

Fakultät Umweltwissenschaften, Fachrichtung Hydrowissenschaften  
Institut für Siedlungs- und Industrier Wasserwirtschaft, Professur für Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

# WavE-Abschlusskonferenz

## **Impulsvortrag**

### Querschnittsthema: Technologien und Verfahren – Innovative ionenselektive (Membran-)Verfahren

Prof. Dr.-Ing. André Lerch // Hanna Rosentreter

09.10.2024

# Ziele des Querschnittsthemas „Technologien und Verfahren“

- Vernetzung und Erfahrungsaustausch → Wissenstransfer



1. Überblick über Technologien und Verfahren von 13 Verbundprojekten in WavE II geben

2. Veröffentlichung



Innovative ionenselektive (Membran-)Verfahren

- Fact Sheet zum Vergleich verschiedener (Membrangestützten) Kapazitiven Deionisationsverfahren mit Hilfe von Einsatzgrenzen und Leistungsparameter



Wassertechnologien zur  
landwirtschaftlichen  
Wasserwiederverwendung

# Überblick und Vergleich

- 55 unterschiedliche Verfahren zur Wasser (-Wieder-) Aufbereitung und Wasserwiederverwendung

Definition von KUOI und KPI	
Key Unit Operation Indicator (KUOI)	Key Performance Indicator (KPI)
KUOI dienen der Definition von Randbedingungen und sinnvollen Einsatzgrenzen zur Technologieauswahl.	KPI dienen dem Leistungsvergleich der Verfahren (Benchmarking) im konkreten Anwendungsfall.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklungsstand</li> <li>• Komplexität</li> <li>• Stoffliche Einsatzgrenzen</li> <li>• Technische Einsatzgrenzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminationsleistung</li> <li>• Energiebedarf</li> <li>• Reststoffanfall</li> <li>• Hilfsstoffeinsatz</li> <li>• (Bau)Größeneinordnung</li> <li>• Instandhaltung</li> </ul>

Engelhart 2021/WavE I



Wortwolke aus den Technologien und Verfahren, die in Wave II Verbundprojekten eingesetzt wurden. [erstellt mit <https://tagcrowd.com>]

# Fact Sheet zum WavE Querschnittsthema „Technologien und Verfahren“ - (Membrangestützte) Kapazitive Deionisationsverfahren



## FACT SHEET ZUM WAVE QUERSCHNITTSTHEMA „TECHNOLOGIEN UND VERFAHREN“ (Membrangestützte) Kapazitive Deionisationsverfahren

**EINFÜHRUNG**  
Klimatische Veränderungen in Verbindung mit einer Zunahme von Wasserstress und Änderungen der Wasserrahmenbedingungen führen beispielsweise in Kombination mit einem steigenden Wasserbedarf durch Bevölkerungswachstum und industrieller Entwicklung bei gleichzeitig unzureichender Abwasserbehandlung zu potenziellen Nutzungskonflikten bzw. deren Verschärfung. Exemplarisch beträgt der Wasserbedarf in Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland rund 20 Mrd. m<sup>3</sup> pro Jahr (DESTATS 2022). Die Verfügbarkeit von Wasser in ausreichendem Umfang und in geeigneter Qualität bildet die Grundlage für eine sichere Trinkwasserversorgung, Agrarwirtschaft und industrielle Produktion. Dies erfordert die Erschließung bisher nicht genutzter bzw. nicht nutzbarer potenzieller Wasserquellen wie auch als stark salzhaltiger bzw. organikhaltiger Wässer und Abwässer. Hieraus resultiert ein weiterer Bedarf an effizienten Verfahren zur (Wieder-)Aufbereitung.

**ENTSALZUNGSVERFAHREN**  
Eine Entsalzung kann prinzipiell durch druckbetriebene, thermische oder elektrochemische Verfahren durchgeführt werden. Beispiele sind die Umkehrosmose, Verdampfung oder kapazitive Entsalzungsverfahren. Vorteil der elektrochemischen Entsalzungsverfahren (Abb. 1, unten) ist, dass Ionen aus dem Lösungsmittel Wasser entfernt und zwischengespeichert werden. Der Energiebedarf skaliert dabei linear mit der entfernten Salzmenge. Im Gegensatz hierzu wird bei den anderen (konventionellen) Verfahren (Abb. 1, oben) meist das Lösungsmittel Wasser mittels Druck von bis zu 60 bar bei der Umkehrosmose oder über Temperaturen von bis 200°C bei der Verdampfung von dem Salzen abgetrennt. Insgesamt steigt bei allen Entsalzungsverfahren der Energiebedarf mit steigenden Salzkonzentrationen an, jedoch ist die Energie, bezogen auf eine geringe Salzkonzentration, bei der Verdampfung und der Umkehrosmose meist höher.

Welche Ionen bei den elektrochemischen Verfahren entfernt werden, ist von den spezifischen Ionenaustauschermembranen (Anionenaustauschermembran (AM) und

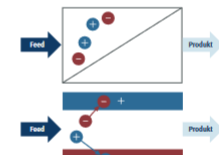


Abbildung 1: Konventionelles Verfahren (oben: „Wasser aus Lösung“) und elektrochemisches, kapazitives Verfahren (unten: „Salz aus Lösung“) im Vergleich.

Bisher werden die meisten elektrochemischen Verfahren im Labormaßstab untersucht. Es fehlt somit die Erfahrung in anwendungsorientierten Langzeitsuchen, welche notwendig sind, um die Grenzen und Möglichkeiten der Prozesse in bestimmten Einsatzszenarien anhand technologischer Kennzahlen als „Key Uni Operation Indicators“ (KUOI) und „Key Performance Indicators“ (KPI) (Engelhart 2022) zu beschreiben. Diese werden im Rahmen der BMBF Fördermaßnahme „Wasser- und Abwasser-Recycling“ (WavE) durchgeführt und Ergebnisse in diesem Fact Sheet mit wesentlichen Ergebnissen zur Kapazitive Deionisation (engl. Capacitive Deionization (CDI)) als ein Vertreter der elektrochemischen Membranverfahren vorgestellt. Anwender sollen so bei der Auswahl eines Verfahrens für ihren Anwendungsbereich hinsichtlich technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte bestmöglich unterstützt werden.

### TECHNOLOGIEBESCHREIBUNG (M)FC/CDI IN WAVE

Die CDI zählt neben verschiedenen Verfahrenskombinationen der Elektrodialyse und der Tardialysen Elektroosmose zu den innovativen elektrochemischen Verfahren. Bei der CDI werden die Elektroden über Gleichstrom polarisiert. An diese Ionenpolarisationschichten sorbieren/desorbieren Ionen in der sich ausbildenden elektrochemischen Doppelschicht im elektrischen Feld (s. Abb. 2). Durch spezifische Zellkonzepte, der Beschichtung von Elektroden, der Anordnung von Membranen auf den Elektroden als Membrangestützte Kapazitive Deionisation (engl.: Membrane Capacitive Deionization (MCDI)) oder die Nutzung von fließenden Elektroden (engl.: Flow Electrode Capacitive Deionization (FC/CDI)) kann eine höhere, selektivere oder durchgängige Entfernungsleistung erzielt werden.

Die Effizienz der Verfahren ist dabei von den Ausgangsparametern (Ionenkonzentration), den Zellparametern (benötigte Produktionskonzentration), den Prozesseinstellungen (z.B. Stromstärke, Spannung und Durchfluss) sowie von den Materialien (z.B. der Elektroden und Membranen) abhängig. Bisher wird die Technologie vorwiegend zur Reduktion anorganischer Wasserinhaltsstoffe wie beispielsweise Chlorid, Sulfat bzw. Nitrat genutzt. Der Wartungsaufwand ist aufgrund des geringen Brunnenaufwands und durch die volumetrische Betriebsweise gering. Aktuell ist die Lebensdauer der Elektroden noch begrenzt (ca. 2 Jahre) und stark abhängig von zu behandelnden (Ab)Wässern, jedoch werden derzeit neue Elektrodenmaterialien entwickelt und deren Langzeiteffizienz untersucht.

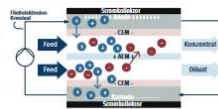


Abbildung 3: Prinzip von FC/CDI in Single Module Aufbau mit simultaner Entsalzung und Aufkonzentration.



Abbildung 2: Prinzip der konventionellen MCDI, oben: Adsorptionsschritt; unten: Desorptionsschritt.

Im Verbundprojekt WEISS\_4.0 ([https://www.wms-group.com/innovation/funding/projects/wave\\_4p0](https://www.wms-group.com/innovation/funding/projects/wave_4p0)) wird eine Membrangestützte Kapazitive Deionisation (MCDI) mit modifizierten Membranen untersucht und mit einer konventionellen MCDI verglichen. Fokus der Arbeiten ist die erstmalige Untersuchung des Ablaufs einer zentralen Abwasserbehandlung eines integrierten Hüttenwerks mit Abwässern (Absalzung diverser Kühlerkälte, Neutralisation Gaseischweissen) aus verschiedenen Produktionsbereichen sowie einer biologischen Abwasserbehandlung. Dies umfasst die Untersuchung technischer Betriebsparameter und Vorbehandlungen sowie deren Auswirkungen auf die Entsalzungsleistung und die Reinerwasserausbeute. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Ermittlung potentieller Störstoffe wie beispielsweise betrieblich verwendete Wasserbehandlungsmittel oder produktionsbedingten Einträgen sowie deren Entfernung zur Sicherstellung eines weichen Anlagenbetriebs, im Rahmen eines Life Cycle Assessments sowie einer Wirtschaftlichkeitsbe-

trachtung erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse im Vergleich zu einer Umkehrosmose mit einer konventionellen Membran sowie einer beschichteten Membran.

Im Verbundprojekt **RIKovary** ([www.rikovary.rwth-aachen.de](http://www.rikovary.rwth-aachen.de)) wird die kontinuierliche Trennung und Aufkonzentrierung ein- und zweierwertiger Ionen in der Flow Electrode Capacitive Deionization (FC/CDI) betrachtet. Hierzu wird sowohl die Membranoberfläche einer einzelnen Entsalzungseinheit vergrößert als auch ein Numbering-Up Ansatz verfolgt, bei dem mehrere Einzeleinheiten hintereinanderschaltbar werden. Nach vorbereitenden Experimenten mit Natriumsulfid und Natriumsulfat im Labor erfolgt anschließend eine Pilotierung mit Realwässern.

Im Verbundprojekt **innovatION** ([www.innovat-ion.de](http://www.innovat-ion.de)) werden spezielle monovalent-selektive Membranen entwickelt und in der MCDI eingesetzt, um selektiv Natrium, Chlorid und Nitrat zu entfernen, polyvalente Ionen jedoch im Produktwasser zu belassen (Abb. 4). Zusätzlich wird der Einfluss von verschiedenen Prozessparametern auf die Entsalzungsleistung sowie das Scaling und Fouling in Langzeittesten untersucht. Dabei wird die praktische Anwendung für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung geprüft. Die entwickelte Technologie wird anhand einer ganzheitlichen ökonomisch-ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung internationalen Zielgruppen wie den Nachhaltigkeitszielen gegenübergestellt, um entsprechende Handlungsempfehlungen abzuleiten.

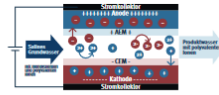


Abbildung 4: Selektive Entsalzung durch den Einsatz monovalent-selektiver Membranen in der CDI (Projekt innovatION).

### KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPI) AND KEY UNIT OPERATION INDICATORS (KUOI)

Die Ausgangsbedingungen hinsichtlich der zu behandelnden Salzkonzentrationen, nachfolgend als Vielfaches der Meerwasseralkonzentration (MW) von 35 g/l NaCl aufgeführt, sowie der organischen Belastung für Feed, Diluat und Konzentrat in den jeweiligen Projekten variieren stark (s. Abb. 5).

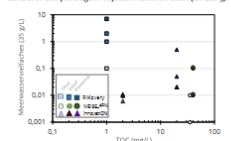


Abbildung 5: Meerwasser- und organische Belastung in den drei Projekten RIKovary (blau), WEISS\_4.0 (grün) und innovatION (violett).

Für einen Vergleich der CDI Verfahren werden die in Tabelle 1 aufgeführten Einsatzbedingungen und die bisher bestimmten Einsatzgrenzen anhand von Technologie Kennzahlen als KPI und KUOI wie in Engelhart (2022) beschriftet bzw. aufgeführt und stellen den aktuellen Stand der bisherigen Abläufe im Querschnittsthema dar.

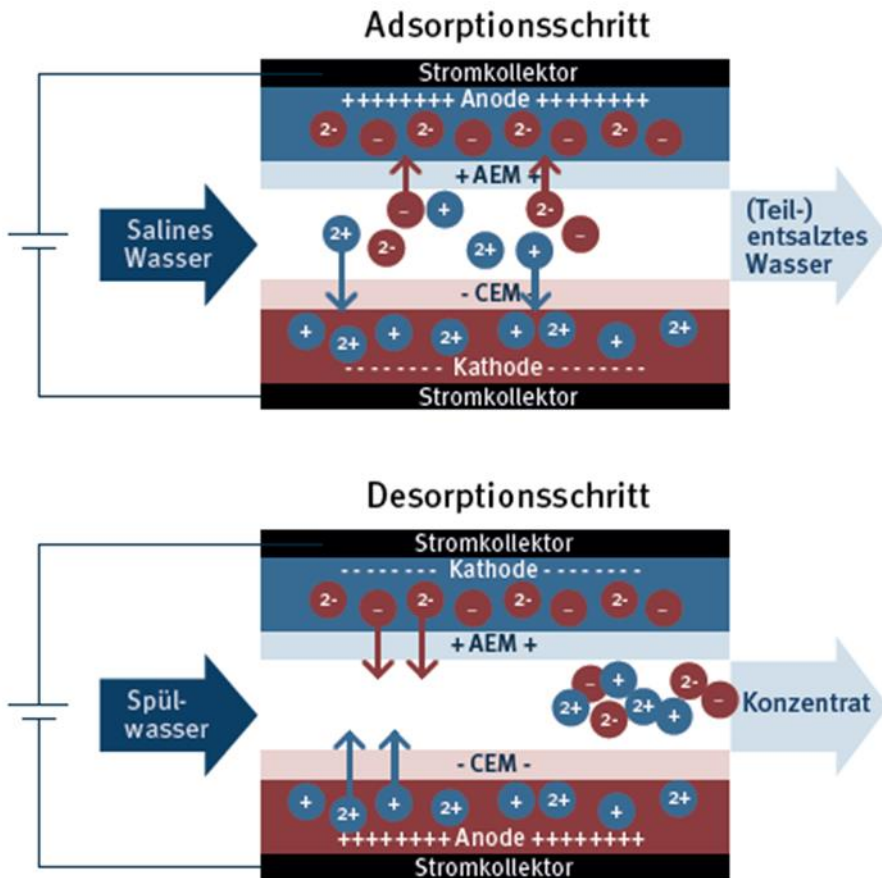
- QUELLEN**  
DESTATS (2022). Eigengewinnung und Fremdbezug von Wasser sowie Einleitung von Abwasser und ungenutzten Wasser, 2019. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umweltschwermetalle/Abwasser/abwasser-2019.html> (abgerufen: 12.06.2024)
- Engelhart, M. (2022). Assessment of Water Reuse Technologies and Concepts - Technical aspects (KPI/KUOI). In: WavE-Online-Seminar Assessment of Water Reuse Technologies and Concepts, 29.09.2022 <https://bmbf.wave.de/veranstaltungen/WavE-Online-Seminar-Assessment-of-Water-Reuse-Technologies-and-Concepts/WavE-Online-Seminar-p-248.html>
- AUTORINNEN UND AUTOREN**  
Mitglieder des WavE-Querschnittsthemas „Technologien & Verfahren“: André Lerch (Vorsitzende) & Hanna Rosentretter (TU Dresden), Martin Imbich (BfL), Christian Imrath & Lukas Munkert (RWTH Aachen), Volker Scheuer (COWI/SIKO), Mathias Wojciechowski (E.ON/IK).
- HERAUSGEBER**  
Wissenschaftliches Begleitvorhaben „TransWavePlus“ (Förderkennzeichen: 02WV160), Christina Jungler (DEHEMA e.V., christina.jungler@dehema.de) Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren [www.bmbf.wave.de](http://www.bmbf.wave.de) Erschienen im August 2024

Tabelle 1: Übersicht der Einsatzbedingungen sowie ausgewählte KPI und KUOI der drei eingesetzten CDI Verfahren. (MW = Meerwasser- und organische Belastung)

Projekt	RIKovary	WEISS_4.0	innovatION
<b>Aufbereitungsziel</b>	Industrielle Technologie zur Anreicherung und Aufkonzentrierung. Prozess: Filterung, selektive Aufkonzentrierung von Natriumsulfat aus Abwasser/Industrieabwasser	Entsalzung, Lebensdauererhöhung und Skalierbarkeitserhöhung	Spezialisierte Technologie für den industriellen Wassereinsatz. Ziel: größte Entsalzung von Natrium, Chlorid und Nitrat aus Schmelzen/Gasöl und Oberflächenwasser
<b>Technologie Reifezeit (TRL)</b>	5-6	6-8	4-6
<b>Salzkonzentration</b>	Zielwert: 1-2 x MW Rezeptionswert: 0,1-1 x MW Diluat: 0,01-0,1 x MW	Zielwert: 0,01-0,1 x MW Rezeptionswert: 0,01-0,1 x MW Diluat: 0,001-0,01 x MW	Zielwert: 0,001-0,01 x MW Rezeptionswert: 0,01-0,1 x MW Diluat: 0,001-0,01 x MW
<b>Organik</b>	Schwache Organikbelastung möglich	Zielwert: 10-20 mg/l COD Rezeptionswert: 10-20 mg/l COD Diluat: 10-20 mg/l	Zielwert: 10-20 mg/l COD Rezeptionswert: 10-20 mg/l COD Diluat: 10-20 mg/l
<b>Zusammensetzung</b>	Minerale und polyvalente Salzkationen	Phosphat, Ammonium, Nitrat, Ca <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HCl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Anorganik (Diluat), Filtrat/Produkt</b>	Abwasser/Produkt: Bis zu 0,1 x MW Anionen: 50%+	60-80% Kationenkonzentration: Bis zu 100 (UL, 2 <sup>+</sup> )	30-50%
<b>Ionen selektiv</b>	ja	ja	ja
<b>Innovation</b>	Innovative Technologie zur Anreicherung und Aufkonzentrierung. Selektive Entfernung von Natrium, Chlorid und Nitrat	Simulation, Entsalzung und Anreicherung von Natrium, Chlorid und Nitrat. Selektive Entfernung von Natrium, Chlorid und Nitrat	Entsalzung basierend auf innovativen Ionen
<b>Einsatz von Chemikalien</b>	Keine. Während Betrieb: Geringe Menge / Aufbereitung von Gasöl/NaCl, NaOH, HCl, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Rezeptionswert: 0,1 x MW)	Geringe Menge / Aufbereitung von Gasöl/NaCl, NaOH, HCl, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Rezeptionswert: 0,1 x MW)	gelegentlich Chemikalienbedarf ab 100 (UL) über 100 (UL) bis zu 1000 (UL) pro Jahr. Geringe Menge / Aufbereitung von Gasöl/NaCl, NaOH, HCl, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Rezeptionswert: 0,1 x MW)
<b>Lebensdauer</b>	Bisher: Lebensdauer / Wartung von 2-3 Jahren. Bisher: Lebensdauer / Wartung von 2-3 Jahren. Bisher: Lebensdauer / Wartung von 2-3 Jahren.	Lebensdauer der Elektroden: Schätzung 2 Jahre	Lebensdauer der Elektroden: Schätzung 2 Jahre. Lebensdauer der Membranen: bis zu 10 Jahren möglich (UL)
<b>Anpassung mit erneuerbaren Energien</b>	Siehe ggf. Kopplung, auch bei vermindertem Stromertrag	Siehe ggf. Kopplung, auch bei vermindertem Stromertrag	Siehe ggf. Kopplung, auch bei vermindertem Stromertrag
<b>Sicherheit / Robustheit / Flexibilität</b>	Siehe Robust, ggf. stabiler Prozess	Siehe Robust, ggf. stabiler Prozess	Siehe Robust, aber nicht für hohe Belastungen
<b>Recyclingfähigkeit</b>	Bisher nicht untersucht	Bisher nicht untersucht	Bisher nicht untersucht
<b>Energiebedarf</b>	5-10 kWh/m <sup>3</sup> für 2 MW	0,5-1 kWh/m <sup>3</sup>	0,5-1 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Zusatzinformationen</b>	Simulation, Trennung und Aufkonzentrierung von 1- und 2-wertigen Ionen Hohe Aufkonzentrierung bei hoher Wasseraktivität	Positive Abschätzung der Aufkonzentrierung von 1- und 2-wertigen Ionen Korrelation zwischen Meerwasser- und Abwasser-Entsalzung und Energiebedarf Hohe Wasseraktivität bei getrennter Anreicherung ermöglicht	Kombination der Trenntechnik der Membran- und Ionenaustauschermembran-Technologie zur selektiven Entfernung von Natrium, Chlorid und Nitrat Hohe Wasseraktivität bei getrennter Anreicherung ermöglicht

Veröffentlichte Version des Fact Sheets vom 2.10.24:  
[https://bmbf.wave.de/Wasserwiederverwendung/\\_/WavE%20Fact%20Sheet-Web\\_final.pdf](https://bmbf.wave.de/Wasserwiederverwendung/_/WavE%20Fact%20Sheet-Web_final.pdf)

# Vorstellung der CDI-Verfahren



Prinzip der konventionellen MCDI; oben: Adsorptionsschritt; unten: Desorptionsschritt. [Fact Sheet]

## Membrangestützte Kapazitive Deionisation (MCDI):

- basierend auf dem Prinzip der Elektroadsorption
- Nutzung von Ionenaustauschermembranen führen im Vergleich zur „einfachen“ Kapazitiven Deionisation (CDI) zu einer höheren Effizienz

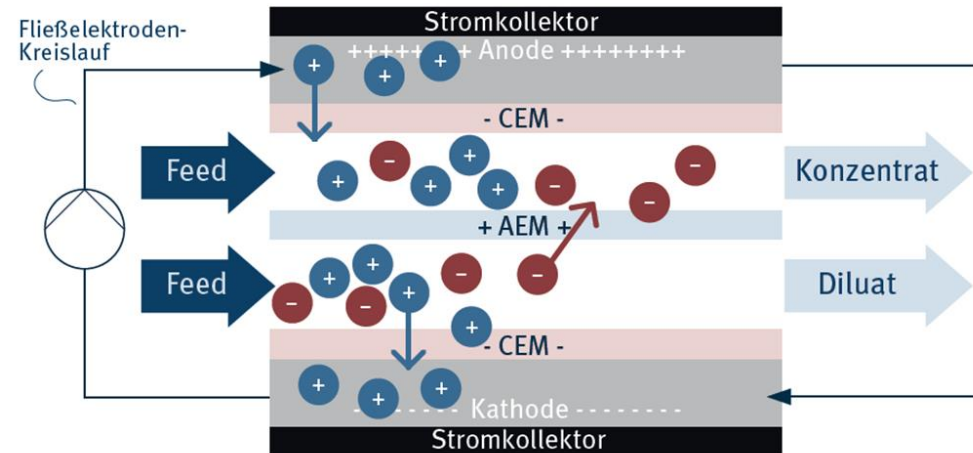
→ Verbundprojekt  **WEISS\_4PN**

# Vorstellung der CDI-Verfahren

## Fließelektroden Kapazitiven Deionisation (FCDI):

- kontinuierliche Trennung und Aufkonzentrierung über Fließelektroden möglich

→ Verbundprojekt **RIKovery**

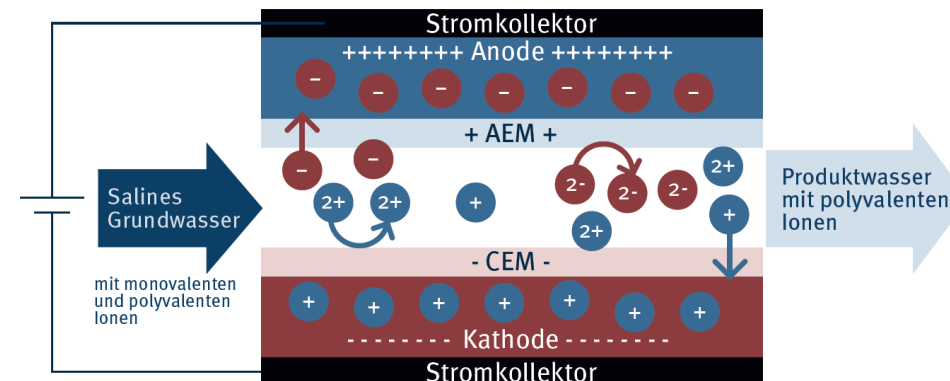


Prinzip von FCDI im Single Module Aufbau mit simultaner Entsalzung und Aufkonzentrierung. [Fact Sheet]

## monovalente Membrangestützte Kapazitive Deionisation (mMCDI):

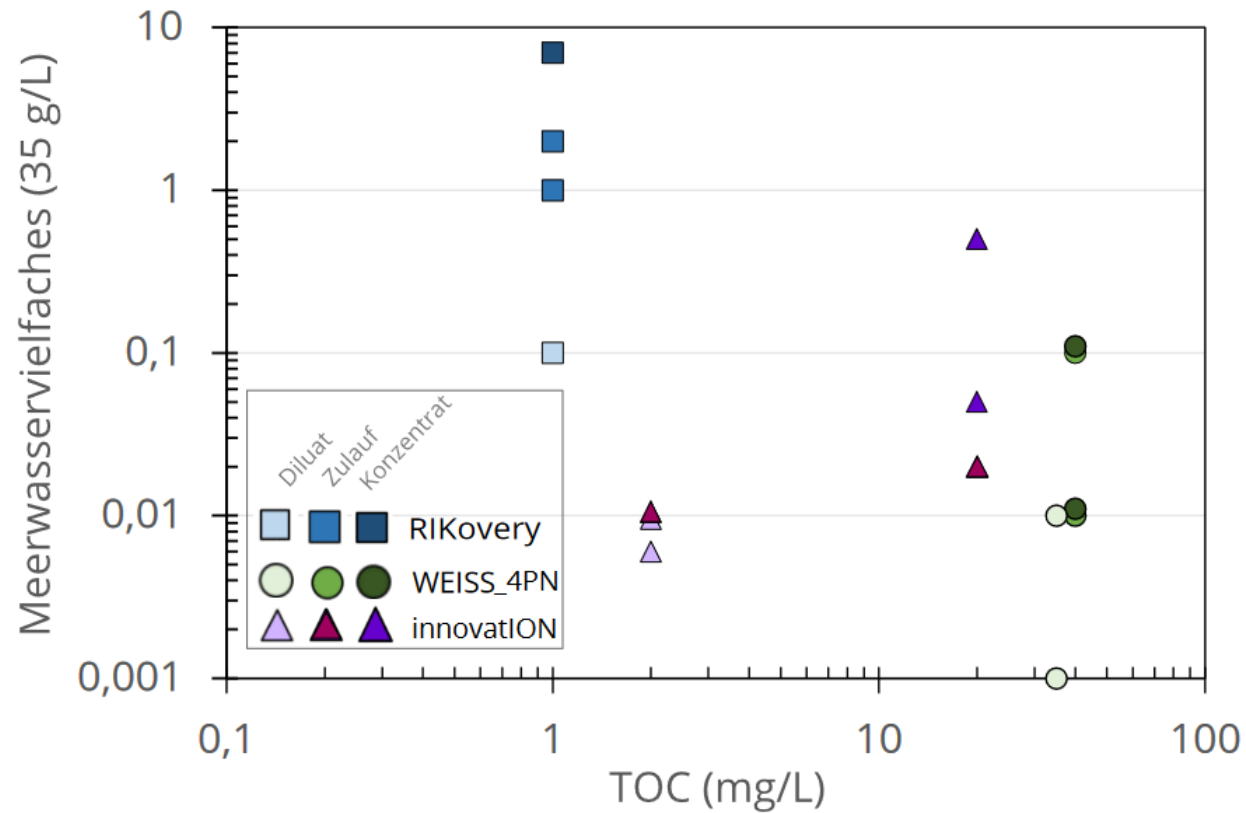
- Entfernung von einwertigen Ionen (wie z.B. Natrium oder Chlorid) aus der Lösung
- Nutzung von selektiven Ionenaustauschermembranen

→ Verbundprojekt **innovatION**  
Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern



Selektive Entsalzung durch den Einsatz monovalent-selektiver Membranen in der CDI (Projekt innovatION). [Fact Sheet]

# Vorstellung der CDI-Verfahren

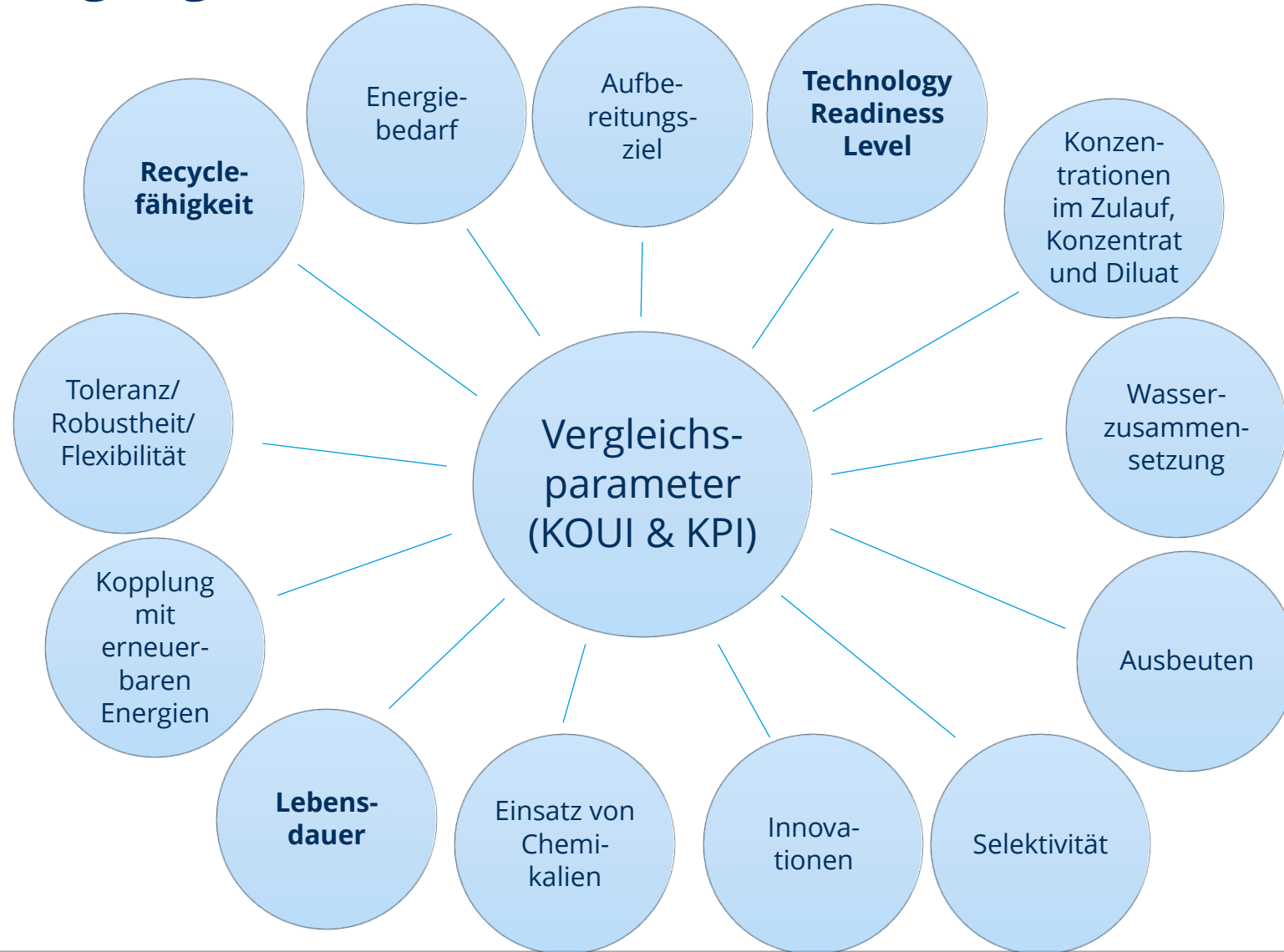


**RIKovery**



Meerwasservielfaches gegenüber organischer Belastung in den drei Projekten RIKovery (blau), WEISS\_4PN (grün) und innovatION (violett). [Fact Sheet]

# Einsatzbedingungen und Schlüsselindikatoren

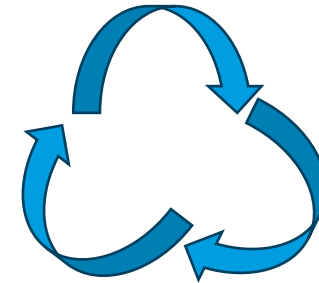




# „Potenziale der Wasserwiederverwendung in der Industrie“

- Was können innovative ionenselektive (Membran-) Verfahren zur Wasser (-Wieder-) Aufbereitung leisten?
  - Selektivität
  - Aufkonzentrierung / Reduzierung des Volumenstroms
  - Entsalzung / Schadstoffentfernung
  - Flexibilität
  - Reduktion des Frischwasserbezugs

} Rückgewinnung von Ressourcen



### **Mitglieder und Teilnehmer:**

André Lerch (Vorsitzender- TU Dresden), Martin Hubrich (BFI),  
Christian Linnartz & Lukas Mankertz (RWTH Aachen), Yuliya Schießer  
(COVESTRO), Matthias Woyciechowski (EVONIK), ...

### **Vernetzungs- und Transfer:**

Christina Jungfer (TransWavEplus)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



QR-Code zum Fact - Sheet