

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung



Wasserwirtschaft und Energie



## Wasserwirtschaft und Energie

# Wasserwirtschaft und Energie

## Ergebnisse kompakt

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**  
Nachhaltiges Wassermanagement

## Impressum

### HERAUSGEBER:



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

### Ansprechpartner für die BMBF-Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE II):

#### Beim BMFTR:

Dr. Rainer Müssner  
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)  
Referat 726 „Ressourcen, Kreislaufwirtschaft; Geoforschung“  
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:

Vernetzungs- und Transfervorhaben der BMBF-Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE II)

#### Verantwortlich im Sinne des Presserechts:

Dr. Thomas Track  
DECHEMA e.V.  
Tel.: 069 7564-427  
Fax: 069 7564-117

Gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)  
Förderkennzeichen: 02WV1560

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 März 2025

Bildnachweise: ©Pixabay, Wikimedialimages, www.istockphoto.com, stock.adobe.com, Shutterstock

## Inhalt

### **BMBF-Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE II)**

Hintergrund und Ziele	4
Untersuchungsstandorte der Verbundprojekte	5

### **Ergebnisse aus den Verbundprojekten**

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

FlexTreat	8
HypoWave+	10
Nutzwasser	12
PU <sub>2</sub> R	14
TrinkWave Transfer	16

#### **Themenfeld: Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser**

FITWAS	20
Med-zeroSolvent	22
NERA	24
ReWaMem	26
RIKovery	28
WEISS_4PN	30

#### **Themenfeld: Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser**

innovation	34
HaSiMem	36
SULFAMOS	38

# Technologien und Konzepte für eine Wasserwiederverwendung

Menschen, Umwelt und Wirtschaft sind täglich auf eine ausreichende Menge an sauberem Wasser angewiesen – doch in vielen Regionen der Welt wird dieses wertvolle Gut immer knapper. Selbst in Deutschland haben längere Dürreperioden in den letzten Jahren lokal zu Ernteausfällen und Produktionsstörungen in der Industrie geführt. Der weltweite Wasserbedarf steigt rasant, bedingt durch Bevölkerungswachstum, fortschreitende Industrialisierung, intensive landwirtschaftliche Nutzung sowie zunehmende Urbanisierung. Gleichzeitig sind die verfügbaren Wasserressourcen begrenzt, was zu Nutzungskonflikten führt. Die wachsende Wasserknappheit bedroht Ökosysteme und beeinflusst die wirtschaftliche sowie politische Stabilität ganzer Länder und Regionen.

Daher besteht ein dringender Bedarf an nachhaltigen Lösungen, um Wasserengpässe gezielt zu bekämpfen. Eine zentrale Maßnahme ist die Wiederverwendung von Wasser durch geschlossene Wasserkreisläufe. Diese tragen dazu bei, die Wasserversorgung langfristig zu sichern und eine effizientere Nutzung der Ressourcen zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE II) ins Leben gerufen. Sie baut auf der Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung“ (WavE) auf.

Ziel beider Fördermaßnahmen war es, innovative Technologien, Betriebskonzepte und Managementstrategien zur Wasserwiederverwendung und Entsalzung zu entwickeln, um die Wasserverfügbarkeit nachhaltig zu erhöhen. In der Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ spielten Reallabore, Standardisierung und Regelwerke sowie die Digitalisierung eine bedeutende Rolle.

Mit WavE II unterstützte das BMBF 13 Verbundprojekte mit Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis sowie ein Vernetzungs- und Transfervorhaben. Die Projekte haben mit ihren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dazu beigetragen, Wasser effizienter zu nutzen sowie alternative Wasserressourcen für verschiedene Sektoren zu erschließen. Die Projektergebnisse der Verbundprojekte sind in dieser Broschüre „Ergebnisse kompakt“ zusam-



mengefasst. Darüber hinaus stellt das WavE-Transferprojekt „TrinkWave Transfer“ seine Ergebnisse vor.

## Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten konzentrierten sich auf folgende drei Themenfelder:

- **Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser**
- **Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser**
- **Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser**

Die Untersuchungen und Entwicklungen erfolgten unter praxisnahen Bedingungen und haben auch Demonstrationsanlagen im technischen Maßstab mit einbezogen. Besondere Bedeutung kommt der Übertragbarkeit der technologischen und konzeptionellen Ansätze auf andere Standorte mit ähnlichen Randbedingungen zu, auch im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen auf dem internationalen Technikmarkt und die erfolgreiche Anwendung für Lösungen „made in Germany“.

# Untersuchungsstandorte der Verbundprojekte



\* Projekt aus der Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung“ (WavE)



## THEMENFELD

# Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser

Die Wiederverwendung von behandeltem kommunalem Abwasser als eine alternative Wasserressource gewinnt zunehmend an Bedeutung. In Europa ist sie bereits in europäische und nationale Strategien eingebettet. Gegenwärtig werden in Europa etwa 2,4 % der behandelten kommunalen Abwässer recycelt; das Potenzial ist jedoch deutlich höher. In der Fördermaßnahme wurden Lösungen entwickelt, die es ermöglichen, diese alternative Quelle für die Wasserversorgung in verschiedenen Anwendungsbereichen zu nutzen.

Die Wiederverwendung von behandeltem kommunalem Abwasser als eine alternative Wasserressource für die weitere Verwendung – etwa in der Landwirtschaft – ist in vielen ariden Ländern schon gängige Praxis. Barrieren für eine Verbreitung in der EU sind vor allem das geringe Bewusstsein über die potenziellen Vorteile sowie die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz einer Mehrfachnutzung. EU-weite Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (EU-Verordnung 2020/741) sollen die Umsetzung solcher Maßnahmen vorantreiben – hier ergeben sich auch Synergien mit der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie.

Im Themenfeld „Wasserwiederverwendung durch Nutzung von behandeltem kommunalem Abwasser“ hat das BMBF fünf Verbundprojekte gefördert. Diese haben Lösungsansätze für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Sektoren (Landwirtschaft, Kommunen oder zur Grundwasseranreicherung) erarbeitet. Entwickelt wurden Konzepte und technische Lösungen, die zum einen eine flexible Anpassung an die Anforderungen zur Wasserwiederverwendung ermöglichen, zum anderen die Akzeptanz einer Wasserwiederverwendung unterstützen. Die in den entsprechenden Verbundprojekten erzielten Forschungsergebnisse fanden auch Eingang in das Merkblatt DWA-M1200 zur Anwendung der Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke. Die wichtigsten Ergebnisse und Produkte aus den Forschungsprojekten, deren Anwendungsperspektiven sowie die sich daraus ergebenden Potenziale zur Einsparung von Wasser und Ressourcen sind auf den folgenden Seiten zusammengefasst.

## Verbundprojekte

**FlexTreat:** Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft

**HypoWave+:** Implementierung eines hydroponischen Systems als nachhaltige Innovation zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung

**Nutzwasser:** Nutzwasserbereitstellung und Planungsoptionen für die urbane und landwirtschaftliche Bewässerung (Nutzwasser als alternative Wasserressource)

**PU2R:** Point-of-Use Re-Use: Dezentrale landwirtschaftliche Wiederverwendung von häuslichem Abwasser zur Verringerung von Nutzungskonkurrenz

**TrinkWave Transfer:** Großtechnische Erprobung neuer Entwicklungen bei der sequentiellen Grundwasseranreicherung

# Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft



## FlexTreat – Abwasser als Ressource nutzbar machen

Die Wasserwiederverwendung ist seit 2020 europaweit gesetzlich geregelt (EU 2020/741). Wenn weitere gesetzliche Anforderungen an die Wasserqualität, wie die Neufassung der EU Kommunalabwasserrichtlinie (EU 2024/3019), berücksichtigt werden, können synergistische Aufbereitungstechnologien ausgewählt werden. Im Projekt FlexTreat wurden hierzu geeignete Kombinationen von Aufbereitungsverfahren getestet.

Dabei lag der Schwerpunkt insbesondere auf der Analyse stofflicher und mikrobiologischer Risiken. Ebenso wurden digitale Konzepte zur Steuerung und Regelung der Anlagen sowie eine App zur Information der beteiligten Akteure und Verbraucher entwickelt. Zudem standen die Akzeptanz der Wasserwiederverwendung und die Übertragbarkeit der Technologien auf internationale Zielmärkte zur Markterweiterung im Fokus der Untersuchungen.



Landwirtschaftliche Bewässerung in Braunschweig (Quelle: Abwasserverband Braunschweig)



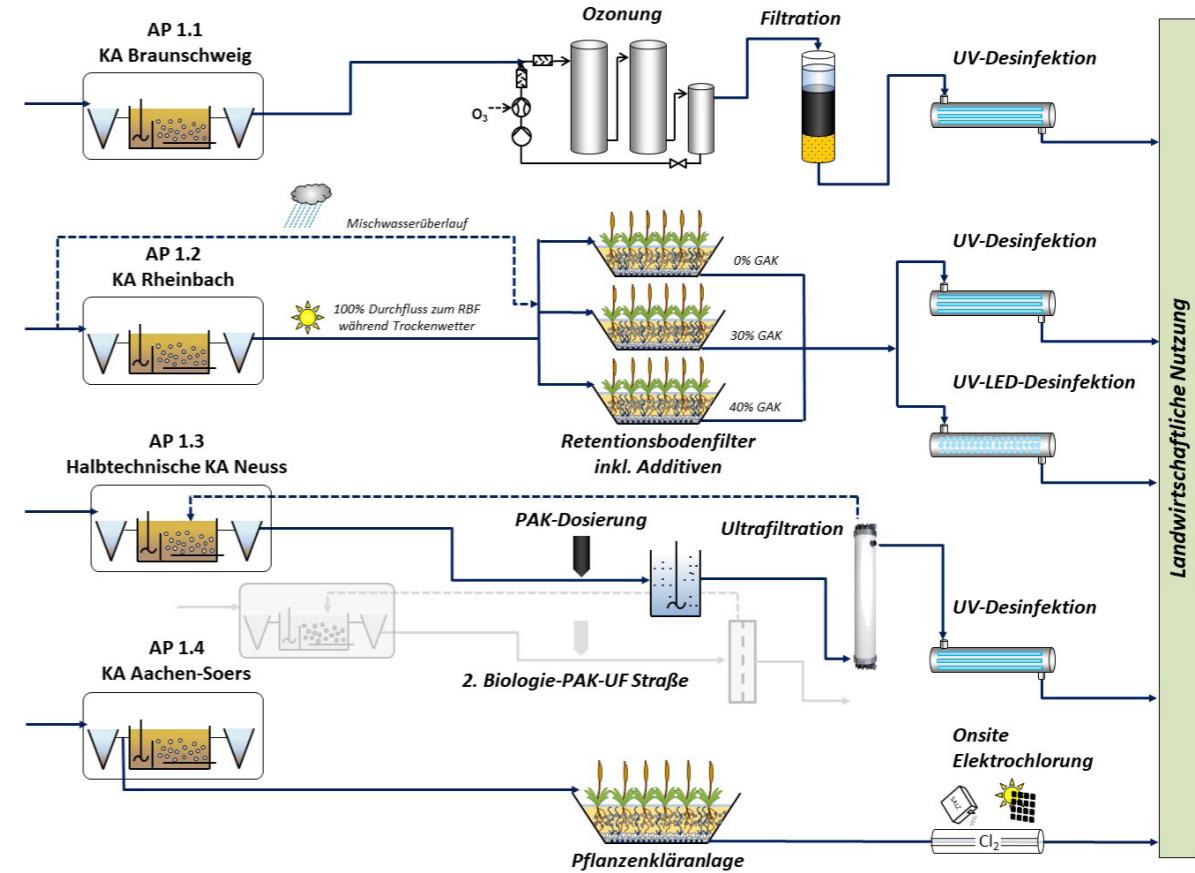
## ERGEBNISSE

Vier unterschiedliche Aufbereitungsverfahren zeigten ihre Eignung zur kombinierten Spurenstoffelimination und Desinfektion. Damit konnte bewiesen werden, dass gängige Verfahren zur Spurenstoffelimination nur geringfügig ergänzt / adaptiert werden müssen, um auch die Qualitätsziele der Wasserwiederverwendung zu erreichen (Kombination von Ozon + UV; Pulveraktivkohle (PAK) Dosierung mit Membranfiltration und UV-Desinfektion; naturnahe Reinigungsverfahren + Elektrochlorung). Innovative Regelungskonzepte (z. B. KI-basierte Anomalie-Erkennung) können hierbei helfen, die Qualitätsziele gesichert einzuhalten. Im „Validierungsleitfaden für eine uneingeschränkte Bewässerung“ zeigt FlexTreat relevante Aspekte für die Bewertung der mikrobiologischen Reinigungsleistung. Stoffliche Risiken wurden mit innovativen Non-target Methoden untersucht, mikrobiologische



## ANWENDUNGEN

In FlexTreat wurden an insgesamt vier Standorten im halb-großtechnischen Maßstab über jeweils zwei Jahre hinweg unterschiedliche Verfahrenszyklen zur weitergehenden Aufbereitung betrieben. Insbesondere am Standort Braunschweig wurde die untersuchte Anlage (Ozonierung + Filtration + UV-Desinfektion) mit weitgehender Messtechnik ausgestattet, sowie das gereinigte Wasser für Anbauversuche in Hochbetten, sowie Versickerungsversuchen zur Untersuchung der Bodenqualität verwendet. In Neuss wurde eine innovative Verfahrensführung für Pulveraktivkohleverfahren in Kom-



Übersicht über die in FlexTreat untersuchten Verfahrensketten (Quelle: FlexTreat)

bination mit Membranfiltration getestet, in Rheinbach ein großtechnischer Retentionsbodenfilter mit granulierter Aktivkohle (GAK) Beimischung und in Aachen ein naturnahes biologisches Verfahren mit nachgeschalteter autarker Chlorung. Die Untersuchungen zeigen die Eignung dieser Verfahren für die avisierten Qualitätsziele und können somit auf großtechnischen Anlagen angewandt werden, die eine Wasserwiederverwendung anstreben.



## EINSPARPOTENZIALE

Die im Rahmen von FlexTreat durchgeführte integrierte Bewertung zeigt insbesondere, dass eine Kombination von 4. Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination mit der laut EU Verordnung für die Wasserwiederverwendung geforderten Filtration und Desinfektion (Qualitätsklasse A) zu signifikanten Einsparungen in Hinblick auf Kosten und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck führt.

Die halb bis großtechnischen Untersuchungen konnten außerdem neue mögliche Designs von 4. Reinigungsstufen (Ozonierung geregelt nach DELTA SAK, PAK+UF mit PAK Rückführung in Biologie, RBFPLUS oder Desinfektionsverfahren wie Chlordinierung, UV-LED) erfolgreich anwenden, welche zum Teil geringere Betriebsmittelbedarfe, als die etablierten Verfahrensvarianten, vorweisen konnten.

### Laufzeit

02/2021 bis 10/2024

### Koordination

Prof. Thomas Wintgens  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA),  
RWTH Aachen

### Webseite

[www.flextreat.de](http://www.flextreat.de)

### Verbundprojektpartner

- Abwasserverband Braunschweig, Wendeburg
- Analytik Jena AG, Jena
- AUTARCON GmbH, Kassel
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
- Erftverband, Bergheim
- inge GmbH, Greifenberg
- Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB), Berlin
- p2m berlin GmbH, Berlin
- PEGASYS Gesellschaft für Automation und Datensysteme GmbH, Meschede
- Universitätsklinikum Bonn
- Xylem Services GmbH, Herford

# HypoWave+ Implementierung eines hydroponischen Systems als nachhaltige Innovation zur ressourceneffizienten landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung



## HypoWave+ – Reallabor produziert hochwertige Tomaten

Regionale Konkurrenzen um die Ressource Wasser nehmen zu. Neue Konzepte und Verfahren für die Wasserwiederverwendung sind gefragt. HypoWave untersuchte ein wasserressourceneffizientes Konzept für die Landwirtschaft, das recyceltes Wasser für die hydroponische Pflanzenproduktion verwendet. HypoWave+ führt das in der wissenschaftlichen Begleitung des Reallabors in Weissenberge bei Gifhorn fort. Ziel ist es, die Marktfähigkeit von hydroponisch erzeugtem Gemüse mittels Wasserwiederverwendung nachzuweisen, um es an anderen Standorten zukünftig ebenfalls anzuwenden.

Der Betrieb von Wasseraufbereitung und Gemüseproduktion wurde 2024 aufgenommen und die benötigte Wasserqualität erzielt. Die Produktqualität der bewässerten Tomaten war tadellos: Alle mikrobiologischen Parameter waren durchgehend unter der Nachweisgrenze.



## ERGEBNISSE

Die erste großtechnische Umsetzung des Hypowave-Konzepts erfolgt in einem Teilbereich des 1.800 m<sup>2</sup> großen Gewächshauses der IseBauern. Insgesamt werden 11,5 Tonnen Tomaten und 50.000 Köpfe Salat in der Saison hydroponisch für den regionalen Markt produziert. Der Betrieb wurde im Frühjahr 2024 aufgenommen. Die Produktqualität der Tomaten entspricht den Erwartungen, zudem waren alle mikrobiologischen Parameter durchgehend unter der Nachweisgrenze.

Für die weitergehende Aufbereitung zu qualitativ ausgezeichnetem Bewässerungswasser wird der Ablauf einer nahegelegenen Abwasserteichanlage genutzt. Dieser wird in einer mehrstufigen Wasseraufbereitung von HUBER SE zunächst über einen Tuchfilter zur Entfernung planktonischer Bestandteile geführt. Danach folgt ein neuartiger Aktivkohle-Biofilter zur Entfernung organischer Spurenstoffe, gefolgt von einer Sandfiltration zum Feststoffrückhalt. Die sich anschließende Desinfektion erfolgt in einer UV-Anlage.

Die Tomaten gediehen mit alkalischem ammoniumreichen Bewässerungswasser ohne Ertragsverlust. Durch die Ammoniumaufnahme säuernten sie das Substrat an, wodurch andere Nährstoffe verfügbarer wurden. Zudem fördert trockene Luft das Wachstum, was weiteres Potential zur Wasseraufreinigung eröffnet.

Über einen Multi-Methoden-Ansatz u.a. mit der Durchführung der Reallaborexperimente und dem sehr engen und diskursiven Austausch im Konsortium wurden die relevanten Qualitäts- und Risikoaspekte bearbeitet. So konnten der Antrag auf

Wasserwiederverwendung gemäß EU2020/741 gestellt sowie die Zertifizierung nach QS-GAP erfolgreich durchgeführt werden. Ein übergreifendes Qualitätsmanagementkonzept sowie eine Strategie zur Vermarktung wurden erarbeitet.



## ANWENDUNGEN

Hydroponischer Anbau in Kombination mit Wasserwiederverwendung ermöglicht eine extrem wasserefficiente und sichere Produktion von hochwertigem Gemüse. Zudem können die



Blick in das Gewächshaus der IseBauern (Quelle: ISOE, 2024)

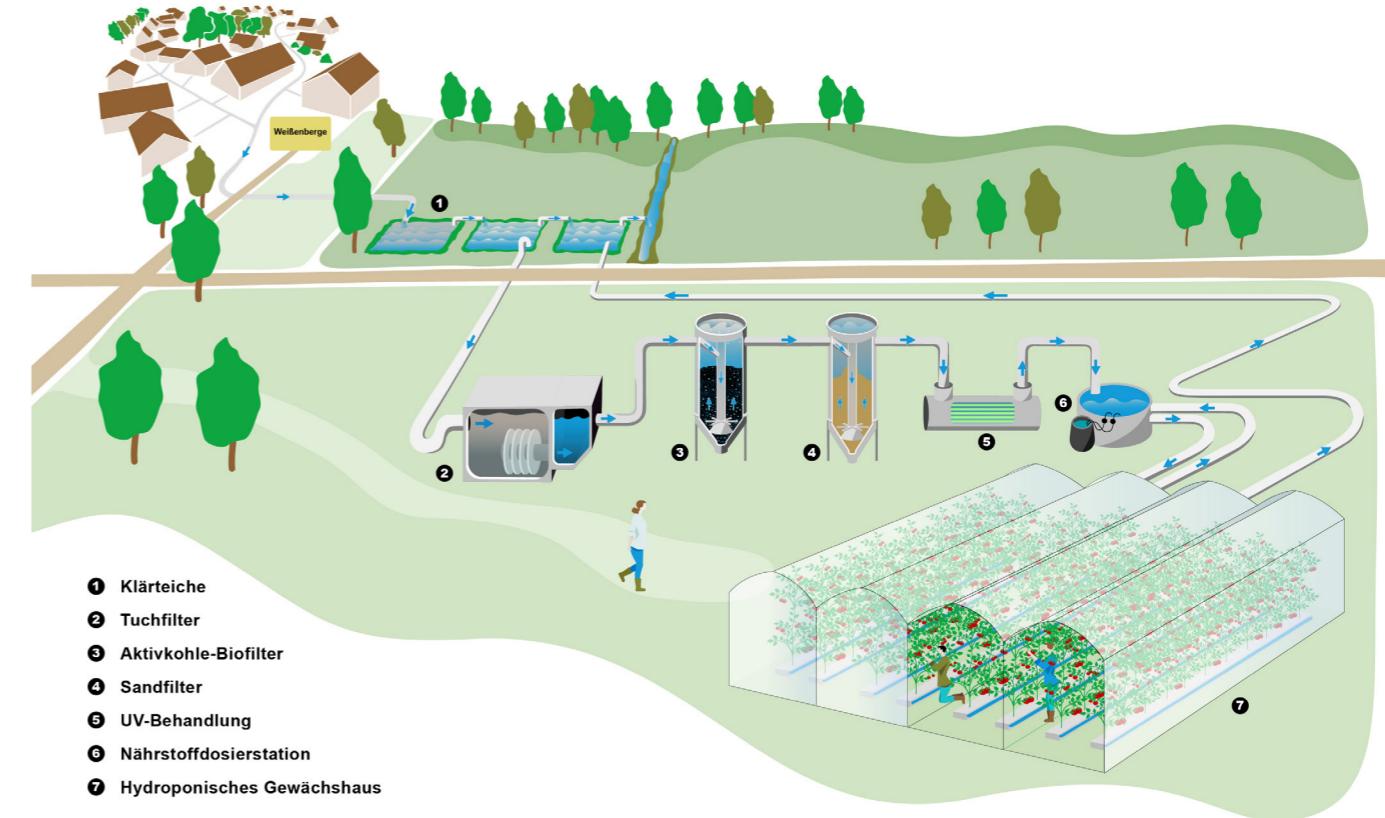


Illustration des in Wahrenholz implementierten HypoWave-Konzepts  
(Quelle: HypoWave+)

Nährstoffe für die Pflanzendüngung genutzt werden, wodurch natürliche Gewässer entlastet werden.

### Mögliche Anwendungen:

- Regionale Gemüse-, Obst- oder Schnittblumenproduktion
- Etablierung einer verbesserten Abwasserreinigung (z.B. 4. Reinigungsstufe)
- Bedarf für eine Insellösung (Hotels, einsame Gehöfte/Siedlungen)
- Erhöhung der Resilienz (z.B. für einen Bewässerungsverband)

Eine breite Anwendung in Deutschland kann nur erreicht werden, wenn solche Systeme in der deutschen Verordnung zur Wasserwiederverwendung nicht ausgeschlossen werden.



## EINSPARPOTENZIALE

Die Ergebnisse zeigen, dass der gesamte Wasserbedarf der Tomatenproduktion durch die Wasserwiederverwendung gedeckt werden kann, auch wenn der Betrieb in 2024 zunächst auf zwei Linien fokussierte. Zudem konnte der Nährstoffbedarf der adulten Pflanzen vollständig durch das Bewässerungswasser gedeckt werden. Im Bereich der Abwasserreinigung ergeben sich grundsätzlich weitere Synergien, sodass auf eine Nährstoffelimination vollständig verzichtet werden kann.

Mit dem gewählten Foliengewächshaus war in 2024 eine Produktion von Mai bis Oktober ohne zusätzliche Energiekosten für Heizung oder Beleuchtung möglich.

### Laufzeit

02/2021 bis 10/2025

### Koordination

Prof. Thomas Dockhorn  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft,  
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu  
Braunschweig

### Webseite

[www.hypowave.de](http://www.hypowave.de)

### Verbundprojektpartner

- Abwasserverband Braunschweig
- Ankermann GmbH & Co. KG (EDEKA), Meine
- Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
- Huber SE, Berching
- INTEGRAR – Institut für Technologie im Gartenbau GmbH, Dresden
- IseBauern GmbH & Co. KG, Wahrenholz
- ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt a.M.
- Universität Hohenheim, Stuttgart
- Wasserverband Gifhorn
- Xylem Water Solutions Deutschland GmbH, Herford
- Landvolk Niedersachsen Kreisverband Gifhorn-Wolfsburg e.V. (assoz. Partner)
- Wolfsburger Entsorgungsbetriebe (assoz. Partner)

# Nutzwasserbereitstellung und Planungsoptionen für die urbane und landwirtschaftliche Bewässerung



## Nutzwasser – Alternative Wasserressource für Stadt und Landwirtschaft

Alternative Wasserressource für Stadt und Landwirtschaft: In Zusammenarbeit mit 12 Praxispartnern wurde erforscht, ob recyceltes Wasser in Deutschland als eine sichere alternative Wasserressource genutzt werden kann. Ziel war die Entwicklung flexibler Managementstrategien zur urbanen und landwirtschaftlichen Bewässerung. Eine Multibarriren-Aufbereitung und IoT-basierte Sensorik ermöglichen die Qualitätssicherung und eine bedarfsgerechte Nutzung. Neben technischen Aspekten wurden wirtschaftliche, rechtliche und betriebliche Modelle geprüft.

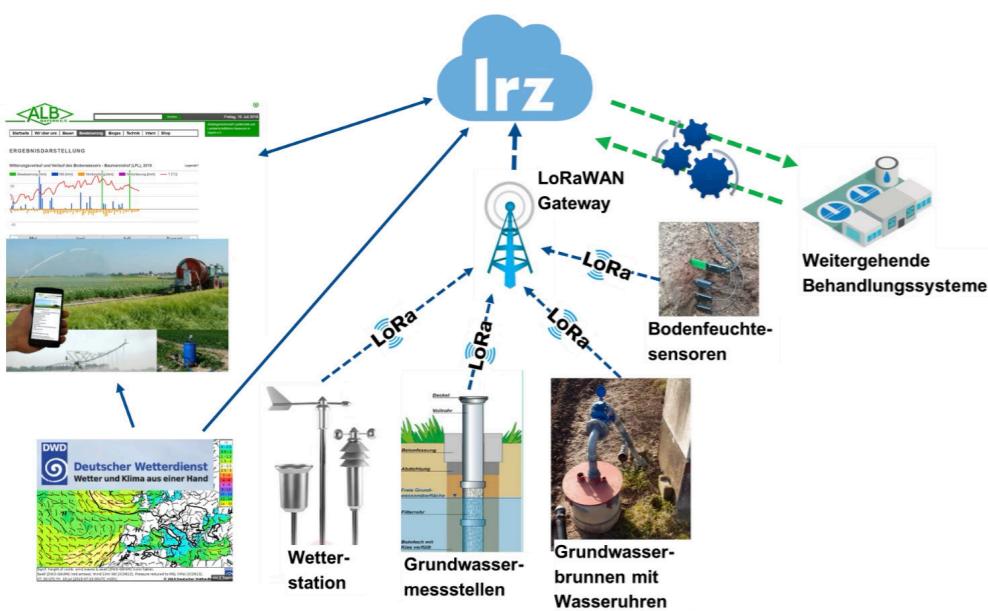
Das dreijährige Projekt gliederte sich in neun Arbeitspakete, darunter Risikomanagement, Wasserqualitätsanalysen, Bedarfsprognosen und Stakeholder-Einbindung. Ergebnisse zeigen das Potenzial einer nachhaltigen Wasserwiederverwendung.



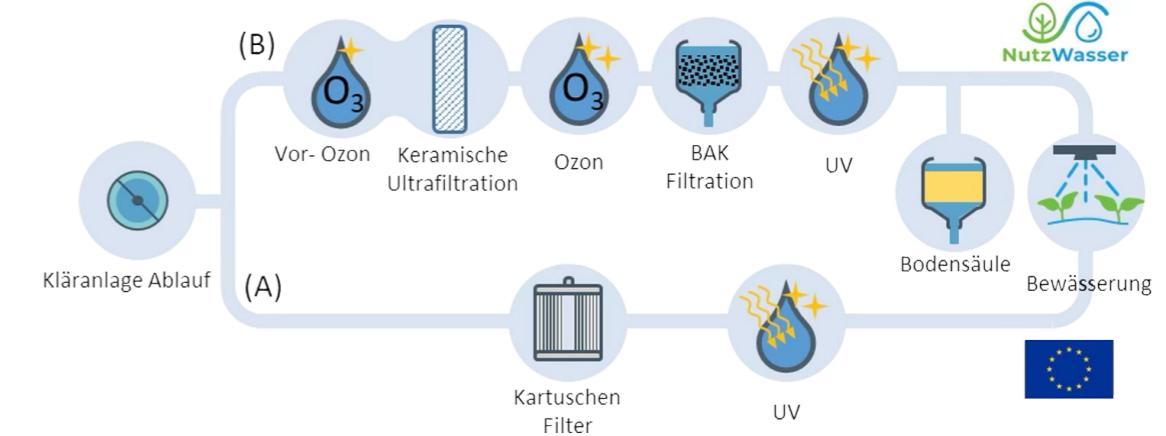
## ERGEBNISSE

Im Projekt Nutzwasser wurden innovative Wasserbehandlungstechnologien erprobt, um eine alternative Wasserressource für urbane und landwirtschaftliche Bewässerung bereitzustellen. Eine Multibarriren-Aufbereitung (UF, Ozonung, BAK, UV) sichert die Wasserqualität, während ein IoT-basiertes Sensorsystem den Bewässerungsbedarf in Echtzeit bestimmt. In großtechnischen Versuchen wurden zwei parallele Wasserwiederverwendungsanlagen getestet. Die rechtlichen Anforderungen der EU-Wasserwiederverwendungs-Verordnung wurden berücksichtigt, ein Risikomanagementansatz entwickelt und konkrete Genehmigungsleitlinien erarbeitet. Die Ergebnisse wurden bereits in mehreren

wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, darunter die Studie „Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation“ im Water Research Journal (DOI: 10.1016/j.watres.2024.122429). Eine weitere Arbeit zum chemischen Risikomanagement für Umwelt- und menschliche Gesundheit wurde eingereicht und erscheint bald. Zudem werden drei neue Publikationen im Journal of Water Reuse veröffentlicht, die sich mit ökonomisch-ökologischen Aspekten, mikrobiologischen Risiken für essbare Pflanzen sowie der Pathogenentfernung durch keramische UF-Membranen befassen. Das Projekt zeigte die Machbarkeit einer sicheren Wasserwiederverwendung für Stadtgrün, Sportanlagen und landwirtschaftliche Flächen. Die Ergebnisse flossen in das neue technische Regelwerk DWA-M-1200 ein und sollen die Übertragbarkeit auf andere Regionen beschleunigen.



Digitalisierung der Bedarfsbestimmung und Prozesskontrolle der Wasserwiederverwendung (Quelle: Nutzwasser)



Die Multibarriren-Behandlungsstrategie, bestehend aus Vor-Ozonung, keramischen UF-Membranen, Ozonung und UV-Desinfektion (B), wurde für die Wasserwiederverwendung in der Stadt Schweinfurt untersucht. Diese Behandlungslinie wurde hinsichtlich Wasserqualität und Risikomanagement für Umwelt und menschliche Gesundheit mit den Mindestanforderungen der EU-Kommission (A) verglichen, die eine Kombination aus Kartuschenfiltration und UV-Desinfektion umfassen. (Quelle: Nutzwasser)

## ANWENDUNGEN

Im Projekt Nutzwasser wurde in Schweinfurt eine großtechnische Aufbereitungsanlage (UF, Ozonung, BAK, UV) errichtet, um recyceltes Wasser für die urbane und landwirtschaftliche Bewässerung bereitzustellen. Dazu wurde in Gochsheim ein digitales Bewässerungsmanagement für 60 ha landwirtschaftliche Flächen mithilfe von IoT-Sensorik und der ALB-App entwickelt. Die Prognosemodelle zur Bedarfsbestimmung ermöglichen eine ressourcenschonende Wasserbereitstellung.

Zukünftige Anwendungsmöglichkeiten liegen in der nachhaltigen Wasserbewirtschaftung für Regionen mit begrenzten Wasserressourcen. Die entwickelten Technologien und Managementansätze können Städte und landwirtschaftliche Betriebe dabei unterstützen, Wasser effizienter zu nutzen, sich an den Klimawandel anzupassen und die Anforderungen der EU-Wasserwiederverwendungs-Verordnung zu erfüllen. Das Projekt schafft somit die Grundlage für eine breitere Implementierung der Wasserwiederverwendung in Deutschland.

## EINSPARPOTENZIALE

Die potenziellen Kosteneinsparungen für Grünflächenwartung und Industrie in Schweinfurt ergeben sich aus der Differenz zwischen Trinkwasser- und Nutzwasserpreis. Der Trinkwasserpreis beträgt 2,30 €/m³ ab 15.000 m³/a. Ist der Nutzwasserpreis niedriger, können erhebliche Einsparungen erzielt werden. In Gochsheim wurde das Nutzwasser bislang nicht eingesetzt, jedoch zeigen Berechnungen signifikante Einsparpotenziale. Eine zusätzliche Bereitstellung von Nutzwasser in Höhe von etwa 100.000 m³/Jahr in Kombination mit den lokal verfügbaren Grundwasserressourcen würde für eine zuverlässige Abdeckung des Bedarfs ausreichen.

Darauf basierend wurde eine Zahlungsbereitschaft der Landwirte in Gochsheim in Höhe von 30.000 €/a ermittelt. Nutzwasser bietet langfristige Versorgungssicherheit, setzt jedoch

Investitionen und Betriebskosten für Verteilung voraus. Mittel- bis langfristig könnte es eine wirtschaftlichere Alternative zu Trinkwasseranwendungen in Industrie und Landwirtschaft darstellen.

### Laufzeit

02/2021 bis 10/2024

### Koordination

Prof. Jörg E. Drewes  
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft,  
Technische Universität München, Garching

### Website

[www.nutzwasser.org](http://www.nutzwasser.org)

### Verbundprojektpartner

- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheim
- Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Darmstadt
- COPLAN AG, Passau
- IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung, gGmbH, Mülheim an der Ruhr
- HOLINGER Ingenieure GmbH, Merklingen
- Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Garching bei München
- Regierung von Unterfranken, Würzburg
- Stadtentwässerung Schweinfurt
- TZW:DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe
- Xylem Services GmbH, Herford
- Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V., Freising (assozierter Partner)
- Stadt Schweinfurt – Referat III Umweltschutz, (assozierter Partner)

# Dezentrale landwirtschaftliche Wieder-verwendung von häuslichem Abwasser zur Verringerung von Nutzungskonkurrenz



## PU2R – Alte Infrastruktur mit innovativem Konzept für aktuelle Herausforderungen nutzen

Einige dünnbesiedelte und trockene Regionen mit landwirtschaftlicher Prägung sehen sich bereits jetzt mit den Folgen des Klimawandels konfrontiert. Knappe Wasserressourcen gilt es effizient zu nutzen. Durch die Wiederverwendung von häuslichem Abwasser aus abflusslosen Sammelgruben kann hochwertiges Bewässerungswasser ohne lange Transportwege bereitgestellt werden. Im PU2R-Konzept werden dafür in einer dezentralen Aufbereitungsanlage die Verfahren Membranbioreaktor, Aktivkohledosierung und UV-Desinfektion kombiniert, um Pathogene und organische Spurenstoffe zu entfernen.

Gleichzeitig können Pflanzennährstoffe im Wasser verbleiben und verringern den notwendigen Düngemitteleinsatz für eine bedarfsgerechte Bewässerung. Potenziale für Brandenburg und der Verbleib organischer Spurenstoffe in Boden und Pflanzen wurden untersucht, um Risiken für Mensch und Umwelt weitreichend minimieren zu können.

## ERGEBNISSE

Das häusliche Abwasser in Sammelgruben einzelner Haushalte ist im Vergleich zu Abwasser, welches durch das Kanalnetz einer zentralen Kläranlage zugeleitet wird, weniger durch Regenwasser und andere Einleitungen verdünnt, enthält aber hingegen keine Chemikalien aus Industrieeinleitungen. Die Spurenstoffkonzentrationen sind teilweise höher sowie deren Variabilität in den Sammelgruben größer.

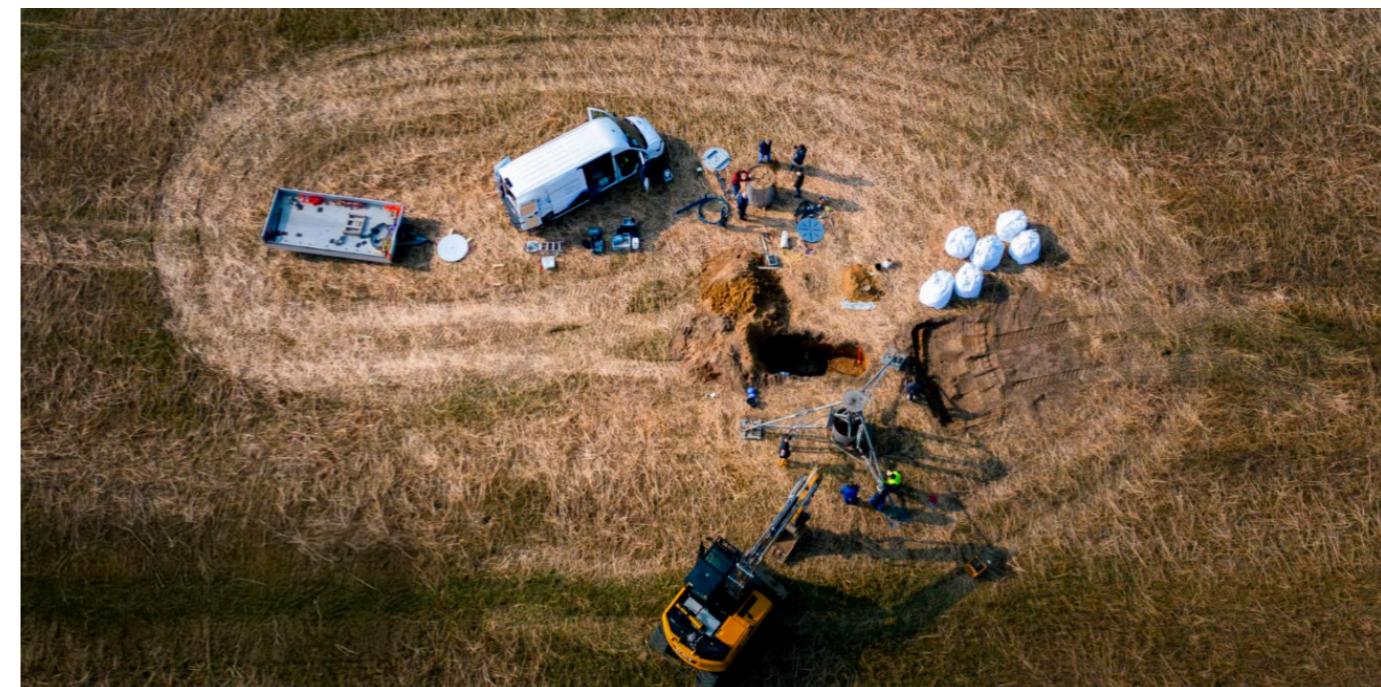
Der Aufbereitungsprozess im Membranbioreaktor mit Aktivkohledosierung muss daher flexibel auf unterschiedliche Belastungen und saisonale Bedarfe einstellbar sein. Die Erweiterung der UV-Desinfektion durch Zugabe von Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) ermöglicht bei längerer Bestrahlungsdauer eine breitbandigere Zersetzung organischer Spurenstoffe. Deren Aufnahme in Pflanzen wurde für eine Vielzahl untersucht und beschrieben. Aus Experimenten zu Abbau- und Transportprozessen im Boden wurden Simulationen durchgeführt und mit Feldversuchen in Lysimeterstudien abgeglichen. Für den Grundwasserschutz konnte darauf basierend ein Prognosewerkzeug bereitgestellt werden.

## ANWENDUNGEN

Ein Dorf in Brandenburg diente mit seinen abflusslosen Sammelgruben, dem Ackerboden und der landwirtschaftlichen Nutzfläche als Modellstandort. Ein Risikomanagementplan, der für die Durchführung von Vorhaben zur Wasserwiederverwendung zu erstellen ist, berücksichtigt alle Gegebenheiten für eine sichere Umsetzung. Das erstellte Prognosewerkzeug kann von Genehmigungsbehörden als fundierte Unterstützung zur Risikoabschätzung für den (Grundwasserschutz ein-



Pilotanlage des Membranbioreaktors mit Aktivkohledosierung und UV-Desinfektion, untergebracht in einem Container  
(Quelle: Aaron Bauer)



Entnahme von Bodenkernen auf einem Acker zur Untersuchung von Wasserhaushalt und Transportvorgängen.  
(Quelle: Kento Ruhl)

gesetzt werden. Das PU2R-Konzept kann flexibel umgesetzt werden und bietet so unterschiedliche Möglichkeiten für lokale Interessengruppen. So könnte das bisherige Entsorgungsunternehmen die Anlage betreiben und für Landwirt\*innen Bewässerungswasser zur Verfügung stellen. Auch ist die Umsetzung als teilmobile Lösung denkbar, was die Skalierbarkeit für den tatsächlichen Bedarf erleichtert. Auch in anderen Regionen Deutschlands, Europas und der Welt ließe sich das PU2R-Konzept anwenden, um Abwasser dezentral zu Bewässerungswasser aufzubereiten und somit sowohl das Wasser als auch die Wertschöpfung in der Region zu behalten.



## EINSPARPOTENZIALE

Etwa ein Viertel der aktuellen Bewässerungswassermenge in Brandenburg könnte durch dezentrale Wasserwiederverwendung bereitgestellt werden. Weitere Einsparungen ergeben sich direkt durch verringerten Düngmittelbedarf, wobei das Einsparpotenzial des Phosphor-Düngers höher ist als für Stickstoffe.

Deutlich reduzierte Transportwege für den ansonsten notwendigen Abtransport des Abwassers aus den abflusslosen Sammelgruben führen zur Einsparung von Dieseltreibstoff, der in mehreren Wirkungskategorien als besonders umweltschädlich einzustufen ist. Die Nutzung erneuerbarer Energien, die in trockenen, dünn besiedelten Gebieten meist reichlich und günstig verfügbar gemacht werden können, verbessert die Umweltauswirkungen des PU2R-Konzeptes abermals deutlich gegenüber einer konventionellen Entsorgung des Abwassers.

**Laufzeit**  
02/2021 bis 10/2024

**Koordination**  
Prof. Aki Sebastian Ruhl  
Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau

**Webseite**  
[www.uba.de/PU2R](http://www.uba.de/PU2R)

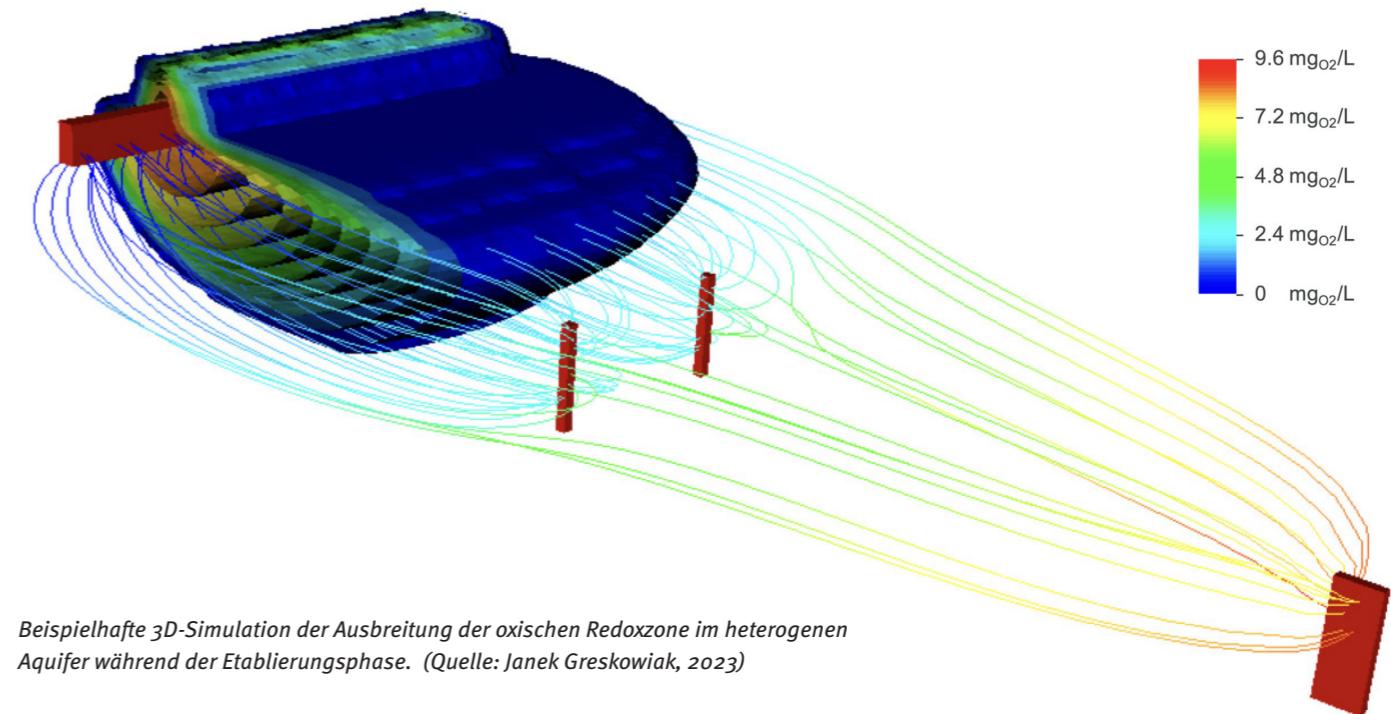
**Verbundprojektpartner**  
• FH Münster, Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt (IWARU)  
• Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Department Analytik (UFZ), Leipzig  
• Humboldt-Universität Berlin, Pflanzenernährung und Dünung  
• Ingenieurbüro Irriproject, Potsdam  
• Microdyn-Nadir GmbH, Wiesbaden  
• Technische Universität (TU) Braunschweig, Bodenkunde und Bodenphysik  
• UV-EL GmbH & Co. KG, Dresden  
• Berliner Wasserbetriebe, F&E (Assoziierter Partner)  
• Technische Universität Berlin, Wasserreinhaltung, (Assoziierter Partner)

# Großtechnische Erprobung neuer Entwicklungen bei der Sequentiellen Grundwasseranreicherung



## TrinkWave Transfer – Naturnahes Verfahren SMART in großtechnischer Erprobung

Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen in der Grundwasserbewirtschaftung und Uferfiltration in Deutschland wurden im BMBF-Verbundvorhaben TrinkWave Transfer die sequentielle Grundwasseranreicherung zur Wasserwiederverwendung im Pilotmaßstab in einem heterogenen Aquifer realisiert. Die sequentielle Grundwasseranreicherung (engl. „Sequential Managed Aquifer Recharge Technology“, SMART) kann damit zur weitergehenden Behandlung belasteter Oberflächenwässer zur Stützung von Trinkwasserressourcen eingesetzt werden. Die zentralen Technologieelemente dieses Konzeptes sind eine hocheffiziente und platzsparende Infiltration über Sickerschlitzgräben sowie der *in situ* Eintrag von Elektronenakzeptoren. Die Etablierung kontrollierter Redoxbedingungen für einen verbesserten mikrobiologischen Umsatz von anthropogenen Spurenstoffen in der Untergrundpassage konnte, während eines mehrmonatigen Probetriebes, demonstriert werden.



Beispielhafte 3D-Simulation der Ausbreitung der oxischen Redoxzone im heterogenen Aquifer während der Etablierungsphase. (Quelle: Janek Greskowiak, 2023)

## ERGEBNISSE

Die Demonstrationsanlage mit einem 25 m langen und 7 m tiefen Sickerschlitzgraben, mehreren Messstellen und drei hydraulisch abgestimmten Entnahmestellen wurde Mitte 2023 fertiggestellt. Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte zunächst mit der Infiltration von Trinkwasser (10 m<sup>3</sup>/h), im Frühjahr 2024 erfolgte die Umstellung auf aufbereitetes Uferfiltrat. Durch die zweimalige Umstellung des zu infiltrierenden Wassers konnten zwei Tracer-Tests durchgeführt werden. Die Tracer-Tests bilden zusammen mit den vorab durchgeführten Kernbohrungen die Basis für die hydraulische Charakterisierung des heterogenen Aquifers. Mit diesen Ergebnissen wurde ein numerisches Modell des Aquifers erstellt und validiert. Die Etablierung einer oxischen Redoxzone im Untergrund wird durch eine oberirdische Belüftung des Wassers vor der Infiltration erreicht. Die Ausbreitung der oxischen Redoxzone ist abhängig von den hydraulischen und geologischen Gegebenheiten (Zehrungspotential) des Untergrundes. Durch kon-

tinuierliche Messungen des gelösten Sauerstoffs an unterschiedlichen Stellen und Tiefen konnte die Etablierung einer ausgeprägten stabilen oxischen Zone über mehrere Monate nachgewiesen werden.

Während eines rund sechsmonatigen Probetriebes 2024 konnte der verbesserte Abbau (Biotransformation) von redox-sensitiven Spurenstoffen gezeigt werden.

## ANWENDUNGEN

Die Errichtung der Pilotanlage zur gezielten Grundwasseranreicherung zur Wasserwiederverwendung mit Hilfe der Sickerschlitzgrabentechnologie sowie die Etablierung einer ausgedehnten oxischen Redoxzone konnten erfolgreich in einem natürlichen und heterogenen Aquifer in Berlin-Johannisthal demonstriert werden. Durch den Bau des Sickerschlitzgrabens mit einer überlappenden Bohrtechnik konnte die schnelle und flexible Konstruktion derartiger Anlagen gezeigt werden. Diese Bohrtechnik ist in der Lage lokale Gegeben-

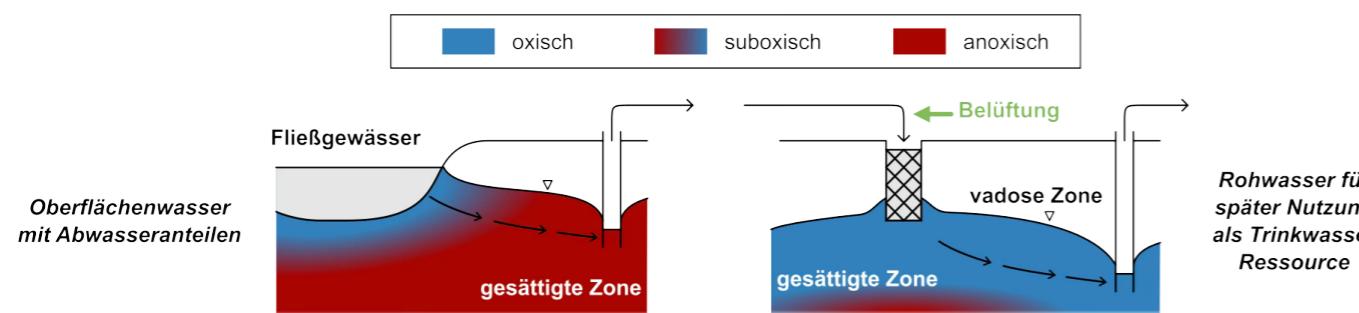
heiten unterschiedlicher Standorte zu berücksichtigen und ist dabei noch hochskalierbar.

Die gesteigerte Biotransformation von redox-sensitiven Spurenstoffen konnte gezeigt werden. Zudem wurden wichtige Erkenntnisse zu möglichen Vermischungseffekten an den Produktionsbrunnen gewonnen, welche trotz einer intensiven geologisch-hydraulischen Charakterisierung des Aquifers auftreten können. Handlungsempfehlung für eine mögliche Anpassung oder ein flexibles Anlagendesign werden mit dem Projektabschlussbericht erarbeitet.

## EINSPARPOTENZIALE

Die Infiltration über Sickerschlitzgräben ermöglicht eine signifikante Reduktion des, sonst für Versickerungsbecken, benötigten Flächenbedarfs. Zudem ist hierdurch eine Infiltration in bestimmte Tiefenschichten und somit eine spezifische hydraulische Anbindung des Aquifers möglich. Während die Infiltrations- und Förderraten in einem weiten Bereich gesteuert werden können, ist die Etablierung einer ausgedehnten oxischen Redoxzone für einen verbesserten Spurenstoffabbau wesentlich von den geologisch chemischen Gegebenheiten des jeweiligen Standortes abhängig. In diesem Projekt konnte bereits eine wesentliche Ausbreitung (ca. 10 m) der oxischen Zone innerhalb einiger Wochen bis Monate gezeigt werden.

Der verbesserte Spurenstoffabbau konnte für einige Substanzen gezeigt werden und beträgt für viele Stoffe mehr als 50 % bis häufig unter die Bestimmungsgrenze. Die finale Bewertung der Abbaupotentiale sowie die Übertragbarkeit der Abbaupotentiale wird mit dem Projektabschlussbericht erarbeitet.



Konzeptionelle Darstellung der sequentiellen Grundwasseranreicherung mit Hilfe eines Sickerschlitzgrabens und Etablierung einer oxischen Redoxzone (Quelle: TrinkWavE Transfer)

**Laufzeit**  
08/2022 bis 12/2024

**Koordination**  
Prof. Jörg E. Drewes  
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft,  
Technische Universität München, Garching

**Webseite**  
<https://www.wasser.tum.de/wasser/forschung/projekte/trinkwave-transfer/>

**Verbundprojektpartner**  
• BGS Umwelt - Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Darmstadt  
• Berliner Wasserbetriebe  
• Technische Universität München, Garching  
• Carl von Ossietzky Universität Oldenburg



## THEMENFELD

# Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser

Wasser ist ein entscheidender Produktionsfaktor für die Industrie und spielt eine zentrale Rolle als Prozess-, Kühl- oder Kesselwasser. Abwasser wird in der Industrie zunehmend als potenzielle Ressource betrachtet und genutzt. Aufbereitete Abwässer, die wiederverwendet und im Kreislauf geführt werden, mindern insbesondere den Verbrauch an Frischwasserressourcen und erhöhen die Produktionssicherheit. Sechs Verbundprojekte der Fördermaßnahme Wassertechnologien: Wiederverwendung haben verschiedene Lösungen für eine Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser in verschiedenen Sektoren erarbeitet.

Neben der Landwirtschaft und dem urbanen Raum ist die Industrie ein bedeutender Wassernutzer. Die Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser wird immer wichtiger, auch im Hinblick auf den Aktionsplan der EU zur Kreislaufwirtschaft (Circular Economy). Der Fokus des industriellen Abwassermanagements verschiebt sich zunehmend von „Behandlung und Entsorgung“ zu „Wiederverwendung, Recycling und Ressourcengewinnung“. Abwasser-Recycling kann die Kosteneffizienz erhöhen und die Rückgewinnung von Nebenprodukten neue Geschäftsmöglichkeiten eröffnen.

Im Themenfeld „Kreislaufführung von industriell genutztem Wasser“ hat das BMBF sechs Verbundprojekte gefördert. Diese haben Technologien und Managementansätze für verschiedene Industriezweige entwickelt, wie etwa Stahl-, Chemie-, und Automobilindustrie, Medizintechnik, Großwäschereien oder die Wasserversorgung. Die wichtigsten Ergebnisse und Produkte aus den sechs Forschungsprojekten, deren Anwendungsperspektiven sowie die sich daraus ergebenden Potenziale zur Einsparung von Wasser und Ressourcen sind auf den folgenden Seiten zusammengefasst.

## Verbundprojekte

**FITWAS:** Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung

**Med-zeroSolvent:** Neue Wege im medizintechnischen Wassermanagement – Etablierung innovativer Methoden für die abwasserfreie Produktion durch energieeffiziente Behandlung von stark belasteten Prozesswässern aus der Membranherstellung

**NERA:** Null-Emission Rohwasserproduktion in der Automobilindustrie

**ReWaMem:** Recycling von Wäschereiabwasser zur Wiederverwendung des Abwassers mittels keramischer Nanofiltration

**RIKcovery:** Recycling von industriellen salzhaltigen Wässern durch Ionenentrennung, Konzentrierung und intelligentes Monitoring

**WEISS\_4PN:** Integrative Anwendung von Innovationen und digitales Kühlleistungsmanagement zur Reduzierung des Wasserbedarfs in der Stahlproduktion

# Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung



## FITWAS – Grundwasserressourcen der Trinkwasseraufbereitung effizienter nutzen

Bei der Aufbereitung von Grundwasser zu Trinkwasser fallen zwischen 1 % und 4 % Filterspülwasser an. Diese feststoffhaltigen Spülwässer werden derzeit i.d.R. nach Absetzen des Schlamms in Oberflächengewässer eingeleitet und gehen damit der Trinkwasserproduktion verloren. Zur Wiederverwendung dieser Filterspülwässer wurden in FITWAS verschiedene Ultrafiltrations-Konzepte untersucht. Das aufbereitete Spülwasser soll als Rohwasser ins Wasserwerk zurückgeführt und damit die Verfügbarkeit von Trinkwasser erhöht werden.

In Pilotversuchen lieferten alle untersuchten Membranverfahren (Unterdruckbetrieb/Druckbetrieb, polymere/keramische Membranen) eine sehr gute Filtratqualität, die die Rückführung erlaubt. Der maximal erzielbare Filtratflux (Filtratfluss bezogen auf Membranfläche) ist dagegen von der jeweiligen Zusammensetzung des Filterspülwassers sowie der verwendeten Membran abhängig.



Pilotversuche im Wasserwerk, in der Mitte Versuchscontainer und zwei Tanks mit Konzentrat aus der Membranfiltration von Filterspülwasser  
(Quelle: OOWV/DVGW-Forschungsstelle TUHH)



## ERGEBNISSE

Die Aufbereitung von Filterspülwässern mittels Ultrafiltration erwies sich als technisch gut umsetzbar. Sowohl polymere Hohlfasermembranen als auch keramische Plattenmembranen lieferten eine sehr gute Filtratqualität (hygienisch und



Pilotanlage mit zwei Ultrafiltrationsmodulen mit polymeren Hohlfasermembranen (Quelle: OOWV)

chemisch-physikalisch), sodass das Wasser potenziell als Rohwasser recycled werden kann. Die Membranfiltration kann einen ersten Schritt in einer Schlammverwertungskette darstellen. Neu ist das Behandlungskonzept basierend auf getauchten keramischen Plattenmembranen, die damit eine klare Alternative zu den etablierten polymeren Membranen bieten. Dabei ist die Rückspülung mit kurzen Pulsen (Backpulse) vorteilhaft, die sehr hohe Ausbeuten (bis zu 99 %) ermöglicht. Am Standort in Hamburg lieferten die Keramikmembranen einen um Faktor drei höheren Filtratflux als Polymermembranen und führen so trotz des höheren Preises der Keramikmembranen zu vergleichbaren spezifischen Aufbereitungskosten.

Die Zusammensetzung des Filterspülwassers bestimmt, wie hoch der maximal mögliche stabile Filtratflux ausfällt. Eine Pilotierung am jeweiligen Standort ist daher unbedingt zu empfehlen. Als ein weiteres wichtiges Ergebnis wird die Aufbereitung von durchmischem Filterspülwasser (ohne vorgesetzte Sedimentation) empfohlen, da dies zu stabilerem Betrieb führte.



## ANWENDUNGEN

Zwei Wasserversorgungsunternehmen haben als Projektpartner in FITWAS Pilotversuche in drei Wasserwerken durchgeführt. Die Ergebnisse bilden eine solide Grundlage, um die großtechnische Realisierung der Spülwasseraufbereitung abzuschätzen.

Bei HAMBURG WASSER werden derzeit die 17 Wasserwerke hinsichtlich ihrer Eignung für das Spülwasserrecycling bewertet. Hierbei werden u. a. die anfallende Spülwassermenge, sowie ggf. anstehende Modernisierungen der Standorte

einbezogen. Eine Erweiterung durch Spülwasserrecycling wird z.B. bei anstehenden Maßnahmen wie der Sanierung der Absetzbecken für die Weiterentwicklung priorisierter Standorte berücksichtigt.

Der OOWV schätzt die großtechnische Realisierung der Spülwasseraufbereitung mit Membranen für den Pilotierungsstandort und weitere Wasserwerke des OOWV ab. Derzeit gibt es bei drei Wasserwerken die Notwendigkeit, die Spülwasseraufbereitung und die Schlammtennwäscherung inklusive Schlammverwertung zu prüfen. Einerseits ist dies durch behördliche Auflagen getrieben, andererseits wird es im Falle eines Neubaus betrachtet, bei dem durch die örtlichen Gegebenheiten die bisher üblichen Schlammteiche nicht möglich sind.



## EINSPARPOTENZIALE

Der Anteil der Filterspülwässer beträgt zwar nur zwischen 1 und 4 % des geförderten Grundwassers, das in den Wasserwerken aufbereitet wird, dies summiert sich aber bei HAMBURG WASSER (HW) und beim OOWV über alle Wasserwerksstandorte auf jeweils 1,5 Mio. m<sup>3</sup>/a.

An beiden Pilotierungsstandorten könnten so ca. 58.000 m<sup>3</sup>/a (OOWV) bzw. ca. 140.000 m<sup>3</sup>/a (HW) Wasser zurückgewonnen werden, die Grundwasser ersetzen. Treiber für die Rückgewinnung sind knappe Grundwasserressourcen oder Wasserrechte in Zusammenhang mit steigenden Wasserbedarfen und hohen Auslastungen von Wasserwerken.

Eine Abschätzung für die Spülwasseraufbereitung am Pilotierungsstandort von HW ergibt einen Energiebedarf für die

Ultrafiltration von ca. 0,2 kWh/m<sup>3</sup> (mit Filtratrückführung und Durchmischung des Filterspülwassers). Im Vergleich dazu liegt der Energiebedarf für die Grundwasserförderung bei HW zwischen 0,1 – 0,3 kWh/m<sup>3</sup>, d.h. die Aufbereitung ist vom Energiebedarf her konkurrenzfähig.

Eine Kostenschätzung für beide Standorte ist im FITWAS Beitrag zur Essener Tagung 2025 enthalten (GWA Band 259, Aachen 2025, ISBN: 978-3-938996-65-2).

### Laufzeit

02/2021 bis 09/2024

### Koordination

Dr. Barbara Wendler / Prof. Mathias Ernst  
DVGW-Forschungsstelle TUHH, Hamburg

### Website

[www.tuhh.de/www/fitwas](http://www.tuhh.de/www/fitwas)

### Verbundprojektpartner

- CERA FILTEC Germany GmbH Blue Filtration, Saarbrücken
- Hamburger Wasserwerke GmbH (HW)
- Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV), Brake
- PHL Substratkontor GmbH & Co. KG, Friesoythe
- Umweltbundesamt (UBA), Berlin

# Etablierung innovativer Methoden für die abwasserfreie Produktion durch energieeffiziente Behandlung von stark belasteten Prozesswässern aus der Membranherstellung



## Med-zeroSolvent – Energetisch optimierte Lösungen für den biologischen Lösungsmittelabbau

Bei der Herstellung von Dialysemembranen für die Nierenersatztherapie werden Lösungsmittel wie Dimethylacetamid (DMAc) oder N-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP) eingesetzt. Innerbetrieblich werden erhebliche Anstrengungen zur Lösungsmittelrückgewinnung unternommen. Allerdings entstehen ungeachtet dessen lösungsmittelhaltige Reste, die konzentrationsabhängig extern behandelt oder thermisch entsorgt werden. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem lösungsmittelhaltige Abwässer vor Ort biologisch aufbereitet und nach einer membranbasierten weitergehenden Behandlung einer innerbetrieblichen Zweitnutzung zugeführt werden können. Dabei standen energiesparende naturnahe Lösungen (zweistufige Vertikalfilter), technische Biofilmverfahren (MBBR) und Anaerobverfahren im Fokus.



MBBR-Pilotanlage zum Abbau von DMAc (Quelle: Thomas Schalk, TU Dresden, Professur für Siedlungswasserwirtschaft)

## ERGEBNISSE

Die im Rahmen der Verfahrensentwicklung durchgeführten Pilotversuche zeigen, dass die untersuchte Verfahrenskombination aus MBBR und Vertikalfilter geeignet ist, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen, aber auch, dass die Kombination beider Verfahren nicht erforderlich ist. Durch eine angepasste Verfahrensführung lassen sich mit den Einzelverfahren gleichwertige Ergebnisse erzielen. Das im unbehandelten Prozesswasser enthaltene ökotoxikologische Potenzial wurde mit beiden Verfahren eliminiert. Zum Nachweis

wurden verschiedene Biotests eingesetzt. Für die zur Wasserverwendung erforderliche weitergehende Behandlung wurden trocken aufgestellte ionenselektive Membranmodule ausgewählt. Ein entscheidendes Kriterium bestand dabei in der Minimierung der nach der biologischen Behandlung erhaltenen Rest-Nitratkonzentrationen.

Zur Überwachung der DMAc-Konzentrationen im Kläranlagenzu- und -ablauf wurde eine onlinefähige UV-Vis-basierte Methode entwickelt. Die durchgeführten Anaerobversuche zeigten, dass NMP im Gegensatz zu DMAc als schwer anaerob abbaubar einzuschätzen ist, so dass sich eine technische Realisierung für NMP zumindest als herausfordernd darstellt.



Pilotanlage zum Abbau von DMAc - im Vordergrund: MBBR-Container, im Hintergrund: Vertikalfilteranlage (Quelle: Christian Koch, TU Dresden, Professur für Siedlungswasserwirtschaft)



## ANWENDUNGEN

Das entwickelte Verfahren kann modulweise in bestehende Anlagen implementiert werden. Das Kernstück bildet die biologische Behandlungsstufe. Art und Umfang der weitergehenden Aufbereitung richten sich nach dem Nutzungsziel. Die Implementierung kann sukzessive erfolgen. Im ersten Schritt wird das gereinigte Abwasser nach der biologischen Behandlung direkt oder indirekt eingeleitet. Diese Vorgehensweise wurde für den Standort Berggießhübel gewählt, für den gegenwärtig die Errichtung eines zweistufigen Vertikalfilters vorbereitet wird.

Die Wiederverwendung von biologisch behandeltem Abwasser kann über das Modul Umkehrosmose realisiert werden, zunächst in periphere Systeme ohne direkten Kontakt zur Faserherstellung. Für die Rückführung in den direkten Produktionsprozess ist zusätzlich die Einbeziehung vorhandener Anlagen zur Wasserrückgewinnung sinnvoll. Das größte Potenzial zur Wasserwiederverwendung besteht allerdings bei Betrieben ohne Lösungsmittel- und Wasserrückgewinnung, da größere Wassermengen im Umlauf sind.



## EINSPARPOTENZIALE

Die naturnahe biologische Behandlung von verdünnten DMAc-Gemischen führt zur Senkung der externen Entsorgungskosten und, im Fall eines der untersuchten Modellstandorte, zur Verringerung des Elektroenergiebedarfs um 26,4 MWh/a durch Stilllegung der gegenwärtig genutzten Destillationsanlage zur Abwasservorbehandlung. Durch die Mitbehandlung von DMAc in anaeroben Stabilisierungsanlagen kann Biogas erzeugt werden. Voraussetzungen sind eine technische

Lösung für die sichere Einspeisung in die Faulung und der innerbetriebliche Rückhalt von produktionsbedingten Kunststoffeinträgen in das Abwasser. Das Energiepotenzial der am Modellstandort anfallenden Konzentrate liegt bei insgesamt 335 MWh/a. Daraus können 111 – 134 MWh/a an elektrischer Energie erzeugt werden. Damit wird ein bisher entsorgtes Abfallprodukt in einen bewirtschaftungsfähigen Energielieferanten umgewandelt.

### Laufzeit

04/2021 bis 10/2024

### Koordination

Prof. Peter Krebs  
Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft

### Website

[www.medzerosolvent.de](http://www.medzerosolvent.de)

### Verbundprojektpartner

- B. Braun Avitum Saxonia GmbH, Radeberg
- CUP Laboratorien Dr. Freitag GmbH, Radeberg
- DAS Environmental Expert GmbH, Dresden
- ILK - Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Dresden
- Me-Sep, Dresden
- Technische Universität Dresden, Institut für Hydrobiologie
- wasserWerkstatt Ingenieurbüro für ökologische Wasserwirtschaft, Dresden

# Null-Emission Rohwasserproduktion in der Automobilindustrie



## NERA – Rohstoffe aus metallhaltigen Industriewässern emissionsfrei zurückgewinnen

In metallverarbeitenden Industriezweigen erfolgt die Abwasseraufbereitung in der Regel über die Zugabe von Säure, Lauge und Fällungs-/Flockungsmittel, um Schwermetalle und Phosphate zu entfernen. Die Aufbereitung gilt als preiswert, produziert jedoch einen nicht verwertbaren Sonderabfall, reduziert die Wirtschaftlichkeit einer Prozesswasserrückgewinnung und erfordert eine Lieferkette für Aufbereitungsmittel. Der NERA-Forschungsverbund hat ein neues elektrochemisches Verfahren entwickelt, um Schwermetalle und Phosphate salzarm, d.h. ohne Zugabe von Wasseraufbereitungsmittel aus dem Abwasser entfernen zu können. Der dabei entstehende Schlamm kann in der Hüttenindustrie verwertet und das gereinigte Abwasser effizient mit hoher Ausbeute zu hochwertigem Prozesswasser aufbereitet werden. Mit Strom aus regenerativen Quellen ist ein „emissionsfreier“ Wasserkreislauf möglich.



## ERGEBNISSE

Die Projektpartner in NERA haben ein neues Elektrodenmaterial und darauf aufbauend ein neues Fällungsreaktorkonzept sowie ein neues Behandlungsverfahren entwickelt. Das entwickelte Kathodenmaterial besteht aus einem Graphit-Polymer-Compound mit der besonderen Eigenschaft, eine ablaugungsfreie Fällung zu ermöglichen. Der Herstellungsprozess



Im Rahmen des Projektes entwickelte Proof-of-Concept-Pilotanlage (Quelle: CUTEC)

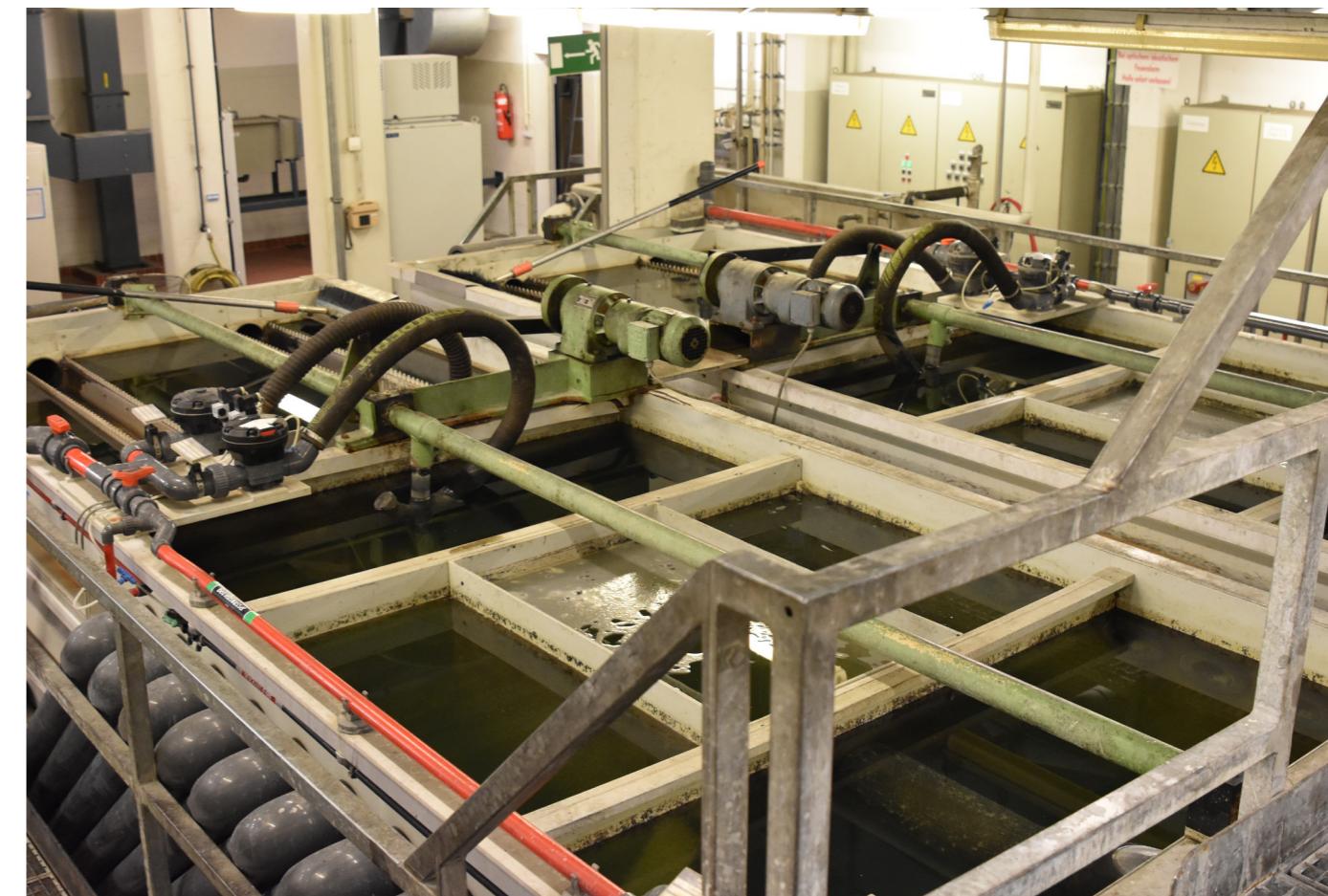
wurde mit entwickelt. Der Elektrolyse-Reaktor wurde im technischen Maßstab entwickelt und enthält u.a. drehende Kathodenscheiben für einen störungs- und wartungsarmen Betrieb. Für einen energieeffizienten Betrieb wurden optimierte Konstruktions- und Prozessparameter ermittelt.

Das entwickelte Behandlungsverfahren ermöglicht eine vollständige Fällung von Schwermetallen im basischen pH-Wert-Bereich sowie eine Neutralisation des gereinigten Abwassers nur mit Hilfe von elektrischem Strom und ohne chemische Hilfsstoffe. Für Abwässer aus Phosphatier-Anlagen wurde ein mehrstufiges Elektrolyseverfahren entwickelt, um einerseits Schwermetalle sowie andererseits schwermetallarmes Phosphat getrennt voneinander zurückzugewinnen. Durch Nutzung von Konzentraten aus Umkehrsmoseanlagen bleibt das Verfahren weiterhin „chemikalienfrei“.



## ANWENDUNGEN

Die in NERA entwickelten Techniken wurden an mehr als 20 verschiedenen Abwasserchargen von jeweils ca. 1 m<sup>3</sup> aus einer Komponentenproduktionsstätte der Volkswagen AG getestet. Sämtliche Abwasserchargen wurden zielführend mit einem Elektrolyseaufwand von 0,5 bis 2,0 kWh/m<sup>3</sup> behandelt. Das Potenzial zur über 90%igen Prozesswasserrückgewinnung wurde anhand einer 2-stufigen Membranverfahrensbehandlung nachgewiesen, die der im Werk betriebenen Prozesswasseraufbereitung aus Trinkwasser entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass das neue Verfahren besonders ressourceneffizient (keine Abfälle, keine Chemikalien, hohe Wasserausbeute) und zugleich auch wirtschaftlich interessant ist im Vergleich zu den weit verbreiteten Fällungs-/Flockungsverfahren. Das entwickelte Modulkonzept mit Parallel- und Reihenschaltung der Elektrolysereaktoren ist zudem geeignet, große Abwassermengen an Produktionsstätten der Automobilbranche zu behandeln. Die Techniken sind allgemein geeignet für die Hydroxidfällung von Metallen und



Anlage VW: Aktuelle Abwasserreinigungsanlage im VW-Werk in Braunschweig (Quelle: VW-Werk Braunschweig)

Härtebildner wie Magnesium und Calcium. Dies ist für Konzentrate aus Membrananlagen interessant, weil die Wasser- ausbeute erhöht wird und auch Rohstoffe gewonnen werden.



## EINSPARPOTENZIALE

Der Projektstandort steht beispielhaft für eine dreistellige Zahl an Produktionsstätten weltweit. Am Projektstandort fallen ca. 100.000 m<sup>3</sup>/a Abwasser der Metallverarbeitung an, das zu 90 % als Frischwasser rückgewinnbar ist. Der Frischwasserbedarf für Prozesswasser in der Metallbearbeitung von ca. 80.000 m<sup>3</sup>/a pro Jahr kann damit gedeckt werden.

Für die Abwasseraufbereitung werden jährlich ca. 100 t an Säure, Lauge, Kalk und Flockungsmittel benötigt, auf die dann vollständig verzichtet werden kann. Weiterhin werden am Standort jährlich ca. 100 – 150 t Fällschlamm als Sonderabfall entsorgt. Dafür entstehen stattdessen ca. 30 bis 50 t/a Fällschlamm, der als Rohstoff abgegeben werden kann.

Allerdings liegt der elektrische Strombedarf deutlich höher bei im Mittel ca. 1,5 kWh pro m<sup>3</sup> Abwasser. Die Kostensenkung im Einkauf von Frischwasser und Chemikalien und bei der Abfallsentsorgung sind größer als die Zusatzausgaben für den Strombedarf. Die Frage des Investitionsbedarfes ist noch zu klären.

### Laufzeit

02/2021 bis 10/2024

### Koordination

Prof. Michael Sievers  
CUTEC Forschungszentrum der TU Clausthal

### Webseite

[www.projekt-nera.de](http://www.projekt-nera.de)

### Verbundprojektpartner

- Common-Link AG, Karlsruhe
- Eisenhuth GmbH & Co. KG, Osterode am Harz
- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal (ICVT)
- Volkswagen AG (assozierter Partner), Braunschweig

# Recycling von Wäschereiabwasser zur Wiederverwendung des Abwassers mittels keramischer Nanofiltration



## ReWaMem – Wäschereiabwasser punktgenau aufreinigen und effizient zurückführen

Der deutsche Textilreinigungsverband schreibt, dass es 2021 ca. 3.600 Betriebe in Deutschland gab, welche starke Verbrauchsschwankungen bei Strom, Wasser und Wärmebedarf haben. Dies ergibt sich aufgrund der diversen Waschgüter, wie Krankenhaus-, Pflege-, Altenheim-, Hotel- und Gastronomiewäsche, Arbeits- und Berufsbekleidung, [...] und den bedingten individuellen (Verfahrens-)Strukturen der Betriebe.

Ziel des Projektes war die Senkung des Frischwasserbedarfs durch systematische, membranbasierte Abwasseraufbereitung innerhalb einer individuellen Verfahrenskette (point of origin). Neuartige keramische Grundgeometrien (tubular/ Rotationsscheiben) als auch Membranen wurden entwickelt und erprobt. Rückhalte bis 90 % im CSB und eine Wasserwiederverwendung bis 80 % wurden erreicht. Der Energieverbrauch ist nicht abschließend optimiert.



## ERGEBNISSE

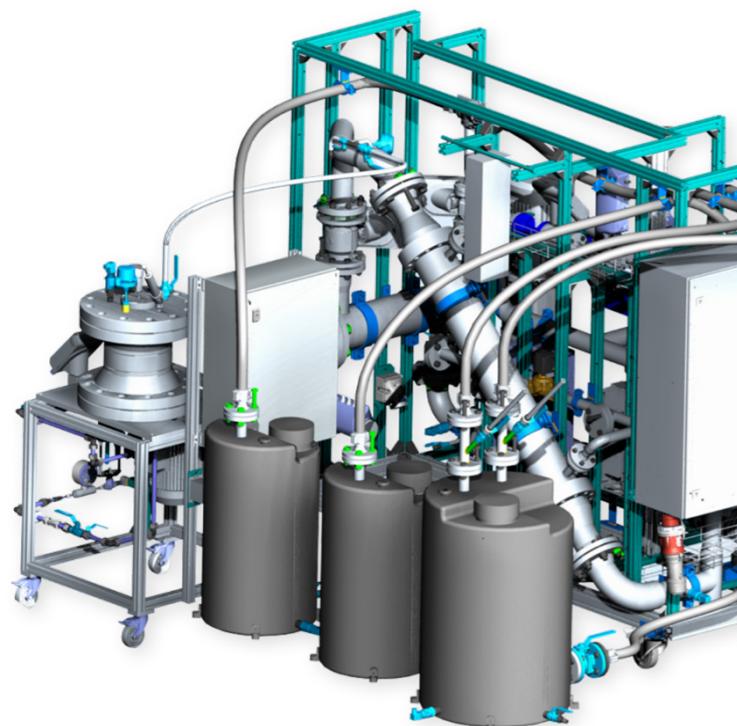
Im Rahmen des Projektes wurde ein Verfahrenskonzept zur Aufbereitung von typischen Wäschereiabwasserströmen (Matten- und Handtuchabwässer) auf Basis der keramischen Nanofiltration entwickelt, in einer Pilotanlage umgesetzt und erfolgreich getestet. Die Filtrationsanlage verfügt über ein er-

weiteres Mess- und Regelsystem und eignet sich im besonderen Maße zur Bestimmung des Filtrationsverhaltens verschiedenster Abwasserproben bei anpassbaren Prozessbedingungen. Diese Pilotierungsversuche dienen der qualitativen und quantitativen Beurteilung des Verfahrens als Basis für die Umsetzung von energie- und ressourceneffizienten Konzepten. Die praxistaugliche Filtrationsanlage kann auch prozessnah im kontinuierlichen Betrieb bei Temperaturen von bis zu 60 °C und Feed-Volumenströmen von bis zu 1,5 m<sup>3</sup> angebunden werden. Das Projekt liefert im Ergebnis ergänzend neue Supportgeometrien für tubulare Geometrien mit erhöhter Membranfläche und es wurden rotierende Membranscheiben für den industriellen Einsatz geschaffen. Beide Elementtypen stehen als Mikro-, Ultra- und Nanofiltrationsmembranen für Kundenanfragen zur Verfügung.



## ANWENDUNGEN

Vorversuche mit verschiedenen Realabwässern fanden zunächst im Technikum der E.S.C.H. GmbH statt. Es wurde das Filtrationsverhalten verschiedener Membrantypen und -geometrien (pH: 8 – 12, CSB: 1.300 – 4.500 mg O<sub>2</sub>/L, σ: 1.400 – 2.700 μS/cm) evaluiert. Hierbei wurde eine spezifische Energie von 1,5 bis 20 kWh pro m<sup>3</sup> behandelten Abwassers benötigt. Der auf den CSB-Gehalt bezogene Rückhalt erreichte dabei 90 %. Im Folgenden wurden Versuche beim Projektpartner CHMS vor Ort in Rödental durchgeführt. Über einen Bypass mit kontinuierlichem Durchsatz wurden so bis zu 800 L/h an Abwässern aus der Fußmattenreinigung erfolgreich behandelt. Bei einer Ausbeute von 80 % konnte ein um 90 % abgereichertes Brauchwasser zurückgewonnen werden. Ein Energiebedarf von minimal 6 kWh pro m<sup>3</sup> wurde dabei aufgezeigt. Anlagen in Produktionsgröße sind energieeffizienter zu betreiben. Die Ausbeute ist noch nicht



Pilotanlage im Technikumsmaßstab (Quelle: E.S.C.H. GmbH)



Vor-Ort-Versuche bei CHMS mit Mattenabwasser (Quelle: E.S.C.H. GmbH)

optimiert. Als Abwasser fielen 20 % des Ausgangsvolumens an. Die Übertragbarkeit der Projektergebnisse konnte bereits bei realen Industrieanfragen und in Vorversuchen aufgezeigt werden.



## EINSPARPOTENZIALE

Im Rahmen der Prozesserprobung konnte nachgewiesen werden, dass mittels des entwickelten und erprobten Verfahrenskonzeptes die Abwasserströme auf mindestens 20 % reduziert werden können. Ein Großteil der behandelten Prozessabwasser (> 80 %) kann als Brauchwasser an geeigneten Stellen in der Wäscherei wiederverwendet werden. Je nach festgelegter Qualitätsanforderung für die einzelnen Waschprozesse kann ein Teil der Frischwassermengen ersetzt werden. Durch die Einbindung der Anlagentechnik und unter Ausnutzung der hohen Prozesstemperaturen (> 45 °C) kann die Leistungsfähigkeit der Verfahrensstufe noch gesteigert werden (Einfluss Viskosität). Zusätzlich kann die Rückführung eines „heißeren“ Permeates als Brauchwasser den Wärmeenergieverbrauch reduzieren helfen.

Die erreichte Qualität des Permeates deutet darauf hin, dass Teile des Waschmittels im Permeat verbleiben und bei Wiederverwendung ggf. die Waschmittelzugabe reduziert werden könnte. Hierzu bedürfte es der Einbeziehung der Lieferanten.

## Laufzeit

02/2021 bis 07/2024

## Koordination

Sebastian Auer

Kompetenznetzwerk Wasser & Energie, Hof

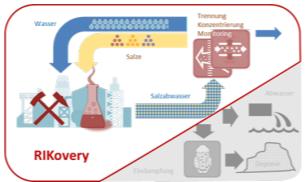
## Webseite

[www.rewamem.de](http://www.rewamem.de)

## Verbundprojektpartner

- Coburger Handtuch- und Mattenservice GmbH & Co. KG (CHMS), Rödental
- E.S.C.H. Engineering Service Center und Handel GmbH, Unterwellenborn
- Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Hermsdorf
- Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hof
- Rauschert Kloster Veilsdorf GmbH, Veilsdorf
- ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching

# Recycling von industriellen salzhaltigen Wässern durch Ionentrennung, Konzentrierung und intelligentes Monitoring



## RIKovery – Salzhaltige industrielle Wasserströme nutzen

Die zunehmende Wasserknappheit erhöht die Notwendigkeit, salzhaltiges Wasser wiederzuverwenden und gleichzeitig die entfernten Inhaltsstoffe einer erneuten Nutzung zuzuführen. Dabei sind sowohl industrielle Prozessabwasser als auch Salzabwässer aus Halden oder salzhaltige Grundwässer relevant.

In RIKovery wurden Recyclingkonzepte entwickelt, die die Wiedergewinnung der in Wasserströmen enthaltenen Salze sowie die Nutzung des anfallenden Wassers ermöglichen. Die Verfahren tragen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, Vermeidung von Stoffeinträgen in den Wasserkreislauf und Verminderung des Primärwasserbedarfs bei.



## ERGEBNISSE

Anhand von realen relevanten Beispielen aus der Praxis mit Membranmodulen im technischen Maßstab konnte gezeigt werden, dass innovative Technologien zur Ionentrennung und Aufkonzentrierung die Möglichkeiten der Konzentratzaufbereitung deutlich erweitern:

- Als besonders attraktiv erweist sich der Betrieb der Nano-filtration über den üblichen Betriebsdruck von 41 bar hinaus (HPNF). Hier konnte gezeigt werden, dass die Trennung von Sulfaten und Chloriden für nahezu gesättigte Salzlösungen machbar ist.
- Die Aufkonzentrierung von einwertigen Neutralsalzen mittels Ultra-High-Pressure Low Salt Rejection Reverse Osmosis (UHP-LSRRO) gelingt bei einem Anwendungsdruck von 120 bar bis zu 15 Gew.-% und damit über die Grenzen der Hochdruck-Umkehrosmose (UHPRO) hinaus.

- Es konnte gezeigt werden, wie mit cleveren Verfahrenskonzepten mittels Forward Osmose eine Konzentration bis hin zur Kristallisation mit geringem Energiebedarf erreicht werden kann.
- Flow-Electrode Capacitive Deionization (FCDI) konnte verwendet werden, um Chlorid-Ionen von Sulfat-Ionen in einem einzigen Schritt zu trennen und zu konzentrieren.

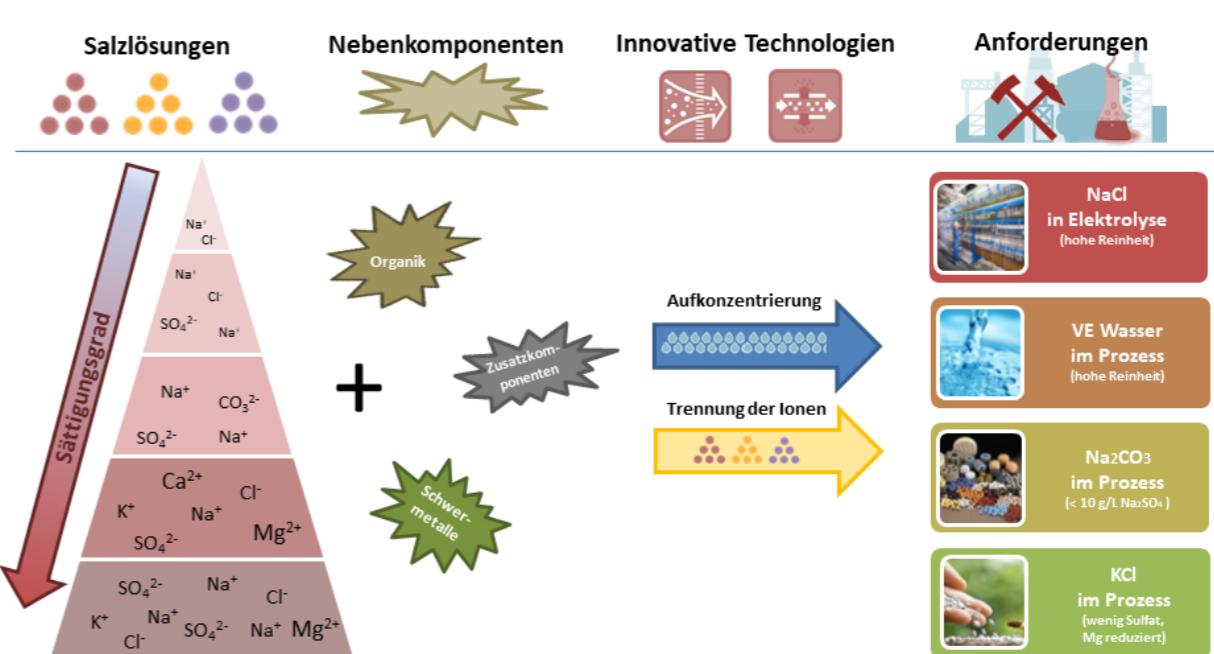
Zur Wiederverwendung von Salzen und Wässern sind spezifische Parameter einzuhalten, um Betriebssicherheit zu gewährleisten. Es wurden Konzepte und analytische Methoden zur Bestimmung der organischen Spurenstoffe in stark salzhaltigen Lösungen entwickelt.

## ANWENDUNGEN

Um breit übertragbare Projektergebnisse zu erzielen, hat das Projekt-Konsortium industriell relevante Anwendungen



RIKovery-Team (Quelle: K+S)



Aufgabenstellungen zur Wiederverwendung von salzhaltenden industriellen Wasserströmen in RIKovery (Quelle: RIKovery)

bearbeitet, die die Haupteinleitungen (Polymerchemie, Spezialchemie, Mineralindustrie) abdecken, sich aber hinsichtlich der Herausforderungen deutlich unterscheiden und somit den Großteil der industriellen Salzeinleitungen darstellen.

Die Notwendigkeit der Reduzierung von Salzemissionen in die Oberflächengewässer erfordert die Weiterentwicklung von energieeffizienten Verfahren zur Ionentrennung und Aufkonzentrierung. Reduktion der Salzemission sollte nicht oder nur mit einer minimalen Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Footprints einhergehen. Folgt man dieser Prämisse, so ist die volle Ausnutzung der Anwendung der Membranverfahren ein kohärenter und zweckmäßiger Ansatz, welcher in RIKovery erfolgreich demonstriert werden konnte. Dies bietet neue Perspektiven für eine Realisierung der industriellen Soleverwertung im Kontext der Ressourcenrückgewinnung und der Wasserwiederverwendung.



## EINSPARPOTENZIALE

Für die Aufkonzentrierung von einwertigen Salzen wurde ein innovatives Membran-Verfahren UHPRO/UHP-LSRRO (für 120 bar Betriebsdruck) entwickelt, welches zur energieeffizienten Aufkonzentrierung der Salzwässer führt (bis NaCl-Konzentration von 170 g/L). Eine Pilotanlage für kontinuierlichen Betrieb (Feed 2,5 m<sup>3</sup>/h) wurde gebaut und am Standort Leverkusen (Covestro) eingesetzt. Die innovative Technologie kann bis zu 60 % Energieeinsparung im Vergleich zur Eindampfung erzielen.

Simultane Ionentrennung und Aufkonzentrierung aus einem Gemisch bestehend aus NaCl und Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mittels FCDI wurde erfolgreich an der RWTH Aachen und bei Evonik durchgeführt.

Die Zielvorgaben einer Selektivität von mehr als 20 gegenüber Sulfat-Ionen und einer Konzentration auf 150 g/L NaCl im Konzentratstrom wurden gezeigt.

Für die Aufbereitung von komplexen hochsalzhaltigen Wässern der Kali-Industrie wurde eine innovative energieeffiziente Verfahrenskombination aus HPNF-FO entwickelt, welche die Trennung und Aufkonzentrierung von ein- und mehrwertigen Ionen bei einem Energiebedarf von ca. 7 kWh/m<sup>3</sup> erlaubt.

### Laufzeit

02/2021 bis 12/2024

### Koordination

Dr. Yuliya Schießer  
Covestro Deutschland AG, Leverkusen

### Webseite

[www.rikovery.rwth-aachen.de](http://www.rikovery.rwth-aachen.de)

### Verbundprojektpartner

- AFIN-TS Analytisches Forschungsinstitut für Non-Target Screening GmbH, Augsburg
- BWS Anlagenbau & Service GmbH, Oberndorf a.N.
- Evonik Operations GmbH, Hanau-Wolfgang
- K+S AG, Unterbreizbach
- RWTH Aachen
- Technische Hochschule Köln
- TZW: DVGW – Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

# Integrative Anwendung von Innovationen und digitales Kühlleistungsmanagement zur Reduzierung des Wasserbedarfs in der Stahlproduktion



## WEISS\_4PN – Potenziale zur Senkung des Wasserfußabdruckes der Stahlindustrie

Eine Stahlproduktion und Weiterverarbeitung ist ohne ausreichende Wasserressourcen nicht denkbar, da bedingt durch Verarbeitungsprozesse und Kühlsysteme Verdunstungsverluste regelmäßig ersetzt und sich anreichernde Salzkonzentrationen im Prozesswasser gesenkt werden müssen. Dies kann sich in Größenordnungen von 200 m<sup>3</sup>/h und mehr je Stahlstandort bewegen.

Im Projekt sind verschiedene Ansätze zur Effizienzsteigerung von Wasserkreisläufen als auch die Nutzung von vermeintlichen Abwasserströmen als Frischwasserersatz durch Entsalzungstechnologien erfolgreich erprobt worden. Dabei wurden digitale Softwarelösungen zum Abgleich von Wasserbedarf und -verfügbarkeit, verschiedene Membrantechniken zur Entsalzung von Wasserströmen an Stahlstandorten im Rahmen von Pilotanlagen eingesetzt sowie zur Steigerung der Effizienz von Membranverfahren Anti-Fouling-Beschichtungen pilotiert.

## ERGEBNISSE

Die Pilotieranlage wurde an zwei Standorten erfolgreich und mit Erkenntnisgewinn betrieben. In der Vorplanung ist es entscheidend, alle Standortparameter zu erfassen und die Verfahrenstechnik auf die speziellen Produktionsbetriebe und lokalen Wassereigenschaften einzustellen. Die untersuchten Wässer zeigten in den Verfahren unterschiedliches Verhalten (Silikatausfällungen oder Ablagerungen auf Basis von Phosphaten oder Flouridverbindungen).



Membranwechsel an der Umkehrosmoseanlage  
(Quelle: SMS)

Die Pilotierung konnte dennoch in allen Fällen mit geeigneten Betriebsparametern und adaptieren Vorbehandlungen stabil gefahren werden:

- Ultrafiltration mit Ausbeuten von 90 – 95 %
- Niederdruck- und Hochdruckumkehrosmose mit Ausbeuten von 85 – 90 %
- die in-situ Anti-Fouling-Membranbeschichtung wurde aufgebracht und zeigte gute Ergebnisse
- membrangestützte Kapazitive Deionisation (mCDI) mit Ausbeuten von bis zu 83 % bei einem Energiebedarf von 0,57 kWh/m<sup>3</sup> (flexibler Betrieb möglich)
- die Niedertemperatur-Destillation kann, sofern thermische Energie über Abwärmeträger zur Verfügung gestellt werden kann, mit einem elektrischen Energiebedarf von 2,5 kWh/m<sup>3</sup> betrieben werden

Darüber hinaus wurde ein vielversprechendes Prognosetool zur Wasserverfügbarkeit erstellt, welches vorausschauend Verfügbarkeitsengpässe erkennt und Datenbanken mit produktionsabhängigen Wasserbedarfen entgegengehalten werden kann.

## ANWENDUNGEN

Das Verfahrenskonzept des Projektes WEISS\_4PN kann flexibel variiert werden und nicht nur verschiedene Wässer verwerten, sondern auch grundsätzliche Lösungen im Wassermanagement anbieten:

- Reduzierung von Frischwasserbedarf bei Wasserstress
- Einleitbedingungen erfüllbar gestalten (-> ZLD-Lösung)
- wirtschaftliche Gewinnung von Frischwasser

Die Grundbausteine sind eine Vorbehandlung (Mikrofilter, Ul-



Pilotierungscontainer und Konzentratsammler  
(Quelle: SMS)



Einstellung Betriebsparameter an der Ultrafiltration (Quelle: SMS)

bald es zu Wasserengpässen kommt. Wohingegen im 2. Fall bei einem ZLD-Prozess eine Frischwassereinsparung von 50 % dargestellt werden kann, die sich in der Sommerperiode bis über 80 % steigern kann.

## Laufzeit

04/2021 bis 10/2024

## Koordination

Stefan Schmidt  
SMS group GmbH (SMS), Hilchenbach

## Website

[www.sms-group.com/de-de/innovation/funding-projects/weiss-4pn](http://www.sms-group.com/de-de/innovation/funding-projects/weiss-4pn)

## Verbundprojektpartner

- aixprocess GmbH, Aachen
- ArcelorMittal GmbH, Eisenhüttenstadt
- Technische Universität Berlin
- Universität Duisburg-Essen (UDE)
- VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI), Düsseldorf
- WEHRLE Umwelt GmbH, Emmendingen



## THEMENFELD

# Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser

Trinkwasserknappheit sowie ein steigender Wasserbedarf sind Herausforderungen in vielen Regionen weltweit. Durch das Eindringen von Meerwasser in viele küstennahe Grundwasserleiter oder schwindende Süßwasserressourcen besteht immer mehr Bedarf an effizienten Verfahren zur Wasserentsalzung. WavE II erarbeitete Lösungen für die Nutzung von salzhaltigen Grund- und Oberflächenwässern als alternative Wasserressource für verschiedene Verwendungszwecke.

Bei der Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser besteht noch deutlicher Forschungsbedarf. Herausforderungen liegen hier vor allem bei der Verringerung von Betriebs- und Instandhaltungskosten, der Steigerung der Energieeffizienz, dem umweltgerechten Umgang mit der entstehenden Sole bzw. deren Verminderung und dem gezielten Management von anfallenden Stör- bzw. Rohstoffen. Große Potenziale werden in den Bereichen Dynamisierung der Prozessführung sowie der Überwachung und Optimierung von Entsalzungsanlagen bzw. -verfahren gesehen.

Vor allem in ariden und semiariden Gebieten, aber auch in gemäßigten Klimazonen, werden heutzutage Entsalzungstechnologien zur Trink- und Brauchwassergewinnung eingesetzt.

Im Themenfeld „Aufbereitung von salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser“ hat das BMBF drei Verbundprojekte gefördert. Hier wurden innovative Technologien wie die kapazitive Deionisierung oder die Vorwärtsosmose sowie Verfahrenskombinationen in der Praxis erprobt und weiterentwickelt. Dabei reichten die Anwendungsfälle von der Trinkwasseraufbereitung über die Behandlung tagebaubeeinflusster und sulfatbelasteter Wässer bis hin zur Aufbereitung von Sickerwässern aus der Salzindustrie.

Die wichtigsten Ergebnisse und Produkte aus den Forschungsprojekten, deren Anwendungsperspektiven sowie die sich daraus ergebenden Potenziale zur Einsparung von Wasser und Ressourcen sind auf den folgenden Seiten zusammengefasst.



## Verbundprojekte

**Innovation:** Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung

**HaSiMem:** Wasserrückgewinnung aus Haldensickerwässern auf der Basis von Membrandestillationsprozessen und Kopplung mit Kristallisation

**SULFAMOS:** Sulfatabreicherung mittels Vorwärtsosmose und Hohlfasertauchmodulen

# Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung



## innovation – Energieeffiziente selektive Entsalzung mit der mMCDI

Süßwasser, das vom Meer, geogenen oder menschlich verursachten Salzvorkommen beeinflusst wird, enthält erhöhte Konzentrationen einwertiger Ionen, wie Natrium, Nitrat und Chlorid, als auch mehrwertige Ionen, wie Sulfat und Calcium. Einwertige Ionen können durch traditionelle Entsalzungsverfahren in salzhaltigen Grund- und Oberflächenwasser meist nur mit einer Vollentsalzung entfernt werden. Für eine energieeffizientere und ressourcenschonendere Reduzierung der einwertigen Ionen wurden innerhalb von innovatION selektive Membranen für den Einsatz in der monovalent selektiven membrangestützte Kapazitive Deionisation (mMCDI) getestet.

## ERGEBNISSE

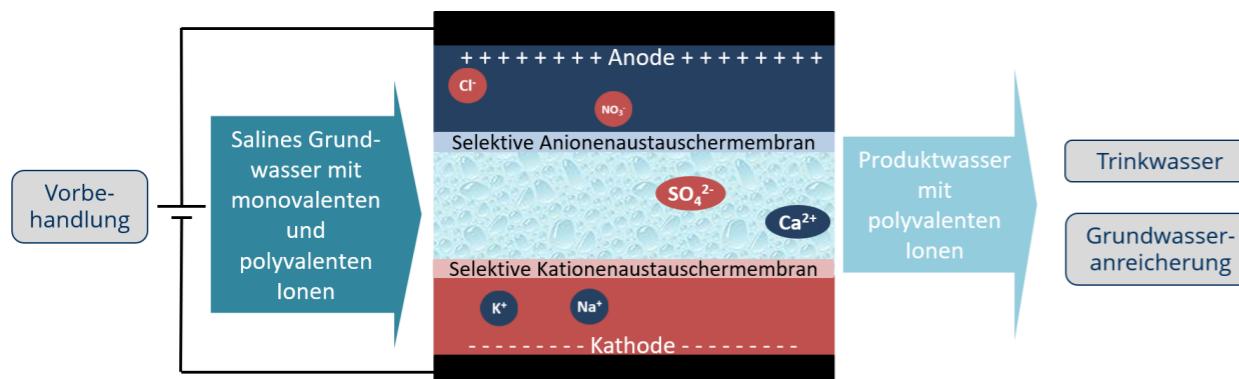
Die mMCDI ist ein energieeffizientes elektrochemisches Teilentsalzungsverfahren zur Entfernung einwertiger Ionen für gering salzhaltige Wässer. Die Entsalzung kann sich dabei flexibel an die Rahmenbedingungen der Entsalzung, wie die Verfügbarkeit von Strom, geforderte Ausbeute und Entsalzungsleistung, anpassen. Durch den Einsatz von neu hergestellten monovalent selektiven Membranen können einwertige Ionen, wie Natrium, Nitrat und Chlorid, diese Membranen passieren und somit an der kapazitiven Elektrode der mMCDI-Zelle adsorbiert. Mehrwertige Ionen können unter Einhaltung idealer Prozessbedingungen (geringe elektrische Spannung und hohen Durchfluss) die Membran nicht passieren und verbleiben im Produktwasser.

In den Labor- und Pilotversuchen konnte somit eine bis zu zehnfach höhere Entfernung von einwertigen Ionen im

Vergleich zu zweiwertigen Ionen erzielt werden. Es zeigen sich für die mMCDI sowohl Kapital- als auch Betriebskosten einsparungen gegenüber vergleichbarer, konventioneller Entsalzungstechnologien.

## ANWENDUNGEN

Die mMCDI kann zukünftig dort eingesetzt werden, wo monovalente Ionen die Grenzwerte für Trinkwasser oder für die Bewässerung überschreiten oder wo eine Grundwasseranreicherung mit teilentsatztem Wasser notwendig ist. Dabei zeigte sich, dass teilentsatztes Wasser im Vergleich zum vollentsalzen Wasser besser für die Grundwasseranreicherung geeignet ist. Ein energetischer Vorteil ergibt sich gegenüber der konventionellen Entsalzung bei gering salzhaltigen Konzentrationen wie mit den nitratreichen Grundwässern am Standort des Kreisverbands für Wasserwirtschaft Nienburg mit einem Gesamtsalzgehalt von 0,3 g/L. Bei höherer Salinität wie am Standort



Funktionsschema der mMCDI zur Aufbereitung salzhaltiger Wässer (Quelle: Hanna Rosentreter, TU Dresden)



mMCDI Pilotanlage von der DEUKUM GmbH und elkoplan staiger GmbH zur selektiven Entfernung von einwertigen Ionen auf Langeoog beim Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverband (Quelle: David Schödel, TU Dresden)

des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbands auf Langeoog zeigte die mMCDI zwar einen höheren Energiebedarf als die Nanofiltration, jedoch ist der chemische Reinigungsbedarf geringer. Da kein Antiscalantmittel eingesetzt werden muss, ist die Verwertung des Konzentrats zur weiteren Aufkonzentrierung, Nutzung oder Beseitigung unproblematischer. Die Langzeitanwendung wird bisher jedoch noch durch die materiellen Eigenschaften der Elektroden begrenzt.

## EINSPARPOTENZIALE

Für die selektive Entfernung von Nitrat mit der mMCDI konnte unter optimierten Prozessbedingungen bei einer Zulaufkonzentration von 0,3 g/L mit 0,05 – 0,10 kWh/m<sup>3</sup> ein um bis zu 50 % geringer Energieverbrauch im Vergleich zu traditionellen Entsalzungsverfahren gemessen werden. Bei einer Zulaufkonzentration von 1,3 g/L war der Energieverbrauch der mMCDI ähnlich zur Nanofiltration, wies aber einen deutlich geringeren Chemikalienverbrauch auf.

Bei der Entsalzung mit der mMCDI konnte bei einem höheren Energieverbrauch eine Ausbeute von bis zu 90 % erreicht werden. Die Ergebnisse zur selektiven Nitratentfernung wurden im Journal Water Resources and Industry eingereicht. Zur Herstellung, Anwendung und Nachhaltigkeitsaspekten von monovalent selektiven Ionenaustauschermembranen wurde ein Review veröffentlicht (<https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118412>). Die Ergebnisse zur geeigneten Infiltration des monovalent teilentsalzten Wassers wurden im Journal of Hydrology eingereicht.

### Laufzeit

02/2021 bis 10/2024

### Koordination

Prof. André Lerch,  
Technische Universität Dresden, Professur für  
Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

### Webseite

[www.innovat-ion.de](http://www.innovat-ion.de)

### Verbundprojektpartner

- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, AG Hydrogeologie und Landschaftswasserhaushalt
- DEUKUM GmbH, Frickenhausen
- elkoplan staiger GmbH – Automation für die Umwelt- und Verfahrenstechnik, Nürtingen
- FUMATECH BWT GmbH, Bietigheim-Bissingen
- Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg
- Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF)
- Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOVV), Brake
- Technische Universität Dresden, Professur für BWL, insb. Nachhaltigkeitsmanagement und Betriebliche Umweltökonomie
- United Nations University, Inst. for Integrated Management and Material Fluxes and of Resources, Dresden (assozierter Partner)
- KWR Water B.V., Nieuwegein, Niederlande (assozierter Partner)

# Wasserrückgewinnung aus Haldensickerwässern auf der Basis von Membrandestillationsprozessen und Kopplung mit Kristallisation



## HaSiMem – Verfahrenskombination von Membrandestillation und Kristallisation zur Aufbereitung von Haldenabwässern

Durch Niederschlag, welcher auf Rückstandshalden der Salzindustrie fällt, entstehen hochkonzentrierte Salzlösungen, die so genannten Haldensickerwässer, die in Haldenrandgräben und Drainagen gefasst und der Entsorgung zugeführt werden. Aus Rückstandshalden der Projektpartner K+S und LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft) fallen jährlich mehr als 2,5 Mio. m<sup>3</sup> dieser Haldensickerwässer an. Ziel des Projektes war die Untersuchung einer Verfahrenskombination aus Kristallisation und einem membrangestützten Destillationsverfahrens (MD). Fokus lag dabei auf der Stabilität der hydrophobierten keramischen Membranen gegenüber den gesättigten Salzlösungen.



## ERGEBNISSE

Das Verfahrenskonzept sieht wie folgt aus: Eine erwärmte Salzlösung wird an einer wasserabweisenden Membran vorbeigeführt, an der Wasser aus der Lösung verdampft. Die Membran trennt Feed- und Destillatraum, verhindert den Durchtritt der Salzlösung und lässt nur Wasserdampf passieren. Dadurch steigt die Salzkonzentration und es entsteht eine Übersättigung. Das gewonnene Wasser ist praktisch salzfrei, während in einem Kristallisator aus der übersättigten Salzlösung Salz kristallisiert wird. Die aufkonzentrierte Salzlösung zirkuliert zwischen Membran und Kristallisator bis die gewünschte Wassermenge entzogen wurde.



Keramische 7-Kanal- und 19-Kanal-Rohre für die Membrandestillation (Quelle: Fraunhofer IKTS)

Versuche mit Polymermembranen scheiterten an der Verblockung der Membranen durch Salzkristallisation auf der Membran. Bei funktionalisierten Keramikmembranen hingegen trat dieses Problem nicht auf, so dass sie auch in Verbindung mit gesättigten Salzlösungen einsetzbar sind.

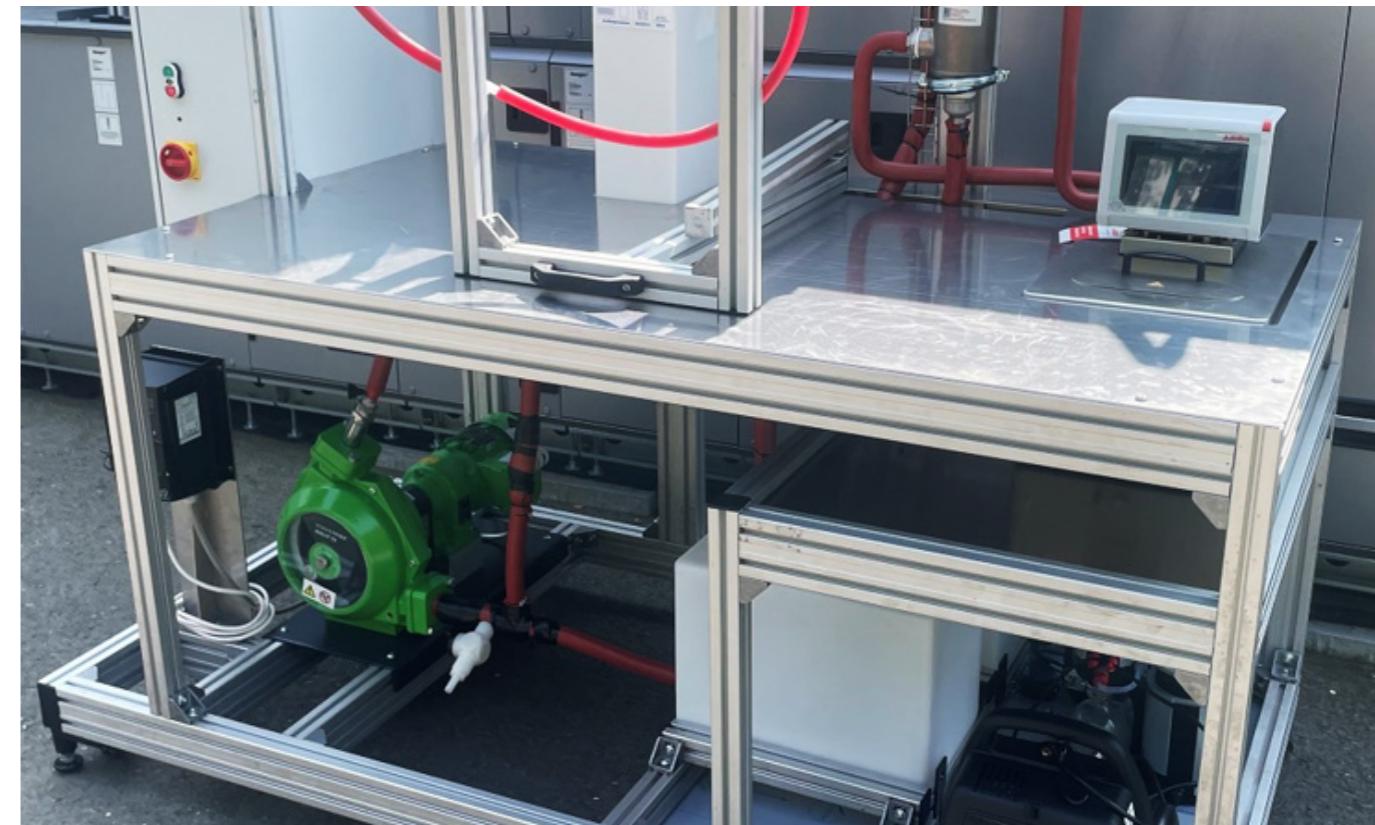
Zur Optimierung der Destillatausbeute wurden Membranen mit unterschiedlicher Kanalzahl gefertigt, beschichtet und zunächst im Labormaßstab mit synthetischer Haldensickerlösung getestet. Zum Abschluss des Projektes erfolgten dann erfolgreiche Versuche mit realen Haldensickerwässern. Die Ergebnisse dieser Studie befinden sich aktuell in der Auswertung.



## ANWENDUNGEN

Das entwickelte Verfahren wurde im Pilotmaßstab mit Haldensickerwasser getestet. Ursprünglich für die Aufkonzentration von Haldensickerwässern entwickelt, bieten die hier erhaltenen Ergebnisse zusätzlich Ansatzpunkte für die Konzentration salzhaltiger Wässer aller Art. Durch die Trennung von Salzlösung und Destillatraum sind bei der Membrandestillation im Vergleich zur technischen Eindampfung deutlich kompaktere Bauweisen möglich; der Destillatraum kann klein gehalten werden.

Daher ist das Verfahren insbesondere dann interessant, wenn die Verdampfung bei geringen Absolutdrücken stattfinden muss, sodass aufgrund der niedrigen Dichte des Dampfes ein technischer Eindampfer sehr große Abmaße aufweist. Da Salze den Dampfdruck von wässrigen Lösungen herabsetzen und das untersuchte Verfahren



Membranseitiger Anlagenteil zur Erprobung der Verfahrenskombination aus keramischer Membrandestillation und Kristallisation  
(Quelle: Fraunhofer IKTS)

auch bei einer Kristallisation von Salzen anwendbar ist, ist diese Technologie unter anderem interessant für die salzverarbeitende Industrie.



## EINSPARPOTENZIALE

Durch die Aufbereitung der Haldensickerwässer können Salzfrachten der Vorfluter reduziert, Salz stabilisiert eingestapelt und der Wasserbedarf reduziert werden. Im Vergleich zu konventionellen Eindampfungsanlagen liegt durch die Membran die einzudampfende Lösung räumlich vom Destillatraum getrennt vor; dieser kann deutlich kleiner und kompakter ausgeführt werden. Zugleich schirmt die Membran den Destillatraum von der korrosiven salzhaltigen Lösung ab, was bei einer technischen Eindampfung nicht der Fall ist.

Dies lässt eine Ausführung aus kostengünstigeren Materialien zu und könnte perspektivisch zu einem Einsparpotential hinsichtlich der Investitionskosten führen. Eine Mehrstufigkeit des Verfahrens kann des Weiteren den Energiebedarf um z. B. 50 % (zweistufig) bzw. 67 % (dreistufig) reduzieren. Im aktuellen Vorhaben konnte erfolgreich die Stabilität der Membranen in Kontakt mit realen feststoffhaltigen Salzlösungen aufgezeigt werden. Die eingesetzten keramischen Membranen befinden sich gegenwärtig noch in der Entwicklung, relevante Reduktionen der Herstellungskosten lassen sich durch Maßstabsübertragungen zu großen Membrangeometrien im industriellen Maßstab erreichen. Der tatsächliche Umfang der möglichen Einsparungen konnte deswegen im Rahmen dieses Projektes noch nicht abschließend geklärt werden und bietet Raum für zukünftige Forschungsaktivitäten.

### Laufzeit

02/2021 bis 12/2024

### Koordination

Bernhard Neupert  
K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen

### Website

[www.hasimem.de](http://www.hasimem.de)

### Verbundprojektpartner

- Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Hermsdorf
- K+S Aktiengesellschaft, Kassel
- SolarSpring GmbH, Freiburg

# Sulfatabreicherung mittels Vorwärtsosmose und Hohlfasertauchmodulen



## SULFAMOS – Sulfatabreicherung mittels Vorwärtsosmose und Hohlfasertauchmodulen

Zu den Spätfolgen des Braunkohletagebaus in Deutschland gehört die großflächige Belastung von Grund- und Oberflächenwässern mit Eisen und Sulfat. Gleichzeitig wird jedoch mit dem bevorstehenden Braunkohleausstieg der Rohstoff Gips für die Bauindustrie fehlen, der bisher in den Rauchgasentschwefelungsanlagen der Kraftwerke erzeugt wurde. Die Beteiligten des Verbundprojektes SULFAMOS entwickelten ein kombiniertes Verfahren, das beide Probleme lösen sollte: Durch die Reduzierung der eingetragenen Sulfatfracht können belastete Gewässer wieder zur Trink- und Brauchwassergewinnung genutzt werden. Zusätzlich wird aus den Reststoffen Gips erzeugt.



Installierte SULFAMOS-Pilotanlage am Feldstandort einer Wasserbehandlungsanlage. Rechts: Modul zur vorwärtsosmotischen Sulfatanreicherung, links Modul zur Sulfatabtrennung mittels Fällung als Gips (Quelle: G.E.O.S.)

## ERGEBNISSE

Das Projektteam entwickelte neue, speziell oberflächenbehandelte Hohlfasermembranen mit einem hohen Sulfatrückhalt, die dann in eigens entwickelten Modulen getestet wurden. In Laborversuchen wurde nachgewiesen, dass die entwickelte Verfahrenskombination grundsätzlich zur Behandlung sulfatbelasteter Wässer aus Tagebau-beeinflussten Quellen geeignet ist. Dem Problem des perspektivisch sinkenden Wasserdar-

werden kann. Die Testergebnisse flossen in den Bau einer Pilotanlage, bestehend aus einem Membran- und einem Fällungsmodul ein, die direkt mit dem Ablauf einer Grundwasserbehandlungsanlage beaufschlagt und erfolgreich im kontinuierlichen Betrieb getestet wurde.

Mit den im Projekt gewonnenen Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Verfahrenskombination grundsätzlich zur Behandlung sulfatbelasteter Wässer aus Tagebau-beeinflussten Quellen geeignet ist. Dem Problem des perspektivisch sinkenden Wasserdar-



Blick auf die Fällungskaskade (Quelle: G.E.O.S.)

gebotes und der damit zu erwartenden Konzentrationsanstiege des Sulfates in bereits belasteten Quellen sehen sich immer mehr Wasserversorger und Betreiber bergbaulicher Anlagen konfrontiert. Im Laufe der Projektbearbeitung konnte G.E.O.S. mit vielen potentiellen Anwendern in Kontakt treten.

## ANWENDUNGEN

Potentielle Technologieanwender sind u.a.:

- Wasserversorger mit Brunnen, die aufgrund hoher geogen bedingter Sulfatkonzentrationen im Rohwasser außer Betrieb genommen wurden, die für die Erhöhung der Versorgungssicherheit in Trockenjahren zukünftig aber wieder reaktiviert werden müssen;
- Betreiber von Grubenwasserbehandlungsanlagen, die mit der Sicherstellung einer ausreichenden Ablaufqualität bzgl. des Parameters Sulfat Probleme haben;
- Städte und Landkreise in Bergbaufolgelandschaften, die Konzepte zur nachhaltigen Nutzung ihrer Wasserressourcen benötigen;
- Bergbaubetreiber, die Gipsgestein fördern und anstehende Sickerwässer behandeln müssen;
- Anwender klassischer Membranverfahren, die Verwertungswege für erzeugte sulfatreiche Konzentrate suchen;
- Herstellung von Elektrolysespeisewasser für Wasserstofferzeugung im Rahmen der Umsetzung von Power-to-X-Konzepten.

## EINSPARPOTENZIALE

Aus der Vielfalt möglicher Anwender leitet sich ein hohes technologisches Potenzial ab, das für die Lösung verschiedenster Fragestellungen einsetzbar ist. Argumente zum Einsatz des gewählten Ansatzes zur Wasserwiederverwen-

dung aus sulfatbelasteten Quellen gibt es viele, beispielsweise weil

- Gewässer durch weitergehende Behandlung von Abwässern vor Einleitung in die Vorflut geschont werden,
- eine signifikante Frachtminderung von Sulfat in Gewässern und damit eine deutliche Verbesserung des chemischen und ökologischen Gewässerzustandes erzielt wird,
- Wasserquellen nachhaltig bewirtschaftet werden,
- eine Wertschöpfung anstelle der Entsorgung anfallender Reststoffen erzielt wird und Ressourcen durch Kreislaufschließung nachhaltig genutzt werden,
- insgesamt ein wertvoller Beitrag sowohl zum aktiven als auch vorsorgenden Umweltschutz geleistet wird.

### Laufzeit

05/2021 bis 04/2024

### Koordination

Dr. Roland Mayer,  
G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke

### Webseite

[www.sulfamos.de](http://www.sulfamos.de)

### Verbundprojektpartner

- fluvicon Industries GmbH, Frickenhausen
- Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik (IGB), Stuttgart
- HTW Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Lehrgebiet Wasserwesen
- MionTec GmbH, Leverkusen
- Zweckverband Wasser/Abwasser Bornaer Land, Borna



## INNOVATIONSATLAS WASSER

Hier finden Sie weitere innovative Produkte aus der BMBF-geförderten Wasserforschung. Die Produkte umfassen neben Technologien und Verfahren auch Managementkonzepte, Software-Tools und Bildungsmaterialien zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

[www.innovationsatlas-wasser.de](http://www.innovationsatlas-wasser.de)

