

Tabelle 1: Übersicht der Einsatzbedingungen sowie ausgewählte KPI und KUOI der drei eingesetzten CDI Verfahren.
(MW = Meerwasservielfaches (35 g/L))

	Fließ Elektroden Kapazitive Deionisation (engl.: Flow Electrode Capacitive Deionization, FCDI)	Membrangestützte Kapazitive Deionisation (engl.: Membrane Capacitive Deionization, MCDI)	monovalente Membrangestützte Kapazitive Deionisation (engl.: monovalent Membrane Capacitive Deionization, mMCDI)
Projekt	RIKovery	WEISS_4PN	innovatiON
Aufbereitungsziel	Innovative Technologie zur Ionentrennung und Aufkonzentrierung; Projektziel RIKovery: selektive Aufkonzentrierung von Natriumchlorid gegenüber Natriumsulfat aus salzhaltigem Industrieabwasser	Entsalzung; Effizienzsteigerung und Selektivitätsverbesserung	Energieeffiziente Technologie für den Rückhalt monovalenter Ionen; Ziel: gezielte Entfernung von Natrium, Chlorid und Nitrat aus salzhaltigem Grund- und Oberflächenwasser
Technology Readiness Level (TRL)	5-6	6-8	4-6
Salzkonzentration	Zulauf: 1-2 x MW Konzentrat: bis zu 7 x MW Diluat: bis zu 0,1 x MW	Zulauf: 0,01-0,1 x MW Konzentrat: 0,01-0,1 x MW Diluat: 0,001-0,01 x MW	Zulauf: 0,009-0,050 x MW Konzentrat: 0,011-0,500 x MW Diluat: 0,006-0,020 x MW
Organik	Simultane Organikabtrennung möglich	Zulauf: bis 40 mg/L CSB Konzentrat: bis 40 mg/L CSB Diluat: bis 35 mg/L	Zulauf: 2 bis 20 mg/L (vorwiegend Huminsäure) Konzentrat: bis 20 mg/L Diluat: bis 20 mg/L
Zusammensetzung	Mono- und polyvalente Salzlösungen	Polyvalente Abwässer, Primär Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , NO ₃ ⁻ , HCO ₃ ⁻	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻
Ausbeute (Konzentrat/Diluat), Pilotanlage Projekt	Volumenstrom Pilotanlage: Bis zu 60 L/h Platzbedarf Pilotanlage: 4 m ³ Ausbeute: >90 %	60 – 80% Technikumsanlage: Bis zu 100 l/h, 2 m ²	30 - 90%
Ionen-selektiv	ja	ja	ja
Innovation	Innovative Technologie zur Ionentrennung und gleichzeitig kontinuierliche Konzentration	Simultane Entsalzung und Enthärtung von komplexen, teilweise organikhaltigen Mischabwässern; Kein Störeinfluss von betrieblichen Wasserbehandlungschemikalien bei Verwendung der MCDI mit modifizierten Membranen	Entfernung hauptsächlich von monovalenten Ionen
Einsatz von Chemikalien	Keine: Während Betrieb. Gering: Reinigung / Vorbereitung von Bauteilen (HCl, NaOH), geringerer Chemikalieneinsatz als bei Umkehrosmose (UO)	Gering: Reinigung (10%HCl, 0,01% des behandelten Volumen), geringerer Chemikalieneinsatz als bei UO	geringerer Chemikalieneinsatz als bei UO (hier nur 1-10 mal pro Monat), < 0,01 % des durchgesetzten Wasservolumens für Reinigung benötigt (0,01-0,1 M HCl/Natronlauge)
Lebensdauer	Bisher Erneuerung der Fließelektroden für jeden neuen Versuch, theoretisch Wiedernutzung durch Regeneration des Elektrodenmaterials möglich	Lebensdauer der Elektroden: Schätzung 2 Jahre	Lebensdauer der Elektroden bisher kaum in Praxis untersucht (Schätzung 2 Jahre); Lebensdauer der Membranen von Feedwasser abhängig (theoretisch bis zu 10 Jahren möglich)
Kopplung mit erneuerbaren Energien	Sehr gut koppelbar, auch bei verminderter Stromstärke nutzbar	Sehr gut koppelbar, auch bei verminderter Stromstärke nutzbar	Sehr gut koppelbar, auch bei verminderter Stromstärke nutzbar
Toleranz /Robustheit/ Flexibilität	Sehr flexibel, pH-stabiler Prozess	Sehr flexibel, pH-stabiler Prozess	Sehr flexibel, aber nicht für hohe Feed-Konzentrationen
Recyclefähigkeit	Bisher nicht untersucht	Bisher nicht untersucht	Bisher nicht untersucht
Energiebedarf	5-25 kWh/m ³ für 2 MW	0,3 - 1,0 kWh/m ³	0,1-5 kWh/m ³
Zusatzinformation	Simultane Trennung und Aufkonzentrierung von 1- und 2-wertigen Ionen möglich Hohe Aufkonzentrierung bei hoher Wasserausbeute	Parallele Abscheidung und Aufkonzentrierung von 1- und 2-wertigen Ionen Korrelation zwischen Reinwasserzusammensetzung und Energieeinsatz ermöglicht Erzeugung einer anwenderdefinierten Zusammensetzung Hohe Wasserausbeuten bei definierter konstanter Zusammensetzung möglich	Kombination der Trenneffekte der - Nanofiltration, - Ionenaustauscher (Entwicklung von selektiven Ionenaustauschermembranen) und der membrangestützten kapazitiven Deionisation unter Verwendung von beschichteten und unbeschichteten Elektroden

FACT SHEET ZUM WAVE QUERSCHNITTSTHEMA „TECHNOLOGIEN UND VERFAHREN“

(Membrangestützte) Kapazitive Deionisationsverfahren

EINFÜHRUNG

Klimatische Veränderungen in Verbindung mit einer Zunahme von Wasserstress und Änderungen der Wasserzusammensetzungen 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. m³ pro Jahr (DESTATIS 2023). 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 schwach bis stark salzhaltiger bzw. organikhaltig Wasser und Abwässer. Hieraus resultiert ein weltweiter 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 der 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 120° C bei der Verdampfung von den Salzen abgetrennt. Insgesamt steigt bei allen Entsalzungsverfahren der Energiebedarf mit steigenden Salzkonzentrationen an, jedoch ist die Energie, bezogen auf eine geringe Salzkonzentrationen, bei der Verdampfung und der Umkehrosmose meist höher.

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

Kationenaustauschermembranen (CEM)), der Elektrodenbeschichtungen oder den Prozesseinstellungen abhängig. Durch die Kombination unterschiedlicher Wasseraufbereitungsverfahren können gering konzentrierte sowie auch hoch konzentrierte Wässer und Abwässer aufbereitet werden und somit das Wasserrecycling in industriellen Prozessen sowie auch die Wasserverfügbarkeit im natürlichen Wasserhaushalt unterstützt werden.

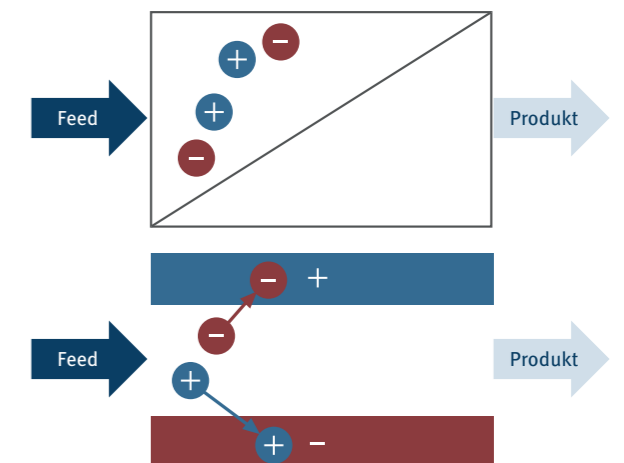


Abbildung 1: Konventionelles Verfahren (oben, „Wasser aus Lösung“) und elektrochemisches, kapazitives Verfahren (unten, „Salz aus Lösung“) im Vergleich.

Bisher werden die meisten elektrochemischen Verfahren im Labormaßstab untersucht. Es fehlt somit die Erfahrung in anwendungsorientierten Langzeitversuchen, welche notwendig sind, um die Grenzen und Möglichkeiten der Prozesse in bestimmten Einsatzgrenzen anhand Technologie Kennzahlen als „Key Uni Operation Indicators“ (KUOI) und „Key Performance Indicators“ (KPI) (Engelhart 2021) zu beschreiben. Diese werden im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ (WavE) durchgeführt und Ergebnisse in diesem Fact-Sheet mit wesentlichen Ergebnissen zur Kapazitiven 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

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

Die Effizienz der Verfahren ist dabei von den Ausgangsparametern (Feedkonzentration), den Zielparmetern (benötigte Produktkonzentration), 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 Reinigungsaufwands und durch die vollautomatische Betriebsweise gering. Aktuell ist die Lebensdauer der Elektroden noch begrenzt (ca. 2 Jahre) und stark abhängig vom zu behandelnden (Ab)Wasser. Jedoch werden derzeit neue Elektrodenmaterialien entwickelt und deren Langzeitverhalten untersucht.

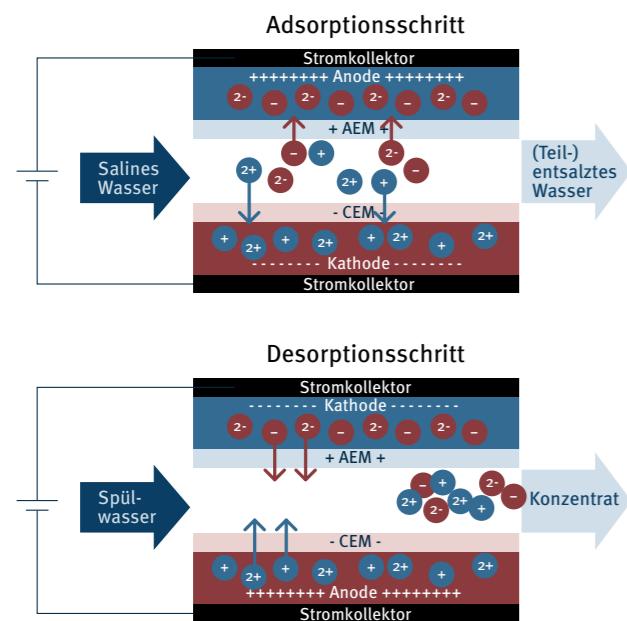


Abbildung 2: Prinzip der konventionellen MCDI; oben: Adsorptionsschritt; unten: Desorptionsschritt.

(M/F)CDI IN WAVE

Im Rahmen der Fördermaßnahme WavE werden in den drei Verbundprojekten RIKovery, WEISS_4PN und innovatIOn CDI-Verfahren unterschiedlicher Ausführung eingesetzt und untersucht.

Im Verbundprojekt RIKovery (www.rikovery.rwth-aachen.de) wird die kontinuierliche Trennung und Aufkonzentrierung ein- und zweiwertiger Ionen in der Flow Electrode Capacitive Deionization (FCDI) betrachtet (Abb. 3) und vom Labor- in einen Pilotmaßstab überführt. Hierzu wird sowohl die Membranfläche einer einzelnen Entsalzungseinheit vergrößert als auch ein Numbering-Up Ansatz verfolgt, bei dem mehrere Einzeleinheiten hintereinandergeschaltet werden. Nach vorbereitenden Experimenten mit Natriumchlorid und Natriumsulfat im Labor erfolgt anschließend eine Pilotierung mit Realwässern.

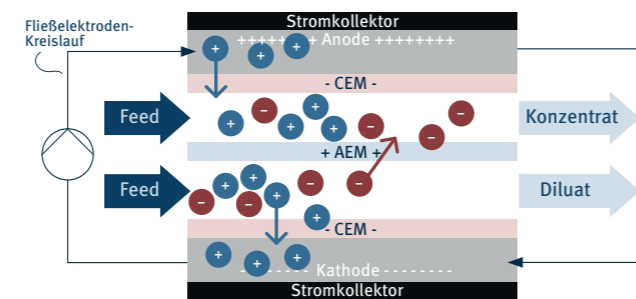


Abbildung 3: Prinzip von FCDI im Single Module Aufbau mit simultaner Entsalzung und Aufkonzentration.

Im Verbundprojekt WEISS_4.0 (<https://www.sms-group.com/innovation/funding-projects/weiss-4pn>) 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 Kühlkreisläufe, Neutralisation Gaswaschwässers) aus verschiedenen Produktionsbereichen sowie einer biologischen Abwasserbehandlung. Dies umfasst die Untersuchung unterschiedlicher Betriebsparameter und Vorbehandlungen sowie deren Auswirkungen auf die Entsalzungsleistung und die Reinwasserausbeute. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Ermittlung potenzieller Störstoffe wie beispielsweise betrieblich verwendete Wasserbehandlungschemikalien oder produktionsbedingten Einträgen sowie deren Entfernung zur Sicherstellung eines verlässlichen 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 innovatIOn (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 Langzeitverfahren untersucht. Dabei wird die praktische Anwendung für die Grundwasseranreicherung und Trinkwasseraufbereitung geprüft. Die entwickelte Technologie wird anhand einer ganzheitlichen ökonomisch-ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung internationalen Zielgrößen wie den Nachhaltigkeitszielen gegenübergestellt, um entsprechende Handlungsempfehlungen abzuleiten.

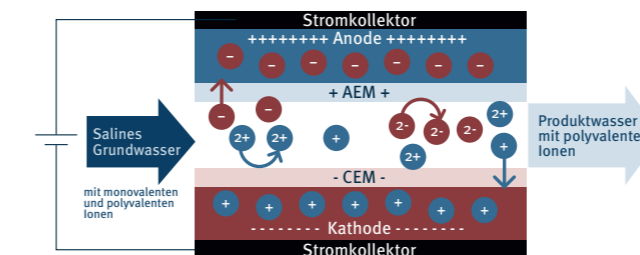


Abbildung 4: Selektive Entsalzung durch den Einsatz monovalent-selektiver Membranen in der CDI (Projekt innovatIOn).

KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPI) UND KEY UNIT OPERATION INDICATORS (KUOI)

Die Ausgangsbedingungen hinsichtlich der zu behandelnden Salzkonzentrationen, nachfolgend als Vielfaches der Meerwassersalzkonzentration (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).

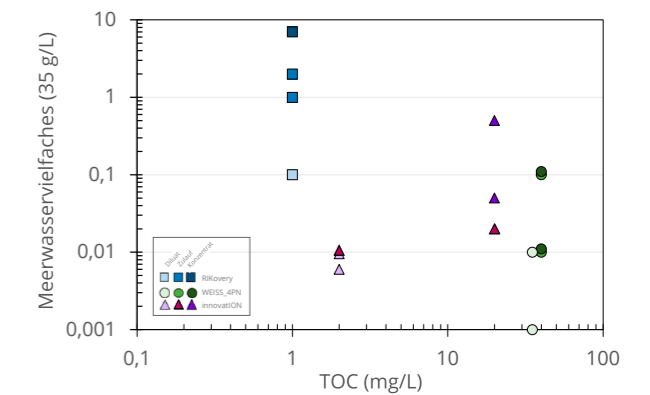


Abbildung 5: Meerwasservielfaches gegenüber organischer Belastung in den drei Projekten. Meerwasservielfaches gegenüber organischer Belastung in den drei Projekten RIKovery (blau), WEISS_4PN (grün) und innovatIOn (violett).

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 (2021) beschrieben aufgeführt und stellen den aktuellen Stand der bisherigen Abfragen im Querschnittsthema dar.

QUELLEN

DESTATIS (2023). Eigengewinnung und Fremdbezug von Wasser sowie Einleitung von Abwasser und ungenutztem Wasser, 2019. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-o3-eigengewinnung-fremdbezug-einleitung-abwasser-2019.html> (abgerufen: 12.06.2024)

Engelhart, M. (2021): Assessment of Water Reuse Technologies and Concepts - Technical aspects (KPI/KUOI). In: WavE-Online-Seminar Assessment of Water Reuse Technologies and Concepts, 31.03.2021 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** (Vorsitzender) & Hanna Rosentreter (TU Dresden), Martin Hubrich (BFI), Christian Linnartz & Lukas Mankertz (RWTH Aachen), Yuliya Schießler (COVESTRO), Matthias Woyciechowski (EVONIK).

HERAUSGEBER

Wissenschaftliches Begleitvorhaben „TransWavEplus“ (Förderkennzeichen: 02WV1560), Christina Jungfer (DECHEMA e.V., christina.jungfer@dechema.de) Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

www.bmbf-wave.de
Erschienen im August 2024