

**Eingehende Darstellung**  
**Zum Verbundvorhaben**  
**Fluid condition Monitoring QT 6.2**

**Teil II: Eingehende Darstellung**

---

Stand:	30.04.2025
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	30.04.2025
Partnerin/Partner:	Tec4Fuels GmbH
Autorinnen/Autoren:	Hichame Ait El Mallali, Werner Willems, Klaus Lucka, Kaoutar Chaghrouchni
Fördertitel:	Fluid Condition Monitoring
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.03.2025
Förderkennzeichen:	03HY118A
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Teil II. Eingehende Darstellung

### 1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

#### 1.1 Einleitung

Die Produktion von grünem Wasserstoff ist stark von Wasserressourcen abhängig, die eine zentrale Rolle für die Effizienz und Nachhaltigkeit des Prozesses spielen. Rein stöchiometrisch benötigt 1 kg Wasserstoff 9 kg Wasser, doch aufgrund von Prozessineffizienzen und der notwendigen Demineralisierung liegt der tatsächliche Verbrauch bei 18 bis 24 kg Wasser pro kg Wasserstoff. Besonders hoch ist der Bedarf bei Kopplung von Elektrolyseuren mit Photovoltaik (PV), wo zwischen 22 und 126 kg Wasser pro kg Wasserstoff benötigt werden, abhängig von Sonneneinstrahlung, Lebensdauer und Siliziumgehalt (1). Zudem verursacht die Deionisierung erhebliche Kosten, In einer Analyse eines 1-MW-PEMWE-Systems machten die Kosten für deionisiertes Wasser 22 % der gesamten Anlagenkosten aus, unabhängig von Systemgröße oder Produktionsrate (2).

Das Projekt „H2Giga“ adressiert diese Herausforderungen durch die Entwicklung eines effizienten Wasseraufbereitungssystems, um die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Wasserstoffproduktion zu steigern.

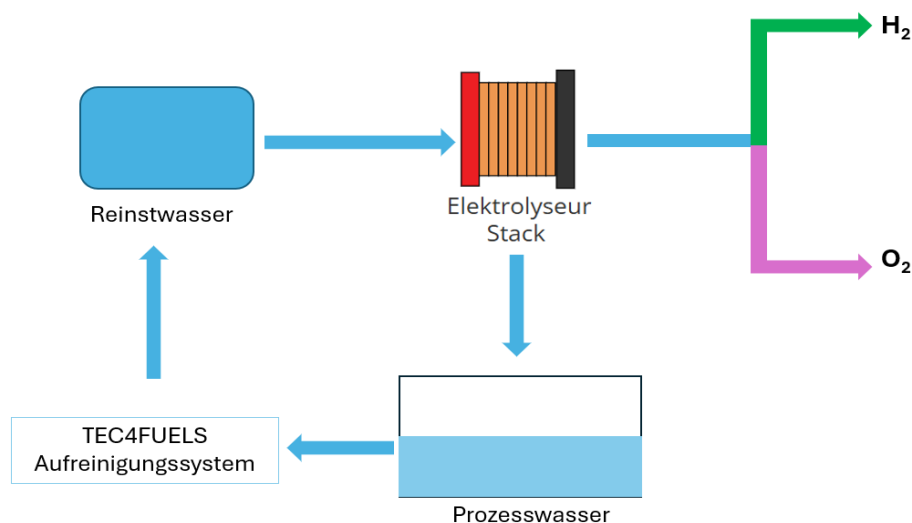


Abbildung 1: Darstellung der Tec4Fuels Aufgabe

Ein wesentlicher Aspekt, der in diesem Bericht beleuchtet wird, ist die Rolle des Prozesswassers. Dieses Wasser, welches unbehandelt nicht für die Spaltung von Wasserstoff und Sauerstoff genutzt werden kann, hat einen erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer und Effizienz von Elektrolyseuren. Verunreinigungen im Prozesswasser, wie gelöste Ionen oder Partikel, können Membranen, Elektroden und andere Komponenten beschädigen, was die Betriebskosten erhöht und die Systemzuverlässigkeit beeinträchtigt. Darüber hinaus hat die im Rahmen des Projekts geleistete Arbeit gezeigt, dass Prozesswasser ein wesentlicher Aspekt ist, da es als Indikator für die Degradation von Elektroden dienen kann. Veränderungen in der Zusammensetzung des Prozesswassers können frühzeitig auf Elektrodenverschleiß hinweisen, was eine präventive Wartung ermöglicht. Daher ist die Aufbereitung von Prozesswasser von entscheidender Bedeutung. Dieser Bericht zeigt anhand von Analysen und experimentellen Daten, wie

wichtig eine effektive Wasseraufbereitung ist, um die Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit von Elektrolyseuren zu gewährleisten und die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion zu steigern.

Im Rahmen des Projekts „H<sub>2</sub>Giga“ untersuchte Tec4Fuels die Qualität des Prozesswassers für Elektrolyseure, um die Effizienz und Lebensdauer der Systeme zu steigern. Ziel war es, Störstoffe im Prozesswasser zu identifizieren, die die Leistung von Elektrolyseuren beeinträchtigen, und eine Mindestwasserqualität für den Betrieb zu definieren. Darüber hinaus sollte ein effizientes Wasseraufbereitungssystem entwickelt werden, das die Anforderungen verschiedener Elektrolyseurtypen erfüllt, um die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion zu verbessern. Die Arbeiten orientierten sich an der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung, die die Identifikation von Störstoffen und die Entwicklung innovativer Aufbereitungstechnologien als zentrale Aufgaben definierte

### 1.1.1 Identifikation von Störstoffen

Die Identifikation erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Elektrolyseurherstellern und dem Qualitätsteam (QT 2.1). Es war zu erwarten, dass im weiteren Projektverlauf zusätzliche Störstoffe identifiziert wurden, die die Anforderungen an die Wasseraufbereitung weiter präzisieren.

Einem Hersteller von SOE-Produkten zufolge könnte der Siliziumgehalt ebenfalls negative Auswirkungen auf das System haben.

Tabelle 1: Festgestellte Störstoffe nach Analysen

Festgestellte Störstoffe		
PEM	AEL	SOE
<b>Na</b>	<b>Fe</b>	<b>Ca</b>
<b>Si</b>	<b>Ir</b>	<b>K</b>
<b>Zn</b>	<b>Ka</b>	<b>Na</b>
<b>Fe</b>	<b>Na</b>	
	<b>Si</b>	
	<b>Sr</b>	

### 1.1.2 Entwicklung eines Wasseraufbereitungssystems

Zur Erreichung der Mindestwasserqualität wurden verschiedene Aufbereitungstechnologien getestet. Zunächst wurde Reinstwasser mit einer Leitfähigkeit von 0,06 µS/cm im Labor gezielt mit den identifizierten Störstoffen kontaminiert und mittels Ionentauscherharz aufbereitet. Diese Methode erwies sich jedoch als wartungsintensiv, da die Harze regelmäßig ausgetauscht werden mussten. Nach einer Literaturrecherche wurde der Prozess durch eine Elektrodeionisation (EDI) ersetzt. Die EDI-Technologie ermöglichte eine kontinuierliche Wasseraufbereitung ohne Austausch von Mischbettharzen und führte zu einer signifikanten Verbesserung der Prozesseffizienz.

Die Technologie erreicht eine Entfernungseffizienz von über 99 % für Ionen wie Kupfer, Nickel, Kobalt, Bor und Siliziumdioxid. Entscheidend für die Effizienz waren Prozessparameter wie Spannung, Durchflussrate, pH-Wert und Membrankonfiguration. Die EDI erwies sich als vielseitig, umweltfreundlich und geeignet für Protonenaustauschmembran-Elektrolyseure (PEM) und Hochtemperaturelektrolyseure (HTEL) (3). Für

alkalische Elektrolyseure ist die Technologie jedoch nicht ausreichend effektiv, was eine Abweichung von der ursprünglichen Annahme darstellt, dass eine universelle Lösung für alle Elektrolyseurtypen entwickelt werden könnte. Langzeit- und Belastungstests zeigten zudem, dass hochkonzentrierte Ionen die Lebensdauer der EDI-Zellen verkürzen können, wenn bestimmte Grenzwerte überschritten werden. Diese Erkenntnisse wurden durch Dauerversuche dokumentiert, die die Robustheit des Systems unter realen Betriebsbedingungen bewerteten.

### 1.1.3 Alternative Technologien: Membrandestillation

Um die Grenzen der EDI-Technologie zu überwinden und die Wasseraufbereitung für ein breiteres Spektrum von Elektrolyseurtypen zu optimieren, wurde die Sweeping-Gas-Membrandestillation (SGMD) getestet. Die Membrandestillation ist ein thermisch getriebenes Trennverfahren, bei dem Wasserdampf durch eine hydrophobe, poröse Membran geleitet wird, während flüssiges Wasser durch die hydrophobe Natur der Membran zurückgehalten wird. Der Transport erfolgt ausschließlich in Dampfform, was eine hohe Reinheit des aufbereiteten Wassers gewährleistet (4).

Die Tests mit SGMD zeigten ein hohes Potenzial, insbesondere für Anwendungen mit niedrigen Ionenkonzentrationen. Diese Technologie bedarf jedoch weiterer Forschung, um die Leistung und Skalierbarkeit für den industriellen Einsatz zu verbessern. Insbesondere die Energieeffizienz und die Anpassung an unterschiedliche Wasserqualitäten müssen optimiert werden, um SGMD in realen Anwendungen einzusetzen.

## 1.2 Ergebnisse

### 1.2.1 Ionentauscherharze Versuche



Abbildung 2: Laborversuch Ionentauscherharze

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde ein Mischbett aus Kationen- und Anionentauscherharzen verwendet. Kontaminiertes Prozesswasser wurde von oben in die Ionentauscher-Säule eingeleitet, um die Entfernung von Störstoffen zu testen, die die Leistung von Elektrolyseuren beeinträchtigen können.

Der Versuchsaufbau ermöglichte eine präzise Messung der Wasserqualität vor und nach der Aufbereitung, insbesondere der Leitfähigkeit. Die Tests wurden unter kontrollierten Bedingungen im Labor von

Tec4Fuels durchgeführt, wobei verschiedene Durchflussraten und Harzmengen getestet wurden, um die Reinigungseffizienz zu optimieren.

Laborversuche mit Ionentauschern (Mischbettharzen) zeigten zwar eine gute Reinigung, jedoch wurde deutlich, dass die Konditionierung sowie die Regeneration der Harze zeit-, kosten- und chemikalienintensiv ist. Aus Gründen der Nachhaltigkeit sowie Wirtschaftlichkeit wurde eine alternative Lösung untersucht.

## 1.2.2 Elektrodeionisation Versuche

### 1.2.2.1 EDI-Aufbau

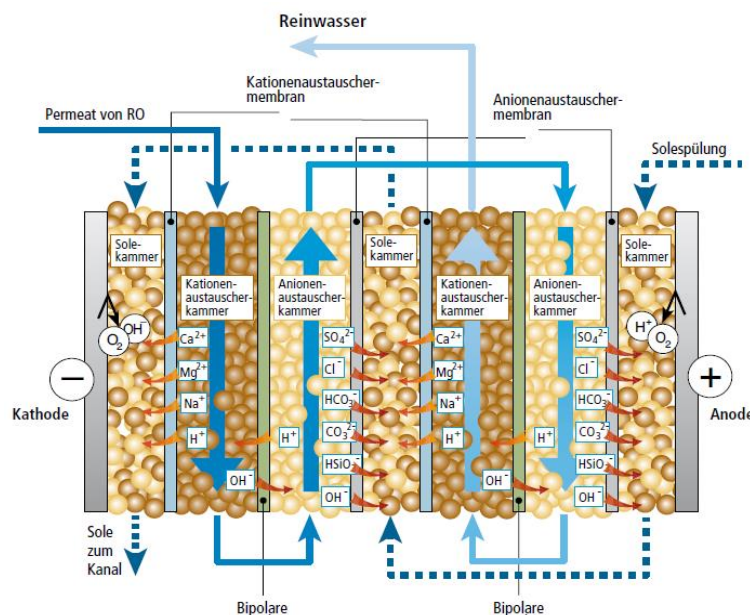


Abbildung 3: Fließbild von Elektrodeionisation Zelle [5]

Abbildung 3 zeigt die schematische Darstellung einer EDI-Zelle, die im Labor von Tec4Fuels getestet wurde.

Die EDI-Zelle besteht aus mehreren Kammern, die durch spezielle Membranen voneinander getrennt sind. Zwischen einer Anode (positiv geladen) und einer Kathode (negativ geladen) befinden sich abwechselnd Solekammern und Reinwasserkammern, die mit Ionentauscherharzen gefüllt sind. Die Solekammern dienen der Aufnahme von abgetrennten Ionen (Störstoffen), während die Reinwasserkammern das zu reinigende Wasser führen.

- **Ionenselektive Membranen:** Die Kammern sind durch Kationen- und Anionenaustauschermembranen getrennt. Kationenaustauschermembranen lassen nur positiv geladene Ionen (z. B. Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, H<sup>+</sup>) passieren, während Anionenaustauschermembranen nur negativ geladene Ionen (z. B. Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>) durchlassen.
- **Bipolare Membranen:** Zwischen den Kammern befinden sich bipolare Membranen, die die Spaltung von Wasser in H<sup>+</sup>- und OH<sup>-</sup>-Ionen fördern. Diese Ionen tragen zur Regeneration der Ionentauscherharze innerhalb der Zelle bei, wodurch keine externe chemische Regeneration notwendig ist.

- Ionenaustauscherharze: Die Kammern sind mit Mischbettharzen aus Kationen- und Anionenaustauschern gefüllt, die gelösten Ionen aus dem Wasser binden und deren Leitfähigkeit reduzieren.

Die verwendeten Membranen bestehen aus Polyetheretherketon (PEEK) laut EDI-Hersteller.

Tabelle 2: Technische Spezifikationen der EDI

Parameter	Einheit	Hersteller Angabe	Benutzt
Produktwasserleistung	l/h	30 – 50	32
Produktwasserqualität bei 30 mg/l CO <sub>2</sub>	µS/cm	0,055 – 0,1	0,055-0,1
Eingangswasserqualität (FCE* max.)	µS/cm	100	ca.10
Härte max.	mg/l	0,1	-
Silikat-Gehalt (als SiO <sub>2</sub> ) max.	mg/l	0,4	-
CO <sub>2</sub> -Gehalt max.	mg/l	30	-
Cl <sub>2</sub> -Gehalt max.	mg/l	< 0,02	0,018
Eingangsdruck max.	bar	3,5	1
Druckverlust	bar	1,0 – 3,0	-
Ausbeute (Recovery Rate)	%	90 – 95	60-90%
Stromversorgung	V/A	24 / 0,70 DC	24 V
Durchfluss, Stromverbrauch	Watt	5 – 7	7

### 1.2.2.2 Prüfstand

Es wurde ein Prüfstand entwickelt, um die Leistung der Elektrodeionisationszelle (EDI-Zelle) bei der Wasseraufbereitung für Elektrolyseure zu testen. Abbildung 4 zeigt das Fließbild des Prüfstands, das die wesentlichen Komponenten und den Prozessablauf darstellt.

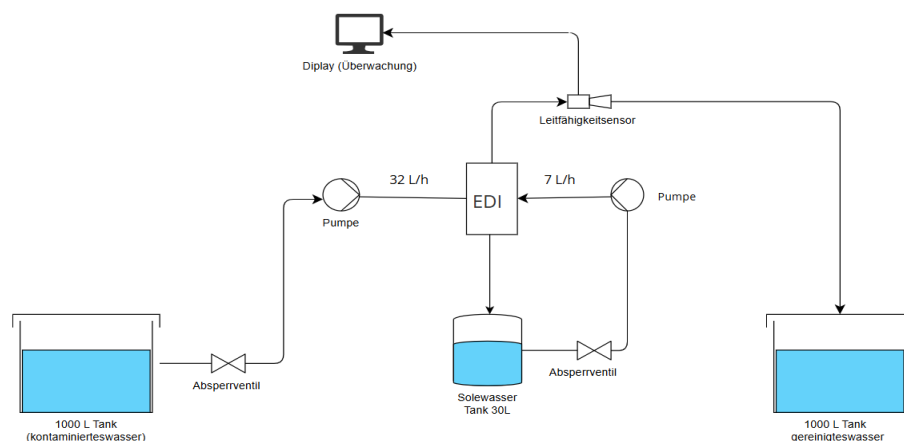


Abbildung 4: P&ID Prüfstand

Der Prüfstand umfasst zwei Haupttanks: einen 1000-Liter-Tank für kontaminiertes Wasser (linke Seite) und einen 1000-Liter-Tank für gereinigtes Wasser (rechte Seite). Das kontaminierte Wasser wird über eine Pumpe mit einer Durchflussrate von 32 l/h in die EDI-Zelle geleitet. Die EDI-Zelle reinigt das Wasser durch Elektrodeionisation, wobei gelöste Ionen in einen separaten Solewassertank (30 Liter) abgetrennt werden. Eine zweite Pumpe mit einer Durchflussrate von 7 l/h führt die Sole aus der EDI-Zelle in den Solewassertank und ermöglicht eine kontinuierliche Entfernung der Ionen. Das gereinigte Wasser wird anschließend in den zweiten 1000-Liter-Tank geleitet.

Zur Überwachung und Steuerung des Prozesses ist der Prüfstand mit einem Leitfähigkeitssensor ausgestattet, der die Wasserqualität in kontinuierlicher Messung bestimmt. Die erfassten Leitfähigkeitsdaten werden auf einem Display visualisiert. Ein Absperrventil am Solewassertank ermöglicht die Entnahme von überschüssiger Sole, um den Kreislauf stabil zu halten. Der Prüfstand wurde so konzipiert, dass er realistische Betriebsbedingungen simuliert, die für die industrielle Wasserstoffproduktion relevant sind.

### 1.2.2.3 Ergebnisse (Mix 1, Mix 2, Mix 3)

Die EDI-Zellen zeigen bei der Aufreinigung von Feldproben sehr gute Ergebnisse, sind anwendungs- und wartungsfreundlich und benötigen keine Chemikalien zur Konditionierung oder Regeneration.

Die untersuchten Feldproben wiesen unterschiedliche Gehalte an Störstoffen auf und konnten mittels EDI-Zellen erfolgreich aufgereinigt werden. Die Leitfähigkeit des Prozesswassers konnte innerhalb kürzester Zeit auf unter 0,06 µS/cm gesenkt werden. Das Wasser entspricht damit Reinstwasserqualität, was durch die anschließende ICP-OES Messung bestätigt wurde.

### Versuch 1: Feldprobe SOE

Tabelle 3: Kontaminanten Versuch 1

Eisen (III)-EDTA Acetat	Natriumhydroxid
0,017 mg/l	0,283 mg/l

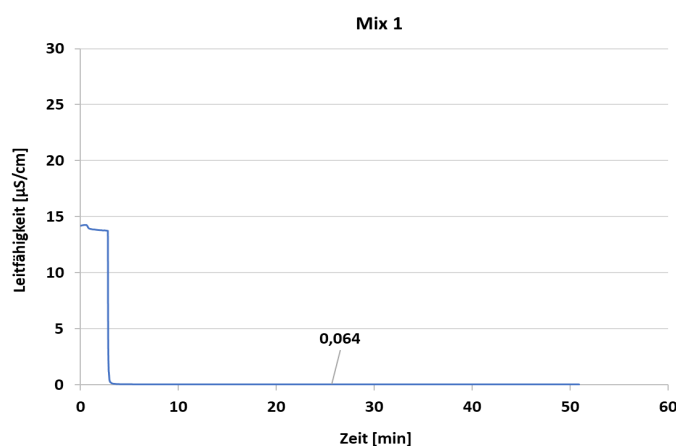


Abbildung 5: EDI-Versuch 1

Nach der Kontamination des Wassers mit zwei Störstoffen stieg die Leitfähigkeit (Abbildung 5) zunächst an, konnte jedoch anschließend durch die Aufreinigung drastisch auf 0,064 µS/cm gesenkt werden und blieb danach stabil.

In der Tabelle 4 ist ersichtlich, dass die EDI-Zelle eine hochwirksame Aufreinigung erzielt wurde. Die Konzentrationen von Eisen und Natrium konnten dabei um über 99 % reduziert werden. Der vergleichsweise hohe Siliziumgehalt lässt sich möglicherweise auf Kunststoffkomponenten in der Probe oder auf Staubrückstände im Behälter zurückführen.

Tabelle 4: ICP-OES Analyse Versuch 1 des gereinigtes Wasser

Störstoffen	B	Ba	Cu	Fe	Na	Ni	Si	Ca	Mg	K
Mix 1 gereinigtes Wasser (mg/L)	0	0	0	0,001	0	0,001	0,924	u.n.g	u.n.g	u.n.g

## Versuch 2: Selbst kontaminiertes Wasser

In diesem Versuch wurden dem Wasser gezielt Kontaminanten in hoher Konzentration zugesetzt, um zu überprüfen, ob die EDI-Zelle die Leitfähigkeit wie im ersten Versuch erneut senken kann. Die verwendeten Kontaminanten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Kontaminanten Versuch 2

Nickel (II) Carbonate (98 %) (mg/L)	Eisen (III) EDTA Acetat (mg/L)	Barium nitrate (99%) (mg/L)	Kupfer (I) Chloride (mg/L)	Natriumhydroxid (mg/L)	Natriumtetraborat (98%) (mg/L)
0,8	15,15	0,19	0,15	10,14	14

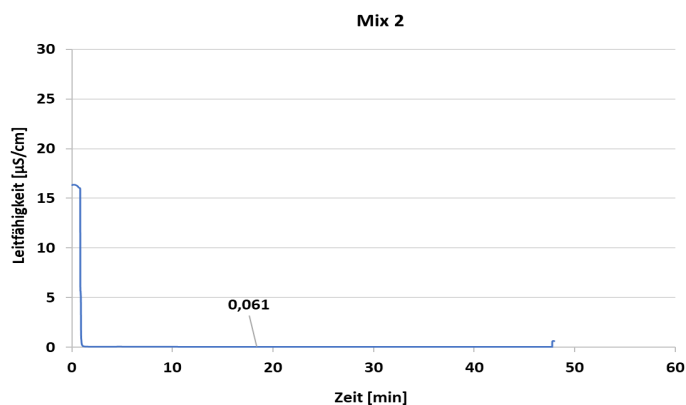


Abbildung 6: EDI-Versuch 2

Durch die Verdopplung der Störstoffkonzentration wurde im Versuch eine Reinigungssituation mit stark belastetem Prozesswasser simuliert, um die Leistungsfähigkeit der EDI-Zellen unter verschärften Bedingungen zu überprüfen. Auch in diesem Fall zeigte die EDI-Zelle (Abbildung 6) eine schnelle und deutliche Abnahme der Leitfähigkeit (0,061µS/cm) innerhalb kürzester Zeit. Die anschließende ICP-Analyse des gereinigten Wassers bestätigte die effektive Entfernung der Hauptkontaminanten. Die detaillierten Analyseergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: ICP-OES Analyse Versuch 2

Störstoffen	B	Ba	Cu	Fe	Na	Ni	Si	Ca	Mg	K
-------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	---

Mix 2 gereinigtes Wasser (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0,532	u.n.g	u.n.g	u.n.g
---------------------------------	---	---	---	---	---	---	-------	-------	-------	-------

### Versuch 3: Selbst kontaminiertes Wasser

In dieser Versuch es wurde die vorherige Konzentration von Versuch 2 verdoppelt. Die Konzentrationen dieses Tests sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Kontaminanten Versuch 3

Nickel (II) Carbonate (98 %) (mg/L)	Eisen (III) EDTA Acetat (mg/L)	Barium nitrate (99%) (mg/L)	Kupfer (I) Chloride (mg/L)	Natriumhydroxid (mg/L)	Natriumtetraborat (98%) (mg/L)
0,16	30,30	0,38	0,30	20,28	28,00

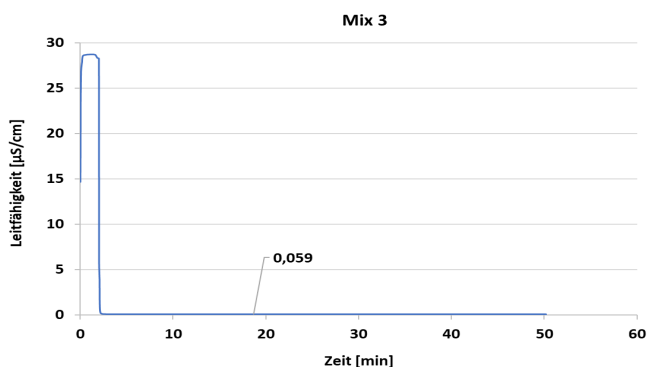


Abbildung 7: EDI-Versuch 3

Die ICP-OES Analyse des gereinigten Wassers zeigte folgende Ergebnisse:

Tabelle 8: ICP-OES Analyse Versuch 3

Störstoffen	B	Ba	Cu	Fe	Na	Ni	Si	Ca	Mg	K
Mix3 gereinigtes Wasser (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0,413	u.n.g	u.n.g	u.n.g

Die ICP-OES Ergebnisse zeigen, dass die EDI-Zelle eine sehr gute Leistung erbracht hat, die Konzentrationen der Störstoffe wurden deutlich reduziert, das Wasser erfolgreich aufgereinigt und die Leitfähigkeit blieb stabil bei einem optimalen Wert von 0,06 µS/cm.

#### 1.2.2.4 Dauerversuche

##### 72h Dauerversuch Test

Nach erfolgreichem Abschluss der Kurzzeittests mit den Mischungen Mix 1, Mix 2 und Mix 3 wurde ein weiterführende Untersuchungen unternommen. Dabei wurde ein längerer Test mit der zuvor genutzten EDI-Einheit durchgeführt, welche bereits in den ersten Tests verwendet wurde. Ziel war es, die Langzeitstabilität und Leistungsfähigkeit der EDI-Zelle unter realistischen Betriebsbedingungen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde ein 72 Stunden Test durchgeführt, bei dem folgende Verunreinigungskonzentrationen eingesetzt wurden (Tabelle 9).

Tabelle 9: Verwendete Konzentration für Dauerversuche

Chemikalien	Ca	Mg	Na	Fe	Zn
Konz. mg/L	0,019	0,001	0,003	0,240	0,005

Die Abbildung 8a zeigt das Leitfähigkeitsverhalten über die Zeit, unterteilt in drei Phasen (I, II, III). Es wurde beobachtet, dass die Leitfähigkeit im Verlauf des Tests langsam anstieg. Nach 18 Stunden wurde der Grenzwert von 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  erreicht. Um die EDI unterhalb dieses Grenzwerts zu regenerieren, wurde eine zweistündige Regenerationsphase (Phase II) eingeleitet. Allerdings zeigte sich, dass die Leitfähigkeit nach der Regenerationsphase erneut über den Grenzwert stieg und schließlich ein Plateau erreichte. Eine Wiederholung des Prozesses in Phase III führte zu identischen Ergebnissen.

Eine detaillierte Untersuchung ergab, dass die Anionenaustauscherharze auf der Anionenseite eine orange Verfärbung aufwiesen (siehe Abbildung 8b). Dies deutet darauf hin, dass die eingesetzte Eisenkonzentration für die EDI-Zellen zu hoch war. Zudem wiesen die Harze teilweise eine mehrlartige Konsistenz auf, was auf eine Unverträglichkeit der verwendeten Konzentrationen mit den EDI-Zellen hinweist. Diese Beeinträchtigung führte zu einer Verstopfung der Membranen, wodurch der Durchfluss erheblich eingeschränkt wurde.

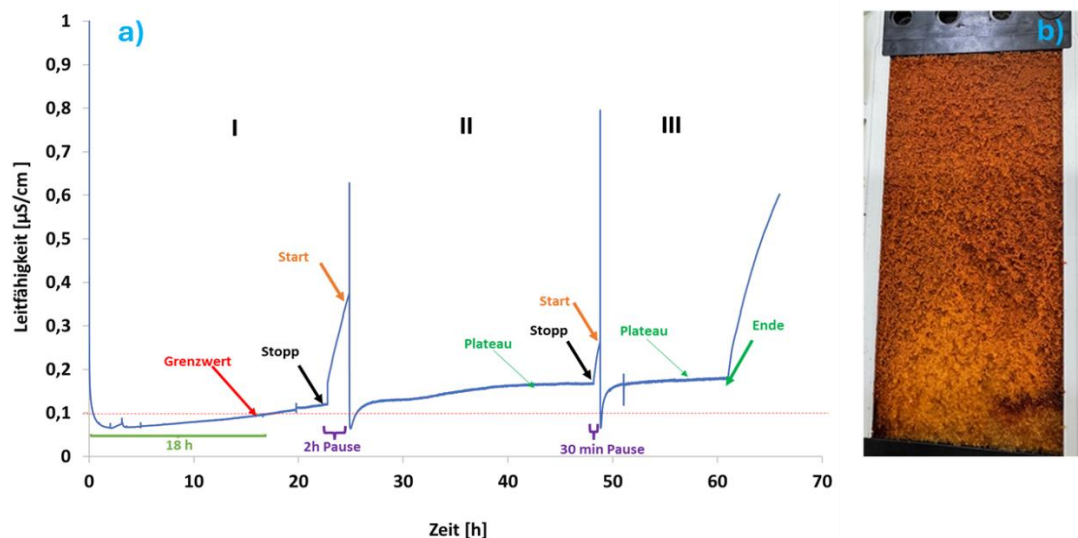


Abbildung 8: a) 60h Versuch Test mit EDI-Zellen nach mehrere Belastungstest, b) Anionenaustauscherharze nach mehrere Belastungstests bei EDI-Zellen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Elektrodeionisation (EDI) aufgrund der zuvor verwendeten hohen Belastungskonzentrationen nicht mehr ausreichend gereinigt werden kann. Diese Erkenntnis ist entscheidend für zukünftige Tests bei höheren Konzentrationen. Es wird deshalb empfohlen, solche Konzentrationen nicht direkt in der EDI zu testen. Stattdessen sollten die Proben vor Zufuhr zur EDI mit geeigneten Methoden, wie beispielsweise Umkehrosmose oder Membrandestillation, vorbehandelt und gereinigt werden, um Schäden an den EDI-Zellen zu vermeiden und eine stabile Langzeitleistung zu gewährleisten.

### 168 h Dauerversuch

Nach Abschluss des 72 Stunden-Dauerversuchs, bei dem die ursprünglichen EDI-Zellen aufgrund hoher Belastungskonzentrationen nicht mehr effektiv reinigten, wurden zwei neue EDI-Zellen des gleichen Modells bestellt. Diese wurden mit identischen Parametern konfiguriert und installiert, um weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen.

Wie in Abbildung 9 dargestellt, wurde eine Regenerationsphase alle 24 Stunden durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der EDI-Zellen zu erhalten. Ein erster Langzeittest mit einer Dauer von 168 Stunden wurde durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leitfähigkeit über die gesamte Testdauer hinweg konstant bei einem optimalen Wert von unter 0,06  $\mu\text{S}/\text{cm}$  blieb. Das Solewasser wurde alle 24 Stunden erneuert und mit einer doppelten Konzentration an Chemikalien, wie sie bei einem Elektrolyseur-Betreiber üblich ist (siehe Tabelle 10), kontaminiert.

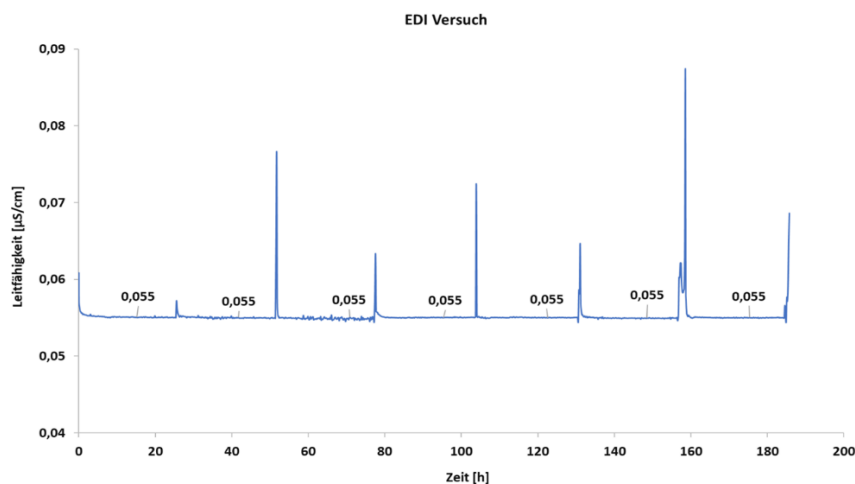


Abbildung 9: 168h Versuch Test mit neue EDI-Zellen

Tabelle 10 zeigt die Konzentrationen des kontaminierten Wassers sowie die Effektivität der EDI-Zellen bei der Reinigung, basierend auf den Konzentrationen des gereinigten Wassers. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die EDI-Zellen die Ionenkonzentrationen sehr effektiv senken können. Darüber hinaus wurde die Veränderung der Solewasserkonzentrationen im Zeitverlauf untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Konzentrationen im Laufe der Zeit ansteigen. Nach mehreren Versuchen wurde festgestellt, dass ein Zeitraum von 168 Stunden kein Bedarf auf die Erneuerung des Solewassers darstellt, da zu diesem Zeitpunkt kein Sättigungspunkt erreicht wird.

Tabelle 10: Verwendete Konzentration für Dauerversuche

Chemikalien (mg/L)	Kontaminiertes Wasser	gereinigtes Wasser	Solewasser 0h	Solewasser 24h	Solewasser 96h	Solewasser 120h	Solewasser 168h
<b>Ca</b>	0,015	0,0009	0,136	0,129	0,120	0,117	0,100
<b>Mg</b>	0,001	0,0001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>Na</b>	0,003	0,002	0,008	0,052	2,273	2,933	3,303
<b>Fe</b>	0,240	0,002	0,000	0,007	0,026	0,031	0,042
<b>Zn</b>	0,005	0,000	0,003	0,008	0,039	0,583	0,185

## Alternierender Dauerversuch

Nach Abschluss des 168 Stunden Langzeittests wurde ein weiterer Dauertest durchgeführt, bei dem ein alternierender, redundanter Testansatz mit zwei EDI-Zellen (gleiches Modell) verfolgt wurde. Die in Tabelle 11 aufgeführten Zusammensetzung Verunreinigungs-komponenten (1:1 Hochtemperatur Elektrolyseur Betreiber) wurden verwendet. Dabei wurde alle 24 Stunden zwischen der ersten und der zweiten Zelle gewechselt, sodass eine Zelle aktiv war, während die andere in einer Regenerationsphase verblieb. Dieser Ansatz ermöglichte eine längere Regenerationszeit und reduzierte die Belastung einer einzelnen Zelle. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 10, zeigen eine stabile Leitfähigkeit, die während des gesamten Tests (964 Stunden) den Grenzwert von 0,065  $\mu\text{S}/\text{cm}$  nicht überschritt. Ziel dieses Tests war es, die Robustheit des Systems zu validieren und durch kontinuierliche Überwachung der Leitfähigkeit die Langzeitstabilität des Systems zu gewährleisten.

Tabelle 11: Verwendete Konzentration für redundante Dauerversuche

Störstoffen	B	Ca	K	Mg	Na	Zn
Konz. mg/L	0,034	0,052	0,007	0,002	0,012	0,002

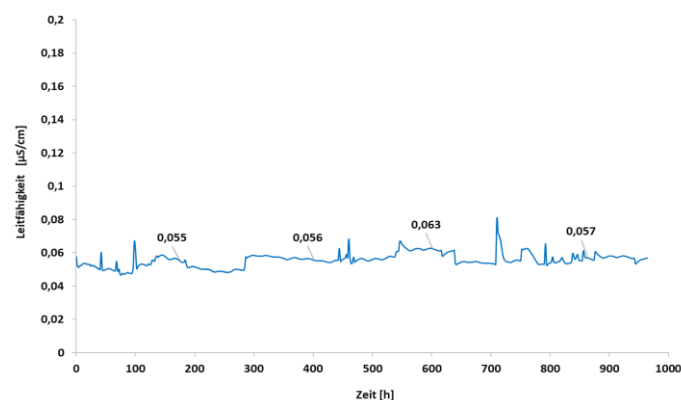


Abbildung 10: 964h Redundant Versuch

Der alternierende Betrieb von zwei EDI-Zellen ermöglicht längere Regenerationsphasen, wodurch Ablagerungen effektiver entfernt und die Ionenaustauschkapazität länger erhalten bleibt. Die Belastung wird gleichmäßig verteilt, was mechanische und chemische Beanspruchungen reduziert und die Lebensdauer der Zellen verlängert. Redundanz erhöht die Betriebssicherheit, da bei Ausfall einer Zelle die andere übernimmt. Tests zeigten stabile Reinigungsleistung ( $<0,065 \mu\text{S}/\text{cm}$  über 964 Stunden). Optimierte Regenerationsintervalle (alle 24 Stunden) steigern Effizienz, minimieren Wartungskosten und maximieren Betriebszeit.

## Dauerversuch 792 h

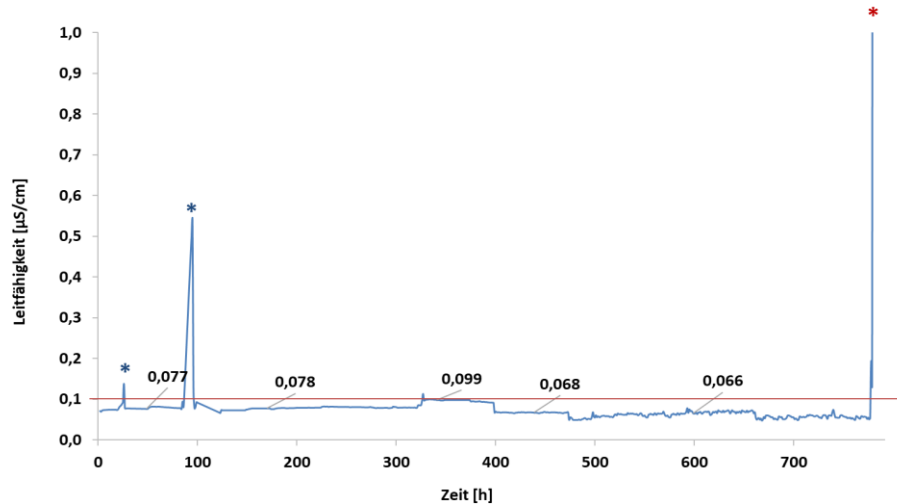


Abbildung 11: 792h Dauerversuch

Mit einer der im redundanten Testansatz verwendeten EDI-Zellen wurde ein Dauerversuch durchgeführt, bei dem eine 1:1-Konzentration einer Feldprobe von einem PEM-Elektrolyseur Partner eingesetzt wurde. Die Ergebnisse zeigen (Abbildung 11), dass die Leitfähigkeit während des Tests im Allgemeinen den Grenzwert von  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$  nicht überschritt, mit Ausnahme von drei spezifischen Zeitpunkten (\*), zu Beginn des Tests während des Nachtbetriebs, nach 96 Stunden ebenfalls während des Nachtbetriebs und gegen Ende des Versuchs.

In den ersten beiden Fällen stieg die Leitfähigkeit kurzzeitig an und sank anschließend sofort wieder ab. Die genaue Ursache für diese kurzfristigen Anstiege konnte nicht eindeutig geklärt werden. Mögliche Einflussfaktoren, wie Schwankungen in der Betriebsumgebung oder temporäre Verunreinigungen, werden derzeit untersucht. Der starke Anstieg der Leitfähigkeit gegen Ende des Versuchs ließ sich hingegen durch eine zunehmende Sättigung der Anionen- und Kationenaustauscherharze erklären, was auf eine hohe Ionenbelastung der Feldprobe hinweist.

Zur detaillierten Analyse der Langzeitleistung der EDI-Zellen im Dauerversuch wurden Proben des Solewassers, des gereinigten Wassers und des kontaminierten Wassers alle 24 Stunden entnommen. Diese Proben wurden durch das Dechema-Institut mittels ICP-OES (Induktiv Gekoppeltes Plasma-Optische Emissionsspektrometrie), IC (Ionenchromatographie) und UV-Vis-Spektroskopie analysiert, um die Konzentrationen der relevanten Elemente und Parameter wie den TOC (Total Organic Carbon) zu bestimmen.

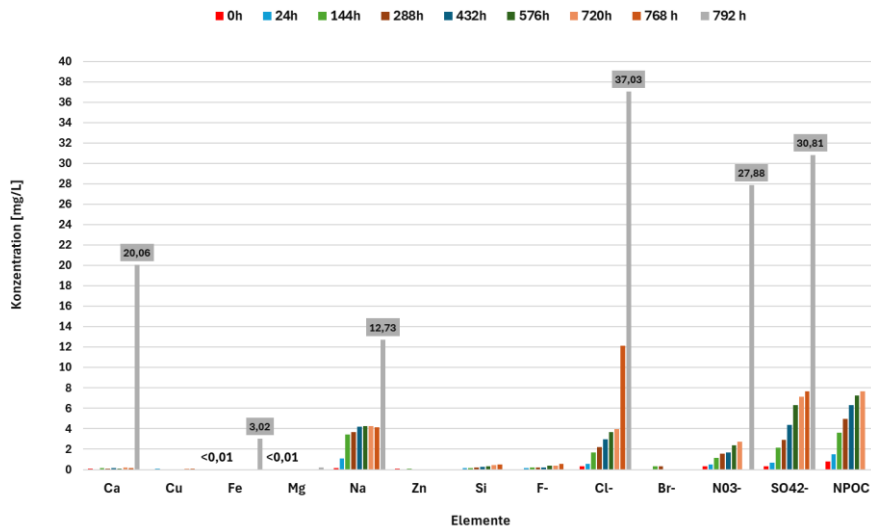
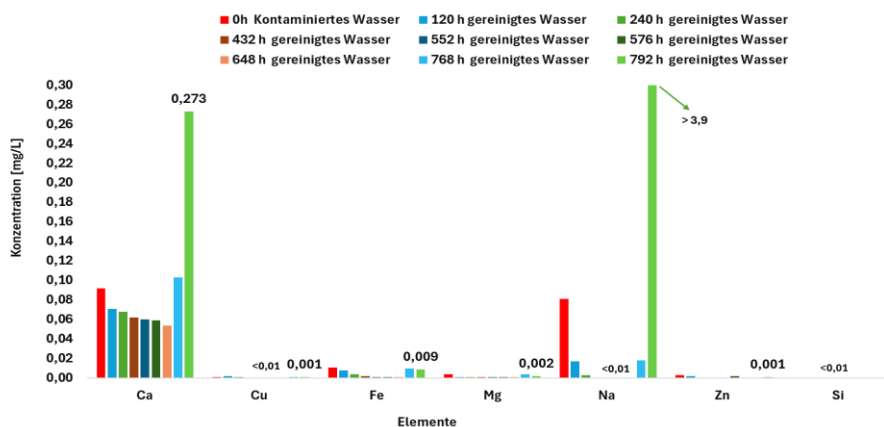


Abbildung 12: Konzentrationen des Störstoffen in Solewasse

Die Ergebnisse aus Abbildung 12 zeigen, dass die Konzentration der Ionen im Solewasser im Laufe der Zeit kontinuierlich ansteigt, was auf eine effektive Entfernung dieser Ionen durch die EDI-Zellen hinweist. Insbesondere konnten kritische Elemente für die Leistung eines Elektrolyseurs, wie Eisen (Fe), Calcium (Ca), Natrium (Na) und Silizium (Si), effizient entfernt werden. Darüber hinaus wurde eine Reduktion des TOC nachgewiesen, was die Fähigkeit der EDI-Zellen zur Entfernung organischer Verunreinigungen bestätigt. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer kontinuierlichen Überwachung des Solewassers, da dessen Zustand ein Indikator für die Degradation der Elektroden und der EDI-Zellen sein kann.

Abbildung 13: Aufgereinigtes Wasser Ergebnisse mit der Versuchszeit



Ein zentrales Ziel des Versuchs war es, den optimalen Zeitpunkt für den Austausch des Solewassers zu bestimmen. Bis zu einer Testdauer von 768 Stunden wurden keine signifikanten Veränderungen in den Solewasserkonzentrationen beobachtet, die einen Austausch erforderlich gemacht hätten. Ab 768 Stunden zeigte sich jedoch ein deutlicher Anstieg der Leitfähigkeit, die den Grenzwert von 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  überschritt weit über dem Zielwert von 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Abbildung 13 zeigt, dass die EDI-Zelle nach 768 Stunden nicht mehr effektiv aufreinholt, was sich in einem deutlichen Anstieg der Konzentration im gereinigten Wasser widerspiegelt. Parallel dazu wurde eine Verfärbung des Solewassers von farblos zu gelblich festgestellt (siehe Abbildung 14). Die ICP-OES-Analyse ergab, dass die Konzentrationen der Metallelemente Ca, Na und Fe in diesem Zeitraum mehrfach anstiegen.

Der Anstieg der Leitfähigkeit und die erhöhten Metallkonzentrationen deuten darauf hin, dass die Mischbettharze der EDI-Zellen gesättigt waren und keine weiteren Ionen mehr effektiv aufnehmen



Abbildung 14: Farbänderung der Solewasserprobe nach 792 Stunden im Vergleich zur Probe nach 500 Stunden

konnten. Die Verfärbung des Solewassers sowie die analytischen Ergebnisse legen nahe, dass die Filter der EDI-Zellen verstopft waren, wodurch der Wasserfluss und die Reinigungsleistung erheblich eingeschränkt wurden.

#### 1.2.2.5 Natrium Belastungstest

Im Rahmen des Projekts wurde ein weiterer Test durchgeführt, und zwar ein Belastungstest mit Natrium. Zu diesem Zweck wurde eine neue Zelle angefordert. Die verwendeten Verunreinigungskonzentrationen sind in Tabelle 12 aufgeführt (es wurde eine hundertfache Natriumkonzentration verwendet in Bezug auf 792 h Dauerversuch). Der Versuch wurde mehrfach wiederholt.

Tabelle 12: verwendete Natrium Konzentration

Kontaminanten	Konzentration (mg/L)
Natrium	7,8

Die Leitfähigkeit blieb bei allen Versuchsreihen konstant bei 0,06  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , was darauf hinweist, dass die Elektrodeionisation (EDI) eine sehr effiziente Reinigung ermöglicht. Die Analyseergebnisse zeigen ein optimales Resultat. Die Natriumkonzentration sank von 20 mg/L auf <0,05 mg/L, was einer Entfernungseffizienz von über 99 % entspricht.

Nach dem Belastungstest mit Natrium wurde mit derselben Zelle ein kurzer Dauertest über 30 Stunden

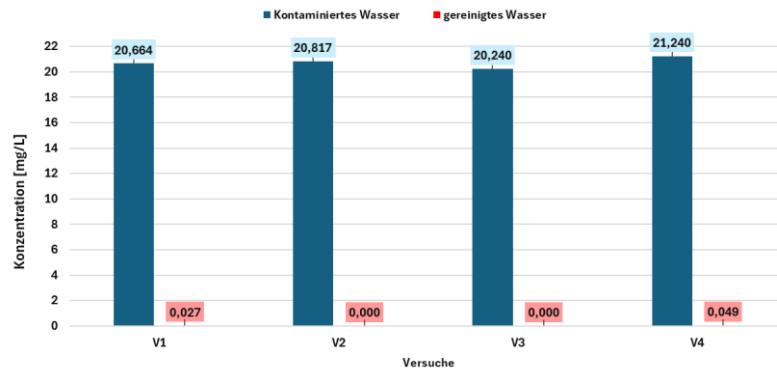


Abbildung 15: Aufreinigungseffektivität der EDI bei Belastungstest mit Natrium

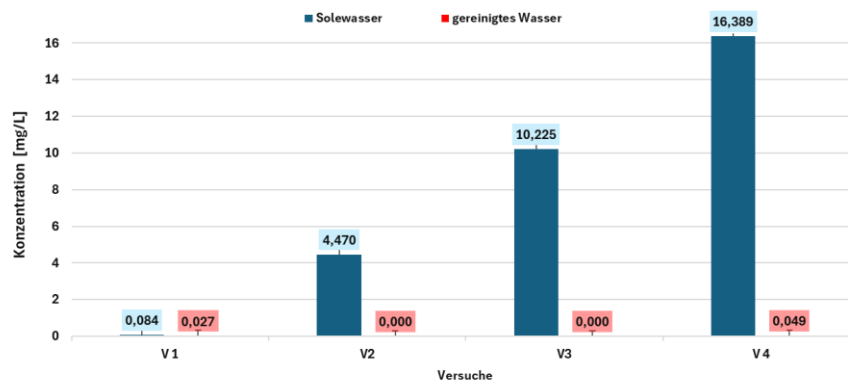


Abbildung 15: Aufkonzentration des Solewassers nach den Versuchen mit Natriumbelastungstest

durchgeführt. Dabei wurde die Initialkonzentrationen verwendet, die auch bei dem vorherigen Langzeitversuch (792 Stunden) angesetzt worden waren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leitfähigkeit während des gesamten Tests unterhalb der festgelegten Grenzwerte blieb. Allerdings wurde der optimale Wert von 0,055  $\mu\text{S}/\text{cm}$  nicht erreicht. Dies deutet darauf hin, dass der Natriumbelastungstest eine Beeinträchtigung der Zelle verursacht hat, die langfristig zu einem Ausfall der Zelle führen könnte.

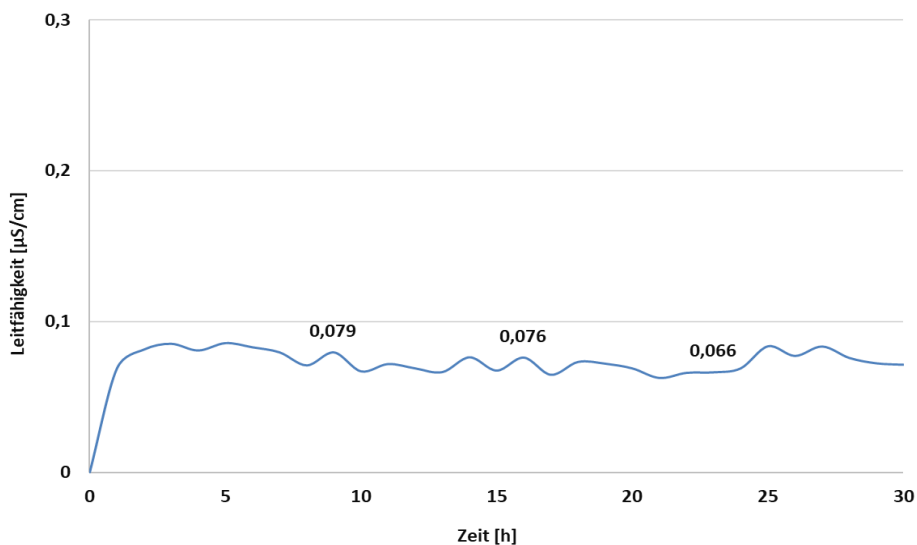


Abbildung 16: Verlauf der Leitfähigkeit der Zelle nach vier Natriumbelastungstests

### 1.2.3 Membrandestillation Versuch

Im Rahmen des Projekts wurde die Membrandestillation (MD) als Alternative zur Umkehrosmose untersucht, da diese Methode das Potenzial bietet, die Energiekosten zu senken und besonders für Elektrolyseurbetreiber attraktiv ist. Insbesondere Betreiber, die über überschüssige Wärme verfügen, können diese in der Membrandestillation nutzen, um die Energiekosten für die Wasseraufbereitung erheblich zu reduzieren.

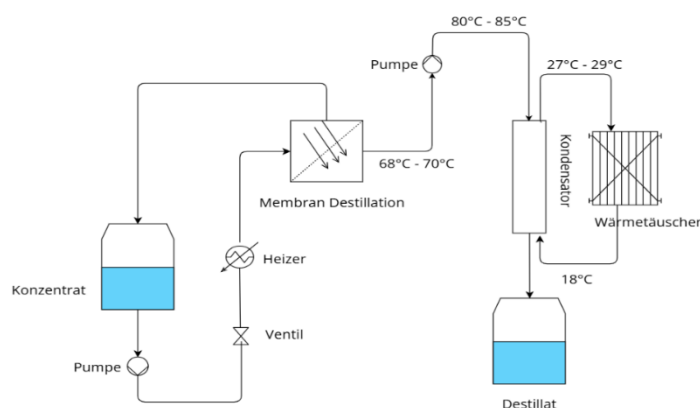


Abbildung 17: Fließbild der verwendete SGMD-Anlage

Für die Versuche wurde die Variante der Sweeping-Gas-Membrandestillation (SGMD) ausgewählt. Abbildung 18 zeigt ein Fließbild des Prüfstands, der für die Tests aufgebaut wurde. Hierbei wurde eine Wasserprobe verwendet, welche mit Verunreinigungskonzentrationen, die 100-fach höher war als die in den vorherigen Dauerversuchen mit den EDI-Zellen eingesetzten Konzentrationen. Die initiale Leitfähigkeit dieser Wasserprobe betrug 1365 µS/cm, was etwa dem Vierfachen der Leitfähigkeit von Leitungswasser in der Region Aachen (ca. 350 µS/cm) entspricht. Diese extrem hohe Konzentration wurde gezielt gewählt, um die Robustheit und Effizienz der Membrandestillation unter anspruchsvollen Bedingungen zu prüfen. Der Durchfluss des Systems wurde auf 100 l/h eingestellt.

Vor Beginn der Tests wurde ein Kontaktwinkeltest durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Membran unbeschädigt ist und ihre hydrophoben Eigenschaften intakt sind. Drei verschiedene Wassertypen wurden getestet, Leitungswasser mit einer Leitfähigkeit von etwa 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , eine 1 mol/L Kaliumhydroxid (KOH)-Lösung und das selbst hergestellte, kontaminierte Wasser. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 19b, zeigen, dass die Membran alle drei Wassertypen gleichermaßen effektiv behandeln kann. Dies deutet darauf hin, dass die Membrandestillation in der Lage ist, unterschiedliche Wasserqualitäten zuverlässig zu reinigen.

Die Wirksamkeit der Methode wurde durch die Reinigung des hochkonzentrierten Wassers bestätigt. Die Leitfähigkeit konnte von 1365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf 1,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  reduziert werden. Dieses Ergebnis unterstreicht die hohe Effizienz der Sweeping-Gas-Membrandestillation, selbst bei hohen Ausgangskonzentrationen, und zeigt ihr Potenzial als Effiziente Alternative zur Umkehrosmose in der Wasseraufbereitung für Elektrolyseanwendungen. In Abbildung 19a ist die für die Testdurchführung verwendete Anlage dargestellt.

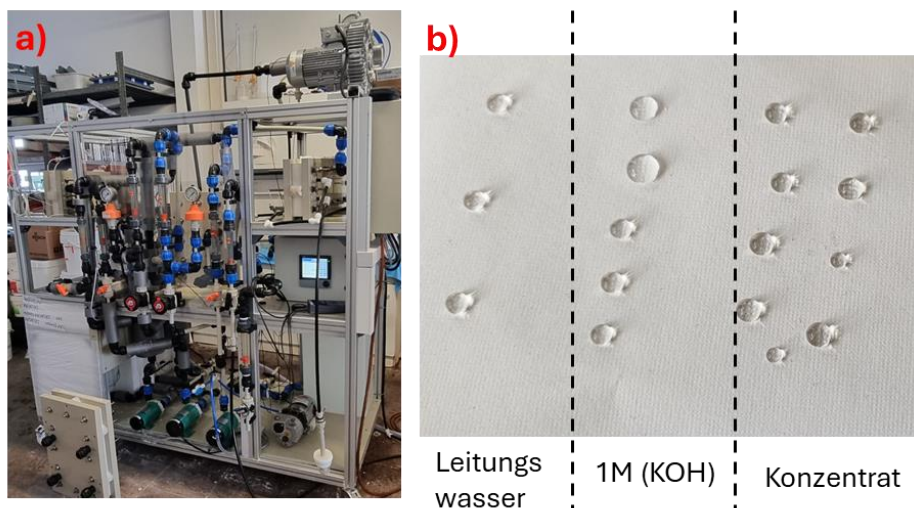


Abbildung 18: a) SGMD Anlage; b) Kontaktwinkel test mit der Membran

#### 1.2.4 Fazit der Ergebnisse

Zusammenfassend wurden die Arbeiten im Forschungsvorhaben erfolgreich durchgeführt. Durch umfangreiche Langzeittests mit EDI-Zellen konnte nachgewiesen werden, dass hohe Ionenkonzentrationen insbesondere Eisen zu einer Schädigung der Ionenaustauscherharze führen können. Im Verlauf der Untersuchungen wurde außerdem festgestellt, dass das Solewasser eine wichtige Rolle als Indikator für die Degradation der Elektroden spielt. Daher sollte es regelmäßig überwacht und bei Bedarf aufgefrischt werden. Ein redundanter Betrieb führte zu robusten Ergebnissen, wobei über einen Zeitraum von 964 Stunden eine stabile Leitfähigkeit von unter 0,06  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufrechterhalten werden konnte.

Die Versuche zeigten, dass eine stabile Aufreinigung bei stark belasteten Zellen langfristig nicht aufrechterhalten werden kann, ab etwa 764 Stunden nahm die Reinigungsleistung deutlich ab.

Parallel dazu erwies sich die Sweeping-Gas-Membrandestillation (SGMD) als vielversprechende Alternative zur Umkehrosmose. Sie reduzierte die Leitfähigkeit des Wassers von 1365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf 1,8

μS/cm und bietet insbesondere für Anlagen mit verfügbarer Abwärme ein großes Potenzial zur Reduktion des Energieverbrauchs.

Insgesamt liefert das Projekt eine belastbare Grundlage für die Entwicklung eines marktfähigen und energieeffizienten Wasseraufbereitungskonzepts, das sowohl die Betriebskosten senkt als auch die Anforderungen von Elektrolyseurbetreibern erfüllt.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten sind im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die geplante Verwertung ist im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

## 5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine wesentlichen Fortschritte auf dem konkreten Gebiet der Wasseraufbereitung bekannt geworden.

6. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
07.09.2022	Konferenzbeitrag	Fluid Condition Monitoring QT 6.2: FluCoM (H2Giga Statuskonferenz, Frankfurt)	Markus Stöckl, Ruben Kehren	
21.09.2023	Konferenzbeitrag	Fluid Condition Monitoring QT 6.2: FluCoM (H2Giga Statuskonferenz, Berlin)	Hichame Ait El Mallali / Jürgen Schuster	
18.09.2024	Konferenzbeitrag	QT 6.2 Fluid Condition Monitoring (H2Giga Statuskonferenz, Berlin)	Hichame Ait El Mallali, Markus Stöckl	
19.10.2024	LinkedIn-Post	LinkedIn-Post zur Teilnahme an der H2Giga Statuskonferenz, Berlin	Tec4Fuels	<a href="https://www.linkedin.com/posts/tec4fuels_elektrolyse-flucom-fluidconditionmonitoring-activity-7244261122147500033-LcQ9">https://www.linkedin.com/posts/tec4fuels_elektrolyse-flucom-fluidconditionmonitoring-activity-7244261122147500033-LcQ9</a>

## Literaturverzeichnis

1. Emanuele Taibi, Herib Blanco, Raul Miranda and Marcelo Carmo. *IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*,. Abu Dhabi : IRENA, 2020. 978-92-9260-295-6.
2. *Impact of impurities on water electrolysis: a review*. Hans Becker, James Murawski, Dipak V. Shinde, a Ifan E. L. Stephens,. s.l. : Royal Society of Chemistry , 2023, Bd. Sustainable Energy & Fuels . 10.1039/d2se01517j.
3. *Various applications of electrodeionization (EDI) method for water treatment—A short review*. Özgür Arar, Ümran Yüksel , Nalan Kabay , Mithat Yüksel. 2014, Turkey : Elsevier (Desalination), 2014.
4. MATSUURA, KHAYET MOHAMED and TAKESHI. *Membran Destillation Principles and Application* . Spain : Elsevier , 2011 . 978-0-444-53126-1.
5. GmbH, ELDI. *Rein- und Reinstwasserherstellung mit Elektro-Entionisierung*. Oststeinbek : ELDI GmbH.

## Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyseur
AEL	Anion Exchange Membran
EDI	Elektrodeionisation
HTEL	Hochtemperatur Elektrolyseur
IC	Ion Chromatographie
ICP-OES	Induktiv gekoppelte Plasma-Optische Emissionsspektroskopie
Konz.	Konzentration
MD	Membran Destillation
NPOC	Non-Purgeable Organic Carbon
PEEK	Polyetheretherketon
PEM	Proton exchange Membran
PV	Photovoltaik
SGMD	Sweeping Gas Membran Destillation
TOC	Total Organic Carbon
u.n.g	Unter Nachweisgrenze