

## Degrad-EI<sup>3</sup>: Identifizierung der Degradationsmechanismen in den AEL, PEMEL und HTEL Elektrolyseuren mit Hilfe von standardisierten chemischen und elektrochemischen Testprotokollen

### Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht

---

Stand:	30.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	02.04.2026
Partnerin/Partner:	DECHEMA-Forschungsinstitut
Autorinnen/Autoren:	S. Mariappan, N. Bogolowski, D. Kniep, B. Sanchez-Batalla, M. Rudolphi, C- Weidlich, J.-F. Drillet
Fördertitel:	Zuwendung aus dem Sondervermögen Klima- und Transformationsfonds, Einzelplan 60, Kapitel 6092, Titel 68502
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY110A
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

## Teil I – Kurzbericht

### Vorwort des Verbundkoordinators

Für den H<sub>2</sub>-Hochlauf werden effiziente und stabile Elektrolysezellen mit einer Betriebsdauer von mindestens 10 Jahren benötigt. Da die Entwicklung einer neuen Elektrolysegeneration im industriellen Maßstab einigen Jahren in Anspruch nimmt, ist die Früherkennung von Degradationsmechanismen von enormer Bedeutung. Alternativ oder ergänzend zu einem sehr langwierigen Echtzeit-Test wurden im Rahmen vom Projekt **Degrad-El3** neuartige Materialien bzw. Elektrolysezellen anhand von einheitlichen Protokollen zu dem beschleunigten, chemischen und elektrochemischen Test auf Komponente-, Zell- bzw. Short-Stack-Ebene unter extremen Bedingungen und Versuchszeiten von bis zu 1000 Stunden untersucht. Diese Arbeiten wurden durch Post-Test Analysen bzw. den Einsatz von hybriden Machine-Learning-Methoden unterstützt mit dem Hauptziel, die Lebensdauer der jeweiligen Elektrolyseure abzuschätzen und idealerweise vorauszusagen.

Bedingt durch sehr lange Lieferengpässe und pandemiebedingte Ereignisse kamen es nach Projektstart vor allem bei experimentellen Tätigkeiten zu zahlreichen Verzögerungen im Zeitplan. Dennoch konnte über den ganzen Projektzeitraum eine hohe Anzahl an Experimenten an den drei Elektrolyseurtechnologien durchgeführt werden, auf die zusammenfassend im Folgenden eingegangen wird. Die detaillierten, partnerspezifischen Darstellungen der Ergebnisse sind den jeweiligen Schlussberichten zu entnehmen.

Die etablierte **AEL**-Elektrolyseurtechnologie wird bei konstanten Bedingungen bzw. niedrigen Stromdichten (<0,5 Acm<sup>-2</sup>) und atmosphärischem Druck über vielen Jahren bereits erfolgreich betrieben. Um ihre Performance zu steigern, wurden Elektroden mit neuartigen Ni-Legierung-Katalysatoren entwickelt und erfolgreich am DLR erprobt. Weiterhin stellt sich allgemein die Frage, ob ein dynamischer Betrieb wie bei der **PEMEL** prinzipiell möglich bzw. sinnvoll ist. Dort konnte der Effekt unterschiedlicher Betriebsmodi des **AEL**-Elektrolyseurs auf die Zellspannung für z.B. eine direkte Koppelung des Elektrolyseurs mit einer Windturbine ohne Zwischenspeicher gezeigt werden. Auf Komponentenebene konnten am DFI keine wesentliche Degradationsmechanismen, bis auf die Kontamination der KOH-Elektrolyten durch Fremdionen (Si, Fe, Al) aus dem VE-Wasser bzw. metallischen Komponenten, festgestellt werden.

Einen der gravierendsten Degradationsmechanismen in der **PEMEL** bei hohen Stromdichten (> 1 A cm<sup>-2</sup>) stellt der Verlust der Katalysatoraktivität für die H<sub>2</sub>-Produktion mit der Zeit dar, bedingt durch u.a. Agglomeration, Diffusion bzw. Auflösung. Sowohl auf Short-Stack-Ebene bei beschleunigten Degradationstest (AST) als auch Komponentenebenen mittels chemischen Auslagerungsversuchen konnte die Konzentration von aufgelösten anorganischen, aber auch organischen Elementen aus den Elektroden, der Ti-PTL und der Nafion-Membran wie Ir, Pt, Ti, Cl am DFI quantifiziert werden. Weiterhin konnten zum ersten Mal die sehr gute Aktivität und Langzeit-Beständigkeit einer im Vergleich zum reinen Ir-Katalysator günstigeren IrCr-Legierung im Labormaßstab demonstriert werden. Beim assoziierten Partner Freudenberg wurde ebenfalls sehr stabile und vielversprechende Ir-basierte Katalysatoren entwickelt und erfolgreich erprobt.

In der **HTEL** herrschen Temperaturen bis zu 850°C, bei der aktive und passive Materialien hohen thermischen Spannungen und H<sub>2</sub>-Diffusion ausgesetzt sind. Um die Degradationsmechanismen in der **HTEL** zu minimieren, konnte am EIFER eine positive Auswirkung des Herabsenkens der Betriebstemperatur auf die Lebensdauer des Elektrolyseurs über mehreren tausend Stunden demonstriert werden. Auf Komponentenebene wurden verschiedenen Werkstoffe für die Interkonnektoren mit H<sub>2</sub> beladen und hinsichtlich Ihres Oxidations- und Versprödungsverhaltens in H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Atmosphären am DFI untersucht. Anhand der Bruchdehnung im Zugversuch konnte der Versprödungsindex ermittelt und die damit H<sub>2</sub>-Versprödung quantifiziert werden.

Am ZBT und Fraunhofer IPA wurde auf Basis von experimentellen Messdaten fortschrittliche **Machine-Learning-Modelle** entwickelt, die in der Lage sind, das Degradationsverhalten der **PEM**- und **AEL**-Elektrolyseure mit Trainingsdaten annähernd vorherzusagen. Darüber hinaus wurde am IPA eine Simulationspipeline für die Berechnung der Veränderung der Prozesswasser-Leitfähigkeit auf molekularer Ebene mittels Quantencomputing entwickelt, um die Limitationen aktueller Methoden zu analysieren.

Für die Entwicklung der nächsten Elektrolyseurgeneration konnte im Projekt **Degrad-El3** zahlreiche, wertvolle Erkenntnisse über relevante Degradationsmechanismen in **AEL**, **PEMEL** und **HTEL**-Technologie gewonnen werden. Diese wurden in Rahmen von H<sub>2</sub>-GIGA Transfermeetings/Statuskonferenzen, nationalen und internationalen Konferenzen und wissenschaftlichen Publikationen der Öffentlichkeit bzw. potentiellen Entwicklern übermittelt.

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

Um den Wasserstoffmarkt zukünftig mit großskaligen Elektrolyseuren im GW-Bereich bedienen zu können, bedarf es weiterer Schritte in den Produktionstechnologien, neue Entwicklungen im Bereich der Membrane und Katalysatoren aber auch im Bereich der Testung und Untersuchung der Degradation der Elektrolyseure. Tests zur Alterung von Elektrolyseuren unter Standardbetriebsbedingungen sind oft langwierig und kostspielig. Auch die direkte Kopplung der verschiedenen, vorhandenen Elektrolysetechniken wie AEL und PEMEL und der neueren Technologie der HTEL an regenerative, fluktuierende Energiequellen wie die Photovoltaik und Windkraft stellt die Elektrolyseurhersteller aufgrund schwankender Betriebsbedingungen vor große Herausforderungen, da sie einen direkten Einfluss auf die Alterung der Komponenten des Stacks haben. Die PEMEL-Technologie zeichnet sich innerhalb der 3 Elektrolysetechnologien zwar durch ihre hohe Lastflexibilität, Stromdichten und den Betrieb bei hohem Wasserstoffpartialdruck aus, allerdings werden hier teure Edelmetallkatalysatoren an Anode und Kathode verwendet. Die etablierte AEL-Technologie dagegen verwendet günstigere Ni-basierte Katalysatoren, wird aber bei Normaldruck und niedrigen Stromdichten betrieben, bei der sie wiederum aber hohe Standzeiten erreicht. Die HTEL ist die Effizienteste aber auch neueste der drei Technologien. Ihr Betrieb bei hohen Temperaturen stellt die verwendeten Materialien vor große Herausforderungen, was die mechanische und thermische Belastung angeht. Veränderungen in der Betriebstemperatur bedingt durch Lastwechsel sind hier besonders fordernd für die Komponenten. Die Unterschiede in den Betriebsweisen machen es erforderlich, für jede Technologie einzeln standardisierte Protokolle für eine verkürzte Testzeit zu entwickeln, um spezifische Degradationserscheinungen zu identifizieren und quantifizieren zu können.

Die Hauptziele der Arbeiten am DFI im Rahmen des Degrad-EI<sup>3</sup> Vorhabens bestanden darin, in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und der Industrie Protokolle für die beschleunigte Alterung der drei Elektrolyseurtypen AEL, PEMEL und HTEL zu entwickeln, diese an Short-Stacks und Einzelzellen zu testen, Degradationseffekte und –Mechanismen von Komponenten anhand von chemischen und elektrochemischen Testmethoden sowie Post-Test-Analysen zu bestimmen. Hierüber sollten Prognosen für die Lebensdauer erstellt werden. Für den Aufbau eines neuen H<sub>2</sub>-Labors sollten hierfür drei neue Prüfstände angeschafft und neues H<sub>2</sub>-Labor eingerichtet werden.

## 2. Ablauf des Vorhabens

Den Beginn der Arbeiten des DFI im DegradEI<sup>3</sup>-Verbundvorhaben bildeten die Literaturrecherche sowie die Entwicklung von standardisierten Prüfbedingungen und Protokollen für die beschleunigte Alterung der drei Elektrolyseurtypen AEL, PEMEL und HTEL in Zusammenarbeit mit den Partnern und der Industrie (AP1-DFI: M1-M24). Gleichzeitig sollte ein Labor am DFI mit der entsprechenden Sicherheitstechnik und Abluft nachgerüstet werden, um in dem neuen H<sub>2</sub>-Labor Prüfstände für den Test von PEMEL-, AEL- und HTEL Short-Stacks und Einzelzellen (AP3 & 4-DFI: M13-M48 bzw. M04-M48) durchführen zu können. Anhand von chemischen Auslagerungen, den elektrochemischen Versuchen sowie der Post-Mortem Analyse der Stack-

und Zellkomponenten mittels XRD, SEM/EDX/WDX, XPS und der Korrosionsprodukte in den Elektrolyten mittels ICP-MS/OES und IC sollten Degradationsmerkmale identifiziert werden (MS5-DFI: M04 – M48).

### 3. Wesentliche Ergebnisse

- Für die drei Elektrolysetechnologien konnten bereits zu Beginn des Projekts in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Standardbedingungen für die Tests definiert sowie standardisierte Protokolle für Langzeitversuche, beschleunigte Alterungs- und Lebensdauertests entwickelt werden (siehe Tabelle 1 Ergebnisteil II). Die Protokolle orientierten sich dabei auch an den Empfehlungen der European Commission, Joint Research Centre (JRC). Die Protokolle wurden in der Praxis getestet.
- Ein neues H<sub>2</sub>-Labor mit den drei Prüfständen für die PEMEL&AEL Niedertemperatur-Elektrolyse (1 kW, Short-Stack & Einzelzelle) und HTEL Hochtemperatur-Festoxidelektrolyse (0,3 kW, nur Einzelzelle) konnte in Betrieb genommen werden. Allerdings erst mit deutlicher Verspätung gegenüber der im Antrag definierten Zeitplanung, im September 2023. Gründe hierfür waren Lieferschwierigkeiten und Probleme mit der Infrastruktur des Labors.
- Am Horiba Prüfstand für PEMEL wurden Dauertests zur beschleunigten Alterung von kommerziellen Short-Stacks der Fa. Hiat GmbH erfolgreich durchgeführt. Es wurden Degradationsraten von ca.  $360 \pm 10 \mu\text{V h}^{-1}$  im schnellen Start-/Stop-Betrieb zwischen 0,05 und 3 A cm<sup>-2</sup> (1000 h) und ca.  $210 \pm 5 \mu\text{V h}^{-1}$  im konstanten Betrieb bei 3 A cm<sup>-2</sup> (2000 h) bestimmt. Am AEL-Prüfstand der Fa. Horiba konnten bereits begonnene Arbeiten an kommerziellen 5-Zellen Short-Stacks der Fa. LightBridge leider nicht fortgeführt werden. Aufgrund von erst nach Inbetriebnahme am DFI festgestellten Materialunverträglichkeiten in der Anlage und daraus resultierenden sicherheitstechnischen Bedenken seitens des Herstellers musste der Betrieb mit konzentrierter Kalilauge bei 80°C eingestellt werden. Lediglich der Betrieb mit gering konzentrierter KOH bei 60°C bis Projektende war noch möglich. Die Baugleichen Prüfstände für AEL & PEMEL wurden zu Projektende von umfangreichen Wartungen abgeholt und werden Ende April an den neuen Standort des DFI in Bad Homburg ausgeliefert. Der Horiba HTEL-Prüfstand ist nur für den Test von Einzelzellen ausgelegt.
- Aufgrund der Verzögerungen bei der Auslieferung der Prüfstände der Fa. Horiba FuelCon wurden am DFI mehrere neue, kleinere PEMEL- und AEL-Prüfstände für 5 bzw. 25 cm<sup>2</sup> Zellen zur Erhöhung der Messkapazität aufgebaut. Diese wurden auch für die H<sub>2</sub>Giga-Weiterbildung im Praxiskurs zur Elektrolyse verwendet. An den PEMEL- & AEL-Messständen wurden an kommerziellen aber auch am DFI hergestellten MEA und Elektroden in Langzeitversuchen über 1000 h und mehr unter Bedingungen der beschleunigten Alterung entsprechend der entwickelten Protokolle erfolgreich durchgeführt und Degradationsraten für PEMEL (70-150  $\mu\text{V h}^{-1}$ ) und AEL (15-35  $\mu\text{V h}^{-1}$ ) ermittelt. Anhand dieser Ergebnisse wurde die Lebensdauer für PEMEL (1-5 kh) und AEL (14-43 kh) abgeschätzt. Für Details siehe Tabelle 2 im Ergebnisteil II des Abschlussberichts. Am AEL-Prüfstand der Fa. Horiba wurden kommerzielle AEM-MEA mit 1M KOH getestet, es wurden allerdings eine sehr hohe OCV > 1,7 V beobachtet und es konnte nur eine geringe Leistung erreicht. Für die HTEL-Technologie am

Horiba Prüfstand konnten mit Zellen der Fa. Kerafol leider keine aussagekräftigen Langzeitergebnisse erzielt werden.

- Anhand von chemischen Auslagerungen, den elektrochemischen Versuchen sowie der Post-Mortem Analyse der Stack- und Zellkomponenten mittels XRD, SEM/EDX/WDX, XPS, der H<sub>2</sub>-Versprödung von Peripherie-Bauteilen und der Korrosionsprodukte in den Elektrolyten mittels ICP-MS/OES und IC konnten Degradationsmerkmale der drei Elektrolysetechnologien identifiziert werden. Für die PEMEL waren dies z.B. ein Verlust von Edelmetall aus den Elektroden, einhergehend mit der Ablagerung von Ir- und Pt- in der Membran und auf der Kathode, die Verringerung der Membranleitfähigkeit und ein Ionomerverlust und die Auflösung/Oxidation von Ti aus der PTL/BPP identifiziert werden. Bei der AEL wurde insbesondere eine Auflösung Al & Fe im Raney-Ni festgestellt. Bei den Interkonnektor-Werkstoffen konnte in den Auslagerungsversuchen bei 700-900°C unter verschiedenen H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>-Atmosphären eine deutliche Oxidation der Oberfläche und eine Interdiffusion von Ni, Cr, Mn festgestellt werden. Die Wasserstoffversprödung an verschiedenen Materialien wurde untersucht. Es wurde ein Degradationskatalog für die PEMEL- und AEL-Technologie erstellt (Details siehe Teil II, Tabelle 10).

#### 4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Auf den Statuskonferenzen aber auch den Transfermeetings wurde sich mit den anderen Verbänden aber auch der Industrie ausgetauscht. Mit den Kollegen aus dem Verbund HTEL-Module – Ready for Gigawatt; Teilvorhaben: Hochtemperaturkorrosion wurde bzgl. des Einflusses von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe eng zusammengearbeitet. Ebenso kam es hierüber zu einem Austausch mit der Fa. Sunfire per Videokonferenz zum Thema Hochtemperaturkorrosion. Über die Projektpartner des DLR wurde der Kontakt zu Fa. Adele vermittelt, über die Elektroden für Versuche bezogen werden konnten. In einer Videokonferenz am 08.06.2022 wurde sich mit Frau Prof. Mechler von der RWTH und anderen Mitarbeitern im Prometheus-Projekt bezüglich der Degradationsprotokolle ausgetauscht. In einer weiteren Webkonferenz am 11.04.2025 fand mit der Fa. Sunfire ein Austausch zum Thema Testmöglichkeiten und Degradationsmessungen für die alkalische Elektrolyse statt.