ENERWA

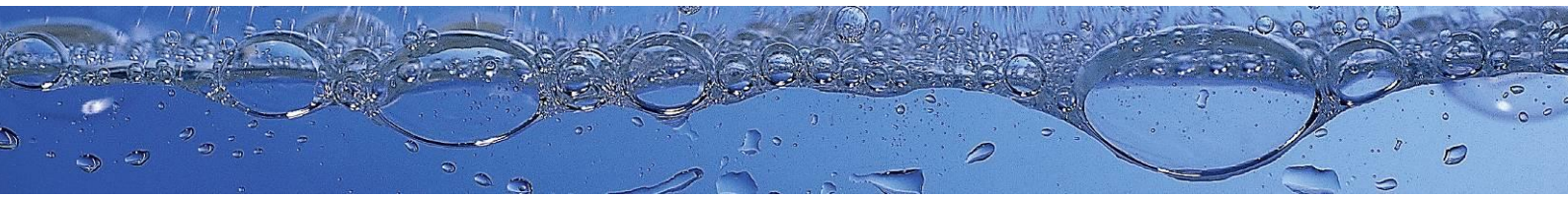
Energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems

Talsperren/Fließgewässer · Trinkwasseraufbereitung · Transport-Speicherung-Verteilung

Gemeinsamer Abschlussbericht aller Verbundpartner
BMBF-Förderkennzeichen 02WER1318A bis L

September 2017

Das diesem Abschlussbericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“ gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Projektpartner / Autoren

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH (IWW)
Dr.-Ing. Wolf Merkel, Anja Rohn, Dr.-Ing. Dieter Stetter, Anil Gaba, Nadine Staben, Kristina Wencki, Jürgen Heinzke, Dr. Heike Horn

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
Dr.-Ing. Paul Wermter, Jan Echterhoff, Michaela Stecking, Daniel Löwen, Maximilian Loderhose

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) an der RWTH Aachen
Dr. Daniel Schweer, Andreas Maaz

Abteilung Aquatische Ökologie der Universität Duisburg-Essen (UDE)
Prof. Dr. Bernd Sures, Dr. Christian Feld, Thomas Meißner

Forschungsstelle Bürgerbeteiligung der Bergischen Universität Wuppertal (BUW)
Prof. Dr. Hans J. Lietzmann, Mark Schwalm, Johannes Jacquemain

Wupperverband (WV)
Dr. Torsten Frank

Aggerverband (AV)
Dieter Wonka

WAG Wassergewinnungs- und -aufbereitungsgesellschaft Nordeifel mbH (WAG)
Walter Dautzenberg

enwor – energie & wasser vor ort GmbH (enwor)
Stephan Hunze

RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH (RWW)
Dr. Michael Plath, Dr. Martin Launer

SYDRO Consult
Dr. Hubert Lohr, Dr.-Ing. Michael Bach

Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH (RZVN)
Dr. Piet Hensel, Dr.-Ing. Dirk König, Vincent Layec

Partner im Unterauftrag:

Ruhrverband (RV)
Prof. Dr.-Ing. Thomas Grünebaum, Inga Hölscher

Wasserversorgungsverband Rhein-Wupper (WVV)
Günter Wasserfuhr

Becker Büttner Held (BBH)
Daniel Schiebold, Jana Siebeck

Bearbeitungszeitraum: April 2014 bis März 2017

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

Danksagung / Vorwort

Energiepotenziale in komplexen Wasserversorgungssystemen zu identifizieren und zu nutzen war die Hauptaufgabe von ENERWA, um den aktuellen Anforderungen nach mehr Energieeffizienz zu genügen und Kosten zu verringern. Mit den Untersuchungen wurde die Grundlage dafür erarbeitet, dass mit wasserwirtschaftlichen Anlagen erneuerbare Energiequellen mehr als bisher genutzt werden können. Außerdem wurde ein Systemverständnis für energetische Anpassungs- und optimierungsmaßnahmen erarbeitet, mit dem Anlagenbetreiber auf aktuelle und zukünftige Anforderungen besser vorbereitet sind.

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des interdisziplinären Projektverbunds ENERWA. Unser besonderer Dank geht an die Beiratsmitglieder für die fachliche Projektbegleitung: Herrn Prof. Scheuer (Vorsitzender der ATT Arbeitsgemeinschaft Trinkwasser-Talsperren e.V.), Herrn Weiß (Bodensee-Wasserversorgung), Herrn Rienmüller (VAG-Armaturen GmbH), Herrn Dr. Schwarz (WILO SE) und Herrn Prof. Lieback (GUT-CERT GmbH).

Vom 2. bis 5. November 2015 haben sich insgesamt 52 BürgerInnen aus den Städten Burscheid, Hückeswagen und Wermelskirchen an dem Bürgerbeteiligungsverfahren „Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen“ beteiligt. Sie wurden für die Zeit der Durchführung vom Arbeitgeber freigestellt oder verwendeten ihren regulären Urlaub bzw. Überstunden für die Teilnahme. Für das große Engagement und den Beitrag zur Erstellung des Bürgergutachtens gilt unser herzlicher Dank. Weiterhin danken wir den externen Referenten, Politkern und Verantwortlichen aus dem Bereich der Wasserwirtschaft für die Bereitstellung von Wissen und Informationen.

Die dargestellten Ergebnisse wurden im BMBF-geförderten Verbundvorhaben ENERWA im Rahmen der Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft - ERWAS“ erarbeitet. Für die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschung für Nachhaltigkeit (FoNa) im Förderschwerpunkt Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM) bedanken sich die Autoren im Namen des gesamten Projektkonsortiums. Die gute Betreuung durch den Projektträger Karlsruhe, namentlich die konstruktive und engagierte Begleitung durch Frau Bernhardt und Frau Kenner seien besonders herausgestellt.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung 1

I.1 Aufgabenstellung 1

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4

I.4 Stand von Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde 6

I.4.1 Energieeffizienz bei der Bewirtschaftung von Talsperren und Gewässern 6

I.4.2 Energieeffizienz im System Trinkwasseraufbereitung 8

I.4.3 Energieeffizienz im System Trinkwassertransport, -speicherung und -verteilung 9

I.4.4 Energiemanagement in Verbundsystemen 10

I.4.5 Ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen 11

I.4.6 Webdienste im Bereich Energieeffizienz 14

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 14

II. Eingehende Darstellung des Projektes 17

II.1 Ermittlung von Grundlagen und Rahmenbedingungen: Ressourcen, Technik, TW-Verbrauch, Energie - AP A.1 17

II.1.1 Ermittlung des Daten- und Methodenbedarfs für das Projekt 17

II.1.2 Beschreibung der untersuchten Versorgungsgebiete 19
II.1.2.1 Modellregion Eifel-Aachen 19
II.1.2.2 Modellregion Bergisches Land 20
II.1.2.3 Modellregion Ruhr 20
II.1.2.4 Modellregion Rheinisch bergischer Kreis 21

II.2 Ermittlung von Grundlagen und Rahmenbedingungen: Ökonomie, Recht Gesellschaft - AP A.2 23

II.2.1 Ökonomische Rahmenbedingungen 23
II.2.1.1 Wasserwirtschaftliche Optimierungsvarianten 23
II.2.1.2 Energiepreisszenarien 28

II.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen 39
II.2.2.1 Einführung 39
II.2.2.2 Talsperrenbetrieb und öffentliches Wasserrecht 40
II.2.2.3 Wasserversorgung und Wasserversorgungsrecht 41
II.2.2.4 Energierecht 44
II.2.2.5 Zusammenfassung der rechtlichen Rahmenbedingungen 51

II.2.3 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen 51
II.2.3.1 Literaturrecherche und Datenbankanalyse 53
II.2.3.2 Das Verfahren der Bürgerbeteiligung 55
II.2.3.3 Ablauf des Verfahrens 56
II.2.3.4 Die Software Politon als Hilfsmittel für Bürgerbeteiligungsverfahren 60
II.2.3.5 Ergebnisse der Bürgerbeteiligung 61

II.3 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer - AP B1 64

II.3.1 Wirkungen einer energieoptimierten dynamisierten Talsperrenbewirtschaftung auf die Wasserqualität im Staukörper 64

II.3.1.1 Untersuchungen des Zustands im Staukörper 64
II.3.1.2 Temperaturbedingtes Schichtungsverhalten im Staukörper 68
II.3.1.3 Nährstoff- und Trübungskonzentration im Staukörper 76
II.3.1.4 Sauerstoffsättigung im Staukörper 82

II.3.2 Wirkungen auf abiotische und biotische Ökosystemelemente im Unterlauf 86
II.3.2.1 Abflussdynamik 87
II.3.2.2 Temperaturregime 88
II.3.2.3 Geschiebe und Sedimente 89
II.3.2.4 Makrozoobenthos 90
II.3.2.5 Fische 92

II.3.3 Energiewirtschaftliche Bewertung einer Dynamisierung 94
II.3.3.1 Untersuchung der Talsperre Wiehl 95
II.3.3.2 Untersuchung der Talsperre Große-Dhünn 100

II.3.4 Empfehlungen zum Ausbaupotenzial 104

II.4 Energieeffizienz bei der Trinkwasseraufbereitung - AP B2 107

II.4.1 Wesentliche Erkenntnisse aus einer Literaturrecherche 107

II.4.2 Beschreibung der Untersuchungen 109
II.4.2.1 Datenermittlung in Wasserwerken 110
II.4.2.2 Pilotanlagenuntersuchungen 111
II.4.2.3 Konzept zur Berechnung des Energiebedarfs und der Energiekosten für verschiedene Betriebsweisen 114

II.4.3 Dynamisierung von Trinkwasseraufbereitungsanlagen 114
II.4.3.1 Einzuhaltende Rahmenbedingungen in der Wasseraufbereitung 114
II.4.3.2 Realisierbarkeit der Dynamisierung 115
II.4.3.3 Einfluss der Dynamisierung auf die Wasserqualität 115
II.4.3.4 Einfluss der Dynamisierung auf Energiebedarf und -kosten 117

II.4.4 Energetische Aspekte pro Verfahrensstufe 124
II.4.4.1 Ozonung 124
II.4.4.2 UV-Desinfektion 125
II.4.4.3 Membranfiltration 126
II.4.4.4 Tiefenfiltration 127
II.4.4.5 Gebäudetechnik 129

II.4.5 Optimierungskonzepte und -möglichkeiten 131
II.4.5.1 Chemikaliendosierung - Kalkwasserbereitung 131
II.4.5.2 Vermeidung von Druckverlusten und unnötigen Förderhöhen 132
II.4.5.3 Potenzial an Energierückgewinnung durch Energieüberschuss in Talsperren-Wasserwerken 134
II.4.5.4 Spülen von Oberflächen- und Tiefenfiltern 136
II.4.5.5 Spülwasseraufbereitung 136
II.4.5.6 Gaseintrag 137

II.4.6 Carbon-Footprint 138

II.4.7 Untersuchungen im Grundwasserwerk Dorsten-Holsterhausen 139

II.4.8 Zusammenfassung Energieeffizienz in der Wasseraufbereitung 141

II.5 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung - AP B3 143

II.5.1 Methodik 143
II.5.1.1 Einführung 143

II.5.1.2 Systematik der Druckzonenklassifizierung....144
II.5.1.3 Senkung der Drucküberschüsse durch Bildung von Hochzonen....147
II.5.1.4 Energierückgewinnung durch Bildung von Tiefzonen....152
II.5.1.5 Zeitliche Optimierung der Fahrweise von Pumpen und Behälter....154
II.5.1.6 Zusammenfassung....161

II.5.2 Identifikation von Optimierungspotenzialen an realitätsnahen Netzmodellen der Praxispartner....161
II.5.2.1 Einführung....161
II.5.2.2 Beschreibung der untersuchten Netze....162
II.5.2.3 Übersicht der durchgeführten Anwendungen....166
II.5.2.4 Energieeinsparpotenzial durch Bildung zusätzlicher Hochzonen....167
II.5.2.5 Bildung von Tiefzonen....181
II.5.2.6 Zeitliche Optimierung der Fahrweise von Pumpen und Behälter....183
II.5.2.7 Zusammenfassung der Einsparpotenziale....192
II.5.2.8 Hochrechnung auf die Trinkwasserverteilung der BRD....193

II.6 Weiterführende Untersuchungen in einem kleinen, geschlossenen Wasserversorgungsgebiet....201

II.6.1 Beschreibung des Wasserversorgungsgebietes....201

II.6.2 Energieanalyse in den Wasserwerken....201

II.6.3 Dynamisierung des Anlagenbetriebes....204

II.7 Energiemanagement im Verbund - AP C....211

II.7.1 Beschreibung der Untersuchungen....211
II.7.1.1 Identifikation von Abhängigkeiten und Schnittstellen zwischen den Teilsystemen 211
II.7.1.2 Ausschlusskriterien....217
II.7.1.3 Verbundsimulation und Übertragbarkeit....218

II.7.2 Ergebnisse....227
II.7.2.1 Wechselwirkungen im Verbund....227
II.7.2.2 Sensitivität der Maßnahmen in den Teilsystemen auf den Verbund....231
II.7.2.3 Wirkung der Verbrauchsmuster und Möglichkeiten zur energieeffizienten Anpassung....231
II.7.2.4 Energetisches Gesamtpotenzial und Übertragbarkeit....232

II.8 Web-Dienste „Energieeffizienz“ - AP D....234

II.8.1 Einführung und Ziele....234

II.8.2 Technische Realisierung....234

II.8.3 Ergebnisse....235
II.8.3.1 Energetische Optimierung des Talsperrenbetriebs....235
II.8.3.2 Ratgeber zur energieeffizienten Wasseraufbereitung....237
II.8.3.3 Dynamisierter Betrieb des Wasserwerkes....240
II.8.3.4 Energetische Optimierung der Wasserverteilung....245

II.9 Ergebnis-Synthese, Ergebnis-Transfer - AP E....253

II.9.1 Nutzungspotenzialanalysen Energieeffizienz....253
II.9.1.1 Software „Politon“ für Bürgerbeteiligungsverfahren....253
II.9.1.2 Identifikation Dynamisierungspotenziale an Talsperrenauslässen....254
II.9.1.3 Einsatzoptimierung von Talsperren-Turbinen....254
II.9.1.4 Druckzonenoptimierung....255

II.9.2 Geschäftsmodell für das ENERWA-Web-Portal....255

II.9.3 Informationsprodukte und Verbreitung der Ergebnisse 263
II.9.3.1 Leitfaden „Energieeffiziente Wasserwirtschaft“ 263
II.9.3.2 Curricula Material 265
II.9.3.3 Rückkopplung der ENERWA-Ergebnisse mit Fachpublikum....265
II.10 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse....268
II.10.1 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer 268
II.10.2 Energieeffizienz in der Trinkwasseraufbereitung 269
II.10.3 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung ..269
II.10.4 Energiemanagement im Verbund 270
II.10.5 Web-Dienste „Energieeffizienz“ 270
II.10.6 Bürgerbeteiligungsverfahren....270
II.11 Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen....272
II.11.1 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer 272
II.11.2 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung ..272
II.11.3 Ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen....273
II.12 Publikationen....275
III. Literatur....279
IV. Anhang....286
IV.1 Bürgerbeteiligung....286
IV.2 Carbon Footprint in der Wasseraufbereitung....291
IV.3 Strukturmerkmale der untersuchten Wasserverteilungsnetze....293
V. Abbildungsverzeichnis 296
VI. Tabellenverzeichnis 302

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das Forschungsprojekt „ENERWA“ hat im Rahmen der BMBF-Förderbekanntmachung „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft“ die energetischen Potenziale des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems, bestehend aus Talsperren/Fließgewässern, Trinkwasseraufbereitung, Transport-Speicherung-Verteilung, eingehend untersucht. Folgende Ziele wurden dabei verfolgt:

Ziel 1 Systematische Erschließung von energetischen Optimierungspotenzialen und Umsetzung auf allen Ebenen (Komponenten, Teilsysteme, Struktur, Verbund)

Ziel 2 Untersuchung ökologischer, gesellschaftlicher, rechtlicher und ökonomischer Grenzen bei der Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen und Erarbeitung von Lösungen zum Barrieren-Abbau

Ziel 3 Verallgemeinerung und Aufbereitung der erarbeiteten Ergebnisse, so dass sie einem breiten Anwenderkreis auf vielfältigen Wegen zugänglich sind.

Bei den Analysen wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden eingesetzt: Aufarbeitung der technischen-rechtlichen-ökonomischen Ausgangsbedingungen, Technikanalysen mit Messprogrammen und Pilotanlagenuntersuchungen, modellgestützte Simulationsrechnungen, ökologische Feldstudien an Talsperren, moderierte Akzeptanzstudien der betroffenen Nutzer, ökonomische Optimierungsmodelle.

Das Vorhaben verfolgte neue Ansätze zur Erschließung energetischer Potenziale in Wasserversorgungssystemen sowohl auf der Ebene technischer Komponenten als auch bei der Steuerung der Teilsysteme im Verbund. Talsperren als Trinkwasserressourcen, Wasseraufbereitungsanlagen in den Wasserwerken und die Trinkwasserverteilungsnetze mit ihren Komponenten Rohrleitungen, Druckerhöhungsanlagen sowie Wasserspeicher bergen bisher noch ungenutzte Potenziale zur Energieeinsparung, -rückgewinnung und -speicherung, die im Rahmen der Untersuchungen identifiziert und bewertet werden sollten.

Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Dynamisierung des Betriebes einzelner Anlagen vor dem Hintergrund schwankender Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie und variabler Energiepreise. Weiterhin wurden Steuerungskonzepte zur energieeffizienten Wasserverteilung erarbeitet. Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Können Trinkwassertalsperren sowie Wassertransport- und Speichersysteme zur Gewinnung und temporären Speicherung von Energie genutzt werden?
- Wo sind die Grenzen und welche Barrieren müssen ggf. wie überwunden werden?

Eine Dynamisierung der Wasserentnahme aus Talsperren wurde vor dem Hintergrund untersucht, diese z.B. durch Turbinierung energetisch möglichst maximal auszunutzen. Dabei müssen wasserwirtschaftliche, qualitätsbezogene und technische Restriktionen berücksichtigt werden, wie z.B. die minimale und maximale Wasserabgabe an den Unterlauf bzw. an die Trinkwasseraufbereitung, aber auch die erzielbaren Erlöse aus dem Verkauf von Strom.

Lösungen werden vor dem Hintergrund ökologischer, gesellschaftlicher (Verbrauchsverhalten der Trinkwasserkunden, Akzeptanz), energierechtlicher und ökonomischer Randbedingungen bewertet. Der Projektansatz legt Wert auf Übertragbarkeit, Verbreitung und weitere Nutzung der Ergebnisse. Deshalb werden standardisierte Energieeffizienz-Fragen herausgearbeitet, die einem interessierten Nutzerkreis die Anwendung der entwickelten Analysemethoden und implementierten Lösungsalgorithmen über einen Web-Dienst ermöglichen. ENERWA leistet wichtige Beiträge zur Verbreitung und Akzeptanzsteigerung von Energieeffizienz-Lösungen: Ergebnisse werden zur wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Verbreitung und Verwertung in einem Leitfaden zur energieeffizienten und ressourcenschonenden Wasserversorgung aufbereitet sowie zugleich bezüglich ihrer sozialen und politischen Akzeptanz analysiert. Eine Effizienzsteigerungs- und Vermarktungsstudie untersucht nationale und internationale Marktperspektiven für den Politik- und Wirtschaftsdialog der deutschen Wasserwirtschaft.

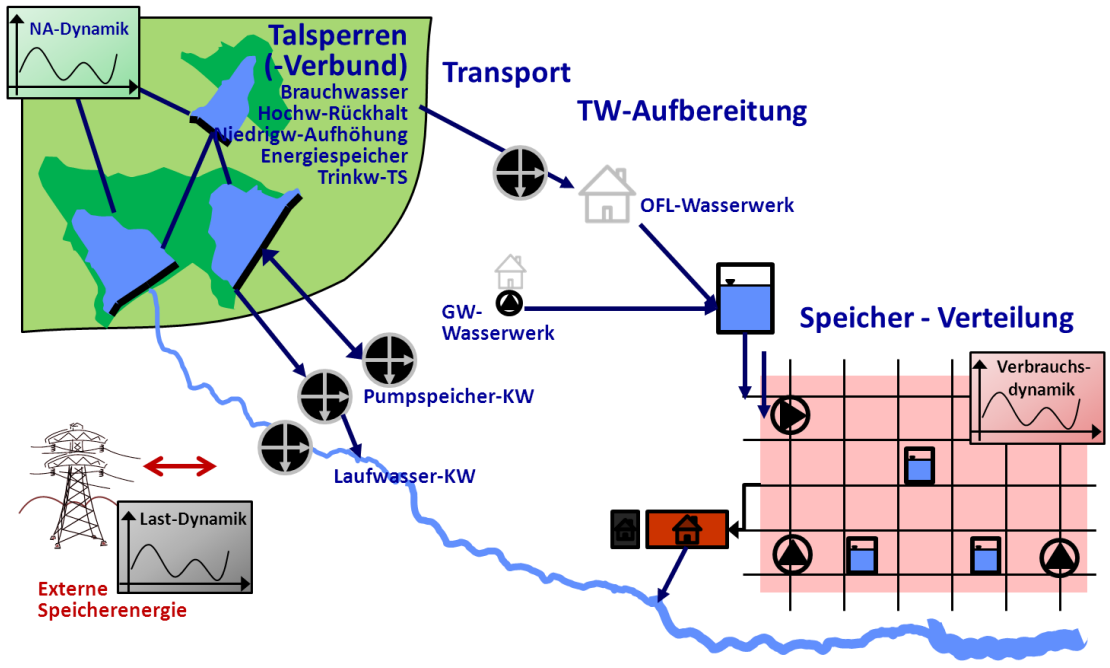


Abbildung 1: ENERWA-Forschungsansatz: Energiepotenziale in der Prozesskette der Wasserversorgung unter Berücksichtigung dynamischer Randbedingungen

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Wasserversorgungsysteme sind komplexe Prozessketten mit Anlagen und Komponenten der Wassergewinnung, -aufbereitung, Speicherung und Verteilung, die vorrangig zur einwandfreien und sicheren Bereitstellung von Trinkwasser konzipiert und betrieben werden. Sie sind für einen langjährigen Betrieb über mehrere Jahrzehnte hinweg ausgelegt und müssen deshalb regelmäßig optimiert und systematisch an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden, um einerseits Kosten zu sparen und andererseits neuen Anforderungen zu genügen. Aktuell stehen Wasserversorger vor der Herausforderung, Energiepotenziale zu identifizieren und zu nutzen, nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen, sondern auch vor dem Hintergrund politischer Forderungen nach mehr Energieeffizienz und neuen Möglichkeiten der Energieerzeugung und –speicherung. Es wird ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial in diesem Bereich erwartet.

Aufgrund des breiten Aufgabenspektrums verfolgte ENERWA einen interdisziplinären Ansatz mit technischen, ökologischen, ökonomischen, rechtlichen und sozialwissenschaftlichen Arbeitsgruppen (Unternehmen und Abkürzungen s. erste Seite). Die Praxispartner bilden unternehmensübergreifend Prozessketten der Wasserversorgung in vier Beispielregionen ab, die nach ihrem energiewirtschaftlichen Potenzial und ihrer Repräsentativität hinsichtlich typischer Versorgungssysteme in Deutschland ausgewählt wurden: Gewinnung und Aufbereitung von Oberflächenwasser bzw. Grundwasser, Transport- und Endverteilungsnetze im Mittelgebirge bzw. Flachland. Der Zugang zu relevanten Daten und zum Betreiberwissen wasserwirtschaftlicher Anlagen war somit gegeben. Die beteiligten Ingenieurunternehmen ergänzten sich in ihren Arbeitsschwerpunkten und hinsichtlich eingesetzter Software-Produkte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

ENERWA wurde von IWW koordiniert. Das Arbeitsprogramm gliederte sich in acht Arbeitspakete (AP) A bis E (s. Abbildung 2), deren inhaltliche Führung und Verantwortung jeweils bei einem als AP-Leiter benannten Projektpartner lag. Eine Abstimmung AP übergreifend fand regelmäßig in Telefonkonferenzen und halbjährlich in Workshops mit allen Beteiligten statt.

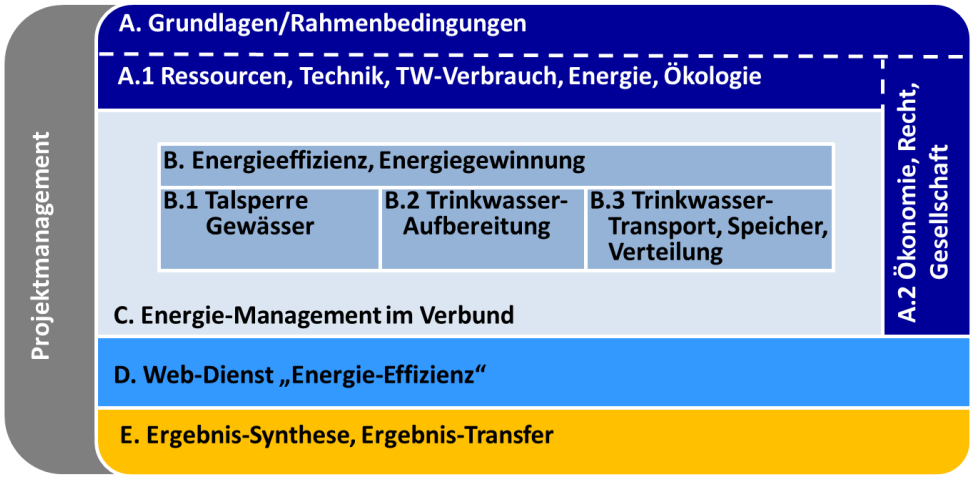


Abbildung 2: ENERWA-Projektstruktur mit den Arbeitspaketen A-E

AP A diente der Analyse von Grundlagen und Rahmenbedingungen für die Untersuchungen und energetische Maßnahmen.

AP A.1 hatte zum Ziel, den Daten- und Methodenbedarf für ENERWA zu ermitteln, zu vereinheitlichen und für die nachfolgenden AP verfügbar zu machen. In Systembeschreibungen auf der Ebene der vier ENERWA-Beispielregionen wurden alle Anlagen und Standorte sowie die Wechselwirkungen der einzelnen Teilsysteme und Komponenten beschrieben.

In AP A.2 wurden die Grundlagen dafür geschaffen, dass Maßnahmen zur Hebung energetischer Potenziale im Hinblick auf ökologische, gesellschaftliche, rechtliche und ökonomische Auswirkungen bewertet werden können. In Form wasserwirtschaftlicher Szenarien erfolgte die Beschreibung von Basisdaten (z.B. Strompreisszenarien), einzuhaltenden Nebenbedingungen (wasser- und energierechtliche sowie ökologische Einschränkungen) sowie den Zielgrößen der Optimierung (Kosten, Ökologie, Wasserverbrauch). Im Kontext des heute komplexen Kommunikationsbedarfs wurden parallel zu den technischen AP Empfehlungen und ein Verfahren für eine Beteiligung von Bürgern und Stakeholdern erarbeitet. Die Analyse des rechtlichen Rahmens für energiewirtschaftliche Maßnahmen an wasserwirtschaftlichen Anlagen gehörte ebenfalls zu den Aufgaben des AP A.2. Ziel dabei war, den Projektpartnern die Struktur

der zu beachtenden rechtlichen Vorgaben nahe zu bringen, damit sie bei entsprechenden Maßnahmen beachtet werden und ggf. Vorschläge für Anpassungen erarbeitet werden können.

In den B-AP wurden die Untersuchungen in den Teilsystemen entlang der Prozesskette der Wasserversorgung und den dazugehörigen Gewässern durchgeführt. Diese erfolgten zu einem großen Teil an den Anlagen der Praxispartner.

AP B.1 widmete sich den Untersuchungen in Talsperren, die der Rohwassergewinnung dienen, und Gewässern im Unterlauf mit dem Ziel, deren theoretisch vorhandenes Energiepotenzial zu ermitteln. Für Trinkwassertalsperren sollte eine Dynamisierung für eine bedarfsgerechte Turbinierung bewertet werden. Im Rahmen von Fallstudien wurden dabei die Auswirkungen einer veränderten Speicherbewirtschaftung auf den Wasserkörper mit Blick auf die Rohwasserqualität und auf die Ökologie im Unterlauf analysiert. Regionale Empfehlungen werden gegeben.

In AP B.2 wurden Aufbereitungs- und Nebenanlagen in Wasserwerken hinsichtlich ihres energetischen Einsparpotenzials systematisch analysiert. Zusammen mit den Ergebnissen zu ökonomischen Fragestellungen und unter Berücksichtigung möglicher Veränderungen der Rohwasserbeschaffenheit als Folge einer Nutzungsänderung und Dynamisierung wurden Optimierungskonzepte erarbeitet und teilweise in den Wasserwerksanlagen, teilweise in Pilotanlagen erprobt. Die Untersuchungen in AP B.2 verteilten sich auf insgesamt 5 Wasserwerke der Praxispartner.

Der Fokus von AP B.3 lag auf der Energieeffizienz von Transport, Speicherung und Verteilung von Trinkwasser. Es wurde ein dynamischer Algorithmus zur Optimierung von Trinkwassernetzen, Druckzonen und Behältern entwickelt und in Modellnetzen angewandt. Auf Basis der Ergebnisse und der Häufigkeit unterschiedlicher Netzstrukturen wurde eine Hochrechnung des Energieeinsparpotenzials auf die gesamte Trinkwasserverteilung der BRD angestrebt.

Gegenstand von AP C war die Zusammenführung aller Ergebnisse in einem Bewirtschaftungskonzept für das wasserwirtschaftliche Gesamtsystem. Gegenseitige Abhängigkeiten und Wirkungen von Maßnahmen in den einzelnen Teilsystemen (AP B.1, B.2, B.3) sollten aufgezeigt und bewertet werden.

Mit den AP D und E leistet ENERWA wichtige Beiträge zur Verallgemeinerung und Aufbereitung der Ergebnisse, so dass sie einem breiten Anwenderkreis auf vielfältigen Wegen zugänglich sind. In AP D wurden wasserwirtschaftliche Energieeffizienz-Fragen für sogenannte Web-Tools aufbereitet, um Anregungen zur energetischen Optimierung von Anlagensystemen zu geben. AP E diente der Zusammenführung der Ergebnisse zu Informationsprodukten, wie einem Leitfaden und einem Wiki für die Fachöffentlichkeit. Parallel wurden die Ergebnisse im

Hinblick auf Marktrelevanz und Umsetzungspotenziale geprüft sowie bei fachlichen und politischen Entscheidungsträgern rückgekoppelt.

I.4 Stand von Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

I.4.1 Energieeffizienz bei der Bewirtschaftung von Talsperren und Gewässern

Räumliche und zeitliche Potenziale für eine Dynamisierung von wasser- und energiewirtschaftlichen Maßnahmen sind nicht ausgeschöpft, obwohl sie ein hohes Maß an Energieeinsparmöglichkeiten bieten. Dies wird bedingt durch ein ausgeprägtes Sicherheitsdenken bei der kommunalen Daseinsvorsorge und ein starres Gerüst an gesetzlichen Vorgaben. Aus vertiefter Kenntnis der Zusammenhänge lassen sich Freiräume für den Hochwasserschutz im Talsperrenbetrieb für dynamisierte Wasserabgaben ableiten (Wupperverband, 2008). Die zentrale Frage lautet: Ist die effiziente, energetische Nutzung des Wasserpotenzials unter Berücksichtigung der Randbedingungen aus Ökologie und Hochwasserschutz und ohne Gefährdung bestehender Trinkwasserqualität möglich? Mit Kenntnissen über Einspeisung aus erneuerbaren Energien und Marktpreisen für elektrische Energie (Mirbach, 2009) lässt sich die Erzeugung von elektrischer Energie an Märkten für Fahrplanenergie und Reserve optimieren (Kasper, 2011). In Abhängigkeit des Verschiebungspotenzials der Nachfrage (Demand-Side-Management) (Schäfer, 2011) können dafür Zeiträume genutzt werden, in denen die Einspeisung aus erneuerbaren Energien hoch oder die Preise an der Strombörse niedrig sind und vice versa. Dieses bietet der dynamisierten Talsperrenbewirtschaftung Marktpotenziale.

Trink- und Brauchwassertalsperren sind gemäß ihrer Definition ganz der Nutzung der Wasserversorgung gewidmet und werden entsprechend betrieben. Dazu gehört, dass eine sehr hohe Sicherheit für die Wasserverfügbarkeit (≥ 99 %, d.h. maximal in einem Jahr von 100 Jahren darf die theoretisch erlaubte Wasserentnahme eingeschränkt sein) gefordert wird. Als konkurrierende Nutzung tritt der Hochwasserschutz auf, der i.d.R. durch im Laufe eines Jahres unterschiedlich große Schutzräume festgelegt wird. Zusätzlich sind die ökologische Funktion des Talsperrenwasserkörpers sowie des Fließgewässersystems zumindest zu beachten. Diese Randbedingungen bzw. Vorgaben sind statisch, d.h. sie sind unabhängig von den tatsächlichen aktuellen Abflusszuständen, Wasserverbräuchen und – entnahmen festgelegt. Der einzige steuerbare Zustand ist der Speicherinhalt bzw. die Abgabe in den Unterlauf, welche den

Stauspiegel des Staukörpers und den Wasserstand im Unterlauf der Talsperre reguliert. Die Änderung der Abgaben, welche durch ein Über- oder ein Unterschreiten von definierten Speicherinhalten festgelegt und dokumentiert wird, ist häufiger möglich, als es zurzeit aus Gründen der Betriebssicherheit und zur Gewährung der Vorsorge praktiziert wird. Die Auswirkungen hoher Wasserabgabeschwankungen auf die Rohwasserqualität und die thermische Schichtung des Staukörpers von Trinkwassertalsperren ist hierbei weitestgehend unerforscht.

Die Dynamisierung des Abflussregimes von Talsperren ist mit Veränderungen der abiotischen und biologischen Bedingungen im Staukörper der Talsperre sowie in den Fließgewässern im Unterstrom verbunden. Neben einer Erhöhung des hydraulischen Stresses durch veränderte Abflussspitzen und –zeiten verändern sich Temperatur- und Geschieberegime in den Fließgewässern. Daraus resultieren temporär Veränderungen der Habitatbedingungen im Gewässerbett unterhalb einer Talsperre. Die Veränderungen können den ökologischen Zustand des Gewässers negativ oder positiv beeinflussen. Stärkere Abflussspitzen können zur „Reinigung“ des Gerinnes von Feinsediment beitragen, aber zu ökologisch ungünstigen Zeitpunkten die Reproduktion von Arten beeinträchtigen. Auswirkungen betreffen insbesondere die Kolmation der Flusssohle, sowie kurzfristig auftretenden hydraulischen Stress (Meile et al., 2005). Der wissenschaftliche Kenntnisstand zur Auswirkung einer Abflussdynamisierung bei Talsperren auf Organismengemeinschaften im Staukörper sowie auf unterhalb gelegene Fließgewässerabschnitte ist noch lückenhaft. Umfangreiche Studien existieren zum „Schwall-Sunk-Betrieb“, also zu dem gepulsten Abfluss unterhalb von Wasserkraftanlagen, der mit dem Strombedarf stark schwankt (Meile et al., 2005). Die meisten diesbezüglichen Untersuchungen wurden im Alpenraum vorgenommen; in der Schweiz ist ca. ein Viertel der mittleren bis größeren Fließgewässer von Schwallbetrieb betroffen. Auch für österreichische Gewässer sind die Auswirkungen von Schwallbetrieb auf die aquatischen Biozönosen gut belegt. Die meisten von Schwallbetrieb betroffenen Gewässerabschnitte erreichen keinen „guten ökologischen Zustand“. Der Schwallbetrieb an alpinen Wasserkraftanlagen ist jedoch nur bedingt mit der Situation im Mittelgebirgsraum vergleichbar. Aus dem deutschsprachigen Raum liegen nur wenige Studien vor, die sich mit der Abflussdynamisierung und möglichen ökologischen Auswirkungen unterhalb von Talsperren im Mittelgebirgsraum befassen. Funke et al. (2009) untersuchten im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes „Integratives Management mehrfach genutzter Trinkwassertalsperren – IntegTa” die Auswirkungen von veränderten Abflussregimen von Talsperren auf das Interstitial unterhalb gelegener Fließgewässer, hier insbesondere auf die Sauerstoffbedingungen in der fließenden Welle und im Gewässerbett. Auf Basis von Makrozoobenthos-Probenahmen in den gemessenen Gewässerabschnitten und einer Bewertung gemäß dem deutschen Standardverfahren (PERLODES; Meier et al. 2006) schlussfolgern die Autoren, dass trotz hydraulischer Überformung keine Auswirkung auf die ökologische Qualität

festzustellen war. Jedoch zeigte sich eine Abnahme des Sauerstoffgehalts in den unteren Sedimentschichten nach länger anhaltenden Mindestwasserabgaben. In dieser Studie bleibt jedoch offen, inwieweit sich eine Veränderung des Temperaturregimes auf die ökologischen Verhältnisse im Unterstrom auswirkt. So werden kaltstenotherme Insekten- und Fischarten, die in den ökologischen Bewertungsverfahren meist positiv eingestuft sind, begünstigt, was gegebenenfalls zu einer Verbesserung des ökologischen Zustandes der entsprechenden Gewässerabschnitte führt. Ein resultierendes Geschiebedefizit im Unterstrom hat zwangsläufig Auswirkungen auf die Habitatdynamik und begünstigt eine Erosion des Gewässerbettes, fördert eine Verschiebung hin zu grobkörnigeren und damit umlagerungsstabileren Substraten. Talsperren gelten als Feinsediment-Senken (Jenzer und De Cesare, 2006), so dass die unterhalb der Talsperre gelegenen Gewässerabschnitte sich oftmals besonders als Laich- und Fortpflanzungshabitat für lachsartige Fische eignen. Bislang fehlt eine Studie, die verschiedene Auswirkungen von Talsperren auf den ökologischen Zustand des unterhalb liegenden Flussabschnittes vergleichend analysiert. Auch dieser Aspekt wird in der Studie von Funke et al. (2009) nicht berücksichtigt, das Prinzip ist jedoch gut dokumentiert (vgl. z.B. Brandt, 2000). Die Auswirkungen des Geschiebedefizits, der Kolmation des Interstitials, der Veränderungen der Wassertemperatur, kurzzeitigen hydraulischen Stresses, ausgeprägte Niedrigwassersituationen und Veränderungen des Chemismus (z.B. durch Phosphatrücklösung im Stauraum sowie von Wasserstandschwankungen auf den ökologischen Zustand / das ökologische Potenzial des Staukörpers sind ebenfalls nur teilweise verstanden.

I.4.2 Energieeffizienz im System Trinkwasseraufbereitung

Die Energiekosten stellen durchschnittlich 16 % der Gesamtkosten für die Wasserversorgung dar (DWA, 2011). Die primären Energieverbraucher sind dabei häufig die Pumpen für Förderung, Druckerhöhung und Filterspülungen mit einem Anteil am gesamten Energieverbrauch der Wasserversorgung von ca. 80 % bis über 90 %, (Boulos und Bros, 2010). Die übrigen Anteile entfallen überwiegend auf die eigentlichen Prozesse der Wasseraufbereitung (v.a. Membrananlagen, Ozonanlagen, Belüftungseinrichtungen, …) sowie auf die Betriebsgebäude inkl. der Klimatechnik.

Aufgrund des großen Anteils der Pumpen am Verbrauch an elektrischer Energie in der Wasseraufbereitung sind die größten Einsparpotenziale in diesem Bereich zu erwarten (16 % bis zu 36 % in Einzelfällen; (Anonymus, 2007)). In den letzten Jahren wurden im Bereich der Pumpen- und Antriebstechnik zahlreiche Innovationen entwickelt und in der Praxis vieler Versorgungsunternehmen umgesetzt (z. B. verstärkter Einsatz von Frequenzumrichtern zur Regelung der Pumpenleistung, Pumpenantriebe mit Permanentmagneten).

In der einschlägigen Literatur, z. B. (DVGW, 2010) oder (SVGW, 2004) sind bereits zahlreiche theoretische Energieeinsparpotenziale für die Wasserversorgung, u. a. die Wasseraufbereitung genannt und teilweise mit Erfahrungswerten dokumentiert.

Die verfahrenstechnische Konzeption einer Wasseraufbereitungsanlage wird von der Rohwasserqualität und den örtlichen Randbedingungen bestimmt. In der Regel nehmen die Aufbereitungskosten mit zunehmender Verschlechterung des Rohwassers zu. Aufgrund der zunehmenden Information über die in den Rohwässern teilweise vorhandenen anthropogenen Spurenstoffe und der immer höheren Anforderungen an die Qualität des Trinkwassers, verbunden mit veränderter Richt- und Grenzwertsetzung, geht die Tendenz hin zu umfangreicheren oder energieintensiveren Aufbereitungsverfahren, wie z. B. Membranverfahren, Aktivkohleadsorption oder Ozonung/Advanced Oxidation Processes (Olsson, 2012). Damit einher gehen höhere Energiebedarfe der Wasseraufbereitung sowie höhere Treibhausgasemissionen (Griffiths-Sattenspiel und Wilson, 2009; Olsson, 2012).

Der Anteil der für die Wasseraufbereitung aufgewendeten Energie am Gesamtenergieverbrauch der Wasserversorgung hängt stark von den regionalen Randbedingungen ab. Dieser wird in der Literatur mit einer Spannweite von 5 – 50 % angegeben (SVGW, 2004). Dabei zeigt der spezifische Energiebedarf der einzelnen Aufbereitungsschritte in Abhängigkeit von den Randbedingungen (Rohwasserqualität, Ausführung der Prozessstufe, Druckverhältnisse innerhalb der Aufbereitung, Betriebsbedingungen, Aufbereitungszielen,…) große Schwankungsbreiten, die in einer Literaturrecherche näher beleuchtet wurden (siehe Kapitel II.4.1).

I.4.3 Energieeffizienz im System Trinkwassertransport, -speicherung und -verteilung

Das Arbeitspaket zur Energieeffizienz im System Trinkwassertransport, -speicherung und -verteilung baut einerseits auf den Erfahrungen in der hydraulischen Modellierung und Simulation des Projektpartners RZVN auf, andererseits auf aktuellen Verfahren zur mathematischen Optimierung sowie graphentheoretischen Ansätzen.

Im Bereich der exakten mathematischen Optimierung großer Systeme mit diskreten (binären bzw. ganzzahligen) Variablen hat sich überwiegend die Gemischt-Ganzzahlige Lineare Optimierung (GGLP; bzw. engl. Mixed-Integer Programming MIP) durchgesetzt, welche als Lösungsverfahren für die Dynamisierung der Pumpenfahrweise verwendet wird. GGLP-Verfahren sind z. B. in Kallrath (2013) beschrieben.

Im Bereich der graphentheoretischen Ansätze für die Druckzonenoptimierung kommen unter anderem Algorithmen zur Bestimmung kürzester Pfade zum Einsatz (vgl. z.B. Dijkstra 1959), welche nachweisbar effizient sind.

Aus praktischer Sicht kann nur sehr begrenzt auf bisherige Arbeiten zurückgegriffen werden, da in ENERWA zum einen erstmals das Verbundsystem betrachtet wurde und zum anderen die Anwendbarkeit der Verfahren auf große Systeme im Vordergrund stand. Bisherige Ansätze zur Netzplanung oder Betriebsoptimierung (vgl. z.B. Keedwell und Khu 2005; Farmani et al. 2004; Bragalli et al. 2006) haben sich in der Regel nur auf kleine Modellnetze beschränkt und sind daher nicht übertragbar auf große reale Systeme.

Darüber hinaus wurde das aktuelle DVGW-Regelwerk direkt oder indirekt berücksichtigt, u.a. die Arbeitsblätter W300-1 (A), W400-1 (A) und W400-3.

I.4.4 Energiemanagement in Verbundsystemen

Energiemanagement ist Thema in verschiedenen Bereichen der Wasserwirtschaft, wovon sich der überwiegende Teil auf die Optimierung, d.h. die Minimierung des Energieverbrauchs für bestimmte Anlagen konzentriert. Die meisten Untersuchungen beziehen sich auf den Abwassersektor, im Speziellen die Energieeffizienz von Abwasserreinigungsanlagen. Betrachtet man eine Kläranlage als integrales System verschiedener Aggregate, so handelt es sich bereits bei dieser Fragestellung um ein Energiemanagement im Verbund. Im Sinne von ENERWA unterliegt ein Verbundsystem jedoch einer anderen Definition: Ein System wird als eine wasserwirtschaftliche Einheit verstanden, die in sich abgeschlossen funktionsfähig ist und die an ein solches System gestellten Anforderungen bereits vollständig erfüllt. In Bezug auf eine Kläranlage wäre die Gesamtanlage ein solches System, nicht aber ein einzelnes Belebungsbecken oder ein Rechen, die jeweils Teilaufgaben erfüllen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ENERWA ergeben sich nach obenstehender Definition drei Systeme: Talsperre, Aufbereitung, Versorgungsnetz. Alle drei Systeme erfüllen bereits für sich eine vollständige Lösung für wasserwirtschaftliche Aufgaben. Die Talsperre leistet Speicherung und Versorgung, die Aufbereitung sorgt für die Bereitstellung der geforderten Wasserqualität, das Verteilungsnetz verteilt die Menge an die Verbraucher. Die Verbundwirkung besteht darin, dass diese Systeme interagieren, indem Wasser von der Talsperre durch die Aufbereitung zum Versorgungsnetz geleitet wird. Durch Änderungen in der Quantität oder Qualität sowie der zeitlichen Muster der Bereitstellung beeinflussen sich die Systeme gegenseitig.

In Bezug auf energetische Optimierung stand bislang fast ausschließlich die Betrachtung einzelner Systeme im Vordergrund. Jedes System (Talsperre, Aufbereitung, Verteilung) wurde

bereits mehr oder weniger intensiv im Hinblick auf energetische Optimierung untersucht (Mueller, 2008). Trinkwassertalsperren spielten dabei eine untergeordnete Rolle, da die Energiegewinnung nach der Wasserversorgung und dem Hochwasserschutz häufig lediglich als nachrangige Nutzung existiert. Bei der Aufbereitung lag der Fokus mehr auf der Optimierung von Einzelaggregaten sowie deren Betrieb. Für Verteilungsnetze gibt es Untersuchungen zur Optimierung. Dabei war weniger der laufende Betrieb in einem bestehenden Netz der Schwerpunkt, sondern vielmehr die kostenoptimierte Planung eines Netzes. Zunehmend ist die Druckoptimierung und Vermeidung von Wasserverlusten auch Gegenstand von Betrachtungen, was bereits in die Praxis eingeflossen ist (VAG, 2010). Eine gemeinsame Verbundbetrachtung aller drei Systeme Talsperre – Aufbereitung – Verteilung mit Analyse und Sensitivität der Wechselwirkungen ist hinsichtlich einer energetischen Optimierung neu. Forschungsaktivitäten im Teilsystem Talsperre mit der Beschränkung auf Hydrodynamik und Ökologie des Staukörpers als Instrument der Talsperrenbewirtschaftung sind durch Benndorf (2003) entstanden. Bei Uhl (2010) ist die Erweiterung gegenüber Benndorf (2003) durch die Ausweitung auf die Wirkung des Talsperrenbetriebs auf die Aufbereitung zu nennen. Eine energetische Betrachtung war allerdings nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Eine energetische Optimierung der vollständigen Kette aus Talsperre, Aufbereitung und Verteilung wurde bislang nicht betrachtet.

I.4.5 Ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Ökonomische Rahmenbedingungen

Mit durchschnittlich 16,6 % entfällt ein wesentlicher Anteil der Gesamtkosten repräsentativer Wasserversorgungsunternehmen auf die Position Fremdbezug Energie (BDEW, 2011). Im Rahmen eines adäquaten Energiemanagements ist es jedoch möglich, den Energieeinsatz auf allen Stufen der Wertschöpfungskette von der Wasserförderung, -aufbereitung bis hin zum Wassertransport und -verteilung im Gesamtsystem zu optimieren. Der ökonomische Nutzen ist insbesondere im Hinblick auf den zu erwartenden Preisanstieg für Energie begründet (Reimers und Riebock, 2012). Vor allem Versorgungsunternehmen, deren Prozesse aufgrund ihrer naturräumlichen Gegebenheiten sehr energieintensiv sind, beschäftigen sich bereits eingehend mit der Nutzung regenerativer Energien sowie der Umsetzung eines Energiemanagements (Lehmann et al., 2010; Staib und Stüble, 2010). Zur Beurteilung alternativer Energieeffizienzmaßnahmen werden zumeist Methoden des Nachhaltigkeitscontrollings, Energieanalysen, aber auch die Kosten-Nutzen- oder Kosten-Wirkungs-Analysen eingesetzt (Gleich et al., 2012; Mitsdoerffer und Thöle, 2010; Hanusch et al., 2011).

Die veränderten Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft (erhöhte Preisvolatilität, energiepolitischer Strukturwandel) stellen Unternehmen vor große Unsicherheiten bei der Investitionsplanung von Erzeugungskapazitäten. Im Zuge der strategischen Unternehmensausrichtung und der Bewertung zukünftiger Kraftwerksprojekte, insbesondere hinsichtlich deren Fähigkeit, flexibel auf volatile Einspeisungen reagieren zu können, ist eine sachgerechte Simulation von zukünftigen Marktpreisen für elektrische Energie mittels geeigneter Modelle unabdingbar. Dabei gilt es, zwei wesentliche Komponenten des heutigen Marktdesigns zu differenzieren: Am Großhandelsmarkt wird elektrische Energie gehandelt, wobei die Preisbildung gemäß ökonomischer Theorie dabei auf Grenzkostenbasis, d.h. hauptsächlich den Brennstoff- und CO_2-Zertifikatskosten erfolgt (Mirbach, 2009). Der Markt ist zu unterteilen in den langfristigen Terminhandel, den täglichen Day-Ahead- sowie den untertäglichen Intraday-Markt. Die Märkte für Reserveleistung dienen den Übertragungsnetzbetreibern, Kraftwerke für die Bereitstellung von drei verschiedenen Reservequalitäten zu kontrahieren. Aufgrund unterschiedlicher technischer Präqualifikationsbedingungen gibt es je nach Qualität nur eine begrenzte Anzahl an Anbietern bzw. teilnehmenden Anlagen. Im Gegensatz zum Energiehandel werden hierbei sowohl die Vorhaltung von Reserveleistung als auch die Erbringung von Reservearbeit getrennt vergütet. Die Abbildung von Preisbildungsmechanismen an Reservemärkten ist bereits Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben, weshalb sich die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes vornehmlich auf den Großhandelsmarkt fokussieren.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems steht vor einem komplexen und dynamischen rechtlichen Hintergrund. Hieran hat sich auch während der Projektlaufzeit nichts geändert. Die bestehenden Regelungen wurden von unterschiedlichen Institutionen (EU, Bund, Länder) zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Zielsetzungen (z. B. Umweltschutz, Verbraucherschutz, Wettbewerb) erlassen und stellen daher kein einheitliches und widerspruchsfreies Regelungssystem dar. Eine Analyse der für den Projektgegenstand relevanten Rechtsvorschriften und vor allem ihres Zusammenwirkens existierte bisher nicht. Vorhandene Veröffentlichungen konzentrieren sich in klassischer Weise auf die abstrakte Darstellung einzelner Rechtsgebiete. Zudem sind rechtliche Bestimmungen ständigen Veränderungen unterworfen; gerade die energierechtlichen Vorschriften werden sehr häufig und nicht nur in Detailfragen geändert. Daher ist die wissenschaftliche Aufbereitung ebenfalls ein stetiger Prozess, welcher der rechtlichen Entwicklung nicht nur folgt, sondern z. B. durch das Aufzeigen von Regelungslücken, Unklarheiten oder Widersprüchen auch auf diese Einfluss nimmt. Was Energieeffizienz generell und die energetische Optimierung der

Wasserwirtschaft im Speziellen anbelangt, steht diese Entwicklung weiterhin noch eher am Anfang.

Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Die energetische Optimierung der Wasserwirtschaft setzt ein tiefgehendes Verständnis der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen voraus. BürgerInnen haben immer häufiger den Anspruch, an Diskussionen zu sowohl technischen Möglichkeiten als energiewirtschaftlichen und ökologischen Fragestellungen der Energiewende beteiligt zu werden. Den sozialen und gesellschaftlichen Folgewirkungen wird große Aufmerksamkeit zuteil. Mobilität und Sensibilität der BürgerinnenInnen - besonders bei Umwelt- und Technikkonflikten - wachsen kontinuierlich, wie u. a. die Bürgerproteste, die große Infrastrukturvorhaben (Flughafen- und Bahnhofsbauten) begleiteten, zeigen.

Eine erfolgreiche energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems hängt daher nicht allein von der technischen und rechtlichen Realisierbarkeit ab, sondern deren Erfolg und Umsetzung bedarf einer kooperativen und konsensorientierten Unternehmenspolitik, die die Zivilgesellschaft und die Politik mit in den Dialog einbezieht (Leggewie, 2010). Planungen und technische Neuerungen, von denen breite Bevölkerungsschichten betroffen sind, sind mehr denn je auf die Akzeptanz der Bevölkerung angewiesen.

In der Literatur fand sich bereits vor Durchführung des Projekts ENERWA eine große Auswahl an Partizipationsmodellen, die sich in konsultative und entscheidungsvorbereitende Verfahren sowie in der Art der angewandten Rekrutierung der Teilnehmenden unterscheiden lassen (Kersting, 2008). Besonders das Modell der Planungszellen, welches auch bei ENERWA erfolgreich durchgeführt wurde, findet in der Forschung hinsichtlich seiner Auswirkungen auf den Kompetenzgewinn der Teilnehmenden („Empowerment“), der Akzeptanz der Ergebnisse in der Bürgerschaft und der Repräsentativität durch Aleatorik, eindeutig Zuspruch.

Eine eingehende Analyse in der nationalen und internationalen Literatur im Bereich von wasserwirtschaftlichen und technischen Projekten ergab, dass zu Beginn des Projekts ENERWA weiterer Forschungsbedarf bei Bürgerbeteiligungsverfahren im Bereich ökologisch-technischer Großvorhaben, hinsichtlich der Anwendung und Weiterentwicklung solcher Verfahren und ihrer Auswirkungen auf eine nachhaltige Entwicklung in der Energiepolitik vorhanden war.

Die Ermittlung zum Stand der Wissenschaft und Forschung zu Beginn des Projekts wurde durch eine Datenbankanalyse bezüglich energie- und wasserwirtschaftlichen Vorhaben mit Bürgerbeteiligung ergänzt. Bereits durchgeführte Bürgerbeteiligungsverfahren wurden analysiert und evaluiert. Die Datenbank Bürgerbegehren des BUW war und bleibt in dieser Form

die umfangreichste verfügbare Sammlung zur Praxis von Bürgerbeteiligung in der Bundesrepublik Deutschland.

I.4.6 Webdienste im Bereich Energieeffizienz

Zu Beginn des Projektes erfolgte eine umfangreiche inhaltliche Recherche zu bestehenden Webangeboten, die einen engeren Bezug zum Forschungsthema aufweisen (siehe auch Kapitel II.9.2). Die Webangebote in den Themenfeldern Energie und Wasserwirtschaft reichen von einfachen statischen Webseiten mit lediglich informativem Charakter bis hin zu komplexen Webportalen, die Webapplikationen bzw. Einstiegspunkte für den Download von Desktop-Programmen anbieten. Webdienste, die sich insbesondere mit energetischen Aspekten in der Wasserwirtschaft beschäftigen, dabei die gesamte Prozesskette von der Wassergewinnung über die Wasseraufbereitung bis hin zur Wasserverteilung beleuchten und zudem einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stehen, konnten nicht identifiziert werden. Diese Lücke sollte mit den ENERWA-Webdiensten geschlossen werden.

Neben der inhaltlichen Recherche wurde zu Beginn des Projektes auch eine Technologierecherche durchgeführt mit dem Ziel, die ENERWA-Webdienste auf eine moderne, aber auch etablierte und zukunftsfähige Technologiebasis zu stellen. Grundsätzlich lassen sich Webapplikationen bzw. Webdienste sowohl mit dem Einsatz von Webservern und entsprechenden Programmiersprachen (z.B. PHP, JavaScript) erstellen. Andererseits gelangen auch komplexe Enterprise Frameworks wie z.B. Java EE oder .Net zum Einsatz. Um für die Implementierung möglichst heterogener Anforderungen gerüstet zu sein, wurde für die ENERWA-Webdienste die Technologie Enterprise Frameworks Java EE gewählt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen fand in folgenden Arbeitspaketen statt:

Arbeitspaket A.2 - Bürgerbeteiligungsverfahren

In der Vorbereitungsphase des Bürgerbeteiligungsverfahrens wurde für die Einladung der BürgerInnen per Zufallsverfahren das Landesinnenministerium NRW kontaktiert, um eine Genehmigung für die Adressen aus den Einwohnermelderegistern der Städte Wermelskirchen, Burscheid und Hückeswagen einzuholen. In Zusammenarbeit mit den Einwohnermeldeämtern dieser Städte wurden insgesamt 1.691 Adressen gesammelt. Der Einladungsprozess wurde unterstützt durch die Verwaltungen der drei Städte.

Die Beantragung des Bildungsurlaubes, der den Teilnehmenden für die Dauer der Planungszellen angeboten wurde, erfolgte in Kooperation mit der Bergischen Volkshochschule.

Neben VertreterInnen von 10 Institutionen aus dem Projekt ENERWA, die im Rahmen des Bürgerbeteiligungsverfahrens ihre Ergebnisse der Bürgerschaft vortrugen, referierten folgende externe ExpertInnen in den Planungszellen: Werner Bosbach, Fischereiberater Leverkusen; Matthias Derlin, Geschäftsführer der Naturarena Bergisches Land GmbH; Hon.-Prof.Dr. Dominik Godde, H2GO – Hydro Management Consulting; Gisela Hück, Leitung der Hygienekontrolle im Gesundheitsamt OBK; Christian Meuthen, Kaufmännischer Leiter/Prokurist Stadtwerke Burscheid; Elke Reichert UWB RBK; Manuela Thomas, Biologische Station Oberberg Kulturlandschaft.

Zur Einführung des Bürgerbeteiligungsverfahrens, für das Politik- und Expertenhearing sowie zur Abschlussveranstaltung und Überreichung des Bürgergutachtens nahmen die Oberbürgermeister und ihre Vertreter der Städte Wermelskirchen, Burscheid und Hückeswagen teil.

Arbeitspaket B.2 – Energieeffizienz und Energiegewinnung: Trinkwasseraufbereitung

Im Rahmen einer Projektaufstockung wurden die in ENERWA erarbeiteten Methoden zur Dynamisierung von Wasseraufbereitungs- und Verteilungsanlagen in einem „model case“ validiert. Für diese weiterführenden Untersuchungen konnte ein weiterer Wasserversorger als Kooperationspartner gewonnen werden. Dieser verfügt über ein mittelgroßes und geschlossenes Wasserversorgungsgebiet mit zwei Wasseraufbereitungsanlagen, welches sich für die Untersuchungen besonders gut eignete. Der Wasserversorger hatte großes Interesse daran, stellte alle notwendigen Informationen zur Verfügung, ermöglichte und unterstützte die Messungen in den Versorgungsanlagen.

Arbeitspaket B.3 – Energieeffizienz und Energiegewinnung: Trinkwassertransport, -speicherung und –verteilung

In anderen ERWAS-Verbundprojekten wurde parallel an vergleichbaren bzw. verwandten Fragestellungen gearbeitet, insbesondere in den Vorhaben „EWID“, „EWAVE“, „ENWASSER“. Durch die Teilnahme an den entsprechenden ERWAS-Querschnittsthemen und Workshops (QT Modellierung und Simulation; QT Energiespeicher und Energienetze) erfolgte ein enger Austausch mit den anderen Verbundvorhaben. Hierdurch wurde für einen Erfahrungstransfer gesorgt, z. B. zu rechtlichen Rahmenbedingungen, Grenzen der mathematischen Modellierung und generellen Verfahrensfragen (z. B. Beurteilung multikriterieller Optimierungen).

Arbeitspaket C – Energie-Management im Verbund

Die Betrachtung im Verbund bezog sich im Wesentlichen auf die Koordinierung der Arbeitspakete B1, B2 und B3 in Bezug auf eine homogene Simulation der Teilsysteme für die Zusammenführung zu einem Verbundsystem, so dass eine gesamtheitliche Auswertung möglich war. Verbindungen zu anderen Stellen, die Rückwirkung auf die Arbeitspakete B1 bis B3 hatten, sind somit zwangsläufig in die Bearbeitung des Arbeitspakets C eingeflossen.

Ein Austausch fand mit dem Verbundprojekt EnWasser, insbesondere mit dem Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, statt, wodurch Vorgehensweise und Schlussfolgerungen bestätigt werden konnten.

II. Eingehende Darstellung des Projektes

II.1 Ermittlung von Grundlagen und Rahmenbedingungen: Ressourcen, Technik, TW-Verbrauch, Energie - AP A.1

Das Arbeitspaket A.1 hatte zum Ziel, eine umfassende Übersicht aller im Verbundprojekt ENERWA benötigten Daten und angewandten Methoden zusammenzustellen. Damit wurde dem Projektverbund eine einheitliche Informationsbasis zur Verfügung gestellt. Datenverfügbarkeit und Datenformate wurden ebenso ersichtlich wie noch zu schließende Datenlücken im Datenbedarf. Die Methodenbeschreibungen beschäftigten sich darüber hinaus mit den im Verbund geplanten Schritten der Datenaufbereitung, Datenanalyse und der weiteren (internen) Ergebnisverwertung. Diese Informationen bildeten eine Arbeitsgrundlage für alle Arbeitspakete, deren Datenbedarfe auch die im Verbund generierten Ergebnisse einschließen.

II.1.1 Ermittlung des Daten- und Methodenbedarfs für das Projekt

Die Datenbedarfe der einzelnen Projektpartner wurden erfasst und den einzelnen Fachgebieten zugeordnet. Daten mit eindeutigen Mehrbedarfen (Bedarf von mehreren Projektpartnern) wurden identifiziert und auf einem BSCW (Basic Support for Cooperative Work) – Server den Projektpartnern zugänglich gemacht. Die Datenbedarfe für das Projekt ENERWA stellten sich wie folgt dar:

Fachgebiet Hydrologie und Ökologie

Für die Bedarfe im Fachgebiet Hydrologie und Ökologie wurden Datenbanken zur Hydrologie, Morphologie, Biologie und Physiko-Chemie bereitgestellt. Daten zur Hydrologie beinhalten beispielsweise Pegelstände, Abflussdaten (Jahresmittel-, Spitzenwerte etc.), Ganglinien und Daten zum Niederschlag. Diese hydrologischen Daten liegen zum größten Teil bereits verbundintern bei den Partnern vor. Zusätzlich können Daten vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) akquiriert werden. Morphologische Daten liegen vor allem mit den in NRW mehrfach erhobenen Gewässerstrukturgütedaten vor, zuletzt im Rahmen einer landesweiten Kartierung im Jahr 2013 erhoben. Projektrelevante biologische Daten beinhalten in erster Linie die Monitoringdaten zur Bestimmung des ökologischen Zustands. Hierzu zählen Taxalisten der Organismengruppen Makrozoobenthos (MZB), Fische, und Makrophyten. Daten zur Physiko-Chemie decken die folgenden Parameter und Kennwerte ab: Temperatur (z. B. Luft, Wasser, Talsperren-Zulauf/-Ablauf), Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit, pH-Wert, Pflanzennährstoffe (N, P) und weitere chemische Parameter (z. B. Mangan, Säurekapazität, DOC/TOC).

Fachgebiet Technische Anlagen

In diesem Fachgebiet wurden die technischen Daten (z. B. Material, Durchmesser- und Längenmaße, Drücke und Energieverbrauchswerte) zu den wasserwirtschaftlichen Anlagen bereitgestellt. Hierzu zählen: Talsperren, Wasseraufbereitung, Wasserversorgungsnetz und alle dazugehörigen Einheiten wie Pumpen, Speicher, Turbinen, Hochbehälter, Leitungen/Düker, Übergabe/Netzknoten, Ventile/Armaturen, Rangierstationen.

Neben den rein technischen Daten sind hier auch die „Metadaten der Anlagen enthalten, z. B. die geographische Lage (Rechtswert, Hochwert, Höhe ü. NN).

Fachgebiet Trinkwasserbedarf /-beschaffenheit

Für die Projektpartner waren folgende Informationen von Interesse: Durchsatzmengen an Knotenpunkten, Jahresmengen, Wasserbilanz (Gewinnung-Abwasser-Netzverlust-Verkauf), Kosten-/Gewinn-/Verlustrechnung, Tagesganglinien und Wasserabgabemengen Qmax, Qmin, Qmittel.

Fachgebiet Energiegewinnungs- und Energienutzungspotenziale

Für die Energiegewinnungs- und Energienutzungspotenziale bestand ein geringer Datenbedarf. Es wurden insgesamt sechs Datenbedarfe ermittelt: Kennwerte, Vergleichswerte, Grenzwerte, Anlagenspezifische Leistungen, Lastgang technischer Anlagen und zeitliche Verschiebepotenziale in der Nachfrage nach elektrischer Energie (Demand Side Management).

Fachgebiet Ökonomische Rahmendaten

Die ökonomischen Rahmendaten beinhalten in erster Linie monetäre Daten, z. B. Investitionskosten, Betriebskosten, Einspeisevergütung, Strompreise (Day-Ahead Auktion und Intraday-Handel) sowie Finanzierungsrahmenbedingungen (Zinsen).

Fachgebiet Gesellschaftliche Rahmendaten

Die im Verbund benötigten gesellschaftlichen Rahmendaten umfassen Daten zu Bevölkerungsstatistiken in den Versorgungsgebieten, Verbraucherbefragungen zur Freizeitnutzung sowie zur Pacht-/Mietnutzung von wasserwirtschaftlichen Anlagen sowie Daten aus Beteiligungsverfahren und Partizipationsprojekten.

Neben den ermittelten Datenbedarfen sowie der projektinternen Bereitstellung von Daten mit Mehrbedarf auf einem BSCW–Server, wurden sogenannte Methodenbeschreibungen von den einzelnen Projektpartnern erstellt. Die Methodenbeschreibungen dienten der Transparenz innerhalb des Projekts, der Fokus lag dabei auf der Beschreibung der Schnitt- bzw. Übergabestellen von einem Teilsystem zum anderen. In jedem AP wurden bestimmte Untersuchungs-

Methoden angewandt, für die bestimmte Daten benötigt wurden. Hieraus konnten weitere Daten generiert werden, die von anderen Partnern folgend genutzt wurden. Weitere Details dazu sind in einem internen Ergebnisbericht beschrieben.

II.1.2 Beschreibung der untersuchten Versorgungsgebiete

Für die vier ENERWA-Modelregionen wurden einheitliche Systembeschreibungen mit spezifischen Angaben von Anlagen und Standorten erstellt:

II.1.2.1 Modellregion Eifel-Aachen

Das Rohwasser für die Wasserversorgung der Städteregion Aachen stammt aus verschiedenen Trinkwassertalsperren der Nordeifel, die ein wasserwirtschaftliches Gesamtsystem bilden. Die Trinkwasseraufbereitung durch den ENERWA-Projektpartner WAG Nordeifel erfolgt in zwei Wasserwerken aus dem Rohwasser der Dreilägerbachtalsperre (Trinkwasseraufbereitung Roetgen) und der Wehebachtalsperre (Trinkwasseraufbereitung Wehebachtalsperre):

- Das Wasserwerk Roetgen (6.000 m³/h) umfasst die Stufen Siebfiltration (Schutzfilter), Dosierung (NaOH, CO_2, $Al(SO4)_3$), Inline-Flockung, Ultrafiltration mit Rückführung der schlammhaltigen Spülwässer, Kalksteinfiltration (13 x 90 m²), Desinfektion (Chlor, Chlordioxid) und Speicherung.
- Das Wasserwerk Wehebachtalsperre (3.000 m³/h) eignet sich aufgrund der konventionellen Aufbereitung gut als Referenzanlage im Vergleich zur Ultrafiltrationsanlage des WW Roetgen bezüglich Energie- und Betriebsmittelverbrauch. Es beinhaltet folgende Aufbereitungsstufen: Dosierung (Kalkwasser, Al(SO4)3), Flockungsreaktor, Sandfiltration (7 x 72 m²) mit Sedimentation und Ableitung der schlammhaltigen Spülwässer, Kalkwasserzugabe, Sandfiltration (7 x 48 m2), Desinfektion (Chlor, Chlordioxid) und Speicherung.

Das Wasserverteilungssystem der Städteregion Aachen wird von der enwor betrieben und umfasst ca. 1.300 km Rohrleitungen mit insgesamt 22 Druckzonen. Das Trinkwasser für mehr als 300.000 Einwohner und mehrere Weiterverteiler wird - neben zwei Grundwasserwerken – überwiegend aus mehreren Talsperren in der Eifel gewonnen, aufbereitet und mit dem vorhandenen Gefälle über Zwischenbehälter in das tiefer gelegene Trinkwasserverteilsystem der enwor geleitet. Der maximale Höhenunterschied beträgt mehr als 300 m im Netz. Eine erste Anlage zur Stromerzeugung im Trinkwassernetz wurde im Jahre 2011 in Betrieb genommen. Hier wurde das vorhandene Druckgefälle an einer Druckreduzierstation zu einer großen Druckzone genutzt. Die vorgesehene Untersuchung zur Erhöhung der Energieeffizienz im vorliegenden Forschungsvorhaben konzentriert sich auf die Dimensionierung der Druckzonen und Identifikation weiterer Energienutzungspotenziale an den Einspeisepunkten in diese Druckzonen.

II.1.2.2 Modellregion Bergisches Land

Der Aggerverband betreibt neben dem Wasserverteilungsnetz im Bergischen Land zwei Trinkwasseraufbereitungsanlagen sowie zwei Trinkwassertalsperren. Hierbei handelt es sich um die Genkeltalsperre mit dem nachgeschalteten Wasserwerk Erlenhagen und die Wiehltalsperre mit dem nachgeschalteten Wasserwerk Auchel. In der Modellregion Bergisches Land existieren darüber hinaus noch weitere wasserwirtschaftliche Anlagen: Die Aggertalsperre dient dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseranreicherung, der Freizeitnutzung sowie der Bereitstellung von Brauchwasser für die Energiegewinnung. Weitere Stauanlagen sind die Stauweiher Osberghausen und Bieberstein sowie die Sülzüberleitung zur Großen Dhünntalsperre des Wupperverbandes (siehe Systembeschreibung „Rheinisch-Bergische Kreis“ und die Aggerüberleitung zur Genkeltalsperre (Stauweiher Badinghagen). Im Rahmen von ENERWA waren die beiden Trinkwassertalsperren Genkel und Wiehl, die beiden Wasserwerke Erlenhagen und Auchel sowie das, aus beiden Wasserwerken gespeiste, Transport- und Verteilungsnetz von besonderem Interesse.

II.1.2.3 Modellregion Ruhr

Im Einzugsgebiet der Ruhr betreibt der Ruhrverband (RV) ein System von acht Talsperren. Ziel des Talsperrenmanagements ist die Sicherstellung eines ausreichenden, gesetzlich festgelegten Abflusses in der Ruhr, gemessen an zwei Kontrollpegeln: Schwerte-Villigst an der mittleren und Hattingen an der unteren Ruhr. Die Entscheidung über die jeweilige Abgabe der einzelnen Talsperren wird täglich in der Talsperrenleitzentrale auf der Grundlage aktueller Messdaten zu Füllständen, Abflussdaten, Niederschlags- und sonstigen Wetterdaten, Verbrauchsmengen (Entnahme und Entziehung), Modellen und Prognosen getroffen.

An den Talsperren des Ruhrverbands sind insgesamt zehn Wasserkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 36,6 MW installiert. Dem Ausgleich der Ansprüche der verschiedenen Wassernutzungen für die Energiewirtschaft kommt dabei besondere Bedeutung zu. Dies betrifft insbesondere Hochwasserschutz, Schifffahrt, Freizeit und Erholung sowie die ökologische Funktion der Wasserkörper der Talsperre und Fließgewässer im Unterlauf und das Beileitungssystem.

Während der Projektlaufzeit boten die Sanierung der Oberflächendichtung des Damms der Biggetalsperre die Möglichkeit, die Auswirkungen einer veränderten Speicherbewirtschaftung mit einem gezielten Monitoring des Talsperrenwasserkörpers und des Unterlaufs zu erfassen (siehe Kapitel II.3.1).

Untersuchungsobjekt für die Oberflächenwasseraufbereitung an der Ruhr ist exemplarisch das Wasserwerk Styrum-West der RWW. Es ist grundsätzlich für eine Dynamisierung des Betriebs besonders geeignet, da das aufbereitete Wasser wieder versickert wird und damit ein sehr großes Speichervolumen zur Verfügung steht. Es beinhaltet folgende Aufbereitungsstufen (2.000 m³/h): Rohwasserpumpstation mit Rechenanlage, Mikrosiebanlage, Vorozonung (zur Vernichtung von Restozon aus der Hauptozonung), Dosierung Polyaluminiumchlorid, Flockung (Entstabilisierung – Agglomeration - Sedimentation), Ozonung, Zwischenpumpstation, Sauerstoffdosierung, Mehrschichtfiltration (12 x 20 m^2), Aktivkohlefiltration (6 x 14 m²), Versickerung und Bodenspeicher, Heberbrunnen, Natronlaugedosierung, Desinfektion (Chlorgas, UV-Anlage ist in Planung).

II.1.2.4 Modellregion Rheinisch bergischer Kreis

Das Rohwasser für die Wasserversorgung des Bergischen Landes stammt aus mehreren Talsperren des Wupperverbands. Die für das Forschungsprojekt ENERWA relevante Talsperre ist die Große Dhünn-Talsperre. Mit einem Speichervolumen von 81 Mio. m³ ist diese eine der größten Trinkwassertalsperren in Deutschland. Ihr primärer Zweck ist die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung im Bergischen Land. Das Versorgungsgebiet der Großen Dhünn-Talsperre beträgt ca. 300 km². Die ca. 128.000 Einwohner der angeschlossenen Städte und Gemeinden werden über ein Leitungsnetz von 115 km Länge mit Trinkwasser versorgt. Die maximale Druckzone beträgt 344 m ü. NN. Weitere Aufgaben der Großen Dhünn-Talsperre sind Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung. Die Talsperre ist so konzipiert, dass sie die Überschusswassermenge nasser Jahre über längere Zeit zurückhalten kann und in den Wintermonaten einen Stauraum von 8,5 Mio. m³ frei hält. In Trockenperioden sichert die Talsperre eine Mindestwasserabgabe von 1,0 m³/s an die Dhünn (Pegel Manfort, Leverkusen). Pro Jahr können aus der Talsperre 42 Mio. m³ Rohwasser zur Trinkwasseraufbereitung bereitgestellt werden, zusätzlich kann in Notfällen der Raum Düsseldorf durch ein bestehendes Leitungsnetz mit Trinkwasser versorgt werden.

Das Rohwasser kann aus 3 unterschiedlichen Tiefen über zwei Vertikalleitungen aus der Talsperre entnommen werden und wird über zwei Rohrleitungen zu zwei Trinkwasseraufbereitungsanlagen befördert. Die Aufbereitung des Trinkwassers, sowie die Verteilung des Trinkwassers in die Versorgungsnetze der angeschlossenen Städte und Gemeinden ist Aufgabe von fünf Versorgungsunternehmen. Der Wasserversorgungsverband Rhein-Wupper (WVV) bereitet ein Rohwasserkontingent aus der Großen Dhünn-Talsperre auf und verteilt es an Wasserbezieher und Vertragspartner. Zur Aufbereitung des Rohwassers der Großen Dhünn-Talsperre betreibt die WVV eine Aufbereitungsanlage „Schürholz“ bei Dabringhausen. Von

dort aus werden die Kommunen Radevormwald, Hückeswagen, Wermelskirchen. Leichlingen Burscheid, Bergisch Neukirchen, Odenthal und Teile von Solingen mit Trinkwasser versorgt.

Zur optimalen Aufbereitung des Rohwassers in der Aufbereitungsanlage Schürholz, mit einer Kapazität von 500 – 2000 m³/h, sind folgende Verfahrensschritte in Betrieb: Mikrosiebanlage – Entstabilisierung – Agglomeration - 1. Filterstufe (2-Schicht-Filter, Hydroanthrazit und Quarzkies) – Zwischenpumpwerk – Ozonherstellung - 2. Filterstufe (Aktivkohle) - 3. Filterstufe (Aufhärtung, Entsäuerung über Jurakalk) - Desinfektion mit Chlordioxid.

Weitere relevante Detailbeschreibungen finden sich in nachfolgenden Kapiteln sowie in einem internen Ergebnisbericht.

II.2 Ermittlung von Grundlagen und Rahmenbedingungen: Ökonomie, Recht Gesellschaft - AP A.2

II.2.1 Ökonomische Rahmenbedingungen

II.2.1.1 Wasserwirtschaftliche Optimierungsvarianten

Die Konzeption und Betriebsweise der Wasserversorgung und der dazugehörigen Infrastruktur müssen sich in erster Linie an den Maximen der Versorgungssicherheit und Qualität orientieren. In einem nächsten Schritt sollten jedoch auch weitere Aspekte, wie der hierfür benötigte Energiebedarf betrachtet werden. Denn in der Wasserversorgung bestehen nach wie vor erhebliche, bisher ungenutzte Potenziale zur Energieeinsparung, -rückgewinnung und -speicherung, die zu heben sind ohne den bisherigen Anspruch an die Versorgungsqualität und -sicherheit zu gefährden.

Eine Motivation zur Durchführung entsprechender Maßnahmen zur Realisierung dieser Potenziale kann von Unternehmen zu Unternehmen variieren. Wesentliche Treiber scheinen jedoch vor allem, die mit dem Energieverbrauch einhergehenden Kosteneinsparpotenziale zu sein. Aufgrund der sozial und politisch induzierten Nachhaltigkeitsdebatte rücken ebenso auch ökologische Motive zunehmend in den Vordergrund.

Überblick

Das Konzept zur Wasserwirtschaftlichen Optimierung wurde auf Basis der ursprünglich definierten Optimierungsrichtungen kostenoptimierte Versorgung, ökologisch optimierte Versorgung und lastoptimierte Versorgung unter Verwendung eines „bottom up“-Ansatzes präzisiert. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit Partnern der technischen Arbeitspakete (AP B) beispielhafte Maßnahmen gesammelt und in Maßnahmenkategorien gruppiert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um sicherzustellen, dass sich alle in AP B betrachteten Teilmaßnahmen in den Optimierungsvarianten wiederfinden und mindestens einer der drei Hauptrichtungen der Optimierung zuzuordnen sind. Nichtsdestotrotz können einzelne Maßnahmen dabei selbstverständlich auch auf mehrere Optimierungsvarianten zutreffen.

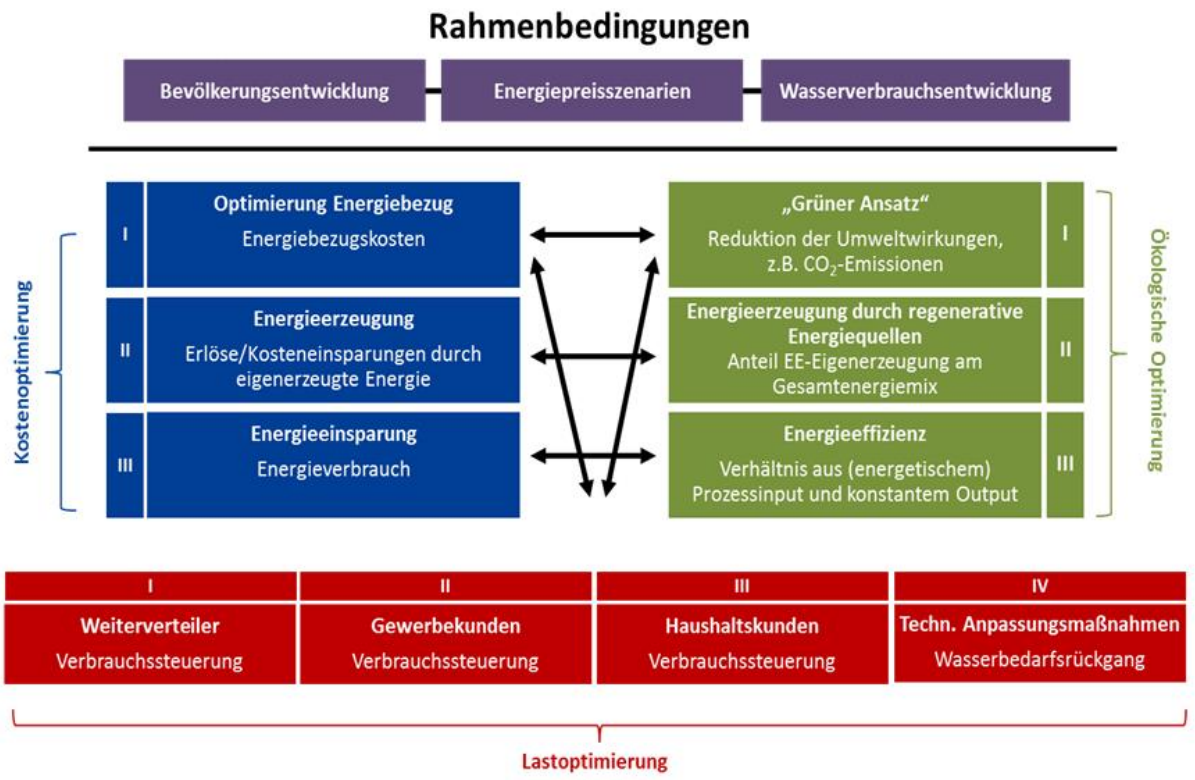


Abbildung 3: Konzept der Wasserwirtschaftlichen Optimierung mit drei Optimierungsrichtungen

Das Konzept der Wasserwirtschaftlichen Optimierung im Rahmen des ENERWA-Projektes, basiert auf einer zweigliedrigen Struktur (Abbildung 3). Den ersten Teil bilden die sozioökonomischen Rahmenbedingungen (lila Felder), bestehend aus Annahmen zu Bevölkerungs-, Energiepreis- und Wasserverbrauchsentwicklung, welche als begleitende Informationen gesehen werden und unabhängig der gewählten Optimierungsvariante Beachtung finden sollen. Während die Energiepreisszenarien vom Projektpartner IAEW eigens für das ENERWA-Projekt auf Basis einer Analyse historischer Energiepreisentwicklungen unter Beachtung der Energieszenarien der Bundesregierung für die Jahre 2023 und 2033 entwickelt wurden (s. Kapitel II.2.1.2), basieren die Annahmen zur Bevölkerungs- und Wasserverbrauchsentwicklung auf bestehenden Veröffentlichungen renommierter Forschungsinstitute und Autoren. Den zweiten Teil des Konzeptes der Wasserwirtschaftlichen Optimierung bilden die drei Optimierungsvarianten: kostenoptimierte Versorgung (blaue Felder), ökologisch optimierte Versorgung (grüne Felder) und lastoptimierte Versorgung (rote Felder).

Bevölkerungs- und Wasserverbrauchsentwicklung

Im Hinblick auf die spätere Anwendung der Wasserwirtschaftlichen Optimierungsrichtungen in den praxisorientierten Arbeiten wurde die Recherche zur Bevölkerungs- und Wasserpreisentwicklung auf das Land Nordrhein-Westfalen fokussiert. Neben vorhandenen Zeitreihen wurden

hierzu auch wesentliche qualitative Einflussfaktoren inkl. ihrer prognostizierten Wirkungen zusammengestellt und ausgewertet.

Im Rahmen der Literaturrecherche zur Bevölkerungsentwicklung in Nordrhein-Westfalen konnten sechs Prognosen renommierter Statistik- und Sozialforschungsinstitute identifiziert werden. In allen bestehenden Prognosen ergibt sich ein klarer Trend, wonach sich die Bevölkerungszahl in NRW im Vergleich zum Basisjahr 2014 (17,68 Mio. Einwohner) bis 2020 um ca. 1 % auf 17,51 Mio. Einwohner verringert haben wird. Im Jahr 2030 wird sich dieser Trend fortsetzen und zu einem Bevölkerungsrückgang von rund 2,8 % (17,22 Mio. Einwohner) führen. Anschließend könnte sich dieser Effekt sogar noch verstärken (Cicholas und Ströker, 2012). Zurückzuführen ist diese Entwicklung im Wesentlichen auf ein anhaltendes Geburtendefizit (Müller et al., 2010).

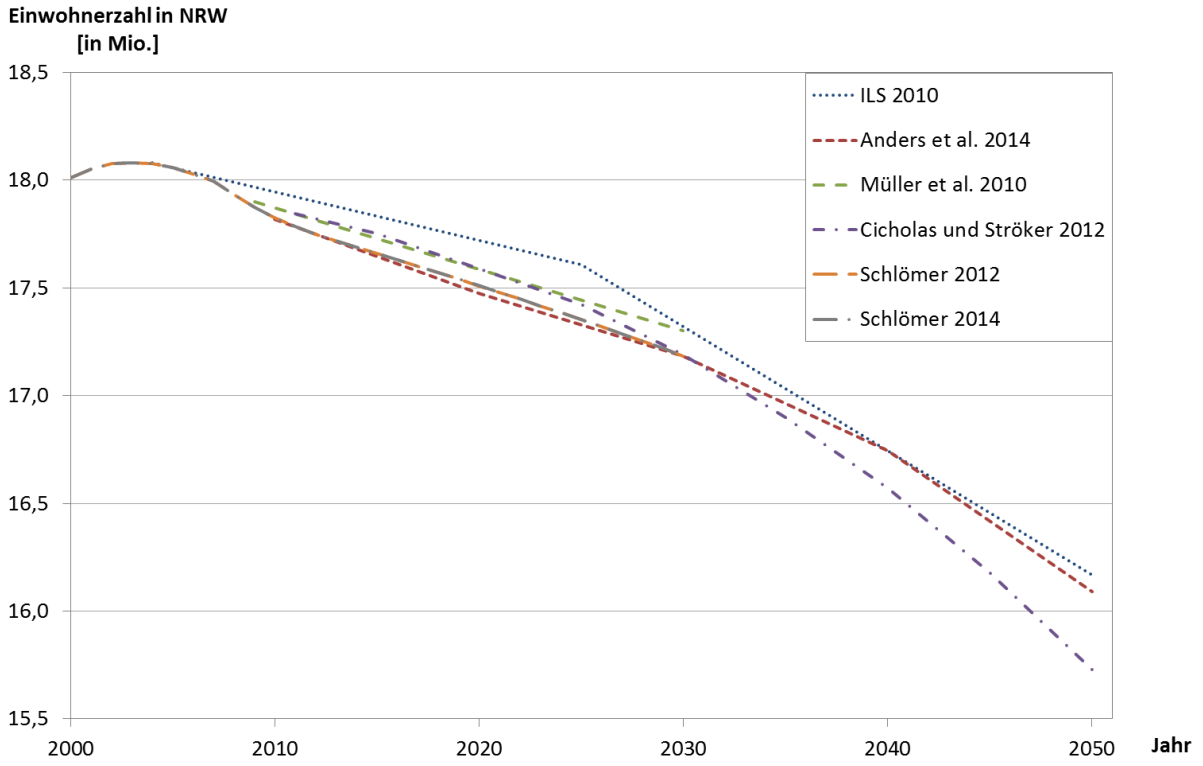


Abbildung 4: Bevölkerungsentwicklung in NRW. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von Anders et al., 2014; Chicolas und Ströker, 2012; ILS, 2010; Müller et al., 2010; Schlömer, 2012; 2014.

Die Wasserverbrauchsentwicklung wird ebenfalls von einer Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren bestimmt. Der zukünftige Trinkwasserbedarf in NRW ergibt sich aus einer Überlagerung vieler verschiedener nutzungsbeeinflussender Effekte, weshalb eine genaue Abschätzung des zukünftigen Bedarfs nahezu unmöglich erscheint (Tabelle 1). Vorsichtigen Schätzungen folgend kann der Trinkwasserverbrauch im Jahr 2020 deshalb nur mit einer Bandbreite von +3 bis –8 % des heutigen Verbrauchs angegeben werden (Herber et al., 2008; Michel

et al., 2007; Nowack, 2011). Mit zunehmendem Prognosezeitraum vergrößert sich diese Bandbreite. Für das Jahr 2100 kann gemäß Roth der Wasserverbrauch verbrauchsgruppenübergreifend sogar zwischen +5 und -25 % liegen (Roth et al., 2011).

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf den zukünftigen Wasserverbrauch. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von Herber et al., 2008; Hillenbrand und Schleich, 2009; Lux, 2009; Michel et al., 2007; Neunteufel et al., 2012; Nowack, 2011; Proske, 2011; Roth et al., 2011.

Einflussfaktor	Auswirkung auf den zukünftigen Wasserverbrauch	
	qualitativ	quantitativ
Demographischer Wandel	sinkt mit Bevölkerungszahl	2020: - 0,6 %
	steigt mit Durchschnittsalter der Bevölkerung	2050: + 6 bis 10 %
Haushaltsgröße	steigt mit abnehmender Größe der Haushalte	2020: 1 %
Klimawandel	k.A.	k.A.
Technologischer Fortschritt	sinkt durch technologischen Fortschritt	2020: - 3 bis 4 % 2035: - 7 bis 8 %
Verbraucherverhalten und sonstige Effekte	k.A.	2020: +/- 2 %
Gewerbliche Verbraucher	k.A.	k.A.
Gesamt		**2020: +3 bis -8 %**

Optimierungsrichtungen der Wasserwirtschaftlichen Optimierung

Die Optimierung der Kosten und der ökologischen Parameter kann durch verschiedene Maßnahmen innerhalb einer jeden Stufe des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems (Talsperrenbewirtschaftung, Wasseraufbereitung, Wassertransport, -speicherung, und -verteilung) erfolgen. Aufgrund der Vielzahl anwendungsspezifischer Einzelmaßnahmen wurden innerhalb der beiden Optimierungsvarianten jeweils drei verschiedene Maßnahmenkategorien (I-III) definiert, denen die anwendungsspezifischen Einzelmaßnahmen zuzuordnen sind. Im Falle der Kostenoptimierung sind dies die Maßnahmenkategorien (I) Optimierung Energiebezug, (II) Energieerzeugung und (III) Energieeinsparung. Bei der ökologischen Optimierung werden die Kategorien (I) „Grüner Ansatz“, (II) Energieerzeugung durch regenerative Energiequellen und (III) Energieeffizienz unterschieden. Wie die ähnlichen Begrifflichkeiten der Maßnahmenkategorien bereits suggerieren, können Einzelmaßnahmen, wie z. B. der Betrieb einer Turbine im

Wasserkreislauf, durchaus in Maßnahmenkategorien beider Optimierungsvarianten einzuordnen sein. Dies erscheint aus praktischer Sicht jedoch auch nachvollziehbar, da der Betrieb einer Turbine sowohl ökonomische als auch ökologische Konsequenzen mit sich bringt. Zu beachten ist jedoch, dass einzelne prozessbezogene Optimierungen stets auch Auswirkungen auf vor- und nachfolgende Prozesse der Trinkwasserbereitstellung haben können. Die Optimierung eines der drei Teilprozesse muss somit nicht zwingend zu einer Verbesserung im Gesamtsystem führen.

Die lastoptimierte wasserwirtschaftliche Optimierung ist demgegenüber vorrangig verbraucherseitig orientiert, also im Bereich der Wasserverteilung angesiedelt. Nichtsdestotrotz können sich auch hieraus Rückwirkungen auf die beiden vorgelagerten Prozessstufen ergeben. Auch hier können vier verschiedene Maßnahmenkategorien (I) Weiterverteiler, (II) Gewerbekunden, (III) Haushaltskunden und (IV) Technische Anpassungsmaßnahmen unterschieden werden.

Ausführliche Beschreibungen allgemeiner Rahmenbedingungen (Bevölkerungsentwicklung, Wasserverbrauchsentwicklung) und der drei Optimierungsvarianten mitsamt der jeweiligen Maßnahmenkategorien und Bewertungsansätze können ENERWA-Publikation Nr. 1 (Wencki, 2015) entnommen werden.

Messung beispielhafter Tagesgangkurven im enwor-Versorgungsgebiet

Zur weitergehenden Analyse der Möglichkeiten einer verbraucherseitigen Lastoptimierung in der Wasserversorgung wurden darüber hinaus zehn beispielhafte Tagesgangkurven von Einfamilienhäusern im Versorgungsgebiet des Projektpartners enwor über den Zeitraum eines Jahres (Januar bis Dezember 2015) ermittelt. Das Messkonzept hierzu wurde bereits zu Beginn der Projektlaufzeit in Zusammenarbeit der Projektpartner IWW, enwor und RZVN erstellt. Die aus diesen Messungen gewonnenen Verbrauchsdaten wurden tages-, monats- und jahresweise ausgewertet und analysiert. Ferner wurden die Analyseergebnisse als Ausgangspunkt zur Diskussion drei verschiedener Anreizsysteme zur lastoptimierten Wasserversorgung genutzt, welche grundlegend zu einem möglichst kontinuierlichen und/oder kostengünstigen sowie ökologisch optimierten Betrieb der wasserwirtschaftlichen Anlagen beitragen könnten.

Da sich das Potenzial zur Verschiebung der Wassernachfrage, welches es aus Sicht des Wasserversorgers zu seinen Zwecken zu heben gilt, von Kunde zu Kunde jedoch grundlegend unterschiedlich gestaltet, sind Aussagen zur Umsetzbarkeit einer effektiven Nachfragesteuerung in der Wasserversorgung stets mit großer Unsicherheit behaftet. Pauschal kann lediglich angenommen werden, dass Gewerbekunden grundsätzlich ein erhöhtes Potenzial der Ver-

brauchssteuerung bieten. Anreizsysteme zur Beeinflussung dieser Kundengruppe können jedoch aufgrund der nicht verallgemeinerbaren Verbrauchsmuster nur einzelvertraglich ausgestaltet werden.

Da der Wassergebrauch privater Wasserkunden zu einem Großteil zur Körperhygiene (36 %) und für die Toilettenspülung (27 %) verwendet wird, fallen potentiell zeitlich steuerbare Wassernutzungen bei dieser Kundengruppe nur mit einem geringen Anteil (18-24 %) ins Gewicht. Um die Verbraucher zu einer Anpassung ihres Verhaltens zu motivieren, bedarf es gezielter Anreize seitens des Versorgungsunternehmens, welche von materieller und/oder immaterieller Art sein können. Zielführende Anreizsysteme können sowohl die Optimierung bestehender Tarifsysteme, Bonus-Malus-Systeme als auch immaterielle Anreize umfassen. Die größtmögliche Wirkung kann den bisherigen Erfahrungen aus der Energiewirtschaft zur Folge vor allem in Kombination unterschiedlicher Anreize erzielt werden.

Für die Übertragbarkeit der im Rahmen dieser Untersuchung vorgebrachten energiewirtschaftlichen Konzepte auf die Wasserversorgung kritisch zu erachten, ist jedoch der derzeitig vorherrschende Mangel an digitalen und kommunikationsfähigen Messsystemen, sogenannten Smart Metern, welcher die Wirtschaftlichkeit und praktische Umsetzung dieser Ansätze weitestgehend hemmt. Ein weiterer Aspekt ist, dass das Verbrauchsmuster, ebenso wie die zur Verschiebung potentiell zur Verfügung stehende Tageswassermenge innerhalb eines Wasserversorgungssystems wie auch kundenspezifisch von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Neben strukturellen Faktoren spielen dabei auch zeitliche und kalendarische Faktoren wie z. B. Uhrzeit und Wochentag eine wichtige Rolle. Die Ausgestaltung und die Rentabilität langfristig zielführender Anreizsysteme zur lastoptimierten Wasserversorgung werden dadurch fortwährend erschwert.

Eine ausführliche Darstellung der Messergebnisse und der weitergehenden Überlegungen zur Anreizgestaltung für eine verbraucherseitige Lastoptimierung in der Wasserversorgung ist in ENERWA-Publikation Nr. 7 (Wencki et al., 2017) zu finden.

II.2.1.2 Energiepreisszenarien

Märkte für elektrische Energie und Leistung

Die Märkte für elektrische Energie und Leistung dienen der Koordination von Angebot und Nachfrage und unterscheiden sich hinsichtlich der Mindestanforderungen und der Charakteristika der Handelsprodukte. Grundsätzlich wird zwischen den Märkten für elektrische Energie, den Spotmärkten, und den Märkten für Leistung (Regelleistung) differenziert.

Bei der Vermarktung von Erzeugungsanlagen mit dem Fokus auf der physikalischen Lieferung von elektrischer Energie stehen die Spotmärkte zur Verfügung. An den Märkten für Regelleistung ist hingegen zwischen der Vorhaltung und tatsächlichen Aktivierung von Regelleistung zu unterschieden. Allgemein werden die Märkte durch die Anforderungen an die handelbaren Produkte unterschieden. Die folgenden Charakteristika beschreiben im Allgemeinen ein handelbares Produkt an den bestehenden Märkten:

- Fristigkeit bis zum Beginn des Lieferzeitpunkts
- Lieferstrukturen
- Lieferverpflichtungen

Die Abfolge der Handelsentscheidungen wird durch die handelsplatzspezifischen Handelsschlüsse bestimmt. Die Periode und Struktur des Produktes ist stets eindeutig definiert. Bei den Spotmärkten geht mit der gebotenen Leistung eine entsprechende Lieferung einher. Regelleistung unterscheidet sich von der Fahrplanenergie dahingehend, dass die Vorhaltung der gebotenen und zugeschlagenen Leistung obligatorisch ist und die tatsächliche, physikalische Erbringung abhängig von der Aktivierung durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) ist und daher selektiv erfolgt. Mit der Vermarktung von Handelsprodukten wird eine Lieferverpflichtung eingegangen, die über den gesamten Produktzeitraum zur betrieblichen Einschränkung führt. In dem Ablauf der Vermarktung sind daher eingegangene Lieferverpflichtungen zu berücksichtigen, sodass die Erfüllung dieser auch stets gewährleistet ist.

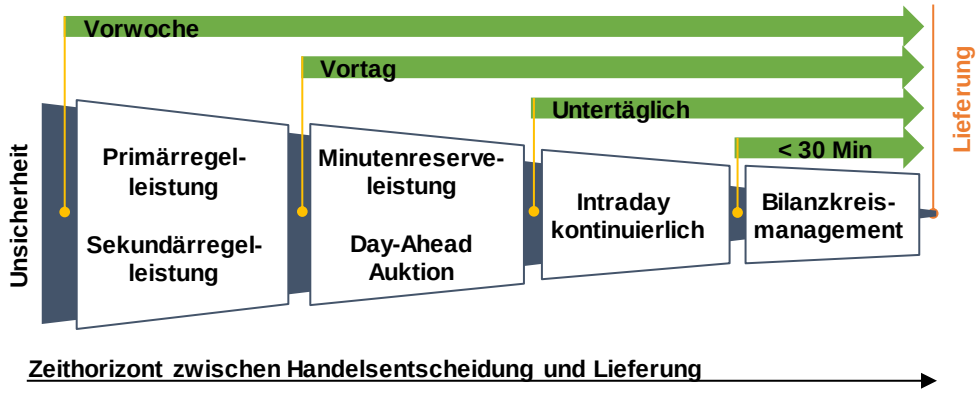


Abbildung 5: Abfolge des Handels von Regelleistung und Fahrplanenergie

In Abbildung 5 ist die Handelsabfolge an den Spotmärkten und Märkten für Regelleistung dargestellt. So wird deutlich, dass Handelsentscheidungen mit physikalischer Lieferverpflichtung bis zu zwei Wochen vor der tatsächlichen Lieferung zu treffen sind. Aufgrund der zeitlichen Diskrepanz zwischen dem Zeitpunkt der Handelsentscheidung und der physikalischen Lieferung werden die Entscheidungen auf der Grundlage von Erwartungen an die Entwicklung der Marktpreise und der Einspeisungen getroffen. Weiterhin kann angenommen werden, dass mit

abnehmenden Zeithorizont die Güte der Informationen zunimmt und daher die Unsicherheiten im untertäglichen Handel geringer als am Vortag oder in der Vorwoche sind.

Im Folgenden sollen die jeweiligen Anforderungen an die Märkte dargestellt werden.

Anforderungen Spotmarkt

Die Spotmärkte werden nach der Fristigkeit in den vortäglichen Handel (Day-Ahead Auktion) und den untertäglichen Handel (kontinuierlichen Intraday Handel) unterschieden. In der Day-Ahead Auktion wird am Vortag um 12 Uhr für 24 Stundenkontrakte für den Folgetag gehandelt, womit nach Veröffentlichung der verbindlichen Ergebnisse der Fahrplan für den Folgetag besteht. Im kontinuierlichen Handel können ab 15 Uhr des Vortags bis zu 30 Minuten vor Lieferung Kontrakte in viertelstündlicher oder stündlicher Auflösung gehandelt werden, so dass eine Anpassung des Anlagenfahrplans bis zu 30 Minuten vor Lieferung möglich ist. Am Spotmarkt liegt die Mindestlosgröße eines Kontraktes bei 100 kW.

Anforderungen Regelleistung

Zur Sicherstellung der Systemstabilität muss jeder ÜNB unter anderem eine ausgeglichene Leistungsbilanz in seiner Regelzone gewährleisten. Zum Ausgleich von Bilanzungleichgewichten stehen den ÜNB verschiedene Regelleistungsqualitäten zur Verfügung, die sich in der zeitlichen Abfolge und den technischen Anforderungen unterscheiden. In Deutschland wird zwischen Primärregel- (PRL), Sekundärregel- (SRL) und Minutenreserveleistung (MRL) unterschieden.

- Primärregelleistung

Die vorzuhaltende PRL im deutschen Netzregelverbund (NRV) wird jährlich in Abstimmung mit den kontinentaleuropäischen ÜNB bestimmt. In Abhängigkeit des Verhältnisses von jährlicher Einspeisung auf die ÜNB wird anteilig am gesamten Bedarf von ±3000 MW die vorzuhaltende PRL verteilt. Die PRL muss gleichmäßig zur Frequenzabweichung innerhalb von 30 Sekunden aktiviert und mindestens über einen Zeitraum von 15 Minuten abgegeben werden können. Die Vorhaltung der PRL in Deutschland erfolgt symmetrisch in Form eines Leistungsbandes in positive und negative Richtung und mit einer Zeitverfügbarkeit von 100% über den gesamten Angebotszeitraum von einer Woche.

Die Beschaffung der PRL erfolgt durch eine wöchentliche Auktion jeweils am Dienstag um 15:00 Uhr für die Folgewoche. Der Erbringungszeitraum ist für sämtliche Stunden der Folgewoche von Montag 00:00 Uhr bis Sonntag 24:00 Uhr definiert. Die Mindestgebotsmenge für die Teilnahme an der Ausschreibung ist auf ±1 MW festgesetzt, weitere Gebotsinkremente

betragen 1 MW. Die Vergabe erfolgt nach der Merit-Order der Leistungspreise und die Vergütung ist nach dem Pay-as-Bid-Verfahren organisiert. Den Teilnehmern ist die Aggregation der Anlagenleistung zur Erbringung von PRL bei der Gebotserstellung gestattet, sofern die Anlagen innerhalb einer Regelzone sind oder regelzonenübergreifend falls die Mindestgebotsmenge nicht erzielt wird. Innerhalb des Portfolios darf die Erbringung der PRL asymmetrisch verteilt werden.

- Sekundärregelleistung

Die SRL wird selektiv in dem NRV erbracht, der für das Leistungsdefizit verantwortlich ist. Die Aktivierung muss innerhalb von 5 Minuten erfolgen und wird durch den ÜNB automatisiert angefordert. Im Gegensatz zu der PRL wird die SRL getrennt nach positiver und negativer Regelleistung mit Mindestgebotsmengen von + 5 MW bzw. -5 MW ausgeschrieben. Der Bedarf an SRL wird für die Dauer eines Quartals bestimmt und unterliegt somit einer periodischen Aktualisierung.

Die Ausschreibung der SRL findet am Mittwoch um 15:00 Uhr der Vorwoche für den Erbringungszeitraum – analog zur PRL – von Montag bis Sonntag der Folgewoche statt. Der Ausschreibungszeitraum wird in die zwei Zeitscheiben Haupt-(HT) und Nebenzeit (NT) unterteilt. Die Hauptzeit erstreckt sich über die Werktage von 08:00 bis 20:00 Uhr und die Nebenzeit über den verbleibenden Zeitbereich. Gebote beschreiben sich durch den Leistungs- und Arbeitspreis sowie durch die Gebotsmenge. Der Zuschlag erfolgt auf Basis der Merit-Order der Leistungspreise solange bis der Bedarf der ÜNB gedeckt ist. Die selektive Aktivierung erfolgt grundsätzlich auf Basis der Merit-Order der Arbeitspreise der zugeschlagenen Gebote.

- Minutenreserveleistung

Die MRL muss innerhalb von 15 Minuten erbracht werden, wobei sich die tatsächliche Aktivierung am Viertelstundenzeitraster der Fahrpläne orientiert. Der Abruf erfolgt automatisiert durch den Merit-Order-List-Server der ÜNB. Die Ausschreibung wird analog zur SRL getrennt nach positiver und negativer Leistung bei einer Mindestgebotsmenge von +5 MW bzw. -5 MW durchgeführt. Die Ausschreibung und Vergabe von MRL erfolgt am vorherigen Werktag vor der Day-Ahead Auktion um 10:00 Uhr bis einschließlich dem folgenden Werktag. Die Produkte unterteilen den Tag in sechs Zeitscheiben von jeweils 4 Stunden beginnend um 00:00 Uhr. Die Bedarfsbestimmung, der Zuschlag von Geboten und die Aktivierung der MRL erfolgt analog zur SRL.

Betrachtete Märkte in Fallstudien

Erzeugungsanlagen mit einer geringen elektrischen Leistung, wie sie in den regionalen Fallstudien verbaut sind (vgl. Kap. II.1.2), die nicht Teil eines Erzeugungsportfolios sind, werden

in der Regel an dem Day-Ahead Markt vermarktet. Insbesondere die Voraussetzung eines 24-Stunden-Dienstes in der Leitwarte und im Handel steht regelmäßig bei kleinen Erzeugungsanlagen nicht im Verhältnis zu dem Nutzen aus der kurzfristigen Vermarktung von Erzeugungsanlagen.

Grundsätzlich sind die Regelleistungsqualitäten durch hydraulische Kraftwerke unter Anwendung eines entsprechenden Regelungskonzeptes zu erbringen. Jedoch liegen die Gebotsinkremente aller Qualitäten über der installierten Leistung der betrachteten Erzeugungsanlagen der regionalen Fallstudien, sodass eine Vorhaltung nach aktuellem regulatorischen Rahmen nicht möglich ist.

Daher liegt der Fokus in ENERWA auf der Vermarktung von elektrischer Energie am Day-Ahead Markt, da hier organisatorisch die geringsten Hemmnisse bei geringen Markteintrittsbarrieren vorliegen.

Day-Ahead Spotmarktpreise

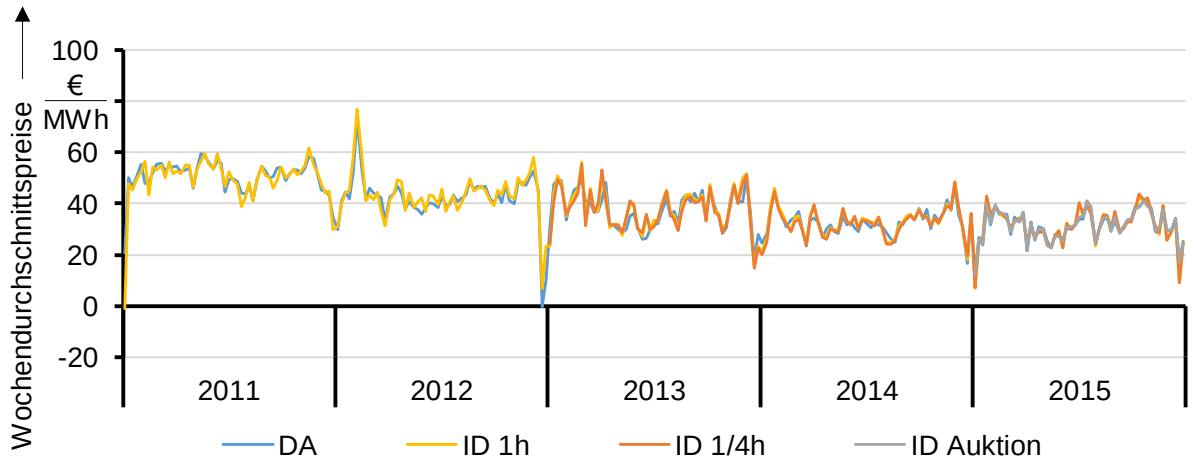
Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Preise am Spotmarkt

Der Preis am Spotmarkt wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Diese lassen sich, wie in Abbildung 6 dargestellt, in erzeugungsseitige und nachfrageseitige Faktoren untergliedern. Erzeugungsseitig gehören dazu unter anderem Brennstoffpreise und der CO_2-Preis, die maßgeblich die Gebote der thermischen Kraftwerke beeinflussen. Konjunktur und Saison hingegen wirken sich in erster Linie auf die Nachfrage nach elektrischer Energie aus. Insbesondere in den vergangenen Jahren kam es, gefördert durch das EEG, zu einem starken Zuwachs an Erzeugungsleistung von Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien. Aufgrund der vernachlässigbar geringen Grenzkosten werden diese zu Gebotspreisen von 0 €/MWh oder sogar kleiner im Spotmarkt angeboten, was zu einem geringeren Preisniveau führt. Dieser Effekt wird auch als Merit-Order-Effekt bezeichnet.

Historie

Abbildung 7 zeigt die Entwicklung des Preisniveaus der verschiedenen Spotmärkte in Form der Wochendurchschnittspreise. Daran ist zu erkennen, dass das Preisniveau im Winter in der Regel unterhalb des Preisniveaus im Sommer liegt. Außerdem nimmt der Spotpreis von 2011 bis 2015 von Jahr zu Jahr weiter ab. Das niedrigste Niveau liegt im Jahresverlauf aufgrund der

geringeren Nachfrage während der Feiertage stets um den Jahreswechsel. Dabei liegen die Wochendurchschnitte der Day-Ahead-Auktion und der Intraday-Märkte stets sehr nah beieinander.



DA = Day-Ahead-Auktion, ID = Intraday-Märkte

Abbildung 7: Historisches Wochenpreisniveau am Spotmarkt

Simulation von Spotpreisen

Im Rahmen von ENERWA erfolgte die Bestimmung zukünftiger Marktpreise auf Basis einer fundamentalen Simulation des Strommarktes.

Das von *Drees* entwickelte Fundamentalmodell basiert auf der Annahme vollkommener Märkte mit vollkommener Transparenz und Konkurrenz (Drees, 2016). Das Ergebnis solcher Märkte führt zu maximaler Wohlfahrt. Dieses Ergebnis stellt außerdem den kostenminimalen Einsatz aller Erzeugungsanlagen und Nachfrageflexibilitäten dar. Darum liegt dem Fundamentalmodell der Ansatz einer kostenminimierenden Einsatzoptimierung zur Deckung der preisunelastischen Nachfrage und zur Vorhaltung von Regelleistung zu Grunde. Dazu wird der Einsatz aller am Markt teilnehmenden technischen Einheiten in einem stündlichen Zeitraster für ein Kalenderjahr optimiert.

Der Betrachtungsbereich des fundamentalen Marktmodells umfasst den gesamten europäischen Binnenmarkt. Dabei werden einzelne Marktgebiete entsprechend als engpassfrei angenommen. Im- und Exporte zwischen angrenzenden Marktgebieten werden durch maximale Übertragungskapazitäten beschränkt.

Anschließend werden die Grenzpreise der Lastdeckung anhand einer kostenbasierten Preissimulation bestimmt (Grote et al., 2015; Mirbach, 2009). Dazu werden zunächst Startkosten auf die durchschnittlichen variablen Kosten der thermischen Kraftwerke umgelegt, um deren Gebote am Spotmarkt abzubilden. Aus einem marktgebietsübergreifenden Matching unter Berücksichtigung des Market-Couplings ergeben sich somit Grenzpreise für Fahrplanenergie.

Die wesentlichen Ergebnisse der Marktsimulation sind der systemweite, blockscharfe und kostenminimale Kraftwerkseinsatz, die resultierenden Gesamtkosten der Stromerzeugung zur Nachfragedeckung, Im- und Exportbilanzen sowie die grenzkostenbasierten Marktpreise für Fahrplanenergie für jedes Marktgebiet.

Das vorgestellte Simulationsverfahren wurde im Rahmen des Projekts angewendet, um Preisprognosen für zwei Szenarien in der Zukunft zu generieren. Diese basieren auf den Szenarien B2023 und B2033 des Netzentwicklungsplans Strom von 2013 (50Hertz Transmission GmbH et al. 2013). In beiden Szenarien ist neben einem Anstieg der Erzeugung auf Basis von EE ein Anstieg des CO_2-Preises sowie der Primärenergiepreise vorgesehen.

Abbildung 8 zeigt den durchschnittlichen Wochenverlauf der simulierten Preise im Vergleich zu den historischen Preisen von 2014 für das deutsche Marktgebiet. Das höhere Preisniveau ist hauptsächlich dem höheren CO_2-Preis geschuldet, der sich insbesondere auf die Erzeugungskosten thermischer Kraftwerke auswirkt. Weiterhin ist besonders für 2033 eine Tendenz zu großen untertäglichen Preisschwankungen zu erkennen. Dies ist auf den hohen Anteil von erneuerbarer Energie (EE) an der Stromerzeugung zurückzuführen. Insbesondere die Erzeugung aus Photovoltaik-Anlagen resultiert in einem deutlichen Preistal in den Mittagsstunden mit hoher Einspeisung.

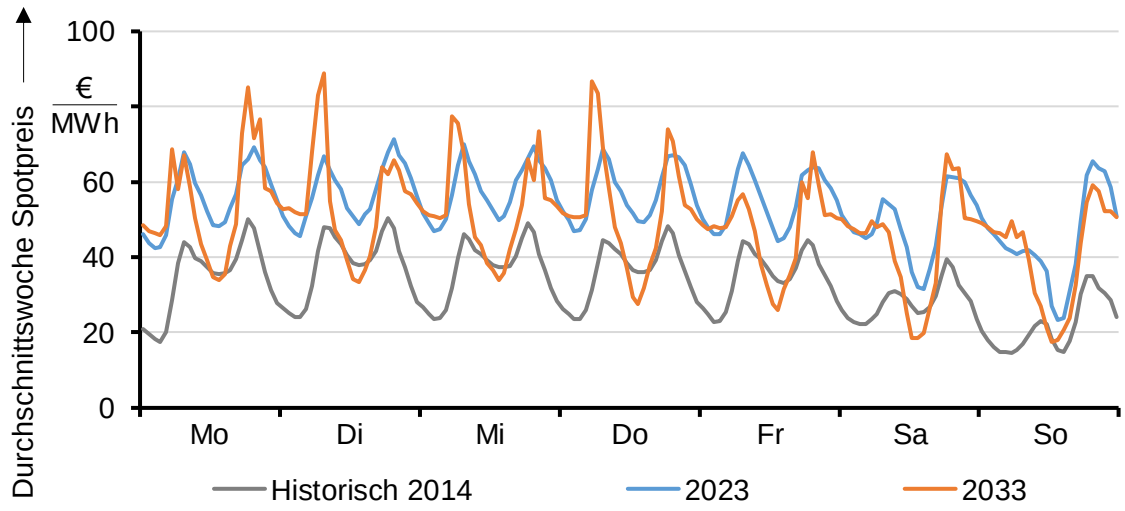


Abbildung 8: Vergleich der Durchschnittswoche simulierter und historischer Spotpreise

Um den Einfluss auf Extremwerte der Preise zu veranschaulichen ist in Abbildung 9 die Preisdauerlinie der simulierten Preise dargestellt.

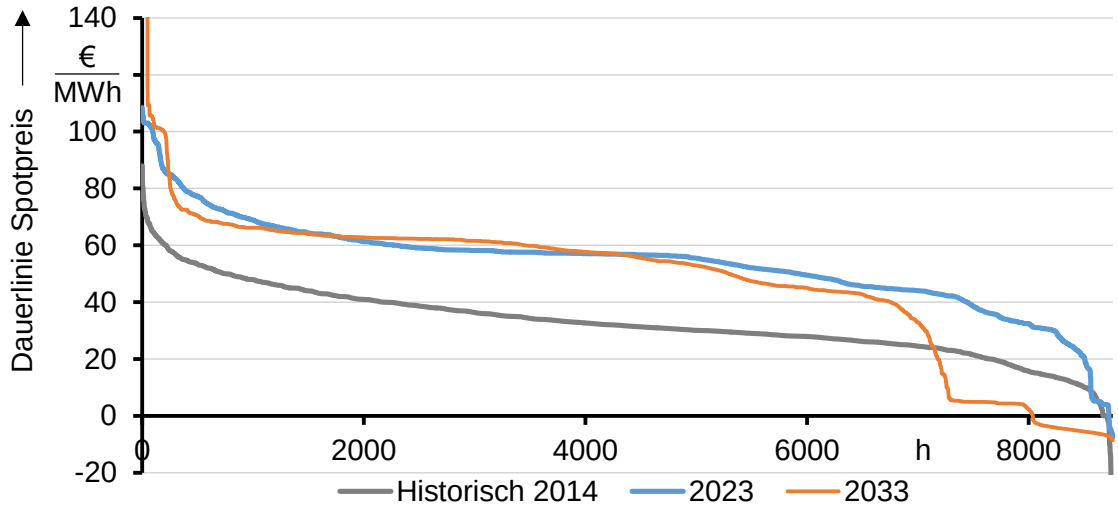


Abbildung 9: Vergleich der Dauerlinie simulierter und historischer Spotpreise

In der Dauerlinie zeichnet sich neben Preisspitzen in beiden simulierten Szenarien von über 100 €/MWh auch ein deutlicher Effekt auf die niedrigen Preise ab. Die hohe grenzkostenfreie Einspeisung aus EE führt im Szenario 2033 in über 1500 h/a zu Preisen von weniger als 10 €/MWh, die zum Teil sogar negativ sind. In diesen Situationen würden am Großmarkt sogar Erlöse aus der Abnahme von elektrischer Energie resultieren.

Kostenkomponenten des Strombezugs

Netznutzungsentgelte

Bei der Netznutzung wird zwischen Einspeise- und Entnahmestellen von Strom am Netzanschlusspunkt unterschieden. Nach § 17 StromNEV ist lediglich für die Entnahme ein Netznutzungsentgelt (unabhängig von der räumlichen Entfernung zwischen dem Ort der Einspeisung und dem Ort der Entnahme) vom Letztverbraucher zu entrichten. Die Bestimmung der Netznutzungsentgelte erfolgt bei Netzkunden mit Viertelstündiger-Leistungsmessung in der Regel auf Basis der folgenden Daten:

- Jahresarbeit (W)
- Höchster gemessener Leistungsmittelwert über das Jahr (Pmax)
- Netzebene des Anschlusses
- Jahresbenutzungsdauer als Quotient aus Jahresarbeit durch höchster gemessener Leistungsmittelwert

Im Folgenden soll für eine repräsentative Anzahl an Netzgebieten der Einfluss von Strukturparametern und der Versorgungsaufgabe auf die Höhe der Netznutzungsgelte aufgezeigt werden. Hierzu wurden die Strukturparameter und die Versorgungsaufgabe von 45 Verteilungsnetzbetreibern in der Mittelspannungsebene analysiert und mithilfe eines k-mean Cluster-Algorithmus fünf repräsentativen Kategorien zugeordnet. Im Folgenden werden die jeweiligen Cluster mit den Strukturparametern als arithmetischer Mittelwert über die Parameter dargestellt.

- **Große Netzbetreiber in ländlichen Gemeinden (Anzahl 4)**
  Entnahmestellen MS: 4821
  Entnahmearbeit MS: 5.435 GWh
  Verhältnis Freileitung zu Kabel MS: 0,354
  Einwohnerzahl: 21.422.207
  Einzugsgebiet: 14.308 km^2
- **Netzbetreiber in Großstädten/dicht besiedelten Gebieten (Anzahl 4)**
  Entnahmestellen MS: 2064
  Entnahmearbeit MS: 1.718 GWh
  Verhältnis Freileitung zu Kabel MS: 0,0073
  Einwohnerzahl: 449.636
  Einzugsgebiet: 214 km^2
- **Netzbetreiber in kleinen Gemeinden (Anzahl 14)**
  Entnahmestellen MS: 106
  Entnahmearbeit MS: 110 GWh
  Verhältnis Freileitung zu Kabel MS: 0,065
  Einwohnerzahl: 28.024
  Einzugsgebiet: 93 km^2
- **Mittelgroße Netzbetreiber in ländlichen Gebieten (Anzahl 6)**
  Entnahmestellen MS: 584
  Entnahmearbeit MS: 405 GWh
  Verhältnis Freileitung zu Kabel MS: 0,209
  Einwohnerzahl: 109.741
  Einzugsgebiet: 462 km^2
- **Netzbetreiber in sehr kleinen Gemeinden (Anzahl 17)**
  Entnahmestellen MS: 17
  Entnahmearbeit MS: 21 GWh
  Verhältnis Freileitung zu Kabel MS: 0,069

Einwohnerzahl: 7.484

Einzugsgebiet: 22 km^2

Abbildung 10 zeigt exemplarisch die Leistungspreise ($\dot{k}_{Leistung}$) für einen Netznutzer mit einer registrierten Leistungsmessung differenziert nach Jahresnutzungsdauer und Netzbetreiberkategorie. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der Leistungspreis bei einer Jahresnutzungsdauer von größer oder gleich 2500 Stunden pro Jahr um den Faktor 4 bis 9 über dem Leistungspreis für Netznutzer mit geringer Jahresnutzungsdauer liegt. Weiterhin ist der Trend zunehmender Leistungspreise aufgrund des zunehmenden Bedarfs an Netzausbaumaßnahmen erkennbar.

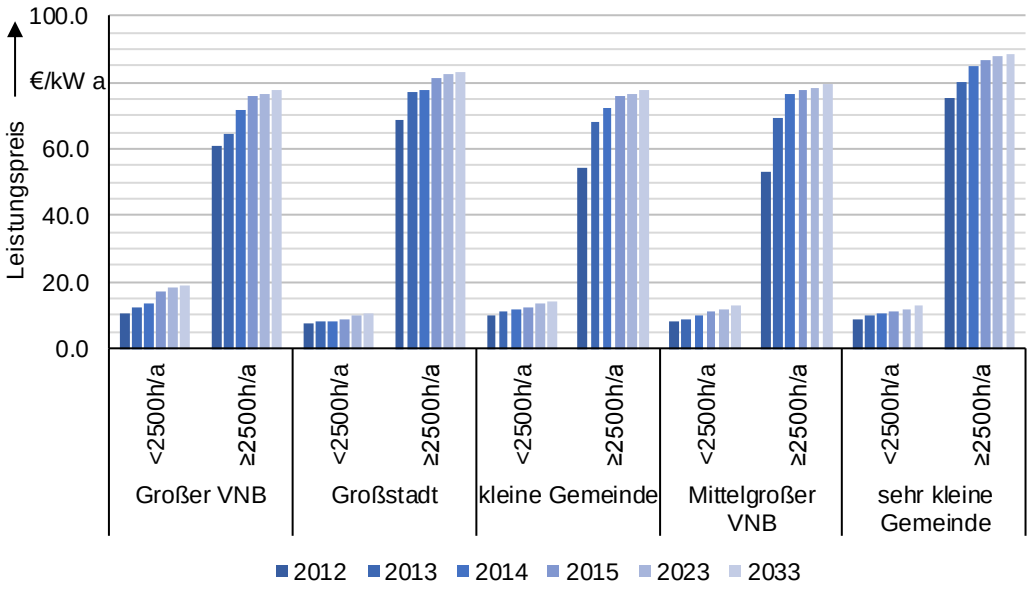


Abbildung 10: Leistungspreise abhängig der Versorgungsaufgabe

In Abbildung 11 sind die Arbeitspreise (k_{Arbeit}) für die verschiedenen Cluster dargestellt.

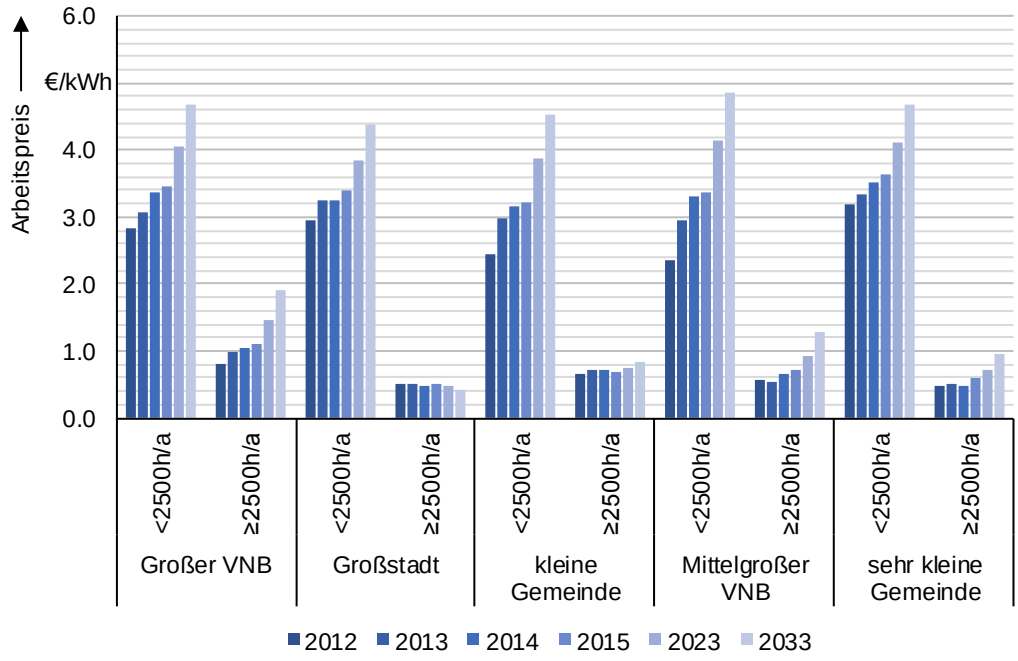


Abbildung 11: Arbeitspreise abhängig von der Versorgungsaufgabe

Die zu entrichtenden Netznutzungsentgelte (K_{NNE}) bestimmen sich für den jeweiligen Netznutzer durch die folgende Gleichung:

$$\dot{K}_{NNE} = \dot{k}_{Leistung} \cdot P_{max} + k_{Arbeit} \cdot \dot{W} \quad [1]$$

Umlagen

Nach EEG haben die Netzbetreiber gegenüber den Elektrizitätsversorgungsunternehmen, die Letztverbraucher beliefern, einen Anspruch auf die Zahlung von EEG-Umlage. Weiterhin sind an die Netzbetreiber Umlagen für die Einspeisung durch aus dem KWKG geförderten Anlagen und für Entschädigungen bei Störung und Verzögerung der Anbindung von Offshore WEA zu entrichten. Die Umlagen sind einheitlich auf die Letztverbraucher zu verteilen und bei der Berechnung der Netznutzungsentgelte in Ansatz zu bringen. Die Entwicklung der EEG-Umlage über den Zeitraum 2011 bis 2015 ist in Abbildung 12 dargestellt. Die verbleibenden Umlagen (KWKG, Offshore-Haftung, etc.) belaufen sich im Saldo auf weniger als 1 Cent/kWh und sind daher nicht explizit aufgeführt.

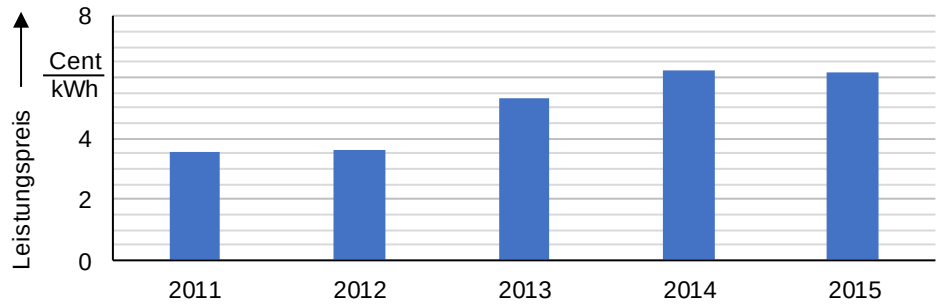


Abbildung 12: Entwicklung EEG-Umlage

Stromsteuer

Die Stromsteuer ist laut § 3 StromStG für den Strombezug aus dem Netz vom Letztverbraucher zu entrichten und ist als Arbeitspreis in Höhe von 20,50 Euro pro MWh zu entrichten. Der Strombezug für den Pumpbetrieb in Pumpspeicherkraftwerken, der zur Förderung des Speichermediums zur Stromerzeugung gemäß § 12 I S. 2 StromStV dient, ist in Verbindung mit dem § 9 I S. 2 StromStV explizit von der Stromsteuer befreit.

Konzessionsabgaben

Konzessionsabgaben sind von den Energieversorgungsunternehmen als Inhaber der Wegerechte für die Verlegung von Leitungen im Gemeindegebiet an die Gemeinde zu entrichten. Die zulässige Höhe der Konzessionsabgabe beträgt für Sondervertragskunden 0,11 Cent/kWh.

II.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

II.2.2.1 Einführung

Die rechtlichen Rahmenbedingungen der energetischen Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems sind sehr komplex, da Regelungen aus ganz unterschiedlichen Rechtsbereichen berührt werden. Als die wichtigsten dieser Rechtsbereiche sind das öffentliche Wasserrecht, das Wasserversorgungsrecht sowie das Energierecht zu nennen. Dabei ist das öffentliche Wasserrecht vor allem für die Zulässigkeit energetischer Optimierungsmaßnahmen an Talsperren von Bedeutung. Das Wasserversorgungsrecht regelt dagegen die im Verhältnis zu den jeweiligen Abnehmern des Wassers geltenden Anforderungen insbesondere an die Wasserqualität, den Druck und die Wasserverfügbarkeit und ist daher in erster Linie für die Zulässigkeit energetischer Optimierungsmaßnahmen im Rahmen der Wasseraufbereitung

und -verteilung relevant. Das Energierecht schließlich betrifft weniger die Frage der Zulässigkeit bestimmter energetischer Optimierungsmaßnahmen als ihre Wirtschaftlichkeit, da seine Regelungen die Kosten der Strombeschaffung sowie die Vergütung und Förderung der Eigenerzeugung maßgeblich beeinflussen.

II.2.2.2 Talsperrenbetrieb und öffentliches Wasserrecht

Das öffentliche Wasserrecht umfasst alle Regelungen, welche die Zulässigkeit von auf Gewässer bezogenen Maßnahmen sowie auf Gewässer bezogene Pflichten betreffen. Es ist hauptsächlich im Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG) und den jeweiligen Landeswassergesetzen (z. B. Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen) geregelt. Hinzu kommen die auf der Grundlage der EU-Wasserrahmenrichtlinie für die einzelnen Flussgebietseinheiten aufgestellten Bewirtschaftungspläne (siehe §§ 83 ff. WHG). Dabei füllen die landesrechtlichen Regelungen die Spielräume aus, die das Wasserhaushaltsgesetz belässt. Im Rahmen des Projekts hat das öffentliche Wasserrecht Bedeutung vor allem für die Zulässigkeit energetischer Maßnahmen an Talsperren.

Die Errichtung und der Betrieb einer Talsperre bedürfen unabhängig davon, ob die Talsperre über eine Wasserkraftanlage verfügt oder nicht, grundsätzlich einer oder auch mehrerer Genehmigungen der zuständigen (Wasser-)Behörde. Nach aktueller Rechtslage sind dies insbesondere ein so genannter Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung oder wesentliche Umgestaltung einer Talsperre sowie eine wasserrechtliche Gestattung für das Aufstauen und Absenken eines Gewässers und für das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus einem solchen. Dabei kann insbesondere die wasserrechtliche Gestattung für das Aufstauen und Absenken bereits vom Planfeststellungsbeschluss mit umfasst sein. Vorhandene Genehmigungen können zudem auch anderen begrifflichen und rechtlichen Kategorien folgen, wenn sie auf der Grundlage früherer gesetzlicher Regelungen erteilt wurden. Unter welchen Voraussetzungen eine Genehmigung erteilt werden kann, ergibt sich im Wesentlichen aus den Regelungen des Wasserhaushaltsgesetzes (s. § 68 Abs. 3 WHG für die Planfeststellung und §§ 8 ff. WHG für wasserrechtliche Gestattungen) und der Landeswassergesetze.

Da es bei der energetischen Optimierung in der Regel nicht um die Neuerrichtung von Talsperren geht, sondern um eine Änderung der Betriebsweise und ggf. der Anlagentechnik, kommt es primär darauf an, inwieweit die in den vorhandenen Genehmigungen enthaltenen Anforderungen einer energetischen Optimierungsmaßnahme entgegenstehen. Dies kann nur im jeweiligen Einzelfall beantwortet werden. Typischerweise enthalten Genehmigungen für Talsperren aber Vorgaben z. B. zu Mindest- und Höchstabflussmengen, zum Höchstpegel, zum Hochwasserschutzraum und zu Hochwasserentlastungsmaßnahmen sowie zur Wasser-

qualität und zu deren Kontrolle. Steht eine Genehmigung einer Maßnahme entgegen, so kommt im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften, insbesondere des Wasserhaushaltsgesetzes und des jeweiligen Landeswassergesetzes, ggf. eine Änderung der Genehmigung in Betracht. Grenzen werden einer solchen aber bspw. durch die im Europarecht wurzelnden und an verschiedenen Stellen des Wasserhaushaltsgesetzes (z. B. in § 27 WHG für oberirdische Gewässer) umgesetzten Verschlechterungsverbote bezüglich des Gewässerzustandes gesetzt. Danach sind Änderungen der Betriebsweise einer Talsperre, die zu einer Verschlechterung des Gewässerzustandes führen, nur sehr begrenzt genehmigungsfähig (siehe insbesondere die Ausnahmen vom Verschlechterungsverbot in § 31 Abs. 2 WHG). Zudem kann die Änderung einer Genehmigung ein umfangreiches neues Verfahren, ggf. einschließlich einer Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich machen.

Nach den Erfahrungen aus dem Projekt können diese materiellen und verfahrensmäßigen Anforderungen an die Änderung einer Genehmigung dazu führen, dass Änderungen der Betriebsweise einer Talsperre zwecks energetischer Optimierung von vornherein nur insoweit in Betracht gezogen werden, wie sie ohne eine Änderung der vorhandenen Genehmigungen umgesetzt werden können. Grundsätzlich belassen die vorhandenen Genehmigungen aber Spielräume, um die Betriebsweise der Talsperre im energetisch sinnvollen Ausmaß zu ändern.

II.2.2.3 Wasserversorgung und Wasserversorgungsrecht

Mit dem Begriff des Wasserversorgungsrechts sind alle rechtlichen Regelungen gemeint, welche das Rechtsverhältnis zwischen dem Wasserversorger und den von ihm mit Wasser belieferten Kunden betreffen. Diese sind vor allem für die Wasseraufbereitung und die Wasserverteilung relevant, da sie Bestimmungen zur Wasserqualität, zum Wasserdruck und zur Wasserverfügbarkeit enthalten. Welche Regelungen des Wasserversorgungsrechts jeweils konkret einschlägig sind, richtet sich einerseits danach, welche Art von Kunden (z. B. Haushaltskunden, Industriekunden, Weiterverteiler) betroffen sind, und andererseits danach, ob das Rechtsverhältnis zu den Kunden öffentlich-rechtlich (d. h. mittels Satzung und Gebühren bzw. Beiträgen) ausgestaltet ist oder privatrechtlich (d. h. mittels Verträgen und Preisen).

Anforderungen an Wasserverfügbarkeit und –druck

- Nach AVBWasserV versorgte Kunden:

Für privatrechtlich mit Wasser versorgte Haushalts- und nichtindustrielle Gewerbekunden, mit denen keine besonderen Vereinbarungen getroffen wurden, richten sich die Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit und den Wasserdruck nach der Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV). Nach dieser muss das Wasserversorgungsunternehmen Wasser im vereinbarten Umfang jederzeit am Ende der Anschlussleitung

zur Verfügung stellen (§ 5 Abs. 1 S. 1 AVBWasserV). Da in der Regel keine Vereinbarungen zum Umfang getroffen werden, richtet sich die zu liefernde Wassermenge nach dem Bedarf des jeweiligen Objekts; grundsätzlich ist der Wasserversorger im Rahmen der wirtschaftlichen Zumutbarkeit und der beschaffungsmäßigen und netztechnischen Gegebenheiten zur Lieferung im unbegrenzten Umfang verpflichtet. Lieferunterbrechungen gestattet die AVBWasserV nur in eng begrenzten Ausnahmefällen, so z. B. wenn diese zur Sicherstellung der öffentlichen Wasserversorgung erforderlich sind, bei Hinderung an der Lieferung durch höhere Gewalt oder bei betriebsnotwendigen Arbeiten (§ 5 Abs. 1 Satz 2 AVBWasserV).

Zwar lässt es die AVBWasserV grundsätzlich zu, mengen- und zeitmäßige Beschränkungen der Lieferpflicht zu vereinbaren (so ausdrücklich § 5 Abs. 1 Satz 2 AVBWasserV). Praktisch und rechtlich dürften solche Vereinbarungen jedoch allenfalls gegenüber gewerblichen Kunden, Wohnungsgesellschaften u. ä. in Betracht kommen, die selbst für eine Bevorratung von Wasser sorgen könnten. Für normale Haushaltskunden erscheinen dagegen regelmäßige Lieferunterbrechungen oder Mengenbegrenzungen kaum zumutbar.

Bezüglich des Wasserdrucks schreibt die AVBWasserV vor, dass das Wasser unter dem Druck geliefert werden muss, welcher für eine einwandfreie Deckung des üblichen Bedarfs in dem betreffenden Versorgungsgebiet erforderlich ist (§ 4 Abs. 3 Satz 2 AVBWasserV). Versorgungsgebiete können dabei kleinere Einheiten als das gesamte versorgte Gebiet des Wasserversorgers sein. Der übliche Bedarf wird maßgeblich durch die ortsübliche Bebauung und Art der Nutzung bestimmt. Weicht die Bebauung oder Nutzung einzelner Grundstücke vom Üblichen ab und macht dies einen erhöhten Wasserdruck erforderlich, so muss der Kunde selbst für diesen sorgen. Als Richtwert für eine einwandfreie Deckung des üblichen Bedarfs gibt das DVGW-Arbeitsblatt W 400-1 als Mindestversorgungsdruck 2,00 bar für Gebäude bloß mit Erdgeschoss an. Für Gebäude mit höherer Geschosszahl steigt der anzusetzende Mindestversorgungsdruck pro Obergeschoss bei neuen Netzen um je 0,5 bar und bei bestehenden Netzen um je 0,35 bar.

Änderungen des Drucks sind im Rahmen der gesetzlichen und behördlichen Bestimmungen sowie der anerkannten Regeln der Technik zulässig, falls dies in besonderen Fällen aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen zwingend notwendig ist; wobei die Belange des Kunden möglichst zu berücksichtigen sind (§ 4 Abs. 3 Satz 3 AVBWasserV). Eine angestrebte energetische Optimierung dürfte grundsätzlich als wirtschaftlicher Grund, der eine Änderung zwingend notwendig macht, anzuerkennen sein. Insbesondere, wenn die Änderung des Drucks eine Anpassung der Kundenanlage notwendig macht, müssen die betroffenen Kunden rechtzeitig über die geplante Änderung informiert werden, so dass sie (auf ihre Kosten) die notwendigen Anpassungen ihrer Kundenanlage vornehmen können.

- Sonstige Kunden:

Für Wasserlieferungen an Industrieunternehmen und Weiterverteiler gilt die AVBWasserV nicht (§ 1 Abs. 2 AVBWasserV). Mit solchen Kunden können Mengenbegrenzungen, Lieferunterbrechungen und Regelungen zum Wasserdruck daher grundsätzlich frei vereinbart werden. Soweit mit solchen Kunden bereits Wasserversorgungsverträge bestehen, sind Änderungen regelmäßig nur mit Zustimmung des Vertragspartners möglich. Nach Laufzeitende oder gegebenenfalls einer Kündigung kommt jedoch ein Neuabschluss zu veränderten Bedingungen in Betracht.

Soweit mit der Gemeinde oder auch mit Grundstückseigentümern Vereinbarungen über die Löschwasserversorgung geschlossen wurden, können sich hieraus besondere Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit und den Wasserdruck ergeben.

Ist die Wasserversorgung öffentlich-rechtlich mittels Satzung und Gebühren ausgestaltet, so richten sich die Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit und den Wasserdruck zunächst nach der Wasserversorgungssatzung. Da Wasserversorgungssatzungen jedoch entsprechend der AVBWasserV auszugestalten sind (§ 35 Abs. 1 AVBWasserV), gelten grundsätzlich vergleichbare Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit und den Wasserdruck wie nach §§ 4 und 5 AVBWasserV. Dabei ist zu beachten, dass sich der Anwendungsbereich der Satzung auch auf Industriekunden und ggf. Weiterverteiler erstrecken kann, so dass abweichende Vereinbarungen nur nach Maßgabe der Satzung in Betracht kommen.

Anforderungen an die Wasserqualität

- Im Geltungsbereich der Trinkwasserverordnung:

Im Verhältnis zu belieferten Letztverbrauchern, welche das Wasser (auch) zu Trinkwasserzwecken (d. h. z. B. auch zur Körperhygiene) nutzen, werden die Mindestanforderungen an die Wasserqualität durch die Trinkwasserverordnung (TrinkwV) verbindlich vorgegeben. Dies gilt unabhängig von der Art des Kunden und der Art des Versorgungsverhältnisses, da auf die Einhaltung der dem Gesundheitsschutz dienenden Anforderungen der TrinkwV nicht verzichtet werden kann. Die TrinkwV enthält nicht nur Grenzwerte für diverse Parameter, sondern darüberhinausgehende, so genannte Minimierungsgebote (§ 5 Abs. 4, § 6 Abs. 3 TrinkwV). Danach genügt es in Bezug auf Mikroorganismen und chemische Stoffe nicht, die Grenzwerte einzuhalten; vielmehr sollen diese so niedrig gehalten werden, wie dies nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik mit vertretbarem Aufwand unter Berücksichtigung von Einzelfällen möglich ist. Dies macht gewisse Abstriche von der technisch erreichbaren Wasserqualität mit Blick auf energetische Optimierungsmaßnahmen nicht von vornherein unzulässig.

Denn es handelt sich um (bloße) Sollvorschriften, die zudem über die Formulierungen „mit vertretbarem Aufwand“ und „unter Berücksichtigung von Einzelfällen“ Spielräume belassen.

Soweit keine Minimierungsgebote greifen, steht die Trinkwasserverordnung Qualitätsänderungen nicht entgegen, solange weiterhin die Grenzwerte und sonstigen Anforderungen eingehalten werden. Im Anwendungsbereich der AVBWasserV (oder entsprechend dieser ausgestalteten Satzungen) ist wiederum deren § 4 Abs. 3 Satz 3 AVBWasserV zu beachten. Danach darf der Wasserversorger die Wasserbeschaffenheit im Rahmen der gesetzlichen und behördlichen Bestimmungen sowie der anerkannten Regeln der Technik nur ändern, falls dies in besonderen Fällen aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen zwingend notwendig ist. Dabei sind die Belange des Kunden möglichst zu berücksichtigen. Dies schließt durch energetische Optimierungsmaßnahmen bedingte Änderungen der Wasserqualität nicht aus. Problematisch dürften allerdings größere Schwankungen der Wasserqualität und insbesondere der Wasserhärte im Tagesverlauf sein, da sich Kunden hierauf nicht ohne Weiteres einstellen können (z. B. hinsichtlich Wassergeschmack und Dosierung von Wasserenthärtern).

Insbesondere im Verhältnis zu Industriekunden können getroffene vertragliche Vereinbarungen zu gegenüber der Trinkwasserverordnung erhöhten Änderungen an die Wasserqualität führen und Qualitätsänderungen beschränken oder unzulässig machen.

- Nicht der Trinkwasserverordnung unterfallende Wasserlieferungen:

Nicht in den Anwendungsbereich der Trinkwasserverordnung fällt praktisch nur die Wasserlieferung an Weiterverteiler oder die Lieferung von Brauchwasser über von der Trinkwasserversorgung getrennte Anlagen. In diesen Fällen kann die Wasserqualität und die Änderung dieser frei vereinbart werden.

II.2.2.4 Energierecht

Die energierechtlichen Bestimmungen finden sich in einer Vielzahl von rechtlichen Regelungen (z. B. im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), im Stromsteuergesetz (StromStG) oder der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV)). Ebenso vielfältig sind die energierechtlichen Regelungsbereiche, wobei in der Regel nur die Wirtschaftlichkeit energetischer Optimierungsmaßnahmen berührt wird, nicht aber ihre Zulässigkeit. Die Wirtschaftlichkeit richtet sich maßgeblich nach den Kosten der Strombeschaffung und den Möglichkeiten, diese durch eine Änderung des Verbrauchsverhaltens oder die Eigenerzeugung von Strom zu reduzieren. Wirtschaftlich von Bedeutung sind zudem die Förderung der Eigenerzeugung sowie die Bedingungen der Vermarktung von Flexibilitäten bei Erzeugung und Verbrauch.

Strombeschaffung

- Zusammensetzung der Strombeschaffungskosten:

Wie Abbildung 13 zeigt, werden die Kosten der Strombeschaffung nur zu einem relativ geringen Anteil durch den Preis für die eigentliche Stromlieferung bestimmt. Hinzu kommen vielmehr die für die Nutzung des Netzes zum Transport des Stroms zu zahlenden Netznutzungsentgelte sowie die so genannten staatlichen veranlassten Mehrbelastungen (wie z. B. EEG-Umlage, Stromsteuer und Konzessionsabgabe) einschließlich der Umsatzsteuer.

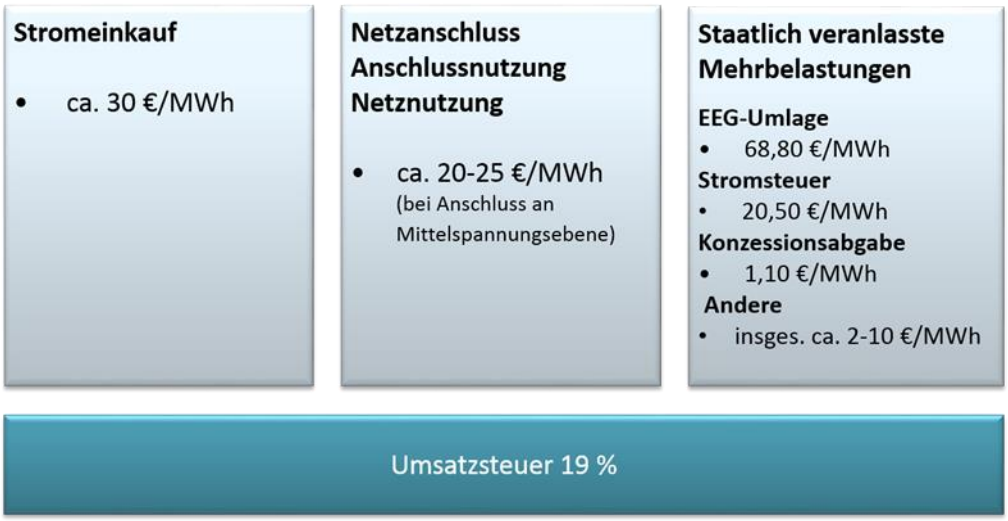


Abbildung 13: Überblick Strombeschaffungskosten

Die Kosten der eigentlichen Stromlieferung richten sich nach der Art der Strombeschaffung und den hierüber vom jeweiligen Wasserversorger konkret getroffenen Vereinbarungen. Auch soweit Strom nicht direkt an der Strombörse beschafft wird, folgen die Preise mittelbar letztlich der Entwicklung der Börsenpreise. Derzeit bewegen sich die Preise für die eigentliche Stromlieferung in der Größenordnung von etwa 30 €/MWh und machen damit nur ca. 20 % der Netto-Strombeschaffungskosten aus.

Die Netznutzungsentgelte (auch Netzentgelte genannt) sind die für den Transport des Stroms durch das Netz zu zahlenden Entgelte. Bei All-inclusive-Stromlieferverträgen sind sie im Strompreis enthalten. In der Regel wählen Wasserversorger jedoch andere Strombeschaffungsmodelle, so dass die Netzentgelte separat an den Netzbetreiber zu entrichten sind. Die Netzentgelte werden nach einem einheitlichen System für jede der sieben Netz- und Umspannebenen berechnet; zu zahlen sind sie jeweils für die in Anspruch genommene Ebene und die dieser vorgelagerten Ebenen. Die setzen sich zusammen aus einer Arbeitspreiskomponente pro entnommener Kilowattstunde und aus einer Leistungspreiskomponente, welche

sich nach der Jahreshöchstlast, also der Viertelstunde im Jahr mit der höchsten Leistung, bemisst. Bei mehr als 2500 Benutzungsstunden dieser Höchstleistung pro Jahr, was für mittlere bis größere Wasserversorger häufig zutrifft, macht die Leistungspreiskomponente den überwiegenden Teil der Netzentgelte aus. Die Netzentgelte haben mit etwa 20-25 €/MWh einen Anteil von ca. 15 % an den Netto-Strombeschaffungskosten.

Die übrigen ca. 65 % der Netto-Strombeschaffungskosten entfallen auf die so genannten staatlich veranlassten Mehrbelastungen. Unter diesem Begriff werden alle Kosten der Strombeschaffung verstanden, welche staatlicherseits in Form von Steuern, Abgaben, Umlagen etc. auferlegt werden. Derzeit sind dies namentlich die folgenden:

- EEG-Umlage (68,80 €/MWh),
- Stromsteuer (20,50 €/MWh),
- KWK-Aufschlag (4,38 €/MWh),
- Umlage für individuelle Netzentgelte (für die ersten 1.000 MWh pro Abnahmestelle 3,88 €/MWh, dann 0,50 bzw. 0,25 €/MWh,
- Konzessionsabgabe (für Sondervertragskunden 1,10 €/MWh, für Tarifkunden 13,20-23,90 €/MWh),
- Offshore-Haftungsumlage (für die ersten 1.000 MWh pro Abnahmestelle -0,28 €/MWh, dann 0,38 bzw. 0,25 €/MWh),
- Umlage nach der Abschaltbare-Lasten-Verordnung (0,06 €/MWh),
- Umsatzsteuer (19 % der Umsätze).

Die Höhe der staatlich veranlassten Mehrbelastungen (mit Ausnahme der Umsatzsteuer) richtet sich ausschließlich nach der elektrischen Arbeit, also den verbrauchten Megawattstunden.

- Möglichkeiten der Reduzierung der Strombeschaffungskosten:

Die Strombeschaffungskosten können natürlich zunächst dadurch verringert werden, dass der benötigte Strom (ohne Reduzierung des Strombedarfs) günstiger beschafft wird. Die Netzentgelte und die staatlich veranlassten Mehrbelastungen reduzieren sich dadurch nicht.

Eine weitere Möglichkeit, die Strombeschaffungskosten zu verringern, besteht in einer Reduzierung des Stromverbrauchs. Hierdurch verringern sich nicht nur die Kosten für die eigentliche Stromlieferung, sondern auch die Netzentgelte (zumindest die Arbeitspreiskomponente und bei einer Reduzierung der Leistungsspitze auch die Leistungspreiskomponente) sowie die staatlich veranlassten Mehrbelastungen, da diese an die Arbeit gekoppelt sind.

Die Möglichkeiten, durch eine zeitliche Verlagerung des Stromverbrauchs (bei gleichbleibender Gesamtbezugsmenge) die Strombeschaffungskoten zu verringern, sind nach derzeitigen

Rechtslage begrenzt, insbesondere weil die staatlich veranlassten Mehrbelastungen ausschließlich nach der entnommenen Arbeit bemessen werden. Abhängig vom Strombeschaffungsmodell kann bei einer Verlagerung des Stromverbrauchs auf Zeiten mit starkem Angebot bzw. geringer Nachfrage zumindest ein geringerer Preis für die eigentliche Stromlieferung erreicht werden. Reduziert sich durch die zeitliche Verlagerung die Jahreshöchstlast, so verringert sich auch die Leistungspreiskomponente des regulären Netzentgelts. Daneben kennt die Strom-Netzentgeltverordnung (StromNEV) verschiedene Privilegierungstatbestände bei besonderen Konstellationen der Netznutzung, in denen Anspruch auf ein besonderes, gegenüber dem allgemeinen Netzentgelt reduziertes Netzentgelt besteht. Zu nennen ist hier insbesondere das besondere Netzentgelt bei atypischer Höchstlast (§ 19 Abs. 2 Satz 1 StromNEV), das bei einer Mindestverlagerung der Höchstlast zu einer Netzentgeltreduzierung um bis zu 80 % führen kann.

Eigenerzeugung von Strom

Erzeugt ein Wasserversorger, z. B. mittels Wasserkraftwerken, selbst Strom, so ist es für die Wirtschaftlichkeit dessen von entscheidender Bedeutung, inwieweit hierdurch die bei der Strombeschaffung entstehenden Kosten vermieden werden können und inwieweit die Stromerzeugung (im weitesten Sinne) gefördert wird. Nach den hierfür einschlägigen rechtlichen Regelungen hängt dies wiederum davon ab, ob der erzeugte Strom verkauft oder zur Eigenversorgung am Standort der Erzeugung oder einem anderen Standort genutzt wird.

Verkauf des erzeugten Stroms

Soweit der erzeugte Strom verkauft wird, muss für den Eigenbedarf weiterhin Strom beschafft werden, so dass sich die Strombeschaffungskosten nicht ändern. Stattdessen wird für den verkauften Strom aber eine Vergütung gezahlt. Zusätzlich kommt bei Erzeugung des Stroms aus erneuerbaren Energien eine Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Betracht. Klassische Wasserkraftanlagen können grundsätzlich eine solche Förderung in Anspruch nehmen. Für Turbinen im Wasserverteilungssystem gilt dies jedoch nur, wenn diese ein natürliches Gefälle ausnutzen, also der Strom nicht zuvor auf das Niveau der Turbine gepumpt wurde. Werden nicht alle Netzebenen in Anspruch genommen, so kommt auf Netzentgeltebene zudem ein Entgelt für dezentrale Einspeisung (§ 18 StromNEV; auch vermiedene Netzentgelte) in Betracht. Dieses kann jedoch nicht neben der EEG-Vergütung gezahlt werden; zudem ist eine gänzliche Abschaffung bis 2030 geplant.

Eigenversorgung am Standort der Erzeugung

Wird der erzeugte Strom zur Eigenversorgung genutzt, so entfallen für die entsprechenden Mengen die Strombeschaffungskosten einschließlich der Netzentgelte und derjenigen staatlich veranlassten Mehrbelastungen, welche an die Netzentgelte gekoppelt sind, also insbesondere die Konzessionsabgabe, der KWK-Aufschlag und die Umlage für individuelle Netzentgelte. EEG-Umlage und Stromsteuer fallen dagegen grundsätzlich auch im Falle der Eigenversorgung an, wobei die gesetzlichen Regelungen jeweils eine Reihe von Ausnahmen vorsehen.

Seit dem EEG 2014 ist die Eigenversorgung nicht mehr generell von der EEG-Umlage befreit. Die Befreiung gilt vielmehr nur für die in § 61a EEG 2017 genannten Fälle, zu denen u. a. der Kraftwerkseigengebrauch und Stromerzeugungsanlagen mit einer installierten Leistung von höchstens 10 kW für höchstens 10 MWh selbst verbrauchten Strom pro Kalenderjahr für einen Zeitraum von 20 Jahren gehören. Grundsätzlich sind auch bisher befreite Bestandsanlagen weiterhin von der EEG-Umlage befreit. Werden Bestandsanlagen modernisiert, so gilt dies jedoch nur noch sehr eingeschränkt. So darf bei vor dem 01.01.2018 erfolgender Modernisierung die Leistung um nicht mehr als 30 % erhöht werden. Bei nach diesem Zeitpunkt erfolgenden Modernisierungen fällt generell eine EEG-Umlage in Höhe von 20 % und bei leistungserweiternden Modernisierungen die volle EEG-Umlage an. Für neue Erneuerbare-Energien-Anlagen und hocheffiziente KWK-Anlagen mit einem Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % ist die EEG-Umlage auf den eigenerzeugten und -verbrauchten Strom auf 40 % begrenzt (§ 61b EEG 2017).

Auch von der Stromsteuer ist der zur Eigenversorgung entnommene Strom nur ausnahmsweise, namentlich in den in § 9 Abs. 1 StromStG geregelten Fällen, befreit. Zu nennen ist insbesondere die Stromsteuerbefreiung bei dezentraler Stromerzeugung in kleinen Anlagen (§ 9 Abs. 1 Nr. 3 StromStG). Die Befreiung setzt insbesondere voraus, dass der Strom in einer Anlage mit einer elektrischen Nennleistung von bis zu 2 MW erzeugt wird. Als nur eine Anlage gelten dabei auch mehrere unmittelbar miteinander verbundene Stromerzeugungseinheiten an einem Standort und insbesondere auch Anlagen in Modulbauweise, die sich im selben baulichen Objekt befinden (§ 12b Abs. 1 StromStV; so genannte Verklammerung). Auch Erzeugungsanlagen an unterschiedlichen Standorten können stromsteuerrechtlich als nur eine Anlage anzusehen sein (§ 12b Abs. 2 StromStV). Daneben ist auch so genannter grüner Strom aus grünen Netzen von der Stromsteuer befreit (§ 9 Abs. 1 Nr. 1 StromStG). Dies setzt voraus, dass der Strom aus einem ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energieträgern gespeisten Netz oder einer entsprechenden Leitung entnommen wird, wobei Strom aus Wasserkraftanlagen mit einer installierten Generatorleistung über zehn Megawatt ausgenommen ist (vgl. § 2 Nr. 7 StromStG). Schließlich ist auch zur Stromerzeugung entnommener Strom sowie in

Notstromanlagen erzeugter Strom von der Stromsteuer befreit (§ 9 Abs. 1 Nr. 2 u. Nr. 4 StromStG).

Eine Förderung nach dem EEG 2017 kommt auch bei der Erzeugung des zur Eigenversorgung genutzten Stroms mittels erneuerbarer Energien nicht in Betracht, da dies eine Einspeisung und Veräußerung des Stroms voraussetzen würde. Auch eine Förderung nach anderen energierechtlichen Regelungen ist nicht vorgesehen.

Eigenversorgung an einem anderen Standort

Wird der selbst erzeugte Strom zur Eigenerzeugung an einem anderen Standort genutzt, so bestehen gegenüber der Nutzung am Standort der Erzeugung einige Besonderheiten.

Auch hier entfallen die Strombeschaffungskosten für den weniger bezogenen Strom. Netzentgelte sind allerdings dennoch zu zahlen, da der Strom durch das Netz der allgemeinen Versorgung transportiert wird. Daher fallen neben den übrigen staatlich veranlassten Mehrbelastungen auch die an die Netzentgelte gekoppelten staatlich veranlassten Mehrbelastungen an. Zusätzliche Einschränkungen ergeben sich zudem bei den Ausnahmen von der EEG-Umlage und der Stromsteuer.

So führt die Definition des Eigenverbrauchs im EEG 2017 dazu, dass bei einer Durchleitung des Stroms durch ein Netz der allgemeinen Versorgung begrifflich kein Eigenverbrauch vorliegt (vgl. § 3 Nr. 19 u. Nr. 35 EEG 2017). Dementsprechend scheidet bei der Eigenversorgung an einem anderen Standort die Befreiung von der EEG-Umlage nach § 61a EEG 2017 sowie die reduzierte EEG-Umlage für hocheffiziente Erneuerbare-Energien- und KWK-Anlagen nach § 61b EEG 2017 aus. Eingeschränkt ist zudem die Befreiung von Bestandsanlagen von der EEG-Umlage. Bei Bestandsanlagen, die ab dem 01.09.2011, aber vor dem 01.08.2014 betrieben wurden oder vor dem 23.01.2014 nach Bundesrecht genehmigt und vor dem 01.01.2015 genutzt wurden, ist eine Durchleitung durch das Netz der allgemeinen Versorgung für die Befreiung nur dann unschädlich, wenn der Strom im räumlichen Zusammenhang mit der Erzeugungsanlage entnommen wird (§ 61d EEG 2017). Bei Modernisierung von vor dem 01.09.2011 in Betrieb genommenen Bestandsanlagen ist es für die Befreiung von der EEG-Umlage notwendig, dass die Entnahme im räumlichen Zusammenhang der Erzeugung erfolgt oder die Erzeugungsanlage auf dem Betriebsgrundstück des Letztverbrauchers errichtet wurde (§ 61d Abs. 4 Nr. 2 und Nr. 3 EEG 2017).

Die Befreiung von der Stromsteuer für Grünen Strom aus grünen Netzen (§ 9 Abs. 1 Nr. 1 StromStG) scheidet nach Auffassung der Finanzverwaltung bei der Eigenversorgung an einem anderen Standort von vornherein aus, da das Netz der allgemeinen Versorgung, über das der Strom transportiert wird, nicht ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energien gespeist

wird. Eine Stromsteuerbefreiung für Strom aus kleinen Anlagen (§ 9 Abs. 1 Nr. 3 StromStG) ist nur möglich, wenn der Strom im räumlichen Zusammenhang mit der Erzeugung entnommen wird. Die Durchleitung durch das Netz der allgemeinen Versorgung schließt einen solchen räumlichen Zusammenhang nicht per se aus. Entscheidend ist seit der Änderung der Stromsteuerverordnung (StromStV) im Jahre 2016 vielmehr allein, ob sich die jeweilige Entnahmestelle in einem Radius von bis zu 4,5 km um die jeweilige Stromerzeugungseinheit befindet (§ 12b Abs. 5 StromStV).

Eine Förderung nach dem EEG 2017 ist bei der Eigenversorgung an einem anderen Standort mangels Vermarktung des Stroms gleichfalls nicht möglich. In Frage kommt jedoch das Entgelt für dezentrale Einspeisung nach § 18 StromNEV (vermiedene Netzentgelte), wenn zum Transport vom Standort der Erzeugung zur Entnahmestelle nicht alle Netzebenen genutzt werden. Dieses soll allerdings bis 2030 abgeschafft werden.

Vermarkung von Flexibilität

Flexibilitäten bei Verbrauch und Erzeugung können insbesondere als so genannte Regelenergie vermarktet werden.

Um das physikalische Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch aufrecht zu erhalten, beschaffen die Übertragungsnetzbetreiber Regelenergie (vgl. § 13 Abs. 1 Nr. 2, § 14 EnWG). Man unterscheidet drei Regelenergiearten: die Primärregelung, die Sekundärregelung und die Minutenreserve. Alle drei Regelenergiearten können als zusätzliche Einspeisung, Reduzierung des Bezugs oder Reduzierung der Einspeisung auftreten (positive oder negative Regelleistung) (vgl. § 6 Abs. 3 StromNZV).

Die Übertragungsnetzbetreiber schreiben die jeweilige Regelenergieart im Rahmen einer gemeinsamen regelzonenübergreifenden anonymisierten Ausschreibung über eine Plattform aus. Das Ausschreibungsverfahren ist in Festlegungen der Bundesnetzagentur näher geregelt. Nach derzeitigen Überlegungen der Bundesnetzagentur sollen die bestehenden Vorgaben an die Verlustenergieausschreibung modifiziert werden, um auch kleineren Anbietern eine Teilnahme zu ermöglichen und um insbesondere auch die Abgabe flexiblerer Angebote zu erreichen.

Zu beachten ist, dass die Vermarktung von Regelenergie auch nachteilige Effekte haben kann. So führt z. B. das Anbieten von negativer Regelenergie grundsätzlich zur Abnahme von Strom aus dem Netz, für die Netzentgelte und die staatlich veranlassten Mehrbelastungen anfallen.

II.2.2.5 Zusammenfassung der rechtlichen Rahmenbedingungen

Der geltende Rechtsrahmen, d. h. insbesondere das für den Talsperrenbetrieb relevante öffentliche Wasserrecht und das die Wasseraufbereitung und -verteilung betreffende Wasserversorgungsrecht, ermöglicht in der Regel die Umsetzung technisch möglicher und sinnvoller energetischer Optimierungsmaßnahmen im Wasserversorgungsystem. Im Einzelfall können sich aber Grenzen ergeben.

In wirtschaftlicher Hinsicht setzt das Energierecht Maßnahmen, welche über eine reine Reduzierung des Stromverbrauchs hinausgehen, also einer zeitlichen Flexibilisierung des Strombedarfs und einer zusätzlichen Stromerzeugung Grenzen. Im Hinblick auf die Flexibilisierung resultieren diese vor allem daraus, dass die Netzentgelte überwiegend und die staatlich veranlassten Mehrbelastungen ausschließlich nach der Arbeit, also dem Stromverbrauch bemessen werden, also nicht danach, ob der Stromverbrauch zu energiewirtschaftlich wünschenswerten Zeiten erfolgt. Eine zusätzliche Stromerzeugung erscheint insbesondere deshalb wirtschaftlich nur begrenzt attraktiv, weil auch die Eigenversorgung zunehmend mit Kosten wie der EEG-Umlage und Stromsteuer belastet wird und zudem nach dem EEG förderfähige Wasserkraft nur bei Nutzung eines natürlichen Gefälles und bei Verkauf des Stroms vorliegt. Zusätzliche Hürden ergeben sich daraus, dass die energierechtlichen Regelungen aufgrund der Vielzahl kaum aufeinander abgestimmter Gesetze und deren häufiger Änderung äußerst komplex sind. Sie stellen sich daher in der Praxis der Wasserversorger als nur schwer handhabbar dar, weil energiewirtschaftliche Fragen stets auch nur ein Aspekt im Rahmen der Kernaufgabe der Wasserversorgung sein können.

II.2.3 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Die Sorge um die Einbindung der Bürgergesellschaft, ihrer Anliegen und Bedenken, gehört zum Selbstverständnis moderner Demokratie. Politik und Wirtschaft folgen auf allen Ebenen immer mehr den Ansprüchen der Bürgerschaft nach Einbindung in Entscheidungsprozesse und der Gestaltung ihrer Lebenswelt. Besonders große und ungewisse Infrastrukturvorhaben mit ihren Folgewirkungen und Nebenwirkungen werden oftmals von Bürgerprotesten begleitet („Energiewende“, „right2water“, Flughafen- und Bahnhofsbauten). So haben auch Entscheidungsträger längst erkannt, dass ein häufig als elitär empfundener Zusammenschluss aus Politik und InteressensvertreterInnen im Laufe des gesellschaftlichen Wandels durch einen konsensorientierten Ansatz mit frühzeitiger Beteiligung der betroffenen BürgerInnen ersetzt werden muss.

Bürgerbeteiligung ist die „essenzielle Voraussetzung für eine zügige Umsetzung“ energiewirtschaftlicher Vorhaben (Sichere Energieversorgung 2011). Nur wenn gesellschaftliche Akteure die anstehenden Umstrukturierungen in ihrem Umfeld auch selbst als sinnvoll erkennen und ihre eigenen Vorstellungen in die Innovationsprozesse einspeisen können, werden sie bereit sein, den Optimierungsprozess und die z.T. einschneidenden Planungsentscheidungen zustimmend zu begleiten (WBGU 2011). Mit dieser partizipativen Dynamik führt das soziale Lernen, die Kompetenzvermittlung und Wissensbildung („Empowerment“) innerhalb der Bürgerschaft sowie die Pluralität der Perspektiven zu größerer Kreativität in der Entscheidungsfindung, sodass auch Politik und Wirtschaft von effektivem Informationsgewinn profitieren.

Die Sensibilität der BürgerInnen wächst besonders bei Umwelt- und Technikkonflikten mitunter durch einen fortführenden gesellschaftlichen Wandlungsprozess in der Energiewende, der Aufhebung klassischer Sozialstrukturen und der medialen Aufmerksamkeit stetig an. Dabei sind zwar die wichtigen Sektoren der Wasseraufbereitung, Wasserversorgung und Entsorgung solange im Bereich des Unsichtbaren, bis sichtbare, spürbare Veränderungen auftreten oder eingeleitet werden. BürgerInnen machen jedoch im Bereich Wasser auch sehr wohl Ansprüche geltend und betrachten dieses als „ein ererbtes Gut […], das geschützt, verteidigt und entsprechend behandelt werden muss“ (Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG). Aufgrund der Vorstellung von Wasser als endliches Gut in kollektivem Besitz entstehen Konfliktfelder zwischen Bürgerschaft und Wasserversorger. Entscheidungsprozesse in der Wasserwirtschaft mit ihren politischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen wollen demnach trotz der technischen Komplexität von der Bürgerschaft in Deutschland mitgestaltet werden.

Eine erfolgreiche energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems in ENERWA erforderte daher einen kooperativen und konsensorientierten Prozess, der die Erwartung, Akzeptanz und Mitgestaltungsbereitschaft der Bürgerschaft aufgreift, evaluiert und mit in die energiewirtschaftliche Handlungsstrategie der energetischen Optimierung einbindet.

Zu diesem Zwecke wurde eine eingehende Literaturrecherche von nationalen und internationalen Publikationen durchgeführt. Diese Literaturrecherche ermittelte den bisherigen Stand der Forschung und Wissenschaft im Bereich von wasserwirtschaftlichen und technischen Projekten in Bezug auf Bürgerbeteiligung. Eine Netzwerk- und Datenbankanalyse ergänzte den Prozess mit einer Sammlung und Evaluation der durchgeführten Bürgerbeteiligungsverfahren. Parallel wurde eine Abstimmungssoftware „Politon“ zur Verwendung im Verfahren entwickelt. Es wurden Stakeholder identifiziert und deren Anforderungen und Fachkompetenz in das Verfahren integriert. Das Bürgerbeteiligungsverfahren wurde im Format der Planungszelle mit 54 aleatorisch ausgewählten BürgerInnen konzipiert und durchgeführt. Den Abschluss bildete das

Bürgergutachten, in dem die Ergebnisse des gesamten Verfahrens im Detail dargestellt wurden.

II.2.3.1 Literaturrecherche und Datenbankanalyse

Die Untersuchung von gesellschaftlichen Rahmenbedingungen erforderte eine grundlegende Analyse der wissenschaftlichen Forschung in der nationalen und internationalen Literatur, die sich mit den Themenkomplexen Wasserwirtschaft, Energetische Optimierung, Energiewende und gesellschaftlicher Wandel, Infrastrukturprojekte und weitere – vor allem bezüglich Bürgerbeteiligung beschäftigen. Im Laufe der Literaturanalyse wurden Monographien, Sammelbänder, Fachzeitschriftenartikel und Berichter diverser Institutionen ausgewertet.

Beteiligt an der Debatte, speziell zum energetischen Optimierungsprozess sowie der Wasserwirtschaft im Allgemeinen, sind vor allem Erzeuger und Verteiler von Energie und Wasser, wie auch politische Akteure, Verbraucher und zivilgesellschaftliche Organisationen. Eine eingehende Literaturrecherche hat jedoch ergeben, dass auf dem Gebiet Wasserwirtschaft und Bürgerbeteiligung aus wissenschaftlicher Sicht erheblicher Forschungsbedarf besteht. So wurde festgestellt, dass eine Eingrenzung der Recherche auf Partizipationsverfahren in der Wasserwirtschaft nur wenige Veröffentlichungen als Untersuchungsgegenstand liefert. Besonders der Bereich empirische Forschung und Fallanalysen stellt sich als äußerst lückenhaft dar.

Sowohl in empirischen als auch in theoriebezogenen wissenschaftlichen Publikationen im Themengebiet Wasserwirtschaft liegt der Fokus häufiger auf Stakeholderbeteiligungen (Castelletti und Sonsini-Sessa 2006; Grover und Krantzberg 2013). Andererseits versuchen Wissenschaftler die Effektivität von Beteiligungsverfahren auf umweltpolitische Entscheidungsprozesse zu messen. Dabei lassen sich zwei Ansätze erkennen, die sich entweder auf die Frage der „Outputs“ oder der „Outcomes“ fokussieren (Newig et al 2012):

- Die Beteiligung der BürgerInnen und der damit einhergehende Informationsgewinn sollen zu ökologisch und umweltpolitisch besseren Entscheidungen führen (Outputs).
- Die Umsetzung umweltpolitischer Vorhaben, die Bereiche der Compliance und Implementierung, werden durch Bürgerbeteiligung bei politischen Entscheidungen effektiver (Outcomes).

In der Literatur findet sich weitgehend die Auffassung, dass eine auf Konsens und auf konstruktivem Dialog basierende Beteiligung aller Betroffenen in wasserpolitischen Vorhaben zu einer effektiveren Entscheidungsfindung und Umsetzung verhilft. Sie führt zu einer gut fundierten Wissensbildung der Entscheidungsträger, wobei kreative, neue Alternativen entstehen. Partizipation in wasser- und umweltpolitischen Vorhaben ermöglicht den BürgerInnen ihre be-

vorzugte Zukunft zu artikulieren (Delli Priscoli 2004), so dass Entscheidungen nicht nur technisch oder nur politisch getroffen werden. Ebenso wird ein positiver Zusammenhang zwischen Partizipation und der Akzeptanz umweltpolitischer Entscheidungen festgestellt. Im Hinblick auf die Auswirkungen auf ökologische Nachhaltigkeit zeigen wissenschaftliche Untersuchungen, dass der „…gesellschaftliche und problembezogene Kontext mit darüber entscheidet, ob Partizipation eine ökologisch nachhaltige Entwicklung stärkt…“ (Newig und Fritsch 2001: 61).

Die Literaturrecherche wurde durch eine eingehende Datenbankanalyse ergänzt. Hier wurden dokumentierte Bürgerbegehren (BB) und Bürgerentscheide (BE) zum Themengebiet der Wasserwirtschaft untersucht. Besonders die Datenbank Bürgerbegehren sowie die im Projektzeitraum an anderer Stelle entstandene Datenbank „Energiepolitische Bürgerbeteiligungsverfahren in NRW“ wurden eingehend zu durchgeführten Verfahren geprüft. In der Datenbank Bürgerbegehren ließen sich über 7.000 Fälle vorfinden. Zu Beginn des Projekts ENERWA konnte nur ein geringer Teil dem Gebiet der Wasserwirtschaft zugeordnet werden; die Anzahl und Vielfältigkeit der Verfahren, die in die Datenbank eingepflegt werden, steigt jedoch stark an. Tabelle 41 im Anhang IV.1 enthält eine Auswahl an Bürgerbeteiligungsverfahren rund um das Thema Wasser aus der Datenbank.

Die Unzulässigkeit zahlreicher Bürgerbegehren lässt sich größtenteils auf gesetzliche Regelungen auf kommunaler und Landesebene zurückführen: Fristüberschreitungen, zu wenige Unterschriften und Ausschluss von Themen waren die Hauptgründe. Auf der anderen Seite sind die anwendungsfreundlichen Regelungen im Bundesland Bayern mitunter ein Grund für die Vielzahl der Beteiligungsmaßnahmen.

In einer deutschlandweiten Analyse lassen sich besonders in den Jahren 1995 bis 1999 überdurchschnittlich viele Verfahren verzeichnen (Abbildung 14). Nahezu 40 % aller erfassten Verfahren in der Datenbank Bürgerbegehren fanden nach 1995 in Bayern statt. Auch im Themenbereich Wasser und Wasserenergie gab es überdurchschnittlich viele Verfahren in diesem Bundesland. Hintergrund hierfür ist die Einführung des Instruments in Bayern im Jahr 1995, in dem die meisten Verfahren stattfanden. Es bestand ein Reformstau in diesem Bundesland, der durch zahlreiche Bürgerbegehren und Bürgerentscheide abgebaut werden konnte. In anderen Bundesländern ließ sich ein solcher Einführungseffekt nicht beobachten.

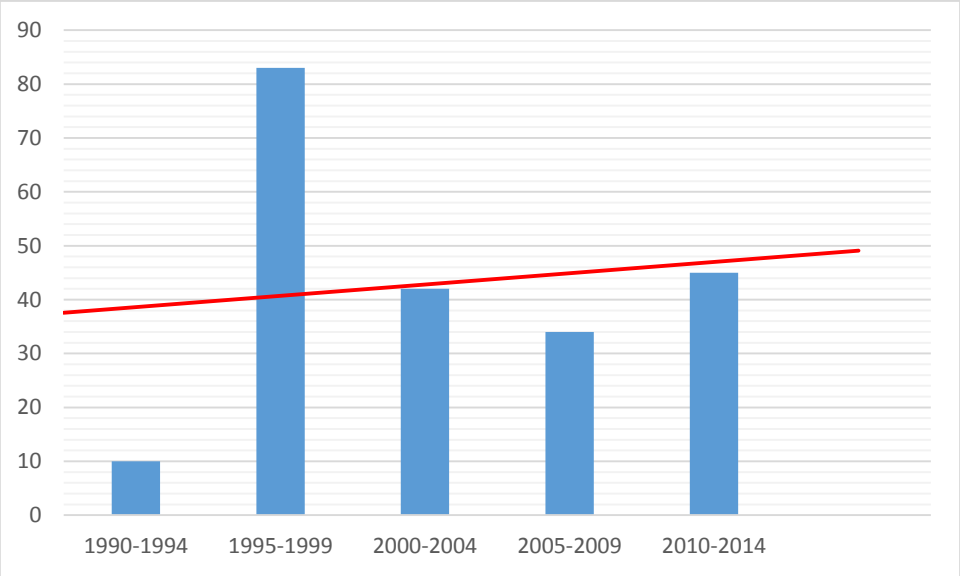


Abbildung 14: Anzahl Bürgerbegehren und Bürgerentscheide im Themengebiet Wasser

II.2.3.2 Das Verfahren der Bürgerbeteiligung

Bei dem Verfahren handelt es sich um die sogenannte Planungszelle, die in den 1970er Jahren vom Soziologieprofessor Peter C. Dienel an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelt wurde, um Planungsentscheidungen gleichermaßen transparent wie auch effektiv gestalten zu können. Inzwischen ist die Planungszelle als Instrument zur Bürgerbeteiligung als Verfahren nicht nur anerkannt, sondern ist in Fachkreisen bereits lange fest etabliert und wird von der lokalen bis sogar zur internationalen Ebene hin regelmäßig erfolgreich durchgeführt. In dem Bestreben, Bürgerinnen und Bürger an politischen Entscheidungsprozessen teilhaben zu lassen und hierzu auf deren Meinung, Erfahrung und Kompetenz zurückzugreifen, ist der Leitgedanke der Planungszelle wohl am besten ausgedrückt. Mit diesem Wunsch nach Beteiligung der Betroffenen und einer gemeinsamen Erarbeitung von konkreten Ideen und neuen Ansätzen mit empfehlendem Charakter wendet sich die Planungszelle ganz ausdrücklich gegen eine nur von „oben“ getroffene Planung. Eine Einbindung zivilgesellschaftlicher Akteure ist jedoch unverzichtbar um das Bürgerbeteiligungsverfahren an heutige Bedürfnisse anzupassen. Daher werden den Planungszellen zur inhaltlichen und konzeptionellen Unterstützung sogenannte Stakeholderverfahren vorangestellt, um die Expertise und Erfahrungen der zivilgesellschaftlichen Akteure mit ins Verfahren aufzunehmen.

Innerhalb des Projektes ENERWA war das Institut für Demokratie und Partizipationsforschung dabei als Durchführungsträger für die Vorbereitung, die Durchführung und die abschließende

Auswertung der Bürger-und Stakeholderverfahren verantwortlich. Ein Ziel für das BUW im Forschungsprojekt ENERWA war es auch, das Verfahren der Planungszelle einer Evaluation zu unterziehen und heraus zu finden, wie es an heutige Bedürfnisse und Standards angepasst werden kann. Die Analyse ergab, dass auf Seiten des Verfahrensablaufs innerhalb der Planungszellen ein computergestütztes Abstimmungssystem einerseits die Effektivität und Barrierefreiheit erhöht, andererseits multiple und in Echtzeit ablaufende geheime Abstimmungen ermöglicht (siehe Kapitel II.2.3.4).

II.2.3.3 Ablauf des Verfahrens

Stakeholderverfahren

Der eigentlichen Planungszelle wurde ein Stakeholderverfahren vorangestellt, da eine konsistente und sozial tragfähige Planung des Inputs von interessierten Verbände, Vereine, Bürgerinitiativen sowie von sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Meinungs- und Leistungsträgern bedarf. Bürgerbeteiligungsverfahren kommen daher nicht umhin, diese Gruppen einzubeziehen. Die Anforderungen dieser Gruppen und die sachkundigen Informationen, die sie beitragen, werden daher zusammengefasst und in das Verfahren integriert. Gleichwohl handelt es sich bei diesen Gruppen um meinungsstarke und interessierte BürgerInnen, nicht um einen repräsentativen Querschnitt der Bevölkerung. Gerade bei bereits feststehenden Meinungen und unabänderlichen Interessen erscheint es schwierig, gemeinwohl- und sachorientierte Lösungen allein durch Einbeziehung von Interessengruppen zu erreichen. Das Stakeholderverfahren dient vorwiegend zur inhaltlichen Unterstützung der Planungszellen. Aus dem Kreis der Stakeholder werden auch potentielle Experten für die Bürgerbeteiligung rekrutiert, um die größtmögliche Fachkompetenz in das Verfahren einzubinden.

Die in ENERWA durchgeführte Netzwerkanalyse diente hauptsächlich als Vorbereitung auf das Stakeholderverfahren. So wurden besondere InteressensvertreterInnen und zivilgesellschaftliche Akteure identifiziert und ihre Verknüpfungen zueinander sowie ihre Ansprüche und Erwartungen in dem Stakeholderverfahren ausgearbeitet.

Die Stakeholderbeteiligung in ENERWA fand am 02.September 2015 im Hauptgebäude des Wupperverbands in Wuppertal statt. An diesem ca. dreistündigen, moderierten Prozess nahmen 16 VertreterInnen aus den Bereichen Wasserwirtschaft, Umweltschutz, Touristik und organisierter Freizeitgestaltung, wie etwa AnglerInnen, SeglerInnen, etc., teil. Dort erhielten sie Gelegenheit, ihre Zustimmung und/oder Probleme mit dem Verfahren kund zu tun sowie Empfehlungen für die Besetzung einiger Vortragsthemen auszusprechen. Aufgrund des Stakehol-

derverfahrens konnte die Planungszelle noch facettenreicher und verständlicher gestaltet werden. Der weitere Kontakt zu verschiedenen ExpertInnen zum Thema Wasser und ihre Einbindung in das Verfahren der Bürgerbeteiligung wurden ebenso gesichert.

Teilgenommen haben:

1. Untere Wasserbehörde (UWB) des Oberbergischen Kreis‘ (OBK)
2. Untere Landesbehörde (ULB) des Oberbergischen Kreis‘ (OBK)
3. Untere Wasserbehörde (UWB) des Rheinisch-Bergischen Kreis‘ (RBK)
4. Wasserversorger Wuppertaler Stadtwerke (WSW)
5. Rheinischer Fischereiverband
6. NABU Rheinisch-Bergischer Kreis
7. Biologische Station
8. Umweltamt OBK
9. Umweltschutz RBK
10. Natur-Arena Bergisches Land GmbH
11. I.G. Bever
12. Wupperverband
13. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH (IWW)
14. Fischereiberater Stadt Leverkusen und RBK
15. Tourismus-Büro Hückeswagen

Planungszelle

Der Leitgedanke der Planungszelle ist es, BürgerInnen Gelegenheit zu geben, ihre Meinung, ihre Lebenserfahrung und ihre Kompetenz konstruktiv in politische Entscheidungsprozesse einzubringen. Die Einbeziehung der BürgerInnen durch die Planungszelle bedeutet ausdrücklich keinen Ersatz, sondern eine Ergänzung der übrigen Planung. Die Ergebnisse der Planungszellen geben Aufschluss darüber, was für Veränderungsstrategien die BürgerInnen erwarten, welche Entscheidungen sie bereit sind, verantwortlich mitzutragen, und welche Maßnahmen sie aktiv mitgestalten wollen. Für die Entwicklung von gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der energetischen Optimierung des Gesamtwassersystems im Projekt ENERWA wurde die klassische Variante der Planungszelle mit den üblichen Kriterien angewandt.

Die TeilnehmerInnen der Planungszelle wurden in einem Zufallsverfahren (Aleatorik) aus den Einwohnermelderegistern der Städte Wermelskirchen, Hückeswagen und Burscheid ermittelt und per Post eingeladen. Die Zufallsauswahl ist ein Kernbestandteil des Verfahrens. Sie garantiert eine gleichberechtigte Teilnahme aller Bevölkerungsgruppen unabhängig von Geschlecht, Bildung oder Berufsstand. So werden in dem Verfahren auch Menschen erreicht, die sich sonst an politischen Veranstaltungen nicht beteiligen. Es erfolgt ein Austausch in der Bürgerschaft, der nicht vorausgesetzt werden kann. Die zufällige Auswahl der Teilnehmenden steigert auch die Akzeptanz in der Gesellschaft der in dem Verfahren herausgearbeiteten Ergebnisse in entscheidendem Maße. Im Projekt ENERWA wurden für die Teilnahme von zwei Gruppen zu je 25 Personen aus den drei teilnehmenden Städten zufällig ausgewählte 1.750 Personen eingeladen. Um Menschen des Alltags die Teilnahme an der Planungszelle zu erleichtern, wurde für den Zeitraum der Planungszelle den BürgerInnen Bildungsurlaub nach dem Arbeitnehmerweiterbildungsgesetz NRW (AWbG) ermöglicht. Das BUW ist hierfür von der VHS Bergisch Land zertifiziert. Durch diese besondere Qualifikation des BUW mussten die Teilnehmenden bei ihrem Arbeitgeber keinen privaten Urlaub beantragen. Die Teilnehmenden gaben lediglich ihre Daten an, das Antragsverfahren erledigte das BUW. Damit konnte ausgeschlossen werden, dass ausschließlich Personengruppen an der Planungszelle teilnehmen, die aufgrund unterschiedlicher Faktoren über ein hohes freiverfügbares allgemeines Zeitkontigent verfügen. Weitere mögliche Hindernisse der Teilnahme wurden durch Angebote von Mobilitätshilfen, Dolmetschern und Kinderbetreuung minimiert. Zusätzlich erhielten die Teilnehmenden eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 100,00 EUR.

An vier aufeinander folgenden Arbeitstagen bearbeiteten die Bürgergutachterinnen und Bürgergutachter das Thema Energetische Optimierung des Gesamtwassersystems unter dem Titel „Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen“ nach einem festgelegten und inhaltlich stringenten Programm, wobei die beiden Gruppen jeweils um eine Stunde zeitversetzt tagten (Tabelle 2). Das Programm blieb indes bei beiden Gruppen gleich. Das Arbeitsprogramm wurde auf Basis des im Arbeitspaket A.2 gesammelten Wissens entwickelt. So flossen die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und Datenbankanalyse, der Netzwerkanalyse sowie die Ergebnisse aus dem Stakeholderverfahren in Abstimmung mit den Projektpartnern in die inhaltliche Zusammensetzung der Arbeitseinheiten (AE). Einen besonderen Stellenwert im Arbeitsprogramm hatten die AE 05 Begehung der Talsperre und AE 12 Politiker- und Expertenhearing: Der Eindruck vor Ort vermittelte besser als jeder Vortrag ein Gefühl für wassertechnische Großbauten. Im Politikerhearing konnten die BürgerInnen ihre Anregungen und Meinungen direkt den entsprechenden Entscheidungsträgern mitteilen.

Tabelle 2: Der Ablaufplan „Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen

Tag 1, Mo. 02.11.	Tag 2, Di. 03.11.	Tag 3, Mi 04.11.	Tag 4, Do 05.11.
AE 01 Begrüßung / Vorstellung des Verfahrens	AE 05 Begehung der Talsperre	AE 09 Rechtliche Rahmenbedingungen Landes-, Bundes und Europarecht	AE 13 Modellentwicklung / Open Space
AE 02 ‚Wasser im Bergischen' – Zwischen Ereignis und Ressource	AE 06 Energetische Optimierung (II): Wasser in Talsperren und Fließgewässern	AE 10 Attraktion Wasser: Tourismus zwischen Naturschutzgebieten und Nutzflächen	AE 14 Gutachtenentwurf/ Bewertung / Fazit
AE 03 Wasser-Energie-Energiewende: Was heißt „energetische Optimierung"?	AE 07 Energetische Optimierung (III): Optimierung des Gebrauchs und Verbrauchs von Wasser	AE 11 Rückblick	
AE 04 Energetische Optimierung (I): Optimierung unter ökologischen Gesichtspunkten	AE 08 Ökologischer und ökonomischer Wert der Talsperre	AE 12 Politiker- und Expertenhearing	

Die BürgerInnen erhielten vertiefende Sachinformationen, welche Ihnen durch Fachleute aus der Wasserwirtschaft, der Forschung, Verbänden für den Naturschutz und der Politik vermittelt wurden. Durch den Expertenvortrag, ein weiterer Kernbestandteil der Planungszelle, wurde gewährleistet, dass nicht alleine auf Ebene des bei den BürgerInnen bereits verfügbaren Alltagswissens diskutiert und entschieden wurde; denn Bürgerbeteiligung benötigt – wie auch Verwaltungen und Stadträte – sachkundige Information durch ausgewiesene Fachleute. Da die Expertise umstritten ist, wurden unterschiedliche (Fach)Perspektiven in das Verfahren einbezogen. In einer Arbeitseinheit referierten zwei ExpertInnen zu dem jeweiligen Themengebiet, entweder mit kontroversen Standpunkten oder unterschiedlichen Blickwinkeln und lieferten so neben ihrem Wissen auch einen wichtigen Impuls für die anschließende Diskussion der Teilnehmenden. Durch die Hinzuziehung ausgewiesenen und pluralen Expertenwissens erfolgte eine Kompetenzvermittlung („empowerment"), die bei den BürgerInnen die Grundvoraussetzung für die thematische Auseinandersetzung mit einem komplexen Thema wie der Wasserwirtschaft schaffte.

Eine zweite Zufallsauswahl (‚Randomisierung') erfolgte in der Aufteilung in Kleingruppen. Hier wurde die unmoderierte Diskussion zu den neu erhaltenen Sachinformationen durch vorgegebene Fragestellungen in dem Themenfeld der AE strukturiert. Aufgrund der offenen Form der Kleingruppengespräche konnte erreicht werden, dass sich auch sonst eher wenig in Ge-

sprächsführung erprobte Personen an der Diskussion beteiligten. Da sich zudem die Kleingruppen nach jeder Arbeitseinheit mittels eines Rotationsverfahrens änderten, konnte die Bildung einer Meinungsführerschaft unterbunden und solcherart eine offene Diskussion erreicht werden. In der Diskussion wurde stets nach Lösungen im Sinne des Gemeinwohls gesucht und das Moderationsteam stand während der Kleingruppendiskussion für Rückfragen zur Verfügung. In der abschließenden Plenumsrunde wurden die Ergebnisse der verschiedenen Kleingruppenarbeiten vorgestellt und gesammelt. Nun wurden die Lösungsansätze durch eine Punktevergabe mittels der entwickelten Technologie „Politon“ von jedem Teilnehmenden bewertet und gewichtet. Die Ergebnisse dieser Bewertung wurden sofort anschaulich auf A0-Postern zur Betrachtung für dieTeilnehmenden dargestellt.

II.2.3.4 Die Software Politon als Hilfsmittel für Bürgerbeteiligungsverfahren

Politon ist eine Software, die zur Durchführung von modernen Bürgerbeteiligungsverfahren, im Rahmen des Projektes ENERWA entwickelt wurde. Sie ermöglicht einen benutzerfreundlichen, effizienten und vor allem anonymen Abstimmungsprozess an digitalen Endgeräten durch die Verfahrensteilnehmenden. Die TeilnehmerInnen nahmen ihre Bewertung und Priorisierung im Rahmen der Planungszelle „Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen“ auf den dazugehörigen Tablets vor und die Daten wurden auf mobilen Servern gefasst. Die Hardware wurde vom BUW zur Verfügung gestellt.

Mittels dieser Soft- und Hardwareausstattung konnten die beteiligten BürgerInnen präferierte Ergebnisse im Moderationsprozess mehrfach gewichten. Die Ergebnisse der Gesamtgruppe wurden nach dem Abstimmungsprozess mittels der mobilen Server direkt ausgewertet und präsentiert.

Das Herausarbeiten von spezifischen Empfehlungen, die eingehende Beschäftigung mit komplexen Themenbereichen und die Diskussion mit anderen Teilnehmenden sind die besonderen Merkmale von qualitativen Bürgerbeteiligungsprozessen und Präsenzverfahren, wie z.B. der Planungszelle. Im Vergleich zur gewöhnlichen Online Bürgerbeteiligung wird eine Vertrauensbeziehung zwischen Fachleuten und Moderation auf der einen Seite und den Teilnehmenden an dem Verfahren auf der anderen Seite aufgebaut. Ohne die positiven Eigenschaften der Präsenzbeteiligung aufzuheben, ermöglichte die digitalisierte Bürgerbeteiligung vor Ort mit Politon einen benutzerfreundlichen und anonymen Abstimmungsprozess innerhalb des Projektes ENERWA, der weitaus effizienter gestaltet wurde als mit analogen Modellen.

Während des gesamten Bürgerbeteiligungsverfahrens wurde Politon für die Moderation, Erläuterung des Ablaufs, Präsentation, Abstimmung sowie effiziente und schnelle Übertragung

der Ergebnisse verwendet. Kurzfristige Änderungen und Ergänzungen innerhalb des Programms und der Fragestellungen konnten leicht vorgenommen werden.

Unsere Evaluation nach den Bürgerbeteiligungsverfahren zeigte, dass drei Viertel der Teilnehmenden eine digitale Abstimmung mit Politon der analogen Abstimmung bevorzugen.

II.2.3.5 Ergebnisse der Bürgerbeteiligung

In fast jeder Arbeitseinheit wurde eine Bewertung der erarbeiteten Ergebnisse in Form einer Bepunktung der Empfehlungen durchgeführt. Die Teilnehmenden konnten je nach Fragestellung 3 oder 5 Punkte verteilen. Mit der Gewichtung fand eine Meinungsbildung statt, sodass neue Erkenntnisse, Gedanken, Abwägungen und Entscheidungen hervorgebracht wurden. Die Gewichtung wurde sowohl analog mit Flipcharts und Klebepunkten als auch mit der Software Politon und den dazugehörigen Tablets vorgenommen.

Die Ergebnisse des Beteiligungsverfahren wurden in drei Bereiche strukturiert dargestellt: Energetische Optimierung, Rechtliche Dimension und Politische Dimension.

Zentrale Forderungen und Empfehlungen der Bürgerinnen und Bürger im Bürgerbeteiligungsverfahren waren:

1. Energetische Optimierung

- Herstellung eines energieeffizienten Zusammenhangs zwischen Lastoptimierung und einem verbrauchsoptimierten Verhalten bei Wasserbereitstellung und -nutzung
- Erhaltung der Artenvielfalt in den Fließgewässern und Talsperren
- Nichtbeeinträchtigung der Wassergüte bzw. Qualität des Trinkwassers
- Nichtüberschreiten der ökologischen Belastbarkeit hinsichtlich der Wassertemperatur und Fließgeschwindigkeit für den Unterlauf

2. Rechtliche Dimension der Wasserwirtschaft

- Kontrollen in der Landwirtschaft müssen verschärft werden
- Gesetzliches Gülleverbot im Wassereinzugsgebiet
- Unabhängige Kontrollen der Wasserqualität sollen regelmäßig und vor allem unangemeldet stattfinden
- Pflicht zur Zusammenarbeit mit den Gesundheitsämtern sollte festgeschrieben werden wie der Verbraucherschutz und die gesundheitlichen Vorgaben
- Einführung eines verminderten Mehrwertsteuersatzes für Wasserversorger

3. Politische Dimension der Wasserwirtschaft

- Verbraucherschutz und gesundheitliche Vorgaben sollen verbessert werden

- Wasserversorgung soll nicht privatisiert werden
- TTIP (Transatlantische Freihandelsabkommen) soll keine Änderung der Trinkwasserqualität hervorbringen
- mehr Transparenz und Informationen: zentrale bundesweite Datenbank mit allen wichtigen Parametern und Qualitätswerten rund um das Thema Wasser, Trinkwasser und Trinkwasserversorgung ist wünschenswert

4. weitere Aspekte von Bedeutung

- Aufklärung der Verbraucher
- zukunftsorientiertes Management der Wasserbetreiber
- Sensibilisierung des Verbraucherverhaltens (durch Anreize)
- Reduzierung des Wasserverbrauchs

Weitere ausgewählte Ergebnisse aus der Bürgerbeteiligung sind in Anhang IV.1, Tabelle 42 aufgeführt.

Zum Abschluss der Planungszelle wurde eine soziodemographische Analyse der TeilnehmerInnen mithilfe eines freiwilligen Fragebogens durchgeführt. Dieser Fragebogen, den alle 54 TeilnehmerInnen ausfüllten, bietet Erkenntnisse zu Alter, Geschlecht, berufliche Tätigkeit, Bildungsabschluss, Haushaltsgröße (einschließlich Kinder) und Staatsbürgerschaft. Die Ergebnisse können Anhang IV.1 entnommen werden.

Mediale Begleitung und visuelle Aufbereitung

Durch intensiven Kontakt mit der Lokalpresse, sowie zahlreichen Pressemitteilungen, wurde das Verfahren während all seiner Durchführungsschritte umfänglich bekannt gemacht. Dies ließ sich auch an der überdurchschnittlich hohen Resonanz des Teilnahmeinteresses festmachen. Insgesamt sind etwa zehn Presseartikel zum Verfahren erschienen, einschließlich im Remscheider Generalanzeiger und in der Bergischen Morgenpost, die sich vor allem mit der Beteiligung der BürgerInnen unter dem Motto „Bürger diskutieren Wasser im Bergischen“ befassten.

Neben dem Pressekontakt, wurde das Verfahren durch ein Filmteam begleitet. In den produzierten Filmen wurden das Stakeholderverfahren, die geführten Interviews und das Verfahren in seinem Ablauf und seiner Zielperspektive dargestellt. Die Filme sind frei bei YouTube zugänglich und wurden in sozialen Netzwerken, sowie auf zahlreichen anderen Webseiten veröffentlicht. Im Rahmen anderer Veranstaltungen und Tagungen wurden die Filme auch gezeigt.

Gutachten

Die Empfehlungen der BürgerInnen wurden in einem Gutachten zusammengefasst und dargestellt. Dabei stützen sich diese Empfehlungen auf die erarbeiteten Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitseinheiten der Planungszelle. Diese wurden in Form von Zahlen, Tabellen und unterstützenden Texten dezidiert und umfänglich dargestellt. Um Fehlern oder inhaltlichen Verzerrungen der Ergebnisse bei der Erstellung des Gutachtens vorzubeugen, wurde eine Korrekturschleife mit BürgergutachterInnen in den Prozess zwischengeschaltet. Neben dieser Dokumentation und Auswertung der Ergebnisse der vier Tage, wurde in dem Gutachten die Planungszelle in ihrem Ablauf und ihrer Funktionsweise selbst noch einmal erläutert.

Das Gutachten wurde in der ersten Auflage 300 Mal gedruckt und den Stakeholdern, politischen EntscheidungsträgerInnen und den Teilnehmenden des Verfahrens zukommen gelassen. Aufgrund des großen Interesses wurde ein erneuter Druck mit 250 Exemplaren beauftragt. Daneben wurde es im Rahmen einer öffentlichen, pressewirksamen Veranstaltung den BürgerInnen der Städte Hückeswagen, Burscheid und Wermelskirchen sowie den Bürgermeistern vor Ort übergeben. Das Gutachten ist mit folgender ISBN-Nummer: 978-3-946781-00-4 versehen; es steht in Universitätsbibliotheken zur Ausleihe zur Verfügung und kann auch digital heruntergeladen werden. In Anhang IV.1, Tabelle 43 wurden alle Projektpartner, Institutionen und Personen aufgelistet, die das Gutachten in der Druckfassung erhalten haben.

II.3 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer - AP B1

II.3.1 Wirkungen einer energieoptimierten dynamisierten Talsperrenbewirtschaftung auf die Wasserqualität im Staukörper

Ziel der Untersuchungen an Talsperren war es, die Wirkung eines dynamischen Talsperrenbetriebes unter chemisch-physikalischen, biologischen und ökologischen Gesichtspunkten zu bestimmen. Als dynamisierte Bewirtschaftung oder dynamischer Talsperrenbetrieb wird die mengenmäßig zeitlich variable Entnahme des Rohwassers aus dem Talsperrenkörper bezeichnet (Sydro Consult, 2004), beispielsweise zur Anpassung der energetischen Nutzung des Wasserpotenzials zu Zeiten hoher Nachfrage und hoher Strompreise. Um möglichst alle von einem dynamischen Talsperrenbetrieb betroffenen wasserwirtschaftlichen Komponenten bewerten zu können, wurden sowohl während des IST-Zustands als auch während eines dynamischen Talsperrenbetriebes Untersuchungen im Staukörper und im unterliegenden Fließgewässer durchgeführt.
In regionalen Fallstudien wurden einerseits die Wirkungen der Dynamisierung unter chemischen, biologischen und ökologischen Gesichtspunkten untersucht, andererseits die energetischen Potenziale unter Berücksichtigung ökonomischer Standardszenarien ermittelt und bewertet. Darauf aufbauend wurden regionale Empfehlungen und ökologisch, ökonomisch und juristisch belastbare Ausbaupotenziale abgeleitet.

II.3.1.1 Untersuchungen des Zustands im Staukörper

Im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme an der Biggetalsperre konnte ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Dynamisierung des Abflussregimes durchgeführt und mit einem Monitoring chemisch-physikalischer Kenngrößen begleitet werden. In Zusammenarbeit mit dem Ruhrverband erfolgte eine gezielte Steuerung des Abflusses über den üblichen Betrieb hinaus (Amplitude, zeitliche Dynamik), um die Einflüsse einer energetischen Wassernutzung auf die Wasserqualität des Staukörpers untersuchen zu können. So wurden in einem Zeitraum von 6 Monaten der Stauspiegel des Biggesees um 12 m gesenkt und das Stauvolumen um ca. 30 % von 130 Mio. m³ auf ca. 91 Mio. m³ reduziert. Das Monitoring-Programm beinhaltete die Aufnahme von Tiefenprofilen der in Tabelle 3 aufgelisteten chemisch-physikalischen Parameter sowohl während starker Wasserabgaben (bis zu 30 m³/s) als auch während geringer Wasserabgaben (< 2 m³/s) aus dem Grundablass. Die Ergebnisse wurden mit Messungen an Talsperren ohne Dynamisierung verglichen.

Um das Monitoring möglichst effizient zu gestalten, wurden den Messungen theoretische Überlegungen vorangestellt. Anhand der Auswertung bereits bestehender chemisch-physikalischer Daten verschiedener Talsperren und unterstützt durch Literaturstudien sollten potenzielle Auswirkungen eines dynamisierten Talsperrenbetriebes auf die Rohwasserqualität identifiziert und bewertet werden. Alle potenziellen Auswirkungen wurden nachfolgend durch die Messungen im Staukörper der Biggetalsperre und durch die Auswertung langjähriger chemisch-physikalischer Daten des Talsperren-Betreibers (Ruhrverband) überprüft.

Tabelle 3: Chemisch-physikalische Parameter des Monitoring-Programms

Parameter	Messbereich und Einheit
Wasserstand (Druck)	0… 100/200 mWS
Temperatur	-5…50 °C
Elektrische Leitfähigkeit **gelöste Stoffe** **Salinität** **Wasserdichte**	0…200 mS 0…200.000 mg/l 0…70 988…1060 kg/l
pH	0…14
Trübung **- suspendierte Stoffe**	0...1000 NTU ca. 5-facher Messbereich Trübung mg/l
Sauerstoff **-Sättigung** **-Konzentration**	 0…400 % 0…40 mg/l

Ziele der Untersuchungen waren:

- Überprüfung von Stabilität und Verteilung der thermischen Schichtung
- Nachverfolgung der horizontalen und vertikalen Verteilung von Schwebstoffen
- Feststellung von chemisch-physikalischen Prozessen in verschiedenen Tiefen des Staukörpers

Talsperren werden anhand folgender Parameter klassifiziert: Trophiegrad, Höhenlage, Chemismus im Staukörper, Schichtungsverhalten des Stausees, hydrologische Randbedingungen aber auch Bewirtschaftungsart der Talsperren bzw. Bewirtschaftungscharakteristika. Von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) wurden zur Kategorisierung von Gewässern für Seen und Flüsse Steckbriefe erstellt, welche die Gewässer nach allgemeinen Typologien klassifiziert. Diese Steckbriefe können z.B. auf der Internetseite des Umweltbundesamtes abgerufen werden.

Die folgende Auflistung bietet eine Übersicht über eine Vielzahl verschiedener Parameter des Staukörpers der Biggetalsperre inklusive der Einordnung nach o.g. Steckbriefen und ermöglicht eine bessere Einordnung der Untersuchungen im Staukörper:

Einzugsgebiet [km²]:	287,2
Speichervolumen [Mio. m³]:	144,0
Ausbaugrad [1/a]:	0,72
Typologie (nach LAWA):	8
Schichtungshäufigkeit [1/a]:	1 – 2 (monomiktisch bis dimiktisch)
Trophiegrad:	mesotroph
Höhe Mindeststau [m ü. NN]:	263,3
Höhe Vollstau [m ü. NN]:	307,5
Höhe Auslauf [m ü. NN]:	254,47
Δ Vollstau/Auslauf:	53,03
min. geod. Höhe UW [m ü. NN]:	286,20
Ausgleichbecken [Mio. m³]:	0,84 (Stausee Ahausen)

Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Talsperren ohne Vorsperren findet nachfolgend eine kurze Erläuterung der Einschichtung von Zuflüssen in Staukörper statt. Zuflüsse sind ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung von chemisch-physikalischen Prozessen im Staukörper. Sie transportieren vor allem Nährstoffe aus den oberhalb befindlichen Einzugsgebieten in den Staukörper. Dies beeinflusst unter anderem den Nährstoff- und Sauerstoffhaushalt.

Die Einschichtung des Zulaufs erfolgt in der Schicht des Wasserkörpers gleicher Dichte (LAWA, 1990). Im Frühjahr fließt der Zufluss daher oberflächennah in den Wasserkörper ein, während der sommerlichen Stagnationsphasen kommt es zur metalimnischen Einschichtung. Dichtebedingte Einschichtungen im Tiefenwasser sind selten und allenfalls im Winter zu erwarten (Ford, 1991). Mit dieser Kenntnis können nährstoff- und trübstoffreiche Zuflüsse bzw. Ströme im Staukörper gezielt erfasst und entnommen werden (Ford und Johnson, 1996; Kennedy und Walker, 1991; Prince und Meyer ,1992).

Bei der Einschichtung von Zuflüssen wird, wie in Abbildung 15 dargestellt, in zwischen Überströmungen, Zwischenströmen und Unterströmungen unterschieden (Cole und Hannan, 1991; Ford und Johnson, 1986; Prince und Meyer, 1992). Der dargestellte Eintauchpunkt ist auf Grund seiner dichte-, auftriebs- und advektionsabhängig sehr dynamisch. Bei Stürmen kann er mehrere Kilometer von der Stauwurzel entfernt liegen (Ford, 1991).

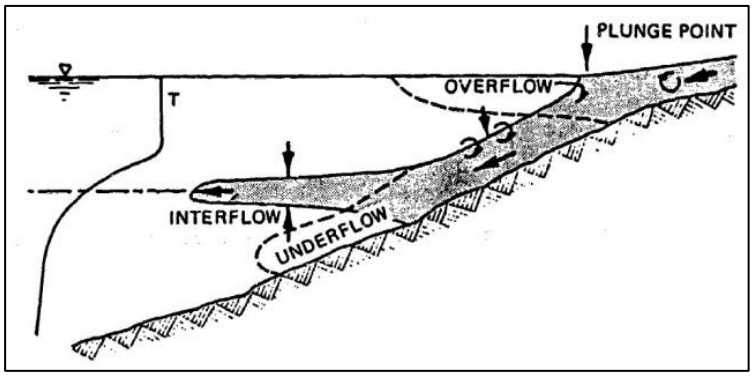


Abbildung 15: Einschichtung von Zuflüssen (Ford und Johnson, 1986)

Überströmungen treten in der Regel im Frühjahr auf, wenn die Dichte des eintretenden Wassers geringer als die des Staukörpers ist (Ford, 1991) und haben in der Regel einen geringeren Einfluss auf die Wasserqualität. Zwar induzieren Überströmungen durch erhöhte Nährstoffeinträge die Primärproduktion in der euphotischen Zone, dennoch ist der Effekt im Epilimnion auf Grund des großen Volumens vergleichbar gering zu den Effekten im volumetrisch kleinerem Metalimnion (Ford und Johnson, 1986). Ein Sauerstoffeintrag durch Überströmungen findet auf Grund einer generellen Sauerstoffsättigung im Epilimnion nicht statt (Cole und Hannan, 1991).

Während Überströmungen keine wesentlichen sauerstoffeintragenden Effekte auf den Staukörper haben, haben laut Cole und Hannan Unterströmungen einen erheblichen sauerstoffeintragenden Effekt auf das Hypolimnion im Staukörper. Dies kann sowohl negative als auch positive Wirkungen hervorrufen (Cole und Hannan, 1991).

Beispielsweise können Unterströmungen Turbulenzen am Gewässergrund erzeugen, welche zu Sedimentaufwirbelungen führen (Ford und Johnson, 1986). Durch Scherkräfte an der Grenzschicht zwischen Wasser und Sediment werden zudem Diffusions- und Rücklösungsvorgänge eingelagerter Stoffe verstärkt. Ford und Johnson sehen Unterströmungen deshalb als hauptverantwortlich für den Transport von z.B. Mangan und Phosphor aus dem oberen in den unteren Talsperrenbereich.

Zwischenströmungen schichten sich während der Stagnationsphase, bei der das Oberflächenwasser wärmer und das Tiefenwasser kälter ist als das Wassers des Zuflusses, metalimnisch ein. Nach Elçi (2008) weist das Metalimnion den maximalsten Dichtegradienten und respektive die geringsten Turbulenzen auf. Somit findet eine Stabilisierung der Sedimente bzw. der suspendierten Stoffe im Metalimnion statt (Elçi, 2008).

Kurzschlussströmungen sind möglich, wenn infolge starker Hochwasserereignisse große Wassermengen entlang des ehemaligen Flussbetts transportiert werden und die theoretische

hydraulische Aufenthaltszeit des Wassers um ein Vielfaches unterschreiten. Dieses Strömungsphänomen ist auch bei ungeschichteten Verhältnissen zu erwarten, da das ehemalige Flussbett strömungslenkend wirkt (Ford, 1991; LAWA, 1990). Die hydraulische Aufenthaltszeit beruht einzig auf physikalischen Prozessen und wird nicht durch die Höhe des Wasserstandes limitiert.

II.3.1.2 Temperaturbedingtes Schichtungsverhalten im Staukörper

Die vertikale thermische Schichtung eines Staukörpers, welcher zur Trinkwasserproduktion genutzt wird, sollte, um eine gesicherte Rohwasserqualität zu gewährleisten, durch eine dynamische Bewirtschaftung unbeeinflusst bleiben. Die vertikale Ausdehnung (Mächtigkeit) des kalten Hypolimnions sollte stabil bleiben.

Literaturstudie

Die Schichtungsausbildung im Talsperrenkörper basiert auf der Ausbildung von Dichtegradienten, welche ihrerseits temperaturabhängig sind. Wasser besitzt seine größte Dichte bei 3,98 °C. Sowohl bei höheren, als auch bei niedrigeren Temperaturen nimmt die Dichte des Wassers ab (siehe Abbildung 16).

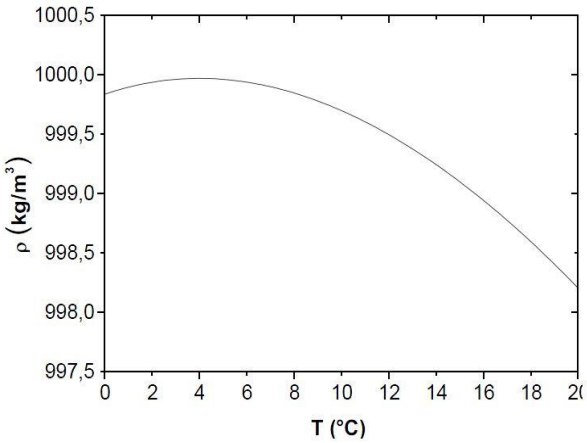


Abbildung 16: Dichteanomalie des Wassers (Lorenz und Aeschbach-Hertig, 2009)

Aus dieser sogenannten Dichteanomalie folgt bei verschiedenen Wassertemperaturen ein Dichtegradient, welcher zu einer Schichtung des Wasserkörpers führt. Je stärker der Dichtegradient ausgeprägt ist, umso stabiler ist die Schichtung. Windinduzierte Turbulenzen treten dann nur noch im oberflächennahen Wasserkörper auf, in dem eine nahezu konstante Dichte herrscht. Die horizontale Schichtung im Talsperrenkörper wird folglich nicht durch die Temperatur beeinflusst, sondern vielmehr durch diese definiert.

Es kommt im Jahresverlauf zu einer Erwärmung des Tiefenwassers. Horn et al. (2006) konnten feststellen, dass das Absinken der Sprungschicht, d.h. der metalimnischen Schicht, welche

einen Temperaturgradienten von mehr als 1 °C aufweist, einzig auf die Entnahme kalten Tiefenwassers zurückzuführen ist und nicht auf meteorologische Einflüsse oder Diffusionsvorgänge. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu natürlichen Gewässern (Horn et al., 2006).

Im weiteren Jahreszyklus kommt es durch das Absinken der Lufttemperatur und der Herbstwinde zur Zirkulation des Wasserkörpers. Durch die Angleichung der Luft- und Wassertemperatur und der windinduzierten Durchmischung werden die Dichtegradienten der Temperaturschichten im Wasserkörper zunehmend aufgelöst. Es folgt die Abnahme der Schichtungsstabilität (Dortch und Ford, 1991; Prince und Meyer, 1992; Thornton, 1991). Auf Grund der erhöhten Wasserentnahme aus dem Hypolimnion und der einhergehenden Verkleinerung desselben ist es umso wahrscheinlicher, dass die Herbstzirkulation den Gewässergrund schneller erreichen kann. Demnach trägt eine hypolimnische Rohwasserentnahme entscheidend zur Durchmischung des Wasserkörpers bei.

Während die natürliche, saisonale Destabilisierung der Stratifikation auf die windinduzierte Zirkulation und auf eine Angleichung der Temperaturen in Folge von Vermischungseffekten zwischen Epi- und Hypolimnion zurückzuführen ist, basiert die oben dargestellte Form der Destratifikation auf der Abführung kalten, dichten, sauerstoffarmen hypolimnischen Wassers und der einhergehenden stetigen Verkleinerung des hypolimnischen Wasservolumens in Folge der vertikalen Verschiebung der Schichten. Die Darstellung kann in Abbildung 17 am Beispiel der Saidenbachtalsperre während des Sommers 1976 nachverfolgt werden.

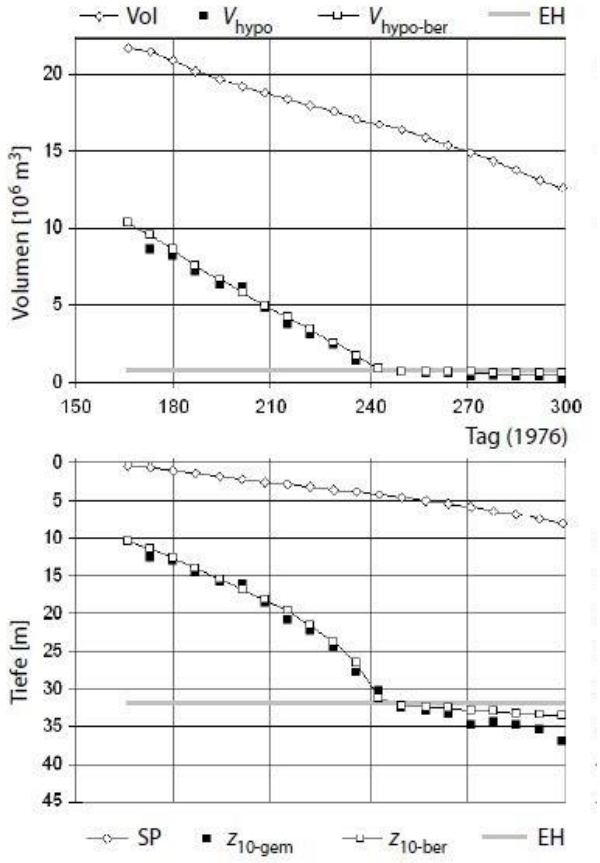


Abbildung 17: Absinken der Sprungschicht (z10) und des hypolimnischen Volumens durch hypolimnische Entnahme (Horn et al., 2006)

Es ist der Abfall des Wasservolumens in der Talsperre (Vol) und des Hypolimnionvolumens (V_{hypo}) bis auf Höhe des Entnahmehorizonts (EH) in Folge der Entnahme aus dem im Hypolimnion gelegenen Entnahmehorizont (EH) im oberen Bild zu verfolgen. Im unteren Bild ist der Abfall des Stauspiegels (SP) und der zehn Grad Isothermen dargestellt. Hypolimnische Einschichtungen der Zuflüsse können auf Grund der sommerlichen Außentemperaturen ausgeschlossen werden. Die zehn Grad Isotherme (z_{10}) dient daher als Repräsentation der Sprungschicht, deren Abfall bis zum Entnahmehorizont im unteren Bild veranschaulicht ist. Der Abfall der zehn Grad Isothermen mit zunehmender Nähe zum Entnahmehorizont verläuft beschleunigt (Krümmung), was aus der beschleunigten vertikalen Ausdehnung des Meta- und Epilimniums bei Verkleinerung des Hypolimnions folgt (Ausführungen oben). Bei Erreichen des Entnahmehorizontes pendelt sich die zehn Grad Isotherme zudem in diesem Bereich ein, was darauf hindeutet, dass das Metalimnion, in welchem die Sprungschicht ausgebildet ist, den Entnahmehorizont erreicht hat. Hieraus ist auch ersichtlich, dass die Temperatur des Wassers unterhalb des Entnahmehorizontes, d.h. in dem noch vorhandenen Hypolimnion, nicht von der Entnahme darüber liegenden Wassers beeinflusst wird. Der in Abbildung 17 beschriebene weitere Temperaturabfall unterhalb des Entnahmehorizontes ist auf die konstante Entnahme

aus dem Grundablass zurückzuführen und verläuft daher auch sichtlich langsamer. Je tiefer der Entnahmehorizont liegt, desto tiefer wird die Sprungschicht wandern und desto stärker ist der erzielbare Mischungseffekt (Castelletti et al., 2014). Liegt das Metalimnion in Höhe des Entnahmehorizontes, so ergeben sich Möglichkeiten der gezielten Bewirtschaftung der Talsperre. So kann nährstoffreiches Wasser gezielt entnommen werden, um den Nährstoffhaushalt des Talsperrenkörpers zu beeinflussen, oder dessen Entnahme gezielt vermieden werden.

Untersuchungsergebnisse

Auf Grund der nachgeschalteten Stauanlage Ahausen kann die Biggetalsperre schon seit mehreren Jahren dynamisch bewirtschaftet werden. Eine derart starke Dynamisierung in Verbindung mit einer großen Stauspiegelabsenkung wie im Jahr 2015 konnte bis dato nicht untersucht werden. In Abbildung 18 sind die vom Ruhrverband monatlich erfassten Tiefenprofile von Wassertemperatur, Sauerstoffsättigung und Chlorophyll-a sowie die des gesamten Phosphors der Monate Mai bis September in den Jahren 2013 bis 2015 des Staukörpers der Biggetalsperre dargestellt. Die Profile der Jahre 2013 bis 2015 dienen als langjährige Referenzwerte und ermöglichen einen Vergleich mit den Profilen während der Dynamisierung in 2015 (Abbildung 19).

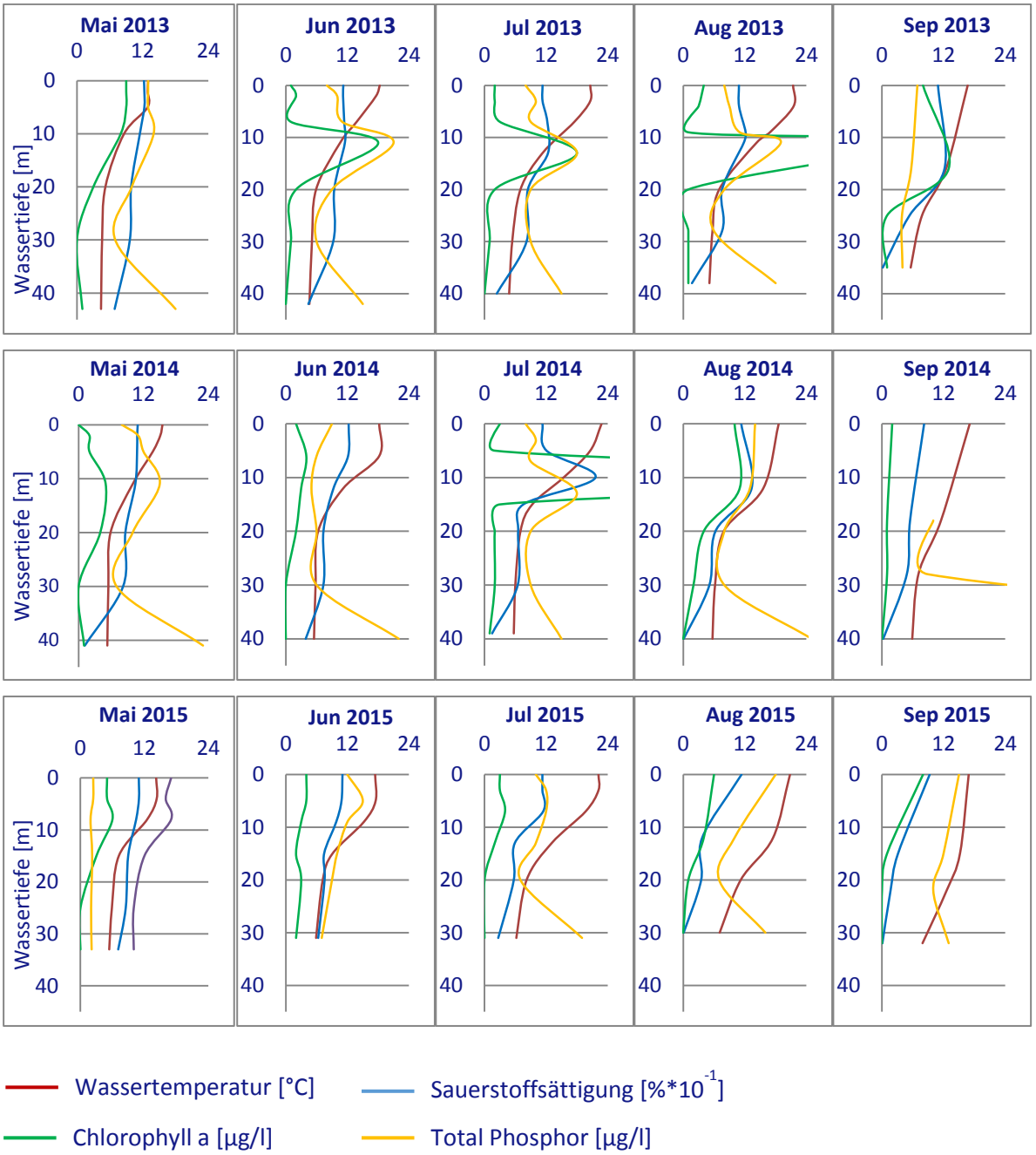


Abbildung 18: Langjährige Gewässergütedaten des Biggestausees für die Monate Mai bis September der Jahre 2013 – 2015 (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015)

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse des Messprogramms an der Biggetalsperre dargestellt. Aufgezeigt sind Tiefenprofile von Wassertemperatur und Sauerstoffsättigung. Die Messungen fanden vom 27. - 29. Mai 2015 sowie vom 22. - 24. Juni 2015 statt und wurden, wie in Abbildung 20 dargestellt, zu verschiedenen Zeitpunkten sowohl während starker als auch schwächeren Wasserabgabe durchgeführt. Die Messzeitpunkte sind in Abbildung 20 gegen den Abfluss aufgetragen.

Abbildung 19: Minimale und maximale Temperaturmesswerte mit zugehöriger Sauerstoffsättigung [%] im Staukörper der Biggetalsperre während der Sondermessungen

Bei gemeinsamer Betrachtung von Abbildung 19 und Abbildung 20 wird deutlich, dass während Phasen mit starken Wasserabgaben keine Auffälligkeiten gegenüber anderen Bewirtschaftungsphasen in den Profilen von Temperatur und Sauerstoff festzustellen sind. Obwohl die Messungen in Grundablassnähe sowohl bei Abflüssen von 1,6 m³/s (Wildbettabgabe) als auch 24 m³/s (Spitzenlast) erfolgten, konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Dies betrifft nur die kurzzeitigen Effekte.

Die vertikale Schichtausprägung wird durch die grundnahe Rohwasserentnahme nicht unmittelbar reduziert, die Anteile der Ausbreitung der Schichten variieren jedoch. Diese sind jedoch entscheidend unterschiedlich für Epi-, Meta- und Hypolimnion. Während die Ausbreitung des letzteren abnimmt, kommt es zu einer relativen Vergrößerung der oberen Wasserschichten.

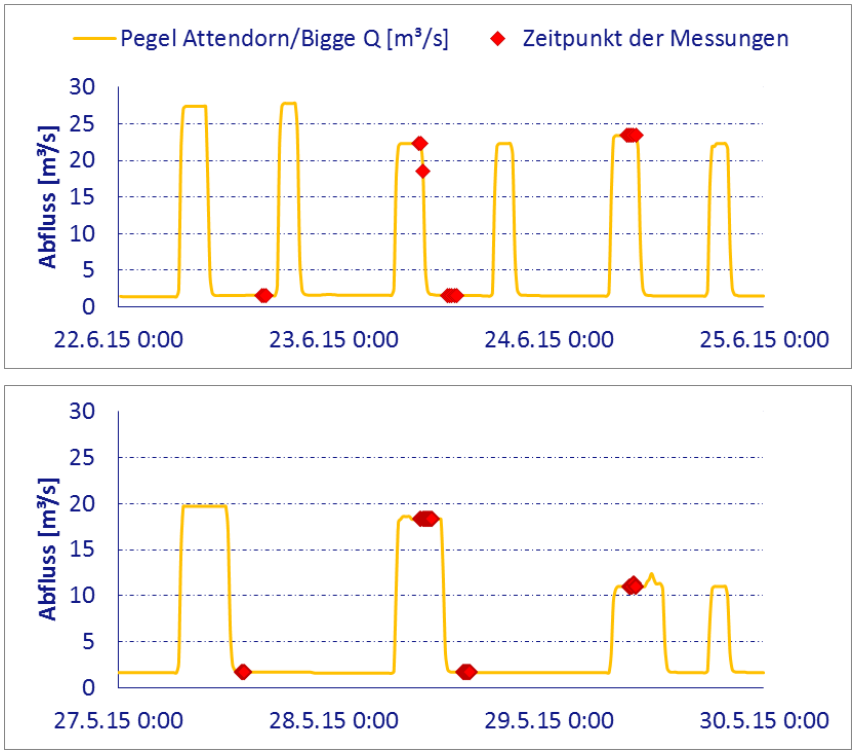


Abbildung 20: Abfluss aus der Biggetalsperre, Pegel Attendorn, im Mai und Juni während der Messungen (rote Punkte) (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015)

Der Vergleich der langjährigen Gewässergütedaten (siehe Abbildung 18) des Ruhrverbandes und der Messdaten des Sondermessprogramms des FiW (siehe Abbildung 19) zeigt, dass eine Entnahme großer Wassermengen aus dem Grundablass des Biggesees, d.h. aus deren Tiefenwasser, zur alleinigen Reduzierung des Hypolimnions führt. Während das Epilimnion und das Metalimnion in ihren vertikalen Ausprägungen stabil bleiben, reduziert sich die vertikale Ausprägung des Hypolimnions mit sinkendem Wasserspiegel (vgl. Abbildung 17). Der Vergleich der Gewässergütedaten von Juli (August) 2015 mit denselben Monaten aus den Vorjahren (Abbildung 18) lässt die Übertragung der auf Basis der Saidenbachtalsperre 1976 gewonnen Ergebnisse (Abbildung 17) zu. Durch die Absenkung des Stauspiegels um 9,92 (11,13) m im Vergleich zu 2014 und um 10,32 (9,4) m im Vergleich zu 2013 wurde das Hypolimnion deutlich reduziert. Während das Hypolimnion im Juli und August 2013 und 2014 eine Mächtigkeit von ca. 20 m (Wassertiefe: 20 – 40 m) aufwies, hatte es im Folgejahr lediglich eine Mächtigkeit von ca. 10 m (Wassertiefe: 20 – 30 m) (vgl. Abbildung 18). Das Epilimnion und Metalimnion blieben hingegen in ihrer vertikalen Ausdehnung nahezu identisch. Des Weiteren ist zu erkennen, dass es durch die starke Wasserspiegelabsenkung zu einer leichten Erwärmung des Tiefenwassers bereits im August und zu einer schnelleren Auflösung der Dichtegradienten zwischen den Schichten kam. Es kam zu einer, im Vergleich zu den Vorjahren,

höheren hypolimnischen Wassertemperatur im Jahr 2015 und damit einhergehend zu einer früheren Destratifikation bereits im September.

Der obere Horizont des Hypolimnions (Wassertiefe 20 m) war im August 2015 insgesamt 3,3 °C wärmer als im Vorjahr und 3,2 °C wärmer als im Jahr 2013. Am Grund betrug der Unterschied 1,4 °C bzw. 2 °C. Zu beachten ist hier, dass durch die Wasserspiegelabsenkung der Grund im Jahr 2015 bei einer Wassertiefe von 30 m erreicht war, während dies in den Jahren 2013 und 2014 bei ca. 38 m bzw. 40 m der Fall war (vgl. Abbildung 21).

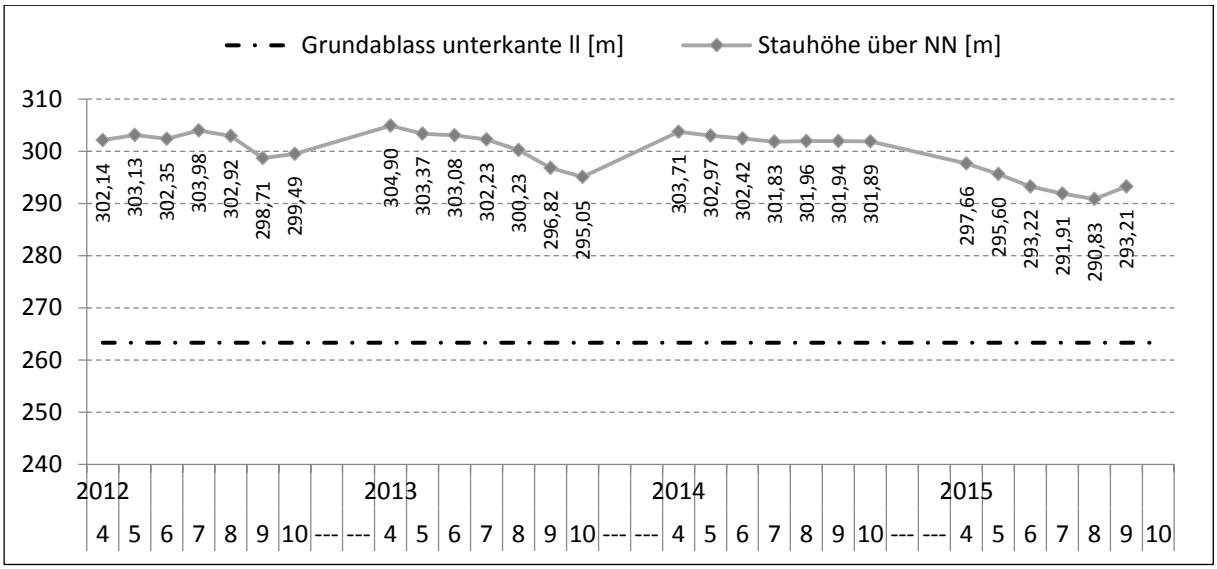


Abbildung 21: Verlauf der Stauhöhe über NN [m] des Biggestausees von 2012-2015 (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015)

Die in ENERWA im Mai und Juni 2015 durchgeführten Messungen zur Untersuchung von potenziellen Kurzschlussreaktionen im Staukörper des Biggesees haben gezeigt, dass sich trotz stark schwankender Wasserabgaben aus dem Grundablass stabile thermische Schichten im Staukörper ausbilden (siehe Abbildung 19).

Im Vergleich zu den Vorjahren konnte jedoch eine leichte Erwärmung des Tiefenwassers im Mai und Juni 2015 festgestellt werden, obwohl die Lufttemperaturen in diesen und in den vorangegangenen Monaten keine auffälligen Abweichungen vom langjährigen Jahresmittel zeigten (vgl. Abbildung 22).

Daher ist eine Erwärmung des Tiefenwassers in Folge der Schichtabsenkung durch die hypolimnische Wasserentnahme naheliegend. Diese Beobachtung basiert jedoch rein auf der abgelassenen Wassermenge und des gesunkenen Stauspiegels und nicht auf der dynamisierten Bewirtschaftung der Talsperre. Zudem konnte durch die Analyse der meteorologischen Daten die Feststellung von Horn et al. (2006) bestätigt werden, dass das Absinken der Sprungschicht nicht durch meteorologische Einflüsse bedingt ist.

Anhand der angestellten Überlegung und der Untersuchungen im Staukörper des Biggesees konnte bestätigt werden, dass die grundnahe Wasserentnahme in einer Verringerung des hypolimnischen Wasservolumens resultiert, während das Volumen des Epi- und des Metalimnions konstant bleiben. Da im tieferen Bereich der Talsperre weniger projektierte Grundfläche vorhanden ist, kommt es zu einer durch die Form des Talsperrenkörpers bedingten vertikalen Ausweitung dieser Schichten. Die Schichtdicke und das Volumen des Hypolimnions nehmen ab. Es kommt zu einer Erwärmung des Hypolimnions und einer saisonal früheren Destabilisierung der Stratifikation durch die schnellere Auflösung der Dichtegradienten. Eine Veränderung der Schichtungsausprägung ist die Folge der starken Entnahme aus dem Grundablass, welche zu einer starken Reduzierung des Stauspiegels führte. Ein unmittelbarer Zusammenhang zur dynamisierten Bewirtschaftungsweise konnte jedoch nicht bestätigt werden.

II.3.1.3 Nährstoff- und Trübungskonzentration im Staukörper

Die natürliche saisonale Destabilisierung der Stratifikation ist auf die Auflösung der Dichtegradienten durch Anpassung an die Lufttemperatur und die windinduzierte Zirkulation epilimnischen und metalimnischen Wassers zurückzuführen. Durch die Abführung kalten, dichten, sauerstoffarmen hypolimnischen Wassers aus dem Grundablass kommt es wie vorher beschrieben zudem zu einer Verstärkung der Destratifikation.

In Seen und Staukörpern von Talsperren werden Stoffkreisläufe neben externen Einträgen vor allem durch im Pelagial und Sedimentraum stattfindenden Prozessen sowie Transportprozessen bestimmt. Während der Nährstofftransport in Richtung des Sediments in partikulärer Form bzw. gebunden stattfindet (Tartari und Biasci, 1997), erfolgt die Rücklösung von Nährstoffen aus dem Sediment ins Pelagial hauptsächlich als anorganisch gelöster Phosphor. In tieferen geschichteten Gewässern ist vor allem die Diffusion maßgebend für den Rücktransport von Phosphor aus dem Sediment (Belzile et al., 1996).

Chlorophyll-a ist ein wesentlicher Indikator für das pflanzliche Biovolumen in Gewässern. Der Gehalt von Chlorophyll-a bei Phytoplankton-Organismen hängt von mehreren Faktoren ab (z. B. Größe, Alter der Zellen und Limitationsmuster). Insgesamt kann der Chlorophyll-a-Gehalt der Phytoplanktonbiomasse zwischen 0,33 und 0,62 Vol.-% variieren (Padisák und Adrian, 1999).

Die Trübung beschreibt vor allem die optisch sichtbare Verschmutzung bzw. optisch sichtbaren Partikel, welche durch ungelöste und kolloidal, also fein verteilt vorliegenden, gelöste Stoffe hervorgerufen wird (Kunz, 2008), und wird auch durch die Biomasse im Staukörper beeinflusst.

Die Relevanz der Betrachtung des Trübungstransportes ergibt sich zum einen zum Schutz der dem Stausee nachgeschalteten Wasseraufbereitungsanlagen, zum anderen adsorbieren Nährstoffe an den Trübstoffen und werden mit diesen in den Talsperrenkörper eingetragen oder in das Sediment eingelagert.

Literaturstudie

Der Einfluss einer dynamischen Talsperrenbewirtschaftung auf den Nährstoffhaushalt des Staukörpers kann aus der Literatur nicht eindeutig geklärt werden, da die chemisch-physikalischen Prozesse im Staukörper von vielen individuell unterschiedlichen Faktoren abhängen.

Das U.S. Army Engineer Research and Development Center stellte fest, dass es bei der natürlichen saisonalen Zirkulation zur Nährstoffverteilung aus dem Hypolimnion in das euphotische Epilimnion und somit zur Steigerung der Eutrophierung im Wasserkörper kommt (U.S. Army Engineer Research and Development Center, o.J); vgl. auch Prince und Meyer, 1992).

Bei der Eutrophierung von stehenden Gewässern spielen verschiedene Faktoren, wie die interne Nährstoffrückführung aus dem Sediment, die Eutrophierungsgeschichte des Gewässers und der Fortbestand von Phytoplanktongemeinschaften eine entscheidende Rolle. So kann es, trotz reduzierter Nährstoffeinträge an den Zuflüssen einer Talsperre, durch oben genannte andere Faktoren häufig zu einer Dominanz von Cyanobakterien im Phytoplankton kommen. Nach Shatwell et al. liegt dies in Talsperren vor allem an der internen Nährstoffrückführung aus dem Sediment in den Staukörper und an betriebsbedingten starken Wasserstandsschwankungen. Beispielsweise konnten an der Wuppertalsperre hohe Gesamtphosphor- und Chlorophyll-a-Konzentrationen bei starken Stauspiegelabsenkungen und respektive niedrigem Wasservolumen festgestellt werden. Demnach kann es bei starken Stauspiegelabsenkungen und gleichzeitig warmen Wetter laut Shatwell et. al zu einer verstärkten Entwicklung von Cyanobakterien kommen. Gleichzeitig konnte an der Talsperre Bautzen nachgewiesen werden, dass Stauspiegelabsenkungen im Mai zu Phosphatrücklösungen aus dem Sediment führten und frühe Durchmischungen im Sommer zur Verteilung dieser im ganzen Staukörper führten, was eine Algenblüte in der euphotischen Zone zur Folge hatte. Diese Blüte könnte laut Shatwell et al. (2013) durch hohe Wasserstände unterbunden werden.

An der Talsperre Quitzdorf konnte durch Shatwell et al. eine enge Beziehung zwischen der Phosphorfreisetzung aus dem Sediment und niedriger Nitratkonzentrationen (> 1 mg L^{-1}) in Nähe der Sedimentoberfläche beobachtet werden. Phosphor adsorbiert an Eisen und Mangan (Shatwell et. al 2013). Diese liegen bei oxischen Verhältnissen partikulär vor und lagern sich somit im Sediment ein. Da Nitrat beim mikrobiellen Stoffumsatz ähnlich wie Sauerstoff als Elektronenakzeptor dienen kann bzw. das Redoxpotenzial der Denitrifizierung

(NO_3 → N_2, N_2O) ausreicht, um eine Oxidation von Eisen (Fe^{2+} → Fe^{3+}) zu induzieren, tragen hohe Nitratkonzentrationen zur Phosphor-Immobilisierung bei (Knösche, 2005).

Bei der stetigen Abführung hypolimnischen Wassers hingegen werden gelöste Nährstoffe dem Kreislauf entzogen. Diese stehen somit nicht mehr für das Biomassewachstum und der aus der Zersetzung abgestorbener Biomasse resultierenden Sauerstoffzehrung zur Verfügung (Cole und Hannan, 1991; Ford und Johnson, 1986; Kennedy und Walker, 1991; Thornton, 1991). Die Abnahme der Eutrophierung im Epilimnion als Reaktion auf die hypolimnische Wasserentnahme und die damit verbundene Abfuhr von Nährstoffen und Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes konnte in verschiedenen Talsperren beobachtet und bestätigt werden (U.S. Army Engineer Research and Development Center, o.J.) Eine erhöhte Phosphor- und organische Kohlenstofffracht im Ablauf (Kennedy und Walker, 1991; Elçi, 2009) konnten bei hypolimnischer Entnahme ebenso in numerischen Modellen nachgewiesen werden.

Paul und Scheifhacken (2009) zeigten anhand des Partikelsedimentationsmodells PaSMo, dass sich der der Seston-Vertikaltransport, also der Transport der Gesamtmenge an Plankton und der nicht lebenden Schwebstoffe (Allaby, 1994), durch die gezielte Abgabe großer Wassermengen aus dem Grundablass in den oberhalb gelegenen Schichten beschleunigen lässt. Während schnell sedimentierende größere Partikel kaum durch die Wasserabgabe beeinflusst werden, wird der vertikale Transport von kleinen, leichteren und langsam sinkenden Partikelfraktionen beschleunigt (Paul und Scheifhacken, 2009).

Nach Abesser und Robinson (o.J.) kann es durch starke Wasserentnahmen in der Nähe des Gewässergrunds und der horizontalen Bewegung des Wassers zu Turbulenzen und somit zu Sedimentaufwirbelungen kommen. Diese advektiven Vorgänge können zu einem Eintrag von Metallen und Nährstoffen in die Wassersäule führen (Abesser und Robinson, o.J.).

Untersuchungsergebnisse

Der Vergleich der langjährigen Gewässergütedaten des Ruhrverbandes (Abbildung 19) zeigt, dass die verstärkte und dynamische Wasserabgabe aus dem Grundablass des Biggedamms zu einer Abnahme der Eutrophierung im Staukörper führen könnte. Es wird deutlich, dass die Chlorophyll-a Gehalte im Jahr 2015 deutlich geringere Werte als in den Vorjahren annehmen. Dies könnte durch den bereits beschriebenen Nährstoffentzug begründet werden, welcher sich in einem verringerten Algenwachstum im Anschluss an die Zirkulationsphase widerspiegelt. Die dynamisierte Bewirtschaftungsweise könnte auf diese Weise zu einem langfristig oligotropheren Nährstoffbild beitragen.

Im Jahr 2015 waren im Epilimnion geringere Chlorophyll a-Konzentrationen festzustellen, obwohl die Lufttemperaturen im Vergleich zu den Vorjahren (2012-2014) gerade in den Monaten

der thermischen Schichtausbildung (April – Juni) am geringsten von den langjährigen Monatsdurchschnittswerten abwichen (siehe Abbildung 22)

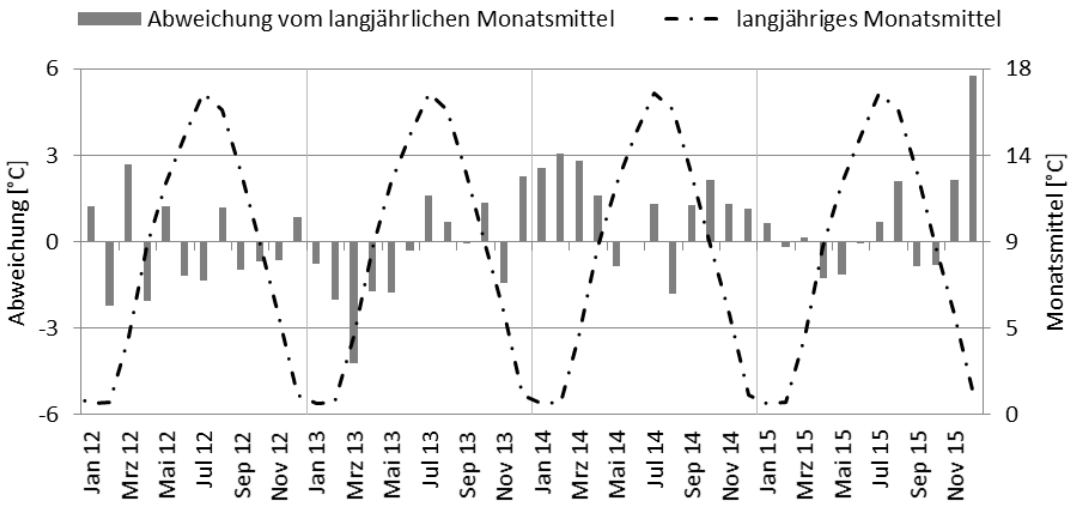


Abbildung 22: Lufttemperaturdaten der Jahre 2012 – 2014 in Meinerzhagen-Redlendorf (DWD, 2015)

Während die Abweichung vom langjährigen Monatsmittel (2007-2015) in den Jahren 2012 - 2014 im April -2,1 °C, -1,7 °C und 1,6 °C, im Mai 1,2 °C, -1,8 °C und -0,9 °C und im Juni -1,2 °C, -0,3 °C und 0,0 °C betrugen, lag sie im April 2015 lediglich bei -1,3 °C, im Mai 2015 bei -1,1 °C und im Juni 2015 bei -0,1 °C. In den Jahren 2012 - 2014 kam es zu hohen epilimnischen Chlorophyll-a-Konzentrationen in den Sommermonaten (Juli - August). Diese blieben 2015 trotz ähnlicher Wetterkonditionen aus. Das belegt auch der Vergleich der Niederschlagsdaten, welcher keine Korrelation zwischen Eutrophierung und Niederschlagsmenge zulässt (siehe Abbildung 23).

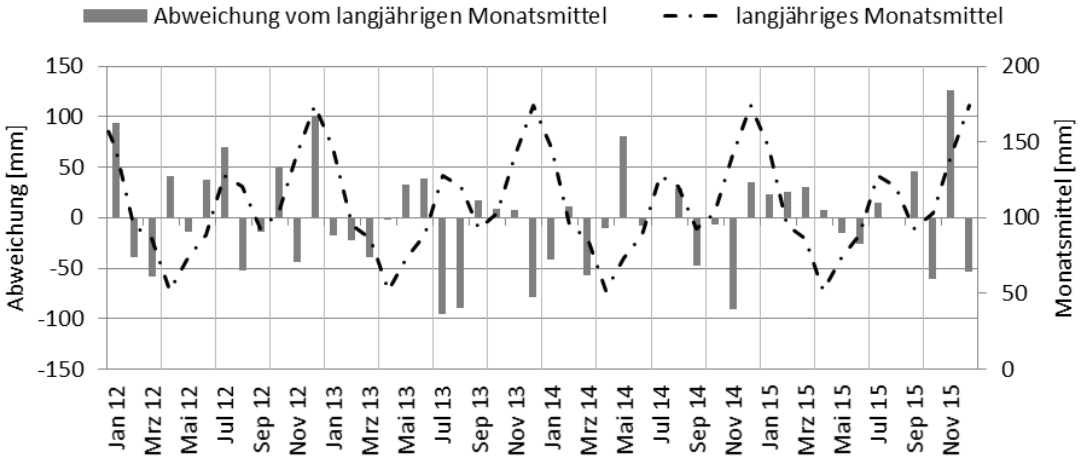


Abbildung 23: Niederschlagsdaten der Jahre 2012 – 2014 in Meinerzhagen-Redlendorf (DWD, 2015)

Ebenso konnten keine quantitativen Auffälligkeiten bei den Zuflüssen des Biggesees festgestellt werden, welche einen erheblichen Einfluss auf die Eutrophierung ausüben könnten.

Besonders im April 2015 konnten im Biggesee geringe Konzentrationen an Chlorophyll-a im Metalimnion und Hypolimnion festgestellt werden (siehe Abbildung 19), welche sich auch nicht mit den weiteren Stauspiegelabsenkungen bis zur Zirkulation im September verstärkten, und somit gegen die Beobachtungen an der Wuppertalsperre und an der Talsperre Bautzen sprechen. Hier wurde ein Zusammenhang zwischen hohen Phosphor- und Chlorophyll-a-Konzentrationen und niedrigem Wasservolumen beobachtet. Im Staukörper des Biggesees kam es höchstwahrscheinlich aufgrund des geringeren Algenwachstums, der kaum vorhandenen Photosynthese und des metalimnischen Biomasseabbaus zu geringeren Sauerstoffkonzentrationen in der Sprungschicht. So lag die Sauerstoffkonzentration an der oberen Grenze der Sprungschicht (Wassertiefe: 12 m) im August 2015 mit 3,4 mg/l um 9,4 mg/l tiefer als zur gleichen Zeit im Vorjahr (12,8 mg/l). Eine Verzögerung oder ein Ausbleiben des sich vom Grund aufwärts ausprägenden Sauerstoffdefizits auf Grund von sauerstoffzehrenden Prozessen ist nicht zu erkennen. Die Ausbildung von sauerstoffarmen Schichten in der Sommerstagnationsphase wird in Kapitel II.3.1.2 beschrieben.

In Abbildung 24 sind die Tiefenprofile der Trübung in unmittelbarer Nähe des Grundablasses der Biggetalsperre dargestellt. Erkennbar ist eine erhöhte Trübungsbelastung im Tiefenwasser als mögliche Reaktion auf die dynamisierte Bewirtschaftungsweise. Trübungsschübe im Zulauf erfahren auf Grund der Dichte des Wassers eine epi- oder metalimnische Einschichtung. Erhöhte Trübungswerte im Tiefenwasser sind demnach nicht auf die Einschichtung zurückzuführen. Die Messergebnisse von ENERWA zeigten einen Anstieg der Trübung im Hypolimnion in der Nähe des Grundablasses, was anfangs auf eine geringe Aufwirbelung von Feinsediment aus dem Sediment und einer Remobilisierung von Eisen und Mangan sowie von Nährstoffen deuten könnte. Dieser Effekt konnte vor allem an Messpunkten in der Nähe des Grundablasses festgestellt werden (siehe Abbildung 24).

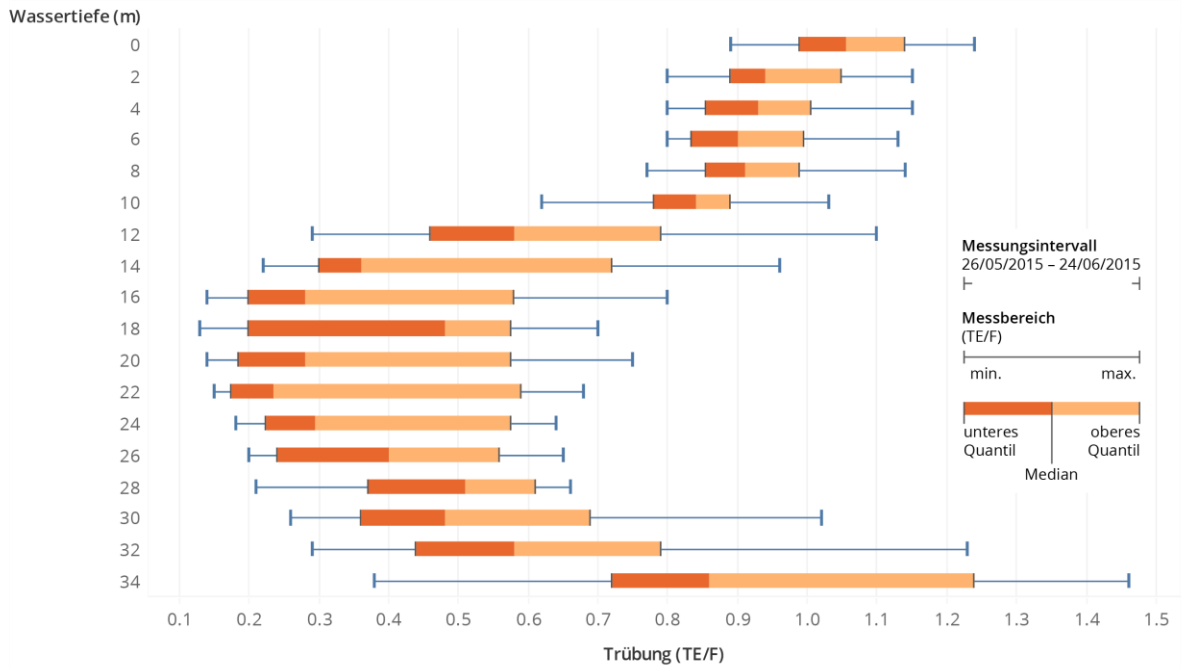


Abbildung 24: Trübungsmessprofile im Staukörper der Biggetalsperre

Des Weiteren kann vermutet werden, dass durch die starke Grundablassabgabe und eine resultierende leichte horizontale hypolimnische Strömung eine Erhöhung der Trübung im Bereich des Grundablasses stattfindet. Der grundablassnahe Bereich gilt zudem als Erosionsbereich. Auf Grund der über mehrere Meter hinweg zunehmenden Trübungswerte (27 – 35 m) ist es unwahrscheinlich, dass die erhöhten Trübungswerte durch direkten Kontakt der Messsonde mit dem Grund resultieren. Neben einem Konzentrationsanstieg im unteren Bereich des Hypolimnions und im Bereich des Grundablasses ist eine Konzentrationsreduzierung im oberen Bereich des Hypolimnions zu erkennen. Dieser Bereich wird vorwiegend als Entnahmehorizont für die Trinkwasseraufbereitung genutzt. Es könnte interpretiert werden, dass auf Grund der thermischen Stabilität lediglich eine Trübungskonzentrationsverlagerung des Feindsedimentes im Hypolimnion stattfindet und keine Aufkonzentration aus der gesamten Wassersäule hin zum Grundablass. Da die Temperaturdifferenz zwischen den Schichten bei über 5 °C liegt und somit auch Diffusionsvorgänge in Folge des sehr starken Dichtegradienten behindert werden (Ottosson und Abrahamsson, 1998), könnte sich die Trübung vertikal auch nur im Hypolimnion verlagern.

Die Werte der Trübungsmessungen an der Großen Dhünn-Talsperre des Wupperverbandes zeigte keine ähnliche Erhöhung der Trübung wie am Grundablass des Biggesees. Zudem ist ein Trübungsanstieg während weniger Messungen lediglich am Talsperrengrund zu verzeichnen. Die Vermutung einer (ungültigen) Messung im Sediment liegt somit nahe. An der Großen

Dhünn-Talsperre findet keine dynamisierte Speicherbewirtschaftung statt, und die durchschnittliche Abgabe des Grundablasses liegt bei 2,2 m³/s (Mittelwerte der Jahre 2002-2011) (vgl. Wupperverband, 2014). Auf Grund der geringen Wildbettabgaben sind daher keine höheren Trübungskonzentrationen im Hypolimnion zu erwarten.

Auf Grundlage der durchgeführten Messungen ist nicht zu erkennen, ob die höheren Trübungskonzentrationen am Grundablass des Biggesees durch Aufwirbelungen am Gewässergrund zustande kommen, ob lediglich eine Konzentrationsverlagerung im Hypolimnion stattfindet, oder ob die starke Wasserabgabe des Grundablasses den Vertikaltransport der kompletten Wassersäule verstärkt. Die während der Stauspielgelabsenkung gemessenen geringen Chlorophyll-a-Konzentrationen im Hypolimnion lassen jedoch vermuten, dass die erhöhten Trübungskonzentrationen auf Grund von Konzentrationsverlagerungen und nicht durch Aufwirbelungen am Gewässergrund und Remobilisierung von Nährstoffen entstanden sind.

Generell muss zwischen Mobilisierung und potenziellen Rücklösungsvorgängen unterschieden werden. Letztere sind nicht zu erwarten, da aus Abbildung 19 deutlich oxische Milieubedingungen im Tiefenwasser während der Messungen hervorgehen. Metalle und an ihnen adsorbierte Nährstoffe liegen demnach oxidiert und somit partikulär vor.

II.3.1.4 Sauerstoffsättigung im Staukörper

Der Sauerstoffhaushalt eines Reservoirs bestimmt wesentlich die chemisch-physikalischen Prozesse im Staukörper. Beispielsweise kann eine oxische Schicht über dem Sediment zur Immobilisierung von Phosphat beitragen und somit Nährstoffkonzentrationen und Eutrophierung im Staukörper reduzieren. Nachfolgend wird der Einfluss einer verstärkten dynamischen und hypolimnischen Wasserabgabe auf den Sauerstoffhaushalt im Staukörper untersucht.

Literaturstudie

Sauerstoff wird über Zuflüsse aber vor allem auch durch Kontakt mit der Atmosphäre und durch biologische Aktivität in den Staukörper eingetragen (Maniak, 2005). Während der Zirkulationsphasen stellt sich im Staukörper ein über die Tiefe konstanter Sauerstoffgehalt ein. Während der Sommerstagnation kann es in dimiktischen, eutrophen Staukörpern zur Ausbildung von sauerstoffarmen, nahezu anaeroben Schichten kommen, da der Sauerstoffaustausch zwischen dem teilweise übersättigten Epilimnion und dem sauerstoffarmen Tiefenwasser durch starke Dichtegradienten behindert wird (Ottosson und Abrahamsson, 1998). Durch lichtinduzierte Photosynthese kommt es im Epilimnion zu einer erhöhten Produktion an Sauerstoff. Die absinkende Biomasse führt wiederum zu mineralisierenden, sauerstoffzehrenden Prozessen im Hypolimnion (Kannan und Job, 1980). Mit Dauer der Stagnation nehmen die

reduzierenden Verhältnisse am Gewässergrund zu, wodurch sich ein vom Grund ausrichtendes Sauerstoffdefizit ausbildet. Die Nährstoffkonzentration im Staukörper und die resultierende Biomasse bestimmen somit im Wesentlichen den Sauerstoffhaushalt. Die Rohwasserentnahme aus den sedimentnahen Bereichen entziehen dem Staukörper auch sauerstoffzehrende Biomasse, was zu einem besseren Sauerstoffhaushalt und Wasserqualitätsverbesserungen führt (Cole und Hannan, 1991; Ford und Johnson, 1986; Kennedy und Walker, 1991; Thornton, 1991).

Das U.S. Army Engineer Research and Development Center konnte dementsprechend eine Abnahme der Eutrophierung im Epilimnion als Reaktion einer hypolimnischen Wasserentnahme und der resultierenden Abfuhr von Nährstoffen beobachten. Die Abfuhr der Nährstoffe trug zur wesentlichen Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes in verschiedenen Talsperren bei (U.S. Army Engineer Research and Development Center, o.J.).

Des Weiteren können Staukörper oftmals sehr sensibel auf äußere Einflüsse reagieren. Eine besondere Rolle spielen hierbei meteorologische Einflüsse. Beispielsweise führte ein schneller Anstieg der Globalstrahlung im April 2013 zu einer Massenentwicklung von Kieselalgen während der Zirkulationsphasen im Staukörper der Henne- und Möhnetalsperre. Die bestandsbildende relativ große und runde koloniebildende Diatomeen-Art Aulacoseira islandica führte zu einer Chlorophyll-a-Konzentration von bis zu 29 – 59 µg/l über dem Grund des Staukörpers der Möhnetalsperre und zu einer Chlorophyll-a-Konzentration von bis zu 31 –59 µg/l über dem Grund des Staukörpers der Hennetalsperre. Die hohe Kieselalgenentwicklung wurde noch in der Zeit der Vollzirkulation vollständig mikrobiell abgebaut, führte aber im weiteren Verlauf zu einer Reihe außergewöhnlicher limnischer Verhältnisse im Staukörper der beiden Talsperren. Im Jahresverlauf traten weniger planktische Algen auf, so dass während der Stagnationsphase weniger Biomasse abzubauen war, was zu einer geringeren Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser führte. Während der Sauerstoffgehalt im Juli im Staukörper der Möhnetalsperre im Metalimnion aufgrund des Abbaus von schnell lysierenden Algen zurückging, lag die Sauerstoffsättigung im Hypolimnion weiterhin im Sättigungsbereich. Im Normalfall stellt sich ein Sauerstoffdefizit im Staukörper von Talsperren in Jahren mit ausgeprägter Grundzehrung vom Grund aus ein. Fische wandern dementsprechend in Richtung höherer Sauerstoffsättigung vom Hypolimnion in Richtung Metalimnion und Epilimnion. Dies geschah auf Grund der hohen Sauerstoffsättigung im Hypolimnion im Jahr 2013 nicht. Der Sauerstoffgehalt im Metalimnion sank derweil soweit, dass sich eine nahezu sauerstofffreie Schicht ausbildete. Da Fische grundsätzlich nicht entgegen eines negativen Sauerstoffgradienten wandern, wurden diese durch die sauerstofffreie Schicht im Hypolimnion eingesperrt. Weitere sauerstoffzehrende Pro-

zesse im Tiefenwasser hätten zu sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Verhältnisse im Hypolimnion und zu einem Fischsterben geführt. Um diesem vorzubeugen und die sauerstofffreie Schicht aufzulösen, wurde das Tiefenwasser mit Sauerstoff begast (Ruhrgütebericht, 2013).

Die Freisetzung von Nährstoffen aus dem Sediment ist stark abhängig von der Sauerstoffverfügbarkeit in der Wasserschicht über dem Sediment, also der Kontaktzone Sediment/Wasser. Eine oxische Schicht über dem Sediment dient als effektive Barriere gegen die Freisetzung von Mangan. Hierbei wirkt die Sauerstoffschicht wie eine semipermeable Membran. Während die Einlagerung von sedimentierenden Stoffen in das Sediment durchaus möglich ist, wird die Rücklösung von Stoffen aus dem Sediment durch die Adsorption an diesem behindert. Die Untergrenze bei deren Unterschreitung es zur Manganfreisetzung aus dem Sediment kommt liegt bei zwei Milligramm Sauerstoff pro Liter Wasser (Mortimer, 1971). Wie in Kapitel II.3.1.3 beschrieben, ist Mangan ein wesentlicher Stoff, welcher die Remobilisierung von Phosphat beeinflusst. Wird der hypolimnische Sauerstoff während der Stagnationsphase nicht vollständig aufgezehrt, bleibt die Konzentration gelösten Mangans (Mn) gering, da keine Reduktion zu Mn(II) erfolgt (Balistrieri et al., 1992). Bildet sich hingegen am Gewässergrund während der Stagnationsphase eine anaerobe Schicht aus, so kommt es zur Verschiebung der Redox-Grenze aus dem Sediment in die Wassersäule und zu einer vereinfachten Rücklösung von Mn aus dem Sediment (Balistrieri et al., 1992; Gantzer, 2008; Mortimer, 1971). Diese Verschiebung der Redox-Grenze ist in Abbildung 25 angedeutet.

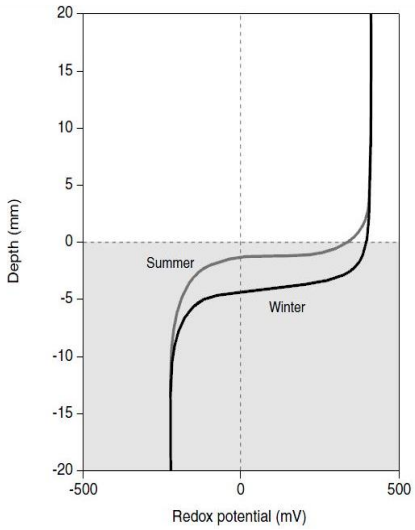


Abbildung 25: Saisonale Verschiebung der Redoxgrenze (Søndergaard, 2007)

Während der Zirkulationsphase, in welcher der Staukörper isotherm ist, d.h. eine gleichmäßige Temperatur über den gesamten Wasserkörper vorliegt und die Sauerstoffverhältnisse homogen sind, stellen sich gegenteilige Verhältnisse ein. Durch Turbulenzen am Gewässergrund wird die oxische Schicht tiefer in das Sediment bewegt und es kommt zu einer Verschiebung

der Redox-Grenze in diesem (Gantzer et al., 2009). Dieser Prozess ist laut Gantzer et al. gemeinsam mit der aus der Zirkulation resultierenden Verdünnung für die geringen Manganwerte im Winter verantwortlich. Die Oxidation von Mangan schreitet im Wasserkörper nur langsam voran. Dadurch kann Mangan während der Zirkulationsphase aus dem Tiefenwasser auch aerobe Gebiete durchwandern und höher gelegene Wasserschichten erreichen (Davison, 1993; Hedlich, 1975). Hierdurch sind gelöste Mn-Konzentrationen auch in sauerstoffreicheren Wasserschichten messbar. Da die turbulenzbedingten Transportprozesse in höheren Wasserschichten wesentlich stärker sind als die Diffusionsvorgänge am Sediment, wird Mn insbesondere im Winter durch die temperaturbedingt aufwärts gerichtete Konvektion in der Wassersäule verteilt.

Je negativer das Redox-Potenzial ist, desto stärker ist die Reduktionskraft. Während der Stagnationsphase wird, durch die Verschiebung der Redox-Grenze aus dem Sediment in die Wassersäule, das an der Kontaktzone Sediment/Wasser auf Grund von Sedimentationsvorgängen kumulierte Mn reduziert und freigesetzt. Dies führt zu einem rapiden Anstieg der gelösten Mn-Konzentration im Hypolimnion.

C. Dean geht davon aus, dass länger andauernde anoxische Verhältnisse im Hypolimnion eine größere Rücklösung zur Folge haben. Diese führen somit nach der Zirkulation und Verteilung des Mn auch zu einer höheren Sedimentationsrate aus dem Epilimnion in das Hypolimnion (Dean, 1999). Eine länger anhaltende sehr geringe Sauerstoffkonzentration im Wasser über dem Sediment kann laut Kristiansen et al. sogar zu einer Erschöpfung der Mn-Reserven im Sediment führen (Kristiansen et al., 2002). Auch Abesser und Robinson (o.J.) gehen davon aus, dass Mn-Reserven im Sediment während der Sommerstagnation erschöpfen. Sie erwarten deshalb, auf Grund der limitierten Menge, keine Qualitätsverschlechterungen des Rohwassers.

Die Freisetzung von Mn hängt neben den Sauerstoffverhältnissen auch vom pH-Gehalt im Wasser ab, da dieser wesentlichen Einfluss auf die Redox-Verhältnisse hat.

Laut Herschel und Clasen verlaufen Oxidationsprozesse bei einem pH-Wert kleiner 8 so langsam, dass Mn auch Wochen nach dessen Freisetzung noch im Gewässer nachgewiesen werden kann. Dabei kann der pH-Wert durch freigesetztes CO_2 aus Zersetzungsvorgängen so weit gesenkt werden, dass gelöstes Mn vor Ausfällung geschützt wird (Herschel und Clasen, 1998).

Horn et al. (2006) stellten fest, dass die metalimnische Einschichtung von Zuflüssen mit erhöhten Trübstoffgehalten insbesondere nach Starkregenereignissen durch die Verkleinerung der euphotischen Zone massiven Einfluss auf die Sauerstoffzehrung im Epilimnion ausüben

kann. Durch Zersetzungsvorgänge freigesetztes CO_2 kann den pH-Wert in anoxischer Sedimentnähe im Sommer dabei so weit senken, dass gelöstes Mangan vor der Ausfällung geschützt ist.

Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen im Staukörper der Biggetalsperre und der Vergleich der langjährigen Gewässergütedaten des Ruhrverbandes konnten vorangestellten Beobachtungen bestätigen (Cole und Hannan, 1991; Ford und Johnson, 1986; Kennedy und Walker, 1991; Thornton, 1991; U.S. Army Engineer Research and Development Center, o.J.). Es ist zu erkennen, dass auf Grund der dynamisch verstärkten Wasserabgabe aus dem Grundablass im Jahr 2015 im Hypolimnion in Sedimentnähe höhere Sauerstoffkonzentrationen während der Stratifikation in den Monaten Mai – August vorherrschen.

In wie weit die reduzierte vertikale Schichtausprägung des Hypolimnions hierzu beiträgt, ist zum derzeitigen Stand nicht abschätzbar. Da sich ein Sauerstoffdefizit von Grund aufwärts ausbildet, ist der Einfluss als eher gering einzuschätzen.

Wie zu erwarten, korrelieren die Chlorophyll-a-Konzentrationen durch den Austrag an Nährstoffkonzentrationen aus dem Grundablass mit den Sauerstoffsättigungswerten im Hypolimnion. Bei der Ausbildung anaerober Bereiche konnte eine Verzögerung beobachtet werden.

Die Untersuchungen im Staukörper der Biggetalsperre zeigten bei den Messergebnissen der Sauerstoffsättigung keine auffälligen Unterschiede zwischen starker und schwacher Grundablassabgabe.

Eine verstärkte dynamische Grundablassabgabe führt demnach nicht zu einer Reduzierung der Sauerstoffsättigung im Hypolimnion, sondern trägt durch die Entnahme von Nährstoffen und die folgende Reduzierung von sauerstoffzehrenden Prozessen zur Erhöhung der Sauerstoffsättigung über dem Sediment bei.

II.3.2 Wirkungen auf abiotische und biotische Ökosystemelemente im Unterlauf

Die biologischen und ökologischen Eigenschaften von Talsperrenunterläufen wurden anhand verschiedener Fallstudien erhoben. Schwerpunkte der Untersuchungen dieser Fallstudien waren: Abfluss, Temperatur, Geschiebe/Sedimente, sowie umfangreiche Analysen zu den Auswirkungen auf wichtige biologische Indikatorgruppen (Makrozoobenthos, Fische). Die Analyse der abiotischen und biologischen Effekte von Talsperren auf ihre Unterläufe deutet auf wichtige

und zum Teil gravierende Störungen der natürlichen Dynamik der Gewässer hin. Die Ergebnisse hängen dabei eng mit der Bewirtschaftung der betrachteten Talsperren zusammen, die sich vor allem aus deren Nutzung als Trinkwasserreservoir ergibt. Die Talsperren der Ruhr dienen zudem der Niedrigwasseraufhöhung im Unterlauf. Die erzielten Ergebnisse sind daher zunächst im Kontext dieser Nutzung und der sich daraus ergebenden Bewirtschaftung zu interpretieren. Eine ausführliche Beschreibung zu Methoden und Ergebnissen der Fallstudien finden sich in einem internen Ergebnisbericht.von Echterhoff und Meißner (2015).

II.3.2.1 Abflussdynamik

Für die Untersuchungen zur Auswirkung von Talsperren auf die Abflussdynamik wurden Daten von insgesamt 80 Pegelstationen (davon 11 Talsperrenunterläufe) über eine Periode von 10 Jahren ausgewertet. Die Pegeldaten wurden aggregiert, in hydrologische Indizes überführt und den fünf Hauptkategorien der Abflussdynamik zugeordnet. Die Hauptkategorien der Abflussdynamik stellen sich wie folgt dar:

- Magnitude: Höhe und Variabilität der Wassermenge
- Frequenz: durchschnittliche Häufigkeit von bestimmten Abflussereignissen, z. B. Niedrig-/Hochwasserabflüssen (NQ/HQ) im Verlauf eines Jahres
- Dauer: durchschnittliche Dauer von Abflussereignissen, z. B. Niedrig-/Hochwasserabflüssen
- Änderungsrate: Änderungen des Abflusses (Anstieg/Abstieg) in einer definierten Zeiteinheit (z. B. in 15 Minuten) und deren Intensität
- Periodik: zeitlich wiederkehrende Muster und ihre Ausprägung (z. B. Saisonalität)

Die hydrologische Charakterisierung und der Vergleich von ungestörten Fließgewässern zeigten deutliche Veränderungen der Abflussdynamik von Talsperrenunterläufen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zusammenfassung der saisonalen Abweichungen der Abflussregime unterhalb von Talsperren im Vergleich zu weitgehend ungestörten Referenzgewässern

Abflussindex	Sommer	Winter
Magnitude	↓↓	=
Frequenz NQ (>$Q_{0,1}$)	↓↓	↑↑
Frequenz HQ (>$Q_{0,9}$)	↓	↓↓
Dauer NQ	=	↑↑
Dauer HQ	↑↑	↑↑
Tägl. Anstiegsrate	↓↓	↓↓
Tägl. Abstiegsrate	↓↓	↓

($Q_{0,1}$ und $Q_{0,9}$ kennzeichnen das 10%- und 90%-Perzentil des Abflusses; Doppelpfeile kennzeichnen signifikante Abweichungen, einzelne Pfeile deutliche, aber nicht signifikante Abweichungen und ein Gleichheitszeichen keine Abweichungen)

Insgesamt weist das Abflussregime von Talsperren eine klare Abflusshomogenisierung auf. Die Variabilität der abgegebenen Wassermengen (Magnitude) ist hier vorwiegend in den Sommermonaten stark vermindert im Vergleich zu unbeeinflussten Referenzgewässern. Zusätzlich wurden unterhalb von Talsperren weniger Extremereignisse aufgezeichnet, im Sommer weniger Niedrigwasserereignisse und im Winter deutlich weniger Hochwasserereignisse, wobei die Dauer dieser Extremereignisse deutlich über denen unbeeinflusster Referenzgewässer liegt. Sowohl die täglichen An- als auch Abstiegsraten sind im Unterlauf von Talsperren herabgesetzt.

II.3.2.2 Temperaturregime

Das Untersuchungsprogramm zum Temperaturregime beinhaltete eine einjährige Langzeitmessung in acht Talsperrenunterläufen sowie in vergleichbaren Nebengewässern. Zusätzlich wurde die mögliche Streuweite des Temperatureinflusses während eines Dynamisierungsversuchs an der Hennetalsperre ermittelt.

Hinsichtlich des Temperaturregimes führen die Talsperren zu einer deutlichen Überformung der Temperaturverhältnisse im Unterlauf (Abbildung 26). Die Variabilität der Temperatur ist unterhalb der Talsperren stark eingeschränkt, die Wassertemperaturen sind vor allem im Frühjahr und Sommer zu niedrig und vollständig von der Lufttemperatur entkoppelt. Es ist davon auszugehen, dass diese bis zu 10 km unterhalb nachweisbaren Störungen mit gravierenden Veränderungen der aquatischen Fauna verbunden sind. Kälteliebende Arten dominieren, die Diversität geht zurück, die Entwicklung der Organismen ist verlangsamt und die Reproduktion

verzögert. Das Beispiel Große Dhünn mit einer variablen Entnahmetiefe des in den Unterlauf abgeleiteten Wassers aus der Talsperre zeigt, wie ein weniger gestörtes Temperaturregime unterhalb einer Talsperre zu erreichen ist. Das dort unterhalb der Talsperre ermittelte Temperaturregime wich nur geringfügig vom ungestörten Regime des benachbarten Nebengewässers ab.

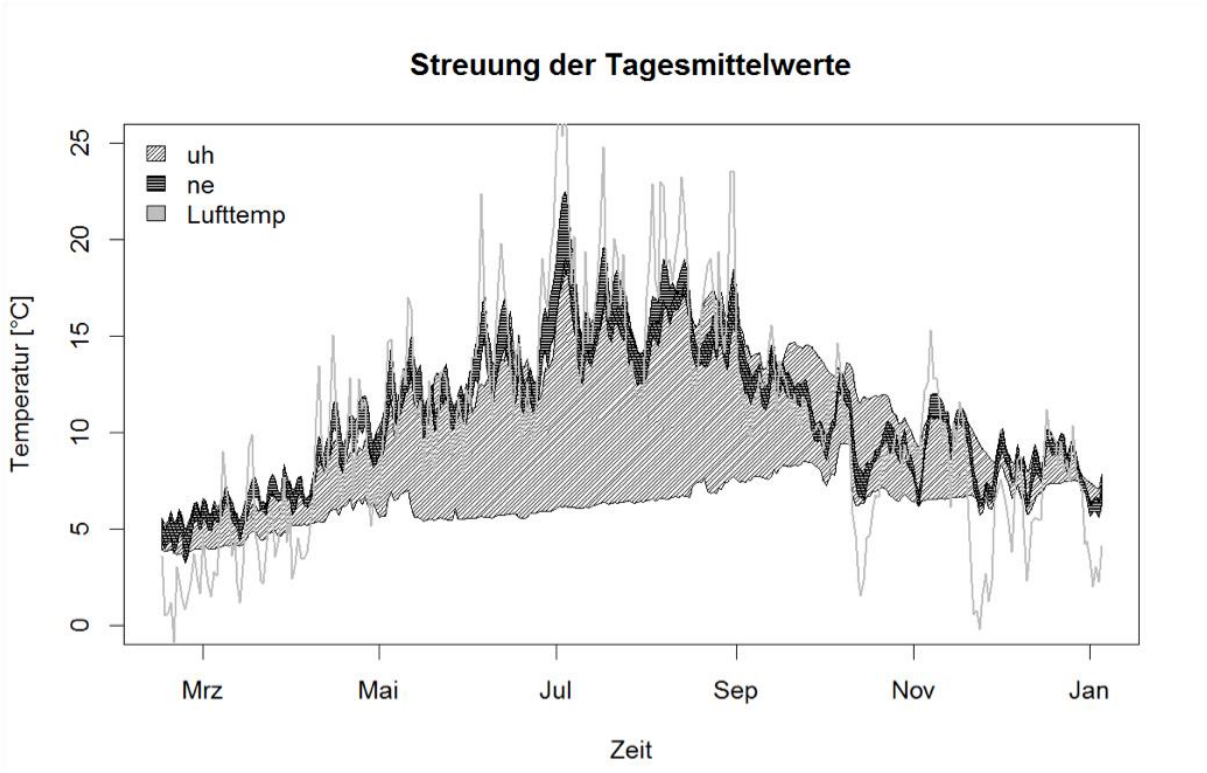


Abbildung 26: Tagesmittelwerte der Wassertemperatur aller erfassten Gewässerabschnitte

Deutlich ist der Zusammenhang zwischen Lufttemperatur (Tagesmittelwerte, hellgraue Linie) und Wassertemperatur in ungestörten Nebengewässern (dunkelgraues Band, ne) zu erkennen, während die Wassertemperatur unterhalb der Talsperren (helles Band, uh) deutlich heterogener und zum Teil weit unterhalb des ungestörten Temperaturregimes lag.

II.3.2.3 Geschiebe und Sedimente

Für die Erhebung der Feinsedimentgehalte unterhalb von Talsperren wurden insgesamt acht Gewässerpaare (jeweils unterhalb von Talsperren und in Nebengewässern) anhand einer standardisierten Methode erhoben und ausgewertet.

Die im Vergleich zu den ungestörten Gewässern erhöhte Akkumulation von Feinsediment (< 2 mm Korngröße) unterhalb von Talsperren konnte mit dieser Studie für mehrere Talsperren deutlich aufgezeigt werden (Abbildung 27). Es wurde teilweise doppelt so viel Feinsediment abgelagert wie in den Nebengewässern, wobei der Unterschied für die Feinfraktion (< 63 µm)

beider Gewässergruppen signifikant war. Ein Trend hin zur stärkeren Akkumulation von feinpartikulärem organischen Material (zusammen mit dem Feinsediment) unterhalb von Talsperren war erkennbar, jedoch nicht signifikant. Hinsichtlich der Abflussdynamik konnte gezeigt werden, dass die betrachteten Talsperren eine herabgesetzte Abflussdynamik im Unterlauf bedingen, insbesondere in Bezug auf die Frequenz bettbildender Abflussereignisse. Dadurch bedingt wird mehr Feinsediment akkumuliert bzw. nicht mehr erodiert, und es kommt zum Habitatverlust für Fische und benthische Wirbellose und letztlich zum Verlust von Biodiversität.

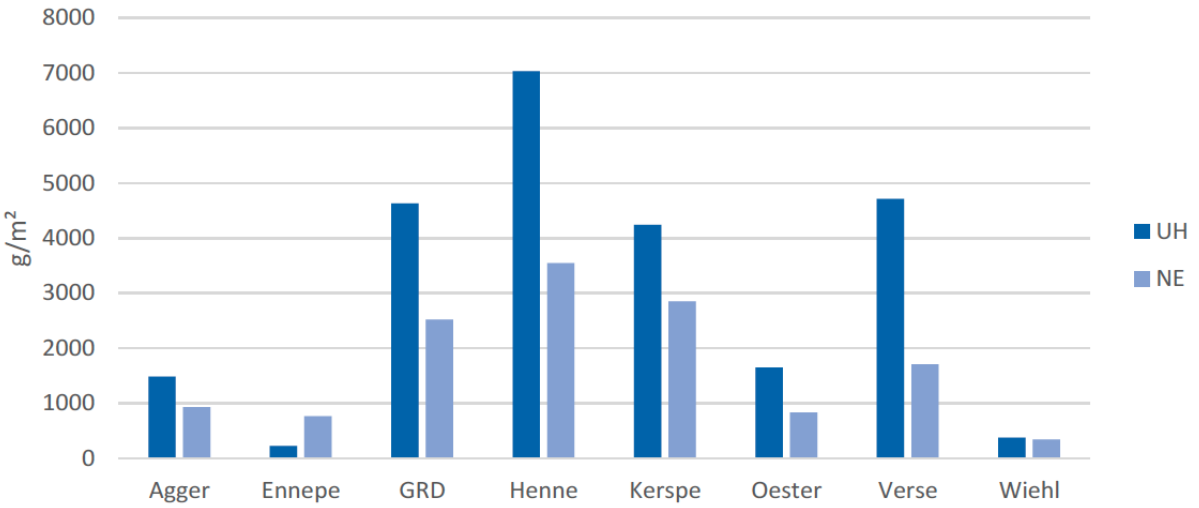


Abbildung 27: Oberflächennahe Feinsedimentmengen unterhalb der Talsperren (UH) und in vergleichbaren, unbeeinflussten Nebengewässern (NE). GRD = Große Dhünn

II.3.2.4 Makrozoobenthos

Die Probennahmen des Makrozoobenthos erfolgten an jeweils acht Abschnitten unterhalb von Talsperren, oberhalb von Talsperren und in vergleichbaren Nebengewässern und wurden von März bis Mai 2016 (Frühjahr) und von Juli bis August 2016 (Sommer) entnommen. Die Daten der Frühjahrsprobennahme wurden ergänzt durch sechs weitere Beprobungen an der Kerspe, Oester- und Versetalsperre. Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte auf struktureller als auch funktionaler Ebene der Makrozoobenthosgemeinschaft, ein Hauptaugenmerk galt dabei den bewertungsrelevanten Metrics.

Die vielfältigen Störungen infolge einer veränderten Abflussdynamik werden im Folgenden zunächst in Ursache-Wirkungsbeziehungen zusammengestellt (Abbildung 28). Ausgehend von diesen Beziehungen wurden einzelne Wirkungspfade (z. B. eine Feinsedimentanreicherung infolge geringerer Abflussmengen) genauer betrachtet und anhand der empirisch erhobenen Daten überprüft. Statistisch signifikante Ursache-Wirkungsbeziehungen wurden dann zur

Prognose der biologischen Wirkung unter einer sich ändernden Abflussdynamik herangezogen (Kap.II.3.4).

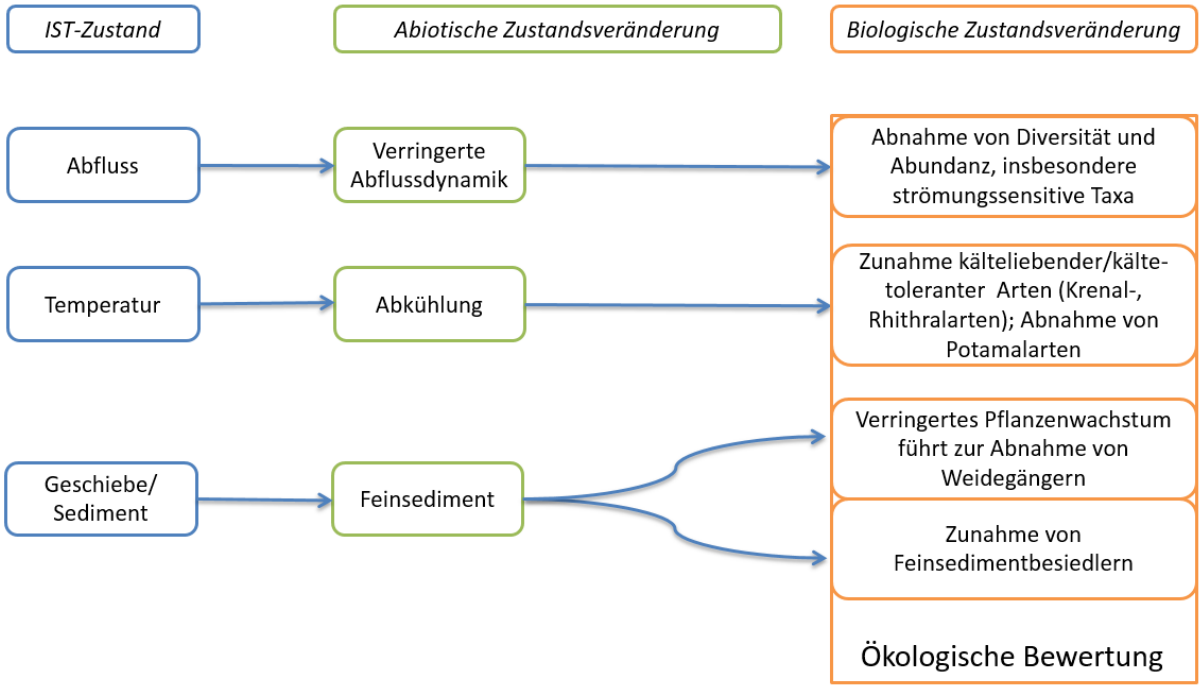


Abbildung 28: Konzept der untersuchten Ursache-Wirkungsbeziehungen

Die untersuchten abiotischen Veränderungen (Temperaturabsenkung, erhöhte Feinsedimentgehalte, Abflussstabilisation) führen zu einer deutlichen Veränderung der Makrozoobenthosgemeinschaft im Unterlauf von Talsperren. Auf Artniveau zeigt sich dies vor allem an einem Rückgang von strömungsliebenden Wirbellosenarten und einer Zunahme an Arten ohne spezialisierte Strömungsansprüche. Eine Rhithralisierung durch ein herabgesetztes Temperaturregime der Talsperrenunterläufe konnte nicht bestätigt werden, was mit einem entgegen gerichteten Einfluss der Abflusshomogenisierung begründet werden kann. Die herabgesetzte Wassertemperatur führt zu einem Anstieg von Quellarten (Krenalarten) in Unterläufen. Erhöhte Feinsedimentgehalte im Unterlauf von Talsperren verschieben die trophische Struktur der Makrozoobenthosgemeinschaft; hier konnte vor allem der Rückgang der Weidegänger in Talsperrenunterläufen aufgezeigt werden. Bezüglich des Anstiegs der Feinsedimentbesiedler zeichnet sich ein differenziertes Bild ab. Die Anteile der zuzuordnenden Substratpräferenzen (%Pelal = Schlammbesiedler) waren stark variabel und passen so zu den variablen Feinsedimentgehalten in Talsperren-beeinflussten Gewässern. Diversitätsverlust und Abnahme von strömungssensitiven sowie störungsempfindlichen Taxa als Folge einer Abflusshomogenisierung konnte im Unterlauf der Talsperren beobachtet werden. Zusammenfassend wirken sich die aufgeführten Stressoren negativ auf die Bewertung des ökologischen

Zustands aus. Auch die Analyse der bewertungsrelevanten Metrics spiegeln die starken Eingriffe in das Abflussregime der Gewässer wider (Tabelle 5). Der Rheoindex gibt Aufschluss über das Verhältnis von strömungsliebenden zu Stillwasserarten und zeigt in sechs von zehn Fällen die aufgezeigten Veränderungen im Abflussregime auf biologischer Ebene. Ähnliches gilt für den Anteil an Hyporhithral-Besiedler (Hyporhithral [%]). Typische Arten der unteren Bachregion stellen im Vergleich zu Bewohnern höher gelegenen Regionen geringere Ansprüche an Strömung und Sauerstoffverfügbarkeit.

Tabelle 5: „Modul allgemeine Degradation“ für Fließgewässer Typ 5 (Pottgiesser und Sommerhäuser, 2008). Probestellen unterhalb von Talsperren. Bewertung und Core-metrics aufgelistet im 5 Klassensystem mit 1 = sehr gut bis 5 = schlecht

	Agger	Bever	Ennepe	Gr.Dhünn	Henne	Sorpe	Wiehl	Kerspe	Oester	Verse
Bewertung gesamt	2	3	2	3	3	4	2	4	2	3
D. F. I. Typ 5	2	2	2	2	3	4	3	3	2	3
Hyporhithral [%]	3	3	2	4	2	5	2	2	2	3
Rheoindex	2	4	2	3	3	3	1	5	3	2
EPT [%]	2	3	1	2	3	3	2	4	1	3

(D.F.I. = Deutscher Faunaindex, Hyporhithral [%] = Hyporhithral-Besiedler, Rheoindex = Verhältnis von strömungsliebenden zu Stillwasserarten, EPT [%] = Anteil von Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera).

Der Einfluss des Abflussregimes auf verschiedene strukturelle und funktionale Ebenen innerhalb der Makrozoobenthosgemeinschaft ist stark variabel. Als bedeutendste Abflusskategorien stellen sich hier die Magnitude, die tägliche Änderungsrate (vorwiegend Abstiegsrate) sowie die jährliche Frequenz und Dauer von Niedrigwasserereignissen in Bezug auf das Makrozoobenthos dar.

II.3.2.5 Fische

Die Befischung der Probestellen wurde im Herbst 2015 mittels Elektrobefischung an acht Gewässerabschnitten unterhalb von Talsperren und in vergleichbaren Nebengewässern nach den Vorgaben des fischbasierten Bewertungssystems Deutschland (fiBS) durchgeführt.

Die Besiedlung der Gewässerabschnitte unterhalb der Talsperren und in den Nebengewässern zeigte deutliche, jedoch statistisch nicht signifikante Unterschiede in den Abundanzen von Bachforelle und Groppe. Aufgrund der geringen Gesamtartenzahl für den LAWA-

Gewässertyp 5 im Referenzzustand sind weitergehende Betrachtungen der Diversität unterhalb von Talsperren und in den Nebengewässern nicht sinnvoll.

Die Auswertung des Fischregionsindex (FRI), welches ein Maß für die Standorttypie der Fischarten einer Gemeinschaft ist, zeigte jedoch deutliche Unterschiede zwischen beiden Gewässergruppen. Der FRI wird u.a. vom vorherrschenden Temperaturregime eines Gewässerabschnittes bestimmt. Die Abweichung der FRI-Werte der Nebengewässer vom typspezifischen Referenzwert (nach fiBS) war im Mittel geringer (mittlere Abweichung: 0,37) als die der Gewässer mit Talsperreneinfluss (0,55), wobei letztere im Mittel einen geringeren FRI aufwiesen (unterhalb der Talsperren: 3,95; Nebengewässer: 4,33). Dies deutet auf eine artifizielle Verschiebung der Fischregion in Richtung Oberlauf hin (Rhithralisierung). Grund der Rhithralisierung dürfte vor allem das kühlere Temperaturregime der Talsperrenunterläufe sein.

Die abschließende Analyse zur Populationsstruktur der erfassten Fischarten gab keine weiteren Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Fischfauna. Hierzu wurden die Größenklassen der Individuen (5 cm-Schrittweite) einer vergleichenden Analyse zugeführt, um Veränderungen in der Zusammensetzung von Jung- und Altfischen zu identifizieren. Die dafür notwendige Datenbasis wurde allerdings nur für die Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) erreicht. Hinsichtlich der Altersstruktur der Bachforelle wurden keine Unterschiede zwischen Probestellen unterhalb von Talsperren und vergleichbaren Nebengewässern festgestellt (Abbildung 29). Auch die qualitative Auswertung der histografisch aufgetragenen Größenklasse ließ keine Unterschiede erkennen. Es ist daher davon auszugehen, dass das herabgesetzte Temperaturregime zunächst keine negativen Auswirkungen auf die Reproduktion der Bachforelle unterhalb von Talsperren hat. Da es sich bei der Bachforelle allerdings um eine Art handelt, die im Rahmen der Fischereibewirtschaftung umfangreich und regelmäßig besetz wird, sind Einflüsse von Besatzmaßnahmen auf die untersuchten Gewässer nicht auszuschließen. Eine Klärung des Einflusses von Besatzmaßnahmen war im Bearbeitungszeitraum leider nicht möglich.

Die z. T. erhöhten Abundanzen der Bachforelle in den Talsperrenunterläufen deuten sogar auf einen positiven Effekt hin, der allerdings nicht signifikant war ($p = 0,05$). In der Zusammenschau geben die Ergebnisse zur Fischfauna Anlass, die grundsätzliche Eignung dieser Tiergruppe im betrachteten Gewässertyp in Frage zu stellen. Mit nur zwei Typ-spezifischen Arten und sehr wenigen Funden von Begleitarten war die Datenbasis für eine fundierte Analyse zu schwach. Hinzu kommen ungeklärte Fragen zum Besatz, so dass an dieser Stelle leider auf eine weitere Betrachtung der Fischfauna verzichtet werden muss.

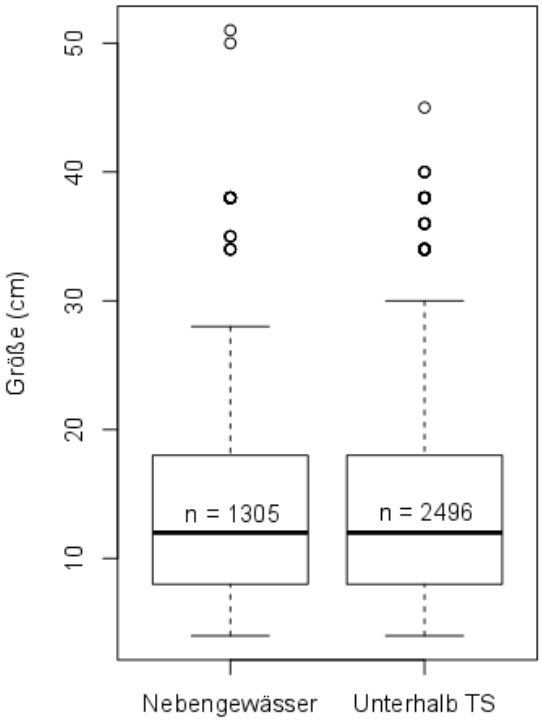


Abbildung 29: Verteilung der Körpergrößen (als Maß für die Altersstruktur) von Bachforellen unterhalb von Talsperren (TS) und in vergleichbaren Nebengewässern.

II.3.3 Energiewirtschaftliche Bewertung einer Dynamisierung

Im Folgenden werden die verschiedenen Dynamisierungsvarianten des Systems Trinkwassertalsperre Wiehl - Trinkwasseraufbereitung Auchel - Flussunterlauf Wiehl für die Jahre 2012, 2013 und 2014 betrachtet. Der Simulation werden konsistente Eingangsdaten zu Grunde gelegt. So werden passend zum Betrachtungsjahr die Abgabemengen[1] der Trinkwassertalsperre an die Trinkwasseraufbereitung und das Fließgewässer Wiehl unterhalb der Talsperre, sowie die Strompreise des Jahres verwendet. Zur Bewertung der Dynamisierung werden verschiedene Grade der Dynamisierung für die jeweiligen Varianten betrachtet. Grundsätzlich dient die Simulation der Dynamisierung der Abschätzung von Erlöspotenzialen. Deshalb werden bei der Darstellung die jährlichen Erlöspotenziale dem entsprechenden Referenzfall gegenübergestellt, so dass aufgrund der verschiedenen wasser- und energiewirtschaftlichen Jahre die Vergleichbarkeit gewahrt wird.

[1] Abgabemengen wurden als Tagesmittelwerte für die entsprechenden Jahre durch den Aggerverband bereitgestellt.

In Tabelle 6 ist die Rohwasserabgabe der Wiehl Talsperre an die Trinkwasseraufbereitung (TWA) Auchel und den Unterlauf Wiehl aufgelistet. Die Rohwasserabgabe verteilte sich in den Jahren 2012 und 2013 zu 2/3 auf die TWA Auchel und zu 1/3 auf den Unterlauf Wiehl. Im Jahr 2014 reduzierte sich das Gesamtvolumen der Abgabe von etwa 26 Mio m³/a auf 19,2 Mio m³/a, so dass der Anteil der Abgabe an den Unterlauf Wiehl deutlich geringer war.

Tabelle 6: Aufteilung der Rohwasserabgabe der Talsperre an die TWA Auchel und die Wiehl

Jahr	Gesamtvolumen [Tm³/a]	Auchel [%]	Wiehl [%]
2012	25943	64	36
2013	26030	62	38
2014	19264	81	19

II.3.3.1 Untersuchung der Talsperre Wiehl

Kostenoptimierte Dynamisierung

In den Simulationen zur kostenoptimierten Dynamisierung werden verschiedene Dynamisierungsperioden zu Grunde gelegt, wobei die Periode von einer Stunde als Referenz verwendet wird. Im Referenzfall wird die Abgabe der Wassermenge an die Aufbereitung bzw. an den Unterlauf fest vorgeben, so dass keine Dynamisierung vorgenommen wird. In Abbildung 30 bis Abbildung 32 wird die Rückwirkung der betrachteten Dynamisierung auf den jährlichen Erlös aus dem Stromverkauf gegenüber dem Referenzfall illustriert.

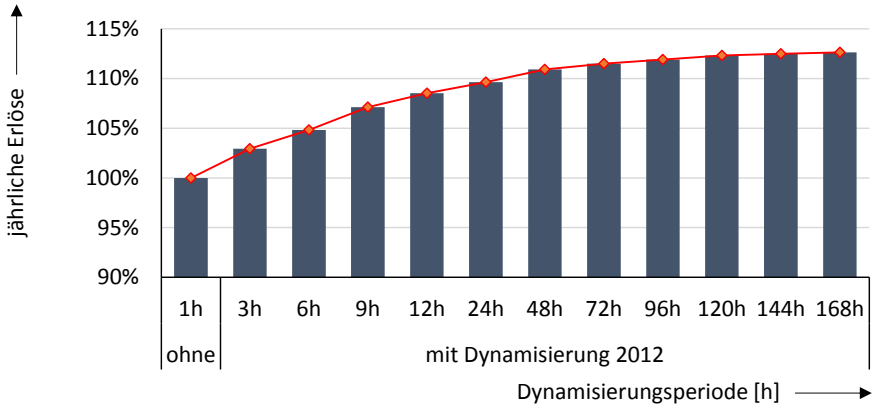


Abbildung 30: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2012

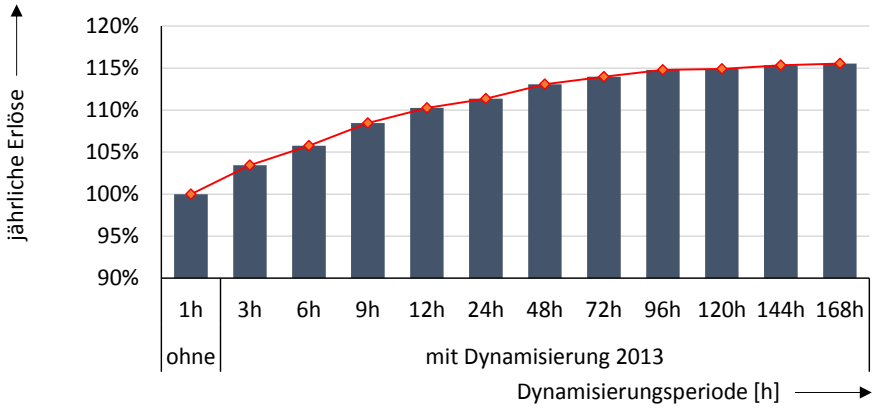


Abbildung 31: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2013

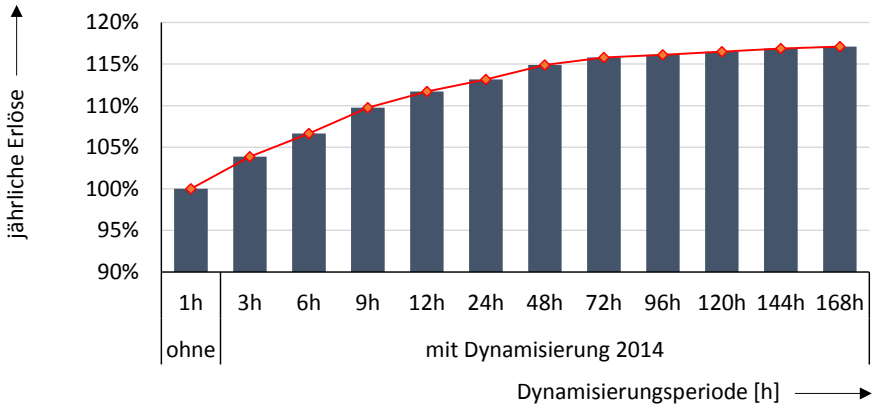


Abbildung 32: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2014

Die Ergebnisse geben für die betrachteten Jahre ein einheitliches Bild hinsichtlich der Rückwirkung der Dynamisierungsperiode auf den jährlichen Erlös. Gegenüber dem Referenzfall ist zu erkennen, dass der Grenznutzen mit zunehmender Verlängerung der Dynamisierungsperiode abnimmt. So beläuft sich die relative Erlössteigerung bei einer Veränderung der Dynamisierungsperiode von 1 h auf 3 h für die Betrachtungsjahre auf 2,9 %/a bis 3,9 %/a Bei Steigerung der Dynamisierungsperiode von 24 h auf 48 h beträgt die Steigerung nur noch 1,3 %/a bis 1,8 %/a. Der abnehmende Grenznutzen lässt sich dadurch erklären, dass aufgrund der technisch begrenzten Durchflusskapazität der Turbinen, Zeiträume mit höheren Strompreisen nur begrenzt viel elektrische Leistung vermarktet werden kann. Gegenüber dem Referenzfall lassen sich die jährlichen Verkaufserlöse um mindestens 12,6 % bis maximal 17,1 % bei einer Dynamisierungsperiode von 168 Stunden bzw. 1 Woche erzielen. Grundsätzlich handelt es sich hierbei um Potenziale, die aufgrund der langen Perioden der Dynamisierung mit weiteren Aufwendungen für bspw. Speicherung einhergehen. Neben den abnehmenden Grenzerlösen pro Jahr geht mit einer Verlängerung der Dynamisierungsperiode ein planerischer Anstieg des Aufwands für Vermarktungsprognosen sowie Aufwendungen für Speicherung von

Volumina an der Abnahmestelle der Trinkwasseraufbereitung einher, damit die Rohwasserbereitstellung stets gewährleistet werden kann. Für eine Verlängerung der Dynamisierungsperiode von 12 h auf 24 h ergibt sich hingegen nur eine Steigerung der Erlöse von 1,1 %/a bis 1,4 %/a. Dem gegenüber steht die Steigerung der Erlöse von 1,4 %/a bis 2 %/a bei einer Verlängerung von 9 h auf 12 h. Daher empfiehlt sich, die Dynamisierungsperioden kleiner oder gleich 12 Stunden zu wählen, da ein steigender Grenznutzen für den Anlagenbetreiber (Erlöse aus Stromverkauf vs. Planungszeitraum) bei längeren Perioden nicht gegeben ist.

Ökologisch optimierte Dynamisierung

In den Simulationen zur ökologisch optimierten Dynamisierung wurde eine feste Dynamisierungsperiode von 24 Stunden bei variierenden Durchflussänderungen im Unterlauf zu Grunde gelegt. In dieser Betrachtung wurde die Rohwasserabgabe an die Trinkwasseraufbereitung in allen Varianten fest im Zeitverlauf vorgeben, so dass hier keine Dynamisierung erfolgt. Als Referenz wird die Dynamisierung mit der größten, betrachteten Einschränkung von 0,025 m³/s (Mindestabgabe) gesetzt. In Abbildung 33 bis Abbildung 35 wird die Rückwirkung der betrachteten Dynamisierung auf den jährlichen Erlös aus dem Stromverkauf gegenüber dem Referenzfall illustriert.

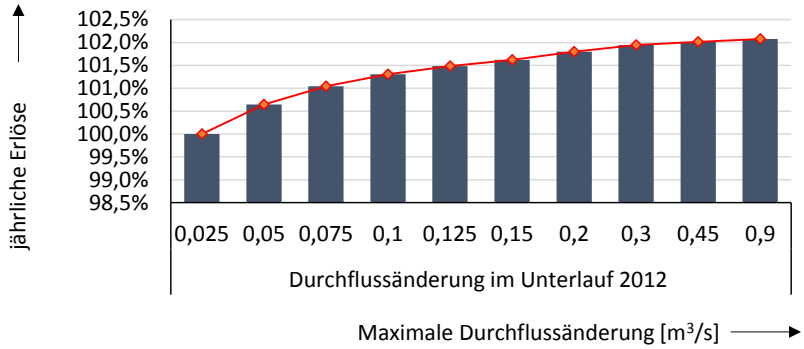


Abbildung 33: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2012

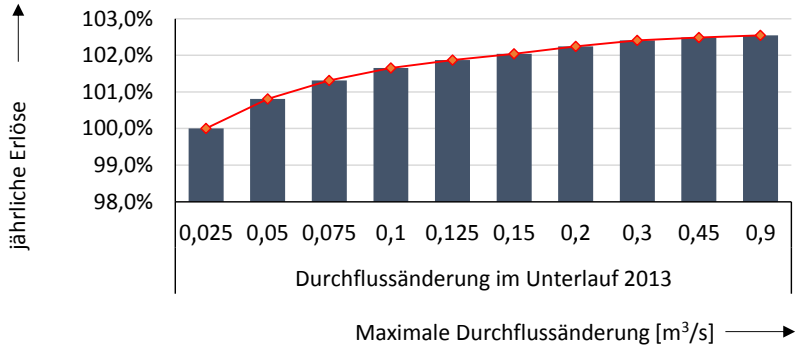


Abbildung 34: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2013

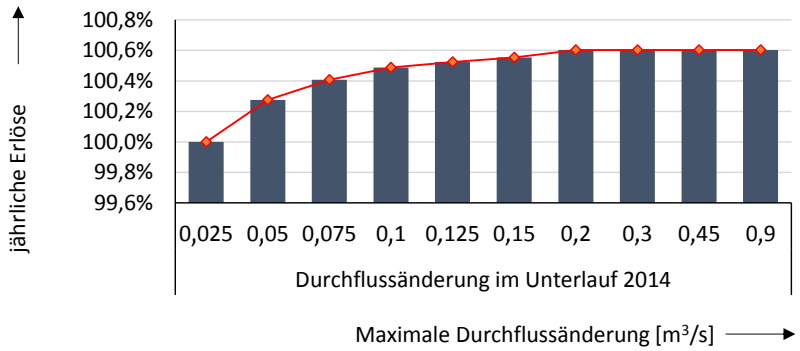


Abbildung 35: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2014

Die ökologisch optimierte Dynamisierung des Unterlaufs zeigt in den Ergebnissen eine deutlich reduzierte Bandbreite der Veränderung der jährlichen Erlöse gegenüber der kostenoptimierten Variante. Gründe hierfür liegen unter anderem in der bereits bestehenden Restriktion des Unterlaufs, der Mindestabgabe von 0,025 m³/s, sowie in den gegenüber der Aufbereitung relativ geringen Volumina. Mit einem Schluckvermögen von maximal 0,9 m³/s der beiden Turbinen ergibt sich die maximale Durchflussänderung zwischen zwei Zeitintervallen, was bei Ausnutzung dem Schwallbetrieb entspricht. Die Ergebnisse spiegeln die Steigerung der jährlichen Erlöspotenziale mit wachsendem Freiheitsgrad wider. In den Jahren 2012 und 2013 können die jährlichen Erlöse aus dem Stromverkauf um 2,1 %/a bis 2,5 %/a bei vollständiger Ausnutzung der Freiheitsgrade gesteigert werden. Jedoch nimmt aufgrund der technischen Restriktionen sowie des wasserwirtschaftlich begrenzten Volumens der Verlauf des Grenznutzens mit steigendem Freiheitsgrad überproportional ab. Das Jahr 2014 mit den relativ geringen Abgabevolumina an den Unterlauf zeigt, dass das Dynamisierungspotenzial eine starke Abhängigkeit des verfügbaren Rohwassers nach Abzug der Mindestabgabe aufweist. Das verfügbare zu dynamisierende Rohwasservolumen ist durch die wasserwirtschaftliche Mindestabgabe stark begrenzt, was bei vollständiger Nutzung der Freiheitsgrade (0,9 m³/s gegenüber 0,025 m³/s) in einer Steigerung der jährlichen Erlöse aus dem Stromverkauf von 0,6 %/a resultiert. Grundsätzlich zeigt sich, dass der Schwallbetrieb aus ökonomischer Sicht keinen deutlichen Mehrwert bietet und eine Einschränkung der Durchflussänderung denkbar ist.

Lastoptimierte Dynamisierung

In den Simulationen zur lastoptimierten Dynamisierung wurde eine variierende Dynamisierungsperiode bei der Trinkwasseraufbereitung betrachtet, wobei die Rohwasserabgabe an den Unterlauf als Zeitreihe vorgegeben wird. Somit ist eine isolierte Betrachtung der lastoptimierten Dynamisierung ohne Rückwirkung möglich. Als Referenz wird die nicht lastoptimierte Dynamisierung (1 h) verwendet. Die Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen die Entwicklung der jährlichen Erlöse abhängig der Dynamisierungsperiode in der Trinkwasseraufbereitung.

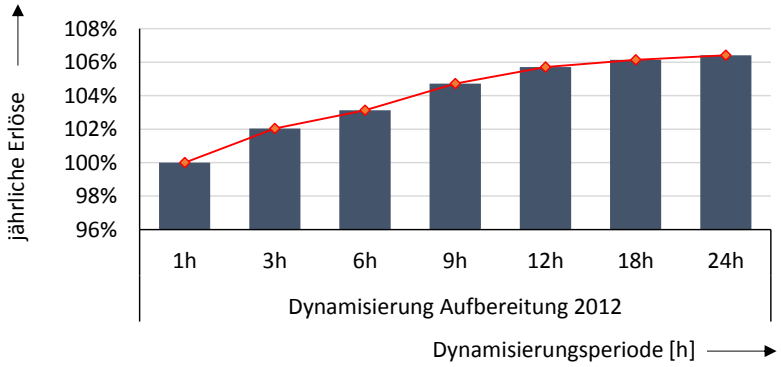


Abbildung 36: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2012

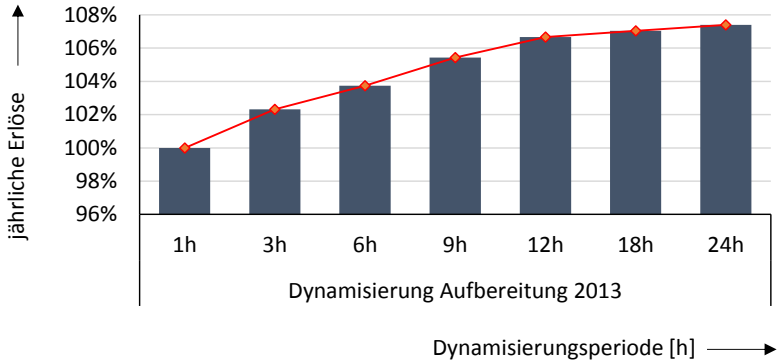


Abbildung 37: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2013

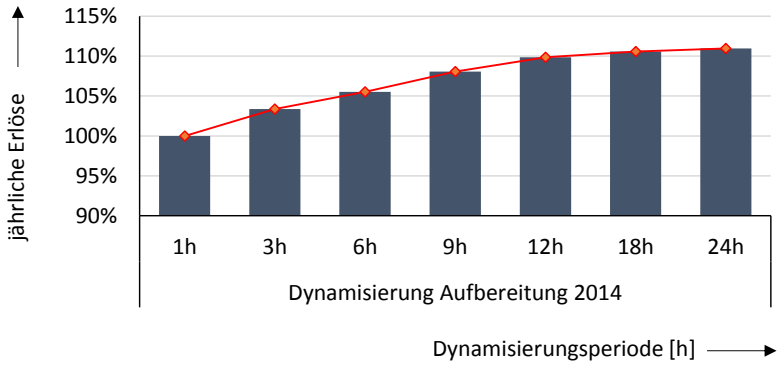


Abbildung 38: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2014

Mit der Veränderung der Dynamisierungsperiode der Rohwasserabgabe an die Trinkwasseraufbereitung geht eine Rohwasserspeicherung in der Aufbereitung einher. Da die Speicherung nur begrenzt möglich ist, wird als maximale Dynamisierungsperiode 24 Stunden gewählt. Wie zu erwarten, zeigen die Ergebnisse eine ähnliche Entwicklung wie die Simulationen zuvor. Mit Verlängerung der Dynamisierungsperiode von 1 h auf 3 h ergibt sich eine Steigerung der jährlichen Erlöse aus dem Stromverkauf von 2 %/a bis 3,4 %/a. Der Grenznutzen durch eine zunehmende Dynamisierungsperiode ist auch in diesem Fall abnehmend, da in Zeiten relativ hoher Strommarktpreise die Turbinen bereits mit der gesamten Leistung einspeisen und somit kein weiteres Dynamisierungspotenzial bieten.

II.3.3.2 Untersuchung der Talsperre Große-Dhünn

In den folgenden Sensitivitätsuntersuchungen werden drei Ausbauvarianten an der Großen Dhünn-Talsperre betrachtet. Die Varianten unterscheiden sich zu der heutigen Konfiguration durch den Zubau an Turbinenleistung, respektive Pumpleistung. Auf Basis der verschiedenen Konfigurationen wird der Mehrwert anhand der Veränderung des Deckungsbeitrags gegenüber der heutigen Konfiguration bewertet.

Zunächst wird eine Beschreibung der Varianten gegeben und im Anschluss die Ergebnisse der Untersuchung diskutiert.

Betrachtungsbereich

Als Referenz der Bewertung wird der aktuelle Stand der Turbinenkonfiguration an der Großen Dhünn-Talsperre angenommen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Referenzkonfiguration der Großen Dhünn-Talsperre (aktueller Stand)

Bezeichner	Schluckvermögen [m^3/s]	Leistung [MW]	Senke
1. Durchströmturbine	0,4	0,14	Dhünn
2. Durchströmturbine	0,4	0,14	Dhünn

Die Referenzvariante wird sukzessive um verschiedene Flexibilitäten erweitert, so dass eine Bewertung des jeweiligen Mehrwerts möglich ist. Insgesamt werden vier Simulationen durchgeführt und ausgewertet: die Referenz mit der aktuellen Konfiguration und 3 Varianten, in denen die Turbinenleistung oder Pumpleistung variiert wird. Für eine optimistische Abschätzung des Pumpspeicherbetriebs wird auf die mengenmäßige Begrenzung des Unterbeckens verzichtet. Tabelle 8 fasst die betrachteten Konfigurationen zusammen.

Tabelle 8: Variationen der Turbinen-/Pumpen-Konfiguration

Konfiguration	Referenz	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Turbinen	P_{max}= 280 kW Q_{max} = 0,8 m^3/s	P_{max}= 560 kW Q_{max} = 1,6 m^3/s	P_{max}= 280 kW Q_{max} = 0,8 m^3/s	P_{max}= 560 kW Q_{max} = 1,6 m^3/s
Pumpen	P_{max}= 0 kW Q_{max} = 0,0 m^3/s	P_{max}= 0 kW Q_{max} = 0,0 m^3/s	P_{max}= 280 kW Q_{max} = 0,64 m^3/s	P_{max}= 560 kW Q_{max} = 1,28 m^3/s
Speichervolumen	Ohne Ausgleichsbecken	Ohne Ausgleichsbecken	Unbegrenzt (Ableitung max. genutzten Speichervolumens)	Unbegrenzt (Ableitung max. genutzten Speichervolumens)

Unabhängig von der betrachteten Konfiguration werden für alle betrachteten Varianten dasselbe Zufluss- und Abflussregime sowie dieselben Strommarktpreise zu Grunde gelegt. Die

Simulationen werden für das historische Jahr 2012 durchgeführt. Es wurde eine Dynamisierungsperiode von 24 Stunden angenommen.

Sensitivität Turbinen-/Pumpenleistung

Als Ergebnis der Simulation des Jahres 2012 wird der Jahresdeckungsbeitrag bestimmt. Aufgrund der verschiedenen Konfigurationen wird zur Vergleichbarkeit der Varianten der Deckungsbeitrag auf die installierte Leistung als spezifischer Deckungsbeitrag ausgewiesen. Abbildung 39 zeigt die Auswertung in Relation zum Referenzzustand.

In der Variante 1 erfolgt mithilfe der zweiten Turbine eine effektive Nutzung von hohen Strompreisen. Aufgrund desselben Wasserdargebots wie in der Variante Referenz führt diese Betriebsführung zu einem reduzierten Nutzungsgrad der einzelnen Turbinen, weshalb der absolute, jährliche Deckungsbeitrag lediglich um 31 % gegenüber der Variante Referenz gesteigert werden kann. Die Auswertung zeigt, dass aufgrund des restriktiven Wasserdargebots der spezifische Deckungsbeitrag bezogen auf die Turbinenleistung um 35 % abnimmt. Zur ausschließlichen Nutzung von Strompreisspitzen ist die Erweiterung der Talsperre um eine weitere Turbine nicht effizient, deshalb ist bei der Auslegung der Turbinenleistung, respektive Wasserabgabe der Zufluss stets zu berücksichtigen.

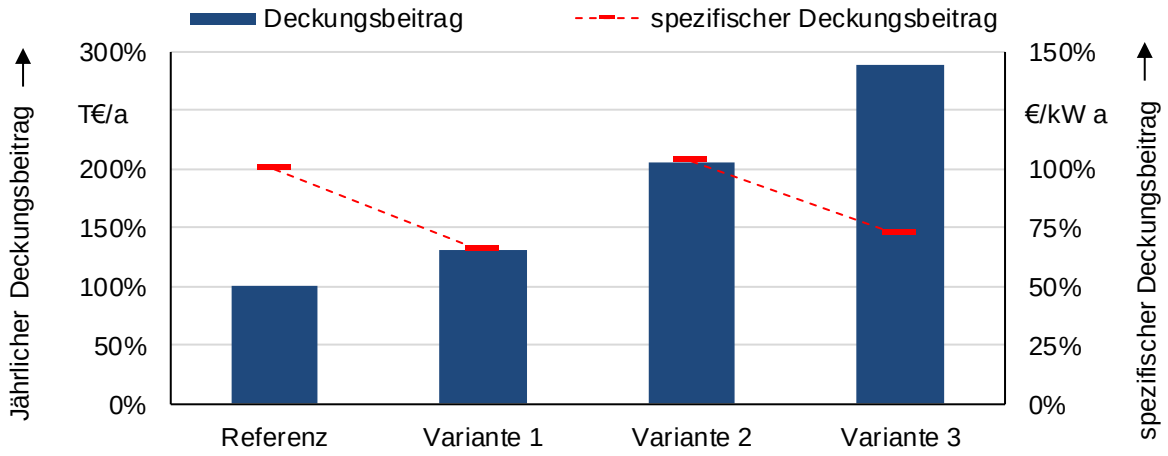


Abbildung 39: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge des Untersuchungsprogramms

Neben der reinen Leistungserhöhung wurde für jede Konfiguration zusätzlich untersucht, welchen Einfluss eine Ausführung des Unterlaufs als Pumpspeicherkraftwerk auf die Deckungsbeiträge hat. Dazu wurde jeweils eine leistungsgleiche Pumpe parallel zu der Turbine modelliert. Zunächst stellt das Speichervolumen im Unterlauf keine Einschränkung in der Simulation dar. Abbildung 40 zeigt Jahresdeckungsbeiträge sowie auf die Turbinenleistung bezogene spezifische Deckungsbeiträge. So steigt der Deckungsbeitrag bereits im Referenzfall um

106 % an, wenn der Unterlauf als Pumpspeicherkraftwerk ausgeführt wird. Die höchste Deckungsbeitragssteigerung ergibt sich in Variante 2. Hier steigt der Deckungsbeitrag um 159 % auf ca. 135 Tsd. €/a an.

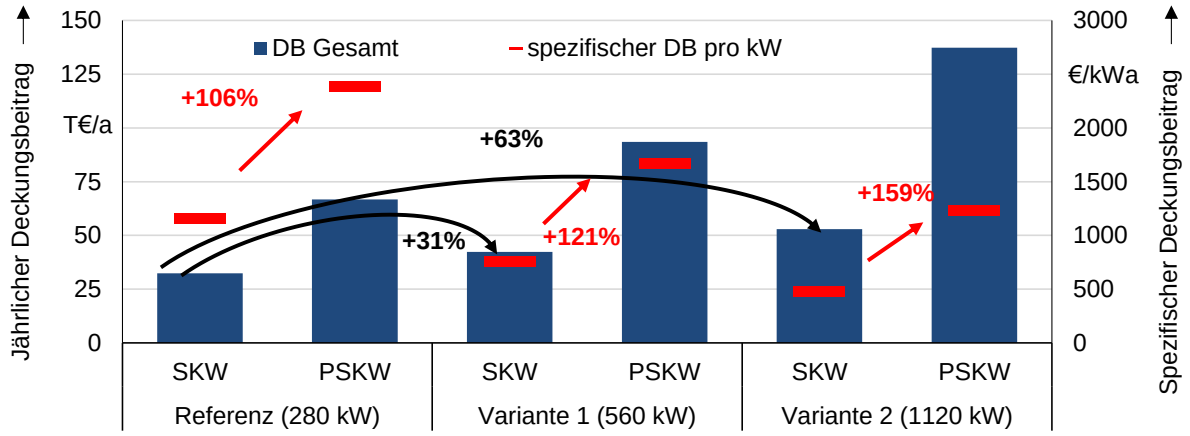


Abbildung 40: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge bei zusätzlichem Pumpspeicher

Sensitivität des Speichervolumens im Unterlauf

Wird im Unterlauf eine Pumpe modelliert, so wird zum Betrieb der Pumpe ein Speicher auf Seite des Unterlaufs benötigt, aus dem Wasser für den Pumpbetrieb entnommen wird. In den vorangegangenen Simulationen stellt dessen Speichervolumen zunächst keine Restriktion dar. Aus dem resultierenden Einsatz dieses Unterbeckens lässt sich die maximal benötigte Größe des Speichers ableiten. Diese Größe wäre notwendig, um das volle Potenzial des Pumpspeichers ausschöpfen zu können. Dies entspricht dem maximalen Hub im Unterbecken. Abbildung 41 zeigt exemplarisch, wie der Fahrplan ausgewertet wird. Rechts dargestellt ist die Dauerlinie des Speichereinsatzes. Die sich ergebenden Maximalwerte der Speichervolumina sind sowohl für die Referenz als auch für die beiden Simulationsvarianten in Tabelle 9 angegeben.

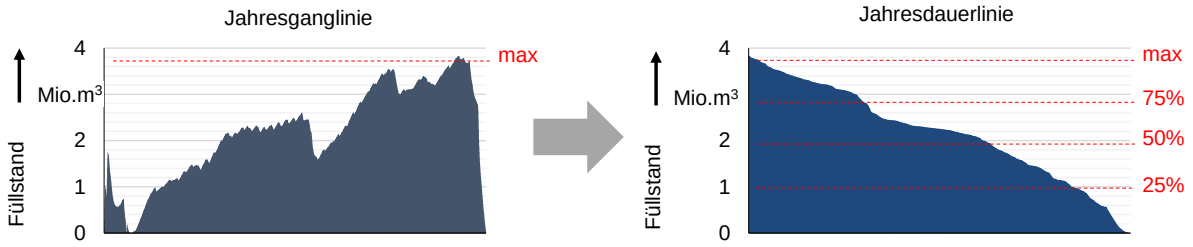


Abbildung 41: Ableitung der Speicherbeckenvariation aus dem Nutzungsprofil des unbeschränkten Speichervolumens im Unterlauf

Tabelle 9: Maximale Ausnutzung des Speichervolumens im Unterlauf

	Referenz	Variante 1	Variante 2
Speichervolumen Unterlauf	3,8 Mio. m^3	4,2 Mio. m^3	5 Mio. m^3

Als Variante zur unbegrenzten Speichermodellierung wird das Volumen auf 75 %, 50 % sowie 25 % des maximalen Füllstands beschränkt. Die Beckenvolumina sind exemplarisch für Variante 1 in Tabelle 10 angeben.

Tabelle 10: Variationen der Begrenzung des Speichervolumens im Unterlauf (Variante 1)

max	75%	50%	25%
3,8 Mio. m^3	2,85 Mio. m^3	1,9 Mio. m^3	0,95 Mio. m^3

Durch die Beschränkung des Speichervolumens im Unterlauf kann nun nicht mehr das volle Erlöspotenzial im Pumpspeicherbetrieb ausgeschöpft werden. Die aus der Simulation resultierenden Erlöse sind in Abbildung 42 dargestellt.

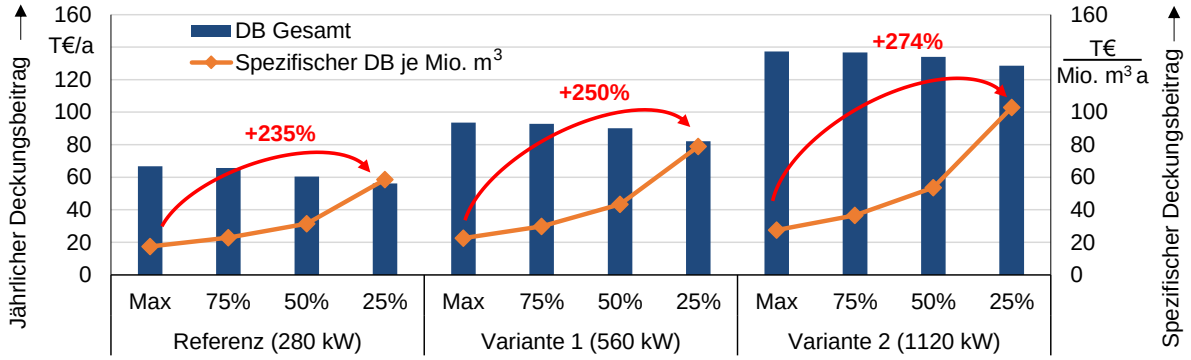


Abbildung 42: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge bei Variation des Speichers im Unterlauf

In Variante 1 beispielsweis sinkt der durch den Pumpspeicher erwirtschaftete Deckungsbeitrag von 93,5 Tsd. €/a auf 82,1 Tsd. €/a. Bezogen auf die Größe des zusätzlichen Speichers jedoch entspricht dies einem Anstieg des spezifischen Deckungsbeitrags um das 2,5-fache. Der Verlauf der Deckungsbeiträge in allen untersuchten Varianten lässt vermuten, dass der Grenznutzen mit zunehmendem Ausbau des Speichervolumens exponentiell abnimmt. Somit ist der ökonomische Nutzen der maximalen Speichervolumina eher begrenzt. Wird die Referenzanlage mit einer leistungsgleichen Pumpe (280 kW) sowie einem Speichervolumen im Unterlauf von 25 % des Maximalwertes angenommen, so steigt der Deckungsbeitrag im Vergleich zum reinen Turbinenbetrieb von 32 Tsd. €/a auf 56 Tsd. €/a an. Dieser Mehrwert ist jedoch gegen zusätzliche Investitionskosten für den Speicher im Unterlauf in einer Größenordnung von 12 Mio. € sowie Investitionskosten für die Pumpe zu bewerten. Somit ist eine Änderung der Konfiguration des Unterlaufs als Pumpspeicher auf Grund der hohen Investitionskosten schon ökonomisch nicht lukrativ.

II.3.4 Empfehlungen zum Ausbaupotenzial

Grundsätzlich konnte durch die Untersuchungen gezeigt werden, dass die Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren nicht den derzeitigen strengen Regularien unterliegen muss. Im Gegenteil gibt es Indizien dafür, dass durch eine dynamische Bewirtschaftung die Rohwasserqualität gesteigert werden kann. Die Resilienz des Staukörpers gegenüber einer dynamischen Bewirtschaftungsweise ist allerdings stark abhängig von der Größe des Speichervolumens und somit von der variierenden Stauspiegelabsenkung. Eine individuelle Betrachtung und Untersuchung des Staukörpers ist daher unabdingbar.

Die Untersuchungen im Projekt ENERWA haben aber auch gezeigt, dass sowohl die Überwachung der thermischen Schichtung als auch des Nährstoff- und Sauerstoffhaushaltes im Staukörper notwendig sind, um dynamische Bewirtschaftungsregeln für Trinkwassertalsperren zur

optimierten Energiegewinnung ableiten zu können. Hierbei spielt der zeitliche Verlauf der Stauspiegelschwankungen eine wesentliche Rolle. Dieser ist neben dem Abfluss (energetisch nutzbare Wassermenge) stark abhängig vom Volumen des Staukörpers, dem Ausbaugrad sowie der Zuflussmenge und somit von den hydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet der Talsperren. Zusätzlich müssen sowohl Hochwasserrückhalteraum, der durch Abgabe des schadensfrei abführbaren Abflusses freigehalten werden muss, und Reserveraum (Speichervolumen meistens zwischen höher gelegenen Betriebsablass und tief liegenden Grundablass) berücksichtigt werden. Aufgrund all dieser Ziel- und Einflussgrößen muss eine individuelle Betrachtung der Talsperren erfolgen.

Aus der saisonalen Gegenüberstellung der Abflussdynamik im Unterlauf von Talsperren und unbeeinflussten Referenzgewässern (siehe II 3.1.2) ergeben sich Potenziale für einen dynamisierten Talsperrenbetrieb aus ökologischer Sicht. Für diese Bewertung wurden 26 Probennahmestellen des bestehenden Gewässermonitorings des Landes NRW (http://www.elwas-web.nrw.de/) analysiert. Fazit dieser Untersuchungen ist, dass ein dynamischeres Abflussregime zu einer Verbesserung der ökologischen Zustandsklasse der Fließgewässer im Unterlauf von Talsperren auf Grundlage des Makrozoobenthos (MZB) führen könnte. Im Detail bedeutet das:

a) Magnitude: Im Sommer besteht das Potenzial, eine höhere Variabilität der Abflüsse zu generieren. Dieses Potenzial besteht im Winter nicht.
    - Diese Dynamisierung ist mit einem positiven Einfluss auf die Bewertung des ökologischen Zustands verbunden (Abnahme Hyporhithralbesiedler).
b) Frequenz HQ: Es besteht abhängig von der Jahreszeit das Potenzial, die Häufigkeit von Hochwasser ähnlichen Abflüssen zu erhöhen. Im Sommer sollten hier nicht mehr als zwei solcher Ereignisse generiert werden. Im Winter könnten es bis zu sieben sein.
    - Diese Dynamisierung bleibt auf Bewertungsebene ohne Einfluss.
c) Frequenz NQ: Im Sommer besteht das Potenzial, häufiger NQ-ähnliche Abflüsse zu generieren. Damit verbunden ist die Möglichkeit, eine zeitlich begrenzte erhöhte Wasserabgabe infolge höherer und häufigerer HQ-ähnlicher Abflüsse im Sommer zu kompensieren. Dieses Potenzial besteht im Winter nicht.
    - Für diese Dynamisierung wird eine positive Auswirkung auf die Bewertung des ökologischen Zustands prognostiziert (Zunahme Anteile EPT-taxa).
d) Dauer HQ: Unabhängig von der Jahreszeit sind die HQ-ähnlichen Abflüsse deutlich zu lang. Dies sollte bei einer Dynamisierung berücksichtigt werden.
    - Diese Dynamisierung bleibt auf Bewertungsebene ohne Einfluss.

e) tägliche Anstiegsrate: es besteht unabhängig von der Jahreszeit das Potenzial, die täglichen Anstiegsraten zu erhöhen und damit höhere Abflüsse in kürzerer Zeit zu generieren. Dies trifft weniger ausgeprägt auch auf die Abstiegsrate der Abflüsse zu.
    - Die Dynamisierung der Abstiegsraten, ist mit einem positiven Einfluss auf die Bewertung des ökologischen Zustands verbunden (Zunahme Deutscher Fauna Index Typ 5).

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass aufgrund von Preisspitzen am Spotmarkt im heutigen Markt geringe Zusatzerlöse aus einem dynamisierten Talsperrenbetrieb erwirtschaftet werden können. Da die Preisspitzen jedoch vergleichsweise gering ausfallen und das Dargebot bei Dynamisierung nicht größer ist als bei konstanter Fahrweise, steigt der Mehrerlös lediglich um wenige Prozent an. Dies würde sich jedoch ändern, wenn zukünftig hohe Preisspitzen im Strommarkt entsprechende Preisanreize bieten, in diesen Stunden den Verbrauch einzuschränken und fokussiert die Erzeugung zu erhöhen.

Durch den Umbau des Unterlaufs zu einem Pumpspeicher lassen sich zusätzliche Deckungsbeiträge erwirtschaften. Dazu ist jedoch die Errichtung eines Speicherbeckens im Unterlauf erforderlich, aus dem Wasser für den Pumpbetrieb entnommen werden kann. Der Verlauf der Deckungsbeiträge in allen untersuchten Varianten lässt vermuten, dass der Grenznutzen mit zunehmendem Ausbau des Speichervolumens exponentiell abnimmt. Wird die untersuchte Referenzanlage mit einer leistungsgleichen Pumpe sowie einem Speicherbecken erweitert, so steigt der Deckungsbeitrag im Vergleich zum reinen Turbinenbetrieb von 32 Tsd. €/a auf 56 Tsd. €/a an. Dieser Mehrwert ist jedoch gegen zusätzliche Investitionskosten für den Speicher im Unterlauf in einer Größenordnung von 12 Mio. € sowie Investitionskosten für die Pumpe zu bewerten. Somit ist eine Änderung der Konfiguration des Unterlaufs als Pumpspeicher auf Grund der hohen Investitionskosten schon ökonomisch nicht lukrativ.

Inwieweit energetische Optimierungsmaßnahmen im Talsperrenbetrieb im Rahmen der geltenden wasserrechtlichen Bestimmungen zulässig sind, hängt vom jeweiligen Einzelfall ab. Zu den juristischen Einzelheiten wird hier auf das Rechtsrahmen-Paper (Schiebold und Siebeck, 2017) sowie die Ergebnisse des Rechtsrahmen-Workshops (Kapitel II.9.3.3) verwiesen.

II.4 Energieeffizienz bei der Trinkwasseraufbereitung - AP B2

II.4.1 Wesentliche Erkenntnisse aus einer Literaturrecherche

Aus verfahrenstechnischer Sicht werden Anlagen der Wasseraufbereitung i. d. R. mit dem geringsten spezifischen Energiebedarf (bei gleichmäßiger Trinkwasserqualität) betrieben, wenn die Anlage mit einem konstanten Durchsatz, idealerweise am optimalen Betriebspunkt arbeitet. Bedingt durch den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergiemix in Deutschland und durch deren zeitlich variable Verfügbarkeit (abhängig z. B. von Witterungsbedingungen), stellt sich die Frage, ob und inwieweit auch die Wasseraufbereitung als flexibler Energieabnehmer durch eine Dynamisierung ihrer Prozesse fungieren könnte. Hierdurch könnten Zeiten geringerer Strompreise bzw. Zeiten hoher Einspeisung regenerativer Energien genutzt werden, um so Energiekosten sowie den Carbon-Footprint der Wasserversorgung zu reduzieren.

Derzeit existieren wenig publizierte Erkenntnisse zu den Auswirkungen von (spontanen) Durchsatzänderungen durch einzelne Verfahrensstufen der Wasseraufbereitung auf den spezifischen Energiebedarf, die Wasserqualität, den Anlagenbetrieb oder die Lebensdauer einzelner Aggregate (wie z. B. Armaturen). Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus der durchgeführten Literaturstudie zur Dynamisierung von einzelnen Aufbereitungsstufen der Wasseraufbereitung ist im Folgenden dargestellt:

<u>Tiefenfilter</u>

Bei Tiefenfiltern ist „die optimale Betriebsweise der Dauerbetrieb mit hydraulisch gleichmäßigem Durchfluss und qualitativ gleichmäßiger Belastung, möglichst ohne Unterbrechungen und Stillstandzeiten. Plötzliche Durchsatzsteigerungen, bspw. infolge eines ansteigenden Trinkwasserbedarfs, können besonders bei Mehrschichtfiltern zu einem starken Anstieg des Filterwiderstandes und ggf. zu einem unerwarteten Erreichen des zulässigen Druckverlustes bis hin zu einem Filterdurchbruch führen.“ (Staben und Nahrstedt, 2014)

Durchsatzänderungen müssen deshalb langsam (Orientierungswert: Änderungen kleiner 3% pro Minute) erfolgen, um die Ablösung von Partikeln möglichst gering zu halten (DVGW W 213-3, 2017). Ives (1991) weist darauf hin, dass diese Änderungsrate nur unter den üblichen Flockungsbedingungen sinnvoll ist. Bei scheranfälligen weichen Flocken sollte eine Durchsatzänderung grundsätzlich auf maximal 1 % pro Minute limitiert werden.

Ist bereits bei der Anlagenplanung klar, dass stark unterschiedliche Durchsätze erforderlich werden, sollten die Filteranlagen modular konzipiert werden. Das heißt, dass einzelne Filtereinheiten z. B. in sog. Aufbereitungsstraßen oder einer Filterstufe zeitweilig in oder außer

Betrieb genommen werden können. Hierdurch lässt sich ein weitgehend gleichmäßiger Betrieb der Filter mit weitgehend konstanten Filtergeschwindigkeiten realisieren. Die An- und Abfahrvorgänge sind dann mit geringen Durchsatzgradienten möglich.“ (Staben und Nahrstedt, 2014)

Ozonung

Bei der Ozonung ist zu beachten, dass sich mit wechselnden Volumenströmen bei gleichbleibendem Reaktionsvolumen die Kontaktzeit verändert (falls nicht Füllstände in Reaktionsbecken durchsatzabhängig variiert werden), sodass die vielerorts übliche Einstellung einer festen Restozonkonzentration am Reaktorablauf in Abhängigkeit vom Volumenstrom unterschiedliche Ozonexpositionen ergibt. Diese müssen durch die Ozonkonzentration angepasst werden, um eine gleichbleibende Aufbereitungsleistung in Bezug auf die zu oxidierenden Wasserinhaltsstoffe zu erreichen (Staben und Nahrstedt, 2014).

Membranfiltration

Bei den meisten Membrananlagen sind Veränderungen der Durchsatzleistung als Reaktion auf z. B. erhöhten Wasserbedarf im Sommer aufgrund der hohen Automatisierungsgrade anlagentechnisch einfach und mit im Vergleich bspw. zu Flockungsfiltrationsanlagen mit Tiefenfiltern mit hohen Gradienten (Steigerungsraten des Durchsatzes) zu realisieren. Limitierend wirken hier der erforderliche Systemdruck sowie die Rohwasserbelastung, die bei erhöhten Durchsätzen zu einer schnelleren Bildung von Deckschichten führen und überproportional häufigere Spülungen verursachen kann (Staben und Nahrstedt, 2014). Dies wäre dann mit einem höheren Energie- und Chemikalienbedarf verbunden. Wie bei den anderen Filtrationsverfahren lässt sich bei schwankenden Aufbereitungsmengen eine weitestgehend kontinuierliche Beschickung einzelner Membranblöcke durch eine blockweise Einschaltung von Modulen erreichen.

UV-Anlagen

Bei der Dimensionierung von UV-Anlagen ist in der Regel der gewünschte maximale Durchfluss maßgebend. Eine Durchsatzvariation an UV-Anlagen ist nur dann zulässig, wenn sich diese im zertifizierten Bereich bewegt oder bei Erhöhung der Volumenströme zusätzliche UV-Bestrahlungseinheiten zugeschaltet werden können. Die zulässigen Eignungs- und Betriebsbereiche für SSK_{254} des zu behandelnden Wassers sowie die Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Durchsatz sind zu beachten.

Schnellentcarbonisierung (SEC)

„Reaktoren zur Schnellentcarbonisierung und Enthärtung von Wässern können verfahrensbedingt hinsichtlich ihrer Durchsatzmenge nur innerhalb gewisser Grenzen betrieben werden.

Hydraulische Lastwechsel erweisen sich als ungünstig, da hieraus einerseits ein Anstieg der Trübung im Reaktorablauf resultiert, andererseits ein gewisser Zeitbedarf erforderlich ist, um den stabilen Betriebspunkt zu erreichen.“ (TZW, 2010) Dieses Verfahren ist deshalb bisher in Bezug auf mögliche Durchsatzleistungen nicht sehr flexibel. Vor diesem Hintergrund wurde von (TZW, 2010) ein Konzept entwickelt, um SEC-Reaktoren ohne die genannten Nachteile hydraulisch flexibler zu machen. Dabei wird ein Teilstrom des entcarbonisierten Wassers im Kreis geführt, wobei dieser der aufzubereitenden Rohwassermenge angepasst wird, so dass eine konstante Aufstiegsgeschwindigkeit resultiert. Somit werden gleichmäßige Strömungsverhältnisse und eine gleichbleibende Ausdehnung der Wirbelschicht, verbunden mit einer stabilen Betriebsweise erreicht. In Pilotversuchen zeigte sich, dass eine dynamisierte Fahrweise der Schnellentcarbonisierung bis zu einer Beaufschlagung mit Rohwasser von mindestens 50 % der Nennleistung des Reaktors ohne Beeinträchtigung der Ablaufqualität gelingt. Kurzfristige Änderungen der Rohwassermenge (Faktor 2) führten nicht zu einer Erhöhung der Trübung im Ablauf bei gleichbleibendem Enthärtungsgrad.

Die Markt- und Literaturrecherche wurde neben den Aspekten zur Dynamisierung auch zur Optimierung des Gesamtenergieeinsatzes zu wesentlichen energieverbrauchenden Verfahren der Wasseraufbereitung durchgeführt. Das Thema Energieeffizienz in der Wasserversorgung wurde in der Vergangenheit vor allem vom DVGW (DVGW, 2010) sowie vom SVGW (SVGW, 2004) behandelt. Eine Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten der gängigen Aufbereitungsstufen, die bei der Literaturstudie gesammelt werden konnten, wurden als Web-Service „Optimierungsratgeber“ (www.enerwa.org) realisiert. Weitere Informationen zu energetischen Aspekten der Pumpen- und Antriebstechnik, einzelnen Verfahrensstufen der Wasseraufbereitung und zur Klimatechnologie finden sich im ausführlichen internen Bericht.

II.4.2 Beschreibung der Untersuchungen

Häufig sind die Energiebedarfe einzelner Teilprozesse im Wasserwerk aufgrund fehlender oder nur wenig detaillierter Aufzeichnungen nicht genau bekannt. Auch der Umfang der Bestandsdaten aus den untersuchten Wasserwerken der Praxispartner war sehr uneinheitlich. In einigen Wasserwerken werden die Leistungsaufnahme bzw. die Arbeit/Energie einzelner Hauptverbraucher kontinuierlich erfasst. In anderen Wasserwerken erfolgen hingegen nur Sammelmessungen für die elektrische Einspeisung ins Wasserwerk.

Im Rahmen von ENERWA wurden in den Wasserwerken (WW) der Praxispartner zusätzliche Vor-Ort-Messungen durchgeführt mit dem Ziel, die Veränderung des Energiebedarfs bei variierender Aufbereitungsleistung zu erfassen. Diese Messungen umfassten für die folgenden

Wasserwerke neben der Aufzeichnung des Drucks an verschiedenen ausgewählten Messstellen in der Aufbereitungskette auch die Messung der Leistung bzw. Arbeit/Energie wesentlicher Stromverbraucher, wenn diese nicht bereits vorlagen:

- WW Erlenhagen des AV (Talsperrenwasserwerk)
- WW Schürholz des WVV Rhein-Wupper (Talsperrenwasserwerk)
- WW Roetgen der WAG Nordeifel mbH (Talsperrenwasserwerk)
- WW Wehebachtalsperre der WAG Nordeifel mbH (Talsperrenwasserwerk)
- WW Essen-Kettwig der RWW mbH (Flusswasserwerk)
- WW Dorsten-Holsterhausen der RWW mbH (Grundwasserwerk)
- WW 1 und WW 2 eines zusätzlichen Wasserversorgers (Grundwasserwerke) – Kap. II.6

II.4.2.1 Datenermittlung in Wasserwerken

Die Messungen wurden für den Betrieb mit minimaler, mittlerer und maximaler Aufbereitungsleistung durchgeführt. Diese Aufbereitungsleistung wurde aus der Auslegung und aus den historischen Daten des Wasserwerks abgeleitet. Die Daten der Druckmessungen vor Ort wurden mit Einbeziehung der geodätischen Höhen der jeweiligen Messstellen zur Erstellung von Energielinien verwendet, die den direkten Energieverlust durch einzelne Aufbereitungsstufen verdeutlichen. Als Grundlage wird die Gleichung nach Bernoulli verwendet:

$$\mathbf{H_{gesamt} = z + \frac{p}{g \times \rho} + \frac{v^2}{2 \times g} = konst.} \qquad \textbf{[2]}$$

H_{gesamt} = Energiehöhe [m]
z = geodätische Höhe [m]
v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
g = Fallbeschleunigung = 9,81 [m/s^2]
ρ = Dichte = 1000 [kg/m^3]
p = Druck [Pa] (1 bar = 10^5 Pa)

Diese beschreibt die Energiehöhe des Wassers bezogen auf 0 m NN an einer definierten Stelle im System über die Summe aus geodätischer Höhe, Druckhöhe und Geschwindigkeitshöhe. In Rohren kann die Geschwindigkeitshöhe $\left(\frac{v^2}{2 \times g}\right)$ für die üblichen Fließgeschwindigkeiten jedoch vernachlässigt werden, weil diese einen sehr kleinen Wert annimmt. Vereinfacht ergibt sich dann:

$$\mathbf{H_{gesamt} = z + \frac{p}{g \times \rho}} \qquad \textbf{[3]}$$

Die zusätzlichen Messungen der elektrischen Leistung sind eine wesentliche Ergänzung. Des Weiteren wurden parallel zu diesen Messungen auch Wasserproben an verschiedenen Stellen

der Aufbereitung genommen, um sie sowohl mikrobiologisch als auch chemisch auf relevante Qualitätsparameter untersuchen zu lassen.

Daten für die Energiebedarfe im Bezugsjahr 2015 für die Belüftung und Entfeuchtung in den Wasserwerken Schürholz und Erlenhagen wurden aus den Aufzeichnungen der Wasserversorger entnommen.

II.4.2.2 Pilotanlagenuntersuchungen

Der Einfluss von dynamischen Betriebsweisen auf die Wasserqualität oder den Energiebedarf wurde mithilfe von Pilotanlagen untersucht. Die Standorte der Pilotanlagen, Aufbereitungsstufen und Ziele der Untersuchungen sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Standorte, Aufbereitungsstufen und Ziele der Pilotuntersuchungen

Standort	Aufbereitungsstufen	Ziel der Untersuchungen
WW Essen-Kettwig	Ozonung, Mehrschichtfiltration und Aktivkohle (AK)-Adsorption	Einfluss einer Dynamisierung auf die Elimination von Trübstoffen, org. Wasserinhaltsstoffen und Energiebedarf
WW Schürholz	Ozonung, AK-Adsorption	Einfluss einer Dynamisierung auf die Elimination organischer Wasserinhaltsstoffe
WW Roetgen	Flockung, Ultrafiltration	Einfluss der Flockungsmitteldosis und der Dynamisierung auf den Energiebedarf

Am Standort Wasserwerk Essen-Kettwig erfolgte die Nachbildung eines Teils der großtechnischen Wasseraufbereitung in einem mobilen Versuchsanlagen-Container mit den Verfahrensstufen Ozonung, Tiefenfiltration (Mehrschichtfilter) und Aktivkohleadsorption (Abbildung 43). Das Wasser durchläuft im Wasserwerk als erste Aufbereitungsstufen die Vorozonung und die Flockung (Flockeranlagen des Typs Pulsator/Accelator). Ein Teilstrom von bis zu ca. 1 m³/h wurde anschließend zur Pilotanlage geführt und dort im Kleinmaßstab aufbereitet.

Untersucht wurde für das Wasserwerk Essen-Kettwig die Veränderung der Filtratqualität anhand der Parameter Trübung, SAK_{254} und DOC bei unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten im Bereich von 7,1 bis 12,8 m/h. Diese wurden an die Belastbarkeit der verwendeten Filtermaterialien angelehnt.

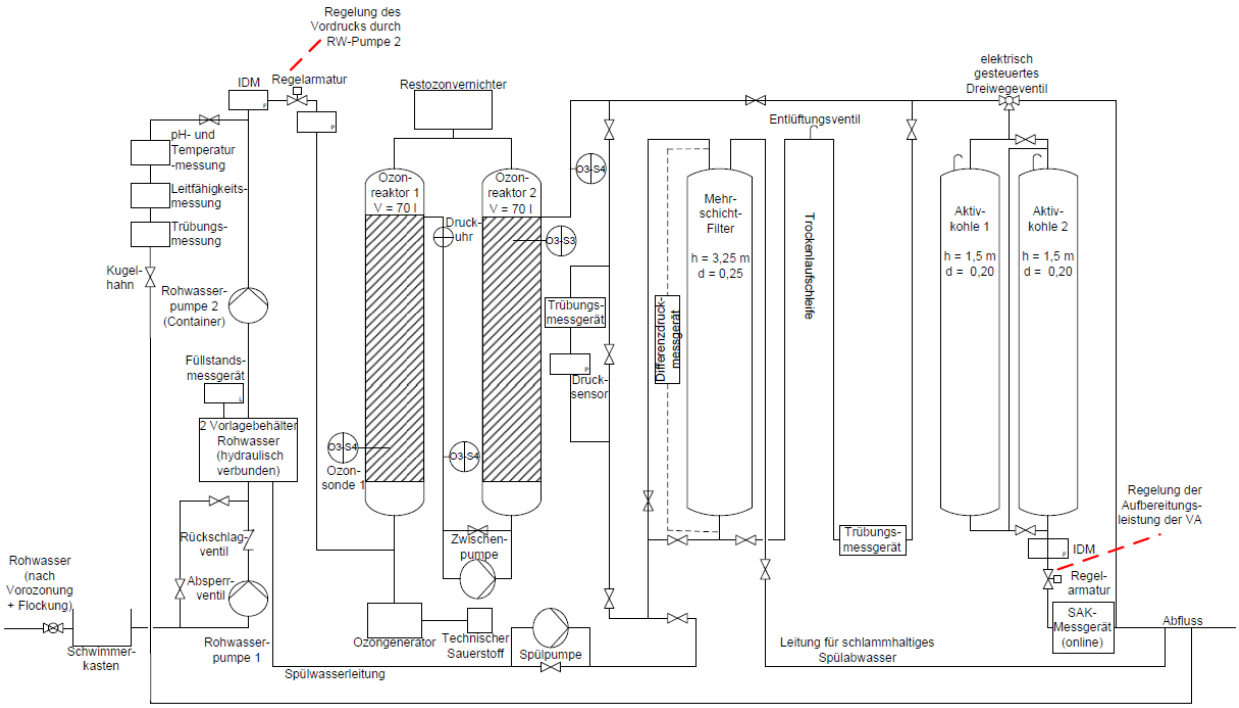


Abbildung 43: RI-Schema der mobilen Pilotanlage am Standort WW Essen-Kettwig

Diese mobile Versuchsanlage wurde später nach Anpassung der Aufbereitungsverfahren für weitere Untersuchungen am Standort WW Schürholz eingesetzt. Das Ziel dort war es, den Einfluss eines dynamischen Anlagenbetriebs auf die Eliminierung von organischen Wasserinhaltsstoffen zu analysieren. Die Versuchsanlage wurde dazu nur mit den Aufbereitungsstufen Ozonung (ab Ozonreaktor 2) und anschließender Aktivkohlefiltration betrieben (Abbildung 44). Die untersuchten Parameter waren der DOC und der SAK_{254}.

Im WW Roetgen wurden an einer Versuchsanlage der WAG Nordeifel mbH Untersuchungen zur Flockungsmitteldosis und zum dynamischen Betrieb der in-line Flockung in Kombination mit der Ultrafiltration (mit vorgeschalteter pH-Wert-Einstellung und Vorfiltration) durchgeführt (Abbildung 45). Diese sollten Aufschluss darüber geben, wie hoch die Auswirkungen auf den Energiebedarf und die Filtratqualität sind. Die relevanten Parameter waren neben der Flächenbelastung (Flux) der Transmembrandruck (TMP), die Permeabilität sowie der DOC, SAK_{254} und der Aluminium(III)-Rückhalt.

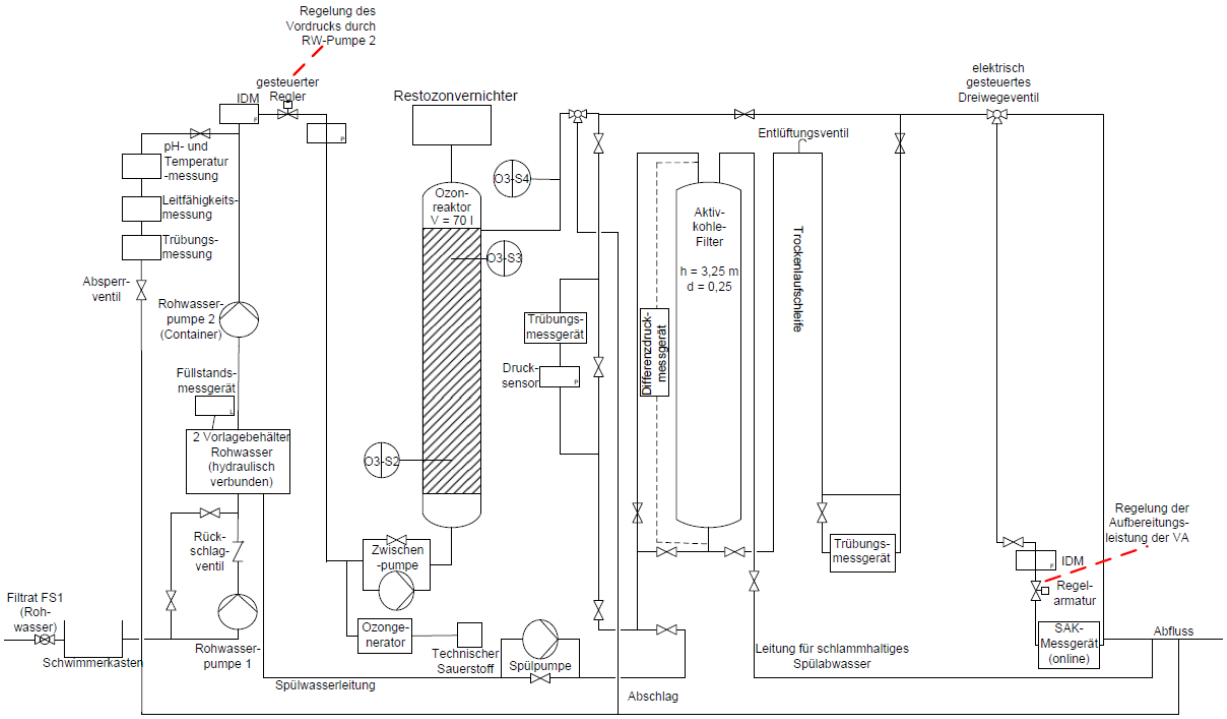


Abbildung 44: RI-Schema der mobilen Pilotanlage am Standort WW Schürholz

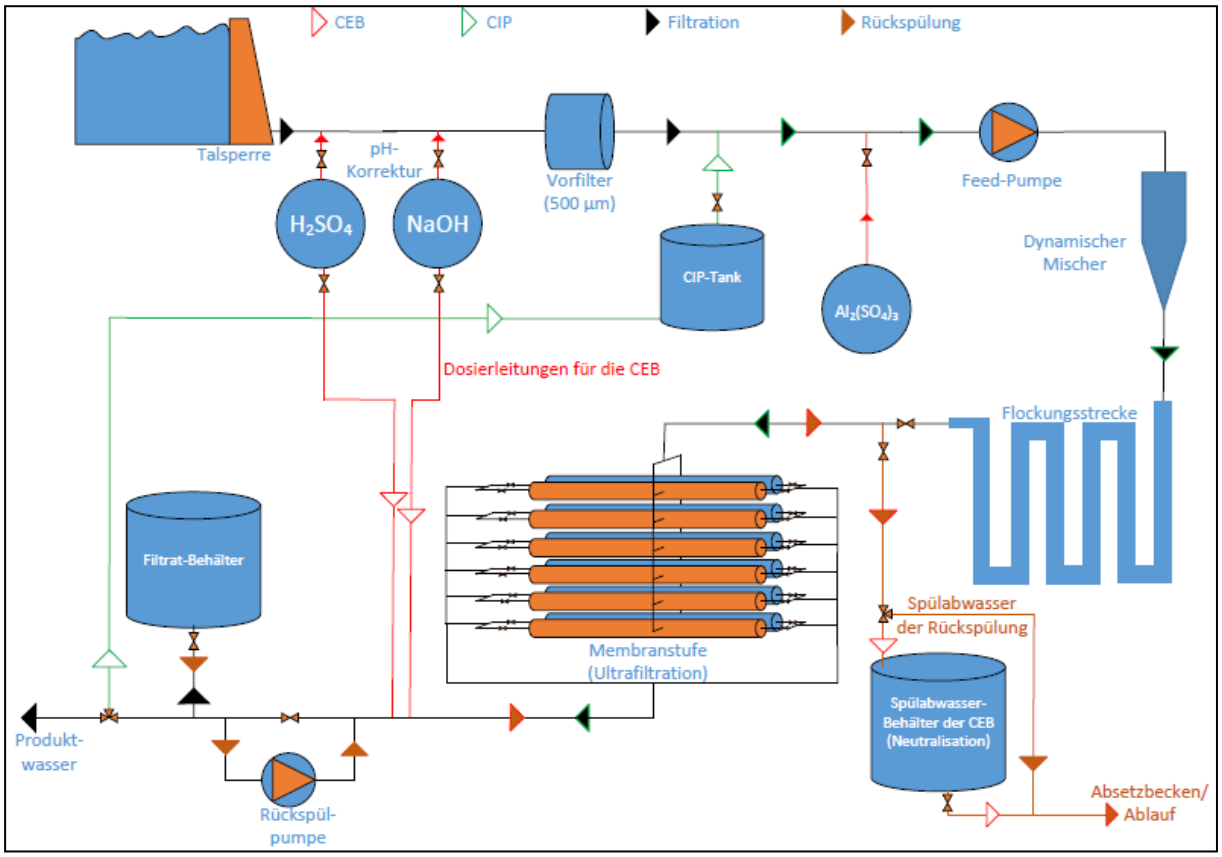


Abbildung 45: Schematische Darstellung der Versuchsanlage der WAG Nordeifel mbH in Roetgen

II.4.2.3 Konzept zur Berechnung des Energiebedarfs und der Energiekosten für verschiedene Betriebsweisen

Da die Fragestellung zu den Auswirkungen einer Dynamisierung auf Energiebedarf und Kosten der Wasseraufbereitung sehr komplex ist, war es notwendig ein Modellierungstool zur Berechnung dieser Aspekte zu entwickeln. Dieses wurde in Zusammenarbeit mit der SYDRO Consult GmbH spezifisch für ausgewählte Wasseraufbereitungsanlagen erstellt. Die wesentlichen Merkmale der Aufbereitungsanlage (geodätische Höhen, Energiebedarf einzelner Aggregate, etc.), die während der Vorarbeiten (Bestandsanalyse, Vor-Ort-Untersuchungen, Datenauswertung) gesammelt worden waren, wurden mit Näherungsfunktionen zum Energiebedarf einzelner Aufbereitungsstufen und mit allen variablen und fixen Strompreisbestandteilen (Spotmarktpreis, atypische Netznutzung, EEG-Umlage, Stromsteuer, etc.) zusammengeführt. Damit können Energiebedarf und -kosten zu jeder Stunde im Jahr, aber auch z. B. als 24h-Mittel berechnet werden.

II.4.3 Dynamisierung von Trinkwasseraufbereitungsanlagen

II.4.3.1 Einzuhaltende Rahmenbedingungen in der Wasseraufbereitung

Bei Umstellung der konventionellen, möglichst statischen Betriebsweise einer zentralen Wasseraufbereitungsanlage auf eine dynamische, die durch Anpassung an einen flexiblen Strommarkt die Ziele der Kostenminimierung und Senkung des Energiebezugs aus fossilen Energieträgern verfolgt, sind für den Betrieb i.d.R. weiterhin die folgenden Grundsätze zu beachten:

Tabelle 12: Grundsätze in der Wasseraufbereitung zur Sicherstellung der Wasserqualität

1. Multi-Barrieren-System	Aufbereitung hat nach den Regeln der Technik zu erfolgen.
2. §17 (1) TrinkwV	Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung haben mindestens nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu erfolgen.
3. §6 (3) TrinkwV: Minimierungsgebot	Konzentration von chemischen Stoffen ist mit vertretbarem Aufwand so gering wie möglich zu halten, so dass resultierende Verunreinigungen des Trinkwassers auf das nötigste beschränkt werden.

Der dynamische Betrieb einer Wasseraufbereitungsanlage kann grundsätzlich nur in dem Bereich erfolgen, für den die Anlage ausgelegt wurde. Einer Dynamisierung müssen immer ausführliche technische Versuche vorausgehen, wobei die folgenden Randbedingungen berücksichtigt werden müssen:

- minimale, mittlere und maximale Aufbereitungsleistung
- Änderung von Strömungsgeschwindigkeit/Drücken durch Anfahr-, Änderungs- und Abstellvorgänge bei Pumpen bzw. Öffnungs-, Änderungs- und Absperrvorgänge bei Armaturen

Um für die Aufbereitungsanlage einen möglichst schonenden Betrieb gewährleisten zu können, sollten am besten drehzahlgeregelte Pumpen eingesetzt werden. Bei Verwendung von starren Pumpen ohne Frequenzumrichter (FU) erfolgt oft noch die Regelung der Aufbereitungsleistung über den gezielten Druckabbau an Druckminderungsventilen. Dynamische Druckänderungen durch zu schnelles Schließen/Öffnen von Armaturen sind hier zu vermeiden und können in bestimmten Fällen zu Druckstoßproblematiken führen, die möglicherweise Schäden im System verursachen (z. B. Einbeulungen, Kavitationen in Rohrleitungen).

II.4.3.2 Realisierbarkeit der Dynamisierung

Ein wesentlicher Faktor für die Realisierbarkeit eines dynamischen Versorgungsbetriebes von der Wassergewinnung bis hin zum Kunden ist die Zwischenspeicherung des Trinkwassers in Speicherbehältern, aus denen der Trinkwasserbedarf zeitweise allein über den Ruhedruck gedeckt werden kann. Solche Speicherbehälter können sich zum einen im Wasserwerk (Reinwasserbehälter) oder aber im Versorgungsnetz (Hochbehälter) befinden. Sie müssen ausreichend hoch über dem Versorgungsgebiet liegen, sodass der Ruhedruck des Wassers ausreichend groß zur Belieferung des Versorgungsgebiets ist. So kann eine vorübergehende Entkopplung des Trinkwasserbedarfs zu jeglichen elektrischen Großverbrauchern in Gewinnung/Aufbereitung/Verteilung erfolgen. Eine Dynamisierung nur des Teiles „Gewinnung und Aufbereitung“ ohne Bereitstellung des Versorgungsdruckes würde sich nur bei sehr hohen Pumpkosten für die Wassergewinnung und/oder bei sehr energieaufwändigen Aufbereitungsverfahren lohnen.

II.4.3.3 Einfluss der Dynamisierung auf die Wasserqualität

In umfangreichen Untersuchungen zur Dynamisierung wurde für verschiedene Aufbereitungsstufen der acht Wasserwerke der Einfluss auf die Wasserqualität untersucht bzw. anhand von vorliegenden Daten bewertet. Zahlreiche Wasseranalysen zu mikrobiologischen, organischen sowie anorganischen Parametern wurden durchgeführt. Nach Sichtung der analytischen

Messdaten, stellten sich insbesondere die Trübung und die Gesamtkeimzahl als die Parameter heraus, anhand derer in vielen Fällen bei dynamischer Fahrweise signifikante Effekte auf die Wasserqualität sichtbar wurden.

Die Untersuchungen vor Ort in allen beteiligten Wasserwerken zeigten, dass im Moment der Umstellung auf größere Aufbereitungsmengen stets Trübstoffe aus der Rohwasserleitung mit in die Aufbereitung geschleppt wurden, sodass die Rohwassertrübung fallweise um ein Mehrfaches anstieg. Aufwirbelung von Ablagerungen und Ablösung von Inkrustationen in den häufig mehrere Kilometer langen Rohwassertransportleitungen sind hier als vermutliche Gründe zu nennen. Diese Trübstoffausträge waren jedoch sehr wahrscheinlich nur vorübergehende Vorkommnisse, die nach einmaliger Durchspülung der Transportleitung nach einigen Stunden für weitere Dynamisierungszyklen nicht wieder zu erwarten sind. Zur Abmilderung dieses Eintrags kann eine Mikrosiebung bereits deutlich beitragen.

Innerhalb der Aufbereitung kann bei Wasserwerken, die weder Drosselarmaturen noch Frequenzumrichter zur Steuerung der Aufbereitungsleistung nutzen, sondern allein durch die In- oder Außerbetriebnahme von Pumpen ihre Aufbereitungsleistung verändern, zeitweise durch die schnellen Veränderungen der Fließgeschwindigkeiten eine Verschlechterung der Filtratqualität in den Filterstufen hinter den Rohwasserpumpen auftreten. Eine Umstellung von statischem auf einen dynamischen Anlagenbetrieb, mit mehrmaligen Schaltvorgängen am Tag, ist nur bedingt zu empfehlen und sollte zunächst immer wasserwerksspezifisch untersucht werden, da in Einzelfällen eine Verschlechterung der Trinkwasserqualität zu erwarten ist. Durch langsames Anfahren der Pumpen kann dieser Effekt jedoch gemildert werden. Durch eine höhere Zahl an Filterstufen, wie es vor allem bei den Talsperrenwasserwerken üblich ist, können kurzzeitige Durchbrüche an der ersten Filterstufe durch nachfolgende abgefangen werden, wodurch bei einer auf die Dynamisierung optimierten Anlagensteuerung keine nennenswerten Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität zu erwarten sind. Die ENERWA-Untersuchungen in den Wasserwerken zeigten, dass eine vom Umweltbundesamt empfohlene maximale Trübung zwischen 0,1 und 0,2 FNU vor der Sicherheitsdesinfektion stets eingehalten werden konnte. Grund für diese Empfehlung ist, dass die Desinfektion mit UV-Desinfektionsgeräten, Chlor oder Chlordioxid ein weitestgehend trübstofffreies Wasser erfordert.

Eine Sonderstellung hat die Trinkwasseraufbereitung durch Membranfiltration nach dem Filtrationsprinzip des Größenausschlusses (Ultrafiltration & Mikrofiltration). Hier sind i.d.R. keine Auswirkungen auf die Filtratqualität durch eine Dynamisierung zu erwarten. Dies wurde durch die Untersuchungen an der Ultrafiltrationsanlage der WAG Nordeifel mbH in Roetgen sowohl

an der großtechnischen Anlage als auch an der Versuchsanlage bei Flächenbelastung bis zu über 100 l/(m²*h) bestätigt.

Für das Grundwasserwerk Dorsten-Holsterhausen (RWW) ergab die Auswertung von Trübungs-Messdaten aus historischen Versuchen an einem Einzelfilter zur Dynamisierung des Filterbetriebs keine Hinweise auf einen Trübungsanstieg bei höheren Filtergeschwindigkeiten oder bei einer Dynamisierung der Aufbereitungsleistung.

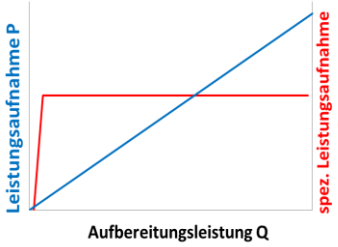
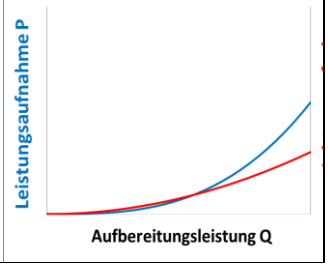
Ozonung und Aktivkohlefiltration – Ergebnisse aus den Pilotuntersuchungen

Zum Abbau und Rückhalt organischer Wasserinhaltsstoffe wird vielerorts die Oxidation mit Ozon mit nachgeschalteter Filtration über Mehrschichtfilter und/oder Aktivkohlefilter genutzt. In Pilotuntersuchungen an den Standorten WW Essen-Kettwig und Schürholz wurde der Einfluss der Dynamisierung auf diese beiden Verfahren untersucht. Für das Wasserwerk Essen-Kettwig konnte gezeigt werden, dass mit Änderung der Aufbereitungsleistung, aufgrund veränderlicher hydraulischer Kontaktzeit des Wassers mit der Aktivkohle, ein entsprechend besserer bzw. schlechterer DOC-Rückhalt bzw. SAK_{254}-Rückgang zu erwarten ist. Am Standort WW Schürholz wurden zu Vergleichszwecken umfangreiche Versuche zur Aufbereitung bei statischer und dynamischer Betriebsweise mit gleicher Tagesaufbereitungsmenge durchgeführt, sodass ein direkter Vergleich beider Fahrweisen möglich war. Die Dynamisierung der Ozonung mit dem vorliegenden Ozoneintragssystem stellte sich als schwierig heraus, da eine proportionale Einstellung der Ozonerzeugung zur Aufbereitungsleistung im niedrigen, durch den Betrieb der technischen Anlage vorgegebenen, Dosis-Bereich von ca. 0,1 mg/l, nicht möglich war. Daher wurde die Ozonung fortan statisch, der Aktivkohlefilter hingegen mithilfe eines Abschlagventils dynamisch betrieben, mit Filtergeschwindigkeiten zwischen etwa 5,3 und 10,5 m/h. Durch einen dynamischen Betrieb trat keine signifikante Verschlechterung der Elimination organischer Wasserinhaltsstoffe in Summe über einen Zeitraum von 24 h auf.

II.4.3.4 Einfluss der Dynamisierung auf Energiebedarf und -kosten

Die Dynamisierung des Betriebs einer Wasseraufbereitungsanlage hängt von statischen, linearen sowie dynamischen Energiebedarfsanteilen ab (Tabelle 13).

Tabelle 13: Energiebedarfsanteile elektrischer Verbraucher

	Energiebedarfsanteil		
	statisch	**linear**	**dynamisch**
Charakteristik	Keine Abhängigkeit zu Q	proportional zu Q	z. B. quadratisch proportional zu Q
Beispiel	Gebäudetechnik (z. B. Entfeuchtung)	statische Förderhöhe (Pumpen)	Strömungswiderstände (Pumpen)
Darstellung			

Der statische Anteil ist unabhängig von der Aufbereitungsleistung und jeglicher –dynamik. Der lineare Energiebedarfsanteil steigt proportional zur Aufbereitungsleistung, so dass sich der spezifische Energiebedarf nicht ändert. Die dynamischen Energiebedarfsanteile steigen mit zunehmender Aufbereitungsleistung überproportional an, so dass diese in der Gesamtbilanz bei gleichbleibender Tagesaufbereitungsmenge Auswirkungen auf den Energiebedarf haben können. Ein wesentlicher Energiebedarfsanteil ist bei Pumpen jener zur Überwindung von Strömungswiderständen (z. B. bei Rohr- und Mischsystemen, Drosselventilen, Filtern, Membranen, etc.), welcher sich dynamisch ändert. In Wasserwerken, in denen kein Vordruck zur Aufbereitung durch eine natürlich aufgefüllte Ressource gegeben ist, muss i. d. R. mit einem Mehrbedarf an elektrischer Energie bei Dynamisierung der Aufbereitung gerechnet werden. Das Ausmaß des Mehrbedarfs bleibt abhängig von der Dynamik und von den Stellen mit Auswirkungen auf den dynamischen Bedarfsanteil. Vorteilhaft ist – falls es die Anlagenkennlinie ermöglicht - die Verwendung von Pumpen mit flachen Wirkungsgradkurven. Diese decken eine breite Volumenstromänderung ab, ohne dass sich trotz Abweichung vom optimalen Betriebspunkt der Wirkungsgrad nennenswert verschlechtert.

In umfangreichen vor-Ort-Untersuchungen an den Aufbereitungsanlagen der Praxispartner wurden Daten zum Energiebedarf erfasst. Mittels dieser wurde spezifisch für jede Anlage jeweils ein Berechnungswerkzeug zur Bestimmung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Aufbereitungsleistung erstellt.

Ergebnisse zur Dynamisierung im Wasserwerk (WW) Erlenhagen

Die Ergebnisse der Modellierung eines dynamischen Anlagenbetriebs werden hier beispielhaft für das WW Erlenhagen im Jahr 2015, mit dem Ziel die Kosten zu minimieren, dargestellt. Diese Minimierung sollte durch Anpassung der Aufbereitungsleistung an einen stündlich variierenden Strompreis (Spotmarktpreiskurve der Leipziger Strompreisbörse EEX bzw. EPEX) und die Meidung eines jahreszeitlich abhängigen Hochlastzeitfensters der atypischen Netznutzung erfolgen. Die Anpassung der Aufbereitungsleistung erfolgte an eine gemittelte Spotmarktpreiskurve aus 2015 und unter Berücksichtigung des Tageswasserbedarfs (Abbildung 46). Die Schaltstufen des Wasserwerks wurden beibehalten.

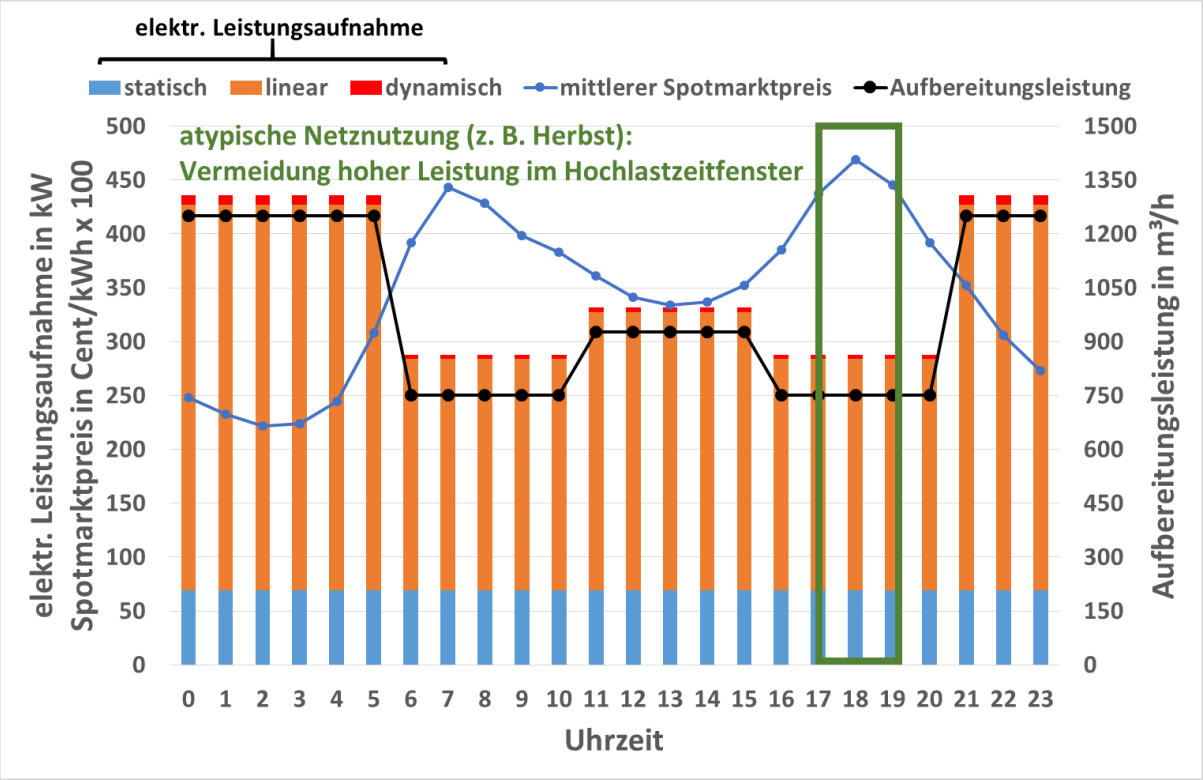


Abbildung 46: Modellierung eines dynamischen Anlagenbetriebs im WW Erlenhagen am Beispiel eines Wochentags im Herbst

Die Dynamisierung wurde mit dem Modellierungstool für ein ganzes Jahr simuliert. Die Ergebnisse sind auf einen mittleren Tag bezogen in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse aus einer Beispielrechnung für das WW Erlenhagen für 2015

	Einheit	statisch	dynamisch	+/-
Aufbereitungsmenge	m³/d	23.334	23.334	
Tagesenergiebedarf	kWh/d	8.263	8.457	+ 2,3 %
Spezifischer Energiebedarf	kWh/m³	0,35	0,36	+ 2,3 %
Energiekosten (variabler + fixer Anteil)	€/d	1002	1015	+ 1,3 %
Netznutzungsentgelt (NNE)	€/d	135	108	- 20 %
Gesamtenergiekosten (inkl. NNE)	€/d	1137	1123	- 1,2 %
Spezifische Aufbereitungskosten	Cent/m³	4,9	4,8	- 1,2 %

Die Ergebnisse der Modellierungsrechnung zeigen, dass bei gleicher Aufbereitungsmenge der Energiebedarf bei dynamischer Betriebsweise um ca. 2,3 % im Vergleich zur statischen Betriebsweise ansteigt. Besonders die Zunahme von Strömungswiderständen und die Verschiebung von Pumpenwirkungsgraden sind als wesentliche Ursachen zu nennen. Durch die Dynamisierung würden die Gesamtenergiekosten um ca. 1,2 % gesenkt werden. Dieser Rückgang ist jedoch ausschließlich durch die Meidung hoher Leistungsaufnahmen im Hochlastzeitfenster der atypischen Netznutzung zu erklären. Eine maximale Einsparung von 20% des Netznutzungsentgelts würde sich durch Abschalten der Aufbereitungsanlage im Hochlastzeitfenster erreichen lassen.

Des Weiteren muss der Mehrbedarf an elektrischer Energie, der i. d. R. bei einer Dynamisierung auftritt, bezahlt werden. Hier fällt zum einen der variable aber auch der fixe Strompreisanteil an. Die reinen Energiekosten nähmen durch diesen Mehrbedarf um 1,3 % zu. Es zeigt sich, dass die Spreizung der Spotmarktpreiskurve, verursacht durch den variablen Anteil am finalen Strompreis, und ggf. auch die mögliche Bandbreite der Aufbereitungsleistung zu gering sind, als dass eine Dynamisierung der Wasseraufbereitung anhand des Spotmarktpreises lohnend wäre. Die größten Kosteneinsparpotenziale zeigen sich beim Netznutzungsentgelt, wo abhängig von der Aufbereitungsanlage zwischen 20 und 80 % eingespart werden könnten.

Ergebnisse zur Ultrafiltration im Wasserwerk (WW) Roetgen

Die Ultrafiltration in Roetgen wird mit dem Vordruck der Dreilägerbachtalsperre betrieben. Durch einen permanent aufzubringenden Vordruck von bis zu einem Bar (~ 10 mWS) zählt die Ultrafiltration in der Wasseraufbereitung zu den energieintensiveren Filtrationsverfahren. Der Energiebedarf wird maßgeblich durch den Druckverlust an der Membran bestimmt (Trans-

membrandruck bzw. TMP). Im WW Roetgen werden durch die Membran je nach Aufbereitungsleistung zwischen 1 und 4,5 m Energiehöhe abgebaut, dies liegt in der Größenordnung von Tiefenfiltern. Der Energiebedarf verhält sich nicht ganz proportional zur Flächenbelastung. Eine Verdopplung der Flächenbelastung von 40 auf 80 l/(m²h) bewirkt einen Anstieg des TMPs im Mittel um etwa 108 % (Abbildung 47). Aufgrund der enorm großen Gesamtmembranfläche von 70.000 m² kann der Filtrationsbetrieb mit einer sehr niedrigen Flächenbelastung von ca. 50 l/(m²h) (max. 86 l/(m²h)) besonders energieeffizient geführt werden. Da die Aufbereitung mit dem Vordruck der Talsperre erfolgt, muss dieser im Ablauf der Membranblöcke mithilfe von Druckminderungsventilen zur Regelung der Aufbereitungsleistung gedrosselt werden. Die wesentlichen Ergebnisse der Berechnungen sind jedoch auf mit Pumpen gespeiste Anlagen übertragbar.

Natürlich setzt sich der Energiebedarf des Filtrationsbetriebs nicht alleine aus den Reibungswiderständen an der Membran zusammen, sondern maßgeblich auch aus denjenigen, die z. B. durch Rohre, Armaturen, Mischsysteme und Filter verursacht werden.

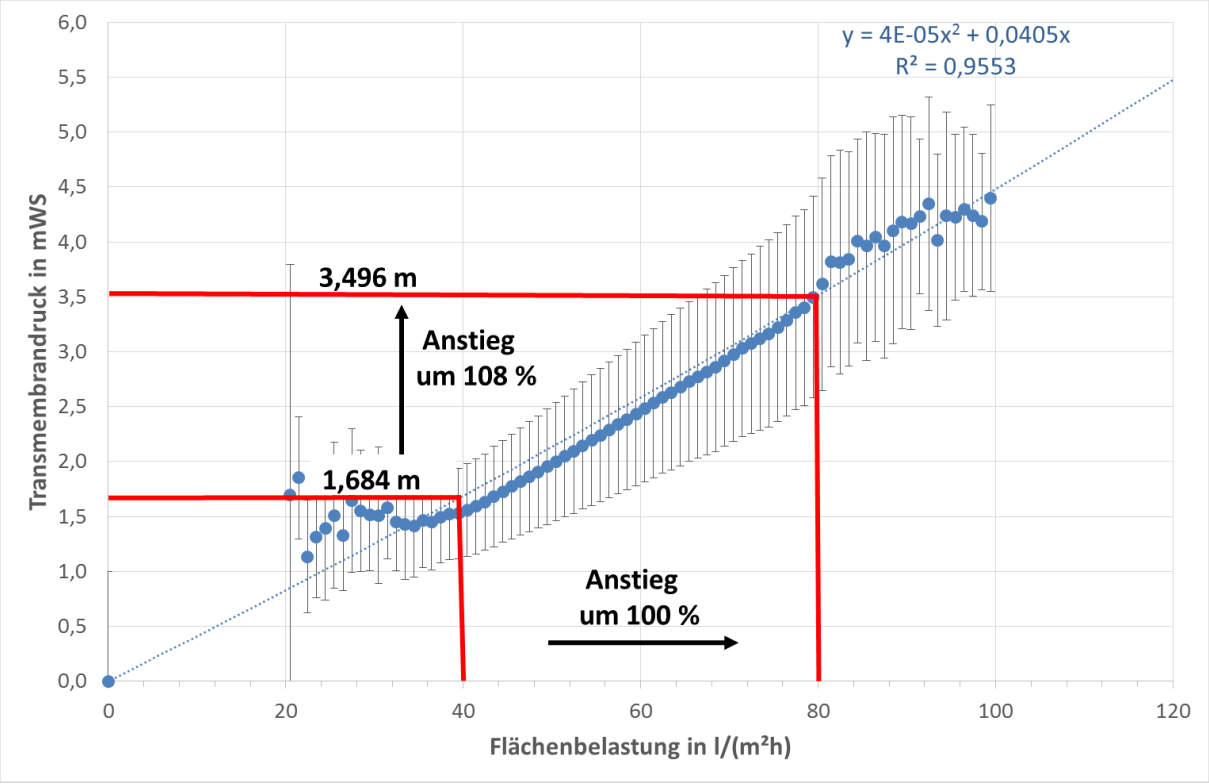


Abbildung 47: Mittlerer Transmembrandruck aller 12 Ultrafiltrationsblöcke des WW Roetgen (Datengrundlage: WAG Nordeifel mbH Januar 2015)

Zur Bewertung des Energiebedarfs einer Ultrafiltrationsanlage wurde ein Bilanzierungszeitraum von 24 h gewählt. Die Aufzeichnungen mehrerer Wochen des Transmembrandrucks bei

abwechselnden Versuchsreihen zur statischen und dynamischen Ultrafiltration mit gleicher Tagesaufbereitungsmenge wurden für die Berechnungen als Grundlage genutzt. Der Transmembrandruck weist allein auf den Energiebedarf zur Passage der Membran hin, so dass in dieser Betrachtung alle anderen Strömungswiderstände der Versuchsanlage unberücksichtigt bleiben. Bei gleicher Tagesdurchsatzmenge und einem konstanten Wirkungsgrad der Vordruckpumpe(n) erfordert die dynamische Fahrweise im Vergleich zur statischen im Mittel einen Mehrbedarf an Energie von etwa 2,3 % (Abbildung 48).

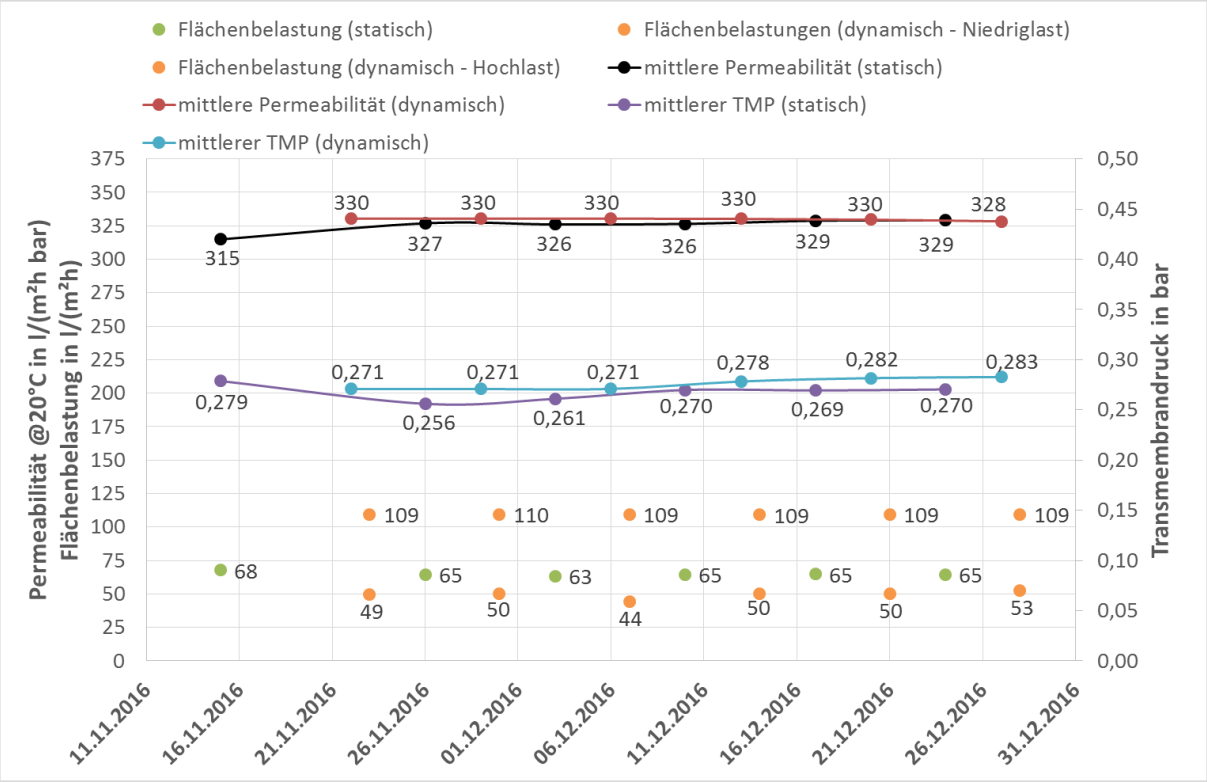


Abbildung 48: Vergleich der Prozessdaten von dynamischer und statischer Betriebsweise der UF im WW Roetgen mit etwa gleichen Tagesaufbereitungsmengen (gewichtete Mittelwerte)

Für die Versuchsanlage wurde zusätzlich neben dem Druckverlust durch wesentliche Anlagenkomponenten auch der Energiebedarf der regelmäßigen Rückspülvorgänge bestimmt. Anhand dieser Daten konnte eine Näherungsfunktion erstellt werden, die den Energiebedarf der Anlage in Abhängigkeit zur Flächenbelastung beschreibt. Für verschiedene statische und dynamische Betriebsweisen mit gleicher täglicher Aufbereitungsmenge (Abbildung 49) konnte so der Energiebedarf des Anlagenbetriebs berechnet werden. Es zeigt sich, dass grundsätzlich aus energetischer Sicht die statische Betriebsweise der dynamischen vorzuziehen ist, da mit steigender Dynamik ein Anstieg des spezifischen Energiebedarfs zu erwarten ist (Tabelle 15).

Des Weiteren steigt mit zunehmender Spreizung von maximaler und minimaler Flächenbelastung zum Erreichen der erforderlichen Tagesaufbereitungsmenge der Energiebedarf signifikant an. Die Untersuchungen an der Anlage zeigten zudem, dass bei kurzzeitigen Erhöhungen der Aufbereitungsleistung nicht zwingend eine Verkürzung der Filtrations- bzw. Erhöhung der Reinigungsintervalle notwendig ist. Es ist somit nicht zwingend mit einem höheren Anfall an schlammhaltigem Spülwasser zu rechnen. Durch die höheren Drücke kann aber bei hohen Flächenbelastungen das Potenzial zur Verblockung der Membranporen steigen. Hier sind auch die Rohwasserqualität sowie die Leistungsfähigkeit der vorgeschalteten in-line Flockung von Bedeutung. Die Rohwasserqualität unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen, die bereits heute im alltäglichen Betrieb zu beachten sind, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Entsteht durch Fouling eine irreversible Verblockung der Membran, die durch einfache Rückspülvorgänge nicht entfernt werden kann, resultiert dadurch aufgrund des steigenden TMP ein Anstieg des Energiebedarfs im Filtrationsbetrieb, wodurch Reinigungsvorgänge wie CEB[2] oder gar CIP[3] erforderlich werden.

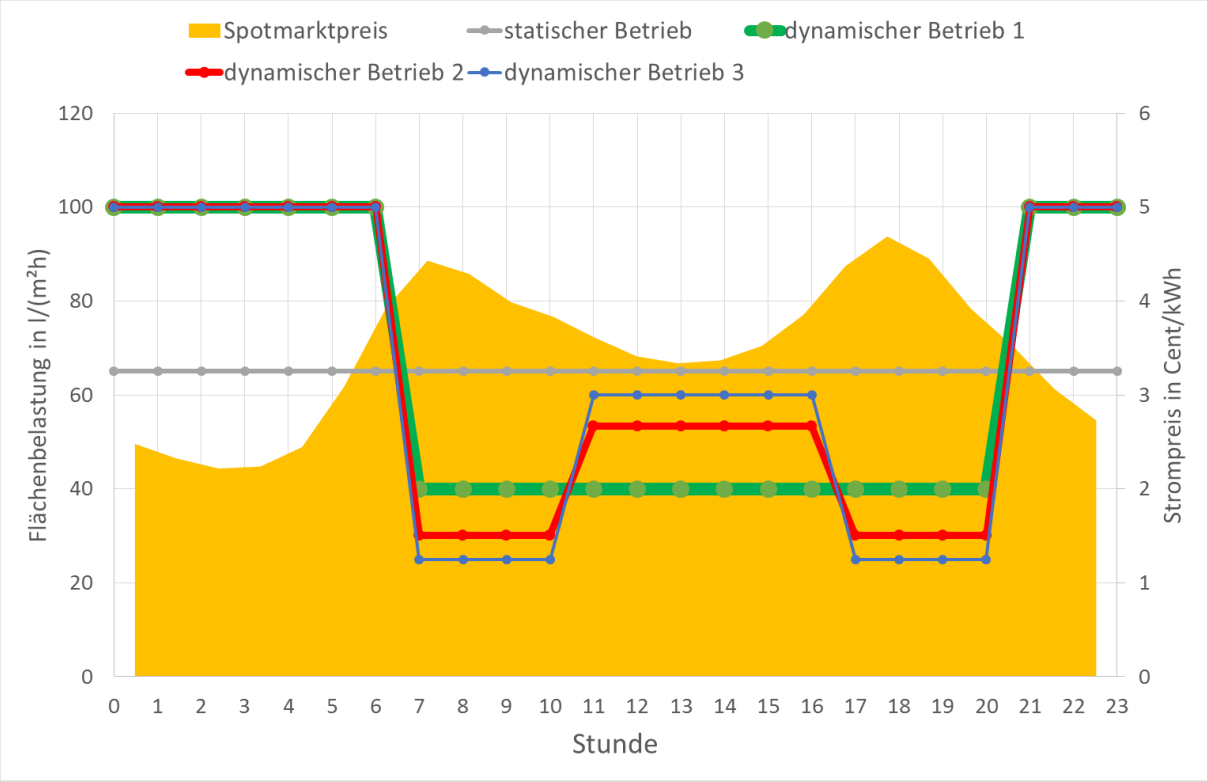


Abbildung 49: Modellierung des dynamischen Anlagenbetriebs (nur Ultrafiltration) im WW Roetgen

[2] CEB: Chemical-Enhanced-Backwash

[3] CIP: Clean-in-Place

Tabelle 15: Vergleich des Energiebedarfs der UF im WW Roetgen bei statischer und dynamischer Fahrweise (UF)

Betriebszustand	spez. Energiebedarf in kWh/m³	+/-
statisch	0,0767	-
dynamischer Betrieb 1	0,1021	+ 33%
dynamischer Betrieb 2	0,1039	+ 35%
dynamischer Betrieb 3	0,1061	+ 38%

II.4.4 Energetische Aspekte pro Verfahrensstufe

II.4.4.1 Ozonung

Ozonanlagen machen häufig einen wesentlichen Anteil des Energiebedarfs der gesamten Wasseraufbereitung aus. Bei Verwendung von technischem Sauerstoff mit einem für die Ozonerzeugung optimierten Reinheitsgrad liegt der Energiebedarf der Ozoneure allein bei ca. 8,5 bis 12,5 kWh/kg O_3. Der Energiebedarf der Ozoneure ist bei Verwendung von Sauerstoff aus Druckwechsel-Adsorptionsanlagen (PSA[4]) oder von Flüssigsauerstoff einer geeigneten Qualität in vergleichbar. Bei Betrieb einer Ozonanlage mit Umgebungsluft wird mit einem höheren Eingangsdruck gearbeitet, um den Sauerstoffgehalt pro Gasvolumen zu erhöhen (Tabelle 16). Dennoch ist der spezifische Energiebedarf der Ozoneure bei Ozonergzeugung direkt aus komprimierter Luft höher als bei der Erzeugung aus technischem Sauerstoff.

Tabelle 16: Beispiel für Betriebsbedingungen bei Verwendung von unterschiedlichen Sauerstoffquellen zur Ozonerzeugung

Ozonerzeugung aus	Überdruck im Ozoneur in bar	elektr. Spannung in V
Luft	1,5	6500
Flüssigsauerstoff (LOX)	0,8 – 0,9	5500

In der Vergangenheit war der Erwerb von Flüssigsauerstoff häufig die unwirtschaftlichere Variante. Heutzutage sind bei den notwendigen Einsatzmengen im Bereich der Wasseraufbereitung (Trinkwasser) jedoch die Kosten für Flüssigsauerstoff häufig mindestens auf einer Ebene

[4] Bei PSA-Anlagen wird aus Umgebungsluft Sauerstoff mit einer Reinheit von 90 - 95 % hergestellt. Dabei wird mittels einer PSA (Pressure Swing Adsorption = Druckwechseladsorption) über ein Molekularsieb (Zeolith) der Stickstoff entfernt, sodass Sauerstoff und die Edelgase zurückbleiben. Der dafür benötigte Kompressor macht i. d. R. bereits etwa 1/3 der elektrischen Leistung des Ozongenerators aus.

mit denen der Eigenerzeugung mittels PSA-Anlagen. Dies liegt an den gesunkenen Kosten für den Bezug der für die Ozonherstellung geeigneten Flüssigsauerstoffqualität und den gleichzeitig gestiegenen Energiekosten. Daher ist zum Zwecke der Wasseraufbereitung im Bereich Trinkwasser die Anschaffung von Anlagen zur Sauerstoffanreicherung vor Ort oft nicht mehr lohnenswert, es sei denn, um die Abhängigkeit von einer Chemikalienlieferung zu vermeiden. Eine Gesamtkostenrechnung für die Ozonerzeugung unter Berücksichtigung der gesamten Sauerstoffversorgung bei Auslegung einer Ozonanlage ist deshalb immer zu empfehlen. Dabei sollten stets die Energiekosten bei Verwendung von Umgebungsluft, zur Eigenerzeugung von Sauerstoff und die für den Bezug von Flüssigsauerstoff gegenübergestellt werden.

Ein zusätzlicher Energiebedarf fällt i. d. R. auch bei der Kühlung des Ozoneurs an. Hier besteht die Möglichkeit einer Direktkühlung mit dem Trinkwasser selbst. Trinkwasser aus der Talsperre eignet sich hier besonders gut, da es für gewöhnlich relativ tiefe Temperaturen aufweist. Oberflächenwässer können jedoch auch Temperaturen von ca. 25°C aufweisen, welche zur Kühlung eher ungeeignet sind. Zur Entkopplung des Kühlkreislaufes können auch Wärmetauscher genutzt werden. Generell ist die Wassertemperatur eine wichtige Einflussgröße, da diese einen wesentlichen Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf der Ozonung hat. Das Lösevermögen für Ozon steigt mit abnehmender Wassertemperatur.

Ein zusätzlich zu berücksichtigender Sauerstoffverbraucher ist der Flüssigsauerstofftank selbst. Wenn die Ozonung außer Betrieb ist, dann kommt es aufgrund von kleinsten Undichtigkeiten und Abblasverlusten (Eigenkühlung) i. d. R. täglich zu Gesamtverlusten von ca. 1-3 % des Tankinhalts. Auch dies kann sich negativ auf die Kosten im dynamisierten Betrieb auswirken.

II.4.4.2 UV-Desinfektion

UV-Anlagen müssen immer passend zu Wasserqualität und Gesamtdurchsatz der Aufbereitungsanlage ausgelegt werden. Abbildung 50 zeigt den Energiebedarf ausgewählter Nieder- und Mitteldruckanlagen.

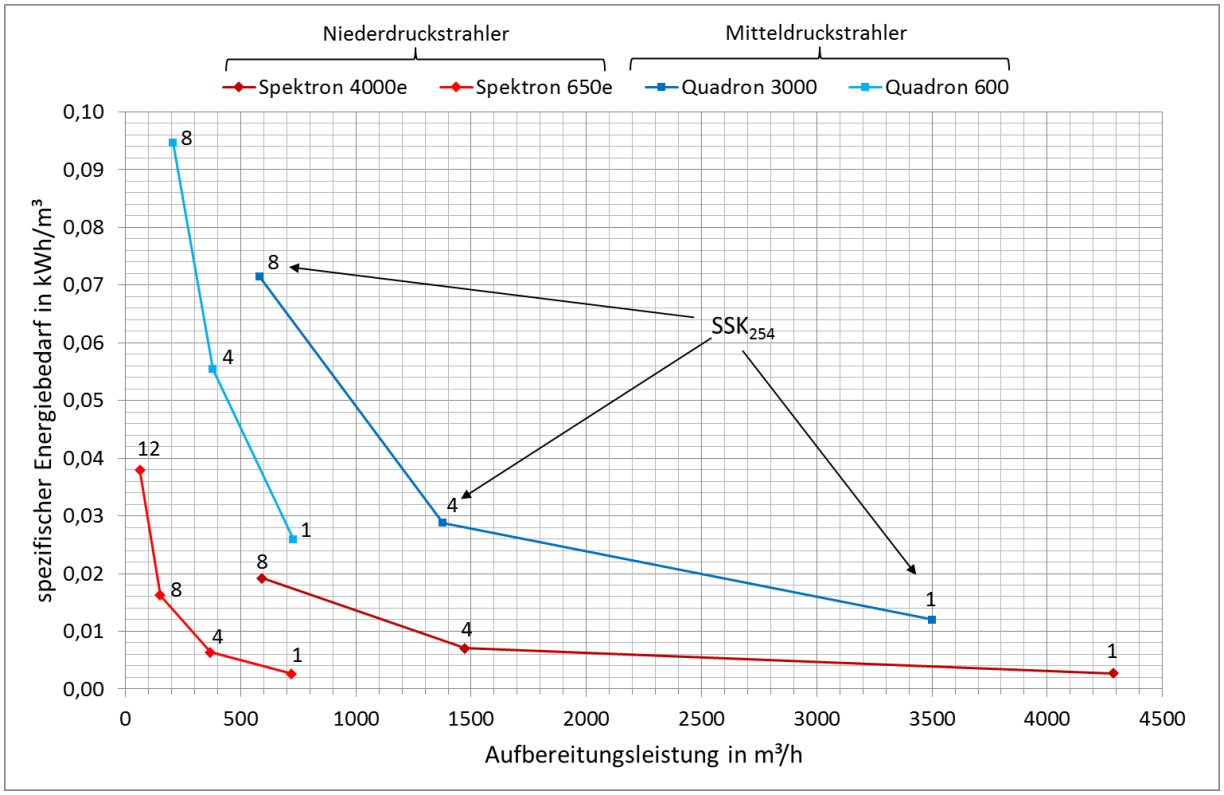


Abbildung 50: Spezifischer Energiebedarf von beispielhaften UV-Anlagen vs. Förderstrom in Abhängigkeit zum SSK_{254} (Datengrundlage: Xylem Water Solutions Deutschland GmbH)

Aus energetischer Sicht ist die Verwendung von Niederdruckstrahlern die sinnvollere Variante. Aus wirtschaftlichen Gründen kann aber die Verwendung von Mitteldruckanlagen (kleinere Bauvolumen bei gleicher Desinfektionsleistung), vor allem bei großen Volumenströmen, die bessere Wahl sein. Eine zum Volumenstrom regelbare UV-Anlage kann grundsätzlich den Energiebedarf senken. Die Energie, die durch diese Reglung eingespart wird, kann aber durch zusätzliche Nebenverbraucher (z. B. klimatisierter Schaltschrank) wieder an anderer Stelle verbraucht werden. Auch Anschaffungskosten, wie z. B. in eine neue SPS, können die Wirtschaftlichkeit für eine regelbare UV-Anlage in Frage stellen.

II.4.4.3 Membranfiltration

Bei der Membranfiltration wird ein wesentlicher Energiebedarf durch die transmembrane Druckdifferenz verursacht. Beim Filtrationsvorgang muss mindestens dieser Verlust an Energiehöhe aufgebracht werden. Der Transmembrandruck steigt mit Zunahme an Ablagerung von Partikeln auf der Membranoberfläche und der damit verbundenen Verblockung der Poren.

In Pilotuntersuchungen wurden Versuche zur Verfahrenskombination Flockung und Ultrafiltration durchgeführt. Die Vorbehandlung des Wassers ist bei der Membranfiltration ein wesentlicher Schritt zur Verringerung von Fouling und gleichzeitiger Steigerung des Flux im Filtrationsbetrieb. Dies führt folglich zu einer Senkung des spezifischen Energiebedarfs bei der Filtration. Des Weiteren kann so die Notwendigkeit von energieintensiven Reinigungsvorgängen (Rückspülung, CEB und CIP) verringert werden, verbunden mit einer Senkung des Energiebedarfs für den Gesamtprozess.

Es wurde der Einfluss unterschiedlicher Flockungsmitteldosen zwischen 1,9 und 7 mg Al^{3+}/l auf den Transmembrandruck untersucht. Grundlegender Gedanke war, die reversible und irreversible Verblockung der Membranporen durch die optimale Ausbildung einer sich über die Membran legenden und so besser rückspülbaren Deckschicht zu verringern. Die Versuche zeigten bei der vorliegenden Rohwasserqualität jedoch keinen positiven Einfluss, der eindeutig auf eine Erhöhung der Flockungsmitteldosis zurückzuführen war. Der Einfluss der Flockungsmitteldosis auf den Spülwasserbedarf ist allgemein in der Gesamtbetrachtung als eher gering einzuschätzen, da oft systembedingt die für den Austrag des schlammhaltigen Wassers benötige Wassermenge größer ist als die für die Spülung der Membranen.

II.4.4.4 Tiefenfiltration

Die Filtration kann über offene oder auch über geschlossene Filter (Druckfilter) erfolgen. Bei der Durchströmung eines Filters entsteht ein Druckverlust. Dieser hängt im Wesentlichen von der Filtermaterial-Korngröße, der Filterschichthöhe und der Filtergeschwindigkeit ab. Der Energiebedarf der Filtration ist theoretisch direkt proportional zur Druckdifferenz, hinzukommen Druckverluste des Rohrleitungssystems. Der Energiebedarf wird durch den Druckverlust oder den Höhenverlust bei der offenen Filtration, bei der die Ablaufhöhe immer geringer ist als die Zulaufhöhe, verursacht. Er ist zudem abhängig von der Filtergeschwindigkeit und von der Wassertemperatur. Bei Erhöhung der Filtergeschwindigkeiten innerhalb üblicher Bereiche steigt der Druckverlust nahezu linear mit leichter exponentieller Überhöhung an (Abbildung 51). Ein Rückgang der Wassertemperatur bewirkt durch die Zunahme der Viskosität des Wassers auch einen Anstieg des Druckverlusts. Da Druckfilter für gewöhnlich mit höheren Filtergeschwindigkeiten betrieben werden, kann der spezifische Energiebedarf zwei bis drei Mal höher sein im Vergleich zu einem schwerkraftgetriebenen Filter.

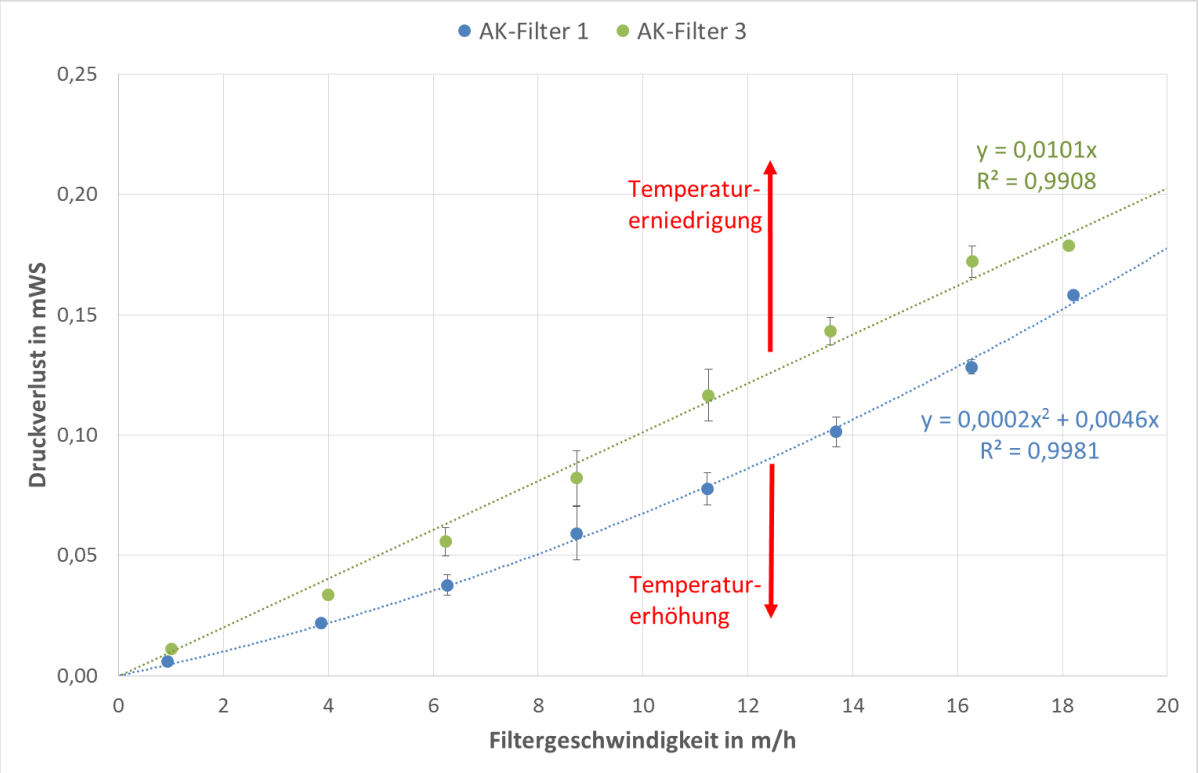


Abbildung 51: Abhängigkeit des Druckverlusts von der Filtergeschwindigkeit (und Temperatur) am Beispiel zweier Aktivkohle-Filter im Wasserwerk Essen-Kettwig (Datengrundlage: RWW 2014)

Abgesehen vom Energiebedarfsanteil, der durch die Reibungswiderstände zustande kommt, ist der spezifische Energiebedarf bei offener und geschlossener Filtration identisch. In der Praxis wird der Durchfluss aller parallel betriebenen Filter i. d. R. gleich gehalten (Gleichlaufregelung), da bei zu unterschiedlichen Volumenströmen meist eine Verschlechterung der Filtratqualität zu erwarten ist. Der geringere Druckverlust in einem frisch gespülten Filter wird hierbei durch eine Armatur im Filterablauf ausgeglichen, so dass die Summe aus Filterwiderstand und Druckverlust der Armatur für alle Filter gleich ist und jeder Filter bei gleichem Durchfluss unabhängig vom eigentlichen Filterwiderstand gleich viel Energie verbraucht. Wenn Druckfilter mit einem fixen Vordruck betrieben werden und offene Filter mit einer immer identischen Überstauhöhe und Regelung des Füllstandes über Klappen im Ablauf, ist der spezifische Energiebedarf beim Filtrationsvorgang nicht vom Filterwiderstand abhängig. Beim Betrieb mit höheren Filtergeschwindigkeiten nimmt allerdings zumindest bei der Partikelfiltration das Filterlaufvolumen (durchgesetzte Wassermenge in m³ pro m² Filterfläche zwischen zwei Spülungen) ab, da sich die Filtrationsintervalle überproportional verkürzen und pro m³ filtriertes Wasser mehr Spülwasser verbraucht werden muss. Bei vielen Filteranlagen entsteht damit ein spezifisch höherer Energiebedarf bei höherer Aufbereitungsleistung vor allem durch die für die Spülung

aufgewendete Energie (Spülluftgebläse, Spülwasserpumpen und Förder- und Aufbereitungskosten für das verbrauchte Spülwasser) und die höheren Druckverluste im Rohrleitungssystem.

In der Praxis verursachen Druckfilteranlagen meist einen höheren spezifischen Energiebedarf, da sie bauartbedingt bei höheren Filtergeschwindigkeiten und damit Druckverlusten betrieben werden. Im Hinblick auf eine Qualitätsbeeinträchtigung des Filtrates bei einer Dynamisierung der Aufbereitungsleistung sind offene Filter bei gut abgestimmten Regelkreisen als etwas unproblematischer einzustufen. Eine Steigerung der Aufbereitungsleistung hat nicht sofort eine Durchflusssteigerung der Filter zur Folge, da sie durch Schwankungen des Filterüberstaus etwas gedämpft wird.

II.4.4.5 Gebäudetechnik

In der Gebäudetechnik wurden die Beleuchtung und die Klimatisierung (Entfeuchtung, Belüftung und Beheizung) von Wasseraufbereitungsanlagen betrachtet, wobei die Beleuchtung meist nur einen geringen Anteil am Gesamtenergiebedarf hat. Neben dem Einsatz von Energiesparlampen kann vor allem durch die Schaltung der Lampen durch Bewegungsmelder in dafür geeigneten Bereichen eine Einsparung erreicht werden.

In Wasseraufbereitungsanlagen erfolgt in der Regel lediglich ein Luftaustausch durch normale Luftbewegung ohne Zwangsbelüftung mit Außenluft, da so der Eintrag von Luftfeuchtigkeit und die Kondensation an den in aller Regel vergleichsweise kalten Aufbereitungsanlagen und Rohrleitungen vermieden wird. So konzentriert sich die Klimatisierung auf die Luftentfeuchtung. In den beiden untersuchten Wasserwerken kamen unterschiedliche Entfeuchtungskonzepte zum Einsatz:

WW 1: Zentraler Betrieb von Wärmepumpen zur Speisung eines Kaltwasserkreislaufs und dezentrale Entfeuchtung der Raumluft über sogenannte Kastenklimageräte (Luft-Wasser-Wärmetauscher mit Ventilatoren). Die Ventilatoren saugen die Raumluft über Ansaugkanäle an, am Wärmetauscher kondensiert Feuchtigkeit aus und die entfeuchtete und abgekühlte Luft wird ohne Erwärmung über weitere Kanäle gezielt in den Räumen verteilt.

WW 2: Dezentraler Betrieb von Entfeuchtungsanlagen vornehmlich nach dem Absorptionsverfahren aber auch mit Kondensationsanlagen (kleinere Anlagen). Bei diesem Konzept ist eine größere Anzahl an Entfeuchtungsanlagen in den verschiedenen Räumen verteilt, die Luft wird angesaugt und entfeuchtet und dann teils über spezielle Luftkanäle oder Ausblaskrümmer wieder im gleichen Raum verteilt.

In WW 1 wurden bis zu 40 % des Energiebedarfs der gesamten Aufbereitung für die Klimatisierung verbraucht. Dies wurde erst nach Einführung des Energiemanagements deutlich. Die Klimatisierung in diesem Wasserwerk erfolgt über drei verschiedene Systeme, wobei Nr. 3 den bei weitem höchsten Anteil am Energiebedarf hat (Tabelle 17).

Tabelle 17: Wesentliche Anlagenkomponenten zur Klimatisierung des Wasserwerks 1

	Anlage	**Aufgabe**	**Zugehörige Aggregate**
1.	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Heizen von Verwaltung, Sozialräumen und Werkstätten	
2.	Luft-Luft-Wärmepumpe	Für Laborluftanlage – Zusatzheizung im Winter und Kühlung im Sommer	
3.	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Entfeuchtung der Aufbereitungsanlage und Heizen/Kühlen des Leitstands	7 Kastenklimageräte mit Lüftermotoren (zwischen 3 und 11 kW)

Die Räume der Aufbereitungsanlage werden nicht beheizt. Die Luftfeuchte wird über Hygrostate geregelt, die die Lüftermotoren der Kastenklimageräte schalten. Auch bei niedriger Luftfeuchte werden die Ventilatoren alle zwei Stunden für eine halbe Stunde betrieben, um eine gleichmäßige Verteilung trockener Luft zu gewährleisten. Durch den dann mehr oder weniger starken Durchsatz feuchter Luft durch die Wärmetauscher wird die Kaltwasserseite der Entfeuchterwärmepumpe mehr oder weniger belastet. Die Wärmepumpe regelt dann entsprechend ihre Leistung nach. Die Wärmemenge der Warmwasserseite der Wärmepumpe wird im Winter zum Beheizen des Leitstands genutzt, ansonsten wird sie über einen Wärmetauscher zu einem Großteil ungenutzt in den Filtrat-Zwischenbehälter abgegeben.

Eine deutliche Senkung des Energiebedarfsanteils der Klimatisierung um etwa 30 % konnte erzielt werden durch:

- Neuanschaffung besser abgestimmter Wärmepumpen zur Steigerung der Wirkungsgrade
- Optimierung der Schaltpunkte der Hygrostate und der Ausblasstellen aus den Kanälen durch aufmerksame Beobachtung von Kondensationsstellen in allen Räumen durch die speziell damit beauftragte Bedienperson
- bauliche Trennung einzelner Anlagenbereiche zur Reduzierung der zu entfeuchtenden Luftvolumina auf das notwendige Maß (hier insbesondere die Abtrennung von Gebäudeteilen mit offenen Wasserflächen)

- Umbauarbeiten an den Lüftungskanälen zur besseren Erreichbarkeit aller Raumteile und Verhinderung von Kurzschlussströmungen
- Konsequente Vermeidung von unnötigem Zutritt von Außenluft

Im WW 2 wurde eine Optimierung des Anlagenbetriebs vor allem durch organisatorische Maßnahmen erreicht. Für die Kontrolle und Vermeidung von Kondensationserscheinungen, die Platzierung externer Hygrostate im Raum, die Einstellung der gewünschten Luftfeuchtigkeit und die Dokumentation der Wirkarbeit der einzelnen Geräte wurde eine zuständige Person benannt, sodass die individuelle Einstellung mitarbeiterspezifischer Wohlfühlbedingungen fortan ausblieb. Von 2015 auf 2016 konnte der Energieverbrauch für die Entfeuchtungsanlagen um 20 % verringert werden.

Ein Vergleich des Energiebedarfs für die Entfeuchtung in den Wasserwerken WW 1 und WW 2 ließ auch unter Berücksichtigung des sehr unterschiedlichen zu entfeuchtenden Raumvolumens die Vermutung aufkommen, dass bei den vorliegenden Oberflächentemperaturen der Rohrleitungen die Entfeuchtung nach dem Prinzip der Sorptionstrocknung in Kombination mit einer Entfeuchtung der Abluft (mittels mit Raumluft betriebener Wärmetauscher bei einem Bau ähnlicher Anlagen) die wirtschaftlichere Variante sein könnte.

Bei neu zu errichtenden Anlagen kann auch die Nutzung alternativer Energiequellen bzw. Wärmequellen und –senken in Erwägung gezogen werden, um den Primärenergieverbrauch der Entfeuchtungsverfahren zu senken. Als Wärmesenke ist – mit entsprechender hydraulischer Trennung - in Talsperrenwerken immer das in aller Regel unter 10 °C kalte Roh- oder Reinwasser verfügbar, so dass alleine damit schon eine Teilentfeuchtung eines Zuluftstroms möglich sein könnte. Als Wärmequelle z. B. für die Regeneration von Sorptionstrocknern kommt ggf. Solarwärme in Frage. Nach entsprechenden Studien ist aber in aller Regel die Nutzung von selbst erzeugtem Solarstrom zum Betrieb entsprechender Klimatisierungsprozesse günstiger und flexibler als die Nutzung der auf der gleichen Fläche gewinnbaren Solar-Wärmeenergie.

II.4.5 Optimierungskonzepte und -möglichkeiten

II.4.5.1 Chemikaliendosierung - Kalkwasserbereitung

I. d. R. ist die Dosierung von Chemikalien aus energetischer Sicht eher unbedeutend. Ein nennenswerter Energiebedarf besteht in einigen Fällen bei der Herstellung der Chemikalien vor Ort sowie bei der richtigen Einmischung. Die ENERWA-Untersuchungen im WW Erlenhagen zeigten, dass die Kalkwasserbereitungsanlage aufgrund ihres Dauerbetriebs zu den

wesentlichen Energieverbrauchern gehört (~ 0,01 kWh/m³). Eine alternative Überlegung, um eine ausreichende Entsäuerung und pH-Wert-Anhebung, auch zur Vermeidung von Betonkorrosion zu bewirken, wäre die direkte Dosierung von Kalkmilch in das Rohwasser in Kombination mit Calciumcarbonat feinerer Körnung in den Kalksteinfiltern sowie ggf. eine geringfügige pH-Korrektur mit Natronlauge. Eine Dosierung von Kalkmilch wäre sowohl aus energetischer als auch aus personeller und technischer Sicht weniger aufwendig im Vergleich zur Kalkwasserbereitung. Es müssten allerdings ein sehr hochwertiges, schnelllösliches Kalkhydrat eingesetzt und in einem Betriebsversuch die Auswirkungen der zusätzlichen Trübstoffracht aus der Kalkmilch auf den Filtrationsprozess geprüft werden.

II.4.5.2 Vermeidung von Druckverlusten und unnötigen Förderhöhen

Die Energie, die für den Betrieb der Pumpen (Rohwasser- oder Zwischenpumpen) notwendig ist, ist ein wesentlicher Anteil am Gesamtenergiebedarf der Trinkwasseraufbereitung. Die Pumpen sind meist Dauerläufer, sodass sich auch kleinere Reduzierungen von Druckverlusten und der zu überwindenden geodätischen Höhe signifikant auf den Energiebedarf auswirken können. Zur Identifizierung dieser Verluste bietet sich eine gesamtsystemische Analyse der Aufbereitungsanlage an (siehe ENERWA-Leitfaden). Besonders die Anfertigung der Energielinie der Aufbereitungsanlage ist hilfreich, um Anlagenkomponenten mit einem augenscheinlich hohen Energiebedarf zu identifizieren. Durch die Untersuchungen in ENERWA konnten für einige Wasserwerke Optimierungspotenziale gefunden werden.

Beispiel WW Erlenhagen

Die Mikrosiebtrommel ist nach der Rohwasserförderung der höchstgelegene Punkt in der Wasseraufbereitungsanlage. Diese war jedoch aufgrund von unzureichender Rückhaltung von Invertebraten und Mikroorganismen außer Betrieb genommen und dann nur noch im Bypass umströmt worden. Eine Umfahrung auf einer geringeren Höhe wurde nach Umbaumaßnahmen möglich, so dass insgesamt ca. 4 m Förderhöhe (~ 120.000 kWh/a) des Rohwasserpumpwerkes Genkel eingespart werden können. (Abbildung 52).

Des Weiteren konnte durch die Untersuchungen gezeigt werden, dass auf die parallel betriebene geschlossene Filterstufe, für die zwingend eine Druckerhöhung (DEA) nötig gewesen ist, komplett verzichtet werden kann. Nun wird der gesamte Wasserstrom über die offene Filterstufe geschickt. Dadurch können ca. 7 m Förderhöhe für einen Teil-Volumenstrom eingespart werden, was einer Einsparung von ca. 85.000 kWh/a entspricht (Abbildung 52).

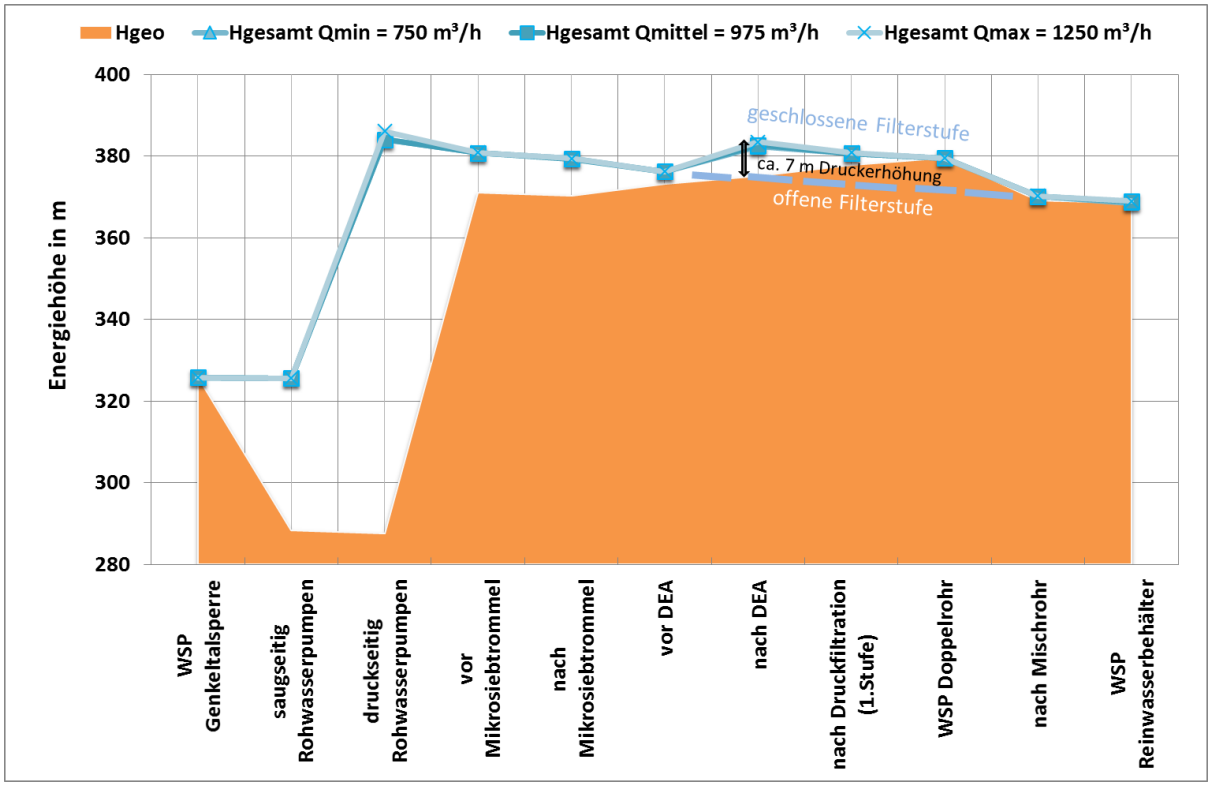


Abbildung 52: Energielinien für das WW Erlenhagen (H_{gesamt} = Energiehöhe) H_{geo} = geodätische Höhe, , WSP = Wasserspiegel, DEA = Druckerhöhungsanlage

Beispiel WW Essen-Kettwig

Im Wasserwerk Essen-Kettwig erfolgt die Feineinstellung der Aufbereitungsleistung bis zu den Flockern mittels einer Klappe hinter den Rohwasserpumpen (Abbildung 53). Weitere Funktionen dieser sind:

- sanftes Hoch- bzw. Herunterfahren der Aufbereitungsleistung trotz starrer Pumpen
- Turbulenzzone zur Einmischung des Flockungsmittels

Diese Klappe bewirkt einen Druckverlust von ca. 5 mWS, und verursacht einen Energiebedarf von ca. 123.500 kWh. Alternativ kann es sinnvoll sein, falls realisierbar, ausgewählte oder gar alle Rohwasserpumpen mit Frequenz-umrichtern auszustatten und zur Einmischung von Flockungsmittel Turbulenzzonen unmittelbar vor bzw. hinter den Rohwasserpumpen zu nutzen. Andernfalls kann die Möglichkeit der Verwendung von Frequenzumrichtern in Kombination mit einem statischen Mischsystem mit geringerem Energieverbrauch geprüft werden. Hier sind ggf. Einsparungen zwischen ca. 116.000 und 65.000 kWh/a möglich.

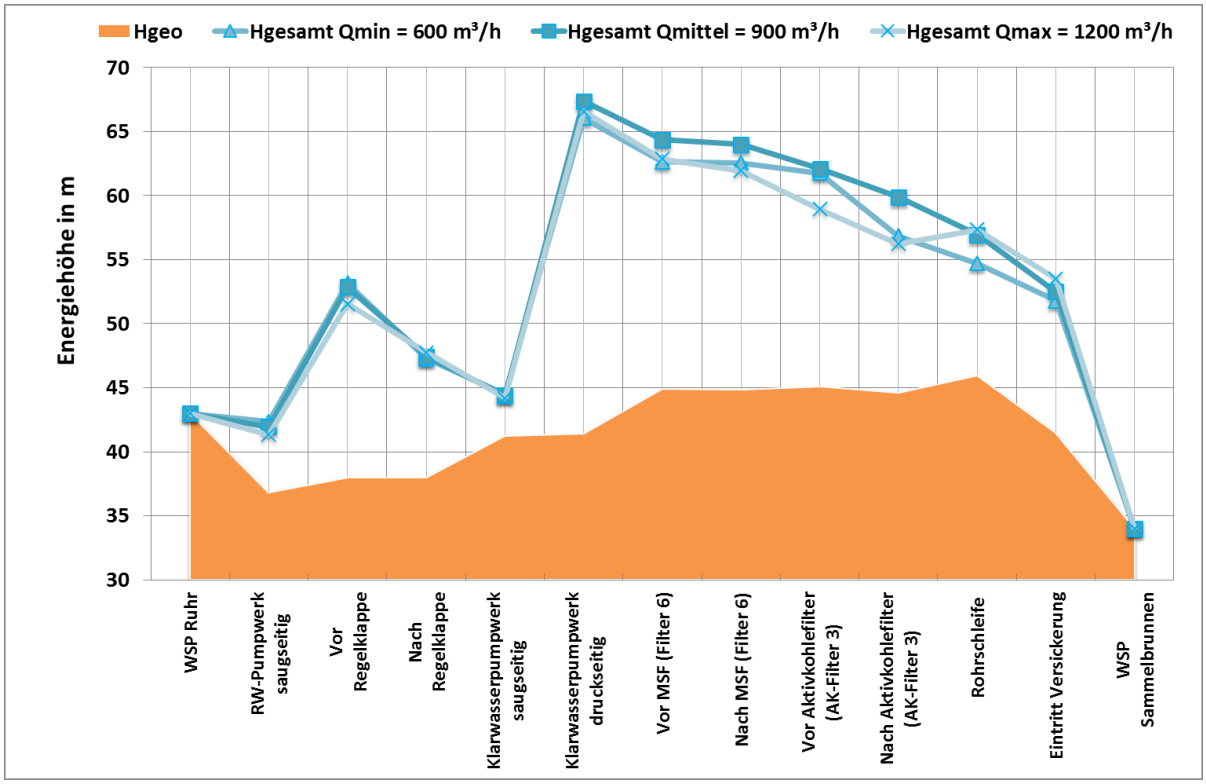


Abbildung 53: Energielinien für das WW Essen-Kettwig; Hgeo = geodätische Höhe, Hgesamt = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel

II.4.5.3 Potenzial an Energierückgewinnung durch Energieüberschuss in Talsperren-Wasserwerken

Der Energiebedarf der Wassergewinnung und –aufbereitung ist zu einem Großteil von der Rohwasserquelle abhängig. Ist der Vordruck der Wasserressource so groß, dass er für die Förderung durch die Aufbereitung ausreicht, kann i. d. R. auf ein Rohwasserpumpwerk verzichtet werden. Dies betrifft vor allem Wasseraufbereitungsanlagen an Talsperren. Für gewöhnlich ist dann die Turbinierung des Wassers im Zulauf zur Wasseraufbereitung zur Energiegewinnung von besonderem Interesse. Erfolgt die Füllung des Staukörpers mit Wasser durch natürliche Gegebenheiten, so ist die Turbinierung des Wassers in vollem Maße gewinnbringend. Wird diese jedoch durch ein Pumpwerk aufgefüllt, kann über die Turbinierung nur ein Teil der Energie rückgewonnen werden, die für das Pumpen dieses Wassers in den Staukörper aufgebracht worden ist.

Beispiel WW Roetgen

Zwischen dem Eintritt des Rohwassers in die Aufbereitungsanlage und dem Reinwasserbehälter werden im WW Roetgen je nach Aufbereitungsleistung zwischen ca. 23 und 27 mWS an Energiehöhe abgebaut (Abbildung 54). Hierzu tragen vor allem ein Ringkolbenventil im Zulauf zum Wasserwerk (Turbine im Bypass) und ein dynamischer Mischer zur Einmischung des Flockungsmittels bei. Die Regelung der Aufbereitungsleistung der gesamten Aufbereitungsanlage erfolgt über Ringkolbenventile jeweils im Ablauf der Ultrafiltrationsblöcke. Bei mittlerer Aufbereitungsleistung werden durch diese ca. 13 mWS gezielt dem System entzogen. Je nach Aufbereitungsleistung des Wasserwerks werden von der Membran selbst, gemessen als Transmembrandruck, im Mittel zwischen ca. 1,5 und 4 m abgebaut (Abbildung 47). Eine Minderung von Druckverlusten in der Aufbereitung des WW's Roetgen ist nur dann lohnenswert, wenn die eingesparte Druckhöhe stattdessen zur Energierückgewinnung über die Turbine im Wasserwerk genutzt wird, da der Vordruck durch die Talsperre vorgegeben wird. Der Betriebspunkt der vorhandenen Turbine im Bypass zur Energierückgewinnung am Wasserwerkseingang passt seit Errichtung der neuen Aufbereitungsanlage nicht mehr zur grundsätzlich nutzbaren Leistung. Nach Prüfung der Wirtschaftlichkeit, soll zur Steigerung der Energieausbeute in naher Zukunft eine effizientere und systemkonformere Turbine installiert werden.

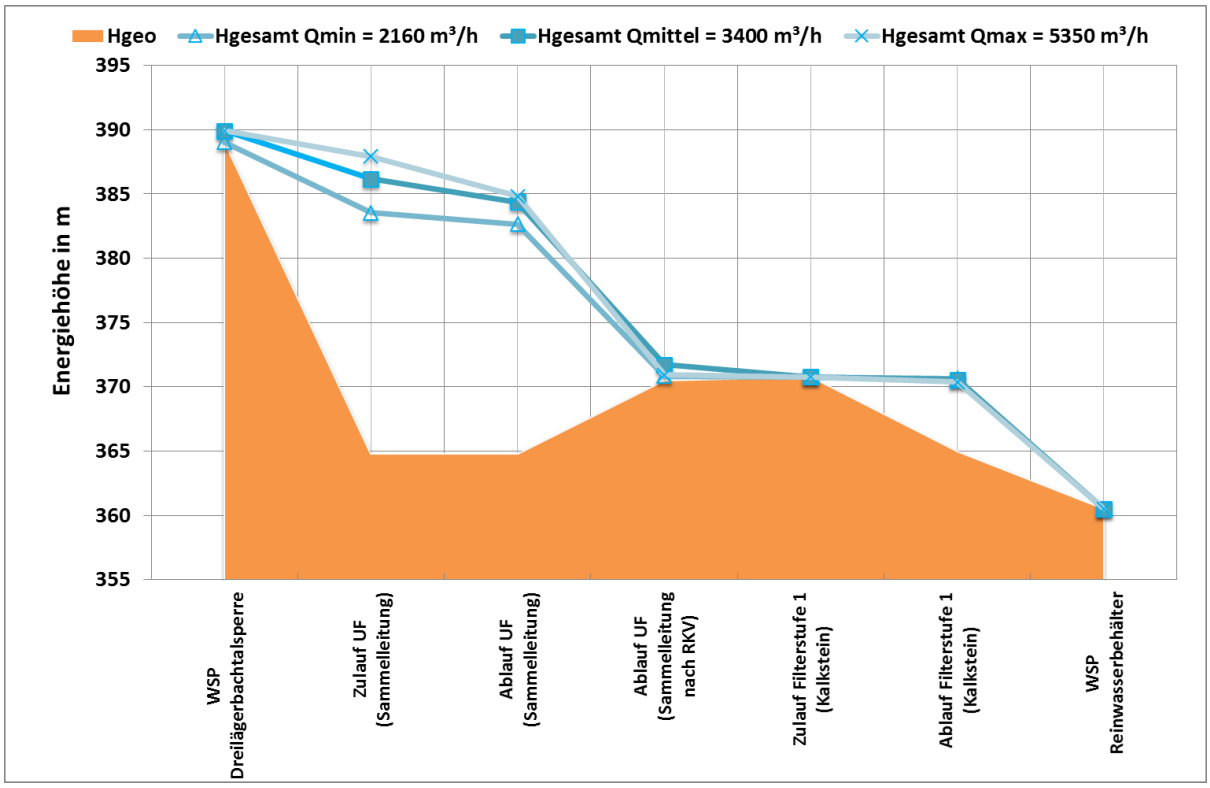


Abbildung 54: Energielinien für das WW Roetgen (Turbine zum Zeitpunkt der Messungen nicht in Betrieb); H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel

II.4.5.4 Spülen von Oberflächen- und Tiefenfiltern

Oberflächen- und Tiefenfilter werden durch Umkehrung der Fließrichtung gespült (Rückspülung), so dass abgeschiedene Trübstoffe vom Filtermaterial abgelöst werden. Der Spülvorgang wird spätestens eingeleitet, sobald die Qualität des Filtrats (z. B. Trübung) einen definierten Grenzwert erreicht hat. Häufig wird jedoch – orientiert an Betriebserfahrungen – nach Erreichen desjenigen Filterlaufvolumens gespült, nach dem die Trübung üblicherweise ansteigt. Bei Filtrationsprozessen, wie z. B. der Eisen(II)-Filtration, die durch einen exponentiellen Druckverlustanstieg bei immer weiter abnehmender Trübung gekennzeichnet sind, richtet sich der Spülzeitpunkt nach dem als optimal erkannten Druckverlust oder wiederum dem bis zu diesem Erfahrungswert üblicherweise durchgesetzten Filterlaufvolumen. Die Spülung nach festen Uhrzeiten - unabhängig vom Filtrationsbetrieb - verursacht den höchsten Spülwasserverbrauch.

Der Spülvorgang benötigt i. d. R. etwa 0,5 – 5 % des zuvor aufbereiteten Wasservolumens. Bei einer energetischen Betrachtung ist es daher auch immer wichtig, die Energie zur Gewinnung und Aufbereitung dieses Wassers zu berücksichtigen. Die ENERWA-Untersuchungen im WW Essen-Kettwig zeigten, dass der Energiebedarf der Spülaggregate in allen Spülphasen der Luft-Wasser-Spülung eines Mehrschichtfilters in Summe etwa 6 kWh beträgt. Damit entspricht der Spülenergiebedarf ca. 0,1 % vom jährlichen Energiebedarf der Gewinnung und Aufbereitung. Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs zur Bereitstellung der entsprechenden Trinkwassermenge steigt dieser Anteil jedoch auf ca. 0,9 %. Zur Senkung des Energiebedarfs ist daher als erste Maßnahme eine Optimierung der Spülung zur Reduzierung des Spülwasserbedarfs zu empfehlen. Diese umfasst in aller Regel die Prüfung, ob Art und Wert des Auslösekriteriums noch passend sind (Trübung, Druckverlust, Filterlaufvolumen, Filterlaufzeit, Zeitspanne) und ob die verschiedenen Schritte des Spülprozesses selbst noch optimiert werden können. Vielfach bewährt hat sich hierfür eine deutliche Verkürzung der üblicherweise letzten Wasser-Spülphase bei mindestens der Lockerungsgeschwindigkeit zugunsten einer zusätzlich folgenden Verdrängungsspülung bei nur halber Lockerungsgeschwindigkeit sowie Verzicht auf einen Erstfiltratabschlag. Eine Senkung des Spülwasserbedarfs hat zur Folge, dass sich das Volumen an schlammhaltigem Spülwasser reduziert. Dadurch kann bei dessen Aufbereitung vor allem Pumpenergie eingespart werden. Die Einsparpotenziale müssen individuell für jede Filterstufe in Wasserwerken ermittelt werden.

II.4.5.5 Spülwasseraufbereitung

In aller Regel wird das schlammhaltige Filterspülwasser in Sedimentationsanlagen soweit aufbereitet, dass es in einen Vorfluter abgeleitet oder versickert werden kann. Diese Verfahren

sind nicht sehr energieaufwändig, aber das mehr oder weniger aufwändig geförderte Wasser steht nicht für die Trinkwasserversorgung zur Verfügung. Insbesondere bei sehr hohen Kosten bzw. sehr hohem Energiebedarf für die Wassergewinnung und Aufbereitung oder bei nicht ausreichenden Wasserrechten und hierdurch verursachtem Fremdbezug sollte über die Aufbereitung von schlammhaltigem Filterspülwasser zur Rückführung in den Aufbereitungsprozess nachgedacht werden. Aus energetischer Sicht kann dies lohnend sein, wenn die Aufbereitung preiswerter ist als die Gewinnung und Aufbereitung weiteren Rohwassers. In diesem Fall muss das nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik aufbereitete schlammhaltige Filterspülwasser vor eine partikelabtrennende Stufe zurückgeführt werden. Als Aufbereitungsverfahren kommen die Sedimentation, die Schnell- oder Membranfiltration ggf. nach Flockung und die UV-Desinfektion in jeweils passenden Kombinationen zum Einsatz. Solche Systeme müssen jeweils individuell für Aufbereitungsanlagen konzipiert werden, da die Randbedingungen sehr unterschiedlich sind.

II.4.5.6 Gaseintrag

Als Gase werden bei der Wasseraufbereitung Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Luft, Ozon (als Bestanteil eines Luft-oder Sauerstoffstromes) oder Chlor eingebracht. Kohlenstoffdioxid ist in Wasser gut löslich und Chlorgas wird nur in geringer Konzentration eingebracht, so dass diese beiden Stoffe hier nicht weiter behandelt werden. Beim Gaseintrag kann zum einen Energie gespart werden, wenn der Eintragsprozess selbst bzgl. Energiebedarf optimiert ist, zum anderen wenn das Gas möglichst vollständig im Wasser gelöst wird, so dass die Kosten für den Kauf oder die Erzeugung vor Ort minimal sind. Am Anfang einer Optimierung sollte deshalb möglichst eine Massenbilanz bei verschiedenen Volumenströmen stehen, aus der hervorgeht, welcher Anteil des benötigten Gases in das Wasser übergeht und welcher als Abluft den Prozess verlässt. Mit der Kenntnis der Verluste und den Kosten für die Gasbereitstellung kann abgeschätzt werden, ob es ein wirtschaftlich interessantes Optimierungspotenzial gibt. Ist dies der Fall, müssen die Stoffübergangsprozesse bewertet werden. Prinzipiell verläuft der Übergang eines Gases in eine Flüssigkeit umso besser, je größer die Stoffübergangsfläche ist, je größer der Unterschied zwischen dem Partialdruck des Gases in der Gasphase und dem Partialdruck des Gases in der Flüssigkeitsphase, je länger die Kontaktzeit und je größer die Turbulenz an der Stoffübergangsfläche ist. Zur Bildung einer Kontaktfläche wird entweder die Flüssigkeit im Gas oder das Gas in der Flüssigkeit dispergiert, häufig mit Unterstützung von zusätzlicher Oberfläche in Form von Füllkörpern. Die Verfahrenstechnik bietet hierzu eine enorme Vielzahl von Systemen. Bei der Trinkwasseraufbereitung werden für den Eintrag von Luft oder Sauerstoff in geschlossenen Systemen häufig sogenannte Oxidatoren (Kessel mit

Luftpolster) eingesetzt, in denen Wasser unter Druck in einem Gasraum verteilt wird und dieses Gas vollständig aufnimmt. Bei richtiger Dimensionierung bleibt der Luftraum durch Nachspeisung von Gas erhalten und das Wasser verlässt den Kessel im optimalen Fall ohne Gasblasen. Für den Eintrag von Ozon (genauer ozonhaltigen Gases) aber auch für Luft oder Sauerstoff alleine werden für Drucksysteme sehr häufig zweistufige Systeme genutzt. In einem kleineren Roh- oder Reinwasserstrom wird mittels eines Injektors oder eines statischen Mischers ein Gas-Wasser-Gemisch hergestellt, das idealerweise sehr viele sehr kleine Blasen enthält. Diese Blasen werden dann im Hauptstrom mit einem großen statischen Mischer verteilt. Je nach Rohrleitungsführung, Verweilzeit in Behältern, Kontakt mit Füllkörpern und sonstigen Randbedingungen lösen sich die Gase mehr oder weniger vollständig in der Flüssigkeit und das überschüssige Gas muss mit entsprechenden Abscheidern ausgetragen und ggf. von Ozon befreit werden. Bei der Konzeption solcher Anlagen ist darauf zu achten, dass die Blasengröße, Rohrleitungsführung und die Apparategeometrie einem Koaleszieren der Blasen (Bildung einer großen aus vielen kleinen Blasen z. B. im Rohrscheitel) möglichst lange entgegenwirken, um möglichst geringe Gasverluste zu bewirken. Für den Gaseintrag in offene Becken werden häufig Flächenbelüfter unterschiedlichster Bauart eingesetzt. Der Projektpartner RWW hat im Wasserwerk Kettwig im Rahmen von ENERWA die veralteten Begasungsteller in der Ozonungskammer durch modernere und bewährte sogenannte Dombegaser aus poröser Keramik (dome diffusers der Firma Ozonia) ersetzt. Damit konnte die Eintragseffizienz von 50 auf 75 % gesteigert und der Ozonbedarf mit den zugehörigen Kostenanteilen um ca. 33 % verringert werden. Zur weiteren Optimierung soll in einem RWW-internen Folgeprojekt das Potenzial einer Umstellung auf kleinere nun besser passende Ozongeneratoren geprüft werden.

II.4.6 Carbon-Footprint

Die Bestimmung des Carbon-Footprint als Indikator zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen, wurde für fünf Wasserwerke durchgeführt. In die Berechnung flossen in erster Linie die folgenden Faktoren ein:

- elektrischer Energiebedarf der Wassergewinnung und –aufbereitung
- Betriebsmittel und Wasseraufbereitungsstoffe

Neben der Emission von Treibhausgasen kann der Carbon-Footprint auch als Indikatorparameter für den Energiebedarf gesehen werden. Der Energiebedarf kann unterteilt werden in den internen und externen Energiebedarf. Der externe Energiebedarf in der Wasseraufbereitung ist vor allem gekennzeichnet durch die Verwendung der Wasseraufbereitungsstoffe, für

deren Herstellung extern Energie benötigt wird. Die CO_2-Emissionen, die durch die Nutzung von Treibstoffen im Wasserwerk oder durch die Abfallentsorgung verursacht werden, wurden nicht berücksichtigt. Diese machen erfahrungsgemäß in den meisten Fällen einen sehr geringen Anteil an den gesamten CO_2-Emissionen aus. Den größten Einfluss auf den Carbon-Footprint hat der Bedarf an elektrischer Energie bei der Wassergewinnung und –aufbereitung. Bei Vergleich des Carbon-Footprint der einzelnen Wasserwerke untereinander fallen deutliche Unterschiede auf (Tabelle 18). Im Wesentlich sind dafür die geografischen Gegebenheiten und die Rohwasserqualität verantwortlich.

Tabelle 18: Carbon-Footprint in g CO_2/m³ der beteiligten Wassergewinnungs- und Aufbereitungsanlagen (inkl. Umlage der Energie aus der Wassergewinnung (WG), die in der Wasseraufbereitung (WA) verbraucht wurde)

Wasserwerk	Jahr	elektr. Energie (WG)	elektr. Energie (WA)	Betriebsmittel, Wasseraufbereitungsstoffe (WA)	Summe	Anteil der WA
Erlenhagen	2014	102	113	47	**262**	**61 %**
Schürholz	2014	284	168	46	**508**	**43 %**
Roetgen	2014	267	103	34	**405**	**34 %**
Wehebachtalsperre	2014	0	46	23	**69**	**100 %**
Essen-Kettwig	2013	6	239	94	**339**	**98 %**

Die Detailergebnisse zum Carbon Footprint und zum spezifischen Energiebedarf einzelner Aufbereitungsstufen bei verschiedenen Aufbereitungsleistungen finden sich in Anhang IV.2, Tabelle 44 und Tabelle 45.

II.4.7 Untersuchungen im Grundwasserwerk Dorsten-Holsterhausen

Eine typische Grundwasseraufbereitungsanlage dient in der Regel der Entfernung von Eisen, Mangan und Ammonium sowie ggf. der Entsäuerung und/oder Stabilisierung. Sie enthält üblicherweise eine Stufe zur Anreicherung mit Sauerstoff und mindestens eine Tiefenfilterstufe. Sehr komplexe Grundwasserbeschaffenheiten können auch mehrere Be- und Entgasungsstufen und bis zu drei Filterstufen enthalten. Bei der Rohwassergewinnung und Wasseraufbereitung in Grundwasserwerken wird ein meist überwiegender Teil des Energiebedarfs bereits bei der Wassergewinnung durch Brunnenpumpen verursacht. Ein Teil der erzeugten Druckenergie wird dann häufig noch in der Wasseraufbereitung genutzt. Bei einer typischen Rohwasserbeschaffenheit solcher Werke kommen keine besonders energieintensiven Verfahren wie z. B. die Ozonung zum Einsatz. Das Wasserwerk Holsterhausen mit der Verfahrensfolge offene

Belüftung – Zwischenpumpwerk - Mehrschichtfilter – UV-Desinfektion - physikalische Entsäuerung ist ein typisches Werk dieser Art. Die seit einigen Jahren betriebene abschließende UV-Desinfektion wird auch in anderen Grundwasserwerken zunehmend eingesetzt.

Die größten Einsparpotenziale liegen bei der Optimierung der Brunnenpumpen bzw. deren Betriebsweise sowie Vermeidung von Druckverlusten und zu überwindender geodätischer Höhe bei der Aufbereitung. Die Energielinie, die zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen in der Aufbereitungsanlage Holsterhausen erstellt wurde, findet sich in Abbildung 55.

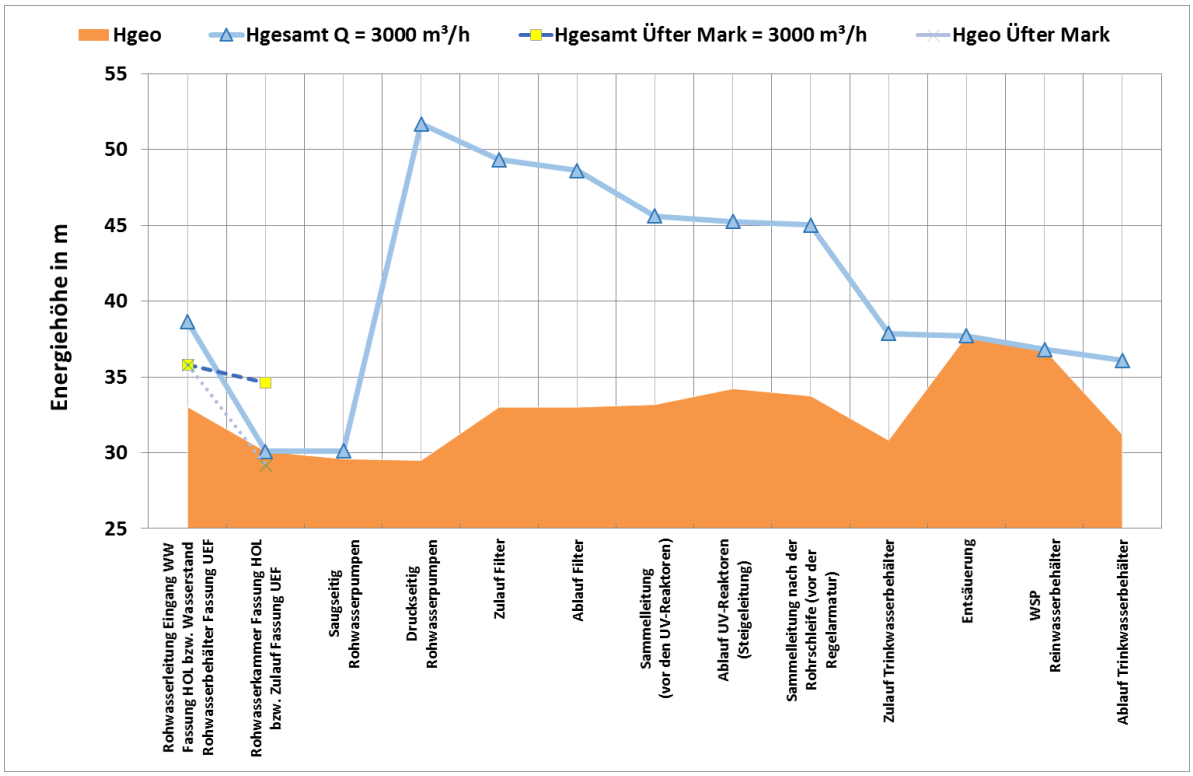


Abbildung 55: Energielinie für das WW Holsterhausen (Datengrundlage: RWW)

Folgende Optimierungspotenziale wurden abgeleitet:

- Rückbau der Rohrschleifen hinter den beiden Filterstraßen inkl. der Regelventile. So kann der Druckverlust durch die Passage der Gesamtanlage deutlich gesenkt, die Filteranlage mit einem geringeren Zulaufdruck betrieben und die Förderhöhe und damit der Energiebedarf der Rohwasserpumpen – ggf. unterstützt durch Verringerung des Laufraddurchmessers – gesenkt werden.
- Falls die Rohrschleifen und die Regelventile aus dem System entfernt werden, sollte auch die Gleichverteilungsregelung der Filter-Volumenströme daraufhin überprüft werden, dass alle Regelventile wirklich nur den für Gleichverteilung erforderlichen zusätzlichen Druckverlust pro Filter bewirken. Im Idealfall ist das Regelventil am Filter mit der längsten Filterlaufzeit bzw. dem höchsten Durchsatzvolumen seit der letzten Spülung ganz geöffnet.

Ggf. kann die Gleichverteilungsregelung so programmiert werden, dass das Regelventil an genau diesem Filter zu 100 % geöffnet bleibt.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten werden im Bereich der Klimatisierung gesehen:

- Direkte Verrohrung des Einlasses der Zuluft zu den Rieselern mit einer Einlassöffnung in der Gebäudewand mit entsprechender Luftfiltration anstatt der Entnahme der Luft aus dem Gebäudeinneren. Das Einströmen der Luft in das Rieselergebäude und der Kontakt mit den kalten Außenwänden der Rieseler führt zu einem Großteil des Jahres zu erheblichen Feuchtigkeitsniederschlägen und stellenweise zu Kondensationsschäden an den Rieselern sowie zu einem hohen Stromverbrauch für die Entfeuchtung dieses Gebäudeteils mittels Kondensationsentfeuchtungsanlagen.

Darüber hinaus wurden die Betriebsdatendokumentation zum Wasserwerk und Berichte zur Steigerung der Aufbereitungsleistung an einem Filter im Hinblick auf eine Dynamisierung des Anlagenbetriebes ausgewertet. Folgendes wurde daraus abgeleitet:

- Der Aufbereitungs-Volumenstrom kann vergleichsweise schnell verändert werden (Einstellzeit der Regelstrecke bei neuer Durchsatzvorgabe) ohne dass sich die Filtrattrübung signifikant erhöht.
- Der spezifische Energiebedarf für die Gewinnung und Aufbereitung ist im Volumenstrombereich von 1.500 – 3000 m³/h nahezu konstant bei ca. 0,26 kWh/m³ und steigt bis ca. 4.000 m³/h nur auf 0,27 bis 0,28 kWh/m³.

Bei einer Dynamisierung des Betriebs wäre damit der spezifische Energiebedarf für Gewinnung und Aufbereitung nahezu unabhängig vom Volumenstrom.

II.4.8 Zusammenfassung Energieeffizienz in der Wasseraufbereitung

In der Wasseraufbereitung gibt es Prozesse mit deutlichen energetischen Optimierungspotenzialen, welche durch Verfahrensoptimierungen, Austausch von ineffizienten bzw. überdimensionierten Komponenten oder Abschalten nicht mehr benötigter Anlagenteile erschlossen werden können. Darüber hinaus finden sich Effizienzpotenziale durch technische Optimierung im Detail: Vermeidung unnötiger Förderhöhen und Druckverluste, Optimierung der Chemikalieneinmischung, Optimierung des Pumpbetriebs sowie der Klimatisierung des Werksgebäudes.

Eine flexible Fahrweise der Wasseraufbereitung bringt i. d. R. einen Mehrbedarf an Energie mit sich, der abhängig von den Wasserversorgungsanlagen signifikant hoch sein kann. Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich bei den derzeitigen Schwankungsbreiten von Strompreisen des Spotmarkts eine Flexibilisierung der Wasseraufbereitung eher nicht. In Sonderfällen, wenn

es für andere Bereiche der Versorgungskette lohnend ist, kann die Dynamisierung jedoch mitgegangen werden. Nennenswerte Einsparungen können aber bei der atypischen Netznutzung durch Minimierung der elektrischen Jahreshöchstleistung erzielt werden.

Negative Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität konnten bei den Untersuchungen nicht beobachtet werden. Der limitierende und zu überwachende Leitparameter bei der Wasseraufbereitung ist die Trübung, da es bei stärkeren Durchflüssen beispielsweise zur Ablösung von Ablagerungen kommen kann. Auch Flockungsanlagen können mit einer erhöhten Ablauftrübung auf variierende Volumenströme reagieren, und so zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Filtrattrübung nachgeschalteter Filter beitragen. Einer Umstellung auf einen dynamischeren Betrieb muss auf jeden Fall für jede Anlage ein technischer Versuch mit den später typischen Randbedingungen vorangehen.

II.5 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung - AP B3

II.5.1 Methodik

II.5.1.1 Einführung

Die energetische Optimierung der Trinkwasserverteilung umfasst (neben anlagentechnischen Optimierungen wie der Installation effizienter Pumpen, Frequenzumrichtern zur Drehzahlregelung, etc.) im Wesentlichen nachfolgende drei Möglichkeiten zur Verringerung des Energiebedarfs bzw. der Energiekosten:

1. eine Verringerung des Energiebedarfs durch eine (lokale) Absenkung des Druckniveaus auf den tatsächlich benötigten Versorgungsdruck
2. eine Verringerung des Netto-Energiebedarfs durch die Installation von Energierückgewinnungsanlagen zur energetischen Nutzung unvermeidbarer Drucküberschüsse
3. eine Verringerung der Energiekosten durch die Nutzung der Trinkwasserspeicher als Energiespeicher und Verlagerung des Pumpbetriebs in Zeitfenster mit geringen Strompreisen

Darüber hinaus ist eine Reduzierung des Fließwiderstandes durch eine größere Dimensionierung der Leitungen möglich. Diese Option ist aus wirtschaftlichen (hohe Investitionen in die Leitungsverlegung) und technischen Erwägungen (geringere Fließgeschwindigkeit = zunehmende Stagnation) jedoch für die Praxis im Regelfall nicht relevant.

Jeder dieser Optimierungsansätze benötigt unterschiedliche Optimierungsverfahren zur Bestimmung des Optimums und ist nur in bestimmten Netzkonfigurationen anwendbar. Im Kapitel II.5.1.2 werden die möglichen Druckzonenkonfigurationen bezüglich ihrer Struktur klassifiziert und die jeweils anwendbaren Optimierungsmöglichkeiten dargestellt.

In Druckzonen mit größeren Höhenunterschieden bzw. wenigen hoch gelegenen Verbrauchern herrscht häufig die Situation, dass diese wenigen Abnehmer aufgrund ihrer Höhenlage ein entsprechendes Druckniveau benötigen und das Druckniveau der gesamten Druckzone bestimmen. Hierdurch werden flächendeckende Drucküberschüsse erzeugt, welche zu einem unnötig hohen Energiebedarf führen. In Kapitel II.5.1.3 wird ein Optimierungsansatz zur Reduzierung des Energiebedarfs durch Minimierung dieser Drucküberschüsse (analog zu 1.) beschrieben, welcher durch eine angepasste Druckzonengestaltung bzw. durch die gezielte Einrichtung neuer Hochzonen erreicht werden kann.

Die Topographie eines Versorgungsbereichs führt vielfach dazu, dass natürliche Hochpunkte zwischen zwei tiefer gelegenen Versorgungsschwerpunkten überwunden werden müssen. Die

hierbei eingesetzte Pumpenergie führt in tiefer gelegenen Netzbereichen zu entsprechenden Drucküberschüssen, die in der Regel nicht energetisch genutzt, sondern beim Abnehmer vernichtet werden.

Die hierdurch entstehenden Möglichkeiten zur Energierückgewinnung (analog zu 2.) werden in Kapitel II.5.1.4 untersucht. Der entwickelte Optimierungsansatz ermöglicht die Installation zusätzlicher Rückgewinnungsanlagen (Turbinen oder rückwärts laufende Pumpen) durch die Identifikation und Einrichtung zusätzlicher Tiefzonen. Darüber hinaus bietet sich generell die Möglichkeit an, bestehende Druckminderungsventile durch Rückgewinnungsanlagen zu ersetzen.

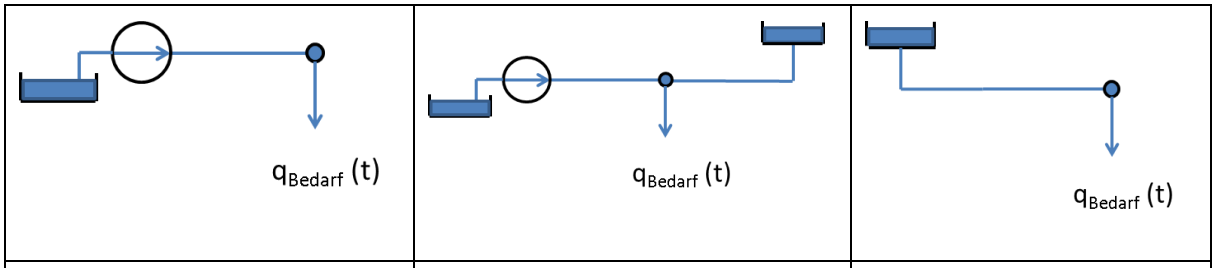
Der dritte untersuchte Optimierungsansatz beschreibt die Möglichkeiten zur Verringerung der Energiekosten durch eine zeitliche Verlagerung des Pumpbetriebs. Die Anpassung der Fahrweise kann genutzt werden, um den Leistungsbedarf bei hohen Netzbelastungen zeitlich zu verschieben, um hierdurch die Stromnetzentgelte zu verringern. In diesem Fall ist an den Netzbetreiber nur der Leistungspreis für die während des Hochlastzeitfensters (z.B. 8 - 9 Uhr morgens) aufgetretene Leistungsspitze zu entrichten („Atypische Netznutzung“). Ein weiterer Ansatz zur Verringerung der Energiekosten durch eine zeitliche Verschiebung der Pumpenbetriebsweise ergibt sich durch eine strukturierte Strombeschaffung, welche eine Anpassung der Fahrweise an die Schwankungen (stündlich bzw. viertelstündlich) der Day-Ahead-Spotmarktpreise ermöglicht. Darüber hinaus bietet sich die Teilnahme am Regelenergiemarkt an, welche durch die Bereitstellung von positiver (Verringerung des Energiebezugs) oder negativer Regelenergie (Erhöhung des Energiebezugs) die Generierung zusätzlicher Erlöse ermöglicht. Die Optimierungsverfahren für die Anpassung der Fahrweise des Netzes werden in Kapitel II.5.1.5 erläutert.

II.5.1.2 Systematik der Druckzonenklassifizierung

Für die Klassifizierung der Druckzonen werden folgende zwei wesentliche Parameter berücksichtigt:

- die relative geodätische Höhe des Netzes gegenüber der Einspeisung
  (Netz von unten oder von oben gespeist)
- die Verfügbarkeit von Speichern (Netzgegenbehälter).

Die benötigte Druckhöhe in Druckzonen ohne Netzgegenbehälter richtet sich nach der Höhe der Wasserabnehmer (insbesondere des höchsten Abnehmers). Bei Netzen mit Netzgegenbehälter orientiert sie sich an der Höhe des Behälters. Aus den beiden Kriterien ergeben sich vier Kombinationen, wobei die ersten drei in folgender Abbildung dargestellt werden.



Fall 1	Fall 2	Fall 3

Abbildung 56: Die drei wichtigsten Typen von Druckzonen (aus energetischer Sicht)

Für jeden oben genannten Typ von Hochzonen bestehen unterschiedliche Möglichkeiten für Energieeffizienzmaßnahmen:

- Die Druckzonen des Falls 1 werden von unten gespeist und haben keinen Netzgegenbehälter. Der Energiebedarf ist eine Funktion des Produkts der Wasserabgabe und der Förderhöhe. Die benötigte Druckhöhe orientiert sich also an dem Höhenprofil der Abnehmer. In solchen Druckzonen kann der Energiebedarf gesenkt werden, wenn die höchsten Abnehmer dezentral oder in ihrer eigenen Hochzone versorgt werden. (Kapitel II.5.1.3)
- Die Druckzonen des Falls 2 werden ebenfalls von unten gespeist (und haben somit einen Pumpenergiebedarf). Im Gegensatz zu Fall 1 wird jedoch gegen einen Hochbehälter (Netzgegenbehälter) gepumpt. Dies bedeutet, dass der Energiebedarf nicht durch eine Absenkung des Druckniveaus verringert werden kann, da das Druckniveau der Zone durch die Höhenlage des Behälters bestimmt wird. Die Speicherfunktion des Behälters eröffnet den Wasserversorgungsunternehmen (WVU) jedoch eine andere Optimierungsmöglichkeit: die energetische Nutzung des Speichervolumens, um den zeitlichen Verlauf des Pumpbetriebs unter Berücksichtigung zeitabhängiger Energiekosten (wie in Kapitel II.5.1.5) anzupassen.
- Die Druckzonen des Falls 3 haben keinen Netzgegenbehälter und werden von oben gespeist. Für sie fällt im Gegensatz zu Fall 1 kein Energiebedarf für den Betrieb der Reinwasserpumpen an. Aus dem Höhenprofil der Druckzone bzw. der Höhenlage der Abnehmer kann es jedoch vorkommen, dass lokal Drucküberschüsse vorliegen, welche durch eine hydraulische Trennung und die Installation von neuen Turbinen im Netz oder den Ersatz von Druckminderungsventilen durch Turbine rückgewonnen werden können (Kapitel II.5.1.4).

Zu dieser übergeordneten Klassifizierung ist anzumerken:

- In manchen WVU gibt es darüber hinaus eine vierte Klasse von Druckzonen. Dies entspricht einer Zone, welche von oben (also ohne Pumpen) gespeist wird und einen Netzgegenbehälter aufweist. Typischerweise liegen die Einspeisung und der Gegenbehälter auf unterschiedlichen Hochpunkten, sodass eine Bildung von Tiefzonen, wie im Fall 3, topologisch häufig unzulässig ist. In solchen Fällen sind Energieeffizienzmaßnahmen deutlich schwieriger umzusetzen, als in den Fällen 1 bis 3. Darüber hinaus ist diese Klasse von Druckzonen relativ selten anzutreffen, weshalb sie im Folgenden nicht näher untersucht wird.
- Bei Druckzonen ohne Netzgegenbehälter ist die Klassifizierung in den Fällen 1 oder 3 nicht immer eindeutig: Wenn die Einspeisehöhe zwischen dem Höhenniveau der höchsten und tiefsten Abnehmer liegt, wird eine Reinwasserförderung mit Energiebedarf zur Versorgung der hoch gelegenen Abnehmer benötigt (Fall 1). Gleichzeitig liegen aber viele Abnehmer unter dem Höhenniveau der Einspeisung und eine Rückgewinnung ist prinzipiell möglich (Fall 3). Eine solche Konfiguration wird im Kapitel II.5.2.5 zur Anwendung der Optimierungsverfahren an realitätsnahen Netzen beschrieben (Druckzone Reken des Netzes von RWW).
- Innerhalb des Falls 2 (von unten gespeist, mit Netzgegenbehälter) lässt sich unterscheiden, ob ein Teil der Reinwasserförderung in den Behälter eine nachgelagerte Druckzone versorgt oder nicht. Außerdem sind in der Praxis unterschiedliche Kombinationen von Reinwasserbehältern und Netzgegenbehältern anzutreffen. In Abbildung 56 (mittleres Bild) ist dargestellt, wie sie in einer 1:1 Beziehung stehen (einfachster Fall). Alternativ sind jedoch auch n:1 (mehrere Reinwasserbehälter (RWB) bzw. Einspeisewerke, nur ein Gegenbehälter), 1:n (ein Reinwasserbehälter bzw. Einspeisewerk und mehrere Netzgegenbehälter) oder n:m Beziehungen möglich. Im Kapitel zur Anwendung der Methoden wird der ENWOR Netzgegenbehälter aus drei Reinwasserbehältern gefüllt. Bei dem Aggerverband versorgt ein Reinwasserbehälter vier unterschiedliche Netzgegenbehälter. Diese Unterfälle unterscheiden sich zwar in der Hydraulik und Detailmodellierung von dem 1:1-Fall. Dieser ist jedoch ausreichend, um die wirtschaftlichen Aspekte darzustellen.

Die hier eingeführte Klassifizierung in die drei Fälle zeigt auf, welche Optimierungsmethoden prinzipiell in Frage kommen. Die Verfahren zur konkreten Identifikation und Quantifizierung des Optimierungspotenzials gehen dann aus den folgenden Kapiteln hervor, welche weiteren Parameter im Detail berücksichtigen.

II.5.1.3 Senkung der Drucküberschüsse durch Bildung von Hochzonen

Methodik und Drucküberschüsse pro Abnehmer

Ziel der Bildung von Hochzonen ist die Absenkung des Einspeisedrucks der zentralen Reinwasserförderung auf ein Druckniveau, welches für den Großteil der Abnehmer ausreichend ist. Abnehmer mit einem dann nicht mehr ausreichenden Druck (unter Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste) müssen hydraulisch getrennt und über zusätzliche Druckerhöhungsanlagen (DEA) versorgt werden. Die hydraulische Trennung führt zur Einrichtung von Hochzonen. Das Verfahren zur Identifikation und Bildung dieser Hochzonen basiert auf dem Prinzip einer Auslegung des Einspeisedrucks unter Berücksichtigung des Druckschlechtpunkts der Druckzone.

Der entwickelte Algorithmus zur Bestimmung der Hochzonen führt iterativ nachfolgende Schritte aus:

- Der Abnehmer am Druckschlechtpunkt der ursprünglichen Druckzone („Tiefzone“) wird von der Tiefzone getrennt und an eine Hochzone angeschlossen.
- Zur Erfüllung von topologischen (Zusammenhang des Netzes) und hydraulischen Randbedingungen werden gegebenenfalls zusätzliche Leitungen an die Hochzone angeschlossen.
- Energetische Kennwerte wie Förderhöhe und Energiebedarf werden quantifiziert.
- Der neue Druckschlechtpunkt im restlichen Teil der Tiefzone wird ermittelt und die Iteration wird fortgeführt

Bei der Implementierung dieses Vorgehens wird jeder Abnehmer irgendwann zum Druckschlechtpunkt der Druckzone. Deshalb wird im Vorfeld jeder Abnehmer nach einer Größe bewertet und sortiert, die Auskunft darüber gibt, ob der Abnehmer zum neuen Druckschlechtpunkt wird. Diese Größe ist die Druckhöhe an der Einspeisung, welche knapp ausreichen würde, damit der Abnehmer mit ausreichem Druck versorgt wird.

In Anlehnung an DVGW W 400-1 (A) ist der vorzuhaltende Versorgungsdruck beim Abnehmer eine Funktion der Anzahl an Geschossen (siehe Tabelle 19):

Tabelle 19: Mindestdruck als Funktion der Geschosszahl laut DVGW Arbeitsblatt W400-1 (A)

Gebäude mit	Mindestdruck an der Abzweigstelle der Anschlussleitung von der Versorgungsleitung
EG	2,00 bar
EG und 1 OG	2,35 bar
EG und 2 OG	2,70 bar
EG und 3 OG	3,05 bar
EG und 4 OG	3,40 bar

Jedem Abnehmer wird also eine Mindest-Solldruckhöhe [5] zugeordnet, welche der Summe aus geodätischer Höhe und Geschosshöhe entspricht, bevor der Mindest-Einspeisedruck berechnet wird.

Energetische Darstellung des Ausmaßes der Drucküberschüsse innerhalb einer Druckzone

Sofern ein Netz für jeden Abnehmer exakt den jeweiligen Solldruck bereitstellen soll, würde theoretisch für jeden Abnehmer eine eigene Druckerhöhung notwendig sein, da für jeden Abnehmer die Bodenhöhe und die Gebäudehöhe unterschiedlich sein können. Dies entspräche dem Fall eines Netzes, welches mit der geringsten Solldruckhöhe versorgt wird und in dem alle Abnehmer mit höherer Solldruckhöhe werden über eine Druckerhöhung im Gebäude versorgt werden.

Da die Solldruckhöhen der einzelnen Abnehmer jedoch in der Regel teilweise räumlich gruppiert auftreten, lässt sich die räumliche Verteilung der benötigten Einspeisedruckhöhe jedoch wie in Abbildung 57 grafisch darstellen.

[5] Sofern reale Daten für Gebäudehöhen vorliegen, werden diese in Anzahl Geschosse und dann in Mindestdruckhöhe umgerechnet. In Netzbereichen ohne Angaben über die realen Gebäudehöhen kann (mit Verlust an Genauigkeit) ein pauschaler Solldruck zugeordnet werden (z.B. 3,0 oder 3,4 bar).

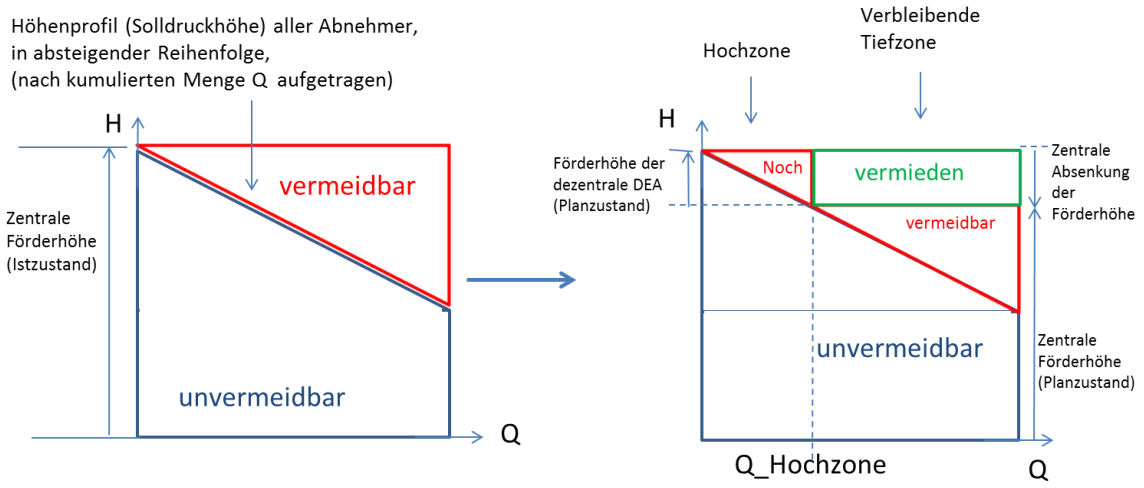


Abbildung 57: Kumulierte Fördermenge absteigend nach Solldruckhöhe sortiert

Die Wasserabgabe der Druckzone (Durchfluss Q) ist auf der X-Achse aufgetragen. Die entsprechende benötigte Einspeisedruckhöhe ist auf der Y-Achse aufgetragen. Das linke Bild zeigt den Istzustand und das rechte Bild den Planzustand mit Bildung einer Hochzone.

Die Funktion H(Q) charakterisiert das Höhenprofil der Abnehmer und trennt die rechteckige Fläche und zwei Bereiche auf, welche als Produkt von Q und H die Dimension der (potenziellen) Energie aufweisen:

- Der Bereich unter dem Höhenprofil (blau) stellt den unvermeidbaren Energiebedarf dar und entspricht der aufzuwendenden Energie im Beispiel der gezielten Druckerhöhung in jedem Gebäude
- Der Bereich über dem Profil (rot) stellt den vermeidbaren Energiebedarf dar. Um ihn tatsächlich zu vermeiden, müsste bei jedem Abnehmer eine dezentrale Druckerhöhung installiert werden, was in der Praxis unwirtschaftlich ist. Mit dem Einbau einer einzigen DEA im Netz lässt sich eine Hochzone bilden und ein Teil des Energiebedarfs vermeiden, welcher durch die grüne Fläche des rechten Bildes dargestellt wird.

Im Planzustand (rechtes Bild) ist das Niveau der Druckhöhe in der Hochzone (links) höher als im restlichen Teil der Druckzone (rechts). In diesem restlichen Teil kann also die Förderhöhe abgesenkt werden, ohne die Versorgungsaufgabe nach DVGW-Arbeitsblatt W400-1 (A) zu beeinträchtigen.

Durch diese Maßnahme werden der Energieverbrauch und somit auch die Energiekosten gesenkt. Gleichzeitig sind jedoch Investitionen und Betriebskosten für die zusätzliche DEA zur Versorgung der Hochzone zu berücksichtigen. Welcher der beiden Kostenterme (Einsparung Energiekosten vs. Kapital- und Betriebskosten der DEA) überwiegt, bestimmt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme.

In Abbildung 57 lässt sich die vermiedene Energie immer als Fläche (Rechteck) darstellen. Aus der Abbildung geht unmittelbar hervor, dass der Verlauf des Höhenprofils einen entscheidenden Einfluss darauf hat, welcher Anteil des vermeidbaren Bereichs mit der ersten Hochzone realisiert werden kann. Konvexe Bereiche des Höhenprofils weisen höhere Potenziale auf, als konkave.

Umgang mit der räumlichen Verteilung der höher gelegenen Abnehmer

Die räumliche Verteilung der Hochpunkte eines Netzes hat einen erheblichen Einfluss auf Anzahl und Ausdehnung möglicher Hochzonen. Im Idealfall liegen alle Abnehmer mit der größten Solldruckhöhe in unmittelbarer Nachbarschaft, so dass durch die Einrichtung einer Hochzone sämtliche Hochpunkte von dem übrigen Netz getrennt werden können.

In der Praxis ist jedoch häufig zu beobachten, dass nicht alle hoch gelegenen Abnehmer auf demselben Hochplateau, sondern teilweise weit voneinander entfernt liegen (dies trifft z. B. auf die Druckzonen Velen und Holsterhausen des RWW-Netzes zu). Würde in diesem Fall nur eine Hochzone eingerichtet werden, müssten für die Anbindung des ersten Abnehmers (Abnehmer mit der größten Solldruckhöhe) des zweiten „Hügels“ an die Hochzone des ersten „Hügels“ großflächige tiefer gelegene Bereiche dazwischen auch mit in die Hochzone eingebunden werden. Dies würde zu einer unnötigen Erhöhung der dezentralen Fördermenge führen und hierdurch einen Großteil des energetischen Einsparpotenzials vernichten. Bei mehreren weit entfernten Hochplateaus kann es also sinnvoll sein, mehrere getrennte Hochzonen einzurichten, um die Drucküberschüsse in den zwischenliegenden tiefer gelegenen Netzbereichen zu vermeiden. Allerdings muss in diesem Fall für jede Hochzone eine separate Druckerhöhung vorgesehen werden, was mit entsprechenden Kapital- und Betriebskosten einhergeht.

Da die Kosten der dezentralen DEA im Netz sehr stark von den lokalen Gegebenheiten abhängen (Grundstück, Gebäudegröße, Druckschlagsicherungen, etc.) und die typische Bandbreite der Investitionen zwischen ca. 100.000 bis 500.000 EUR liegt, wurde darauf verzichtet, typische Kostensätze der Investitionen zu hinterlegen, um ein Gesamtkostenminimum zu bestimmen. Stattdessen wird für jede Anzahl an möglichen Hochzonen (Fall 1 HZ, Fall 2 HZ, Fall 3 HZ, usw.) separat berechnet, welcher Energiebedarf bzw. welche Energiekosten eingespart werden können. Für jede dieser Simulation wird der optimale Abbruch des Verfahrens (hinsichtlich dieser Energieeinsparung) ermittelt, zum Beispiel „mit 1 HZ nach 15 Abnehmer abbrechen, mit 2 HZ erst nach 28 Abnehmer abbrechen, mit 3 HZ nach 70 Abnehmer abbrechen, usw.“. Welche dieser drei Varianten gewählt wird, ist dann im Einzelfall zu klären, in dem das WVU konkrete Planungskosten erhebt (inkl. Gebäudekosten des DEAs) und vergleicht.

Der Optimierungsalgorithmus für die Bildung mehrerer Hochzonen führt iterativ folgende Schritte durch:

- Vom neuen Abnehmer (aktueller Druckschlechtpunkt) wird zu jeder Hochzone die Länge des kürzesten Wegs ermittelt.
- Ist das Minimum der Entfernungen des Abnehmers zu den bestehenden Hochzonen kleiner als die minimale Entfernung zwischen zwei bestehenden Hochzonen, wird der Abnehmer an eine bestehende HZ angebunden.
- Ansonsten bleibt der Abnehmer allein als neue Hochzone und die zwei am nächsten voneinander gelegenen Hochzonen werden zusammengeschlossen.
- Alle minimalen Entfernungen zwischen allen Hochzonen werden aktualisiert.

Die Wechselwirkung zwischen Energiekosten und den Kapitalkosten sowie Betriebskosten der zusätzlichen DEA bei der Einrichtung mehrerer Hochzonen kann schematisch nachfolgender Abbildung 58 entnommen werden. Aus dem Verlauf der dunkelblauen Kurve ist ersichtlich, dass die gesamten Pumpenergiekosten stetig mit der Anzahl zusätzlicher Abnehmer in den Hochzonen sinken, da sich das Druckniveau immer gezielter an den tatsächlichen Druckbedarf jedes Abnehmers annähert.

Parallel zu den sinkenden Energiekosten verlaufen die Kapitalkosten (einschl. pauschalierter Betriebskosten) als steigende Treppenkurve, welche mit jeder zusätzlichen Hochzone steigt (= Installation zusätzliche DEA). Der Einfachheit wurden die Kosten der eigentlichen Pumpe normiert, wodurch die Kapitalkosten nur steigen, wenn eine neue Hochzone eingerichtet wird, nicht jedoch, wenn innerhalb einer Hochzone mehr Abnehmer (= höhere Pumpleistung) angeschlossen werden. Die rot markierte Linie in Abbildung 58 zeigt das Minimum der Gesamtkosten an, welches in diesem Fall bei zwei Hochzonen liegt. Die gestrichelte hellblaue Linie zeigt das theoretische Minimum der Energiekosten an, welches erreicht würde, wenn jeder Abnehmer exakt mit seinem Solldruckbedarf versorgt würde.

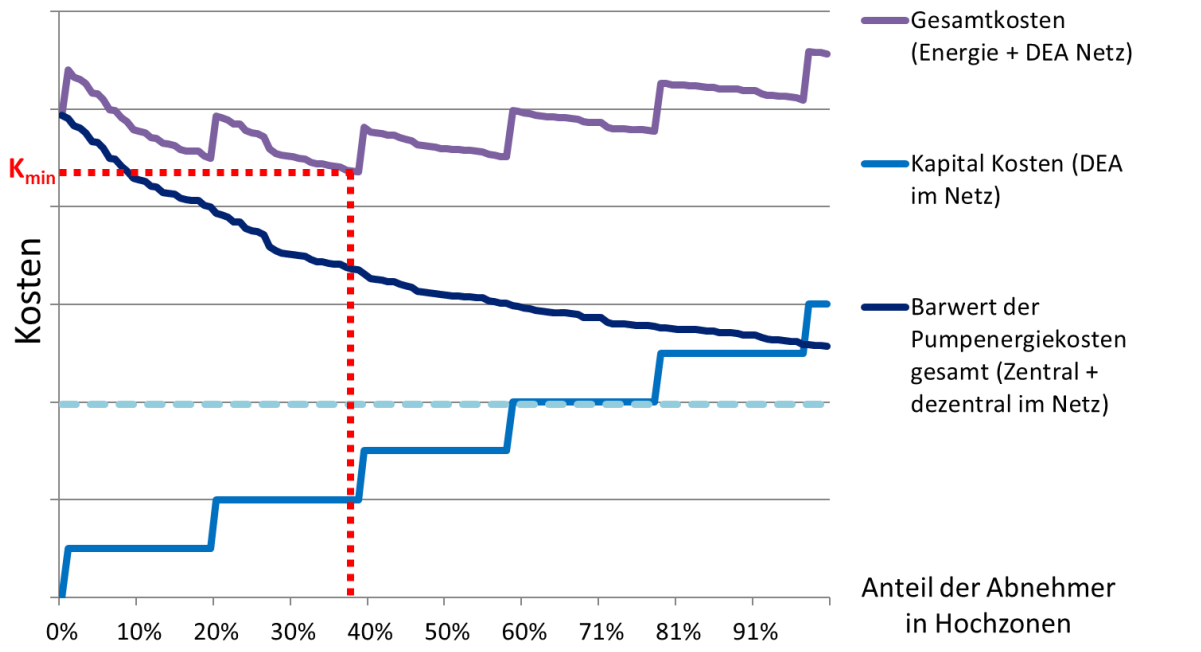


Abbildung 58: Kosten in Abhängigkeit der Anzahl zusätzlicher Hochzonen (schematisch)

II.5.1.4 Energierückgewinnung durch Bildung von Tiefzonen

Bei der Energierückgewinnung sind zwei Ansätze zu unterscheiden:

1. der Ersatz bestehender Druckminderungsventile durch Turbinen
2. die Einrichtung neuer Tiefzonen, um Drucküberschüsse zur Energierückgewinnung zu nutzen

Ersatz von Druckminderungsventilen (DMV) durch Turbinen

Der erste Ansatz ist der einfache Ersatz von DMV durch Turbinen ohne die Druckzonengestaltung zu ändern. Um das Potenzial für die Energierückgewinnung am Standort eines DMV abzuschätzen, sind aus einer einfachen Netzberechnung die Rechenergebnisse der DMV abzulesen. Sie beinhalten den Volumenstrom (entspricht der Fallmenge), den Vor- und den Nachdruck (Druckdifferenz zwischen Vor- und Nachdruck entspricht der Fallhöhe).

Sowohl der Volumenstrom, als auch die Druckdifferenz unterscheiden sich für jeden Zeitpunkt bzw. jeden Bedarfsfall. Während der Volumenstrom im Tages- und Jahresverlauf relativ stark schwankt, ist die Druckdifferenz zwischen Vor- und Nachdruck vergleichsweise konstant, da die Reibungsdruckverluste nur bei ausgelasteten Leitungen merklich mit dem Bedarfsfall schwanken. Um nicht 8760 Netzberechnungen durchführen zu müssen, ist es normalerweise

ausreichend, charakteristische Bedarfsfälle (Spitzenbedarf, Normalbedarf, Durchschnittsbedarf und Nachtbedarf) zu berechnen und entsprechend der Häufigkeit auf eine Jahresenergiemenge hochzurechnen. Bei Vernachlässigung der Schwankungen der Reibungsdruckverluste kann auch anhand eines einzigen mittleren Bedarfsfalls über die Jahreswassermenge der Druckzone, welche aus der Verbrauchsabrechnung vorliegt, das jährliche energetische Rückgewinnungspotenzial errechnet werden.

Die Erschließung des energetischen Rückgewinnungspotenzials durch die Installation von Turbinen bzw. rückwärtslaufenden Pumpen ist in der Regel nur an Standorten mit hohem Durchfluss und großer Fallhöhe wirtschaftlich. Darüber hinaus müssen die Kosten für die Anbindung an das öffentliche Stromnetz (Entfernung zur nächsten Stromleitung) berücksichtigt werden, welche im ländlichen Bereich bei Leitungen, die nicht durch bebautes Gebiet verlaufen, erheblich sein können.

Einrichtung von Tiefzonen

Der zweite Ansatz zur Nutzung des Potenzials für die Energierückgewinnung besteht in der Einrichtung zusätzlicher Tiefzonen durch Auftrennung bestehender Druckzonen. Dieser Ansatz ist mit der Einrichtung von Hochzonen zu vergleichen, allerdings in umgekehrter Richtung und mit einigen Vereinfachungen.

Der Algorithmus zur Bestimmung von Tiefzonen ist daher weitgehend identisch mit dem Algorithmus zur Ermittlung von Hochzonen. Ausgehend von dem Abnehmer mit dem höchsten Drucküberschuss (= negativer Solldruckbedarf im Vergleich zu Einspeisung) werden sukzessive weitere Tiefpunkte angebunden, wobei dies nur so lange möglich ist, wie Abnehmer mit positivem Drucküberschuss direkt verbunden sind. Sobald mindestens ein Abnehmer keinen Drucküberschuss aufweist, bricht der Algorithmus ab, da in diesem Fall keine Druckabsenkung bzw. Energierückgewinnung möglich ist. Das Optimum wird ex-Post bestimmt, indem zu jeder Iteration das Produkt aus möglicher Fallhöhe, welches dem geringsten Drucküberschuss in der Tiefzone entspricht, und der Fallmenge (= Summe des Verbrauchs aller Abnehmer in der Tiefzone) berechnet wird. Wenn es nicht mehr möglich ist weitere Abnehmer in eine Tiefzone anzubinden, wird das Maximum aus allen Iterationen gewählt und diese Variante gespeichert.

Ein wichtiger Aspekt für die praktische Umsetzbarkeit liegt in der Minimierung der Anzahl von Netztrennstellungen (geschlossene Absperrarmaturen), um Stagnation zu vermeiden und den Realisierungsaufwand gering zu halten. So sollte sich die Anzahl der Trennstellen auf eine Netztrennung für die neue Turbine und ein bis zwei weitere Trennstellen für Ventile, die nur der Störfallsicherheit zur Versorgung der Tiefzone dienen, beschränkt werden.

II.5.1.5 Zeitliche Optimierung der Fahrweise von Pumpen und Behälter

Generisches Modell

Nachdem in den letzten beiden Kapiteln der Energiebedarf durch aufwändige strukturelle Änderungen gesenkt werden sollte, widmet sich dieses Kapitel kurzfristigen Änderungen im Netzbetrieb zur Nutzung der zeitvariablen Bestandteile der Energiekosten.

Die Zeitreihen des Strompreises wurden durch den Partner IAEW zur Verfügung gestellt. Eine zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs wird vom Strommarkt durch diese zeitvariablen Preise empfohlen, da sie auch für die Integration zeitvariabler erneuerbarer Einspeisungen (z.B. Wind- und Sonnenenergie) in die Stromnetze sinnvoll und nützlich ist.

Die Optimierungsaufgabe wird mit den Entscheidungsvariablen „zeitlicher Fahrplan (Durchfluss) des Pumpbetriebs“ und der Zielfunktion „Minimierung der Gesamtkosten“ unter Einhaltungen versorgungstechnischen Randbedingungen formuliert.

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung sowie der komplexen hydraulischen Berechnung vermaschter Netze wird die mathematische Optimierung der Fahrweise auf ein Ersatzmodell reduziert, welches aus der Einspeisung (Reinwasserbehälter), der Netzkennlinie (Druckverlust als Funktion der transportierten Wassermenge) als ein Strang sowie dem Netzgegenbehälter besteht.

Im Basismodell bestehen die Gesamtkosten nur aus der Summe der Pumpenergiekosten über einen Optimierungszeitraum. In einer Modellerweiterung können Investitionskosten für Rohre und Speicher mitberücksichtigt werden. Das Optimierungsmodell geht aus der Abbildung 59 eines Behälterpaares mit einem Pumpwerk und einem Strang hervor.

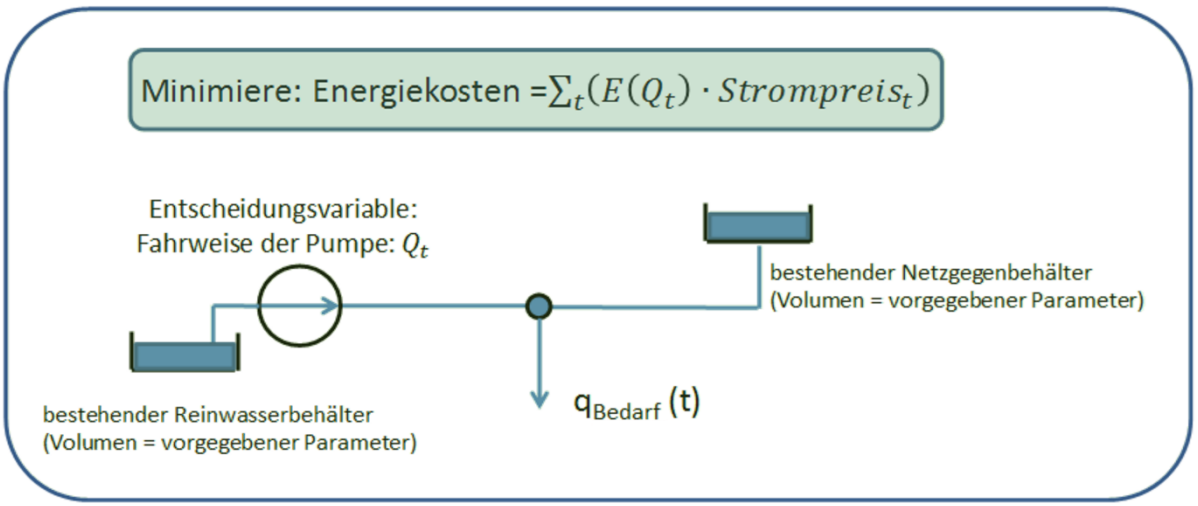


Abbildung 59: Basismodell eines Behälterpaares Reinwasser ⇔ Trinkwasser

In Abbildung 59 ist die einfachste Ausprägung einer Fahrweise-Optimierung mit einem einzigen Strang, einem Pumpwerk, einem Abnahmeknoten und zwei Speichern dargestellt. In Transportnetzen (wie dem Netz des AV) ist diese Konfiguration in dieser Form direkt zu finden. In Verteilnetzen ist diese Konfiguration erst nach Abstrahierung der Vermaschung (Netzreduktion) zu erkennen. In diesem Fall sind die Ergebnisse der Fahrweise-Optimierung nur näherungsweise auf das Realnetz zu übertragen, da die Reibungsdruckverluste nur vereinfacht berücksichtigt wurden.

Zusammensetzung des Strompreises

Für die Lösung der Optimierungsaufgabe muss der Strompreis in unterschiedliche Komponenten aufgeteilt werden, da nur ein Teil des Strompreises zeitabhängig ist.

Generell wird nachfolgend angenommen, dass die Beschaffung der Energie vollständig am Spotmarkt (Day-Ahead) erfolgt. Diese Annahme ist in der Praxis in der Regel nicht korrekt, da kleine WVU häufig einen Vollversorgungsvertrag abschließen, d.h. der Strompreis ist wie bei Endverbrauchern unabhängig vom Zeitpunkt des Bezugs. Bei großen WVU mit entsprechend hohem Strombedarf erfolgt häufig ein strukturierter Strombezug, d.h. eine Mischung aus zeitunabhängigen Baseload-Komponenten und einem variablen Teil, der über den Spotmarkt gedeckt wird. Die Annahme des vollständigen Spotmarktbezugs soll jedoch den maximal möglichen Nutzen aus einer Anpassung der Fahrweise an den zeitlichen Verlauf der Strompreise aufzeigen und kann daher (für die hinterlegten Spotmarktpreisekurven) als Obergrenze für die Energiekosteneinsparung durch die Dynamisierung des Pumpbetriebs gesehen werden.

Aus welchen Komponenten sich der Strompreis zusammensetzt, kann Kapitel II.2.2.4 entnommen werden. Die Energiekosten sind als Day-Ahead Spotmarktbezug zeitvariabel, sämtliche Steuern und Abgaben nicht. Die Netznutzungsentgelte sind teilweise zeitabhängig: sofern die Voraussetzungen einer atypischen Netznutzung vorliegen, kann der Leistungspreis durch eine zeitliche Verschiebung erheblich reduziert oder vollständig vermieden werden. Aus Abbildung 60 geht hervor, dass maximal lediglich 30 % der gesamten Stromkosten durch eine Anpassung der Fahrweise beeinflusst werden können.

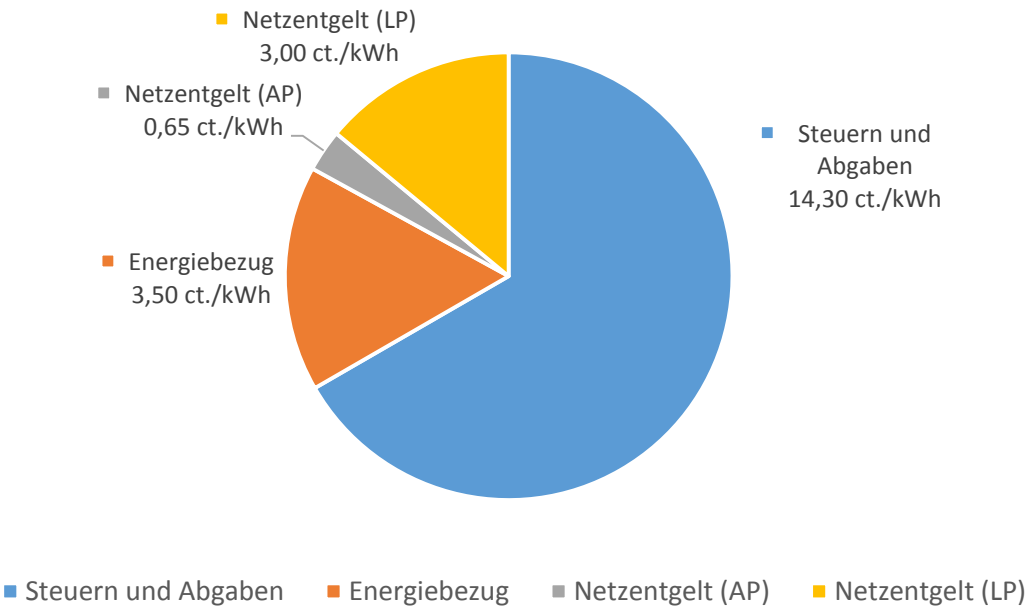


Abbildung 60: Zusammensetzung des Strompreises (nur ca.-Angaben, genaue Werte abhängig von Zeitpunkt, Standort, etc.)

Atypische Netznutzung

Nach § 19 (2) StromNEV kann ein individuelles Netzentgelt vereinbart werden, wenn die Höchstlast eines Verbrauchers nachweislich erheblich von der zeitgleichen Höchstlast des Stromnetzes abweicht.

Die „zeitgleiche Höchstlast“ des Netzes wird von dem Stromnetzbetreiber durch sogenannte Hochlastzeitfenster beschrieben, welche quartalsweise (in der Regel nur für Q4 und Q1) Stundenfenster vorgeben (z. B.: 17^{00}-19^{00} h) in den das Stromnetz hoch belastet ist.

Sofern individuelle Netzentgelte für die atypische Netznutzung vereinbart werden, ist die Leistungspreiskomponente lediglich auf die während der Hochlastzeitfenster aufgetretene Höchstlast des Verbrauchers zu entrichten. Abbildung 61 stellt diesen Effekt schematisch dar. Ohne individuelle Netzentgelte müsste der Verbraucher den Leistungspreis für seine Gesamthöchstlast („P_{max}“) entrichten. Durch die Vereinbarung individueller Netzentgelte lediglich auf die während der Hochlastzeitfenster aufgetretene Spitzenlast („$P_{Hochlast}$“). Durch die atypische Netznutzung können maximal 80 % der gesamten Netzentgelte einspart werden. Diese Grenze ergibt sich durch das Verhältnis von Arbeits- und Leistungspreiskomponente und würde erreicht werden, wenn die Spitzenlast während der Hochlastzeitfenster den Wert 0 annimmt.

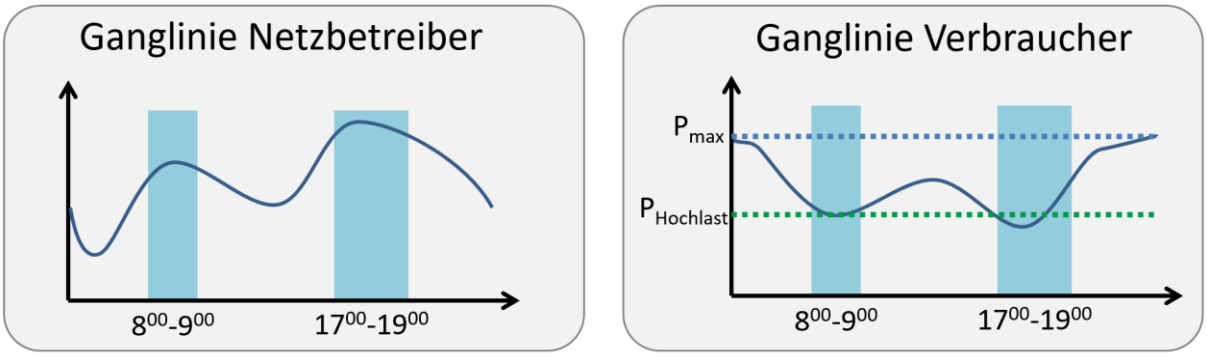


Abbildung 61: Schematische Darstellung der atypischen Netznutzung

Beschreibung des Modells

Das mathematische Optimierungsmodell wird durch Parameter und Optimierungsvariablen beschrieben.

Die zeitunabhängigen Parameter dieses Modells sind:

- Höhenunterschied zwischen den beiden Speichern
- Speicherdimensionen (Höhe, Querschnitt), wenn sie Vorgabe sind
- Rohrwiderstand (aus Länge und Nennweite)
- zulässige Durchflussbereiche
- Wirkungsgrad-Kennlinie der Reinwasserförderung (RWF)
- Zeitkonstante Bestandteile des Strompreises (s. u.)

Außerdem sind Zeitreihen der Eingangsparameter für die Simulation und Optimierung des Modells erforderlich:

- Wasserabgabe aller Abnehmer (in diesem Modell punktuell dargestellt), mit ihrem zeitlichen Verlauf
- Durchflussverlauf des Zuflusses auf dem vorgelagerten Teilsystem
- Verlauf des Stromeinkaufpreises

Im Modell werden die Stromkosten aus 4 Komponenten berücksichtigt

- Einkauf mit zeitlichen Verlauf (z.B. an EEX angelehnt) (EUR / MWh)
- staatliche Mehrbelastungen (EUR / MWh)
- Die Netzentgelte für die Arbeit (EUR / MWh) und für die Leistung (EUR / kW_{max})

Das Optimierungsmodell kann nach der Entscheidungsvariable „Zeitlicher Verlauf des Durchflusses der Reinwasserförderung (RWF)“ aufgelöst werden.

Art des Problems und Lösungsverfahrens

Generell werden die Verfahren der mathematischen Optimierung herangezogen. Je nach abzubildendem physikalischem Modell lässt sich die Problemklasse der Optimierung unterteilen.

- Bei Pumpwerken mit Ein- / Ausschalten von Pumpaggregaten kommen diskrete „Ja / Nein“ - Entscheidungen hinzu, welche nur mit binären Variablen beschrieben werden können. Um Drucküberschüsse im Teillastbetrieb zu verhindern, ist aus energetischer Sicht die Benutzung von Frequenzumrichtern meistens sinnvoll. Unter der Annahme, dass in Zukunft FU vorhanden sein werden, folgt, dass diese binären Variablen entfallen können.
- Aus der Definition der Pumpenergie als Produkt von Fördermenge und Förderhöhe und aus der Druckverlustgleichung der Leitungen geht hervor, dass das physikalisches Modell Nicht-Linearitäten besitzt. Somit handelt es sich um eine nicht lineare Optimierung, welche durch Anwendung der stückweisen Linearisierung auch als gemischt ganzzahlige lineare Optimierung formuliert werden kann.

Linearisierungen verursachen binäre Entscheidungsvariablen, so dass die Rechenzeiten im worst-case exponentiell wachsen. Entscheidend für die Rechenbarkeit dieser Modelle ist also ihre Anzahl an Linearisierungen.

Pro Zeitschritt werden an Linearisierungen eine pro Strang und „einige“ pro RWF benötigt. „Einige“ liegt dabei zwischen 2 und 5, da jedes Produkt zwei Linearisierungen benötigt. Mit dieser vollständigen Menge an Gleichungen lassen sich die Netzmodelle exakt nachbilden, sofern bei den Linearisierungen ausreichende Stützpunkte eingefügt werden. Dabei wird auch der Rückkopplungseffekt des Füllstandes der Behälter auf die Druckhöhe berücksichtigt. Solche Modelle sind bei über 6 Zeitschritten unter Einbeziehung der Stand der Technik der Optimierungen leider wegen den Linearisierungen des Produkts Q H nicht in vernünftiger Rechenzeit (wenige Stunden) lösbar.

Demgegenüber wurde eine Formulierung entwickelt, welche die Anzahl an Linearisierung pro Zeitschritt auf 1 reduziert, sodass problemlos über 8760 Zeitschritte berechnet werden können. In dieser Formulierung sind jedoch weitere Vereinfachungen bzw. Annahmen des physikalischen Modells enthalten:

- die Rückkopplung des Speicherfüllstands auf das Druckniveau wird vernachlässigt.
- Netzmaschen werden nicht abgebildet
- die zeitabhängige Abnahmemenge ist an einem einzigen Knoten

Diese Formulierung beinhaltet eine einzige, jedoch stark nicht lineare Gleichung (Quotient eines Polynoms dritter Ordnung in Q durch eine konkave Funktion von Q), um die Pumpenergie direkt aus der Fördermenge zu ermitteln. Die Pumpenergie beträgt:

$$E(Q) = \rho \cdot g \cdot \frac{Q \cdot H(Q)}{\eta(Q)}$$

Mit der Förderhöhe $H(Q) = H_{geo,HB} - H_{geo,RWB} + R \cdot Q^2$

Mit dem Wirkungsgrad der Pumpe $\eta(Q)$, der als quadratische Funktion dargestellt werden kann.

Folgende Effekte werden abgebildet:

- Überproportionaler Energieverbrauch bei hohem Durchfluss wegen der Rohrreibung R
- Überproportionaler Energieverbrauch bei zu niedrigen oder hohen Durchflüsse wegen den Wirkungsgradeinbußen der Pumpen

Der typische Verlauf des elektrischen Leistungsbedarfs in Abhängigkeit von dem Durchfluss geht aus den nachfolgenden Abbildungen hervor. Je nach Druckzonen (Geodätische Höhendifferenz, Netzkennlinie bzw. Reibungswert) ergeben sich unterschiedliche Profile für E(Q). Bei großem Höhenunterschied, großen Nennweiten (geringe Reibung) und flachen Wirkungsgrad-Kennfeldern der Pumpen ist eine lineare Abbildung von E(Q) ohne großen Linearisierungsfehler möglich. Abbildung 62 zeigt ein solches Transportnetz mit geringen Reibungsdruckverlusten und relativ guter linearer Näherung des Energiebedarfs.

Bei hohen Reibungsdruckverlusten (steile Netzkennlinie) oder steilen Wirkungsgrad-Kennfeldern der Pumpen wird empfohlen, mindestens 4 oder 5 Stützpunkte für eine stückweise Linearisierung zu benutzen, da sonst der Linearisierungsfehler zu groß wird. Ein gering dimensioniertes Verteilnetz mit sehr steiler Netzkennlinie und entsprechend hohem Linearisierungsfehler (insbesondere bei hohen Durchflüssen) ist in Abbildung 63 dargestellt.

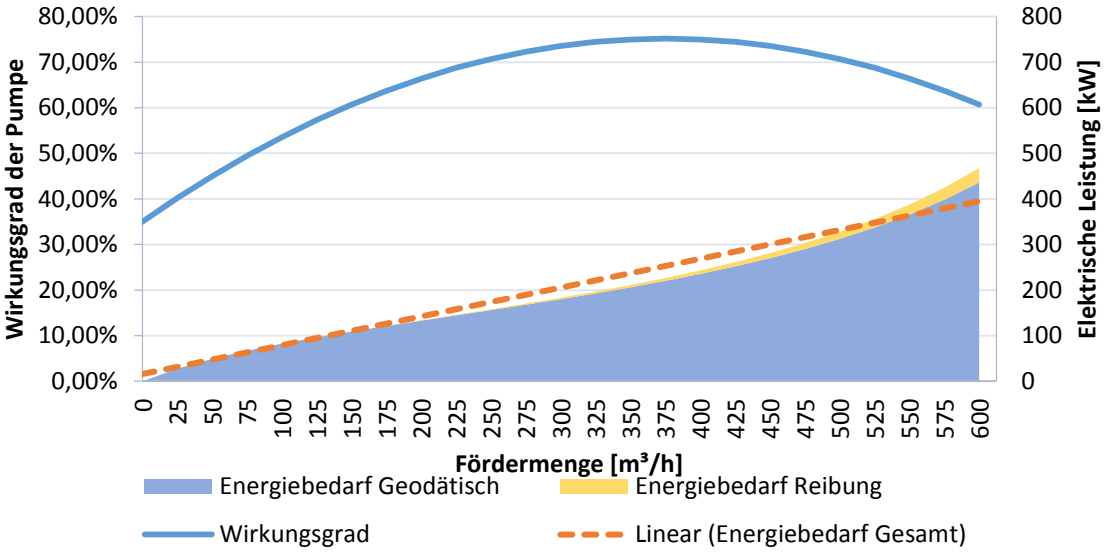


Abbildung 62: Elektrische Pumpenleistung mit linearer Näherung in Abhängigkeit der Netzkennlinie und des Pumpenwirkungsgrades bei flacher Netzkennlinie (Transportnetz)

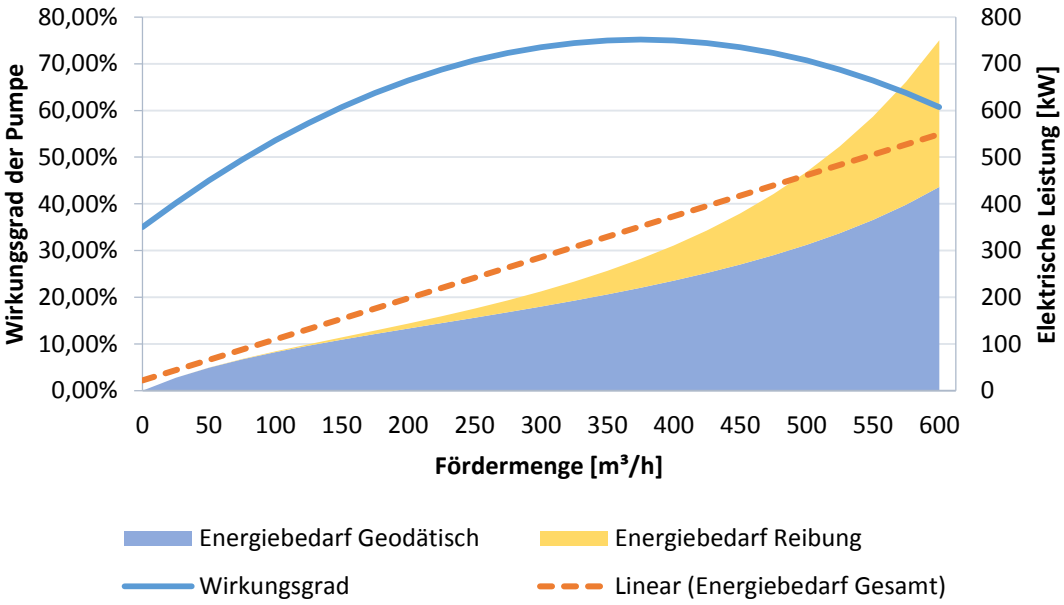


Abbildung 63: Elektrische Pumpenleistung mit linearer Näherung in Abhängigkeit der Netzkennlinie und des Pumpenwirkungsgrades bei steiler Netzkennlinie (Verteilnetz)

II.5.1.6 Zusammenfassung

Für drei unterschiedliche Optimierungsansätze zur Reduzierung des Energiebedarfs und der Energiekosten der Wasserverteilung wurden erfolgreich passende Optimierungsverfahren entwickelt und prototypisch als Softwaremodule implementiert.

Im nachfolgenden Kapitel wird die Anwendung der Optimierungsverfahren an realen Netzen untersucht. Aufgrund der Größe und Komplexität der Netzsysteme mussten teilweise Vereinfachungen getroffen werden oder es konnten nur Teilsysteme untersucht werden, weshalb im Folgenden der Begriff „realitätsnahe Modellnetze“ verwendet wird.

II.5.2 Identifikation von Optimierungspotenzialen an realitätsnahen Netzmodellen der Praxispartner

II.5.2.1 Einführung

Die Anwendung der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Optimierungsverfahren erfolgte anhand der Wasserverteilsysteme der drei Praxis-Projektpartner RWW, ENWOR und Aggerverband. Die drei untersuchten Netze decken eine Vielzahl der in Deutschland anzutreffenden Verteilstrukturen dar:

1. Das Netz von RWW beinhaltet sowohl Strukturen eines regionalen Transportnetzes mit groß dimensionierten gering vermaschten Transportleitungen, als auch klein- und großstädtische Verteilnetzstrukturen, welche durch eine hohe Vermaschung sowie klein- bis mittel-dimensionierte Leitungen gekennzeichnet sind.
2. Das Netz von ENWOR ist ein typisches regionales Verteilnetz mit ländlicher und kleinstädtischer Struktur. Aufgrund der Topographie eines Mittelgebirges (Eifel) steht das Netz exemplarisch für Wasserverteilsysteme in Gebieten mit großen geodätischen Höhendifferenzen.
3. Das Netz des Aggerverbands weist hingegen die Merkmale eines reinen Wassertransportnetzes auf, welches das Wasser von einem Talsperrensystem und den Wasseraufbereitungsanlagen zu Weiterverteilern (kommunalen Wasserversorgern) in der Region transportiert. Das Netz ist ebenfalls durch größere geodätische Höheunterschiede sowie eine geringe Vermaschung gekennzeichnet.

Die drei Praxispartner haben für die Anwendung der Optimierungsverfahren ihre Netzdaten zur Verfügung gestellt, um die im Rahmen des Projekts identifizierten Einsparpotenziale konkret auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu testen.

Bereits durch ihre Strukturmerkmale sind die drei Wasserrohrnetze sehr unterschiedlich, worauf im Kapitel II.5.2.2 näher eingegangen wird.

Anhand der Klassifizierungen der Druckzonen nach Druckzonentyp wurden dann die Druckzonen identifiziert, die für die Detailauswertung der Potenziale in Frage kommen (Kapitel II.5.2.3).

Aufgrund der Größe der Netzmodelle und der hohen Komplexität der Optimierungsaufgabe wurden teilweise Reduktionsverfahren angewendet oder vereinfachte Näherungen der Netze durch Kennlinien genutzt.

II.5.2.2 Beschreibung der untersuchten Netze

RWW

Das Rechennetzmodell der RWW ist Abbildung 64 dargestellt und kann durch folgende Kennwerte beschrieben werden:

Tabelle 20: Kennwerte des Wasserrohrnetzes RWW

Eigenschaft	Wert
Netzlänge	2.831 km
Netzvolumen	130.700 m³
Druckzonen (einschl. Industriezonen)	16
Rechenstränge	29.308

Zur Einordnung und zum Vergleich der Wasserverteilungssysteme können die Strukturmerkmale laut DVGW-Arbeitsblatt 1100-3 herangezogen werden. Die für eine Betrachtung des Energiebedarfs relevanten Strukturmerkmale wurden in Anhang IV.2, Tabelle 47 zusammengefasst (z. B. maximale Höhendifferenz, Anzahl Druckzonen). Eine Klassifizierung der Druckzonen ist in Tabelle 48 enthalten.

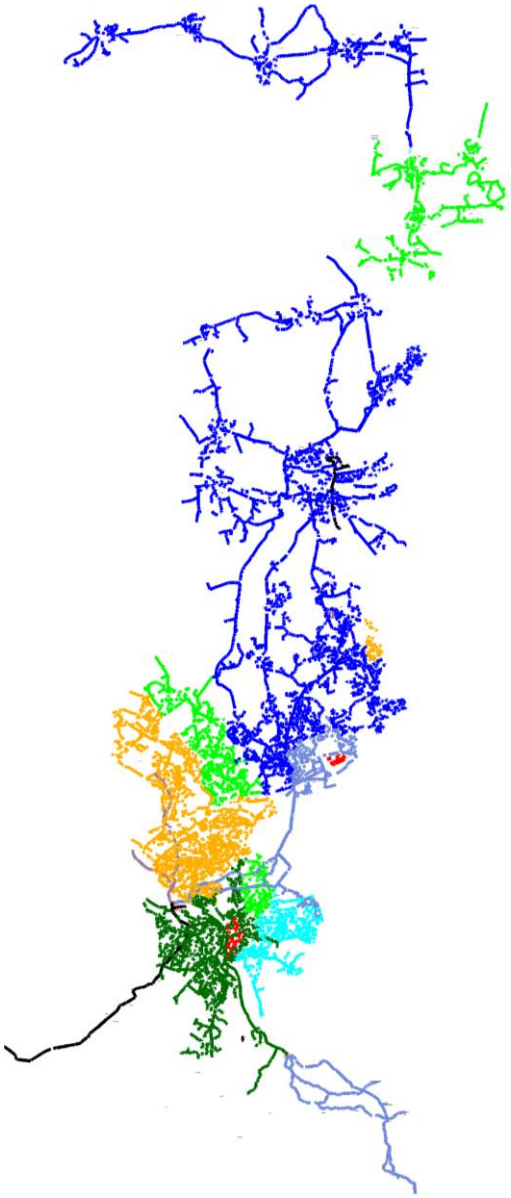


Abbildung 64: Netzsystem RWW mit Einfärbung nach Druckzonen

ENWOR

Das Rechennetzmodell der enwor wurde in Abbildung 65 dargestellt und kann durch folgende Kennwerte beschrieben werden:

Tabelle 21: Kennwerte des Wasserrohrnetzes ENWOR

Eigenschaft	Wert
Netzlänge	1.241km
Netzvolumen	66.617 m³
Druckzonen	23
Rechenstränge	22.922

Für die Betrachtung des Energiebedarfs relevante Strukturmerkmale können Anhang IV.2, Tabelle 49 entnommen werden.

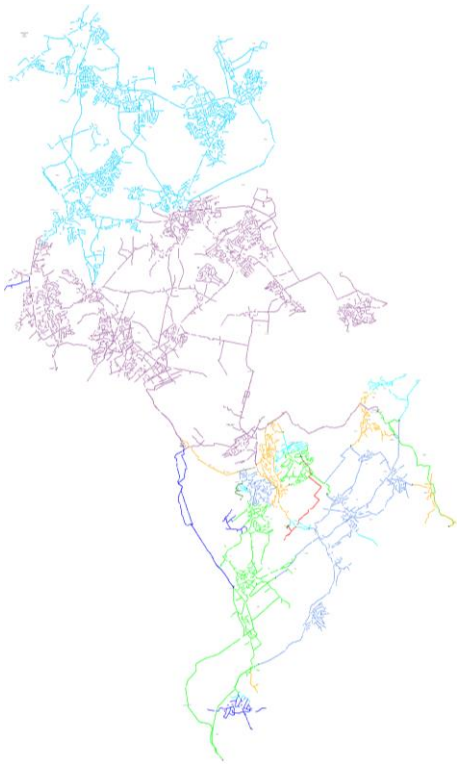


Abbildung 65: Netzsystem ENWOR mit Einfärbung nach Druckzonen

Im Vergleich zu den Kennwerten des RWW fällt die höhere Anzahl an Druckzonen (bei geringerer Netzlänge) auf, welche auf die ausgeprägtere Topographie (maximale Höhendifferenz 348 m statt 116 m) zurückgeführt werden kann. Ein weiterer deutlicher Unterschied ergibt sich in der Abnehmerstruktur, die bei RWW zu etwa 50 % durch Großkunden (hauptsächliche große Industriekunden und Chemie-Fabriken im Ruhrgebiet) geprägt ist, bei ENWOR hingegen vorwiegend durch Tarifkunden (89 %). Das landwirtschaftlich und teilweise ländliche Versorgungsgebiet von ENWOR weist erwartungsgemäß eine höhere Pro-Kopf-Wasserabgabe auf sowie einen erheblich geringeren Metermengenwert. Überraschenderweise ist die Hausanschlussdichte im Versorgungsgebiet von ENWOR deutlich höher, als im städtischen Gebiet von RWW. Dies liegt in einer Besonderheit des RWW-Netzes begründet, das teilweise lange Transportleitungen aufweist, um Netzbereiche miteinander zu verbinden, jedoch nicht sämtliche anliegenden Gemeinden bzw. Städte versorgt. Daher umfasst das flächenmäßige Versorgungsgebiet auch Netzbereiche, die keine eigenen Abnehmer aufweisen.

Die Klassifizierung der Druckzonen entspricht lediglich einer isolierten Druckzonenbetrachtung, welche in dem Gesamtverbundsystem ENWOR, mit einer Vielzahl kaskadierender

Druckzonen und Behälter nur eingeschränkte Aussagekraft hat (siehe Anhang IV.2, Tabelle 50). So speisen einige Behälter im freien Gefälle nachgelagerte Zonen. Prinzipiell könnte in diesen Zonen, welche dem Fall 3 („Von oben gespeist“) zuzuordnen sind, eine Energierückgewinnung installiert werden. Allerdings werden die nachgelagerten Zonen teilweise durch Druckerhöhungsanlagen versorgt, weshalb eine Verringerung des Vordrucks hier zu keinem energetischen Gesamtvorteil führen würde. Das Potenzial für Energierückgewinnungsanlagen wird daher für die Einzelanlagen betrachtet und nicht für sämtliche Druckzonen mit Fall 3. Darüber hinaus sind einige Druckzonen über Zwischenbehälter verbunden, die nur zu einem geringen Teil für Lastverschiebungen genutzt werden könnten.

Aggerverband

Tabelle 22: Kennwerte des Wasserrohrnetzes des Aggerverbands

Eigenschaft	Wert
Netzlänge	221 km
Netzvolumen	44.922 m³
Druckzonen	11
Rechenstränge	838

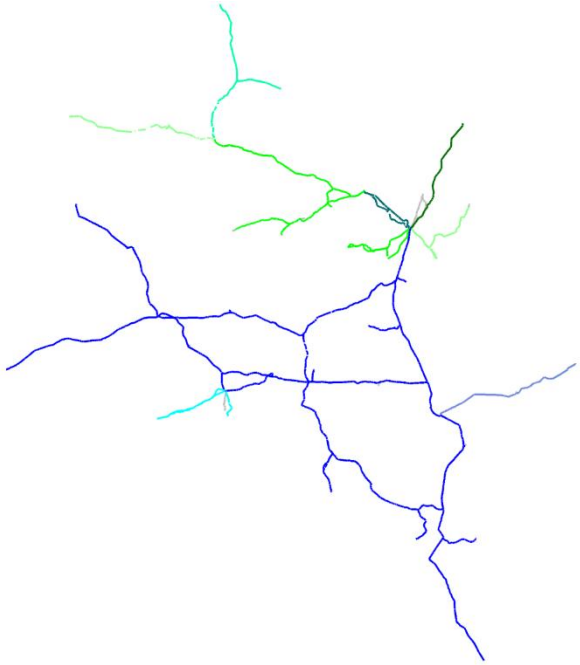


Abbildung 66: Netzsystem Aggerverband

Das Netz des Aggerverbands ist als reines Transportnetz, welches ausschließlich Weiterverteiler versorgt, nicht mit Wasserverteilnetzen vergleichbar (z. B. keine Hausanschlüsse, etc.) und wird daher nicht in den Vergleich der Strukturmerkmale einbezogen.

Das Netz des Aggerverbands eignet sich aufgrund der Versorgungsstruktur mit Transportleitungen zwischen der Wasseraufbereitung und den Behältern vorwiegend für eine Optimierung der Fahrweise (Fall 2). Eine klassische Druckzonenoptimierung ist in diesem Verteilsystem nicht möglich und zusätzliche Energierückgewinnungsmöglichkeiten liegen – je nach notwendigem – Druckniveau im Wesentlichen bei den nachgelagerten Weiterverteilern. Daher wird hier hauptsächlich diese Optimierung betrachtet.

II.5.2.3 Übersicht der durchgeführten Anwendungen

Für die Klassifizierung der durchgeführten Anwendungen wird zuerst auf die unterschiedlichen Typen von Druckzonen (siehe Kapitel II.5.1.2) verwiesen:

- Bei Druckzonen ohne Netzgegenbehälter sind Maßnahmen zur Gestaltung der Druckzonen vorzuziehen (Bildung von Hochzonen bzw. Tiefzonen, wenn das Netz von unten bzw. von oben gespeist wird). Diese Maßnahmen sind in der Spalten 1 und 2 der folgenden Tabelle dargestellt.
- Bei Druckzonen mit Netzgegenbehälter ermöglicht der Speicher die zeitliche Verschiebung des Energieverbrauchs. Diese Rechenfälle werden in der dritten Spalte unter der Bezeichnung „Fahrweise Optimierung“ aufgeführt.

In der folgenden Tabelle 23 ist dargestellt, welche Optimierungsmethoden an welchen Netzmodellen der drei Wasserversorgungsunternehmen (WVU) angewendet wurden:

Tabelle 23: Übersicht der durchgeführten Optimierungsansätze in den drei Netzmodellen

Netz	Bildung von neuen Hochzonen (Fall 1)	Bildung von Tiefzonen zur Energierückgewinnung (Fall 3)	Fahrweise Optimierung zur Minimierung der Energiekosten (Fall 2)
RWW	Reken Velen Holsterhausen ohne reale Geschosshöhenangaben → pauschal 3,0 bar	Reken (neue Tiefzone)	Nicht durchgeführt, da das derzeitige Rechenverfahren nicht für große Netzinstanzen geeignet ist. Vergleichsweise geringes Behältervolumen im Netz
ENWOR	Zone „von Werner Str." in Stolberg mit realen Geschosshöhen	Umrüstung DMV → Turbine	Strahlenstruktur von 3 Einspeisungen (2 PW, 1 Turbine) Richtung HB
Aggerverband	wird nicht untersucht (Ansatz nur im vermaschten Bereich, nicht bei Netzen mit überwiegender Transportfunktion geeignet).		1 Strang Modell zur Abbildung der Konfiguration von 2 Behältern

Auf die Einzelheiten wird in den folgenden Kapiteln II.5.2.4 bis II.5.2.6 eingegangen. Kapitel II.5.2.7 fasst dann die Ergebnisse je WVU und je Methode zusammen.

II.5.2.4 Energieeinsparpotenzial durch Bildung zusätzlicher Hochzonen

Allgemeines

Bei der Druckzonengestaltung wurden die Verteilnetze RWW und ENWOR mit folgender räumlicher Abgrenzung berücksichtigt.

- Im RWW Netz wurden zwei kleine Druckzonen „Reken" und „Velen" und eine große Druckzone „Holsterhausen" getestet.
- Im ENWOR Netz wurde die kleine Druckzone „Stolberg Pumpwerk von Werner Str." untersucht und es gab leider keine weitere mögliche Testzone (wegen „Typ" der Druckzone).

Bei der Berechnungsmethodik sind aufgrund unterschiedlicher Datengrundlage folgende Unterschiede anzumerken:

- Bei RWW (siehe unten) wurde der vereinfachte Ansatz mit pauschaler Vorgabe des Mindestdrucks für jedes Gebäude von 3,0 bar angewandt. In diesem Netzgebiet war es nicht möglich, die realen Daten der Gebäudehöhen zu erhalten.
- Bei ENWOR (siehe unten) wurde der exakte Ansatz mit Gebäudehöhendaten durchgeführt.

Außerdem konnte im ENWOR Netz auch ausgewertet werden, wie sich der pauschale und der exakte Ansatz unterscheiden: in diesem Netz ist das berechnete Einsparpotenzial auf Basis der realen Daten (aufgrund eines steileren Höhenprofils der Abnehmer als in den Pauschaldaten) höher.

Ergebnisse im RWW–Netz

Ergebnisse einer Hochzone innerhalb der Druckzone Reken

Die folgende Abbildung 67 stellt auf der Y-Achse die mindestens vorzuhaltende Druckhöhe an der Einspeisung (Reinwasserförderung Reken) dar, welche zur Erfüllung der Solldruckhöhe aller Abnehmer benötigt wird. Auf der X-Achse ist die kumulierte Wasserverbrauchsmenge (m³/h bei Spitzenbedarf) aller höchsten Abnehmer aufgetragen, die bei der entsprechenden Einspeisedruckhöhe an eine separate Hochzone angebunden werden müssten.

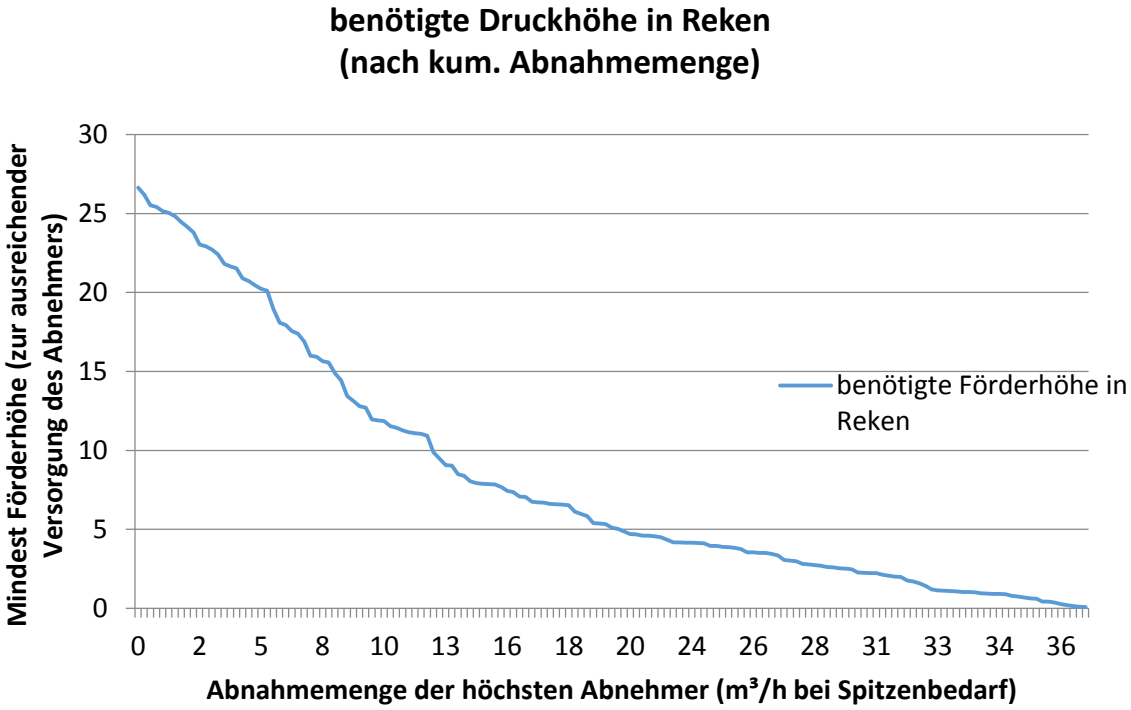


Abbildung 67: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Reken in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone.

Das Höhenprofil der Abbildung 67 der Abnehmer von Reken ist (aufgrund der fehlenden Angaben zu den Geschosshöhen) mit einem pauschalen Solldruck von 3,0 bar pro Abnehmer abgeleitet (entspricht drei Vollgeschossen nach W400-1 A) und verläuft somit parallel zum Höhenprofil des Bodens. Der gesamte Wasserverbrauch der Druckzone beträgt 205 m³/h. Aus Abbildung 67 kann jedoch entnommen werden, dass lediglich die höchst gelegenen Abnehmer (bis Q=36 m³/h) überhaupt einen (im Vergleich zu der Höhe der Netzeinspeisung) positiven Solldruck aufweisen (H>0). Alle weiteren Abnehmer (nicht in der Abbildung dargestellt) liegen

unterhalb der „0 m-Solldruckhöhe“. Dies ist der besonderen Topographie der Druckzone Reken geschuldet, welche weder vollständig „von oben“ noch „von unten“ erfolgt (sondern von einer mittleren Höhe bezogen auf die Abnehmer):

- Für 169 m³/h der 205 m³/h Wasserabgabe erfolgt die Einspeisung von oben: aus Sicht dieser Abnehmer reicht bereits die geodätische Höhe der Einspeisung (ohne Reinwasserpumpen) aus.
- Für 36 m³/h der 205 m³/h Wasserabgabe reicht die geodätische Höhe der Einspeisung nicht aus und das Pumpwerk wird benötigt.

Die räumliche Ausdehnung der Hochzonen geht aus der Abbildung 68 hervor. Dabei ist die Zugehörigkeit der Leitungen an die Hochzone in den Farbtönen grün (direkte Anbindung hoch gelegener Abnehmer) und Cyan (Anbindung sonstiger Bereiche, um den Zusammenhang der Druckzone zu gewährleisten) gekennzeichnet.

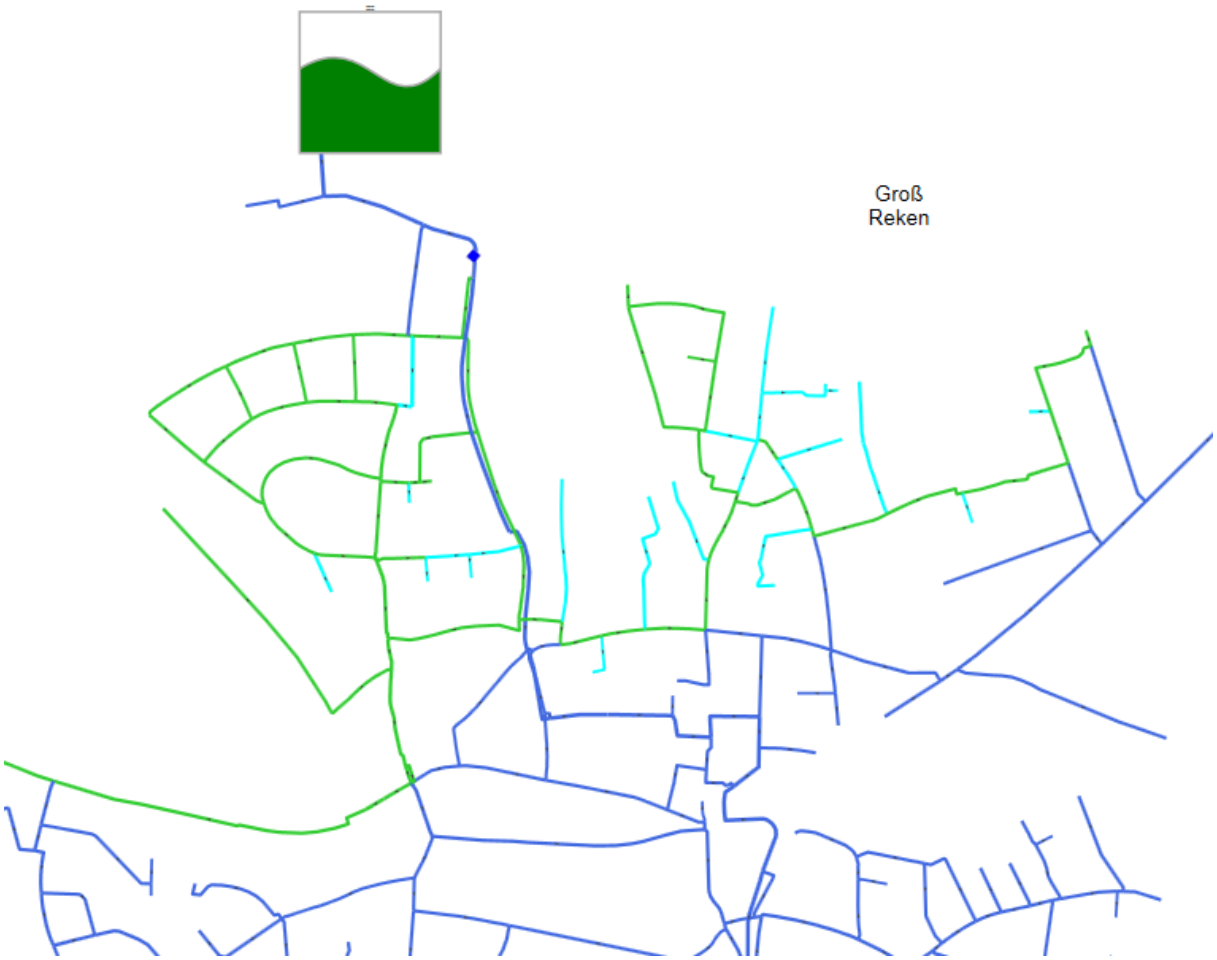


Abbildung 68: Rechnerisch ermittelte Ausdehnung der Hochzone in Reken

Wie im Kapitel zu den Optimierungsmethoden bereits erläutert wurde, werden die Abnehmer sukzessive angebunden, sofern dies topologisch zulässig ist. Das Verfahren wird dann abgebrochen. Die energetisch optimale Lösung der Abbildung 68 stellt einen Zustand vor der letztmöglichen Anbindung eines Abnehmers dar, weil die weiteren Anbindungen zu höheren dezentralen Fördermengen und damit einem steigenden Gesamtenergiebedarf geführt hätten. Dieser Effekt ist in Abbildung 69 dargestellt.

Der Abbruch bei der höchsten Energieeinsparung liegt bei Anbindung der 47 höchsten Abnehmer an die Hochzone, welche zusammen 12 m³/h bei Spitzenbedarf darstellen. Dabei wird eine Einspeisehöhe von nur 11 m WS (statt 31 m im Istzustand) benötigt. Hierdurch kann der Energiebedarf um 44 MWh/a bzw. 66 % verringert werden. Dieses sehr hohe Einsparpotenzial ist auf die beschriebene besondere Topographie der Druckzone zurückzuführen. Darüber hinaus wird auf das Kapitel II.5.2.5 verwiesen, welches die Einrichtung einer Tiefzone in Reken untersucht.

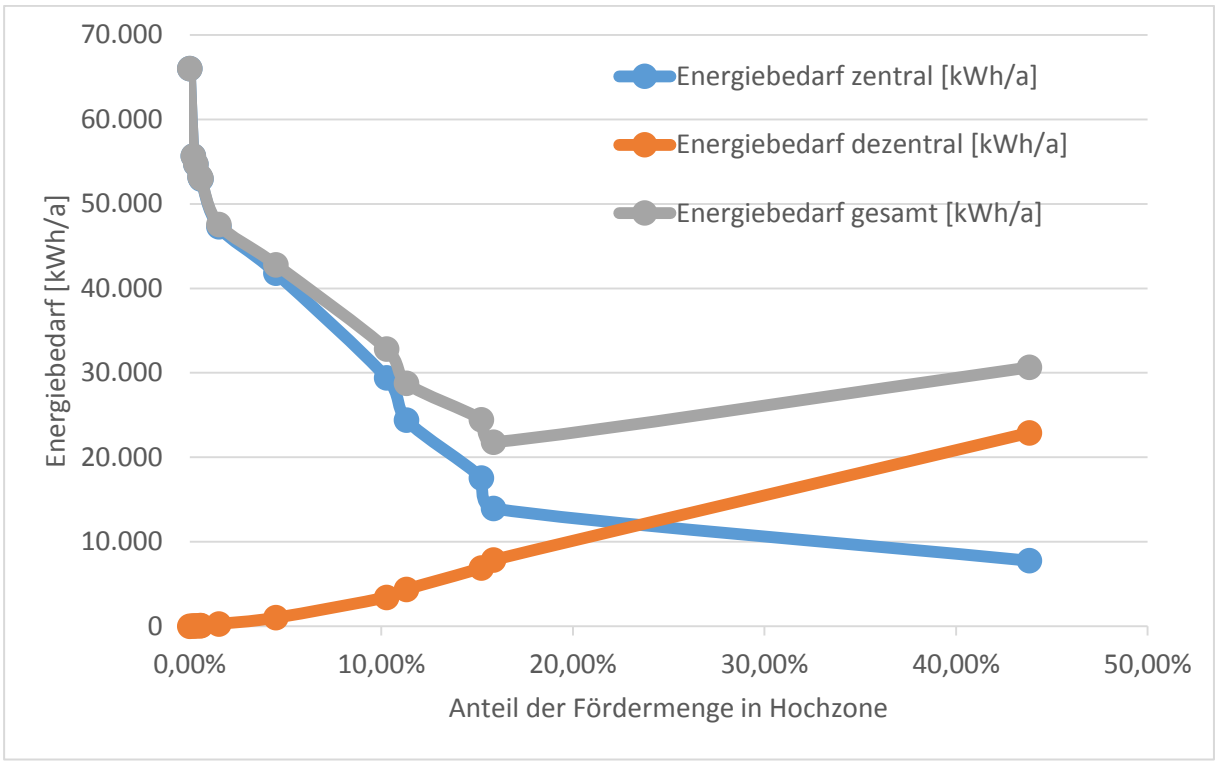


Abbildung 69: Energiebedarf zentral und dezentral in Abhängigkeit der Fördermenge, welche in die Hochzone verlagert wird

Ergebnisse der Hochzonenbildung innerhalb der Druckzone Velen

Das Höhenprofil der Abnehmer in Velen geht aus der Abbildung 70 hervor. Anzumerken ist hierbei, dass sich nicht alle hohen Abnehmer auf einem einzigen Höhenplateau befinden, son-

dern durch tiefer gelegene Bereiche voneinander getrennt sind. Diese geographische Konstellation ist ungünstig, da nicht alle Abnehmer in eine Hochzone verlagert werden können, sondern mehrere Hochzonen eingerichtet werden müssten. Hierdurch verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit einer solchen Druckzonenanpassung, da mehrere Druckerhöhungsanlagen eingerichtet werden müssen.

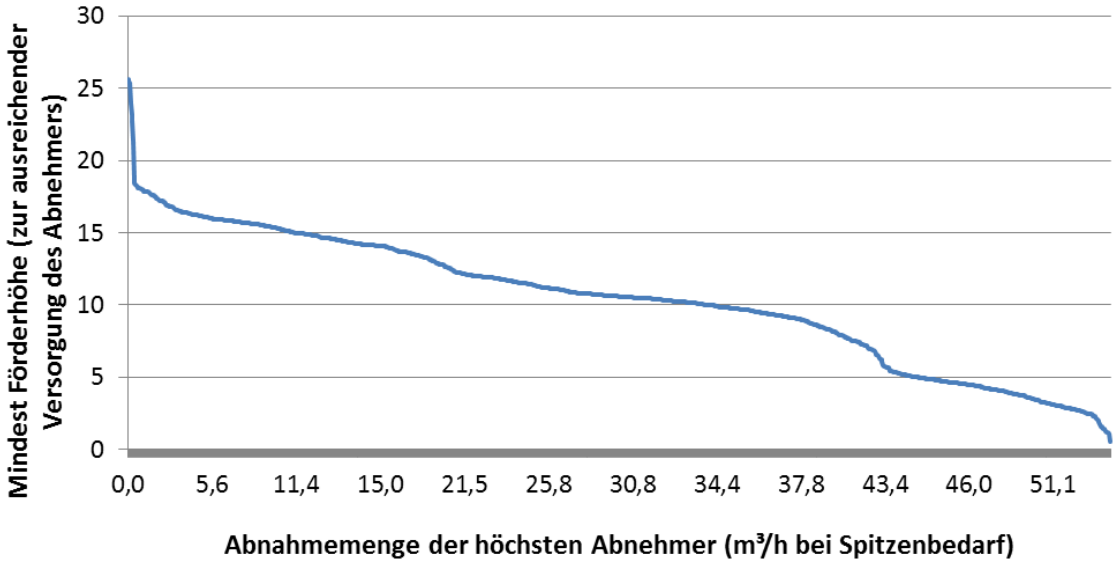


Abbildung 70: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Velen in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone.

Die räumliche Ausdehnung der Hochzonen geht aus der Abbildung 71 hervor. Der Abbruch bei der höchsten Energieeinsparung erfolgt bei Auslagerung der 37 höchsten Abnehmer in zwei Hochzonen, welche zusammen 1,02 m³/h des Spitzenbedarfs entsprechen. Dabei wird eine Einspeisehöhe von nur 17 mWS (statt 30 mWS im Istzustand) benötigt. Diese Druckabsenkung ermöglicht eine Reduktion des Energiebedarfs um 25 MWh/a, was einer relativen Einsparung von 30 % entspricht.

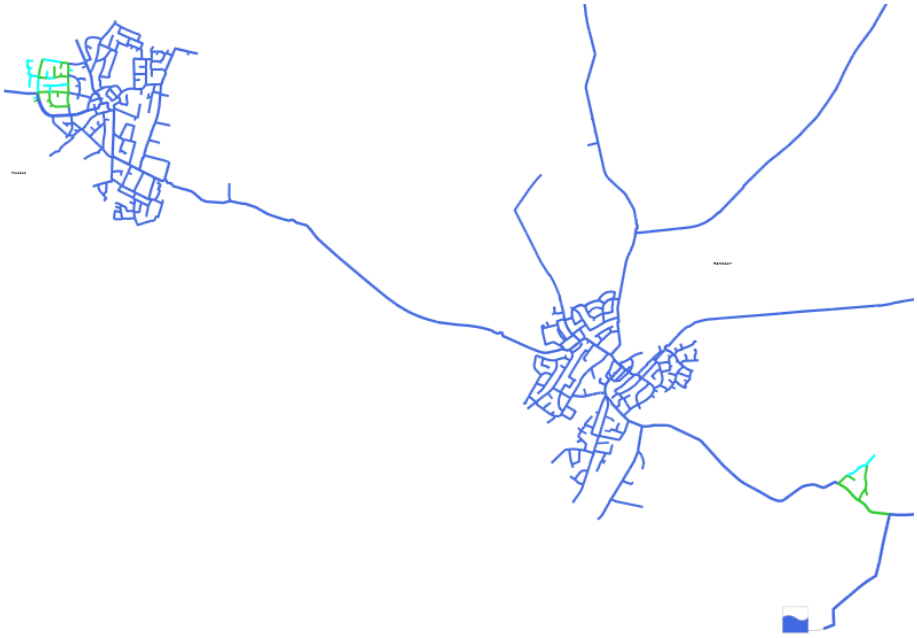


Abbildung 71: Räumliche Ausdehnung der beiden Hochzonen in Velen.

Ergebnisse der Hochzonenbildung innerhalb der Druckzone Holsterhausen

Die Druckzone Holsterhausen weist als Haupttransportzone (und teilweise Verteilzone) eine besondere Bedeutung in dem Versorgungssystem des RWW auf, was sich auch in den Kennwerten 1070 km Netzlänge (37 % der Gesamtlänge) und 43.600 m³ Leitungsvolumen (33 % des Gesamtvolumens) widerspiegelt. Aus energetischer Sicht ist die Zone von besonderem Interesse, da ein großer Teil des geförderten Wassers durch diese Zone transportiert wird, wodurch auch geringe relative Einsparpotenziale zu einer hohen absoluten Energieeinsparung führen können.

Das Höhenprofil der Abnehmer in Holsterhausen geht aus der Abbildung 72 hervor und verläuft im Gegensatz zu den Kleinzonen Reken und Velen deutlich flacher. Dies ist zu erwarten, da einerseits die Topographie regelmäßiger verläuft und andererseits wesentlich größere Netzbereiche versorgt werden, so dass sich eine Vergleichmäßigung der Höhenverteilung ergibt. Auch wenn dieses flachere Höhenprofil eine geringere prozentuale Energieeinsparung erwarten lässt, wird die Zone aufgrund des erwähnten hohen Gesamtenergiebedarfs näher untersucht.

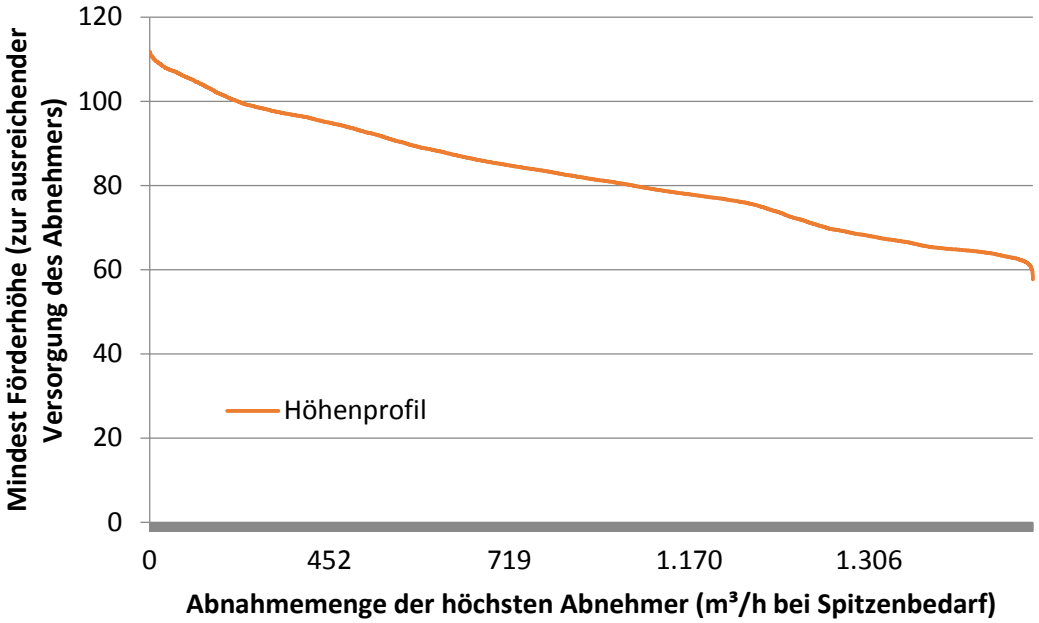


Abbildung 72: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Holsterhausen in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone.

Erwartungsgemäß ist bei der großen Druckzone Holsterhausen eine relevante Druckabsenkung nur möglich, wenn mehrere räumlich verteilte Hochzonen gebildet werden. Insgesamt hat der Optimierungsalgorithmus drei Hochzonen identifiziert, welche von der Gesamtzone hydraulisch getrennt werden müssen, um das Druckniveau entsprechend abzusenken. Die Lage der Hochzonen geht aus der Abbildung 73 hervor.

Über die Lage der Hochzonen ist festzuhalten:

- Die erste Hochzone (Abbildung 74 oben) liegt im Norden des Planausschnittes im Bereich Gladbeck (Hammer Str. und Tunnelstr.)
- Anschließend wird eine südliche Hochzone am Westring (25. höchster Abnehmer) bzw. in der Hanielstr. (29. Abnehmer) benötigt (Abbildung 75).
- Ab dem 55. Abnehmer wird eine dritte Hochzone benötigt, welche zu weit entfernt von der nördlichen und der südlichen liegt (Abbildung 74 unten).

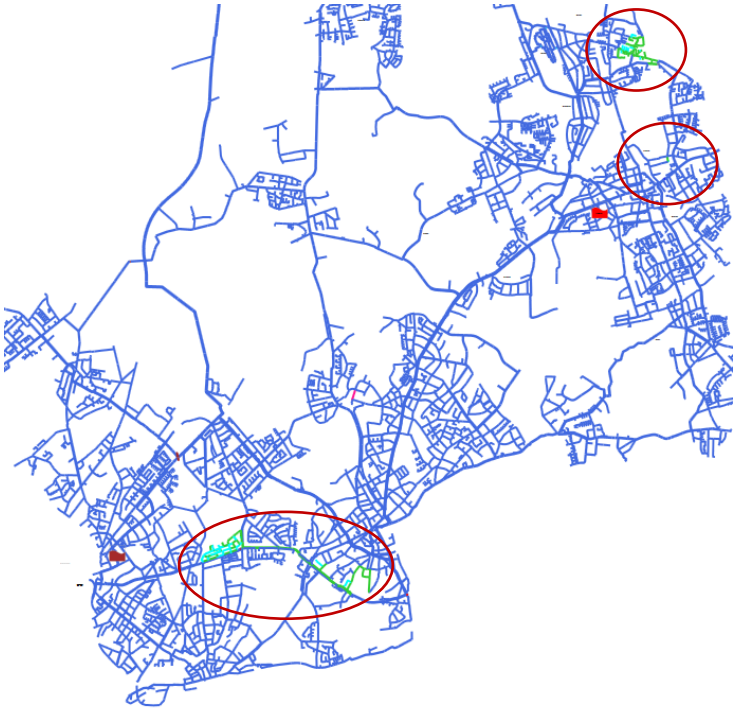


Abbildung 73: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Holsterhausen

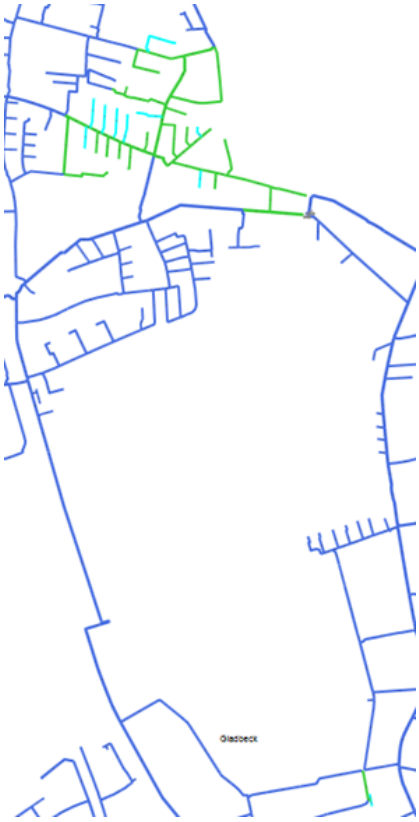


Abbildung 74: Hochzonen Nord (Hammer Str. / Tunnelstr.) und Mitte (Riesener Str.)

Abbildung 75: Hochzonen Süd (Westring und Haniel Str.)

Durch die Einrichtung dieser Hochzonen kann die Einspeisedruckhöhe von 124 m (Ist-Förderhöhe) auf 109,5 m um ca. 14 m abgesenkt werden. Hierin ist bereits eine Druckabsenkung auf das notwendige Solldruckniveau enthalten, welche bestehende Drucküberschüsse bei den höchst gelegenen Abnehmern eliminiert. Aufgrund der großen Fördermenge der zentralen Reinwasserförderung entspricht diese Druckabsenkung einer großen Senkung des Energiebedarfs um ca. 965 MWh/a bzw. 10 % des heutigen Energiebedarfs.

Aufgrund der komplexen und heterogenen Abnehmerstruktur sind jedoch vor einer solchen Druckabsenkung weitere Überprüfungen durchzuführen, u.a.:

- eine detaillierte Überprüfung der Gebäudehöhen (der Pauschalansatz von 3,0 bar Solldruck ist nicht zwingend repräsentativ für das gesamte Versorgungsgebiet)
- eine Überprüfung der Behälterhöhen und der Netzschaltung bzw. Anbindung der Behälter

Die Bildung der Hochzonen in Holsterhausen ist jedoch ein Sonderfall, da bestehende Hochzonen benachbart liegen und für diese Planung herangezogen werden müssten, um gegebenenfalls auf die Installation zusätzlicher Druckerhöhungsanlagen verzichten zu können. Eine weitere empfohlene Druckzonentrennung geht aus der Abbildung 76 hervor.

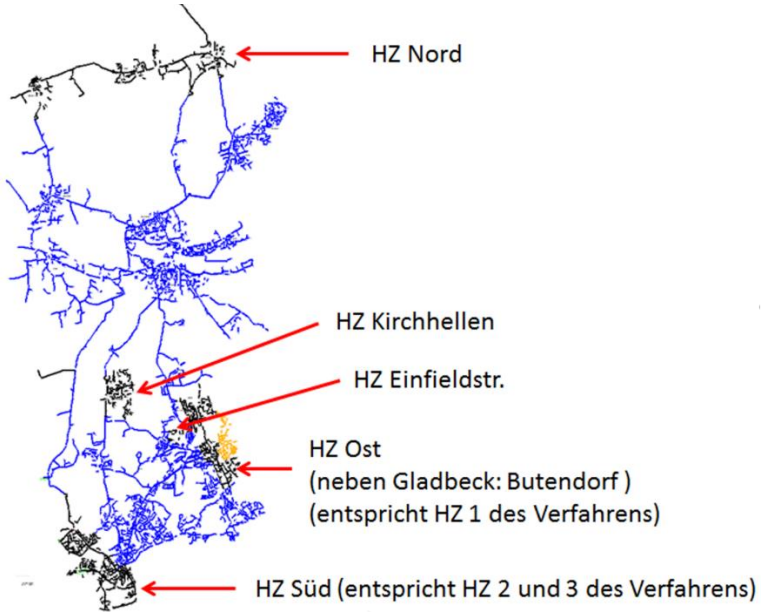


Abbildung 76: Großflächige Bildung von Hochzonen in der Druckzone Holsterhausen (mit Erweiterung bestehender Druckzonen)

Dabei wird die bestehende HZ Gladbeck vergrößert, und vier weitere Hochzonen werden hinzugefügt. Die Hochzone Kirchhellen trennt jedoch eine bestehende Nord-Süd Transportachse auf, so dass eine freigeschaltete (Bypass) Leitung benötigt wird.

Durch diese Maßnahme könnte die Einspeise-Druckhöhe um weitere 16,8 m auf 95 m abgesenkt werden. Die Wasserabgabe der Hochzonen beträgt dabei 30 % der gesamten Wasserabgabe. Der Energiebedarf würde durch diese Maßnahmen um weitere ca. 500 MWh/a reduziert werden. Für die Bildung bzw. Erweiterung der fünf Hochzonen wären (zur Redundanz der Versorgung) etwa 15 Druckerhöhungsanlagen (DEA) im Netz benötigt, was gegen die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung dieser Maßnahmen spricht.

Ergebnisse im ENWOR–Netz (Druckzone Stolberg)

Ansatz mit pauschalen Gebäudehöhen

Durch den pauschalen Ansatz von 3,0 bar Solldruck für jeden Abnehmer verläuft das Höhenprofil (blau) der Abnehmer parallel zu den Bodenhöhen (Abbildung 77).

Unter der Annahme eines flächendeckenden Mindestdrucks von 3,0 bar ergibt sich die optimale Ausdehnung der Hochzone bei Anbindung der 94 höchsten Abnehmer. Hierdurch kann die Förderhöhe um 18 m von 105 m auf 87 m reduziert werden.

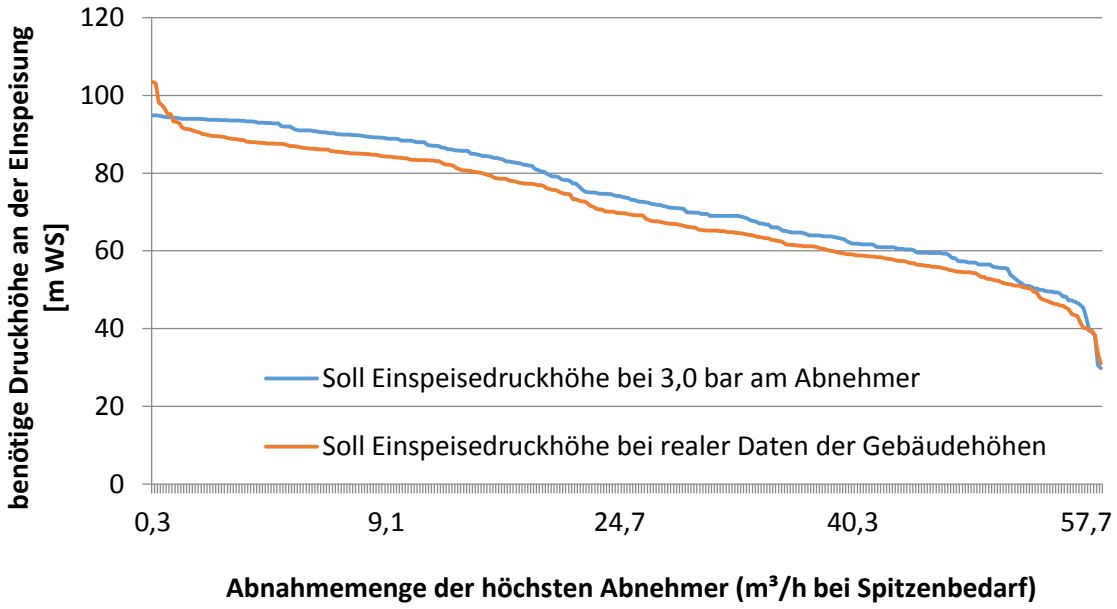


Abbildung 77: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Stolberg in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone.

Die räumliche Ausdehnung der Hochzone geht aus der Abbildung 78 hervor und umfasst insgesamt 18,4 % der Fördermenge der ursprünglichen Druckzone Stolberg. Der Energiebedarf reduziert sich durch die Absenkung der zentralen Förderhöhe um etwa 9,4 MWh/a, was einer relativen Einsparung von ca. 11 % entspricht. Dieses theoretische Ergebnis auf Grundlage eines pauschalen Solldruckbedarfs von 3,0 bar wird im nachfolgenden Abschnitt anhand realer Geschosshöhendaten aus dem Liegenschaftskataster verfeinert. Der Vergleich beider Lösungen soll aufzeigen, wie eine detaillierte Betrachtung mit genauen Katasterdaten eine Verbesserung der Lösungsqualität ermöglicht.

Abbildung 78: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Stolberg (Berücksichtigung realer Daten der Gebäudehöhen)

Da von ENWOR ein Kataster-Datenbestand mit Angabe der realen Geschosshöhen geliefert wurde, konnte eine wesentlich differenziertere Druckzonenoptimierung und Anpassung der Förderhöhe an den realen Solldruckbedarf durchgeführt werden, als bei einem pauschalen Ansatz von 3,0 bar Solldruckhöhe.

Das reale Höhenprofil der Abnehmer in der Druckzone Stolberg („PW von Werner Str.“) geht aus der orangenen Kurve der vorangegangenen Abbildung 77 hervor und zeigt im Vergleich zu der blauen Kurve, welche dem Pauschalansatz entspricht, einen deutlich steiler abfallenden Verlauf. Dieser steile Verlauf bietet, wie bereits dargelegt wurde, aus energetischer Sicht ein höheres Einsparpotenzial, da der Energiebedarf bereits bei einer geringen Fördermenge in die Hochzone spürbar gesenkt werden kann.

Die höchsten Abnehmer liegen auf Basis der realen Höhen (orangene Kurve) höher als bei dem Pauschalansatz. Das Potenzial zur Druckabsenkung ohne Hochzone verschwindet beinahe, d.h. in der aktuellen Betriebsweise der Pumpen wird nur der tatsächlich notwendige Druck gefördert. Nachdem die ersten Abnehmer in die Hochzone angebunden sind, verläuft das reale (orangene) Profil deutlich steiler als das pauschale Höhenprofil, so dass insgesamt eine umfangreichere Druckabsenkung selbst bei kleiner Ausdehnung der Hochzone erreicht wird.

Die räumliche Ausdehnung der auf Basis der realen Geschosshöhen ermittelten Hochzone geht aus der Abbildung 79 hervor.

Abbildung 79: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Stolberg auf Basis realer Geschosshöhen

Die optimale Ausdehnung der Hochzone wird bei Anbindung der 40 höchsten Abnehmer und Absenkung der Druckhöhe um 18 m von 105 m auf 87 m erreicht. Es ist hier Zufall, dass die

optimale Lösung von beiden Berechnungen zu der gleichen Druckabsenkung führen. Da die Ausdehnung und Fördermenge der Hochzone auf Basis der realen Geschosshöhendaten kleiner ist, ergibt sich ein höheres Einsparpotenzial hinsichtlich des Energiebedarfs. Dies spiegelt den beschriebenen Effekt des steileren Höhenprofils wider und führt zu einer Reduktion des Energiebedarfs um 12 MWh/a bzw. 13 %.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bildung der Hochzonen

Nachfolgende Tabelle 24 vergleicht die energetischen Einsparpotenziale in den untersuchten Druckzonen. Hierbei bestätigen sich die theoretisch zu erwartenden Effekte, dass die höchsten Einsparpotenziale in den Druckzonen mit einer deutlichen Absenkung der zentralen Förderhöhe bei möglichst geringen Wasserbedarfs der Abnehmer in der Hochzone bestehen. Das prozentuale Einsparpotenzial liegt zwischen 11 % und 66 % des heutigen Energiebedarfs. Die Förderhöhen können zwischen 12 m und 25 m reduziert werden.

Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse

Druckzone	Absenkung der Förderhöhe [mWS]	Anteil der Fördermenge in Hochzone	Anzahl Hochzonen	Energieeinsparung (ca.) [MWh/a]	Bemerkungen
Reken	25 (31 → 6)	20 %	1	43,6 (66 %)	klares Gefälle in Fließrichtung (gut)
Velen	12 (29 → 17)	2 %	2	25,0 (30 %)	viele kleine „Hügel“ (schlecht)
Holsterhausen	14 (124 → 110)	1,1 %	3	965,0 (11 %)	mögliche Verschiebung der bestehenden Druckzonen-Kaskadierung
Stolberg (pauschal)	18 (105 → 86)	18,4 %	1	9,4 (11 %)	Flaches Höhenprofil
Stolberg (reale Höhen- Daten)	18 (105 → 87)	5,6 %	1	12,0 (13 %)	Steiles Höhenprofil

Eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der ermittelten Maßnahmen kann nicht getroffen werden, da die Kosten für die Einrichtung einer oder mehrerer neuer Druckerhöhungsanlagen überwiegend von lokalen (z. B. ob ein Grundstück oder Gebäude benötigt wird; Löschwasserbedarf, etc.) sowie betrieblichen Faktoren (z. B. gewünschtes Redundanzlevel) abhängt. Diese Faktoren haben häufig einen größeren Einfluss auf die Gesamtkosten der Druckerhöhungsanlage, als die eigentliche Pumpe bzw. Installationen.

Die Ergebnisse der Druckzonenoptimierung bei den Partnernetzen erlauben somit folgende Aussagen:

- Die Einsparpotenziale hängen direkt von der Topographie ab: der n-höchste Abnehmer kann nämlich nur dann in die Hochzone angeschlossen werden, wenn vorher alle Abnehmer vom erst-höchsten bis zum (n-1) höchsten auch in die Hochzone angeschlossen wurden. Die Ergebnisse der beiden ersten Druckzonen illustrieren diesen Effekt des Höhenprofils. In den beiden Druckzonen Reken und Velen beträgt die Ist-Förderhöhe ca. 30 m WS. Die Potenziale für Druckabsenkung unterscheiden sich wie folgt:
- In Reken kann die Förderhöhe mit relativ geringem Aufwand (Bildung einer einzigen Hochzone im Nordwesten) um über 80 % auf ca. 6 mWS gesenkt werden.
- In der Druckzone Velen mit vielen kleinen Hügeln kann sie nur um ca. 30 % gesenkt werden. Außerdem müssten mehrere separate Hochzonen (mit mehreren neuen DEA im Netz) gebildet werden, so dass mit dem Verfahren klar erkannt wird, dass die Topographie von Velen nicht geeignet ist.
- Für Holsterhausen ist außerdem anzumerken, dass es benachbarte Hochzonen gibt. In der Praxis bedeutet also die Druckzonengestaltung nicht zwingend die Bildung neuer Hochzonen, sondern die Überprüfung bzw. Anpassung der räumlichen Ausdehnung existierender Hochzonen. Hierdurch kann gegebenenfalls auf die Installation neuer Druckerhöhungsanlagen verzichtet werden.
- Die absoluten Potenziale bei ENWOR sind aufgrund der kleinen Fördermenge in Stolberg geringer. Allerdings hat die Berechnung des Falls Stolberg ermöglicht, die Berücksichtigung realer Gebäudehöhendaten zu illustrieren. Die Abweichung der Ergebnisse im Pauschalansatz gegenüber dem exakten Ansatz zeigt, wie wichtig das Heranziehen realer Gebäudehöhendaten vor der Umsetzung einer möglichen Druckzonentrennung ist.

II.5.2.5 Bildung von Tiefzonen

Bildung der Tiefzone Reken

Die südlichen Bereiche der Druckzone Reken liegen geodätisch so tief, dass die Einspeisehöhe im Norden selbst ohne DEA ausreichen würde. Es ist sinnvoll, einen möglichst großen Bereich als neue Tiefzone abzutrennen. Dabei wird angestrebt, das Produkt der Fallhöhe und Fallmenge (E = Q x H) zu maximieren. Da ein Anschluss von nördlichen Abnehmern gleichzeitig die Fallmenge erhöht, aber die Fallhöhe reduziert, handelt es sich um einen Tradeoff.

Bei Reken ist jedoch eine Beschränkung durch Betrachtung der versorgungstechnischen Randbedingungen (Einhaltung eines Mindestdrucks) festzustellen. Der südliche Bereich beinhaltet ganz südlich (Spekinger Weg bzw. Hohe Markt südöstlich von Klein-Reken) einige höher gelegene Abnehmer, so dass eine Fallhöhe von 25 mWS nicht überschritten werden kann. Aus dieser Feststellung ist nun die maximale Fallhöhe fest vorgegeben, so dass die möglichst nördlichste Abtrennung der Druckzonen gefunden werden muss, um die Fallmenge der Tiefzone und damit den Energieertrag zu maximieren. Dabei müssen auch betriebliche bzw. versorgungstechnische Faktoren berücksichtigt werden (z.B. eine möglichst geringe Anzahl der Trennstellen).

Dies wird erreicht, wenn die Trennung durch die Transportleitung zwischen den Dörfern und nicht im eng vermaschten Bereich innerhalb eines Dorfs verläuft. Für die Tiefzone Reken werden zwei Trennstellen – wie in Abbildung 80 dargestellt – benötigt. Die Trennstelle auf der Hauptleitung (Westen) bekommt die Turbine, die zweite Trennstelle (Osten) ein Druckminderungsventil, welches im Normalbetrieb geschlossen ist und nur der Ausfallsicherheit dient.

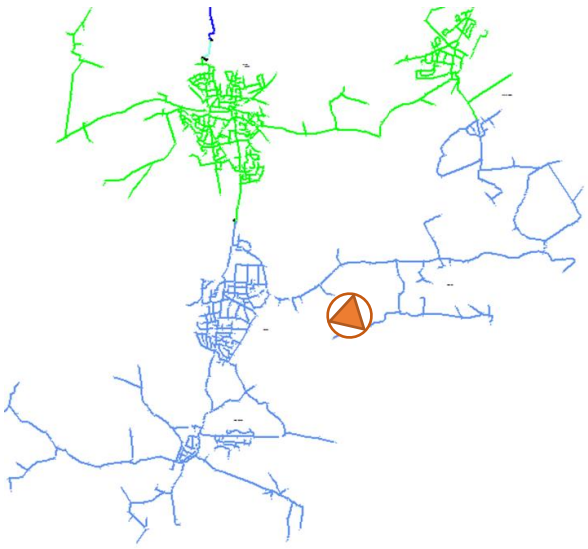


Abbildung 80: Räumliche Ausdehnung der Tiefzone Reken (grün) und Standort der Turbine (orange)

Daraus folgt eine Fallhöhe von 25 mWS mit einer Fallmenge von 90 m³/h bei Spitzenbedarf. Mit dem Verteilungsschlüssel (3760 Jahresnutzungsstunden) zur Hochrechnung auf Jahreswerte ergibt sich eine Energieeinsparung von ca. 20 MWh/a, also die Hälfte der Einsparung, die sich durch die Bildung der Hochzonen ergeben würde.

Als Interpretation, warum die Druckabsenkung energetisch sinnvoller als eine Turbinierung ausfällt, ist festzuhalten:

- Die zentrale Druckabsenkung, wie in Kapitel II.5.2.4 beschrieben, betrifft fast alle Abnehmer (außer die Abnehmer der Hochzone). Denn nur die Abnehmer der Hochzone brauchen das hohe Druckniveau.
- Die Turbinierung betrifft dagegen einen kleineren Bereich also eine kleinere Wassermenge.

Erwähnenswert bleibt jedoch, dass eine Turbinierung aufgrund anderer Vorteile (wie ihre deutlich bessere Ausfallsicherheit, welche nicht Hauptgegenstand des Forschungsprojekts ist) bevorzugt werden kann.

Darüber hinaus ist unklar, welche Maßnahme aus wirtschaftlicher Sicht zu bevorzugen ist. Die Installation der DEA zur Versorgung einer Hochzone wird höhere Investitionen erfordern als der Einbau einer rückwärts laufenden Pumpe als Turbine. Gleichzeitig ist die laufende Kostenersparnis jedoch wesentlich höher, da der Strombezug ca. 0,20-0,25 €/kWh kostet, während die Einspeisung des gewonnenen Stroms lediglich mit ca. 0,03-0,04 €/kWh vergütet wird.

Umrüstungen bestehender Tiefzonen des ENWOR-Netzes

Das ENWOR-Netz hat die Besonderheit, aus vielen Druckzonen zu bestehen, die im freien Gefälle über Druckminderungsventile versorgt werden. Dies liegt an der Höhenlage der Haupteinspeisung Roegten, welche oberhalb der Abnehmer liegt und damit die Versorgung überwiegend ohne Pumpen im Netz ermöglicht. Das Netz besteht heute aus kaskadierend geschalteten Druckzonen, welche mit Druckminderungsventilen (DMV) verbunden sind. Sowohl aufgrund der Größe der Druckzonen (gering vermascht; teilweise überwiegend Transportcharakter), als auch der bereits feinen Kaskadierung wird auf eine Anpassung der Druckzonen verzichtet.

In folgender Tabelle 25 wird daher die heutige Netzstruktur beibehalten und für diese das Potenzial für die Energierückgewinnung ermittelt, welche durch den Ersatz der Druckminderungsventile durch Turbinen erreicht werden könnte:

Tabelle 25: Potenzial von Ersatz von DMV durch Turbinen im ENWOR Netz

Von Druckzone	Nach Druckzone	Durchfluss-menge bei Spit-zenbedarf [m³/h]	Fallhöhe [mWS]	Energie [MWh/a]
Gottessegen	Nordraum	758	32	199
TWA Roegten	RKV Buttergasse	337	23	61
TWA Wehe	Tannenhof	182	15	22
RKV Buttergasse	Hastenrath / Bohl	29	80	19
TWA Roegten	Obersteinstr.	3	67	1,7
*Stolberg VW Str	Bach / Talstr	5	40	1,6
RKV Buttergasse	Schevenhütte	7	22	1,2
Summe				**306 (MWh / a)**

RKV=Ringkolbenventil, TWA=Trinkwasseraufbereitung

Aus den sieben bestehenden Druckminderungsventilen sind die ersten vier zu berücksichtigen, so dass etwa 300 MWh/a (bei 3760 angenommen Jahresbenutzungsstunden und 80 % Wirkungsgrad) gewonnen werden könnten. Im Wasserrohrnetz der ENWOR sind die Potenziale durch den Tausch Druckminderungsventil → Turbine erheblich größer als die Potenziale durch die Bildung einer Hochzone zur Druckabsenkung. Wie vorher erwähnt, ist hieraus keine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Wasserversorgungsunternehmen möglich, da die Topographie von ENWOR eine in Deutschland eher selten anzutreffende Konfiguration darstellt.

II.5.2.6 Zeitliche Optimierung der Fahrweise von Pumpen und Behälter

Anwendung im Netz des Aggerverbands

Für die Optimierung der Fahrweise des Pumpbetriebs wird das Behälterpaar mit dem Reinwasserbehälter (RWB) Erlenhagen (4.000 m³) und dem Netzgegenbehälter Volmekopf (10.000 m³) untersucht, welche über eine leistungsfähige Transportleitung miteinander verbunden sind. Die Komponenten des Optimierungsmodells sind in Abbildung 81 schematisch dargestellt.

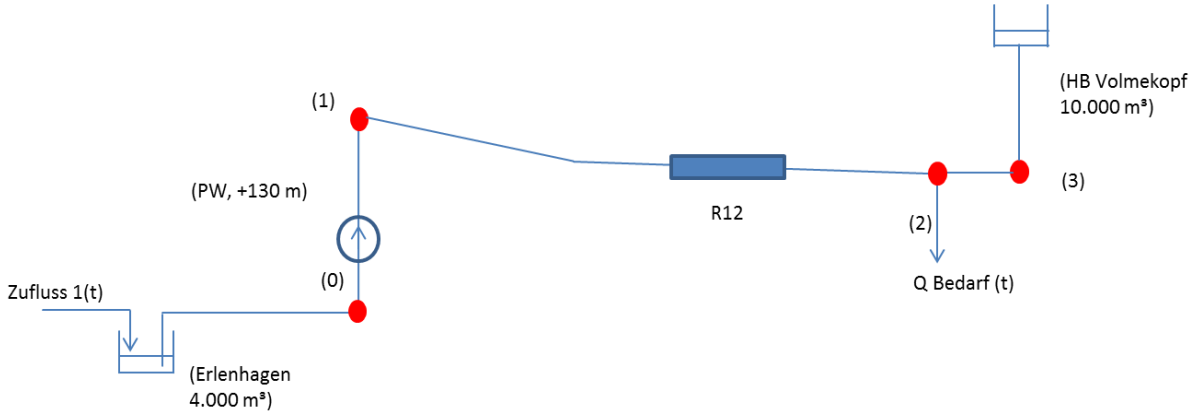


Abbildung 81: Schematische Darstellung des Optimierungsmodells für die Optimierung der Fahrweise im Netz des Aggerverbands

Das Optimierungsmodell entspricht einer vereinfachten (reduzierten) Abbildung eines Teilnetzes des Aggerverbands, welches nachfolgende Besonderheiten berücksichtigt:

- Der RWB Erlenhagen wird nicht mit seinem vollen Volumen berücksichtigt. Da der RWB Erlenhagen zur Hälfte für die Wasseraufbereitung benutzt wird, ist zunächst ein Volumen von 2.000 m³ zu betrachten. Außerdem entspricht der Bereich Volmekopf (bzgl. der Wasserabgabe) nur ca. einem Viertel des nördlichen Netzbereichs. Im folgenden Modell wird daher dem RWB Erlenhagen nur ein nutzbares Volumen von 500 m³ zugeordnet.
- Im Pumpwerk Bredenbruch werden nur positive Durchflüsse (Richtung Volmekopf) berücksichtigt. Der Fall eines „Pumpspeicherbetriebs“ mit Rückspeisung von dem Behälter Volmekopf in den RWB Erlenhagen und Installation einer Turbine wird daher explizit nicht untersucht.
- Im Pumpwerk Bredenbruch wird ein fiktiver Betrieb mit Frequenzumrichter (FU) angenommen, so dass die Entscheidungsvariable „Durchflussmenge“ nicht auf diskrete Zustände (Kombination von Ein- / Aus-Schalten einzelner Aggregate) beschränkt ist. Im Istzustand existiert dieser Frequenzumrichter nicht, allerdings kann das volle Potenzial erst bei Installation eines Frequenzumrichters zur Drehzahlregelung gehoben werden.
- Der Rohrreibungswiderstand des Leitungsabschnitts Erlenhagen – Bredenbruch wird aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt und stattdessen dem Leitungsabschnitt Bredenbruch – Volmekopf zugerechnet. Der errechnete (linearisierte) Widerstand *R* bei einer Leitungslänge von 9 km und Rohrnennweite DN 700 entspricht 56 Mws / (m³/s)².
- Als Unterschied der geodätischen Höhen zwischen den beiden Behälter wird H_{geo} = 129,5 m angenommen.
- Für das Pumpwerk (Motor + Pumpe) wird ein fiktives Wirkungsgradkennfeld eta(Q) mit 80% bei 1200 m³/h und Einbußen auf 60 % bei sehr niedrigem bzw. hohem Durchfluss angenommen.

- Aus den drei letzten Angaben (R, H_{geo} und eta(Q)) wird das Kennfeld E(Q) des Pumpenergieverbrauchs abgeleitet und in Abbildung 82 als rote Kurve dargestellt:

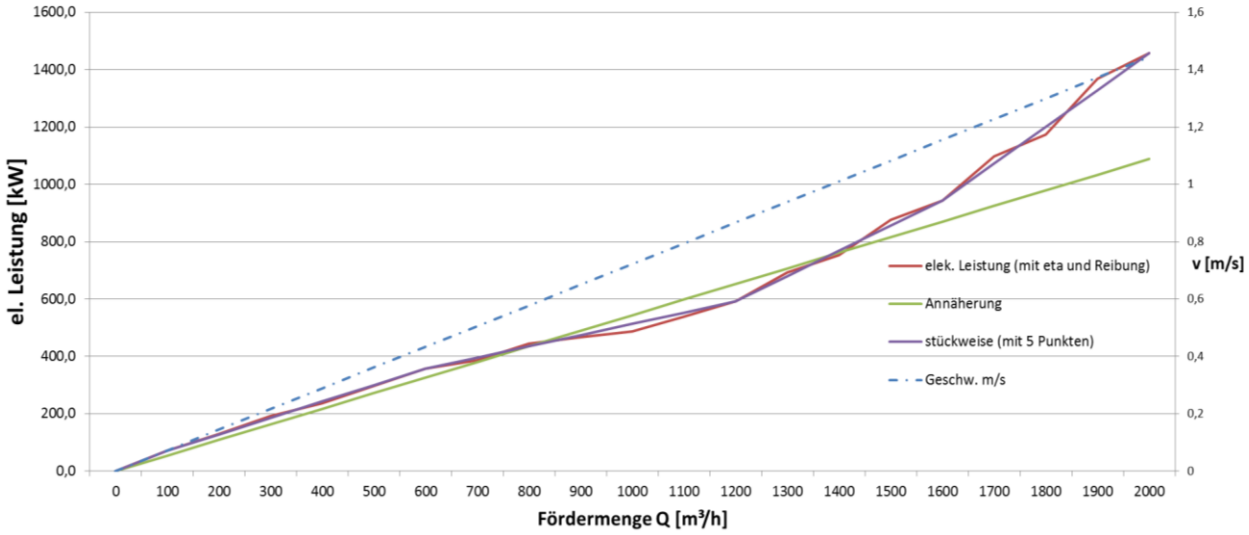


Abbildung 82: E(Q)-Kennfeld des Systems Erlenhagen – Volmekopf (Elektrische Pumpenleistung als Funktion der Fördermenge)

Im Normalbetrieb mit einer Fließgeschwindigkeit (blaue Kurve) unter 1 m/s liegt die Fördermenge Q unter 1400 m³/h. Die grüne Gerade stellt die lineare Interpolation des roten (exakten) Kennfelds für den Bereich von 0 bis 1400 m³/h dar.

Im linearen Modell bleiben sämtliche zeitliche Verschiebungen des Verbrauchs ohne Auswirkung auf die gesamte Energiemenge (Vernachlässigung der überproportional ansteigenden Reibungsdruckverluste). Die Ergebnisse des linearen Modells in unterschiedlichen Szenarien gehen aus Tabelle 26 hervor.

Dabei werden spaltenweise vier Szenarien dargestellt:

- In Szenario 1 wird die (angenommene) Ist-Fahrweise berücksichtigt und der Energieverbrauch aus der linearen Beziehung E(Q) ermittelt. Szenario 1 dient als Referenz für den Variantenvergleich.
- Im Szenario 2 ist der Einspeisedurchfluss in das Netz über einen Zeitraum von je 24 Stunden konstant, entsprechend einem tageweisen Bandbetrieb.
- Im Szenario 3 ist die Fahrweise eine Entscheidungsvariable für die Optimierung. In der Zielfunktion ist nur die zeitliche Summe des Produkts des Strompreises mit Stromverbrauchsmenge enthalten.
- Szenario 4 erweitert die Zielfunktion des Szenarios 3 um einen zusätzlichen Term: die Kosten der höchsten Leistung innerhalb der für die atypische Netznutzung relevanten Hochlastzeitfenster. Für das Jahr 2015 sind 523 Stunden den Hochlastzeitfenstern zuzurechnen.

Die Kostenstruktur setzt sich aus 4 Komponenten wie folgt zusammen:

- Stromeinkauf: EEX historische Werte des Jahres 2015 [ct/kWh]
- staatlich veranlasste Mehrbelastungen von 8,666 [ct/kWh]
- Netzentgelte (Arbeitspreis) [ct/kWh]
- Netzentgelte (Leistungspreis) [EUR/kW]

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die Entgelte der Mittelspannungsebene bei über 2500 Benutzungsstunden im Jahr (c = 0,62 ct/kWh und d = 72,79 EUR/kW) der Berechnung zugrunde gelegt.

Mit Ausnahme der Leistungspreiskomponente der Strom-Netznutzungsentgelte hängen alle Kostenbestandteile von der bezogenen Energiemenge (kWh) ab, während der Leistungspreis auf Basis der maximal aufgetretenen Bezugsleistung (kW) bzw. – bei Inanspruchnahme atypischer Netzentgelte – von der maximal aufgetretenen Bezugsleistung während der Hochlastzeitfenster berechnet wird.

Tabelle 26: Ergebnisse der Optimierung der Fahrweise bei linearer Modellierung des Energiebedarfs E(Q)

Szenario	1	2	3	4
a) Stromeinkauf [EUR]	32.151,90	31.999,15	26.017,35	26.182,46
b) Mehrbelastung [EUR]	95.811,82	95.811,82	95.811,82	95.811,82
c) Netzentgelt Arbeitspreis [EUR]	30.256,36	30.256,36	30.256,36	30.256,36
Summe a – c [EUR]	**158.220,08**	**158.067,33**	**152.085,53**	**152.250,64**
d) Netzentgelt Leistungspreis [EUR]	18.132,75	10.931,20	55.546,32	4.683,80
Gesamtkosten (a-d) [EUR]	**176.352,83**	**168.998,53**	**207.631,85**	**156.934,44**
Änderung der Gesamtkosten (a-d)	0,0%	-4,2%	17,7%	-11,0%
Änderung der energieabhängigen Kosten (a-c)	0,0%	-0,1%	-3,9%	-3,8%
Max-Leistung Hochlastzeitfenster [kW]	222	134	680	57
Max-Leistung gesamt [kW]	254	159	703	703
Energiebedarf [kWh]	1.008.550	1.008.550	1.008.550	1.008.550

Ein Ausschnitt der Ergebnisse der Fahrweise-Optimierung ist in nachfolgender Abbildung 83 für den Zeitraum vom 05.01.2015 – 10.01.2015 dargestellt. Die graue Linie zeigt dabei die Fahrweise, wenn diese ausschließlich nach dem zeitabhängigen Spotmarktpreis optimiert

wird. Die grüne Linie berücksichtigt hingegen auch die leistungsabhängigen Netznutzungsentgelte bei atypischer Netznutzung.

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass beide Kurven zu den meisten Zeitpunkten fast deckungsgleich verlaufen. Lediglich zu einzelnen Stunden ergeben sich Abweichungen, da die Optimierung ohne atypische Netznutzung Leistungsspitzen an Zeitpunkten mit geringen Spotmarktpreis erzeugt ohne zu prüfen, ob diese inner- oder außerhalb eines Hochlastzeitfensters liegen. Im Gesamtergebnis führt dies zu deutlich steigenden Energiekosten, da der Leistungspreis der Netznutzungsentgelte im Vergleich wesentlich höher liegt. Unter Berücksichtigung der atypischen Netznutzung in der Optimierung der Fahrweise werden Lastspitzen während der Hochlastzeitfenster dagegen konsequent vermieden, ohne dass dies zu einem deutlichen Anstieg der Kosten des Spotmarktbezugs führt.

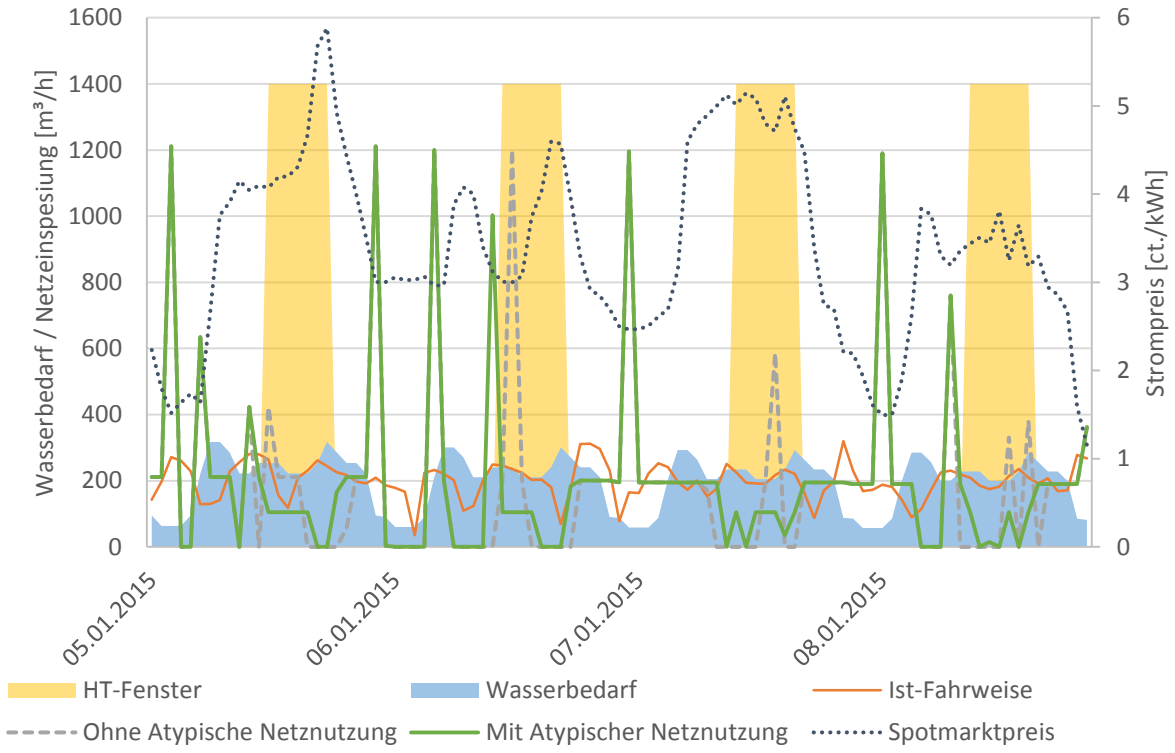


Abbildung 83: Vergleich der optimierten Fahrweise des Netzes des Aggerverboands mit bzw. ohne Berücksichtigung der atypischen Netznutzung

Durch stückweise Linearisierung (lila Kurve) können die Nichtlinearitäten der roten Kurve nachgebildet werden. Geringe und hohe Durchflüsse werden wegen des schlechten Wirkungsgrads durch überproportionalen Energieverbrauch abgebildet. Außerdem werden höhere Reibungsverluste bei hohen Durchflüssen berücksichtigt. Die Ergebnisse des stückweise linearisierten Modells gehen aus der folgenden Tabelle hervor:

Tabelle 27: Ergebnisse der Optimierung der Fahrweise bei nicht linearer Modellierung des Energiebedarfs E(Q)

Szenario	1	2	3	4
a) Stromeinkauf	32.301,16	32.152,04	18.441,66	18.433,79
b) Mehrbelastung	95.987,62	95.987,62	88.538,36	88.462,59
c) Netzentgelt Arbeitspreis	30.311,88	30.311,88	27.959,48	27.935,55
Summe a - c	**158.600,66**	**158.451,54**	**134.939,50**	**134.831,93**
d) Netzentgelt Leistungspreis	18.347,68	11.060,77	57.406,98	0,00
Gesamtkosten (a-d)	**176.948,34**	**169.512,31**	**192.346,48**	**134.831,93**
Änderung der Gesamtkosten (a-d)	0,0%	-4,2%	8,7%	-23,8%
Änderung der energieabhängigen Kosten (a-c)	0,0%	-0,1%	-14,9%	-15,0%
Max-Leistung Hochlastzeitfenster [kW]	224,68	135,45	703,00	0,00
Max-Leistung gesamt [kW]	258,00	159,00	1.145,00	1.145,00
Energiebedarf [kWh]	1.010.400	1.010.400	931.980	931.190

Dabei ist im Vergleich zu dem linearen Modell folgendes anzumerken:

- In den Szenarien 3 und 4 (optimiert) werden Lösungen mit einem geringeren Energieverbrauch gefunden als in den nicht-optimierten Szenarien. Dieser Effekt, welcher im linearen Modell nicht abgebildet werden kann, zeigt, dass die Optimierung neben dem dynamischen Spotmarktpreis und den atypischen Netzentgelten (Szenario 4) auch den Energiebedarf berücksichtigt. So wird z.B. vorwiegend in Zeiten mit geringem Wasserbedarf und damit geringen Reibungsdruckverlusten gepumpt, um den Energiebedarf zu senken und damit die zeitunabhängigen Kosten des Strombezugs, welche ca. 80 % ausmachen, zu reduzieren.
- Im Szenario 3, welches die atypische Netznutzung ignoriert, liegt die maximale Leistung während der Hochlastzeitfenster deutlich höher als im Istzustand (Szenario 1) oder Band-

betrieb (Szenario 2). Am geringsten ist die maximale Leistung während der Hochlastzeitfenster im Szenario 4, da die Leistungskosten (durch Netzentgelte) in der Zielfunktion enthalten sind. Außerhalb der Hochlastzeitfenster ist die Leistung in diesem Szenario jedoch höher als im Istzustand.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass das nicht lineare Modell in der Lage ist, die Einflüsse der zeitlichen Lastverschiebung auf die Kosten ausreichend genau abzubilden. Die Lösungsdauer für dieses Model liegt im Bereich von ca. 30 Minuten bis zu wenigen Stunden.

Anwendung im ENWOR-Netz

Im Netz der ENWOR wurde die Optimierung der Fahrweise ebenfalls modelliert und prototypisch durchgeführt. Betrachtet wird die Konfiguration der drei Einspeisungen (Roegten, Hastenrath und Binsfeldhammer), die alle zum HB Gottessegen führen, wie in Abbildung 84 schematisch dargestellt ist. Eine Besonderheit hierbei ist, dass auf der Strecke Roegten → Gottessegen eine Turbine installiert ist, so dass Energie gewonnen und nicht verbraucht wird. Auf den übrigen Abschnitten (aus Binsfeldhammer sowie Hastenrath) wird hingegen Pumpenergie in das System eingebracht. Der gesamte Energiebedarf setzt sich dabei zusammen aus der geodätischen Förderhöhe und den dynamischen Reibungsdruckverlusten, welche über den Widerstand R abgebildet werden.

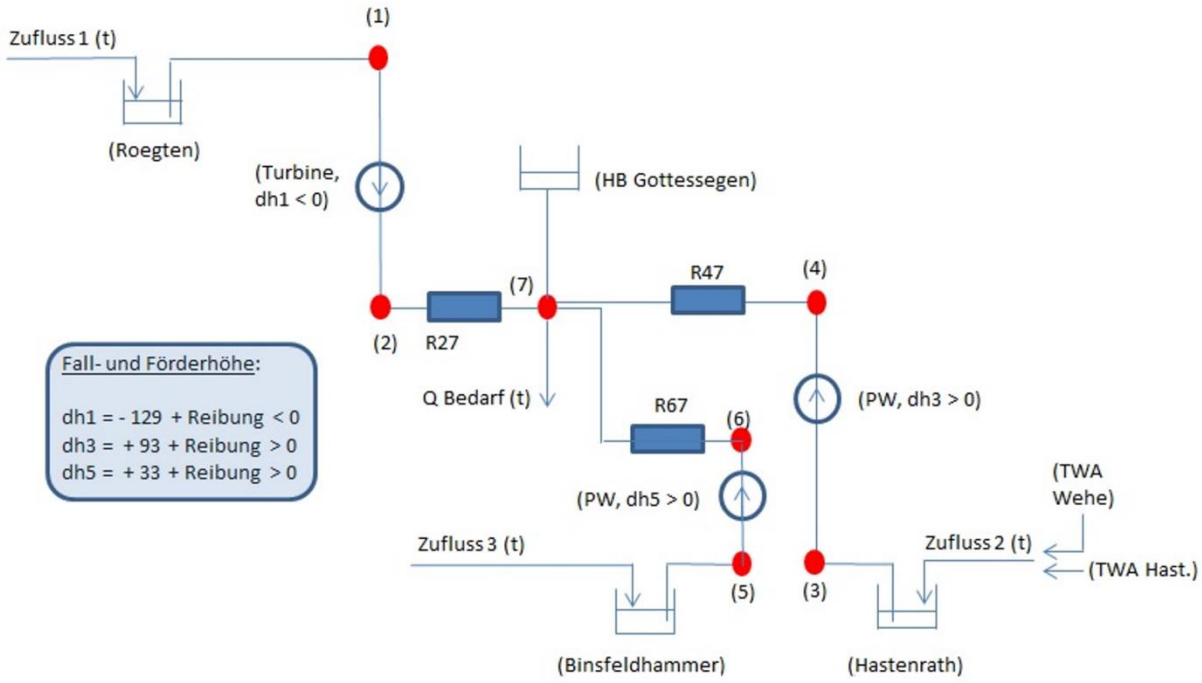


Abbildung 84: Schematisches Modell für die Fahrweise-Optimierung im ENWOR-Netz

Die Eigenschaften der drei dargestellten Leitungstrecken gehen aus Tabelle 28 hervor:

Tabelle 28: Kennzahlen der Transportstrecken

Strecke bis HB Gottessegen	Länge [km]	Nennweite [mm]	Sonstige	Widerstand R [m / (m³/s)²]
1-2 Roegten / Breinig	17	600; 1000+800+500 parallel	ca. 16% Abnahme-menge auf der Strecke	35
3-4 (Wehe) Hastenrath	19	900 - 1200		25
5-6 Binsfeldhammer	7	400; 400+300 parallel		1000

Die entsprechenden Strecken sind in Abbildung 85 und Abbildung 86 schematisch dargestellt:

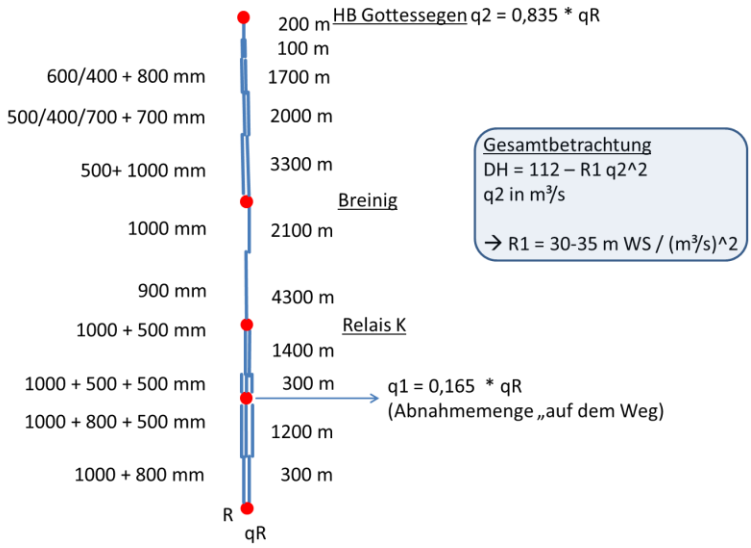


Abbildung 85: Widerstand für die Strecke Roegten → Gottessegen

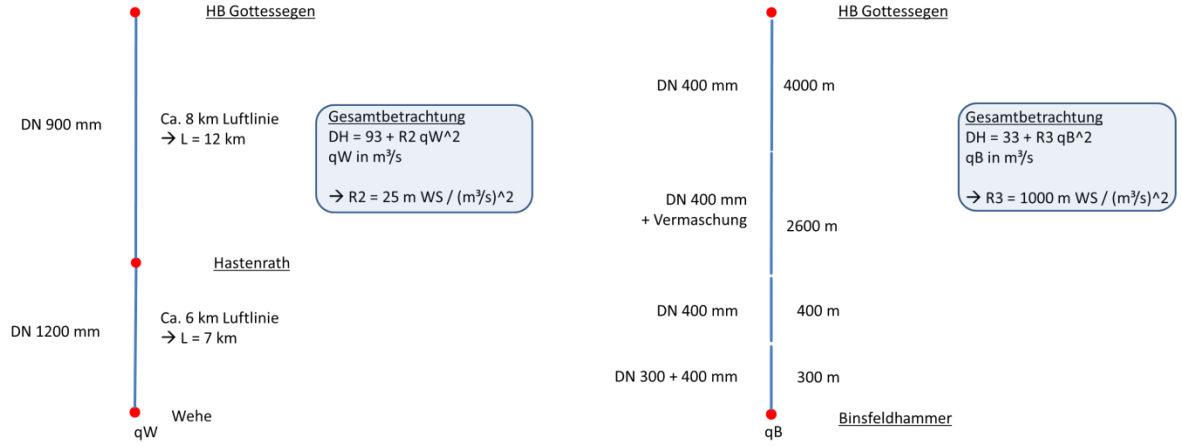


Abbildung 86: Widerstand für die Strecke (Wehe) Hastenrath Gottessegen (links) und für die Strecke Binsfeldhammer Gottessegen

Aufgrund der wesentlich komplexeren Modellierung der Teilabschnitte und der höheren Anzahl von Einspeisepunkten erfolgt in Abbildung 87 nur eine Darstellung des Wasserbedarfs sowie der jeweiligen Einspeisemengen auf den Strecken 1-2 (Roegten → Breinig), 3-4 (Wehe / Hastenrath) sowie 5-6 (Binsfeldhammer).

Aus Abbildung 87 ist ersichtlich, dass die Durchflussmengen Q-3-4 und Q-5-6 weitgehend parallel verlaufen, während Q-1-2 zu einigen Zeitpunkten (soweit aufgrund des Wasserbedarfs möglich) eher zu Zeiten eines hohen Spotmarktpreises genutzt wird, da hier eine Energierückgewinnung erfolgt. Aufgrund der erheblich geringeren Erlöse aus der Energiegewinnung im Vergleich zu dem Bezugspreis richtet sich die Gesamtoptimierung jedoch stärker nach den Mengen Q-3-4 und Q-5-6.

Für das Modell ENWOR erfolgt kein direkter Kostenvergleich mit der Ist-Fahrweise, da diese aufgrund der Modellvereinfachungen sowie teilweise unklarer Transfermengen (an Weiterverteiler) nicht vollständig nachgebildet werden konnte. Gegenüber einem angenommenen Bandbetrieb (jeweils 24h konstant) liegen die Einsparpotenziale bei ca. 5 % bezogen auf den reinen Energiepreis und bei ca. 20 % unter Berücksichtigung atypischer Netznutzung.

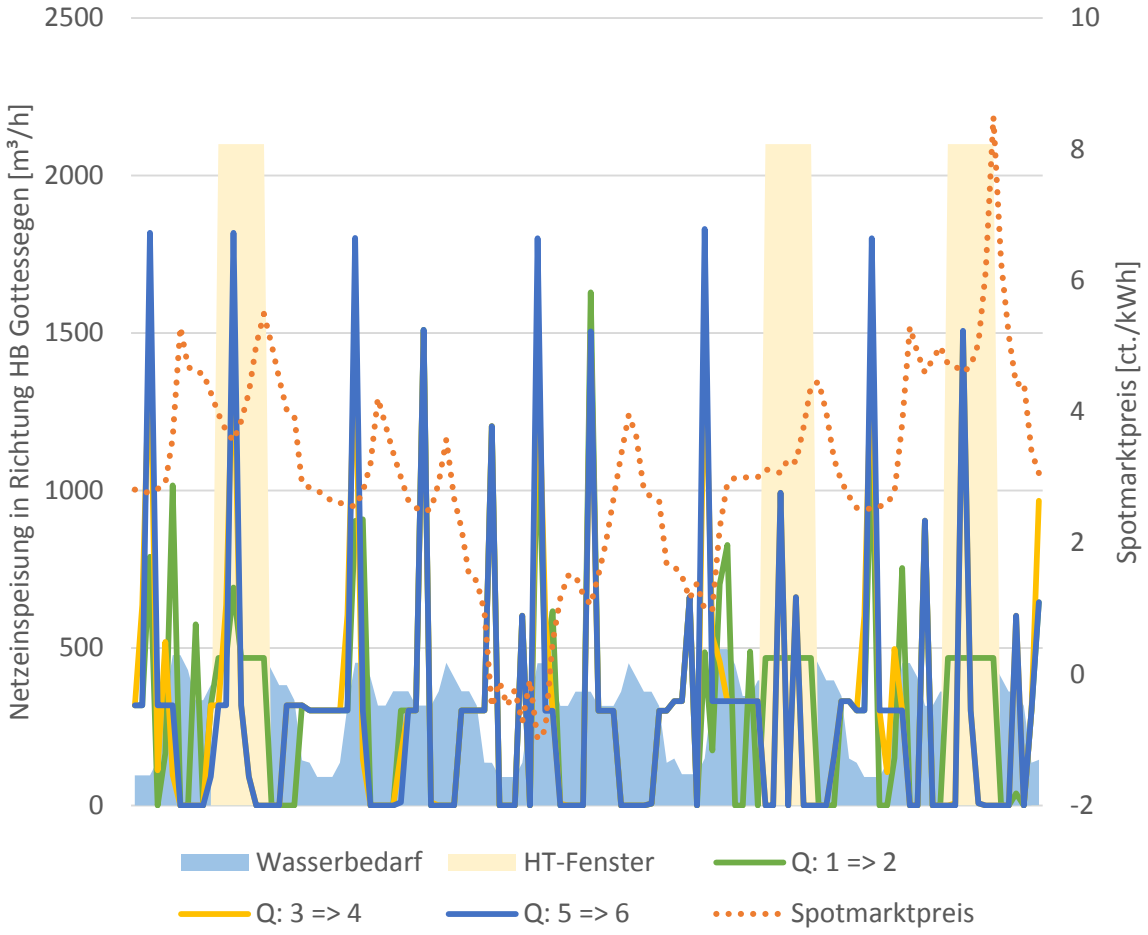


Abbildung 87: Optimierte Fahrweise im ENWOR-Netz (06.02.2015-10.02.2015)

II.5.2.7 Zusammenfassung der Einsparpotenziale

Je nach Höhenprofil der höchsten Abnehmer in einer Druckzone konnte der Energiebedarf der Reinwasserförderung durch die Bildung von Hochzonen um 11 % bis 66 % des Ist-Bedarfs abgesenkt werden (Kapitel II.5.2.4). Hierzu wurden in den untersuchten Druckzonen konkret das Höhenprofil und die entsprechende Ausdehnung der Hochzonen gezeigt. Darunter sind Fälle mit mehreren Hochzonen auf verschiedenen, nicht verbundenen, Hochlagen enthalten.

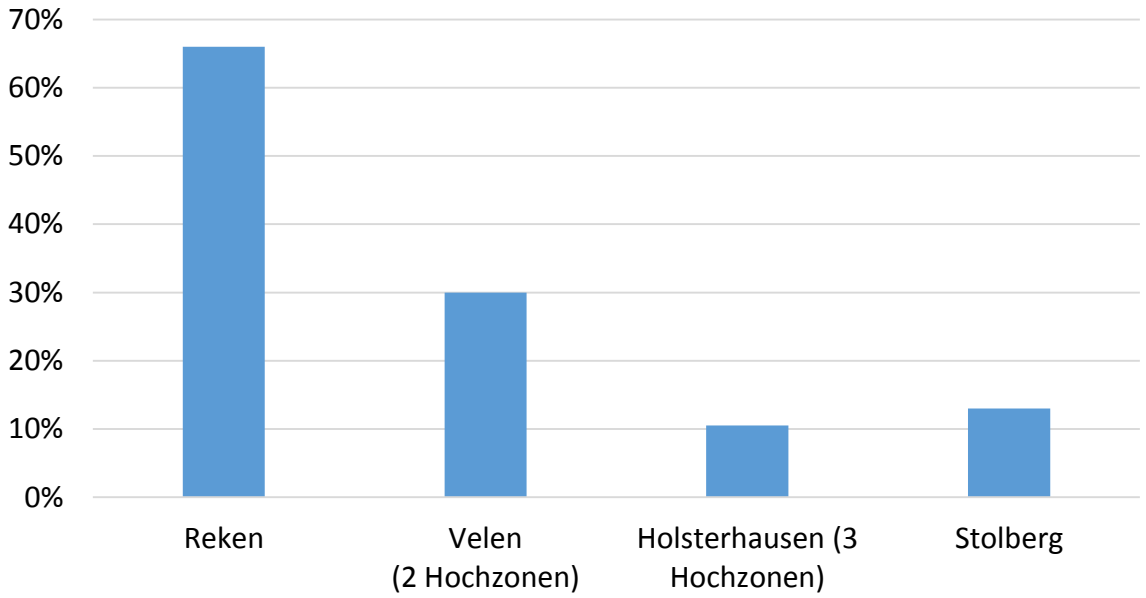


Abbildung 88: Vergleich der Energieeinsparung durch die Bildung von Hochzonen

Potenziale für eine Energierückgewinnung würden prinzipiell durch den Einbau von Turbinen im Netz bestehen. Entsprechende versorgungstechnisch mögliche Fallhöhen und die dazugehörigen Energiemengen wurden im Kapitel II.5.2.5 ausgewertet. Hierbei wurden sowohl der Fall der Teilung einer bestehenden Druckzone als auch der Ersatz von Druckminderungsventilen (DMV) durch Turbinen untersucht. Das Erzeugungspotenzial durch den Austausch von DMV durch Turbinen (ohne Änderung der Druckzonengestaltung) liegt im Netz der ENWOR bei ca. 300 MWh/a.

Bei Druckzonensystemen mit Reinwasserförderung und Netzgegenbehältern wurden im Kapitel II.5.2.6 die Potenziale der zeitlichen Verschiebung der Pumpenergie durch Speichernutzung untersucht, wobei unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Energiekosten Ersparnisse von bis zu 25 % erzielt werden konnten. Diese Ersparnisse sind jedoch primär auf atypische Netzentgelte zurückzuführen und nur sekundär auf den zeitlich schwankenden Spotmarktpreis. Der Grund hierfür liegt in der Struktur der Energiekosten, welche sich vorwiegend aus zeitunabhängigen Kostenbestandteilen (im Wesentlichen Steuern und Abgaben) zusammensetzen.

Sollen flexible Verbraucher, wie Wasserversorger, zukünftig einen Beitrag für eine stärkere Integration erneuerbarer Energien leisten, ist die Politik aufgefordert, eine zeitliche Dynamisierung der staatlichen Belastungen (EEG-Umlage, Stromsteuer, etc.) in Erwägung zu ziehen.

II.5.2.8 Hochrechnung auf die Trinkwasserverteilung der BRD

In Anlehnung an Kapitel II 5.1.2 können Trinkwassernetze im Wesentlichen durch zwei Netztypen charakterisiert werden. Zum einen kann eine Einspeisung von oben vorliegen, wodurch

für die Wasserverteilung kaum oder gar kein Energiebedarf besteht. Zum anderen wird eine Einspeisung von unten unterschieden, in welcher der Energiebedarf vor allem durch die Pumpenergie zur Bereitstellung des benötigten Versorgungsdruckes charakterisiert ist (DVGW, 2016).

Wird das Versorgungsgebiet von unten gespeist, liegen wesentliche Energieeinsparpotenziale in der Druckzonenoptimierung. Diese Optimierung sowie mögliche Energieeinsparpotenziale sind in Kapitel II 5.1.2 erläutert. Bei einem hohen Anteil der entkoppelten Wassermenge sowie geringer Druckdifferenz sind Energieeinsparpotenziale ab 1 % möglich. Im Idealfall wird nur ein geringer Anteil der Wassermenge bei gleichzeitig großer Druckdifferenz entkoppelt, wodurch ein umso größeres Energieeinsparpotenzial resultiert. Innerhalb von ENERWA konnten Energieeinsparpotenziale bis über 60 % ermittelt werden. Durchschnittlich werden Energieeinsparungen in Höhe von 15 % für realistisch gehalten (Hensel, 2017).

Das Energieeinsparpotenzial bei Pumpen ist im Wesentlichen in der bedarfsabhängigen Regelung der Pumpendrehzahl zu finden. Durch die Anpassung der Pumpendrehzahl ist es möglich die Pumpen im optimalen Betriebsbereich und damit mit hohem Wirkungsgrad und geringerem spezifischen Energiebedarf betreiben zu können. Die Nutzung hocheffizienter Motoren kann zu einer weiterführenden Reduktion des Energiebedarfs beitragen. Insgesamt werden die maschinen- und antriebstechnischen Energieeinsparpotenziale auf 5 bis 35 % abgeschätzt (BFE, 2003; DVGW, 2010; Plath, 2014; Kilchmann et al., 2004; BOKU, 2012).

Durch die Anpassung des Versorgungsdrucks an den tatsächlichen Bedarf und bis maximal dem 4. Obergeschoss (DVGW, 2015), was mindestens 3,4 bar an der Abzweigstelle zum Hausanschluss (vgl. Abbildung 89) entspricht, können Energieeinsparpotenziale zwischen 5 bis 40 % erreicht werden (Rammler, 2017). Bereits durch eine Reduzierung des Versorgungsdruckes um 0,5 bar lässt sich in der bundesweiten Wasserverteilung, auf Basis von Erfahrungswerten zum spezifischen Energiebedarf von durchschnittlich 0,265 kWh/m³ (IWW, 2017) und dem theoretischen Energiebedarf von 2,714 Wh/(m³*m) (Pinnekamp et al., 2017), ein Energieeinsparpotenzial von 5,1 % ableiten (Löwen, 2017).

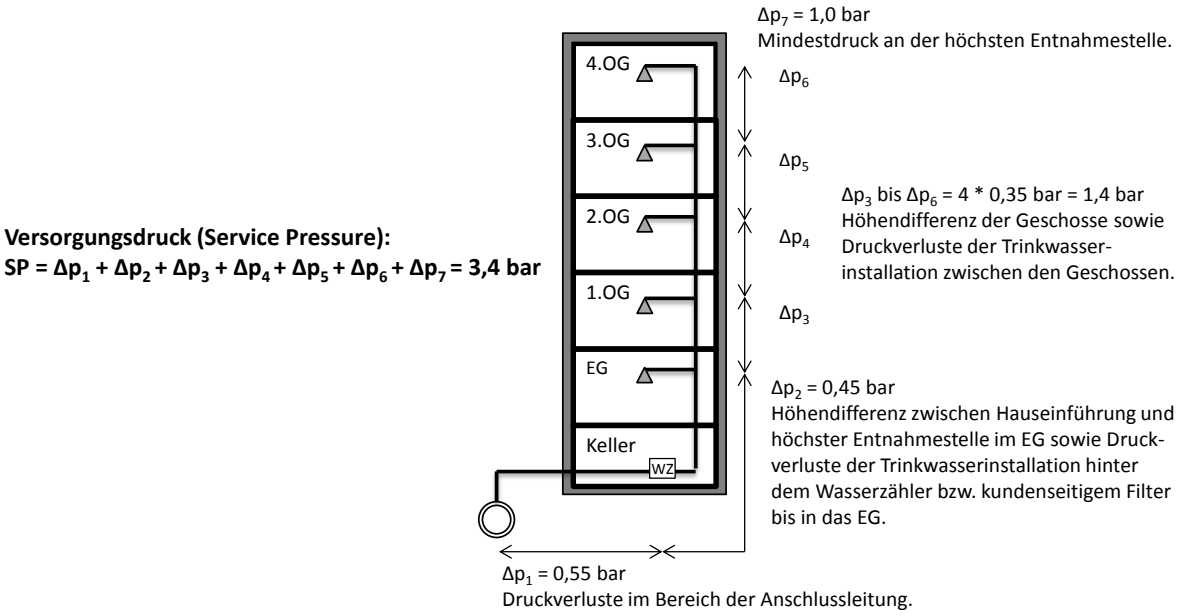


Abbildung 89: Zusammensetzung der Druckverluste der Anschlussleitung und Trinkwasserinstallation für ein unterkellertes Gebäude bis zum 4.Obergeschoss unter Voraussetzung eines Mindest-Versorgungsdrucks basierend auf DVGW, 2015. Darstellung: FiW

Global gesehen stellen Wasserverluste in der Trinkwasserversorgung eines der wesentlichen Probleme zur Sicherstellung einer permanenten Versorgung dar (Gangl und Dietz, 2008). Die durch Wasserverluste zusätzlich aufzubringende Pumpenergie und die damit einhergehenden Kosten sind jedoch größtenteils vermeidbar. Abbildung 90 zeigt den durchschnittlichen Wasserverlust in Deutschland. Dieser beträgt rd. 9 % (destatis, 2015). Mit einem Zielwert des Wasserverlusts von 5 % (Hensel, 2017; SMUL, 2008) können im Durchschnitt 4 % der geförderten Wassermenge eingespart werden, wodurch vereinfacht unter Annahme linearer Energiebedarfsfunktionen über die gesamte Wasserversorgungskette hinweg ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 4 % resultiert.

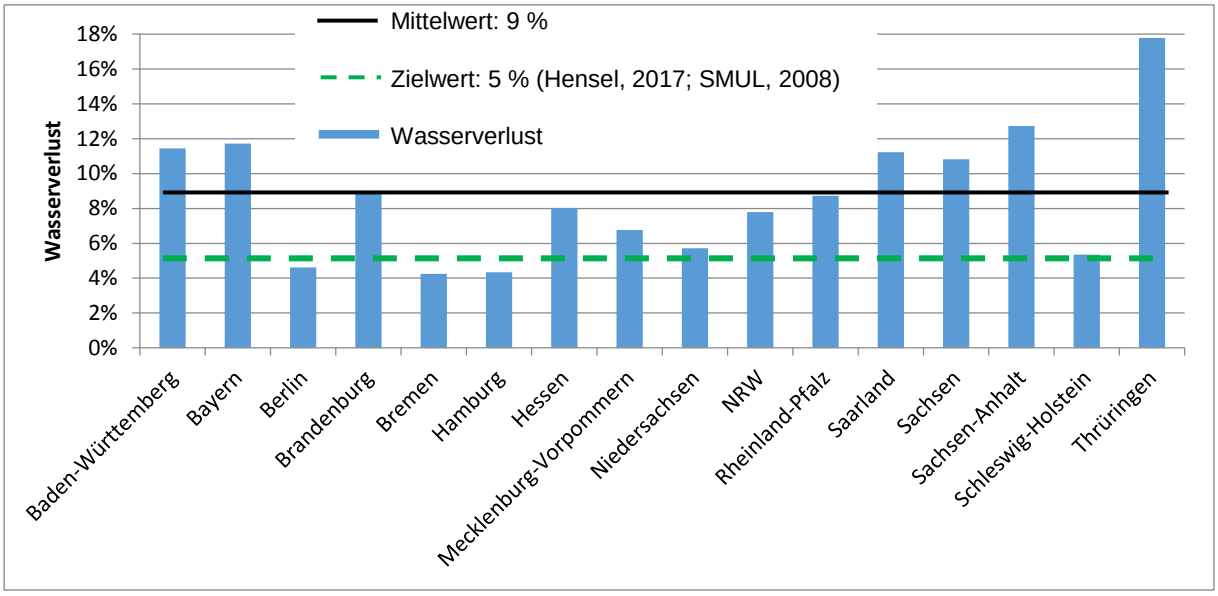


Abbildung 90: Bundesweiter Wasserlust basierend auf destatis, 2015 und Löwen, 2017

Zusammenfassend sind die abgeschätzten theoretischen Energieeinsparpotenziale in Tabelle 29 dargestellt. Als erste Aufstellung sind zwei Szenarien (minimales und maximales Energieeinsparpotenzial) abgebildet, welche für das jeweilige Strukturmerkmal die Bandbreite des Energieeinsparpotenzials repräsentiert.

Tabelle 29: Theoretische Energieeinsparpotenziale in der bundesweiten Wasserverteilung

Strukturmerkmal	Theoretische Energieeinsparpotenziale Wasserverteilung (P)	
	Min.	Max.
Druckzone	1 %	60 %
Pumpen	5 %	35 %
Versorgungsdruck	5 %	40 %
Wasserverlust	1 %	13 %

Nachfolgend wird die Berechnung des szenariospezifischen Energieeinsparpotenzials erläutert. Basierend auf Formel [4] wird das strukturmerkmalspezifische Energieeinsparpotenzial durch die Differenz zwischen bisherigem und neuem Energiebedarf im Verhältnis zum bisherigen Energiebedarf ermittelt. Die theoretischen Energieeinsparpotenziale (P_i) werden als Dezimalzahl eingesetzt.

Berechnung des strukturmerkmalspezifischen Energieeinsparpotenzials basierend auf (Binder, 2012) zur Berechnung von Wirkungsgraden (Löwen, 2017):

$$\mathrm{EE_{Pot_i}} = \frac{E_{Bedarf,bisher} - E_{Bedarf,neu}}{E_{Bedarf,bisher}} = 1 - \frac{E_{Bedarf,neu}}{E_{Bedarf,bisher}} = 1 - \mathrm{P_i}$$

[4]

Anschließend wird das Gesamtenergieeinsparpotenzial des Szenarios basierend auf Formel [5] berechnet. Anlehnend an die Berechnung des Gesamtwirkungsgrad verketteter Teilsysteme resultiert das Gesamtenergieeinsparpotenzial ($EE_{Pot,ges}$) aus der Multiplikation der strukturmerkmalspezifischen Energieeinsparpotenziale ($EE_{Pot,i}$).

Berechnung des resultierenden gesamten Energieeinsparpotenzials basierend auf (Binder, 2012) zur Berechnung des Gesamtwirkungsgrad verketteter Teilsysteme (Löwen, 2017):

$$\mathrm{EE_{Pot,ges}} = \left(1 - \mathrm{EE}_{Pot,i_1} * \ldots * \mathrm{EE_{Pot,i_n}}\right) * 100$$

[5]

Im Weiteren werden kurz die Unterschiede der einzelnen Szenarien sowie das technisch mögliche Energieeinsparpotenzial beschrieben. Die Bandbreite des theoretischen Energieeinsparpotenzials beläuft sich auf 11 bis 81%. Da die energetische Optimierung eines einzelnen Strukturmerkmals auch das Energieeinsparpotenzial eines anderen Strukturmerkmals (in Teilen) heben kann, werden die Annahmen zu den einzelnen Szenarien nachfolgend kurz erläutert.

Szenario: minimales Energieeinsparpotenzial

Alle in Tabelle 29 genannten Energieeinsparpotenziale können in minimalem Umfang ausgeschöpft werden. Daraus resultierend wurde ein Gesamtenergieeinsparpotenzial von 11 % ermittelt.

Szenario: mittleres Energieeinsparpotenzial

Im Bereich der Pumpen können Frequenzumrichter nachgerüstet oder der aktuelle Pumpenbestand saniert bzw. durch eine hocheffiziente Pumpe modernisiert werden. Für die Druckzonen wird eine detaillierte Untersuchung und Optimierung durchgeführt. Das zusätzliche Potenzial einer Reduzierung des Versorgungsdrucks verringert sich hierdurch und wird nicht mehr berücksichtigt. Das Gesamtenergieeinsparpotenzial beläuft sich auf 32 %.

Szenario: maximales Energieeinsparpotenzial

Ein Energieeinsparpotenzial von 60 % durch die Druckzonenoptimierung stellt kein flächendeckendes Potenzial, sondern vielmehr eine Ausnahme dar, welches bei größeren Versorgungsgebieten unter bestimmten Rahmenbedingungen auf einzelne Versorgungszonen angewandt werden kann. Bei kleineren WVU muss aufgrund topographischer Gegebenheiten eine entsprechend größere Druckdifferenz vorliegen, damit ein Energieeinsparpotenzial in ähnlicher Größenordnung realistisch ist. Das Potenzial der Reduzierung des Versorgungsdrucks verringert sich hierdurch und wird nur zur Hälfte berücksichtigt. Unter diesen Annahmen kann ein Gesamtenergieeinsparpotenzial von 81 % abgeschätzt werden.

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen strukturmerkmalspezifischen Energieeinsparpotenziale liegen die theoretischen Gesamtpotenziale in der bundesweiten Wasserverteilung somit zwischen 11 und 81 %.

Technisches Energieeinsparpotenzial

Diese Szenarien bilden in erster Linie Energieeinsparpotenziale aus Einzelfallbetrachtungen ab. Zur Ableitung des technisch möglichen Energieeinsparpotenzials liegt der Schwerpunkt auf flächendeckenden Energieeinsparpotenzialen. Hierzu müssen weitere Restriktionen, wie Häufigkeitsverteilungen einzelner Strukturmerkmale, berücksichtigt werden.

Basierend auf den in der Praxis erprobten ENERWA-Projektergebnissen resultiert für die Druckzonenoptimierung ein mittleres Energieeinsparpotenzial von durchschnittlich 15 % (Hensel, 2017).

Durch eine Reduzierung des Versorgungsdruckes zwischen 0,5 und 1 bar (Hensel, 2017; Rammler 2017) lässt sich ein Energieeinsparpotenzial von 7,7 % ableiten (Löwen, 2017). Auf Grund der Druckzonenoptimierung kann dieses Potenzial bereits in einzelnen Teilen der Versorgungsgebiete gehoben worden sein. Bei größeren WVU mit mehreren Druckzonen, lässt sich jedoch vermutlich weiterhin ein Energieeinsparpotenzial durch die Druckreduzierung erzielen. Bei kleineren WVU mit einer geringen Anzahl an Druckzonen kann nur eins der beiden Potenziale voll ausgeschöpft werden. Da mehr als 80 % des Reinwassers von WVU mit einer Reinwasserabgabe > 1 Mio. m³ bereitgestellt wird (destatis, 2015), wird das Energieeinsparpotenzial durch die Anpassung des Versorgungsdrucks mit dem Faktor 0,8 multipliziert.

Energieeinsparung durch die Nachrüstung von Frequenzumrichtern oder den Einbau hocheffizienter Motoren sind bereits länger bekannte Optimierungsmaßnahmen. Der Anteil der noch verbleibenden drehzahlstarren Pumpen bzw. älterer Motoren wird mit 25 % angenommen (Hensel, 2017). Plath (2014) nennt weitere Potenziale zur Wirkungsgradoptimierung (Laufrad polieren, Beschichtung des Pumpengehäuses) von bis zu 5 %. Basierend auf diesen Anteilen

wird für die Pumpen insgesamt ein Energieeinsparpotenzial von 13,8 % (35 % * 0,25 + 5 %) abgeschätzt.

Auf Basis eines Zielwertes von 5% liegt das mittlere Energieeinsparpotenzial beim Wasserverlust bundesweit bei etwa 4 % (s. oben).

Insgesamt konnten unter Anwendung der Formeln [4] und [5] technisch mögliche Energieeinsparpotenziale bis zu 33,6 % abgeleitet werden, vgl. Tabelle 30.

Tabelle 30: Technisches Energieeinsparpotenzial in der bundesweiten Wasserverteilung

Strukturmerkmal	**Technische Energieeinsparpotenziale in der Wasserverteilung (P)**
Druckzone	15 %
Pumpen	13,8 %
Versorgungsdruck	6,1 %
Wasserverlust	4 %
Gesamt	**33,6 %**

Angesichts des durchschnittlichen Energiebedarfs von 0,265 kWh/m³ in der bundesweiten Wasserverteilung resultiert bei einer Reinwassermenge von 4,08 Mrd. m³/a (Stand 2013) (destatis, 2015) ein Gesamtenergiebedarf der Wasserverteilung von rd. 1,08 TWh/a. Unter der Annahme des technischen Energieeinsparpotenzials von 33,6 % würde der Energiebedarf der Wasserverteilung um 0,36 TWh/a auf 0,72 TWh/a reduziert werden können. Unter Berücksichtigung von 3.247 kWh/Haushalt (destatis, o.J.) entspricht die Reduktion von 0,36 TWh/a mehr als 110.000 Haushalten. Mit durchschnittlich 2 Personen/Haushalt (destatis, 2017; destatis, o.J.) ist die Energieeinsparung vergleichbar mit dem Stromverbrauch einer Großstadt mit über 220.000 Einwohnern.

Zur Abschätzung der für den Wasserversorger individuell möglichen Energieeinsparungen stellt Abbildung 91 basierend auf dem bisherigen Energiebedarf der Wasserverteilung (bzw. der hochgerechneten Reinwasserabgabe) die ermittelten, verminderten Energiebedarfe der Wasserverteilung für die drei Szenarien dar.

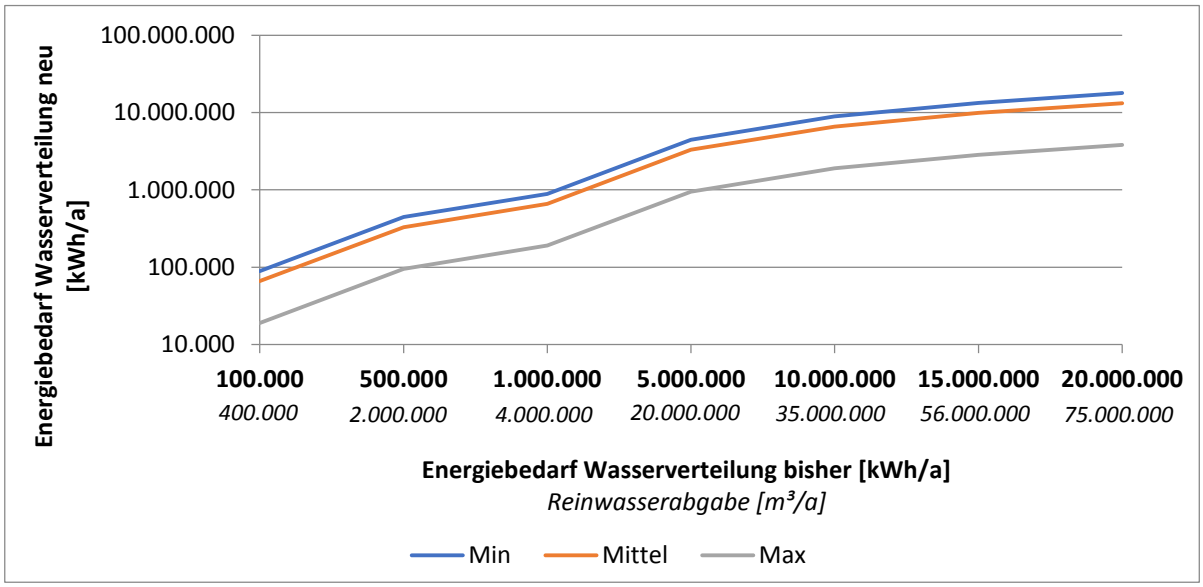


Abbildung 91: Reduktion des Energiebedarfs der Wasserverteilung auf Basis der Szenarien (minimale, mittlere und maximale Energieeinsparpotenziale); (Löwen, 2017)

II.6 Weiterführende Untersuchungen in einem kleinen, geschlossenen Wasserversorgungsgebiet

II.6.1 Beschreibung des Wasserversorgungsgebietes

Zur Ermittlung des Kosteneinsparpotenzials durch eine Dynamisierung der Trinkwasserversorgung unter Berücksichtigung des variablen Spotmarktpreises und der atypischen Netznutzung wurde von IWW und der RZVN Wehr GmbH eine Optimierungsrechnung für ein weiteres kleines Trinkwasserversorgungsgebiet durchgeführt. Die einzelnen Komponenten dieses Wasserversorgungsgebiets sind im Einzelnen:

- 2 Anlagen zur Grundwassergewinnung
    - Gewinnungsanlage 1 mit 11 Brunnen
    - Gewinnungsanlage 2 mit 5 Brunnen
- 2 Wasseraufbereitungsanlagen mit integrierten Trinkwasserspeicherbehältern und Reinwasserpumpanlagen
    - Wasserwerk (WW) 1 (Speicher: 2 x 750 m³)
    - Wasserwerk (WW) 2 (Speicher: 2 x 350 m³)
        - Zwischenpumpwerk mit 3 Pumpen
- 1 Versorgungsnetz mit 2 Speicherbehältern
    - Hochbehälter 1 (2 x 1.500 m³)
    - Hochbehälter 2 (1 x 10.000 m³)

II.6.2 Energieanalyse in den Wasserwerken

In beiden Wasserwerken sind vor allem Brunnenpumpen, Zwischenpumpen und Reinwasserpumpen zur Wasserförderung wesentlich am Gesamtenergiebedarf beteiligt. Andere energieintensive Aufbereitungsverfahren, wie z. B. die Ozonung, sind bei der bereits guten Qualität des Grundwassers nicht notwendig. Der Energiebedarf inkl. Trinkwasserpumpen lag für das WW 1 im Jahr 2016 bei 952.854 kWh und für das WW 2 bei 980.759 kWh.

Die Energie zur Förderung durch die Aufbereitungsanlage wird zurzeit im WW 1 vollständig von starren Brunnenpumpen aufgebracht (Abbildung 92). Der Energieanteil der Brunnenpumpen für die Wasseraufbereitung liegt bei ca. 35 %. Nach Eintritt des Wassers ins Werksgebäude erfolgt die Aufbereitung unterbrechungsfrei über einen Oxidator zur Belüftung, durch zwei in Reihe angeordnete Filterstufen zur Abtrennung von Eisen und Mangan sowie durch einen Verweilzeitbehälter mit integrierter Natronlaugedosierung zur Entsäuerung bis in den Trinkwasserspeicher.

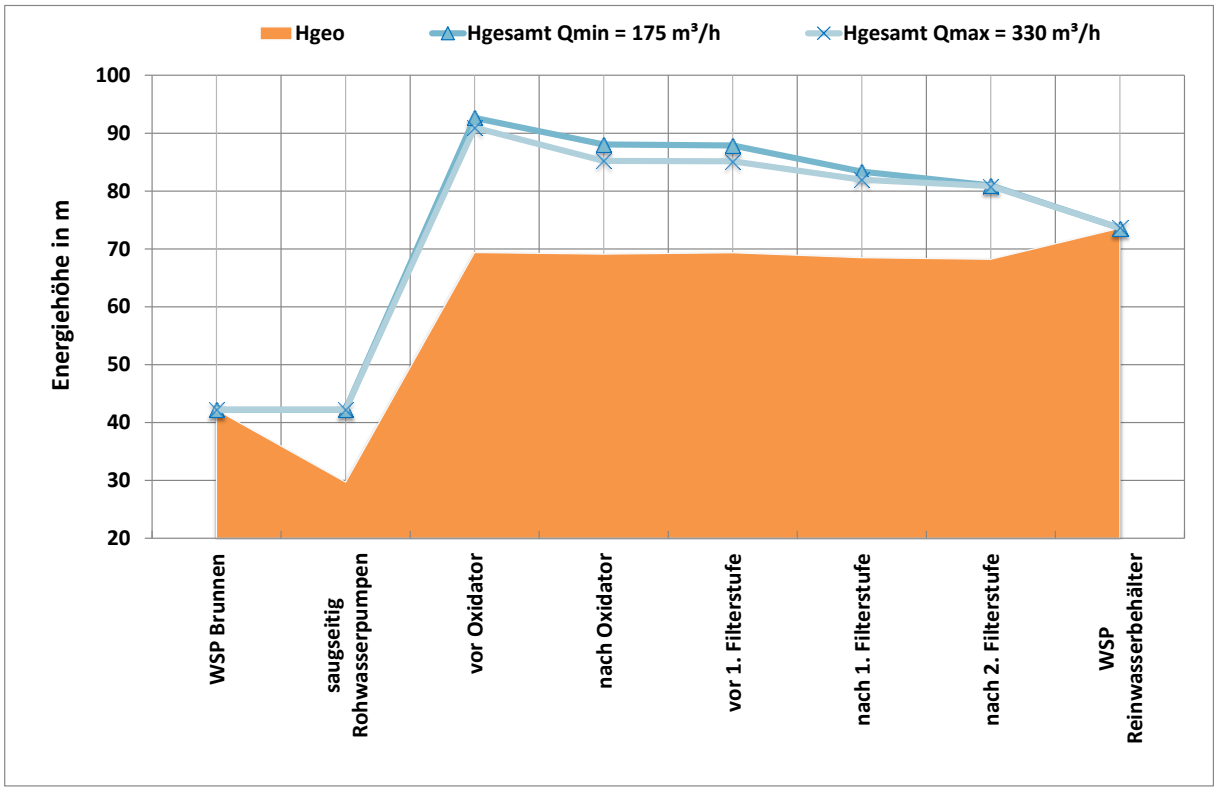


Abbildung 92: Energielinien für das WW 1; H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel

Im WW 2 werden ca. 37 % des Energiebedarfs der Grundwasserpumpen für die Förderung des Wassers durch die Aufbereitungsanlage benötigt (Abbildung 93). Im Wasserwerk kommt nach der physikalischen Entsäuerung (erste Aufbereitungsstufe) zusätzlich ein Zwischenpumpwerk zum Einsatz, welches die Aufbereitungsleistung vorgibt. Dieses fördert das Wasser durch die unter einem Überdruck stehenden Schnellentcarbonisierungsreaktoren (SER) und die nachfolgenden vier Druckfilter. Ein kleiner Teil des Überdrucks wird durch Rohrreibungsverluste abgebaut. Der Großteil des Druckverlusts wird jedoch durch das In- Schwebe-halten des Sandes bzw. der sich ausbildenden Pellets in den Reaktoren verursacht. Der Druckverlust durch das Filtermaterial der Druckfilter lag je nach Aufbereitungsleistung im Bereich von ca. 0,1 und 0,7 mWS bei Filtergeschwindigkeiten zwischen 3,1 und 9,3 m/h. Die Gleichlaufregelung der Filter wird über Regelklappen im Ablauf der einzelnen Filter realisiert.

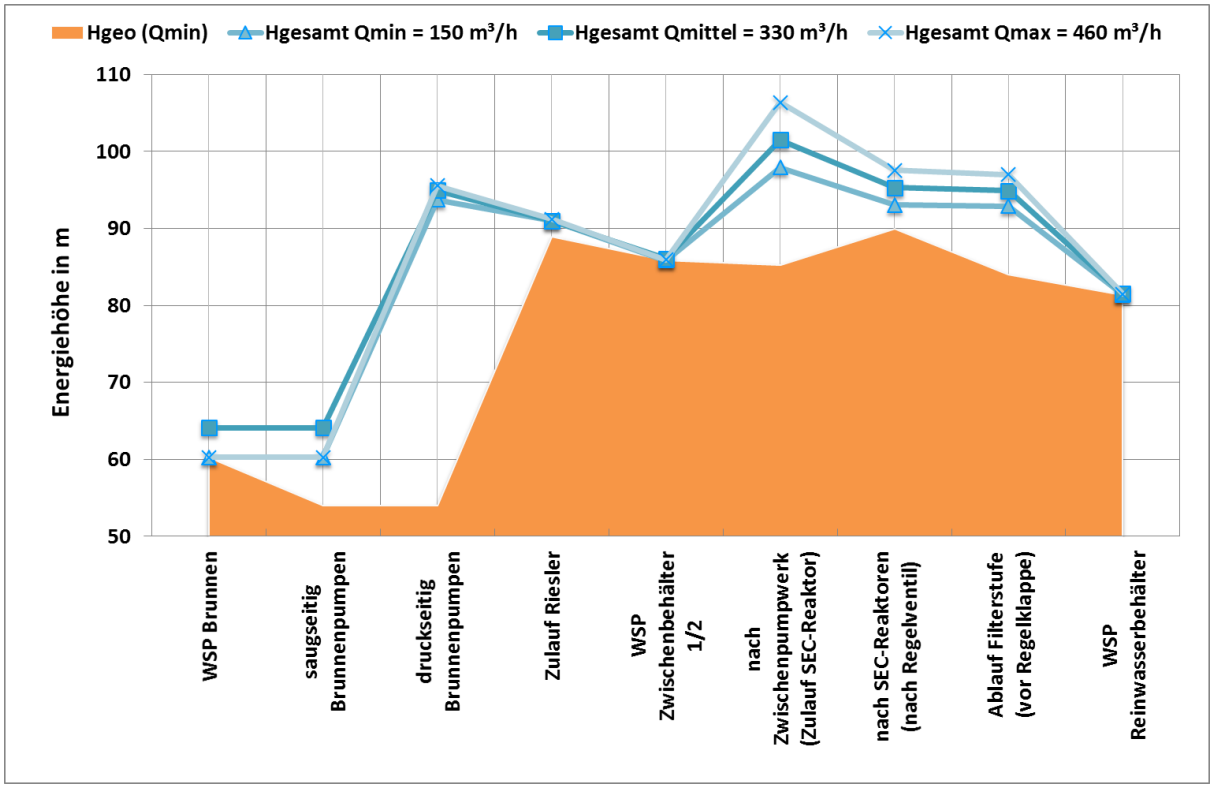


Abbildung 93: Energielinien für das WW 2; H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel

Die größten Energieeinsparpotenziale sind in den beiden Wasserwerken vor allem bei den Pumpen zu finden. Vom Betreiber wurde zur energetischen Optimierung kürzlich die Sanierung der ca. 5 km langen Rohwasserleitung von den Entnahmebrunnen bis zum WW 1 vorgenommen, wodurch Rohrreibungsverluste, die über die Jahre aufgrund von Inkrustationen zugenommen hatten, verringert werden konnten. In einer nächsten Maßnahme erfolgt ein Ersatz der alten Brunnenpumpen durch neue, drehzahlgeregelte und effizientere, um den Energiebedarf der Wasserförderung zu senken. Im nächsten Schritt sollte der Fokus dann auf einen möglichst effizienten Betrieb gelegt werden. Folgende Punkte sollten im Allgemeinen zur Verringerung des Energiebedarfs berücksichtigt werden:

- Da die nötige Förderhöhe der Brunnenpumpen im Wesentlichen durch die Höhe des Grundwasserspiegels vorgegeben wird, sollte - sofern es die Entnahmeerlaubnis zulässt - darauf geachtet werden, dass diejenigen Brunnen in Betrieb sind, die zu einer Minimierung der Förderhöhe führen.
- Im WW 2 wird der Vordruck des Zwischenpumpwerks vom Füllstand des Zwischenbehälters vorgegeben. Somit ist es energiesparender, einen möglichst hohen Füllstand zu gewährleisten, so dass die Pumpen immer mit dem maximalen Vordruck betrieben werden.

- Bei höheren Fließgeschwindigkeiten erhöht sich durch die Rohrreibungswiderstände der Energiebedarf der Wasserförderung. Daher ist aus energetischer Sicht eine statische Wasserförderung am effizientesten.

Ein weiteres Optimierungspotenzial wurde bei den Rieslern des WW 2 identifiziert. Die Ergebnisse aus den Messungen zur Leistungsaufnahme und zur Wasserqualität im Ablauf zeigen, dass bei allen drei Messdurchgängen die Gebläse des Rieslers 2 einen durchgängig höheren spezifischen Energiebedarf und gleichzeitig eine etwas schlechtere Entsäuerungsleistung aufwiesen als Riesler 1 (Tabelle 31).

Tabelle 31: Energiebedarf und Basenkapazität (KB) bis pH 8,2 bei den Rieslern des WW 2

	150 m³/h		**330 m³/h**		**460 m³/h**	
	spez. Energiebedarf	KB 8,2	spez. Energiebedarf	KB 8,2	spez. Energiebedarf	KB 8,2
Einheit	kWh/m³	mmol/l	kWh/m³	mmol/l	kWh/m³	mmol/l
Riesler 1	0,0014	0,35	0,0021	0,43	0,0018	0,46
Riesler 2	0,0037	0,38	0,0033	0,48	0,0026	0,57

II.6.3 Dynamisierung des Anlagenbetriebes

Zur Untersuchung der Dynamisierung des Anlagenbetriebes wurden Messungen bei unterschiedlichen Anlagendurchsätzen durchgeführt. Die Ergebnisse der elektrischen Leistungsaufnahme an den Brunnen- und Zwischenpumpen zeigten für beide Gewinnungs- und Aufbereitungsanlagen, dass bei höherer Last eine signifikante Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs von bis zu 15 % vorliegt. Dieser Anstieg erfolgt im Wesentlichen durch den dynamischen Energiebedarfsanteil (siehe Kapitel II.4.3.4). Dazu zählt die Zunahme der Strömungswiderstände durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten in den Rohwasserleitungen beim Hinzuschalten von Brunnenpumpen. Hinzu kommt, dass eine signifikante Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen durch hohe Förderströme erfolgen kann, wodurch zusätzlich noch eine Veränderung der statischen Förderhöhe berücksichtigt werden muss.

Untersuchungen zum Einfluss der Dynamisierung auf die Wasserqualität zeigten, dass in den beiden Wasserwerken bei Umschaltvorgängen auf höhere Aufbereitungsleistungen mit Trübstoffausträgen der einzelnen Filter zu rechnen ist.

Im WW 1 zeigten sich bei Umschaltvorgängen in der ersten Filterstufe massive kurzzeitige Trübungsanstiege bis ca. 17 FNU. Diese Austräge der beiden Filter wurden jedoch nahezu vollständig durch die vier Filter der 2. Stufe abgefangen.

Im WW 2 lag das Maximum der Ablauftrübung bei Umschaltvorgängen bei 0,5 FNU, welche sich dann über einen Zeitraum von drei bis vier Stunden wieder dem Ausgangsniveau annäherte. Im Sammelfiltrat „verschwimmt“ jedoch ein Teil der Trübstoffausträge einzelner Filter, wodurch das Maximum hier bei ca. 0,2 FNU lag.

Je nach Beladungszustand der Filter kann vor allem bei Anfahrvorgängen nach Stillstand der Aufbereitungsanlage die Trübung im Filtrat ansteigen. In solchen Situationen sind ein langsames Anfahren der Pumpen und ggf. ein häufigeres Spülen der Filter empfehlenswert.

Bei der Schnellentcarbonisierung im WW 2 stellte sich heraus, dass mit zunehmender Aufbereitungsleistung die Enthärtungsleistung abnimmt. Bei minimaler Aufbereitungsleistung von 150 m³/h liegt das Wasser im weichen Härtebereich (7,3°dH). Bei Erhöhung der Aufbereitungsleistung auf 330 bzw. 460 m³/h liegt die Wasserhärte dann nur noch im mittleren Härtebereich von 8,3 bzw. 10,0°dH. Die Aufzeichnungen aus dem Prozessleitsystem zeigten, dass die Kalkmilchdosierung nicht proportional zur Durchsatzleistung der einzelnen Reaktoren dosiert wird, sondern mit zunehmender Aufbereitungsleistung spezifisch gesehen abnimmt (Tabelle 32). Es handelt sich somit nicht um einen Effekt der Dynamisierung, sondern um eine Inkonsistenz bei der Regelung des spezifischen Kalkmilchzusatzes.

Tabelle 32: Prozessdaten zu den Schnellentcarbonisierungsreaktoren (SER) im WW 2 mit Angaben zum Härtebereich (Laborergebnisse); Q_{min} = 175 m³/h; Q_{mittel} = 330 m³/h; Q_{max} = 460 m³/h

		Durchsatz-leistung	Kalkmilch-Dosierung	spez. Kalkmilch-Dosierung	CO2-Dosierung	spez. CO2-Dosierung	pH-Wert im Ablauf	Härtebereich
	Einheit	[m³/h]	[l/h]	[l/m³]	[kg/h]	[g/m³]	[-]	[°dH]
Qmin	SER 1	-	-	-	-	-	-	-
	SER 2	149	570	3,8	2,4	16,0	9,2	7,1
	SER 1+2	**149**	**570**	**3,8**	-	-	-	7,1
Qmittel	SER 1	169	648	3,8	2,7	15,9	9,4	7,3
	SER 2	170	498	2,9	2,5	14,6	8,6	9,4
	SER 1+2	**338**	**1146**	**3,4**	-	-	-	8,3
Qmax	SER 1	231	670	2,9	3,7	16,0	8,6	10,3
	SER 2	232	690	3,0	3,7	15,9	8,5	10,1
	SER 1+2	**463**	**1360**	**2,9**	-	-	-	10,0

Zur Bestimmung des Kosteneinsparpotenzials des betrachteten Wasserversorgungsgebiets durch Dynamisierung wurden von IWW für die wesentlichen elektrischen Verbraucher der Wassergewinnung und –aufbereitung zunächst Näherungsfunktionen des spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit zur Aufbereitungsleistung bestimmt. Dafür wurde Messreihen zur elektrischen Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen Durchsätzen aufgenommen (Tabelle

45 im Anhang). Der Energiebedarf dieses Versorgungsgebietes wird zu ca. 55 % durch Gewinnung/Aufbereitung und zu ca. 45 % durch die Wasserverteilung verursacht. Bei Modellierung der kostenoptimierten Fahrweise wurde zunächst der Betrieb der Trinkwasserpumpen unter Berücksichtigung der großen Speichervolumina der Hochbehälter dynamisiert. Im Anschluss wurde dann unter Berücksichtigung des Speichervolumens des Reinwasserbehälters im Wasserwerk die Modellierung einer optimierten Betriebsweise für die Wasseraufbereitung vorgenommen. Beide Optimierungen erfolgten in Anlehnung an die Spotmarktpreise und die Hochlastzeitfenster der atypischen Netznutzung (www.westnetz.de) aus dem Jahr 2015. Es zeigte sich bereits bei der Modellierung, dass die größte Limitierung für die Wasseraufbereitung die Größe der Reinwasserbehälter im Wasserwerk ist. Zeiten niedriger Strompreise konnten nicht vollständig ausgenutzt werden, da die Unterschiede zwischen dem Aufbereitungs-Volumenstrom und dem Förderstrom der Reinwasserpumpen nicht durch den vergleichsweise kleinen Reinwasserbehälters ausgeglichen werden konnten. Es war deshalb temporär eine Abschaltung der Aufbereitungsanlage notwendig. Vor allem für die Jahreszeiten Herbst und Winter war die Modellierung nicht einfach, da neben den Niedrig- und Hochpreiszeiten zusätzlich auch die Hochlastzeitfenster der atypischen Netznutzung beachtet werden mussten. In diesen wurde die Aufbereitung von Wasser vermieden, sodass die Aufbereitungsanlage in den Stunden zuvor die Reinwasserbehälter füllen musste. Dadurch war die Vermeidung der Aufbereitung zu Zeiten höherer Strompreise nicht immer möglich und die Aufbereitung gezwungen die Füllung des Reinwasserbehälters durchzuführen.

Bei der Modellierung der dynamisierten Fahrweise wurden häufig Stillstandzeiten der Wasseraufbereitungsanlage implementiert. Die statischen Verbraucher, die in erster Linie der Gebäudetechnik zugeordnet werden können, verursachten in diesen Zeiträumen den einzigen Stromverbrauch. Bei der atypischen Netznutzung ist darauf zu achten, dass in den Hochlastzeitfenstern die maximale elektrische Jahreshöchstleistung möglichst niedrig gehalten wird. Bei derart kleinen Speicherbehältern, wie sie in den untersuchten Wasserwerken vorliegen, ist der Parallelbetrieb von Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung aufgrund der Einfachheit der Speicherbehälterbewirtschaftung wünschenswert. Allerdings erfordert dies eine möglichst genaue Abstimmung der Pumpanlagen für Rohwasser, Aufbereitung (WW 2) und Reinwasser zur Optimierung des Gesamt-Energiebedarfs.

Zur Bestimmung der gesamten Energiekosten (inkl. Netznutzungsentgelt) für Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung war eine Erweiterung bzw. Anpassung des Berechnungswerkzeugs notwendig. Dadurch konnte die von RZVN ermittelte kostenoptimierte Ganglinie der Reinwasserpumpen, welche ausschnittsweise aus Abbildung 94 hervorgeht, mit der kostenoptimierten Ganglinie der Gewinnungs- und Aufbereitungsanlage von IWW zusammengeführt werden. So

war es dann möglich, die Gesamtenergiekosten für das betrachtete Wasserversorgungsgebiet zu bestimmen.

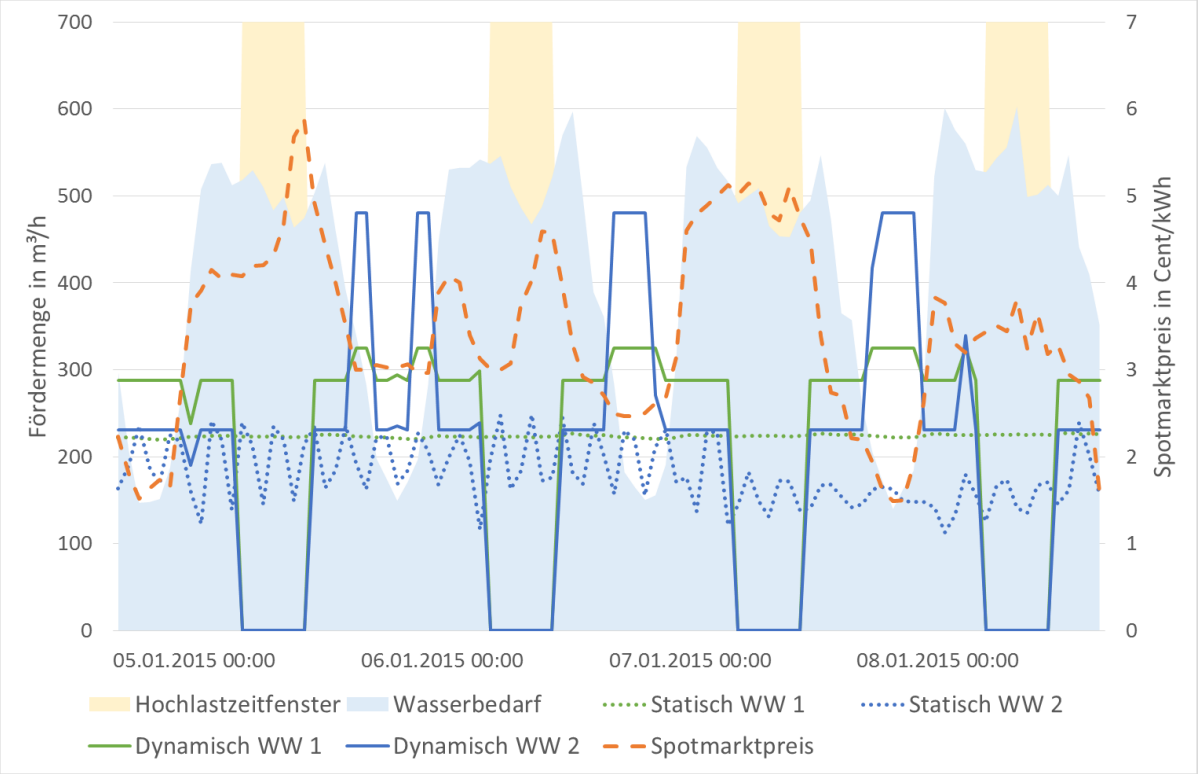


Abbildung 94: Statische und dynamische Fahrweise der Wasserwerke (Reinwasserpumpen) für den Zeitraum 05.01. - 08.01.

In den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 33 bis Tabelle 38) sind die Ergebnisse der Optimierungsrechnung beider Wasserwerke (getrennt und in Summe) für die statische konventionelle und die dynamisierte Fahrweise aufgeführt. Aus den Berechnungen für die Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Verteilungsanlagen geht hervor, dass die Dynamisierung unter Berücksichtigung der atypischen Netznutzung die spezifischen Gesamtenergiekosten um ca. 10,5 % senken kann. Diese Einsparung ist vor allem durch die Einsparung beim Netznutzungsentgelt zu erklären. Im WW 1 konnte dieses um 53 %, im WW 2 sogar um 73 % durch Meidung des Betriebs der Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Verteilungsanlagen in den Hochlastzeitfenstern reduziert werden. Im Mittel beträgt die Einsparung für beide Wasserwerke 65 % (Tabelle 37 und Tabelle 38). Durch die eingebrachte Dynamik entsteht in der Wassergewinnung und -aufbereitung für das WW 2 ein Mehrbedarf an Energie (siehe oben), der die Einsparung durch die Ausnutzung von Zeiten niedriger Strompreise übersteigt. Dadurch steigen die nur vom Spotmarktpreis abhängigen Energiekosten um ca. 2,1 %. Für das WW 1 zeigt sich zwar ebenfalls ein Mehrbedarf an Energie für Gewinnung und Aufbereitung, der aber geringer ausfällt, sodass durch die Ausnutzung der Dynamik des Spotmarktpreises eine Einsparung von ca. 4,9 % erzielt werden konnte. Es wurde für das Betrachtungsjahr 2015 eine Gesamteinsparung

von ca. 25.922 € berechnet. Diese ist mit einem Anteil von 86 % auf das Netznutzungsentgelt zurückzuführen. Somit konnten 3.501 € durch Ausnutzung der Dynamik der Spotmarktpreise eingespart werden. Durch den Mehrbedarf an Energie für Gewinnung und Aufbereitung wurden hier Mehrkosten von ca. 1.060 € verursacht.

Die Ergebnisse zur Dynamisierung decken sich weitgehend mit denen der anderen untersuchten Wassernetze (RWW, AV). In allen Fällen konnte das Haupteinsparpotenzial, welches in einem Bereich von ca. 20 – 25 % liegt, durch die Reduktion der Netzentgelte im Rahmen der atypischen Netznutzung erreicht werden. Das Einsparpotenzial bei den reinen Energiekosten (Spotmarktbezug) liegt mit ca. 5 % ebenfalls in der gleichen Größenordnung wie bei den Netzen von RWW und AV.

Der negative Effekt zunehmender Energiekosten (Spotmarktbezug ohne Netzentgelte) lässt sich auf die zweistufige Vorgehensweise zurückführen. Da bei der Wasserverteilung (im Gegensatz Gewinnung und Aufbereitung) kein Anstieg des Pumpenergiebedarfs durch die Dynamisierung zu beobachten ist (sehr geringe Reibungsdruckverluste), errechnet die Optimierung eine sehr stark an den Spotmarktpreisen und den Hochlastzeitfenstern orientierte Fahrweise (Abbildung 94), welche zu kurzen Förderspitzen führt. Diese ziehen den höheren Energiebedarf auf Seiten der Gewinnung und Aufbereitung nach sich. Bei einer einstufigen Gesamtoptimierung des Wasserversorgungssystems würde dieser Effekt nicht auftreten, allerdings ist eine solche (theoretische) Gesamtoptimierung aufgrund der komplexen nichtlinearen Beziehungen in der Wasseraufbereitung derzeit nicht realisierbar.

Am Beispiel des hier betrachteten Wasserversorgers wurden die erarbeiteten Simulations- und Optimierungsverfahren neben den bisher untersuchten Talsperrensystemen erfolgreich an einer aus Grundwasser gespeisten Wasserversorgung angewendet. Die Einsparpotenziale lagen dabei in einer vergleichbaren Größenordnung, wie bei den aus Talsperren gespeisten Trinkwassernetzen. Die Dynamisierung ist daher aus finanzieller Sicht lediglich zur Reduktion der Netzentgelte sinnvoll. Die geringfügigen Einsparmöglichkeiten bei einer an den Spotmarktpreis angelehnten Fahrweise werden größtenteils durch einen höheren spezifischen Energiebedarf in der Wasseraufbereitung aufgezehrt.

Tabelle 33: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 1; TW = Trinkwasser

Aufbereitungsmenge: 2.020.547 m³/a
Spülwassermenge: 26.524 m³/a
Trinkwassermenge: 1.994.023 m³/a

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	Jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	952.854	0,478	100%	556	279	112.712	5,65				
WG+WA	498.217	0,250	52%	291	146	58.933	2,96				
Wassergewinnung (WG)	286.186	0,144	30%	167	84	33.853	1,70				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	175.639	0,088	18%	102	51	-	-	12.692	0,64	125.403	6,29
Wasseraufbereitung (WA)	212.031	0,106	22%	124	62	25.081	1,26				
Wasserverteilung (WV)	454.637	0,228	48%	265	133	53.778	2,70				

Tabelle 34: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 1; TW = Trinkwasser

Aufbereitungsmenge: 2.020.304 m³/a
Spülwassermenge: 26.524 m³/a
Trinkwassermenge: 1.993.780 m³/a

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	Jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	933.787	0,468	100%	545	273	107.126	5,37				
WG+WA	506.672	0,254	54%	296	148	57.945	2,91				
Wassergewinnung (WG)	292.769	0,147	31%	171	86	33.430	1,68				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	179.679	0,090	19%	105	53	-	-	5.968	0,30	113.094	5,67
Wasseraufbereitung (WA)	213.903	0,107	23%	125	63	24.515	1,23				
Wasserverteilung (WV)	427.115	0,214	46%	249	125	49.181	2,47				

Tabelle 35: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 2; TW = Trinkwasser

Aufbereitungsmenge: 1.662.624 m³/a
Spülwassermenge: 20.148 m³/a
Trinkwassermenge: 1.642.476 m³/a

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	850.383	0,518	100%	496	302	100.591	6,12				
WG+WA	500.535	0,305	59%	292	178	59.208	3,60				
Wassergewinnung (WG)	127.644	0,078	15%	74	45	15.099	0,92				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	131.376	0,080	15%	77	47	-	-	21.573	1,31	122.164	7,44
Wasseraufbereitung (WA)	372.891	0,227	44%	218	132	44.109	2,69				
Wasserverteilung (WV)	349.847	0,213	41%	204	124	41.383	2,52				

Tabelle 36: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 2; TW = Trinkwasser

Aufbereitungsmenge: 1.662.441 m³/a
Spülwassermenge: 20.148 m³/a
Trinkwassermenge: 1.642.293 m³/a

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	876.522	0,534	100%	511	311	102.676	6,25				
WG+WA	529.646	0,323	60%	309	188	61.256	3,73				
Wassergewinnung (WG)	121.583	0,074	14%	71	43	14.024	0,85				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	135.455	0,082	15%	79	48	-	-	5.876	0,36	108.551	6,61
Wasseraufbereitung (WA)	408.063	0,248	47%	238	145	47.232	2,88				
Wasserverteilung (WV)	346.876	0,211	40%	202	123	41.420	2,52				

Tabelle 37: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch WW 1 und WW 2; TW = Trinkwasser

Aufbereitungsmenge: 3.683.171 m³/a
Spülwassermenge: 46.672 m³/a
Trinkwassermenge: 3.636.499 m³/a

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	1.803.237	0,496	100%	1052	289	213.302	5,87				
WG+WA	998.752	0,275	55%	583	160	118.141	3,25				
Wassergewinnung (WG)	413.831	0,114	23%	241	66	48.951	1,35				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	307.015	0,084	17%	179	49	-	-	34.265	0,94	247.567	6,81
Wasseraufbereitung (WA)	584.921	0,161	32%	341	94	69.189	1,90				
Wasserverteilung (WV)	804.485	0,221	45%	469	129	95.161	2,62				

Tabelle 38: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch WW 1 und WW 2; TW = Trinkwasser

	Energie-bedarf	spez. Energie-bedarf	Anteil am Gesamt-energie-bedarf	jährl. CO2-Emissionen	spez. CO2-Emissionen	Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	spez. Energie-kosten für den Betrieb (Spotmarkt)	Netznut-zungs-entgelt	spez. Netznut-zungs-entgelt	Gesamt-energie-kosten	spez. Gesamt-energie-kosten
	kWh/a	**kWh/m³ TW**	**%**	**t CO2/a**	**g CO2/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³ TW**	**Euro**	**Cent/m³**
WG+WA+WV	1.810.309	0,498	100%	1056	290	209.802	5,77				
WG+WA	1.036.319	0,285	57%	605	166	119.201	3,28				
Wassergewinnung (WG)	414.352	0,114	23%	242	66	47.454	1,31				
abzgl. Anteil Pumpenergie für die WA	315.134	0,087	17%	184	51	-	-	11.843	0,33	221.645	6,10
Wasseraufbereitung (WA)	621.966	0,171	34%	363	100	71.747	1,97				
Wasserverteilung (WV)	773.990	0,213	43%	452	124	90.601	2,49				

II.7 Energiemanagement im Verbund - AP C

II.7.1 Beschreibung der Untersuchungen

Die Betrachtung im Verbund führt die Ergebnisse der Arbeitspakete B1, B2 und B3 zusammen und zeigt gegenseitige Abhängigkeiten und Wirkungen auf. Dazu werden die drei Bausteine Talsperre – Aufbereitung – Verteilung gemeinsam analysiert bzw. simuliert. Deshalb war es erforderlich, eine gemeinsame Simulationsplattform für alle drei Systeme zu etablieren. Dabei ist deren homogene Betrachtung entscheidend. Die Teilsysteme müssen auf einem einheitlichen Bezugssystem für Energie und Kosten aufsetzen, kopplungsfähig sein, d.h. den gleichen zeitlichen Bezug für die Simulation zu nutzen und homogene Zeitschritte für die Simulation verwenden. Ist dies nicht direkt mit der technischen Lösung aus dem jeweiligen Arbeitspaket möglich, müssen Ersatzsysteme gebildet werden.

Vor diesem Hintergrund war eine enge Kooperation mit den B-Arbeitspaketen notwendig, um

- die Konsistenz der Vorgehensweise zu sichern
- verbundfähige Modelllösungen bzw. Ersatzsysteme für eine gemeinsame Simulationsplattform zu erhalten

Die Aufstellung der gemeinsamen Simulationsplattform und die nachfolgenden Analysen erfolgten in folgenden Arbeitsschritten:

- Identifizierung der Schnittstellen und Randbedingungen zwischen den Teilsystemen.
- Integrale Analyse bzw. Simulation, „Was wäre wenn“-Analyse aller Teilsysteme nach Aufbau der Simulationsplattform.
- Ermittlung der Gesamtpotenziale und Ableitung der Übertragbarkeit auf andere Trinkwasserversorgungssysteme

II.7.1.1 Identifikation von Abhängigkeiten und Schnittstellen zwischen den Teilsystemen

Die Teilsysteme agieren miteinander. Die entscheidende Größe zwischen den Teilsystemen ist die Wassermenge und die Wasserqualität in ihrer zeitlichen Verteilung.

Teilsystem Talsperre - Aufbereitung

Während die Wassermenge ohne Einschränkung wirkt, war zuerst zu klären, welche Qualitätsparameter zwischen Talsperre und Aufbereitung von Bedeutung sind. Damit ist unmittelbar die Frage verbunden, ob eine Änderung/Dynamisierung im Abgabenmuster der Talsperre in Richtung Aufbereitung oder in Richtung Unterlauf Auswirkungen auf die Wasserqualität in der

Talsperre besitzt. Eine verminderte Wasserqualität würde die Versorgungssicherheit, die Ökologie in der Talsperre und im Unterlauf sowie die Aufbereitung negativ beeinflussen und ist folglich zu vermeiden. Ist eine verminderte Wasserqualität zu erwarten, so wäre dies eine einschränkende Randbedingung für die energetische Optimierung.

Wasserqualitätsparameter:

In Kooperation mit den Arbeitspaketen B1 und B2 wurden acht Leitparameter identifiziert, die sowohl für die Ökologie der Talsperre als auch für die Wasseraufbereitung von maßgeblicher Bedeutung sind: Wassertemperatur, TOC, Mangan, Trübung, pH-Wert, Sauerstoff, Ammonium, Phosphat.

In den Untersuchungen zur Dynamisierung der Wasserabgabe aus Talsperren im Arbeitspaket B1 ergab sich, dass selbst extreme Schwankungen im Abgabenregime keine bzw. sehr geringe Auswirkungen auf die betrachteten Leitparameter haben.

Parallel dazu wurde die Dynamisierung modelltechnisch untersucht. Das von SYDRO verwendete Modell Talsim-NG ist in der Lage, die vertikale Schichtung der Temperatur in Stauanlagen zu simulieren. Eine Erweiterung war in Bezug auf zwei Aspekte erforderlich:

- Integration weiterer Güteparameter, z.B. die identifizierten Leitparameter.
- vertikale und horizontale Unterteilung des Staukörpers.

Verschiedene Lösungen kamen hierfür prinzipiell in Frage. Entweder eine Erweiterung des Source-Codes von Talsim-NG oder die Anwendung eines bereits bestehenden Modellbausteins, der wiederum kopplungsfähig ist.

Im Zuge der Untersuchung zeigte sich, dass die Anwendung eines fertigen Modellbausteins die flexiblere und effizientere Lösung darstellt, da sowohl die vertikale und horizontale räumliche Auflösung des Staukörpers als auch die Integration aller Leitparameter gegeben war.

Der für die Aufgabenstellung am besten geeignete Baustein war das Modell CE-QUAL-W2. Dabei handelt es sich um ein 2D-Vertikalmodell zur Simulation der Hydrodynamik und Wasserqualität in Flüssen, Mündungsbereichen, Seen, Talsperren und Flusseinzugsgebieten der Portland State University. Das Modell simuliert die Hydrodynamik, die Wassertemperatur und bis zu 47 Wasserqualitätsparameter. Während der Simulation findet eine Rückkopplung zwischen den Berechnungen zur Wasserqualität und denen zur Hydrodynamik im Modell statt. Der Baustein ist frei erhältlich, quelloffen und wird aktuell weiterentwickelt.

Die modelltechnische Untersuchung fand an der Großen Dhünn-Talsperre statt. Dort existiert ein umfangreiches Messprogramm zur Wasserqualität, was eine Kalibrierung und Verifikation des Modells erlaubte.

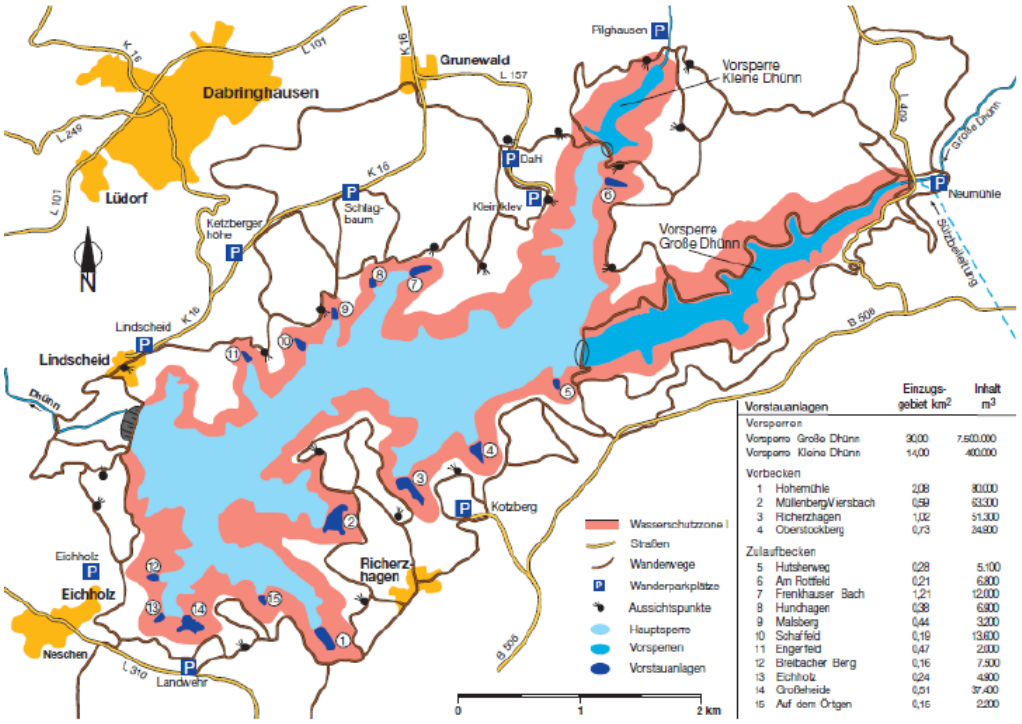


Abbildung 95: Projektgebiet für die Anwendung des Modell-Bausteins CE-QUAL-W2 zur Untersuchung der Dynamisierung von Talsperrenabgaben

Nach Aufstellung des Modells ergab sich die in Abbildung 112 dargestellte abstrahierte modelltechnische Beschreibung der Großen Dhünn-Talsperre.

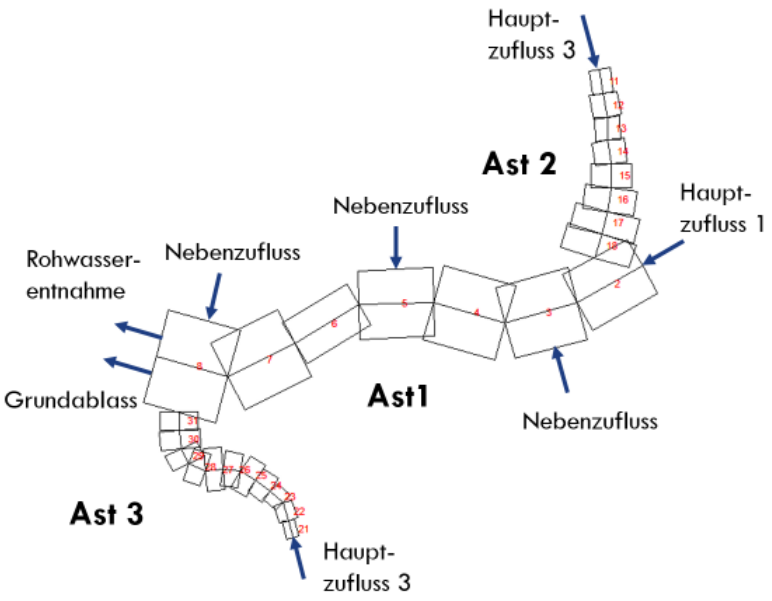


Abbildung 96: Modelldarstellung der Großen Dhünn-Talsperre mit seitlichen Vorsperren, Zufluss und Abgabeelementen

Um die Ergebnisse aus dem Teilsystem Talsperren (AP B1) zu vervollständigen bzw. zu bestätigen, wurden verschiedenste Abgabenszenarien simuliert. Abbildung 97 zeigt beispielhaft die Modellergebnisse im Hinblick auf die Temperatur in einem Längsschnitt durch die Große-Dhünn-Talsperre in den Monaten Januar, April, August und November. Es zeigt sich, dass die zusätzliche Untergliederung des Wasserkörpers in vertikaler Richtung z.B. im April detaillierte Ergebnisse zur Temperaturschichtung des Talsperrenkörpers ermöglicht als eine rein horizontale Unterteilung Insbesondere im Bereich des Sperrbauwerks und damit im Bereich der Trinkwasserentnahmeeinrichtungen sind durch die vertikale Untergliederung des Talsperrenkörpers z.B. im April Temperaturunterschiede nicht nur in vertikaler sondern auch in horizontaler Richtung zu erkennen. Die Ergebnisse sind somit analog zu den Aussagen, die in AP B1 aus Messungen abgeleitet wurden. Eine signifikante Änderung der Wasserqualitätsparameter stellte sich erst ein, wenn die Dynamik der Abgaben so ausgedehnt wurde, dass Änderungen der Wasserbilanz und somit auch der Versorgungssicherheit auftraten. Da eine Einschränkung der Versorgungssicherheit im Rahmen des Forschungsvorhabens als nicht akzeptabel ausgeschlossen wurde, konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Dynamisierung mit Bezug auf Energieoptimierung aus Sicht der Talsperre vollzogen werden kann. Dieses Resultat gilt jedoch nur aus Sicht der Talsperre. Ob dies aus Sicht der Aufbereitung zutrifft, musste mittels einer Verbundbetrachtung der drei Systeme analysiert werden.

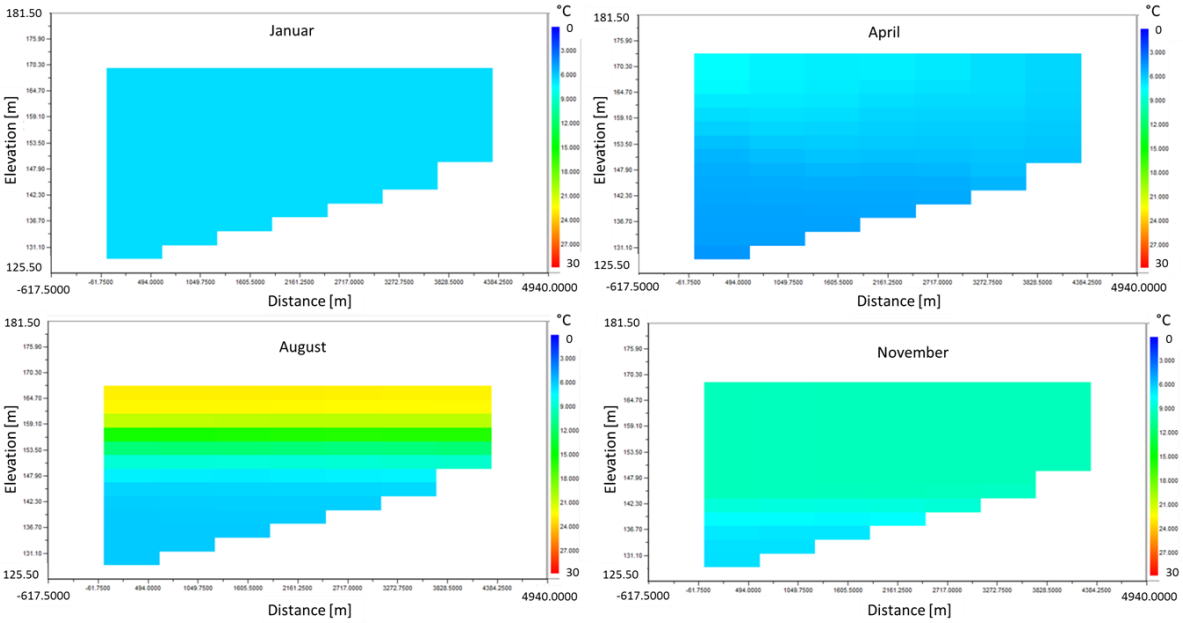


Abbildung 97: Beispiel der vertikalen Auflösung mit Ergebnissen der Temperatur im Staukörper zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr

Wassermenge und virtueller Zwischenspeicher:

Üblicherweise gibt es zwischen Talsperre und Aufbereitung keinen Puffer im Sinne eines Zwischenspeichers. Wird dies strikt in der Verbundbetrachtung so umgesetzt, muss entweder die Aufbereitung direkt dem Abgabeschema der Talsperre folgen oder umgekehrt. Dies stellt unter Beachtung der Ausschlusskriterien und aus Sicht der Verbundbetrachtung eine zu starke Einschränkung dar. Da innerhalb von ENERWA aus Gründen des Erkenntnisgewinns die theoretische Möglichkeit eingeräumt werden muss, dass sich alle drei Teilsysteme mit maximalem Eigennutzen optimieren dürfen, ist die Einführung eines Speichers zwischen Talsperre und Aufbereitung zwingend notwendig. Jedoch wird in der Verbundbetrachtung dafür gesorgt, dass das Volumen eines Zwischenspeichers nicht folgenlos bleibt, d.h. die Größe des Zwischenspeichers wird monetär belegt. Dafür wurden Einheitspreise zum Bau von Speichern angesetzt. Der benötigte Platz zum Bau eines solchen Zwischenspeichers wird in der Betrachtung nicht berücksichtigt, da eine (monetäre) Bewertung dieser Frage immer vom konkreten Einzelfall (Lage und Örtlichkeit der Talsperre sowie der Wasseraufbereitungsanlage) abhängt und sich somit nicht verallgemeinern lässt. Das bedeutet, dass innerhalb der Verbundanalyse eine optimale Lösung entstehen kann, die einen Zwischenspeicher beinhaltet, welche aber letztendlich in der Praxis aus Platzgründen verworfen werden müsste.

Druck:

Es ist von Einzelfall zu Einzelfall unterschiedlich, wie die Anordnung der Höhenverhältnisse zwischen Auslass der Talsperre und Aufbereitungsanlage ist. Die Überwindung einer Höhe per Pumpen geht in die Energiebilanz ein und wird daher auch in der Analyse innerhalb von AP C berücksichtigt. Der benötigte Energieverbrauch ist hierbei immer neu festzulegen und stellt einen Parameter in der Simulationskette dar. Dies wäre nicht weiter von Bedeutung, da es viele Parameter in der Simulationskette gibt. Jedoch ist dieser Parameter direkt verknüpft mit dem virtuellen Speicher zwischen Talsperre und Aufbereitung. Wird ein Zwischenspeicher benutzt, so füllt sich dieser. In Abhängigkeit seiner Grundfläche steigt die Wassersäule mehr oder weniger stark an. Durch diese Wassersäule wird der Höhenunterschied zwischen Talsperre zum Zwischenspeicher und Zwischenspeicher zur Aufbereitung beeinflusst, d.h. es muss mehr oder weniger Energie eingesetzt werden, je nachdem, ob es noch Höhenüberschuss gibt oder gepumpt werden muss.

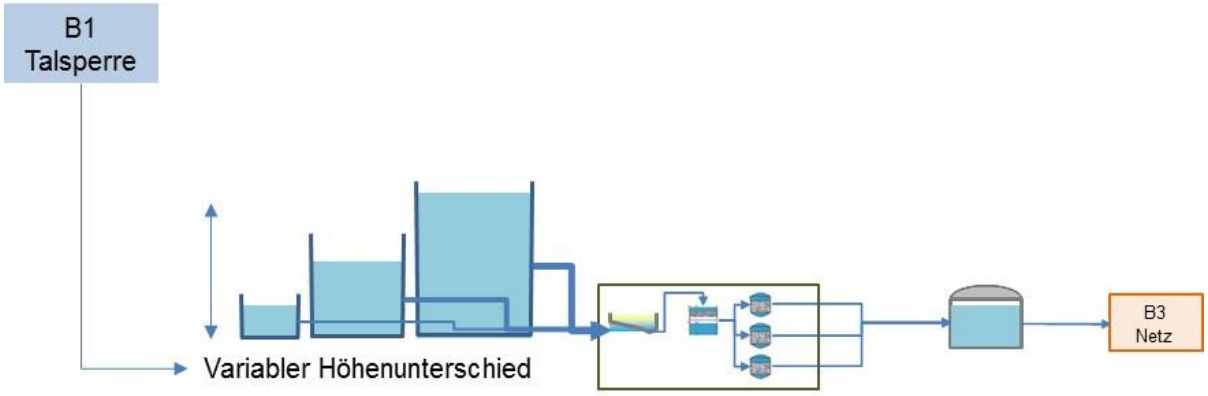


Abbildung 98: Darstellung des virtuellen Speichers zwischen Talsperre und Aufbereitung

In der Verbundanalyse gibt es deshalb zwei Optionen:

- Der Zwischenspeicher ist mit einer Grundfläche festgelegt und der wechselnde Höhenunterschied zwischen Talsperre zum Zwischenspeicher und Zwischenspeicher zur Aufbereitung geht in die Energiebetrachtung ein.
- Es gibt einen Zwischenspeicher, aber der Höhenunterschied unterschiedlicher Füllstände wird vernachlässigt.

Teilsystem Aufbereitung - Verteilnetz

Zwischen der Aufbereitung und dem Verteilnetz befindet sich der Reinwasserspeicher. Dieser stellt automatisch die Schnittstelle zwischen den Teilsystemen dar. Es gibt keine Abhängigkeit oder Beziehung zu Wasserqualitätsparametern. Das Bindeglied zwischen den beiden Systemen ist ausschließlich die Wassermenge.

Wassermenge und Zwischenspeicher:

Aufgrund der Existenz eines Reinwasserspeichers in realen Systemen muss an der Schnittstelle zwischen Aufbereitung und Verteilnetz kein virtueller Speicher eingeführt werden. Um ausreichend Freiheitsgrade für die Analyse und Optimierung zuzulassen, wird allerdings die Annahme getroffen, dass der Reinwasserspeicher beliebig groß werden kann.

Wie bereits für die Schnittstelle Talsperre - Aufbereitung dargelegt, bleibt das Volumen eines Zwischenspeichers nicht folgenlos, sondern die Größe des Reinwasserspeichers wird monetär belegt. Dafür wurden Einheitspreise zum Bau von Speichern angesetzt. Wie auch bei der Schnittstelle Talsperre – Aufbereitung geht der benötigte Platz für eine eventuelle Vergrößerung des Reinwasserspeichers nicht in die Betrachtung ein, da auch hier detaillierte Einzelfallbetrachtungen notwendig sind. Im Unterschied zum virtuellen Speicher zwischen Talsperre

und Aufbereitung ist eine potenzielle Vergrößerung des Reinwasserspeichers aber ein tendenziell leichter umzusetzendes Vorhaben in der Optimierungskette, da dieser in real existierenden Systemen bereits vorhanden ist.

Druck:

Prinzipiell gilt die gleiche Aussage wie für den virtuellen Speicher zwischen Talsperre und Aufbereitung. Für die Verbundbetrachtung gibt es deshalb auch hier die zwei Optionen:

- Der Reinwasserspeicher ist mit einer Grundfläche festgelegt und der wechselnde Höhenunterschied von der Aufbereitung kommend geht in die Energiebetrachtung ein.
- Der Höhenunterschied durch unterschiedliche Füllstände des Reinwasserspeichers wird vernachlässigt.

Im Unterschied zum virtuellen Speicher der Schnittstelle Talsperre – Aufbereitung wird aber kein Höhenunterschied in Richtung Verteilnetz berücksichtigt.

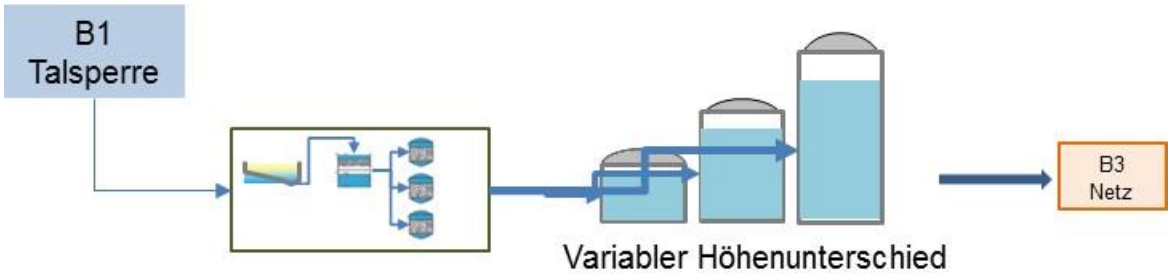


Abbildung 99: Darstellung des Reinwasserspeichers zwischen Aufbereitung und Verteilung

II.7.1.2 Ausschlusskriterien

In der Verbundanalyse gibt es viele Freiheitsgrade. Es sind deshalb zunächst Zustände auszuschließen, die grundsätzlich inakzeptabel sind, weil sie nicht dem Stand der Technik entsprechen, aus rechtlichen Gründen abzulehnen sind oder schlicht die Grenzen der Umsetzbarkeit überschreiten. Jedes Teilsystem (AP B1, B2, B3) hat während der Optimierung und Ausarbeitung für den Ausschluss entsprechender Zustände gesorgt.

Ausschlusskriterien, die eventuell nur in einem Teilsystem abzulehnen sind, in allen anderen aber alle Forderungen einhalten, sind nachfolgend exemplarisch genannt:

1. Die gegebene Versorgungssicherheit durch die Talsperre darf nicht beeinträchtigt werden.

Eine Änderung der Wasserbilanz muss sich innerhalb eines Jahres ausgleichen. Mit anderen Worten, eine Dynamisierung der Talsperrenabgaben muss volumenneutral erfolgen, wobei der längste Bilanzierungszeitraum ein Jahr beträgt.

2. Änderungen der Wassermenge pro Zeiteinheit müssen sich an physikalisch machbaren Randbedingungen orientieren.

   Darunter sind Anschalt- und Ausschaltvorgänge von Aggregaten zu verstehen, die eine gewisse Zeit benötigen, um Änderungen der Wassermenge zu erlauben oder aufzunehmen.

3. Änderungen der Wassermenge pro Zeiteinheit müssen betrieblich machbar sein.

   Eine Dynamisierung, welche in der Praxis vom Betriebspersonal nicht realisierbar bzw. kontrollierbar ist, ist auszuschließen. Dazu gehört beispielsweise eine Fahrweise, die in einem Takt von fünf Minuten eine Wassermenge ändert, selbst wenn die Änderung innerhalb der Grenzen von Punkt 2 liegen würde.

4. Die geltenden Vorschriften für die Aufbereitung müssen eingehalten werden.

   Wenn eine Optimierung dazu führt, dass die Aufbereitung die in der Trinkwasserverordnung und nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik geforderte Wasserqualität nicht mehr einhalten kann, ist dies ein Ausschlusskriterium.

5. Druckverhältnisse im Verteilungsnetz müssen die geforderten Lastfälle der Bemessung einhalten.

   Eine Optimierung ist unzulässig, wenn diese dazu führt, dass Bemessungsfälle von Versorgungsnetzen im Brandfall und geforderte Mindestdrücke nicht mehr eingehalten werden.

Darüber hinaus sind zum Beispiel Verweilzeiten, geforderte Wassertemperaturen etc. zu berücksichtigen. Da manche Bedingungen nicht explizit in der Verbundsimulation integriert werden konnten, sind diese indirekt durch andere Vorgaben berücksichtigt.

II.7.1.3 Verbundsimulation und Übertragbarkeit

Wie bereits in Kapitel II.7.1.1 angedeutet, sind die Simulationsplattform und die Schnittstellen zwischen den Teilsystemen so formuliert, dass diese weitestgehend generisch und somit übertragbar sind. Der generische Ansatz gilt uneingeschränkt für die Talsperre, mit Einschränkungen für die Aufbereitung und mit einem nicht unerheblichen Voraufwand verbunden auch für das Verteilnetz.

Der generische Anteil wird mit Hilfe von Parametern festgelegt und erlaubt grundsätzlich die Simulation von verschiedenen Systemen. Im Einzelfall muss aber immer der virtuelle Zwischenspeicher sowie der Reinwasserspeicher in Bezug auf den Platzbedarf geprüft werden.

Talsperre:

Die uneingeschränkte Übertragbarkeit sichert das Modellwerkzeug Talsim-NG, welches die im ENERWA Projekt zu leistenden Anforderungen voll erfüllt. Die mögliche Variation der Wassermengenbewirtschaftung in der Software Talsim-NG geht sogar weit über das hinaus, was innerhalb von ENERWA direkt benötigt wird.

Mit Bezug auf die Leitparameter der Wasserqualität ist die Kopplung mit dem Tool CE-QUAL-W2 erforderlich, wenn man die Dynamisierung der Abgaben in einem Maße betreiben möchte, die einem Pumpspeicherbetrieb gleichkommt. Ansonsten gibt es auf Basis der Untersuchungen im ENERWA Projekt keine erkennbaren Anzeichen, dass die Gütemodellierung vollumfänglich erforderlich wäre, da sowohl in realen Versuchen als auch mittels Modellsimulationen keine maßgeblichen Auswirkungen eines dynamisierten Betriebs auf die Wasserqualität im Talsperrenkörper festgestellt werden konnten.

In der konkreten Anwendung wurden die Parameter der Wiehl-Talsperre verwendet.

Zur Eingliederung des Teilsystems Talsperrensimulation in die Simulationsplattform der Verbundwirkung wurde ein Ersatzsystem gebildet. Dieses Ersatzsystem benutzte die in AP.B1 durchgeführten Simulationen des Teilsystems Talsperre und leitete eine Funktion zwischen Abgabe und Energieerzeugung ab (Schritt 1), danach aus der Energieerzeugung den Erlös (Schritt 2). Dabei kam die übergreifend für alle AP.B festgelegte Beziehung „Energie zu Erlös/Kosten“ zum Einsatz. Als Ergebnis der Ersatzsystembildung lassen sich direkt aus einer Abgabe [m^3/h] die Energieerzeugung [kWh] und daraus in Folge die Erlöse [EUR/h] berechnen. In Bezug auf die Übertragbarkeit sind jeweils anzupassen:

- Wirkungsgradkurve der Turbinenkennlinie
- spezifische Verhältnisse der Talsperre in Bezug auf Höhen, Speichervolumen
- Regeln der Abgaben in den Unterlauf
- mittlere Entnahmen der Trinkwassermenge pro Monat.

Den Vergleich des Teilsystems mit dem Ersatzsystem zeigt die folgende Abbildung.

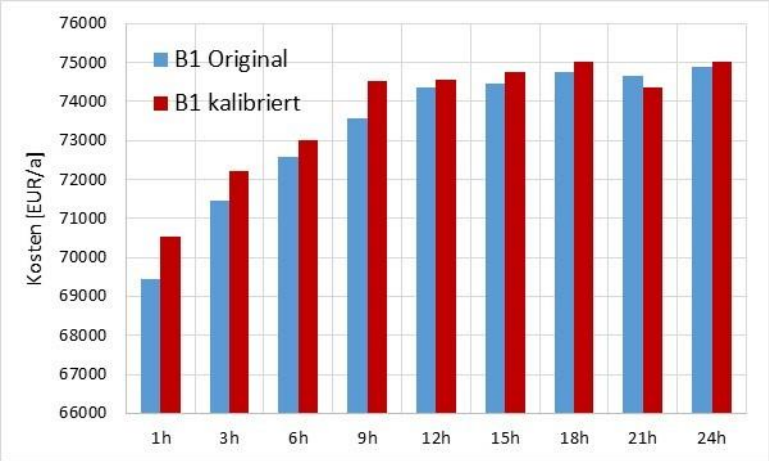


Abbildung 100: Vergleich der Ergebnisse zwischen detailliertem Teilsystem Talsperre und dem Ersatzsystem zur Verbundbetrachtung für verschiedene Optimierungsstufen

Das erste Glied in der Simulationskette wird mit hydro-meteorologischen Daten wie Zufluss zur Talsperre, Niederschlag, Verdunstung angetrieben.

Aufbereitung:

Die Aufbereitung wurde innerhalb der Prozesskette mit einem vereinfachten Modell eingebunden. Das Modell wurde von AP B2 entwickelt und durch AP C so strukturiert und erweitert, dass es in die Simulationskette einzubinden war.

Dieses Tool enthält die im Folgenden genannten Komponenten, die für den Einzelfall zu parametrisieren sind:

- Wirkungsgradkurven für alle benutzten Aggregate

  Die Wirkungsgradkurven sind in Form von X-Y Funktionen in Abhängigkeit des Durchsatzes definiert und veränderlich, d.h. sie können für den Einzelfall angepasst werden.

- Kurven für Druckverluste von Filtern und Rohrleitungen

  Die Beziehungen sind als X-Y Funktionen gesetzt, somit veränderlich und auf den Einzelfall anzupassen.

- Randbedingungen des spezifischen Energieverbrauchs für die verschiedenen Elemente der Aufbereitung sind in Form von Parametern zu setzen.
- Die Höhenlage der einzelnen Elemente ist festzulegen, so dass sich daraus ein Höhenprofil der Aufbereitung ergibt.
- Die Optionen der Zwischenspeicher (virtueller Speicher und Reinwasserspeicher) gehen als Parameter ein und sind somit an jeden Einzelfall anzupassen.

- Das Tool berechnet Abschätzungen zur CO_2 Emission, die aber für die Verbundwirkung mit Bezug zur Energie nicht berücksichtigt wurden.

Das Werkzeug behandelt nicht die Aufbereitung an sich. Diese wird als funktionstüchtig angenommen.

In der konkreten Anwendung wurde das Modell für das WW Erlenhagen des Aggerverbandes parametrisiert.

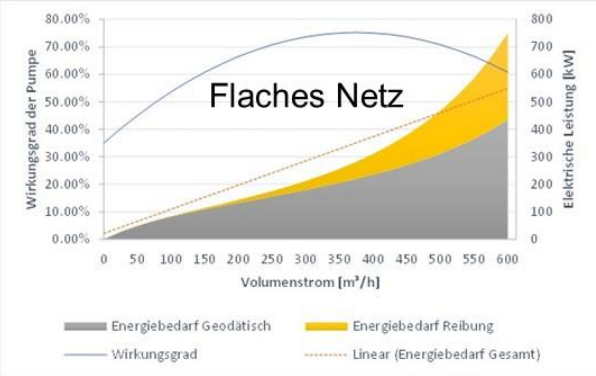
Das Modell ist Excel-basiert und so aufgebaut, dass es aus der Vorgabe des Durchsatzes die benötigte Energie bzw. die Energierückgewinnung berechnet und daraus die Kosten bzw. den Erlös. Somit liefert das Modell den Gewinn bzw. die Kosten als Funktion des Durchsatz und der Energie in [EUR/h]. Dabei kam die übergreifend festgelegte Beziehung „Energie zu Erlös/Kosten“ zum Einsatz.

Das Tool erhält als Input die Abgabe aus der Talsperre bei Ansatz ohne virtuellen Zwischenspeicher. Bei Verwendung eines virtuellen Zwischenspeichers stellt der Input die Abgabe aus diesem dar.

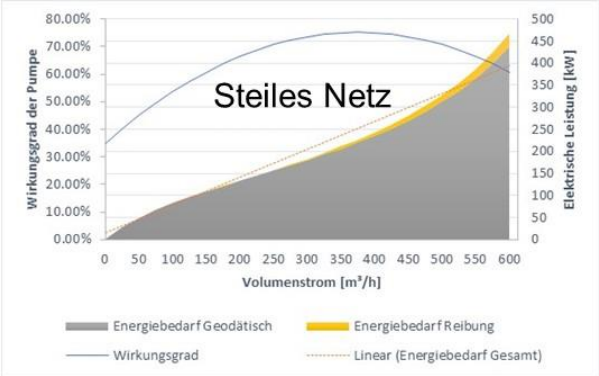
Verteilung:

Das Verteilnetz lässt sich nicht als hydrodynamisches Modell mit dem vollständigen Rohrnetz integrieren. Dafür sind die Modellansätze, die Rechenzeiten und der Zeitschritt nicht kompatibel. Es war daher zwingend erforderlich, ein Ersatzsystem aufzustellen. Die Ableitung eines Ersatzsystems ist deutlich aufwändiger und beinhaltet auch mehr Unsicherheiten als in den anderen Teilsystemen.

Für die Ableitung des Ersatzsystems wird ein hydrodynamisches Modell zur Netzabbildung benötigt. Wenn das Modell für das jeweilige Projektgebiet aufgestellt ist, müssen unterschiedliche Lastfälle, d.h. Rechenläufe durchgespielt werden. Dies muss so häufig erfolgen, bis eine mittlere Kennlinie für das jeweilige Netz abgeleitet werden kann, wobei die Kennlinie den benötigen Energiebedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes liefern muss. Bei einem flachen Netz, d.h. wenig Höhenunterschiede, steigt der geodätisch bedingte Energieeinsatz weniger an, dafür aber der Energieverlust durch Reibung. Bei einem steilen Netz mit großen Höhenunterschieden macht sich fast nur noch der geodätische Energiebedarf bemerkbar. Die Reibungsverluste spielen dann eine untergeordnete Rolle.



Source: RZVN, Herr Hensel)



Source: RZVN, Herr Hensel)

Abbildung 101: Netzkennlinien für unterschiedliche Verteilungssysteme, abgeleitet in AP.B3

Die Aufgabe besteht nun darin, anhand der Netzkennlinie und der Beziehung zwischen Energiebedarf und Kosten ein Ersatzsystem zu finden, welches das gegebene Netz am besten abbildet. Dazu sind wieder wie bei der Talsperre zwei Schritte erforderlich. Im Schritt 1 wird die Netzkennlinie als Funktion zwischen Volumenstrom zu Energiebedarf direkt verwendet. Im konkreten Fall wurde von AP B3 eine lineare Beziehung für die Netzkennlinie angenommen.

Schritt 2, die Beziehung zwischen Energiebedarf zu Erlös, ist komplexer. Dazu sind mit Hilfe des hydrodynamischen Modells aus AP B3 unterschiedliche Entnahmeszenarien (mit/ohne Optimierung) durchzurechnen. Für jeden Zeitschritt sind je Szenario der aggregierte Energiebedarf und die Gesamtkosten des Betriebs auszuweisen, um für ein Szenario über alle Zeitschritte eine Regression durchführen zu können.

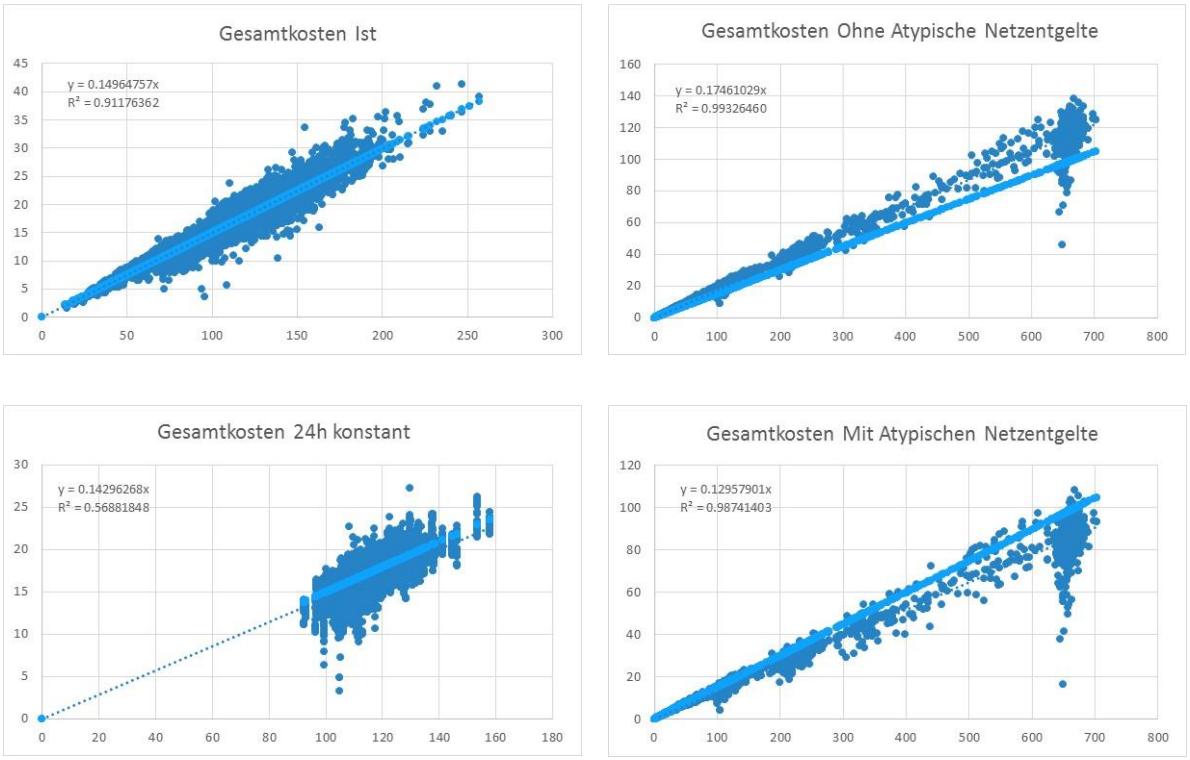


Abbildung 102: Beziehungen zwischen Energiebedarf und Kosten aus vier verschiedenen Szenarien von AP B3

Die in Abbildung 102 gezeigten vier Szenarien stehen exemplarisch für eine weitere Zahl an Szenarien und stellen im Einzelnen dar:

- aktueller Ist-Zustand, abgeleitet aus den Bestandsdaten
- Optimierung ohne atypische Netzentgelte
- konstante Fahrweise über 24h
- Optimierung mit atypischen Netzentgelten

Die Erläuterungen zu den Szenarien finden sich in den Kapiteln II.5.1.1 und II.8.3.

Um den Freiheitsgrad der Optimierung im Verbund möglichst groß zu halten, reichen in der Regel die berechneten Szenarien nicht aus. Um weitere Fahrweisen prüfen zu können, muss aus allen Szenarien eine möglichst repräsentative Funktion zwischen Energie und Kosten abgeleitet werden. Diese ist als X-Y - Funktion im Ersatzsystem für die Verteilung abzulegen und geht somit als Parameter in der Simulationskette für die Verbundoptimierung ein.

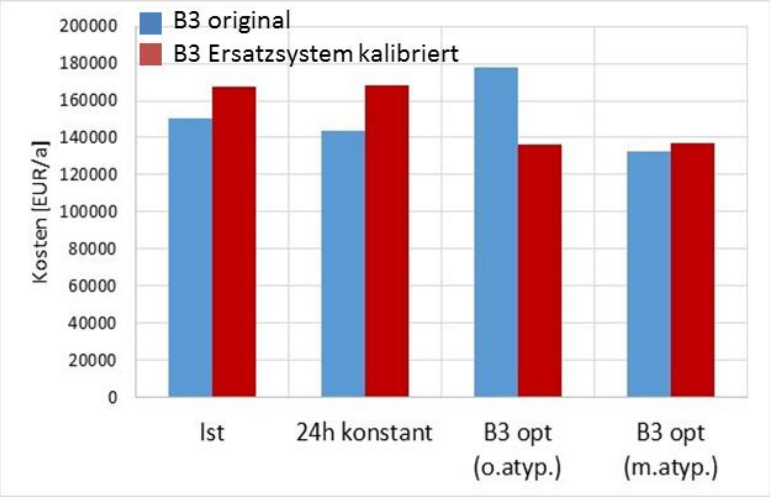


Abbildung 103: Vergleich der Ergebnisse zwischen detailliertem Teilsystem Verteilung und dem Ersatzsystem für die Verbundbetrachtung für verschiedene Entnahmeszenarien

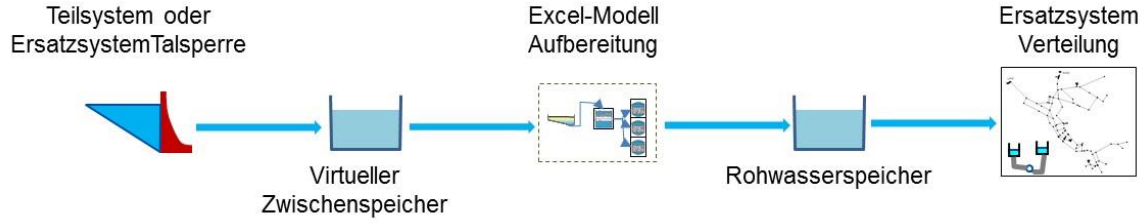
Im konkreten Fall des Verteilungsnetzes für die Verbundbetrachtung wurde das Teilnetz Volmekopf aus dem Aggerverbandsgebiet verwendet.

Als Input in das Ersatzsystem für die Verteilung geht die Entnahme aus dem Reinwasserspeicher ein. Weitere Größen sind nicht erforderlich. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass bei allen vorangegangenen Rechenläufen mit dem hydrodynamischen Rechenmodell des Netzes Verbrauchsdaten, Pumpen-, Rohrleitungskennlinien sowie die komplette Modellaufstellung zur Abbildung des Netzes eingeflossen sind.

Abschließend kann für das Verteilnetz gesagt werden, dass die notwendigen Vorbereitungen zur Ableitung eines zwingend benötigten Ersatzsystems bei weitem den höchsten Aufwand erfordern und immer vor einer Verbundbetrachtung durchzuführen sind. Die Qualität des Ersatzsystems hat hierbei einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse und Unsicherheiten der Verbundbetrachtung.

Gesamtsystem

Die Simulationskette aus den Teilsystemen Talsperre – Aufbereitung – Verteilung stellt sich wie folgt dar:



Die komplette Simulationsplattform zeigt Abbildung 104.

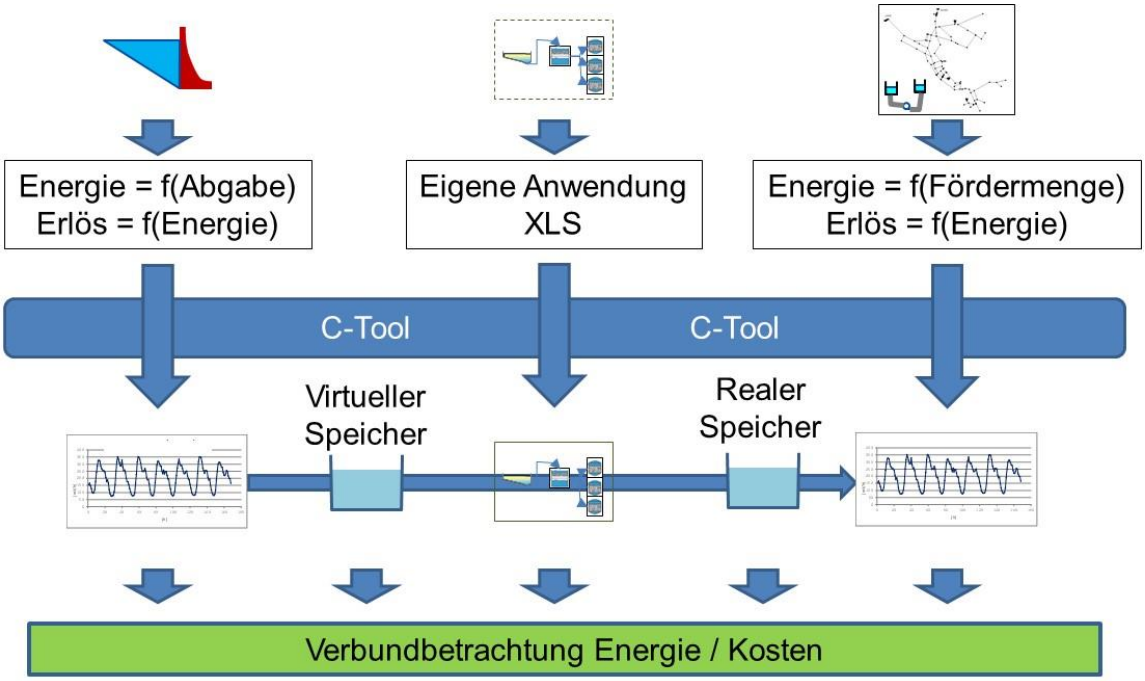


Abbildung 104: Prozesskette und Simulationsplattform für die Verbundbetrachtung

Zusätzlich zu den einzelnen Werkzeugen innerhalb der Simulationsplattform sind die Randbedingungen für die Simulation festzulegen. Grundsätzlich kann der Betrachtungszeitraum variiert werden.

Tabelle 39: Übersicht zu Einstellungen der Simulationsplattform in AP C

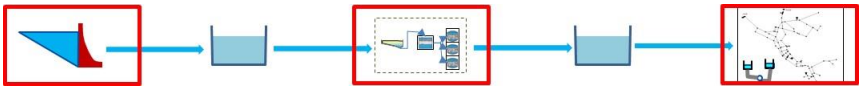
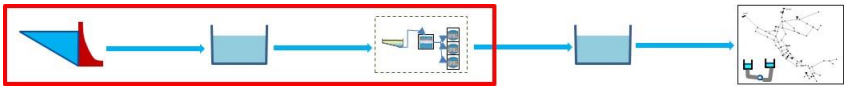
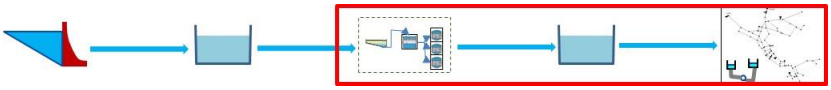
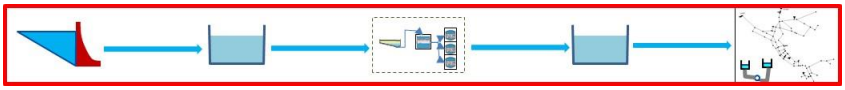
Thema	Optionen	Festlegung für Verbundbetrachtung
Betrachtungszeitraum	variabel	Jahr 2015
Energiepreismuster	variabel, muss zum Betrachtungszeitraum passen	Jahr 2015
Verschiedene Standorte	Möglich (bei unterschiedlichen Standorten muss der Durchsatz für alle Teilsysteme stimmig sein)	Stimmigkeit wurde für alle untersuchten Systeme durch Anpassung der Durchsatzmengen gewährleistet
Berücksichtigung von Höhendifferenzen	möglich	durch Parametrisierung möglich.
Simulationszeitschritt	Keine (immer 1h)	1h
Virtueller Speicher	kann an/aus geschaltet werden. Druckabhängigkeit vom Wasserstand im Speicher kann ein/aus geschaltet werden.	wurde sowohl mit als auch ohne betrachtet.
Reinwasserspeicher	immer gegeben. Druckabhängigkeit vom Wasserstand im Speicher kann ein/aus geschaltet werden.	wurde sowohl mit als auch ohne Druck betrachtet.
Spezifische Baukosten pro m³ Speichervolumen	variabler Parameter	angesetzt 250 EUR/m³
Veränderungen des Systems		
Veränderung Teilsystem Talsperre	Möglich (solange der Erlös als Funktion der Energie und des Durchsatzes zu definieren ist)	
Veränderung Teilsystem Aufbereitung	möglich.	
Veränderung Teilsystem Verteilung	theoretisch möglich (verlangt sehr viel Vorarbeit)	

II.7.2 Ergebnisse

II.7.2.1 Wechselwirkungen im Verbund

Für das Gesamtsystem wurden folgende Konstellationen untersucht:

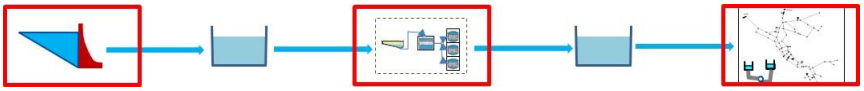
Tabelle 40: Übersicht der Verbundoptimierung in AP C

Verbundstufe	Beschreibung
Einzeloptimierung	Jedes Teilsystem optimiert seine Fahrweise für maximalen Gewinn bzw. Einsparung. Untersuchung der Wirkung auf die anderen Teilsysteme 
B1 + B2	Verbundoptimierung zwischen B1 und B2. B3 reagiert nur. 
B2 + B3	Verbundoptimierung zwischen B2 und B3. B1 reagiert nur 
B1+B2+B3	Verbundoptimierung von B2 + B3 + B3. 

Einzeloptimierung

Jedes Teilsystem optimiert seine Fahrweise für maximalen Gewinn bzw. maximale Einsparung.

Untersuchung der Wirkung auf die anderen Teilsysteme



Die Einzeloptimierung zeigt drei sehr unterschiedliche Fahrweisen.

B1 folgt dem Spotmarktpreis und erzielt die beste Optimierung mit einer Ausrichtung auf 24h und einer Ausnutzung der höchsten Energiepreise.

B2 nutzt vermehrt die günstigeren Nachtstunden. Um die Randbedingungen (siehe Kap. II.7.1.2) einzuhalten, muss aber tagsüber ein Minimaldurchsatz aufrechterhalten werden.

B3 erzielt das beste Ergebnis bei atypischer Netznutzung, wobei die Unterschiede zu anderen Optimierungsläufen nicht sehr hoch sind.

Abbildung 105: Ergebnisse der Einzeloptimierung aus AP C mit mittlerem Tagesgang des Spotmarktpreises aus dem Jahr 2015

Die Optimierungen entstanden mit dem dargestellten mittleren Tagesgang der Spotmarktpreise aus dem Jahr 2015.

In der Verbundbetrachtung entstehen durch die Einzeloptimierungen jedoch sehr ungünstige Effekte, welche die Einzeloptimierung überkompensieren. Dies gilt besonders aus Sicht von B1 und B2.

Es kann aus der Einzeloptimierung von B1 und B2 festgehalten werden, dass die Fahrweisen gegenläufig sind. B1 leistet maximale Abgaben, um Spitzenzeiten zur Erzielung des höchsten Ertrags auszunutzen, während sich B2 in seiner Niedrigphase befindet. Ebenfalls gegenläufig sind die Nachtstunden. Die Konsequenz ist ein notwendiger Speicher zwischen B1 und B2 mit einem Volumen von über 90.000 m³.

Zwischen B2 und B3 sind die Gegensätze der Fahrweisen ähnlich ausgeprägt. B2 kann der Dynamik von B.3, aufgrund der bereits in Kapitel II.7.1.2 beschriebenen Kriterien, nicht folgen. Die Konsequenz ist ein sehr großer Rohwasserspeicher zum Ausgleich zwischen B1 und B2 mit in diesem Fall über 130.000 m³ Volumen.

Unter Vernachlässigung des Problems der Zwischenspeicher ist die beste Lösung trivial. Da B3 das höchste Einsparpotential aufweist, welches deutlich höher liegt als die Einsparungen bei B2 bzw. die Erlöse bei B1, müsste die Fahrweise von B3 verwendet werden, um im Ver-

bund die beste Lösung zu erhalten. Aufgrund der hierfür notwendigen extrem großen Zwischenspeicher sowohl zwischen B1 und B2 als auch zwischen B2 und B3 ist dies keine gültige Lösung.

Optimierung B1 + B2 im Verbund

Verbundoptimierung zwischen B1 und B2. B3 folgt der Abgabenstruktur von B2.

Wenn B1 und B2 gemeinsam optimiert werden, d.h. eine Gesamtlösung gesucht wird, ändern sich die Fahrweisen deutlich. Von der erlösgesteuerten Struktur von B1 bleibt fast nichts mehr übrig. Die Abgabenstruktur von B1 wird annähernd konstant, B2 versucht noch Nachtstunden auszunutzen und das Behältervolumen zwischen B1 und B2 schrumpft auf 900 m³ zusammen. Die Restgröße des Speichers ist stark abhängig von den angesetzten spezifischen Kosten je m³ Volumen. Je höher die Kosten, desto eher geht der Speicher gegen Null. Auf die Fahrweise hat dies aber wenig Auswirkung. Die Abgaben nähern sich mit kleiner werdendem Speicher einer konstanten Abgabe. Das bedeutet, dass der Ist-Zustand die optimale Lösung darstellt.

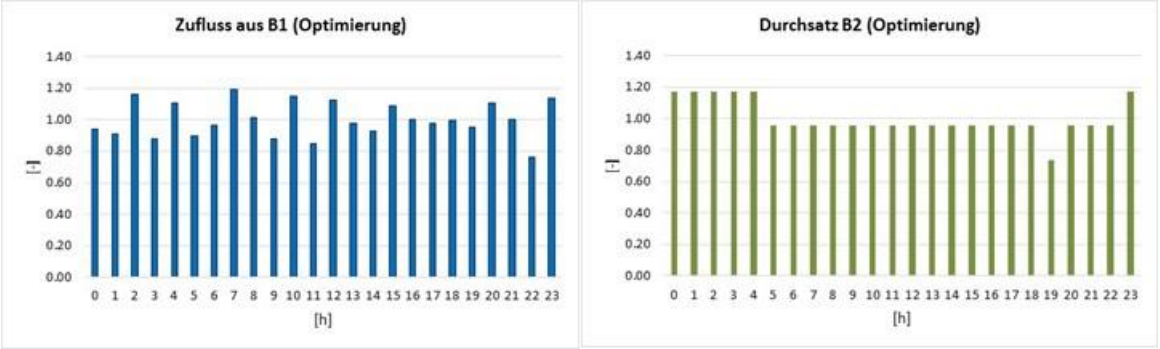
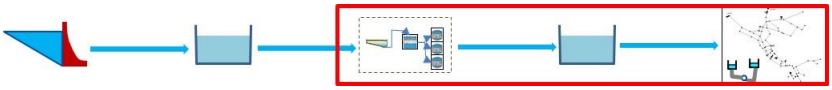


Abbildung 106: Ergebnisse der Verbundoptimierung B1+B2

Optimierung B2 + B3 im Verbund

Verbundoptimierung zwischen B2 und B3. B1 folgt der Abgabenstruktur von B2.



Die Wirkung einer Verbundoptimierung zwischen B2 und B3 zeigt deutlich, wie dominant das System B3 wirkt. Die Abweichung zwischen Verbundlösung und Einzeloptimierung für B3 ist gering. Sie würde noch geringer ausfallen, wenn ein Nulldurchsatz bei B3 nicht mehr erlaubt wird. Dann lägen Einzeloptimierung und Verbundoptimierung B2 + B3 noch enger zusammen. Von der Einzeloptimierung von B2 ist nur der Ansatz der Nutzung der Nachtstunden übrig. Der

Reinwasserspeicher müsste ca. 6.000 m³ oder kleiner (wenn der Nulldurchsatz von B3 aufgehoben wird) sein.

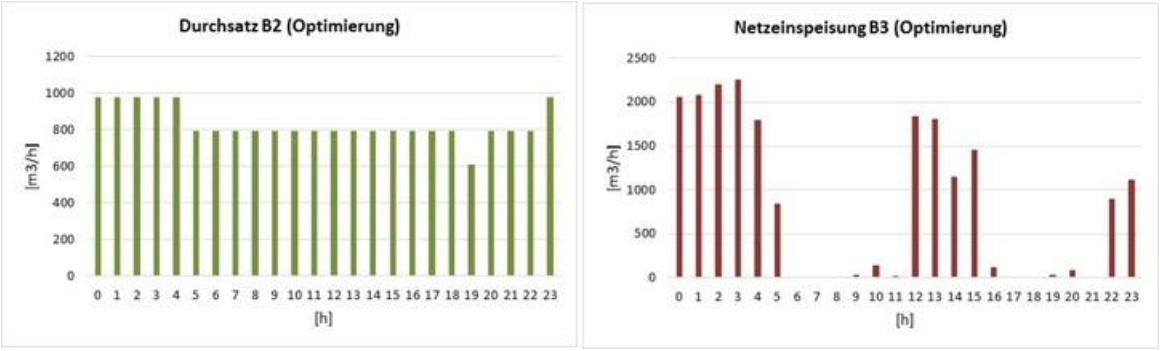
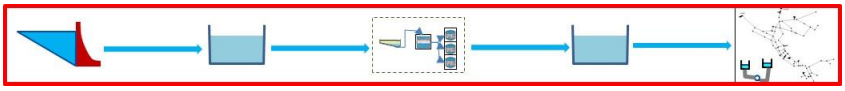


Abbildung 107: Ergebnisse der Verbundoptimierung B2+B3

Das Fazit aus der Optimierung B2 + B3 legt den Schluss nahe, dass aus Sicht von B2 der konstante Ist-Zustand als annähernd optimal bezeichnet werden kann, während eine Optimierung von B3 lohnend ist.

Optimierung B1 + B2 + B3 im Verbund

Verbundoptimierung zwischen B1, B2 und B3.



Die Gesamtoptimierung über alle drei Teilsysteme liefert ein fast deckungsgleiches Bild wie die B2+B3 Optimierung. B1 nähert sich konstanten Abgaben, B2 versucht nach wie vor Nachstunden auszunutzen, während sich B3 nahe am eigenen Optimum bewegt.

Da B1 nur von B2 abhängt, unterscheidet es sich kaum von der B1+B2 Optimierung. Die Aufbereitung in AP B2 agiert als Puffer zwischen den Systemen B1 und B3.

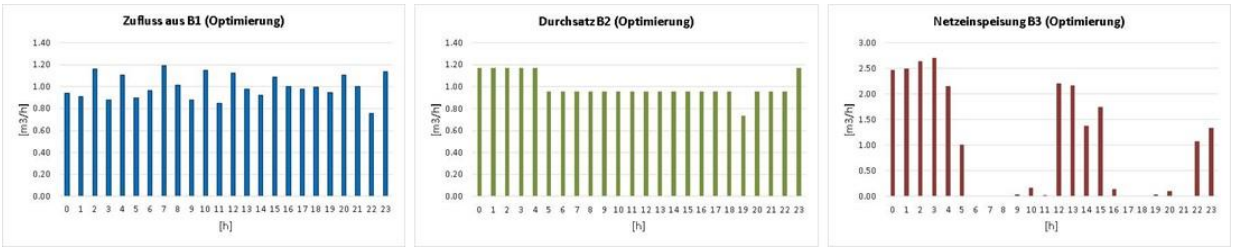


Abbildung 108: Ergebnisse der Verbundoptimierung B1+B2+B3

Auch hier muss festgestellt werden, dass aus Sicht von B1 und B2 keine Optimierung lohnend zu sein scheint, während dies für B3 nicht gilt. Dort liegt das größte Einsparpotential, welches sehr deutlich die Gewinne bzw. Einsparungen von B1 und B2 übersteigt.

Eine Optimierung im Verbund ist damit überwiegend eine Optimierung im AP B3, dem Verteilnetz.

II.7.2.2 Sensitivität der Maßnahmen in den Teilsystemen auf den Verbund

Angefangen beim Teilsystem Talsperre (AP B1) ist eine Dynamik im Abgabenregime zur Aufbereitung sehr sensitiv und hat zur Folge, dass ein Zwischenspeicher benötigt wird. Dies bleibt nur aus, wenn die Änderungen bei B1 minimal sind. Fazit ist, dass bei einer Verbundbetrachtung die Dynamisierung der Talsperrenabgabe an die Wasseraufbereitung nicht empfehlenswert ist.

Eine Änderung im Regime der Wasseraufbereitung (AP B2) ist wenig sensitiv, da die Dynamisierung hier per se relativ gering ausfällt. B1 könnte die Änderung ohne Probleme mitgehen, unter der Voraussetzung, dass betrieblich eine Dynamisierung möglich ist. Das Verteilungssystem (AP B3) müsste mit dem Reinwasserspeicher soweit abgekoppelt werden, dass die individuelle Optimierung oder Fahrweise von B3 nicht davon betroffen ist. Somit wirkt sich eine Dynamik bei B2 im Wesentlichen auf den Reinwasserspeicher aus. Da die Einsparungen bei B2 auf niedrigem Niveau liegen, ist es auch hier unwahrscheinlich, dass sich ein Optimierungsfall in der Praxis finden lässt, sobald der Reinwasserspeicher vergrößert werden müsste.

Änderungen innerhalb der Aufbereitung, die eine höhere Dynamik in der Fahrweise erlauben, sind grundsätzlich positiv zu bewerten.

Das Verteilnetz B3 besitzt ein hohes Einsparungspotential, welches in Konkurrenz mit dem Ausbau des Reinwasserspeichers steht. Hier muss im Einzelfall abgewogen werden, inwieweit ein Ausbau des Speichers Kosten verursacht. Eine generelle Aussage ist hier nicht möglich. Klar ist, dass umfangreiche Simulationen für das Verteilnetz nötig sind und anschließend die Verbundsimulation - wie hier durchgeführt – folgen muss, um Klarheit darüber zu erhalten.

II.7.2.3 Wirkung der Verbrauchsmuster und Möglichkeiten zur energieeffizienten Anpassung

Für B1 bleibt nur die Möglichkeit, sich einer Änderung von B2 anzupassen.

Aus der Untersuchung steht für B2 die Aussage, dass eine Änderung des Verbrauchsmusters wenig Auswirkung hat. Eine Ausnutzung der Nachtstunden lohnt sich erst aus Sicht einer Verbundoptimierung, für B2 allein aber nur auf geringem Niveau. Alle untersuchten Verbrauchsmuster sind in Abbildung 109.

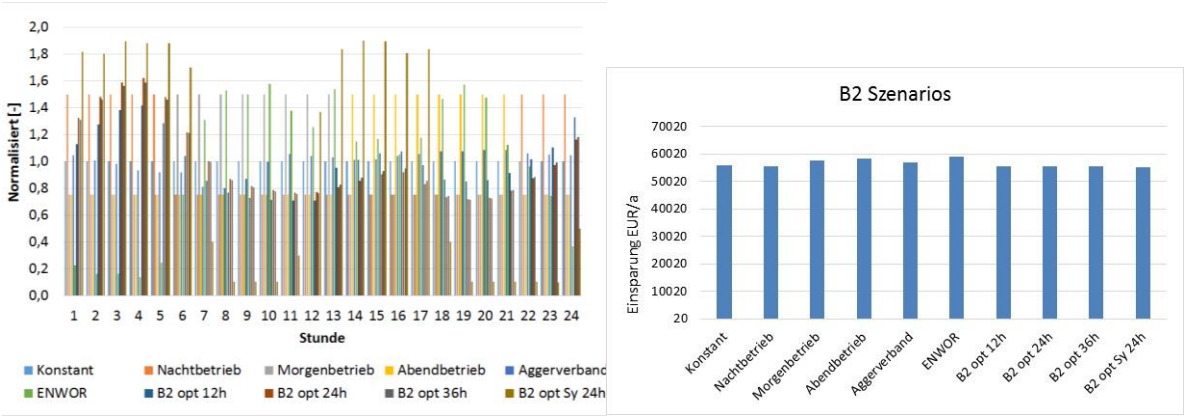


Abbildung 109: Untersuchte Verbrauchsmuster für B2 sowie deren Erlös

Die Verbrauchsmuster von B3 unterscheiden sich in ihren Einsparpotentialen maximal um ca. 40.000 EUR/a (Abbildung 110). Bei einer Optimierung im Gesamtsystem treten jedoch die dynamischen Varianten stärker in den Vordergrund. Ein derartiges Verbrauchsverhalten umzusetzen, würde sich aller Voraussicht nach lohnen.

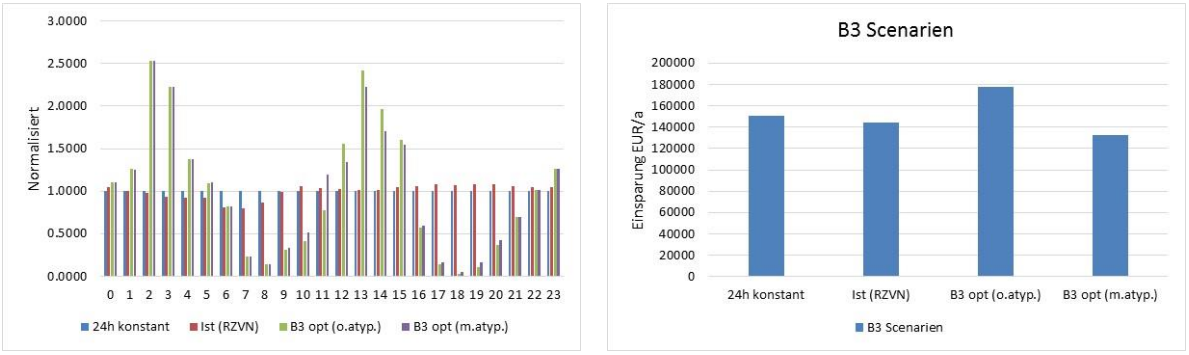


Abbildung 110: Untersuchte Verbrauchsmuster für B3 und deren Einsparungen

II.7.2.4 Energetisches Gesamtpotenzial und Übertragbarkeit

Energetisches Gesamtpotenzial

Das energetische Gesamtpotenzial ergibt sich nur durch Einsparungen im Teilsystem Verteilung (B3). Mit anderen Worten, eine Verbundoptimierung richtet sich am Verteilungsnetz aus, weil dort mit Abstand das größte Einsparpotenzial liegt, und wird zur Teilsystemoptimierung. B1 und B2 sind nachrangig in Bezug auf ihr Optimierungspotenzial.

Es muss beachtet werden, dass die Zwischenspeicher den erforderlichen Freiheitsgrad erzeugen, ohne den die verbundweite Optimierung nicht funktionieren würde. Dieser ist in Form eines Reinwasserspeichers gegeben. Somit ist in der Betrachtung des energetischen Gesamtpotenzials die Frage der Einsparung durch Optimierung am Verteilnetz dem möglichen Ausbau

eines Reinwasserspeichers (Kosten) gegenüberzustellen. Bezüglich der Größe des Reinwasserspeichers ist zusätzlich die Aufenthaltszeit des Wasers zu berücksichtigen. Somit wird klar, dass die Kosten für einen möglichen Ausbau des Speichers zwischen B2 und B3 sensitiv auf die Ergebnisse wirken.

Übertragbarkeit

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist in der Grundaussage prinzipiell gegeben. Die Dominanz des Verteilnetzes ist übertragbar, die Unterordnung in der Verbundoptimierung von Dynamisierung an der Talsperre in Richtung Aufbereitung und in der Aufbereitung ebenfalls. Ob sich eine Untersuchung lohnt, hängt von vielen Faktoren ab und muss im Einzelfall geprüft werden. Folgende Grundsätze können aber bestätigt werden.

- Eine Dynamisierung der Talsperrenabgaben in Richtung Aufbereitung lohnt sich nur im Rahmen der Flexibilität der Aufbereitung.
- Die Möglichkeiten zur Dynamisierung bei der Aufbereitung sind stark eingeschränkt. Der Aufwand zur Umsetzung wird in der Regel höher sein als die erzielbaren relativ geringen Einsparungen.
- Das Verteilnetz dominiert das Verbundsystem. Eine Optimierung kann sich lohnen, muss aber im Einzelfall untersucht werden und einem eventuell notwendigen Ausbau des Reinwasserspeichers gegenübergestellt werden.

Ob sich eine Untersuchung lohnt, kann über folgende Punkte vorab grob geprüft werden (Aussage aus AP.B3 (RZVN)):

- Eine Dynamisierung im Verteilnetz, welches per se höhere Reibungsdruckverluste besitzt, führt in der Regel zu einer Steigerung des Energiebedarfs.
- Eine Dynamisierung in einem Transportnetz, welches eher geringe Reibungsdruckverluste besitzt, führt dagegen nicht zu einer Steigerung des Energiebedarfs.
- Große Höhenunterschiede im Netz bedeuten hohe statische Förderhöhen und somit einen hohen Gesamtenergiebedarf. Hier wird sich eine Dynamisierung eher lohnen, da die Energiekosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen.
- Bei geringen Höhenunterschieden im Netz liegen nur geringe statische Förderhöhen vor, sodass der Gesamtenergiebedarf eher gering ist. Eine Dynamisierung wird sich weniger lohnen, da der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten geringer ist und das Verhältnis zwischen statischem und dynamischem Druckverlust ungünstig liegt. Somit macht sich eine Zunahme der Reibungsdruckverluste, relativ gesehen, stärker bemerkbar, wodurch die Dynamisierung tendenziell weniger wirtschaftlich ist.

II.8 Web-Dienste „Energieeffizienz“ - AP D

II.8.1 Einführung und Ziele

Ziel des Arbeitspaketes D war, die ENERWA-Forschungsergebnisse in Form von Webdiensten interaktiv erfahrbar zu machen und dem Anwender Lösungsansätze für die energetische Optimierung seines Systems anzubieten.

In einem ersten Schritt wurde eine Technologierecherche durchgeführt, um die Entwicklungsarbeiten effektiv und mit aktuellen Software-Technologien bearbeiten zu können. In einem zweiten Schritt erfolgte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Herausarbeitung standardisierter Energieeffizienzfragen, die für potentielle Anwender interessant sind. Deren Umsetzbarkeit in Webdienste anhand der vorliegenden Daten und Optimierungsrechnungen wurde eingehend geprüft.

II.8.2 Technische Realisierung

Die technische Umsetzung wurde mit unterschiedlichen Technologien realisiert. Für die Erstellung der Webseite enerwa.org wurde das Content Management System (CMS) Wordpress eingesetzt. Für die Entwicklung bzw. Programmierung der Webdienste wurde die Java Platform, Enterprise Edition (Java EE) verwendet. Grob vereinfacht liegt den Webdiensten folgende Struktur zu Grunde:

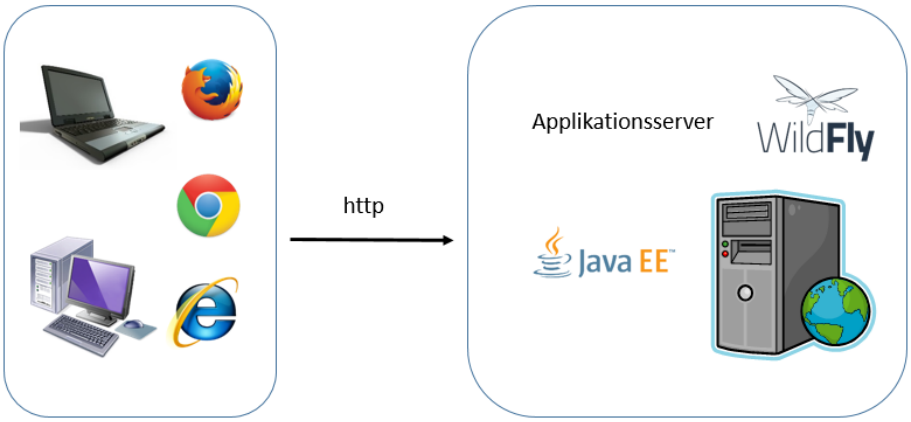


Abbildung 111: Architektur der ENERWA-Webdienste

Für die interaktive Nutzung der Webdiente benötigt der Anwender lediglich einen aktuellen und gängigen Webbrowser wie z.B. Google Chrome, Mozilla Firefox oder Microsoft Edge. Die Webdienste sind responsiv, d.h. die Webseiten können mit einem PC oder Tablet aufgerufen

werden. Die Verwendung von Smartphones ist technisch möglich, allerdings sind die Webdienste größtenteils zu komplex, um deren Oberfläche anschaulich auf einem kleinen Bildschirm darzustellen.

Eine Anmeldung ist nicht erforderlich. Von einer Registrierung der Anwender wurde im Laufe des Projektes Abstand genommen, um keine Eintrittsbarriere aufzubauen. Ein verschlüsselter Zugriff mit https ist nicht erforderlich, weil die über das Internet übertragenen Informationen der Webdienste nicht als sensibel eingestuft wurden.

Die Webdienste sind über eine Landing-Page erreichbar, die dem Anwender eine schnelle Orientierung bietet.

Abbildung 112: Ausschnitt ENERWA Landing Page

II.8.3 Ergebnisse

Es wurden insgesamt sechs Webdienste entwickelt, mit denen der Anwender entweder anhand realen Daten unterschiedliche Dynamisierungsszenarien aktiv nachstellen kann oder konkrete Optimierungsratschläge erhält. Das erforderliche Grundwissen wird jeweils in kurzen Textblöcken verständlich dargestellt und erläutert. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Webdienste kurz beschrieben.

II.8.3.1 Energetische Optimierung des Talsperrenbetriebs

Der Slogan des Webdienstes „Energetische Optimierung des Talsperrenbetriebs“ lautet: „Was bedeutet eine Dynamisierung eines Talsperrenbetriebs? Lernen Sie anhand konkreter Daten

einer Talsperre verschiedene Optimierungsszenarien kennen!“ Hier werden die Forschungsergebnisse des Arbeitspaketes B1 visualisiert. Der Webdienst hilft dem Anwender, die wesentlichen Überlegungen und Arbeitsschritte der Dynamisierung nachzuvollziehen. Ferner bietet der Webdienst die Möglichkeit, dynamisierte Betriebsweisen der Talsperre für verschiedene Zeitintervalle und Dynamisierungsgrade zu analysieren und zu vergleichen (vergleiche Abbildung 113). Die Ergebnisse der Dynamisierung werden in Bezug zu einer konstanten, nicht dynamisierten Fahrweise gestellt (siehe Abbildung 114).

Die Werte hinter den verschiedenen Optimierungsszenarien entstammen den Berechnungen des Projektpartners IAEW, welche auf Basis realer Datensätze zur Wiehltalsperre (Jahr 2013) durchgeführt wurden.

Anhand von grafischen Darstellungen werden Vor- und Nachteile eines dynamisierten Talsperrenbetriebes veranschaulicht. So kann sich der Anwender das Abgaberegime der Wiehl-Talsperre einer beliebigen Kalenderwoche des Jahres 2013 für unterschiedliche Szenarien (Mindestabgabemenge) der energetischen Optimierung darstellen lassen (vergleiche Abbildung 113).

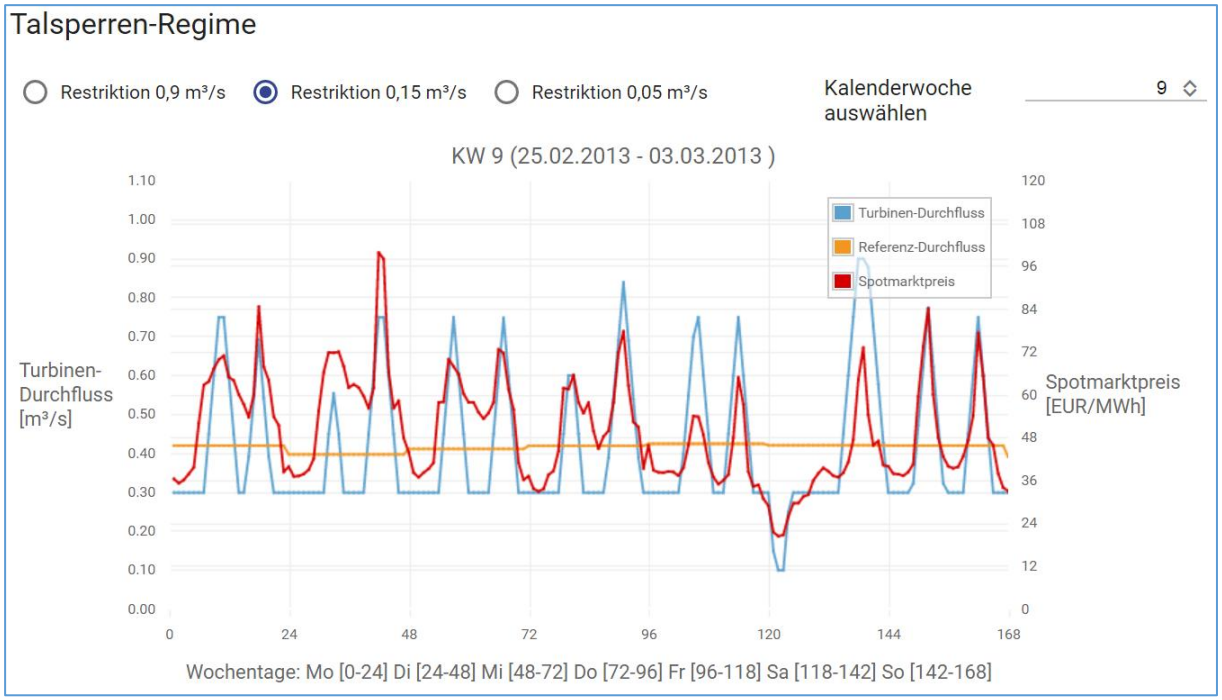


Abbildung 113: Talsperren-Regime

Die wöchentlichen Erlöse, die mit dem Stromverkauf erzielt werden könnten, werden relativ zur den Erlösen des Referenz-Durchflusses angezeigt (siehe Abbildung 114).

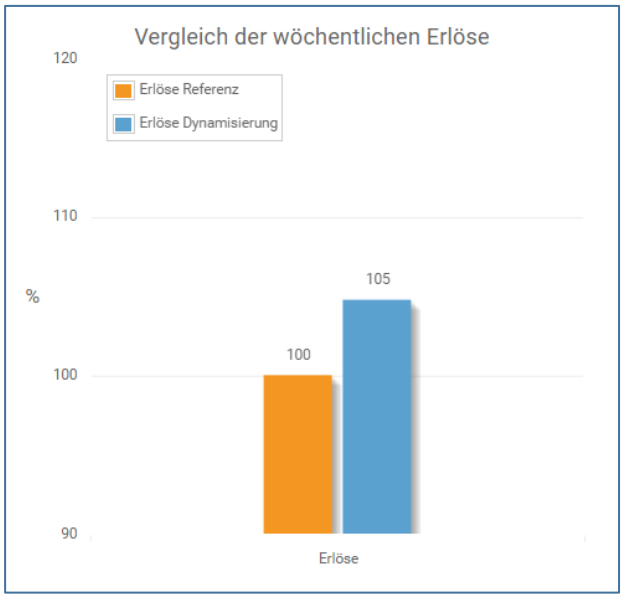


Abbildung 114: Erlöse einer dynamisierten Fahrweise im Vergleich zur Referenz

II.8.3.2 Ratgeber zur energieeffizienten Wasseraufbereitung

Die Energieeffizienzfrage des Webdienstes „Ratgeber zur energieeffizienten Wasseraufbereitung“ lautet: „Gibt es in der Wasseraufbereitung Energieeinsparpotenziale? Nutzen Sie den Optimierungsratgeber!“. Der Webdienst visualisiert die Forschungsergebnisse des Arbeitspaketes B 2.

Wenngleich der spezifische Energieverbrauch der Wasseraufbereitung gegenüber dem üblicherweise hohen Energieverbrauch der Wasserverteilung in den Hintergrund zu rücken scheint, können sich auch im Wasserwerk Energieeinsparungen realisieren lassen. Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass es zwar eine große Anzahl unterschiedlicher Quellen mit Hinweisen zu Energieeinsparpotenziale gibt, eine strukturierte und leicht verständliche Darstellung gab es jedoch nicht. Diese Lücke sollte mit dem „Ratgeber zur energieeffizienten Wasseraufbereitung“ geschlossen werden.

Die Optimierungshinweise wurden in Anlehnung an anerkannte Leitfäden zur energetischen Optimierung der Wasseraufbereitung (DVGW –Information Wasser Nr. 77, LfU-Ratgeber "Einsparungen von Kosten und Energie in der Trinkwasserversorgung", BFE/SVGW-Leitfaden „Energie in der Wasserversorgung“) zusammengestellt und durch Empfehlungen der ENERWA-Projektpartner ergänzt.

Der "Optimierungsratgeber“ soll dem Anwender helfen, verborgene Energieeinsparpotenziale in seinem Wasseraufbereitungsprozess zu entdecken. Dabei werden folgende Fragestellungen behandelt:

Allgemeine Fragen

Eine energetische Optimierung sollte sich nicht nur auf die Hauptprozesse der Wasseraufbereitung beschränken, sondern alle Energieverbräuche im Wasserwerk mit einbeziehen. Zu diesem Zweck muss der Anwender zunächst einige allgemeine Fragen beantworten, die für jedes Wasserwerk relevant sein können.

Aufbereitung

Über eine Picklist kann der Anwender Aufbereitungsstufen auswählen, die in seinem Wasserwerk zum Einsatz gelangen. Darüber hinaus können auch die Mengen an eingesetzten Aufbereitungsstoffen erfasst werden, um eine Carbon Footprint Berechnung durchzuführen.

Spezifische Fragen

In Abhängigkeit der vom Anwender ausgewählten Aufbereitungsverfahren, erfolgt hier die Beantwortung wichtiger Fragen zu den ausgewählten Verfahren. Die Beantwortung der Fragen ist intuitiv, weil der Anwender lediglich ja/nein Antworten geben muss (siehe Abbildung 115).

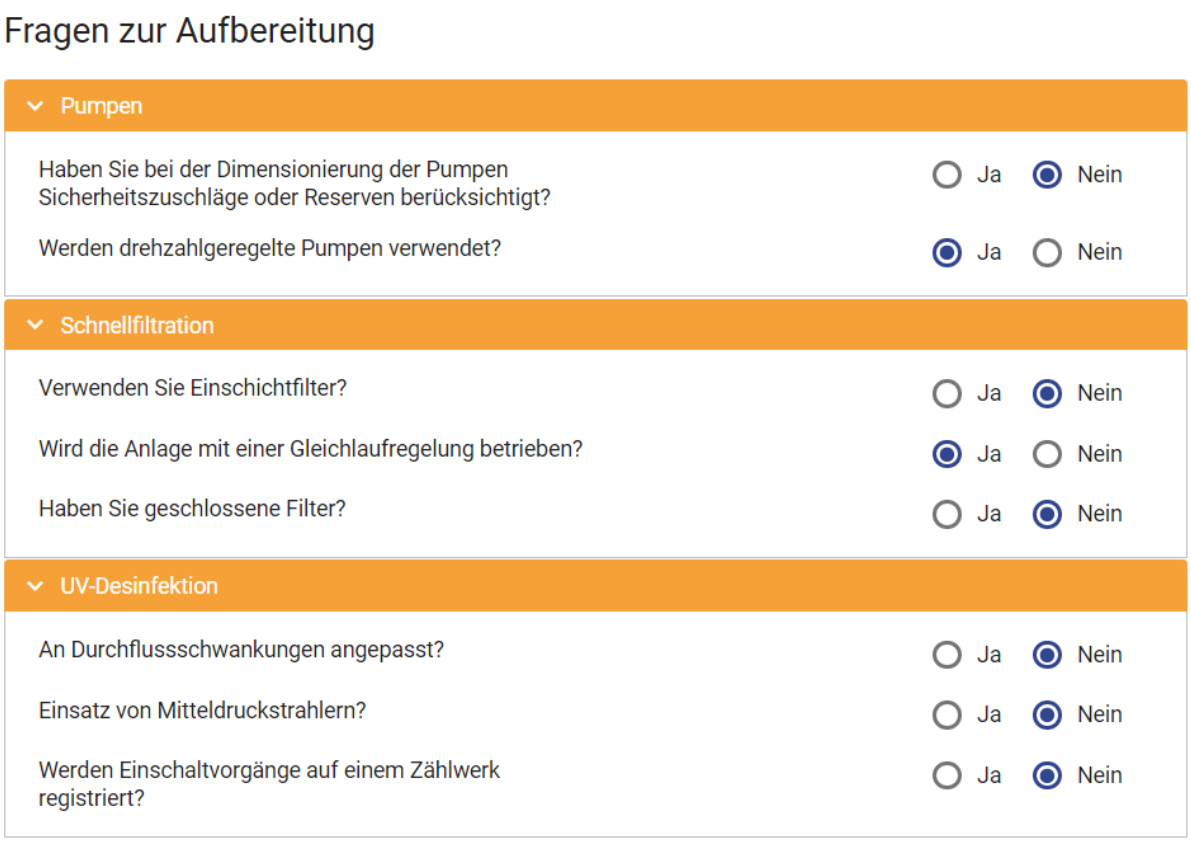


Abbildung 115: Fragen zu ausgewählten Aufbereitungsverfahren

Ergebnisse

Auf dieser Seite sind die auf die ausgewählten Aufbereitungsprozesse zugeschnittenen Optimierungshinweise zusammengefasst. Der Anwender soll ermutigt werden, aus den Hinweisen Rückschlüsse auf das energetische Optimierungspotenzial seiner Aufbereitung zu ziehen, um adäquate Maßnahmen zu ergreifen, die den Energieverbrauch senken.

Der Anwender kann sich intuitiv anhand einzelner Panels sowohl die Optimierungshinweise als auch die limitierenden Faktoren anzeigen lassen (Abbildung 116 und Abbildung 117).

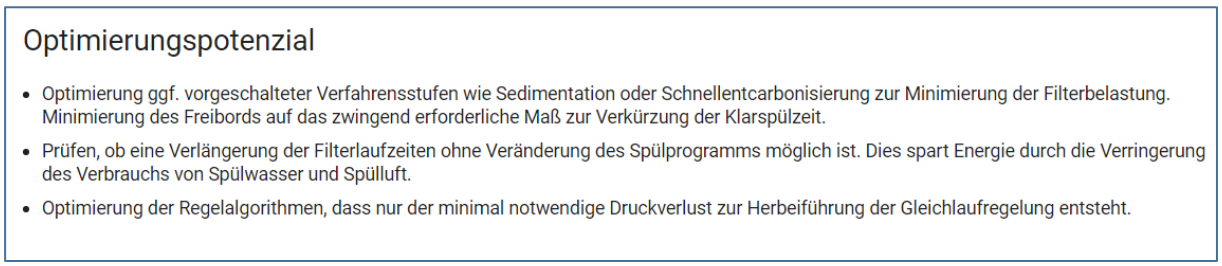


Abbildung 116: Optimierungshinweise zu einem ausgewählten Aufbereitungsverfahren

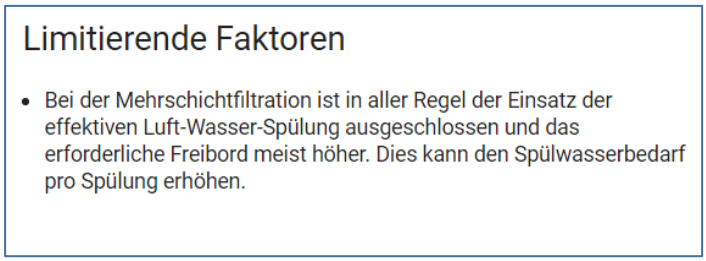


Abbildung 117: Hinweise zu limitierenden Faktoren zu einem ausgewählten Aufbereitungsverfahren

Ferner wird eine Carbon-Footprint Berechnung durchgeführt (Abbildung 118), die präsentierten Emissionswerte werden dabei auf Basis der zuvor eingegebenen Strom- und Chemikalienverbräuche kalkuliert und sollen einer ersten Abschätzung der CO_2-Emissionen dienen.

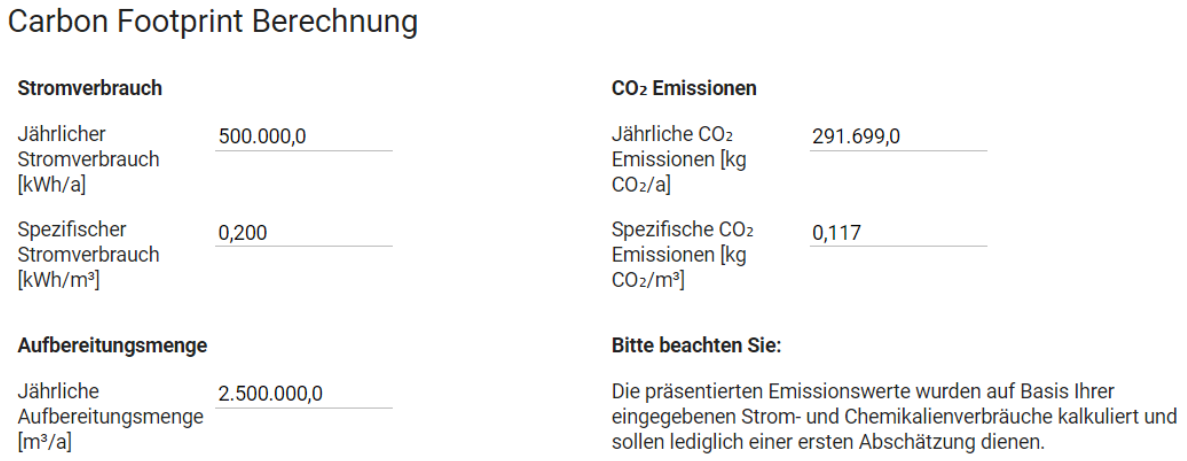


Abbildung 118: Ergebnisse der Carbon Footprint Berechnung

II.8.3.3 Dynamisierter Betrieb des Wasserwerkes

Mit dem Webdienst „Dynamisierter Betrieb des Wasserwerkes“ erfährt der Anwender, wie ein Wasserwerk unter Berücksichtigung variabler Strompreise und Beachtung von Hochlastzeitenstern betreiben werden kann. Der Webdienst dient der Visualisierung der Forschungsergebnisse des Arbeitspaketes B 2.

Wasserversorger passen die Aufbereitungsmenge in der Regel an die Nachfrage nach Trinkwasser unter Berücksichtigung technischer Restriktionen der Aufbereitungsanlagen an. Dies führt normalerweise stets zu einer relativ konstanten Fahrweise mit einer möglichst konstanten Aufbereitungsmenge auf Basis eines 24-Stunden Betriebs. Der dynamisierte Wasserwerksbetrieb kann anhand realer Betriebsdaten beispielhafter Wasserwerke simuliert werden, um die

ökonomischen und ökologischen Vor- bzw. Nachteile einer Dynamisierung der Wasseraufbereitung besser zu verstehen. Der Webdienst vermittelt sowohl detaillierte Kenntnisse über die Zusammensetzung des Strompreises und als auch Know-how über die dynamisierte Fahrweise eines Wasserwerkes. Ferner bietet der Webdienst dem Anwender weitreichende Möglichkeiten, mit realen Daten unterschiedliche Dynamisierungsszenarien nachzustellen.

Einleitung

Für die Dynamisierung des Wasserwerksbetriebes ist die Ausrichtung der Energieverbräuche am Strompreis von zentraler Bedeutung. Der Strompreis lässt sich grundlegend in unterschiedliche Komponenten aufteilen, welche jedoch nur zu einem kleinen Teil zeitlich variabel gestaltet sind. Neben dem zeitabhängigen Preis für die eigentliche Stromlieferung und den Netzentgelten zählen auch die rein mengenabhängigen, staatlich veranlassten Bestandteile zu den Kosten der Strombeschaffung.

Bei der Dynamisierung des Betriebs der Wasseraufbereitung werden daher im Folgenden sukzessive zwei Optimierungsmöglichkeiten betrachtet:

1. Optimierung anhand des Spotmarktpreises
   Das Prinzip der Dynamisierung des Wasserwerksbetriebs anhand des Spotmarktpreises ist zunächst vergleichsweise simpel: Wird die Wasseraufbereitung auf Zeiten mit einem geringen Strompreis fokussiert, können die anteiligen Stromkosten der Wasseraufbereitung gesenkt und gleichzeitig die Stabilität im Stromnetz unterstützt werden.
2. Optimierung nach Netznutzung
   Versucht man die Energiekosten des Wasserwerks zusätzlich über eine atypische Netznutzung zu optimieren, muss man vor allem die vom Übertragungsnetzbetreiber vorgegebenen Hochlastzeitfenster stets im Blick haben. Denn nur durch eine Reduzierung des Energieverbrauchs in diesen Zeitfenstern kann der leistungsabhängige Bestandteil der Netznutzungsentgelte über das ganze Jahr gesehen reduziert werden. Gleichzeitig darf man jedoch auch keinesfalls den Gesamtenergieverbrauch der Anlagen aus den Augen verlieren, da sich mit steigendem Energiebedarf auch der mengenabhängige Anteil des Netznutzungsentgeltes erhöht.

Grunddaten

Der Anwender muss zunächst ein Wasserwerk und ein Betrachtungsjahr auswählen. Die Daten der Wasserwerke sind reale Daten von Wasserwerken, die im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht wurden. Die jeweils quartalsweise gemittelten Spotmarktpreiskurven für die Jahre 2011 und 2014 sind konkrete historische Daten, die quartalsweise gemittelten Spotmarktpreiskurven für die Jahre 2023 und 2033 sind prognostizierte Kurven und wurden vom Projektpartner IAEW zur Verfügung gestellt.

Voroptimierung anhand des Spotmarktpreises

Im ersten Schritt zur Dynamisierung des Wasserwerkbetriebs steht zunächst allein der Spotmarktpreis im Vordergrund. Im Tagesverlauf unterliegt dieser in Abhängigkeit vom bestehenden Stromangebot Schwankungen (vergleiche Abbildung 119). Ziel der Dynamisierung des Wasserwerksbetriebs anhand des Spotmarktpreises ist es nun, die Wasseraufbereitung auf Zeiten mit einem geringen Spotmarktpreis zu fokussieren um die anteiligen Kosten der Strombeschaffung zu reduzieren. Bei der Dynamisierung müssen die jeweiligen Betriebspunkte des Wasserwerkes berücksichtigt werden, da eine starke Erhöhung der Aufbereitung eine Erhöhung des Energieverbrauchs nach sich ziehen kann und der spezifische Energiebedarf je m³ somit steigt, weil z.B. Pumpen nicht mehr im optimalen Wirkungsgrad betrieben werden können. Der Wasserwerksbetrieb eines Tages wurde in zwölf Zeitintervalle (jeweils zwei Stunden) aufgeteilt (vergleiche Abbildung 120).

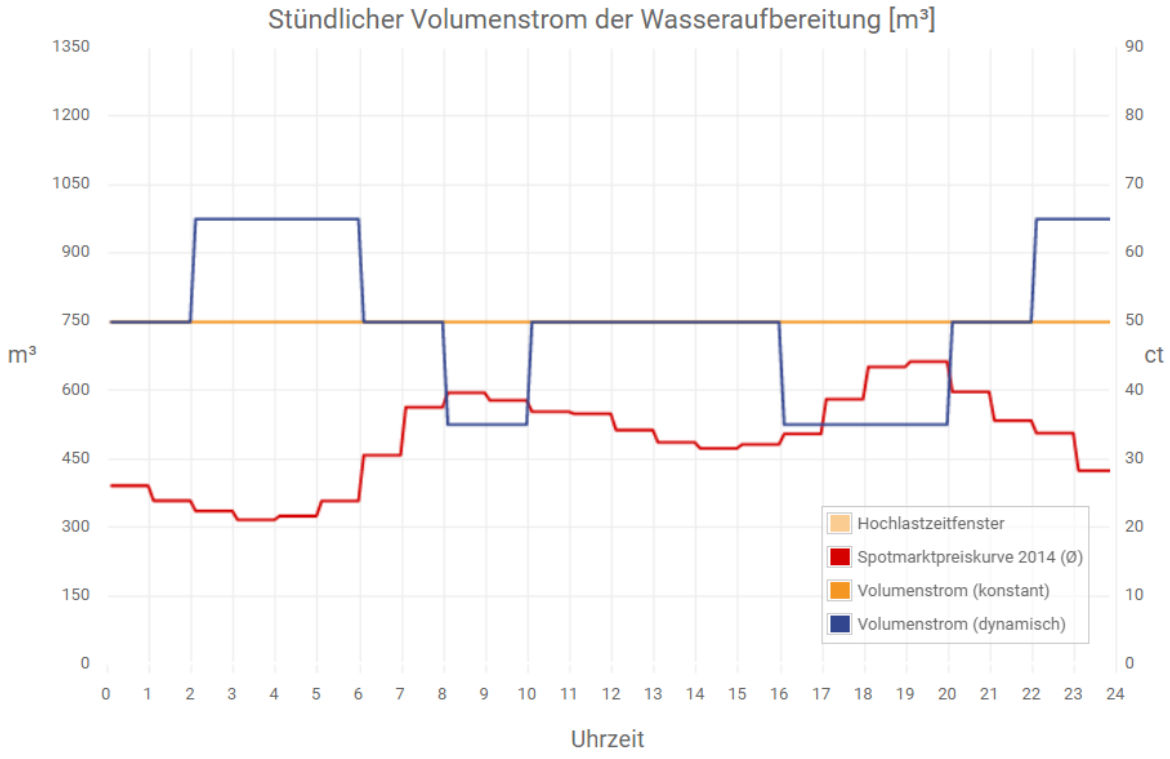


Abbildung 119: Dynamisierung nach Spotmarktpreis

Für jedes der Zeitintervalle steht ein Schieberegler zur Verfügung, mit dem die stündlich aufbereitete Wassermenge reguliert werden kann. Der Anwender kann die vorgegebene Gesamtaufbereitungsmenge eines Tages bestmöglich auf die Zeitcluster verteilen, um die Stromkosten des Wasserwerkes zu senken (vergleiche Abbildung 120).

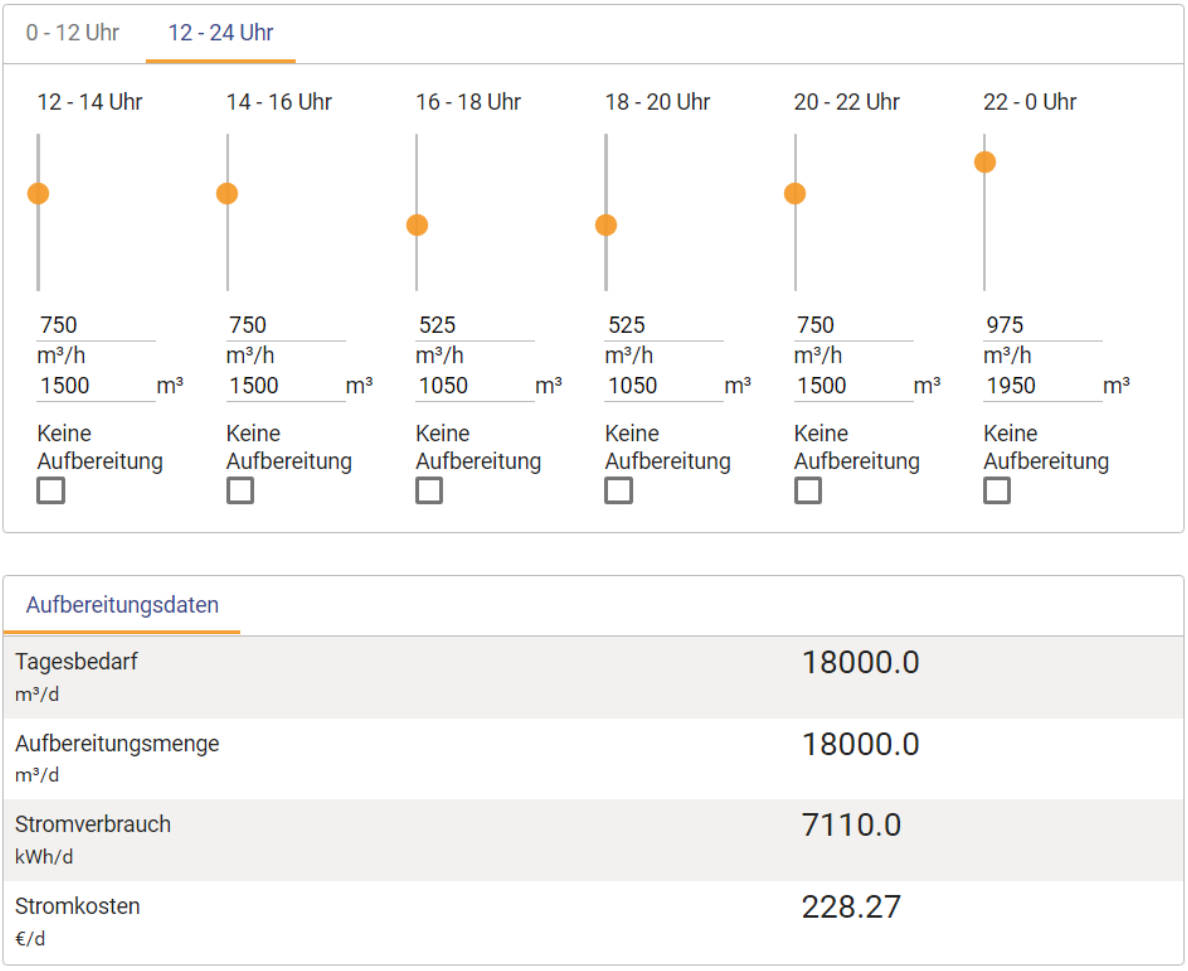


Abbildung 120: Schieberegler zur Anpassung der Aufbereitungsmenge

Die Regelung des Anwenders wird automatisch für alle vier Quartale eines Jahres übernommen. Es besteht anschließend die Möglichkeit, jedes Quartal individuell anzupassen.

Optimierung nach Netznutzung

Aufgrund der Tatsache, dass der Spotmarktpreis nur einen Teil der gesamten Energiebeschaffungskosten ausmacht, sind die Möglichkeiten der Energieeinsparung über den Spotmarktpreis begrenzt. Mehr Einsparpotenzial ist grundsätzlich über eine Reduktion der Netznutzungsentgelte zu erwarten, da diese etwa ein Viertel der gesamten Strombeschaffungskosten ausmachen. Nach der derzeitigen Netzentgeltsystematik lassen sich die Netzentgelte zum einen schlicht durch eine Verringerung der beschafften Strommengen reduzieren, zum anderen aber auch durch die Schaffung von vorteilhaften Anschlusssituationen und eine Änderung des Abnahmeverhaltens. Bei der nachfolgenden Berechnung steht die letztere Variante im Vordergrund. Beim Abnahmeverhalten „belohnt“ die Netzentgeltverordnung im Ansatz Beiträge zu

einer Vergleichmäßigung des Strombedarfs. Diese können die Form einer möglichst dauerhaften konstanten Abnahme oder aber einer atypischen Gestaltung des Lastprofils mit Leistungsspitzen in Zeiten mit generell eher geringem Strombedarf haben.

Die Ergebnisse der Dynamisierung anhand des Spotmarktpreises sind hierfür als Ausgangswerte in jedem Quartal hinterlegt. Um die Kriterien einer atypischen Netznutzung zu erfüllen, muss der Anwender versuchen, das Wasserwerk in den Quartalen mit Hochlastzeitfensters so zu fahren, dass innerhalb der eingezeichneten Hochlastzeitfenster (in den nachfolgenden Grafiken orange markiert) die benötigte Strommenge reduziert wird (vergleiche Abbildung 121 und Abbildung 122).

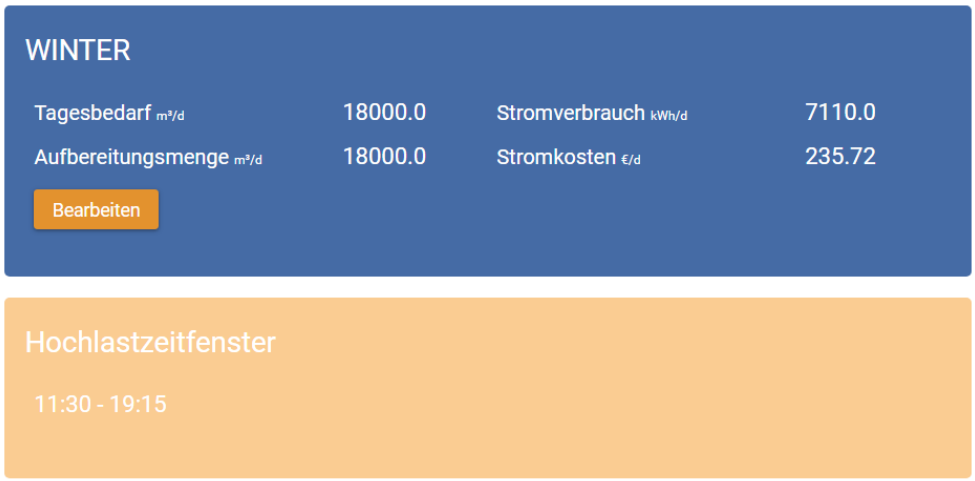


Abbildung 121: Quartal mit Hochlastzeitfenster im Jahr 2014

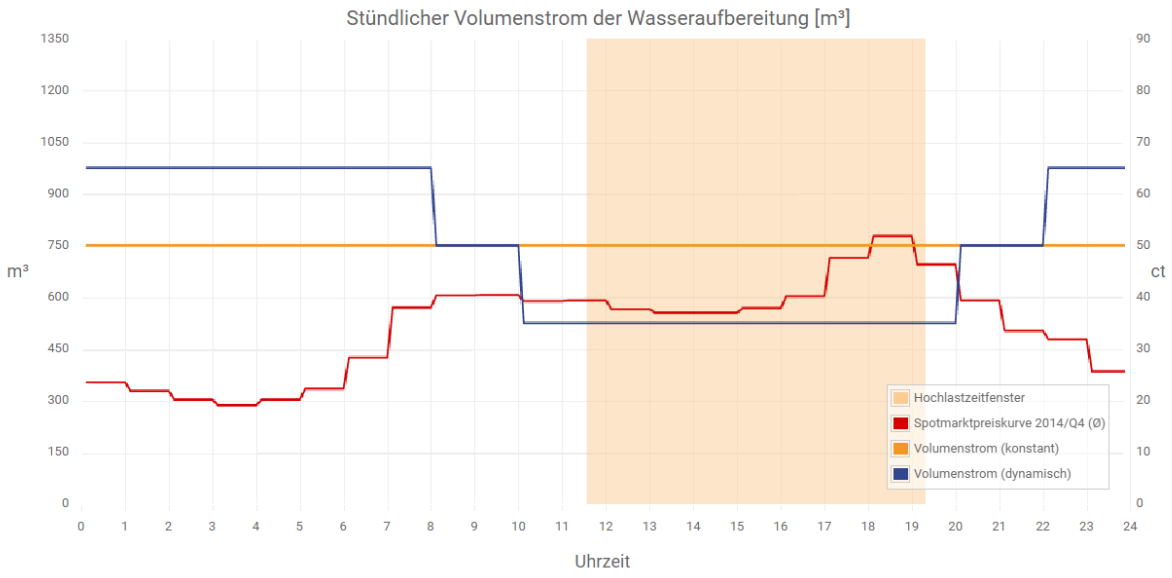


Abbildung 122: Fahrweise nach der Berücksichtigung des Hochlastzeitfensters

Nach Abschluss der Bearbeitung wird dem Anwender angezeigt, ob die Kriterien für eine atypische Netznutzung erfüllt sind (vergleiche Abbildung 123).

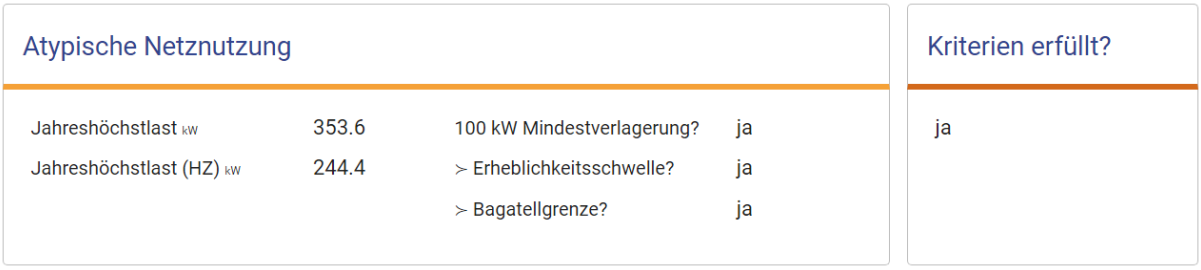


Abbildung 123: Kriterien der atypischen Netznutzung

Ergebnisübersicht

Auf der Ergebnisübersicht erhält der Anwender eine komplette tabellarische, quartalsweise Übersicht zu einer Vielzahl an Parametern, jeweils aufbereitet für eine konstante und dynamische Betriebsweise. Dazu zählen insbesondere:

- Summe Aufbereitungsmenge (m³) und Stromverbrauch (kWh)
- Gesamtkosten, Stromsteuer (Verbrauch), Mehrwertsteuer (€)
- Stromkosten unterteilt in anteilige Kosten (€) für:ö
-
    - Spotmarkt
    - Netznutzung, Leistungspreis, >2500h/a, individuell
    - Netznutzung, Arbeitspreis, >2500h/a
    - Konzessionsabgaben
    - KWKG (Verbraucherkategorie C)
    - EEG
    - Offshore-Haftung (Verbraucherkategorie C)
    - §19-Umlage (Verbraucherkategorie C)
    - AbLaV

Der Anwender erkennt anhand des Vergleiches der dynamischen zur konstanten Fahrweise, ob eine Energieeinsparung erzielt werden konnte.

II.8.3.4 Energetische Optimierung der Wasserverteilung

Der Webdienst „Energetische Optimierung der Wasserverteilung“ erläutert dem Anwender interaktiv mögliche Optimierungspotenziale in der Wasserverteilung und spiegelt damit Forschungsergebnisse des Arbeitspaktes B3 wider.

Die energetischen Optimierungsmöglichkeiten in der Trinkwasserverteilung sind grundsätzlich vielfältig. Neben einer anlagentechnischen Optimierung, z. B. durch Installation von energieeffizienten Pumpen oder von Frequenzumrichtern mit Drehzahlregelung, bestehen in Abhängigkeit der bestehenden Druckzonenkonfiguration im Wesentlichen drei Möglichkeiten zur Verringerung des Energiebedarfs bzw. der Energiekosten der Wasserverteilung (siehe Kapitel 0.)

1. Druckzonenoptimierung.
2. Energierückgewinnung.
3. Optimierung der Fahrweise

Druckzonenoptimierung

Dieser Webdienst gilt für Druckzonen ohne Netzgegenbehälter (vergleiche Abbildung 124). Der Energiebedarf der Wasserverteilung wird fast ausschließlich für den Betrieb der Pumpen aufgewendet. Die benötigte Druckhöhe des Wassertransports orientiert sich stets am Höhenprofil der Abnehmer. Der Energiebedarf der Wasserverteilung ist somit eine Funktion des Produkts der Wasserabgabemenge und der Förderhöhe.

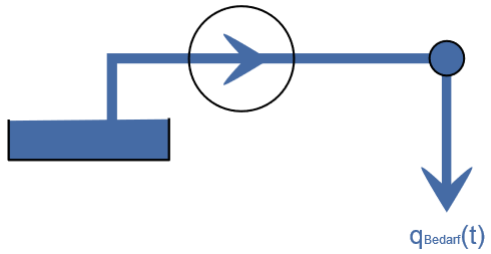


Abbildung 124: Druckzonenoptimierung

Gelingt es dem Wasserversorger die höchst gelegenen Abnehmer im betrachteten Teilabschnitt seines Versorgungssystems dezentral oder in einer eigenen Hochzone zu versorgen, kann dies zu einer Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs in der Druckzone führen.

Ziel der Bildung von Hochzonen ist die Absenkung des Einspeisedrucks der zentralen Reinwasserverteilung auf ein Druckniveau, welches für den Großteil der Abnehmer ausreichend ist. Abnehmer, die aufgrund ihrer Höhenlage oder Entfernung zum zentralen Einspeisepunkt des Versorgungssystems dann nicht mehr mit ausreichendem Druck versorgt werden können, müssen hydraulisch getrennt und über zusätzliche Druckerhöhungslagen (DEA) versorgt werden.

Die Methodik zur Identifikation und Bildung einer Hochzone basiert auf dem Prinzip der Auslegung des Einspeisedrucks unter Berücksichtigung des sogenannten „Druckschlechtpunkts“ einer Druckzone und wurde vom Projektpartner RZVN entwickelt. Der Druckschlechtpunkt be-

zeichnet dabei die am Ende des ungünstigsten Rohrnetzverlaufs liegende Abnahmestelle innerhalb einer Druckzone. Der Anwender kann den Algorithmus mit dem Chart interaktiv nachvollziehen, indem er die einzelnen Iterationsschritte sukzessive abarbeitet (vergleiche Abbildung 125). Das Chart der Druckzone zeigt bei jedem Iterationsschritt den benötigten Energiebedarf in der Hochzone (dezentral) und der Tiefzone (zentral) sowie den gesamten Energiebedarf an. Das Schaubild der Druckzone visualisiert die Veränderung im Leitungsnetz (ohne Abbildung), die durch die Anbindung der Hochpunkte bedingt ist. Die Übersicht (vergleiche Abbildung 126) zeigt den benötigten Energiebedarf der jeweiligen Zonen in konkreten Zahlenwerten und verdeutlicht die absoluten und relativen Änderungen. Die Erläuterungen geben dem Anwender zu jedem Iterationsschritt wichtige Hinweise, um die Veränderung zu verstehen und einordnen zu können.

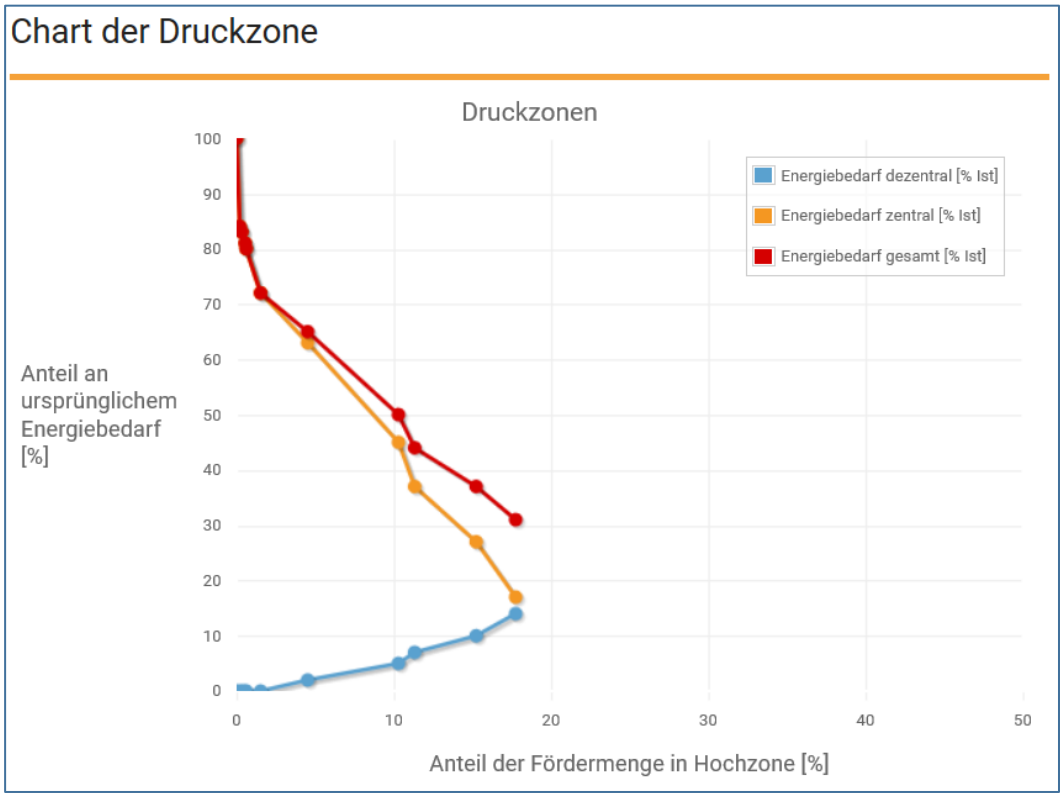


Abbildung 125: Druckzonenchart eines ausgewählten Iterationsschrittes

Übersicht

	Druckzonen		
	Zentrale Zone	Dezentrale Zone	Gesamte Zone
Energiebedarf [kWh/a]	11.382	9.256	20.638
Energiebedarf [%]	17,0	14,0	31,0
Reinwasserabgabe in [m³/a]	632.883	136.413	769.296
Reinwasserabgabe in [%]	82,3	17,7	100,0
Absenkung der Förderhöhe [m]	24,9		
Länge der Hochzone [m]		12.383	
Länge der Hochzone [%]		9,7	

Abbildung 126: Übersicht zum Energiebedarf eines ausgewählten Iterationsschrittes

Energierückgewinnung

Die Erschließung des energetischen Rückgewinnungspotenzials durch die Installation von Turbinen bzw. rückwärtslaufenden Pumpen ist in der Regel nur an Standorten mit hohem Durchfluss und großer Fallhöhe wirtschaftlich (vergleiche Abbildung 127).

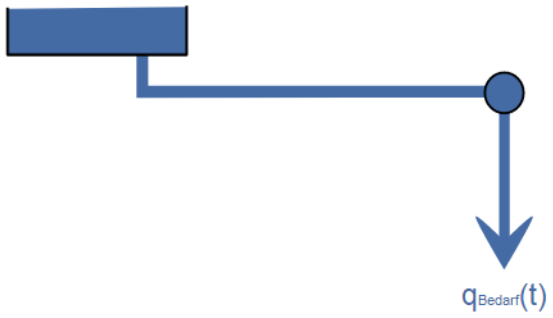


Abbildung 127: Energierückgewinnung

Bei Vernachlässigung der Schwankungen der Reibungsdruckverluste kann bereits anhand eines einzigen mittleren Bedarfsfalls über die Jahreswassermenge der Druckzone, unter Berücksichtigung des Vor- und des Nachdrucks (Druckdifferenz zwischen Vor- und Nachdruck entspricht der Fallhöhe) das jährliche energetische Rückgewinnungspotenzial errechnet werden. Die Formel zur Energierückgewinnung wurde vom Projektpartner RZVN zur Verfügung gestellt. Mit wenigen Eingaben kann der Anwender sein Energierückgewinnungspotenzial errechnen lassen (vergleiche Abbildung 128).

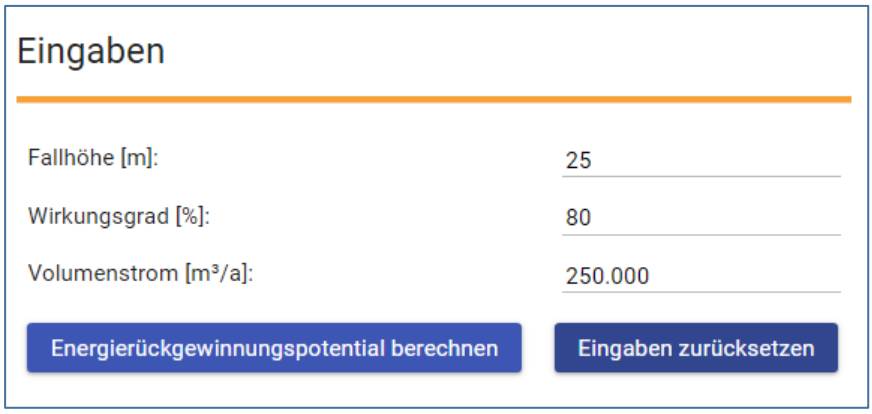


Abbildung 128: Eingabemaske Energierückgewinnung

Das errechnete Ergebnis wird dem Anwender inkl. der internen Rechenkonstanten angezeigt (vergleiche Abbildung 129).

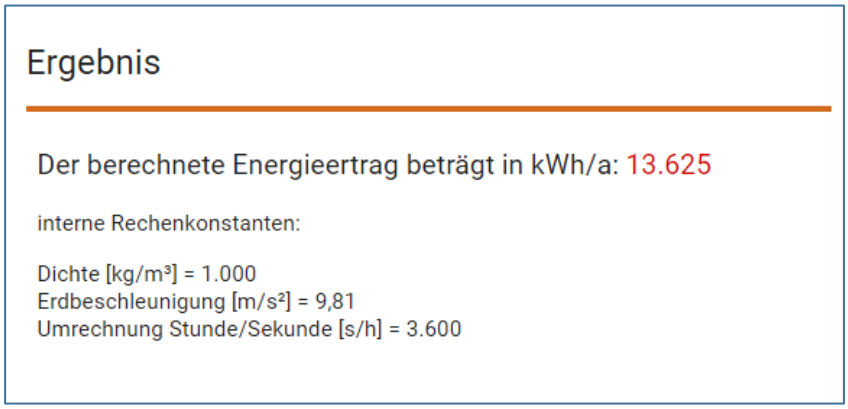


Abbildung 129: Ergebnismaske Energierückgewinnung

Optimierung der Fahrweise

Der Webservice ermöglicht es dem Anwender für das Jahr 2015 auf Basis realer Daten eines Wasserwerkes, unterschiedliche Betriebsweisen eines Wasserwerks nachzustellen. Die Druckzone wird von einem Wasserwerk über Pumpen gespeist und verfügt über einen Netzgegenbehälter.

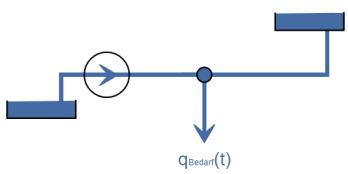


Abbildung 130: Betriebsweise bei Pumpbetrieb und Netzgegenbehälter

In einem interaktiven Chart können für alle Kalenderwochen des Jahres 2015 jeweils die nicht-optimierte und die optimierte Betriebsweise gegenübergestellt werden. Der Webservice beantwortet dem Anwender folgende Fragen:

- Wie sieht die optimierte Betriebsweise aus, wenn nach dem Spotmarktpreis optimiert wird (vergleiche Abbildung 131)?
- Wie sieht die optimierte Betriebsweise aus, wenn nach dem Spotmarktpreis optimiert wird und zusätzlich atypische Netzentgelte berücksichtigen werden (vergleiche Abbildung 132)?
- Wie entwickeln sich die jährlichen Gesamtkosten der Ist-Betriebsweise und der optimierten Betriebsweisen (vergleiche Abbildung 133)?

Welches Wissen wird beim Anwender mit dem Webservice aufgebaut?

- Mit einer optimierten Betriebsweise lassen sich die jährlichen Gesamtkosten senken.
- Für die Optimierung der Betriebsweise muss der Strompreis in zeitvariable und zeitkonstante Komponenten aufgeteilt werden.
- Eine Optimierung nach Spotmarktpreis führt zu geringeren Kosten des Spotmarktbezugs, weil durch eine Verlagerung des Pumpbetriebs in Zeitfenster mit geringen Strompreisen die zeitvariablen Bestandteile der Energiekosten sinken.
- Diese Betrachtungsweise allein reicht aber nicht aus, wenn atypische Netzentgelte zu entrichten sind, weil die Netzeinspeisung auch in Hochlastzeitfenstern (HT-Fenster) erfolgt.
- Eine Optimierung nach Spotmarktpreis ohne Berücksichtigung der atypischen Netzentgelte kann zu höheren Gesamtkosten führen, wenn eine erhöhte Netzeinspeisung in Hochlastzeitfenstern erfolgt.

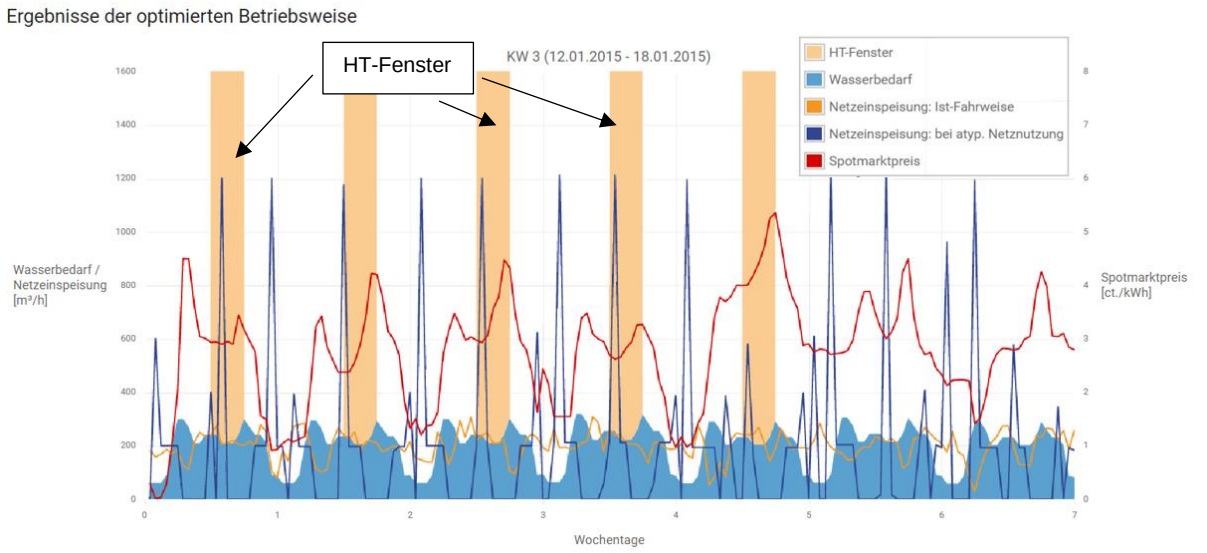


Abbildung 131: Ergebnisse der optimierten Fahrweise ohne Berücksichtigung atypischer Netzentgelte in der Kalenderwoche 3

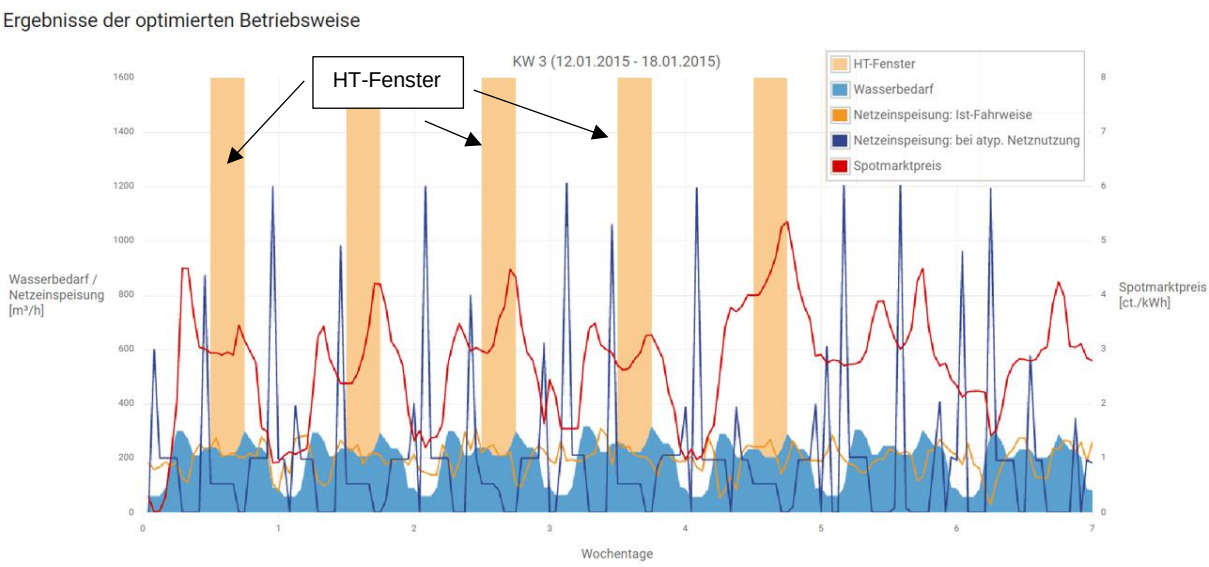


Abbildung 132: Ergebnisse der optimierten Fahrweise mit Berücksichtigung atypischer Netzentgelte in der Kalenderwoche 3

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass für das dargestellte Beispiel mit einer Optimierung der Netzeinspeisung eine Reduktion der gesamten Energiekosten in Höhe von bis zu 12,8 % (Gesamtkosten Ist-Fahrweise – Gesamtkosten Atypische Netznutzung berücksichtigt) realisiert werden kann (vergleiche Abbildung 133).

Bei abweichenden Netzkonfigurationen konnten vom Projektpartner RZVN sogar Einsparpotenziale von 20-25 % der ursprünglichen Gesamtenergiekosten ermittelt werden.

Kosten			
	Ist-Fahrweise	Atypische Netznutzung nicht berücksichtigt	Atypische Netznutzung berücksichtigt
Spotmarktbezug [€/a]	100.0%	80.7%	81.2%
Steuern und Abgaben [€/a]	100.0%	100.0%	100.0%
Netzentgelt Arbeitspreis [€/a]	100.0%	100.0%	100.0%
Netzentgelt Leistungspreis [€/a]	100.0%	303.0%	25.6%
Gesamtkosten [€/a]	100.0%	118.1%	87.2%

Abbildung 133: Gegenüberstellung der jährlichen Gesamtkosten verschiedener Betriebsweisen

Der Großteil der Energieeinsparungen resultiert dabei im Allgemeinen aus der atypischen Netznutzung. Im vorliegenden Beispiel führt eine ausschließliche Orientierung der Pumpzeiten am Spotmarktpreis trotz 19,3 % Einsparungen im Spotmarktbezug insgesamt sogar zu Mehrkosten in einer Größenordnung von 18,1 %, was auf eine Verdreifachung der maximalen Leistung innerhalb der Hochlastzeitfenster zurückzuführen ist (vergleiche Abbildung 133). Das maximale Energiekostenersparnis kann somit nur unter Berücksichtigung des Spotmarktpreises und gleichzeitiger Reduktion der Leistung innerhalb der Hochlastzeitfenster erzielt werden.

II.9 Ergebnis-Synthese, Ergebnis-Transfer - AP E

II.9.1 Nutzungspotenzialanalysen Energieeffizienz

Zur Ermittlung der nationalen und internationalen Vermarktungschancen für die ENERWA-Ergebnisse wurden überregionale Nutzungspotenzialanalysen durchgeführt. Anhand folgender Kriterien wurden geeignete ENERWA-Erzeugnisse dafür ausgewählt:

- Entwicklungsstand: Wie weit ist das Erzeugnis entwickelt (von der Idee bis zur Marktreife)?
- Grad der Alleinstellung: Gibt es vergleichbare Erzeugnisse? Hat das Erzeugnis Eigenschaften, die es von anderen Konkurrenzangeboten abhebt?
- Entwicklungspotenzial: Ist der Markt beschränkt oder wachsend?
- Adaptionspotenzial: Kann das Produkt auf andere Anwendungen übertragen werden?
- Anwendungsvoraussetzung: Welche Vorkenntnisse braucht der potenzielle Anwender?
- Anwendungsrelevanz: Wie groß ist der potenzielle Anwendersektor?

Die Nutzungspotenzialanalysen der vier ausgewählten ENERWA-Erzeugnisse (siehe Kap. II.9.1.1 bis II.9.1.4) verschaffen einen zusammenfassenden Überblick über deren überregionale Marktreife und sind unter www.enerwa.org. zu finden. Sie umfassen folgende Aspekte:

- eine Kurzbeschreibung des ENERWA-Erzeugnisses
- Kurzportraits der Anwendungsregion (z. B. Status quo der Gewinnung elektrischer Energie durch Wasserkraft an Trinkwasser-Talsperren, Vermarktungsoptionen)
- Potenzialanalyse aufbauend auf den Erkenntnissen des/r Kurzportraits
- Bewertung durch potenzielle Anwender (z. B. durch Projekt-Praxispartner)
- Fazit

Die Untersuchung der Anwendungsregionen beleuchtet Chancen, Risiken und hilft bei der Abschätzung einer erfolgreichen Marktintegration. Zudem erhalten potenzielle Anwender und Kunden eine Kurzzusammenfassung über die Anwendungsbreite und -tiefe des Erzeugnisses sowie die Bewertung der Praxisanwendung.

II.9.1.1 Software „Politon“ für Bürgerbeteiligungsverfahren

Das Erzeugnis „Politon“ ist eine Software, die zur Durchführung von modernen Bürgerbeteiligungsverfahren, speziell sogenannten Planungszellen, eigens entwickelt wurde. Es ermöglicht einen benutzerfreundlichen, effizienten und vor allem anonymen Abstimmungsprozess an digitalen Endgeräten durch die Verfahrensteilnehmer*innen.

Der durch die Digitalisierung tiefgreifende Wandel in allen Lebensbereichen ist in vollem Gange und bietet große Chancen, Produkte und Dienstleistungen zu revolutionieren (BMWI, 2017). Mit Hilfe des ENERWA-Erzeugnisses „Politon“ ergeben sich im Rahmen der Digitalisierung und Vernetzung auch für Bürgerbeteiligungsverfahren neue Potenziale. Das Verfahren kann individueller, visueller und schneller gestaltet werden. Zudem ergeben sich große Vorteile im Rahmen der Aufbereitung und Ergebnispräsentation.

II.9.1.2 Identifikation Dynamisierungspotenziale an Talsperrenauslässen

Talsperren erfüllen wichtige Funktionen in den Bereichen Trinkwasserversorgung, Energieerzeugung, Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung. Regionale Zielsetzungen wie der nachhaltige Gewässerschutz und ein hoher Freizeitwert der Region führen jedoch vermehrt dazu, dass sich Talsperrenbetreiber in einem Spannungsfeld potenziell konfliktärer Interessen bewegen.

Der optimale Talsperrenbetrieb unter Einhaltung aller gegebenen Restriktionen gestaltet sich somit zunehmend komplex. Im ENERWA-Projekt stand die energiewirtschaftliche Optimierung des Talsperrenbetriebs im Vordergrund, dennoch mussten hierzu auch die geltenden Rahmenbedingungen erfasst und in Form von Restriktionen berücksichtigt werden.

Zur Identifikation von Dynamisierungspotenzialen an Talsperrenauslässen (Wildbett) unter Berücksichtigung ökologischer Restriktionen wurde ein ENERWA-Erzeugnis entwickelt. Es dient der saisonal abgegrenzten hydrologischen Charakterisierung der Wildbettabgabe anhand historischer Abgabemuster. Über einen Vergleich des erstellten Abgabeprofils mit hydrologischen Referenzmustern können individuelle Potenziale zur Stromerzeugung erarbeitet werden.

II.9.1.3 Einsatzoptimierung von Talsperren-Turbinen

Bei diesem ENERWA-Erzeugnis handelt es sich um ein Instrument zur Optimierung der Turbinen-Fahrweise mit der Maximierung der Stromerlöse als Zielgröße.

Die Bestimmung des energiewirtschaftlichen Potenzials von Talsperren erfolgt auf Basis einer Modellierung aller Wasserentnahmen, Zuflüsse und Restriktionen. Anschließend wird der Einsatz aller Komponenten so optimiert, dass zu möglichst hohen Strompreisen der Strom erzeugt und zu möglichst geringen Preisen Strom verbraucht wird. Ein variabler Preisanreiz ist in Deutschland/Europa durch die Strombörse EPEX gegeben. Dabei muss innerhalb der Dynamisierungsperiode von bspw. 24 Stunden die Summe der jeweiligen Zuflüsse und Entnahmen konstant bleiben.

Die Preisauswertung der EPEX Spot aus den Jahren 2011 bis 2014 zeigt eine durchschnittliche Schwankung über den gesamten Zeitraum von 37,78 €/MWh sowie in jedem einzelnen Jahr eine durchschnittliche Tagesschwankung zwischen 30 und 40 €/MWh. Eine Dynamisierung in diesem Markt über den Zeitraum eines Tages kann also durchaus lohnenswert sein.

Die Ergebnisse der Untersuchung haben gezeigt, dass auch unter Berücksichtigung ökologischer Einsatzgrenzen ein dynamisierbares Potenzial in Deutschland vorhanden ist. Insbesondere die teils deutlich größere Anzahl an „großen“ Talsperren in anderen Ländern – innerhalb sowie außerhalb Europas – deutet weltweit auf weitere Potenziale hin.

II.9.1.4 Druckzonenoptimierung

Das ENERWA-Erzeugnis Druckzonenoptimierung ist eine Software zur Ermittlung und Lokalisierung von Drucküberschüssen in Wasserverteilungsnetzten. Daraus abgeleitet können Maßnahmen entwickelt werden, um den Energieeinsatz in der Trinkwasserversorgung zu optimieren.

Das Ergebnis der Druckzonenoptimierung besteht in einem Maßnahmenvorschlag, welcher die Einrichtung einer separaten, tiefer gelegenen Druckzone vorsieht. Innerhalb dieser Druckzonen werden Gebiete mit gleichen Druckhöhen zusammengefasst. Zur Erfassung der Drucküberschüsse, sowie zur Bewertung des möglichen Einsparpotenzials bietet die Software eine gute Übersicht.

II.9.2 Geschäftsmodell für das ENERWA-Web-Portal

Die Entwicklung eines Geschäftsmodells zur mittel- bis langfristigen Deckung der laufenden Kosten zur Erhaltung des ENERWA-Web-Portal, bestehend aus der ENERWA-Webseite und den Webdiensten, kann nur unter genauer Kenntnis des Marktes, der Produkte und bestehender Geschäftsmodelle für vergleichbare Web-Angebote erfolgen. Nachdem sich der Erarbeitung der ersten beiden Punkte bereits im Rahmen der Nutzungspotenzialanalysen ausführlich gewidmet wurde, kann die Erarbeitung des Geschäftsmodells für das ENERWA-Web-Portal diese Ergebnisse als Basis nehmen und um den fehlenden Aspekt der Analyse bestehender Ertragsmodelle und Ableitung bzw. Entwicklung eines praxistauglichen Geschäftsmodells erweitern.

Recherche und Analyse bereits erfolgreicher Ertragsmodelle

Hierzu wurden in einem ersten Schritt nach mit den entsprechenden ENERWA-Ergebnissen vergleichbaren Web-Angeboten (Informationsportale, Webdienste, (Online-)Tools, etc.) recherchiert, um einen Überblick über den bestehenden Markt und bereits erfolgreich praktizierte Ertragsmodelle zu gewinnen. Die Online-Recherche hierzu erfolgte sehr fokussiert. Es wurden nur solche Webdienste erfasst, die sich mit der energetischen Optimierung wasserwirtschaftlicher Anlagen oder Energieeffizienzfragen im Allgemeinen befassen. Insgesamt konnten 44 Webseiten identifiziert werden, welche sich mit thematischen Aspekten der Energieeffizienz in der Wasserversorgung beschäftigen. 37 dieser Webseiten bieten darüber hinaus (teils mehrere) webbasierte Dienstleistungen unterschiedlicher Komplexitätsgrade an. Die dahinter stehenden Ertragsmodelle basieren größtenteils auf institutioneller Förderung durch öffentliche Stellen und Verbände. Eine Minderheit der recherchierten Webseiten und -dienste wird hingegen über kostenpflichtige Dienstleistungen refinanziert.

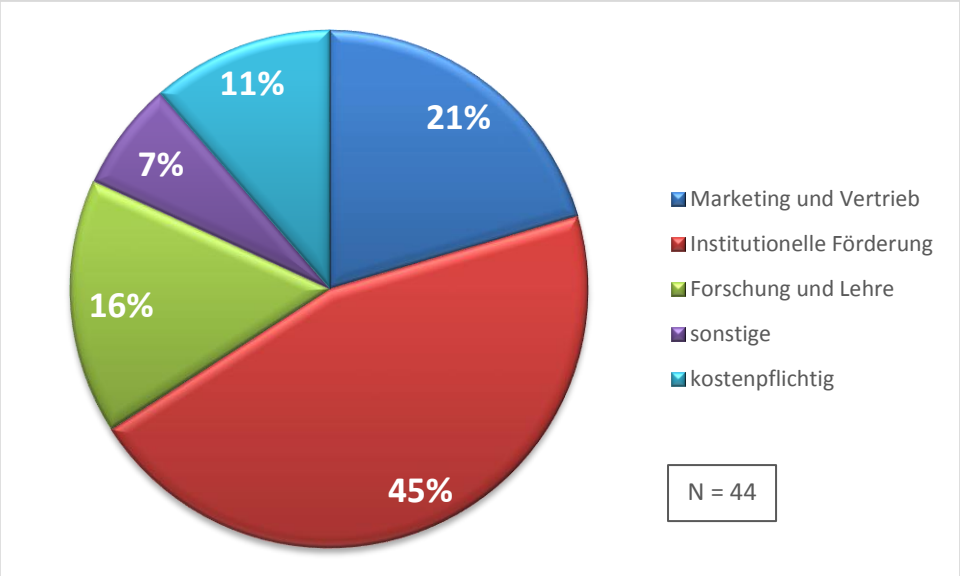


Abbildung 134: Ertragsmodelle der recherchierten Webangebote zur energetischen Optimierung in der Wasserwirtschaft

Begleitend wurden über eine Literaturrecherche weitere innovative Finanzierungsansätze für Dienstleistungen im Web 2.0 recherchiert, welche anschließend mit den Rechercheergebnissen bereits praktizierter Ertragsmodell abgeglichen und auf ihre Eignung für das ENERWA-Webportal geprüft wurden. Im Rahmen dieser Überprüfung musste jedoch festgestellt werden, dass die kritischen Erfolgsfaktoren für klassische Ertragsmodelle im Web von den ENERWA-Angeboten momentan schlichtweg noch nicht erfüllt werden. Eine Refinanzierung über Werbeeinnahmen ist beispielsweise nur bei hoher Reichweite und hohen Nutzerzahlen der Webangebote möglich. Die Erhebung von Nutzungsgebühren für Webangebote führt in der Regel

zu sinkenden Zugriffszahlen und ist bei Erhebung von Bezahlungen per Einzeltransaktion aufgrund der geringen Gewinnspanne nicht lukrativ. Weitere Überlegungen hinsichtlich klassischer Ertragsmodelle im Web wurden demnach zunächst verworfen, könnten aber zukünftig für die ENERWA-Angebote bei Bedarf wieder aufgegriffen werden.

Geschäfts- und Ertragsmodell für die ENERWA-Webangebote

Im Ergebnis konnte auf Basis dieser Recherchen ein „Geschäftsmodell-Baukasten“ bestehend aus potentiellen Angebots- und Finanzierungsbausteinen zusammengestellt werden (Abbildung 135). Dieser beinhaltet verschiedene Dienstleistungs- und Ertragsmodelle zur Fortführung und mittel- bis langfristigen Finanzierung des ENERWA-Webangebots. Hierbei wurden vier grundlegende Angebotstypen der Leistungserbringung durch die Website identifiziert, welche über zwei verschiedene Ertragsmodelle (einzeln oder in Kombination) kostendeckend finanziert werden könnten.

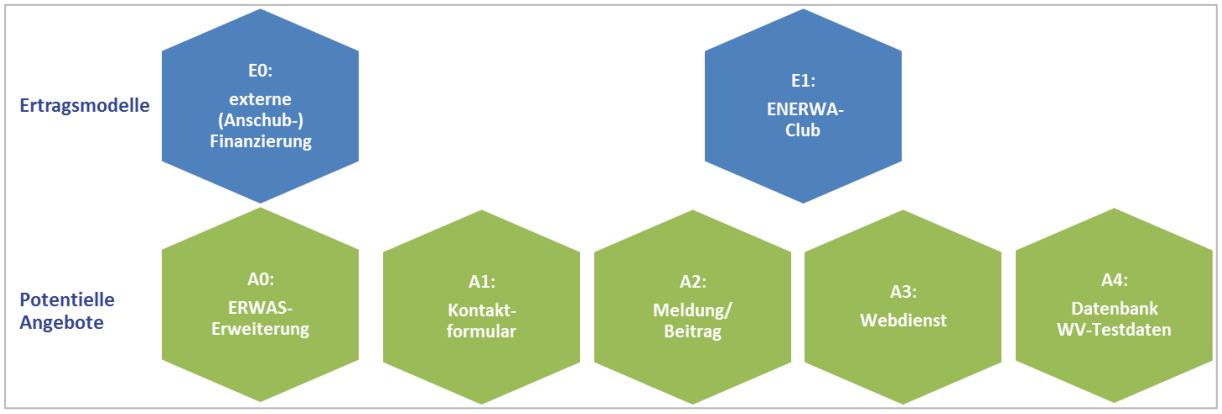


Abbildung 135: Geschäftsmodell-Baukasten für die ENERWA-Online-Angebote

Nachfolgend sollen die sieben Ertrags- und Finanzierungsbausteine einzeln steckbriefartig dargestellt werden. Begonnen wird dabei mit den vier Ideen zu potentiellen Angeboten, welche zwar kurzfristig gesehen zusätzliche Kosten verursachen, langfristig aber positiv zur Steigerung der Attraktivität des ENERWA-Webangebotes und der darüber zu generierenden Erlöse beitragen könnten.

Angebot 0: ERWAS-Erweiterung

Hintergrund

Zusätzlich zum bestehenden Informations-Angebot auf der ENERWA-Webseite sollen bestehende Webdienste sowie weitere ausgewählte Ergebnisse aus anderen ERWAS-Projektverbünden präsentiert werden. Die ursprüngliche ENERWA-Website wird damit zu einer zentralen Anlaufstelle für Energieeffizienz-Fragen in der Wasserwirtschaft erweitert, welche selbst ein breit gefächertes Informationsangebot bietet und mit einer Vielzahl relevanter externer Angebote verknüpft ist.

Geschätzter Personalaufwand:
ergibt sich aus detaillierter Abfrage

Geschätzter Kostenaufwand:
ergibt sich aus detaillierter Abfrage

Wie soll es funktionieren:

In Zusammenarbeit mit ERWASnet wird in einem ersten Schritt über die Projektleiter der einzelnen ERWAS-Verbundvorhaben das Interesse an einer Präsentation der Projektergebnisse über die ENERWA-Website abgefragt. Neben der allgemeinen Interessensbekundung, enthält diese Abfrage im Idealfall bereits die Aufforderung zur Angabe von konkreten Inhalten und zum Umfang der angedachten Ergebnisse und ihrer Darstellungsweise. Auf Basis dieser Abfrage können Personal- und Kostenaufwand der Erweiterungsmaßnahmen näher definiert und - nach Abgleich mit dem zur Verfügung stehenden Budget (siehe Ertragsmodell 1) - vielversprechende Ergebnisse zur weiteren Verwendung ausgewählt werden. Die weiteren Abstimmungen zur Spezifizierung der Ergebnisdarstellung und Aufgabenteilung erfolgen bilateral zwischen den Forschungspartnern und dem Websitebetreiber.

Angebot 1: Kontaktformular

Geschätzter Personalaufwand:
2 Tage (0,5 Tage für Option i.)

Geschätzter Kostenaufwand:
100-400 € pro Partner

Zielgruppe

(Forschungs-)Institute, Firmen/Hersteller

Wie soll es funktionieren:

Kontaktformulare können an unterschiedlichen Stellen auf der ENERWA-Webseite platziert werden:

- am Ende eines Webdienstes
- am Ende eines Beitrages (z. B. Einleitungsseite Ergebnisbericht)

In einheitlichem Design werden dazu in Abstimmung mit den Partnern entweder

i. die Kontaktinformationen eines kompetenten Ansprechpartners (Name, Institut, Telefon, Mail) direkt auf der Website platziert

oder

ii. in Form eines Kontaktformulars – verbunden mit einmaligen Implementierungskosten - umgesetzt werden. Eingehende Nachrichten sollen dabei automatisiert an die Kontaktperson weitergeleitet werden, sodass über die Implementierung hinaus kein weiterer Betreuungsaufwand für den Website-Betreiber resultiert.

Angebot 2: Meldung/Beitrag

Geschätzter Personalaufwand:
2 Tage pro Partner und Jahr

Geschätzter Kostenaufwand:
400 € pro Partner und Jahr

Zielgruppe
(Forschungs-)Institute, Firmen/Hersteller, Wasserversorger/-verbände

Wie soll es funktionieren:

Auch über das Projektende hinaus sollen weitere Mitteilungen und Beiträge auf der Webseite platziert werden um „enerwa.org“ laufend aktuell zu halten. Derzeit bestehen zwei Optionen Beiträge und Meldungen auf der Webseite zu platzieren: in Berichtsform auf der Ergebnisseite oder als Aktuelles-Meldung.

Um Meldungen und Beiträge auf der Website zu platzieren, ist von den Partnern die Bereitstellung von qualifizierten Beiträgen gemäß den vorab bereitgestellten inhaltlichen und formalen Vorgaben („Autorenhinweise“) gefordert. Zur Einreichung von Beiträgen und Meldungen wird eine separate E-Mail-Adresse eingerichtet und ein zentraler Ansprechpartner/eine zentrale Ansprechpartnerin benannt. Redaktionelle Arbeiten, formale Überarbeitungen und sonstige Lektorats-Aufgaben sind im abgeschätzten Personalaufwand und den veranschlagten Kosten nicht eingeschlossen und werden nur durch separate Beauftragung erbracht.

Angebot 3: Webdienst

Geschätzter Personalaufwand:
auf Anfrage bei IWW

Geschätzter Kostenaufwand:
auf Anfrage bei IWW

Zielgruppe
(Forschungs-)Institute, Firmen/Hersteller, Wasserversorger/-verbände

Wie soll es funktionieren:

Nach Projektabschluss sind bereits fünf funktionsfähige Webdienste auf der ENERWA-Website verfügbar. Stehen aus anderen Projekten des ERWAS-Verbundes weitere interessante Forschungsergebnisse zur Verfügung oder besteht ein nachhaltiges Interesse an der Erweiterung bestehender Webdienste, können diese auch nach Abschluss des Projektes in Zusammenarbeit mit unserem Softwareentwickler-Team umgesetzt werden. Der Personal- und Kostenaufwand eines solchen Webdienstes kann nur individuell nach Entwicklungsstand der Webdienst-Idee und Arbeitsaufwand zu dessen Implementierung definiert werden.

Zur ersten Kontaktaufnahme wird IWW das Webdienst-Erfassungsformular online stellen, welches der groben Skizzierung der grundlegenden Webdienst-Idee mitsamt der angedachten Funktionsweise durch den Interessenten dienen soll. Basierend auf diesen Erstinformationen werden in einem kostenlosen Abstimmungsgespräch offene Fragen diskutiert und die Webdienst-Idee konkretisiert. IWW erstellt im Anschluss ein Angebot zur Webdienst-Erstellung, welches zu den darin genannten Konditionen beauftragt werden kann.

Angebot 4: Datenbank	
Geschätzter Personalaufwand: auf Anfrage ***Geschätzter Kostenaufwand:*** auf Anfrage	
Zielgruppe (Forschungs-)Institute, Firmen/Hersteller	
Wie soll es funktionieren: Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl an Daten zu den in ENERWA untersuchten Wasserversorgungssystemen zusammengestellt. Diese Datensätze sollen – das Einverständnis der entsprechenden Praxispartner vorausgesetzt – auch nach Projektende für Forschungs- und Entwicklungszwecke nutzbar gemacht werden. Die Daten werden hierzu von den Projektpartner vorab in eine einheitliche Form und Struktur überführt. Über ein Anfrageformular auf der Website können externe Interessenten Datensätze anschließend in vordefinierten Umfängen kostenpflichtig anfordern. Zur Anforderung der Daten sind neben Kontaktinformationen des Interessenten kurze Angaben zum Verwendungszweck erforderlich.	

Abgesehen von den zusätzlichen Kosten zur Realisierung dieser zusätzlichen ENERWA-Webangebote, gilt es zunächst jedoch die laufenden Kosten des bestehenden Angebotes zu decken. Diese setzen sich zusammen aus fixen Kostenbestandteilen für die Software-, Hardware- und CMS-Wartung sowie für WordPress-Updates und können auf rund 5.000 €/Jahr abgeschätzt werden. Als Ertragsmodelle zur Deckung dieser sowie aller individuell für die zusätzlichen Webangebote anfallenden variablen Kostenbestandteile konnten zwei verschiedene Ansätze identifiziert werden, welche im Folgenden steckbriefartig zusammengefasst werden.

Ertragsmodell 1: institutionelle (Anschub-)Finanzierung

Wer sind potentielle Geldgeber?

Institutionen und Verbände (BMBF, DWA, DVGW, etc.)

Hintergrund

Die Erweiterung des Website- und Webdienstangebotes ist mit hohem Kostenaufwand verbunden, welcher durch den Websitebetreiber allein nicht durch den zu erwartenden Nutzen kompensiert wird. Insbesondere die Einbringung zusätzlicher ERWAS-Inhalte in die Website erfordert einen hohen Personaleinsatz binnen kurzer Zeit, welcher ohne eine zusätzliche finanzielle Unterstützung nur in langfristiger Vorleistung vom Websitebetreiber zu erbringen wäre.

Wofür wird das Geld benötigt?

Ein externer Fördermittelbetrag wird vor allem im Falle der Durchführung des „Angebots 0: ERWAS-Erweiterung“ benötigt, da es sich hierbei um eine über das Ziel der ENERWA-Ergebnisvermarktung hinausgehende Dienstleistung handelt, welche für die am Projekt beteiligten Unternehmen und den Websitebetreiber nicht unmittelbar nutzenstiftend ist. Die Wartungskosten der Homepage sind mit dieser Anfangsinvestition für einen bestimmten Zeitraum abgedeckt. Zur Finanzierung des Ergebnis-Portals über diesen Zeitraum hinweg, müssen dann wiederum andere Geschäftsmodelle genutzt werden.

Welcher Betrag würde ungefähr benötigt?

Der Mittelbedarf zur Erbringung der im Angebotsbaustein „ERWAS-Erweiterung“ benannten Leistungen kann erst nach Definition des Umfangs und der geforderten Darstellungsweise der ERWAS-Ergebnisse verlässlich geschätzt werden.

Ertragsmodell 2: ENERWA-Club	
Wer sind potentielle Mitglieder? (Forschungs-)Institute, Firmen/Hersteller, ggf. auch WVUs und Wasserverbände	
Hintergrund: Die Weiterführung des Website- und Webdienstangebotes ist mit hohem Kostenaufwand (Personal- und Sachkosten) verbunden, welcher für den Websitebetreiber allein nicht durch seinen zusätzlichen Nutzen kompensiert wird.	
Wie soll es funktionieren: Webdienste und weitere Projektergebnisse der Club-Partner werden kostenfrei auf dem Web-Portal präsentiert. Auch die Kontaktdaten ausgewählter Ansprechpartner der Institute und Hersteller werden nebst den jeweiligen Ergebnissen präsentiert und/oder der Homepagebesucher bekommt die Möglichkeit mittels Kontaktformular seine Anfrage automatisiert an die entsprechenden Ansprechpartner zu übermitteln. Die Erbringung dieser kostenlosen Dienstleistungen wird über die „Club-Gemeinschaft“ finanziert. Mit einer Mitgliedschaft verpflichten sich Unternehmen/Institute zu einer jährlichen Beitragszahlung für einen festgelegten Zeitraum. Die Höhe dieser Beitragszahlung ist von der Mitgliederanzahl und dem vom Webseitenbetreiber zu erbringenden Dienstleistungspaket abhängig. Wachstumspotenzial ist dadurch gegeben, dass der „Club“ zunächst mit einer begrenzten Anzahl an Mitgliedern (bevorzugt aus dem ENERWA-Konsortium“) gegründet würde. Nach erfolgreicher Demonstrationsphase können sukzessive weitere neue Mitglieder beworben werden. Ferner ließe sich das Projekt bei Gelingen dieser ersten Pilotumsetzung auch auf weitere Wasserwirtschaftliche Themenstellungen übertragen. Die Club-Mitglieder könnten sich je nach Thema aus vollkommen anderen Konsortien rekrutieren.	

Aus diesem „Baukasten“ heraus sollen über das Projektende hinaus ein realisierbares Kostenträgermodell ermittelt werden, welches die (Fix-)Kosten zur Fortführung der ENERWA-Webangebote decken kann. Eine Verfolgung der beschriebenen Ideen und Ansätze erfolgte bereits während der Projektlaufzeit und wird auch nach Projektende fortgesetzt werden.

Akzeptanzbefragung und weitere Vermarktung

Eine erste Akzeptanzbefragung beim Projektträger sowie den ENERWA-Forschungs- und Praxispartnern wurde bereits im Rahmen des sechsten ENERWA-Projekttreffens durchgeführt. Grundsätzlich konnte hierbei eine breite Akzeptanz der vorgestellten Angebotsbausteine festgestellt werden. Die beiden Ertragsbausteine wurden von den am Projekt beteiligten Partnern zur Kenntnis genommen, konkrete Interessensbekundungen potentieller „ENERWA-Club“-Mitglieder blieben jedoch aus. Die praktische Umsetzbarkeit eines solchen Projektansatzes wurde anschließend einer erneuten Prüfung unterzogen und soll nach weiterer Konkretisierung und Ausweitung der digitalen Angebote wieder aufgegriffen und stärker vermarktet werden. Um diesen Ausbau der bestehenden ENERWA-Web-Landschaft stemmen zu können, bedarf es jedoch einer (institutionellen) Anschubfinanzierung, weshalb dieser Ertragsbaustein zunächst in den Fokus der weiteren Bemühungen zur Entwicklung eines langfristigen Geschäftsmodells rückte.

Der langfristige Betrieb und die Ausweitung der in ENERWA entwickelten Web-Dienste wurden hierzu gegen Projektende in verschiedenen Foren und im Kreise der wasserwirtschaftlichen Verbände vorgetragen. Den ERWAS -Forschungspartnern wurde vorgeschlagen, in einer vom BMBF geförderten Ergänzungsphase weitere energiewirtschaftliche Web-Tools für die Abwasser- und Wasserwirtschaft zu entwickeln. Diese Diskussion wurde auch im Rahmen der ERWAS-Abschlussveranstaltung mit Projektträger und potenziellen Partnern fortgesetzt. Im Ergebnis konnte hierdurch das Interesse einzelner ERWAS-Projektverbünde (u. a. arrivee) geweckt werden. Ob es zu einer Umsetzung der erarbeiteten Webdienstideen kommt, steht zum Zeitpunkt des Projektendes von ENERWA jedoch noch aus.

Parallel erfolgte die Ansprache der wasserwirtschaftlichen Verbände DWA und DVGW. Über den Fachausschuss "Energie in der Wasser- und Abfallwirtschaft" wurden die Verbände und Unternehmen der Abwasserbeseitigung angesprochen. Ziel wäre es, die wasserwirtschaftlichen Verbände für ein dauerhaftes Engagement zum Betrieb und zur weiteren Ergänzung der Web-Dienste zu gewinnen. Eine abschließende Position der Verbände steht dazu noch aus.

Das Feedback von Vertretern potentieller Nutzergruppen konnte unter anderem im Zuge des „28. Mülheimer Wassertechnischen Seminars“ eingeholt werden, bei dem die ENERWA-Webangebote einerseits in einem Vortrag dem breiten Publikum präsentiert wurden und zum anderen im Foyer an einem Informationsstand zum Ausprobieren einluden.

Die zuvor beschriebene Überprüfung der Realisierbarkeit und Umsetzung der einzelnen Angebots- und Finanzierungsbausteine, welche während der Projektlaufzeit begonnen wurde, soll in den folgenden zwei Jahren nach Projektende nun weiter vorangetrieben werden.

II.9.3 Informationsprodukte und Verbreitung der Ergebnisse

II.9.3.1 Leitfaden „Energieeffiziente Wasserwirtschaft“

Um die Projektergebnisse in der interessierten Fachöffentlichkeit zu verbreiten, wurde ein Leitfaden “Energieeffiziente Wasserwirtschaft“ erstellt. Dieser ist eine kurz gefasste Darstellung zur Einführung in die mögliche Nutzung von Energieeinspar- und Energieeffizienz-Potenzialen. Die ENERWA-Ergebnisse wurden in Form von Antworten auf standardisierte Energieeffizienz-Fragen herausgearbeitet, die die entwickelten Analysemethoden und die Ergebnisse an Beispielanlagen nahebringen. Der Leitfaden ist folgendermaßen strukturiert:

- Untersuchungsmethoden/Tools/Vorgehensweise
- Potenziale/Beispiele (Fokus auf die Ergebnisse)

- Vertiefende Literatur (Verweise zu den Ergebnisberichten und wichtiger Literatur)

Die Fragen, die im Leitfaden beantwortet werden, beziehen sich auf die unterschiedlichen fachlichen Bereiche des Projekts:

Bürgerbeteiligung & Rechtsrahmen

- Welchen Beitrag leisten Bürgerbeteiligungsverfahren zu Forschungsfragen in der Ressourcen- und Energiepolitik?
- Wie wirken sich die rechtlichen Rahmenbedingungen auf die Zulässigkeit und Wirtschaftlichkeit der untersuchten Maßnahmen der energetischen Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems aus?

Talsperre & Fließgewässer

- Hat eine dynamische Talsperrenbewirtschaftung Auswirkungen auf die Rohwasserqualität des Staukörpers?
- Wie wird das theoretisch vorhandene energiewirtschaftliche Potenzial von Talsperren ermittelt?
- Wie sind die ökologischen Auswirkungen eines dynamisierten Talsperrenbetriebs im Unterlauf zu bewerten?

Trinkwasseraufbereitung

- Ist ein dynamischer Betrieb von Wasseraufbereitungsanlagen möglich und sinnvoll?
- Wie kann zur energetischen Optimierung aller einzelnen Apparate der Wasseraufbereitung eine gesamtsystemische Analyse durchgeführt werden?

Trinkwassertransport, -speicher & -verteilung

- Welche Einsparpotenziale hinsichtlich Energiebedarf und Energiekosten bestehen in Trinkwassernetzen?

Energie-Management im Verbund

- Ist eine übergeordnete Optimierung von Talsperre – Aufbereitung – Verteilung möglich?

Der Leitfaden wurde als Wiki auf der enerwa.org-Homepage (https://enerwa.org/projektergebnisse) umgesetzt und kann dort auch als Gesamt-PDF heruntergeladen werden.

II.9.3.2 Curricula Material

Um relevante Projekt-Ergebnisse direkt in die Ausbildung von zukünftigen Fachkräften integrieren zu können, wurden Curricula Materialein aus den zwei Bereichen „Talsperre/Flussgebietsmanagement“ und „Einführung in den Spotmarkt“ in Form von Foliensätzen erstellt. Diese behandeln folgende Themen:

- Eigenschaften von Talsperren/Staukörpern
- Umweltfaktoren und -bedingungen
- Gewässergüte von Staukörpern
- Gewässergüte-Monitoring
- Integrale Bewirtschaftung von Staukörpern
- Durchführung einer Spotmarktanalyse

Ziel ist es, dass die Studierenden den Umfang und die Komplexität der integrierten wasserbezogenen Herausforderungen erkennen und das integrierte Wasserressourcenmanagement als eine Kombination aus Management (Naturwissenschaft / Umwelttechnik (Anwendungswissen)) und Nachhaltigkeit verstehen und kennenlernen.

Andererseits werden Studierende aus der Fachrichtung Energiewirtschaft angesprochen, um die Grundlagen und Prozesse zur Erstellung und Auswertung einer Spotmarktanalyse zu verstehen und zu lernen. Die Möglichkeit einer Synchronisation von Energieangebot und –nachfrage wird erklärt.

II.9.3.3 Rückkopplung der ENERWA-Ergebnisse mit Fachpublikum

In ENERWA sind drei Veranstaltungen mit Fachpublikum und Beteiligung fachlicher Entscheidungsträger durchgeführt worden:

- ERWAS-Dach-Seminar (13.9.16 in Augsburg)
- ENERWA-ERWAS-Rechtsrahmen-Workshop (6.4.17 in Berlin)
- ENERWA-Abschlusskonferenz „Energieoptimierung in der Wasserversorgung“ (9.3.17 in Mülheim an der Ruhr)

Ziel dabei war, die Ergebnisse bekannt zu machen, um mehr Akzeptanz für die Umsetzung von Potenzialen zu erreichen und Empfehlungen an die Politik zu formulieren sowie Raum für den Austausch über die energetischen Optimierungspotenziale zu schaffen.

Im ERWAS-DACH-Seminar wurden drei unterschiedliche Blöcke mit länderübergreifender Betrachtung (Deutschland, Schweiz, Österreich) behandelt: „Mensch, Wasser & Energie“, „Mög-

lichkeiten der Flexibilisierung bei Kläranlagen - Interaktion von Abwasserbeseitigung und Energiewirtschaft“ und „Möglichkeiten der Flexibilisierung bei der Talsperrenbewirtschaftung – Nutzung von Energiepotenzialen und Auswirkungen“. Es hat sich gezeigt, dass die Herausforderungen der Potenzialnutzung sowohl auf der Abwasser- als auch auf der Trinkwasserseite bestehen. Weiterhin wurden Ansätze, wie z.B. Regelenergie-Pooling in der Schweiz, vorgestellt. Ein weiterer Fokus lag auf der Bedeutung der Akzeptanz in der Bevölkerung, da die Menschen (sei es Betriebspersonal oder die Bevölkerung) von Veränderungen durch energetische Anpassungsmaßnahmen an Infrastruktursystemen direkt betroffen sind.

Im ENERWA-ERWAS-Rechtsrahmen-Workshop fand mit 60 Teilnehmern ein intensiver Austausch im Rahmen eines sogenannten World Café statt. Das Ziel war, Ergebnisse aus den ERWAS-Einzel-Verbünden vorzustellen und mit Betreibern sowie Verbänden zu diskutieren, zu analysieren und damit das Wissen über die Potenziale und deren Nutzungshemmnisse in den fachpolitischen Diskurs einzubringen. Die folgenden Themen wurden diskutiert:

1. Anforderungen an ein praxistaugliches Energierecht aus Sicht der Wasserwirtschaft (Daniel Schiebold, Becker Büttner Held Berlin - Projekte arrivee und ENERWA)
2. Szenarien für eine energie-flexible Wasserwirtschaft (Dr. Frank Hüesker, TU Kaiserslautern - Projekt arrivee)
3. Barrieren für die Flexibilisierung von Trinkwassertalsperren (Jan Echterhoff, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. / Andreas Maaz, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft / Dirk Salomon, Wupperverband - Projekt ENERWA)
4. Wasserwirtschaftliche Anlagen als Flexibilitätsdienstleister im Stromnetz: Hemmnisse und Chancen (Axel Dierich, inter3 - Projekt arrivee)
5. Nutzung des Lastmanagement-Potenzials in der Wassergewinnung, -aufbereitung und –verteilung (Dr.-Ing. Michael Plath, RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH / Christoph Drusenbaum, Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung - Projekte EnWasser und EWave)

Konsens bestand darin, dass das derzeitige Energierecht die Wirtschaftlichkeit energetischer Optimierungen der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung begrenzt, wenn die Maßnahmen über eine Einsparung von Energie hinausgehen (z.B. Erzeugung, Flexibilisierung). Unterschiede zwischen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung bestehen dabei nur im Detail (z.B. ist die Kraft-Wärme-Kopplung nur für Abwasser relevant). Es sollte mehr Verlässlichkeit auf Seiten der Gesetzgebung geben, da die stetigen Änderungen, z.B. des EEG, den Umgang mit dem Thema sehr schwierig machen. Die hochkomplexe und komplizierte Gesetz-

gebung führt dazu, dass jemand ohne juristischen Hintergrund kaum noch damit zurechtkommt. Der Rechtsrahmenworkshop hat dazu beigetragen, Empfehlungen an die Politik und den Gesetzgeber zu formulieren. Diese können in der ENERWA-Publikation Nr. 8 (Schiebold und Siebeck, 2017) nachgelesen werden.

Zum Abschluss des Projektes ENERWA wurde eine Fachkonferenz zum Thema „Energieoptimierung in der Wasserversorgung“ organisiert und am 9. März 2017 in der Stadthalle Mülheim an der Ruhr erfolgreich durchgeführt. Auf dieser Veranstaltung wurden den fast 150 Teilnehmern aus dem Wasserfach die ENERWA-Ergebnisse präsentiert. Es fand ein reger Informationsaustausch statt. Im Foyer hatten die Teilnehmer die Möglichkeit, sich am Bildschirm direkt über die Web-Tools zu informieren und ein Video zum Bürgerbeteiligungsverfahren zu sehen. Zielgruppe der Veranstaltung waren Vertreter der Wasserversorgung, Talsperrenbetreiber, Wasserverbände, Umwelt- und Wasserwirtschaftsbehörden, Wissenschaft, industrielle Ausrüster und Planungsbüros.

II.10 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

II.10.1 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer

Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der wasserwirtschaftlichen und ökologischen Restriktionen im Unterlauf einer Talsperre im Rahmen von ENERWA dienen u.a. der Verbesserung des bestehenden hydraulischen Modells von Wasserkraftwerken zur Bewertung des Einsatzes von Turbinen am Spot- und Regelleistungsmarkt. Durch die Verbesserung der Modelle und Verfahren kann somit unter anderem im Rahmen des Studentenprojektes „Einsatz von Wasserkraftwerken im Strommarkt“ der Einfluss von Veränderungen in den wasserwirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen auf den Turbineneinsatz ein Gegenstand der Untersuchung sein.

Die Untersuchungen im Staukörper der Talsperre haben gezeigt, dass eine dynamische Talsperrenbewirtschaftung keinen negativen Einfluss auf die Rohwasserqualität haben muss, sondern diese, je nach Ziel- und Einflussgrößen der individuell zu betrachtenden Talsperre, sogar verbessern kann. Die Untersuchungen können somit als Grundlage für weitere Untersuchungen zur Abschätzung von Dynamisierungsgrenzen weiterer Trinkwassertalsperren dienen (je nach Ausbaugrad und weiteren Zielgrößen wie die der LAWA-Steckbriefe).

Innerhalb des Projektes konnten Verfahren zur Bewertung des Einflusses von Talsperren auf die Fließgewässer erarbeitet werden. Diese Methoden stehen nun zur Verfügung, um auch zukünftig an anderen Standorten Vergleiche zwischen Talsperren beeinflussten und unbeeinflussten Gewässerläufen vornehmen zu können. Die vorliegenden Daten bezüglich einer ökologisch verträglichen Optimierung des Talsperrenbetriebs zeigen auf, dass sich eine Dynamisierung des Talsperrenablasses unter Berücksichtigung saisonal geprägter hydrologischer Charakteristika ökologisch positiv auswirken kann. Diese positiven Effekte sind unter Berücksichtigung der jeweiligen Vor-Ort-Bedingungen auch bei der Dynamisierung weiterer Talsperren zu erwarten und können basierend auf der hier vorgeschriebenen Methodik wissensbasiert hergeleitet werden.

Meinung der ENERWA-Praxispartner:

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden auf den zukünftigen Bewirtschaftungsplan der Trinkwassertalsperren Einfluss haben. Zurzeit finden noch Untersuchungen zum Betrieb von Talsperren unter Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen statt. Danach wird ein neuer Bewirtschaftungsplan aufgestellt, in den auch die Ergebnisse aus ENERWA (dynamischere Abgabe an den Unterlauf statt mehr oder weniger kontinuierlicher Abgabe) einfließen.

II.10.2 Energieeffizienz in der Trinkwasseraufbereitung

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen von Wasseraufbereitungsanlagen können kurzfristig im Rahmen der Beratungstätigkeiten in Wasserwerken angewendet werden. Eine entsprechende Dienstleistung „Energieeffizienzsteigerung in Wasserwerken“ wurde bereits in das Leistungsangebot der Projektpartner IWW und RWW aufgenommen und angeboten. Auch mit der Aufbereitung der Ergebnisse in Form von Web-Diensten und als Anleitung für Anwender im ENERWA-Leitfaden wurde die Verwertbarkeit der Ergebnisse in der Praxis von Wasserversorgern unterstützt.

Meinung der ENERWA-Praxispartner:

Auf Basis der Projektergebnisse können Maßnahmen zur Energieeinsparung in der Wasseraufbereitung abgeleitet und umgesetzt werden, sofern sie sich auch wirtschaftlich darstellen lassen. Dies muss im Einzelfall noch geprüft werden. Der Nutzen der Projektergebnisse ist für die Wasserversorger somit direkt vorhanden.

II.10.3 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung

Die Optimierungsverfahren für Trinkwasserverteilungsnetze wurden prototypisch in Softwaremodule umgesetzt, sind jedoch noch in einem zu frühen Entwicklungsstadium um direkt für neue Dienstleistungen eingesetzt zu werden, da die Erstellung, Anpassung und Parametrierung der Modelle noch vergleichsweise aufwendig ist und eine besondere Expertise erfordert.

Daher ist geplant, die Verfahren zur Marktreife weiterzuentwickeln. Die Optimierungsansätze und Ergebnisse sind in Gesprächen mit Kunden sowie bei Vorträgen auf Fachkonferenzen auf breites Interesse gestoßen, was die hohe Relevanz einer energetischen Optimierung der Trinkwasserverteilung aufzeigt. Die RZVN GmbH plant daher dieses Themenfeld als eines der zukünftigen Säulen ihres Dienstleistungsangebots auszubauen und damit für einen Transfer der Forschungsergebnisse zu den Wasserversorgern zu sorgen.

Ein erster Ergebnistransfer erfolgte bereits durch zwei Fachveröffentlichungen sowie zwei Vorträge (siehe Kapitel II.12). Weitere Vorträge werden auf zwei Konferenzen im Oktober 2017 gehalten.

Meinung der ENERWA-Praxispartner:

Die Ergebnisse des Projektes zeigen nennenswerte technische Energieeinsparpotentiale im Bereich der Trinkwassertransport- und -verteilnetze sowie der Trinkwasserspeicherung. Den

Wasserversorgern wurden die entsprechenden Möglichkeiten aufgezeigt. Andererseits werden vor dem Hintergrund der herrschenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen konkrete Umsetzungsmaßnahmen in der Praxis gehemmt. Durch die Projektergebnisse wird jedoch in jedem Fall im Bereich der Netzplanung - speziell hinsichtlich Trinkwasserspeicherkonzepten und Druckzonendefinitionen - der bisher alleingültige Blick auf die Netzdimensions- und Hydraulikoptimierung auch auf die energetischen Aspekte erweitert. Die Ergebnisse sind bereits so differenziert, dass eine Umsetzung von den Wasserversorgern geprüft werden kann.

II.10.4 Energiemanagement im Verbund

Die Verbundbetrachtung verlangt die relativ komplexe Aufstellung einer Simulationskette sowie die Ableitung von Ersatzsystemen für die drei Teilsysteme. Der Nutzen ist gegeben, weil tatsächlich das Gesamtsystem geschlossen betrachtet werden kann. Da sich aber das Verteilnetz als dominant herausgestellt hat, ist die Gesamtbetrachtung eher zweitrangig geworden.

Als sehr positiv hat sich die Betrachtung zur Dynamik in der Talsperre mit den geringen Folgen auf die Leitparameter der Wasserqualität herausgestellt. Da ein Modellbaustein mit CE-QUAL-W2 anwendungsreif vorliegt und dessen Kopplungsfähigkeit gegeben ist, kann den Anforderungen, die auf diesem Gebiet steigend sind, entsprochen werden.

II.10.5 Web-Dienste „Energieeffizienz“

Die in ENERWA entwickelten Web-Dienste stellen die Projekt-Lösungsansätze modellhaft und komprimiert vor: Interessierte Anwender erhalten die Möglichkeit, Forschungsergebnisse interaktiv kennenzulernen und gebündelte Energieeffizienz-Informationen auf einer zentralen Plattform zu finden. Optimierungsprobleme wurden didaktisch aufbereitet. Die Seite www.enerwa.org sowie die Web-Dienste können eine wichtige Erstkontaktfunktion übernehmen. Der Anwender wird auf wesentliche Forschungsergebnisse hingewiesen und findet schnell weiterführende Informationen sowie Ansprechpartner für weitere Unterstützung.

Darüber hinaus sollen die Verantwortlichen anderer Verbund- bzw. Forschungsprojekte ermutigt werden, ebenfalls über die Realisierung von Web-Diensten nachzudenken, um ihre Forschungsprojekte einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung zu stellen. Erste Erfolge zeigen sich bereits daran, dass seitens eines anderen ERWAS-Verbundprojektes Kontakt zu ENERWA-Ansprechpartnern bezüglich der Web-Dienste aufgenommen wurde.

II.10.6 Bürgerbeteiligungsverfahren

Im Zuge der weitreichenden nationalen und internationalen Literatur- und Datenbankrecherche wurde festgestellt, dass das Konzept Planungszelle als Format der Bürgerbeteiligung das

erste Mal innerhalb des Projekts ENERWA für ein wasserpolitisches Verfahren angewendet wurde. Die Kernbestandteile der Planungszelle, die Zufallsauswahl der Teilnehmenden, die Expertenvorträge und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen in Gruppen sind die Merkmale, welche das Verfahren auch künftig für wasserwirtschaftliche Infrastrukturprojekte interessant machen.

Die Ergebnisse der Planungszelle gaben Aufschluss darüber, was für Veränderungsstrategien die BürgerInnen erwarten, welche Entscheidungen sie bereit sind verantwortlich mitzutragen, und welche Maßnahmen sie aktiv mitgestalten wollen. Die Zufallsauswahl der TeilnehmerInnen garantierte eine gleichberechtigte Teilnahme aller Bevölkerungsgruppen. Sie steigerte die Akzeptanz der in dem Verfahren herausgearbeiteten Ergebnisse in entscheidendem Maße. Mit der Durchführung des Verfahrens in ENERWA wurden auch Menschen erreicht, die sich sonst an politischen Veranstaltungen nicht beteiligen. Die Teilnehmenden gewannen an Kompetenz, ihr Handlungs- und Sachwissen in einem komplexen Themenbereich wurde gestärkt. Der gesellschaftspolitische Nutzen des Verfahrens in ENERWA für die energetische Optimierung des Wassersystems ist sowohl auf lokaler Ebene in den beteiligten Städten wie auch allgemein für wasserpolitische Vorhaben nachhaltig von großer Bedeutung.

Die eigens für das Bürgerbeteiligungsverfahren ENERWA entwickelte Abstimmungssoftware Politon ermöglichte eine benutzerfreundliche, effiziente und anonyme Abstimmung innerhalb der Planungszellen. Die Resonanz bei den Teilnehmenden war sehr positiv – so würden Dreiviertel der Bürgerinnen und Bürger die Abstimmung mit Politon gegenüber analogen Verfahren bevorzugen. Die Software Politon verspricht demnach wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten für weitere Projekte und bietet funktionale und wirtschaftliche Vorteile.

Die Software Politon war auch Thema des am 24.-26. April 2015 angebotenen Blockseminars für Studierende der Bergischen Universität zum Thema „Bürgerbeteiligung für nachhaltige Energiepolitik“. Hier diskutierten die Teilnehmenden über verschiedene moderne Partizipationsmöglichkeiten, wie E-Partizipation, Bürgerforen, Konsultationen, Liquid-Democracy und die sogenannte „Meerbusch Card“, die sie unter Anwendung von klassischer Politiktheorien analysierten und bewerteten. In dem Blockseminar wurde die entwickelte Abstimmungssoftware Politon vorgestellt und getestet, bevor sie in dem Bürgerbeteiligungsverfahren eingesetzt wurde. Die Studentinnen und Studenten bewerteten die Software äußerst positiv und erklärten den erheblichen Vorteil von Politon gegenüber analogen Modellen bei Präsenzverfahren wie der Planungszelle oder der reinen Online-Beteiligung.

II.11 Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

II.11.1 Energieeffizienz und –gewinnung: Talsperren und Gewässer

Während der Projektlaufzeit sind keine Fortschritte auf dem Gebiet der dynamischen Talsperrenbewirtschaftung bekannt geworden, die das Projekt ENERWA im Wesentlichen beeinflusst haben. Das ERWAS-DACH-Seminar (siehe Kapitel II.9.3.3) wurde genutzt, um Erfahrungen rund um die dynamische Bewirtschaftung von Talsperren im internationalen deutschsprachigen Kontext zu diskutieren. Die Problemstellungen und Auswirkungen einer dynamischen Talsperrenbewirtschaftung in den Nachbarländern Österreich und Schweiz sind jedoch, auf Grund der alpinen Strukturen, nur bedingt auf das Nordrhein-Westfälische Grundgebirge übertragbar.

Hinsichtlich des Strommarktes stellt der Day-Ahead-Markt Trade-Offs zwischen Vermarktungsaufwand, Hoheit über die Anlagensteuerung und Erlösmöglichkeiten dar. Höhere Potenziale bietet der kurzfristiger gehandelte Intraday-Markt, jedoch ist hierzu eine aufwendigere Echtzeitvermarktung erforderlich. Die Erschließung des Regelleistungsmarktes erfordert entweder die Vermarktung im Portfolio oder über einen externen Dienstleister, wodurch das verbleibende Erlöspotenzial geschmälert wird. Gleichzeitig sind hier in den vergangenen Jahren große Preisschwankungen mit Tendenz zu sinkenden Preisen zu verzeichnen. Bei einer Vorhaltung von Regelleistung wird außerdem die Hoheit über die Anlagensteuerung an den Regler oder Direktvermarkter abgebeben, was in der Praxis für viele Anwendungen der Trinkwasserversorgung ein Ausschlusskriterium darstellt.

II.11.2 Energieeffizienz und –gewinnung: Trinkwassertransport, Speicher, Verteilung

Die Stadtwerke Tübingen haben ein Optimierungstool (swt-Optimierer) entwickelt, mit dem die Kosten für die Wasserverteilung minimiert werden sollen. Es berechnet die optimalen Fahrpläne durch bedarfsgerechtes Verschieben von flexiblen Pumpzeitfenstern, optimalen Einsatz der Aggregate, Ausnutzung der vorhandenen Speicher und Berücksichtigung von Hochlastzeitfenstern. Der swt-Optimierer wird dabei permanent mit den aktuellen Börsenstrompreisen gefüttert.

Das Tübinger Modell ist prinzipiell ähnlich dem in ENERWA entwickelten Ansatz zur Lastverschiebung im Wasserverteilungsnetz. In ENERWA wurden die Potenziale für ganze Jahre berechnet. Der swt-Optimierer berechnet 1 bis 3 Tage im Voraus für die operative Planung.

II.11.3 Ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Da das Energierecht eine sehr dynamische Rechtsmaterie ist, gab es auch während der Durchführung des Projekts ENERWA verschiedene Änderungen energierechtlicher Vorschriften. Hervorzuheben ist insbesondere die zweimalige Änderung des Erneuerbare Energie-Gesetzes (EEG) zum 01.08.2014 und zum 01.01.2017. Die damit verbundenen Änderungen (namentlich die grundsätzliche Belastung der Eigenversorgung mit der EEG-Umlage durch das EEG 2014 und die weitere Einschränkung des diesbezüglichen Bestandsschutzes bei der Modernisierung von Altanlagen durch das EEG 2017) bedeuten allerdings eher Rück- als Fortschritte. Weitere Änderungen des Energierechts (z. B. durch das Netzentgeltmodernisierungsgesetz) sind absehbar.

Im Bereich des öffentlichen Wasserrechts und des Wasserversorgungsrechts ist vor allem die Novellierung des Wassergesetzes Nordrhein-Westfalen im Juni 2016 zu nennen, welche jedoch für die im Projekt untersuchten Maßnahmen nur zu kleineren Rechtsänderungen geführt hat.

Relevante Fortschritte im rechtswissenschaftlichen Bereich, insbesondere in Form einer aktuellen Querschnittsdarstellung der für die energetische Optimierung der Wasserversorgung relevanten Rechtsbereiche außerhalb des Projekts ENERWA sind nicht bekanntgeworden (siehe das im Rahmen von ENERWA erarbeitete Papier „Rechtliche Rahmenbedingungen für eine energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems“).

Bürgerbeteiligung ist ein zentrales politisches Thema der Kommunen und Länder in Deutschland. In der Bevölkerung und in der Politik wächst deutlich der Anspruch, Mitbestimmungsmöglichkeiten zu schaffen und Entscheidungsprozesse transparenter zu gestalten. Sowohl große Projekte, die bundesweit Aufsehen erregen, als auch kommunale oder länderspezifische Vorhaben werden häufiger von den Medien aufgegriffen. Bürgerbeteiligung in verschiedenen Formen findet schon immer vor allem auf kommunalen Ebenen statt. Seit 2010 gehen jedoch immer mehr Städte dazu über, Leitlinien und Satzungen zu Bürgerbeteiligung zu beschließen, um die zunehmende Anzahl an Verfahren und Forderungen hiernach zu ordnen. Bislang wurden Beteiligungsatzungen in über 30 Städten von einer Größe zwischen 12.000

und 1.000.000 Einwohnern entwickelt. Faktisch wurden Bürgerbeteiligungsverfahren mit zunehmender Tendenz durchgeführt: Mehr als die Hälfte aller Verfahren in Deutschland fanden seit 2003 statt. Die Anzahl der durchgeführten Verfahren sowie der Anspruch auf Beteiligungsformen vonseiten der Bürgerschaft wächst seit 2015 stetig an. Diese Daten und weitere Details zu den Verfahren werden in der Datenbank Bürgerbegehren des Instituts für Demokratie und Partizipationsforschung in der BUW (IDPF) festgehalten.

Während der Durchführung des Projektes wurde die Datenbank Energiepolitische Bürgerbeteiligungsverfahren in NRW vonseiten des IDPF im Rahmen eines anderen Projektes entwickelt. Die Datenbank erfasst, dokumentiert und analysiert öffentliche Debatten im Rahmen von Bürgerbeteiligung zu Energiewendethemen im Land Nordrhein-Westfalen. Die Dokumentation erfolgt im Rahmen des Virtuellen Instituts (VI) „Transformation – Energiewende NRW“, einem Forschungsverbund verschiedener Forschungsinstitute des Landes Nordrhein-Westfalen. Ziel des Datenbankprojektes ist es, Hintergrunddaten zu sozioökonomischen und kulturellen Implikationen der Energiewende unter Berücksichtigung der spezifischen nordrhein-westfälischen Rahmenbedingungen zu ermitteln. Laut Datenbank fanden in NRW seit 2010 über 100 energiepolitische Bürgerbeteiligungsverfahren verschiedener Formen statt, die sich mit den Themen Biomasse, Geothermie, Infrastruktur, Konventionelle Kraftwerke, Solar-, Wasser- und Windenergie beschäftigten. Das Bürgerbeteiligungsverfahren im Projekt ENERWA wurde in die Datenbank aufgenommen.

II.12 Publikationen

Echterhoff J., Meißner J., Schweer D., Maaz A., Meißner T. (2017): Energetische Dynamisierung von Trinkwassertalsperren - Dokumentation zu regionalen Potenzialen, Kosten, Nutzen und Einsatzgrenzen, ENERWA-Publikation Nr. 6, www.enerwa.org, 03/2017

Echterhoff J., Meißner J. (2015): Die gewässerchemischen und chemisch-physikalischen Prozesse einer Trinkwassertalsperre unter Berücksichtigung eines dynamisierten Talsperrenbetriebs, ENERWA-Publikation Nr. 2, www.enerwa.org, 08/2015

EUWID (2014): ENERWA untersucht energetische Potenziale in Prozesskette der Wasserversorgung. EUWiD, Ausgabe: WA23/2014 Ersch.-Dat.: 03.06.2014

EUWID (2015): ENERWA: Energetische Optimierung von Wasserversorgungssystemen ist möglich. EUWID, Ausgabe: WA41/2015 Ersch.-Dat.: 06.10.2015

FiW (Hrg.) (2016): Handouts zum ERWAS-DACH-Seminar, ENERWA-Publikation Nr. 4, 09/2016.

Hensel P., Layec V. (2015): Energetische Optimierung der Wasserversorgung: Verteilung, Speicherung und Rückgewinnung, 3R Rohre, Ausgabe 10-11/2015

Hensel P. (2017): Energetische Optimierung von Trinkwassernetzen, 3R Rohre, Ausgabe 03/2017

Lietzmann H. J., Schwalm M., Jacquemain J. (2016): Energetische Optimierung des Gesamtwassersystems – Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen, ENERWA-Publikation Nr. 3, www.enerwa.org, 07/2016

Merkel M., Rohn A. (2016): Da geht noch was: Energieoptimierung in der Wasserversorgung. Interview in: ERWAS-Special ENERWA, gwf-Wasser | Abwasser, 7-8/2016

Rohn A. et al (2016): Erweiterte Nutzung von Trinkwasser-Talsperren unter energetischen Aspekten. WasserWirtschaft, 6/2016

Schiebold D., Siebeck J. (2016): Darstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen, ENERWA-Publikation Nr. 5, www.enerwa.org, 09/2016

Schiebold D., Siebeck J. (2017): Rechtliche Rahmenbedingungen für eine energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems. ENERWA-Publikation Nr. 8, www.enerwa.org, 06/2017

Wencki K. (2015): Ökonomische Rahmenbedingungen- Wasserwirtschaftliche Optimierungsvarianten, ENERWA-Publikation Nr. 1, www.enerwa.org, März 2015

Wencki K., Koti J., Hunze S. (2017): Ökonomische Rahmenbedingungen - Anreizsysteme zur lastoptimierten Versorgung, ENERWA-Publikation Nr. 7, www.enerwa.org, April 2017

Geplante Publikationen:

Meißner T., Feld C.: River regime shifts through reservoir dam management and options for ecological improvement. Water Research, Einreichung Ende September 2017

Meißner T., Feld C.: Flow regime shifts impact ecological status more than physico-chemistry and morphology. STOTEN oder Journal of Applied Ecology, Einreichung Dezember 2017

Stetter D., Gaba A.: Energetische Einsparpotenziale in Wasserwerken (inkl. Webdienste). gwf – Wasser | Abwasser oder energie | wasser-praxis, Einreichung November 2017

Echterhoff J., Meißner T., Maaz A.: Erweiterte Nutzung von Trinkwasser-Talsperren unter energetischen Aspekten und Auswirkungen auf die Ökologie. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, Einreichung bis Ende 2017

Löwen D., Hensel P., Wencki K.: Hochrechnung von Energieeinsparpotenzialen in Wasserversorgungsgebieten auf die BRD. gwf – Wasser | Abwasser oder energie | wasser-praxis, mit Kurzbeitrag in ZfK und euwid, Einreichung bis Ende 2017

Vorträge:

Echterhoff J. (2017): Auswirkungen auf die Schichtung des Staukörpers und die Rohwasserqualität der Trinkwasseraufbereitung. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Heinzke J. (2017): ENERWA-Web: web-basierte Dienste. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Hensel P. (2015): Energetische Optimierung der Wasserversorgung: Verteilung, Speicherung und Rückgewinnung, Vortrag 5. Praxistag Wasserversorgungsnetze, Essen 10.11.2015

Hensel P. (2017): Optimierung von Trinkwassernetzen, Druckzonen und Speichern. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Lietzmann H. J. (2015) Begrüßung und Einleitung des Bürgerbeteiligungsverfahrens. Bürgerbeteiligungsverfahren, Wuppertal, 2.-5. November 2015

Lietzmann H. J. (2015) Bürgerbeteiligung im Rahmen der Wasserwirtschaft. Stakeholderbeteiligung, Wuppertal, 2. September 2015

Lietzmann H. J. (2016) Bürgerakzeptanz schaffen. Bürgerbeteiligung als Voraussetzung wirksamer wasserwirtschaftlicher Energieprojekte. ERWAS Dachkonferenz, Augsburg, 12. September 2016

Lietzmann H. J. (2016) Bürgerbeteiligung in der Wasserwirtschaft. Planungserfordernis und Erfolgsbedingung, Aqualon, Köln 10. November 2016

Lietzmann H. J. (2016) Partizipation bei energiepolitischen Entscheidungen. Forschungszentrum Jülich, 22. Juni 2016

Lietzmann H. J. (2017): Bürgerbeteiligungsverfahren - Unterstützung von energie- und wasserwirtschaftlichen Veränderungen durch gesellschaftliche Akzeptanz. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Lohr, H. (2017): Verbundbetrachtung von Wasserversorgungssystemen: Integration und Herausforderung bei der Kopplung von Talsperre - Aufbereitung – Versorgungsnetz. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Maaz A. (2017): Energiewirtschaftliche Bewertung der Dynamisierung des Abflussregimes an Talsperren. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Meißner T. (2015): Abfluss und Abflussdynamik, Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Limnologie, Essen, 21. September 2015

Meißner T. (2015): Dynamisierung nach ökologischen Gesichtspunkten, Bürgerbeteiligungsverfahren, Wuppertal, 2.-5. November 2015

Meißner T. (2016): Abflussregime und Struktur von Makrozoobenthosgemeinschaften in Mittelgebirgsbächen, Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Limnologie, Wien, 26.-30 September 2016

Meißner T. (2017): Ökologische Auswirkungen eines veränderten Abflussregimes von Talsperren – Grenzen und Monitoringstrategie. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Merkel W. (2015): Begrüßung und Vorstellung von ENERWA. Bürgerbeteiligungsverfahren, Wuppertal, 2.-5. November 2015

Merkel W. (2015): ERWAS Energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft. Themen aus Sicht der Wasserversorgung. DVGW Forschungsbeirat Hannover, 20.05.2015

Merkel W. (2016): Anpassungsfähige und effiziente Versorgungssysteme für Trinkwasser. BMBF Forschungsforum „Bausteine für Wassersysteme der Zukunft – innovativ, flexibel und energieeffizient“ IFAT München, 31. Mai 2016

Merkel W. (2016): Erweiterte Nutzung von Trinkwasser-Talsperren unter energetischen Aspekten. 17. DeutschesTalsperrensymposium, Freiburg, 15.-17. Juni 2016

Merkel W. (2017): Energetische Optimierung der Trinkwassergewinnung aus Talsperren. Fernwasserforum der ATT/DVGW, Würzburg, 9.-10. Mai 2017

Plath M. (2017): Energieeffizienter Betrieb des Gesamtsystems Wasserversorgung. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Rohn A. (2017): Ergebnisse von ENERWA. Vortrag beim Wupperverband, Wuppertal, 22. Mai 2017

Schiebold D. (2017): Rechtlicher Rahmen und Wirtschaftlichkeit von energetischen Optimierungsmaßnahmen. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Stetter D. (2015): ENERWA – erste Ergebnisse zur Wasseraufbereitung, Vortrag Forum Fernwasserversorgung in Kassel, 5./6. Mai 2015 (DVGW)

Stetter D. (2017): Energetische Einsparpotenziale von Aufbereitungs- und Nebenanlagen in Wasserwerken. 28. Mülheimer Wassertechnisches Seminar, Mülheim an der Ruhr 9. März 2017

Wencki K. (2015): Wasser – Energie - Energiewende: Was heißt „energetische Optimierung“? Bürgerbeteiligungsverfahren, Wuppertal, 2.-5. November 2015

Geplante Vorträge:

W. Merkel: Das Forschungsvorhaben ENERWA: Projektansatz und -durchführung sowie Erkenntnisse. Fachtagung DVGW-Landesgruppe Rheinland-Pfalz: Energieoptimierung in der Wasserversorgung Rheinland-Pfalz, Haßloch, 19. Oktober 2017

W. Merkel: Energieeffizienz in der Wasserwirtschaft – Überblick über aktuelle Ergebnisse in der Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Fachsymposium der Wasserwirtschaftsverwaltung Luxemburg: Energieoptimierung in der Wasserwirtschaft, Esch-sur-Alzette (Esch/Belval), Frühjahr 2018

S. Stetter: Energetische Einsparpotenziale von Aufbereitungs- und Nebenanlagen in Wasserwerken. Fachsymposium der Wasserwirtschaftsverwaltung Luxemburg: Energieoptimierung in der Wasserwirtschaft, Esch-sur-Alzette (Esch/Belval), Frühjahr 2018

III. Literatur

50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TransnetBW GmbH, TenneT TSO GmbH (Hrsg.) (2013): Netzentwicklungsplan Strom 2013.

Abesser, C.; Robinson, R. (o.J.): Iron and manganese mobilisation. Mobilisation of iron and manganese from sediments of a Scottish Upland reservoir. Hg. v. School of Geography and Geosciences.

Allaby, A. (1994): Dictionary of the Environment. 4th Edition. Macmillan Reference Books, Macmillan Press Ltd..

Anders N, Hackmann T, Hobohm J, Kirchner A, Knittel T, Koepp M, Krämer L, Lühr O, Peter F, Sakowski F, Struwe J, Straßburg S, Thamling N, Ackermann T, Martensen N, Untsch S, Lehr U, Lutz C (2014): Entwicklung und Durchführung einer Impactanalyse für den Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen. Prognos AG, Berlin, 339 S.

Andreas Binder (2012): Elektrische Maschinen und Antriebe – Grundlagen und Betriebsverhalten.

Anonymus (2007): Wasserwirtschaft kann Stromkosten für Pumpen um 16 Prozent senken. EUWID, Wasser und Abwasser (35), 1-2.

Balistrieri, L.; Murray, J.; Paul, B. (1992): The cycling of iron and manganese in the water column of Lake Sammamish, Washington. In: Limnology and Oceanography 37 (3), S. 510–528.

Belzile, N.; Pizarro, J.; Filella, M.; Buffle, J. (1996). Sediment diffusive fluxes of Fe, Mn, and P in a eutrophic lake: Contribution from lateral vs bottom sediments. Aquatic sciences, 58(4), 327-354.

Benndorf (2003): GETAS, Gekoppelte hydrodynamisch-ökologische Simulation zur Bewirtschaftung von Talsperren. BMBF Projekt.

BFE – Bundesamt für Energie (2003): Stromkosten halbieren in der Wasserversorgung. EnergieInnovation, Februar 2003.

BOKU - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2012): Erstellung eines Leitfadens zur Optimierung der Energienutzung bei Wasserversorgungsanlagen. März 2012.

Brackemann H et al. (2000): Liberalisierung der deutschen Wasserversorgung – Auswirkungen auf den Gesundheits- und Umweltschutz, Skizzierung eines Ordnungsrahmens für eine wettbewerbliche Wasserwirtschaft, Texte 2/00 des Umweltbundesamtes (ISSN 0722-186X)

Bragalli, C., D'Ambrosio, C. und Lee, J. et al. (2006): An MINLP solution method for a water network problem. In ESA'06: Proceedings of the 14th conference on Annual European Symposium, Seiten 696–707, London, UK. Springer-Verlag.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.) (2011): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011.

Castelletti, A. und R. Soncini-Sessa (2006). A procedural approach to strengthening integration and participation in water resources planning, Environmental Modelling & Software, 21(10):1455-1470.

Castelletti, A.; Yajima, H.; Giuliani, M.; Soncini-Sessa, R.; Weber, E. (2014): Planning the Optimal Operation of a Multioutlet Water Reservoir with Water Quality and Quantity Targets. In: J. Water Resour. Plann. Manage. 140 (4), S. 496–510. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000348.

Cicholas U, Ströker K (2012): Vorausberechnung der Bevölkerung in den kreisfreien Städten und Kreisen Nordrhein-Westfalens 2011 bis 2030/2050. Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 38 S

Cole, T.; Hannan, H. (1991): Dissolved Oxygen Dynamics. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel und F. E. Payne (Hg.): Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. 3. Aufl. 1 Band: John Wiley & Sons, Inc.

Davison, W. (1993): Iron and manganese in lakes. In: Earth-Science Reviews 34 (2), S. 119–163. DOI: 10.1016/0012-8252(93)90029-7.

Dean, W. (1999): The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. In: Journal of Paleolimnology 21, S. 375–393.

Delli Priscoli, J. (2004) What is Public Participation in Water Resources Management and Why is it important? In International Water Resources Association. Water International 29 (2): 1-7

destatis - Statistisches Bundesamt (2015): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Öffentliche Wasserversorgung -. Fachserie 19, Reihe 2.1.1, 29.07.2015.

destatis - Statistisches Bundesamt (2017): Bevölkerung in Deutschland voraussichtlich auf 82,8 Millionen gestiegen. Pressemitteilung vom 27. Januar 2017 – 33/17. Wiesbaden.

destatis - Statistisches Bundesamt (o.J.): Energieverbrauch – Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößen. URL: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/StromverbrauchHaushalte.html (Stand: 16.08.2017).

Dijkstra, E. W. (1959): A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. Numerische Mathematik, 1:269-271.

Dortch, M. (o.J.): Water quality considerations in reservoir management. Hg. v. US Army Engineer Waterways Experiment Station.

Drees, T. (2016): Simulation des europäischen Binnenmarktes für Strom und Regelleistung bei hohem Anteil erneuerbarer Energien. 1. Auflage, Print Production M. Wolff, Aachen.

DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2016): Technischer Hinweis – Merkblatt - DVGW W 1100-2 (M) - Definition von Hauptkennzahlen für die Wasserversorgung.

DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2015a): Technische Regel – Arbeitsblatt - DVGW W 400-1 (A) - Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung. Februar 2015

DVGW (2010): Handbuch Energieeffizienz/Energieeinsparung in der Wasserversorgung - Wasser-Information Nr. 77. DVGW, Bonn

DVGW W 213-5 (A): 2013-10 (2013): Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung - Teil 5: Membranfiltration DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, 29 S.

DWD (2015): Historische Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes, Deutscher Wetterdienst, Online: http://www.dwd.de, abgerufen am am 15.07.2015.

Elçi, Ş. (2008): Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. In: Limnology 9 (2), S. 135–142. DOI: 10.1007/s10201-008-0240-x.

Farmani, R., Savic, D. A. und Walters, G. A. (2004): Exnet benchmark problem for multiobjective optimization of large water systems.

Ford, D. (1991): Reservoir transport processes. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel und F. E. Payne (Hg.): Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. 3. Aufl. 1 Band: John Wiley & Sons, Inc.

Ford, D.; Johnson, L. (1986): An assessment of reservoir mixing processes. Hg. v. US Army Corps of Engineers. US Army Engineer Waterways Experiment Station.

Gang, G., Dietz, R. (2008): Wasserverlustreduzierung in der Trinkwasserversorgung - Effiziente Netzüberwachung mit neuem Monitoring-System. 3R International (47), Heft 8-9/2009 (pp. 493-496).

Gantzer, P. (2008): Controlling oxygen, iron and manganese in water-supply reservoirs using hypolimnetic oxygenation. Dissertation. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

Gantzer, P.; Bryant, L.; Little, J. (2009): Controlling soluble iron and manganese in a water-supply reservoir using hypolimnetic oxygenation. In: Water research 43 (5), S. 1285–1294. DOI: 10.1016/j.watres.2008.12.019.

Gleich, R.; Bartels, P.: Breisig, V. (Hrsg.) (2012): Nachhaltigkeitscontrolling – Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele zur Umsetzung, Haufe, Freiburg.

Griffiths-Sattenspiel B, Wilson W (2009): The Carbon Footprint of Water. River Network, Portland, 49 S.

Grote, F. et al. (2015): Modeling of Electricity Pricing in European Market Simulations, European Energy Market (EEM).

Grover, V.I. und Krantzberg, G. (Eds). 2013.Water co-management. CRC Press, Taylor and Francis Group.

Hanusch, H.; Ilg, G.; Jung, M. (2011): Nutzen-Kosten-Analyse. 3. Aufl., Verlag Franz Vahlen, München.

Hedlich, R. (1975): Der Chemismus des Talsperrenwassers und seine Abhängigkeit von der Struktur und Nutzung des Einzugsgebietes. In: Acta hydrochim. hydrobiol. 3 (5/6), S. 535–543.

Hensel, P. (2017): Hochrechnung von Energieeinsparpotenzialen in der Wasserverteilung. Gesprächsnotiz basierend auf einem Telefonat, geführt von Daniel Löwen. Aachen, Juli 2017.

Herber W, Wagner H, Roth U (2008): Die Wasserbedarfsprognose als Grundlage für den regionalen Wasserbedarfsnachweis der Hessenwasser GmbH & Co. KG. Gwf Wasser|Abwasser, 149(5), 426-434.

Herschel, A.; Clasen, J. (1998): The importance of the manganese-oxidizing microorganism metallogenium personatum for the retention of manganese in the Wahnbach reservoir. In: Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie 83 (1), S. 19–30.

Hillenbrand T, Schleich J (2009): Determinants of residential water demand in Germany. Ecological Economics, 68, 1756-1769.

Horn, H.; Horn, W.; Paul, L.; Uhlmann, D.; Röske, I. (2006): Drei Jahrzehnte kontinuierliche Untersuchungen an der Talsperre Saidenbach. Fakten, Zusammenhänge, Trends. Hg. v. Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. TU Dresden. Lengefeld.

Hudson H E (1963): Functional Design of Rapid Sand Filters. J. Sanit. Eng. Div. 1963, 17-29.

ILS (2010): Der demographische Wandel in Deutschland und NRW. http://www.rwiessen.de/media/content/pages/forschung-und-beratung/pdf/DemographischerWandel.pdf (Stand 06.01.2015).

Ives K (1991): Cryptosporidium (effects, detection and elimination). Konferenzbeitrag Aqua Enviro - Technology Transfer.

IWW (2017): Erfahrungswerte zu Energieverbräuchen in der Wasserversorgung. Gesprächsnotiz basierend auf Telefonaten, geführt von Daniel Löwen. Aachen, Juli 2017.

Kallrath, J. (2013): Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Springer Spektrum, Wiesbaden, 2. Auflage.

Kannan, V.; Job, S. V. (1980): Diurnal depth-wise and seasonal changes of physico-chemical factors in Sathiar reservoir. In: Hydrobiologia (70), S. 103–117.

Keedwell, E. und Khu, S.-T. (2005): A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18(4):461-472.

Kennedy, R.; Walker, W. (1991): Reservoir nutrient dynamics. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel und F. E. Payne (Hg.): Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. 3. Aufl. 1 Band: John Wiley & Sons, Inc.

Kersting N. (2008): Politische Beteiligung. Einführung in dialogorientierte Instrumente politischer und gesellschaftlicher Partizipation. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften

Kilchman, Kamm, Kobel, Kempf, Maruug, Loeffel, Riesen, Baumann, Ott, Rüegsegger, Müller and Schmid (2004): Handbuch Energie in der Wasserversorgung. Bern, Bundesamt für Energie BFE.

Knösche R. (2005): Nährstoffaushagerung von Flusssee-Sedimenten. Teilprojektbericht. Projekt: "Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel" gefördert vom BMBF. Universität Potsdam, Institut für Biochemie und Biologie AG Vegetationsökologie und Naturschutz.

Kristiansen, K. D.; Kristensen, E.; Jensen, E.M.H. (2002): The Influence of Water Column Hypoxia on the Behaviour of Manganese and Iron in Sandy Coastal Marine Sediment. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 55 (4), S. 645–654. DOI: 10.1006/ecss.2001.0934.

Kunz, P. M. (Ed.). (2008). Eigen-und Prozeßkontrolle in Kläranlagen. John Wiley & Sons.

LAWA (1990): Limnologie und Bedeutung ausgewählter Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland. Essen: Woeste.

Leggewie, C. (2010). Klimawandel als Gesellschaftswandel. APuZ 32/33, 40-46.

Lehmann, P.; Mayer, J.; Weiß, M. (2010): Energiemanagement beim Zweckverband BodenseeWasserversorgung. In: Wissensdurst – Eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 5, S. 14 – 21.

Löwen (2017): Energieoptimierung in der Wasserverteilung – Ansätze zur Abschätzung der Einsparpotenziale in NRW. Nicht veröffentlicht. Aachen, 2017.

Lux A (2009): Wasserversorgung im Umbruch. Campus Verlag, Frankfurt/New York, 307 S.

Maniak, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27839-7.

Michel B, Michel F, Rüthrich W, Kluge T, Deffner J, Götz K, Liehr S (2007): Wasserbedarfsprognose 2030 für das Versorgungsgebiet der Hamburger Wasserwerke GmbH (HWW). Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE).

Mirbach, T. (2009): Marktsimulationsverfahren zur Untersuchung der Preisentwicklung im europäischen Strommarkt, Dissertation, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 128, Klinkenberg, Aachen.

Mitsdoerffer, R.; Thöle, D. (2010): Energieanalysen auf Abwasseranlagen, Präsentation im Rahmen der IFAT ENTSORGA 2010 zum DWA-Arbeitsblatt A-216.

Mortimer, C. H. (1971): Chemical exchanges between sediments and water in the Great Lakes. Speculations on probable regulatory mechanisms. In: Limnology and Oceanography 16 (2), S. 387–404.

Müller T, Munz E, Seifert W (2010): Gesellschaft im Wandel - Demografische und soziale Entwicklungen in Nordrhein-Westfalen und seinen Regionen 1999-2009. Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 81 S.

Müller, R. (2010): Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren. Multikriterielles Optimierungsverfahren zur Bewirtschaftungsplanung von Stauräumen. REGKLAM Ergebnisbericht. Teilprojekt innerhalb REGKLAM, BMBF Projekt.

Neunteufel R, Richard L, Perfler R (2012): Wasserverbrauch und Wasserbedarf- Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 252 S

Newig, J und Fritsch, O. (2011) Ökologische Nachhaltigkeit durch zivilgesellschaftliche Partizipation? Zum Stand der Debatte in der internationalen Literatur. in Handler, M und Trattnigg (Hg.) (2011) Zukunft der Öffentlichkeitsbeteiligung. Chancen Grenzen. Herausforderungen.

Newig,J., Jager, N., Challies, E. (2012) Führt Bürgerbeteiligung in umweltpolitischen Entscheidungsprozessen zu mehr Effektivität und Legitimität? Erste Ergebnisse einer Metaanalyse von 71 wasserpolitischen Fallstudien*: in Zeitschrift für Politikwissenschaft 22. Jahrgang Heft 4, 2012, S. 527 – 564.

Nowack M (2011): Possibilities of scenario planning for sanitation organizations facing demographic change. Dissertation an der Faculty of Business and Economics, Technische Universität Dresden, Dresden.

Olsson G (2012): Water and energy. conflicts and connections. Water21, 14(5), 12-16.

Ottosson, F.; Abrahamsson, O. (1998): Presentation and analysis of a model simulating epilimnetic and hypolimnetic temperatures in lakes. In: Ecological Modelling 110 (3), S. 233–253. DOI: 10.1016/S0304-3800(98)00067-2.

Padisák, J.; Adrian R. (1999): Chapter 5.1, Biovolumen. In Tümpling, W. & G. Friedrich (editors) Methoden der Biologischen Wasseruntersuchung 2. Biologische Gewässeruntersuchung: 334-367. Gustav Fischer Verlag, Jena.

Paul, L.; Scheifhacken, N. (2008). Einfluss der Wassermengenbewirtschaftung auf die vertikale Verteilung allochthoner Trübstoffe in Trinkwassertalsperren nach Hoch-wässern. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL)–Erweiterte Zusammenfassung der Jahrestagung, 144-149.

Pinnekamp, J., Gredigk-Hoffmann, S., Rißе, H., Miethig, S., Loderhose, M., Wöffen, B., Genzowsky, K., Bolle, F., Schröder, M., Gramlich, E., Schmitz, M., Koenen, S., Seibert-Erling, G. (2017): Energie und Abwasser – Handbuch NRW. Noch nicht veröffentlicht.

Plath, M. (2014): Procedure of energy efficiency studies in a water company. 06.05.2014.

Pottgiesser T., Sommerhäuser M., 2008. Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen - Steckbriefe und Anhang. Essen

Prince, R. E.; Meyer, E. B. (1992): Water quality management for reservoirs and tailwaters. Operational and structural water quality enhancement techniques. Report 2. Hg. v. US Army Corps of Engineers. Army Waterways Experiment Station. Mississippi (2).

Proske M (2011): Demographischer Wandel und Daseinsvorsorge. an der Raum- und Umweltplanung, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.

Rammler (2017): Optimierung von Druckzonen im Zuge der Erneuerung einer Druckerhöhungsanlage. ENERWA-Abschlusskonferenz. Mülheim an der Ruhr, 09.03.2017.

Reimers, G.; Riebock, C. (2012): Erste DVGW-Energiemanagementsystem-Zertifizierung. In: energie | wasser praxis, 63 Jg., Heft 7+8, S. 38 – 39.

Roth U, Mikat H, Wagner H (2011): Der Einfluss moderner Haushaltsgeräte auf den Trinkwasserbedarf der Haushalte. gwf-Wasser|Abwasser, 152(3), 254-260.

Ruhrgütebericht (2009): AN DER RUHR, Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke. Ruhrgütebericht. Ruhrverband, 2009.

Ruhrverband (2015): Langjährige Gewässergütedaten. Abgerufen: 2015. CSV-Daten. Datenlieferant: Geschäftsbereich Talsperren und Stauseen Mengenwirtschaft und Morphologie des Ruhrverbandes.

Schlömer C. (2012): Raumordnungsprognose 2030. Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 115 S.

Schlömer C. (2014): Raumordnungsprognose 2030. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/UeberRaumbeobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/Downloads/Uebersicht_Krs.xls?__blob=publicationFile&v=2 (Stand 24.02.2015).

Schräder, T. H. (2007): Zur Limnologie und Abwasserbiologie von Talsperren Obere Saale (Thüringen). In: Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie.

Shatwell, T.; Jordan, S.; Ackermann, G.; Dokulil, M.; Rücker, J.; Scharf, W.; Wagner A.; Kasprzak, P. (2013). Langzeitbeobachtungen zum Einfluss von Klimawandel und Eutrophierung auf Seen und Talsperren in Deutschland.

Sichere Energieversorgung (2011). Deutschlands Energiewende. Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Bericht der Ethikkommission im Bundeskanzleramt. Berlin

SMUL – Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (2008): Wasserverbrauch und Wasserverluste. URL: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/6637.htm (Stand: 16.08.2017).

Søndergaard, M. (2007): Nutrient dynamics in lakes - with emphasis on phosphorus, sediment and lake restoration. In: National Environmental Research Institute.

Staben N, Nahrstedt A (2014): Anpassungsoptionen der Trinkwassergewinnung und -aufbereitung an sich ändernde Rahmenbedingungen. Publikation Nr. 53 zum BMBF-Projekt DYNAKLIM, IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Mülheim an der Ruhr

Staib, O.; Stüble, D. (2010): Umsetzung des Energiemanagement bei der Wasserförderung, aufbereitung und –verteilung. In: Wissensdurst – Eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 5, S. 22 – 25.

SVGW-Handbuch Energie (2004): Energie in der Wasserversorgung: Ratgeber zur Energiekosten- und Betriebsoptimierung. SVGW, Zürich.

Sydro Consult (2004): TALSIM Flussgebietsmodellierung und -bewirtschaftung. Programmbeschreibung. Hg. v. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. SYDRO Consult GbR.

Tartari, G.; Biasci, G. (1997). Trophic status and lake sedimentation fluxes. In The Interactions Between Sediments and Water (pp. 523-531). Springer Netherlands.

Thornton, K. W. (1991): Perspectives on reservoir limnology. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel und F. E. Payne (Hg.): Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. 3. Aufl. 1 Band: John Wiley & Sons, Inc.

TrinkwV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)

TZW (2010): Dynamisierung der Betriebsweise von Schnellreaktoren. Eigenverlag Technolgiezentrum Wasser, Newsletter März 2010, Karlsruhe, 1 S.

Uhl (2010): Integratives Management mehrfach genutzter Trinkwassertalsperren; IntegTa. DOI:10.2314/GBV:626046254.

U.S. Army Engineer Research and Development Center (o.J.): The WES handbook on water quality enhancement techniques for reservoirs and tailwaters.

VAG-Armaturen (2013): Druckmanagement, www.vag-armaturen.com.

Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG

WBGU/ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2011). Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Zusammenfassung für Entscheidungsträger.

Wencki, K. (2015): Ökonomische Rahmenbedingungen- Wasserwirtschaftliche Optimierungsvarianten, ENERWA-Publikation Nr. 1, www.enerwa.org, März 2015.

Wencki, K., Koti, J., Hunze, S. (2017): Ökonomische Rahmenbedingungen - Anreizsysteme zur lastoptimierten Versorgung, ENERWA-Publikation Nr. 7, www.enerwa.org, April 2017.

Wupperverband (2014): Langjährige Gewässergütedaten. Abgerufen: 2014. CSV-Daten. Datenlieferant: Geschäftsbereich Wassermengenwirtschaft und Gewässergüte

IV. Anhang

IV.1 Bürgerbeteiligung

Tabelle 41: Auswahl Bürgerbeteiligungen rund um das Thema Wasser

Ort	Themengebiet	Ergebnis	Jahr
Alling	Wasserversorgung	Pos. durch neuen Gemeinderatsbeschluss	2016
Hermaringen	Wasserenthärtungsanlage	BE im Sinne des Begehrens	2016
Bornheim	Wasserversorgung	BE nicht im Sinne des Begehrens	2016
Bornheim	Wasserversorgung	BB nur öffentlich diskutiert	2016
Brodersby	Wasserversorgung	BE nicht im Sinne des Begehrens	2015
Geiselwind	Wasserversorgung	Unzulässig	2015
Heringen, Helme	Wasserversorgung	Unzulässig	2015
Übach-Palenberg	Wasserversorgung	BB nur öffentlich diskutiert	2015
Delligsen	Wasserversorgung	Unzulässig	2014
Arnbruck	Wasserversorgung	BE im Sinne des Begehrens	2014
Zwingenberg, Bergstr	Wasserversorgung	Unzulässig	2014
Arnbruck	Wasserversorgung	Unzulässig	2014
Bissingen	Wasserversorgung	Pos. durch neuen Gemeinderatsbeschluss	2013
Ammerthal	Abwasser	Offen	2012
Bernau	Wasser- und Abwasser-zweckverband	Pos. durch neuen Gemeinderatsbeschluss	2012
Bad Sassendorf	Wasserversorgung	Unzulässig	2012
Stuttgart	Wasserversorgung	Unzulässig	2012
Weibersbrunn	Wasserversorgung	BE nicht im Sinne des Begehrens	2011
Heidenrod	Wasserversorgung	BE im Sinne des Begehrens	2011
Weilheim	Geothermische Energie	BB nicht eingereicht	2011
Buch b Illertissen	Wasserversorgung	BE in Stichentscheid angenommen	2011
Gemünden am Main	Finanzierung Trink-/Abwasser	BE im Sinne des Begehrens	2010
Rimbach b Eggenfelden	Wasserversorgung	Unzulässig	2010
Marxheim	Wasserversorgung	BE im Sinne des Begehrens	2010
Bad Dürrheim	Wasserqualität	BE im Sinne des Begehrens	2009
Neu Wulmstorf	Wasserqualität	BB nur öffentlich diskutiert	2009

Tabelle 42: Ausgewählte Ergebnisse aus der Bürgerbeteiligung

Drücken Sie in Ihren Worten aus, was Energetische Optimierung für Sie bedeutet!

AE 03 Energetische Optimierung	5 Pkt.
Sensibilisierung des Verbraucherverhaltens (durch Anreize)	37
Entwicklung und Verbesserung der Technik	35
Aufklärung und verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen	31
Prozessoptimierung der Trinkwassergewinnung/Optimierung der Anlagen	26
Energieeinsparung	22
Lastoptimierung / Verbrauchsoptimiertes Verhalten entsprechend der Energienutzung und -erzeugung	18
Regenwassernutzung	13
Politische & wirtschaftliche Maßnahmen	13
TTIP	13
Netzoptimierung	12
Einsparung von Ressourcen (vorbeugende Instandhaltung)	10
Ökologische Optimierung	9
Erzeugung von Energie durch Fließgewässer	9
Zukunft beachten hinsichtlich Preis- und Bevölkerungsentwicklung	6
Kostenoptimierung	6
Wasserverbrauch reduzieren	4
Zusätzliche Turbinen beim Transport	4
Gesamt	**268**

Welche ökologischen Gesichtspunkte sollten im Rahmen einer energetischen Optimierung berücksichtigt werden?

AE 04 Ökologische Gesichtspunkte	5 Pkt.
Erhaltung der Artenvielfalt in den Fließgewässern und Talsperren	56
Nichtbeeinträchtigung der Wassergüte bzw. Qualität bei Trinkwasser	46
Wasserentnahme aus optimalen Temperaturpunkten bzw. Gewässerschichten	25
Nichtüberschreiten der ökologischen Belastbarkeit hinsichtlich Temperatur	25
Renaturierung der Uferbestände und des Flussverlaufs	17
Nichtüberschreiten der ökologischen Belastbarkeit bzgl. Wassermenge / Anpassung der Abflussmenge an die Antriebsgeschwindigkeit	17
Regulierung des Ablaufs	16
Erhaltung und Förderung des Selbstreinigungseffekts	15
Sparsamer Umgang mit der Ressource Trinkwasser	15
Nichtbeeinträchtigung der Wassergüte bei Fließgewässern (Temperatur, Sauerstoff, Trübung)	14
Nichtüberschreiten der ökologischen Belastbarkeit hinsichtlich Fließgeschwindigkeit	9
Erhaltung und Verbesserung der Biodiversität	9
Realisierung von ökologisch sinnvollem Stromeinkauf durch die Wasserwerke	5
Gesamt	**269**

Welche neuen Erkenntnisse haben Sie nach dem Besuch der Talsperre über den Umgang mit Wasser für sich gewonnen?

AE 05A Positive Aspekte	AE 05B Negative Aspekte
Besseres Verständnis der Technik und der Kooperation mit der Landwirtschaft	
Vermutung des qualitativ hochwertigen Trinkwasser hat sich bestätigt / Wasserqualität	Hoher technischer Aufwand
Technische Innovationen werden eingesetzt (Thermorüssel)	Unkontrollierter Notablauf
Sauberkeit	Mangelnde Arbeitssicherheit
Veranschaulichung des Entnahmevorgangs	Wenig Offentlichkeitsarbeit
Kontrollen alle 15 Minuten	No-Go-Area um die Talsperre
Abnehmer entscheidet über die "Wasserschicht"	
Zulaufsystem	
Uberregionale Betrachtung	

Soziodemographische Zusammensetzung der TeilnehmerInnen:

- Geschlecht: Die Planungszellen setzten sich zu je 50 % Frauen und Männern zusammen, welches überwiegend der Gesamtverteilung in den Städte Burscheid, Hückeswagen und Wermelskirchen entspricht.
- Alter: Das Durchschnittsalter der Teilnehmenden betrug 50,9 Jahre. Sie waren somit 7,2 Jahre älter als der Durchschnitt dieser Städte (eingeladen wurden Personen ab 14 Jahren).
- Wohnort: Die Verteilung der TeilnehmerInnen hinsichtlich ihres Wohnortes entsprach annähernd der Größenverteilung der jeweiligen Städte zueinander. Es kamen 50 % aus Wermelskirchen, 24 % aus Hückeswagen und 26 % aus Burscheid.
- Lebensdauer im Wohnort: Über 50 % der Teilnehmenden leben seit über 20 Jahren in ihren Städten, nur 13 % seit weniger als 10 Jahren.
- Bildungsabschluss: Leicht überdurchschnittlicher Bildungsgrad: Von den Teilnehmenden haben 24,1 % Haupt-Volksschulabschluss, 24,1 % Realschulabschluss, 9,3 % Fachabitur, 25,9% Allgemeine Hochschulreife, 25,9 % FH- oder Universitätsabschluss

- Berufliche Tätigkeit: Die Teilnehmenden sind mehrheitlich berufstätig (57,4 %). Die größten Gruppen der Teilnehmenden stellen dabei Angestellte (29,6 %) und RenterInnen (18,5 %).
- Haushaltsgröße: Die Teilnehmenden leben in Haushalten mit 1 bis 6 Personen, im Durchschnitt 2,64 Personen. In 22,2 % der Haushalte leben Kinder oder Jugendliche unter 18 Jahren.

Tabelle 43: Versand des Bürgergutachtens

Projektpartner	ReferentInnen	Institutionen
• IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH • Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen • enwor - wärme vor ort GmbH • Wupperverband • Prof. Dr. Bernd Sures, Universität Duisburg-Essen • SYDRO Consult GmbH • RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH • Ruhrverband • Rechenzentrum für Versorgungsnetze • WAG Wassergewinnungs- und -aufbereitungsgesellschaft • Wasserversorgungsverband Rhein-Wupper • Aggerverband • BBH Becker Büttner Held	• Peter Meiwald, Deutscher Bundestag • Prof. Dr. Dominik Godde, H2GO Hydro Management Consulting • Werner Bosbach • Mathias Derlin, Naturarena Bergisches Land GmbH • Giesela Hück, Oberbergischer Kreis - Gesundheitsamt • Christian Meuthen, Stadtwerke Burscheid GmbH • Elke Reichert, Rheinisch Bergischer Kreis / LEADER • Manuela Thomas, Biologische Stationen Oberberg/Rhein-Berg	• DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. • Bergische Volkshochschule • Deutsche Nationalbibliothek • Landesbibliothek NRW • Bürgermeister, Stadt Burscheid • Bürgermeister, Stadt Hückeswagen • Bürgermeister, Stadt Wermelskirchen • Ausschuss für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, **Deutscher Bundestag** • Ausschuss für Klimaschutz, Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, **Landtag NRW** • Unterausschuss Klimaschutzplan des Ausschusses Klimaschutz, Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft, **Landtag NRW**

IV.2 Carbon Footprint in der Wasseraufbereitung

Tabelle 44: Energiebedarf und Carbon-Footprint einzelner Verfahrensstufen Teil 1

WW Erlenhagen	**Q (m³/h)**	-	**750**	**975**	**1200**	-	**750**	**975**	**1200**	-	**750**	**975**	**1200**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**18%**	**57%**	**100%**	-	**18%**	**57%**	**100%**	-	**18%**	**57%**	**100%**
	Q (m³/h), geschl. Filter	-	**309**	**309**	**475**	-	**309**	**304**	**475**	-	**309**	**304**	**475**
	Q (m³/h), offene Filter	-	**441**	**666**	**728**	-	**441**	**666**	**728**	-	**441**	**666**	**728**
		gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie			
		kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**			
	Eisen (III)/CO2/Tankanlage	-	4	4	5	-	0,0002	0,0002	0,0002	-	0,1	0,1	0,1
	Offene Filteranlage	-	5	5	5	-	0,0005	0,0003	0,0003	-	0,3	0,2	0,2
	Kalkmilch	-	35	38	39	-	0,0020	0,0016	0,0013	-	1	1	1
	Spülwasserpumpen	-	87	85	86	-	0,0048	0,0036	0,0030	-	3	2	2
	Schlamm/LME	-	189	186	187	-	0,0105	0,0080	0,0065	-	6	4	3
	Kalkwasser	-	231	233	239	-	0,0128	0,0100	0,0083	-	7	5	4
	Geschlossene Filteranlage	-	294	375	470	-	0,0396	0,0514	0,0412	-	21	27	22
	UV Anlage	-	455	454	453	-	0,0253	0,0194	0,0157	-	13	10	8
	Zwischenpumpwerk	-	474	580	984		0,0264	0,0248	0,0342	-	14	13	18
	Rohwasserpumpwerk (Mittelwert)	-	5461	5461	5461	-	0,2733	0,2733	0,2733	-		145	
	Summe	-	7234	7422	7930	-	0,3953	0,3926	0,3840	-	210	208	204
						kWh/m³/m				**g CO2/m³/m**			
	Zwischenpumpe 1	-	-	-	565	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zwischenpumpe 2	-	-	-	419	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zwischenpumpe 3	-	242	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zwischenpumpe 4	-	233	280	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe Zwischenpumpen	-	474	580	984	-	0,0043	0,0038	0,0047	-	2	2	3
	Wirkungsgrad Zwischenpwerk					-	64%	71%	58%				
WW Schürholz	**Q (m³/h)**	-	**509**	**726**	**1225**	-	**509**	**726**	**1225**	-	**509**	**726**	**1225**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**42%**	**59%**	**100%**	-	**42%**	**59%**	**100%**	-	**42%**	**59%**	**100%**
		gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie			
		kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**			
	Agglomeration	-	91	103	130	-	0,0075	0,0059	0,0044	-	4	3	2
	Entstabilisierung	-	314	396	540	-	0,0257	0,0227	0,0184	-	14	12	10
	Ozonung	-	348	360	401	-	0,0285	0,0207	0,0136	-	15	11	7
	Zwischenpumpwerk	-	1137	1474	2920	-	0,0931	0,0846	0,0993	-	49	45	53
	Rohwasserpumpwerk	-	6599	11586	16369	-	0,5402	0,6649	0,5568	-	286	352	295
	Summe	-	8490	13919	20360	-	0,6950	0,7988	0,6925	-	368	423	367
						kWh/m³/m				**g CO2/m³/m**			
	Zwischenpumpwerk	-	1137	1474	2920	-	0,0058	0,0049	0,0057	-	3	3	3
	Wirkungsgrad Zwischenpumpwerk					-	47%	56%	48%				
WW Wehebachtalsperre	**Q (m³/h)**	-	**954**	**1550**	**2160**	-	**954**	**1550**	**2160**	-	**954**	**1550**	**2160**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**44%**	**72%**	**100%**	-	**44%**	**72%**	**100%**	-	**44%**	**72%**	**100%**
		gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie			
		kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**			
	Kalkmilchanlage	-	55	36	59	-	0,0024	0,0010	0,0011	-	1	1	1
	Kalksättiger	-	80	91	117	-	0,0035	0,0024	0,0023	-	2	1	1
	Schlammaufnahme ohne Pumpen	-	239	239	239	-	0,0104	0,0064	0,0046	-	6	3	2
WW Essen-Kettwig	**Q (m³/h)**	**454**	**600**	**900**	**1200**	**454**	**600**	**900**	**1200**	**454**	**600**	**900**	**1200**
	Anteil am max. Durchsatz	**38%**	**50%**	**75%**	**100%**	**38%**	**50%**	**75%**	**100%**	**38%**	**50%**	**75%**	**100%**
		gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie			
		kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**			
	Pulsator (inkl. Restozonvernichter)	1030	885	792	936	0,0945	0,0615	0,0367	0,0325	50	33	19	17
	Accelator	92	50	30	55	0,0084	0,0035	0,0014	0,0019	4	2	1	1
	Kiesfilter	269	147	80	151	0,0247	0,0102	0,0037	0,0052	13	5	2	3
	Rechen	1	1	1	1	5E-05	4E-05	3E-05	3E-05	0,03	0,02	0,01	0,01
	Ozonanlage (zzgl. Restozonvernichter)	2305	2255	2777	3153	0,2115	0,1566	0,1286	0,1095	112	83	68	58
	Sammelbrunnen	454	446	1336	523	0,0417	0,0309	0,0619	0,0182	22	16	33	10
	Filteranlage	12	14	14	85	0,0011	0,0010	0,0006	0,0030	0,6	0,5	0,3	1,6
	Rohwasserpumpen	618	726	1084	1497	0,0567	0,0504	0,0502	0,0520	30	27	27	28
	Klarwasserpumpen	1199	1301	1972	2545	0,1100	0,0904	0,0913	0,0884	58	48	48	47
	Summe	5979	5826	8084	8947	0,5487	0,4046	0,3743	0,3106	291	214	198	165
						kWh/m³/m				**g CO2/m³/m**			
	Rohwasserpumpen	618	726	1084	1497	-	0,0047	0,0046	0,0051	-	2	2	3
	Wirkungsgrad RW-Puimpen					-	58%	59%	53%				
	Klarwasserpumpen	1199	1301	1972	2545	-	0,0042	0,0040	0,0040	-	2	2	2
	Wirkungsgrad KW-Pumpen					-	65%	69%	69%				

Umrechnung des spezifischen Energiebedarfs pro mWS (Wasserförderung) in den Pumpenwirkungsgrad siehe Tabelle 46

Tabelle 45: Energiebedarf und Carbon-Footprint einzelner Verfahrensstufen Teil 2

WW Roetgen	**Q (m³/h)**	-	**2160**	**3400**	**5350**	-	**2160**	**3400**	**5350**	-	**2160**	**3400**	**5350**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**40%**	**64%**	**100%**	-	**40%**	**64%**	**100%**	-	**40%**	**64%**	**100%**
			gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie		
			kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**		
	Filterspülung (ein Filter pro Tag)	-	37,8	37,8	37,8	-	0,0007	0,0005	0,0003	-	0,4	0,2	0,2
WW 2	**Q (m³/h)**	-	**150**	**330**	**460**	-	**150**	**330**	**460**	-	**150**	**330**	**460**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**33%**	**72%**	**100%**	-	**33%**	**72%**	**100%**	-	**33%**	**72%**	**100%**
			gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie		
			kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**		
	Gebläse Entsäuerer 1	-	3	8	10	-	0,0014	0,0021	0,0018	-	1	1	1
	Gebläse Entsäuerer 2	-	6	13	14	-	0,0037	0,0033	0,0026	-	2	2	1
	Summe Gebläse	-	9	21	24	-	0,0051	0,0054	0,0044	-	3	3	2
	Brunnenpumpen	-	569	1218	1822	-	0,1580	0,1538	0,1651	-	84	82	87
	Zwischenpumpen	-	225	605	1142	-	0,0624	0,0764	0,1035	-	33	40	55
	Summe	-	811	1866	3013	-	0,2255	0,2356	0,2729	-	120	125	145
							kWh/m³/m				**g CO2/m³/m**		
	Brunnenpumpe 1	-	324	386	418	-	0,0035	-	0,0034	-	2	-	2
	Brunnenpumpe 2	-	245	-	188	-	0,0070	-	0,0052	-	4	-	3
	Brunnenpumpe 3	-	-	239	401	-	-	-	0,0044	-	-	-	2
	Brunnenpumpe 4	-	-	240	413	-	-	-	0,0045	-	-	-	2
	Brunnenpumpe 5	-	-	353	403	-	-	-	0,0047	-	-	-	3
	Summe Brunnenpumpen	-	569	1218	1822	-	0,0105		0,0222	-	6	-	12
	Wirkungsgrad Brunnenpumpen						52%		61%				
							kWh/m³/m				**g CO2/m³/m**		
	Zwischenpumpe 1	-	-	302	564	-	-	0,0049	0,0050	-	-	3	3
	Zwischenpumpe 2	-	225	302	578	-	0,0051	0,0050	0,0051	-	3	3	3
	Summe Zwischenpumpen	-	225	605	1142	-	0,0051	0,0099	0,0101	-	3	5	5
	Wirkungsgrad Zwischenpumpwerk					-	53%	55%	54%				
WW 1	**Q (m³/h)**	-	**175**	-	**330**	-	**175**	-	**330**	-	**175**	-	**330**
	Anteil am max. Durchsatz	-	**53%**	-	**100%**	-	**53%**	-	**100%**	-	**53%**	-	**100%**
			gemessene elektr. Arbeit				Spez. Energiebedarf				Carbon-Footprint - elektr. Energie		
			kWh pro 24 Stunden				**kWh/m³**				**g CO2/m³**		
	Brunnenpumpe 5	-	-	-	290	-	-	-	0,0421	-	-	-	22
	Brunnenpumpe 9	-	154	-	154	-	0,0369	-	0,0223	-	20	-	12
	Brunnenpumpe 10	-	235	-	233	-	0,0565	-	0,0338	-	30	-	18
	Brunnenpumpe 15	-	696	-	706	-	0,1672	-	0,1024	-	89	-	54
	Brunnenpumpe 17	-	-	-	564	-	-	-	0,0819	-	-	-	43
	Brunnenpumpe 18	-	281	-	-	-	0,0675	-	-	-	36	-	-
	Brunnenpumpe 20	-	-	-	694	-	-	-	0,1007	-	-	-	53
	Summe	-	1366	-	2640	-	0,3281	-	0,3831	-	174	-	203

Umrechnung des spezifischen Energiebedarfs pro mWS (Wasserförderung) in den Pumpenwirkungsgrad siehe Tabelle 46

Tabelle 46: Umrechnung des spezifischen Energiebedarfs pro Meter Förderhöhe (kWh/m³/m) in einen Pumpenwirkungsgrad (%)

spez. Energiebedarf pro Meter Förderhöhe	kWh/m³/m	0,0027	0,0030	0,0040	0,0050	0,0060	0,0070	0,0080	0,0090	0,0100	0,0110	0,0120	0,0130
Wirkungsgrad	-	100%	91%	68%	54%	45%	39%	34%	30%	27%	25%	23%	21%

IV.3 Strukturmerkmale der untersuchten Wasserverteilungsnetze

Tabelle 47: Ausgewählte Strukturmerkmale für das Netz RWW

Strukturmerkmal	Ausprägung
Maximale Höhendifferenz	116 [m]
Anzahl Druckzonen	13 (ohne Industrie)
Art des Siedlungsraums	Städtischer Raum
Abgabe an Sondervertragskunden (SVK)	52 %
Pro-Kopf-Haushaltstagesverbrauch	119 [m³ / (EW x d)] (ohne SVK)
Metermengenwert	25 [m³/m]
Hausanschlussdichte	160 [HA/km²]

Tabelle 48: Klassifizierung der Druckzonen des RWW-Netzes

Druckzone	Fall
Breitscheid / Velbert / Wülfrath	1
Holsterhausen	1
HZ Buersche Str. / Gladbeck	1
Kundennetz Arcelor Mittal	3
Kundennetz Ineos Phenol	3
Melchenberg Hochmoor	1
Mülheim Bedingrade	2 (mit nachgelagerten Druckzonen)
Mülheim Dimbeck	3
Mülheim Dümpten	1
Mülheim Fulerum	2
Mülheim Kreuzfeld	2 (mit nachgelagerten Druckzonen)
Oberhausen Obere Zone	1
Oberhausen Ruhrchemie	1
Oberhausen Untere Zone	2 (mit nachgelagerten Druckzonen)
Reken	1
Velen	1

Tabelle 49: Ausgewählte Strukturmerkmale für das Netz ENWOR

Strukturmerkmal	Ausprägung
Maximale Höhendifferenz	348 [m]
Anzahl Druckzonen	21 (ohne Kleinstzonen)
Art des Siedlungsraums	73 % städtischer Raum 27 % ländlicher Raum
Abgabe an Sondervertragskunden (SVK)	11 %
Pro-Kopf-Haushaltstagesverbrauch	155 [m³ / (EW x d)] (ohne SVK)
Metermengenwert	12 [m³/m]
Hausanschlussdichte	193 [HA/km²]

Tabelle 50: Klassifizierung der Druckzonen des ENWOR-Netzes

Druckzone	Fall
Bachstr. (DMV)	3
Breinig (RKV)	3
Buttergasse, Zweifaller S.(RKV)	3
Donnerberg (HB)	3
Gottessegen (HB)	1
Hastenrath / Bohl (DMV)	3
Mausbach (HB)	3
Mulartshütte (PW)	1
Nordraum (DMV)	3
Obersteinstraße (DMV)	3
Rott II Oberzone (HB)	2
Rott Unterzone (DMV)	3
Rüst (PW)	2
Schevenhütte (DMV)	3
Süssendell (PW)	1
Talstr. (DMV)	3
Tannenhof (DMV)	3
Tiefzone Stolberg (TWA Binsf.)	2
TWA Roetgen	3
TWA Wehe	3
Übernahme Scherbstr. - Übergabe Pannesheide	1
Solberg von-Werner-Str. (PW)	1
Waldfriede, Glück-Auf-Str.(DMV)	3

RKV=Ringkolbenventil (Druckminderung), DMV=Druckminderungsventil, RKV= , HB=Hochbehälter, PW=Pumpwerk, TWA=Trinkwasseraufbereitung

V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ENERWA-Forschungsansatz: Energiepotenziale in der Prozesskette der Wasserversorgung unter Berücksichtigung dynamischer Randbedingungen. 2

Abbildung 2: ENERWA-Projektstruktur mit den Arbeitspaketen A-E 4

Abbildung 3: Konzept der Wasserwirtschaftlichen Optimierung mit drei Optimierungsrichtungen 24

Abbildung 4: Bevölkerungsentwicklung in NRW. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von Anders et al., 2014; Chicolas und Ströker, 2012; ILS, 2010; Müller et al., 2010; Schlömer, 2012; 2014 25

Abbildung 5: Abfolge des Handels von Regelleistung und Fahrplanenergie 29

Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Preise am Spotmarkt 32

Abbildung 7: Historisches Wochenpreisniveau am Spotmarkt 33

Abbildung 8: Vergleich der Durchschnittswoche simulierter und historischer Spotpreise .. 34

Abbildung 9: Vergleich der Dauerlinie simulierter und historischer Spotpreise 35

Abbildung 10: Leistungspreise abhängig der Versorgungsaufgabe 37

Abbildung 11: Arbeitspreise abhängig von der Versorgungsaufgabe 38

Abbildung 12: Entwicklung EEG-Umlage 39

Abbildung 13: Überblick Strombeschaffungskosten 45

Abbildung 14: Anzahl Bürgerbegehren und Bürgerentscheide im Themengebiet Wasser . 55

Abbildung 15: Einschichtung von Zuflüssen (Ford und Johnson, 1986) 67

Abbildung 16: Dichteanomalie des Wassers (Lorenz und Aeschbach-Hertig, 2009) 68

Abbildung 17: Absinken der Sprungschicht (z10) und des hypolimnischen Volumens durch hypolimnische Entnahme (Horn et al., 2006) 70

Abbildung 18: Langjährige Gewässergütedaten des Biggestausees für die Monate Mai bis September der Jahre 2013 – 2015 (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015) . 72

Abbildung 19: Minimale und maximale Temperaturmesswerte mit zugehöriger Sauerstoffsättigung [%] im Staukörper der Biggetalsperre während der Sondermessungen 73

Abbildung 20: Abfluss aus der Biggetalsperre, Pegel Attendorn, im Mai und Juni während der Messungen (rote Punkte) (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015) 74

Abbildung 21: Verlauf der Stauhöhe über NN [m] des Biggestausees von 2012-2015 (aufbereitet, nach Ruhrverband, 2015) 75

Abbildung 22: Lufttemperaturdaten der Jahre 2012 – 2014 in Meinerzhagen-Redlendorf (DWD, 2015) 79

Abbildung 23: Niederschlagsdaten der Jahre 2012 – 2014 in Meinerzhagen-Redlendorf (DWD, 2015) 79

Abbildung 24: Trübungsmessprofile im Staukörper der Biggetalsperre 81

Abbildung 25: Saisonale Verschiebung der Redoxgrenze (Søndergaard, 2007) 84

Abbildung 26: Tagesmittelwerte der Wassertemperatur aller erfassten Gewässerabschnitte 89

Abbildung 27: Oberflächennahe Feinsedimentmengen unterhalb der Talsperren (UH) und in vergleichbaren, unbeeinflussten Nebengewässern (NE). GRD = Große Dhünn 90
Abbildung 28: Konzept der untersuchten Ursache-Wirkungsbeziehungen 91
Abbildung 29: Verteilung der Körpergrößen (als Maß für die Altersstruktur) von Bachforellen unterhalb von Talsperren (TS) und in vergleichbaren Nebengewässern 94
Abbildung 30: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2012 95
Abbildung 31: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2013 96
Abbildung 32: Kostenoptimierte Dynamisierung Jahr 2014 96
Abbildung 33: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2012 97
Abbildung 34: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2013 97
Abbildung 35: Ökologisch optimierte Dynamisierung Jahr 2014 98
Abbildung 36: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2012 99
Abbildung 37: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2013 99
Abbildung 38: Lastoptimierte Dynamisierung Jahr 2014 99
Abbildung 39: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge des Untersuchungsprogramms 101
Abbildung 40: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge bei zusätzlichem Pumpspeicher 102
Abbildung 41: Ableitung der Speicherbeckenvariation aus dem Nutzungsprofil des unbeschränkten Speichervolumens im Unterlauf 103
Abbildung 42: Jährliche und spezifische Deckungsbeiträge bei Variation des Speichers im Unterlauf 104
Abbildung 43: RI-Schema der mobilen Pilotanlage am Standort WW Essen-Kettwig 112
Abbildung 44: RI-Schema der mobilen Pilotanlage am Standort WW Schürholz 113
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Versuchsanlage der WAG Nordeifel mbH in Roetgen 113
Abbildung 46: Modellierung eines dynamischen Anlagenbetriebs im WW Erlenhagen am Beispiel eines Wochentags im Herbst 119
Abbildung 47: Mittlerer Transmembrandruck aller 12 Ultrafiltrationsblöcke des WW Roetgen (Datengrundlage: WAG Nordeifel mbH Januar 2015) 121
Abbildung 48: Vergleich der Prozessdaten von dynamischer und statischer Betriebsweise der UF im WW Roetgen mit etwa gleichen Tagesaufbereitungsmengen (gewichtete Mittelwerte) 122
Abbildung 49: Modellierung des dynamischen Anlagenbetriebs (nur Ultrafiltration) im WW Roetgen 123
Abbildung 50: Spezifischer Energiebedarf von beispielhaften UV-Anlagen vs. Förderstrom in Abhängigkeit zum SSK_{254} (Datengrundlage: Xylem Water Solutions Deutschland GmbH) 126
Abbildung 51: Abhängigkeit des Druckverlusts von der Filtergeschwindigkeit (und Temperatur) am Beispiel zweier Aktivkohle-Filter im Wasserwerk Essen-Kettwig (Datengrundlage: RWW 2014) 128

Abbildung 52: Energielinien für das WW Erlenhagen (H_{gesamt} = Energiehöhe) H_{geo} = geodätische Höhe, , WSP = Wasserspiegel, DEA = Druckerhöhungsanlage 133

Abbildung 53: Energielinien für das WW Essen-Kettwig; Hgeo = geodätische Höhe, Hgesamt = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel..... 134

Abbildung 54: Energielinien für das WW Roetgen (Turbine zum Zeitpunkt der Messungen nicht in Betrieb); H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel..... 135

Abbildung 55: Energielinie für das WW Holsterhausen (Datengrundlage: RWW)..... 140

Abbildung 56: Die drei wichtigsten Typen von Druckzonen (aus energetischer Sicht) 145

Abbildung 57: Kumulierte Fördermenge absteigend nach Solldruckhöhe sortiert..... 149

Abbildung 58: Kosten in Abhängigkeit der Anzahl zusätzlicher Hochzonen (schematisch)..... 152

Abbildung 59: Basismodell eines Behälterpaares Reinwasser ⇔ Trinkwasser 154

Abbildung 60: Zusammensetzung des Strompreises (nur ca.-Angaben, genaue Werte abhängig von Zeitpunkt, Standort, etc.) 156

Abbildung 61: Schematische Darstellung der atypischen Netznutzung 157

Abbildung 62: Elektrische Pumpenleistung mit linearer Näherung in Abhängigkeit der Netzkennlinie und des Pumpenwirkungsgrades bei flacher Netzkennlinie (Transportnetz)..... 160

Abbildung 63: Elektrische Pumpenleistung mit linearer Näherung in Abhängigkeit der Netzkennlinie und des Pumpenwirkungsgrades bei steiler Netzkennlinie (Verteilnetz)..... 160

Abbildung 64: Netzsystem RWW mit Einfärbung nach Druckzonen 163

Abbildung 65: Netzsystem ENWOR mit Einfärbung nach Druckzonen..... 164

Abbildung 66: Netzsystem Aggerverband 165

Abbildung 67: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Reken in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone. 168

Abbildung 68: Rechnerisch ermittelte Ausdehnung der Hochzone in Reken 169

Abbildung 69: Energiebedarf zentral und dezentral in Abhängigkeit der Fördermenge, welche in die Hochzone verlagert wird 170

Abbildung 70: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Velen in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone. 171

Abbildung 71: Räumliche Ausdehnung der beiden Hochzonen in Velen. 172

Abbildung 72: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Holsterhausen in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone. 173

Abbildung 73: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Holsterhausen..... 174

Abbildung 74: Hochzonen Nord (Hammer Str. / Tunnelstr.) und Mitte (Riesener Str.) 174

Abbildung 75: Hochzonen Süd (Westring und Haniel Str.) 175

Abbildung 76: Großflächige Bildung von Hochzonen in der Druckzone Holsterhausen (mit Erweiterung bestehender Druckzonen) 176

Abbildung 77: Benötigte Druckhöhe an der Einspeisung Stolberg in Abhängigkeit der Anbindung der höchsten Abnehmer an die Hochzone. 177
Abbildung 78: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Stolberg (Berücksichtigung realer Daten der Gebäudehöhen) 177
Abbildung 79: Räumliche Ausdehnung der ermittelten Hochzonen in Stolberg auf Basis realer Geschosshöhen 178
Abbildung 80: Räumliche Ausdehnung der Tiefzone Reken (grün) und Standort der Turbine (orange) 181
Abbildung 81: Schematische Darstellung des Optimierungsmodells für die Optimierung der Fahrweise im Netz des Aggerverbands 184
Abbildung 82: E(Q)-Kennfeld des Systems Erlenhagen – Volmekopf (Elektrische Pumpenleistung als Funktion der Fördermenge) 185
Abbildung 83: Vergleich der optimierten Fahrweise des Netzes des Aggerverboands mit bzw. ohne Berücksichtigung der atypischen Netznutzung 187
Abbildung 84: Schematisches Modell für die Fahrweise-Optimierung im ENWOR-Netz ..189
Abbildung 85: Widerstand für die Strecke Roegten → Gottessegen..... 190
Abbildung 86: Widerstand für die Strecke (Wehe) Hastenrath Gottessegen (links) und für die Strecke Binsfeldhammer Gottessegen..... 191
Abbildung 87: Optimierte Fahrweise im ENWOR-Netz (06.02.2015-10.02.2015)..... 192
Abbildung 88: Vergleich der Energieeinsparung durch die Bildung von Hochzonen..... 193
Abbildung 89: Zusammensetzung der Druckverluste der Anschlussleitung und Trink-wasserinstallation für ein unterkellertes Gebäude bis zum 4.Obergeschoss unter Voraussetzung eines Mindest-Versorgungsdrucks basierend auf DVGW, 2015. Darstellung: FiW 195
Abbildung 90: Bundesweiter Wasserlust basierend auf destatis, 2015 und Löwen, 2017.196
Abbildung 91: Reduktion des Energiebedarfs der Wasserverteilung auf Basis der Szenarien (minimale, mittlere und maximale Energieeinsparpotenziale); (Löwen, 2017)..... 200
Abbildung 92: Energielinien für das WW 1; H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel 202
Abbildung 93: Energielinien für das WW 2; H_{geo} = geodätische Höhe, H_{gesamt} = Energiehöhe, WSP = Wasserspiegel..... 203
Abbildung 94: Statische und dynamische Fahrweise der Wasserwerke (Reinwasserpumpen) für den Zeitraum 05.01. - 08.01..... 207
Abbildung 95: Projektgebiet für die Anwendung des Modell-Bausteins CE-QUAL-W2 zur Untersuchung der Dynamisierung von Talsperrenabgaben 213
Abbildung 96: Modelldarstellung der Großen Dhünn-Talsperre mit seitlichen Vorsperren, Zufluss und Abgabeelementen 213
Abbildung 97: Beispiel der vertikalen Auflösung mit Ergebnissen der Temperatur im Staukörper zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr 214
Abbildung 98: Darstellung des virtuellen Speichers zwischen Talsperre und Aufbereitung..... 216

Abbildung 99: Darstellung des Reinwasserspeichers zwischen Aufbereitung und Verteilung 217
Abbildung 100: Vergleich der Ergebnisse zwischen detailliertem Teilsystem Talsperre und dem Ersatzsystem zur Verbundbetrachtung für verschiedene Optimierungsstufen 220
Abbildung 101: Netzkennlinien für unterschiedliche Verteilungssysteme, abgeleitet in AP.B3 222
Abbildung 102: Beziehungen zwischen Energiebedarf und Kosten aus vier verschiedenen Szenarien von AP B3 223
Abbildung 103: Vergleich der Ergebnisse zwischen detailliertem Teilsystem Verteilung und dem Ersatzsystem für die Verbundbetrachtung für verschiedene Entnahmeszenarien 224
Abbildung 104: Prozesskette und Simulationsplattform für die Verbundbetrachtung 225
Abbildung 105: Ergebnisse der Einzeloptimierung aus AP C mit mittlerem Tagesgang des Spotmarktpreises aus dem Jahr 2015 228
Abbildung 106: Ergebnisse der Verbundoptimierung B1+B2 229
Abbildung 107: Ergebnisse der Verbundoptimierung B2+B3 230
Abbildung 108: Ergebnisse der Verbundoptimierung B1+B2+B3 230
Abbildung 109: Untersuchte Verbrauchsmuster für B2 sowie deren Erlös 232
Abbildung 110: Untersuchte Verbrauchsmuster für B3 und deren Einsparungen 232
Abbildung 111: Architektur der ENERWA-Webdienste 234
Abbildung 112: Ausschnitt ENERWA Landing Page 235
Abbildung 113: Talsperren-Regime 236
Abbildung 114: Erlöse einer dynamisierten Fahrweise im Vergleich zur Referenz 237
Abbildung 115: Fragen zu ausgewählten Aufbereitungsverfahren 239
Abbildung 116: Optimierungshinweise zu einem ausgewählten Aufbereitungsverfahren 239
Abbildung 117: Hinweise zu limitierenden Faktoren zu einem ausgewählten Aufbereitungsverfahren 240
Abbildung 118: Ergebnisse der Carbon Footprint Berechnung 240
Abbildung 119: Dynamisierung nach Spotmarktpreis 242
Abbildung 120: Schieberegler zur Anpassung der Aufbereitungsmenge 243
Abbildung 121: Quartal mit Hochlastzeitfenster im Jahr 2014 244
Abbildung 122: Fahrweise nach der Berücksichtigung des Hochlastzeitfensters 244
Abbildung 123: Kriterien der atypischen Netznutzung 245
Abbildung 124: Druckzonenoptimierung 246
Abbildung 125: Druckzonenchart eines ausgewählten Iterationsschrittes 247
Abbildung 126: Übersicht zum Energiebedarf eines ausgewählten Iterationsschrittes 248
Abbildung 127: Energierückgewinnung 248
Abbildung 128: Eingabemaske Energierückgewinnung 249

Abbildung 129: Ergebnismaske Energierückgewinnung 249
Abbildung 130: Betriebsweise bei Pumpbetrieb und Netzgegenbehälter 249
Abbildung 131: Ergebnisse der optimierten Fahrweise ohne Berücksichtigung atypischer Netzentgelte in der Kalenderwoche 3 251
Abbildung 132: Ergebnisse der optimierten Fahrweise mit Berücksichtigung atypischer Netzentgelte in der Kalenderwoche 3 251
Abbildung 133: Gegenüberstellung der jährlichen Gesamtkosten verschiedener Betriebsweisen 252
Abbildung 134: Ertragsmodelle der recherchierten Webangebote zur energetischen Optimierung in der Wasserwirtschaft 256
Abbildung 135: Geschäftsmodell-Baukasten für die ENERWA-Online-Angebote 257

VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf den zukünftigen Wasserverbrauch. Eigene Darstellung auf Basis der Daten von Herber et al., 2008; Hillenbrand und Schleich, 2009; Lux, 2009; Michel et al., 2007; Neunteufel et al., 2012; Nowack, 2011; Proske, 2011; Roth et al., 2011. 26

Tabelle 2: Der Ablaufplan „Unser Wasser im Bergischen – Talsperren im Fokus vielfältiger Interessen 59

Tabelle 3: Chemisch-physikalische Parameter des Monitoring-Programms 65

Tabelle 4: Zusammenfassung der saisonalen Abweichungen der Abflussregime unterhalb von Talsperren im Vergleich zu weitgehend ungestörten Referenzgewässern 88

Tabelle 5: „Modul allgemeine Degradation“ für Fließgewässer Typ 5 (Pottgiesser und Sommerhäuser, 2008). Probestellen unterhalb von Talsperren. Bewertung und Core-metrics aufgelistet im 5 Klassensystem mit 1 = sehr gut bis 5 = schlecht 92

Tabelle 6: Aufteilung der Rohwasserabgabe der Talsperre an die TWA Auchel und die Wiehl 95

Tabelle 7: Referenzkonfiguration der Großen Dhünn-Talsperre (aktueller Stand) 100

Tabelle 8: Variationen der Turbinen-/Pumpen-Konfiguration 100

Tabelle 9: Maximale Ausnutzung des Speichervolumens im Unterlauf 103

Tabelle 10: Variationen der Begrenzung des Speichervolumens im Unterlauf (Variante 1) 103

Tabelle 11: Standorte, Aufbereitungsstufen und Ziele der Pilotuntersuchungen 111

Tabelle 12: Grundsätze in der Wasseraufbereitung zur Sicherstellung der Wasserqualität 114

Tabelle 13: Energiebedarfsanteile elektrischer Verbraucher 118

Tabelle 14: Ergebnisse aus einer Beispielrechnung für das WW Erlenhagen für 2015 120

Tabelle 15: Vergleich des Energiebedarfs der UF im WW Roetgen bei statischer und dynamischer Fahrweise (UF) 124

Tabelle 16: Beispiel für Betriebsbedingungen bei Verwendung von unterschiedlichen Sauerstoffquellen zur Ozonerzeugung 124

Tabelle 17: Wesentliche Anlagenkomponenten zur Klimatisierung des Wasserwerks 1 130

Tabelle 18: Carbon-Footprint in g CO_2/m^3 der beteiligten Wassergewinnungs- und Aufbereitungsanlagen (inkl. Umlage der Energie aus der Wassergewinnung (WG), die in der Wasseraufbereitung (WA) verbraucht wurde) 139

Tabelle 19: Mindestdruck als Funktion der Geschosszahl laut DVGW Arbeitsblatt W400-1 (A) 148

Tabelle 20: Kennwerte des Wasserrohrnetzes RWW 162

Tabelle 21: Kennwerte des Wasserrohrnetzes ENWOR 163

Tabelle 22: Kennwerte des Wasserrohrnetzes des Aggerverbands 165

Tabelle 23: Übersicht der durchgeführten Optimierungsansätze in den drei Netzmodellen 167

Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse 179
Tabelle 25: Potenzial von Ersatz von DMV durch Turbinen im ENWOR Netz 183
Tabelle 26: Ergebnisse der Optimierung der Fahrweise bei linearer Modellierung des Energiebedarfs E(Q) 186
Tabelle 27: Ergebnisse der Optimierung der Fahrweise bei nicht linearer Modellierung des Energiebedarfs E(Q) 188
Tabelle 28: Kennzahlen der Transportstrecken 190
Tabelle 29: Theoretische Energieeinsparpotenziale in der bundesweiten Wasserverteilung 196
Tabelle 30: Technisches Energieeinsparpotenzial in der bundesweiten Wasserverteilung 199
Tabelle 31: Energiebedarf und Basenkapazität bis pH 8,2 bei den Rieslern des WW 2 204
Tabelle 32: Prozessdaten zu den Schnellentcarbonisierungsreaktoren (SER) im WW 2 mit Angaben zum Härtebereich (Laborergebnisse); Q_{min} = 175 m³/h; Q_{mittel} = 330 m³/h; Q_{max} = 460 m³/h 205
Tabelle 33: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 1 209
Tabelle 34: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 1 209
Tabelle 35: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 2 209
Tabelle 36: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch das WW 2 210
Tabelle 37: Ergebnisse aus der Simulation für eine statische Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch WW 1 und WW 2 210
Tabelle 38: Ergebnisse aus der Simulation für eine dynamisierte Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung durch WW 1 und WW 2 210
Tabelle 39: Übersicht zu Einstellungen der Simulationsplattform in AP C 226
Tabelle 40: Übersicht der Verbundoptimierung in AP C 227
Tabelle 41: Auswahl Bürgerbeteiligungen rund um das Thema Wasser 286
Tabelle 42: Ausgewählte Ergebnisse aus der Bürgerbeteiligung 287
Tabelle 43: Versand des Bürgergutachtens 290
Tabelle 44: Energiebedarf und Carbon-Footprint einzelner Verfahrensstufen Teil 1 291
Tabelle 45: Energiebedarf und Carbon-Footprint einzelner Verfahrensstufen Teil 2 292
Tabelle 46: Umrechnung des spezifischen Energiebedarfs pro Meter Förderhöhe (kWh/m³/m) in einen Pumpenwirkungsgrad (%) 292
Tabelle 47: Ausgewählte Strukturmerkmale für das Netz RWW 293
Tabelle 48: Klassifizierung der Druckzonen des RWW-Netzes 294
Tabelle 49: Ausgewählte Strukturmerkmale für das Netz ENWOR 294
Tabelle 50: Klassifizierung der Druckzonen des ENWOR-Netzes 295