regelung wurde zu Beginn des Verbundprojektes H₂Opt durch alle Projektpartner beschlossen. Alle Projektpartner waren der Auffassung, dass durch Meetings in kleinerer Runde eine höhere Effektivität erzielt werden kann als bei Projekttreffen mit allen Projektbeteiligten. SAM hatte während der kompletten Projektlaufzeit im Schnitt zwei Mal pro Monat solch kleinere Meetings mit mindestens einem Projektpartner. Diese Meetings dienten hauptsächlich dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess der Software und Koordination der einzelnen Arbeitspakete. Die Projekttreffen mit allen Projektbeteiligten fanden im Schnitt alle 8 Monate statt. Diese Treffen dienten zur Gesamtkoordination und zur Information aller Projektpartner über den Status Quo der Software.

Der Projektleiter organisierte zudem während der Projektlaufzeit ein Projektstatusseminar nach ca. einem Jahr Projektlaufzeit. Das Projektstatusseminar fand im Wasserwerk Rote Hohl des Projektpartners SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG (SWK) statt. Die Teilnehmer des Projektstatusseminars sind nachfolgend aufgelistet:

- Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM)
- Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)
- Obermeyer Planen + Beraten GmbH (OPB)
- SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG (SWK)
- EWR Netz GmbH (EWR)
- Projektträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit (PTKA)
- Vernetzung- und Transfervorhaben ERWASNET

Nach zwei Jahren Projektlaufzeit organisierte der Projektleiter einen Workshop im Wasserwerk Bürstadt. Gastgeber war der Projektpartner EWR. In diesem Workshop wurde der aktuelle Stand der Software einem breiten Fachpublikum aus der Öffentlichen Trinkwasserversorgung präsentiert. Zudem wurde der Workshop zu einem intensiven Erfahrungsaustausch zwischen den Projektpartnern aus dem Verbundprojekt H₂Opt und den externen Teilnehmern genutzt. Die in dem Workshop gewonnenen Erkenntnisse flossen im Anschluss in den kontinuierlichen

Verbesserungsprozess der Software mit ein. Die Teilnehmer dieses Workshops sind nachfolgend aufgelistet:

- ④ EnergieSüdwest Netz GmbH
- ④ EWR Netz GmbH
- ④ Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
- ④ Hessenwasser GmbH & Co. KG
- ④ Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen
- ④ Obermeyer Planen + Beraten GmbH
- ④ Stadtwerke Bretten GmbH
- ④ Stadtwerke Wörth am Rhein
- ④ SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG
- ④ Verbandsgemeindewerke Landstuhl
- ④ Vernetzungs- und Transfervorhaben ERWASNET
- ④ Zweckverband für Wasserversorgung Germersheimer Südgruppe Kö.d.ö.R.
- ④ Zweckverband Wasserversorgung Nordostwürttemberg (NOW)

Entgegen der ursprünglichen Planung wurde nur ein Workshop anstatt drei Workshops mit Versorgungsunternehmen durchgeführt, da durch die häufige Präsentation des Forschungsprojektes auf DVGW-Veranstaltungen bereits die erwünschte Rückmeldung aus der Praxis gewonnen werden konnte.

Der Projektleiter sorgte zudem für die termingerechte Einplanung, korrekte Durchführung und Dokumentation der für die Validierung des Programmes notwendigen Messungen bei den Projektpartnern SWK und EWR.

Der Projektleiter unterstützte bei der Durchführung der Qualitätssicherung und prüfte die erstellte Dokumentation des Quellcodes. Ziel war die Erstellung einer Dokumentation, die nach Projektende eine Weiterentwicklung der Software problemlos ermöglicht. Während der Programmierarbeiten sorgte der Projektleiter für eine enge Abstimmung und koordinierte die Arbeiten von SAM und ITWM, so dass die Schnittstellen der Teile des Quellcodes die von dem jeweiligen Projektpartner erstellt wurden, eindeutig definiert sind. Dadurch wurde doppelte Arbeit durch eine nachträgliche Anpassung des Quellcodes vermieden.

Zum Austausch von Daten wurde vom Projektleiter ein Dateiserver eingerichtet, auf den alle Projektpartner Zugriff hatten. Jeder Projektpartner hatte somit jeder Zeit die Möglichkeit sich über den Status Quo des Projektstandes außerhalb der Projektmeetings zu informieren. Über den Dateiserver wurde zudem in regelmäßigen Abständen die aktuellste Softwareversion allen Projektpartnern für Anwendertests zur Verfügung gestellt.

Die Projekthomepage wurde ebenfalls vom Projektleiter erstellt und im Bereich seines Webauftritts angesiedelt. Über die Projekthomepage wurde unter anderem die während des Projektes durchgeführte Betreiberumfrage zusätzlich verteilt.

Der Projektleiter war außerdem für die regelmäßige konsortialübergreifende Berichterstattung gegenüber dem Projektträger hinsichtlich Projektfortschritt, Synergieeffekten und Verwertungsentscheidungen verantwortlich. Er repräsentierte das Projektkonsortium bei den externen Netzwerkaktivitäten und auf Tagungen und sorgte für ein kontinuierliches Monitoring des Stands der Forschung und Technik durch Teilnahme an Fachtagungen und Literaturrecherche.

Der Projektkoordinator möchte sich an dieser Stelle bei allen Projektbeteiligten für das entgegengebrachte Vertrauen und für die jeder Zeit gute und hilfsbereite Zusammenarbeit bedanken. Das gemeinsame bearbeitete Verbundprojekt H₂Opt hat deutliche Energieeinsparpotentiale in allen Bereichen der Rohwassergewinnung als auch -förderung aufgezeigt. Gleichzeitig bieten die gesammelten Daten und Erfahrungen auf allen Seiten die Chance den Weg der kontinuierlichen Überwachung, Überprüfung, Beurteilung und Verbesserung des Gesamtsystems Trinkwasserversorgung fortzuführen.

2.1.2 AP2: Erstellung der Datenbasis

Für die Modellierung und Simulation der Trinkwasserversorgungsanlagen, sowie für die Betriebsanalysen wurden innerhalb einer umfangreichen Bestandsaufnahme betriebsrelevante Daten zu den Trinkwasserversorgungsanlagen von EWR und SWK gesammelt. Neben Versorgungsschemata und Geometriedaten (z.B. Lageplan Versorgungsnetz oder Pläne vom Brunnenaufbau) wurden auch Datenblätter von modellrelevanten Komponenten, wie beispielsweise Pumpen, Elektromotoren oder Frequenzumrichtern von beiden Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Zu Beginn des Projektes stellte EWR zudem drei komplette Datensätze aller im Prozessleitsystem (PLS) verfügbaren Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute für jeweils einen Zeitraum von einem Jahr zur Verfügung. Diese Daten dienen als Grundlage für die Modellerstellung, die Validierung des Softwaremodells und für eine Quantifizierung des Optimierungspotentials. Die Anlage in Worms war bei SAM bereits aus früheren Projekten bekannt. Somit waren dort bereits alle erforderlichen Messdaten zur Erstellung eines Modells der Anlage vorhanden.

Auf Seiten der SWK standen zu Projektbeginn lediglich Datensätze mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung. Während der Projektbearbeitung zeigte sich, dass diese Daten weder für eine Modellierung des Gewinnungsgebietes noch für die Erstellung des Anlagenkennfeldes geeignet sind. In Zusammenarbeit mit SAM wurden für die Modellierung interessierende Prozessgrößen zunächst identifiziert. Die identifizierten Messgrößen wurden monatlich an den Projektpartner SAM übermittelt. Zur besseren Datenbehandlung und -analyse hat SAM eine SQL-Datenbank aufgebaut. Der Import der mit Hilfe eines erstellten

Datenaufbereitungstool zuvor aufbereiteten Messdaten, sowie der Export etwaiger Abfragedaten wurde durch eine ebenfalls selbsterstellte graphische Benutzeroberfläche (siehe Abb. 2) realisiert. Durch den Aufbau der SQL-Datenbank war eine kontinuierliche Messdatenaufnahme, -aufbereitung, -auswertung und -integration in die Simulationsmodelle stets gewährleistet.

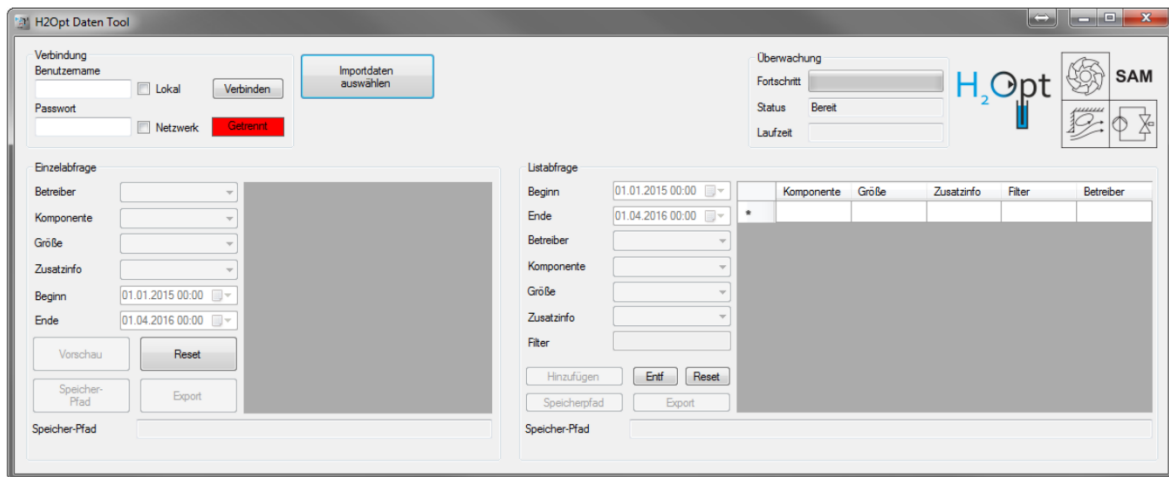


Abb. 2: Graphische Benutzeroberfläche zur Datenbankkommunikation

In der SQL-Datenbank wurden Datensätze mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute kontinuierlich erfasst und abgespeichert. Während der Projektlaufzeit konnte somit eine Datenbasis für einen Zeitraum von zwei Jahren mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute geschaffen werden. Diese Daten wurden zum einen für eine umfangreiche Betriebsanalyse und zum anderen für die Auswahl von auszutauschenden Brunnenpumpen genutzt.

Um den Ist-Zustand der Pumpen zu dokumentieren wurden Messungen der Pumpenkennlinien durchgeführt. Mit Hilfe der Messungen konnte die aktuelle Betriebscharakteristik der Pumpen mit den Herstellerangaben (Soll-Zustand der neuen Pumpe) abgeglichen werden. Negative Effekte auf den Förderhöhenverlauf der Pumpe, wie Verschleiß oder Verockerung, konnten dadurch bei der Modellierung der Versorgungssysteme mitberücksichtigt werden. Dies trug wiederum zur Verbesserung der Betriebssimulationen bei.

Tab. 2.1: Übersicht Feldmessungen in den Wasserwerken Bürstadt (EWR) und Barbarossastraße (SWK)

	Netzpumpe 1	Netzpumpe 2	Netzpumpe 3	Netzpumpe 4
EWR	1x	1x	1x	1x
	Hauptpumpe 1	Hauptpumpe 2	Hauptpumpe 3	Hauptpumpe 4
SWK	2x	2x	2x	2x

Die Messungen wurden vom Projektpartner SAM bei den beiden Projektpartnern EWR und SWK an mehreren Tagen vor Ort durchgeführt. Auf Seiten des Verteilungsnetzes wurden jeweils die vier Hauptpumpen des Wasserwerkes Bürstadt (EWR) und des Wasserwerkes Barbarossastraße (SWK) vermessen. Die Anzahl der durchgeführten Messungen kann Tab. 2.1 entnommen werden.

Im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost (SWK) wurden die elf aktiven Brunnen mehrfach vermessen. Eine Übersicht der durchgeführten Feldmessungen kann Tab. 2.2 entnommen werden.

Tab. 2.2: Übersicht Feldmessungen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost (SWK)

Brunnen A	Brunnen B	Brunnen C	Brunnen D	Brunnen E	Brunnen F
2x	2x	1x	1x (alt) 1x (neu)	1x (alt) 1x (neu)	1x
Brunnen 12a	Brunnen 17	Brunnen G	Brunnen H	Brunnen I	
2x	4x	2x	2x (alt) 1x (neu)	2x	

Die durchgeführten Messungen führten auf der einen Seite zu einer soliden Datenbasis für eine erfolgreiche Modellerstellung und die anschließende Validierung. Auf der anderen Seite konnten durch die Feldmessungen entweder die Herstellerangaben bestätigt oder verschlissene Pumpen detektiert werden.

Neben der Betriebsanalyse der Pumpen wurden die Daten zur Erstellung eines Anlagenkennfeldes verwendet. Im Fall der Anlage der SWK konnte mit dem Modell jedoch nicht so eine hohe Genauigkeit wie bei der Anlage in Worms erreicht werden (siehe Abschnitt 2.1.4). Als Alternative zum Anlagenkennfeld können Rohrleitungsrechner verwendet werden. Zu Projektbeginn stand jedoch kein aktuelles und validiertes Rohrleitungsmodell zur Verfügung. Die SWK hat während des Projektes mit der Aktualisierung des Modells begonnen. Aufgrund der hohen Komplexität des Netzes und der notwendigen Messungen zur Validierung konnte das Rohrleitungsmodell in der Laufzeit des Projektes jedoch nicht mehr für die Optimierung der Anlage verwendet werden.

Das Verbundprojekt H₂Opt hatte von Anfang an das Ziel eine in der Trinkwasserversorgung universell einsetzbare Software zu entwickeln. Die Software sollte dabei so aufgestellt sein, dass jedes beliebige Versorgungsschema abgebildet werden kann. Die Projektpartner haben sich somit

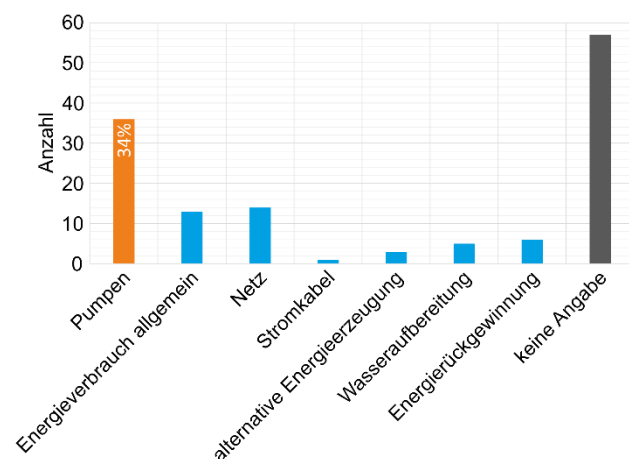


Abb. 3: Optimierungspotentiale aus Sicher der Betreiber

bewusst gegen eine Insellösung für die beiden Projektpartner aus der öffentlichen Trinkwasserversorgung entschieden. Die zu Projektbeginn deutschlandweit durchgeführte Betreiberumfrage hatte das Ziel, Bedürfnisse an die im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt entwickelte Software zu detektieren. Deutschlandweit wurden insgesamt 1241 öffentliche Wasserversorger gebeten sich an der Umfrage zu beteiligen. Die

Rückläuferquote betrug mit 108 Teilnehmern 8,7 %. Laut Statistischem Bundesamt (18) existierten im Jahr 2010 in Deutschland 6065 öffentliche Wasserversorger. An der im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführten Umfrage haben sich somit 1,8 % der öffentlichen Wasserversorger in Deutschland beteiligt.

Abb. 3 zeigt die Optimierungspotentiale in der Wasserversorgung aus Sicht der Betreiber. 34 % sehen das größte Optimierungspotential in der Verbesserung der Pumpen. Dies deckt sich mit den Projektzielen von H₂Opt.

Die Projektpartner EWR und SWK gewinnen ihr Rohwasser ausschließlich aus Brunnen und Quellen. Die im Verbundprojekt H₂Opt entwickelte Software wurde zunächst auf diese beiden Trinkwasserversorgungsanlagen ausgelegt und validiert.

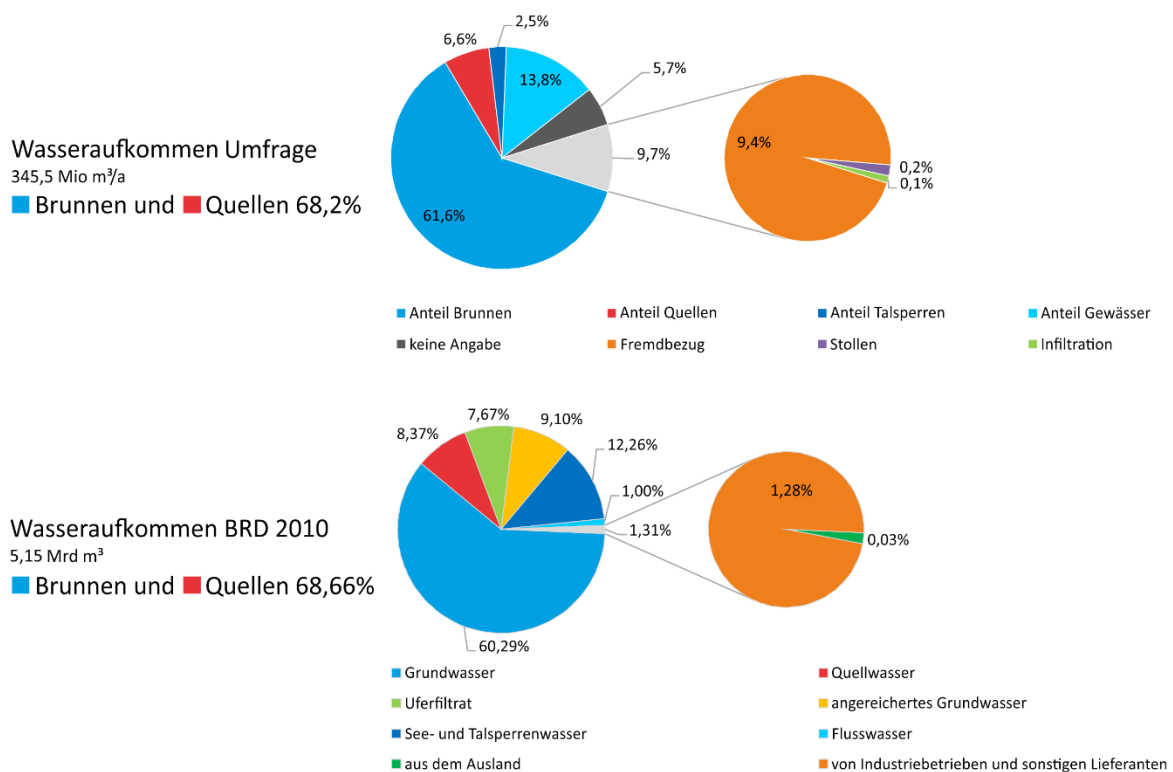


Abb. 4: Art der Wassergewinnung – H₂Opt-Umfrage (oben) und Statistisches Bundesamt 2010 (18) (unten)

Abb. 4 zeigt, dass die öffentlichen Wasserversorger ihr Rohwasser zu mehr als zwei Drittel aus Brunnen und Quellen gewinnen. Eine Übertragbarkeit der im Verbundprojekt H₂Opt entwickelten Software auf andere Wasserversorgungsunternehmen ist somit gewährleistet.

2.1.3 AP3, 4 & 7: Modellbasierte Simulation mit Interaktiver Entscheidungsunterstützung

Die Arbeitspakete AP3 (Modellbasierte Simulation des Wasserwerkes), AP4 (Modellbasierte Simulation des Rohrleitungsnetzes) und AP7 (Interaktive Entscheidungsunterstützung) wurden im vorliegenden Abschlussbericht gegenüber dem Projektantrag zusammengefasst.

Modellierung der Anlage der EWR

Das im Verbundprojekt H₂Opt verwendete Anlagenmodell wurde zunächst für das Versorgungsnetz von EWR erstellt und detailliert untersucht. Das in Abb. 5 skizzierte Anlagenmodell verfügt über vier parallel angeordnete Netzpumpen (NP1 bis NP4) im Wasserwerk Bürstadt. Am anderen Ende des Versorgungsgebietes sind zwei gleich große Hochbehälter als Gegenbehälter angeordnet.

Messungen zeigen, dass die Anlagenkennlinie des Versorgungssystems sowohl vom Wasserstand in den beiden Hochbehältern als auch vom Netzverbrauch abhängig ist. Abb. 6 (a) veranschaulicht die Abhängigkeit von diesen beiden (Betriebs-)Parametern. Der zwischen $H_{B,min}$ und $H_{B,max}$ schwankende Behälterstand, prägt der Versorgungsanlage die statische Förderhöhe auf. Der Netzverbrauch Q_V ist maßgebend für die Steigung der Anlagenkennlinie. Die beiden Anlagenkennlinien mit der Kombination aus niedrigstem Behälterstand und maximalen Netzverbrauch ($H_{B,min}; Q_{V,max}$), sowie höchstem Behälterstand und minimalen Netzverbrauch ($H_{B,max}; Q_{V,min}$) spannen, wie in Abb. 6 (b) schematisch dargestellt, das Anlagenkennfeld des Versorgungsnetzes auf. Prinzipiell kann jeder Punkt im Anlagenkennfeld von den Netzpumpen angefahren werden.

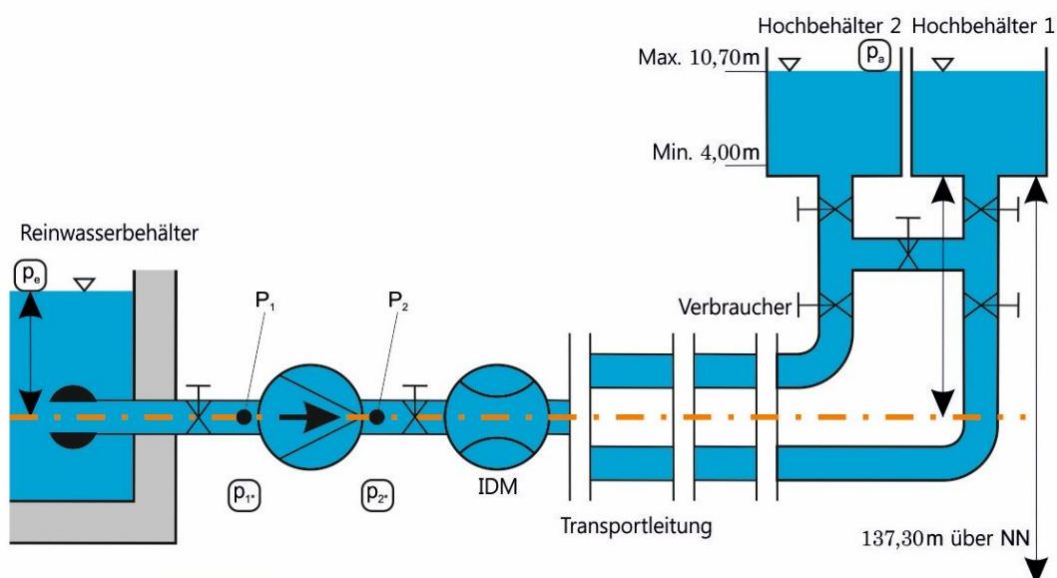


Abb. 5: Skizze Anlagenmodell EWR

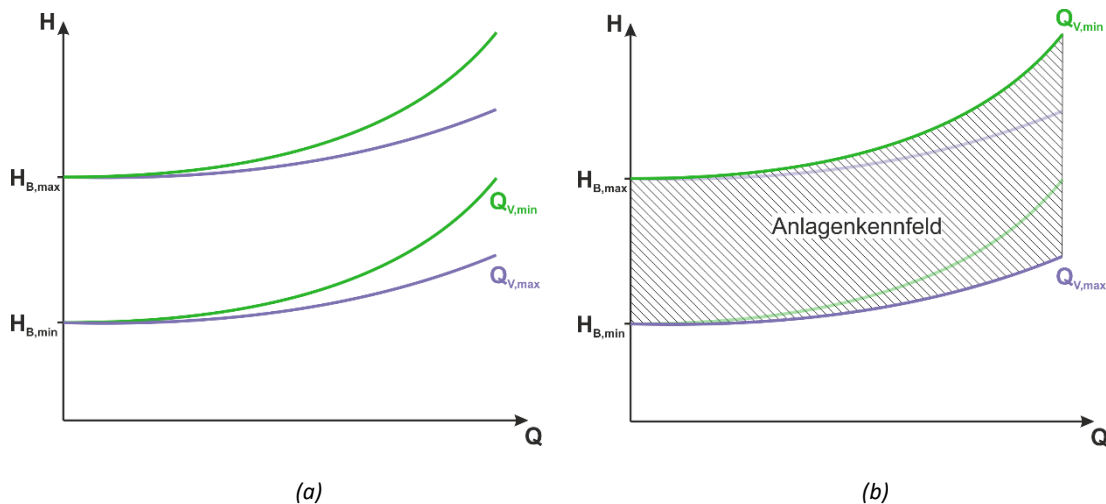


Abb. 6: Schema des Anlagenkennfeldes:

- (a) Abhängigkeit des Kennlinienverlaufs von Behälterstand und Netzverbrauch
 (b) aufgespanntes Anlagenkennfeld

Das Anlagenmodell basiert auf einer Berechnungsmethode, die den Verlauf der Anlagenkennlinie in Abhängigkeit vom Netzverbrauch und vom Behälterstand der beiden Gegenbehälter beschreibt. In Abb. 6 (b) ist das durch das Modell beschriebene Anlagenkennfeld schematisiert dargestellt. Die statische Förderhöhe ist durch die geodätische Höhendifferenz zwischen der Netzpumpe und dem Wasserspiegel im Gegenbehälter vorgegeben und kann abhängig vom Füllstand des Behälters zwischen $H_{B,min}$ und $H_{B,max}$ variieren. Die Steigung der Anlagenkennlinie, d.h. der Förderhöhenverlust innerhalb des Netzes, hängt vom Verbrauch (Wasserentnahme aus dem Versorgungsnetz) ab. Bei niedrigem Wasserverbrauch $Q_{V,min}$ füllen die Netzpumpen die beiden Gegenbehälter auf und ein Großteil des geförderten Wassers wird vom Wasserwerk in die Behälter transportiert. Dabei entstehen durch den langen Transportweg hohe Förderhöhenverluste. Bei hohem Verbrauch $Q_{V,max}$ wird ein Großteil des geförderten Wassers innerhalb des Versorgungsnetzes verbraucht und muss nicht durch das komplette Netz transportiert werden. Hierbei entstehen geringere Förderhöhenverluste und die Steigung der Anlagenkennlinie fällt im Vergleich zur Kennlinie bei niedrigem Wasserverbrauch geringer aus (vgl. Abb. 6 (b), Anlagenkennlinien bei $Q_{V,min}$ und $Q_{V,max}$).

Im Modell wird die Abhängigkeit der Anlagenkennlinie vom Netzverbrauch und vom Behälterstand mit Hilfe eines Polynoms vom Grad 2 berücksichtigt:

$$H_{AKL} = a \cdot Q_V^2 + b \cdot Q_V + H_{stat}$$

Die Polynomkoeffizienten a und b sind anlagenspezifisch und werden abhängig vom Netzverbrauch berechnet. Der Einfluss des Behälterstandes auf die Anlagenkennlinie wird durch den konstanten Term des Polynoms berücksichtigt, welcher der statischen Förderhöhe H_{stat} entspricht.

Zur Berechnung des Pumpenbetriebs ermittelt das Modell den Schnittpunkt zwischen der Anlagen- und Pumpenkennlinie. Förderhöhen- und Wirkungsgradverlauf einer Pumpe (betrieben bei Nenndrehzahl) können den Herstellerangaben entnommen oder im Feldexperiment neu vermessen werden.

Das Modell berücksichtigt sowohl den Einzel- als auch den Parallelbetrieb der redundant (als Parallelschaltung) angeordneten Netzpumpen. Im Fall des Parallelbetriebs sind mehrere Pumpen mit unterschiedlicher Kennliniencharakteristik kombinierbar, die entsprechend ihrer Förderhöhenverläufe addiert werden.

Durch Drehzahlregelung kann der Betrieb von Netz- oder Brunnenpumpen auf den jeweiligen Fördermengenbedarf bzw. auf einen energetisch günstigen Betrieb im Wirkungsgradoptimum angepasst werden.

Das Modell zur Drehzahlregelung generiert, basierend auf den vorgegebenen Kennliniendaten der Pumpe (i.d.R. Förderhöhen- und Wirkungsgradverlauf bei Nenndrehzahl) die Pumpenkennlinien bei reduzierter Drehzahl. In Abb. 7 ist exemplarisch der Förderhöhen- und Wirkungsgradverlauf einer Pumpe bei Nenndrehzahl n_1 und bei angepasster Drehzahl $n_2 < n_1$ dargestellt. Durch die Drehzahlreduzierung verschiebt sich der Betriebspunkt von Überlast bei Nenndrehzahl n_1 in Richtung Wirkungsgradoptimum bei n_2 . Den Förderhöhenverlauf der Pumpe bei der Drehzahl n_2 berechnet das Modell mit Hilfe der Affinitätsgesetze. Bei der Berechnung des Wirkungsgradverlaufs wird die empirische Formel von PFLEIDERER (19) zur Wirkungsgradaufwertung verwendet.

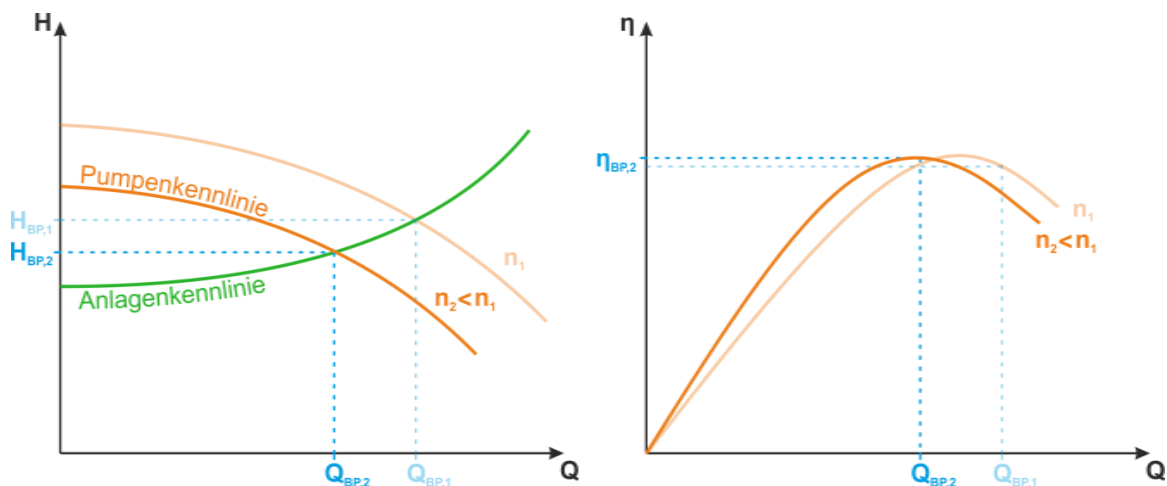


Abb. 7: Förderhöhen- und Wirkungsgradverlauf bei reduzierter Drehzahl

Das Anlagenmodell wurde hinsichtlich der Behälterstands- und Netzverbrauchsabhängigkeit genauer untersucht. Das Modell sollte dadurch weiter verfeinert und die Abweichung zwischen (realer) Messung und den Simulationsergebnissen der H₂Opt Software weiter reduziert werden.

Modellierung der Anlage der SWK

Zudem wurden die Allgemeingültigkeit des Modells und die Anwendbarkeit des Modellierungsverfahrens auf andere Versorgungsanlagen überprüft. Hierzu wurde das Anlagenmodell auf das Versorgungsgebiet Normalzone der SWK übertragen.

Um die Übertragbarkeit des zugrundeliegenden Anlagenkennlinienmodells auf andere Versorgungsnetze zu testen, wurde die Software auf den Betrieb der Netzpumpen der Normalzone von Kaiserslautern angewandt. Die in Abb. 8 schematisch dargestellte Normalzone ist die unterste Druckzone des Versorgungsnetzes der SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG, über diese Zone wird ein Großteil des Stadtgebietes mit Trinkwasser versorgt.

Der Aufbau der Normalzone ist deutlich komplexer als das Versorgungsnetz der EWR Netz GmbH. Zwei Hochbehälter (HB Weidengarten und HB Betzenberg) sind an zwei unterschiedlichen Stellen an das Versorgungsnetz der Normalzone angeschlossen. Zudem gibt es drei Druckzonen (Normal-, Hoch- und Höchstzone), die über mehrere Pumpstationen miteinander verbunden sind. Versorgt wird die Normalzone über das Wasserwerk Barbarossastraße. Dort stehen vier parallel geschaltete Netzpumpen unterschiedlicher Baugröße für die Förderung des Trinkwassers zur Verfügung. Der Betrieb dieser Netzpumpen wurde in enger Zusammenarbeit der Projektpartner SAM, SWK und ITWM in die H₂Opt Software integriert.

Mit Hilfe der in der SQL-Datenbank gespeicherten Messdaten und auf Basis der im Rahmen des Verbundprojektes entwickelten Methodik zur Erstellung des Anlagenkennfeldes, wurde das Anlagenkennfeld für das Versorgungsnetz der Normalzone erstellt. Wie bereits zuvor erwähnt, ist das betrachtete Versorgungsnetz des Projektpartners SWK deutlich komplexer als das Versorgungsnetz des Projektpartners EWR. Zum einen ist das Speichervolumen der beiden Hochbehälter (HB Weidengarten und HB Betzenberg) nicht identisch und zum anderen liegt die maximale Füllhöhe des HB Betzenberg deutlich unterhalb der maximalen Füllhöhe des HB Weidengarten. Dies bedeutet, dass der HB Betzenberg im Prinzip künstlich bewirtschaftet werden muss. Um einen Wasseraustausch im HB Betzenberg zu gewährleisten wird in Zeiten von Niedrigverbrauch das im HB Betzenberg gespeicherte Wasser in das Versorgungsnetz Hochzone gepumpt. Zusätzlich zu den beiden Pumpstationen an den beiden Hochbehältern sind im Versorgungsnetz der SWK vier weitere Pumpstationen verteilt, die Wasser aus der Normalzone in eine andere Druckzone übergeben können. Das Trinkwasser, das durch diese Pumpstationen dem Versorgungsnetz Normalzone entnommen wird, muss zu dem Netzverbrauch der Normalzone addiert werden. Die unterschiedlichen Behältergrößen sowie die Förderung der Pumpstationen erschwerten die Erstellung eines Anlagenkennfeldes für das Versorgungsnetz Normalzone. Durch das verhältnismäßig sehr geringe Speichervolumen der beiden Hochbehälter, müssen im Wasserwerk Barbarossastraße die vier Hauptpumpen quasi im Dauerbetrieb betrieben werden. Die Methodik zur Erstellung eines Anlagenkennfeldes sieht die Verwendung von Stützpunkten vor, bei denen keine Förderung in das Versorgungsnetz stattfindet. Durch den Dauerbetrieb der vier Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße fehlen diese Stützpunkte gänzlich. Trotz dieser

Unwägbarkeiten ist den Projektpartnern SAM, SWK und ITWM die Erstellung und die Integration des Anlagenmodells für das Versorgungsnetz Normalzone in die H₂Opt Software gelungen. Die Übertragbarkeit der Methodik zur Erstellung des Anlagenkennfeldes konnte somit erfolgreich bewiesen werden.

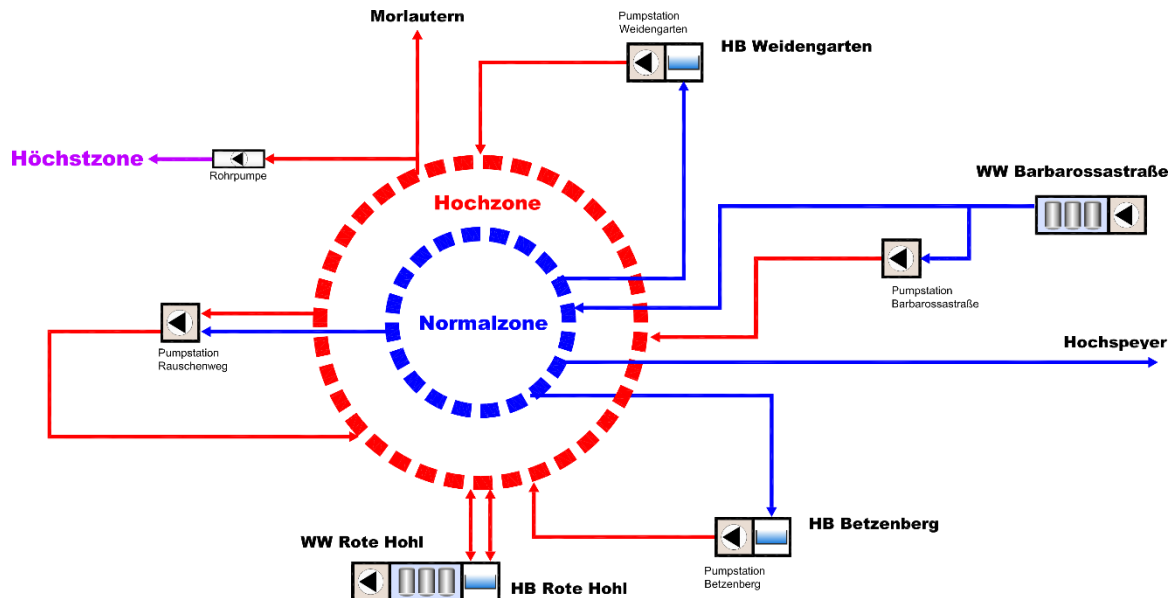


Abb. 8: Anlagenschema der Normalzone inklusive deren Anschlüsse ans Wasserwerk Barbarossastraße, an die Hochbehälter und an die Hochzone

Modellierung der Anlage der Verbandsgemeindewerke Landstuhl

Die Übertragbarkeit des Anlagenkennlinienmodells bzw. die Methodik zur Bestimmung dieses hydraulischen Modells sollte an einem dritten Versorgungsnetz getestet werden. Hierzu sollte in Zusammenarbeit der Projektpartner SAM und OPB die H₂Opt Software auf das Versorgungsnetz der Verbandsgemeindewerke Landstuhl angewandt werden. Die Verbandsgemeindewerke Landstuhl betreiben die Wasserversorgung für die Stadt Landstuhl und die Ortsgemeinden Bann, Hauptstuhl, Kindsbach, Mittelbrunn und Oberarnbach. Zur Wasserversorgung zählen die Wassergewinnung, -aufbereitung, -speicherung und -verteilung. Die Verbandsgemeindewerke Landstuhl betreiben 10 Tiefbrunnen, 4 Wasserwerke, eine Vielzahl von Hochbehältern sowie ein Leitungsnetz mit einer Gesamtlänge von ca. 125 km. Hierzu zählt auch die Wasserversorgung des Landstuhl Regional Medical Centers der US Army.

Für den Anwendungstest sollte zunächst der Betrieb des Wasserwerkes Kindsbach untersucht und optimiert werden. OPB und SAM sahen im Wasserwerk Kindsbach die Möglichkeit den anstehenden Anwendertest relativ rasch zu realisieren. Auf Grund der Datenlage im Wasserwerk Kindsbach konnte dieses Vorhaben leider nicht mehr innerhalb des Projektrahmens realisiert werden. OPB und SAM waren parallel auf der Suche nach einer Versorgungsanlage, deren Datenbasis und -struktur sich besser für einen Anwendertest eignen würde. Leider ist auch dies im Laufe des Projektes nicht mehr gelungen.

Optimierung und Entscheidungsunterstützung

Die im Rahmen des Verbundprojektes entwickelte Software basiert auf einer mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung. Grundsätzlich fließen in eine Optimierung verschiedene Entscheidungsparameter mit ein und gleichzeitig kann der Anwender dabei verschiedene Optimierungsziele definieren. Die zuvor definierten Optimierungsziele können sowohl kohärent als auch diametral sein.

Dem Fachpersonal in der Leitwarte einer Trinkwasserversorgungsanlage stehen beispielhaft die Entscheidungsparameter Pumpenauswahl, Schaltzeiten und Drehzahlregelung zur Auswahl. Dies bedeutet, das Fachpersonal muss sich entscheiden, welche Pumpe zu welchem Zeitpunkt eingesetzt und, falls vorhanden, mit welcher Drehzahl die ausgewählte Pumpe betrieben werden soll. Bei der Entscheidungsfindung muss das Fachpersonal dabei stets die Optimierungsziele berücksichtigen. Für den Fall einer Trinkwasserversorgungsanlage sind dabei beispielhaft die Optimierungsziele Stromkostensenkung, möglichst geringer Energieverbrauch und möglichst geringe Anzahl an Schaltungen zu nennen. Bei über den Tag gleichbleibenden Stromkosten bedeutet ein minimaler Energieverbrauch dabei gleichzeitig minimale Stromkosten. Bezieht der Anwender allerdings variable Stromkosten sind diese beiden Optimierungsziele nicht mehr gleichzusetzen und der Anwender möchte seine Pumpen möglichst in Zeiten von niedrigen Strompreisen betreiben.

Mathematisch betrachtet stellt das Problem der Lösungsfindung zunächst ein ganzzahliges Optimierungsproblem dar. Abb. 9 zeigt die in der H₂Opt Software unter anderem angewendete Tiefensuche im Entscheidungsbaum (Branch-and-Bound). Zum Startzeitpunkt ($t = 0$) der Entscheidungsfindung stehen dem Anwender drei Möglichkeiten zur Verfügung: Den Betrieb von Pumpe 1 (gelber Punkt), den Betrieb von Pumpe 2 (blauer Punkt) oder keine Pumpe (roter Punkt) zu betreiben, da im Hochbehälter eventuell noch genügend Reserven zur Verfügung stehen. Nach einem Zeitschritt vergleicht der Solver jede Lösungsmöglichkeit auf ihre Umsetzbarkeit. In Abb. 9 würde ein Einsatz von Pumpe 1 im ersten Zeitschritt ($t = 1$) zu einer nicht zulässigen Lösung führen. Diese Lösungsmöglichkeit wird im ersten Zeitschritt ausgeschlossen. Alle weiteren Lösungsmöglichkeiten, die den Einsatz von Pumpe 1 im ersten Zeitschritt vorsehen, werden im Anschluss nicht weiter betrachtet. Die in Abb. 9 exemplarisch durchgeführte Optimierung über drei Zeitschritte bietet dem Anwender am Schluss drei Lösungsmöglichkeiten. Lösung 3 wird bei gleicher Schaltanzahl aber einem höheren benötigten Energieeinsatz durch Lösung 1 dominiert und ist bei der Entscheidungsfindung auszuschließen. Somit stehen dem Anwender zwei Lösungen zur Verfügung, zwischen denen er sich entscheiden kann. Der Anwender entscheidet selbstständig, welches Optimierungsziel er stärker gewichten möchte. Lösung 1 ist die beste Lösung im Hinblick auf die geringste Anzahl an Schaltungen, während Lösung 2 den geringsten Energieeinsatz erfordern würde. Die H₂Opt Software unterstützt somit den Anwender bei der Entscheidungsfindung und hilft ihm Lösungen qualitativ zu vergleichen.

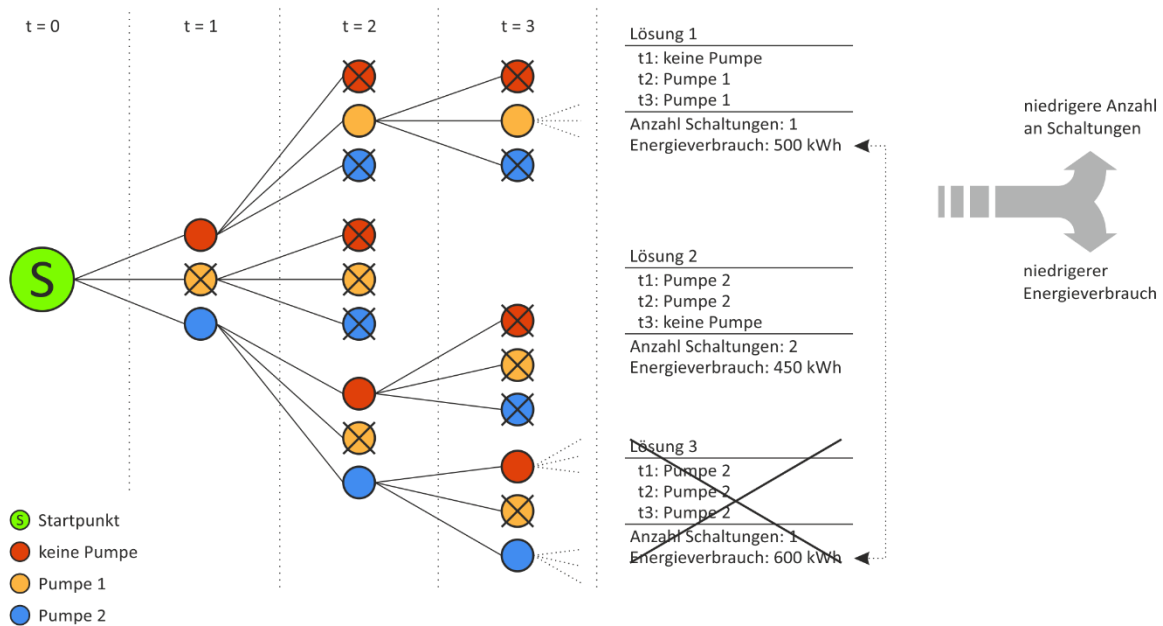


Abb. 9: Tiefensuche im Entscheidungsbaum (Branch-and-Bound)

Optimierung von Aufbereitungsanlagen

Ein weiterer Optimierungsansatz an Trinkwasserversorgungsanlagen bietet der Bereich der Aufbereitungsanlagen. Diesbezüglich wurden im Wasserwerk Barbarossastraße des Projektpartners SWK in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SAM umfangreiche Untersuchungen an der Aufbereitungsanlage durchgeführt. Der Fokus dieser Untersuchungen lag dabei auf dem Energieeinsparpotential bei Variation der Spülintervalle und -zeiten an der Filteranlage im Wasserwerk Barbarossastraße. Eine Filterrückspülung läuft klassisch in drei Phasen ab: Luftspülung, Luft-/Wasserspülung, Wasserspülung.

Die Luftspülung lockert das Filterbett. Die anschließende Luft-/Wasserspülung hat den gleichen Effekt. Das beigemischte Wasser fördert dabei zusätzlich kleine Schwebeteilchen und ausgewaschenes Filtermaterial nach oben. Die abschließende Wasserspülung wird auch Klarspülung genannt. Sie dient dazu den Filter wieder in einen betriebsbereiten Zustand zu bringen. Das meiste Energieeinsparpotential bietet bei diesem Rückspülprozess die Dauer der Luft-/Wasser- und der Wasserspülphase. Bei einer etwaigen Optimierung des Rückspülprozesses muss die uneingeschränkte Verfügbarkeit der Filteranlage und eine gleichbleibende Wasserqualität oberste Priorität haben.

Abb. 10 zeigt eine Gegenüberstellung der einzelnen Spülprogramme hinsichtlich des Trübungswertes im Spülwasser während der Klarspülphase aufgetragen über der Zeit. Die Verläufe weisen dabei zu Beginn der Klarspülphase eine deutliche Abhängigkeit gegenüber der Luft/Wasser-Phase auf. Je länger die Luft/Wasser-Phase durchgeführt wurde, desto niedriger war die Anfangstrübung im Spülwasser während der Klarspülphase. Im weiteren Verlauf der Klarspülphase nähern sich jedoch alle Trübungskurven einem Wert von 15 FNU an. Dieser Wert

liegt 15-fach über dem zulässigen Grenzwert. Es handelt sich dabei aber um den Wert eines Filters. Der Trübungswert im Reinwasser, das heißt nach der Filteranlage wurde in der Versuchsreihe zu keinem Zeitpunkt überschritten. Ein erhöhter Trübungswert nach einer Filtrerrückspülung ist völlig normal. Die anschließende Durchmischung mit dem Reinwasser der restlichen Filter führt zu einem deutlichen Rückgang und Unterschreiten des Trübungsgrenzwertes.

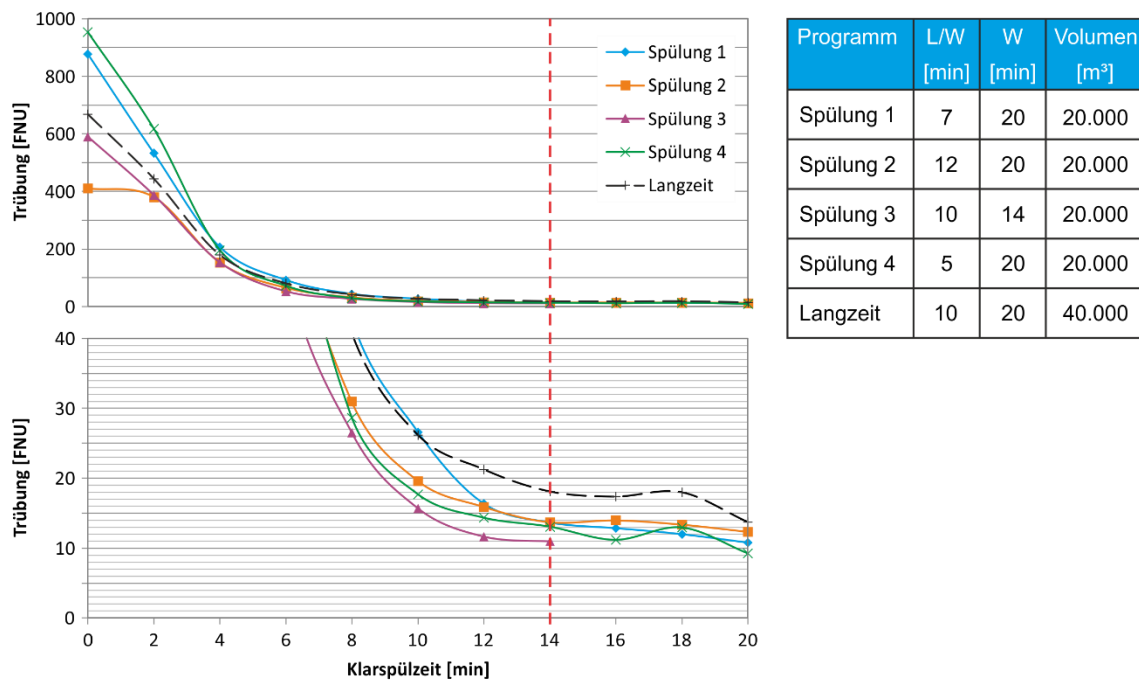


Abb. 10: Vergleich der Trübungswerte der einzelnen Spülprogramme

Würden die einzelnen Spülprogramme umgesetzt, ergäben sich die in Abb. 11 gezeigten prozentualen Energieeinsparpotentiale pro Jahr. Der Jahresenergieverbrauch der kompletten Filteranlage im Wasserwerk Barbarossastraße beträgt circa 6.200 kWh. Die gegenüber der Referenzspülung veränderten Parameter sind orange hinterlegt. Die potentielle Energieeinsparung wird unterteilt in Energieeinsparpotential in der Klarspülphase, des anteiligen Wassers in der Luft-/Wasserspülphase (L/W-Phase), der anteiligen Luft in der Luft-/Wasserspülphase und in der Luftspülphase. Hinsichtlich der Energieeinsparung und einer gleichbleibenden Wasserqualität stellte sich das Spülprogramm „Optimum I“ als beste Lösung heraus. Durch eine gleichzeitige Verlängerung der Spülintervalle von 20.000 m³ auf 30.000 m³, eine Verkürzung der Luft-/Wasserspülphase um 3 min und eine Verkürzung der Wasserspülphase um 4 min könnte bei gleichbleibender Wasserqualität eine Energieersparnis von 46 % pro Jahr erzielt werden.

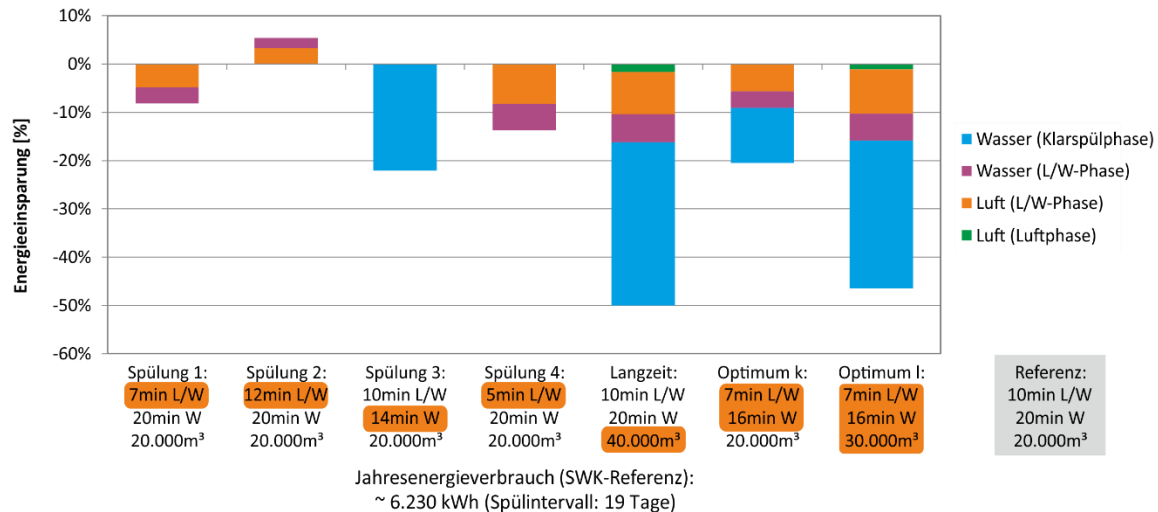


Abb. 11: Energieeinsparpotentiale pro Jahr an der Filteranlage im Wasserwerk Barbarossastraße (SWK)

Während der Versuchsreihe konnte keine Veränderung der Wasserqualität festgestellt werden. Jedes Spülprogramm wurde mehrfach wiederholt und in beiden Filterstraßen im Wasserwerk Barbarossastraße durchgeführt. Vor einem Wechsel des Spülprogrammes wurden die Filter zunächst mit der Standardspülung zurückgesetzt. Eine Filterbeeinflussung durch die vorherige Versuchsreihe kann somit ausgeschlossen werden. Die im Rahmen des Verbundprojektes gewonnenen Erkenntnisse können nur als Kurzeitergebnisse angesehen werden. Eine Aussage über eine etwaige langfristige Veränderung des Filterverhaltens kann somit nicht getroffen werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten gleichwohl Grenzen hinsichtlich der Spülzeiten aufgezeigt werden. Die Rahmen des Verbundprojektes durchgeführten Untersuchungen an der Filteranlage sind ein Teil der ganzheitlichen Betrachtung einer Trinkwasserversorgungsanlage.

Modellierung des Rohrleitungsnetzes der SWK als Alternative zum Anlagenkennfeld

Parallel zur Modellierung der Anlage der SWK über das Modell eines Anlagenkennfeldes wurde von der SWK und SAM mit der Erstellung eines Rohrleitungsmodells begonnen. Die Modellierung erfolgte mit der Software STANET zunächst für den Stadtteil Dansenberg. Ziel war es die mit STANET erstellten Modelle nach Epanet zu exportieren und so für die Optimierung mit der H2Opt Software verfügbar zu machen.

Die Daten des Wasserversorgungsnetzes in Kaiserslautern und Umgebung lagen bei Projektbeginn in G!NIUS als GISX Datenbanken vor. Leider waren diese Daten unvollständig aufgrund des Alters Rohrleitungsnetzes. Zur Erstellung des Modelles musste deshalb zu Beginn die benötigten Daten wie Rohrlängendurchmesser, Werkstoffe, etc. aus Ordnern im Archiv der SWK in die GIS-Datenbanken integriert werden. Der Aufwand dafür hielt sich für den Stadtteil Dansenberg in Grenzen, für das komplette Versorgungsgebiet der SWK konnte diese Datenerfassung innerhalb der Laufzeit des Projektes leider nicht abgeschlossen werden. Deshalb wurde der Prozess

exemplarisch nur für Dansenberg durchgeführt. Nach der Vervollständigung der GIS-Daten wurde in STANET eine Schnittstelle erstellt, mit der die Daten aus der GIS-Datenbank in STANET importiert werden können. Das so erstellte Modell wurde nach EPANET importiert (Abb. 12) und war somit für die Optimierung mit der H2Opt Software verfügbar.



Abb. 12: EPANET-Modell des Stadtgebietes Dansenberg

Modellierung von Brunnenpumpen

Ein zentrales Element des Verbundprojektes H2Opt war die Entwicklung eines Modellierungsansatzes für den Betrieb von Vertikalbrunnen. Bei der Modellierung des Brunnenbetriebs wird der Betriebspunkt der Pumpe durch Berechnung des Schnittpunktes zwischen Anlagen- und Pumpenkennlinie bestimmt. Die Anlagenkennlinie wird der Modellierung vorgegeben, bei drehzahlgeregelten Brunnenpumpen kann sie experimentell ermittelt werden. Alternativ kann bei Brunnen ohne Frequenzumrichter die Anlagenkennlinie mit Hilfe eines Rohrleitungsrechners (z.B. EPANET (20) oder STANET®) simuliert werden.

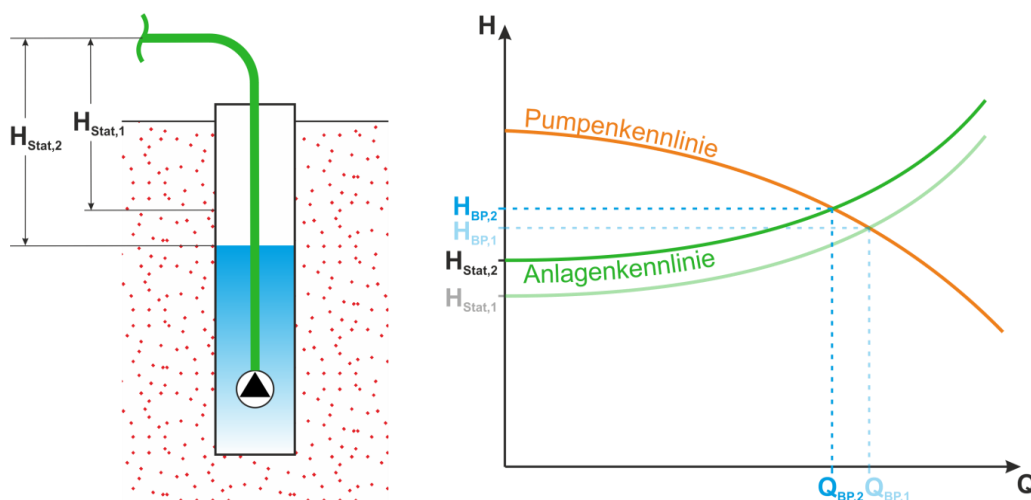


Abb. 13: Einfluss der Absenkung des Wasserspiegels auf die Anlagenkennlinie

Abb. 13 zeigt den Einfluss der Absenkung des Wasserspiegels auf die Anlagenkennlinie. Durch den Betrieb der Brunnenpumpe senkt sich der Wasserspiegel im Brunnenschacht ab. Hierdurch erhöht sich die statische Förderhöhe der Anlagenkennlinie (vgl. Abb. 13, $H_{Stat,1}$ mit $H_{Stat,2}$) und der Betriebspunkt verschiebt sich in Richtung Teillast.

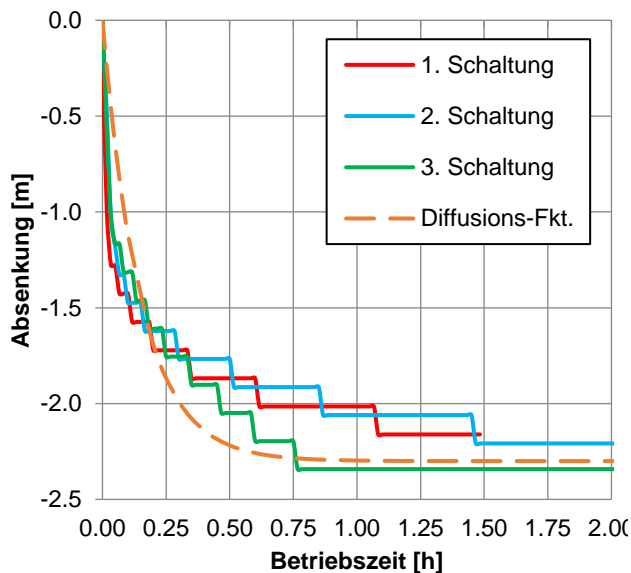


Abb. 14: Zeitliches Absenkverhalten am Beispiel von Brunnen H (SWK, PLS-Daten vom Januar 2015)

Die Absenkung des Wasserspiegels ist zeit- und Betriebspunktabhängig. Dabei steigt die Absenkung proportional zur Fördermenge der Brunnenpumpe. Den zeitlichen Einfluss zeigt Abb. 14 am Beispiel von Brunnen H der SWK. Aufgetragen ist die Absenkung über der Betriebszeit der Brunnenpumpe für drei verschiedene Schaltzyklen. Nach dem Einschaltvorgang senkt sich der Wasserspiegel zunächst schlagartig ab und nähert sich mit fortschreitender Betriebszeit asymptotisch der maximalen Absenkung, die wiederum fördermengenabhängig ist, an. Das erstellte Modell berücksichtigt das zeitliche Absenkverhalten durch die nachfolgende Diffusionsfunktion:

$$s(t) = a \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + b$$

Mit Hilfe der Funktionsparameter a , Maximalabsenkung b und Zeitschrittweite τ wird der zeitliche Verlauf der Absenkung beschrieben. Die auf das Absenkverhalten des Brunnens angepassten Parameter sind durch Messdaten aus dem Leitsystem (PLS-Daten) zu bestimmen und dem Modell vorzugeben. In Abb. 14 ist das durch die Diffusionsfunktion beschriebene Absenkverhalten von Brunnen H mit der orangenen, gestrichelten Linie gekennzeichnet.

Neben dem Absenkverhalten des Wasserspiegels bei Vertikalbrunnen wurden auch die Anlagenkennlinien der Vertikalbrunnen modelliert. Abb. 15 zeigt die Umsetzung einer Brunnenskizze (Abb. 15 oben) in das zugehörige EPANET-Modell (Abb. 15 unten) für den Brunnen D im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost des Projektpartners SWK. Mit Hilfe der

EPANET-Modelle konnten die Anlagenkennlinien der Vertikalbrunnen bestimmt werden. Dazu wurden die EPANET-Modelle zunächst mit Hilfe der gesammelten Messdaten kalibriert. Das Verfahren zur Bestimmung der Anlagenkennlinie von Vertikalbrunnen wurde im Anschluss an drehzahlgeregelten Vertikalbrunnen überprüft. Die simulierten Anlagenkennlinien wurden den gemessenen Anlagenkennlinien gegenübergestellt. Eine Modellierung von Vertikalbrunnen mit einem Rohrleitungsrechner, wie z.B. EPANET, ist zwar grundsätzlich möglich, allerdings wird die Anlagenkennlinie von Vertikalbrunnen noch zusätzlich von äußeren Bedingungen beeinflusst. In erster Linie wäre hierzu die Ergiebigkeit des Grundwasserkörpers zu nennen, die wiederum einen Einfluss auf das Absenkenverhalten des Wasserspiegels im Brunnenschacht hat.

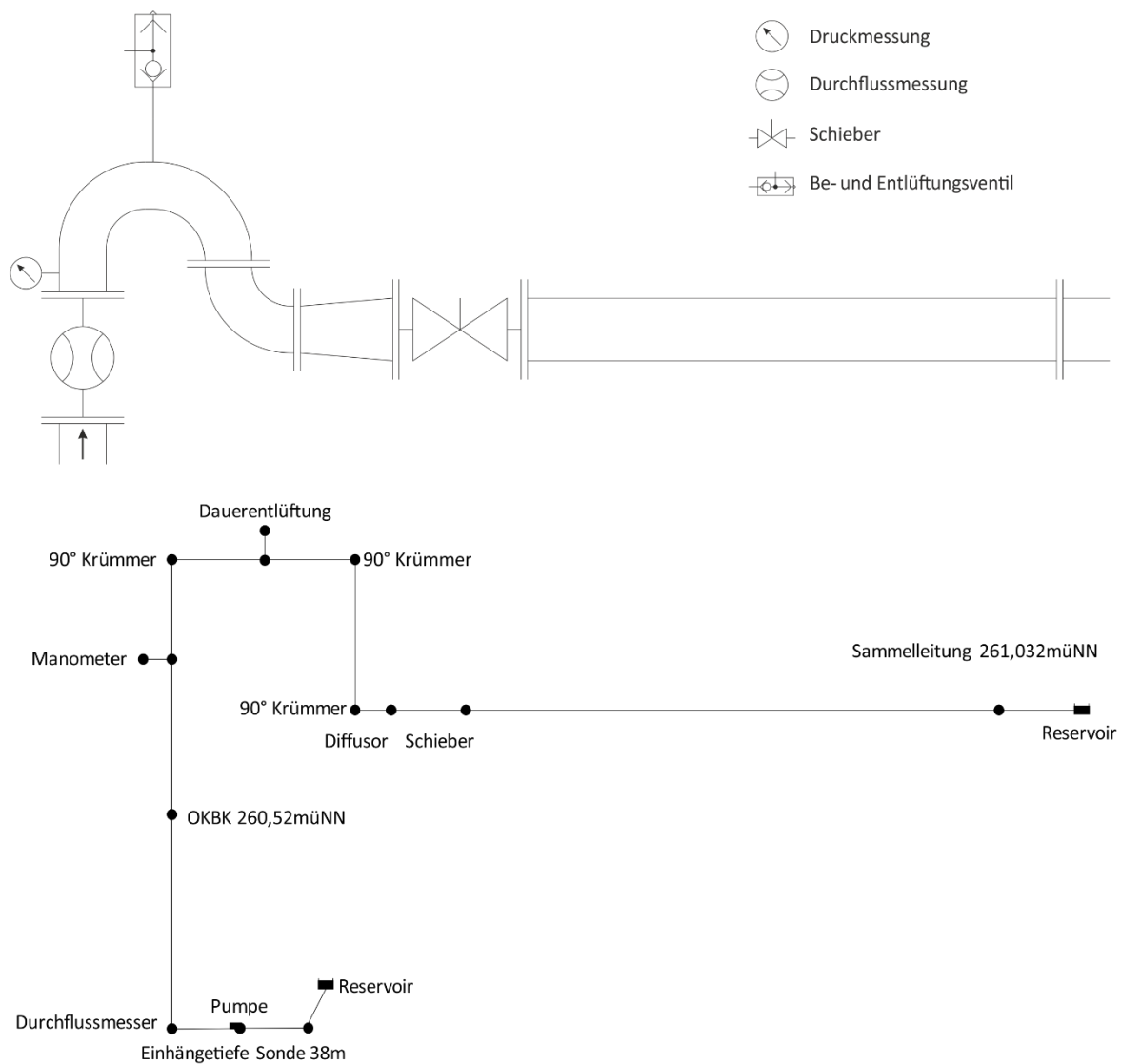


Abb. 15: Brunnenskizze (oben) und EPANET-Modell (unten) für Brunnen D (SWK)

Prognose des Trinkwasserverbrauches

Während des H2Opt Projektes durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass der Wasserbrauch im Versorgungsnetz Einfluss auf die Steigung der Anlagenkennlinie und damit auf den Betrieb der Netzpumpen hat. Dieser Einfluss wird entsprechend auch bei den Anlagenmodellen für das EWR Versorgungsnetz und für das Versorgungsnetz der Normalzone Kaiserslautern (SWK) mitberücksichtigt. Um einen Pumpenfahrplan für die Netzpumpen z.B. über einen Zeitraum von einem Tag vorausrechnen zu können, muss für die gleiche Zeitspanne ein (zeitabhängiger) Netzverbrauch prognostiziert werden. Abb. 16 zeigt einen solchen Netzverbrauch - auch Netzverbrauchsprofil genannt – exemplarisch für einen Werktag.

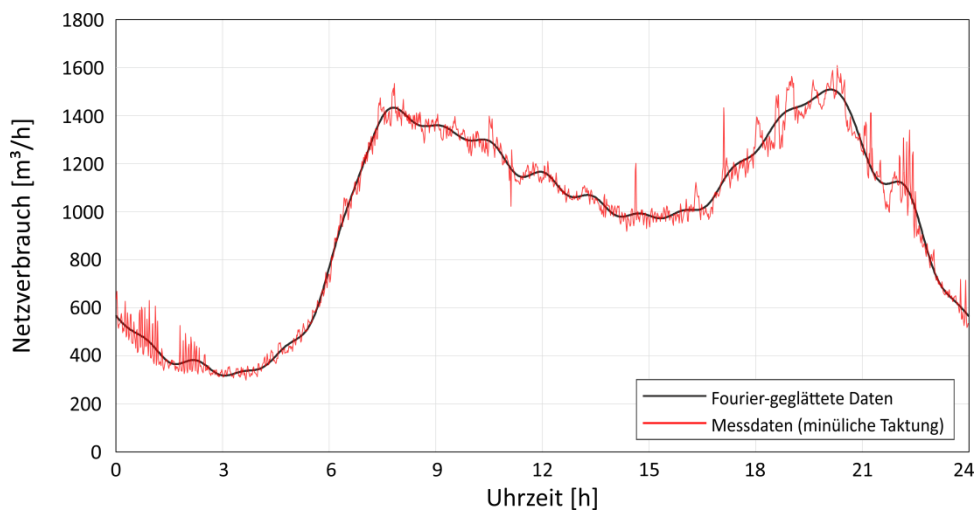


Abb. 16: Netzverbrauchsprofil eines Werktages (Mi. 17.07.2013) für das Versorgungsgebiet der EWR; Messdaten und Fourier-geglätteten Daten

In Abb. 16 ist der reale, aus den Messdaten bilanzierte Netzverbrauch (rote Linie) über einen Tag, Mittwoch den 17.07.2013, aufgetragen. Im Vergleich dazu ist eine Fourier-Glättung dieser Daten (schwarze Linie) dargestellt. Der Verbrauchsverlauf wird dabei mit den ersten 20 Summationsgliedern der Fourierreihe approximiert. Durch diese Beschreibung des Verbrauchsprofils mit Hilfe der Fourierreihe können niedrigskalige, statistische Schwankungen herausgefiltert werden.

Für die Entwicklung der Methodik zur Netzverbrauchsprognose wurden die Netzverbräuche im Versorgungsnetz des Projektpartners EWR für die beiden Jahre 2012 und 2013 untersucht. Zunächst wurde eine Clusterung der Tagesverbrauchsprofile bezüglich des jeweiligen Gesamtverbrauches durchgeführt. Dabei zeigten sich ähnliche Verbrauchsverläufe bei den zu einem Cluster gehörenden Tagesverbrauchsprofilen. Die Cluster sind in 1.000 m³-Schrittweite von 17.000 bis 22.000 m³ Tagesgesamtverbrauch unterteilt.

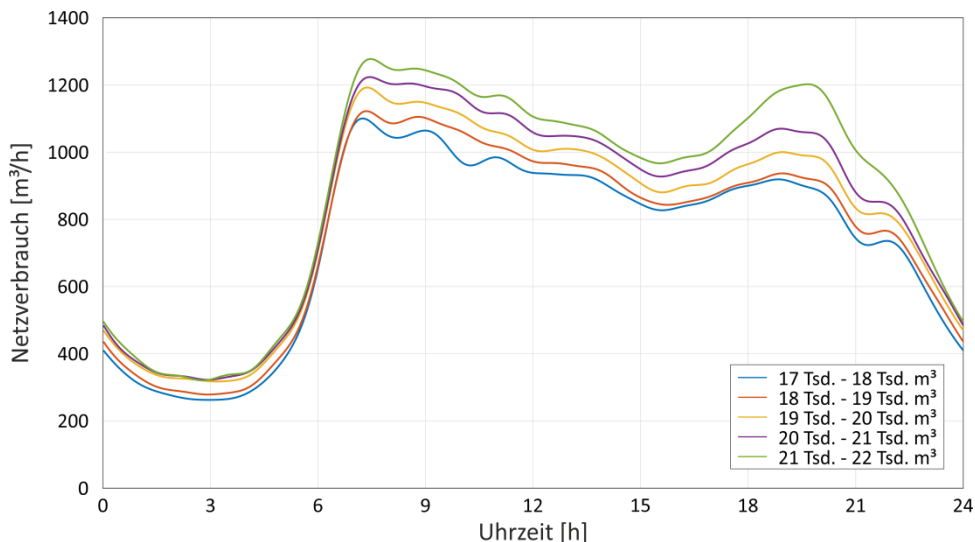


Abb. 17: Tagesverbrauchsprofile des EWR Versorgungsnetz, gemittelt für die Gesamtverbrauchscluster

Abb. 17 zeigt die, für jeden Gesamtverbrauchscluster, gemittelten Tagesverbrauchsprofile. Der prinzipielle Verlauf des Verbrauchsprofils ist immer gleich, dieser gibt (als statistisches Mittel) die Gewohnheiten beim Wasserverbrauch bzw. den Tagesablauf der Einwohner des Versorgungsgebietes wieder. Ausgehend von diesem prinzipiellen Verlauf kann das Tagesverbrauchsprofil in drei Teile (vgl. Abb. 18) unterteilt werden. Zu Beginn des Tages ist der Wasserverbrauch im Netz niedrig, zwischen 5 und 9 Uhr steigt der Verbrauch sehr stark an (Modellteil 1). Anschließend stagniert der Wasserverbrauch kurz im Bereich des Tagesmaximums, ehe er im Verlauf des Nachmittags kontinuierlich zurückgeht (Modellteil 2). Zum Abend hin steigt der Verbrauch im Netz nochmal an, bevor er zur Nacht hin deutlich absinkt (Modellteil 3).

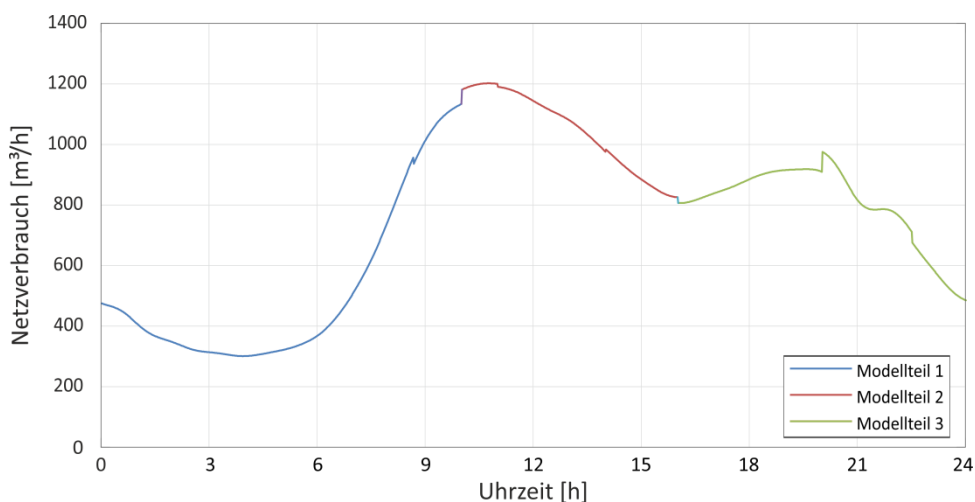


Abb. 18: Tagesverbrauchsprofil, Modellverlauf und Unterteilung exemplarisch für ein Gesamtverbrauchscluster

In Abb. 18 ist ein Tagesverbrauchsprofil exemplarisch für einen Gesamtverbrauchscluster dargestellt. Der Modellverlauf ist in die zuvor beschriebenen Modellteile (1 bis 3) unterteilt. Bei der entwickelten Netzverbrauchsprognose wird ein solcher Verlauf zu Tagesbeginn vorgegeben. Hierbei wird mit Hilfe des Gesamtverbrauches des Vortages und unter Berücksichtigung des zu

prognostizierenden Wochentages (Unterscheidung zwischen Werktag, Samstag, sowie Sonn- und Feiertagen) das jeweilige, gemittelte Tagesverbrauchsprofil der Cluster (s. Abb. 17) ermittelt und zunächst als Verbrauchsprognose angenommen. Im weiteren Tagesverlauf wird der gemessene, reale Verbrauch im Versorgungsnetz mit dem zu Beginn prognostizierten Tagesverbrauchsprofil abgeglichen. Dieser Vergleich wird innerhalb vordefinierter Zeiträume - den sogenannten Kontrollräumen – durchgeführt. Ist die detektierte Abweichung zwischen prognostiziertem und realem Wasserverbrauch zu groß (d.h. größer als ein vorgegebener Grenzwert), so wird die Verbrauchsprognose entsprechend angepasst. Hierbei werden die nachfolgenden Modellteile, abhängig davon ob der prognostizierte Verbrauch vom realen Verbrauch über- bzw. unterschritten wird, in Richtung höher oder niedriger gelegene Gesamtverbrauchscluster verschoben. Diese Korrekturmethode ist in Abb. 18 an den „Sprüngen“ im Tagesverbrauchsprofil ersichtlich.

Die basierend auf den Netzverbrauchsdaten von EWR entwickelte Prognosemethode wurde mit Hilfe der Jahresdaten von 2014 validiert. Die Untersuchungen zeigten gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und den prognostizierten Verbrauchswerten. Abb. 19 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung eines prognostizierten (blaue Linie) und eines realen Verbrauchsprofils (rote gestrichelte Linie) für einen Tag. Beide Verbrauchsprofile zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung. Über dem gesamten Untersuchungszeitraum (Jahr 2014) betrug die mittlere Abweichung des prognostizierten Verbrauchs gegenüber den Realwerten 5,3 %.

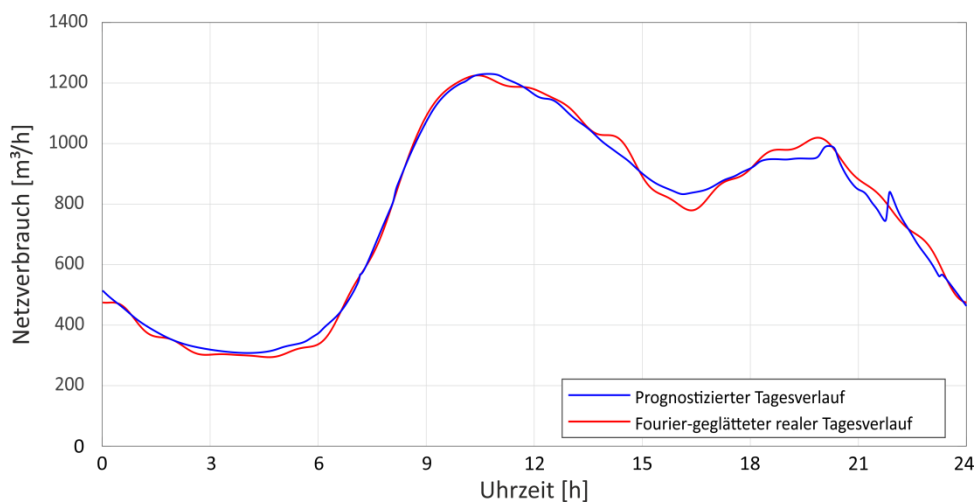


Abb. 19: Gegenüberstellung prognostiziertes und reales Verbrauchsprofil

Erstellung der graphischen Benutzeroberfläche

Die in AP3 und AP4 entwickelten Modelle wurden durch den Projektpartner ITWM in die Software integriert. Die Software wurde zudem mit einer interaktiven graphischen Benutzeroberfläche ausgestattet, die dem Nutzer eine einfache und schnelle Handhabung bieten soll. Nachfolgend wird die graphische Benutzeroberfläche präsentiert und die Bedienbarkeit erläutert.

In Abb. 20 ist der Drag&Drop-Editor der H₂Opt Software gezeigt. Mit Hilfe dieses Editors kann der Nutzer beliebige Versorgungsschemata aufbauen. Abb. 20 zeigt dabei das Versorgungsschema des Projektpartners EWR am Beispiel des Wasserwerkes Bürstadt. Auf der linken Seite ist die Rohwassergewinnung in grün dargestellt. Die Rohwassergewinnung ist mit dem Wasserwerk Bürstadt (Bildmitte) verknüpft. Darin sind die vier Netzpumpen (P1-P4) parallel verschaltet. Das Wasserwerk Bürstadt ist auf der Ausgangsseite mit dem Versorgungsnetz, dargestellt durch die Stadt Worms, verknüpft. Die an das Versorgungsnetz angeschlossenen beiden identischen Hochbehälter sind im Versorgungsschema in einem Hochbehälter (HB) zusammengeführt. Das mit Hilfe des Drag&Drop-Editors erstellte Versorgungsschema wird im Anschluss als Modelltopologie an die H₂Opt Software übergeben. Die umgesetzte Topologie wird in Abb. 21 auf der linken Seite als Strukturbaum dargestellt. Die Topologie besteht dabei aus Komponenten, Objekten und Rohren. Diesen werden entsprechende Attribute zugewiesen, die wiederum durch den Nutzer verändert werden können.

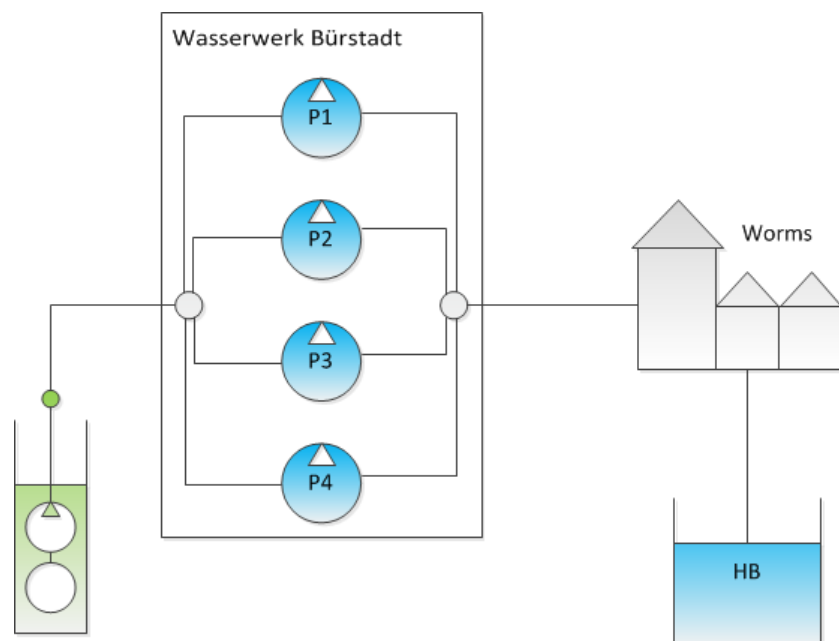


Abb. 20: Abbildung Versorgungsschema EWR im Drag&Drop-Editor der H₂Opt Software

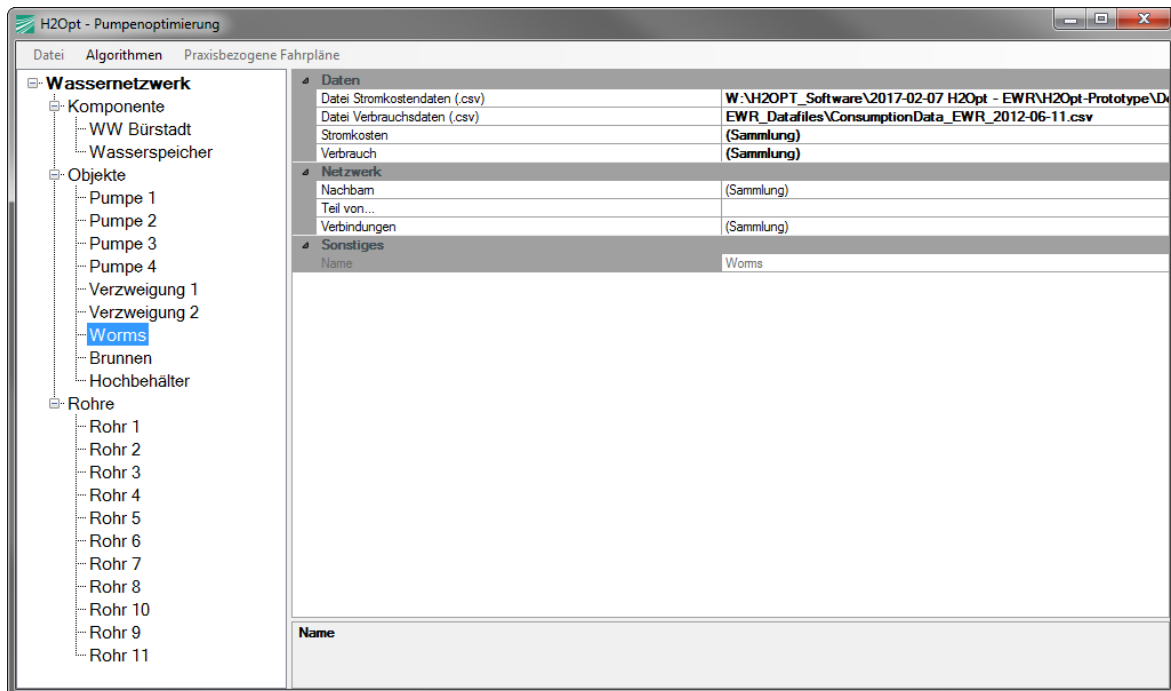


Abb. 21: Startfenster der H₂Opt Software

Eine Änderung der Attribute erfolgt durch Eingaben in Abb. 21 im Bereich auf der rechten Seite. In dem gezeigten Beispiel sind die Änderungsmöglichkeiten für das Objekt Worms gezeigt. Hierbei können in den beiden ersten Zeilen csv-Dateien für die Stromkosten und die Verbrauchsdaten eingelesen werden. Beide Datensätze können zusätzlich manuell verändert werden. Beispielhaft wird hierzu der Verbrauchsdaten Editor in Abb. 22 gezeigt. Die Verbrauchsdaten werden sowohl tabellarisch (Abb. 22 links) als auch graphisch (Abb. 22 rechts) dargestellt. Eine manuelle Änderung der Verbrauchsdaten ist dabei per Drag&Drop der einzelnen Datenpunkte in der graphischen Darstellung (Abb. 22 rechts) möglich. Die manuell veränderten Verbrauchsdaten können im Anschluss für die Optimierung abgespeichert werden. Nach erfolgter Zuweisung aller Attribute kann mit der Software die Optimierung gestartet werden. Im gezeigten Beispiel handelt es sich dabei um die Erstellung eines Pumpenfahrplans für einen Tag mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Die Optimierung kann mit verschiedenen hinterlegten Algorithmen durchgeführt werden. Eine energieoptimierte Lösungsmenge für das in Abb. 22 vorgegebene Verbrauchsprofil ist in Abb. 23 gezeigt. Die von der Software berechneten Lösungsmöglichkeiten sind in Abhängigkeit der für den berechneten Fahrplänen benötigten Schaltungen über dem spezifischen Energieverbrauch in kWh/m³ aufgetragen.

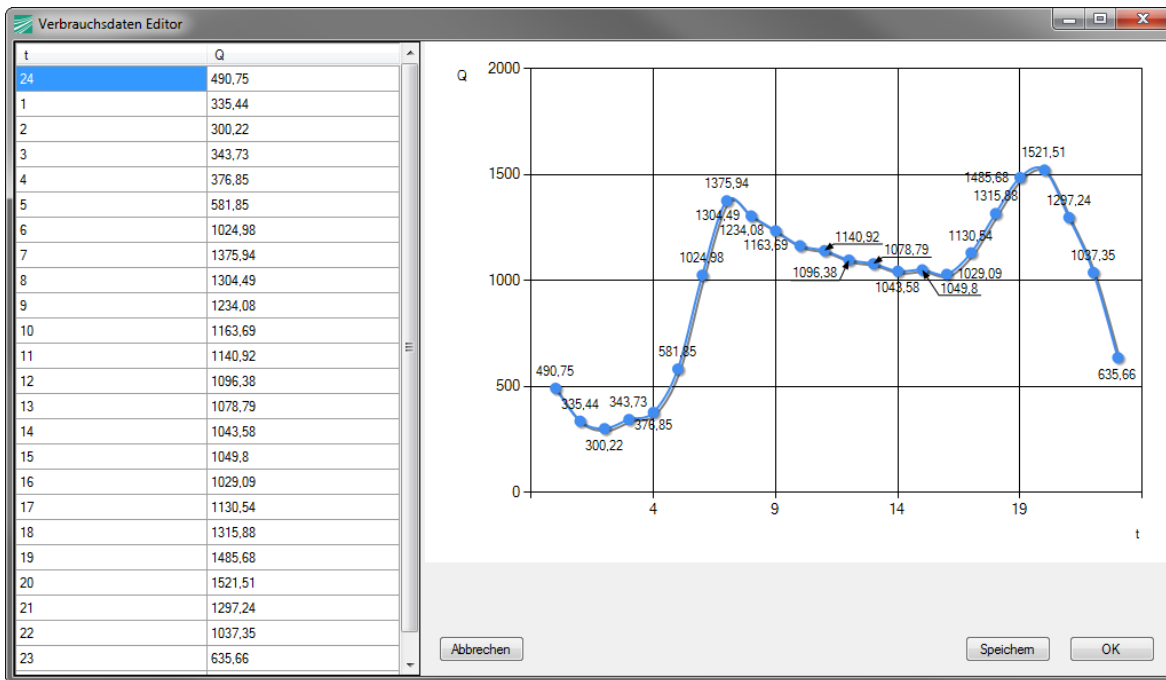


Abb. 22: Verbrauchsdaten Editor der H₂Opt Software

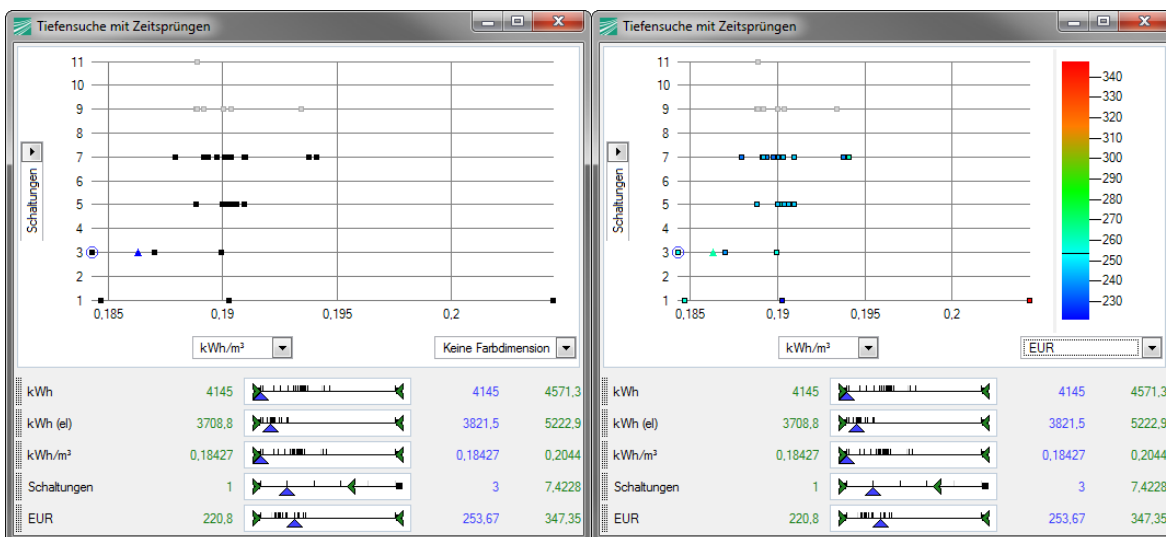


Abb. 23: Darstellung der Lösungsmöglichkeiten zwei- (links) und dreidimensional (rechts) in der H₂Opt Software

Zusätzlich zu der zweidimensionalen Darstellung (Schaltanzahl über spezifischem Energieverbrauch) kann den Lösungsmöglichkeiten eine dritte Dimension zugewiesen werden. In Abb. 22 sind den Lösungsmöglichkeiten auf der rechten Seite mit Hilfe einer Farbskala die Energiekosten für den möglichen Pumpenfahrrplan zugewiesen. Auf beiden Seiten sind die durch die H₂Opt Software berechneten Lösungsmöglichkeiten als Quadrate dargestellt. Eine durch den Nutzer modifizierte Lösung wird durch ein Dreieck dargestellt.

Der Nutzer kann in Abb. 22 die Lösungsmenge durch Verwendung von Schieberegler zusätzlich eingrenzen. Lösungsmöglichkeiten, die nicht dem Nutzerwunsch entsprechen werden dabei in grau dargestellt. Jede Lösungsmöglichkeit in Abb. 23 kann durch den Nutzer angeklickt und

modifiziert werden. Die graphische Darstellung der Pumpenfahrpläne in der H₂Opt Software ist in Abb. 24 dargestellt.

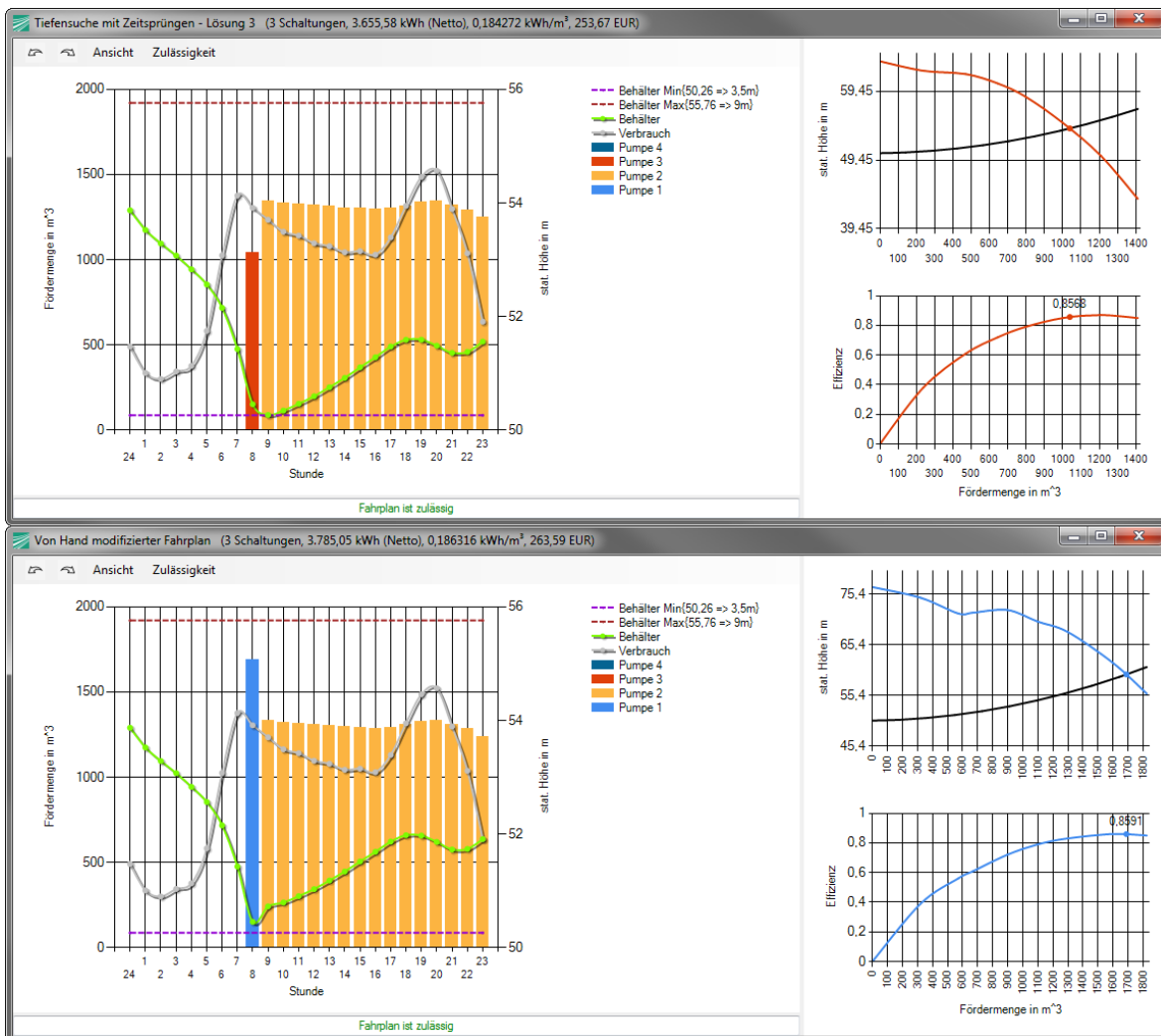


Abb. 24: Pumpenfahrpläne in der H₂Opt Software - Softwarelösung (oben) vs. modifizierte Lösung (unten)

Der in Abb. 24 oben dargestellte Fahrplan repräsentiert dabei die von der H₂Opt Software berechnete effizienteste Lösung, repräsentiert durch das umkreiste Quadrat in Abb. 23. In Abb. 24 ist der effizienteste Fahrplan zusätzlich dem vom Nutzer modifizierten Fahrplan (unten) gegenübergestellt. Die farbigen Säulen repräsentieren dabei die von der entsprechenden Netzpumpe geförderten Menge an Trinkwasser in m³/h. Je höher die Säule im Diagramm, desto größer die Fördermenge der Netzpumpe in der jeweiligen Betriebsstunde. Das Tagesverbrauchsprofil wird repräsentiert durch die graue Linie. Der Behälterstand in m im Hochbehälter ist durch die grüne Linie dargestellt. Würde in einer berechneten oder modifizierten Lösung der minimale Behälterstand (violett gestrichelte Linie) virtuell unter- bzw. der maximale Behälterstand (rot gestrichelte Linie) überschritten werden, so würde die H₂Opt Software die Warnung „Unzulässigkeit im Hochbehälter“ ausgeben. Im Anschluss könnte der Nutzer den geplanten Fahrplan weiter modifizieren, bis eine Zulässigkeit gegeben ist. Dies wird in beiden Fahrplänen durch die Meldung „Fahrplan ist zulässig“ dargestellt. Die beiden Grenzwerte für den

Behälterstand können ebenfalls durch den Nutzer nach seinen Bedürfnissen und Erfahrungen verändert werden. Der Nutzer kann sich des Weiteren pro Stunde den Betriebspunkt der betriebenen Netzpumpe darstellen lassen. Durch klicken des entsprechenden Balkens wird im Betriebsfahrplan auf der rechten Seite oben die Drosselkurve der Pumpe in der entsprechenden Farbe sowie die zu diesem Zeitpunkt berechnete Anlagenkennlinie in schwarz geplottet. Unterhalb der Drosselkurve wird die Wirkungsgradkennlinie der Netzpumpe für den betrachteten Zeitpunkt dargestellt.

Im von der H₂Opt Software berechneten effizientesten Fahrplan wird um 8 Uhr der Einsatz von Netzpumpe 3 geplant. Der Behälterstand würde dadurch um 9 Uhr den unteren Grenzwert erreichen. Bei einer etwaigen Havarie im Wasserwerk würde dies im Ernstfall eine Unterschreitung des Grenzwertes bedeuten. Der modifizierte Fahrplan sieht um 9 Uhr einen Einsatz von Netzpumpe 1 vor. Der minimale Behälterstand würde für den geplanten Tag deutlich oberhalb des unteren Grenzwertes liegen. Für den Rest des geplanten Einsatztages sehen beide Fahrpläne den Einsatz von Netzpumpe 2 vor. Beide in Abb. 24 dargestellten Fahrpläne unterscheiden sich im Hinblick auf die Anzahl der Schaltungen nicht. Für den modifizierten Fahrplan werden allerdings 1,1 % mehr an spezifischer Energie benötigt.

Durch die interaktive Entscheidungsunterstützung kann der Nutzer sehr schnell What-if-Szenarien durchspielen. Er kann dabei zusätzlich die berechneten Fahrpläne jeder Zeit an seine Bedürfnisse anpassen und seine Erfahrungswerte mit in die Planung der Pumpenfahrpläne einbringen. Zusätzlich kann er die berechneten Lösungsmengen nach seinen Kriterien darstellen lassen. Die in Abb. 23 gewählte Darstellung der Lösungsmenge (Schaltanzahl über spezifischem Energieverbrauch) kann mit Hilfe von Drop-Down-Menüs verändert werden. So benutzt zum Beispiel das Fachpersonal im Wasserwerk Bürstadt zur Fahrplanauswahl anstelle der Schaltanzahl auf der Ordinate den am Ende des geplanten Zeitraumes erreichten Behälterstand.

2.1.4 AP5: Validierung der Simulation

Basierend auf dem Betriebsmodell für Vertikalbrunnen wurde die Rohwassergewinnung im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost als hydraulisches Modell nachgebildet und simuliert.

Auf den strukturellen Aufbau des Gewinnungsgebietes Kaiserslautern Ost wird in 2.1.6 näher eingegangen. Durch die im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost verwendete Freispiegelleitung beeinflussen sich die Brunnen in der Regel nicht untereinander. Aus diesem Grund berechnet das Modell den jeweiligen Betriebspunkt der elf Brunnen unabhängig voneinander. Im Betrieb selten auftretende gegenseitige Beeinflussungen der Brunnen (z.B. beim gleichzeitigen Betrieb von Brunnen 17 und Brunnen G) werden durch eine Abhängigkeitsmatrix berücksichtigt. Mit Hilfe dieser Matrix erhöht das Modell bei bestimmten Schaltkombinationen die statische Förderhöhe der betroffenen Brunnen und reduziert damit deren Fördermenge.

Abb. 25 vergleicht exemplarisch für den Brunnen 17 im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost die simulierten Fördermengen mit den vom Leitsystem gemessenen Werten. Die Fördermengen sind

stündlich für einen ganzen Tag (Zeitschritt 1 bis 24) aufgetragen. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Werte und den realen Betriebspunkten von Brunnen 17. Insbesondere die Beeinflussung des Betriebspunktes durch Brunnen G im Zeitschritt 11 wird mit der Abhängigkeitsmatrix korrekt wiedergegeben.

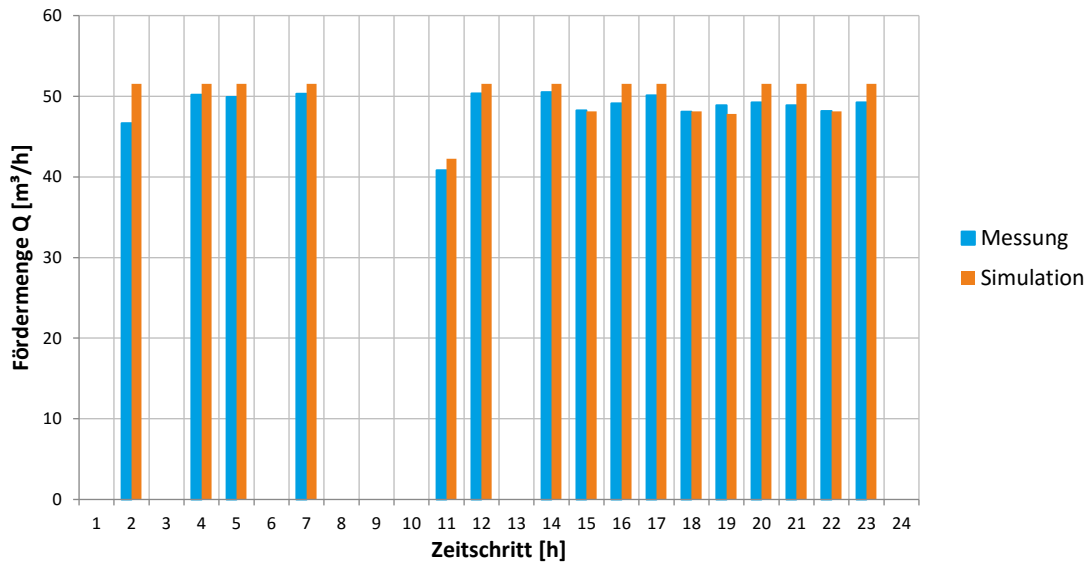


Abb. 25: Fördermengenvergleich zwischen Messung und Simulation (SWK, Brunnen 17)

Die in 2.1.3 beschriebene Berechnungsmethode zur Erstellung eines Anlagenkennfeldes am Beispiel des Wasserwerkes Bürstadt wurde umfangreich untersucht, erweitert und validiert. Das Anlagenkennfeld wurde auf Basis der Jahresdaten 2012 erstellt.

Die Validierung des Modells wurde mit Messdaten aus dem Jahr 2013 durchgeführt. Abb. 26 zeigt einen Vergleich zwischen der Simulation und realen Messdaten. Im Diagramm auf der linken Seite ist der Verlauf des Wasserstandes im Hochbehälter über einen Tag aufgetragen. Die rote gestrichelte Linie zeigt den simulierten und die blaue Linie den realen Wasserstand an einem Tag. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Realität beträgt an diesem Tag weniger als 1%. Im Diagramm auf der rechten Seite ist die Menge an gefördertem Reinwasser über den gleichen Tag aufgetragen. An diesem Tag sind nur die Netzpumpe 2 und 4 gelaufen. Die rote gestrichelte Linie repräsentiert wiederum die Simulation, wohingegen die blaue Linie die reale Fördermenge der Netzpumpen widerspiegelt. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Realität beträgt an diesem Tag circa 4% hinsichtlich der Fördermenge. In einem weiteren Schritt wurde der Betrieb der vier Netzpumpen des Wasserwerkes Bürstadt über ein komplettes Jahr mit der Software nachsimuliert und mit den entsprechenden Messdaten aus dem Prozessleitsystem verglichen. Ziel hierbei war sowohl die Robustheit der H₂Opt Software als auch die Güte des hinterlegten Simulationsmodells über einen längeren Simulationszeitraum zu testen und auszuwerten. Die Abweichung zwischen den simulierten Fahrplänen und den tatsächlich umgesetzten Fahrplänen betrug hinsichtlich des spezifischen Energieverbrauchs durchschnittlich 0,65% über den Zeitraum von einem Jahr.

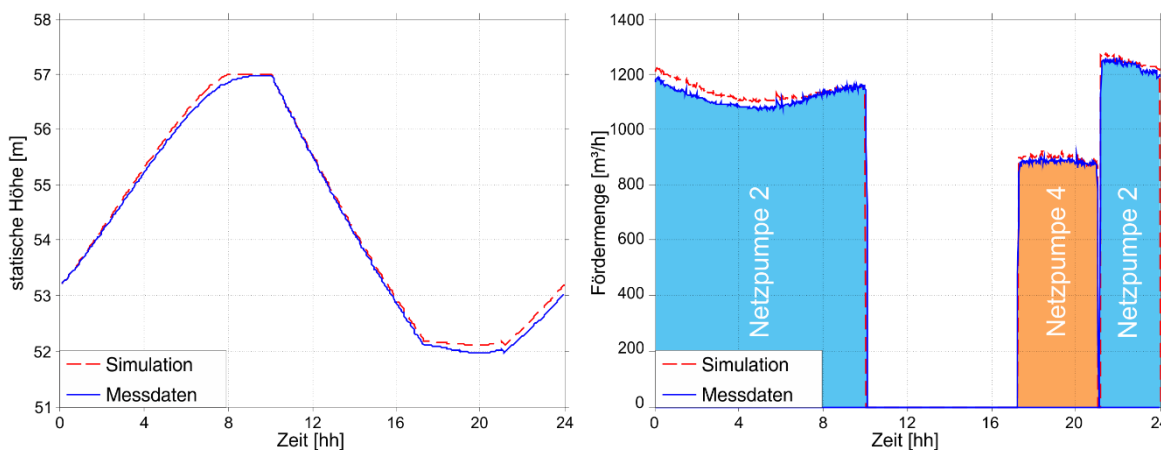


Abb. 26: Validierung des Anlagenkennfeldes des Wasserwerkes Bürstadt

Nach erfolgreicher Validierung des Anlagenmodells beim Projektpartner EWR wurde die Methodik auf das Versorgungsnetz Normalzone des Projektpartners SWK übertragen. Die beiden nachfolgenden Diagramme zeigen eine Gegenüberstellung von simulierten und Daten aus dem Prozessleitsystem für einen exemplarischen Tag. In Abb. 27 ist im linken Diagramm der Behälterstand über einen Tag aufgetragen. Die rote gestrichelte Linie repräsentiert dabei den simulierten Behälterstand. Der tatsächlich gemessene Behälterstand wird durch die blaue Linie dargestellt. Der tendenzielle Verlauf des Behälterstandes wird durch die Simulation zwar getroffen, allerdings weichen die beiden Niveaus des Behälterstandes im Laufe eines Tages doch sehr stark voneinander ab. Dies ist auch bei der Rohwasserförderung der Fall. In Abb. 27 ist auf der rechten Seite die simulierte Rohwasserfördermenge (rote gestrichelte Linie) der tatsächlich gemessenen Rohwasserfördermenge (blaue Linie) gegenübergestellt. Die Tendenz der Realwerte wird zwischen 7 und 21 Uhr sehr gut getroffen. Während dieses Zeitraumes wird in der Normalzone mehr als 300 m³/h Trinkwasser verbraucht. Am Anfang und am Ende des dargestellten Tages unterschreitet die Verbrauchsmenge den Wert von 300 m³/h und die simulierte Rohwasserfördermenge trifft nicht mehr den tendenziellen Verlauf der realen Werte. Wie bereits im vorherigen Absatz erwähnt, ist dies auf den Dauerbetrieb der vier Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße zurückzuführen.

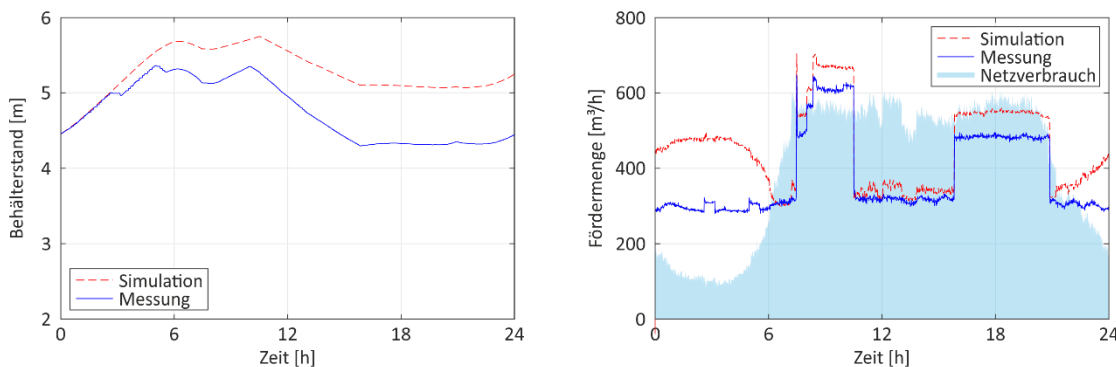


Abb. 27: Validierung des Anlagenkennfeldes des Wasserwerkes Barbarossastraße

Eine weitere Verbesserung des Anlagenmodells konnte beim Projektpartner SWK nicht erzielt werden. Das erstellte Modell wurde in die H₂Opt integriert und im Anschluss in Zusammenarbeit der beiden Projektpartner SWK und ITWM im Wasserwerk Barbarossastraße einem Praxistest unterzogen. Mit Hilfe der H₂Opt Software konnte ein energieeffizienter Pumpenfahrplan (Abb. 28) unter Berücksichtigung der drehzahleregelten Hauptpumpen 3 und 4 erstellt werden.

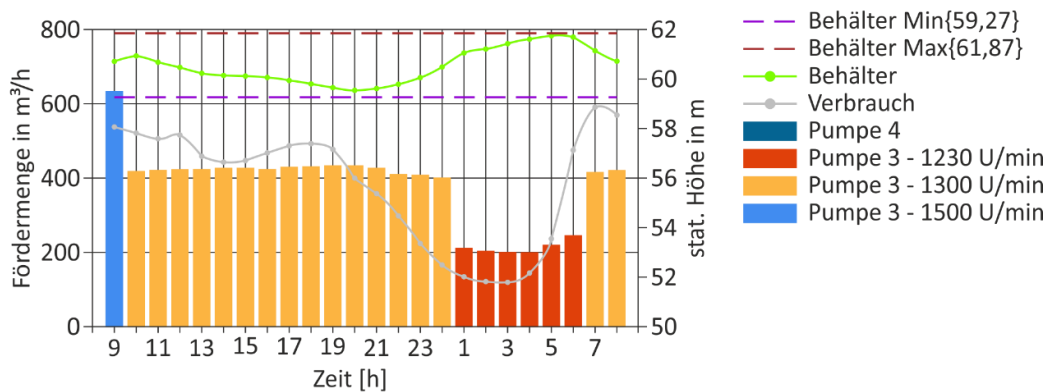


Abb. 28: Erstellter Pumpenfahrplan für das Wasserwerk Barbarossastraße

Der in Abb. 28 dargestellte Pumpenfahrplan ist eine Betriebsempfehlung der H₂Opt Software für die vier Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße. Der Fahrplan berücksichtigt einen Zeitraum von 24 Stunden (beginnend: 16.11.2016 um 09:00 Uhr) und wurde unter Vorgabe einer Mindestreserve für Trink- und Löschwasser erstellt. Im Vergleich zur automatisierten Fahrweise (Abb. 29) bei der die vier Hauptpumpen abhängig vom Wasserstand im Hochbehälter Weidengarten betrieben werden, konnte mit der Software ein gleichmäßigerer Betrieb generiert werden. Durch die Umsetzung des Fahrplans aus Abb. 28 konnten somit die Schaltspiele der vier Hauptpumpen auf ein Viertel reduziert werden, was sich wiederum günstig auf den Verschleiß der Pumpen (Lebensdauer) und auf den Betrieb der Filteranlage auswirkte. Gleichzeitig konnte, im Vergleich zur ursprünglich angedachten, automatisierten Fahrweise (Abb. 29), 4 % Energie beim Betrieb der vier Hauptpumpen eingespart werden. Die H₂Opt Software konnte, wie bereits zuvor beim Projektpartner EWR, somit auch beim Projektpartner SWK erfolgreich eingesetzt werden.

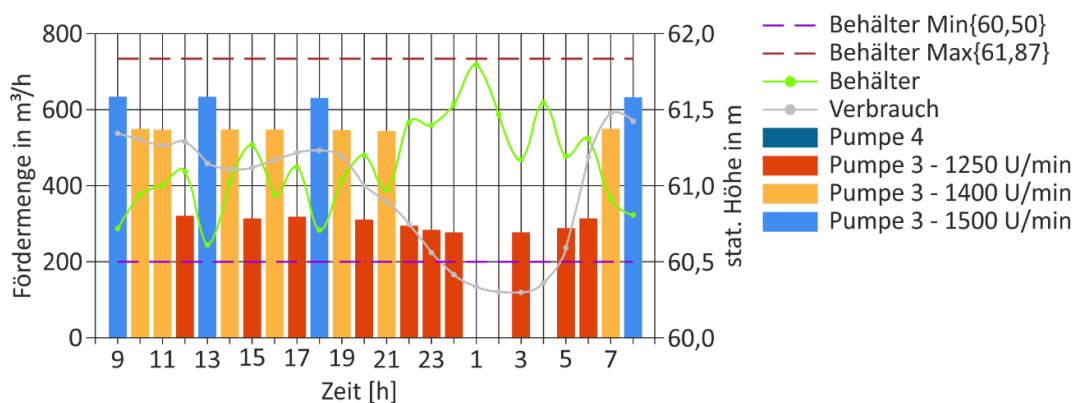


Abb. 29: Automatisierte Fahrweise der Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße

Ein täglicher Einsatz der H₂Opt Software konnte allerdings im Rahmen der Projektlaufzeit beim Projektpartner SWK leider nicht mehr realisiert werden. Nichtsdestotrotz waren die ersten Praxistests im Wasserwerk Barbarossastraße sehr viel versprechend und bieten großes Potential für einen zukünftigen Einsatz. Sobald ein validiertes Rohrleitungsmodell zur Verfügung steht ist es möglich, dieses direkt für die Optimierung zu nutzen oder auf Basis von Simulationen mit dem Rohrleitungsnetz das Modell des Anlagenkennfeldes zu verbessern.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde die H₂Opt Software einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess unterzogen. Alle Projektpartner hatten zu jeder Zeit Zugang zur aktuellen Version und haben diese in regelmäßigen Abständen eingehenden Benutzertests unterzogen. Zum Verbesserungsprozess trugen neben den Benutzertests sowohl die vor Ort durchgeführten Kennlinienmessungen als auch gezielt mit den Projektpartnern EWR und SWK abgestimmte Messungen zur Modellverbesserung. Hierzu wurden vom Projektpartner SAM in Absprache mit dem Projektpartner SWK gezielt Messszenarien erstellt und diese im Anschluss durch das Fachpersonal vor Ort umgesetzt. Der Projektpartner OPB hat den Auswahlprozess dabei beratend begleitet. Die zuvor genannte gegenseitige Beeinflussung von Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost wurde im Hinblick auf die Modellverbesserung dabei sehr intensiv durchgeführt. Eine umfangreiche Datenanalyse hat zunächst die Brunnen 17 und Brunnen F als durch andere Brunnen/-kombinationen beeinflusste Brunnen identifiziert. Nachfolgend wird näher auf die Untersuchungen zu Brunnen 17 eingegangen.

Abb. 30 zeigt exemplarisch eine betriebsbedingte Reduzierung der Fördermenge von Brunnen 17. Abgebildet sind die Fördermengen aller Brunnenpumpen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost in der Zeit zwischen 10:30 und 17:00 Uhr am 08.08.2015. Graphisch hervorgehoben ist der Fördermengenverlauf von Brunnen 17, der bei einer konstanten Frequenz von 33,4 Hz starke Schwankungen aufweist. Prinzipiell zeigt dieser Verlauf zwei Fördermengenniveaus auf, ein hohes bei ca. 14 l/s und ein um ca. 35 % niedrigeres Niveau bei etwa 9 l/s. Auffällig ist, dass die Fördermenge von Brunnen 17 immer dann zurückgeht, wenn die Brunnen D und G zugeschaltet werden. Umgekehrt „erholt“ sich die Fördermenge von Brunnen 17 nach der Abschaltung beider Brunnen wieder. Diese Auffälligkeit tritt während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Januar 2015 bis Juni 2017) auf.

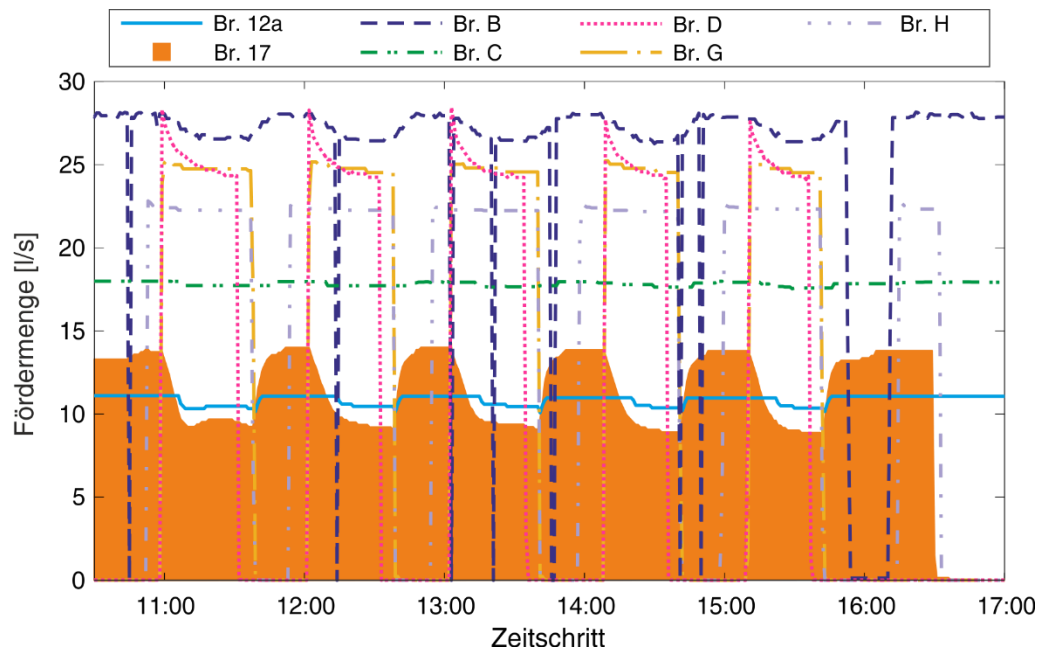


Abb. 30: Fördermengenverläufe der Brunnen im Gewinnungsgebiet KL-Ost am 08.08.2015

Untersucht wurde der kombinierte Betrieb von Brunnen 17 zusammen mit den Brunnen 12a, B, D, E und G. In Kombination mit diesen Brunnen trat, der zuvor beschriebene, negative Einfluss auf die Fördermenge von Brunnen 17 auf. Bei der Durchführung der Tests wurde ein Messprogramm abgefahren, welches basierend auf vorherigen Analysen der Daten aus dem Prozessleitsystem aus dem realen Betrieb des Gewinnungsgebietes abgeleitet wurde. Das Messprogramm legte die nachzufahrenden Betriebskombinationen fest und gab die Sollfördermengen für die einzelnen Brunnen vor, die zu Beginn des jeweiligen Messprogrammepunktes im Prozessleitsystem eingestellt wurden.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Untersuchungsergebnisse für Brunnen 17 vom 21. (Abb. 31) bzw. 22.06.2017 (Abb. 32). Die Brunnen D und G haben jeweils alleine betrieben keinen, bzw. im Fall von Brunnen G nur einen geringen, Einfluss auf das Förderverhalten von Brunnen 17. Ist allerdings Brunnen G in Kombination mit mindestens einem der drei untersuchten Brunnen (B, D oder E) in Betrieb, so ist ein deutlicher Rückgang der Fördermenge bei Brunnen 17 um durchschnittlich etwa 25 % zu erkennen. Dieser Befund deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen des realen Betriebs (vgl. Abb. 30). Im Jahresverlauf schwankt der negative Einfluss der genannten Brunnenkombinationen auf die Fördermenge von Brunnen 17 etwa zwischen 20 und 40 %.

In Abb. 31 und Abb. 32 ist der Fördermengenverlauf von Brunnen 12a ebenfalls flächig hervorgehoben. Der Verlauf von Brunnen 12a folgt prinzipiell dem von Brunnen 17, die zuvor genannten Brunnenkombinationen haben somit auch einen Einfluss auf die Fördermenge von Brunnen 12a. Dieser Einfluss fällt allerdings sehr viel geringer aus und kann daher beim Erstellen von Betriebskonzepten bzw. bei der Auswahl geeigneter Brunnenkombinationen vernachlässigt werden.

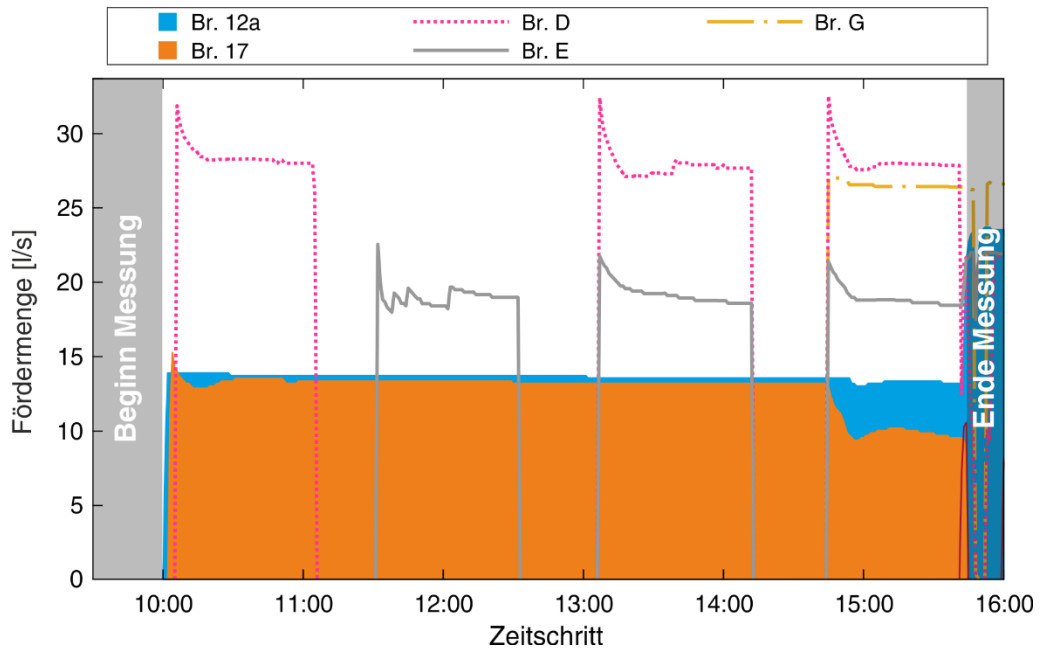


Abb. 31: Fördermengenverläufe der Brunnen 12a, 17, D, E und G während der Durchführung des Messprogrammes am 21.06.2017 zwischen 10:00 und 16:00 Uhr

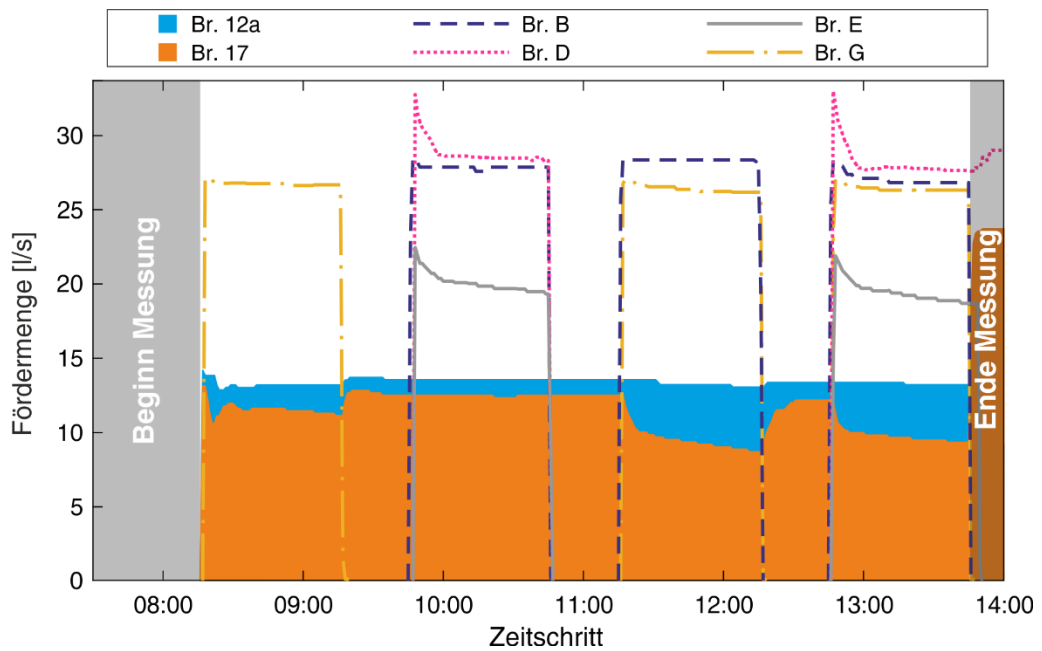


Abb. 32: Fördermengenverläufe der Brunnen 12a, 17, B, D, E und G während der Durchführung des Messprogrammes am 22.06.2017 zwischen 08:15 und 13:45 Uhr

2.1.5 AP6: Optimierung

Im Anschluss an die Untersuchungen zur Modellgüte wurden mit Hilfe der H₂Opt Software drei verschiedene Fallstudien in Zusammenarbeit der Projektpartner ITWM, SAM und EWR durchgeführt. Die im Rahmen von H₂Opt entwickelte Software dient zur Energieeinsparung in der öffentlichen Wasserversorgung. Eine Möglichkeit kann dabei der Austausch von aktuell verbauten Pumpen sein. In der ersten Fallstudie wurden im validierten Modell die vier Netzpumpen im Wasserwerk Bürstadt virtuell gegen die alten Netzpumpen, die vor dem Jahr 2004 verbaut waren, ausgetauscht. Eine Gegenüberstellung der Betriebsweise der alten und aktuell verbauten Pumpen kann Abb. 33 entnommen werden.

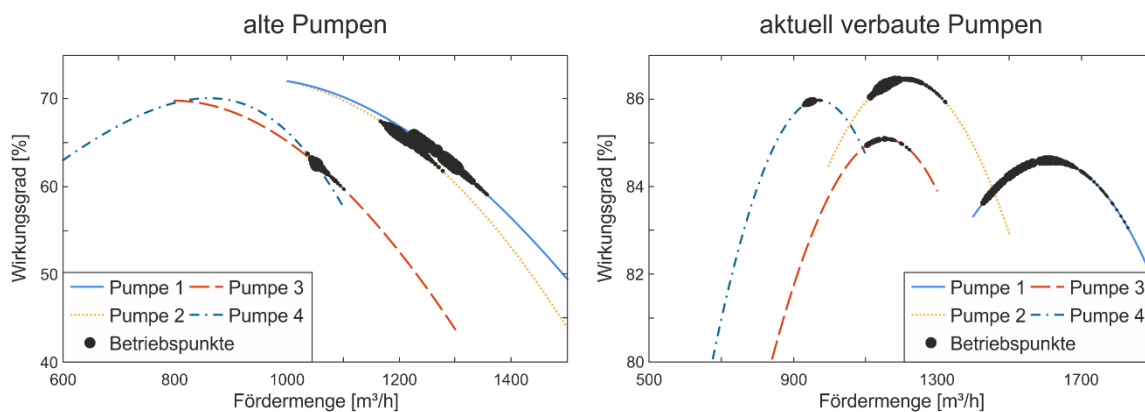


Abb. 33: Vergleich Betriebsweise alte und aktuell verbaute Pumpen

Bei den alten Pumpen handelte es sich um jeweils zwei baugleiche Pumpen. Diese wurden hauptsächlich in starker Überlast betrieben (vgl. Abb. 33 links) und wurden im Jahr 2004 gegen vier verschiedene Pumpen ersetzt (siehe (9)). Die aktuell verbaute Pumpen werden im Bereich ihrer Optima betrieben (vgl. Abb. 33 rechts) und verbrauchen 26,6 % weniger Energie pro Jahr als die vor 2004 verbaute Pumpen. Obwohl dieser Austausch nicht im Rahmen von H₂Opt vollzogen wurde, zeigt dieses Beispiel den großen Nutzen der entwickelten Software hinsichtlich der Steigerung der Energieeffizienz.

In der zweiten Fallstudie wurde der Effekt von variablen Strompreisen auf die Betriebsweise der vier Netzpumpen im Wasserwerk Bürstadt untersucht. Normalerweise beziehen öffentliche Wasserversorger ihren Strom bereits ein bis zwei Jahre im Voraus. Der steigende Anteil von erneuerbaren Energien erlaubt allerdings eine neue Denkweise auch im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung. Die in dieser Fallstudie verwendete Strompreiskurve wurde H₂Opt von der Next Kraftwerke GmbH zur Verfügung gestellt. Die Kunden der Next Kraftwerke GmbH können zwischen einem statischen und einem variablen Stromtarif wählen. Das in diesem Beispiel verwendete variable Strompreisprofil wird durch eine viertelstündliche Strompreisaktualisierung gekennzeichnet.

Für den Fall, dass ein Wasserversorger einen variablen Stromtarif bezieht, kann er zwischen einer Optimierung hinsichtlich der Minimierung der Stromkosten oder der Minimierung des Energieverbrauchs wählen. Ein solches Beispiel wird in Abb. 34 gezeigt. Der Fahrplan auf der linken Seite zeigt eine kostenminimale Lösung. Diese wird durch eine Verwendung größerer Pumpen und deren Betrieb in Zeiten niedriger Strompreise charakterisiert. Des Weiteren wird der Hochbehälter über längere Zeit auf seinem Maximalfüllstand gehalten. Die energieminimale Lösung (vgl. Abb. 34 rechts) hingegen wird durch einen sehr niedrigen Wasserstand und die Verwendung kleinerer Pumpen gekennzeichnet.

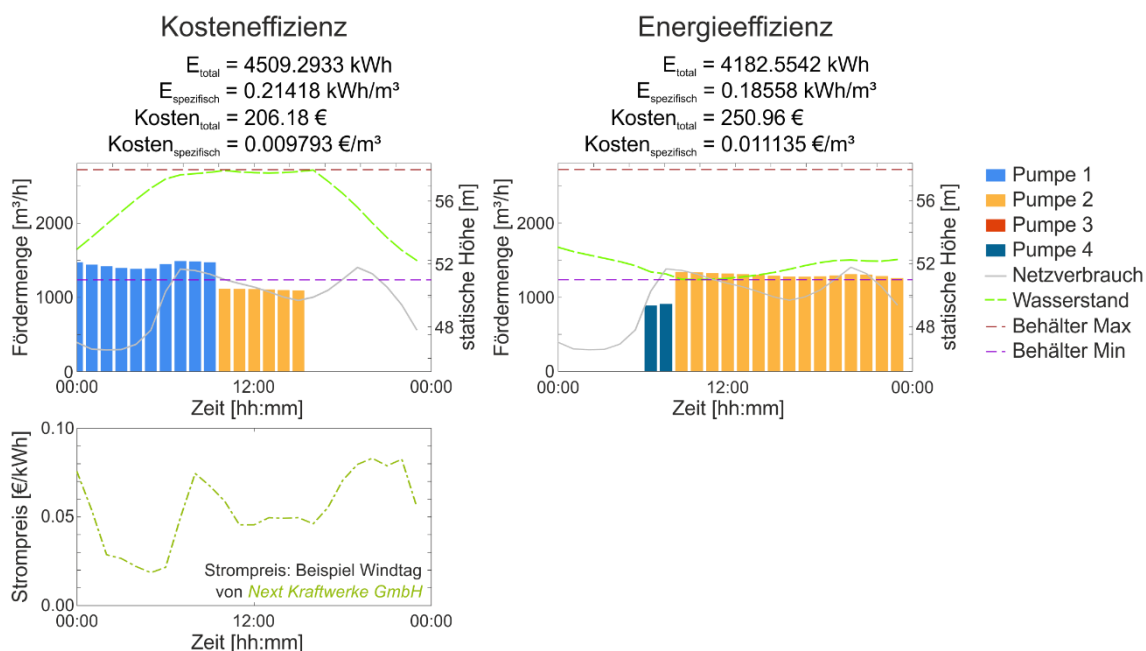


Abb. 34: Gegenüberstellung Kosteneffizienz und Energieeffizienz

Obwohl der kostenminimale Pumpenfahrplan einen Mehraufwand von 15,4 % hinsichtlich der spezifischen Energie bedeutet, gleicht er dieses Minus im Hinblick einer Kosteneinsparung von 21,7 % gegenüber dem energieoptimalen Pumpenfahrplan wieder aus.

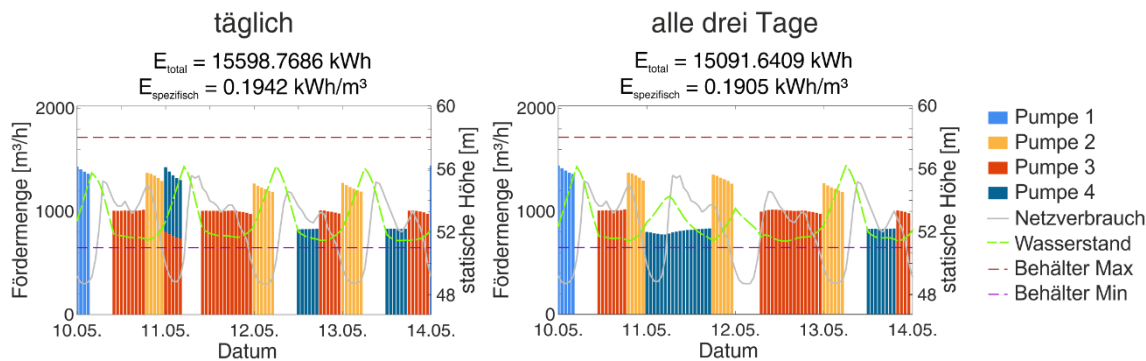


Abb. 35: Gegenüberstellung täglicher Wasseraustausch und Wasseraustausch alle drei Tage

Der Projektpartner EWR Netz GmbH tauscht das Wasser in den Hochbehältern in der Regel täglich aus. Hierzu muss der Wasserstand mindestens einmal täglich einen vorher definierten Maximal- und Minimalstand erreichen. In der dritten Fallstudie wurde dieser Zyklus von einmal täglich auf alle drei Tage ausgeweitet, was einer Energieeinsparung von 1,9 % entspricht. Abb. 35 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung eines täglichen Wasseraustausches links und eines Wasseraustausches alle drei Tage rechts.

Während der Anwendung der H₂Opt Software wurde durch alle Projektpartner stets auf den Aufbau und die Bedienerfreundlichkeit der Software geachtet. Verbesserungs- bzw. Erweiterungsvorschläge, die aus den umfangreichen Softwaretests resultierten, flossen jeder Zeit in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess mit ein. In regelmäßigen Abständen wurden den Projektpartnern durch ITWM neue Software-Versionen zur Verfügung gestellt.

Nach einer erfolgreichen Validierung des Simulationsmodells der Wasserversorgung in Worms und der Durchführung von umfangreichen Fallstudien in Zusammenarbeit der Projektpartner ITWM, SAM und EWR wurde die Software am realen Modell mehrfach verwendet. In drei Praxistests wurden im Wasserwerk Bürstadt in Zusammenarbeit der Projektpartner EWR und ITWM Pumpenfahrpläne für die darauffolgenden 24 Stunden generiert. Als Eingabeparameter benötigt die Software den prognostizierten Netzverbrauch der nächsten 24 Stunden. Unter der Voraussetzung, dass es sich um Wochentage handelt, kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich der Netzverbrauch der nächsten 24 Stunden ähnlich verhalten wird, wie der Netzverbrauch der vergangenen 24 Stunden. Mit diesem prognostizierten Netzverbrauch wurden mögliche Fahrpläne berechnet. Der effizienteste Fahrplan im Hinblick auf minimale spezifische Kosten und niedrigste Anzahl an Pumpenschaltungen wird in Abb. 36 durch das umkreiste Quadrat unten links repräsentiert. Dieser Fahrplan wurde vom Wasserwerksmeister hinsichtlich der niedrigen geplanten Wasserreserve für diesen Tag als ungeeignet eingestuft. Im Dialog mit dem Fachpersonal vor Ort wurde der berechnete Pumpenfahrplan solange modifiziert, bis ein zufriedenstellender Plan gefunden wurde. Dieser Plan wurde vom Fachpersonal im Anschluss für die nächsten 24 Stunden umgesetzt.

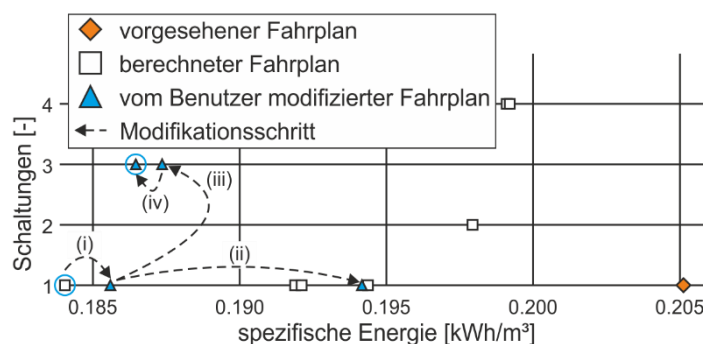


Abb. 36: Auswahl eines Fahrplans

Eine Gegenüberstellung des umgesetzten Fahrplans und des für diesen Tag eigentlich geplanten Fahrplan ist in Abb. 37 gezeigt. Durch den Einsatz der Software konnte für diesen Tag eine Energieeinsparung von 26,7 % erzielt werden.

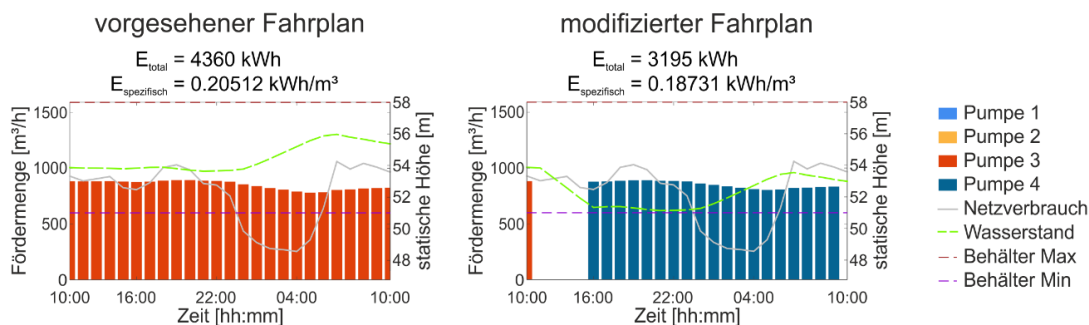


Abb. 37: Gegenüberstellung vorgesehener und modifizierter Fahrplan

Nach den erfolgreich absolvierten Praxistests wurde die H₂Opt Software für die Erstellung von täglichen Pumpenfahrplänen vom Fachpersonal vor Ort verwendet. Das Fachpersonal des Projektpartners EWR stand dabei im engen Kontakt zu den Projektpartnern SAM und ITWM, die dem Fachpersonal bei dem täglichen Einsatz beratend zur Seite standen.

Im täglichen Betrieb traten verschiedene Szenarien auf, welche das Fachpersonal mit Hilfe der H₂Opt Software sehr schnell einplanen konnte. So konnten energetisch günstige und betriebsschonende Pumpenfahrpläne für die einzelnen Szenarien erstellt und umgesetzt werden. Ein Beispiel hierzu wird in Abb. 38 gezeigt.

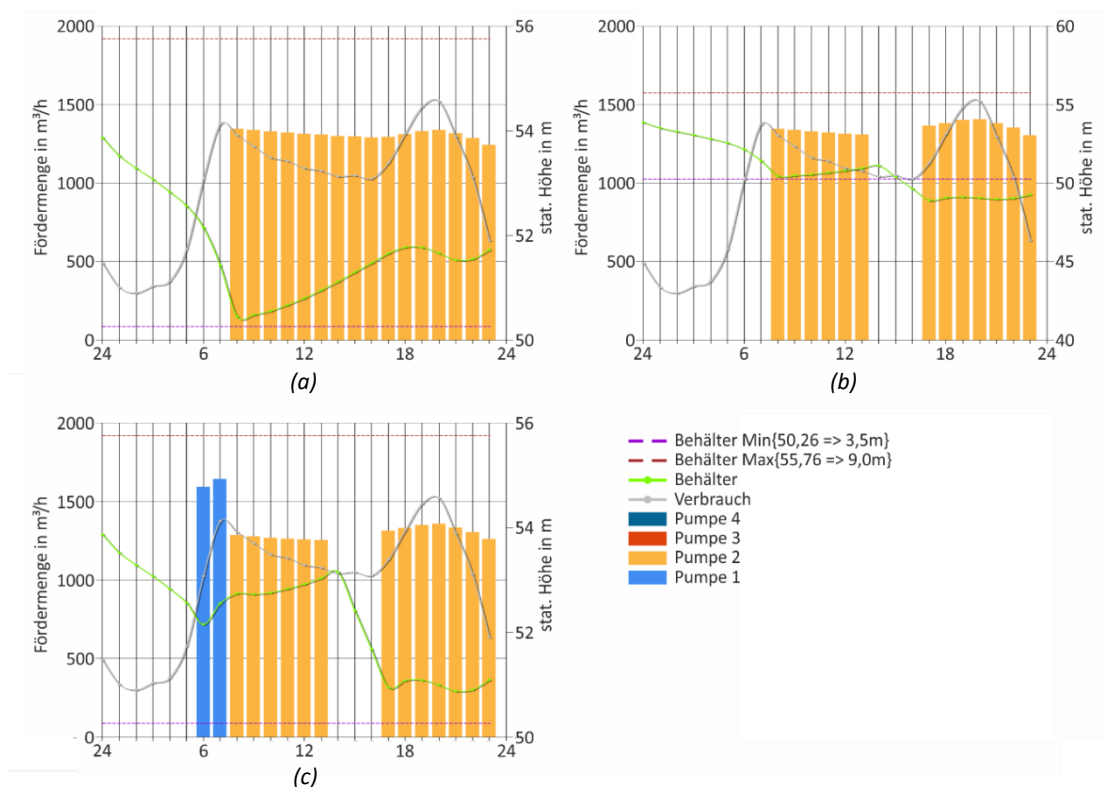


Abb. 38: Pumpenfahrpläne im täglichen Betrieb

In Abb. 38 (a) ist ein energetisch günstiger Pumpenfahrplan dargestellt. Dieser Fahrplan wurde zu Beginn, unter Vorgabe des prognostizierten Tagesverbrauchsprofils und dem Füllstand des Hochbehälters am Tagesanfang, mit der Software berechnet. Die Empfehlung der Software sah vor Pumpe 2 von 8 bis 24 Uhr durchgehend zu betreiben. Wartungsbedingt mussten an diesem Tag jedoch die Netzpumpen im Wasserwerk Bürstadt für 3 Stunden (zwischen 14 und 17 Uhr) außer Betrieb genommen werden. Das Fachpersonal konnte den Wartungszeitraum durch Modifizierung des Pumpenfahrplans mitberücksichtigen. Abb. 38 (b) zeigt den entsprechend modifizierten Pumpenfahrplan. Der Wartungszeitraum wurde durch das Abschalten von Pumpe 2 zwischen 14 und 17 Uhr eingeplant. Dadurch wurde jedoch die Mindest-Trinkwasserreserve im Behälter ab 15 Uhr unterschritten (vgl. Behälterniveau in Abb. 38 (b)). Die Software gab nach der Modifikation des Pumpenfahrplans eine entsprechende Warnung („Unzulässigkeit im Hochbehälter“) aus. Für die Wartungsarbeiten mussten mehr Wasserreserven, d.h. ein höherer Füllstand des Behälters, eingeplant werden. Ein höherer Füllstand konnte prinzipiell durch zwei Möglichkeiten erzielt werden, durch den Einsatz der größeren Pumpe 1 anstelle von Pumpe 2 (Betriebszeit von 9 bis 14 Uhr) oder durch den früheren Start einer Netzpumpe. Nach der Planung und Auswertung beider Szenarien mit Hilfe der Software stellte sich die erstgenannte Variante als energetisch ineffizient heraus. Zugleich konnte die benötigte Mindest-Trinkwasserreserve bei dieser Betriebsvariante (wenn auch nur knapp) nicht eingehalten werden. Daher wurde die zweite Variante umgesetzt und Pumpe 1 (in diesem Fall energetisch günstiger als der Betrieb von Pumpe 2) zwei Stunden früher gestartet. Abb. 38 (c) zeigt den entsprechenden Pumpenfahrplan bei dem anfangs Pumpe 1 (Betriebszeit von 6 bis 7 Uhr) und später Pumpe 2 betrieben wurden. Mit diesem Fahrplan konnte eine energieoptimierte Betriebslösung unter Einhaltung der Mindest-Trinkwasserreserve gefunden werden.

2.1.6 AP8: Pilotprojekt

Als Pilotprojekt sollte mit der entwickelten Software eine verbesserte Betriebsstrategie für die Brunnenpumpen der SWK im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost entwickelt und umgesetzt werden. Das Gewinnungsgebiet Kaiserslautern hat eine Ost-West-Erstreckung von 3,6 km und eine Nord-Süd-Erstreckung von 1,7 km. Die Rohwassergewinnung erfolgt in dem betrachteten Gewinnungsgebiet durch elf aktive Brunnen und die Quelle Lauterspring, die zu 100% für die Trinkwasserversorgung verwendet wird. Zu Projektbeginn waren fünf Brunnenpumpen mit einem Frequenzumrichter ausgestattet. Diese dienten allerdings lediglich zur Reduzierung der Betriebsdrehzahl und wurden nicht für eine automatisierte Drehzahlregelung verwendet. Zu Projektbeginn wurden somit fünf Brunnenpumpen mit Frequenzumrichter und sechs Brunnenpumpen ohne Frequenzumrichter im Start/Stop-Betrieb betrieben. Eine schematische Übersicht des Gewinnungsgebietes Kaiserslautern Ost kann Abb. 39 entnommen werden.

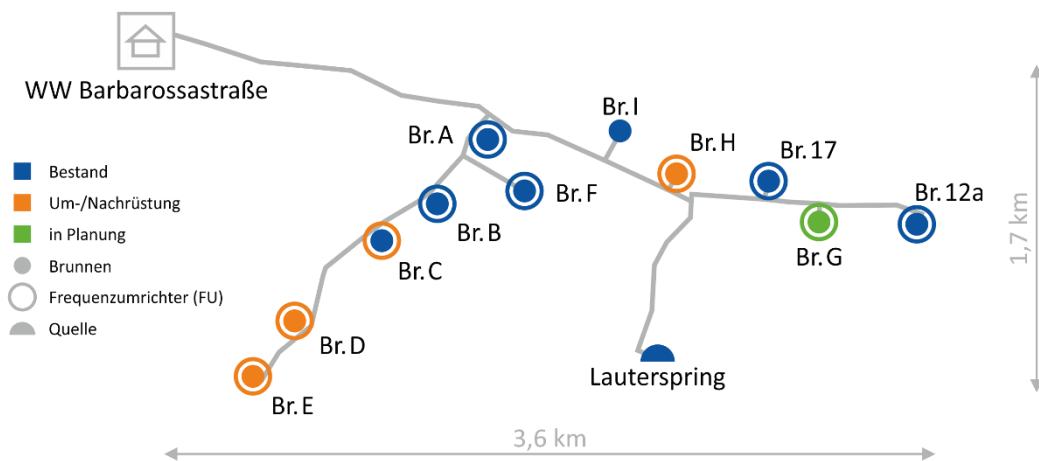


Abb. 39: Schematische Übersicht Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost (SWK)

In Abb. 39 werden Brunnenpumpen durch Punkte und Frequenzumrichter durch Kreise symbolisiert. Die blauen Symbole beschreiben den Bestand an Brunnenpumpen und Frequenzumrichtern, an denen während der Projektlaufzeit keine technischen Veränderungen vorgenommen wurden. Die orangenen Symbole repräsentieren Brunnenpumpen und Frequenzumrichter, die erneuert bzw. nachgerüstet wurden. In Brunnen G soll nach Projektende eine neue Brunnenpumpe verbaut werden. Diese soll dann zukünftig ebenfalls mit Frequenzumrichter betrieben werden.

Alle im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost betriebenen Brunnenpumpen fördern Rohwasser in eine Rohwassersammelleitung. Auf Grund der im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost erschlossenen Quelle Lauterspring ist die Rohwassersammelleitung als Freispiegelleitung ausgeführt. Das gewonnene Rohwasser fließt somit im freien Gefälle in das Wasserwerk Barbarossastraße. Zusätzlich ist an die Rohwassersammelleitung in räumlicher Nähe zu Brunnen A der Rohwasserbehälter Salingsmühle angeschlossen. Dieser dient in erster Linie zur Vermeidung eines Trockenlaufens der vier Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße.

Die Hauptpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße sind von unterschiedlicher Baugröße und fördern Rohwasser durch die Rohwasseraufbereitungsanlage in das Versorgungsgebiet Normalzone. Wird im Versorgungsgebiet Normalzone weniger Trinkwasser verbraucht als durch die Hauptpumpen gefördert wird, so wird das überschüssige Trinkwasser in zwei Hochbehälter unterschiedlicher Baugröße gepuffert. Für den umgekehrten Fall wird das gepufferte Trinkwasser aus den beiden Hochbehältern entnommen. Die beiden größten Hauptpumpen werden mit einem Frequenzumrichter betrieben; die beiden kleinsten können allerdings lediglich im Start/Stopp-Betrieb betrieben werden. Die vier verbauten Hauptpumpen können nicht im Parallelbetrieb gefahren werden. Auf Grund des geringen Speichervolumens in den beiden Hochbehältern muss im Wasserwerk Barbarossastraße eine Hauptpumpe 24/7 betrieben werden.

Wie bereits in 2.1.2 erwähnt, wurde zunächst der Ist-Zustand dokumentiert. Die im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost verbauten Pumpen wurden im Anschluss experimentell untersucht. Die ermittelten Kennliniensätze wurden danach den Herstellerangaben gegenübergestellt. Abb. 40 zeigt ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung von gemessenen Kennlinien zu den Herstellerangaben. Im linken Diagramm ist die Förderhöhe in m über der Fördermenge in l/s aufgetragen. Mit steigender Drehzahl (Frequenz in Hz) steigt ebenfalls das Kennlinienniveau der Förderhöhen-Kennlinien. Insgesamt ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Herstellerangaben in schwarz und gemessenen Kennlinien in bunt zu erkennen. Auf der rechten Seite sind die zugehörigen Wirkungsgrade in % aufgetragen über der Fördermenge in l/s. Die auf den ersten Blick großen Abweichungen zwischen Herstellerangaben und gemessenen Kennlinien ist auf unterschiedlich aufgetragene Wirkungsgrade zurückzuführen. Die Herstellerangaben beziehen sich auf den hydraulischen Wirkungsgrad, d.h. ohne jeglichen Lager-, Reibungs- und Antriebsverluste. Insbesondere Antriebsverluste schlagen bei Unterwasserpumpen mit niedrigen Motorwirkungsgraden negativ zu Buche. Die gemessenen Kennlinien beziehen sich auf den Gesamtwirkungsgrad, d.h. alle tatsächlich auftretenden Verluste sind mitinbegriffen.

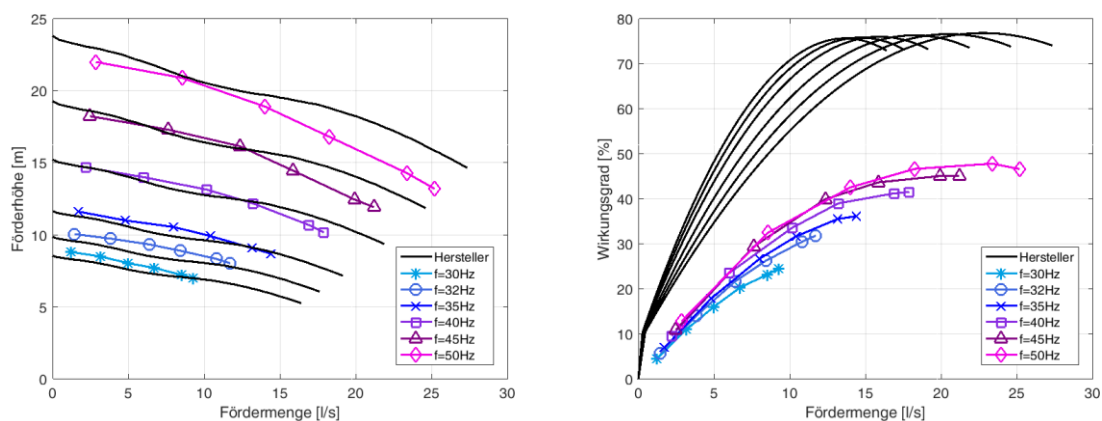


Abb. 40: Kennlinienvergleich Brunnen 12a: Förderhöhe (links) und Wirkungsgrad (rechts)

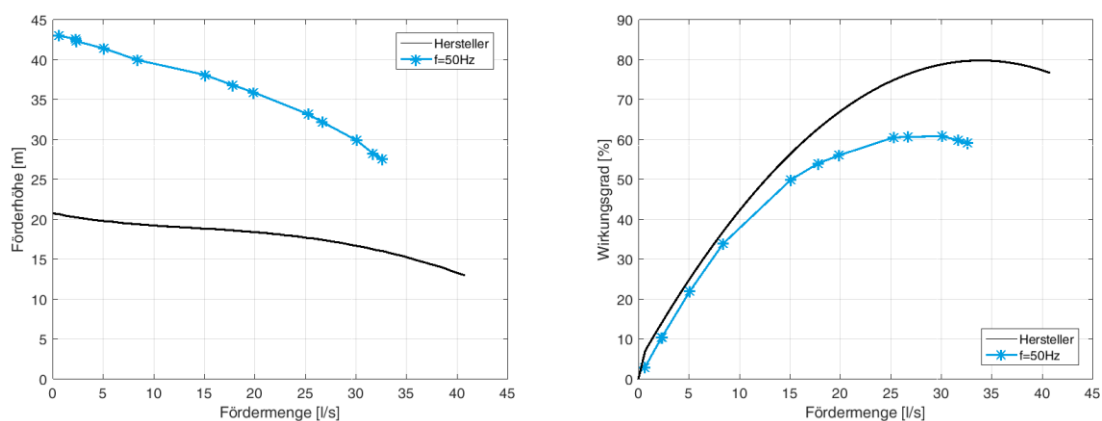


Abb. 41: Kennlinienvergleich Brunnen I: Förderhöhe (links) und Wirkungsgrad (rechts)

Ein Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung von gemessenen Kennlinien zu den Herstellerangaben zeigt Abb. 41. Die gemessene Förderhöhen-Kennlinie (links in blau) liegt deutlich oberhalb der Herstellerangaben (schwarz). Dies bedeutet, dass in diesem Fall eine andere Brunnenpumpe verbaut ist, als dokumentiert.

Mit Hilfe der Feldmessungen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost konnte eine umfangreiche Bestands- und Betriebsanalyse durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Betriebsanalyse zeigten auf, welche Brunnenpumpen im Hinblick auf die Energieeffizienz ausgetauscht werden sollten. Der Pumpenaustausch erfolgte basierend auf einer Vergleichsrechnung bei der die Betriebsdaten aus dem Kalenderjahr 2015 berücksichtigt wurden. Abb. 42 zeigt exemplarisch für Brunnen D die Förderhöhen- und Wirkungsgradkennlinien der ursprünglich verbauten Brunnenpumpe. Auf den Kennlinien ist das Betriebsspektrum der Brunnenpumpe eingezeichnet. Dabei wird die Häufigkeit des jeweiligen Betriebspunktes durch die Linienstärke wiedergegeben. Je stärker die Linie, desto häufiger wurde die Pumpe in diesem Betriebspunkt betrieben. Der Betriebsschwerpunkt der alten Brunnenpumpe lag außerhalb des optimalen Betriebsbereichs der Pumpe. Durch die Auswahl einer neuen, auf den Betrieb angepassten Pumpe (s. Abb. 43) wurde der Gesamtwirkungsgrad um 14 % gesteigert. Basierend auf den Betriebsdaten von 2015 werden durch den durchgeführten Pumpentausch in Brunnen D jährlich 2.700 kWh eingespart.

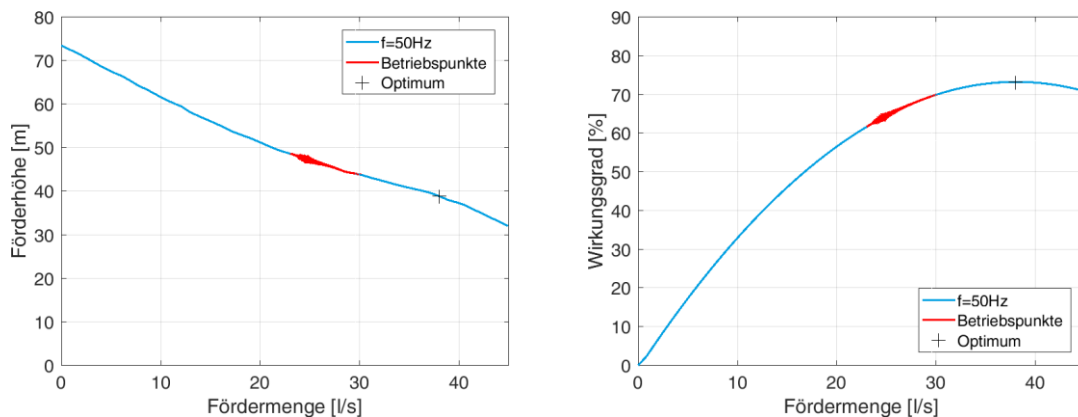


Abb. 42: Kennlinien der alten Pumpe mit Betriebsspektrum von Brunnen D

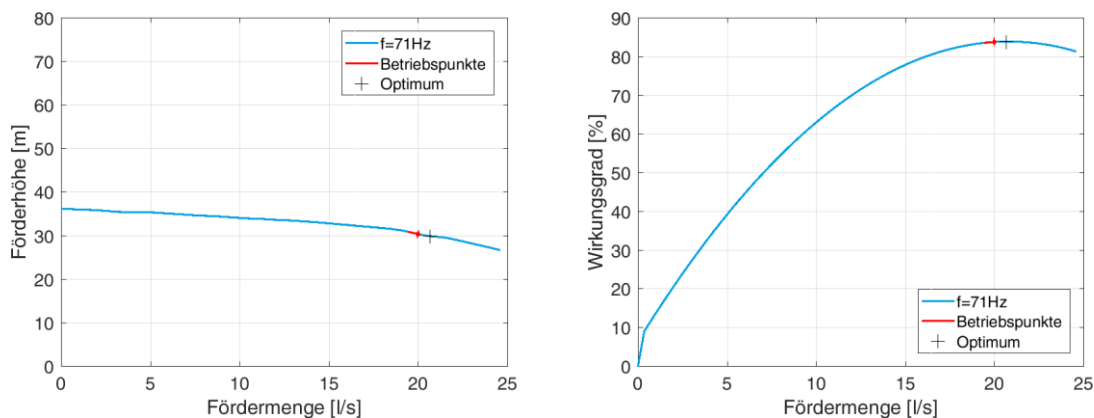


Abb. 43: Kennlinien der neu ausgewählten Pumpe mit Betriebsspektrum von Brunnen D

Die jährliche Energieeinsparung durch die im Projektverlauf durchgeführten technischen Veränderungen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost beträgt basierend auf den Betriebsdaten des Jahres 2015 insgesamt 47.035 kWh.

Neben den technischen Veränderungen wurde zur Projekthalbzeit das Betriebskonzept der Brunnenpumpen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost verändert. Im neuen Betriebskonzept werden die Brunnen A und F mit einer fixen reduzierten Drehzahl durchgehend betrieben bis die genehmigte Tagesentnahmemenge erreicht ist. Dies bedeutet, dass beide Brunnen pro Tag nur einmal an- und ausgeschaltet werden. Die Betriebsdrehzahl richtet sich nach der Entnahmemenge, bei der die Trübungsgrenzwerte im Rohwasser nicht überschritten werden. Die restlichen neun Brunnen wurden in drei Gruppen mit jeweils drei Brunnen aufgeteilt. Jeder Gruppe werden im täglichen Wechsel die Stufen Grundlast-, Unterstützungs- oder Reservebrunnen zugewiesen. Je nach Stufe werden den jeweiligen Brunnen unterschiedliche Sollfördermengen zugewiesen. Diese Sollfördermengen stehen in Abhängigkeit zu dem Behälterstand im Rohwasserbehälter Salingsmühle. Durch die Umstellung auf das neue Betriebskonzept konnte im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost insgesamt eine Vergleichmäßigung der Entnahmemengen pro Brunnen erzielt werden.

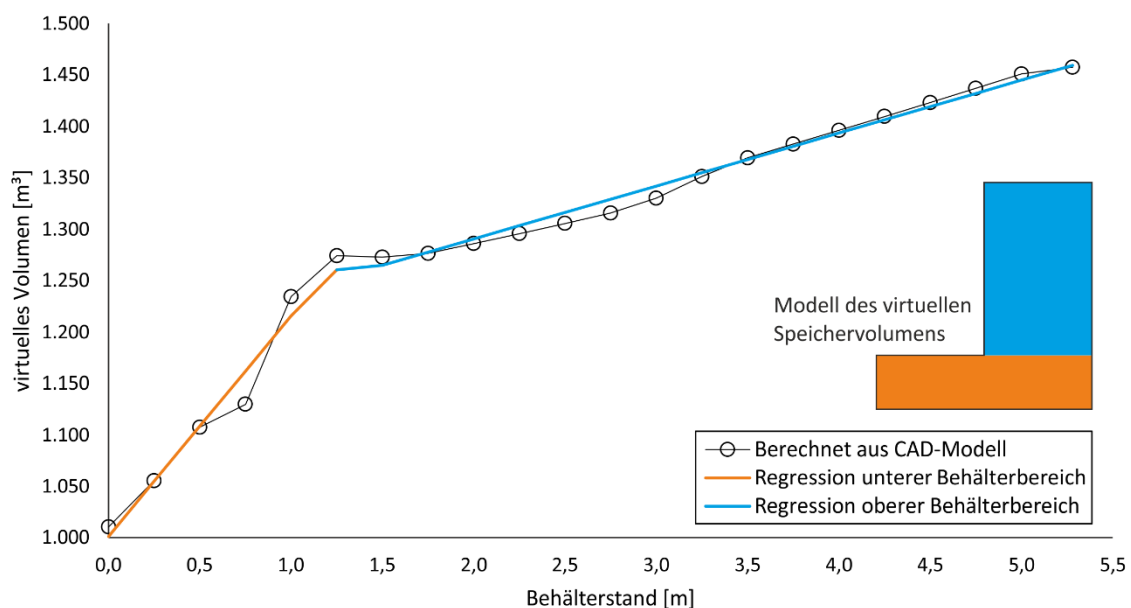


Abb. 44: Virtuelles Speichervolumen in Abhängigkeit vom Behälterstand Rohwasserbehälter Salingsmühle

Um das neue Betriebskonzept mit der H₂Opt Software simulieren und optimieren zu können, musste neben dem Betrieb der Vertikalbrunnen insbesondere auch der Füllstand des Rohwasserbehälters Salingsmühle modelliert werden. Untersuchungen zeigen, dass dem Rohwasserbehälter Salingsmühle (Fassungsvermögen ca. 180 m³) ein deutlich höheres „virtuelles“ Speichervolumen zugeordnet werden muss. Durch das Fassungsvermögen der beiden Anschlussleitungen des Rohwasserbehälters Salingsmühle an das Wasserwerk Barbarossastraße und die Freispiegelleitungen der Förderstränge Lauterspring und Saupferchtal wird das

Speichervolumen des Rohwasserbehälters erweitert. Abb. 44 zeigt hierzu das virtuelle Speichervolumen in Abhängigkeit vom Behälterstand im Rohwasserbehälter Salingsmühle. Diese Abhängigkeit wurde mit Hilfe eines CAD Modells von der Verrohrung im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost, welches basierend auf technischen Zeichnungen erstellt wurde, berechnet.

Der Verlauf des virtuellen Speichervolumens kann mit zwei linearen Regressionen beschrieben werden. Hierzu wird der Rohwasserbehälter in einen unteren und einen oberen Bereich unterteilt. Im unteren Bereich (bis zu einem Behälterstand von 1,25 m) steigt das Speichervolumen mit zunehmendem Behälterstand deutlich an, im oberen Bereich (Behälterstand zwischen 1,25 und 5,28 m) ist die Steigung der linearen Regression etwa 75 % kleiner. Da die beiden Regressionen die Abhängigkeit zwischen Behälterstand und virtuellen Speichervolumen gut wiedergeben, wurde für die Beschreibung des Füllverhaltens des Rohwasserbehälters Salingsmühle ein zweistufiger Behälter verwendet. Der in Abb. 44 skizzierte Behälter besitzt im unteren Bereich eine große Querschnittsfläche und im oberen Bereich eine kleine Querschnittsfläche.

Beim Befüllungs- bzw. Entleerungsvorgang des Behälters Salingsmühle muss neben dem virtuellen Speichervolumen auch das zeitabhängige Reaktionsverhalten des Behälterstandes berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur Druckleitung kommt es bei der Freispiegelleitung zu einem zeitlichen Versatz zwischen der Brunnenförderung bzw. der Schüttung der Quelle Lauterspring und der „Ankunft“ des Rohwassers im Behälter. Der Transport des Rohwassers innerhalb der beiden Freispiegelleitungen (Gerinneströmung) zum Rohwasserbehälter Salingsmühle benötigt zwischen 4 und 18 Minuten. Dieser zeitliche Versatz zwischen der Förderung und der Reaktion des Behälterstandes wird durch die nachfolgende Abbildung verdeutlicht.

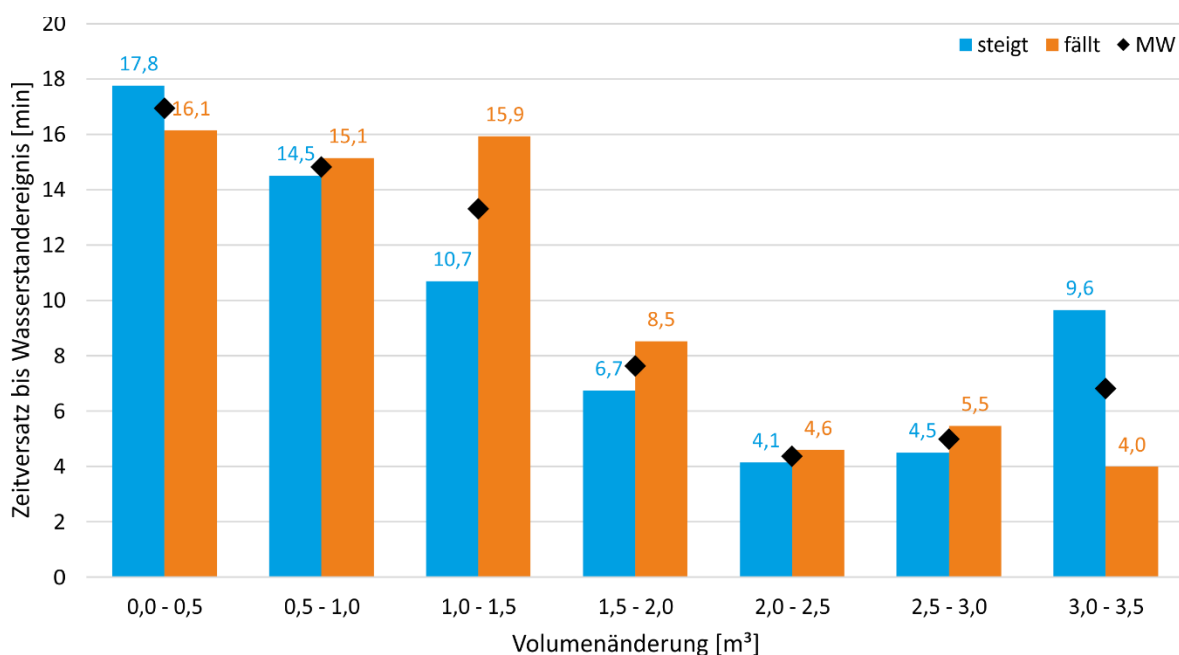


Abb. 45: Reaktionsverhalten des Behälterstandes im Rohwasserbehälter Salingsmühle

In Abb. 45 ist der durchschnittliche Zeitversatz zwischen einer Änderung in der Volumenbilanzierung (Zu- bzw. Entnahme von Rohwasser) und der daraus resultierenden Füllstandänderung im Rohwasserbehälter Salingsmühle dargestellt. Eine Zunahme des Rohwassers, d. h. ein Ansteigen des Behälterstandes, wird durch die blauen Säulen repräsentiert. Ein fallender Behälterstand durch die Entnahme von Rohwasser wird durch die orangenen Säulen dargestellt. Die Volumenänderungen bei der Rohwasserbilanzierung sind in Abb. 45 in verschiedene Klassen unterteilt. Tendenziell nimmt der Zeitversatz mit zunehmender Volumenänderung ab. Abgesehen von den beiden Änderungsklassen 1,0-1,5 m³ und 3,0-3,5 m³, fällt der Unterschied im Zeitversatz zwischen steigenden und fallenden Behälterstand gering aus.

Da die Brunnen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost abhängig vom Behälterstand im Rohwasserbehälter Salingsmühle zu- und abgeschaltet werden, ist das Reaktionsverhalten des Behälters bei der Steuerung des Brunnenbetriebs mit zu berücksichtigen.

Durch die technischen Veränderungen und die Umstellung des Betriebskonzeptes können jährlich auf Basis der Jahresfördermengen des alten Betriebskonzeptes 57.933 kWh Energie eingespart werden. Bezogen auf die Jahresfördermengen des neuen Betriebskonzeptes beträgt die jährliche Energieersparnis im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost 75.793 kWh. Bei einem durchschnittlichen Strompreis von 0,1712 €/kWh für die Industrie (17) bedeutet dies eine jährliche Reduzierung der Betriebskosten um 12.975 €.

Eine umfassende Optimierung der Brunnen mit Hilfe der Software ist derzeit nur eingeschränkt möglich, da die Genauigkeit der Modelle noch verbessert werden muss. Hierzu ist es erforderlich die Wechselwirkung der einzelnen Brunnen durch den Grundwasserkörper besser zu erfassen.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei allen Projektpartnern bilden die Personalkosten den größten Posten. Nachfolgend sind für alle Projektpartner die Personal-, Sach- und Reisekosten den beantragten Zuwendungen gegenübergestellt. Das Verbundprojekt H₂Opt ist insgesamt im beantragten Zahlungsrahmen durchgeführt worden.

2.2.1 Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM)

Tab. 2.3: zahlenmäßiger Nachweis (SAM)

Art	Bewilligte Zuwendung	Ausgaben
Personalkosten	397.890,00 €	402.316,88 €
Sachkosten	595,00 €	595,00 €
Reisekosten	3.570,00 €	2.860,43 €
Projektpauschale	80.411,00 €	80.091,00 €
<i>Ausgleich durch Eigenmittel</i>		<i>-5.317,31 €</i>
Gesamt	482.466,00 €	480.546,00 €

2.2.2 Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)

Tab. 2.4: zahlenmäßiger Nachweis (ITWM)

Art	Bewilligte Zuwendung	Ausgaben
Personalkosten	572.481,00 €	591.046,10 €
Sachkosten	3.150,00 €	0,00 €
Reisekosten	4.850,00 €	5.481,46 €
<i>Ausgleich durch Eigenmittel</i>		<i>-16.046,56 €</i>
Gesamt	580.481,00 €	580.481,00 €

2.2.3 SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG (SWK)

Tab. 2.5: zahlenmäßiger Nachweis (SWK)

Art	Bewilligte Zuwendung	Ausgaben
Personal- und Gemeinkosten	47.805,00 €	47.045,00 €
Sachkosten	8.504,50 €	10.525,69 €
Reisekosten	1.250,00 €	0,00 €
Eigenmittelanteil (50 %)		-28.785,34 €
Gesamt	57.559,00 €	28.785,35 €

2.2.4 EWR Netz GmbH (EWR)

Tab. 2.6: zahlenmäßiger Nachweis (EWR)

Art	Bewilligte Zuwendung	Ausgaben
Personalkosten	29.950,50 €	29.880,21 €
Sachkosten	5.000,00 €	0,00 €
Reisekosten	1.250,00 €	292,05 €
Eigenmittelanteil (50 %)		-15.086,13 €
Gesamt	36.200,50 €	15.086,13 €

2.2.5 Obermeyer Planen + Beraten GmbH (OPB)

Tab. 2.7: zahlenmäßiger Nachweis (OPB)

Art	Bewilligte Zuwendung	Ausgaben
Personalkosten	21.265,00 €	44.339,35 €
Sachkosten	0,00 €	0,00 €
Reisekosten	1.250,00 €	559,84 €
Eigenmittelanteil (50 %)		-22.449,60 €
Gesamt	22.515,00 €	22.449,59 €

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit

Die Entwicklung einer modularen Softwareplattform zur Simulation, Optimierung und Entscheidungsunterstützung von Wasserversorgungsanlagen mit dem Anspruch, bei der Mehrzahl von Wasserversorgungsunternehmen von unmittelbarem praktischen Nutzen zu sein, erfordert einen innovativen interdisziplinären Ansatz, der naturgemäß erhebliche wissenschaftliche und technologische und damit letztlich auch wirtschaftliche Risiken in sich trägt. Insbesondere stellt der inhaltliche Umfang – von der Datenerhebung über die Simulation und Optimierung bis hin zur Modellvalidierung, graphischen Entscheidungsunterstützung und szenarienartigen Fallstudien in direkter Einbindung verschiedener Unternehmen der Wasserwirtschaft zusammen mit dem dafür nötigen Kompetenzspektrum - eine im Rahmen industrieller Auftragsforschung nicht überwindbare Hürde dar.

Eine Realisierung der im Verbundprojekt H₂Opt entwickelten Software und deren Einsatz in der Praxis wäre ohne finanzielle Förderung des BMBF in dieser Art und Weise nicht möglich gewesen.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Projektpartner des Verbundprojektes H₂Opt haben in enger Zusammenarbeit eine Software zur Optimierung von Anlagen zur Trinkwasserversorgung unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten realisiert. Die H₂Opt Software wird bereits unter realen Bedingungen zur täglichen Erstellung von Pumpenfahrplänen im Wasserwerk Bürstadt des Projektpartners EWR Netz GmbH erfolgreich eingesetzt.

Des Weiteren werden die Ergebnisse und Erfahrungen des Verbundprojektes mit in der universitären Lehre miteingebunden. Im Fachbereich Bauingenieurwesen im Fachgebiet Siedungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern findet die H₂Opt Software im Rahmen der Vorlesung „Wasserversorgung“ ihren Einsatz. Die im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt erzielten Ergebnisse finden ebenfalls am Lehrstuhl Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen des Fachbereichs Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern ihren Einsatz in den vier Lehrveranstaltungen „Strömungsmaschinen 1“, „Strömungsmaschinen 2“, „Strömungsmaschinen 3“ und „Optimierung in der Strömungsmechanik“.

Aktuell ist ebenfalls eine Weiterverwendung in EFRE-Projekt vorgesehen. Als Projektkoordinator dieses Projektes hat sich das Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik beworben.

Die Zusammenarbeit zwischen der SWK und SAM wurde über die Projektlaufzeit hinaus bis Ende 2017 fortgeführt, indem weiterhin Messdaten der Anlage an SAM übergeben und ausgewertet wurden. Außerdem laufen bei SAM eine Promotion zur Modellierung der Brunnenpumpen und weitere studentische Arbeiten zur Optimierung des Betriebs der Brunnenpumpen und zur Auswahl von Brunnenpumpen unter Berücksichtigung der Absenkung des Grundwasserspiegels.

Zwischen ITWM und EWR laufen derzeit Gespräche über eine feste Integration der H2Opt Software in das Leitsystem.

Auf der vom LDEW und DVGW organisierten Veranstaltung „Energieoptimierung in der Wasserversorgung Rheinland-Pfalz“ wurde vom Zweckverband Wasserversorgung Eifel-Mosel Interesse an Kooperation mit SAM bekundet. Derzeit sind wir auf der Suche nach einer geeigneten Fördermaßnahme zur Realisierung des Projektes.

Weiterhin bestehen derzeit Kontakte zu einer möglichen Kooperation mit dem IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH im Hinblick auf Forschungsaktivitäten zu Brunnenpumpen.

Basierend auf den Ergebnissen von H2Opt wurden weitere Förderanträge in der Fördermaßnahme Ressourceneffizientes Stadtquartier („Waterspace“) und dem Water JPI Joint Call 2017 („IoT.H2Opt“) zur Weiterentwicklung von Entscheidungsunterstützungsinstrumenten und Optimierungsmethoden für Trinkwasseranlagen eingereicht. Beide Anträge befinden sich derzeit in der Begutachtung.

Der beim Projektpartner SAM entwickelte Modellierungsansatz für den Betrieb von Vertikalbrunnen wird über den Projektrahmen hinaus im Rahmen einer Promotionsarbeit weiter verfolgt und ausgebaut. Eine Verknüpfung der beiden Modellierungsansätze für die Erstellung eines Anlagenkennfeldes auf Seite der Trinkwasserförderung und für den Betrieb von Vertikalbrunnen auf der Seite der Rohwassergewinnung bieten einen weiteren Schritt hin zum Ziel der ganzheitlichen Betrachtung einer Trinkwasserversorgungsanlage.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Allen Projektpartnern ist kein anderes Forschungsinstitut oder Unternehmen bekannt, welches bereits eine Software in der Form von H2Opt benutzt oder seit der Antragstellung entwickelt hat.

Während der Projektlaufzeit recherchierte der Projektverbund H2Opt kontinuierlich den Stand der Technik im Bereich der Optimierung von Anlagen zur Trinkwasserversorgung. Durch die Teilnahme an der Konferenz Water Distribution Systems Analysis (WDSA) 2014, konnte ein Überblick über die letzten Forschungsergebnisse in diesem Bereich erstellt werden. Auch hier, war die Optimierung des Rohrleitungsnetzes ein Bestandteil der Konferenzbeiträge, z.B. (2). Die Optimierung des Betriebs der Pumpen wurde z.B. in (21) diskutiert. Die Voraussetzung für die Optimierung der Pumpen ist in diesen Arbeiten die Kenntnis der Strömungsvorgänge im Rohrleitungsnetz. D.h. es sind kalibrierte Rohrleitungsmodelle notwendig, um eine realistische Vorhersage der Betriebspunkte der Pumpen zu ermöglichen. Die Verwendung eines Anlagenkennfeldes, wie sie in H2Opt umgesetzt ist, wird nicht berücksichtigt. Aber gerade dieser Ansatz bietet eine Menge Vorteile. Er ist viel einfacher zu realisieren, da das Anlagenkennfeld aus Messdaten, die die meisten Anlagenbetreiber sowieso erheben, ermittelt werden kann. Der hohe

Aufwand zur Erstellung eines kalibrierten Rohrleitungsmodells, den gerade kleine und auch mittlere Versorgungsunternehmen nicht leisten können, entfällt.

Außerdem ist in den Beiträgen (21) und (22) die Regelung der Pumpen nur eingeschränkt veränderbar, da z.B. die Drehzahlregelung von Pumpen nicht korrekt abgebildet werden kann. Dieses Problem wird auch in (3) adressiert. In der Regel fehlen Daten, mit denen die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von Pumpe, E-Motor und Frequenzumrichter von der Drehzahl beschrieben werden kann.

In (4) wurde zudem diskutiert, dass Optimierungsmethoden in der Trinkwasserversorgung momentan noch keinen Einzug in die Praxis erhalten haben, da die verwendeten Methoden zumeist nicht auf die Bedürfnisse der Anwender eingehen und eher Spezialisten vorbehalten sind. Gerade an diesem Punkt hat H₂Opt angesetzt und ein Tool geschaffen, mit dem auch die Anlagenbetreiber schnell und effizient arbeiten können.

Die zitierten Arbeiten sind trotzdem für H₂Opt von Relevanz, da aus Ihnen verschiedene Problemstellungen und Optimierungsziele für H₂Opt abgeleitet werden konnten.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Das Verbundprojekt H₂Opt hat sich auf verschiedenen Ebenen präsentiert. Eine Auflistung der Veröffentlichungen und Vorträge ist nachfolgend gezeigt.

- „Entscheidungsunterstützung für Planung und Betrieb von Trinkwasserversorgungsanlagen“
gwf Wasser-Abwasser 07/08, 2016.
- „Decision support for the design and operation of variable speed pumps in water supply systems“
Computing and Control for the Water Industry, Amsterdam, 2016.
- „Modeling of vertical wells in the water procurement - Application to the case study water procurement area East Kaiserslautern“
Computing and Control for the Water Industry, Amsterdam, 2016.
- „Decision Support for the Design and Operation of Water Supply Systems“
Computing and Control for the Water Industry, Leicester, 2015.
- „H₂Opt: A Software Prototype for the Optimization of Drinkwater Systems“
3rd International Rotating Equipment Conference, Düsseldorf, 2016.
- „Optimierung der Betriebsweise von Anlagen zur Trinkwasserversorgung im Hinblick auf Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit“
DVGW-WAT, 2015.

- ④ „H₂Opt: Ein Forschungsvorhaben zur Steigerung der Energieeffizienz von Wasserversorgungsbetrieben“
Hessen im Blick 02/2014, Informationszeitschrift DVGW Hessen und Rheinland Pfalz.
- ④ „H₂Opt: Interaktive Entscheidungsunterstützung für das Betriebs- und Energiemanagement von Wasserversorgungsbetrieben auf der Grundlage von mehrkriteriellen Optimierungsverfahren “
DVGW Informationstag Wasser, Guntersblum, 2014.
- ④ „Energieeffizienz und Lebenszykluskosten von Pumpen in der Wasserversorgung“
DVGW Informationstag Wasser, Alzey, 2016.
- ④ „Optimierung der Betriebsweise von Anlagen zur Trinkwasserversorgung im Hinblick auf Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit“
DVGW Informationstag Wasser, Bensheim, 2016.
- ④ „Austausch von Transportpumpen eines Wasserwerks im Hinblick auf Energieeffizienz und Vermeidung von Kavitationschäden“
VDI-Tagung Schäden in Pumpensystemen, München, 2016.
- ④ Vorträge im Rahmen der PamAcademy von Saint-Gobain, Saarbrücken, 2016 und 2017.
- ④ DVGW energie | wasser-praxis, Artikel geplant für 01/2018
- ④ LDEW/ DVGW Energieoptimierung in der Wasserversorgung Rheinland-Pfalz

Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern wurden im Rahmen des Verbundprojektes H₂Opt folgende studentische Arbeiten vergeben:

- ④ Masterarbeiten
 - ▶ MA2017/034
„Entwicklung und Validierung einer Methode zur Bestimmung von Anlagenkennfeldern von Trinkwasseranlagen“
- ④ Bachelorarbeiten
 - ▶ BA2016/005
„Hydraulische Modellierung und experimentelle Validierung einer Drosselregelung“
 - ▶ BA2016/008
„Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des Anlagenkennfeldes von Trinkwasseranlagen“
 - ▶ BA2016/038
„Analyse des Betriebs- und Schaltverhaltens in der Wassergewinnung in Kaiserslautern“

- ▶ BA2017/007
„Erstellung eines Programms zur Auswertung der Betriebsdaten von Wasserversorgern“

○ Studienarbeiten

- ▶ SA2015/034
„Implementierung eines hydraulischen Berechnungsprogramms zur Bestimmung des Betriebs von Vertikalbrunnen mit MATLAB und SIMULINK“
- ▶ SA2015/041
„Modellierung und numerische Untersuchung der Rohwassersammelleitung im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost“
- ▶ SA2015/042
„Analyse des Betriebs- und Schaltverhaltens von Brunnenpumpen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern-Ost der SWK Stadtwerke Kaiserslautern“
- ▶ SA2015/043
„Experimentelle Untersuchungen zur Drehzahlabhängigkeit von Pumpenkennlinien - Validation eines drehzahlabhängigen Kennlinien-Berechnungsprogramms“
- ▶ SA2015/055
„Entwicklung eines Datenverwaltungstools auf Basis von Visual Basic und SQL“
- ▶ SA2015/057
„Experimentelle Untersuchung der Filteranlage im Wasserwerk Barbarossastraße“
- ▶ SA2015/061
„Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung des Anlagenkennfeldes von Trinkwasserversorgungsanlagen“
- ▶ SA2015/069
„Simulation des Brunnennetzes der EWR Netz GmbH mittels EPANET, sowie die Erstellung von Anlagenkennlinien im Rahmen des ERWAS – H₂Opt Verbundprojekts“
- ▶ SA2016/024
„CFD-Untersuchung der Durchströmung von Schlauchpackern in Vertikalbrunnen“

○ Studienprojekte/Projektarbeiten

- ▶ SP2015/026
„Komponentenweise Lebenszykluskosten-Analyse der Wasserversorgung in Kaiserslautern“
- ▶ SP2015/071
„Modellierung einer Trinkwasseranlage mithilfe von STANET®“

- ▶ PA2015/029
„Ermittlung von Anlagenstrukturen und Optimierungspotentialen in der öffentlichen Trinkwasserversorgung basierend auf einer deutschlandweiten Betreiberumfrage“
- ▶ PA2016/017
„Programm zur frequenz- und lastabhängigen Berechnung der elektrischen Verluste von Antriebssystemen (PDS) basierend auf der Norm DIN EN 50598“
- ▶ PA2016/050
„Untersuchung und Modellierung des betriebsbedingten Absenkverhaltens von Vertikalbrunnen in den Gewinnungsgebieten Kaiserslautern Ost und Süd“
- ▶ PA2017/001
„Entwicklung einer Prognosemethode für den Netzverbrauch in Trinkwasserversorgungsanlagen mit Korrekturverfahren an charakteristischen Punkten des Tagesverbrauchprofils“

3 Literatur

1. **Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung & Gewässerschutz (Eawag).** *Wasser und Energie – Faktenblatt*. Dübendorf, Zürich, Schweiz : eawag aquatic research, 2011.
2. **Brodersen, Sönke.** Lebenszykluskosten für Förderanlagen – Auswahlkriterien für wirtschaftliche Entscheidungen. *wat2006*. 2006.
3. **DECHEMA.** Pumpen, Kompressoren und Armaturen: Im Zeichen der Energie-Intelligenz. *ACHEMA 2012 Presseinformation Trendbericht Nr. 4 : Pumpen und Armaturen*. 2012.
4. **Pabst, Simone.** Das Geld kommt aus der Dose. *Chemie Technik*. März 2008.
5. Nicht nur "gepumpt", sondern gespart. *Der Konstrukteur ASB-Special*. 2007.
6. **SIEMENS.** SinaSave: Amortisationsrechner für energieeffiziente Antriebstechnik. [Online] [Zitat vom: 25. Mai 2012.] <http://www.industry.siemens.com/topics/global/de/energieeffiziente-produktion/energiespar-tools/energieeffizienz-software-sinasave/Seiten/Default.aspx>.
7. **Graf, Saskia.** Der LCC-Rechner und seine Möglichkeiten. *KSB - Technik Kompakt: Aktuelles Fachwissen für die Praxis*. 2002.
8. Pumpe wird zum Feldgerät. *Chemie Technik*. 2003, Nr. 5.
9. **Roclawski, Harald, Hellmann, Dieter-Heinz und Hausen, Wolfgang.** Auswahl von Transportpumpen für die Wasserversorgung nach Lebenszykluskosten. *Pump Users International Forum*. 2004.
10. **Hähnlein, Christian.** *Numerische Modellierung zur Betriebsoptimierung von Wasserverteilnetzen*. Dissertation TU Darmstadt : s.n., 2008.
11. **Ingenieurbüro Fischer-Uhrig.** STANET® Netzberechnung - Für Gas, Wasser, Strom, Fernwärme und Abwasser. [Online] <http://www.stafu.de>.
12. **Karlsruher Institut für Technologie.** IWG Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abteilung III Wasserversorgungsnetze. [Online] [Zitat vom: 13. 03 2013.] http://kanet.iwg.uni-karlsruhe.de/407_1128.php.
13. **ESTECO.** www.modefrontier.com. *modeFRONTIER*. [Online]
14. **Dynardo - dynamic software & engineering.** www.dynardo.de/en/software/optislang.html. [Online]
15. *Pareto-Navigation in Chemical Engineering*. **Asprion, Norbert et al.** s.l. : ESCAPE 21, 2010.

-
16. **Küfer, Karl-Heinz et al.** Multicriteria Optimization in Intensity Modulated Radiotherapy Planning. [Buchverf.] Panos M. Pardalos et al. *Handbook of Optimization in Medicine*. s.l. : Springer, 2009.
 17. **BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.** BDEW-Strompreisanalyse Februar 2017 (Haushalte und Industrie). Berlin : s.n., 2017.
 18. **Statistisches Bundesamt.** Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserversorgung - Öffentliche Wasserversorgung -. Wiesbaden : DESTATIS, 2013. Fachserie 19 Reihe 2.1.1. Artikelnummer: 2190211109004.
 19. **Pfleiderer, Carl.** *Strömungsmaschinen*. 7., unveränderte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. ISBN 978-3-540-26913-7.
 20. **United States Environmental Protection Agency.** [Online] <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
 21. **Bayrisches Landesamt für Umwelt.** *Effizienz- und Qualitätsuntersuchung der kommunalen Wasserversorgung in Bayern (2010)*. 2010.
 22. **aquabench GmbH.** aquabench. [Online] www.aquabench.de.