Leitprojekt
H_2Giga

Marl, 29.04.2026

Verbundvorhaben:
Direktbeschichtung von anionenleitenden Membranen für großskalige Wasserelektrolyseure

Teilvorhaben:
DURAION® als AEM-Materialbasis für die Herstellung von Membran und Ionomer

Sachbericht zum Verwendungsnachweis –

Teil I: Kurzbericht und Teil II Eingehende Darstellung

Stand:	29.04.2026
Partnerin/Partner:	Evonik Operations GmbH
Autorinnen/Autoren:	Dr. Artjom Maljusch, Patrick Borowski
Fördertitel:	H2Giga_NG5_AEM-Direkt
Laufzeit:	01.03.2023 bis 28.02.2026
Förderkennzeichen:	03HY130E
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Leitprojekt H₂Giga
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
Finanziert von der Europäischen Union NextGenerationEU

Teil I – Kurzbericht

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die anionenleitfähige Membran (AEM) ist die zentrale Komponente in der AEM-Elektrolysetechnologie, welche für eine hohe Elektrolyseperformance einen hohen Ionentransport ermöglichen soll und die produzierten Gase im Elektrolyseur (Wasserstoff und Sauerstoff) für einen sicheren Betrieb trennen muss. Im Rahmen des Gesamtvorhabens war es das Ziel, diese anionenleitfähige Membranen und Ionomere (Binder für partikuläre Katalysatoren) aus der DURIAON® Produktfamilie von Evonik weiterzuentwickeln, beziehungsweise zu optimieren und dem Konsortium zur Verfügung zu stellen. Die Arbeiten knüpften an den bestehenden wissenschaftlichen und technischen Stand der existierenden Polymerchemie und Membranherstellungstechnologie an. Dabei standen insbesondere die Skalierbarkeit der Materialien selbst sowie deren Eignung zur (skalierbaren) Direktbeschichtung mit Katalysatoren im Fokus.

2. Ablauf des Vorhabens

Evonik stellte während des Projekts kontinuierlich anionenleitfähige Membranen und Ionomere für die Projektpartner her. Zentraler Schwerpunkt lag hier auf der Optimierung der Prozessführung mit Blick auf die Skalierung der Membranherstellung und der vorherigen Synthese des anionenleitfähigen Polymers (Vorstufe von Membran und Ionomer). Zudem wurde für die Skalierung der Elektrolysezelle eine verstärkte Membran mit reduziertem Quellverhalten entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

3. Wesentliche Ergebnisse

In Bezug auf die Synthese des anionenleitfähigen Polymers wurde festgestellt, dass eine höhere Molmasse des Polymers die mechanischen Eigenschaften der Membranen signifikant verbessert, während eine zu hohe Molmasse die Löslichkeit und damit die Verarbeitung erschwerte. Durch die Optimierungsprozesse wurden eine reproduzierbare Qualität und Skalierbarkeit erreicht, sodass die Partner über die Projektlaufzeit mit ausreichend Material versorgt werden konnten.

Ein Meilenstein war die Einführung einer verstärkten Version der anionenleitfähigen Membran, die durch die Einbettung eines Kunststoffgewebes eine erhöhte mechanische Stabilität im gequollenen Zustand und im Besonderen ein deutlich, um 80 % reduziertes Quellverhalten zeigten – beides sind entscheidende Parameter für die Skalierung der AEM-Elektrolysetechnologie. Im Vergleich zur nicht verstärkten Membranversion führte die Verstärkung mit einem Gewebe außerdem zu einer Reduktion der Wasserstoffpermeabilität, aber auch zur leichten Reduktion der Elektrolyseperformance aufgrund des zusätzlichen Widerstands. Aufgrund der genannten positiven Eigenschaften der verstärkten Membran sowie deren nachgewiesen erfolgreichen Beschichtbarkeit mit Katalysatoren setzte sich diese Membranversion als Standard für die Arbeiten im Projekt durch.

Die größte Herausforderung bei der Herstellung der verstärkten Membran war die Verheiratung des anionenleitfähigen Polymers mit dem Verstärkungsgewebe, bei der Defekte wie Luftblasen sowie eine unzureichende Einbettung zu vermeiden waren. Solche Defekte können zu einer erhöhten Wasserstoffpermeation oder inhomogenen Katalysatorbeschichtungen führen.

Analog der im Projekt skalierten Fläche der Elektrolysezelle auf 300 cm² musste ebenfalls die anionenleitfähige Membran in der Breite skaliert werden. Auf Basis der erfolgreichen Skalierung der unverstärkten Membran von anfangs 12 cm Membranbreite auf 32 cm konnte ebenfalls die verstärkte Membran direkt mit einer Breite von 28 cm hergestellt und den Partnern bereitgestellt werden. Damit wurden Meilensteine signifikant übertroffen beziehungsweise direkt übersprungen. Diese Fortschritte in der Produktionstechnologie sind ein bedeutender Schritt hin zur großtechnischen Anwendung.

Zusammenfassend hat das Projekt wesentliche Fortschritte bei der Entwicklung und Optimierung anionenleitfähiger Membranen, deren Produktion sowie deren Direktbeschichtung erzielt. Die verbesserten Materialien und Prozesse ermöglichen eine höhere Effizienz und Skalierbarkeit für Elektrolyseanwendungen.

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Die elektrochemische Charakterisierung der katalysatorbeschichten Membranen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern. Jahrelange interne Erfahrungen flossen in die harmonisierten Testprotokolle und in die einheitlich verwendete Konsortialzelle, welche auf Basis eines Evonik internen Standards beruht, ein. Durch die Harmonisierung konnten Messaufwand unter den Partnern bei dennoch hoher Vergleichbarkeit geteilt werden.

Durch die Teilnahme an zuvor mit den Projektpartnern diskutierten Messkampagnen wurden regelmäßig Elektrolyseversuche durchgeführt. Neben der Bewertung von Katalysatorbeschichtungen auf der anionenleitfähigen Membran wurden auch systematische Effekte wie die Korrosion beziehungsweise Degradation von Zellkomponenten betrachtet. Vorteil des intern verwendeten Elektrolyseteststands (25 cm² Zellgröße) war die Möglichkeit von Dauerversuchen. Diese zeigten, dass Konditionierungsprozesse in der Elektrolysezelle (Elektroden, poröse Transportlagen, Gehäuseteile, Membran) mehrere hundert Stunden benötigen, bevor stabile Betriebsbedingungen erreicht werden können. Deshalb sind Dauerversuche bei der Bewertung von Zellkomponenten entscheidend.

Bei den Elektrolyseversuchen wurden im Wesentlichen viele Messdaten gewonnen, die zentral durch die Partner ausgewertet und in gemeinsamen Projekttreffen diskutiert wurden. Die Daten der Elektrolyseversuche, aber auch Basisdatensätze zu den hergestellten Membranen wurden komfortabel auf eine gemeinsame CKAN-Datenbank geladen.

Die enge Zusammenarbeit im Konsortium und der Austausch von Know-how waren entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele.

Teil II. Eingehende Darstellung

1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes stellte Evonik anionenleitfähige Membranen und entsprechende Ionomere (anionenleitfähige Binder) aus der Produktfamilie DURIAON® den Partnern zur Verfügung. Die Herstellungsprozesse beider Materialien befanden sich über die Projektlaufzeit im Entwicklungsstadium. Die Schwerpunkte lagen bei der Skalierung der Materialien und auf der Implementierung einer Membranverstärkung, um gezielt die Membraneigenschaften für den Einsatz in skalierten Elektrolyseuren (hier zunächst 300 cm²) zu optimieren.

I.1.1 AP1.1: AEM - Membran & Ionomer

Hauptziel von **AP1.1** war die Herstellung von anionenleitfähigen Membranen sowie Ionomeren und die Bereitstellung dieser Materialien an die Konsortialpartner. Zudem wurden Konzepte zur Membranverstärkung evaluiert und entsprechend auch eine verstärkte Membranversion durch Einarbeitung eines Kunststoffgewebes bereitgestellt.

Die Herstellung der Materialien umfasste generell folgende Prozessschritte:
- *Synthese der Anionen leitfähigen Polymere,*
- *(Freigabe-) Analytik der anionenleitfähigen Polymere,*
- *Herstellung (Casting) der anionenleitfähigen Membranen,*
- *(Freigabe-) Analytik der anionenleitfähigen Membranen,*
- *Formulierung der Ionomere,*
- *(Freigabe-) Analytik der Ionomere.*

Die regelmäßige Bereitstellung der anionenleitfähigen Materialien erfolgte nach Meilensteinplan sowie entsprechendem Bedarf der Partner (**MS01**, **MS06**, **MS07**).

Aufgrund von allgemeinen Marktinteressen wurde in der zweiten Jahreshälfte 2023 Evonik intern entschieden, die Dicke der unverstärkten DURAION® Membran von 65 µm auf 100 µm anzu-heben – entsprechend betraf diese Änderung auch die Membranen für die Projektpartner. Hintergrund der Entscheidung war unter anderem den Elektrolysebetrieb perspektivisch bei höherem Wasserstoff (Differential-) Druck (> 30 bar) mit der DURAION®-Membran zu ermöglichen. Bei höheren Wasserstoff-Drücken ist die Treibkraft für die Permeation von Wasserstoff zur Anode (Seite des Elektrolyseurs, wo Sauerstoff gebildet wird) durch die anionen-leitfähigen Membran höher - eine dickere Membran verringert die Menge an durchtretendem Wasserstoff, um einen sichereren Betrieb des Elektrolyseurs zu ermöglichen. Diese Markt-einschätzung konnte 2024 wieder zu Gunsten einer dünneren Membran revidiert werden, die eine geringeren Zellspannung bei gleicher Stromdichte (= höhere Effizienz) ermöglicht. Eine un-verstärkte DURAION® Membran mit einer Dicke von 65 µm stand so dem Projekt wieder zur Verfügung.

Entsprechend dem Meilenstein **MS02** wurden die Eigenschaften der hergestellten und an die Partner übergebenen anionenleitfähigen Membranen regelmäßig überprüft. Zu den bereitgestell-ten Materialien wurden zugehörige Analyse-Basisdatensätze den Partnern

bereitgestellt (**MS02**) und in die CKAN-Datenbank hochgeladen – darunter fallen unter anderem die Bestimmung von: Dicke der Membran, Quellverhalten, mechanische Eigenschaften (E-Modul) und intrinsische Wasserstoffpermeation.

Aus den gemessenen Membraneigenschaften geht hervor, dass die Dicke der anionenleitfähigen Membran einen unmittelbaren Einfluss auf mehrere Membraneigenschaften hat. In Abbildung 1 sind die Dicke und die entsprechenden H_2-Permeabilitäten von 65 um und 100 um Membranen dargestellt. Zusätzlich sind auch UI-Kennlinien beider Membranen abgebildet. Eine dickere Membran reduziert die ungewollte Permeation von Wasserstoff auf die Sauerstoffseite, erhöht aber die notwendige Spannung, um gewünschte Stromdichte zu erreichen.

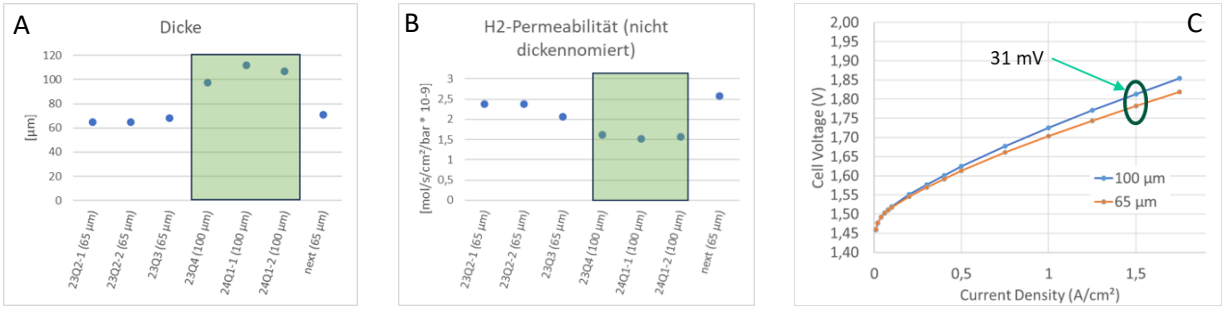

Abbildung 1. Auswirkung der Membrandicke (A) auf deren H_2-Permeabilität (B) und Zellspannung (C).

Um den erhöhten Anforderungen an die anionenleitfähigen Membran bei einer Flächenskalierung der aktiven Elektrolysefläche gerecht zu werden (mechanische Eigenschaften, Quellverhalten), wurden diverse Konzepte der Membranverstärkung evaluiert (Evonik intern, **MS03**). Es wurde festgestellt, dass die Membranverstärkung mit einem Kunststoffgewebe die erwünschten hohe mechanischen Eigenschaften und reduzierte Quellung ermöglichen kann sowie technisch gut skaliert werden kann.

Generell gibt es zwei Möglichkeiten, wie eine mit einem Gewebe verstärkte Membran hergestellt werden kann. Option 1: das Gewebe wird vorgelegt und mit einer dünnen Schicht aus einer viskosen Polymerlösung „übergossen“. Die Polymerlösung wird dabei in die freien Räume zwischen einzelnen Fäden eindringen und die Fäden dabei einbetten. Option 2: zuerst wird eine dünne Schicht aus einer viskosen Polymerlösung auf eine dicke Substratfolie vorgelegt und danach das Gewebe in diese Schicht eingelegt. Es wurde festgestellt, dass bei einer Option viele Luftblasen durch die Polymerlösung eingeschlossen werden. Dies ist unerwünscht, da solche Luftblasen potenzielle Defektstellen in der Membran darstellen und zur erhöhten H_2-Permeabilität der Membran führen können. Mit der anderen Option konnten mittels Handbeschichtung hoch-qualitativ verstärkte Membrane mit 10 cm Bahnbreite hergestellt werden (**MS04**).

Als eine hochqualitativ verstärkte Membran wird eine Membran mit im Querschnitt mittiger Position des Gewebes sowie glatten Oberflächen bezeichnet (s. Abbildung 2A und 2B). Zu den typischen Fehlern bei der Produktion von verstärkten Membranen gehören (i) eine nicht mittlere Position des Gewebes (s. Abbildung 2C und 2D) und (ii) ein nicht ausreichend gut eingebettetes Gewebe (s. Abbildung 2E). Wird eine zu geringe Menge an Polymerlösung verwendet, so wird das Gewebe nicht vollständig eingebettet. Dies führt zu einer Membran mit mindestens einer Oberfläche mit hoher Rauigkeit, welche die anschließende Beschichtung mit einer Katalysator-paste sehr aufwändig bis kaum möglich macht.

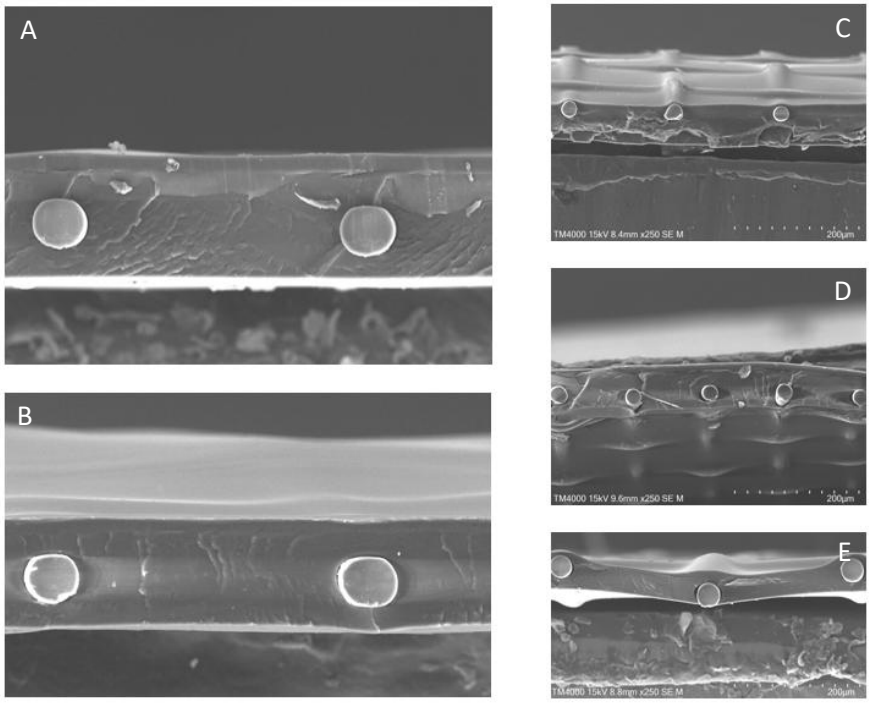

Abbildung 2. REM-Aufnahmen von Querschnitten einer mit Gewebe verstärkten Membran. Auf dem Bild A ist mittige Position des Gewebes zu sehen, Bild B zeigt eine glatte Oberfläche der Membran. Bilder C und D zeigen Membranquerschnitte mit nicht mittiger Position des Gewebes und einer rauen Oberfläche. Bild E zeigt ein nicht vollständig eingebettetes Gewebe mit zwei rauen Oberflächen.

Eine hohe Wechselwirkung zwischen Polymerlösung (Polymer als auch Lösungsmittel) und dem Material des Gewebes ist für eine hohe Benetzung bzw. Einbettung des Gewebes entscheidend. Während des Projektverlaufs wurden unterschiedliche Arten an Defekten beobachtet (s. Abbildung 3). Oft wurden größere, rundförmige Bereiche des Gewebes komplett nicht eingebettet (s. Abbildung 3A und 3B). Manchmal wurden Fäden des Gewebes zwar benetzt, jedoch freie Flächen zwischen den Fäden blieben nicht beschichtet (s. Abbildung 3C). Gelegentlich wurden eingeschlossene Luftblasen (s. Abbildung 3D) und Inhomogenitäten im eingebetteten Gewebe (s. Abbildung 3E) beobachtet.

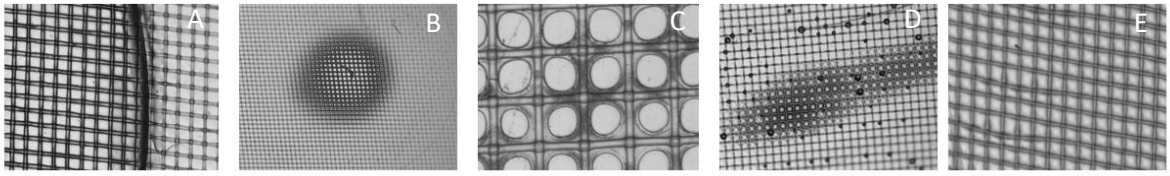

Abbildung 3. Optische Aufnahmen von Beschichtungsdefekten, welche während des Projektes bei der Entwicklung der verstärkten Membran beobachtet wurden. Bilder A und B zeigen Bereiche, welche von der Polymerlösung nicht benetzt wurden. Auf dem Bild C sind eingebettete Fäden und nicht eingebettete freie Fläche zwischen den Fäden zu sehen. Viele kleine eingeschlossene Luftblasen (Bild E) und Inhomogenitäten im Gewebe (Bild E) wurden gelegentlich beobachtet.

Die Qualität des Gewebes spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Herstellung von hochqualitativ verstärkten Membranen. Die meisten Defekte und Inhomogenitäten, welche im Gewebe vorhanden sind, werden auch in der verstärkten Membran vorhanden sein und können ihre Qualität sowie ihre Eigenschaften signifikant beeinflussen. Typischerweise werden bei der Qualitäts-kontrolle des Gewebes folgende Parameter analysiert: Dicke des Fadens, Dicke des Gewebes, Maschenweite, offene Fläche und vorhandene Inhomogenitäten (s. Abbildung 4).

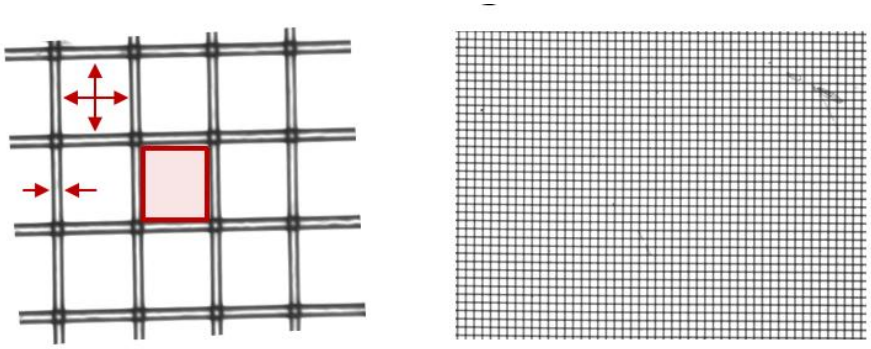

Abbildung 4. Optische Aufnahmen von hochqualitativen Gewebeproben ohne Defekte. Rot markierte Fläche zwischen einzelnen Fäden wird als offene Fläche des Gewebes bezeichnet.

Die Produktion von hochqualitativem Gewebe ist ein sehr komplexer und aufwändiger Prozess. Nach dem Webprozess wird das hergestellte Material thermisch behandelt, um Fäden miteinander zu fixieren. Die Analyse von Gewebeproben unterschiedlicher Hersteller zeigte, dass typischerweise drei Arten an Defekten vorhanden sein können (s. Abbildung 5). Wird eine zu hohe Temperatur während der Fixierung angewendet, so werden die Fäden angeschmolzen und dicke Knotenpunkte gebildet (s. Abbildung 5A). Eine zu hohe Komprimierung des Gewebes bei einer zu geringen Temperatur führt zur Beschädigung der Fäden und deren Versatz (Zick-Zack Muster, s. Abbildung 5B). Oft wurden ungleiche Abstände zwischen den Fäden beobachtet (s. Abbildung 5C). Typischerweise führen Defekte bzw. Inhomogenitäten im Gewebe zur Reduktion der mechanischen Eigenschaften des Gewebes und bei der resultierenden anionenleitfähigen Membran zu einer Welligkeit.

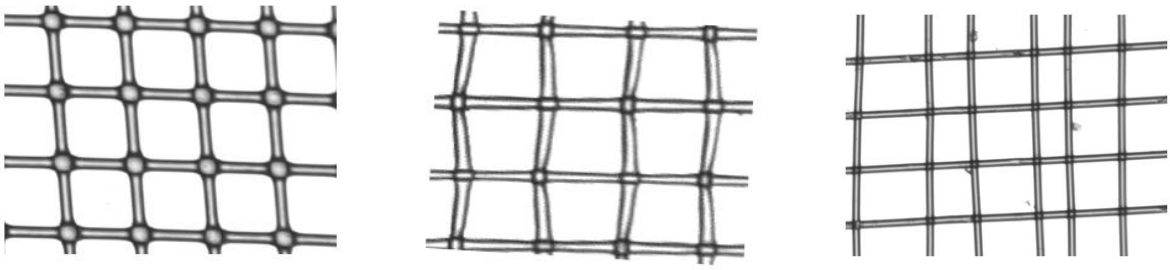

Abbildung 5. Optische Aufnahmen von Gewebeproben mit Defekten (A und B) und ungleichmäßigen Abständen zwischen einzelnen Fäden (C)

Ein weiterer wichtiger Parameter bei der Herstellung von hochqualitativ verstärkten Membranen ist die Zugspannung, mit welcher das Gewebe während dem gesamten Produktionsprozess gespannt wird. Eine zu geringe Zugspannung führte zu einer welligen Membran (s. Abbildung 6).

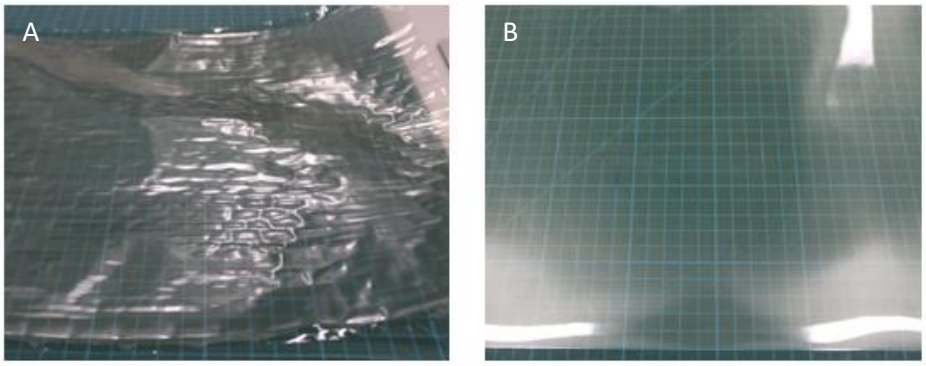

Abbildung 6. Optische Aufnahmen von verstärkten Membranproben. Bild A zeigt eine Membran, welche mit einer zu geringen Zugspannung am Gewebe hergestellt wurde und daher eine starke Welligkeit aufweist. Bild B zeigt eine flache hochqualitativ verstärkte Membran.

Eine hochqualitativ verstärkte Membran wird beim Kontakt mit dem Elektrolyten (z.B. 1M KOH) flach bleiben (s. Abbildung 7A). Auf der anderen Seite wird sich eine nicht hochqualitativ verstärkte Membran (d.h. Gewebe zeigt Fehlstellen, ist nicht mittig positioniert oder nicht gut eingebettet) beim Quellen im Elektrolyten stark zusammenrollen (s. Abbildung 7B).

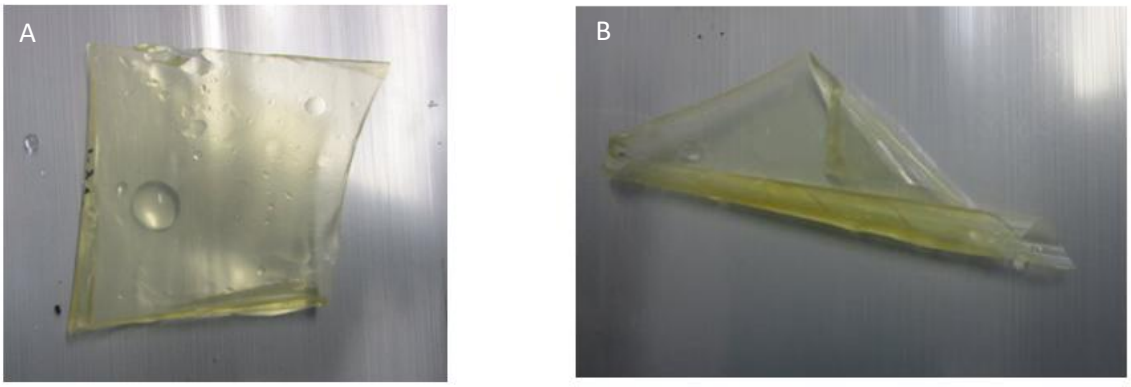

Abbildung 7. Optische Aufnahmen von einer hochqualitativen (A) und einer nicht hochqualitativen (B) verstärkten Membran nach Quellen in 1M KOH Elektrolyten.

Die Anwesenheit des Gewebes beeinflusst die Eigenschaften einer Membran. Die nachfolgenden Graphen zeigen einige Membraneigenschaften über die quartalsweise Membranbereitstellungen (s. Abbildung 8). Zu erkennen ist der (o. g.) zeitweise Wechsel der Membranzieldicke von 65 µm auf 100 µm bei der unverstärkten Membran, was insbesondere die nicht-dickennormierte Wasserstoffpermeation reduzierte (die übrigen Parameter sind dickennormiert). Schwankungen beim E-Modul (insbesondere bei der trockenen Membran) ergaben sich im Wesentlichen durch den Trockengrad der Membranen aufgrund von Produktionsschwankungen.

Die Vorteile der verstärkten Membran im Vergleich zur freistehenden Membran werden ebenfalls in den nachfolgenden Graphen deutlich (s. Abbildung 8):

- Das Quellverhalten im Zielelektrolyten (1M KOH) wurde von 10 % auf ca. 2 % reduziert, da das formstabile Gewebe zur Verstärkung die dimensionale Änderung in der Membranfläche weitestgehend unterband.

- Das E-Modul (die mechanischen Eigenschaften) wurde im gequollenen Zustand (in 1M KOH, Anwendungsfall) durch die mechanische Stützfunktion des Gewebes erhöht. Im trockenen Zustand war im Wesentlichen das anionenleitfähige Polymer und nicht das Gewebe verantwortlich für das E-Modul, weshalb hier keine große Änderung durch die Membranverstärkung zu erkennen war.

- Die Wasserstoffpermeation wurde im Vergleich zur 65 µm unverstärkten Membran reduziert, da zum einen die verstärkte Membran dicker war (80 µm) und zudem das Gewebe an sich eine weitere Barriere für den Wasserstofftransport darstellte. Die reduzierte Wasserstoffpermeation war ebenfalls ein Indikator für die hohe Qualität der Anbindung vom anionenleitfähigen Polymer an das Gewebe. Eine unzureichende Anbindung sowie Fehlstellen (eingeschlossene Luftblasen, nicht eingeschlossene Fasern) hätten eine erhöhte Wasserstoffpermeation zur Folge gehabt.

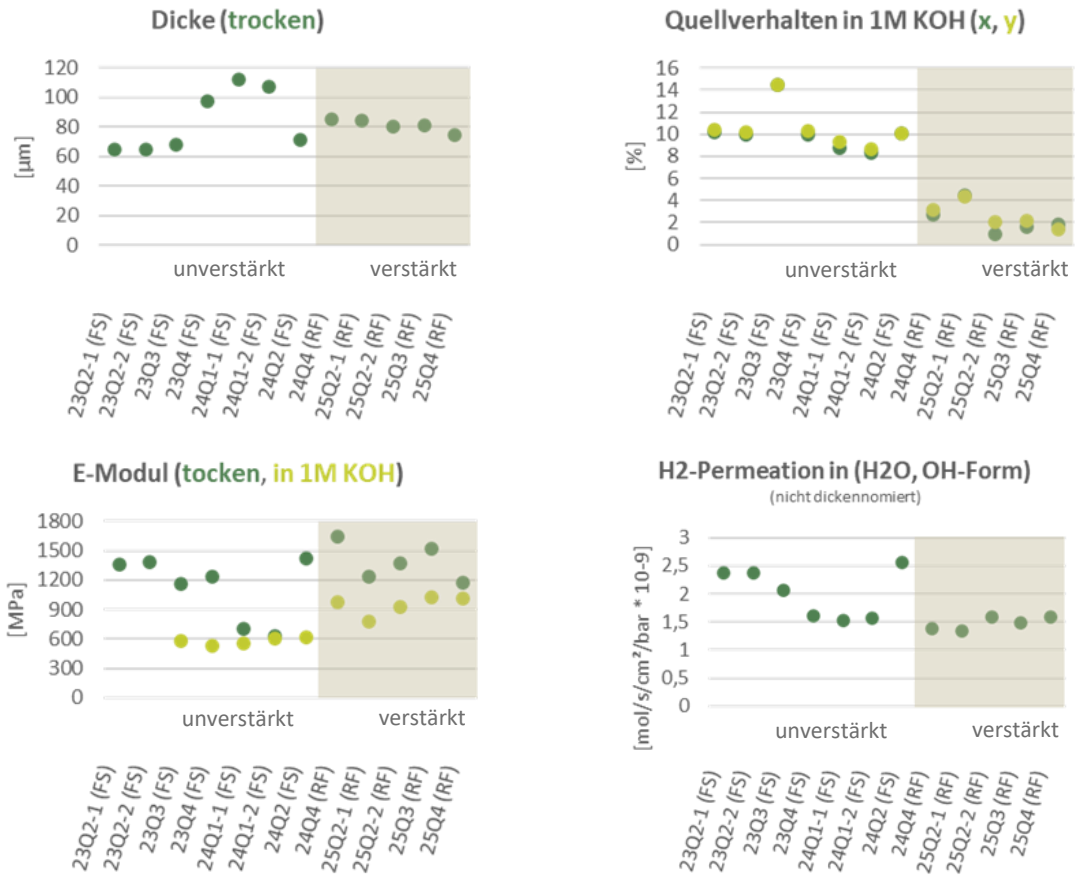

Abbildung 8: Wesentliche Membraneigenschaften über die Projektlaufzeit, die die notwendige Entwicklung der Membran mit Reduktion des Quellverhaltens, die Erhöhung der mechanischen Eigenschaften im gequollenen Zustand und verringerter H_2-Permeation aufgrund der Implementierung eines Verstärkungskonzeptes zeigen.

Die Anwesenheit vom Gewebe in der verstärkten Membran führt zur leichten Erhöhung der Zellspannung, um die gleiche Stromdichte (gleiche Menge an produziertem Wasserstoff) im Vergleich zur freistehenden Membran zu erreichen (s. Abbildung 9). So wird bei der Verwendung der verstärkten Membran eine ca. 50 mV höhere Zellspannung bei einer Stromdichte von 1,5 A/cm^2 benötigt.

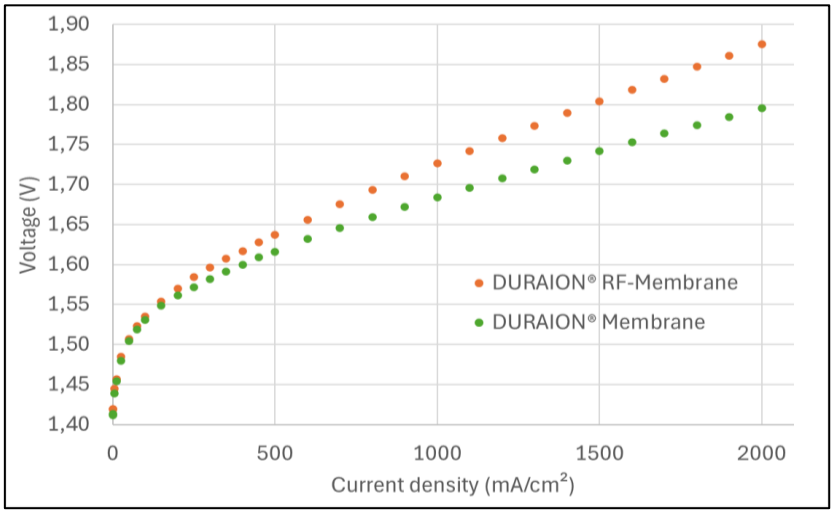

Abbildung 9. UI-Kennlinien, welche mit einer unverstärkten (grüne Punkte) und einer verstärkten (RF, orange Punkte) Membran aufgenommen wurden. Es wurde eine 25 cm² AEM-Direkt-Zelle im CCS-Aufbau mit 1M KOH bei 70° C verwendet.

Zur Nutzung der freistehenden Membran auf 300 cm² Zellgröße entsprechend dem Projektplan, war die Skalierung der Membranbreite auf bis zu 15 cm analog dem Meilensteinplan (**MS05**) notwendig. Die Herstellung der freistehenden Membranen erfolgte bereits ab Projektbeginn auf einer kompakten Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage. Um die Membranbreite weiter zu erhöhen, wurden die gesammelten Erfahrungen auf eine alternative Beschichtungsanlage mit breiterem Auftragswerk übertragen. So konnte die Breite der freistehenden Membran entgegen der ursprünglichen Planung (**MS05**, Skalierung auf bis zu 15 cm Bahnbreite) von 12 cm direkt auf 32 cm erfolgreich skaliert werden. Somit wurde Ziel von **MS05** signifikant übertroffen.

Basierend auf den vielversprechenden Materialeigenschaften der verstärkten Membran sowie auf den ersten erfolgreichen Beschichtungsversuchen auf einer alternativen Beschichtungsanlage mit breiterem Auftragswerk, wurde im Konsortium entschieden, nur noch die verstärkte Membran zu verwenden. Damit wurde der kontinuierliche **MS06** (Bereitstellungen der nicht-verstärkten Membran) hinfällig.

Mit Erfahrungen aus ersten Handversuchen und der Skalierung der unverstärkten Membran, konnte ebenfalls die Herstellung der verstärkten Membran direkt auf eine Breite von bis 28 cm erfolgreich skaliert werden. Damit wurden bereits die Zielbreiten von **MS04** und **MS07** (Breite 10 cm bzw. bis zu 15 cm) signifikant übertroffen.

I.1.2 AP2.3: Harmonisierung und Messkapazitätserweiterung 25 cm², 50 cm²

Hauptziel von AP2.3 war die Harmonisierung der Elektrolysemessungen sowie der Testplatt-formen, Zellen und Messprotokollen. Ein bisher bei Evonik etabliertes Zelldesign (25 cm²) diente als Grundlage für das im Verbund umgesetzte, einheitliche Zellkonzept (Verantwortung: SE).

Entsprechend wurden Informationen wie technische Zeichnungen mit den Konsortialpartnern geteilt.

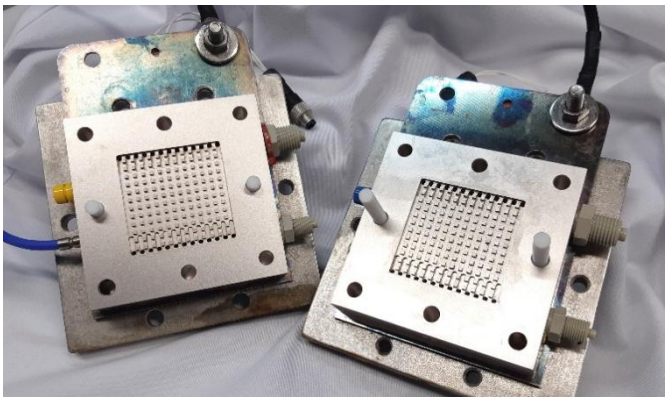

Abbildung 10: bei Evonik etabliertes Zellkonzept für 25 cm² Elektrolyseversuche als Grundlage für das im Verbund einheitliche Zellkonzept.

Für die Festlegung eines Protokolls für einheitlichen Elektrolyseversuche (Verantwortung: SE) wurden bisherige Erfahrungen von Evonik beigesteuert:

- *Materialvorbehandlung (Membrankonditionierung)*
  Die Konditionierung der Membran wurde im Vorfeld der Zellassemblierung durchgeführt, sodass (beschichtete) Membranen bereits Ionengetauscht (Chlorid zu Hydroxid) sowie feucht in die Elektrolysezelle eingebaut wurden. Dadurch wurden Unsicherheiten durch eine in-situ Konditionierung sowie der Effekt der in-situ Membranquellung zunächst vermieden.
  - 2x 1 M KOH bei 60 °C für je 1 h (4 ml pro cm² Membranfläche)
  - 1x 1 M KOH bei 60 °C über Nacht (~16 Std., 4 ml pro cm² Membranfläche)

- *Beginn des Testprotokolls (Einfahren)*
  Zu Beginn des Testprotokolls wurden Membran und Elektroden an die Betriebstemperatur herangeführt. Ein konstantes Anheben gefolgt von Halten der Stromdichte führte zur gerichteten Aktivierung von Elektroden und dem Ausbilden von Hydroxid-Transportwegen in der Membran. Vor Aufzeichnen der Polarisationskurve wurde das System bei geringer Stromdichte regeneriert, sodass reproduzierbare Polarisationskurven aufgenommen werden konnten – dieses Vorgehen wurde ebenfalls nach konstantem Betrieb der Elektrolysezelle empfohlen.
  - *Aufheizen des Teststands nach Zellmontage*
    - Bei OCP bis zum Erreichen der Zieltemperatur am Zelleinlass (Anode, ~2 Std.)
  - *Galvanostatische lineare Stromsteigerung:*
    - Start/Ende: 0,01 A/cm² → 1 A/cm²
    - Scanrate: 0,4 mA/cm²/s
    - Schrittweite: 0,1 A/cm²
    - Abschaltung: 2,2 V
  - *Galvanostatischer Halt:*
    - Level: 1 A/cm²

        - Zeit: 1 h
        - Abschaltung: 2,2 V
    - *Halt bei niedriger Stromdichte:*
        - Level: 0,001 A/cm²
        - Zeit: 30 min

- *Materialnachbehandlung*
  Zur post-mortem Analyse wurde die Membran gewaschen, um überschüssigen Elektrolyten zu entfernen. Sofern die Analytik eine trockene Probe voraussetzt, wurde eine Trocknung durchgeführt.
    - Spülen mit DI-Wasser bei Umgebungstemperatur
    - 3x Spülen mit DI-Wasser bei 60 °C für je 20 min (4 ml pro cm² Membranfläche)
    - 1x Spülen mit DI-Wasser bei Umgebungstemperatur über Nacht (~ 16 Std., 4 ml pro cm² Membranfläche)
    - Optional: Trocknen der Membran im Ofen bei 50 °C über Nacht (~16 Std.)

Der von Evonik zur Verfügung stehende Teststand musste für das einheitliche Testkonzept mit einem neuen Heizungskonzept erweitert werden, um den kontinuierlichen Betrieb von bisher 60 °C auf 70 °C zu erhöhen.

Es wurden drei Konsortialzellen für einheitliche Elektrolyseversuche beschafft. Erste Versuche damit zeigen im Vergleich zum bisher verwendeten Zellkonzept (platinierte statt edelmetallfreie Kontaktflächen) einen leicht erhöhten, initialen Zellwiderstand (+0,7 mOhm), was zu einer leicht erhöhten Zellspannung führte. Darüber hinaus waren Funktionalität und Performance gut sowie war die Vergleichbarkeit zu Messungen mit einer internen Referenzzelle und internen Standard-Materialien hoch.

Um weitere Erfahrungen mit der Konsortialzelle zu sammeln, wurde ein erster Elektrolyseversuch mit Standard-Materialien von Evonik über 500 Betriebsstunden erfolgreich durchgeführt. Dabei fiel auf, dass eine Oxidschicht auf der Zelloberfläche der Konsortialzelle insbesondere bei Verwendung von edelstahlbasierten Transportlagen im Elektrolysebetrieb gebildet wurde. Aus der Erfahrung sollte diese Schicht vor jedem neuen Versuch aufgrund der Reproduzierbarkeit entfernt werden, da es sich um einen sonst zusätzlich undefinierten Zellwiderstand handelt, der die Zellspannung negativ beeinflussen würde. Mit der Fa. Schlötter wurde diese Thematik diskutiert und von diesem Partner wurden potenzielle Reinigungsbäder und eine Reinigungs-prozedur bereitgestellt. Für eine maximale Reproduzierbarkeit/Vergleichbarkeit wurden allerdings im Projektverlauf für die Elektrolyseversuche stets neu beschichtete Zellkomponenten der Fa. Schlötter verwendet.

Die Zunahme des Widerstands aufgrund der sich im Elektrolysebetrieb gebildeten Oxidschicht auf dem Flowfield wurde bei den durchgeführten Messreihen mitbestimmt. Beispielsweise betrug die Zunahme im Rahmen der Round-Robin-Kampagne 4 (RRC4) +33 mOhm.

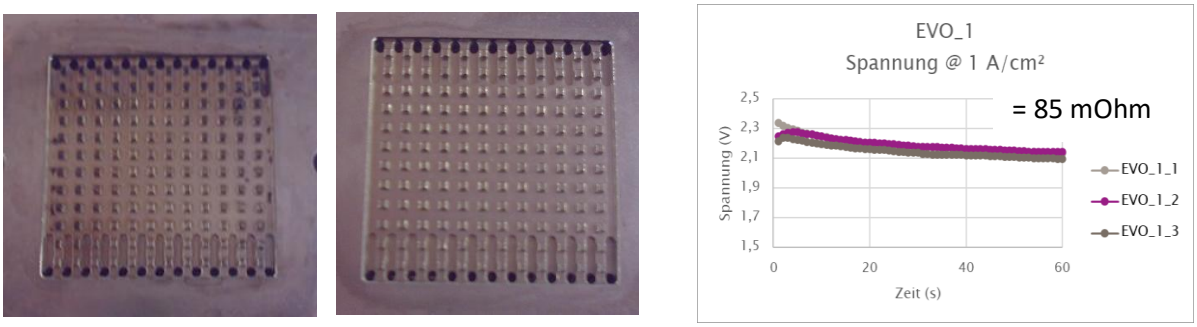

*Abbildung 11: Flowfields nach dem Elektrolyseversuch mit Verfärbungen (links) aufgrund sich bildender Oxidschichten, die einen zusätzlichen Widerstand im System bedeuten und damit die Zellspannung negativ beeinflussen. Beispielhafte Bestimmung des elektrischen Widerstands der Flowfields, indem die Zelle ohne Membran sowie Elektroden assembliert wurde – nur ein Kohlenstoffpapier trennt die Flowfields dabei im Aktiven Bereich (25 cm²) während ein konstanter Strom angelegt und die Spannung gemessen wird. Der Widerstand ergibt sich aus dem Ohm'schen-Gesetz (R=U*I).*

I.1.3 AP3.1/3.2: Elektrochemische Charakterisierung von AEM-CCM/-CCSs aus Flüssigphasen-abscheidung & Gasphasenabscheidung

Mit den Konsortialzellen und von den Partnern hergestellten katalysatorbeschichteten Membranen wurden entsprechend des gemeinsamen Testprotokolls elektrochemische Charakterisierungen durchgeführt. Die zentrale Organisation von Messkampagnen sowie das Bereitstellen von geschriebenen Messprotokollen vereinfachte die Durchführung der elektrochemischen Messungen deutlich – auch wenn dennoch gelegentlich manuelle Anpassungen aufgrund beispielsweise abweichender Versionen der Messsoftware notwendig waren. Die gewonnen Messergebnisse wurden an die Partner gesendet (Upload Datenbank).

Ein Beispiel dafür war die von der Fa. Schlötter beidseitig mit Nickel galvanisch beschichtete Membran (Anoden- und Kathodenkatalysator ist Nickel). Mit dieser CCM konnten Polarisationskurven aufgenommen werden und die CCM war elektrochemisch aktiv. Allerdings war die Performance deutlich über der Soll-Zellspannung (2,14 V vs. 2 V bei 1 A/cm²). Optisch zeigte die Katalysatorschicht der Kathode nur leichte Beschädigungen, welche möglicherweise vom Ausbau der Membran aus der Elektrolysezelle stammen. Die Katalysatorschicht auf der Anodenseite wurde einheitlich auf die kontaktierende poröse Transportlage (PTL) übertragen und es waren leichte (zu erwartende) Verfärbungen durch Oxidationsprozesse zu erkennen. Die Schicht an sich war mechanisch integer, wurde aber durch die Anodenprozesse (beispielsweise Gasbildung) von der Membran gelöst (unzureichende Haftung).

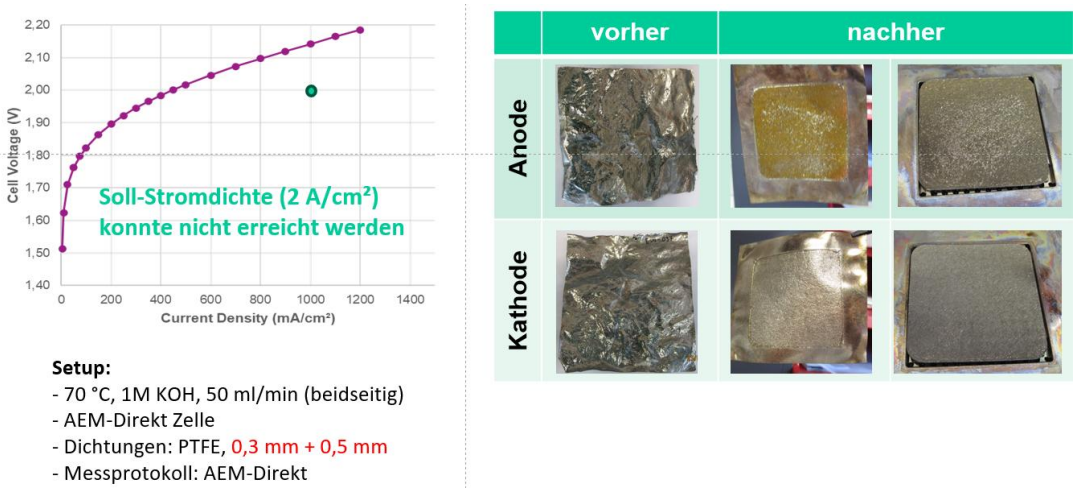

Abbildung 12: Elektrochemische Charakterisierung einer beidseitig mit Nickel beschichteten DURAION® Membran. Links: Polarisationskurve, rechts: optische Analyse nach dem Öffnen der getesteten Elektrolysezelle.

Ein weiteres Beispiel waren die elektrochemischen Charakterisierungen im Rahmen der Round-Robin Kampagne 3 (RRC3), bei der unter anderem reversible Ströme bei Abschaltvorgängen analysiert wurden – intern erfolgte dabei die Aufnahme der Daten, die dann bei den Partnern ausgewertet wurden.

Die Daten zeigten, dass die Stromabnahme bei konstanter Spannung über die Zeit (Performance-verlust, Degradation) am Anfang einer elektrochemischen Messung bei höherer Temperatur größer war: -52 mA/cm²/min vs. -30 mA/cm²/min. Zudem waren negative Ströme beim zwischen-zeitiger Spannungsreduktion insbesondere bei fortgeschrittener Versuchsdauer zu erkennen.

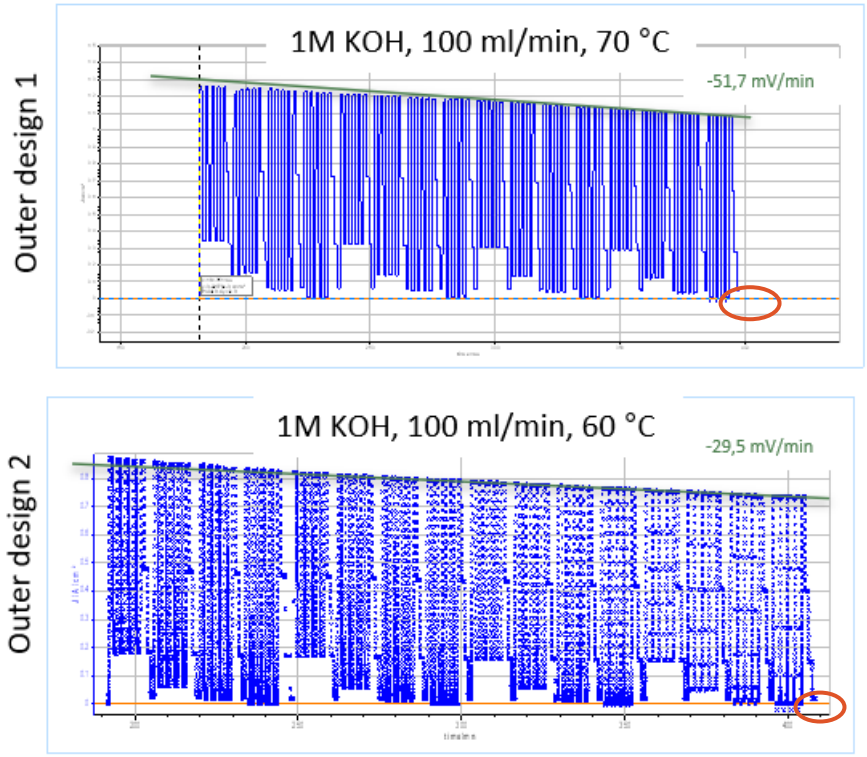

Abbildung 13: Elektrochemische Charakterisierung im Rahmen der RRC3: bei gleichem Setup fand bei höherer Temperatur ein schnellerer Performanceverlust statt und negative Ströme waren bei Reduktion der Spannung zu erkennen (Kreise).

I.1.4 AP3.3: Durchführung von Elektrolyse-Dauerversuche im Maßstab 25 cm²

Die vorhandene Messkapazität erlaubte Dauerversuche über mehrere Tage, was im Rahmen der Round-Robin Kampagne 4 (RRC4) genutzt wurde. Eine kathodenseitig mit Katalysator beschichtete verstärkte DURAION®-Membran wurde über 260 Stunden mit einem zyklischen Messprotokoll gemessen. Der Versuch zeigt die Notwendigkeit von Dauerversuchen bei der Materialcharakterisierung, da meist Konditionierungsprozesse zu Beginn von Elektrolyseversuchen mehrere hundert Stunden dauern und erst dann konstante Bedingungen vorliegen und eine relevante Alterungsrate (Degradation) bestimmt werden kann. Beim durchgeführten Versuch waren es etwa 200 Stunden, bis die Änderung der Stromdichte (beispielsweise durch Oxidations- und Katalysatorprozesse) bei gleicher Spannung konstanter wurde.

Nach Versuchsende wurden die genutzten Materialien optisch analysiert, wobei sich leichte Verfärbungen auf den Flowfields zeigten. Die zuvor auf die Membran aufgebrachte Katalysatorschicht war zum Teil noch auf der Membran und zum Teil auf der porösen Transportlage (PTL). Dies deutete auf eine starke Verbindung der Materialien durch den Anpressdruck und den Betrieb hin, die durch das Ausbauen/Separieren der Schichten mechanisch beschädigt wurden. Die verwendeten Komponenten wurden den Partnern zur post-mortem Charakterisierung gesendet sowie die aufgezeichneten Daten zur vollständigen Analyse.

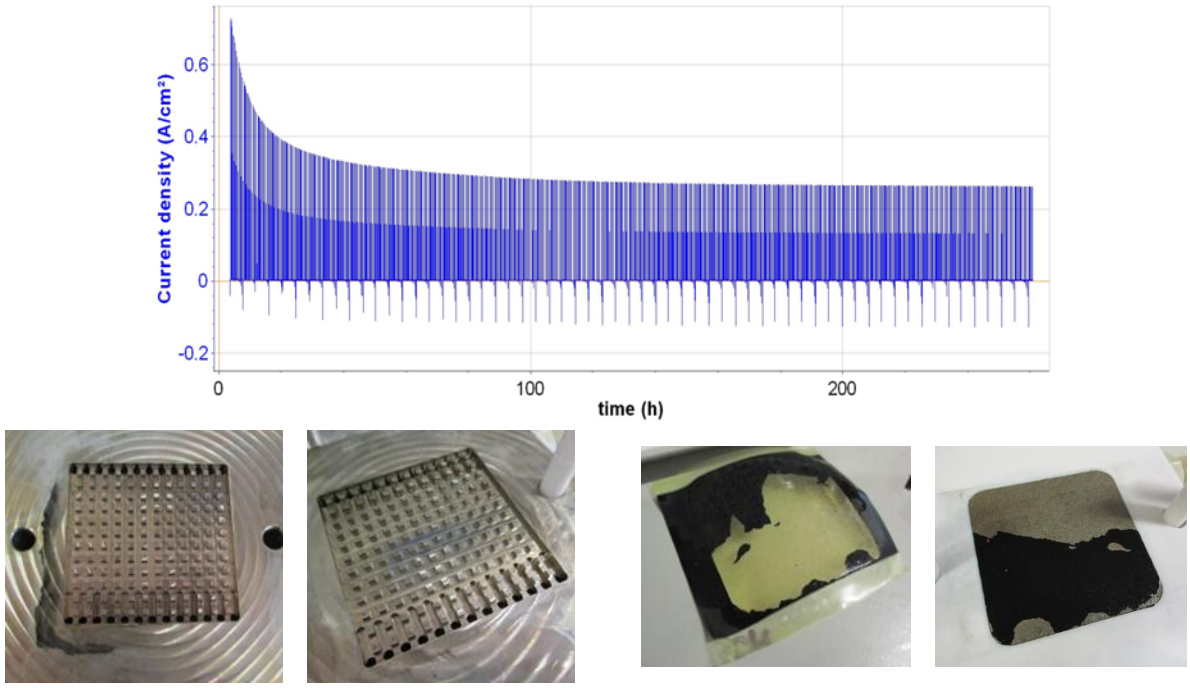

Abbildung 14: Elektrochemischer Dauerversuch im Rahmen der RRC4 mit 260 Betriebsstunden: deutlich wurde, dass ein stabiler Betrieb sich erst nach etwa 200 Stunden eingestellt hatte. Nach Ausbau der Komponenten zeigte sich eine leichte Verfärbung an den Flowfields und dass die auf die Membran aufgetragene Katalysatorschicht teilweise großflächig/zusammenhängend auf die poröse Transportlage übertragen war.

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die mit Abstand wichtigste Kostenposition waren im Projekt die Personalkosten, um die Entwicklungsarbeiten an der AEM-Technologie durchzuführen. Evonik hat über den Förderrahmen hinaus noch weitere Personalmittel in das Projekt eingebracht, um die Projektziele zu erreichen. Die zweite relevante Kostenkategorie waren Materialkosten für die Entwicklungsarbeiten im Labor. Insgesamt bewegte sich das Projekt genau in der Kosten- und Zeitplanung des Projektantrages und verdeutlicht die Notwendigkeit des Ressourceneinsatzes zum Erreichen der Projektziele.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die anionenleitfähige Membran als zentrale Komponente der AEM-Elektrolysetechnologie für den Einsatz im Gesamtvorhaben AEM-Direkt bereitzustellen. Die Membran muss hohe Anforderungen hinsichtlich Ionenleitfähigkeit, chemischer Stabilität, mechanischer Festigkeit sowie geringer Wasserstoffpermeabilität erfüllen. Diese Eigenschaften werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Polymers bestimmt. Daher war eine gezielte Weiterentwicklung der Polymersynthese sowie der Membranherstellung zwingend erforderlich. Die Optimierung der Syntheseparameter war notwendig, um die

Molmasse reproduzierbar einzustellen und damit die funktionalen Eigenschaften der Membran gezielt zu beeinflussen. Ohne diese Arbeiten wäre weder eine stabile Materialqualität noch eine verlässliche Weiterverarbeitung im Konsortium möglich gewesen.

Mit Blick auf größere Zellformate (300 cm² bis ~5000 cm²) war zudem die Bewertung der Skalierbarkeit der Membranherstellung notwendig. Die mechanische Stabilität und das Quellverhalten gewinnen bei zunehmender Membranfläche erheblich an Bedeutung. Daher war die Untersuchung möglicher Verstärkungsstrategien, insbesondere die Integration von Stützstrukturen wie ein Kunststoffgewebe, ein wesentlicher Bestandteil des Projekts. Die Kompatibilität solcher Verstärkungen mit dem DURAION®-Polymer sowie deren Einfluss auf die Membranleistung mussten experimentell geprüft werden, da resultierenden Eigenschaften nicht theoretisch vorhersagbar waren, sowie um Risiken für zukünftige großskalige Anwendungen zu minimieren.

Der Umfang der Arbeiten war angemessen, da er direkt aus den funktionalen Anforderungen der AEM-Technologie und den Zielen des Gesamtvorhabens abgeleitet war. Die experimentellen Untersuchungen waren erforderlich, um Materialqualität, Reproduzierbarkeit und Skalierbarkeit sicherzustellen und dem Konsortium Membranen und Ionomere in der notwendigen Qualität und Menge bereitzustellen. Der Ressourceneinsatz entsprach dem vorgesehenen Rahmen und war notwendig, um belastbare, statistisch relevante und technologisch verwertbare Ergebnisse zu erzielen.

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

Die im Projekt erzielten Ergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur wirtschaftlichen und wissenschaftlich-technischen Weiterentwicklung der DURAION®-Plattform. Durch die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse zur Skalierung der Polymersynthese und Membran-herstellung wurden zentrale Voraussetzungen geschaffen, um die Technologie nach Projektende in Richtung industrieller Maßstäbe weiterzuentwickeln. Die erarbeiteten Prozessdaten und Optimierungen helfen, die DURAION®-Plattform innerhalb von vier bis fünf Jahren nach Abschluss des Vorhabens im Wachstumskern „Membranen“ von Evonik zu etablieren und damit neue Marktsegmente zu erschließen sowie bestehende Geschäftsbereiche zu stärken.

Wissenschaftlich hat das Projekt zu einer deutlichen Erweiterung des Know-hows im Bereich anionenleitfähiger Polymere geführt. Die enge Zusammenarbeit der Konsortialpartner ermöglichte einen intensiven Wissensaustausch, der unmittelbar zur Kompetenzvertiefung beitrug. Evonik war aufgrund der zentralen Rolle der DURAION®-Polymere in nahezu alle wissenschaftlichen Fragestellungen eingebunden und konnte seine Expertise in Synthese, Charakterisierung und Membranverarbeitung weiter ausbauen. Parallel wurden bestehende

Methoden hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Verlässlichkeit und Skalierbarkeit optimiert und neue Analyseansätze entwickelt.

Die Ergebnisse weisen zudem eine klare Anschlussfähigkeit auf. Bereits während der Projektlaufzeit wurde die Vorbereitung eines potentiellen Folgevorhabens (AEM-Demo) initiiert und den Langzeitbetrieb eines großskaligen AEM-Elektrolyseurs adressiert. Die im aktuellen Projekt hergestellten verstärkten Membranen sollen dabei direkt in die Stack-Assemblierung einfließen, was die technische Reife und Relevanz der erzielten Resultate unterstreicht.

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

Im Förderzeitraum 2023–2026 war ein hinsichtlich der Membranverstärkung deutlicher Fokus auf die gezielte Strukturierung und Vernetzung von anionenleitfähigen Membranen erkennbar, um gleichzeitig eine erhöhte mechanische Festigkeit, eine reduzierte Quellung und eine reduzierte Wasserstoffpermeabilität zu erreichen, ohne dabei die Leitfähigkeit zu kompromittieren.

Ein zentraler Entwicklungsstrang zur Membranverstärkung ist die Quervernetzung. Durch kovalente Vernetzung entlang der Polymerketten werden höhere Elastizitätsmodule und eine verbesserte Dimensionsstabilität erzielt, während die Ionenleitfähigkeit über optimierte Seitengruppen erhalten bleibt. Ein Beispiel dazu wurde von Xu et al. in 2024 veröffentlicht [1]. Makromolekular vernetzte Poly (aryl piperidinium)-basierte Membranen zeigen eine 50% geringere Wasseraufnahme, eine um Faktor 4 reduzierte Quellung sowie eine um Faktor 2 erhöhte ionische Leitfähigkeit.

Parallel dazu wird Backbone-Engineering eingesetzt, um die Steifigkeit und die chemische Stabilität der anionenleitfähigen Membranen zu erhöhen. Ein Beispiel dazu wurde von Song et al. in 2026 veröffentlicht [2]. So wurde ein stark konjugiertes aromatisches Rückgrat in eine Poly (aryl piperidinium)-basierte Membran eingeführt. Dies führte zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit um Faktor 2 sowie einer leichten Erhöhung der ionischen Leitfähigkeit.

Ein weiterer Ansatz ist die Einführung verzweigter und mikroporöser Strukturen, um ein feinporiges Netzwerk mit kontrollierter Wasseraufnahme zu erzeugen. Ein Beispiel dazu wurde von Zhang et al. in 2024 veröffentlicht [3]. So wurden stark verzweigte Segmente in eine Poly (aryl piperidinium)-basierte Membran eingeführt. Dies führte zu um Faktor 2 reduzierten Quellung und Wasseraufnahme sowie um Faktor 2 erhöhten ionischen Leitfähigkeit.

Ein alternativer Ansatz ist die Erzeugung einer Block-verzweigter Struktur durch Kombination von harten (mechanisch tragende) und weichen (ionenleitende) Blöcken. Ein Beispiel dazu wurde von Li et al. in 2026 veröffentlicht [4]. So wurde eine Block-verzweigte Poly (aryl piperidinium)-basierte Membran hergestellt. Die Block-verzweigte Architektur führte zu der um Faktor 2 reduzierten Quellung und um Faktor 2 erhöhten ionischen Leitfähigkeit.

Alternativ zur chemischen Modifikation des anionenleitfähigen Polymers können Eigenschaften wie Festigkeit, Quellung und Wasserstoffpermeabilität einer anionenleitfähigen Membran weiter durch die Einarbeitung einer Stützstruktur gezielt optimiert werden. Dazu können ein Kunststoffgewebe (wie im Projekt von Evonik realisiert), Vlies [5] oder expandierte PE-Folie [6] oder PTFE-Folie [7] eingesetzt werden.

Literaturquellen:

[1] Xiuqin Wang, Zeyang Fang, Min Zhang, Shilei Xie, Dong Xie, Peng Liu, Shoushan Wang, Faliang Cheng, Tongwen Xu, Journal of Membrane Science, 700, 2024, 122717

[2] Ruohan Feng, Di Zhang, Chuan Hu, Fang Song, Journal of Energy Chemistry, 2026

[3] Shuai Zhang, Xiaofeng Li, Yanqin Yang, Jingde Li, Jifu Zheng, Suobo Zhang, Journal of Membrane Science, 698, 2024, 122587

[4] Yixin Wang, Tiegen Guo, Erqiang Yang, Ruofei Gao, Bin Hu, Junfen Li, Jiandang Xue, Nanwen Li, Journal of Membrane Science, 748, 2026, 125346

[5] Somayyeh Rakhshani,Rodolfo Araneo,Luis Alexander Hein, Antonio Rinaldi, Alfonso Pozio, Polymers, 17(12), 2025, 1677

[6] Tae Kyung Lee, Jun Ho Park, Kwang Seop Im, Sachin K. Chitale, Sang Yong Nam, Int. Journal of hydrogen Energy, 176, 2025, 151441

[7] Zhiming Feng, Gaurav Gupta, Mohamed Mamlouk, Journal of Applied Polymer Science, 141, 19, 2024.

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

- Wilke, V., Rivera, M., Morawietz, T., Sata, N., Mues, L., Hegelheimer, M., Maljusch, A., Borowski, P., Schmid, G., Thum, C.Y., Klingenhof, M., Strasser, P., Karl, A., Basak, S., Poc, J.-P., Eichel, R.-A., Gago, A.S. and Friedrich, K.A. (2025), Novel Atmospherically Plasma Sprayed Micro Porous Layer for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Operating With Supporting Electrolyte, Electrochem. Sci. Adv., 5: e202400036. https://doi.org/10.1002/elsa.202400036
- Strobl, O., Martic, N., Michaels, H., Not de Godoy, F., Wessnick, F., Lang, D., Kress, M., Maltenberger, A., Wengler-Rust, S., Luxbacher, T., Falgner, S., Borowski, P., Maljusch, A., Klinger, A., Schmid, G., Low hydrogen crossover anion-exchange membrane water electrolysis based on non-ionic binder polymers, EES Catalysis, Manuskript wurde akzeptiert