

BMBF-Fördermaßnahme

# Wave

Zukunftsfähige Technologien  
und Konzepte zur Erhöhung  
der Wasserverfügbarkeit durch  
Wasserwiederverwendung  
und Entsalzung

**STATUSSEMINAR**



**17. – 18. April 2018**

**DECHEMA-Haus · Frankfurt am Main**

**ABSTRACT-BAND**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**HERAUSGEBER:**



DECHEMA e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

**Ansprechpartner für die BMBF-Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung“ (WavE):**

Beim BMBF:  
Dr. Christian Alecke  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat 724 - Ressourcen und Nachhaltigkeit  
53170 Bonn

Beim Projektträger:  
Dr.-Ing. Markus Delay  
Projektträger Karlsruhe (PTKA)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**EDITOR:**

Wissenschaftliches Begleitvorhaben der BMBF-Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung“ (WavE)

Verantwortlich im Sinne des Presserechts:  
Dr. Thomas Track  
DECHEMA e.V.  
Tel.: +49 (0)69 7564-427  
Fax: +49 (0)69 7564-117

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Förderkennzeichen: 02WAV1400

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren der einzelnen Beiträge.  
Die Broschüre ist nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.

Erschienen im April 2018  
zum Statusseminar der BMBF-Fördermaßnahme WavE

<b>BMBF-Fördermaßnahme WavE: Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung</b>	<b>4</b>
<b>Wissenschaftliches Begleitvorhaben – TransWavE</b>	<b>4</b>
<b>Nationale und Internationale Standorte</b>	<b>5</b>
<b>WavE-Verbundprojekte</b>	<b>7</b>
<b>Themenfeld: Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser</b>	<b>7</b>
<b>MULTI-ReUse:</b> Modulare Aufbereitung und Monitoring bei der Abwasser-Wiederverwendung	8
<b>TrinkWave:</b> Planungsoptionen und Technologien der Wasserwiederverwendung zur Stützung der Trinkwasserversorgung in urbanen Wasserkreisläufen	9
<b>HypoWave:</b> Einsatz hydroponischer Systeme zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung	10
<b>EPoNa:</b> Ertüchtigung von Abwasser-Ponds zur Erzeugung von Bewässerungswasser in Namibia	11
<b>Themenfeld: Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser</b>	<b>13</b>
<b>REMEMBER:</b> Ressourcen- und energieeffiziente Wasser-Membranfiltration mittels Dielektrophorese	14
<b>WaKap:</b> Modulares Konzept zur nachhaltigen Wasserentsalzung mittels kapazitiver Entionisierung am Beispiel Vietnam	15
<b>Themenfeld: Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser</b>	<b>17</b>
<b>WaterMiner:</b> Räumlich-zeitlich abgestimmte Kreislaufführung und Wiederverwendung bergbaulicher Abwässer am Beispiel eines urban geprägten Bergbaugesbietes in Vietnam	18
<b>PAkmem:</b> Aufbereitung problematischer Prozess- und Abwässer mit keramischen Nanofiltrationsmembranen	19
<b>WEISS:</b> Effiziente Kreislaufführung von Kühlwasser durch integrierte Entsalzung am Beispiel der Stahlindustrie	20
<b>WaRelp:</b> Water-Reuse in Industrieparks	21
<b>Re-Salt:</b> Recycling von industriellen salzhaltigen Prozesswässern	22
<b>HighCon:</b> Konzentrate aus der Abwasserwiederverwendung	23
<b>DiWal:</b> Entwicklung eines ressourceneffizienten Wassermanagement- und Anlagenkonzepts für Vorbehandlungs- und Tauchlackieranlagen unter Nutzung der Elektroimpulstechnologie zur Dekontamination von industriellen Wässern und Lacken	24
<b>WavE-Querschnittsthemen</b>	<b>25</b>
Risikomanagement in der Abwasserwiederverwendung	26
Technologien und Prozesse	27
Salze und Reststoffe	28

## BMBF-Fördermaßnahme WavE: Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung

Die Verfügbarkeit von Wasser in ausreichender Menge und Qualität ist entscheidende Grundlage für das gesundheitliche Wohlergehen des Menschen, die nachhaltige Entwicklungsfähigkeit von Regionen und eine intakte Umwelt. Weltweit steigt der Wasserbedarf allerdings drastisch an – gleichzeitig werden die begrenzten Wasserressourcen übernutzt und verschmutzt. Mit zunehmendem Wasserstress gewinnt die Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung nicht nur in klassischen ariden Gebieten, sondern auch in wasserreicheren Wachstumsregionen durch konkurrierende Nutzungen stark an Bedeutung.

Mit der Fördermaßnahme WavE will das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) diesen Herausforderungen begegnen. Ziel von WavE ist die Entwicklung von innovativen Technologien, Betriebskonzepten und Managementstrategien für eine nachhaltige Erhöhung der Wasserverfügbarkeit und ein zukunftsfähiges Wassermanagement. 13 Verbundprojekte und ein wissenschaftliches Begleitvorhaben widmen sich seit dem dritten Quartal 2016 dieser Aufgabe. Die Verbundprojekte arbeiten in transdisziplinären und praxisorientierten Teams mit Fachleuten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Praxis. Sie betrachten das Thema „Erhöhung der Wasserverfügbarkeit“ aus verschiedenen Perspektiven und erproben unterschiedliche Ansätze. Die Untersuchungen und Entwicklungen erfolgen unter praxisnahen Bedingungen an Standorten im In- und Ausland und beziehen auch Demonstrationsanlagen im technischen Maßstab mit ein. Besondere Bedeutung kommt der Übertragbarkeit der technologischen und konzeptionellen Ansätze auf andere Standorte mit ähnlichen Randbedingungen zu, auch im Hinblick auf die Positionierung und Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen auf dem internationalen Technikmarkt.

WavE konzentriert sich auf folgende drei Themenfelder:

### ► Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser

In WavE reicht die Wiederverwendung von behandeltem kommunalem Abwasser von der zweckmäßigen Aufbereitung zur Wiederverwendung in der Landwirtschaft und effizienten Bewässerungssystemen bis hin zur Unterstützung der Wasserversorgung in industriellen und auch städtischen Wasserkreisläufen. Insbesondere werden Managementkonzepte und technische Lösungen für modulare Behandlungskonzepte entwickelt, die eine flexible Anpassung an die Wasserwiederverwendung ermöglichen.

### ► Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser

Im Bereich der Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser besteht noch deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Herausforderungen liegen hier vor allem in der Verringerung von Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie der Steigerung der Energieeffizienz der Entsalzungsanlagen. In WavE kommen hierzu innovative Technologien wie die Dielektrophorese zur Optimierung von Membranfiltrationsverfahren oder die kapazitive Deionisation zum Einsatz. Sie bieten ein vielversprechendes Potenzial zur Unterstützung einer ressourcen- und energieeffizienten Entsalzung.

### ► Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser

In WavE werden verschiedene Industriezweige adressiert, angefangen von der chemischen Prozessindustrie über die Stahl- und Automobilindustrie bis hin zum Bergbau. Innerhalb der Industriestandorte werden vor allem die Hauptwasserströme Prozesswasser und Kühlwasser betrachtet. Neben diesen spezifischen Ansätzen werden Lösungen für Engpässe bei der industriellen Wasserwiederverwendung entwickelt. Die Kosten für den Umgang mit Konzentraten sind ein entscheidendes Haupthindernis für eine Erhöhung der Wiederverwendungsraten. Dies spielt eine Rolle für jeden Bereich der Wassernutzung, aber vor allem in der Industrie. Neben einer verringerten Abhängigkeit von Frischwasserressourcen ergeben sich auch große Potenziale zur Rückgewinnung von Roh- und Wertstoffen.

Im Rahmen des Statusseminars stellen die Verbundprojekte der Fördermaßnahme ihre bisherigen Ergebnisse vor. Zusätzlich wird der aktuelle Stand der übergreifenden Querschnittsthemen vorgestellt. Begleitend findet eine Posterpräsentation der Verbundprojekte statt.

## Wissenschaftliches Begleitvorhaben – TransWavE

Die Fördermaßnahme WavE wird durch ein wissenschaftliches Begleitvorhaben (TransWavE) unterstützt, das allen Akteuren bei der Abwicklung der Fördermaßnahme zur Seite steht. Als zentrale Schnittstelle fördert TransWavE den Dialog zwischen BMBF, dem Projektträger, dem Lenkungskreis und den Verbundprojekten sowie mit der (Fach-)Öffentlichkeit. Damit dient TransWavE insbesondere der themenübergreifenden Vernetzung der Verbundprojekte (intern und extern) und unterstützt den Ergebnistransfer zwischen den Projekten und in die Praxis (national – europäisch – international).

Das wissenschaftliche Begleitvorhaben TransWavE wird von der DECHEMA e.V. koordiniert.

### KONTAKT

DECHEMA e.V.

Dr. Thomas Track/Dr. Christina Jungfer

Tel.: +49 69 7564-427/-364

E-Mail: thomas.track@dechema.de

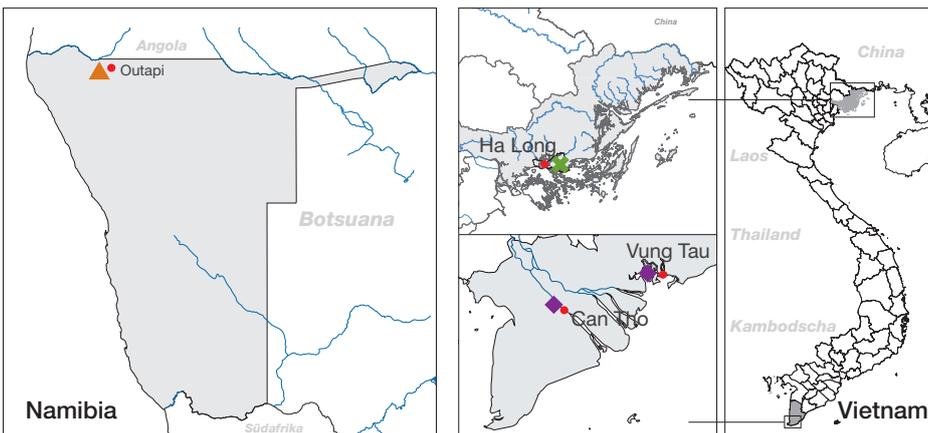
christina.jungfer@dechema.de

[www.bmbf-wave.de](http://www.bmbf-wave.de)

## Nationale Standorte



## Internationale Standorte



Projekt- und Untersuchungsstandorte der Verbundprojekte der Fördermaßnahme WaVE.



## WavE-Verbundprojekte

**Themenfeld: Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser**



- ▶ **MULTI-ReUse:** Modulare Aufbereitung und Monitoring bei der Abwasser-Wiederverwendung
- ▶ **TrinkWave:** Planungsoptionen und Technologien der Wasserwiederverwendung zur Stützung der Trinkwasserversorgung in urbanen Wasserkreisläufen
- ▶ **HypoWave:** Einsatz hydroponischer Systeme zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung
- ▶ **EPoNa:** Ertüchtigung von Abwasser-Ponds zur Erzeugung von Bewässerungswasser in Namibia

## MULTI-ReUse

### Modulare Aufbereitung und Monitoring bei der Abwasser-Wiederverwendung



#### KOORDINATION

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für  
Wasserforschung gGmbH

Dr.-Ing. Wolf Merkel

Tel.: +49 208 40303-100

E-Mail: [w.merkel@iww-online.de](mailto:w.merkel@iww-online.de)

[www.water-multi-reuse.org](http://www.water-multi-reuse.org)

#### Projektziele

Das Projekt MULTI-ReUse entwickelt ausgehend von konventionell gereinigtem Abwasser flexible Verfahrensketten zur Produktion von definiert gestaffelten Wasserqualitäten und -mengen. Das Wasser soll als Brauchwasser für Industrie, Landwirtschaft, Grundwasseranreicherung oder Siedlungswasserwirtschaft weiterverwendet werden. Es werden sowohl neue Entwicklungen und Verfahrenskombinationen im Bereich der Membrantechnologie als auch innovative Verfahren zur Online-Überwachung von Hygiene und zur Bestimmung von biologisch verwertbarem Kohlenstoff entwickelt. Die Verfahrensoptimierung wird unter Praxisbedingungen erarbeitet. Die Handlungsalternativen werden in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit bewertet; das Bewertungstool für weitere Anwendungen zur Verfügung gestellt. MULTI-ReUse schließt entscheidende Lücken, um innovative Verfahrenskonzepte zur Wasserwiederverwendung aus Deutschland weltweit anpassungsfähiger und konkurrenzfähiger zu machen und betreibt aktiven Wissenstransfer zu den gewonnen Erkenntnissen.

#### Zwischenergebnisse

In einem ersten Arbeitspaket wurden Nutzungsanforderungen und Qualitätskriterien für die Wasserwiederverwendung in Industrie, Landwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft und Grundwasseranreicherung im nationalen und internationalen Rahmen zusammengetragen. Diese Daten dienen projektintern als Grundlage für weitere Planungen. Zusätzlich wurden die Informationen in Factsheets sowie einem Artikel für eine Fachzeitschrift zusammengefasst. Des Weiteren wurden ausgewählte internationale Zielmärkte für das MULTI-ReUse-Verfahren identifiziert. Diese Analyse wurde in Form eines Berichts mit dem Titel „Marktpotentiale der Wasserwiederverwendung“ veröffentlicht.

Zur Untersuchung der modularen Verfahrensketten unter realen Bedingungen wurde im Sommer 2017 die Versuchsanlage am Pilotstandort in Betrieb genommen. Die erste Versuchsphase diente zur Optimierung des Ultrafiltrationsprozesses in Kombination mit der vorgeschalteten Flockung. Daneben wurden die neu entwickelten Umkehrosiose-Membranen im Vergleich zu einem Standardprodukt erfolgreich getestet. Sie benötigen bei ähnlichem Rückhalt einen geringeren Betriebsdruck.

Die durchflusszytometrischen Messungen bestätigten ein gutes mikrobiologisches Rückhaltevermögen der Ultrafiltration (UF) und v.a. der Umkehrosiose (UO). Auch das „Reverse Stable Isotope Labelling“ (RSIL) zeigt eine deutliche Reduktion bzw. Verlust der CO<sub>2</sub>-Produktion nach Passieren der UF bzw. der UO. Während die mikrobiologische Population vermutlich keine Gemeinsamkeit mehr aufweist mit der im Rohwasser, wird das Aufkeimungspotential nur wenig verringert. Selbst nach erfolgter Aufkeimung deuten erste Langzeitversuche mit RSIL darauf hin, dass die produzierte Menge an CO<sub>2</sub> weiterhin zunimmt, also weiterhin Aktivität gegeben ist.

Zur Entwicklung eines flexibel anwendbaren Bewertungstools für die spätere Anwendung in der nationalen sowie abgeschlossenen internationalen Fallstudien wurden zunächst bekannte, multikriterielle Bewertungsverfahren aus Literatur und abgeschlossenen Forschungsprojekten recherchiert. Mittels Defizitanalyse konnten daraus jene Ansätze selektiert werden, welche im Hinblick auf das Bewertungsziel und den bestehenden Bewertungsrahmen potentiell anwendbar erscheinen. Parallel wurden die Bewertungsszenarien innerhalb der Fallstudien konkretisiert und vorläufige Kriterienkataloge erarbeitet.

Das Projekt informiert über seine Ausrichtung und erste Ergebnisse auf einem Multi-Touch-Table, der derzeit im Wassermuseum Kaskade in Diekmannshausen steht und dort in die Ausstellung zum Thema Wasserkreislauf und Wasserwiederverwendung eingebunden ist. Der Verbund hat eine Open-Access-Strategie vorbereitet: Durch Nutzung von CC-Lizenzen ist es möglich, Factsheets und weitere entstehenden Produkte frei zu nutzen.

#### Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden Verfahren zur Desinfektion sowie zur Adsorption in Betrieb genommen und ergänzende Verfahrensstufen ermittelt. Die Verfahrenskombinationen werden vergleichend in längeren Demonstrationsphasen getestet, begleitet durch ein umfangreiches Monitoring. Für die neuen mikrobiologischen Methoden gilt es nun zu untersuchen, wie z.B. der Aktivkohlefilter den Nährstoffgehalt des Wassers und damit das Aufkeimungspotential und die CO<sub>2</sub>-Produktion beeinflusst. Auf Grundlage der Vorarbeiten und der weiteren Ausarbeitung des Fallbeispiels Nordenham wird das Bewertungstool entwickelt und angewendet. Eine Exportstrategie wird gemeinsam mit den Praxispartnern erarbeitet. Die Projektergebnisse werden durch Veröffentlichungen, Teilnahme an Konferenzen und Messen sowie durch die Projektwebseite, den Touchtable (möglichst auch auf Fachmessen) und „learning expeditions“ für verschiedene Zielgruppen verbreitet.

## TrinkWave

### Planungsoptionen und Technologien der Wasserwiederverwendung zur Stützung der Trinkwasserversorgung in urbanen Wasserkreisläufen



#### KOORDINATION

Technische Universität München  
 Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes  
 Tel.: +49 208 40303-100  
 E-Mail: [jdrewes@tum.de](mailto:jdrewes@tum.de)  
[www.wasser.tum.de/trinkwave/startseite](http://www.wasser.tum.de/trinkwave/startseite)

Weltweit rückt die Nutzung von gebrauchtem Wasser als alternative Wasserressource in den Fokus. Schon heute gibt es dafür viele Beispiele, vornehmlich in trockenen und halbtrockenen Regionen. Hier wird lokal anfallendes gereinigtes Abwasser als nachhaltige und kostengünstige Alternative anstelle von Oberflächen- oder Grundwasserressourcen verwendet. Aber auch in klimatisch gemäßigten Gegenden wie Deutschland kann zu Zeiten extremer Trockenheit das Wasser regional knapp werden und so eine Wiederverwendung ökonomisch und ökologisch sinnvoll sein.

#### Projektziele

Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen in der Grundwasserbewirtschaftung in Deutschland entwickelt das TrinkWave Projekt energieeffiziente, naturnahe Aufbereitungsprozesse für eine Wasserwiederverwendung ohne den Einsatz von Hochdruckmembranen. Um eine ausreichende Trinkwasserqualität sicherzustellen, werden in einem sogenannten Multibarriersystem mehrere aufeinanderfolgende Verfahrensschritte auf Basis einer sequentiellen Grundwasseranreicherung kombiniert, um möglichst alle störenden Stoffe aus dem Abwasser zurückzuhalten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entfernung von Krankheitserregern, Antibiotikaresistenzgenen und organischen Spurenstoffen. Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete untergliedert, die eine ganzheitliche Betrachtung des Themas unter Berücksichtigung technischer, wasserrechtlicher und sozialwissenschaftlicher Aspekte erlauben:

- ▶ Wesentliche Hürden für die Wiederverwendung von gebrauchtem Wasser sind bislang rechtliche Unsicherheiten zu Qualitätsanforderungen, eine mangelnde Kenntnis darüber, wie zuverlässig die eingesetzten Aufbereitungsverfahren sind sowie Bedenken der Verbraucher. Erstmals wird dieses Projekt daher multidisziplinäre Bewertungsansätze entwickeln, anhand derer Verfahrenskombinationen zur Wasserwiederverwendung beurteilt werden.
- ▶ Diese Ansätze dienen u.a. dazu, wasserrechtliche Konflikte zwischen Grundwasserschutz und Wasserwiederverwendung anhand von Fallbeispielen wissenschaftlich zu bewerten, eindeutige Kriterien für die Anforderung an die Qualität festzulegen und so die Akzeptanz für eine Wiederverwendung zu erhöhen.
- ▶ Alternative Verfahrenskombinationen werden mit Hilfe von naturnahen, aber technisch modifizierten Hybridfiltrationssystemen weiterentwickelt, die Mehrfachbarrieren für mikrobielle und chemische Kontaminanten, hohe Infiltrationsraten, einen hohen Grundwasserschutz sowie hohe Prozessstabilität bieten.
- ▶ Dafür werden technische Richtlinien, Handlungsempfehlungen und Validierungsansätze für die Planung, Bewertung, Optimierung und Überwachung der Entfernungsleistung existierender und innovativer Multibarriersysteme entwickelt.
- ▶ Zur Beurteilung der Wasserqualität dienen neue chemische und genetische Leitparameter.
- ▶ Eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung entwickelt Ansätze zur Risikokommunikation mit Nutzern und Interessengruppen.

#### Zwischenergebnisse

Das neue Aufbereitungskonzept bestehend aus einem Mehrschichtfilter zur Vorbehandlung, einem Zwischenspeicher (2.700 L) und dem neuen SMARTplus System wurde an der Technischen Universität München im halbtechnischen Maßstab aufgebaut und im Frühjahr 2017 mit Kläranlagenablauf in Betrieb genommen. Zentrale Elemente von SMARTplus sind die Infiltration des gereinigten Abwassers über einen Sickerschlitzgraben sowie der in situ Eintrag von Elektronenakzeptoren zur Steuerung der Redoxbedingungen. Erste Ergebnisse aus Tracer-Versuchen zeigen, dass es gelungen ist, hydraulische Bedingungen zu erzeugen, die einer Pfropfenströmung in einem homogen durchströmten porösen Medium sehr nahekommt und damit eine kontrollierbare Sequenz von Redoxzonen etabliert.

Für den in situ Eintrag von Sauerstoff wird der Einsatz gaspermeabler Membranen untersucht. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der homogene und blasenfreie Eintrag des Gases über den gesamten Querschnitt des Reaktors dar. Darüber hinaus wird auch der Eintrag von Ozon als zusätzliche Barriere für Pathogene und organische Spurenstoffe betrachtet. Weitere laufende Untersuchungen verschiedener Projektpartner umfassen den Einsatz von Elektronendonatoren zur Steuerung der Redoxbedingungen und die Nutzung reaktiver und sorptiver Materialien zur Verbesserung der Reinigungsleistung.

Neben den experimentellen Ansätzen wurden bereits zwei Stakeholder-Workshops durchgeführt, um Risiken und Anforderungen einer Wasserwiederverwendung in Deutschland zu diskutieren. Die Ergebnisse des Workshops zeigen Wege auf, wie der behördliche Umgang mit einer Grundwasseranreicherung im Rahmen einer Wasserwiederverwendung ausgestaltet werden könnte.

#### Ausblick

Die großtechnische Umsetzung der neuentwickelten Aufbereitungsverfahren direkt als Vorstufe der Trinkwasseraufbereitung soll auf einem ehemaligen Wasserwerksstandort in Berlin getestet werden. Dazu erfolgt momentan eine konkretere Planung und Kostenanalyse basierend auf hydrogeologischen Modellierungen und Standortuntersuchungen.

## HypoWavE

### Einsatz hydroponischer Systeme zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung



#### KOORDINATION

Technische Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn  
Tel.: +49 531 391-7937  
E-Mail: [t.dockhorn@tu-bs.de](mailto:t.dockhorn@tu-bs.de)  
[www.hypowave.de](http://www.hypowave.de)

#### Projektziele

In HypoWave wird untersucht, wie kommunales Abwasser so aufbereitet werden kann, dass damit eine effiziente Pflanzenproduktion in einem hydroponischen System möglich ist. Das kommunale Abwasser wird für die substratfreien Pflanzlinien im Gewächshaus der Pilotierungsanlage in Hattorf über modular einsetzbare technische Verfahrensschritte aufbereitet. Ziel ist es, ein Gesamtsystem zu entwickeln, bei dem eine optimale Nährstoffverwertung durch die Pflanzen bei gleichzeitiger Gewährleistung hoher Produktqualität und Hygieneanforderungen erfolgt. Zugleich erlaubt dieses System durch die Wiederverwendung von Abwasser und dessen Kreislaufführung eine signifikante Steigerung der Wasserressourceneffizienz. Dazu müssen siedlungswasserwirtschaftliche und pflanzenbauliche Aspekte aufeinander abgestimmt werden, was in einem modularen Technikkonzept eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten eröffnet.

Da die Pilotierungsergebnisse auf gesellschaftliche Rahmenbedingungen treffen, befasst sich das Projekt ebenso mit notwendigen Akteuren und ihren Kooperationen, lokalen Problemstellungen und Lösungsansätzen. Ebenfalls Teil der adressierten Governance-Fragestellungen sind beeinflussende Faktoren für die Realisierbarkeit des Transformationsprozesses. Darunter fallen rechtliche, marktwirtschaftliche, organisatorische und soziale Entscheidungsbedingungen.

Die erarbeiteten Konzepte werden zusätzlich in ausgewählten europäischen Fallstudien auf mögliche standortabhängige Anwendungsgebiete bezogen. Diese sollen zusammen mit einer Wirkungsabschätzung dazu beitragen, die Marktbereitung für einen wasser- und nährstoffeffizienten Pflanzenbau in hydroponischen Systemen zu erleichtern.

Parallel werden die Arbeiten und Ergebnisse mit Kläranlagenbetreibern, Landwirten, Gartenbauern, landwirtschaftlichen Beratern, Ingenieurbüros, Umwelt- und Verbraucherschützern, sowie Behördenvertretern und Entscheidungsträgern unterschiedlicher Ebenen in einem Stakeholderdialog diskutiert und weiterentwickelt. Dieser Dialog leitet gemeinsam mit den Fallstudien die Ergebnisverwertung ein.

#### Zwischenergebnisse

Ein großer Fokus der HypoWave-Forschung lag in den letzten Monaten auf der Konzeptionierung, Erstellung und Erprobung der Pilotierungsanlage. Im Februar 2017 begann der Aufbau, ab Mai 2017 konnten sämtliche Anlagenkompartimente in Betrieb genommen und ein geordneter Versuchsbetrieb gestartet werden.

Im ersten Pilotierungsjahr wurde der Frage nachgegangen, inwiefern das aufbereitete Abwasser ausreichend Nährstoffe für ein gutes Wachstum des Salats liefert. Dafür wurde die Anlage im Durchlaufverfahren betrieben. Den hydroponischen Linien wurde durch das modulare Technikkonzept unterschiedlich aufbereitetes Abwasser (aerob/anaerob, zusätzliche Behandlung mittels Aktivkohlebiofilter bzw. Ozon) zugeführt. Als Versuchspflanze wurde Kopfsalat ausgewählt, der im September 2017 trotz eines gemäß gängiger pflanzenbaulicher Praxis vergleichsweise geringen Nährstoffdargebots in handelsüblicher Kopfgröße geerntet werden konnte.

Im Rahmen der Stakeholderbeteiligung und der Governance-Forschung konnten in zahlreichen Expertengesprächen und zwei Stakeholderworkshops mögliche Betreiber und deren Kooperationsbedarfe bspw. mit Beratern und Investoren wie auch sektorenübergreifende Kooperationen (z.B. mit dem Handel) identifiziert werden. In ihrer Verknüpfung eröffneten das Dialogformat und die Expertengespräche die Gelegenheit, die Innovation einerseits schon während des Forschungsprozesses einer Fach- und Teilöffentlichkeit zu präsentieren, andererseits aber wichtige Hinweise, weiterführende Fragestellungen und praxisrelevante Lösungsanregungen der Teilnehmenden aufzunehmen.

Im November 2017 startete die erste der Fallstudien in der Region Wolfsburg.

#### Ausblick

Über den Winter 2017/2018 laufen nun die detaillierten Ergebnisauswertungen der siedlungswasserwirtschaftlichen und pflanzenbaulichen Daten. Außerdem findet aktuell die Planung der kommenden Vegetationsperiode mit einer Modifikation einzelner Linien zu einer Kreislaufführung des Bewässerungswassers statt. Im Jahr 2018 werden zudem die drei weiteren Fallstudien im Hessischen Ried, im Dreiländereck (DE-BE-NL) und im portugiesischen Évora ebenso wie ein weiterer Stakeholderworkshop durchgeführt. Mit der wachsenden Datenbasis wird die Wirkungsabschätzung beginnen.

## EPoNa

### Ertüchtigung von Abwasser-Ponds zur Erzeugung von Bewässerungswasser am Beispiel des Cuvelai-Etoshia-Basins in Namibia



#### KOORDINATION

Technische Universität Darmstadt  
 Prof. Dr. Susanne Lackner  
 Tel.: +49 6151 16 20301  
 E-Mail: [s.lackner@iwar.tu-darmstadt.de](mailto:s.lackner@iwar.tu-darmstadt.de)  
[www.epona-africa.com](http://www.epona-africa.com)

#### Projektziele

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Demonstration eines Konzeptes zur beispielhaften Sanierung, Erweiterung und Ertüchtigung einer Teichanlage durch Kombination mit vor- und nachgeschalteten technischen Maßnahmen hin zu einer Produktionsanlage für Bewässerungswasser sowie die Untersuchung unterschiedlicher Bewässerungstechniken und Bepflanzungen für aride sandige Standorte, die jährlich einmal überflutet werden. Die ganzjährige Erzeugung von Futtermitteln für die Viehhaltung ist für Projektregion nicht nur wirtschaftlich, sondern auch soziokulturell von hoher Bedeutung. Des Weiteren können durch adäquate Wasserbehandlung und -wiederverwendung Verunreinigungen bei Überflutungsereignissen verringert, die Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung gesenkt und die Methanemissionen reduziert werden. Dabei gilt es, einen nachhaltigen Betrieb der Abwasserreinigung und Bewässerung durch Aus- und Weiterbildung sowie durch die Etablierung von Managementstrukturen zu sichern. Darüber hinaus wird eine weitere Ergebnisverwertung durch die deutsche Wirtschaft und lokale Betreiber in anderen Städten Namibias und weltweit unterstützt.

#### Zwischenergebnisse

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde die bestehende „Evaporation“-Anlage in Outapi vermessen und die anfallenden Abwassermengen während verschiedener Jahreszeiten ermittelt. Diese Daten sowie die Ergebnisse der Analysen zur Wasserqualität dienten als Grundlage für die Planung der Versuchsanlagen.

Zur Vorbehandlung des Abwassers werden parallel eine anaerob betriebene Vorklärung mit integrierter Schlammfäulung und ein Mikrosieb mit 250 µm Maschenweite untersucht. Die Abtrennung eines Großteils der Feststoffe und somit auch bis zu 50 % des CSB ist ein wesentlicher Schritt zur Kapazitätserweiterung der Teiche und somit zur Verbesserung der Ablaufqualität. Nach Erstellung der Detailplanung wurden die Bauarbeiten an ein namibisches Bauunternehmen vergeben und befinden sich aktuell in der Ausführung. Die Planung und Beschaffung der Maschinenteknik erfolgte parallel hierzu in Deutschland und Anfang 2018 konnte das Material nach Namibia verschifft werden.

Darüber hinaus werden verschiedene technische Möglichkeiten für die hydraulische Führung und die Nachbehandlung verglichen. Die Strömungsführung im Fakultativteich erfolgt zukünftig durch schwimmende Leitwände und die Nachbehandlung durch einen Grobsteinfilter im letzten Schönungsteich. Dies ermöglicht die Behandlung des gesamten Wasserstroms der ertüchtigten Straße, und nicht, wie zunächst vorgehen, nur eines Teilstroms.

In Feldversuchen wird die Eignung von verschiedenen Bewässerungstechniken und Kultursysteme untersucht. Hierfür ermöglichte die Analyse des lokalen Marktes nach Saatgut, Pflanzen und Bewässerungsmaterial die weitere Planung. Gleichzeitig wurde die Trockenzeit in 2017 genutzt, um den Schlamm in den Teichen zu trocknen und zu räumen. Durch die Untersuchung von Schlammproben konnte die Eignung als Dünger bestätigt werden.

Auf Basis der erarbeiteten Umweltverträglichkeitsprüfung stellte die namibische Umweltbehörde die Baugenehmigung aus. Neben der Zusammenarbeit mit den Ministerien auf nationaler Ebene wurden durch Workshops die Nachbarkommunen über das Projekt informiert und Möglichkeiten der Zusammenarbeit in Form einer Kläranlagennachbarschaft untersucht.

#### Ausblick

Nach Fertigstellung der Baumaßnahmen und Installation der Vor-, Nachbehandlung und der Leitwände, wird die ertüchtigte Anlage im Juli 2018 in Betrieb gehen. Die Untersuchungen zur Wasserqualität und die Auswertung der Betriebsparameter dienen zur Erarbeitung von Anpassungsmöglichkeiten und somit zur Verbesserung des Bewässerungswassers. Parallel dazu werden Managementstrukturen entwickelt und die Kläranlagennachbarschaft formalisiert. Die Ausbildung und Schulung von Betreibern findet auf der Anlage gemeinsam durch die verschiedenen Projektpartner statt. Im Rahmen der Untersuchungen zur Ökonomie erfolgt sowohl eine betriebs- als auch eine volkswirtschaftliche Bewertung der Kosten und Nutzen. Dies wird durch eine Abschätzung der Folgen für Gesellschaft und Natur in der Region ergänzt und darüber hinaus die Transferpotenziale in andere Kommunen und Regionen Namibias sowie Nachbarländer untersucht.



## WavE-Verbundprojekte

Themenfeld: Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser



- ▶ **REMEMBER:** Ressourcen- und energieeffiziente Wasser-Membranfiltration mittels Dielektrophorese
- ▶ **WaKap:** Modulares Konzept zur nachhaltigen Wasserentsalzung mittels kapazitiver Entionisierung am Beispiel Vietnam

## REMEMBER

### Ressourcen und Energie-Effiziente Wasser-Membranfiltration mittels Dielektrophorese



#### KOORDINATION

Martin Membrane Systems AG  
Daniel Crawford, Felix Baranyai  
Tel.: +49 38874/43261-11  
E-Mail: felix-baranyai@martin-membrane.com  
[www.remember-projekt.de](http://www.remember-projekt.de)

#### Projektziele

In der Membranfiltration (z.B. in Tauchmodulen zur Wasseraufbereitung) bildet sich während des Filtrationsprozesses eine Deckschicht auf dem Filtermodul. Diese führt zwangsläufig zu einer Reduktion des Durchflusses mit zunehmender Zeit. Ziel des Projekts ist es diese unerwünschte Deckschichtbildung durch den Effekt der Dielektrophorese (DEP) zu unterdrücken und damit die Standzeit des Membranmoduls zu verlängern. Dafür werden Elektroden per Siebdruckverfahren auf der Membran aufgebracht und über ein Plasmaverfahren dielektrisch verkapselt, was ihre Stabilität erhöht. Die dielektrische Verkapselung führt allerdings auch zu einer Reduktion des DEP-Effekts, sodass eine optimale Dicke der Verkapselung gefunden werden muss. Durch das Siebdruckverfahren lassen sich geringe Elektrodenbreiten und -abstände realisieren, was, im Vergleich zu früheren Untersuchungen, eine Arbeit mit sehr geringen Spannungen erlaubt.

#### Zwischenergebnisse

Die optimalen Elektrodenkonfigurationen wurden durch Simulationen und Druckversuchen auf Glas ermittelt. Durch den Einsatz eines herkömmlichen Auflichtmikroskops und 15 µm Polymerpartikeln ließ sich sehr Eindrucksvoll der Effekt der Dielektrophorese zur Anhebung der Partikel von Glassubstraten zeigen.

Für das Siebdruckverfahren wurde eine Kombination aus Sieb, Paste und Substrat ermittelt, die es erlaubt, reproduzierbar Elektroden von 75 µm Breite auf den Membranen zu drucken. Es wurde ein Siebdesign zur vollflächigen Bedruckung von kommerziell erhältlichen Membranmodulen von Martin Membrane Systems entworfen. Mit diesem Design wurden 10 Membranmodulen mit aufgebrauchten Elektroden hergestellt.

Es wurde ein Versuchsstand zur Messung von Druckverlust und Durchfluss des Filtrationsprozesses mit den Membranmodulen entwickelt, der es erlaubt, das Fouling auf verkürzten Zeitskalen zu emulieren. Hierzu wird zurzeit Töpferton bei einer Konzentration von 8 g/L als Suspension eingesetzt. Mit dem Versuchsstand wurden vorläufig bedruckte Module getestet und der positive Effekt der Dielektrophorese auf die Membranstandzeit konnte grundsätzlich nachgewiesen werden.

Die dielektrische Verkapselung wurde zunächst unter Einsatz von Glassubstraten erprobt. Hierbei muss nicht auf ein zielgerichtetes Aufbringen der Verkapselung auf die Elektroden geachtet werden, da keine Membranfläche blockiert wird. Gleichzeitig wird ein System zur zielgerichteten Aufbringung der Verkapselung entwickelt um beim Einsatz an Elektroden auf Membranen ein Verblocken der Membranporen zu vermeiden.

#### Ausblick

Die vollflächig bedruckten Membranmodule (10 Stück) sollen einem Funktionstest unterzogen werden. Hierbei wird bei einer Parameterstudie der Einfluss von Frequenz und angelegter Spannung auf die Foulingunterdrückung beim Einsatz verschiedener Ausgangssuspensionen und Konzentrationen untersucht.

Der Siebdruckprozess soll zugunsten dünnerer Linienbreiten und geringerer Linienabstände optimiert werden. Diese soll mit einem positiven Effekt auf die Foulingunterdrückung verknüpft werden (gleiche Foulingunterdrückung bei geringerer angelegter Spannung). Anschließend ließe sich der Prozess im gesamten Parameterraum (Frequenz, Spannung, Elektrodengeometrie, Partikelsuspension) beschreiben.

Der Einfluss der Dicke der Verkapselung auf den DEP-Effekt soll zuerst mit Glassubstraten und Beobachtung der Bewegung von Einzelpartikeln unter dem Mikroskop untersucht werden. Anschließend soll die Verkapselung an Membranmodulen erprobt werden. Hierzu muss ihr Einfluss auf die Haltbarkeit der Elektroden und ihr negativer Effekt auf die benötigte Spannung untersucht werden.

Nach Ermittlung des Einflusses der Betriebs- und Elektrodenparameter auf die Foulingunterdrückung soll eine Testanlage zur Filtration von 1 m<sup>3</sup>/d ausgelegt und umgesetzt werden. Diese wird mit DEP-Modulen und mit herkömmlichen Modulen betrieben und die Standzeit verglichen.

## WaKaP

### Modulares Konzept zur nachhaltigen Wasserentsalzung mittels Kapazitiver Deionisierung am Beispiel Vietnam



#### KOORDINATION

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Prof. Dr. Jan Hoinkis  
Tel.: +49 721 925-1372  
E-Mail: jan.hoinkis@hs-karlsruhe.de  
[www.wakap.de](http://www.wakap.de)

#### Projektziele

Das Ziel des Projekts ist es ein modulares und kosteneffizientes Konzept zur nachhaltigen Wasserentsalzung und Arsenentfernung in Vietnam zu entwickeln.

Durch die Kombination von kapazitiver Deionisierung mit Membranen (MCDI) und Umkehrosmose (UO) soll im Vergleich zu bestehenden Entsalzungsverfahren der Energieverbrauch deutlich reduziert und die Menge an produziertem Trinkwasser erhöht werden. Zudem ist für arsenhaltiges Grundwasser eine in situ Behandlung vorgesehen. Mit dieser Technik sollen Arsen-, Eisen-, Mangan- und Ammoniumkonzentrationen unter die WHO-Trinkwasserwerte vermindert werden.

Die Versorgung der Hybridprozesse soll mit regenerativer Energie (Photovoltaik, Wind, TEG) erfolgen, um einen autarken und dezentralen Betrieb der Anlagen (ohne Netzanbindung) zu ermöglichen. Gesteuert und überwacht wird das Gesamtprojekt mit einem Smart Sensor System und einer IoT-Anwendung.

#### Zwischenergebnisse

Die erste Pilotanlage zur in situ Arsenaufbereitung für den Standort „Pagoda“ in Cho Vam in der Provinz An Giang konnte im Juni 2017 in Betrieb genommen werden und hat bis heute gute Ergebnisse geliefert. Hierbei handelt es sich um in situ Verfahren zur Arsenentfernung, welches auf der unterirdischen Oxidation von Eisen durch die Sauerstoffanreicherung in den Grundwasserleiter und die anschließende Adsorption von Arsen an den gebildeten Eisenoxiden beruht. Die Arsenkonzentrationen am Pilotierungsstandort lagen zu Beginn des Aufbereitungsprozesses bei etwa 90 µg As/l und somit um das 9-fache oberhalb des WHO-Grenzwerts von 10 µg/l. Die Eisenkonzentrationen sind erwartungsgemäß von 9 mg/l im Rohwasser innerhalb weniger Tage bis unter den Trinkwasser-Grenzwert von 0,2 mg/l gefallen. Mit steigender Bildung von Eisenoxide nehmen die verfügbaren Adsorptionsplätze für Arsen zu, wodurch die Effizienz der Arsenentfernung mit der Dauer der Enteisung zunimmt. Dadurch wurde bei der ersten Pilotanlage bereits nach zwei Wochen Betrieb der Trinkwasser-Grenzwert für Arsen (10 µg/l) erreicht und in der Folge sogar deutlich unterschritten.

Hinsichtlich der Ammoniumentfernung konnte ebenfalls ein Erfolg verzeichnet werden. Die Konzentrationen sind in 65 Tagen von  $c > 1$  mg/l unter die Trinkwassergrenze gefallen. Der langsame Oxidationsvorgang von Mangan und das relativ hohe Ammoniumvorkommen zu Beginn des Betriebs, verhindern eine schnelle Entfernung von Mangan. Nach über 5 Monaten wurde zwar der Grenzwert noch nicht unterschritten, jedoch bildet sich ein weiter fallender Trend aus. Somit deutet sich an, dass auch beim Mangan die Unterschreitung der Grenzwerte erreicht werden.

Für den zukünftigen Einsatz eines MCDI-Moduls wurden umfangreiche Labortests durchgeführt. Ein Modellwasser mit einer Konzentration von  $c = 1$  g NaCl/l konnte mit einem spezif. Energieverbrauch von 0,6 kWh/m<sup>3</sup> Diluat auf Trinkwasserniveau aufbereitet werden. Weitere Labortests lassen noch geringere Energiewerte erwarten. Weiterhin wurde das Entfernungspotential der MCDI-Anlage von Ammonium und Arsen untersucht.

Eine computerbasierte Modellierung wurde bisher für einen 1D und eine 2D Fall innerhalb eines Elektrodenpaares des MCDI-Moduls erstellt. Dabei kann der Ionentransport simuliert und somit ein Salzurückhalt berechnet werden.

#### Ausblick

Eine zweite Pilotanlage mit einer größeren Kapazität wird in einem neuen Standort im Mekongdelta ab März 2018 aufgebaut. Hierbei weist das Grundwasser eine erhöhte Arsen- und Salzkonzentration auf. Zusätzlich wird diese Pilotanlage energieautonom mit solarer Energien versorgt werden.

Es folgen weitere Tests mit einem neuartigen MCDI-Modul, welches für deutlich höhere Salzkonzentrationen in Richtung Meerwasserentsalzung ausgelegt ist. Es ist geplant eine Pilotanlage zur küstennahe Trinkwassergewinnung im Spätjahr 2018 in Vung Tau zu installieren.

Das Computermodell wird mit geeigneten Adsorptionsmodellen erweitert und auf ein komplettes Modul hochskaliert werden. Das Modell dient zur späteren Simulation ganzheitlicher Entsalzungssysteme.



## WavE-Verbundprojekte

### Themenfeld: Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser



- ▶ **WaterMiner:** Räumlich-zeitlich abgestimmte Kreislaufführung und Wiederverwendung bergbaulicher Abwässer am Beispiel eines urban geprägten Bergbaugebietes in Vietnam
- ▶ **PAkmem:** Aufbereitung problematischer Prozess- und Abwässer mit keramischen Nanofiltrationsmembranen
- ▶ **WEISS:** Effiziente Kreislaufführung von Kühlwasser durch integrierte Entsalzung am Beispiel der Stahlindustrie
- ▶ **WaRelp:** Water-Reuse in Industrieparks
- ▶ **Re-Salt:** Recycling von industriellen salzhaltigen Prozesswässern
- ▶ **HighCon:** Konzentrate aus der Abwasserwiederverwendung
- ▶ **DiWaL:** Entwicklung eines ressourceneffizienten Wassermanagement- und Anlagenkonzepts für Vorbehandlungs- und Tauchlackieranlagen unter Nutzung der Elektroimpulstechnologie zur Dekontamination von industriellen Wässern und Lacken

## WaterMiner

### Räumlich-zeitlich abgestimmte Kreislaufführung und Wiederverwendung bergbaulicher Abwässer am Beispiel eines urban geprägten Bergbaugebietes

#### Projektziele

Kern des Projektes ist die Entwicklung eines Stoffstrommodells zur Wasserwiederverwendung unter Berücksichtigung von Energieverbrauch, Verwendung von Hilfsstoffen sowie der Entstehung von Schlämmen bei der Wasseraufbereitung. Neben technischen Konzepten werden Umweltwirkungen und der Umweltnutzen sowie die ökonomische Effizienz aus betrieblicher und gesellschaftlicher Sicht betrachtet.

#### Zwischenergebnisse

Folgende Zwischenergebnisse wurden in der bisherigen Projektlaufzeit erzielt:

- ▶ Erfassung der relevanten verfügbaren Daten: Ist-Zustand (Bergbauwässer, bergbauinterner Wasserbedarfe nach Mengen und Qualität, bergbauexterner Wasserbedarfe nach Mengen und Qualität, Funktionsweise der existierenden Wasseraufbereitungen, Wasserqualitäten), Ablauf zukünftiges Bergbaugeschehen (Bergbauwässer, Wasserbedarfe nach Mengen und Qualitäten)
- ▶ Aufbau und Abstimmung des Datenmanagements, der Datenauswertung und der Datenreports
- ▶ Konzeption zusätzlicher Messungen im Gelände, Beschaffung Monitoringequipment: Wasserstände, Wassermengen und Schwebstoffe (Kohlenstaub im Abwasser) in einem Beispielgewässer im Bergbaugebiet
- ▶ Aufbau und Abstimmung dreier Bewertungsmodelle zu zwei Entwässerungsgebieten im Bergbaugebiet: (1) Modelle zur Stoffstromanalyse und zum Stoffstrommanagement (Wasser, Energie, Hilfsstoffe, Schlämme usw.), (2) Modelle zum Oberflächenabfluss und Sedimenttransport, (3) Modelle für die ökonomischen Bewertung

#### Ausblick

Folgende weitere Arbeiten sind vorgesehen:

- ▶ Weitere Anpassung und Kalibrierung der aufgebauten Modelle
- ▶ Definition von Szenarien entsprechend dem geplanten zukünftigen Bergbaugeschehen und dem erwarteten Wasserbedarf nach Mengen und Qualitäten
- ▶ Konzeption und Implementierung von Massnahmen zur Abwasserbehandlung incl. Rückgewinnung von Kohlenstaub
- ▶ Zusammenfassung der Modelle und des Datenmanagements zu einem Gesamtsystem
- ▶ Zusammenfassung der Projektergebnisse zu einem Practice Guide für die räumlich-zeitlich abgestimmte Kreislaufführung und Wiederverwendung bergbaulicher Abwässer

## WaterMiner

#### KOORDINATION

Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Harro Stolpe

Tel.: +49 234 3227995

E-Mail: harro.stolpe@rub.de

[www.ruhr-uni-bochum.de/ecology/forschung/waterminer.html](http://www.ruhr-uni-bochum.de/ecology/forschung/waterminer.html)

# PAkmem

## Effektive Aufbereitung problematischer Prozess- und Abwässer mit keramischen Nanofiltrationsmembranen

### KOORDINATION

akvola Technologies GmbH  
Dr.-Ing. Matan Beery  
Tel.: +49 30 959998950  
E-Mail: beery@akvola.com  
[www.pakmem.de](http://www.pakmem.de)

### Projektziele

Die Zielstellung des PAKmem-Projektes liegt in der anwendungsorientierten Entwicklung von Reinigungs-verfahren für Prozesswässer zur Verbesserung der Reinigungsleistungen und Reduktion des Chemikalienbedarfes in der Öl- und Gasindustrie sowie der Keramikindustrie. Die Verfahrenskombination von Flotation, keramischer Mikrofiltration und Nanofiltration sowie Elektrodialyse und Verdampfung zur Konzentratbehandlung soll die effiziente Kreislaufführung von Prozessabwässern produktionsnah demonstrieren.

### Zwischenergebnisse

Stand der Projektarbeit: Bisher im Projekt sind vor allem AP 1-4 überarbeitet worden.

Das AP 1, „Prozessanalyse“, diente dazu einen Überblick über alle Prozesse der beteiligten Partner zu erarbeiten, anhand dessen die Stoffströme beschrieben und bilanziert werden können. Das Ergebnis war die Erstellung eines Lastenheftes für die zwei Trennaufgaben in den zwei verschiedenen Anwendungen. Diese dienen insbesondere dem IKTS zur Membransynthese und den Partner aktiv in den Trennversuchen eine detaillierte Planung der Versuchsanordnungen zu ermöglichen.

Das AP 2 „Voruntersuchungen und Membrananfertigung“ wurde ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Mehrere Membrangeometrien und -eigenschaften sind für die Untersuchungen ausgewählt worden. Für die Voruntersuchungen wurde das Einkanalrohr (Länge 50 cm, Innendurchmesser 7 mm, Außendurchmesser 10 mm) als Membrangeometrie gewählt. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden 19-Kanalrohre und 163-Kanalrohre mit einer Länge von jeweils 120 cm gewählt. Membranen mit einem Cut-Off von 750 D, 450 D und ca. 200 D (entsprechend Porengrößen von 1,0 nm, 0,9 nm und 0,8 nm) werden für die Versuche gewählt. Neben der Porengröße wird auch das Material der Membranträger variiert, neben hochreinem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird auch Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit einem Zusatz von SiO<sub>2</sub> verwendet. Außerdem sind auch Flachmembranen beschichtet worden.

Das AP 3 „Technikumsversuche“ wurde zum Großteil abgeschlossen. Hier sind geeignete Verfahrensbedingungen für die gewählten Membranen und Technologien gefunden worden. Es sind Wässer aus dem Standort Barnstorf der Firma Wintershall sowie aus der Sanitärkeramikfabrik der Firma Duravit entnommen.

Das AP 4 „Feldversuche“ wurde zum Teil überarbeitet. Eine Versuchsanlage ist bei der Firma Duravit installiert worden. Auf der O&G-Seite gab es bisher keine Möglichkeiten Feldversuche durchzuführen, da Wintershall zurzeit keine Unterbringungsmöglichkeiten für die Feldversuchsanlage vor Ort hat. Aus diesem Grund werden die Versuche in großem Maßstab (220L) vorerst in den Technikumshallen von DBI und akvola durchgeführt. Anfang 2018 ist eine große Abwassermenge von Wintershall abgeholt worden.

### Ausblick

Im Jahr 2018 werden die Pilotanlagen gebaut und montiert. Die Pilotierung vor Ort erfolgt im Jahr 2019.

Im Bereich der **Verwertung** stellt sich die Prozesskombination keramische Flotation-MF-NF als vielversprechendsten vor bzgl. Marktreife und -relevanz. Diese Kombination sollte sich als automatisierte Ex-Anlage auf dem Markt etablieren. Die keramische NF sollten qualitativer und günstiger als zuvor herstellen lassen. Im Rahmen des Projektes wird eine Pilotanlage mit realem Wasser im Feld getestet werden. Die Ergebnisse werden als Proof-of-Concept dienen. Gleichzeitig wird ein Marketingplan für dieses Produkt auf dem Gebiet der Öl- und Gasindustrie entwickelt mit den Zielen:

- ▶ Steigerung des Bekanntheitsgrades
- ▶ Verringerung der Kaufwiderstände
- ▶ Beschleunigung des Verkaufsprozesses
- ▶ Marktanteilgewinnung

Dafür werden die Instrumente verwendet: Networking, Direktansprache, Wissenschaftskommunikation und Produktbroschüre. Insgesamt werden diese Kanäle benutzt: Messen, Tagungen, Fachzeitschriften, Verbände.

## WEISS



### Effiziente Kreislaufführung von Kühlwasser durch integrierte Entsalzung am Beispiel der Stahlindustrie

#### KOORDINATION

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Martin Hubrich

Tel.: +49 211670734

E-Mail: martin.hubrich@bfi.de

[www.bfi.de/de/projekte/weiss-effiziente-kreislauffuehrung-von-kuehlwasser-durch-integrierte-entsalzung-am-beispiel-der-stahlindustrie](http://www.bfi.de/de/projekte/weiss-effiziente-kreislauffuehrung-von-kuehlwasser-durch-integrierte-entsalzung-am-beispiel-der-stahlindustrie)

#### Projektziele

Projektziel ist die Halbierung der Absalzwassermenge von Kühlkreisläufen durch Entfernung von Salzen und Feststoffen im Zuzatzwasser und die bedarfsgerechte Chemikaliendosierung unter Einbeziehung von Simulationstools.

#### Zwischenergebnisse

Im Rahmen von betrieblichen Messungen wurde eine Variation des behandelten Kühlwasservolumens zwischen 11.000 und 21.000 m<sup>3</sup>/Tag ermittelt (AP1). Probenahmen ergaben saisonale Einflüsse auf die Zusammensetzung des Ansetzwassers in Bezug auf die Leitfähigkeit und die biologische Belastung. Zur Ermittlung von Stoffquellen und -senken als Grundlage für die Simulationen (AP4) und das Life Cycle Assessment (AP7) erfolgte eine Bilanzierungsprobenahme. Im Ergebnis stellte die Produktion die Quelle für Stoffeinträge wie Feststoffe und Öl sowie die Aufkonzentrierung von Chloriden, Sulfat und Härtebildnern dar. Stoffsenken für Feststoffe bildeten Kiesfilter (Abscheidegrad: 98,5%), mit nachgeschalteter Schlammentwässerung sowie ein Zyklon zur Ölabtrennung (Abscheidegrad: 93,9%) und die Absalzung des Kühlkreislaufes für Härtebildner bzw. Anionen. Im Rahmen der Entwicklung eines Mess- und Regelungskonzeptes zur Kühlwasserüberwachung und bedarfsgerechten Chemikaliendosierung (AP2) konnte die Anwendbarkeit der BFI online Feststoff-Messung und der zeitnahen Erfassung der biologischen Aktivität mittels ATP-Messung anhand betrieblicher Proben nachgewiesen werden. Die betrieblichen Anforderungen in Bezug auf Messgenauigkeit und Messdauer wurden erfüllt und keine Störeinflüsse der betrieblich verwendeten Kühlwasserbehandlungschemikalien auf die ATP-Messung ermittelt.

Durch Optimierung der Betriebsparameter der Kapazitiven Deionisation (CDI) konnte eine Erhöhung der Reinwasserausbeute auf bis zu 74% bei Abscheidegraden für Chlorid von 98% bzw. für Sulfat von 72% erzielt werden. Die Vorgaben für einen betrieblichen Wiedereinsatz des erzeugten Reinwassers als Ansetzwasser (Leitfähigkeit < 200 µS/cm, Chlorid/Sulfat < 20 mg/L) wurden erfüllt (AP3). Bei der Behandlung von 4000 Litern Kühlwasser mittels CDI konnten keine Störeinflüsse von Kühlwasserinhaltsstoffen festgestellt werden.

Des Weiteren wurden geeignete RO-Membranen ermittelt und die Arbeiten zur Entwicklung von RO-Membranbeschichtungen zur Vermeidung von Scaling und Fouling fortgeführt. In Versuchen zur Einengung der CDI- und RO-Konzentrate wurden eine Evaporation und Hochdruck-Umkehrosiose (HD-RO) eingesetzt. Hierbei konnte bei Verwendung der Evaporation eine Destillatausbeute von 94,6%, bzw. bei Absenkung des pH-Wertes von 95,9% erzielt werden. Das erzeugte Destillat erfüllt die Anforderungen für einen betrieblichen Wiedereinsatz. Der Säurebedarf zur pH-Einstellung betrug bis zu 4 L/m<sup>3</sup>. Bei der Konzentrateinengung mittels Hochdruck-Umkehrosiose sind Permeatausbeuten bis ca. 60% betrieblich sinnvoll, da bei höheren Aufkonzentrierungen Ausfällungen trotz pH-Absenkung und Antiscalant Dosierung auftraten. Die Versuche bildeten die Grundlage zur Auslegung einer HD-RO mit einem Druckbereich bis 80 bar für die betriebliche Erprobung (AP5)

Als Grundlage für die Simulationen der Kühlkreisläufe mittels SIMBA (AP4) wurde ein Stoffstromvektor mit 11 Parametern definiert und das Schema des Kühlkreislaufes abgebildet. Hierfür wurden neue Bibliotheken zur Beschreibung von Kühltürmen und Wärmetauschern entwickelt und mit der Beschreibung der neuen Behandlungsverfahren begonnen.

Im Rahmen der Vorbereitung der betrieblichen Demonstration (AP5) wurden die Detailplanungen der Gesamtversuchsanlage abgeschlossen, mit der Realisierung begonnen sowie die ausgewählten Einzelanlagen beschafft (Pilot CDI: Volumenstrom bis 840 L/h) bzw. gebaut (HD-RO).

Basierend auf weiteren zur Verfügung gestellten und ermittelten Daten wurde die LCA-Beschreibung der Ausgangssituation fortgesetzt (AP7).

#### Ausblick

Die Fertigstellung und Installation der Gesamtversuchsanlage an einem ausgewählten betrieblichen Kühlwasserkreislauf bei den Deutschen Edelstahlwerken in Hagen erfolgt bis Ende März 2018. Hieran schließt sich die betriebliche Erprobung an.

# WaRelp



## KOORDINATION

TU Darmstadt  
Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Linke  
Tel.: +49 6151 16-21964  
E-Mail: linke@geod.tu-darmstadt.de  
[www.wareip.de](http://www.wareip.de)

## Water-Reuse in Industrieparks

### Projektziele

Eine nachhaltige Wasserversorgung ist für Betreiber industrieller Produktionsanlagen essentiell; insbesondere solcher mit hohem Wasserbedarf, wie der chemisch-pharmazeutischen Industrie. U.a. aus den Sustainable Development Goals (SDGs) entsteht die Forderung, den extern zu deckenden Wasserbedarf durch entsprechende inner- und zwischenbetriebliche Kreislaufführung zu senken.

Das Verbundprojekt WaRelp will die in einem Industriepark anfallenden Abwässer über kaskadenartig geschaltete Behandlungsstufen bedarfsorientiert und unter Berücksichtigung technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte aufbereiten, d.h. nur in dem Umfang, wie Brauchwasser einer bestimmten Qualität in einer anderen Produktionsanlage oder für weitere Nutzungszwecke z.B. Bewässerung benötigt wird. Um im gegebenen Einzelfall die geeignetsten Behandlungsverfahren einzusetzen, erfolgt die Entwicklung eines Tools zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Weiterhin werden Lösungen für die bei der komplexer werdenden Prozesssteuerung steigenden Anforderungen an Mitarbeiter entwickelt.

Neben dem konzeptionellen Ansatz des Water-Reuse in Industrieparks werden Behandlungsansätze in den Bereichen „Nutzung der Salzbiologie zum verbesserten Abbau“, „Elimination von refraktärem CSB in der Deckschicht einer Membran“ sowie „Anwendung von Entsalzungsverfahren im elektrischen Feld“ in Versuchsanlagen untersucht und anschließend in das Konzept integriert.

### Zwischenergebnisse

Das Forschungsprojekt hat den Entwurf eines Abwassermanagementkonzepts mit integriertem Leitungs- und Messkonzept mit dem Schwerpunkt auf „Water-Reuse“ entwickelt. Um ein hohes Anwendungspotenzial in wasserarme Regionen zu erreichen, zielt das Konzept auf einen hohen „Reuse-Faktor“ ab. Für den Entwurf wurden drei unterschiedliche Ausgangssituationen herangezogen, die durch Untersuchungen von Industrieparks in China, Vietnam und Deutschland detailliert werden konnten. Die Abwässer aus verschiedenen Produktionsanlagen werden dort zumeist ohne Reuse-Ansätze in einer sich im Industriepark befindlichen zentralen Kläranlage behandelt. Die zentrale Wasseraufbereitungsanlage bezieht Grund-, Leitungs- oder Oberflächenwasser für die Wasserversorgung und stellt in der Regel drei Wasserqualitäten (Trinkwasser, Brauchwasser und VE-Wasser), im Einzelfall aber bis zu neun Qualitäten zur Verfügung.

Das zwei Ansätze beinhaltende Konzept knüpft an die o.a. Ausgangssituation von Kläranlagen an, ermöglicht aber die Bereitstellung von Reuse Water über ein Water-Reuse Plant (WRP). Im Ansatz 1 werden die Abwässer der Produktionsanlagen in einem einzigen Kanal den verschiedenen Behandlungsstufen der Kläranlage zugeleitet, wobei bei stark belasteten Abwässern eine Vorbehandlung bei den Produktionsanlagen erfolgt. Von der Kläranlage wird das gereinigte Abwasser dann dem WRP zugeleitet, wo es je nach seiner späteren Verwendung zusätzlich in verschiedenen Behandlungsstufen, z.B. für Bewässerung, Straßenreinigung, Toilettenspülung, Prozesswasser, Kühlwasser usw., aufbereitet wird. Im Ansatz 2 werden die Abwässer aus mehreren Produktionsanlagen in parallelen Kanälen der Kläranlage zugeleitet, wo sie je nach Qualitätsstufe mit verschiedenen Behandlungsverfahren aufbereitet werden. Die unterschiedlichen Behandlungsverfahren für die unterschiedlichen Abwasserströme ermöglichen eine Wasseraufbereitung und -bereitstellung nach dem Prinzip „fit for purpose“. Von der Kläranlage wird das Wasser wie in Ansatz 1 dem WRP zugeführt. Für das Tool zur Entscheidungsunterstützung wurde eine Datenbank entwickelt, in die die erzielten Forschungsergebnisse derzeit eingepflegt werden. Die bisher in den Teilprojekten mit synthetischen Abwässern durchgeführten Versuche bestätigen die Geeignetheit der gewählten Ansätze.

### Ausblick

Zur Erprobung des Konzepts wird ein Modellindustriepark (MIP) mit Leitungs- und Messkonzepten abgeleitet, der die Variation unterschiedlicher Produktionsanlagen und Aufbereitungstechniken mit dem Ziel eines möglichst hohen Reuse-Faktors erlaubt. Hierdurch können unterschiedliche Situationen, wie die Neuentwicklung oder die Veränderung bestehender Industrieparks, bezogen auf Wasserverfügbarkeit und Zusammensetzung von Produktionsanlagen simuliert werden. Die multikriterielle Entscheidungsunterstützung dient hierbei zur Identifizierung der geeigneten Behandlungstechniken. Aus den experimentell ausgerichteten Teilprojekten werden neue Behandlungstechniken abgeleitet und ergänzt.

## Re-Salt

### Recycling von industriellen salzhaltigen Prozesswässern



#### KOORDINATION

Covestro Deutschland AG  
Dr. Yuliya Schießler  
Tel.: +49 214 6009 5461  
E-Mail: [yuliya.schiessler@covestro.com](mailto:yuliya.schiessler@covestro.com)  
<http://resalt.web.th-koeln.de>

#### Projektziele

Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Wiedergewinnung des in industriellen Prozesswasserströmen enthaltenen Salzes (NaCl) und dessen Rückführung als Rohstoff in die Chlor-Alkali-Elektrolyse sowie der Weiterverwertung des anfallenden Wassers. Das Projekt umfasst folgende Schritte:

- ▶ Entwicklung der Spurenstoffanalytik in stark salzhaltigen Lösungen
- ▶ Reinigung der salzhaltigen Prozesswasserströme durch angepasste adsorptive und elektrochemische Verfahren
- ▶ Aufkonzentrierung der salzhaltigen Lösungen mittels innovativer und umweltfreundlicher Verfahren (u. a. unter Verwendung von Abwärme auf niedrigem Energieniveau)
- ▶ Prüfung der Nutzung der gewonnenen gereinigten und aufkonzentrierten Prozesswasserströme in der Chlor-Alkali-Elektrolyse

#### Zwischenergebnisse

Zur Analytik organischer Verbindungen in stark salzhaltigen Matrices (NaCl-Gehalte bis über 200 g/L) wurden im Projekt mehrere methodische Ansätze bei **TZW** getestet. Über die Vorversuche und neue Entwicklungen konnten verschiedene analytische Verfahren etabliert werden, über die nun der Erfolg der Aufbereitungsverfahren in den anderen Arbeitspaketen beurteilt werden kann.

An der **Universität Duisburg Essen (MVT)** konnte ein Verfahren etablieren, mit dem es gelingt, von **Donau Carbon** gelieferte Basiskohlen in einem Labor-Drehrohrföfen reproduzierbar mit hohen Iodzahlen (CEFIC > 1.000 mg/g) zu aktivieren und mit Oberflächengruppen zu funktionalisieren. Derzeit werden diese Aktivkohlen (AK) im Hinblick auf ihre Adsorptionsleistung für die Zielparameter und die entstandenen Oberflächengruppen charakterisiert.

Mit Hilfe der am **DFI** entwickelten Filterpresszellen werden die Adsorptions- und Desorptionseigenschaften von organischen Verunreinigungen in Gegenwart von Natriumchlorid als Leitsalz untersucht. Eine leicht erhöhte Adsorptionskapazität der Kohle durch elektrochemische Polarisierung wird beobachtet. Um Hinweise zu erlangen, ob eine Polarisierung die Oberflächenstruktur der Aktivkohle verändert, werden Vergleichsversuche durchgeführt.

Auf der Basis der erfolgten Prozesswasseranalysen fand an der **TH Köln** eine Auswahl marktgängiger Hochdruckumkehrumkehrosomose-Elemente statt. Um diese auf Eignung zu testen, wurde ein standardisiertes Versuchsprogramm entwickelt, um systematisch den Einfluss folgender Aspekte zu untersuchen: mechanische Beständigkeit, Verhalten bei Langzeitbelastung sowie die Identifikation leistungslimitierender Faktoren.

Für die Demonstrationsanlage wurden in verschiedenen Gesprächen zwischen **Covestro und EnviroChemie** das Anforderungsprofil und die Schnittstellen der Anlage festgelegt. Zurzeit erfolgt die Detailplanung der Demonstrationsanlage. Nach verfahrenstechnischen Änderungen, Ergänzungen und Verbesserungen an der Anlage werden mögliche Lieferanten von Komponenten konkret angefragt. Dabei erfordert die Werkstoffauswahl der Komponenten eine intensive Kommunikation mit den Lieferanten.

Ebenfalls mit Projektstart begann die **Öffentlichkeitsarbeit**. Re-Salt wurde auf der eigenen Webseite, mehreren Pressemitteilungen und mehreren Veranstaltungen vorgestellt.

Besonders hervorzuheben ist das Fachseminar „Recycling von salzhaltigen Prozesswässern“ am 21. März 2018 im NETZ – NanoEnergieTechnikZentrum am Campus Duisburg der Universität Duisburg-Essen. Es verfolgt das Ziel, den wissenschaftlichen Austausch in einem kompetenten Umfeld mit Teilnehmern aus Forschung und Industrie zu ermöglichen und zugleich aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Vorhaben vorzustellen. Neben Vertretern aus der Industrie werden auch wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus dem Projekt ihre aktuellen Forschungsergebnisse vorstellen.

#### Ausblick

Die Aussichten auf die Erreichung der Ziele haben sich in Wesentlichen nicht geändert.

## HighCon

### Konzentrate aus der Abwasserwiederverwendung



#### KOORDINATION

Technische Universität Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen  
Tel.: +49 30 314-22905  
E-Mail: [sven.geissen@tu-berlin.de](mailto:sven.geissen@tu-berlin.de)  
[www.highcon.de](http://www.highcon.de)

#### Projektziele

Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung von innovativen, mehrstufigen und selektiven Prozessen zur Wiederverwendung von industriellem Abwasser bis hin zur Verwertung der Konzentratinhaltsstoffe. Basierend auf den Anforderungen ausgewählter Industriebranchen werden innovative Technologien wie die Membrandestillation, selektive Niedertemperatur-Destillation-Kristallisation und die Elektrodialyse Metathesis weiterentwickelt und an spezifische Anwendungen angepasst. Ein Simulationswerkzeug soll die komplexen Zusammenhänge von den Rohwasserströmen bis zur Konzentratverwertung abbilden und die Nachhaltigkeit bewerten; damit wird erstmalig eine ganzheitliche Optimierung der Wasserwiederverwendung möglich.

#### Zwischenergebnisse

Aufbauend auf den Stoffstromanalysen an den HighCon-Anwendungsstandorten wurden verschiedene Verfahrensverschaltungen aus den HighCon-Technologien entwickelt und im Technikumsmaßstab untersucht. Die Abbaubarkeit von Abwasserinhaltsstoffen stellt für die gesamte Prozesskette eine wesentliche Herausforderung dar, da die im Konzentrat verbleibenden organischen Komponenten bei der weiteren Aufbereitung hinderlich sind – vor allem mit Hinblick auf die Rückgewinnung von Salzen.

Zur Abtrennung des DOC von Salzen aus RO-Konzentraten wurden für die NF zunächst Membranscreenings im Labor durchgeführt, um die beste Membran für eine Salz-DOC-Trennung zu identifizieren. Die Auftrennung von organischen Komponenten und einwertigen Ionen ist grundsätzlich sehr gut umzusetzen. Die mit einwertigen angereicherten Permeate wurden in weiteren Versuchen zur Salzurückgewinnung mittels HighCon-Technologien eingesetzt. Die NF-Konzentrate – hochkonzentrierte Gemische aus mehrwertigen Ionen und Organik, die in dieser Form nicht weiterverwendet werden können – wurden anschließend mit dem Ziel behandelt, den DOC aus dem Salz-Organik Gemisch zu entfernen. Hierzu wurden die Verfahren der Aktivkohleadsorption, der Flockung-Fällung und der Elektrolyse vergleichend getestet. Die Auswertung der Ergebnisse dauert noch an, es zeichnet sich aber ab, dass mit der Aktivkohle und der Elektrolyse der DOC entfernt werden kann, mit der Flockung-Fällung jedoch vornehmlich nur eine Entfärbung gelingt.

Durch die Optische Kohärenz Tomografie wird eine Visualisierung von Fouling und im speziellen auch Scaling ermöglicht. Durch eine optimierte und im speziellen angepasste Bildverarbeitung ist es gelungen, Deckschichten quantifizierbar zu machen. Erste Ergebnisse zeigen, dass Fouling in Membrandestillation (MD) Systemen aller Wahrscheinlichkeit nach nicht Spacer-induziert ist und eine kritische Foulingrate existiert, bei der sich die Prozessleistung signifikant verschlechtert.

Die FeedGap-AirGap-Modulkonfiguration, die für die weitere Anreicherung von hochkonzentrierten Salzlösungen mit der MD entscheidende Vorteile bietet, kann nun simuliert werden. Zur Verifizierung des Simulationsmodells wird ein Teststand für die Vermessung dieses Moduls aufgebaut.

Im Bereich der Elektrodialyse wurde ein Bilanzierungswerkzeug entwickelt, um die Prozessvarianten der Elektrodialyse Metathesis (EDM) analysieren zu können. Aus dieser Analyse und einer neuen Methode zur ionenselektiven Messung der Membranleitfähigkeit wird ein neuer EDM-Modulaufbau abgeleitet, welcher umgesetzt und getestet wird. Bislang konnte ein EDM-Prozess mit Natriumchlorid-Zugabe erfolgreich getestet werden.

Für die Mehrfacheffekt-Feuchtluftdestillation (MEF) wurde ein erster Versuchsträger für einen alternativen, reinigbaren Befeuchter konzipiert und im Labor Maßstab getestet. Basierend auf diesen Tests wird ein Kühlturm mit diesen Befeuchtern in die bestehende Technikumsanlage integriert um erste Erfahrungen zu sammeln.

#### Ausblick

Die Prozessvarianten werden nun im Rahmen einer Demonstration an den Anwendungsstandorten untersucht. Die Ergebnisse dienen nicht nur der Technologie- und Prozessoptimierung, die gewonnenen Daten werden auch in ein Life Cycle Assessment sowie den Aufbau eines Simulationswerkzeuges zur ganzheitlichen Abbildung der Wasserwiederverwendung einfließen. Langfristig müssen für die ganzheitliche Optimierung des Recyclingwasser- und Konzentratmanagements auch die durch refraktäre Organik entstehenden Rückkopplungen berücksichtigt werden.

## DiWaL

### Entwicklung eines ressourceneffizienten Wassermanagement- und Anlagenkonzepts für Vorbehandlungs- und Tauchlackieranlagen unter Nutzung der Elektroimpulstechnologie zur Dekontamination von industriellen Wässern und Lacken



#### KOORDINATION

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Dr.-Ing. Wolfgang Frey  
Tel.: +49 721 6082 2453  
E-Mail: wolfgang.frey@kit.edu  
[www.ihm.kit.edu/725.php](http://www.ihm.kit.edu/725.php)

#### Projektziele

In Prozessen der wasserbasierten Elektrotauchlackierung durchlaufen Lackiergüter zur Reinigung, Vorbehandlung und zum Aufbringen einer Korrosionsschutzschicht zahlreiche großvolumige Bäder, bevor sie abschließend die optisch ansprechende Decklackschicht erhalten. Übergeordnetes Projektziel ist es die Kreislaufführung von Prozesswasser in der industriellen Elektrotauchlackierung zu verbessern. Ein zentraler Ansatz zielt dabei auf die Inaktivierung von Bakterien, deren Wachstum in den verwendeten Wässern und Lacken bislang im Wesentlichen durch die Zugabe von Bioziden und den Verwurf von Prozesswasser eingeschränkt wird. Im Projektverbund wird ein neuartiges, rein physikalisches Verfahren auf Basis der Elektroimpulstechnologie eingesetzt, mit dem das Keimwachstum in industriellen Wässern und Lacken möglichst ohne weiteren Biozideinsatz verhindert werden soll.

Bei der Elektroimpulsbehandlung wird die zu entkeimende Flüssigkeit über zwei Elektroden mit kurzen Hochspannungsimpulsen beaufschlagt. Die so im zu entkeimenden Medium erzeugte elektrische Feldstärke lädt die Membranen der Mikroorganismen auf. In Folge kommt es zur Permeabilisierung, zur sogenannten Elektroporation der Zellmembran. Die Zelle kann mit stark permeabilisierter Zellmembran ihre Lebensfunktionen nicht aufrechterhalten und stirbt ab.

Für einen industriellen Einsatz dieser Technik in der Automobilserienlackierung und in der Elektrotauchlackierung von Allgemeingütern wird im Projektverlauf zunächst der Verkeimungsstatus industrieller Anlagen bestimmt. Dazu werden moderne molekularbiologische Detektionsmethoden weiterentwickelt und im Speziellen auf die Medien in der Elektrotauchlackierung angepasst. Ziel der Ermittlung der Verkeimungslage ist es, maßgebliche Rekontaminationsquellen zu identifizieren und wirkungsvolle Einsatzpunkte einer Elektroimpulsentkeimung zu bestimmen.

Parallel zu den mikrobiologischen Arbeiten erfolgt der Aufbau einer Elektroimpulsanlage für den späteren Demoeinsatz in der industriellen Elektrotauchlackierung. Im Gegensatz zu existierenden konventionellen Elektroimpulsanlagen, die Impulse - plasmaphysikalisch anspruchsvoll - mit Gasentladungsschaltern auslösen, wird im Projekt ein wartungsfreier und bedienerfreundlicher 30 kV/40 kW Impulserzeuger auf der Basis moderner Halbleitertechnik für die Impulsparametererfordernisse einer Entkeimung in der Elektrotauchlackierung entwickelt und aufgebaut. In vorangestellten Laboruntersuchungen wird der Impulsparameterbereich bestimmt, innerhalb dessen keine Beeinträchtigung der Elektrotauchlackqualität bei gleichzeitig hoher Inaktivierungsleistung gegeben ist.

Ergebnisse aus begleitenden Stakeholderanalysen fließen in die Anlagenentwicklung ein. Begleitende Nachhaltigkeitsuntersuchungen bewerten die neue Technik aus ökologischer Sicht.

Im Projektverbund arbeiten BMW, Eisenmann, FreiLacke, PPG, die Hochschule Pforzheim und das KIT zusammen.

#### Zwischenergebnisse

Als wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Elektroimpulstechnologie konnte in Laborversuchen ein Impulsparameterbereich identifiziert werden, innerhalb dessen die Elektroimpulsbehandlung von anodischem Tauchlack ohne Beeinträchtigung der Lackqualität erfolgen kann. Die Elektroimpulsbehandlung verkeimter Prozesswasserproben aus der Automobilserienlackierung ergab eine Inaktivierungsleistung von 4 Log-Stufen und mehr.

Mittels Kultivierung und DNA basierter Analytik wurde das Keimspektrum in einer Anlage zur Automobilserienlackierung bestimmt. Keimidentifizierung erfolgte über 16S-PCR, Sequenzierung und Datenbankabgleich. Die Analyse des Keimspektrums zeigte eine hohe Diversität in den frühen Vorbehandlungszonen. Hohe Keimbelastungen waren in den Spülzonen nach der Tauchlackierung festzustellen. Haupteintragswege und dominante Keime wurden identifiziert.

Im Rahmen des Aufbaus eines modularen halbleiterschalteten 30 kV Impulsgenerators für den späteren Demobetrieb ist die Einzelmodulentwicklung abgeschlossen. Derzeit befindet sich eine 8 kV-Version in der Erprobungsphase.

#### Ausblick

Mit der Feststellung eines rückwirkungsfreien Parameterbereichs zur Elektroimpulsbehandlung von ATL und dem erfolgreichen Betrieb von Generatormodulen mit geringer Anstiegszeit sind wichtige Eckpunkte zur Umsetzung des Verfahrens erfüllt. Nach Fertigstellung der impulstechnischen Infrastruktur im S2 Labor werden im Folgenden Untersuchungen zur Minimierung der Behandlungsenergie durchgeführt. Weiterhin wird die Verfahrensverträglichkeit für kathodische Tauchlacke geprüft werden.

## WavE-Querschnittsthemen



- ▶ Risikomanagement in der Abwasserwiederverwendung
- ▶ Technologien und Prozesse
- ▶ Salze und Reststoffe

# WavE-Querschnittsthema: Risikomanagement in der Wasserwiederverwendung

**VORSITZ**

Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft  
Tel.: +49 89 289-13713  
E-Mail: jdrewes@tum.de

**Einführung in das Querschnittsthema**

Jede Form einer geplanten Wasserwiederverwendung erfordert einen vorsorgenden Umgang mit den akuten und chronischen Risiken, die von pathogenen Keimen und chemischen Verbindungen ausgehen. Dieses gesundheitliche Risiko hängt davon ab, in welchem Maße Menschen in Kontakt mit Wasser kommen, welches erhöhte Konzentrationen von Pathogenen sowie chemischen Stoffen beinhaltet. Für die Abschätzung dieses Risikos bei einer Wasserwiederverwendung wurde eine Vielzahl von Ansätzen postuliert. Die World Health Organization (WHO) hat dazu federführend ein Konzept vorgelegt, das den Prozess der Risikobewertung in vier Schritte einteilt (Abbildung). Diese Schritte umfassen die Problemidentifikation, eine zugrundeliegende Dosis-Wirkungsbeziehung, eine Expositionsabschätzung und eine konkrete Risikocharakterisierung. Sie kann für mikrobiologische wie für chemische Kontaminanten durchgeführt werden.

**The 4 Step Risk Assessment Process**



Risikobewertungskonzept der WHO

Das Risikobewertungskonzept der WHO („Water Safety Plans“) wurde von vielen Ländern in gesetzgeberischen Anforderungen und technischen Regelwerken adaptiert und für verschiedene Anwendungen der Wasserwiederverwendung umgesetzt. Dieses Konzept bildet daher auch die Grundlage eines Risikomanagements für Anwendungen innerhalb der Fördermaßnahme WavE.

**Bisherige Aktivitäten und Zwischenergebnisse**

Die Mitglieder des Querschnittsthemas „Risikomanagement“ legten zunächst inhaltliche Schwerpunkte für Aktivitäten fest, die einerseits einer Risikominimierung bei einer Wasserwiederverwendung als auch die Einordnung der Potentiale und möglichen Gefahren bei einer Vielzahl von denkbaren Anwendungen einer Wiederverwendung dienen. Zur Orientierung bisheriger Erfahrungen wurde eine Liste international verfügbarer Regelwerke und gesetzlichen Anforderungen erstellt. Diese Dokumente wurden auf der Intranet Seite allen TeilnehmerInnen der WavE-Fördermaßnahme zur Verfügung gestellt. Für eine weitere inhaltliche Fokussierung verständigte sich die Gruppe auf vier verschiedene Anwendungsfelder einer Wasserwiederverwendung, die in der Tabelle zusammengestellt sind.

**Beispiele für unterschiedliche Wasserwiederverwendungspraktiken**

Landwirtschaftliche Bewässerung	Urbane Nutzungen/ Landschaftsbewässerungen	Grundwasseranreicherung	Industrielle Wiederverwendung
a. Nahrungsmittel für Rohverzehr b. Nahrungsmittel, abgekocht c. Futtermittel d. Energiepflanzen/nachwachsende Rohstoffe	a. ohne Zugangsbeschränkung b. mit Zugangsbeschränkung c. Toilettenspülung	a. Direkte Injektion in einen Grundwasserleiter b. via Anreicherungsbecken mit Perkolation durch Bodenschichten Versickerungsbecken	a. Prozesswasser b. Kühlwasser c. Kesselspeisewasser

Um die wichtigsten Aspekte eines Risikomanagements bei einer Wasserwiederverwendung den VerbundprojektteilnehmerInnen, aber auch potentiell interessierten Anwendern sowie der Öffentlichkeit kompakt zu vermitteln, verständigte sich die Arbeitsgruppe des Querschnittsthemas ‚Risikomanagement‘ darauf kurze Fact Sheets zu erstellen. Die thematischen Schwerpunkte liegen dabei auf a.) mikrobiologischen Parametern, b.) generellen Parameter (wie Organik, Nährstoffe, Salze und Schwermetalle), c.) Spurenstoffen sowie d.) einer Illustration der wesentlichen Elemente eines Gesamtkonzeptes Wasserrecycling.

Darüber hinaus wird die Gruppe zwei Positionspapiere erstellen, die die gegenwärtige Diskussion zu minimalen Qualitätsanforderungen an die Wasserwiederverwendung auf der EU Ebene aufgreift und in einen weiteren Beitrag zur (fehlenden) Akzeptanz einer Wasserwiederverwendung Stellung nimmt. Weiterhin wird sich die Gruppe über die Anwendung einer umfassenden Risikobewertung in einzelnen Verbundvorhaben austauschen.

**Ausblick**

Erste Fact Sheets des Querschnittsthemas „Risikomanagement“ liegen während des Statusseminars der WavE-Fördermaßnahme aus. Weiterhin plant die Gruppe die Erarbeitung der Positionspapiere im Laufe des Jahres 2018.

## WavE-Querschnittsthema: Technologien und Prozesse

### Einführung in das Querschnittsthema

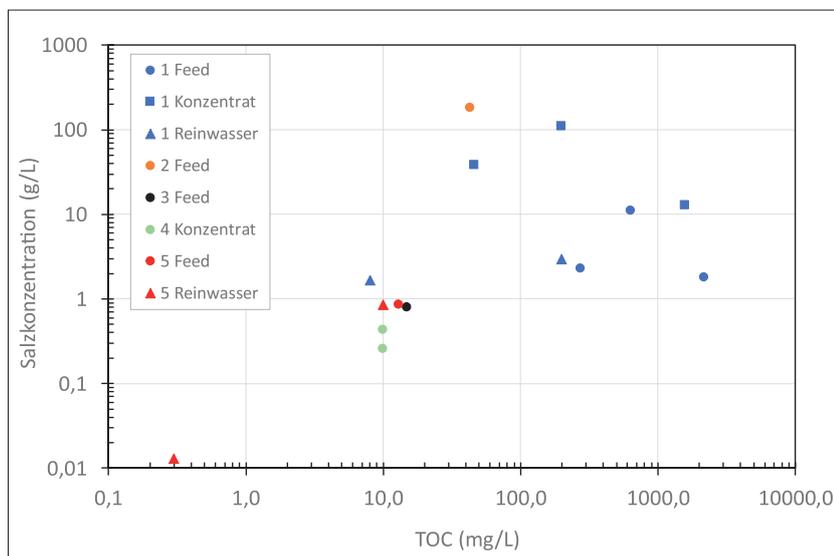
In den WavE-Verbundprojekten gibt es viele Überschneidungen bezüglich Technologien und Prozessen. Das Querschnittsthema dient der Vernetzung der in WavE engagierten Verbundvorhaben, die sich im weiteren Sinne mit der Erforschung und Anwendung von Trenntechnologien zur Erzeugung von Permeaten oder Diluaten aus belasteten Abwässern oder Prozesslösungen beschäftigen. In der Zusammenarbeit der Projektbeteiligten sollen Einsatzgrenzen der Technologien bzw.

Prozesse in unterschiedlichen Applikationen abgesteckt und Randbedingungen zum erfolgreichen Einsatz definiert werden. Dazu zählen unter anderem die erreichbaren Zielkonzentrationen und Reinigungsergebnisse, der dafür notwendige Energieeinsatz oder Störstoffe, die zur Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit bis zum Versagen der Technologien führen können.

Ein Ziel der Fachgespräche zum Querschnittsthema „Technologien und Prozesse“ ist es, eine Entscheidungsmatrix für den Anwender zu erarbeiten, die zur Unterstützung der Auswahl einer Technologie für eine bestimmte Anwendung dient, oder evtl. auch Entwicklungslücken identifiziert, die überwunden werden müssen.

### Bisherige Aktivitäten und Zwischenergebnisse

Im Jahr 2017 wurden durch das Querschnittsthema an die Verbundprojekte Fragebögen zu den angewendeten Technologien und den für diese Technologien bekannten Einsatzgrenzen und -bedingungen an die im Querschnittsthema engagierten Verbundprojekte versendet. Aus den Rückläufen der Befragung ergab sich eine erste Technologiematrix, die im Laufe der Vorhaben durch die Ergebnisse der praktischen Versuche präzisiert und weiter ausgebaut werden soll. In dieser Matrix werden charakteristische Eliminationsleistungen in Abhängigkeit der tatsächlichen Zusammensetzung der Abwässer und Prozesslösungen erfasst.



Erhebung von TOC und korrespondierender Salzkonzentration in einer Auswahl von Abwässern, die in den WavE Verbundprojekten betrachtet werden.

leistungsfähigkeit ermöglichen, um Forschern und Praktikern Hinweise auf Einsatzgebiete und damit verbundene Aufwendungen zu geben. Neben dem technologischen Entwicklungszustand (technology readiness level, TRL) werden volumen- oder frachtbezogene Kennzahlen des Energieaufwands, des Reststoffanfalls und des Hilfsstoffeinsatzes im Prozess erfasst. Diese Liste wird konkret anhand der Betrachtungen einzelner Trenntechnologien validiert und optimiert. Ziel ist es, eine allgemein akzeptierte Zusammenstellung der KPI der Fachöffentlichkeit als weiteres Instrument einer einheitlichen Technologiebewertung zur Verfügung zu stellen.

### Ausblick

Neben der Vernetzung durch fachlichen Austausch zwischen den Verbundprojekten, soll im Querschnittsthema ein wissenschaftlicher und praktischer Mehrwert durch Technologiebewertung generiert werden, um die Übertragbarkeit und den Transfer der Forschungsergebnisse in die Anwendung zu unterstützen. Dadurch wird dem Ziel Rechnung getragen, die Wasserverfügbarkeit in industriellen Anwendungen durch Aufbereitung und Wiederverwendung zu steigern.

### VORSITZ

Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart  
Technische Universität Darmstadt  
Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik  
Tel.: +49 6151 16-20300  
E-Mail: m.engelhart@iwar.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Braun  
Technische Hochschule Köln, Wasseraufbereitung  
und Membranprozesse, Institut für Anlagen- und  
Verfahrenstechnik  
Tel.: +49 221-8275-2203  
E-Mail: gerd.braun@th-koeln.de

Als vergleichende Leitparameter der Abwasserbelastung wurden im Querschnittsthema der gesamte organische Kohlenstoff (TOC) und die korrespondierende Salzkonzentration (TDS bzw. elektrische Leitfähigkeit) identifiziert. Die Abbildung zeigt die weiten Konzentrationsbereiche, einiger in den WavE Verbundprojekten betrachteter Abwässer und der daraus erzeugten Konzentrate sowie Permeate / Diluate (Reinwasser). Sowohl TOC als auch TDS schwanken im Bereich von 3 – 4 log-Stufen, was die Vergleichbarkeit von Prozessbedingungen und erzielten Ergebnissen erschwert.

Zur Vergleichbarkeit der Technologien wurde daher zusätzlich die Einführung übergreifender Technologie Kennzahlen (key performance indicators KPI) im Querschnittsthema diskutiert. Eine erste Liste zu diesen Kennzahlen liegt in der Zwischenzeit vor. Die KPIs sollen einen weitgehend konsistenten, technologieübergreifenden Vergleich der Leistungsfähigkeit ermöglichen.

## WavE-Querschnittsthema: Salze und Reststoffe

### VORSITZ

Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen  
Technische Universität Berlin  
Institut für Technischen Umweltschutz  
Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik  
Tel.: +49 30 314-22905  
E-Mail: sven.geissen@tu-berlin.de

### Einführung in das Querschnittsthema

Bei der Wasserwiederverwendung sind Salze und Reststoffe – neben dem aufbereiteten Wasser – der zweite große Stoffstrom. Im Rahmen des Querschnittsthemas „Salze und Reststoffe“ werden Fragestellungen und Ergebnisse in Bezug auf Anforderungen für die Verwertung und Entsorgung von Salzen und Reststoffen, geeignete Technologien für die Behandlung von hoch konzentrierten (Salz-)Strömen aber auch die Analytik in Konzentraten sowie Parameter zur Prozesssteuerung und Überwachung in Konzentratströmen diskutiert.

### Bisherige Aktivitäten und Zwischenergebnisse

Als Grundlage für die Verständigung wurden zunächst die Begriffe Konzentrat und Superkonzentrat definiert, wobei es sich bei Konzentraten um Stoffströme aus Aufbereitungsverfahren zur Wasserwiederverwendung handelt, die hauptsächlich einen erhöhten Gehalten an Salzen (aber auch Organik und Schwermetallen) aufweisen. Als Superkonzentrate wird ein Konzentrat mit Salzkonzentrationen > 8% (80 g/L) bezeichnet.

Für sichere, verlässliche und zwischen den WavE-Projekten vergleichbare Ergebnisse ist eine verlässliche Analytik wichtig. Daher wurden mit Hinblick auf die Herausforderungen bei der Konzentratanalytik von den teilnehmenden Projekten Fragebögen zu Laboranalyseverfahren und Analyseverfahren zur Prozessüberwachung in Konzentraten ausgefüllt. Die Auswertung sowie ausgearbeitete Lösungsvorschläge wurden in einem Ergebnisbericht zusammengefasst. Die besonderen Herausforderungen bei der Konzentratanalytik können u.a. durch einen hohen Anteil an anorganischem Kohlenstoff im Verhältnis zum organischen Kohlenstoff (Summenparameter), eine komplexe Probenmatrix oder gegenüber Wasser veränderten Stoffeigenschaften entstehen.

Für die Aufbereitung von Konzentraten steht durch die WavE-Partner ein Technologieportfolio zur Verfügung, das sowohl etablierte Verfahren (z.B. ED, NF, RO oder Verdampfungsverfahren) als auch innovative Technologien wie die Membrandestillation oder die kapazitive Deionisation (CDI) umfasst. Bezüglich der Technologien ergeben sich viele Überschneidungen zu dem Querschnittsthema „Technologien und Prozesse“. Daher werden Verfahren zur Konzentrataufbereitung nicht gesondert betrachtet, stattdessen wurde die im Rahmen des Querschnittsthemas „Technologien und Prozesse“ erarbeitete Technologiematrix um die Fragestellung zum Einsatzbereich (Salzkonzentration) der Technologien erweitert.

Eine große Herausforderung bei der Konzentrataufbereitung ist die Abtrennung der Organik von den Salzen bzw. den anorganischen Reststoffen. Dabei ist es von großer Bedeutung, dass Produktions- und Abwasseraufbereitungsprozesse ganzheitlich betrachtet werden. Das Ziel ist nicht nur am Ende der Aufbereitungsverfahren Salze (oder andere Wertstoffe zur Wiederverwendung) zu generieren und sogenannte „End-of-pipe“-Lösungen zu erarbeiten, sondern insbesondere Vermeidungsstrategien zu entwickeln. So können Stoffe identifiziert werden, die bei der Konzentratverwertung ein Problem darstellen und deren Eintrag kann u.U. direkt zu Beginn des Prozesses vermieden werden. Ein Ziel des Querschnittsthemas ist eine Sensibilität für diese Thematik zu schaffen.

Bei der Verwertung von Konzentratinhaltsstoffen entstehen nicht nur auf der technologischen Ebene Herausforderung, ein wichtiger Punkt sind die rechtlichen Anforderungen für die Wiederverwendung von Wertstoffen, die aus Abwasser zurückgewonnen werden. Da die Verantwortung, die insbesondere bezüglich Verunreinigungen und Hygiene mit der Wiederverwendung einhergeht, ein wichtiger Aspekt für die Verwertung von Konzentratinhaltsstoffen ist und der rechtliche Rahmen diesbezüglich zum aktuellen Zeitpunkt nur unzureichend geklärt ist, wird ein Diskussionsforum mit entsprechenden Inhalten organisiert.

### Ausblick

Das Diskussionsforum „Genehmigungsrechtliche Aspekte im Umgang mit Konzentraten und Reststoffen“ (Juni 2018) ermöglicht einen offenen Austausch der WavE-Partner mit externen Fachleuten (z.B. von Behörden und Entsorgungsunternehmen) zu den rechtlichen Anforderungen, der Genehmigungslage und der Einstufung von Restströmen.

Zur Analytik und Prozessmesstechnik in Konzentraten werden ergänzend zu der WavE-internen Umfrage die Hersteller von Laboranalysegeräten und Prozessmesstechnik befragt und das Fachwissen der Experten soll in den Ergebnisbericht einfließen.







[www.bmbf-wave.de](http://www.bmbf-wave.de)