

**Abschlussbericht des Teilprojekts
von Herrn Prof. Dr. J. Lang,
Technische Universität Darmstadt**

30. November 2017

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt
Förderkennzeichen: 042602/500 00709 ERWAS/EWAVE
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: EWave –
Energiemanagementsystem Wasserversorgung
Teilprojekt: Physikalische Modelle und numerische Verfahren
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2014 - 30.06.2017

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens EWAVE ist es, ein innovatives Energie-Managementsystem zu entwickeln, welches im Echtzeit-Betrieb der Wasserversorgungsgesellschaft RWW als ein Wasserversorger mit typischer Netzstruktur zum Einsatz kommt. Dabei werden energie-optimale Pläne zur Steuerung des Betriebes von Wasserversorgungsanlagen berechnet. Der Energieverbrauch des Gesamtnetzes erfolgt durch Summation der Energieverbräuche einzelner Netzwerkkomponenten. Um eine qualitativ wertvolle Aussage über den Energieverbrauch des Netzes machen zu können, wird auch die Eigenenergieerzeugung vom System berücksichtigt.

Das Assistenzsystem basiert auf verschiedenen Tools, welche untereinander interagieren. Neben dem Simulationstool (SIMT) verfügt das System über ein diskretes (DOPT) und kontinuierliches Optimierungstool (COPT). Alle diese Tools basieren auf mathematischen Modellen, welche die physikalischen Hintergründe des Netzwerkverhaltens beschreiben. Diese Modelle wurden aus einem vorherigen Projekt teilweise übernommen und zusammen mit den einzelnen Gruppen weiterentwickelt. Insbesondere wurde sich eingehend mit den Energiemodellen und dem Energieverbrauch der einzelnen Netzwerkkomponenten auseinandergesetzt.

Das Teilprojekt befasst sich mit der Entwicklung des Tools COPT. Hierbei werden adjungierten-basierte Optimierungsmethoden verwendet, um energie-optimale Betriebsfahrpläne der einzelnen Netzwerkkomponenten sowie des Gesamtnetzes berechnen zu können. Um die technischen Anforderungen und die Qualität des Trinkwassers berücksichtigen zu können, werden spezifische Randbedingungen in den Optimierungsalgorithmen eingebaut. Schließlich bilden die eingesetzten numerischen Verfahren zur Lösung der mathematischen Modelle die Basis der effizienten kontinuierlichen Optimierung. Insgesamt befasst sich dieses Teilprojekt mit der optimalen Lösung eines vollen nichtlinearen Modells.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen des Verbundprojekts EWAVE wurde dieses Teilprojekt an der Technischen Universität Darmstadt in der Arbeitsgruppe “Numerische Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen” unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Jens Lang bearbeitet und durchgeführt. Insgesamt gab es folgende Kooperationspartner:

- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Prof. Dr. Alexander Martin, Dr. Antonio Morsi, Dr. Björn Geißler
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Prof. Dr. Günther Leugering, Maximilian Walther
- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (HBRS), Prof. Dr. Gerd Steinebach, Tim Jax, Patrick Haussmann, David Dreistadt
- Technische Universität Darmstadt (TU DA), Prof. Dr. Jens Lang, Lisa Wagner
- Universität Mannheim (U MA), Prof. Dr. Oliver Kolb
- RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, Dr. Michael Plath, Stefan Fischer, Ronald Roepke, Martin Launer
- Siemens AG, Process Industries and Drives, Vertical Sales, Dr. Andreas Pirsing
- Siemens AG, Corporate Technology Research in Digitalization and Automation, Modeling and Simulation Technologies, Dr. Annelie Sohr, PhD Moritz Allmaras, Tim Schenk
- Bilfinger GreyLogix aqua GmbH, Olaf Kremsier.

Die Personalmittel wurden durchgehend für die wissenschaftliche Mitarbeiterin Lisa Wagner M.Sc. verwendet.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß dem Projektantrag wurden die darin beschriebenen Meilensteine abgearbeitet und umgesetzt. Dabei wurden die speziellen Einzelziele in Kooperation mit den oben genannten Partnern mithilfe thematisch entwickelter Teilprojekte realisiert. Neben bilateralen Austauschen der einzelnen Partner fanden halbjährige Treffen mit allen Projektpartnern statt, bei denen die aktuellen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert wurden. In der Endphase des Projekts, der Pilotphase des Systems bei RWW, fanden zusätzlich wöchentlich gemeinsame Telefonkonferenzen statt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wie in Abschnitt 2 des Projektantrags beschrieben, existieren noch keine Softwarepakete bzw. Managementsysteme, welche energie-optimale Betriebsfahrpläne aufgrund von mathematischen Modellen mit instationären Lösungen unter Echtzeit-Bedingungen berechnen können. Weiter gibt es bis dato keinen praxistauglich integrierten Gesamtansatz, welcher alle Aspekte hinsichtlich Modellierung, Simulation und energie-effizienter Optimierung berücksichtigt. Hiermit sollen einerseits methodische Untersuchungen und Testläufe zur netzweiten Optimierung der Betriebsführung von Wasserversorgungsanlagen, Betriebsverbesserungen von Wasserwerken und die Betrachtung von Energieverbräuchen im Wasserversorgungsnetz durchgeführt werden. Andererseits sollen die erwähnten Methodiken in ein einfach zu bedienendes Assistenzsystem integriert werden, sodass die Anwender mittels eines Meldefenster die energie-optimalen Betriebsfahrpläne ablesen können.

Mithilfe der hier entwickelten Modellbeschreibungen ist eine vollständige Simulation aller Netzwerkkomponenten möglich. Dies ist eine Erweiterung und Verbesserung an andere Softwarepakete, bei denen nur quasi-stationäre Simulationen berücksichtigt werden können [6, 15, 18]. Diese hydrodynamische Modellierung und Simulation ist für die darauf aufbauende energie-effiziente Optimierung aus mathematischer Sicht sinnvoll und notwendig. Oben genannte Techniken und Methodiken sollen in verschiedene Module integriert werden, die ein noch nicht vorhandenes Energie-Managementsystem bilden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojekts fand eine enge Zusammenarbeit mit allen beteiligten Projektpartnern statt. Zudem nahm ein Teil unserer Projektpartner am ERWAS-Querschnittsthema "Modellierung und Simulation" teil, an welchem die verschiedenen benutzten Softwarepakete hinsichtlich Performance und mathematische Modellierung und Simulation in Vorträgen vorgestellt und verglichen wurden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Bezüglich dieses Teilprojekts konnten alle im Projektantrag vereinbarten Meilensteine innerhalb des Projektzeitraums erreicht werden. Die dabei erzielten Ergebnisse können dem mathematischen Thema “Kontinuierliche Optimierung dynamischer Systeme” zugeordnet werden. Des Weiteren hatte das Teilprojekt an der TU Darmstadt die Federführung im Arbeitspaket 3 “Physikalische Modelle und numerische Verfahren” des Projekts.

Wie in den einzelnen Zwischenberichten beschrieben, wurde zunächst die Weiterentwicklung des Modellkatalogs für Netzwerkkomponenten vorgenommen. Aufbauend auf dem bereits vorhandenen Modellkatalog, welcher im BMBF-Projekt Odysseus [11] entwickelt wurde, wurden Komponenten wie Pumpen mit variabler Drehzahl oder Regelventile modelltechnisch erweitert oder neue Komponenten wie künstliche Speicher entwickelt [9]. Die Entwicklung der künstlichen Speicher war notwendig, um gewisse Teile des Netzwerks, z.B. Rohrnetze, als eine Komponente zusammenfassen zu können, d.h. eine Netzwerkaggregation zu gewährleisten [19]. Um eine energie-effiziente Betriebsführung der Wasserversorgungsanlagen mathematisch definieren und berechnen zu können, wurde die mathematische Modellierung einer Energie-Komponente vorgenommen und in der Software implementiert. Mit dieser Komponente kann beispielsweise der Energieverbrauch von Pumpen oder druckbehafteten Verbindern dargestellt werden. Beispielsweise wurden druckbehaftete Verbindern benutzt, um sogenannte Riesler oder UV-Filter im Wasserwerk geeignet modellieren zu können.

Neben der Modellierung spielt auch die Wahl geeigneter numerischer Methoden eine Rolle, um die Simulations- und Optimierungsprobleme auf Netzwerken zu lösen. Innerhalb der Software können hierzu adäquate Diskretisierungen für jede einzelne Komponente verwendet werden. Um die hyperbolischen Erhaltungsgleichungen, welche den druckbehafteten Wasserfluss im Rohr [1, 2, 12] beschreiben, zu lösen, wurde mit der Implementierung von SDIRK-Verfahren in Kombination mit Finite-Volumen- [10] oder Discontinuous-Galerkin-Verfahren [14] begonnen. Mehr über die Eigenschaften dieser Verfahren im Bezug auf hyperbolische Erhaltungsgleichungen in Wasserversorgungsnetzwerken findet sich in [21, 22]. Im Gegensatz zu dem bereits implementierten impliziten Boxverfahren [8], weisen obige numerische Verfahren eine höhere Genauigkeit bezüglich der Lösungsapproximation auf. Zudem konnten weitere wichtige Eigenschaften für das Stabilitätsverhalten der Verfahren nachgewiesen werden [21]. Im Energie-Managementsystem ist jedoch das implizite Box-Verfahren verwendet worden, um obig erwähnte Lösungen zu generieren. Des weiteren wurden Erweiterungen bezüglich der Software vorgenommen, um die Ergebnisse zu verbessern und um eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der anderen Softwaretools zu erhal-

ten.

Um die technischen Randbedingungen und die Richtlinien über die Wasserqualität zu berücksichtigen, wurden entsprechende Nebenbedingungen in der Software eingebaut. Beispielsweise kann somit das Mischverhältnis des Rohwassers, welches von unterschiedlichen Quellen entnommen wird, gesteuert werden, um insgesamt die geforderte Trinkwasserqualität zu erreichen. Außerdem kann mithilfe dieser Nebenbedingungen auch die gleiche Bespeisung von parallelen Filterstraßen geregelt werden. Insgesamt ist die Berücksichtigung derartiger Randbedingungen notwendig, um die Dynamik des betrachteten Wasserversorgungsnetzes abzubilden. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Nebenbedingungen, wird bei dem beschriebenen Nebenbedingungstyp eine Verknüpfung mehrerer Netzwerkkomponenten, welche prinzipiell über dem gesamten Wassernetz unterschiedlich lokalisiert sein können, hergestellt.

Um die kontinuierliche Optimierung in das Assistenzsystem einzubauen, wurde das Softwaretool COPT entwickelt, in welchem die Software ANACONDA¹ aufgerufen wird. Zusammen mit dem Softwaretool DOPT (**d**iskretes **O**ptimierungstool) [13] bildet es das EWAVE-Optimierungstool [4], welches nach dem Simulationstool SIMT² aufgerufen wird. Mit den Anfangszuständen von SIMT und den optimalen Steuerungen von DOPT wird in COPT mithilfe von ANACONDA ein nichtlineares Optimierungsproblem gelöst, welches auf instationären Modellgleichungen beruht. Bezüglich den kontinuierlichen Steuergrößen, welche in DOPT aufgrund der stationären Modelle anders berechnet werden und so nicht verwendet werden können, wird hier eine zulässige und lokal optimale Lösung berechnet. Innerhalb von ANACONDA wird dazu auf aktuelle Optimierungsbibliotheken wie DONLP2 [16, 17] und IPOPT [20] zurückgegriffen. Um unzulässige Anfangszustände zu erkennen, wird vor jedem Optimierungslauf ein sogenannter Zulässigkeits-test in COPT durchgeführt. Sofern Randbedingungen verletzt werden, werden diese für die erste halbe Stunde innerhalb eines 12h- oder 24h-Optimierungslaufs relaxiert. Vor jedem Optimierungslauf wird ein Simulationslauf angestoßen. Für das gesamte Optimierungsmodul beträgt die Berechnungszeit 30 Minuten. Nach Ablauf dieser 30 Minuten, wird die Berechnung abgebrochen. Als optimale Lösung wird dann das Ergebnis von DOPT oder das Ergebnis aus dem vorherigen Lauf für das Assistenzsystem verwendet. Die Berechnungszeit für die Simulationsläufe in ANACONDA betragen nur wenige Sekunden. Die Optimierungsaufgaben konnten größtenteils in den von industrieller Seite geforderten Zeitrahmen gelöst werden.

¹Adaptive Numerical Algorithms for Control Optimization on Networks DArmstadt entwickelt in [7]

²SIMulationstool, welches das Softwarepaket TWaveSim [19] und TWaveProg [5] beinhaltet.

Das Energie-Managementsystem wurde für das entwickelte aggregierte Netzwerk von RWW mithilfe zahlreicher historischer Datensätze, welche von RWW zur Verfügung gestellt wurden, ausreichend getestet. Nach dieser ausführlichen Testphase erfolgte schließlich die Inbetriebnahme des Systems bei RWW, wobei hier seitens der Anwender Dokumentationen hinsichtlich der Ergebnisse des Assistenzsystems angefertigt, hinterfragt und abschließend mit allen Projektpartnern in den letzten Projekttreffen besprochen wurden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kostenplanung wurde gemäß dem Zuwendungsbescheid vom 29.01.2014 eingehalten. Die Personalmittel des Teilprojekts in der Arbeitsgruppe “Numerik und wissenschaftliches Rechnen” der Technischen Universität Darmstadt wurden für die wissenschaftliche Mitarbeiterin Lisa Wagner, M. Sc. eingesetzt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt verlief entsprechend der im Projektantrag formulierten Planung und die gesetzten Ziele konnten mithilfe der beantragten Mitteln erreicht werden. Die interdisziplinäre Zusammensetzung der Projektpartner trug maßgeblich zur Erreichung der gesetzten Ziele bei.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mithilfe der von RWW gemessenen Daten konnte ein ganzheitliches Modell des Netzwerkes entwickelt werden, an welchem das Assistenzsystem verschiedene Simulationen berechnet. Im Rahmen des Projektes wurden insbesondere für das Wasserwerk Holsterhausen eine Vielzahl von Daten ausgewertet und auch zusätzlich aufgenommen. Im Nachgang zum Projekt wurden weitere Druckmessungen in der Wasseraufbereitung nachgerüstet. Auf Basis der aufgenommenen Druckdaten und der für die Kalibrierung des Simulationsmodells notwendigen Untersuchung der Hydraulik der Wasseraufbereitung wird aktuell eine größere Veränderung der hydraulischen Bedingungen im Wasserwerk Holsterhausen geprüft. Ziel ist es dabei, eine größere Menge Wasser bei gleichem Energiebedarf aufbereiten zu können. Die detaillierte Betrachtung der Trinkwasserpumpen im Wasserwerk Holsterhausen sowie die erzielten Simulationsergebnisse während der Testphase haben die Ansatzpunkte für die Anpassung der Trinkwasserpumpen geliefert. Es wurden neue Laufräder für die großen Trinkwasserpumpen bestellt, da die Veränderung dieser Räder das größte Einsparpotenzial darstellt.

Die Ergebnisse des Projektes wurden auf dem DVGW-Seminar “Wirtschaftlicher Betrieb von Pumpensystemen” am 19.10.2017 in Hannover vorgestellt.

Es wird aktuell geprüft, ob die sehr einfache, aber dennoch ausreichend genaue Wasserbedarfsprognose großflächig bei RWW mit unterschiedlichen Zielen eingesetzt werden soll, u.a. für kurzfristige Behälterbewirtschaftung und mittelfristige Bewirtschaftung der Untergrundspeicher. Die im Gesamtprojekt entwickelten Kennzahlen, speziell die Wirkungsgrade für alle Anlagenteile der Wasserversorgung, sollen direkt in der bei RWW eingesetzten Datenbank berechnet werden. Anhand der Kennzahlen erfolgt dann die energetische Bewertung aller Anlagen der RWW.

2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojekts ERWAS [3] entstanden Resultate, die auf ähnlichen Problemstellungen basieren. Jedoch wurde keine signifikante Übereinstimmung zwischen den Projekten festgestellt. Vorarbeiten aus dem Gebiet und Arbeiten über relevante Teilaspekte, die in unseren Ergebnissen verwendet wurden, sind in den aufgezählten Veröffentlichungen aufgelistet.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse wurden bereits auf internationalen Workshops und Konferenzen vorgestellt und führten zu einer entsprechenden Veröffentlichung [22] oder einem Forschungsbericht [9]. Des weiteren wird ein Buch namens “ICT solutions for Water Supply Systems” entstehen, dessen Inhalte weitestgehend verfasst sind. Die Inhalte sind

- Part I: ICT solutions for Water Supply Systems
 - Role of ICT in Water Supply Systems: Requirements, Current Status and Challenges
 - EWAVE
- Part II: Theoretical Aspects
 - Demand Forecast
 - Hydraulic Modelling and Energy View
 - Optimization
- Part III: Practical Aspects
 - Network Aggregation
 - Setup of Simulation Model and Calibration
 - Field Data, Automation, Instrumentation and Communication

- New ICT Architecture
- Water Cockpit: Dashboard for Decision Support Systems
- Part IV: Outlook
 - Results from the Operational Test Phase
 - ICT and Smart Metering

Abschließend entstand im Rahmen dieses Projekts die Dissertation von Lisa Wagner M.Sc. [21].

Literatur

- [1] J. Abreu, E. Cabrera, J. Izquierdo, and J. García-Serra. Flow modeling in pressurized systems revisited. *Jou. of Hydraulic Eng.* 125, 11:1154–1169, 1999.
- [2] G. Bollrich. *Technische Hydromechanik 1*. HUSS-Medien GmbH, 2007.
- [3] ERWAS. Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft – ERWAS. http://www.fona.de/mediathek/pdf/SammelmappeERWAS_barrierefrei_web.pdf, April 2017.
- [4] B. Geißler, A. Morsi, and M. Walther. Spezifikation EWave-Optimierungsmodul. intern Document, November 2015.
- [5] P. Hausmann and G. Steinebach. Dokumentation – TWaveProg – Statistische Trinkwasserbedarfsprognose für das Wasserwerk Dorsten-Holsterhausen. intern Document, Januar 2016.
- [6] KANET. <http://kanet.iwg.uni-karlsruhe.de>.
- [7] O. Kolb. *Simulation and Optimization of Gas and Water Supply Networks*. PhD thesis, TU Darmstadt, 2011.
- [8] O. Kolb, J. Lang, and P. Bales. An implicit box scheme for subsonic compressible flow with dissipative source term. *Numer Algor*, 53:293–307, 2010.
- [9] O. Kolb and G. Steinebach. *Modellkatalog und Datenstrukturen Wasserversorgung*, 2016.
- [10] R. J. Leveque. *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press, 2002.
- [11] A. Martin, K. Klamroth, J. Lang, G. Leugering, A. Morsi, M. Oberlack, M. Ostrowski, R. Rosen, and Editors. *Mathematical optimization of water networks*. International Series of Numerical Mathematics, Birkhäuser, Springer Basel, 2012.
- [12] H. Martin and R. Pohl. *Technische Hydromechanik 4*. Verlag Bauwesen, 2000.
- [13] A. Morsi and B. Geißler. EWave-DOPT: Mathematical Model. intern Document, August 2016.
- [14] D.A. Di Pietro and A. Ern. *Mathematical aspects of discontinuous Galerkin methods*, volume 69 of *Mathématiques et Applications*. Springer, 2012.

- [15] L.A. Rossmann. *EPANET 2 users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 2000.
- [16] P. Spellucci. A new technique for inconsistent QP problems in the SQP method. *Math. Meth. of operations research*, 47(3):355–400, 1998.
- [17] P. Spellucci. A SQP method for general nonlinear programs using only equality constrained subproblems. *Math. Programming*, 82(3):413–448, 1998.
- [18] STANET. <https://www.stafu.de>.
- [19] G. Steinebach. TWaveSim – Ein Prozesssimulator für die Trinkwasserversorgung. intern Document, March 2016.
- [20] A. Wächter and L.T. Biegler. On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Math. Programming*, 106(1):25–57, 2006.
- [21] L. Wagner. *Second-order implicit Methods for conservation Laws with Applications in Water Supply Networks*. PhD thesis, TU Darmstadt, 2017.
- [22] L. Wagner, J. Lang, and O. Kolb. Second order implicit schemes for scalar conservation laws. In *Lecture Notes in Comp. Science and Eng.*, volume 112, pages 33–41, 2016.

Vorträge:

1. 22.07.2014: “Adaptive surrogate modelling in unsteady transport systems, WCCM2014, Barcelona
2. 14.09.2015: “Higher order time discretization for simulation and optimization of water supply networks”, ENUMATH 15, Ankara
3. 17.06.2016: “Second order implicit schemes for solving balance laws with applications to water supply networks”, ECMI 16, Santiago de Compostela
4. 25.07.2017: “Adaptive modelling, simulation and optimization of water and gas supply networks, WCCM2016, Seoul
5. 07.04.2017: “Adaptive modelling, simulation and optimization of complex water and gas flow in supply networks, FEF2017, Rom
6. 18.05.2017: “Adaptive modelling, simulation and optimization of complex water and gas flow in supply networks, University of Bath

Posterpräsentation:

1. August 2016: “Second order implicit time discretization with applications in water supply networks”, HYP 16, Aachen

**Erfolgskontrollbericht des Teilprojekts
von Herrn Prof. Dr. Jens Lang,
Technische Universität Darmstadt**

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt
Förderkennzeichen: 042602/500 00709 ERWAS/EWAVE
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: EWave –
Energiemanagementsystem Wasserversorgung
Teilprojekt: Physikalische Modelle und numerische Verfahren
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2014 - 30.06.2017

3 Erfolgskontrollbericht

3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die förderpolitischen Ziele von ERWAS sind umfassend und weitreichend. Speziell auf dieses Projekt bezogen umfassen sie die Energieeinsparungen in Wasserversorgungsanlagen und die Entwicklung von nachhaltigen und zukunftsfähigen energie-effizienten Wasser-Management-Anlagen. Unter Berücksichtigung von Energieverbräuchen und Energierückgewinnungen in den einzelnen Netzwerkkomponenten konnten mit dem entwickelten Energie-Managementsystem Energieeinsparungen im Rahmen von 3-10% für das betrachtete Wasserversorgungsnetz von RWW berechnet werden.

Dieses basiert auf der Kopplung verschiedener Softwaretools und der Integration von Messdaten der Wasserwerksgesellschaft RWW. Für die Softwaretools mussten mathematische Methoden aus verschiedenen Teilgebieten (Numerik, diskrete und kontinuierliche Optimierung) kombiniert und weiterentwickelt werden. Diese Strategien und Verfahren sind nicht nur auf die Anwendung zur Lösung von Problemstellungen für einzelne Wasserversorgungssysteme beschränkt, sondern können auch hinsichtlich andere Flussprobleme auf Netzwerken verwendet werden.

Durch den stetigen Austausch mit den Industriepartnern entstand der Nutzen des Assistenzsystem seitens der Wirtschaft und der Forschung. Der Austausch mit anderen Wasserwerksgesellschaften in den organisierten Workshops kann möglicherweise auch Kooperationen für zukünftige weitere Projekte liefern.

3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Im Rahmen des Projektes konnte ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung eines Echtzeit-Management-Systems für die Wasserversorgung in nur wenigen Jahren geleistet werden. EWAVE kann heute schon in Echtzeit eingesetzt werden. Die Mathematische Optimierung reduziert die Energiekosten signifikant. Für die Anlage von RWW konnten Einsparraten von 3-10% erzielt werden.

Offene Fragen betreffen die Digitalisierung der Wasserversorger. Das permanente Bereitstellen von umfangreichen Daten, die den aktuellen Zustand im Wassernetzwerk möglichst genau widerspiegeln, ist wesentlich bei der Erstellung und Kalibrierung von mathematischen Modellen, die dann die Grundlage für Berechnungs- und Optimierungsmethoden bilden. Die dadurch entstehenden Fixkosten für die Unternehmen zum Aufsetzen eines Systems wie EWAVE sind daher vermeintlich hoch. Der tägliche Mehrwert in Euro scheint alleine noch nicht überzeugend genug zu sein.

3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen/Schutzrechte wurden weder angemeldet noch erteilt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende: Das entwickelte Energiemanagementsystem kann auch bei anderen Wasserwerkgesellschaften angewandt werden. Hierzu bedarf es jedoch noch weiterer Arbeit. Allgemein dient es den Wasserwerkgesellschaften als Anwendergruppe. Gegenüber anderen Systemen verfügt das hier entwickelte System über die Methoden zur Simulation und Optimierung eines komplexen Wasserversorgungsnetzes.

Wissenschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende: Im Rahmen des Verbundprojektes EWave ist ein Assistenzsystem entstanden, welches in der Praxis umfangreich getestet wurde. Dieses System dient zur Lösung der behandelten Aufgabenklasse und ist aus der Integration verschiedener Softwarepakete der einzelnen Partner entstanden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende: Mit dem Gesamtvorhaben wurde aus technischer Sicht ein Assistenzsystem entwickelt, welches Betriebspläne der Wasserversorgungsanlagen berechnet, mit denen der Energieverbrauch der Wasserversorgungsnetze reduziert werden kann. Ergebnisse hierzu wurden auf Workshops und Konferenzen vorgestellt und diskutiert, sodass weitere Forschungsergebnisse diesbezüglich realisierbar sind.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit: Durch die enge Kooperation mit den Projektpartnern sind Beziehungen entstanden, welche die Weiternutzung, Weiterentwicklung und möglicherweise eine Vermarktung des Assistenzsystem ermöglichen.

3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Nicht vorhanden.

3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die erzielten Ergebnisse wurden bereits auf internationalen Konferenzen und Workshops vorgestellt und führten zu entsprechenden Veröffentlichungen [21, 22]. Weiterhin wird ein mit allen Projektpartnern gemeinsam verfasstes Buch "ICT solutions for Water Supply Systems" entstehen. Die Veröffentlichung des Buches ist für März 2018 geplant. Informationen und Kurzbeschreibungen zum Projekt sowie Kontaktadressen sind auch auf der eigenen Homepage <https://edom.fau.de/ewave/> zu finden.

3.6 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kosten- und Zeitplanung wurden gemäß dem Zuwendungsbescheid vom 29.01.2014 eingehalten.