NaWaM
Nachhaltiges Wassermanagement
ERWAS

Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft

Ergebnisse

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

NaWaM
Nachhaltiges Wassermanagement
ERWAS

Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft

Ergebnisse

Vorwort

Ein nachhaltiges Wassermanagement spielt für unsere Gesellschaft eine wichtige Rolle. Um auch für künftige Generationen eine sichere und qualitativ einwandfreie Versorgung mit Wasser zu gewährleisten, muss die Wasserwirtschaft sich stetig neuen Herausforderungen stellen. Dabei sind die Anforderungen an die Betreiber von Wasserversorgungs- und Abwasserbehandlungsanlagen in den letzten Jahrzehnten ständig gestiegen.

Trotz des bereits erreichten hohen technologischen Standards in Deutschland besteht in der Wasserwirtschaft immer noch ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 25 % des Stromverbrauches. Eine energieeffiziente Wasserversorgung und Abwasserbehandlung spielt daher nicht nur eine zentrale Rolle für die Weiterentwicklung der städtischen Infrastruktursysteme, sondern sie kann auch Teil der Energiewende sein. Eine höhere Energieeffizienz ist zudem auch mit einer Reduktion von klimaschädlichem Kohlendioxid verbunden. Allein die Kläranlagen in Deutschland sind für einen jährlichen Ausstoß von ca. 3 Mio. t CO_2 verantwortlich.

Doch um dieses Potenzial zu nutzen, sind neue Ideen und Lösungsansätze aus der Forschung erforderlich. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat deshalb im Jahr 2012 die Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft – ERWAS“ ins Leben gerufen und mit rund 28 Mio. € gefördert.

In den Forschungsprojekten haben die Forscher die Schnittstelle zwischen wasserwirtschaftlichen Anlagen und den umgebenden Energienetzen untersucht. Die Erkenntnisse sind Basis dafür, dass diese Anlagen zukünftig auch als Bausteine einer energieeffizienten, dezentral organisierten Infrastruktur fungieren können, die auf erneuerbaren Energien basiert.

In allen ERWAS-Vorhaben waren neben den wissenschaftlichen Institutionen Partner aus der Wirtschaft und aus der wasserwirtschaftlichen Praxis eingebunden. Technologien, Pilotanlagen und Prototypen wurden erprobt und müssen nun ihre Praxistauglichkeit nachweisen. So entstanden schon zu Beginn Anwendungsperspektiven in gemeinsamer Verantwortung mit den Praxispartnern.

ERWAS hat gezeigt, dass das „Zusammendenken“ von Wasser und Energie den entscheidenden Anstoß gibt zu neuen, energie- und ressourceneffizienten Lösungen. Schließlich profitieren alle von diesen Innovationen, denn Kosteneinsparungen der Wasserwirtschaft kommen letztlich auch den Gebührenzahlern zugute. Die zentralen Ergebnisse werden in dieser Broschüre präsentiert.

Karl-Eugen Huthmacher

Inhaltsverzeichnis

Die BMBF-Fördermaßnahme ERWAS 6

Einleitung 8

ERWAS-Querschnittsthemen 12

ERWAS-Verbundprojekte 16

Energieerzeugung aus Abwasser mit Biobrennstoffzellen

BioBZ Die bio-elektrochemische Brennstoffzelle als Baustein einer energieerzeugenden Abwasserbehandlungsanlage 18

BioMethanol Nachhaltige Synthese des Energieträgers Methanol aus Abwasser 20

KEStro Kläranlagen als Energiepuffer für Stromnetze 22

Energieoptimierung und Lastmanagement in der Trinkwasserversorgung

ENERWA Energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems 24

EnWasser Erschließung eines Lastmanagementpotenzials in der Wasserversorgung zur Integration erneuerbarer Energien 26

EWave Energiemanagementsystem Wasserversorgung 28

EWID Energiegewinnung im Wasserverteilungsnetz durch intelligentes Druckmanagement 30

H_2Opt Interaktive Entscheidungsunterstützung für das Betriebs- und Energiemanagement von Wasserversorgungsbetrieben auf der Grundlage von mehrkriteriellen Optimierungsverfahren 32

Erschließung der Energie- und Ressourcenpotenziale in der Abwasserreinigung

arrivee Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung 34

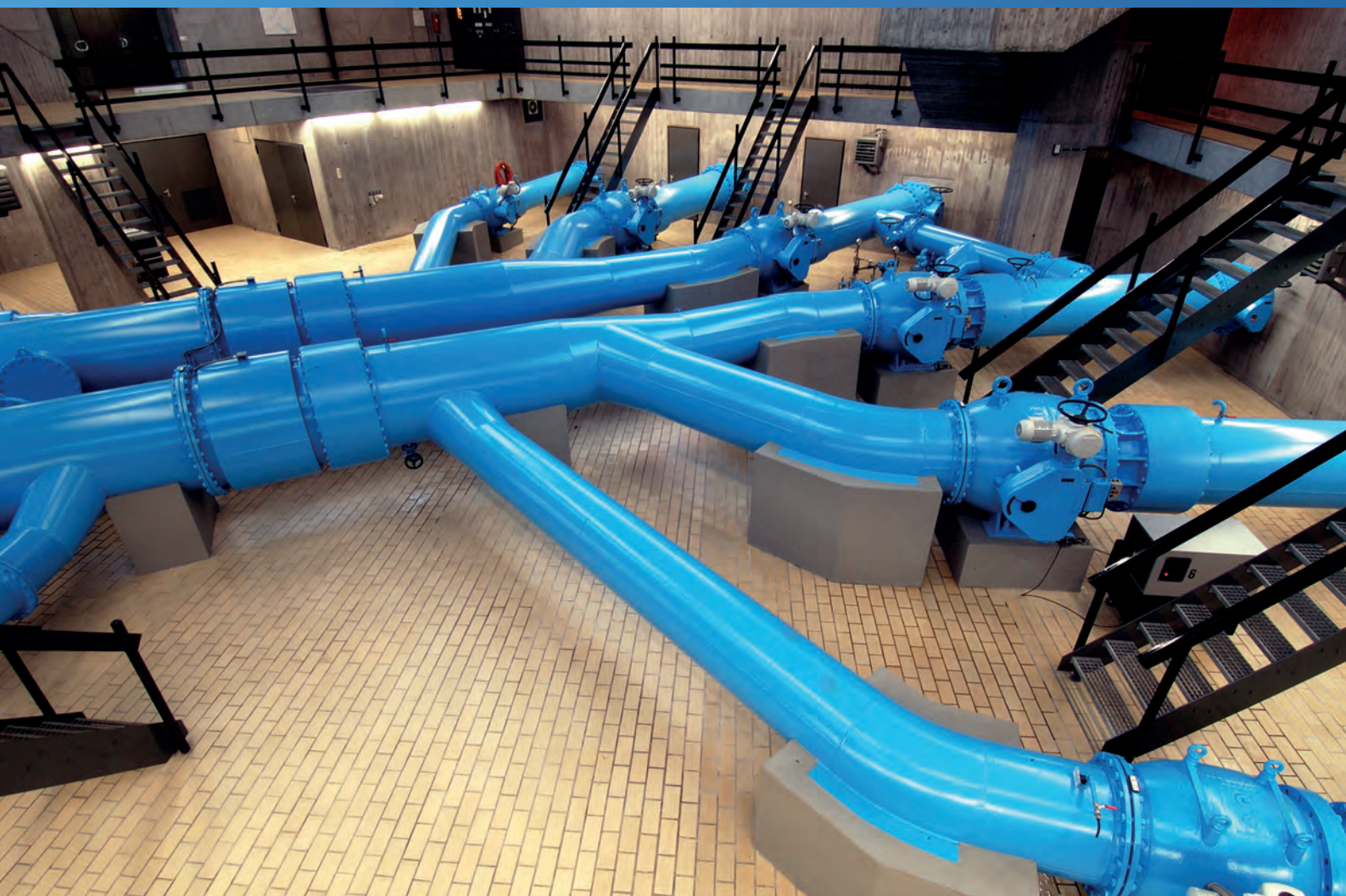
E-Klär Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagen-Technologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende 36

ESiTI Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch 38

KRN-Mephrec Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt 40

Kontaktdaten der Verbundpartner 42

Impressum 52



Die BMBF-Fördermaßnahme ERWAS

Die BMBF-Fördermaßnahme ERWAS

Einleitung

Ergebnispräsentation

Ohne Energie kann keine wasserwirtschaftliche Anlage betrieben werden. Die in Deutschland vorhandenen Systeme der öffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbehandlung verbrauchen zusammen rund 6,6 TWh elektrische Energie pro Jahr. Das entspricht dem jährlichen Strombedarf von etwa 1,6 Millionen Vier-Personen-Haushalten. Neben dieser Verbesserung der Energieeffizienz ist auf vielen wasserwirtschaftlichen Anlagen auch eine ressourcenschonende Energiegewinnung möglich. Im Falle der Abwasserreinigung könnte beispielsweise durch innovative Ansätze eine energetische Autonomie oder sogar eine „energiepositive" Versorgungslage erreicht werden.

Obwohl diese Rahmenbedingungen und Chancen schon seit den 1990er Jahren in der Fachwelt diskutiert wurden, konnte bisher noch kein entscheidender Erfolg bei der Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz verbucht werden, auch wenn in einzelnen Anlagen große Fortschritte erreicht wurden. Dies lag nicht am mangelnden Willen der Akteure, sondern unter anderem an fehlenden innovativen Ansätzen. Es galt daher, neue Möglichkeiten und Potenziale zu erschließen. Hier setzt die ERWAS-Fördermaßnahme mit ihren 12 vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhaben und rund 80 Partnern an (vgl. Abb. 2).

Nach Abschluss der meisten Projekte können in der vorliegenden Broschüre die umfangreichen Ergebnisse in Kurzform präsentiert werden. Weitergehende Erkenntnisse können aus den umfangreichen Forschungsberichten der Verbundforschungsvorhaben gewonnen werden.

Abb. 1: Kläranlage Goslar (Sabine Thaler, DWA)

Die Verbundforschungsvorhaben

Ein inhaltlicher Schwerpunkt der geförderten Vorhaben lag in der Erarbeitung neuer Konzepte des Zusammenwirkens zwischen der Trinkwasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft. Beispiele stellen die Nutzung des Lastmanagementpotenzials und der Energiespeichermöglichkeiten der Wasserwirtschaft für die zukünftigen Energiesysteme dar. Hier wurde unter anderem erforscht, inwiefern wasserwirtschaftliche Anlagen bei einem zukünftig stärker schwankenden Stromangebot aus regenerativen Quellen (Wind- und Solarenergie) eine ausgleichende Rolle als Energiequelle oder -senke spielen können.

Weiterhin wurden innovative Verfahren der Energieerzeugung und der Energiewandlung auf wasserwirtschaftlichen Anlagen entwickelt, so die optimierte Stromerzeugung in mikrobiellen Brennstoffzellen oder die Produktion von Methanol sowie die Stromverwertung in Elektrolyseuren. Neue Wege zur verbesserten Erschließung der im Klärschlamm gebundenen Energiepotenziale bei gleichzeitiger Verwertung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen wie Phosphor standen ebenfalls im Fokus.

In mehreren Verbundvorhaben stand die Nutzung der Energiepotenziale in den Anlagen der Wasserversorgung im Vordergrund. Ein thematischer Schwerpunkt lag hier im Bereich der Betriebsoptimierung. Ein weiteres Forschungsthema war die Energieoptimierung zukünftiger Anlagen zur Elimination von Spurenstoffen.

Trinkwasserversorgung	**ENERWA** **EnWasser** **EWave** **EWID** **H_2Opt**
Biobrennstoffzellen	**BioBZ** **BioMethanol** **KEStro**
Abwasserreinigung	**arrivee** **E-Klär** **ESiTI** **KRN-Mephrec**

Abb. 2: Die Projekte der ERWAS-Fördermaßnahme

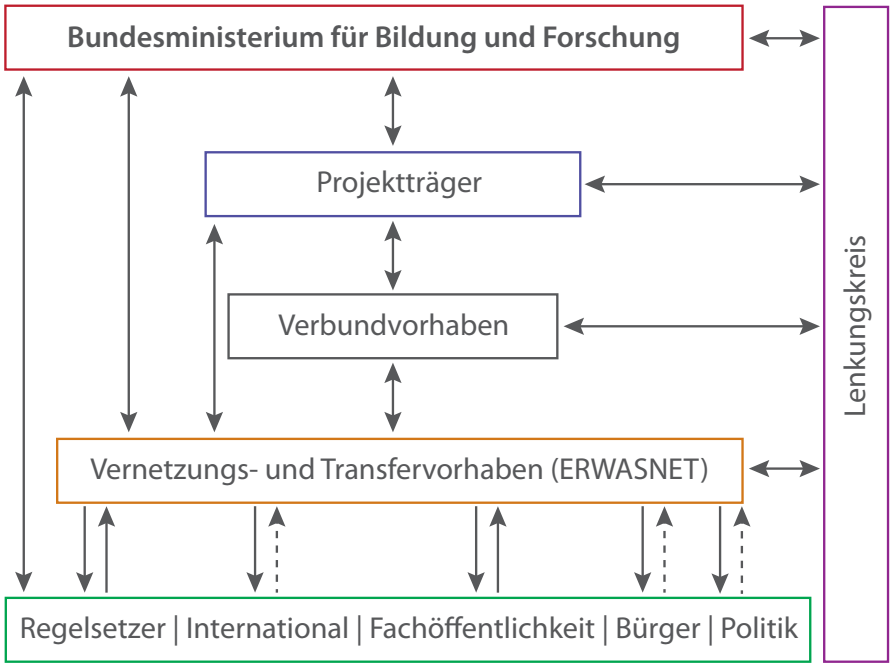


Abb. 3: Struktur der Fördermaßnahme

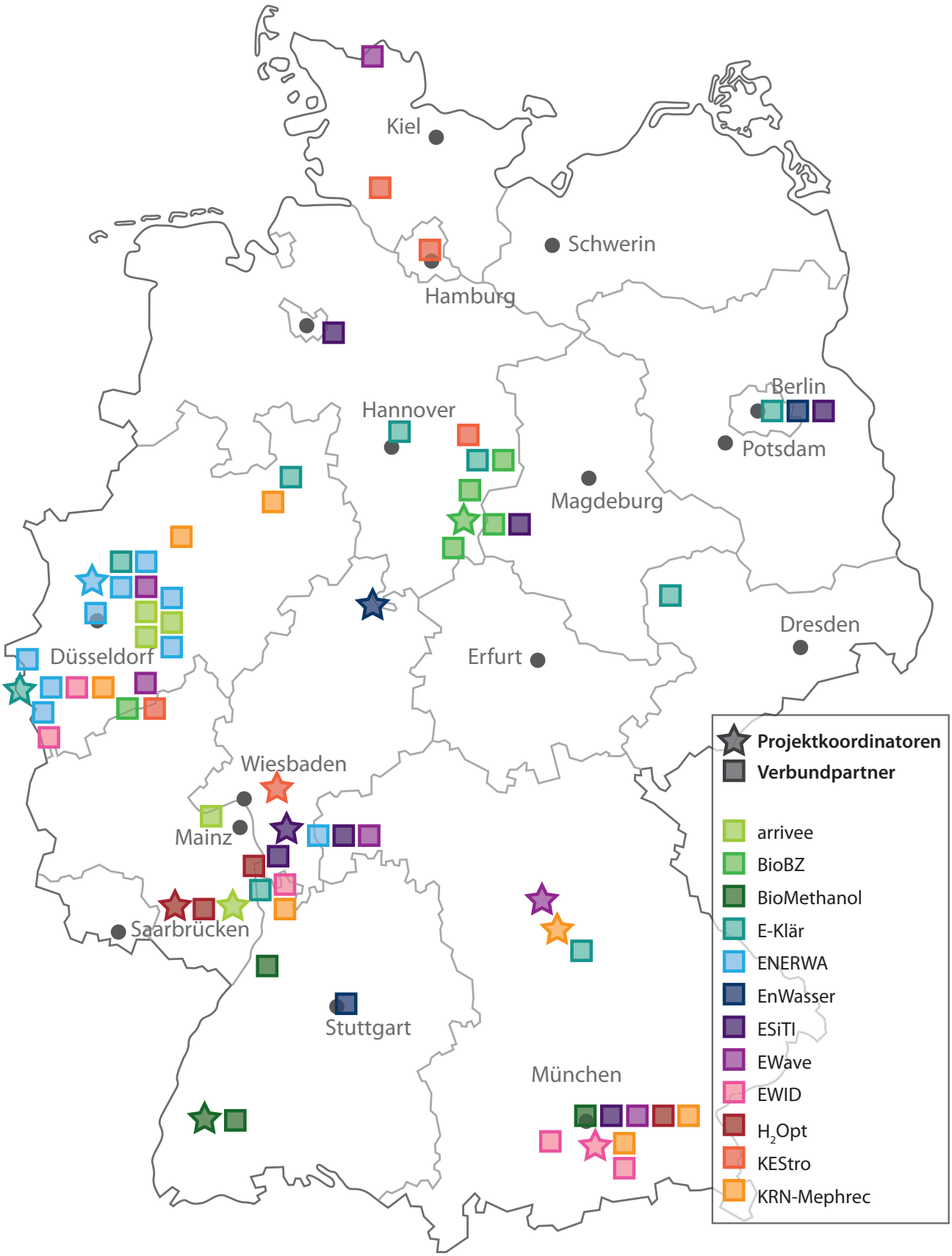


Abb. 4: BMBF-Fördermaßnahme ERWAS – Standorte der beteiligten Institutionen

Der Lenkungskreis

Im Zentrum der Fördermaßnahme stand natürlich die Arbeit der Verbundprojekte. Diese wurden unter anderem von einem Lenkungskreis als begleitendes Gremium unterstützt. Seine Aufgabe war es, wie bei allen Fördermaßnahmen im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes NaWaM, an der Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis sicher zu stellen, dass sich aus den Forschungsarbeiten praxisrelevante Erkenntnisse ableiten und umsetzen lassen. In den Lenkungskreis waren Mitglieder aus Wirtschaft, Behörden und anderen Institutionen berufen, die mit dem Thema „Wasser und Energie" im Rahmen ihrer täglichen Arbeit auf verschiedenste Weise verbunden sind. Die Koordinatoren aller 12 Verbundforschungsvorhaben waren ebenfalls Mitglied des Lenkungskreises, so dass ein direkter Wissens- und Informationsaustausch gewährleistet war.

Abb. 5: Mitglieder des Lenkungskreis

Das Vernetzungs- und Transfervorhaben

Die Fördermaßnahme ERWAS wird durch ein eigenständiges Vernetzungs- und Transfervorhaben (ERWASNET) begleitet, das organisatorische und inhaltliche Aufgaben wahrnimmt und die Verbundforschungsvorhaben bei ihrer Arbeit unterstützt. ERWASNET wird von einem

Abb. 6: Präsentation der Zwischenergebnisse auf der ERWAS-Konferenz im Februar 2016

Konsortium bestehend aus der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) und der TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH durchgeführt.

Zu den Aufgaben des Vernetzungsteams gehören die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Arbeitstreffen, Diskussionsforen und Statusseminaren zu übergreifenden Fragestellungen; die Erarbeitung und Bereitstellung von Informationsmaterialien zur Fördermaßnahme (Presse- und Werbematerialien, Broschüren, Flyer, Homepage, Newsletter, etc.); die Sicherstellung der Koordinierung mit den regelsetzenden Verbänden der Wasserwirtschaft, um die Verwertung der Ergebnisse der Forschungsvorhaben in den technischen Regelwerken zu ermöglichen sowie die Vernetzung mit entsprechenden nationalen bzw. internationalen Aktivitäten.

Im internationalen Bereich wurden bisher vier Großveranstaltungen mit Bezug zum Wasser-Energie-Nexus besucht (Washington, D.C., Stockholm, Malmö und Exeter). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Forschungsverbundvorhaben im internationalen Vergleich an der Spitze der technologischen Entwicklung bewegen.

Kontakt:

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
Theodor-Heuss-Allee 17 • 53773 Hennef
A. Baum • Dr. C. Wunsch
Tel.: +49 2242 872-124 • Tel.: +49 2242 872-209
baum@dwa.de
wunsch@dwa.de

TUTTAHS & MEYER
Ingenieurgesellschaft mbH
Bismarckstr. 2-8 • 52066 Aachen
Prof. Dr. M. Schröder • Dr. M. Gelhaus
Tel.: +49 241 500005 • Tel.: +49 234 33305-0
m.schroeder@tum-aachen.de
m.gelhaus@tum-bochum.de

Die BMBF-Fördermaßnahme ERWAS

ERWAS-Querschnittsthemen

Schon zu Beginn der ERWAS-Fördermaßnahme war klar, dass es Schnittstellen und Teilaspekte geben würde, die von projektübergreifendem Interesse sind, z.B. bei Verfahren, Methoden oder fachspezifischen Fragestellungen. Um diese Arbeiten zusammenzuführen und mögliche Synergiepotenziale aktiv zu nutzen, hat der Lenkungskreis mehrere Querschnittsthemen (QT) definiert, die in verbundübergreifenden Arbeitsgruppen bearbeitet wurden. Diese waren:

- QT Biobrennstoffzelle (BZ)
- QT Energiespeicher und Energienetze (ESpEN)
- QT Klärschlamm
- QT Modellierung und Simulation

Die Querschnittsthemen wurden mit hohem Engagement von den Projektpartnern unterstützt und es wurden viele für die Forschung, aber auch direkt für die Praxis relevante Ergebnisse erarbeitet. Nachstehend werden wesentliche Arbeitsergebnisse in Kurzform dargestellt.

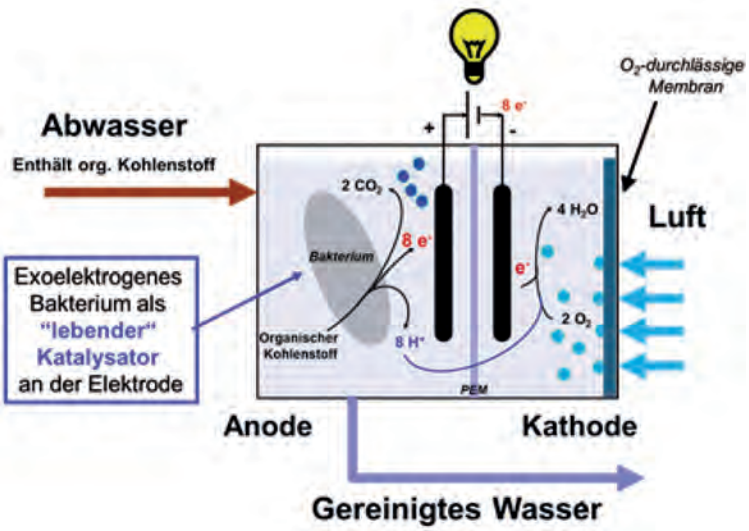


Abb. 1: Funktionsprinzip einer mikrobiellen Biobrennstoffzelle zur gleichzeitigen Stromerzeugung und Reinigung von Abwasser (IMTEK)

QT Biobrennstoffzelle (BZ)

Die 3 Verbundvorhaben BioBZ, BioMethanol und KEStro haben sich unter unterschiedlichsten Aufgabenstellungen mit der Entwicklung von Biobrennstoffzellen (Funktionsprinzip siehe Abb. 1) bzw. Elektrolyseuren beschäftigt und mit viel Engagement im QT Brennstoffzelle zusammen gearbeitet. Von den Beteiligten wurden der Austausch und die Diskussionen als äußerst positiv und förderlich für die eigene Forschungstätigkeit bewertet. Es wurden Synergien und gemeinsame Herausforderungen identifiziert, nicht nur innerhalb des QT sondern auch mit Akteuren außerhalb von ERWAS. Die Ergebnisse wurden von den Verbundpartnern aufgenommen und waren unter anderem Basis von Vorträgen und Veröffentlichungen.

So wurde unter Federführung des Verbundprojektes BioBZ gemeinsam ein erfolgreicher Workshop zum Thema „Mikrobielle Brennstoff - und Elektrolysezellen" durchgeführt mit Teilnehmern aus Industrie, Praxis und Forschung. Ein Bericht über die Aktivitäten des QT erschien in der KA-Schwerpunktausgabe zum Thema „Forschung Energie Wasser". In Planung ist ein Themenband „Mikrobielle Brennstoff- und Elektrolysezellen in der Abwasserreinigung".

Durch die ERWAS-BZ-Vorhaben und die gemeinsamen Aktivitäten des QT BZ ist der Einsatz von Biobrennstoffzellen und Elektrolyseuren in der Abwasserbehandlung soweit erforscht worden, dass der Weg zur Pilotierung in größerem Maßstab jetzt frei ist. Wenn sich die aufgezeigten Möglichkeiten dieser Technologie auch in großtechnischen Anlagen bestätigen, könnte dies eine Technologiewende in der Abwasserbehandlung einleiten.

QT Energiespeicher und Energienetze (ESpEN)

Bei der Festlegung der Querschnittsthemen wurde klar, dass die Bedeutung der Rolle der Wasserwirtschaft im „Strommarkt für die Energiewende" ein übergreifendes Thema vieler Verbundvorhaben war. Daher haben sich Partner aus 10 der insgesamt 12 Vorhaben an dem QT Energiespeicher und Energienetze beteiligt, in dem ursprünglich insbesondere das Thema Regelenergiepotenziale wasserwirtschaftlicher Anlagen behandelt

Abb. 2: Einsatzmöglichkeiten für Flexibilität, abgeändert nach (Gretzschel, Schäfer, Honeck, Dornburg)

werden sollte. Schnell war in der Abstimmung unter den teilnehmenden Verbundprojekten allerdings klar, dass sich die Thematik nicht auf die Regelenergie reduzieren lässt. Die Zielsetzung „Erkundung des Regelenergiepotenzials" wurde weiter gefasst zu „Erkundung des Flexibilitätspotenzials".

Ein flexibler und effizienter Anlagenbetrieb kann nur erreicht werden, wenn detaillierte Kenntnisse zu den Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen, über Lastprofile und Lastspitzen, sowie Wirkungsgrade und Kennlinien vorliegen. Erst mit diesen Informationen können zum Beispiel Erlöse im Bereich Lastabschaltung bzw. Lastzuschaltung, optimierte Beschaffungsprofile oder gar die Reduzierung der Netzentgelte realisiert werden. Auf dieser Basis können die Flexibilitätsoptionen in unterschiedlichen Märkten erkannt und systemdienlich eingesetzt werden (vgl. Abb. 2).

Der netzdienliche Einsatz erfolgt auf der Ebene der Verteilnetze und hat die Spannungshaltung als Ziel. Der marktdienliche Einsatz beinhaltet die unterschiedlichen Produkte der Strombörse und umfasst primär keine system- bzw. netzdienlichen Funktionen.

Um die Flexibilitäten insbesondere kleiner und mittlerer Anlagen der Wasserwirtschaft zu vermarkten, ist eine Möglichkeit ein sogenanntes „virtuelles" Kraftwerk. Dieses fasst die flexiblen Leistungen unterschiedlicher Anlagenstandorte bzw. Anbieter zusammen und bietet sie gebündelt an den Flexibilitätsmärkten an (s. Abb. 3). Durch die Bündelung mit anderen wasserwirtschaftlichen Anlagen ist das momentane Leistungsziel von 5 MW im Verbund problemlos erreichbar und kann ohne großen Mehraufwand für den Anlagenbetreiber vermarktet werden.

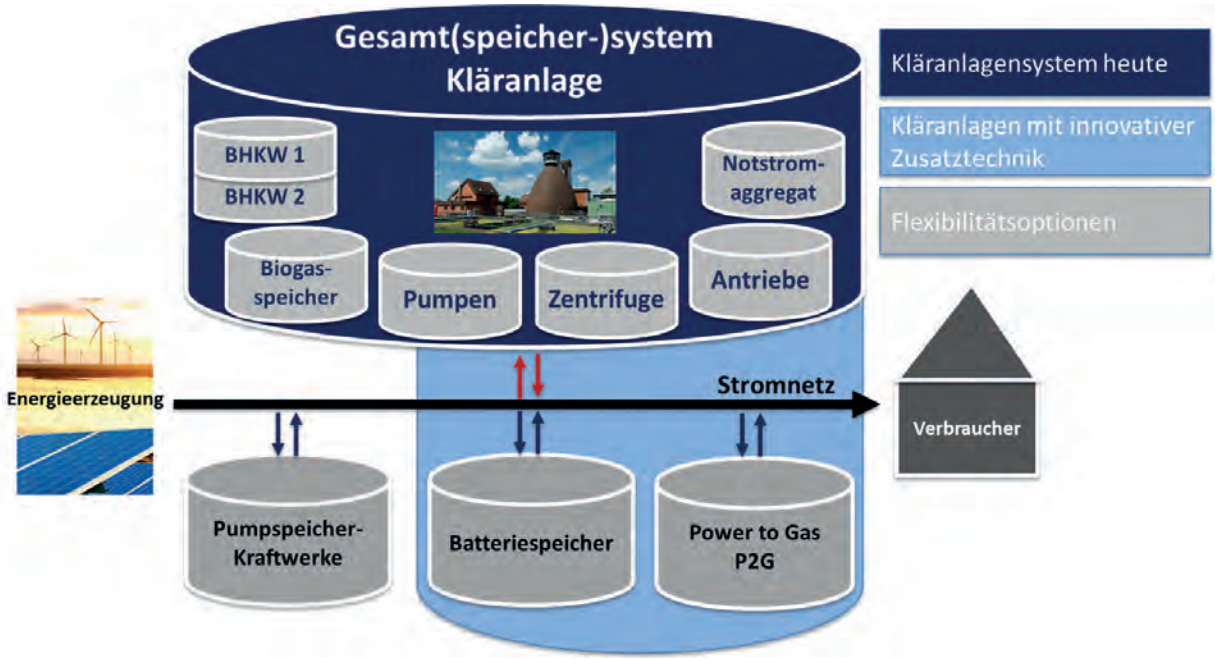


Abb. 3: Abwasserwirtschaftliche Systeme als Flexibilitätsbaustein in der Energiewirtschaft (bluemove consulting GmbH)

Inwieweit sich wasserwirtschaftliche Anlagen für die hier aufgeführten und in den Projekten untersuchten Einsatzbereiche in Zukunft verstärkt einsetzen lassen, wird erheblich von den rechtlichen Rahmenbedingungen und deren zukünftiger Ausgestaltung abhängig sein.

QT Klärschlamm

Das Querschnittsthema Nutzung der Energieressource Klärschlamm: Klärschlamm und Co-Substrate, Faulgas, Klärschlammverwertung (QT-Klärschlamm) diente der inhaltlichen Vernetzung der Verbundforschungsvorhaben in dem Bereich „Energie und Klärschlamm". Hierzu gehörten insbesondere Forschende aus den Projekten arrivee, E-Klär, ESiTI und KRN-Mephrec. Basierend auf dem neuen Arbeitsblatt DWA-A 131 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen" wird die Auslegung der biologischen Reinigungsstufe von Kläranlagen zukünftig in Deutschland auf Basis des CSB erfolgen. Im QT wurde die entsprechende Anpassung der Auslegungsparameter auch im Bereich der Klärschlammbehandlung diskutiert und als unbedingt notwendig angesehen, unter anderem um eine in sich konsistente Energiebilanz der gesamten Kläranlage zu ermöglichen.

In der Praxis werden allerdings momentan unterschiedliche Verfahren zur CSB-Analytik von Klärschlämmen eingesetzt. Es galt zu klären, ob diese Verfahren zum Beispiel für die Anpassung und Entwicklung von Bemessungsansätzen oder auch für die Verwendung im Rahmen von Benchmark-Prozessen gleichwertige Ergebnisse liefern.

Deshalb wurde im Rahmen des Querschnittsthemas eine Vergleichsmessung bezüglich des CSB durchgeführt. Ziel war es, verschiedene Analysenverfahren unter Einbeziehung der Probenvor- bzw. Probenaufbereitung zu vergleichen, um Rückschlüsse auf Plausibilität und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bezüglich Klärschlammproben zu ziehen.

Im Rahmen dieser Vergleichsmessungen konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass sich alle angewendeten Verfahren zur CSB-Bestimmung eignen. Die Verfahren weisen jedoch in Abhängigkeit von der Probenart (Homogenität des Feststoffanteils, Fettanteil) unterschiedlich große Abweichungen auf (vgl. Abb. 4). Vorteilhaft zeigen sich hier die Vorgehensweisen, bei denen die Originalprobe ohne weitere Probenvorbereitung (Trocknen und Mahlen) und mit einer geringen bzw. ohne Verdünnung analysiert werden können.

Aufgrund der zunehmenden Relevanz des CSB ergibt sich aus dieser Arbeit des QT die Empfehlung, die Analyse von Klärschlamm zukünftig zu vereinheitlichen. Die Ergebnisse der durchgeführten CSB-Vergleichsmessung wurden in der KA Abwasser, Abfall im April 2016 sowie als Poster auf der Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft „Wasser 2016" publiziert. Sie werden zudem in die Überarbeitung der DIN 38 414-09 eingebracht.

In Analogie zu der CSB-Vergleichsmessung wird eine Vergleichsmessung zu Laborgärversuchen innerhalb der Verbundvorhaben durchgeführt. Hierbei soll der Einfluss von Versuchsaufbau/-durchführung sowie des Impfschlamms auf das Ergebnis untersucht werden.

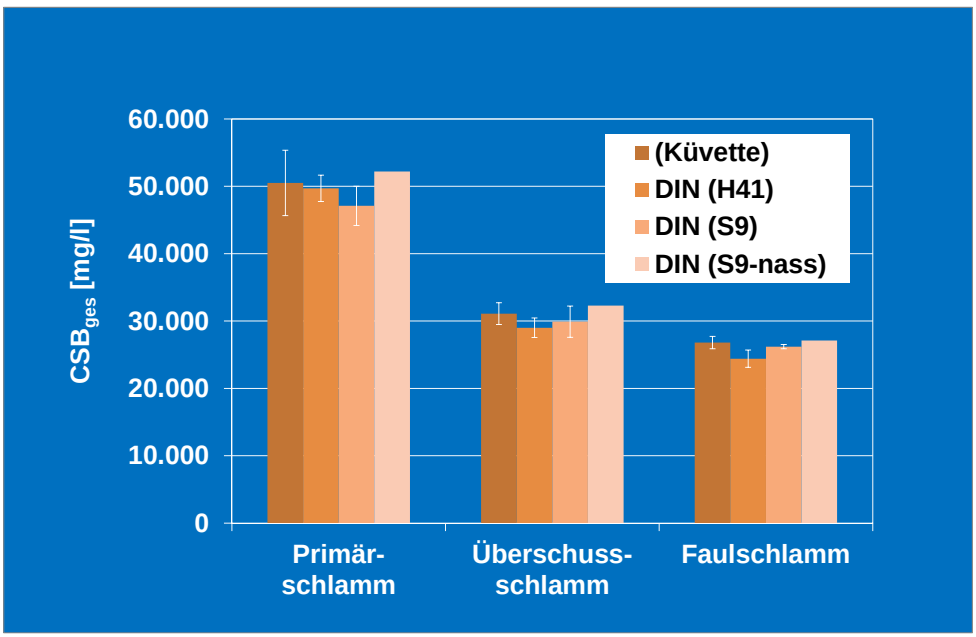


Abb. 4: Ergebnisse der CSB-Vergleichsmessung

QT Modellierung und Simulation

Im QT Modellierung und Simulation haben sich über 30 Forschende aus den Verbundvorhaben ENERWA, EnWasser, EWave, EWID und H_2Opt ausgetauscht. In regelmäßig stattfindenden Treffen wurden Projektfortschritte ebenso wie Modellierungsansätze bzw. -strategien von den Teilnehmern vorgestellt und anschließend in großer Runde diskutiert.

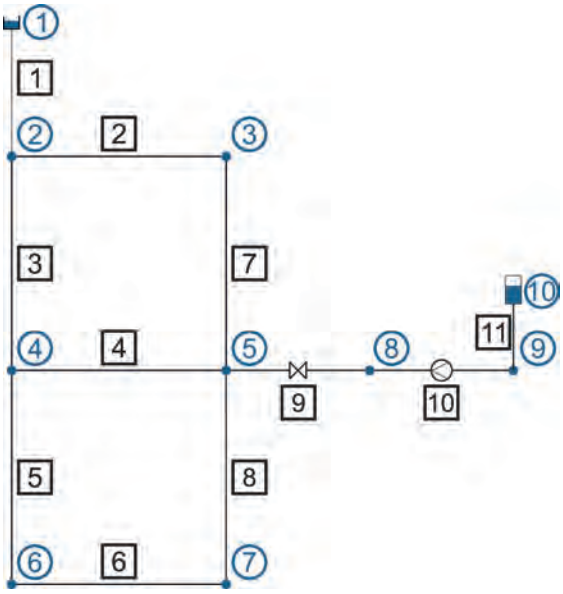


Abb. 5: Rohrleitungsnetzwerk des 2. Benchmarks

Neben Problemen, die bei der Modellierung auftraten, wurden dabei weitere verbundübergreifende Fragestellungen innerhalb der Gruppe besprochen. Hierzu zählten unter anderem Methoden zur Rohrleitungsberechnung und zur Prognose des Trinkwasserverbrauchs, die Robustheit von Simulationen, die Entwicklung effizienter Optimierungsverfahren, sowie die Validierung von Simulationen.

Um die selbst entwickelten Rohrleitungsrechner der Projektverbünde miteinander hinsichtlich der Simulationsergebnisse vergleichen zu können, wurden zwei Benchmark-Tests durchgeführt. Bei diesen Tests wurden die Simulationsergebnisse des kommerziellen Rohrleitungsrechners AFT Fathom 7.0 und der Open-Source Software EPANET 2.0 als Vergleichswerte hinzugezogen. Abbildung 5 zeigt das Rohrleitungsnetzwerk des 2. Benchmarks.

Das Netzwerk besteht aus insgesamt 8 Knoten, die über 9 Rohrleitungen, einem Ventil und einer Pumpe miteinander verbunden sind. Am oberen Ende ist ein Reservoir am rechten Ende ein Behälter angeschlossen, über die Wasser ins Netzwerk eingespeist wird. Die geodätischen Höhen der Netzknoten unterscheiden sich ebenso wie die in den Knoten vorgegebenen Wasserverbräuche. Der Rohrdurchmesser variiert zwischen 300 und 600 mm,

Rohr	Durchfluss [m³/h]				
	AFT Fathom 7.0	ANACONDA (EWave)	EPANET 2.0	RZVN Wehr GmbH (ENERWA)	TWaveSim (EWave)
1	1120,00	1120,00	1120,00	1120,00	1120,00
2	383,46	383,26	383,41	383,30	383,26
3	636,54	636,74	636,59	636,70	636,74
4	153,48	153,36	153,47	153,35	153,36
5	363,06	363,38	363,12	363,35	363,38
6	33,06	33,38	33,12	33,35	33,38
7	283,46	283,26	283,41	283,30	283,26
8	166,94	166,62	166,88	166,65	166,62

Tab. 1: Durchflüsse im Netzwerk bei geschlossenem Ventil

Knoten	Totaldruckhöhe [m]				
	AFT Fathom 7.0	ANACONDA (EWave)	EPANET 2.0	RZVN Wehr GmbH (ENERWA)	TWaveSim (EWave)
1	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00
2	208,23	208,23	208,25	208,24	208,23
3	206,52	206,47	206,52	206,50	206,47
4	203,62	203,52	203,60	203,57	203,52
5	202,36	202,22	202,32	202,28	202,22
6	202,09	201,94	202,05	202,00	201,94
7	202,03	201,86	201,97	201,93	201,86

Tab. 2: Totaldruckhöhen im Netzwerk bei geschlossenem Ventil

während die Länge eines jeden Rohres 1000 m beträgt. Im Vergleich zum 1. Benchmark wurde das Rohrleitungsnetz des 2. Benchmarks um ein „virtuelles" Wasserwerk bestehend aus Ventil, Pumpe und Behälter ergänzt. Das Wasserwerk ist an Knoten 5 angeschlossen und kann über das zwischen Knoten 5 und 8 befindliche Ventil geregelt werden. Beim 2. Benchmark wurde der Druckverlustbeiwert ζ des Ventils variiert und somit verschiedene Drosselungsgrade eingestellt. So konnte das Rohrleitungsnetzwerk bei unterschiedlichen Fördermengen der Pumpe, d.h. unterschiedlichen Betriebszuständen des Wasserwerkes, simuliert und ausgewertet werden.

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen exemplarisch für den Fall des geschlossenen Ventils die berechneten Strömungsverhältnisse (Durchfluss- und Druckverteilung) im Netzwerk. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Rohrleitungsrechnern zeigt, dass die Simulationsergebnisse - sowohl die Durchflüsse in den jeweiligen Rohren des Netzwerkes als auch die Totaldruckhöhen in den Verbindungsknoten sich nur geringfügig (um maximal 0,2 %) voneinander unterscheiden. Durch die Simulationsvergleiche weiterer Betriebszustände konnten auf diese Weise die Rohrleitungsrechner untereinander verifiziert werden.

ERWAS-Verbundprojekte

BioBZ

Die **bio**-elektrochemische **B**rennstoff**z**elle als Baustein einer energieerzeugenden Abwasserbehandlungsanlage

Hintergrund

Die im kommunalen Rohabwasser vorhandene Energie wird bisher über eine Klärschlammfaulung mit anschließender Verwertung des Faulgases über eine Kraft-Wärme-Kopplung in elektrische Energie umgewandelt. Dabei werden insgesamt ca. 8-12 % der chemisch gebundenen Energie des Rohabwassers in Strom umgewandelt. Der so produzierte Strom deckt den Eigenbedarf von Abwasserbehandlungsanlagen zu 50 bis 80 %. Ein neuer Ansatz, den Eigenanteil deutlich zu erhöhen, ist die direkte Umwandlung der chemisch gebundenen Energie von gelösten organischen Abwasserinhaltsstoffen in elektrischen Strom.

Dieser Ansatz wird im Verbundvorhaben „Die bio-elektrochemische Brennstoffzelle als Baustein einer energieerzeugenden Abwasserbehandlungsanlage“ verfolgt. Es sollen biologische Brennstoffzellen vom Labor in den halbtechnischen Maßstab entwickelt, untersucht und bezüglich des Anwendungspotenzials bewertet werden. Von Interesse sind der Beitrag dieser Systeme zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen sowie die Aussichten für eine technische Umsetzung und wirtschaftliche Anwendung. Begleitende Untersuchungen zur Mikroschadstoffelimination sowie zur Charakterisierung von „stromproduzierenden“ Biofilmen liefern ergänzende Erkenntnisse zur Beurteilung des „Mehrwerts“ solcher Systeme.

Ergebnisse

Die Ergebnisse betreffen verschiedene Entwicklungs- und Untersuchungsschwerpunkte und sind nachfolgend zusammengefasst.

(1) Materialentwicklung: Für die anaerob betriebenen Zellen wurden Elektrodenplatten auf Basis einer Graphit-Polymer-Mischung entwickelt. Für die aerob betriebenen Zellen wurden graphitbeschichtete Edelstahlgewebe-Elektroden entwickelt. Zur Minimierung von Ablagerungseffekten auf der Elektrode und zur Erhöhung der langzeitstabilen Leistung wurde eine Katalysator-Graphitmischung auf Basis Molybdändisulfid und Mangandioxid entwickelt.

(2) Scale-up: Die Material- und Leistungseigenschaften der Zellen wurden im Maßstab 13x15 cm^2 optimiert und bei der nächsten Plattengröße von 15x70 cm^2 überprüft. Da die flächenspezifische Leistungsdichte im Bereich 150 bis 220 mW/m^2 vergleichbar war, erfolgte die Entwicklung der halbtechnischen Pilotanlage mit Plattengrößen von 45x70 cm^2 und einer Gesamtfläche von ca. 30 m^2. Informationen aus der Biofilmcharakterisierung unterstützten die Auslegung im Hinblick auf die Überströmgeschwindigkeit.

(3) Reaktorkonzept / Integration auf Kläranlagen: Es wurde ein Tauchmodulkonzept entworfen, welches relativ einfach in ein vorhandenes Belebungsbecken integriert werden kann. Es wurde ein Teilabbauverfahren für den CSB hinter der Vorklärung entworfen, um ggfs. ausreichend CSB für eine weitergehende Stickstoffelimination sicherzustellen. Ergänzend wurde festgestellt, dass auch im Schlammwasser aus der Faulung eine Anwendung mit vergleichbar hohen flächenspezifischen Leistungen möglich ist.

(4) Steuerungstechnik und Ernte/Speicherung des Stroms: Zur Untersuchung der Betriebseigenschaften der Zellen wurden Konstant-Stromquellen entwickelt. Dabei wurde festgestellt, dass jede Zelle – auch wenn sie baugleich sind und gleich betrieben werden – eine eigene Zellspannung für ihr Leistungsoptimum erfordert. Die Entwicklung bezog sich auf die Ernte und Speicherung des von den Mikroorganismen produzierten Stroms. Es wurden elektronische Schaltkreise zur Spannungswandlung und Stromspeicherung entworfen und Gleichspannungswandler entwickelt, um kommerziell nutzbare Spannungen ab 2,5 V zu erzeugen und den Strom zu speichern (Wirkungsgrad von 70 %).

(5) Langzeitverhalten: Abgesicherte Ergebnisse zum Langzeitverhalten liegen derzeit nur für die kleineren Zellen vor. Einige Zellen konnten über 1,5 Jahre nahezu wartungsfrei dauerhaft bei 50 bis 150 mW/m^2 betrieben werden. Höhere Leistungen führten zu Scaling und Fouling-Effekten, woraus eine Leistungseinbuße entstand. Diese wurde im Projektverlauf über die o.g. Katalysatorentwicklung minimiert bzw. weitgehend vermieden (Zeitraum der Bewertung aktuell: 5 Monate).

(6) Mikroschadstoffelimination: Die Laboruntersuchungen von Modellsubstanzen aus unterschiedlichen Substanzklassen zeigten eine substanzspezifische Eliminierbarkeit in der Biobrennstoffzelle von leicht eliminierbar (z.B. Erythromycin, Diazepam, Koffein) bis wenig eliminierbar (Enrofloxacin, Diclofenac, Carbamazepin). Die Eliminierbarkeit hängt zudem von der Verweilzeit des Abwassers in der Biobrennstoffzelle ab.

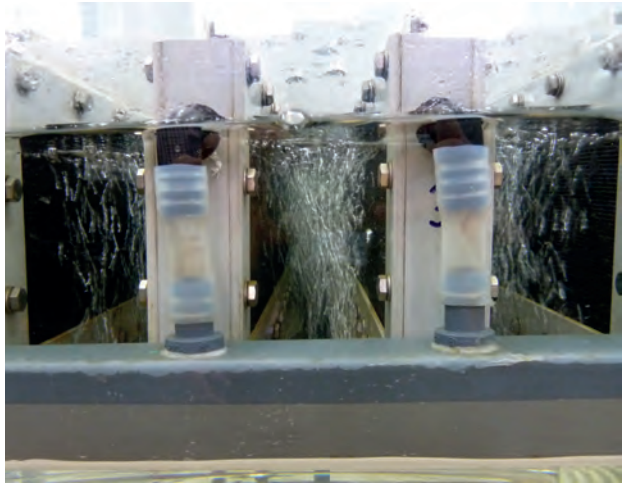


Abb. 1: Pilotanlage der Biobrennstoffzelle auf der Kläranlage in Goslar (Sabine Thaler, DWA)

(7) Wasserstoffproduktion: Es wurden verschiedene Katalysatormaterialien getestet und im Hinblick auf Leistungsfähigkeit bezüglich Wasserstoffproduktion sowie Ressourceneffizienz bewertet. Die 1.4401-Stahllegierung (V4A-Stahl) stellte sich als beste Kombination aus guter katalytischer Aktivität und niedriger Korrosionsrate heraus. Gleichzeitig ist sie im Vergleich auch die wirtschaftlichste Wahl für die kathodische Wasserstofferzeugung im technischen Maßstab.

(8) Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz: Über eine Bilanzierung von CO_2-Äquivalenten für Materialverbrauch und Energiegewinnung einer Biobrennstoffzelle erfolgte eine ganzheitliche Bewertung. Es zeigte sich, dass die hier betrachtete CO_2-Bilanz bereits nach 2 bis 3 jährigem Betrieb positiv wird (CO_2-Senke), da die Minderung der CO_2-Emissionen den CO_2-Verbrauch durch Materialverbrauch übersteigt.

Der Wirkungsgrad der Stromgewinnung (Verhältnis elektrische Energie zu chemisch gebundener Energie) mittels Biobrennstoffzelle liegt im Bereich 12-17 % bezogen auf den abgebauten CSB. Der mögliche Beitrag zur Energieeffizienz einer Kläranlage hängt von der Bemessung ab. Bei größeren Anlagen ab ca. 10.000 EW (Einwohnerwert) ist die CSB-Entnahme begrenzt, um die Denitrifikation nicht zu beeinträchtigen. Der Beitrag zur Energiebilanz beträgt bei einem CSB-Abbau von 18 g je EW ca. 3,5 kWh. Bei Kläranlagen mit größerem C/N-Verhältnis im Rohabwasser sowie bei Kläranlagen mit geringeren Anforderungen an die Stickstoffelimination ist bei einem CSB-Abbau von 40 g/EW (= 34 % des CSB im Rohabwasser) eine Energiegewinnung von ca. 8 kWh möglich.

Diese Zahlen verdeutlichen, dass die Biobrennstoffzelle bei einer größeren CSB-Entnahme wie z.B. in Kombination mit der Deammonifikation zukünftig energieerzeugende Abwasserbehandlungsanlagen allein auf Basis des CSB im Rohabwasser ermöglichen kann. Besonders vorteilhaft ist dabei eine Kombination mit der Faulung, da der Primärschlamm und der (restliche) Überschussschlamm nach wie vor stabilisiert werden müssen.

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde – erstmalig in Deutschland – eine halbtechnische bio-elektrochemische Abwasserbehandlungsanlage erfolgreich entwickelt und erprobt. Der Scale-up Faktor lag bei 1.500. Wesentliche Projektfortschritte waren:

- Entwicklung von neuen Herstell- und Beschichtungsverfahren für Composit-Elektroden und Membranelektrodeneinheiten für eine Kleinserienproduktion
- Entwicklung von neuen elektronischen Produkten für die Steuerung der Zellen und die Spannungswandlung/Stromernte
- Entwicklung von neuen leistungsfähigen und langzeitstabilen Katalysatormischungen
- Entwicklung eines energieverbrauchsarmen Tauchmodulkonzeptes
- Anwendung von Optimierungswerkzeugen wie Biofilmcharakterisierungsmethoden, Biofilmkonditionierungsverfahren und Strömungssimulation

Ein Verbesserungspotenzial und auch -bedarf besteht in Bezug auf Materialverbrauch und Herstellungskosten für eine bessere Wirtschaftlichkeit. Das allerdings war zu erwarten, weil in diesem Projekt das Aufzeigen von Machbarkeit und Umsetzbarkeit im Vordergrund stand. Einen Mehrwert stellt die Spurenstoffelimination dar, die zurzeit nicht monetär bewertet werden kann.

Kontakt:

Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
(CUTEC-Institut)
Leibnizstr. 21+23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Michael Sievers
Tel.: +49 5323 933-243
michael.sievers@cutec.de

Laufzeit: 05/2014 – 10/2017
www.bio-bz.de

BioMethanol

Nachhaltige Synthese des Energieträgers Methanol aus Abwasser

Hintergrund

Als alternative Technologie zur energieeffizienten Abwasserreinigung werden derzeit mikrobielle Brennstoffzellen diskutiert, in denen sogenannte exoelektrogene Bakterien statt mit O_2 als terminalem Elektronenakzeptor ihrer Atmungskette mit der Anode einer Brennstoffzelle „atmen". So kann aus Abwasser direkt elektrische Energie erzeugt und gleichzeitig auf die energieintensive Belüftung des Belebtschlamm-Beckens verzichtet werden. Wird nun zwischen Anode und Kathode eine zusätzliche Spannung angelegt, können an der Kathode statt Sauerstoff auch Protonen reduziert werden und Wasserstoff entsteht (mikrobielle Elektrolysezelle). Die hierzu notwendige elektrische Energie ist deutlich geringer als bei der klassischen Elektrolyse, da ein Teil der Elektrizität von den Bakterien geliefert wird. Im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojektes BioMethanol sollen durch Aufarbeitung von Abwasser CO_2 und H_2 in einer mikrobiellen Elektrolysezelle gewonnen und in einem nachgeschalteten Katalyseprozess zu Methanol umgesetzt werden. Ziel des Projekts ist die Charakterisierung einer entsprechenden Demonstrationsanlage im Labormaßstab, sowie die Bewertung des Konzepts „Methanol aus Abwasser" unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Dazu gehört neben der Entwicklung einer für den Betrieb mit echtem Industrieabwasser geeigneten mikrobiellen Elektrolysezelle auch die Verbesserung der für die Methanol-Synthese verwendeten Katalysatoren.

Ergebnisse

Im Hinblick auf die Entwicklung der mikrobiellen Elektrolysezelle wurde mit Kohlenstoff-geträgertem MoS_2 ein neues Elektrodenmaterial für die elektrolytische Wasserstofferzeugung aus Industrieabwasser entwickelt. Im Vergleich zu etablierten Platinkathoden, zeigt das neue Material eine deutlich verbesserte Leistungsfähigkeit mit um ca. 0,4 V verringerten Überpotenzialen. Durch den weitaus geringeren Preis (die Materialkosten der Elektroden liegen mit unter 5 € m^{-2} um etwa zwei Größenordnungen unter denen einer Platinelektrode) bei gleichzeitig deutlich verbesserter Leistungsfähigkeit ist das neu entwickelte Material für die Anwendung besonders vielversprechend.

Parallel zur Entwicklung der Kathode wurde die Anodenleistung der mikrobiellen Elektrolysezelle durch den Einsatz definierter mikrobieller Konsortien weiter verbessert. Die erfolgreiche Strategie beruht auf dem Einsatz eines gemischten mikrobiellen Konsortiums und dessen langsamer Adaptation an das reale Industrieabwasser. Das Konsortium besteht aus dem elektroaktiven Bakterium Geobacter sulfurreducens sowie weiteren Mikroorganismen, die aus dem Abwasser der Celluloseacetat-Produktion isoliert wurden. In Labor-Experimenten konnte gezeigt werden, dass sich durch dieses Verfahren eine ca. 80-fache Steigerung der Anodenstromdichte auf Werte von bis zu 1,2 A m^{-2} möglich ist. Aktuell wird diese Inokulations-Strategie für den Einsatz

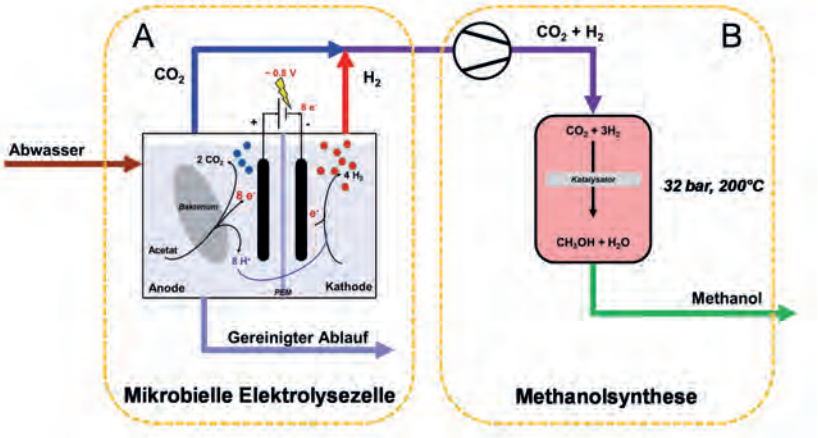


Abb. 1: Schematische Darstellung des Konzepts zur stofflichen und energetischen Nutzung der Kohlenstofffracht in (Industrie-)Abwässern. A) Mikrobielle Elektrolysezelle; B) Methanol-Synthese

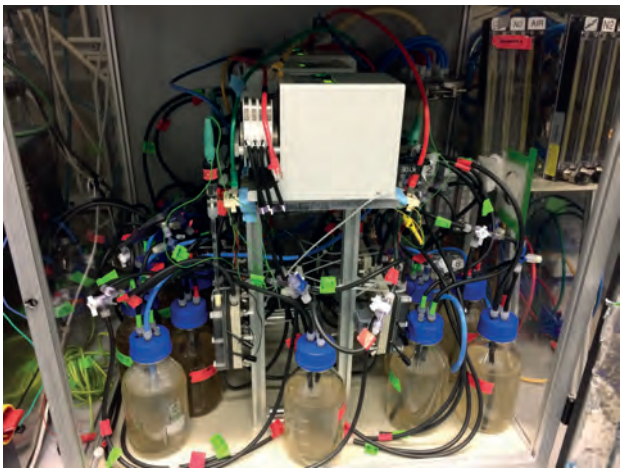


Abb. 2: Laboraufbau zum parallelen Betrieb hochskalierter mikrobieller Elektrolysezellen (36 cm² geometrische Elektrodenfläche) mit Industrieabwasser (IMTEK)

in kompletten mikrobiellen Elektrolysezellen etabliert und optimiert. In ersten Versuchen konnten mit hochskalierten mikrobiellen Elektrolysezellen (Abb. 2) bereits Stromdichten von über 4 A m^{-2} erreicht werden.

Bei den Arbeiten zu verbesserten Katalysatoren für die Methanolsynthese wurde u.a. eine neue vielversprechende Syntheseroute für einen flouridierten Katalysator mit hohem Carbonat-Anteil im Präkursor etabliert. Wesentlicher Vorteil dieser Syntheseroute gegenüber der etablierten Gasphasen-Fluoridierung ist die Erhaltung der Carbonat-Struktur im Katalysator. Aktuell kann mit diesem Katalysator eine gegenüber dem Benchmark um 10 Prozentpunkte erhöhte Selektivität für Methanol von 80 % bei 200 °C und 40 bar erreicht werden. Zusätzlich wurden erfolgreiche Versuche zur nachgelagerten Direktsynthese von Dimethylether aus Methanol durchgeführt. Mit diesem Ansatz lässt sich im Vergleich zum Benchmark-Katalysator eine um ca. 20 % erhöhte CO_2-Umsatzrate erreichen. Mit einem etwa dreifach höheren Verkaufspreis ist Dimethylether zudem ein wirtschaftlich attraktiveres Produkt als Methanol, wodurch sich die Rentabilität des Prozesses deutlich steigern ließe.

Zur projektbegleitenden Evaluation des Technologiepotenzials wurde eine detaillierte Modellrechnung zur ökonomischen und ökologischen Bewertung verschiedener Prozessvarianten erstellt. Darin berücksichtigt sind neben verschiedenen Szenarien der Energiemarkt-Preisentwicklung und der möglichen Entwicklung der Methanol-Verkaufspreise auch die Anschaffungspreise kostenrelevanter System-Komponenten. Zum Abschluss des Projekts kann mit diesem Modell auf Basis der mit der Demonstrationsanlage erhobenen Messdaten eine fundierte Evaluation des Technologiepotenzials und eine ökonomische und ökologische Betrachtung des Gesamtsystems vorgenommen werden. Bereits im Vorfeld durchgeführte Berechnungen zeigten, dass sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht auf den Zukauf von CO_2 aus externen Quellen verzichtet werden sollte. Zudem ist die erreichbare Stromdichte der Elektrolysezelle und die damit einhergehende Membran- und Elektrodenfläche einer der Hauptfaktoren hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems.

Fazit

Im Rahmen des Verbundvorhabens konnten erfolgreich neue Materialien und Verfahren entwickelt werden, die eine deutliche Verbesserung der Teilprozesse des Konzepts „Methanol aus Abwasser“ unter anwendungsrelevanten Bedingungen erlauben. Im Hinblick auf die mit Industrieabwasser betriebene mikrobielle Elektrolysezelle sind dies kostengünstige und hochaktive Katalysatoren für die Wasserstoffgewinnung, und das neu entwickelte Animpf-Verfahren zur Erhöhung der bislang das Gesamtsystem limitierenden Anodenstromdichte. Auf Seiten der Methanol-Synthese können mit den neu entwickelten Katalysatoren nicht nur die Umsatzraten erhöht, sondern mit Dimethylether (DME) auch ein im Vergleich zu Methanol wirtschaftlich attraktiveres Produkt erzeugt werden. Die parallel zu diesen Entwicklungsarbeiten durchgeführte ökonomische und ökologische Bewertung verschiedener Prozessvarianten hat sich als sehr hilfreich erwiesen. So konnten die das Gesamtsystem limitierenden Faktoren (z. B. die erreichbare Stromdichte an der Anode) frühzeitig identifiziert und gezielt optimiert werden. Zum Abschluss des Projekts werden die Teilprozesse „mikrobielle Elektrolyse“ und „Methanol/DME-Synthese“ in einer Labor-Demonstrationsanlage zur nachhaltigen stofflichen und energetische Nutzung der Kohlenstofffracht in (Industrie-)Abwässern zusammengeführt, und eingehend charakterisiert. Die so gewonnenen Daten werden eine detaillierte Bewertung des Konzepts hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und CO_2-Emissionen ermöglichen, und als wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung und Pilotierung des Verfahrens in Folgeprojekten dienen.

Kontakt:

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Georges-Koehler-Allee 103
79110 Freiburg
Dr. Sven Kerzenmacher
Tel.: +49 761 203-73218
sven.kerzenmacher@imtek.uni-freiburg.de

Laufzeit: 04/2014 – 12/2017
www.biomethanol.uni-freiburg.de

KEStro

Kläranlagen als **E**nergiepuffer für **Stro**mnetze

Hintergrund

Regenerative Energiequellen, z. B. Windkraft und Photovoltaik, unterliegen großen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Im Rahmen der Energiewende ist der Anteil regenerativer Energien gewachsen und wird weiter an Bedeutung gewinnen. Zum Ausgleich dieser Schwankungen und somit zur Stabilisierung der Stromnetze werden Energie-Puffer-Systeme, beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke, benötigt.

Kläranlagen könnten ebenfalls als Energie-Puffer genutzt werden. Dieser neuartige Energiepuffer besteht aus zwei Komponenten: Eine energieliefernde Biobrennstoffzelle und eine energieverbrauchende Spurenstoffelektrolyse. Je nach Energiebedarf im Stromnetz können die Komponenten entweder zugeschaltet oder vom Netz genommen werden. Zusätzlich zur Stabilisierung der Stromnetze tragen beide Verfahren auch zur Reinigung des Abwassers bei. Die Entwicklung und Erprobung dieser beiden Komponenten sind Gegenstand des Verbundprojektes KEStro.

Ergebnisse

Die Biobrennstoffzelle gewinnt Energie nach folgendem Prinzip: Ein Biofilm baut organische Wasserinhaltsstoffe ab und gibt dabei anfallende Elektronen an die Elektrode (Anode), auf der er sich angesiedelt hat, ab. An einer zweiten Elektrode (Kathode), der Gasdiffusions-Elektrode, wird Sauerstoff aus der Luft zu Wasser reduziert. Die Biobrennstoffzelle wurde in synthetischem (Substrate: Acetat und Huminstoffe) und in realem Abwasser (Trübwasser aus der Primärschlammbehandlung; Ablauf aus der Vorklärung) im Labor charakterisiert. Dabei zeigte sich u. a., dass der Biofilm innerhalb weniger Wochen aufwächst. Zur Stabilisierung der Stromnetze muss die Energiequelle phasenweise abgeschaltet werden. Es zeigte sich, dass temporäres Abschalten der Biobrennstoffzelle auf die erzielbare elektrische Leistung keinen signifikanten Einfluss hat. Die Eignung von Gasdiffusionselektroden, die mit unterschiedlichen Elektrokatalysatoren (Silber; diverses, Kohlenstoff-basiertes Material) ausgerüstet sind, wurden untersucht. Gasdiffusionselektroden, die Silber-Katalysatoren enthalten, lieferten die höchsten Energiewerte. Allerdings bilden sich auf diesen Elektroden Biofilme aus, die die Leistung zumindest in den ersten Wochen nicht signifikant verminderten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Zelle auch ohne teure Trennmembran (zwischen den beiden Elektroden) betrieben werden kann. Biobrennstoffzellen werden in den meisten Fällen als Filterpressenzellen konzipiert. Im Projekt KEStro wurde für diese Anwendung eine zylindrische Zelle entworfen und im Labor- und Demonstrator-Maßstab gebaut (siehe Abb. 1). Der Vorteil dieser Bauform liegt in der guten Zugänglichkeit der Gasdiffusionselektroden für Luftsauerstoff, d. h. es wird keine Pumpe benötigt. Es wurden Laborzellen (ca. 400 cm^2 Anodenfläche) und zwei Demonstrator-Zellen (ca. 2100 cm^2 Anodenfläche) gebaut. Die Demonstrator-Zellen wurden auf dem Klärwerk Steinhof (Abwasserverband Braunschweig) getestet.

Das Verfahrensprinzip der Spurenstoffelektrolyse besteht aus zwei Schritten: Im ersten Schritt werden die Spurenstoffe in der Adsorberzelle (vgl. Abb. 2) an Aktivkohle adsorbiert. Dies erfordert keine zusätzliche Energie. Zu dem Zeitpunkt, an dem „Überschussenergie“ im Netz zur Verfügung steht, wird im zweiten Schritt an die Aktivkohle eine Spannung angelegt. Die Spurenstoffe reichern sich in der Lösung an und werden in der zweiten Zelle (Elektrolysezelle) an einer bordotierten Diamant-Elektrode abgebaut. Aus einer Reihe verschiedener Kohlenstoff-Materialien wurde mit Hilfe von Adsorptionsversuchen das geeignete Material bestimmt. Adsorption und elektrochemisch induzierte Desorption wurden untersucht. Es zeigte sich, dass die elektrochemische Desorption u. a. von der chemischen Struktur der Spurenstoffe, vom pH-Wert, von der angelegten Spannung und von den Oberflächeneigenschaften der Aktivkohle abhängt. Das Zusammenspiel dieser Parameter ist derzeit noch nicht vollständig aufgeklärt.

Für ein halogeniertes Röntgenkontrastmittel, das chemisch sehr stabil ist, konnte die reduktive Dehalogenierung an Kohle-Elektroden nachgewiesen werden. Der oxidative Abbau der halogenierten Röntgenkontrastmittel wurde an bordotierten Diamant-Elektroden ebenfalls nachgewiesen. Außerdem wurde eine Reihe weiterer Pharmawirkstoffe erfolgreich abgebaut. Da sich die erforderlichen Spannungen und elektrischen Ströme für die Desorption und den elektrochemischen Abbau stark unterscheiden, wurden die

Abb. 1: Zwei Biobrennstoffzellen-Demonstratoren im Testbetrieb auf dem Klärwerk Steinhof

beiden Prozessschritte Adsorption/Desorption und Elektrolyse räumlich getrennt und auf zwei Zellen verteilt. Aus ökonomischer Sicht ermöglicht das dadurch entstehende modulare System aus Adsorber-/Desorber-Zelle und Elektrolyse-Zelle eine flexible Anpassung an Markterfordernisse. Demonstratoren der beiden Zelltypen wurden gebaut und durchliefen Testreihen im Klärwerk Steinhof.

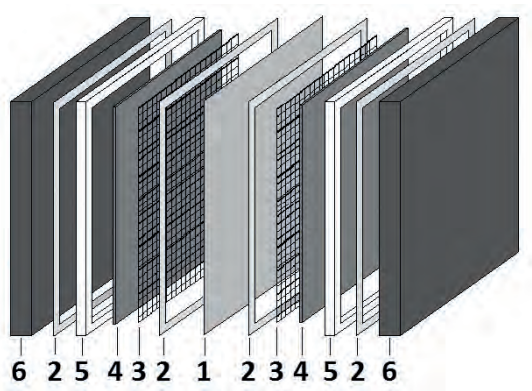


Abb. 2: Schema einer elektrochemischen Adsorption-/Desorptions-Zelle (1 Ionenaustauschermembran, 2 Dichtung, 3 Netz, 4 Aktivkohlebett, 5 Rahmen, 6 Stromabnehmer)

Fazit

Im Projekt wurde gezeigt, dass das Konzept einer Netzstabilisierung durch die Kombination aus Biobrennstoffzelle und Spurenstoffelektrolyse prinzipiell realisierbar ist. Allerdings sollte die Leistung der Biobrennstoffzelle deutlich gesteigert werden. Für die potenzialkontrollierte Adsorption/Desorption und die Spurenstoff-Elektrolyse eröffnen sich neue Anwendungsfelder, u. a. in der Aufbereitung industrieller Prozesswässer. Auf Basis der Daten des derzeit laufenden Demonstrator-Betriebs wird für das Gesamtsystem abschließend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erstellt.

Kontakt:

DECHEMA Forschungsinstitut
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt
Dr. Klaus-Michael Mangold
Tel.: +49 69 7564-327
mangold@dechema.de

Laufzeit: 05/2014 – 07/2017
www.kestro.de

ENERWA

Energetische Optimierung des wasserwirtschaftlichen Gesamtsystems Talsperren/ Fließgewässer • Trinkwasseraufbereitung • Transport-Speicherung-Verteilung

Hintergrund

Talsperren als Trinkwasserressourcen, Wasseraufbereitungsanlagen in den Wasserwerken und die Trinkwasserverteilungsnetze bergen bisher noch ungenutzte Potenziale zur Energieeinsparung, -rückgewinnung und –speicherung. 15 Partner aus Wissenschaft und Praxis (Wasserverbände, Wasserversorger, Ingenieurbüros) haben diese Energiepotenziale in Wasserversorgungssystemen im Rahmen von ENERWA systematisch untersucht. Ein Schwerpunkt lag auf der Dynamisierung des Anlagenbetriebes vor dem Hintergrund schwankender Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie und variabler Energiepreise. Mit einer dynamischen Wasserentnahme aus Talsperren sollen die Wasserabgaben in den Unterlauf der Gewässer oder in die Wasserwerke energetisch möglichst maximal ausgenutzt werden. Auch Einsparpotenziale auf der Ebene von Anlagen und Teilsystemen in Wasserwerken und Verteilungsnetzen wurden analysiert. Ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen sowie rechtliche und gesellschaftliche Randbedingungen wurden in die Untersuchungen einbezogen.

Ergebnisse

Die Dynamisierungsversuche an einer Talsperre mit starker Stauspiegelabsenkung führten zu einer leichten Erwärmung des Tiefenwassers, aber die Ausprägung der thermischen Schichten und die Rohwasserqualität blieben unbeeinflusst. Die Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass eine stärkere Dynamisierung die Sauerstoffverhältnisse im Hypolimnion positiv beeinflusst, da die Wasserabgabemenge über den üblichen Betrieb hinaus dem Staukörper Nährstoffe entzieht und somit weniger Biomasse zum Grund sedimentiert und abgebaut werden muss. Im Unterlauf der Talsperren kann eine stärkere Variation des Abflusses in gewissen Grenzen sogar Feinsedimentablagerungen und damit verbundene negative Effekte auf die Biozönose verhindern. Die Nutzung bestehender Dynamisierungspotenziale bietet darüber hinaus die Möglichkeit der Verbesserung des ökologischen Zustands der Talsperrenunterläufe. Um für eine veränderte Talsperrenbewirtschaftung und ggf. weitere Veränderungen im Wasserversorgungsystem gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen, wurde parallel zu den technischen Untersuchungen ein Bürgerbeteiligungsverfahren entwickelt und erfolgreich durchgeführt.

Die Option, Trinkwassertalsperren als Energiepuffer zu nutzen, ist somit in begrenztem Umfang durchaus gegeben und auch Wasseraufbereitungsanlagen und Verteilungsnetze bergen Flexibilitätsoptionen. Dazu gehört vor allem ein gezielter Einsatz von Trinkwasserbehältern zum Lastmanagement vor dem Hintergrund der Minimierung der Energiekosten. Allerdings zeigen die Analysen auch, dass sich diese Optionen zu einem erheblichen Teil derzeit nicht wirtschaftlich darstellen lassen, insbesondere wenn nennenswerte Investitionen notwendig sind - aufgrund aktueller Strompreisregularien und gesetzlicher Rahmenbedingungen. Eine Nutzung des Verschiebepotenzials der Wasserabgaben aus Talsperren im Tagesgang zur Energieerzeugung mit Turbinen, besonders in Zeiten hoher Erlöse, kann ökonomisch sinnvoll sein. Eine weitergehende Dyna-

Abb. 1: Bigge-Talsperre (rechts) und Vorsperre (links) (Jan Echterhoff, FiW Aachen)

misierung ist aufgrund der begrenzten Wassermenge und der hohen Investitionen in Turbinen, Pumpen und Speicherbecken aktuell nicht wirtschaftlich.

Eine flexible Fahrweise der Wasseraufbereitung lohnt sich energetisch und wirtschaftlich nur in Sonderfällen, kann aber sinnvoll sein, wenn es für andere Bereiche der Versorgungskette lohnend ist. 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 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.

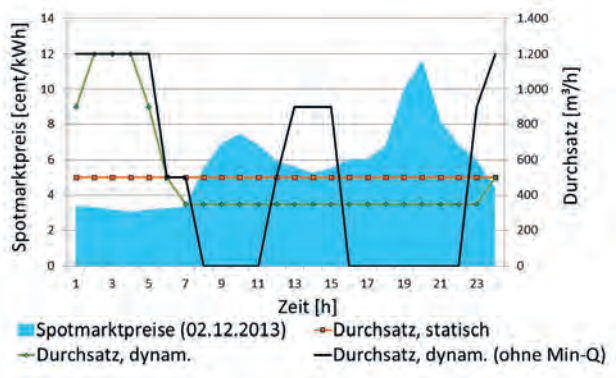


Abb. 2: Dynamisierung des Wasserwerksbetriebs in Abhängigkeit vom aktuellen Strompreis

Neben der Dynamisierung von Anlagen finden sich Effizienzpotenziale der Wasserversorgung durch technische Optimierung im Detail:

Für Wasserverteilungsnetze wurden Optimierungsalgorithmen mit dem Ziel einer intelligenten Gruppierung höher gelegener Verbraucher zu neuen Druckzonen entwickelt, um Druck- und damit Energieüberschüsse im Netz signifikant zu reduzieren. Weiterhin wurde in einem Netz einer Mittelgebirgsregion durch Umrüstung von Druckminderungsventilen zu Kleinturbinen ein Einsparpotenzial von ca. 300 MWh/a identifiziert.

In der Trinkwasseraufbereitung wurden auf der direkten Verbrauchsebene folgende Einsparmöglichkeiten identifiziert: Vermeidung unnötiger Förderhöhen, Optimierung der Chemikalieneinmischung, dimmbare UV-Lampen, Pumpenoptimierung und Klimatisierung.

Die Analyse der Energiepotenziale im Kontext des Gesamtsystems ergab, dass die einzelnen Optimierungsansätze keine kritischen Betriebszustände in den anderen Teilsystemen bewirken. Die verschiedenen Maßnahmen sind gut miteinander zu kombinieren, sofern die Durchflussmengen den Abnahme- und Speicherkapazitäten im Versorgungssystem entsprechen.

Die rechtliche Zulässigkeit der entwickelten Maßnahmen ist stark einzelfallabhängig, dürfte aber in der Regel gegeben sein oder kann durch Änderungen von wasserrechtlichen Genehmigungen oder Verträgen hergestellt werden. Das Energierecht stellt kein Hindernis dar. Dagegen sind die wirtschaftlichen Anreize zur energetischen Optimierung des Wasserversorgungssystems aus den derzeitigen energierechtlichen Förderinstrumentarien sehr beschränkt. Eine über eine reine Verbrauchsreduzierung hinausgehende Flexibilisierung von Stromverbrauch und -erzeugung sowie eine zusätzliche Erzeugung erscheinen angesichts nennenswerter Investitionen wirtschaftlich nur bedingt attraktiv.

Fazit

In allen Bereichen der Wasserversorgungskette konnten energetische Potenziale identifiziert werden, ohne negative Auswirkungen auf die Ökologie, die Rohwasserqualität der Talsperren und die Trinkwasserqualität befürchten zu müssen. Eine bessere Ausnutzung des steigenden Anteils volatiler regenerativer Energie ist durch eine flexiblere Fahrweise der Anlagen möglich, aktuell aber kaum wirtschaftlich. Bei einem Anstieg der Energiepreise und/oder einer stärkeren Schwankung zwischen Minimal- und Maximaltarifen werden viele Lösungsansätze aus ENERWA ökonomisch attraktiv.

Alle Ergebnisse sind in einem ENERWA-Leitfaden zusammengefasst und gemeinsam mit praxisnahen Web-Diensten zur Energieanalyse und –optimierung sowie Informationen zu den entwickelten Optimierungstools unter www.enerwa.org für Anwender aus der Wasserversorgung sehr gut nutzbar.

Kontakt:

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut
für Wasserforschung gemeinnützige GmbH
Moritzstr. 26
45476 Mülheim an der Ruhr
Dr. Wolf Merkel
Tel.: +49 208 40303-100
w.merkel@iww-online.de

Laufzeit: 04/2014 – 09/2017
www.enerwa.org

EnWasser

Erschließung eines Lastmanagementpotenzials in der Wasserversorgung zur Integration erneuerbarer Energien

Abb. 1: Wasseraufbereitungsanlage auf dem Sipplinger Berg am Bodensee

Hintergrund

Der steigende Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien (EE) an der Stromerzeugung beeinflusst bereits heute den Netzbetrieb. Während in der Vergangenheit die Erzeugung entsprechend dem Bedarf erfolgte, kann das Lastmanagement, also die Anpassung des Stromverbrauchs an die -erzeugung, einen wichtigen Beitrag zur Integration der EE in das Energiesystem leisten. Neben industriellen Großverbrauchern können dabei auch Betreiber von Anlagen mittlerer Verbrauchsleistung von Preisschwankungen am zentraleuropäischen Spotmarkt für Energie (EPEX-Spotmarkt) profitieren und Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung realisieren. Dazu zählen u.a. Wasserversorger, welche für den Betrieb Ihrer Anlagen zur Förderung und Aufbereitung von Trinkwasser, Strom benötigen.

Am Beispiel des Zweckverbands Bodensee-Wasserversorgung (BWV) wurden Maßnahmen zur Flexibilisierung von Anlagen zur Wasserförderung und -aufbereitung untersucht und bewertet. Die BWV versorgt ungefähr 4 Mio. Menschen in Baden-Württemberg mit jährlich etwa 125 Mio. m^3 Trinkwasser und ist damit der größte Wasserversorger im Bundesgebiet. Das Rohwasser wird dem Bodensee entnommen und zunächst auf den naheliegenden Sipplinger Berg gepumpt. Dafür stehen sechs Pumpen mit einer maximalen Gesamtleistung von 35 MW zur Verfügung. Auf dem Sipplinger Berg durchläuft das Wasser mehrere Aufbereitungsstufen mit einem Zwischenspeicher und einem Reinwasserspeicher. 2014 betrugen die Strombeschaffungskosten 15,5 Mio. €. Im Projekt wurden neben dem Betrieb der bestehenden Anlage und dem existierenden Speicher im Wasserverteilnetz Optionen zur Erweiterung der Speicherkapazitäten vor Ort (Neubau eines Rohwasserspeichers, Vergrößerung der Zwischenspeicher) analysiert. Beim flexiblen Betrieb der Anlage ist sowohl die Versorgungssicherheit als auch die Einhaltung technischer, hydraulischer und betrieblicher Randbedingungen jederzeit sicherzustellen.

Ergebnisse

Bei der untersuchten Anlage zur Trinkwasserförderung und -aufbereitung konnte ein bisher ungenutztes Potenzial für Lastverschiebung festgestellt und bereits teilweise erschlossen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass andere Anlagen zur Wasserversorgung in Deutschland ebenfalls ungenutzte Potenziale besitzen. Die Schaffung bzw. Erweiterung von Wasserspeicherkapazitäten ermöglicht eine Erhöhung der Flexibilität der Anlagen. Dabei hat die Lage des Speichers eine deutlich stärkere Wirkung auf den Zugewinn an Flexibilität als seine Größe, weshalb insbesondere derart positionierte Speicherkapazitäten zu empfehlen sind, welche eine Entkopplung von Förderung und Aufbereitung bewirken. Im Falle der untersuchten Anlage der BWV etwa wäre dies ein der Aufbereitung vorgelagerter Rohwasserspeicher, welcher keines großen Volumens bedarf.

Die Kosteneinsparungen, welche sich durch Strombeschaffung am EPEX-Spotmarkt erzielen lassen, sind allerdings bei weitem nicht ausreichend, um Investitionen in Speicherkapazitäten anzureizen. Der Gewinn an Flexibilität durch zusätzliche Speicherkapazität kann nur einen Deckungsbeitrag zu den Investitionskosten liefern. Dies liegt neben den hohen Kosten für den Speicherzubau auch an der Tatsache, dass die Spotmarktkosten nur knapp 30 % der gesamten

Kosten der Strombeschaffungskosten ausmachen. 60 % der Kosten entfallen auf die EEG-Umlage, 6% auf Steuern und 5 % auf Netznutzungsentgelte. Nichtsdestotrotz lohnt sich eine genaue Untersuchung der Anlage, da sich hierbei ungenutzte Flexibilitätspotenziale an anderer Stelle identifizieren lassen. Im Falle der BWV führt bereits eine Änderung der Fahrweise der existierenden Anlage zu deutlichen Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung am Spotmarkt. Eine genaue Bestimmung und Erschließung der verfügbaren flexibel zu bewirtschaftenden Kapazitäten im Trinkwasserverteilnetz bietet weiteres Potenzial für Kosteneinsparungen. Im Vergleich zu einem Speicherneubau sind hier deutlich geringere Kosten für die Umstellung der Betriebsweise der Anlagen (für z.B. IT/ Software und Schulung des Personals) zu erwarten.

Auch bei den Netznutzungsentgelten lassen sich signifikante Kosteneinsparungen erzielen. Durch atypische Netznutzung, d.h. die Begrenzung der maximalen Verbrauchsleistung einer Anlage während sogenannter Hochlastzeiten, können höhere Kostensenkungen erreicht werden als am Spotmarkt durch zusätzliche Speicherkapazitäten eingespart werden kann. Auch hier wurden im Falle der BWV die Potenziale der bestehenden Anlage bisher nicht ausgenutzt. Eine Entkopplung der leistungsstarken Rohwasserpumpen von der Aufbereitung durch einen zusätzlichen Rohwasserspeicher ermöglicht eine weitere Leistungs- und damit Kostenreduktion bezüglich der Netznutzungsentgelte. Die verschiedenen Optionen und damit verbundenen Kosteneinsparungen sind in Abbildung 2 dargestellt. Durch die beschriebenen Maßnahmen lassen sich auf der Basis historischer Daten zu Spotmarktpreisen, Netznutzungsentgelten und dem Trinkwasserbedarf aus dem Jahr 2014 insgesamt 7 % der jährlichen Strombeschaffungskosten einsparen.

Eine Analyse aller Schritte der Wasseraufbereitung hat aber auch Anlagenkomponenten identifiziert, welche eine volle Ausnutzung bestehender sowie potenzieller zusätzlicher Speicherkapazitäten verhindern, wie z.B. Durchflussbeschränkungen der Filter. Eine Investition zur Beseitigung solcher Einschränkungen kann günstiger und wirkungsvoller ausfallen als ein Zubau an Speicherkapazität. Auch diese Erkenntnisse können qualitativ als deutschlandweit übertragbar angesehen werden. Eine quantitative Bewertung der möglichen Flexibilisierung von Anlagen und damit einhergehenden potenziellen Kosteneinsparungen muss im Einzelfall erfolgen.

Fazit

Erste Maßnahmen in Form einer Flexibilisierung der bestehenden Anlage und der Erschließung bereits vorhandener Speicherkapazitäten, im Fall der BWV der flexible Betrieb des Netzspeichers, können bereits zu maßgeblichen Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung führen. Dabei sind, im Gegensatz zu einem Speicherneubau, nur geringe

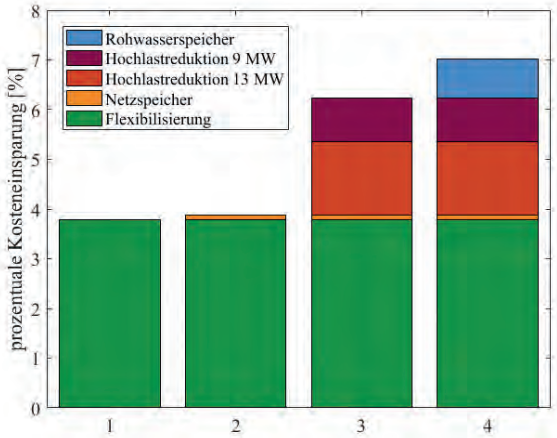


Abb. 2: Aggregierte maßnahmenabhängig zu erzielende jährliche Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung

Kosten, z.B. für IT oder Schulungen des Personals, zu erwarten. Eine Senkung der maximalen Last während der Hochlastzeiten bietet weiteres Potenzial für Kosteneinsparungen. Eine Senkung von 19 auf 17 MW wurde schon während der Projektlaufzeit durch die BWV realisiert. Eine sehr starke Minimierung der maximalen Leistung in der Hochlastzeit kann aber in der Realität in naher Zukunft nicht ohne weiteres umgesetzt werden. Ein nächster Schritt wäre die Strombeschaffung am Spotmarkt sowie eine Implementierung von Software zur Einsatzoptimierung vor Ort, um eine kostenoptimale Fahrweise der Anlage zu ermöglichen. Um dies erfolgreich zu implementieren, müssten zunächst die damit einhergehenden Herausforderungen für das Personal, die Arbeits- und die betrieblichen Abläufe untersucht und eine geeignete Strategie entwickelt werden. Die durch zusätzliche Speicherkapazitäten am Spotmarkt zu erzielenden Kosteneinsparungen hingegen reichen nicht aus, um den Bau neuer Speicher zu finanzieren. Ohne gleichzeitige starke Senkung der maximalen Last in der Hochlastzeit lassen sich nur sehr geringe Deckungsbeiträge unter 10 % realisieren. Dies könnte sich in Zukunft ändern in Abhängigkeit davon, in welcher Form die regulatorischen Rahmenbedingungen sowie die Marktinstrumente in den kommenden Jahren an das sich ändernde Energiesystem angepasst werden.

Kontakt:

Fraunhofer-Institut für Windenergie
und Energiesystemtechnik
Königstor 59
34119 Kassel
Patrick Hochloff
Tel.: +49 561 7294-214
patrick.hochloff@iwes.fraunhofer.de

Laufzeit: 05/2014 – 04/2017
www.enwasser.net

EWave

Energiemanagementsystem Wasserversorgung

Hintergrund

Der Betrieb von Wasserversorgungsanlagen ist komplex. Es ist sicherzustellen, dass das Wasser die Verbraucher stets in ausreichender Menge, Qualität und mit genügend Druck erreicht. Neben der Versorgungssicherheit fordern die Verbraucher angemessene Wasserpreise. Der effiziente Einsatz von Energie hat immer mehr Bedeutung.

Mit dem im Rahmen des Projektes Energiemanagementsystem Wasserversorgung (EWave) entwickelten Assistenzsystem werden Wasserversorger bei dieser Aufgabe unterstützt. Mathematische Optimierungsverfahren berechnen eine kostenoptimale Betriebsweise. Heute wird diese Aufgabe fast ausschließlich von erfahrenem Betriebspersonal wahrgenommen und erfordert eine sehr gute Anlagenkenntnis.

Ergebnisse

Anforderungsanalyse/Workshops
Als Grundlage für die Erstellung eines simulationsbasierten Assistenzsystems dient ein allgemeingültiger Anforderungskatalog der Wasserversorgung. Aus diesem Grund wurden mehrere Workshops mit Wasserversorgungsunternehmen durchgeführt. Durch die Zusammenarbeit konnten Erfahrungen bzgl. Energiemanagementsystemen ausgetauscht sowie Erweiterungen des Anforderungskataloges vorgenommen werden.

Wirkungsgrade
Durch die im Projekt EWave entwickelten Kennzahlen werden die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes bewertet. Anhand von Wirkungsgraden wird der Vergleich von unterschiedlichen Anlagen und Wasserwerken ermöglicht. Zusätzlich zu elektrischen Wirkungsgraden wurde zur Bewertung von Wasser durchströmten Anlagenteilen ein hydraulischer Wirkungsgrad berechnet. Durch den Anlagenwirkungsgrad ist eine Gesamtbewertung der Anlage möglich.

Trinkwasserprognose
Wichtige Randbedingungen für einen optimierten Betrieb sind Kenntnisse über aktuelle und zukünftige Trinkwasser- und Energiebedarfe. Dabei hängen die Energiebedarfe von den hydraulischen Zuständen im Wasserwerk und im gesamten Verteilnetz der betrachteten Druckzone ab. Daher wurden ein Trinkwasserprognosemodell sowie ein voll dynamisches, hydraulisches Simulationsmodell entwickelt.

Das hydraulische Simulationsmodell basiert auf einem Netzwerkansatz, bei dem die Netzelemente wie Rohre, Speicher, Ventile, Pumpen etc. durch mathematische Gleichungen beschrieben und über einen Netzgraphen miteinander gekoppelt werden. Das entstehende nichtlineare, differential-algebraische Gleichungssystem, wird automatisch generiert und mit geeigneten Methoden numerisch gelöst. Zur Berücksichtigung des gesamten Trinkwassernetzwerkes im dynamischen Simulationsmodell ist eine Netzabstraktion notwendig. Diese erfolgt durch regionale Zusammenfassung von Teilnetzen zu übergeordneten Rohr- und Speicherelementen, wodurch die großräumige Netzstruktur erhalten bleibt.

Optimierung
Zur Entscheidungs- und Betriebsunterstützung nutzt EWave das neu entwickelte, integrierte Optimierungsmodul EWave-OPT. Als Ergebnis erhält der Nutzer Anlagenfahrpläne im 15-Minuten Zeitraster. Hierzu werden mathematische Optimierungsverfahren benutzt, welche diskret-lineare und kontinuierlich-nichtlineare Methoden kombinieren. Zunächst wird ein gemischtganzzahliges Optimierungsmodell gelöst, um daraus alle diskreten Entscheidungen (vornehmlich Pumpenschaltpläne) abzuleiten. EWave-OPT nutzt die Ergebnisse für die diskreten Optimierungsgrößen und optimiert im Nachgang die kontinuierlichen Größen wie Pumpendrehzahl, Ventilöffnungsgrade, oder Wassermengen. Ein energieoptimaler Betrieb benötigt eine komponentenübergreifende, globale Betrachtung des Gesamtsystems.

Die in EWave eingesetzten mathematischen Optimierungsverfahren sind nicht auf bereits bekannte Pumpen- und Anlagenfahrpläne angewiesen. Vielmehr zeigt sich, dass auf diese Weise andere Pumpenfahrpläne und darüberhinausgehende Steuergrößen vorgeschlagen werden können, die zu einem energieeffizienteren Gesamtbetrieb führen. Offline-Optimierungsergebnisse ergeben ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 10 % für das Wasserwerk des Pilotgebietes (Abb. 1).

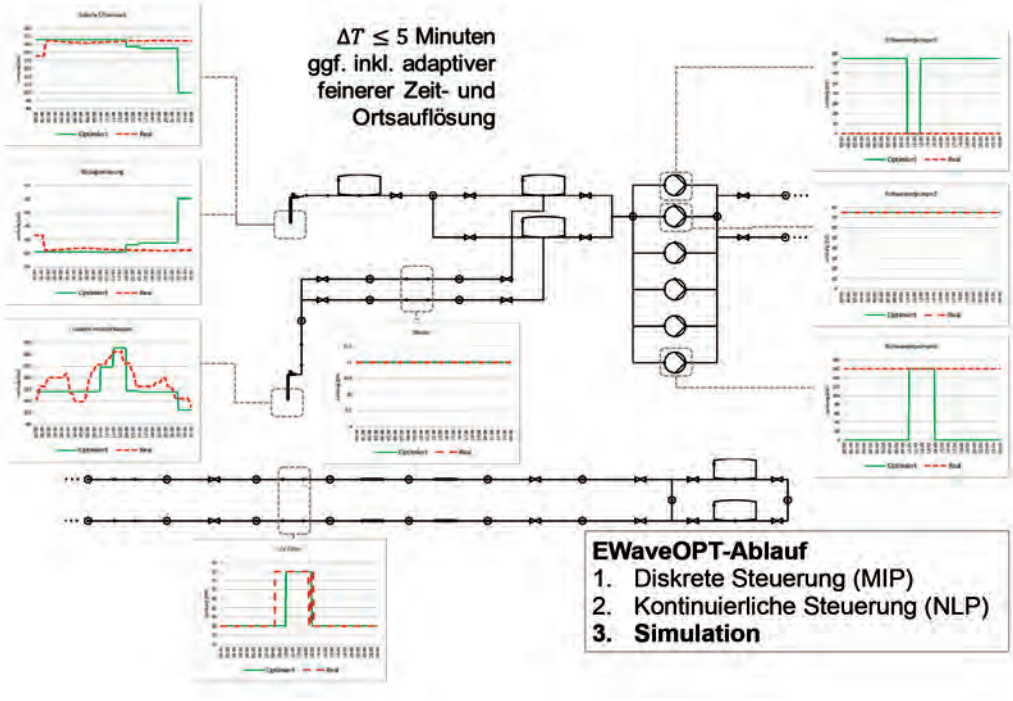


Abb. 1: Szenario-Rechnung mit EWave

Systemarchitektur

Das Energiemanagementsystem EWave verfügt über einen modularen Aufbau. Dabei wurde auf die bestehenden Module des SmartWater-Systems SIWA von Siemens aufgesetzt. Im ersten Schritt werden zunächst Mess- und Betriebsdaten eingelesen und vorverarbeitet. Dann wird ein Simulationslauf zur Schätzung des aktuellen Anlagenzustandes angestoßen und eine Prognoserechnung zum Wasserbedarf durchgeführt. Auf dieser Basis werden die Schaltzeitpunkte der Pumpen über den Vorausschauzeitraum von 24 Stunden optimiert. In dieser Berechnung werden auch Ausfälle und Betriebsvorgaben, die die Möglichkeiten der Optimierung des Anlagenbetriebes im Wasserwerk einschränken, berücksichtigt. Die Ergebnisse werden abschließend über eine detaillierte Simulation validiert. Dieser Ablauf wird zyklisch alle 15 Minuten wiederholt.

Die Ergebnisse der Optimierungsrechnung, wie z.B. die empfohlenen Pumpenschaltungen, Energiekosten u.ä., werden den Benutzern auf einer graphischen Benutzeroberfläche angezeigt. Insbesondere wird dem Bediener eine sich ständig aktualisierende Liste der anstehenden Schaltempfehlungen angezeigt.

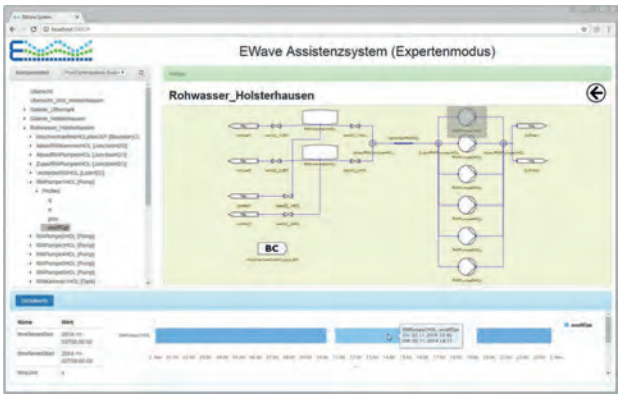


Abb. 2: Webbasierte Benutzeroberfläche EWave

Fazit

Wasserversorgungsunternehmen steuern ihre Versorgungssysteme heutzutage über Automatiken sowie über zentrale Leitwarten. Das EWave-Assistenzsystem ermittelt Schalthandlungen durch Hinzunahme weitergehender Informationen. Ziel ist der energieeffiziente bzw. kosteneffiziente Betrieb, bei unverändert hoher Versorgungssicherheit. Das System verfügt über eine graphische Benutzeroberfläche, welche u.a. die Fahrpläne und Energiekosten visualisiert. Die Grundlage für das im EWave-Assistenzsystem hinterlegte Modell des Wasserversorgungssystems ist eine entsprechende Anlagendokumentation sowie ein Energie- und Betriebsdatenmanagement. Die Optimierung lieferte für das betrachtete Versorgungssystem auf Basis historischer Daten ein Energieeinsparpotenzial von ca. 10 %.

Kontakt:

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg (FAU)
Cauerstraße 11
91058 Erlangen
Prof. Dr. Alexander Martin
Tel.: +49 9131 85-671 63
alexander.martin@fau.de

Laufzeit: 04/2014 – 06/2017
www.edom.fau.de/ewave

EWID

Energiegewinnung im Wasserverteilungsnetz durch intelligentes Druckmanagement

Hintergrund

Um den Druck im Wassernetz zu begrenzen und die Wasserleitungen nicht übermäßig zu beanspruchen, werden in Wasserversorgungssystemen Druckminderventile (DMV) eingesetzt. Bei der klassischen Druckregelung mittels DMV wird Energie in Schall und Wärme umgewandelt, welche im Wasserverteilungsnetz nicht weiter verwendet werden können. Das Forschungsprojekt „Energiegewinnung im Wasserverteilungsnetz durch intelligentes Druckmanagement (EWID)“ zeigt Wege auf, um diese Energiedissipation zu verringern. Dazu wurde ein neuartiges System aus einer rückwärts laufenden Pumpe als Turbine (PaT) in Verbindung mit einem intelligenten Druckmanagement (iDm) entwickelt. Ziel ist es, einerseits die maximal möglich abbaubare Energie des Wassers bedarfsorientiert in elektrische Energie umzuwandeln und andererseits durch Reduktion des Versorgungsdrucks in Rohrleitungen einen Beitrag zur Verringerung der Wasserverluste und des Materialstresses im Wasserverteilungsnetz zu leisten.

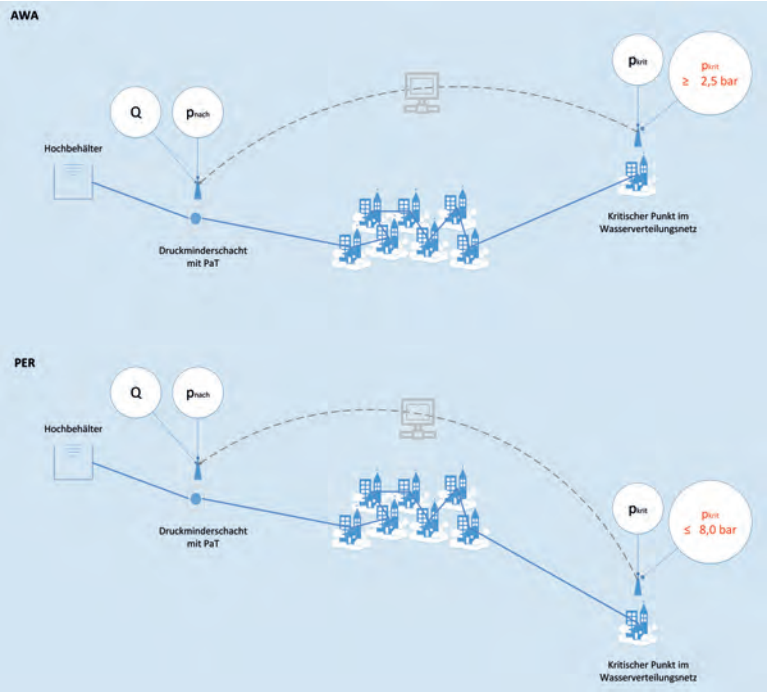


Abb. 1: Randbedingungen und Systementwicklung PER und AWA; PaT + iDm (UniBwM)

Ergebnisse

Im Rahmen des Verbundprojektes EWID wurden die Einsatzmöglichkeiten von PaTs in unterschiedlichen Wasserverteilungsnetzen (Wasserversorgungszweckverband Perlenbach (PER) und AWA-Ammersee Wasser-und Abwasserbetriebe gKU (AWA)) untersucht. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Energieverwertungssysteme entwickelt: der Netzparallel- für PER und der Inselnetzbetrieb für AWA. Hierdurch können neben der Verringerung der Wasserverluste und des Materialstresses auch unterschiedliche weitere Zielsetzungen hinsichtlich der (rück-)gewonnenen Energie verfolgt werden: beim Netzparallelbetrieb steht eine Verbesserung der Gesamtenergiebilanz im Vordergrund während beim Inselnetzbetrieb durch autarke Energieversorgung von Messsonden (z.B. Druckmesssonden, Durchflussmesser) zusätzliche Daten über das Wasserverteilungsnetz generiert werden können. Da die im Druckminderschacht installierte PaT durch eine Druckmesssonde am kritischen Punkt (intelligentes Druckmanagement (iDm)) geregelt wird, muss u.a. auch die ortsspezifische Topographie einbezogen werden. Kritische Punkte, welche durch hydraulische Berechnungen zu identifizieren sind, sind in diesem Zusammenhang die Stellen im anschließenden Verteilungsnetz, an welchen der durch technische Regelwerke empfohlene Druck (Gewährleistung Versorgungskomfort) am ehesten unter- bzw. überschritten wird (Abb. 1).

Zur Technikumserprobung der entwickelten neuartigen PaT-Systeme wurde an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) ein simuliertes Versorgungsnetz (Durchfluss Q, Druck p) in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern KSB AG (KSB) und Schraml GmbH (SCH) installiert und in Betrieb genommen. Innerhalb dieses Netzes erfolgte eine Aufteilung in drei Stränge: ein Strang zur Simulation des Ist-Zustandes (Hauptstrang mit DMV) sowie zwei unabhängig voneinander (mittels Magnetventil (MV)) zu öffnende Bypässe (Nebenstränge mit PaTs, Netzparallel- bzw. Inselnetzbetrieb).

Zunächst wurde das Netzparallelbetrieb-System für PER geprüft und analysiert. In der Technikumserprobung konnten u.a. vier Szenarien erfolgreich getestet werden:

- konstanter Nachdruck (Übernahme der Arbeit vom DMV)
- dynamischer Nachdruck
- dynamischer Nachdruck über kritischen Punkt durch eine Annäherungsfunktion, welche die Gegebenheiten hin zum kritischen Punkt simuliert
- Brandlastfall und automatische Außerbetriebnahme der PaT

Im Anschluss daran wurde das technisch aufwändigere System zum Inselnetzbetrieb für AWA im Technikum entwickelt und getestet.

Nach erfolgreicher Technikumserprobung konnte die Verifizierung im Netz, d.h. das Testen der beiden entwickelten Systeme unter realen Rahmenbedingungen, stattfinden. Aufgrund der früher vorliegenden Ergebnisse bzgl. des Netzparallelbetriebs wurde zuerst das System bei PER mit einer neu ausgelegten PaT installiert, in Betrieb genommen, getestet und anschließend optimiert (Abb. 2).

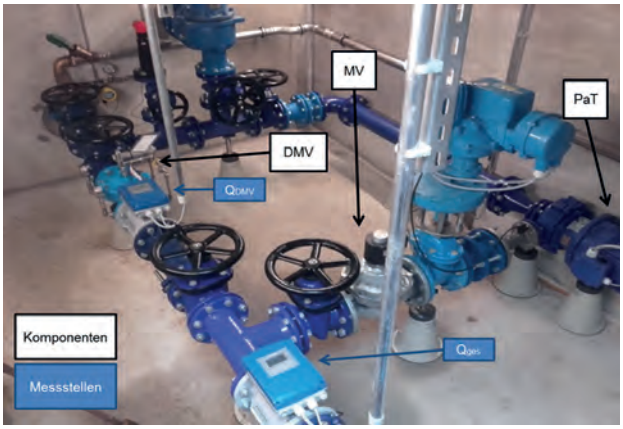


Abb. 2: Verifizierung im Netz: PER
(Originalbild: PER, Beschriftung: UniBwM)

Die PaT (im Feldversuch: Wandmontage, um 90° gedreht ➛ Vermeidung von Hochpunkten) ergänzt ein DMV und soll im Bereich von 6–10 l/s einen Druck von ca. 7 bar abbauen. Testläufe mit konstantem Nachdruck-Sollwert verliefen ohne nennenswerte Druckschwankungen und die PaT speiste bis zu 3,5 kW ins örtliche Stromnetz ein. Weitere Tests mit dynamischem Nachdruck verliefen ebenfalls erfolgreich. Alle Sollwerteinstellungen können im Leitsystem vorgenommen werden. Die Anlage läuft störungsfrei im Netzparallelbetrieb. Als weitere wichtige Größe wurde ein kritischer Punkt im Netz bestimmt, an dem der aktuell anliegende Druck gemessen und übertragen wird und mittels iDm (zulässiger Maximaldruck: 8 bar) in die Regelung mit einfließen soll. Dieses iDm wurde bei der Dr. Krätzig Ingenieursgesellschaft mbH (KI) entwickelt und getestet. Es wird nach erfolgreich durchgeführter Technikumserprobung an der UniBwM bei PER im Zuge der Verifizierung im Wassernetz eingesetzt.

Das System für den Inselnetzbetrieb wird etwas zeitversetzt bei AWA getestet, da derzeit noch weitere Technikumsversuche durchgeführt werden müssen. Die Zeitverzögerung resultiert aus der komplexeren Schaltung der einzelnen elektrotechnischen Komponenten und der Notwendigkeit eines Realstandortwechsels. Die Rahmenbedingungen des erstangedachten Standortes ließen es nicht zu, einen ausreichend großen Durchfluss über die PaT zu leiten und somit genügend Energie für den Selbsterhalt des Systems und die Versorgung weiterer Messsonden zu erzeugen. Diese Voraussetzungen erfüllt der neue Standort. Allerdings befindet sich dieser nicht innerhalb des Wasserverteilungsnetzes, sodass kein kritischer Punkt und keine Einflüsse auf den Rohrleitungsdruck durch das Verbraucherverhalten vorhanden sind. Deshalb wird bei AWA keine intelligente Steuerung der PaT über einen kritischen Punkt im anschließenden Netz installiert werden. Der Nachdruck wird konstant auf einem niedrigen, neu ermittelten Wert gehalten werden, d.h. die PaT wird gemeinsam mit dem ebenfalls eingebauten DMV die konstante Druckregulierung übernehmen.

Fazit

Die im Verbundprojekt EWID entwickelten Systeme (Netzparallel- und Inselnetzbetrieb) zur Energie(rück-)gewinnung mittels PaT sind unter entsprechenden Rahmenbedingungen technisch realisierbar und wirtschaftlich zu betreiben. Der Netzparallelbetrieb stellt im Vergleich zum Inselnetzbetrieb mit einem standardmäßigen Asynchronmotor geringere Anforderungen an die Auswahl und Auslegung der erforderlichen Leistungselektronik. Die kritischen Punkte, über welche die PaT geregelt wird, sind durch hydraulische Berechnungen zu identifizieren. Durch die Installation und den Betrieb dieser Systeme können sowohl die Betriebs- als auch die Versorgungssicherheit verbessert werden. Die PaT ist dabei wegen der Sicherstellung der Druckreduktion im Wassernetz immer parallel zum DMV im Bypass anzuordnen.

Kontakt:

Universität der Bundeswehr München,
Institut für Wasserwesen, Professur für
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg
Prof. Dr. F. Wolfgang Günthert
Tel.: +49 89 6004-2156
wolfgang.guenthert@unibw.de

Laufzeit: 04/2014 – 06/2017
www.unibw.de/ewid

H_2Opt

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

Hintergrund

Die öffentlichen Wasserversorger haben die essentielle Aufgabe eine konstante flächendeckende Trinkwasserversorgung bei gleichbleibender Wasserqualität sicherzustellen. Dabei soll die Wasserentnahme aus dem Gewinnungsgebiet möglichst gleichmäßig erfolgen und der Betrieb möglichst kosten- und energieeffizient sein. Jede Versorgungsanlage hat ihre Eigenheiten und wird in den meisten Fällen nach Erfahrungswerten betrieben. Um die Versorgungssicherheit nicht zu gefährden, werden alternative Betriebsweisen oft nicht in Erwägung gezogen. Mit Hilfe der im Rahmen des Verbundprojektes H_2Opt entwickelten Software können Betreiber einer Trinkwasserversorgungsanlage unterschiedliche Betriebsweisen bezüglich Energieeffizienz miteinander vergleichen, und gleichmäßigem Pumpenbetrieb optimieren und nach eigenen Kriterien quantifizieren.

Ergebnisse

Im Rahmen des Verbundprojektes H_2Opt wurde ein Softwareprototyp geschaffen mit dessen Hilfe der Betrieb verschiedener Versorgungsanlagen analysiert und bezüglich Energieeffizienz und gleichmäßigem Betrieb der Anlage optimiert werden kann. Die Modellierung der Anlage erfolgt durch eine interaktive Drag & Drop Benutzeroberfläche. Die verwendeten Komponenten wie zum Beispiel Pumpen und Hochbehälter müssen über Kennliniensätze (Pumpen) oder geometrische Maße (Hochbehälter) spezifiziert werden. Zur Berechnung verschiedener Pumpenfahrpläne mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren benötigt die Software ein prognostiziertes Verbrauchsprofil für einen bestimmten Zeitraum, zum Beispiel einen Tag, und das Anlagenkennfeld der Versorgungsanlage. Im Rahmen des Verbundprojektes wurde auf die Verwendung von Rohrleitungsrechnern verzichtet. Stattdessen wird das Rohrleitungssystem durch Anlagenkennlinien, basierend auf Messdaten, modelliert. Diese Methode wurde zunächst an der Versorgungsanlage des Projektpartners EWR Netz GmbH in Worms validiert und im Anschluss auf die komplexere Versorgungsanlage der SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG übertragen.

Das Anlagenmodell der EWR Netz GmbH beinhaltet vier Netzpumpen unterschiedlicher Baugröße im Wasserwerk Bürstadt, das mit Hilfe von Messdaten erstellte Anlagenkennfeld des Versorgungsnetzes sowie zwei identische Hochbehälter. Eine in Zusammenarbeit der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführte Modernisierung der vier Netzpumpen hat bereits zu einer Kosteneinsparung von 27 % (siehe Abb. 1) geführt. Bei einer mit der H_2Opt-Software hinsichtlich der minimalen spezifischen Energiekosten optimierten Fahrweise der Netzpumpen liegt das Kosteneinsparpotenzial bei weiteren 5 %. Würde die Anlage unter Bezug von variablen Strompreisen betrieben, könnte insgesamt ein Kosteneinsparpotenzial von 43 % erzielt werden. Die Software wurde im weiteren Projektverlauf von Fachpersonal vor Ort (im Wasserwerk Bürstadt) zur Festlegung der täglichen Pumpenfahrpläne erfolgreich eingesetzt. Die Software wurde dabei einem intensiven Anwendungstest in der Praxis unterzogen.

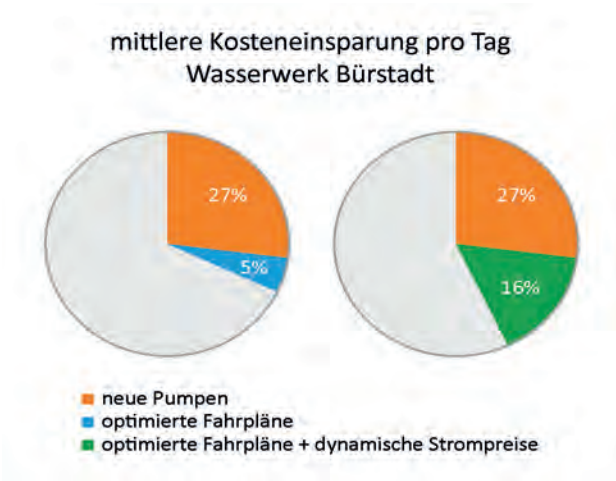


Abb. 1: Kosteneinsparpotenzial

Die in Worms angewandte Methode wurde auf die Anlage der SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG übertragen. Das Anlagenmodell umfasst die vier Rohwassertransportpumpen im Wasserwerk Barbarossastraße, das mit Hilfe von Messdaten erstellte Anlagenkennfeld des Versorgungsgebietes Normalzone sowie zwei Hochbehälter unterschiedlicher Größe. In einem ersten Praxistest konnte vor Ort eine Energieeinsparung von 4% gegenüber der im Prozessleitsystem hinterleg-

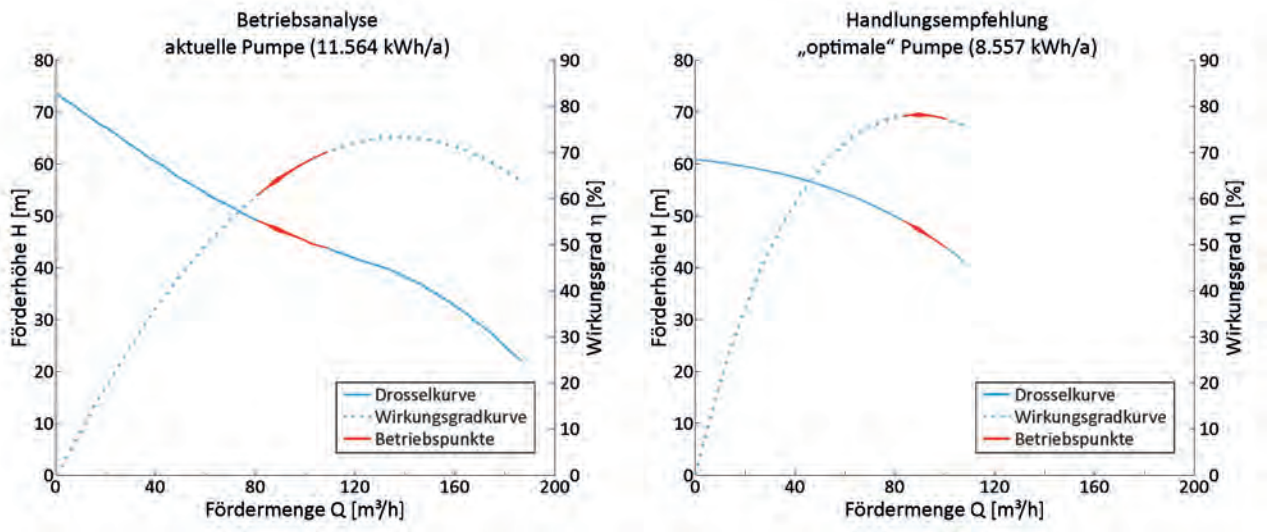


Abb. 2: Vergleich aktuell eingebaute und neu ausgewählte Pumpe

ten Fahrweise erzielt werden. Gleichzeitig wurde das Schaltspiel der Transportpumpen von ursprünglich 33 Schaltungen auf 7 Schaltungen in 24 Stunden reduziert, was zu einer gleichmäßigeren Fahrweise der Transportpumpen führte.

Eine gleichmäßigere Fahrweise wurde im Laufe des Projekts ebenfalls bei den Brunnenpumpen im Gewinnungsgebiet Kaiserslautern Ost der SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG durch Umstellung auf ein neues Betriebskonzept erreicht. Auf Basis einer umfangreichen Betriebsanalyse wurden teilweise Brunnenpumpen ausgetauscht.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen Vergleich zwischen einer aktuell eingebauten Pumpe (links) und einer neu ausgewählten „optimalen" Pumpe (rechts) für den Analysezeitraum von einem Kalenderjahr. Die real eingesetzte Pumpe wurde im Analysezeitraum stets im Teillastbereich eingesetzt und verursachte einen Energieverbrauch von 11.564 kWh/a. Eine auf den Anwendungsfall angepasste Brunnenpumpe würde im Bereich des Betriebsoptimums betrieben und würde einen Energieverbrauch von 8.557 kWh/a verursachen, was einer Energieeinsparung von ca. 26 % entspricht.

Fazit

Die im Rahmen des Verbundprojektes H_2Opt erstellte Software ermöglicht eine Optimierung von Anlagen zur Trinkwasserversorgung unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten. Die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse bzw. gewonnenen Erkenntnisse sind sehr vielversprechend. Die angewendete Berechnungsmethode zur Erstellung des Anlagenkennfeldes bietet insbesondere großes Potenzial bei Trinkwasserversorgungsunternehmen, die über kein kalibriertes Rohrleitungsmodell ihres Versorgungsgebietes verfügen. Durch Einsatz der Software konnten bereits bei beiden Projektpartnern aus der Trinkwasserversorgung erhebliche Energieeinsparungen realisiert werden. Bei ca. 6.000 öffentlichen Wasserversorgern ist alleine in der Bundesrepublik Deutschland ein sehr großes Potenzial für Energieeinsparungen vorhanden.

Kontakt:

Technische Universität Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str. 47
67663 Kaiserslautern
Prof. Dr. Martin Böhle
Tel.: +49 631 205-2769
martin.boehle@mv.uni-kl.de

Laufzeit: 04/2014 – 06/2017
www.mv.uni-kl.de/sam/forschung/h2opt

arrivee

Abwasser**r**einigungsanlagen als **R**egelbaustein in **i**ntelligenten **V**erteilnetzen mit **e**rneuerbarer **E**nergieerzeugung

Hintergrund

Nach aktuellen energiepolitischen Planungen und Deutschlands avisierter Ausbauziele wird der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien weiter steigen und so einen relevanten Anteil der Grundlastversorgung einnehmen. Energie aus Sonne und Wind schwankt entsprechend ihrem natürlichen Aufkommen und kann zeitweise zu Energieüberschüssen führen, welche nicht ins Stromnetz eingespeist werden können. Zum Ausgleich und zur Vermeidung der kurzfristigen Abschaltung dieser Erzeuger ist ein entsprechendes Potenzial an Flexibilität und in Zukunft auch an Speichermöglichkeiten erforderlich.

Im Rahmen des Projektes arrivee steht die Entwicklung einer Systemlösung zur Einbindung der in Deutschland flächendeckend vorhandenen kommunalen Kläranlagen mit Schlammfaulung in ein optimiertes Regelenergie- und Speicherkonzept im Vordergrund. Dazu sollen die bestehenden technischen Voraussetzungen von Kläranlagen mit Faulung, insbesondere die vorhandenen Stromerzeugungsanlagen und die zugehörigen Gasspeicher, gezielt genutzt werden. Darüber hinaus verfügen Kläranlagen über weitere Anlagenteile die bedarfsgerecht zu- und abgeschaltet werden und damit flexibel genutzt werden können. Mit entwickelten Lösungsansätzen sollen damit Dienstleistungen zur Verfügung gestellt werden, die bereits heute relevant sind und in Zukunft benötigt werden, um die Energiewende zu verwirklichen. Es soll gezeigt werden, dass die regionale Wasserwirtschaft in Deutschland mit ihren energetischen Speicher- und Erzeugungsmöglichkeiten die entsprechenden technischen Fähigkeiten und Potenziale besitzt, um einen Beitrag zu den energiepolitischen Zielen zu leisten. Hierfür werden die Einflüsse von außen auf die Prozesse in der Kläranlage analysiert und bewertet. Derzeit wird das produzierte Klärgas weitestgehend zur Eigenstromproduktion direkt auf der Anlage, zur Behandlung des zugeführten Abwassers und des anfallenden Schlammes, genutzt. Zukünftig könnten Kläranlagen eine aktivere Rolle zur Stabilisierung der Stromnetze einnehmen, indem eine angepasste Stromproduktion, über Zwischenspeicherung des Gases und/oder Überführung von Energie in ein Langzeitspeichermedium, z.B. hochreines Methan, erfolgt.

Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes konnte über eine deutschlandweite Bestandsaufnahme aller Faulungsanlagen gezeigt werden, dass Kläranlagen sowohl über das entsprechende Potenzial, als auch über die notwendigen technischen Voraussetzungen verfügen effektiv Flexibilität als Systemdienstleistung bereit zu stellen. Die politischen und die rechtlichen Rahmenbedingungen (Stand Anfang 2017) stehen den untersuchten technischen und betrieblichen Möglichkeiten, die energiewirtschaftliche Flexibilität von Kläranlagen in Energiemärkte der Zukunft (insbesondere Strom) optimiert einzubeziehen, nicht prinzipiell entgegen. Es ist derzeit nicht anzunehmen, dass sich das politische und legislative Umfeld im Laufe der kommenden zehn Jahre derart verändern könnte, dass die Einbindung dezentraler Flexibilitätsoptionen von Kläranlagen in Energiemärkte grundsätzlich unmöglich wäre.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde auf drei Kläranlagen des Wupperverbandes mit Hilfe eines entwickelten Aggregatemanagements die Nutzung vorhandener Großverbraucher als Flexibilitätsbaustein untersucht. Dazu wurden Abschaltversuche unter Trockenwetterbedingungen durchgeführt und ihre Auswirkungen auf die Reinigungsprozesse beobachtet. Dabei wurden Zeitfenster identifiziert, in denen die Abschaltung ohne eine Verschlechterung der Gesamtablaufwerte erfolgen konnte. Kläranlagen können somit bereits mit den vorhandenen Aggregaten Flexibilität bereitstellen. Es erfolgte eine weitergehende Untersuchung der entwickelten Steuerparameter zur Nutzung der Anlagenteile, um eine Beeinträchtigung der Reinigungsleistung zu verhindern. Weitere optionale technische Bausteine wurden durch ein mathematisches Simulationsmodell für die Pilotkläranlage Radevormwald erfolgreich abgebildet. In den Simulationen der biologischen Prozesse und des Energiebedarfs wurden für den Ist-Zustand sowie für den Prognosezustand (Szenario 2035) die Möglichkeiten der Flexibilitätsbereitstellung untersucht und bestätigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Pilotanlage für den Ist-Zustand und im Prognosezustand Flexibilität für verschiedene Märkte bereitstellen kann. Darüber hinaus wurden Schnittstellen für die Kopplung des Kläranlagenmodells mit einem Netzmodell entwickelt. Die Ergebnisse der gekoppelten Simulation

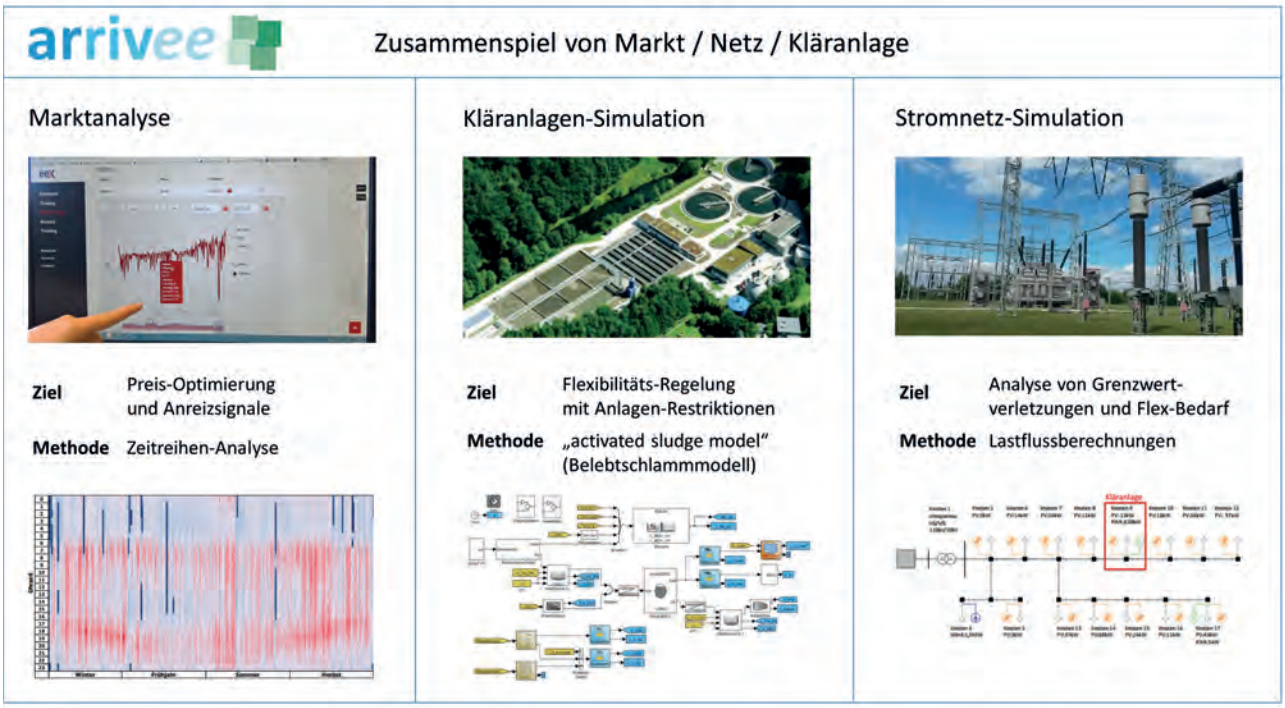


Abb. 1: Zielsetzung und Methodik der einzelnen modelltechnischen Analysen zur Untersuchung des Zusammenspiels von Markt, Netz und Kläranlage (Uni Wuppertal/Stadt Wuppertal)

zeigen, dass die Pilotanlage in Radevormwald lokale Engpässe im vorgelagerten Verteilnetz beheben und somit auch netzdienlich betrieben werden kann. Durch die Einbindung von Kläranlagen in ein zustandsüberwachtes Stromverteilnetz können diese helfen, lokale Einspeiseüberschüsse sinnvoll aufzunehmen, den Anteil abgeregelter Energie aus erneuerbaren Energiequellen zu reduzieren und somit insgesamt einen kostenintensiven konventionellen Netzausbau im Verteilnetz zu ersetzen bzw. zu verzögern oder im Aufwand zu reduzieren.

Als ein zukünftig innovatives Anlagenkonzept hat sich insbesondere die biologische Methanisierung herausgestellt. Der mittels Elektrolyseur und erneuerbarem Überschussstrom hergestellte Wasserstoff dient der Aufbereitung des Faulgases zu Methangas, das ins Gasnetz einspeisefähig wäre. Damit kann die Kläranlage langfristig Energie zwischenspeichern und trägt gleichzeitig zur Stabilisierung der Stromnetze bei. Weitere Synergien ergeben sich aus der Nutzung des Elektroylseproduktes Sauerstoff auf der Kläranlage zur Ergänzung der Belüftung bzw. zur Erzeugung von Ozon. Dieser ganzheitlich sinnvolle Ansatz lässt sich heute in Deutschland allerdings nur bedingt wirtschaftlich darstellen – könnte zukünftig aber durchaus eine Rolle spielen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass Kläranlagen aus technischer Sicht sowohl das nötige Potenzial als auch die nötigen technischen Voraussetzungen haben, aktiv zur Energiewende beizutragen. Die energierechtliche Zulässigkeit und der politische Wille zur Einbindung von dezentralen Akteuren wie Kläranlagen in Strom-, Wärme- und Gasmärkte der Zukunft sind zwar gegeben. Dies ist abwasserpolitisch allerdings keine hinreichende Bedingung dafür, dass das, was technisch und ökologisch sinnvoll ist, auch praktisch umgesetzt wird. Ohne direkte wirtschaftliche Anreize, ohne verstärkte Rechtssicherheit und ohne explizite politische Willensbekundungen wird der Kläranlagenbetreiber in Zukunft in der ihm zudem bislang unbekannten und sich dynamisch ändernden Welt der Energiewirtschaft den großen Schritt im Regelfall wohl nicht wagen. Individuelle Einzellösungen lassen sich dennoch unter guten Randbedingungen sinnvoll umsetzen. Die aufgezeigten Potenziale und Erkenntnisse eignen sich zudem auch, um kläranlagenintern genutzt zu werden, beispielsweise im internen Lastmanagement. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass innovative Anlagenkonzepte auf Kläranlagen nutzbar sind und viele Synergien schaffen können. Zukünftig können Kläranlagen sowohl als Kurz- als auch als Langzeitspeicher dienen und Verteilnetze entlasten, was unter einem volkswirtschaftlichen Gesichtspunkt mehr als sinnvoll erscheint. Die Verbreitung und der Austausch von erlangtem Wissen und Erfahrungen zur Implementierung, dieser weitestgehend neuen Aufgabenstellungen, ist unabdingbar.

Kontakt:

Technische Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Str. 14
67663 Kaiserslautern
Prof. Dr. Theo Schmitt
Tel.: +49 631 205-2946
theo.schmitt@bauing.uni-kl.de

Laufzeit: 04/2014 – 06/2017
www.erwas-arrivee.de

E-Klär

Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende

Hintergrund

Kommunales Abwasser stellt eine potenzielle Energie- und Wertstoffquelle dar. Ziel des Projektes E-Klär war die Entwicklung methodischer, planerischer und technologischer Werkzeuge für eine zukünftige optimale Nutzung dieser Ressourcen. Hierzu wurde eine Methodik zur strategischen Infrastrukturplanung für die Transformation einzelner, realer Kläranlagen zusammen mit Planungswerkzeugen und innovativen Technologien entwickelt.

Ergebnisse

Im Projekt wurde mit dem Stufenkonzept eine Methode zur robusten, kläranlagenspezifischen und zukunftsweisenden Infrastrukturplanung entwickelt (s. Abb. 1). Die Methode dient sowohl der Strategiefindung als auch der Entscheidungsunterstützung für den ersten Investitionsschritt. Im Sinne von Robustheit werden Entscheidungen vor dem Hintergrund unsicherer Rahmenbedingungen betrachtet. Daher würdigen die Bewertungsschritte sowohl die Stabilität von Lösungen als auch deren Flexibilität.

Das Stufenkonzept basiert auf einem rollierenden, zweistufigen Bewertungsansatz, bei dem im ersten Schritt zur Strategiefindung Zielkläranlagen als robuste Orientierungspunkte abgeleitet werden. Hierauf aufbauend werden im zweiten Schritt (kostenminimierende) Transformationspfade – von der gegenwärtigen Ausgangssituation zu den Zielkläranlagen – erarbeitet und Vorschläge für den anstehenden Investitionsschritt abgeleitet. Die Bewertung erfolgt dabei auf Basis von Kennzahlen, die mit den im Projekt entwickelten Planungswerkzeugen (s.u.) szenarienspezifisch berechnet werden. Diese Informationen bilden die Grundlage für den statischen, nutzwertbasierten Vergleich von Zielkläranlagen und der dynamischen Bewertung von Transformationspfaden. Beide Bewertungen erfolgen anhand eines Szenarien übergreifenden Quervergleiches bezüglich Robustheit, wobei die Bewertungstiefe an die Datenverfügbarkeit anpasst wird.

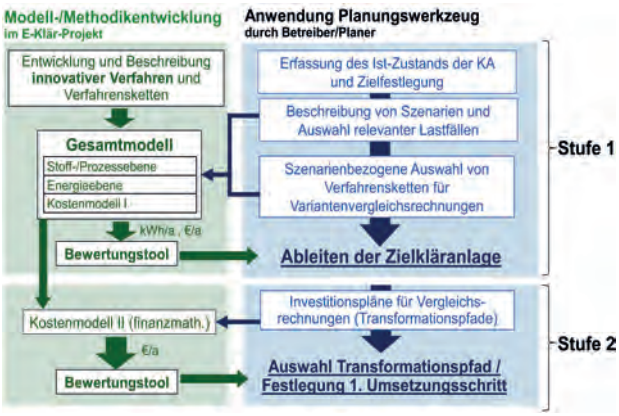


Abb. 1: Überblick über das Stufenkonzept

Zur Unterstützung der strategischen Infrastrukturplanung wurden Planungswerkzeuge konzipiert. Im Gegensatz zum Betriebscontrolling, in dem reale Messwerte mit Soll-Werten verglichen werden, ist bei der Umsetzung einer langfristigen Infrastrukturplanung ein „Blick in die Zukunft" durch entsprechende Prognoseanstrengungen notwendig. Dies schlägt sich sowohl in der Detailtiefe der zu verwendenden Modelle als auch bei der Auswahl der Eingangsgrößen nieder.

Die entwickelten Planungswerkzeuge sind dabei ein um Energie und Kosten erweitertes Stoffflussmodell, mit dem die Durchführung von Prognoserechnungen zur Ermittlung von optimierten Energie- und Kostenkennwerten für jede Verfahrensstufe und aggregiert für die Gesamtanlage weitestgehend möglich ist. Desweiteren wurde für jedes Verfahren eine Modulbeschreibung, die anhand von Versuchsergebnissen (s.u.) und Literaturdaten erstellt wurde, in die Modulbibliothek der Software WEST integriert und erprobt. Diese Modulbeschreibungen werden softwareunabhängig im Schlussbericht veröffentlicht. Zur Abbildung der Investitionspfade erfolgte die Entwicklung des Kostenmodells I (Bestimmung von Jahreskosten unter Berücksichtigung der sich ändernden Auslegungsgrößen der Verfahrensketten mithilfe des Stoffflussmodells) sowie des Kostenmodells II (Bewertung des Transformationspfads unter Berücksichtigung der finanztechnischen Größen im zeitlichen Verlauf über den Prognosezeitraum).

Ergänzend zur Modellerweiterung wurde auf Basis der Analyse des vorhandenen Datenmanagements realer Kläranlagen des Ruhrverbandes ein Prognosedatengenerator entwickelt, der auf Grundlage der historischen Zulaufcharakteristik die in Form von Szenarien dargestellten externen Rahmenbedingungen in bemessungsrelevante, anlagenspezifische Größen durch statistische Auswertungsmethoden übersetzt. Die Entwicklung der Planungswerkzeuge sowie die Erprobung der Berechnungsansätze und statistischen Auswertungsme-

Abb. 2: Rechengutwaschpresse und halbtechnische Anaerobreaktoren mit Thermodruckhydrolyse

thoden erfolgten anhand von drei Beispielanlagen des Ruhrverbandes.

Für eine optimale Nutzung der im Abwasser enthaltenen Energie und Ressourcen in zukünftigen Kläranlagen wurden innovative Verfahren untersucht. Zur Ausschleusung chemisch gebundener Energie kamen Rechengutwäsche, Adsorption in zweistufigen biologischen Verfahren, Chemikalienzugabe sowie Siebung zum Einsatz. Dabei schleuste das großtechnische Feinsieb mehr CSB aus (ca. 50 %) als eine konventionelle Vorklärung (ca. 33 %). Durch Fäll- und Flockungsmittelzugabe in Zulaufproben einer Vorklärung wurden bis zu 60 % des CSB entfernt. Im Hinblick auf eine Wertstoffrückgewinnung wurden die Fasereigenschaften von Feinsiebgutproben analysiert: Aufgrund ihrer Faserlänge ist die Eignung zur Papierherstellung eingeschränkt; weitere Optionen wurden aufgezeigt.

Zur Nutzung chemisch gebundener Energie wurden neben der Faulung von Feinsiebgut Überschussschlämme unterschiedlicher Kläranlagen mittels Thermodruckhydrolyse (TDH) aufgeschlossen und mit Primärschlamm gefault. Dabei stieg die Methanausbeute um ca. 20 %; zugleich trat eine erhöhte Nährstoffrückbelastung sowie eine finanziell bedeutende, verbesserte Entwässerbarkeit (+2 bis +8 % Trockenrückstand) auf. Mit einer energieeffizienten Schneckenpresse konnten vergleichbare Entwässerungsergebnisse zu anderen Aggregaten erreicht werden. Ein Bogensieb zur Filtratreinigung verbesserte den Abscheidegrad, während sich eine Konditionierung mit Biopolymeren als möglich erwies, jedoch 3-4-fach erhöhte Polymermengen erforderte.

Für eine erfolgreiche Integration energieeffizienter Verfahren zur Stickstoffelimination in zukünftigen Kläranlagen wurden Daten großtechnischer Anlagen mit Teilstromdeammonifikation ausgewertet und die biologischen Grundlagen im ASM3 erweitert. Weiterhin wurden Deammonifikations-Schlämme aus großtechnischen Anlagen auf ihre Eigenschaften und Umsatzraten untersucht. Durchgeführte Batch-Tests zur Identifikation von Hemmpotenzialen zeigten, dass Prozesswässer aus der TDH keine Hemmungen hervorriefen. Demgegenüber zeigten sich bei Brüdenkondensaten verschiedener Trocknungsanlagen Hemmungen von bis zu 50 %.

Im Hinblick auf zukünftige Reinigungsanforderungen wurden die Auswirkungen innovativer Verfahren auf eine Spurenstoffelimination und Desinfektion untersucht sowie Bemessungshilfen und Kostenfunktionen erarbeitet. Durch Chemikalienzugabe ergab sich eine zusätzliche Spurenstoffelimination von 0 – 60 % in der Vorklärung. Durch die TDH wurden einige Spurenstoffe weitgehend eliminiert, andere in die Flüssigphase überführt. Die Ergebnisse zur Faulung deuten auf eine partielle Desorption vieler Spurenstoffe hin.

Fazit

Die entwickelten methodischen und planerischen Werkzeuge ermöglichen nun neben der Integration innovativer Technologien in die Verfahrenskonzeption für eine optimale Nutzung der im Abwasser enthaltenen Energie und Ressourcen auch die Identifikation des optimalen Transformationspfades. Die strategische Infrastrukturplanung ist in der Umsetzung als kontinuierlicher Controlling-Prozess angelegt, bei dem der Auswahl- und Bewertungsprozess regelmäßig unter Einbeziehung der Entwicklung der örtlichen Rahmenbedingungen überprüft werden kann.

Kontakt:

Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)
der RWTH Aachen
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Johannes Pinnekamp
Tel.: +49 241 80-25207
pinnekamp@isa.rwth-aachen.de

Laufzeit: 05/2014 – 10/2017
www.e-klaer.de

ESiTI

Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch

Hintergrund

Im Rahmen des Verbundprojekts „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch (ESiTI)“ wurde die Verknüpfung der Energieströme von Kläranlagen mit den Anforderungen aus der Energiewirtschaft untersucht. Hierbei gilt es Energieverbrauch und -erzeugung der Kläranlage im Tagesgang in Bezug auf ihre Speicher- bzw. Flexibilitätsoptionen zu bewerten. Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel des Zentralklärwerks Darmstadt, einer kommunalen Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 240.000 Einwohnerwerten. Ziel war es, Maßnahmen für ein ganzheitliches Energiemanagement zu entwickeln, vor allem im Hinblick auf die Energiewende. Kläranlagen können damit zukünftig als Energiedienstleister einen Beitrag zur Netzstabilität leisten.

Ergebnisse

Im Rahmen von ESiTI wurde u.a. eine Vorgehensweise zur Identifizierung, Nutzung und Optimierung möglicher Flexibilitätsoptionen für Abwasserbehandlungsanlagen entwickelt (vgl. Abb. 1). Aktuell erfolgt die Zusammenführung der Ergebnisse in einem Leitfaden. Den Schwerpunkt bildet dabei die Klärschlammbehandlung als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger. Die Basis der Bewertung von Flexibilitätsoptionen liegt in der Auswertung der Energiedaten im Jahres- bis hin zum Tagesgang. Zudem müssen die Kapazitäten vorhandener Energiespeicher (z.B. Substrat-, Faulgas- und Wärmespeicher) identifiziert werden. Anforderungen der Energiewirtschaft wurden im Rahmen der Projektbearbeitung durch die Entwicklung von Bewirtschaftungsstrategien berücksichtigt. So kann der Kläranlagenbetreiber bspw. durch ein gezieltes Substrat- und Lastmanagement entweder die erforderliche Kapazität des Stromnetzes reduzieren (Ausgleich des Tagesgangs), die Netzstabilität steigern (Regelenergie) oder durch Nutzung dynamischer Strompreise eigene Kosten mindern und zur Residuallastglättung beitragen.

Die untersuchten Strategien können durch verschiedene Maßnahmen aus den Bereichen Speichermanagement, Stromverbrauch und -erzeugung realisiert werden. Neben der Nutzung von vorhandenen Redundanzen in der Verfahrens- und Maschinentechnik wurden dabei auch innovative Möglichkeiten aus den Bereichen „Co-Substrate“, „Thermodruckhydrolyse“ und „Faulung“ (konventionell/Hochlastfaulung) im labor- und halbtechnischen Maßstab untersucht. Die Faulgaserzeugung und -verwertung durch Blockheizkraftwerke (BHKW) sind Schlüsselelemente einer bedarfsorientierten Bereitstellung von Strom und Wärme.

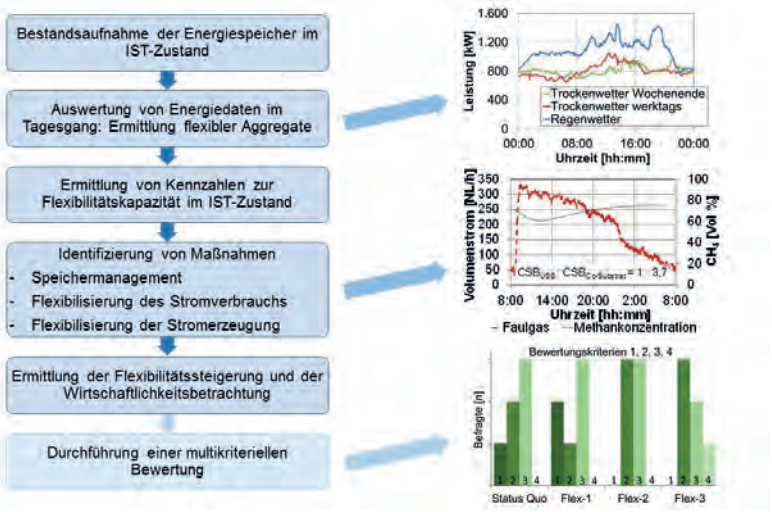


Abb. 1: Schema des Leitfadens zur Erhöhung der Flexibilitätskapazität

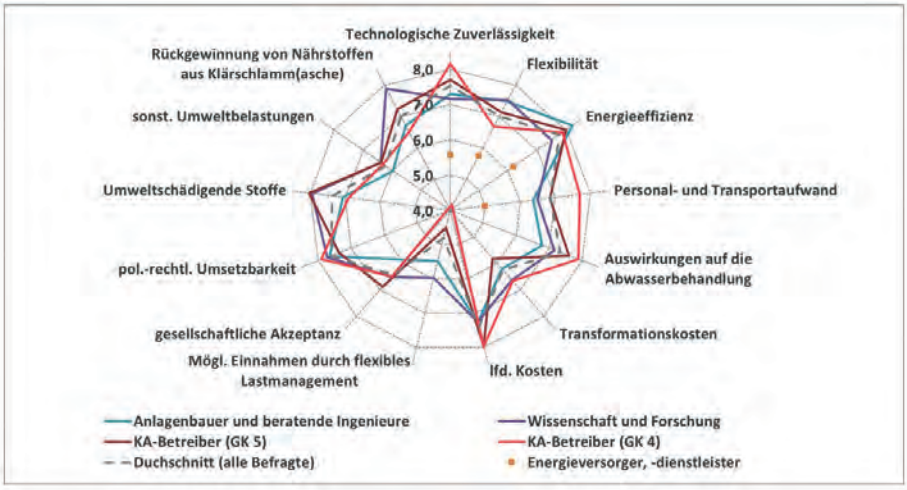


Abb. 2: Gewichtung von Bewertungskriterien durch befragte Kläranlagenbetreiber

Bei einer flexiblen Betriebsweise der faulgaserzeugenden Klärschlammbehandlung in Kombination mit einer flexiblen Verstromung des erzeugten Faulgases durch Blockheizkraftwerke lässt sich der Bedarf an Energiespeichern deutlich reduzieren. Eine flexible Verstromung bedingt jedoch eine ganzheitliche Betrachtung weiterer Energieströme wie bspw. (Ab-) Wärme, was ein intelligentes Wärmemanagement erfordert. Ferner wurden zukünftige Anforderungen z.B. durch Einbindung einer thermischen Klärschlammverwertung berücksichtigt. Neben der Wärmenutzung und Stromerzeugung wurde dementsprechend auch die Entsorgungssicherheit einschl. Phosphorrückgewinnung betrachtet.

Durch einen höheren Eigenversorgungsgrad durch die Nutzung von Co-Substraten verringern sich die Umweltauswirkungen hinsichtlich der Energieversorgung des Kläranlagenbetriebs. Wird jedoch ein alternatives Substratmanagement (bspw. Vergärung in benachbarter Biogasanlage mit Gärrestausbringung) als Vergleichsmaßstab angelegt, zeigen sich je nach betrachteter Umweltwirkung unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit des alternativen Nutzungspfads. Vor dem Hintergrund der Interaktion mit dem gesamten Energiesystem lassen sich durch eine flexible Fahrweise der Blockheizkraftwerke, in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Kraftwerksparks, Einsparungen von CO_2-Emissionen realisieren. Hier zeigt sich die Kapazität der Energiespeicher, bspw. des Gasspeichers, erneut als sensitive Einflussgröße.

Abschließend wurden im Rahmen von ESiTI die verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien für die Kläranlage der Zukunft mit einer multikriteriellen Bewertung anhand ökonomischer, ökologischer, technologischer sowie sozio-politischer Kriterien bewertet (vgl. Abb. 2).

Fazit

Die Anforderungen der Energiewirtschaft an einen flexiblen Energieerzeuger und -verbraucher erfordern auch auf Abwasserbehandlungsanlagen ein flexibles Lastmanagement durch Kombination verschiedener Aggregate. Die bisherige Betrachtung der Effizienzsteigerung einzelner Aggregate infolge energetischer Optimierungen reicht hierbei nicht aus und muss um eine ganzheitliche Betrachtung möglicher Flexibilitäten ergänzt werden. Hierbei gilt es auch, neben den technischen Größen zu Strom- und Wärmeverbrauch im Tagesgang, ökologische Auswirkungen und sozialwissenschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Der im Rahmen von ESiTI erarbeitete Leitfaden führt die Ergebnisse zusammen und zeigt Betreibern Möglichkeiten und Grenzen einer flexiblen Betriebsweise auf.

Kontakt:

Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum
christian.schaum@unibw.de

Laufzeit: 04/2014 – 07/2017
www.esiti.de

KRN-Mephrec

Klärschlammverwertung Region Nürnberg mit metallurgischem Phosphorrecycling

Hintergrund

Die Kläranlagen Deutschlands behandeln ca. 10 Mrd. m^3 Abwasser pro Jahr und erzeugen dabei 7,5 Mrd. m^3 entwässerten Klärschlamm, der heute als Abfall in die Landwirtschaft verbracht oder verbrannt wird. Die Abwasserwirtschaft ist aufwändig (ca. 4.400 GWh/Jahr Stromverbrauch) und kostet rund 6.000 Mio. €/Jahr. Mit neuer Technologie und Veränderungen der Verfahren kann das Abwasser als Rohstoffquelle verwendet und mit der zurückgewonnenen Energie der Eigenbedarf der Klärwerke weitgehend selbst gedeckt werden.

Gemäß neuer Klärschlammverordnung haben Großstädte 12 Jahre Zeit, um ein Verfahren zu installieren, mit dem mindestens 50 % des im Klärschlamm enthaltenen, wertvollen Phosphors zurückgewonnen und damit bis über 40 % des deutschen Phosphorbedarfs gedeckt werden. Unter den praxisrelevanten Verfahren werden thermische Verfahren mit Recyclingraten über 80 % favorisiert, um die im Klärschlamm enthaltene Energie zu nutzen und die Reststoffe unschädlich zu machen.

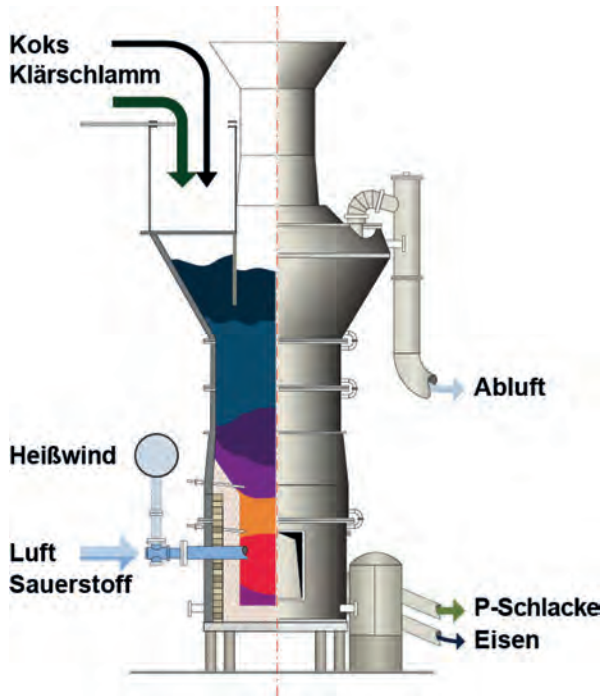


Abb. 1: Kupolofen

Das Potenzial am Klärschlammmarkt beträgt mindestens 1.000.000 t Trockenmasse/Jahr mit einem Finanzbedarf von über 500 Mio. €/Jahr. Bisher gibt es noch kein wirtschaftliches, etabliertes Verfahren, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Es sind deshalb besonders für Großanlagen Verfahrens- und Betriebskonzepte auszuarbeiten, zu erproben und international verfügbar zu machen.

Im Rahmen des Verbundprojekts KRN-Mephrec, Klärschlammverwertung Region Nürnberg mit metallurgischem Phosphorrecycling wurde in Nürnberg zu diesem Zweck ein Verfahren aus der Hüttentechnologie erprobt. Mit Hilfe der sogenannten Schmelzvergasung wird der getrocknete und brikettierte Klärschlamm in einem Schmelzofen bei Temperaturen bis zu 2.000°C geschmolzen und die Wertstoffe des Klärschlamms werden wie bei der Eisenherstellung zurückgewonnen.

Ergebnisse

Auf der Kläranlage Nürnberg wird das Verfahren im Maßstab 1 zu 5 eingehend erprobt. Es wurde eine Produktion mit Klärschlammtrocknung und Brikettierung aufgebaut. Neben Klärschlamm wird auch Monoverbrennungsasche zu stabilen, lagerbeständigen Briketts verarbeitet. Zur Vorbereitung der Einschmelzung wird ein differenziertes Gemisch aus Klärschlammbriketts zusammen mit Gießerei-Koks, Kalkstein und ggf. weiteren Gesteinen hergestellt.

Die exakt verwogenen Chargen werden über eine Schleuse in den Schmelzofen eingebracht und die Chargen auf ca. 3,50 Meter Höhe aufgeschichtet. Je weiter die Charge sich der Schmelzzone nähert, desto mehr wird der Klärschlamm erhitzt. Das dabei entstehende Synthesegas tritt als Gichtgas am Schachtkopf aus und wird bei der Versuchsanlage in einer Kammer verbrannt. Großtechnisch soll das Synthesegas später in einem weiteren Prozess gereinigt und motorisch für die Strom- und Wärmebereitstellung bereit gestellt werden.

In der eigentlichen Schmelzzone beginnen bei ca. 1.600 °C die Gesteine und der Klärschlamm zu schmelzen. Die Temperatur wird durch Verbrennen eines Teils des Gießereikoks und Einblasen von Heißwind sowie technischem Sauerstoff oberhalb der Düseneben erreicht. Der restliche glühende Gießerei-Koks bildet das gasdurchströmte Stützgerüst. Der

Porenraum im Ofenunterteil füllt sich mit flüssiger Schlacke. Am Boden des Reaktors sammelt sich das flüssige und schwerere Eisen zusammen mit allen im Klärschlamm enthaltenen Edel- und Schwermetallen. Über dem Eisenbad sammelt sich die flüssige Schlacke.

Die Schlacke verlässt den Ofen kontinuierlich über ein Austragsloch und wird anschließend im Wasserbad granuliert. In weiteren Schritten wird es in einer Kugelmühle gemahlen und zu streufähigem Dünger granuliert. Die Eisenschmelze wird durch kurzzeitiges Öffnen des Austragslochs auf Bodenhöhe des Reaktors in eine Kokille gefüllt. Das erstarrte Eisen wird der Wiederverwertung in der Stahlindustrie zugeführt.

Der Wirtschaftspartner Baumgarte Boiler Systems GmbH errichtete die Kernkomponenten der Versuchsanlage nach den Vorgaben des Verfahrensgebers Ingitec GmbH. Die Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH stellt die weiteren Komponenten des Verfahrens bereit und bewirtschaftet die Versuchsanlage als kommunale Entwicklungsmaßnahme im Sinne der neuen Klärschlammverordnung. Der Wirtschaftspartner Innovatherm GmbH bringt seine Erfahrungen als größter Monoverbrennungsanlagenbetreiber Deutschlands ein. Die Klärschlammaschen werden in einer gesonderten Versuchsreihe behandelt.

Das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg bilanziert die Verfahrenskette und entwickelt das Verwertungskonzept für das entstehende Synthesegas. Das IFEU-Institut in Heidelberg erstellt die Ökobilanz der gesamten Verfahrenskette und vergleicht das Verfahren mit Alternativen der Klärschlammverwertung. Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen bestimmt die Qualität der Produkte und vergleicht diese mit anderen Recyclingverfahren. Die Universität der Bundeswehr in München klärt die Einbindung der Verfahrenskette in die Kläranlage und kümmert sich um die abwasserseitigen Fragen des Verfahrens. Das regionale Vermarktungskonzept des recycelten Phosphors wird mit Expertenbeteiligung erarbeitet.

Die Metallurgie des Schachtofens hat eine Jahrhundert alte Tradition. Die Technologie auf Klärschlamm anzuwenden, ist dennoch eine große Herausforderung. Der gebaute Schmelzofen ist mit einer Schmelzleistung von ca. 400 bis 450 kg/h leistungsfähiger als berechnet und die entstehenden Gasmengen sind verfahrenstechnisch nicht einfach zu bewältigen. Die bestehende Abgasbehandlungsanlage und einzelne Komponenten mussten mehrfach umgebaut oder nachgerüstet werden. Die zahlreichen Untersuchungen der Wissenschaftspartner sind deshalb noch nicht abgeschlossen.

Die Steuerung des Prozesses erweist sich hinsichtlich der Dosierung der Inhaltsstoffe, sowie der Luft- und Temperaturführung als anspruchsvoll. Die Technologie verspricht dennoch die Ziele einer stofflichen und zugleich energetischen Verwertung des Klärschlamms ohne Restabfall wirtschaftlich zu erreichen und wird deshalb in weiteren Versuchen erprobt und technologisch weiterentwickelt. Die Prozessführung besonders hinsichtlich Gaserzeugung, Reinheit der Produkte und Energieverbrauch wird weiter erprobt und optimiert.

Abb. 2: Schlackeablauf beim ersten Schmelzversuch

Fazit

Die metallurgische Umwandlung des Klärschlamms in Metall und Phosphorschlacke verspricht als Alternative zur Monoverbrennung ein besonders aussichtsreiches Verfahren zu sein, das praktikabel, nachhaltig und zugleich finanzierbar ist. Die Rückgewinnung der Produkte ist besonders hoch (über 80 % des enthaltenen Phosphors). Das Verfahren ist aufgrund seiner einstufigen Betriebsweise besonders leistungsfähig und kompakt. Das Mephrec-Verfahren ist hinsichtlich seiner Effizienz besonders vorteilhaft zu bewerten und erzeugt quasi keinen Abfall.

Das entstehende Synthesegas kann z.B. zur motorischen Nutzung weiterverwendet werden. Die gewonnene phosphorreiche Schlacke wird als Rezyklat in einen Dünger mit mittlerer und anhaltender Düngewirkung mechanisch weiterverarbeitet. Es ist sehr schadstoffarm und hat aufgrund der preisgünstigen Bereitstellung gute Aussichten, sich in der Landwirtschaft zu bewähren. Die abgestochene, metallische Legierung geht in den Schrotthandel.

Wenn sich die ersten Versuchsergebnisse bestätigen und die technisch notwendigen Einzelkomponenten einer Großanlage im Rahmen des Pilotprojekts geklärt sind, entsteht nach eingehenderen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ggf. eine Großanlage, bei der bis über 70.000 t/Jahr Klärschlamm verarbeitet werden können.

Kontakt:

Klärschlammverwertung
Region Nürnberg GmbH
Adolf-Braun-Str. 33 • 90429 Nürnberg
Burkard Hagspiel
Tel.: +49 911 231-4520
burkard.hagspiel@stadt.nuernberg.de

Laufzeit: 11/2014 – 10/2017
www.nuernberg.de/internet/klaerschlammverwertung

Kontaktdaten der Verbundpartner

arrivee

Projektkoordinator
Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Paul-Ehrlich-Str. 14
67663 Kaiserslautern
Prof. Dr. Theo Schmitt
Tel.: +49 631 205-29 46
theo.schmitt@bauing.uni-kl.de

Verbundpartner
Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik
Rainer-Gruenter-Str. 21
42119 Wuppertal
Prof. Dr. Markus Zdrallek
Tel.: +49 202 439-19 76
zdrallek@uni-wuppertal.de

iGas GmbH
Cockerillstraße 100 • 52222 Stolberg
Karl-Heinz Lentz
Tel.: +49 2402 979160-1
kh.lentz@igas-engineering.de

Transferstelle Bingen Geschäftsbereich der ITB gGmbH
Berlinstr. 107 A
55411 Bingen am Rhein
Prof. Dr. Ralf Simon
Tel.: +49 6721 98 424-0
simon@tsb-energie.de

Stadtwerke Radevormwald GmbH
Am Gaswerk 13
42477 Radevormwald
Christoph Richtarski
Tel.: +49 2195 91 31-0
c.richtarski@s-w-r.de

Wupperverband
Untere Lichtenplatzer Str. 100
42289 Wuppertal
Dirk Salomon
Tel.: +49 202 583-114
sal@wupperverband.de

Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH -WiW-
Untere Lichtenplatzer Str. 100
42289 Wuppertal
Dr. Gerd Kolisch
Tel.: +49 49 202 583-0
kol@wupperverband.de

BioBZ

Projektkoordinator
Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC-Institut)
Leibnizstr. 21+23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Michael Sievers
Tel.: +49 53 23 933-243
michael.sievers@cutec.de
Dr. Torsten Zeller
Tel.: +49 53 23 933-206
torsten.zeller@cutec.de

Verbundpartner
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Engler-Bunte-Ring 1
76131 Karlsruhe
Prof. Dr. Harald Horn
Tel.: +49 721 608-42581
harald.horn@kit.edu

Eisenhuth GmbH & Co. KG
Friedrich-Ebert-Str. 203
37520 Osterode am Harz
Dr. Thorsten Hickmann
Tel.: +49 5522 9067-14
t.hickmann@eisenhuth.de

EURAWASSER Betriebsführungsgesellschaft mbH
Odermarkplatz 1 • 38640 Goslar
Nora Sickora
Tel.: +49 5321 33 76-63
nora.sickora@eurawasser.de

TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie
Hagenring 30 • 38106 Braunschweig
Prof. Dr. Uwe Schröder
Tel.: +49 531 391-84 25
uwe.schroeder@tu-bs.de
Prof. Dr. Robert Kreuzig
Tel.: +49 531 391-59 61
r.kreuzig@tu-braunschweig.de

TU Clausthal, Institut für Chemische Verfahrenstechnik
Leibnizstraße 17
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Ulrich Kunz
Tel.: +49 5323 72-2534
kunz@icvt.tu-clausthal.de

BioMethanol

Projektkoordinator
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK – Institut für Mikrosystemtechnik
Georges-Koehler-Allee 103
79110 Freiburg
Dr. Sven Kerzenmacher
Tel.: +49 761 203-732 18
sven.kerzenmacher@imtek.uni-freiburg.de

Institut für Anorganische und Analytische Chemie (Projektbearbeitung)
Albertstr. 21 • 79104 Freiburg
Prof. Dr. Ingo Krossing
Tel.: +49 761 203-61 22
krossing@uni-freiburg.de

Verbundpartner
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Wasserstofferzeugung und -speicherung
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
Dr. Achim Schaadt
Tel.: +49 761 4588-5428
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für angewandte Biowissenschaften
Fritz-Haber-Weg 2 • 76131 Karlsruhe
Prof. Dr. Johannes Gescher
Tel.: +49 721 608-419 40
johannes.gescher@kit.edu

Solvay Acetow GmbH
Engesserstr. 8
79108 Freiburg im Breisgau
Dr. Dirk Hölter
Tel.: +49 761 511-35 98
dirk.hoelter@solvay.com

E-Klär

Projektkoordinator
RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Templergraben 55 • 52062 Aachen
Prof. Dr. Johannes Pinnekamp
Tel.: +49 241 80-25207
pinnekamp@isa.rwth-aachen.de

Verbundpartner
CAMBI Deutschland GmbH
Schwannstr. 6 • 40476 Düsseldorf
Christian Isachsen
Tel.: +49 66 77 98 00
Christian.isachsen@cambi.no

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6 • 28857 Syke
Dr. Paul Engelke
Tel: +49 4242 16380
peng@dhigroup.com

E&P Anlagenbau GmbH
Mariannenstr. 38 • 12209 Berlin
Kerstin Zacherl-John
Tel.: +49 8122 8471879
ep.kerstin.john@t-online.de

Huber SE
Industriepark Erasbach A1
92334 Berching
Dr. Stefania Paris
Tel.: +49 8462 201-744
ps@huber.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Welfengarten 1 • 30167 Hannover
Prof. Dr. Karl-Heinz Rosenwinkel
Tel.: +49 511 762-2276
rosenwinkel@isah.uni-hannover.de

Ruhrverband
Postfach 10 32 42 • 45128 Essen
Dr. Dieter Thöle
Tel.: +49 201 178-2546
dth@ruhrverband.de

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Pockelsstr. 14 • 38106 Braunschweig
Prof. Dr. Norbert Dichtl
Tel.: +49 531 391-79 35
n.dichtl@tu-braunschweig.de

Universität Leipzig, Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement
Grimmaische Straße 12
04109 Leipzig
Prof. Dr. Robert Holländer
Tel.: +49 341 973-3870
hollaender@wifa.uni-leipzig.de

Xylem Services GmbH
Boschstr. 4-14 • 32051 Herford
Arne Wieland
Tel.: +49 5221 930 129
arne.wieland@xyleminc.com

ENERWA

Projektkoordinator
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH
Moritzstr. 26
45476 Mülheim an der Ruhr
Dr. Wolf Merkel
Tel.: +49 208 403 03-100
w.merkel@iww-online.de
Anja Rohn
Tel.: +49 208 403 03-384
a.rohn@iww-online.de

Verbundpartner
Aggerverband
Sonnenstr. 40 • 51645 Gummersbach
Dieter Wonka
Tel.: +49 22 61 36-350
won@aggerverband.de

Bergische Universität Wuppertal Forschungsstelle Bürgerbeteiligung
Gaußstr. 20 • 42119 Wuppertal
Prof. Dr. Hans-Joachim Lietzmann
Tel.: +49 202 257 95 40
hans.j.lietzmann@uni-wuppertal.de

enwor – energie & wasser vor ort GmbH
Kaiserstr. 86 • 52134 Herzogenrath
Stephan Hunze
Tel.: +49 24 07 579-14 00
stephan.hunze@enwor-vorort.de

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen e. V.
Kackertstr. 15-17 • 52072 Aachen
Dr. Friedrich-Wilhelm Bolle
Tel.: +49 241 80-268 27
bolle@fiw.rwth-aachen.de

Rechenzentrum für Versorgungs-netze Wehr GmbH
Wiesenstr. 21 • 40549 Düsseldorf
Dr. Piet Hensel
Tel.: +49 211 601273-04
hensel@rzvn.de

RWTH Aachen, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft
Schinkelstraße 6 • 52062 Aachen
Daniel Schweer
Tel.: +49 241 80-97659
daniel.schweer@iaew.rwth-aachen.de

RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH
Am Schloß Broich 1-3
5479 Mülheim an der Ruhr
Dr. Michael Plath
Tel.: +49 208 4433-629
michael.plath@rww.de

SYDRO CONSULT GmbH
Mathildenplatz 8
64283 Darmstadt
Dr. Hubert Lohr
Tel.: +49 6151 367-367
h.lohr@sydro.de

Universität Duisburg-Essen, Abteilung Aquatische Ökologie
Universitätsstr. 5 • 45141 Essen
Prof. Dr. Bernd Sures
Tel.: +49 201 183-26 17
bernd.sures@uni-due.de

WAG Wassergewinnungs- und aufbereitungsgesellschaft Nordeifel mbH
Am Filterwerk • 52159 Roetgen
Walter Dautzenberg
Tel.: +49 2471 17-61 00
walter.dautzenberg@enwor-vorort.de

Wupperverband
Untere Lichtenplatzer Str. 100
42289 Wuppertal
Dr. Torsten Frank
Tel.: +49 202 583-332
tfkn@wupperverband.de

EnWasser

Projektkoordinator
Fraunhofer-Institut für Wind-energie und Energiesystemtechnik
Königstor 59 • 34119 Kassel
Patrick Hochloff
Tel.: +49 561 72 94-214
patrick.hochloff@iwes.fraunhofer.de

Verbundpartner
Capgemini Deutschland GmbH
Potsdamer Platz 5 • 10785 Berlin
Dr. Jörg Katzfey
Tel.: +49 221 91 26 44-482
joerg.katzfey@capgemini.com

IHS Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 10
70550 Stuttgart
Dr. Albert Ruprecht
Tel.: +49 711 685-632 56
ruprecht@ihs.uni-stuttgart.de

Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung
Hauptstr. 163 • 70563 Stuttgart
Matthias Weiß
Tel.: +49 711 973-22 18
matthias.weiss@zvbwv.de

ESiTI

Projektkoordinator
Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR
Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt
Prof. Dr. Peter Cornel
p.cornel@iwar.tu-darmstadt.de
Prof. Dr. Christian Schaum
+49 89 6004-2061 -3484
christian.schaum@unibw.de
Prof. Dr. Liselotte Schebek
(Projektbearbeitung)
Tel.: +49 6151 16-31 41
l.schebek@iwar.tu-darmstadt.de

Verbundpartner
Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC-Institut)
Leibnizstr. 21+23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Michael Sievers
Tel.: +49 5323 933-243
michael.sievers@cutec.de

Dr. Born - Dr. Ermel GmbH
Finienweg 7 • 28832 Achim
Jörn Franck
Tel.: +49 4202 758-0
jf@born-ermel.de

EnviroChemie GmbH
In den Leppsteinswiesen 9
64380 Roßdorf
Dr. Markus Engelhart
Tel.: +49 6154 69 98-57
markus.engelhart@envirochemie.com

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
Nobelstraße 12 • 70569 Stuttgart
Dr. Ursula Schließmann
Tel.: +49711 970-42 22
ursula.schliessmann@igb.fraunhofer.de

ENTEGA Abwasserreinigung GmbH & Co. KG
Frankfurter Str. 110
64293 Darmstadt
Dr. Julia Klinger
Tel.: +49 6151 701-40 90
abwasser@entega.ag

inter 3 GmbH Institut für Ressourcenmanagement
Otto-Suhr-Allee 59 • 10585 Berlin
Dr. Shahrooz Mohajeri
Tel.: +49 30 34 34 74-40
mohajeri@inter3.de

bluemove Consulting gmbh
Kellerbachstraße 8 • 82335 Berg
Arthur Dornburg
Tel.: +49 175 2232144
dornburg@bluemove-consulting.de

EWave

Projektkoordinator
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 11 • 91058 Erlangen
Prof. Dr. Alexander Martin
Tel.: +49 9131 85-67163
alexander.martin@math.uni-erlangen.de

Verbundpartner
Bilfinger GreyLogix aqua GmbH
Heidenkampsweg 101
20097 Hamburg
Olaf Kremsier
Tel.: +49 40 524 711-172
olaf.kremsier@bilfinger.com

Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau und Technikjournalismus
Grantham-Allee 20
53757 Sankt Augustin
Prof. Dr. Gerd Steinebach
Tel.: +49 2241 865-330
gerd.steinebach@h-brs.de

RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH
Am Schloß Broich 1-3
45479 Mülheim an der Ruhr
Dr. Michael Plath
Tel.: +49 208 4433-629
michael.plath@rww.de

Siemens AG, Industry Sector
Gleiwitzer Str. 555
90475 Nürnberg
Dr. Andreas Pirsing
Tel.: +49 30 896-20 678
andreas.pirsing@siemens.com

Technische Universität Darmstadt
Dolivostr. 15 • 64293 Darmstadt
Prof. Dr. Jens Lang
Tel.: +49 6151 16-2389
lang@mathematik.tu-darmstadt.de

EWID

Projektkoordinator
Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg
Prof. Dr. F. Wolfgang Günthert
Tel.: +49 89 6004-21 56
wolfgang.guenthert@unibw.de
Frank Krönlein
Tel.: +49 89 6004-26 16
frank.kroenlein@unibw.de
Sophia Badenberg
Tel.: +49 89 6004-22 31
sophia.badenberg@unibw.de

Verbundpartner
AWA-Ammersee Wasser- und Abwasserbetriebe gKU
Mitterweg 1 • 82211 Herrsching
Thomas Tinnes
Tel.: +49 8152 91 83-503
tinnes@awa-ammersee.de

Dr. Krätzig Ingenieurgesellschaft mbH
Süsterfeldstr. 81 • 52072 Aachen
Dr. Thomas Krätzig
Tel.: +49 241 88 973-0
infoline@dr-kraetzig.com

KSB Aktiengesellschaft
Johann-Klein-Str. 9
67227 Frankenthal
Traugott Ulrich
Tel.: +49 6233 86-29 63
traugott.ulrich@ksb.com

Schraml GmbH
Herxheimer Str. 7
83620 Feldkirchen-Westerham
Dr. Stephanie Schraml
Tel.: +49 8062 70 71-17
stephanie.schraml@schraml.de

Wasserversorgungszweckverband Perlenbach
Am Handwerkerzentrum 31
52156 Monschau
Derk Buchsteiner
Tel.: +49 2472 9916-10
derk.buchsteiner@wasserwerk-perlenbach.de

H_2Opt

Projektkoordinator
Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen
Gottlieb-Daimler-Str. 47
67663 Kaiserslautern
Prof. Dr. Martin Böhle
Tel.: +49 631 205-27 69
martin.boehle@mv.uni-kl.de
Dr. Harald Roclawski
Tel.: +49 631 205-43 08
roclawsk@mv.uni-kl.de

Verbundpartner
EWR Netz GmbH
Klosterstr. 16 • 67547 Worms
Wolfgang Hausen
Tel.: +49 6241 848-530
hausen@ewr.de

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
Fraunhofer Platz 1
67663 Kaiserslautern
Dr. Michael Bortz
Tel.: +49 631 316 00-45 32
michael.bortz@itwm.fraunhofer.de

Obermeyer Planen + Beraten GmbH
Brüsseler Straße 5
67657 Kaiserslautern
Kasimir Mazur
Tel.: +49 631 303 29-177
kasimir.mazur@opb.de

SWK Stadtwerke Kaiserslautern Versorgungs-AG
Karcherstraße 28
67655 Kaiserslautern
Hilmar Württemberger
Tel.: +49 631 80 01-40 37
hilmar.wuerttemberger@swk-kl.de

KEStro

Projektkoordinator
DECHEMA Forschungsinstitut
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt
Dr. Klaus-Michael Mangold
Tel.: +49 69 75 64-327
mangold@dechema.de

Verbundpartner
Abwasserverband Braunschweig
Celler Str. 22 • 38176 Wendeburg
Bernhard Teiser
Tel.: +49 5303 509-11
bernhard.teiser@abwasserverband-bs.de

CONDIAS GmbH
Fraunhoferstr. 1 b • 25524 Itzehoe
Dr. Thorsten Matthée
Tel.: +49 4821 804 087-0
matthee@condias.de

DVGW, Technologiezentrum Wasser TZW
Karlsruher Straße 84
76139 Karlsruhe
Prof. Dr. Andreas Tiehm
Tel.: +49 721 96 78-137
an dreas.tiehm@tzw.de

WaCo Wassertechnik Consult GmbH
Grottenstr. 3 • 22605 Hamburg
Dr. Oliver Debus
Tel.: +49 40 822 770-0
waco@wassertech.de

KRN-Mephrec

Projektkoordinator
Klärschlammverwertung Region Nürnberg GmbH
Adolf-Braun-Str. 33
90429 Nürnberg
Burkard Hagspiel
Tel.: +49 911 231-45 20
burkard.hagspiel@stadt.nuernberg.de

Verbundpartner
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
Fabian Stenzel
Tel.: +49 9661 908-432
fabian.stenzel@umsicht.fraunhofer.de

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg
Horst Fehrenbach
Tel.: + 49 6221 4767-16
horst.fehrenbach@ifeu.de

INNOVATHERM Gesellschaft zur innovativen Nutzung von Brennstoffen mbH
Frydagstraße 47
44536 Lünen
Ute Blöthe
Tel.: +49 2306 92823-23
ub@innovatherm-gmbh.de

RWTH Aachen University, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Johannes Pinnekamp
Tel.: +49 241 80-25207
isa@isa.rwth-aachen.de

Baumgarte Boiler Systems GmbH
Senner Str. 115
33647 Bielefeld
Gerald Gruener
Tel.: +49 521 9406-168
Ggruener@baumgarte.com

Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg
Prof. Dr. F. Wolfgang Günthert
Tel.: + 49 89 6004-2156
wolfgang.guenthert@unibw.de

Notizen

Impressum

Herausgeber:
DWA
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
Theodor-Heuss-Allee 17 • 53773 Hennef
Tel.: +49 2242 872-333 • Fax: +49 2242 872-100
info@dwa.de • www.dwa.de

Redaktion:
ERWASNET – Vernetzungs- und Transfervorhaben für die BMBF-Fördermaßnahme
„Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“

Fotonachweise:
Titel v. l. o.: EnWasser; tan4ikk, fotolia.de; Peter Haller
v. l. u.: Frank Krönlein, EWID; Hermann Paulenz; TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH
Innen: S. 6 oben: Bodensee-Wasserversorgung; S. 6 unten: EnWasser; S. 16 oben: Hermann Paulenz; S. 16 unten: EWID; S. 42 oben/unten: Fotolia; Bilder QT/Verbünde: jeweilige Projektpartner

Layout:
DWA, Hennef

Druck:
medienHaus Plump GmbH • Rolandsecker Weg 33 • 53619 Rheinbreitbach

Bezug über:
DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
Download: www.bmbf.nawam-erwas.de

Beiträge:
Koordinatoren der ERWAS-Verbundprojekte,
Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Vernetzungs- und Transfervorhabens ERWASNET

Ansprechpartner:
Ansprechpartner beim BMBF:
Dr. Christian Alecke – Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 724 – Ressourcen und Nachhaltigkeit • 53170 Bonn
Tel.: +49 228 9957-2110 • christian.alecke@bmbf.bund.de

Ansprechpartner beim Projektträger:
Dr. Thomas Deppe – Projektträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit
Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie, Außenstelle Dresden
Hallwachsstr. 3 • 01069 Dresden
Tel.: +49 351 463-31443 • thomas.deppe@kit.edu

Auflage:
1. Auflage, Mai 2017