

Ilmenau, 25. März 2026

**Verbundvorhaben: H₂Giga – StacIE (Stack Scale-up –
Industrialisierung PEM-Elektrolyse);
Teilvorhaben: Galvanische Beschichtung und elektrochemische
Charakterisierung von Stackkomponenten für die PEM-Elektrolyse**

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht

Stand:	25.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	25.03.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik
Autorinnen/Autoren:	Dr. Mario Kurniawan, Dr. Martin Leimbach, Prof. Dr. Andreas Bund
Fördertitel:	H ₂ Giga – Verbundprojekt NG2 „StacIE“– Industrialisierung PEM-Elektrolyse
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY103E
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

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

Ziel des Teilvorhabens war die Erforschung kostengünstiger und zugleich hochstabiler Beschichtungslösungen für Bipolarplatten (BPP) und poröse Transportschichten (PTL) für PEM-Elektrolyseure. Insbesondere anoden-seitige Komponenten sind im Betrieb stark sauren Medien und hohen anodischen Potenzialen ausgesetzt, wodurch preiswerte Grundmaterialien wie Stahl ohne geeignete Schutzschichten nicht dauerhaft beständig sind. Stand der Technik sind titanbasierte Komponenten oder titan-/edelmetallbasierte Schichtsysteme, die häufig mittels vergleichsweise kostenintensiver Abscheidungsverfahren hergestellt werden. Vor diesem Hintergrund wurde im Teilvorhaben untersucht, ob galvanische und gut skalierbare Beschichtungsprozesse als kostengünstigere Alternative geeignet sind, um Korrosionsstabilität und elektrische Kontaktierung im Stackbetrieb sicherzustellen.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben folgte einem iterativen Ansatz aus Prozesserforschung, ex-situ Screening und operando Validierung. Hierzu wurde ein modularer Mehrzellen-Teststand (5-Zellen-Stack, „Rainbow-Stack“) aufgebaut, um Komponenten parallel unter identischen Randbedingungen prüfen zu können. Parallel wurden galvanische Prozessketten erforscht (Vorbehandlung → Abscheidung → Stabilisierung) und geeignete Kandidaten über standardisierte ex-situ Untersuchungen priorisiert. Die vielversprechendsten Varianten wurden anschließend im Mehrzellen-Teststand unter dynamischen Prüfprotokollen operando bewertet und in Optimierungsschleifen weiterentwickelt.

Für die Umsetzung und Vergleichbarkeit der operando Validierung wurden von den Projektpartnern bereitgestellte Materialien und Komponenten gezielt in die Prozess- und Testkette integriert: BPPs, und katalysatorbeschichtete Membranen (CCM) wurden von Schaeffler AG bereitgestellt und für Beschichtungsversuche sowie Stacktests eingesetzt. Fumatech stellte Membranmaterial als Grundlage für CCM-Aufbauten bereit. Zusätzlich wurden beschichtete BPP-Varianten vom Institut für Oberflächentechnik (IOT, RWTH Aachen) für Vergleichsmessungen im Mehrzellen-Teststand zur Verfügung gestellt. Die PTL-Varianten wurden im Teilvorhaben überwiegend eigenständig hergestellt bzw. beschichtet (Schaeffler und IOT). Ergänzende Analytik und ausgewählte Untersuchungen wurden mit Unterstützung des Partners HI ERN durchgeführt.

Der Mehrzellen-Teststand und die eingesetzte Messtechnik wurden für Stromdichten bis 6 A/cm² ausgelegt. Die im Projekt durchgeführten operando Vergleichsmessungen wurden im relevanten Betriebsfenster bis 4 A/cm² realisiert und für Benchmarking und Variantenselektion genutzt.

3. Wesentliche Ergebnisse

- Aufbau und Inbetriebnahme eines operando fähigen Mehrzellen-Teststands aus fünf Zellen mit umfangreicher Sensorik und Mehrkanal-Diagnostik zur parallelen Einzelzellbewertung und zur Vergleichbarkeit von Varianten.
- Erforschung reproduzierbarer galvanischer Prozessketten für BPP-Beschichtungen, einschließlich der Identifikation kritischer Einflussfaktoren auf die Stabilität (insbesondere Defekte, Kantenbereiche sowie Grenzflächen/Interlayer) im Stackbetrieb.
- Erforschung und Optimierung galvanischer Pt-Beschichtungen auf Ti-basierten PTLs mit dem Ziel der Edelmetallreduktion bei gleichzeitig stabiler Kontaktierung; dabei wurde die Homogenität der Beschichtung in porösen Strukturen als entscheidend herausgearbeitet.
- Umfangreiche operando Validierung im Mehrzellen-Teststand mit mehr als 25 Vergleichstests (Laufzeit jeweils mehrere Wochen) und mehr als 120 getesteten Komponentenvarianten, wodurch belastbare Aussagen zur Stabilität, Variantenpriorisierung und Übertragbarkeit für die Hochskalierung abgeleitet werden konnten.

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Die Arbeiten wurden in enger Kooperation innerhalb des StacIE-Verbunds durchgeführt, insbesondere zur Bereitstellung und zum Austausch von Komponentenvarianten sowie zur Abstimmung von Prüf- und Vergleichskriterien und operando Testprotokollen. Die ex-situ Charakterisierungsmethodik und die Screening-/Bewertungskriterien wurden gemeinsam mit den Verbundpartnern (u. a. Schaeffler, IOT und HI-ERN) abgestimmt, um eine konsistente und belastbare Vorauswahl geeigneter Schichtsysteme zu ermöglichen.

Darüber hinaus erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit Schaeffler und IOT entlang der Prozess- und Testkette: Schaeffler stellte wesentliche Komponentenvarianten (u. a. BPPs, PTLs und CCMs) für Entwicklungs- und Vergleichstests bereit. IOT stellte beschichtete BPP-Varianten sowie PTL-Entwicklungen für Vergleichsuntersuchungen zur Verfügung; ausgewählte von IOT entwickelte PTL-Varianten wurden im Mehrzellen-Teststand operando charakterisiert. So konnten Varianten aus unterschiedlichen Herstellungsrouten unter identischen Randbedingungen direkt vergleichend bewertet und die Ergebnisse für die Optimierung der Prozessketten zurückgekoppelt werden.

Ilmenau, 25. März 2026

**Verbundvorhaben: H₂Giga – StacIE (Stack Scale-up –
Industrialisierung PEM-Elektrolyse);
Teilvorhaben: Galvanische Beschichtung und elektrochemische
Charakterisierung von Stackkomponenten für die PEM-Elektrolyse**

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

Stand:	25.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	25.03.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik
Autorinnen/Autoren:	Dr. Mario Kurniawan, Dr. Martin Leimbach, Prof. Dr. Andreas Bund
Fördertitel:	H ₂ Giga – Verbundprojekt NG2 „StacIE“ – Industrialisierung PEM-Elektrolyse
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY103E
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 II. Eingehende Darstellung

1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Ausgangslage, Zielsetzung und Abgleich mit der Vorhabenbeschreibung

Das Teilvorhaben wurde im Rahmen der H2Giga-Initiative durchgeführt und zielte auf die Erforschung kosteneffizienter und langlebiger Stack-Komponenten für PEM-Elektrolyseure ab. Schwerpunkt war die Oberflächenfunktionalisierung mit galvanischen Beschichtungen für anoden-seitige Komponenten unter stark sauren Betriebsbedingungen bei hohen anodischen Potentialen.

Folgende zentrale wissenschaftlich-technische Ziele wurden definiert:

- Bipolarplatten: Einsatz von Edelstahl als kostengünstiges Substrat durch Aufbringung geeigneter Schutzschichten.
- Poröse Transportschichten: Reduktion des Edelmetalleinsatzes bei gleichzeitig stabiler Kontaktierung und geringer Passivierungsneigung.
- Prozessketten: Erforschung skalierbarer, industriekompatibler Prozessfolgen (Vorbehandlung → Beschichtung → Stabilisierung).
- Qualifizierung: Validierung durch standardisierte ex-situ Prüfungen sowie operando-Tests unter realitätsnahen Belastungen.

Im Projektverlauf erfolgte die Umsetzung grundsätzlich entlang des Arbeitsplans; notwendige Anpassungen betrafen vor allem die zeitliche Einplanung von Aufbau- und Validierungsaufwänden des Mehrzellen-Teststandes sowie den iterativen Charakter der operando-Vergleiche (Wiederholungsmessungen, Priorisierung von Probenvarianten, Abstimmung der Testmatrix). Diese Anpassungen änderten den Kern der Aufgabenstellung nicht, sondern dienten der robusten Nachweisführung und der Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

1.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse entlang der Arbeitspakete

Die folgenden Abschnitte sind entlang der Arbeitspakete (AP) strukturiert. Jedes AP enthält (i) Ziel, (ii) Vorgehen/Umsetzung, (iii) Ergebnisse/Erkenntnisse, (iv) Ausblick/Nächste Schritte.

AP 2.8.4.1: Aufbau eines Mehrzellen-Teststandes (5-Zellen-Stack) zur operando Charakterisierung

Zur operando Qualifizierung beschichteter Komponenten wurde ein Teststand aus fünf Zellen („Rainbow-Stack“) aufgebaut und in Betrieb genommen. Ziel war es, unterschiedliche Varianten unter identischen Randbedingungen parallel zu testen und Degradationsmechanismen über Einzelzellspannungen sowie impedanzbasierte Kenngrößen wie den Hochfrequenzwiderstand (high frequency resistance, HFR) zu bewerten. Das Prozess- und Messkonzept des Prüfstands ist in Abb. 1 dargestellt; Abb. 2 zeigt die konfigurierbaren Varianten, und Abb. 3 dokumentiert den Aufbau der Zelle und des 5-Zellen-Stacks.

Ziel: Aufbau und Inbetriebnahme eines Mehrzellen-Prüfstands zur materialseitigen Bewertung beschichteter BPP und PTL unter realitätsnahen Bedingungen (Temperaturführung, Sensorik, Einzelzellüberwachung, HFR-Auswertung).

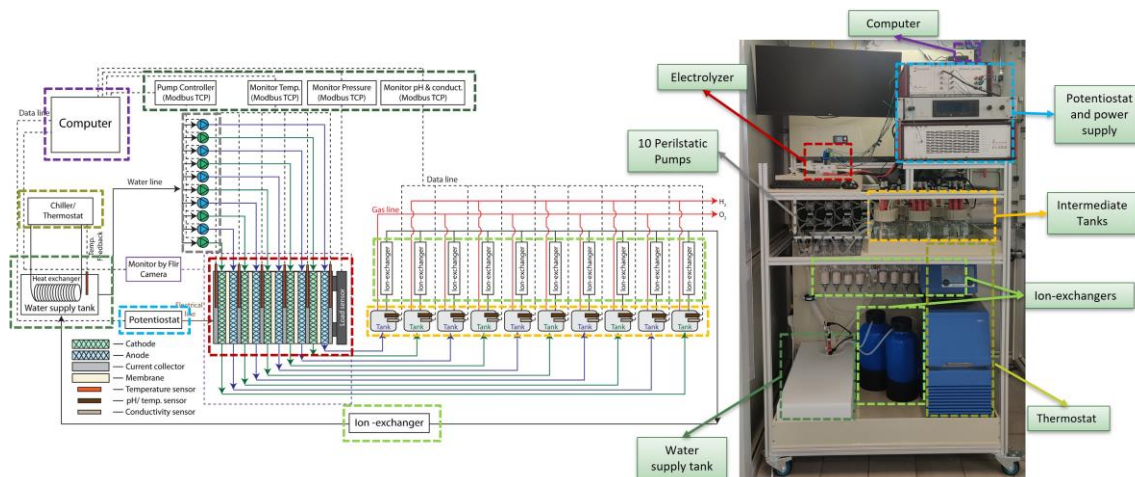



Abb. 1: Links: Schematische Darstellung des Prüfstands einschließlich aller Sensoren und Aktoren; rechts: Fotografie des Prüfstands.


Vorgehen/Umsetzung:

- Konzeption und Aufbau einer modularen 5-Zellen-Prüfumgebung einschließlich Medienführung, Temperaturregelung und Einzelzellüberwachung (Abb. 1-3).
- Integration einer umfangreichen Sensorik (u. a. Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Durchfluss) zur Stabilisierung der Betriebsbedingungen und zur Degradationsdiagnostik (Abb. 2).
- Implementierung einer parallelen elektrochemischen Charakterisierung zur zeitaufgelösten Bewertung von Kontakt- und ohmschen Widerständen sowie zur Vergleichbarkeit zwischen Zellen.
- Aufbau einer Datenerfassung/Überwachung zur strukturierten Messdatenspeicherung und Testprotokollierung.


Cell 1	Ti BPP	Ti mesh ID131 External coating	Pt coated Ti-felt -ID100 (t=0.25mm)	241106 60um CCM1	Carbon felt (t=0.25mm)	SS mesh ID-137 (t=1.5 mm)	Stainless-steel 1.4404 (t=0.5mm)
Cell 2	EC-350	Ti mesh ID131 External coating	Pt coated Ti-felt -ID100 (t=0.25mm)	241106 60um CCM2	Carbon felt (t=0.25mm)	SS mesh ID-137 (t=1.5 mm)	Stainless-steel 1.4404 (t=0.5mm)
Cell 3	EC-350	Ti mesh ID131 External coating	Pt coated Ti-felt -ID100 (t=0.25mm)	241106 60um CCM3	Carbon felt (t=0.25mm)	SS mesh ID-137 (t=1.5 mm)	Stainless-steel 1.4404 (t=0.5mm)
Cell 4	Ti BPP	Ti Mesh ID 131 + Int.coating PTL 042-6	Ti Felt ID 69 + coating EC-333 PTL 041-2.3	241106 60um CCM4	Carbon felt (t=0.25mm)	SS mesh ID-137 (t=1.5 mm)	Stainless-steel 1.4404 (t=0.5mm)
Cell 5	Ti BPP	Ti mesh ID131 External coating	Ti Felt ID 118 + coating EC-333 PTL 035_3	241106 60um CCM5	Carbon felt (t=0.25mm)	SS mesh ID-137 (t=1.5 mm)	Stainless-steel 1.4404 (t=0.5mm)




PTL2
Ext. coated




PTL2
Int. coated



PTL1



CCM



PTL1



PTL2

Abb. 2: Übersicht der Material- und Komponentenvarianten, die im Prüfstand (Abb. 1) konfiguriert und getestet wurden.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Der Mehrzellen-Teststand wurde für vergleichende Untersuchungen von Komponentenvarianten nutzbar gemacht.
- Es konnte ein dynamischer Degradations-/Korrosionstest unter definierten Randbedingungen implementiert werden.
- Die Möglichkeit der simultanen Impedanz-Messung für alle Zellen erwies sich als wesentlich für die schnelle Identifikation kontaktwiderstandsgetriebener Alterungseffekte.

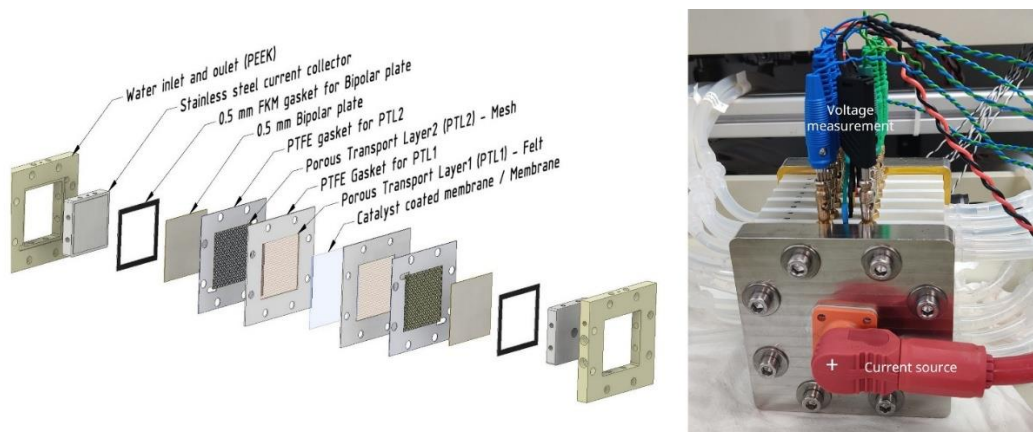


Abb. 3: Links: Schematische Darstellung einer Einzelzelle mit Stromkollektor, BPPs, PTLs und CCM; rechts: Fotografie des vollständig assemblierten 5-Zellen-Stacks

Nächste Schritte:

- Weiterführung der operando Testreihen, wobei die nächsten Schritte auf der Verbesserung der Systemautomatisierung sowie der Etablierung robuster Bewertungskriterien lagen.

AP 2.8.4.2: Galvanische Beschichtung von Bipolarplatten (BPP)

In diesem Arbeitspaket wurde eine galvanische Prozesskette zur Beschichtung von BPP erforscht, um Edelstahl als kostengünstiges Substrat unter PEM-Bedingungen nutzbar zu machen. Die Vorgehensweise basiert auf Vorbehandlung, Haft-/Strike-Schicht, Funktionsschicht und Stabilisierung; die wesentlichen Prozessschritte sind in Abb. 4 schematisch dargestellt. Im Ergebnis konnte ein reproduzierbares Prozessfenster für edelmetallfreie Schutzschichten erarbeitet werden, wobei Grenzflächen und Defekte als zentrale Stabilitätstreiber identifiziert wurden.

Ziel: Entwicklung galvanischer Schichtsysteme zur Korrosions- und Kontaktstabilisierung von BPP, insbesondere zur Nutzung von Edelstahl als kostengünstigem Substrat.

Vorgehen/Umsetzung:

- Aufbau einer stabilen Prozessablauf aus Vorbehandlung (Entfettung/Aktivierung), Haftvermittlungs-/Strike -Schicht und funktionaler Deckschicht (Abb. 4).
- Untersuchung und Optimierung von Ni-basierten Legierungssystemen als edelmetallfreie Schutzschichten.
- Entwicklung von Nachbehandlungs-/Stabilisierungsstrategien zur gezielten Bildung schützender, leitfähiger Oberflächenzustände (z. B. kontrollierte Oxidation durch Wärmebehandlung).
- Herstellung von Referenzsystemen (Edelmetall-basiert) zur Einordnung der erreichbaren Stabilität und als Benchmark im operando Vergleich.

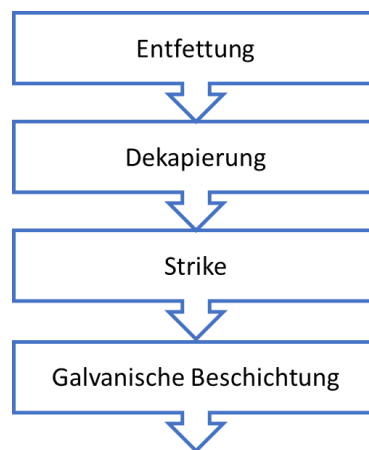


Abb. 4: Schematische Darstellung der Vorbehandlung und elektrochemischen Aktivierung des Edelstahlsubstrats für den galvanischen Beschichtungsprozess

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Es wurde ein reproduzierbares Prozessfenster für edelmetallfreie Legierungsschichten etabliert, das sowohl Korrosionsschutz als auch elektrische Funktion adressiert.
- Wärmebehandelte galvanische Schichten zeigten im Screening eine deutlich verbesserte Beständigkeit gegenüber unbehandelten Varianten; zugleich wurde die Prozesskette als grundsätzlich skalierbar eingeschätzt (Vorbehandlung → Abscheidung → Stabilisierung).
- Als kritischer Faktor für die Gesamtstabilität wurde die Grenzfläche zur Haft-/Strike-Schicht identifiziert: Lokale Defekte (Poren, Kanten, Montagebeschädigungen) können zur lokalen

Freilegung und damit zur Initiierung von Auflösungs Vorgängen führen, auch wenn die Funktionsschicht selbst weitgehend stabil bleibt. Daraus wurden konkrete Optimierungsrichtungen (Defektminimierung, Kantenabdeckung, Montage-/Handlingkonzept) abgeleitet.

Nächste Schritte:

- Weitere Reduktion von Defekten durch Parametervariation (Stromdichteführung, Elektrolytführung, Schichtspannung), verbesserte Kanten-/Randabdeckung sowie optimierte thermische Stabilisierung (Ramp-Rates, Haltezeiten).

AP 2.8.4.3: Ex-situ Charakterisierung der BPP-Schichten

Zur Identifikation geeigneter Schutzschichten für die BPP wurden ex-situ Prüfmethode genutzt, um Beschichtungen unter betriebsrelevanter Beanspruchung vergleichbar zu bewerten. Der Prüfaufbau und die Prüfprozedur sind in Abb. 5 dargestellt, ein ausgewähltes Ergebnis zur Vorvernickelung (Ni-Strike) in Abb. 6. Die ex-situ Daten dienen als Grundlage für die Priorisierung der Varianten für operando Tests sowie für die Ableitung von Optimierungsstrategien.

Ziel: Standardisierte Bewertung der chemischen und elektrochemischen Stabilität galvanischer Schichten unter betriebsrelevanten Bedingungen als effizientes Screening vor operando Tests.

Vorgehen/Umsetzung:

- Erforschung und technische Umsetzung eines ex-situ Prüffahrplans (Abb. 5) mit:
 - Polarisationsmessungen (z. B. LSV),
 - Potentiostatischen Halteversuchen (Chronoamperometrie) zur beschleunigten Degradation,
 - Impedanzspektroskopie (EIS) zur Erfassung von Änderungen in Grenzflächen-/Schichtwiderständen,
 - ergänzender Schichtcharakterisierung (z. B. Schichtdicke, Morphologie).
- Wiederholte Messzyklen zur Abgrenzung transienter Konditionierungseffekte von echter Degradation.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Das ex-situ Screening erlaubte eine strukturierte Eingrenzung des großen Parameterfelds: mehrere Ni-basierte Schichten zeigten unter anodischer Beanspruchung instabiles Verhalten (z. B. Auflösung oder Rissbildung), während stabilisierte Systeme eine deutlich robustere Performance zeigten.
- Die EIS-basierte Bewertung erwies sich als geeignet, frühe Passivierungs- bzw. Kontaktwiderstandsänderungen sichtbar zu machen und damit Kandidaten für operando Tests zu priorisieren.

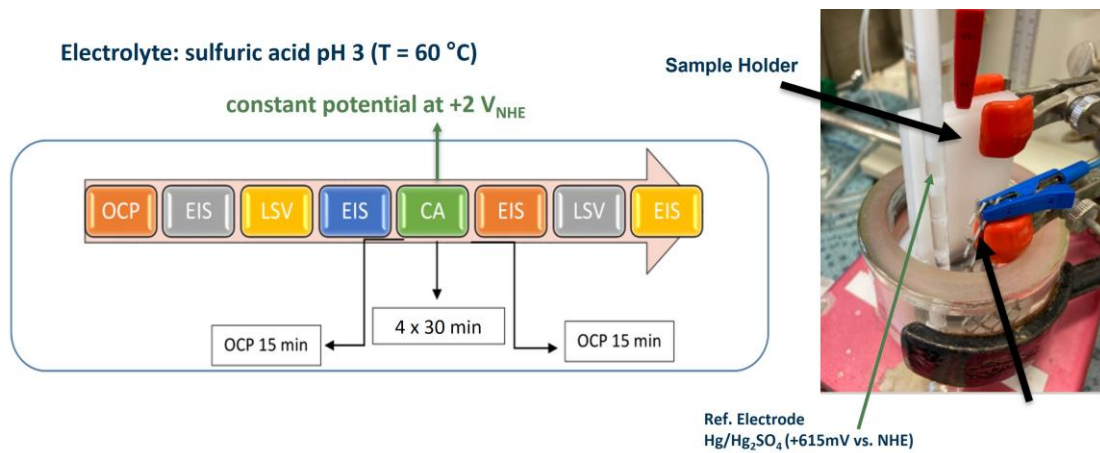


Abb. 5: Ex-situ Prüfaufbau und Prüfprozedur zur Untersuchung der chemischen Stabilität und des Degradationsverhaltens von Beschichtungen unter betriebsrelevanten Bedingungen

Nächste Schritte:

- Koordination der ex-situ Prüfkriterien mit operando Abnahmekriterien (z. B. zulässige Widerstandsänderung, definierte Stabilitätsindikatoren), um Transferfähigkeit und Vergleichbarkeit weiter zu erhöhen.



Abb. 6: Einfluss eines Nickel-Strikes auf die Beständigkeit galvanischer Schichten unter anodischen Belastungen, wie sie bei der PEM-Elektrolyse auftreten. Links Ni-Strike-Abscheidung mit nicht-optimierten Prozessparametern; rechts Ni-Strike-Abscheidung mit optimierten Parametern.

AP 2.8.4.4: Charakterisierung ausgewählter BPP im Teststand (operando)

Die operando Bewertung im Mehrzellen-Stack wurde eingesetzt, um ex-situ Befunde unter realistischen kombinierten Belastungen zu verifizieren. Das dynamische Prüfprotokoll ist in Abb. 7 dargestellt; die Auswertung von Zellkennlinien sowie HFR/Spannung über die Zeit ist in Abb. 8–10 dokumentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Montage-, Grenzflächen- und Defekteffekte im Stackbetrieb eine zentrale Rolle spielen und ex-situ nur begrenzt abgebildet werden.

Ziel: Bewertung der Stabilität ausgewählter Beschichtungssysteme im Mehrzellen-Stack unter kombinierten mechanischen, elektrochemischen und thermischen Belastungen.

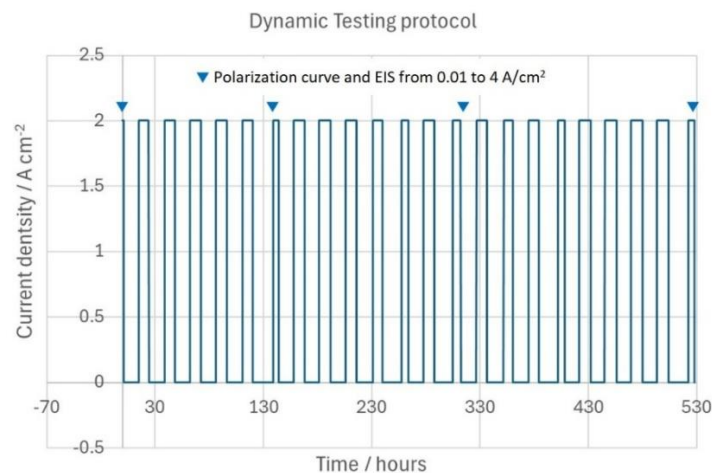


Abb. 7: Visualisierung des dynamischen Prüfprotokolls zur beschleunigten Alterung; Markierungen kennzeichnen Polarisationsmessungen einschließlich EIS-Analyse

Vorgehen/Umsetzung:

- Umsetzung eines dynamischen Belastungsprotokolls (Abb. 7) zur Beschleunigung von Alterung und zur Annäherung an reale Betriebsprofile (Ein-/Aus-Zyklen, definierte Stromdichten, wiederholte Kennlinien- und EIS-Messungen).
- Kontinuierliche Erfassung von Einzelzellspannungen und HFR als unmittelbare Indikatoren für Degradation und Kontaktstabilität
- Post-Test-Bewertung zur Trennung von Schichtdegradation, Grenzflächenproblemen und montageinduzierten Effekten.

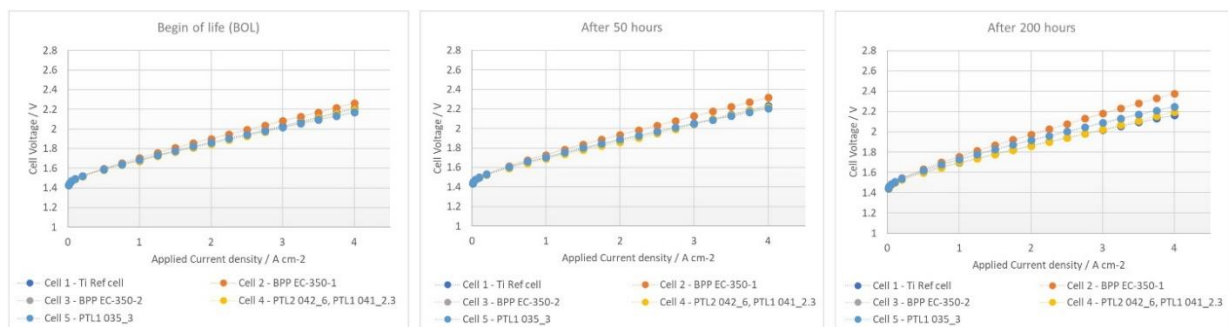


Abb. 8: Polarisationskurven des 5-Zellen-Stacks bei 0 h (BOL), 50 h und 200 h. Die verwendeten Komponenten wurden von Projektpartnern bereitgestellt.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Der Operando Vergleich bestätigte, dass die Bewertung im Stack entscheidend ist, da zusätzliche Effekte (Montagekompression, lokale Defekte, Rand-/Kantenbeanspruchung, dynamische Betriebsführung) ex-situ nur begrenzt abgebildet werden.
- Für edelmetallfreie BPP-Konzepte zeigte sich, dass die Funktionsschicht bei geeigneter Stabilisierung grundsätzlich belastbar sein kann; dominierende Schwachstellen lagen häufig in lokal freiliegenden Grenzflächen bzw. in mechanisch induzierten Defekten.

- Referenzsysteme ermöglichten eine klare Einordnung hinsichtlich erreichbarer Stabilität und Kontaktwiderstand.

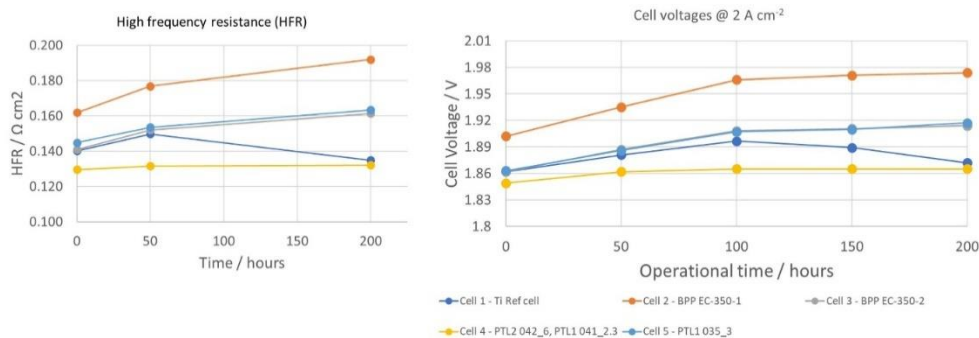


Abb. 9: Hochfrequenzwiderstand (HFR) und Zellspannung bei 2 A cm⁻² als Funktion der Betriebszeit.

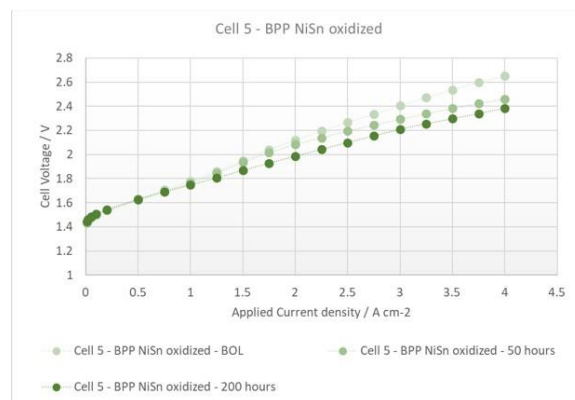


Abb. 10: Operando Polarisationsverhalten einer geeignet vorbehandelten Beschichtung auf einer Bipolarplatte aus Edelstahl im dynamischen 200-h-Prüfprotokoll.

Nächste Schritte:

- Standardisierung von Handling- und Montageparametern (Drehmomente/Kompression, Schutz gegen Kantenbeschädigung) sowie weitere Prozessoptimierung zur Defektreduktion.

AP 3.4.2.1: Herstellung und Beschichtung von PTLs

Beschichtete PTLs wurden erforscht, um unter realitätsnahen Betriebsbedingungen eine stabile elektrische Kontaktierung sicherzustellen und gleichzeitig den Edelmetalleinsatz zu reduzieren. Die Abscheidung auf porösen Strukturen wurde daher so ausgelegt, dass auch bei reduzierter Schichtdicke eine ausreichende Bedeckung erreicht wird. Die Elektrolytzusammensetzung zeigte einen deutlichen Einfluss auf die Schichtausbildung (Abb. 11). Diese Erkenntnisse dienten als Grundlage für eine kontrollierte Reduktion der Pt-Schichtdicke.

Ziel: Entwicklung/Optimierung beschichteter PTLs zur Stabilisierung des elektrischen Kontakts und zur Verringerung passivierungsbedingter Widerstandsanstiege bei minimalem Edelmetalleinsatz.

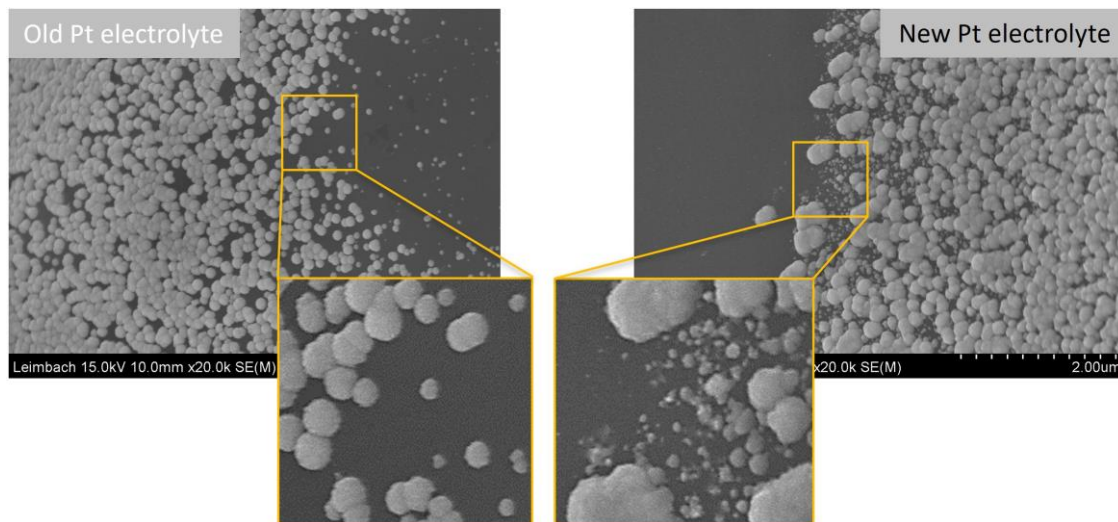


Abb. 11: REM-Aufnahmen von Pt-Schichten aus zwei verschiedenen Elektrolyten; der neue Pt-Elektrolyt(rechts) führt zu kleineren Keimen und damit zu homogeneren und gleichmäßigeren Beschichtungen in der Fläche. Hier sind die Randbereiche dargestellt, um den Einfluss der Elektrolytzusammensetzung auf die Korngröße zu verdeutlichen.

Vorgehen/Umsetzung:

- Erforschung der galvanischen Abscheidung auf porösen Strukturen unter Berücksichtigung der 3D-Porosität (Vermeidung von Porenverblockung, ausreichende Bedeckung).
- Systematische Variation von Vorbehandlungen (fluoridhaltig sowie fluoridfreie saure Varianten) zur Aktivierung der Titanoberfläche.
- Erforschung und Optimierung eines Platin-Elektrolyten zur Verbesserung von Haftung und Homogenität auf Titan-Filzen; Untersuchung von Konzepten mit/ohne Interlayer (Abb. 11).
- Zielgerichtete Reduktion der Pt-Schichtdicke bei gleichbleibender Funktion (Edelmetallreduktion).

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Es konnte eine Pt-Beschichtung auf Titan-PTLs mit hoher Homogenität und guter Haftung umgesetzt werden.
- Der Edelmetalleinsatz wurde durch Reduktion der Pt-Schichtdicke (z. B. von höherer Ausgangsdicke auf deutlich reduzierte Schichtdicken) verringert, ohne dass im Screening eine Stabilitätseinbuße beobachtet wurde.
- Fluoridfreie saure Vorbehandlungen zeigten Potenzial als umweltfreundlichere Alternativen, erforderten jedoch eine enge Prozessführung zur Reproduzierbarkeit.

Nächste Schritte:

- Weiterer Fokus auf minimale Pt-Beladung bei robuster Bedeckung in der Tiefe der Porenstruktur sowie Abgleich der ex-situ Resultate mit operando Kontaktwiderstandsverläufen.

AP 3.4.2.2: Ex-situ Charakterisierung von PTLs

Die ex-situ Charakterisierung diente der Bewertung von Schichtqualität, Haftung und Stabilität als Grundlage für die Auswahl geeigneter Varianten für die operando Experimente. Abb. 12 dokumentiert den Einfluss unterschiedlicher Vorbehandlungsrouten auf die Schichtausbildung sowie die Ergebnisse der Stabilitätsbewertung. Damit wurde eine reproduzierbare Prozessroute für die weitere Qualifizierung abgeleitet.

Ziel: Bewertung der Stabilität und Beschichtungsqualität von PTLs mittels elektrochemischer und bildgebender Methoden.

Vorgehen/Umsetzung:

- Bestimmung von Schichtdicken und Bedeckungsgraden, Haftungs-/Morphologieanalysen und elektrochemische Stabilitätstests unter sauren Bedingungen (Abb. 13).
- Vergleich unterschiedlicher Vorbehandlungs- und Abscheiderouten zur Auswahl von Kandidaten für operando Tests.

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Der Einsatz eines optimierten Pt-Elektrolyten verbesserte Haftung und chemische Stabilität; gleichzeitig konnten geeignete Prozessfenster für reduzierte Schichtdicken identifiziert werden.

Nächste Schritte:

- Überführung der besten Varianten in systematische operando Testreihen zur Langzeitvalidierung.

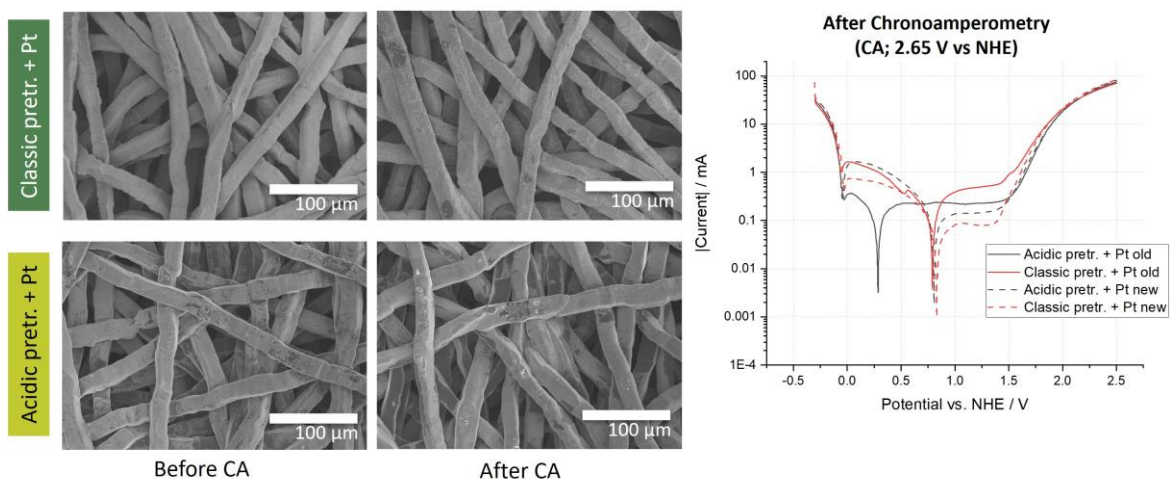


Abb. 12: Links: REM-Aufnahmen galvanischer Pt-Beschichtungen auf Ti-PTLs nach klassischer und saurer Vorbehandlung; rechts: Korrosionsanalyse (Tafel-Auswertung aus LSV) nach Langzeitstabilitätstest bei 2,65 V vs. NHE mit neuem Pt-Elektrolyten.

AP 3.4.2.3: Charakterisierung ausgewählter PTLs im Teststand (operando)

Die operando Untersuchungen dienen der Langzeitbewertung beschichteter PTLs hinsichtlich Kontaktstabilität, Performance und Degradationsverhalten. Abb. 13 zeigt die operando Auswertung exemplarisch anhand von Polarisationskurven sowie dem Verlauf von

Zellspannung und HFR. Die Ergebnisse unterstützen die Aussage, dass geeignete Beschichtungen die Kontaktstabilität im Stackbetrieb verbessern können.

Ziel: Langzeitnahe Bewertung beschichteter PTLs im Stack, insbesondere hinsichtlich Kontaktstabilität (HFR), Performance und Degradationsverhalten.

Vorgehen/Umsetzung:

- Operando Langzeittests beschichteter PTL-Varianten in Kombination mit definierten BPP-Konfigurationen.
- Auswertung von Zellspannung und HFR über die Testdauer zur Identifikation von passivierungsgetriebenen Widerstandszunahmen und Kontaktinstabilitäten.

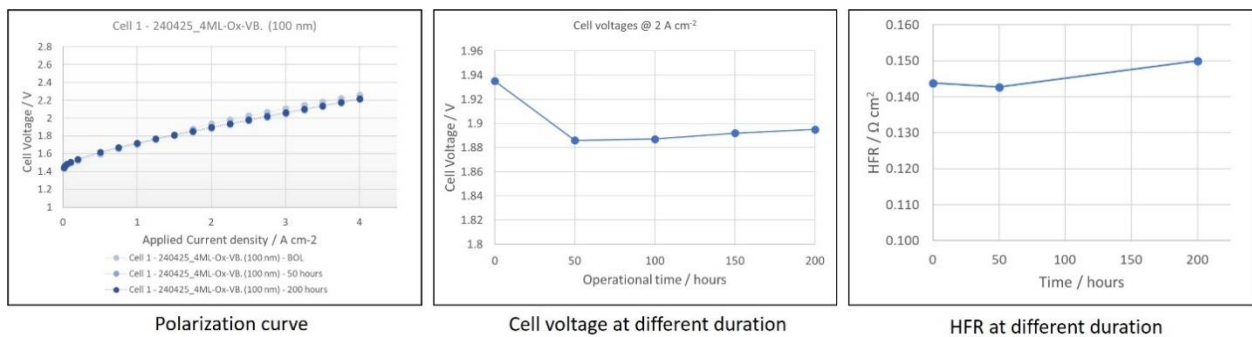


Abb. 13: Operando Bewertung einer Pt-beschichteten Ti-Filz-PTL im Teststack: links Polarisationskurven (BOL, 50 h, 200 h), Mitte Zellspannung bei 2 A cm⁻² über die Betriebszeit, rechts HFR über die Betriebszeit

Ergebnisse/Erkenntnisse:

- Beschichtete PTLs zeigten im operando Betrieb eine Stabilisierung des Kontaktverhaltens; reduzierte Edelmetallvarianten konnten grundsätzlich betrieben und verglichen werden.
- Die Kombination aus operando Monitoring und ex-situ Screening erwies sich als geeignetes Vorgehen, um Prozess- und Materialvarianten iterativ zu optimieren.

Nächste Schritte:

- Erweiterte Langzeitvalidierung (über die initialen dynamischen Testfenster hinaus) sowie Überführung der Ergebnisse in Empfehlungen zur Skalierung (Prozessfenster, Qualitätsmerkmale, Prüfkriterien).

1.3 Darstellung der Meilensteinerfüllung

Tabellarische Übersicht:

Nr.	Bereich	Meilenstein (Kriterium)	Status	Ergebnis/Nachweis
1	Stack	Erste funktionstüchtige Zelle inkl. Sensorik	erreicht	Messbetrieb/Validierung
2	BPP	Auswahl geeigneter Beschichtungen	erreicht	Screening und Auswahl

Nr.	Bereich	Meilenstein (Kriterium)	Status	Ergebnis/Nachweis
3	Stack	5-Zellen-Stack einsatzbereit	erreicht	Operando Betrieb
4	PTL	Basisdesign hergestellt/charakterisiert	erreicht	Designentscheidung und Tests
5	BPP	Optimierte BPP-Beschichtungen charakterisiert	erreicht	Ex-situ/operando Nachweise
6	PTL	Optimierte PTL-Beschichtungen (z. B. reduzierte Schicht)	erreicht	Ex-situ/operando Nachweise
7	BPP/Stack	Degradations-/Performance-Test für Upscaling-Parameter abgeschlossen	erreicht	Testserie und Auswertung
8	PTL/Stack	Degradations-/Performance-Test für Upscaling-Parameter abgeschlossen	erreicht	Testserie und Auswertung

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.1 Teststände und Aufbau Mehrzellen-Teststand („Rainbow-Stack“)

Mehrzellen-Teststand (5-Zellen-Stack) inkl. Medienführung, Sensorik, Aktorik und Datenerfassung:

- Der Aufbau des Mehrzellen-Teststands war essenziell, um die im Vorhaben vorgesehene operando Qualifizierung unter praxisnahen Betriebsbedingungen umzusetzen. Dazu zählen insbesondere definierte Temperaturführung, definierte Stromdichten, kontinuierliche Einzelzell-Spannungsüberwachung, ein stabil geregeltes Wasser-/Durchflusssystem, Wasseraufbereitung/-filtration mit Erfassung ausgetragener Spezies für post-mortem Analysen, dynamische Betriebsprofile (Zyklusbetrieb) sowie mechanische Belastungen infolge der Stack-Montage (Kompression). Ohne diese Infrastruktur wäre die Übertragbarkeit von ex-situ Ergebnissen in den Stackbetrieb nicht ausreichend nachvollziehbar belegbar.

Inhaltliche Zuordnung wesentlicher Aufwands-/Beschaffungspositionen:

- Stack-Hardware und mechanischer Aufbau (Mehrzellen-Stack, Zellkomponenten, Dicht- und Verbindungstechnik, Stromkollektor-/Kontaktierungskonzept):
Erforderlich für reproduzierbaren Aufbau und Betrieb sowie für den direkten Vergleich von Komponentenvarianten unter identischen Randbedingungen (Geometrie, Kontaktflächen, Montagebedingungen).
- Medienversorgung und Kreislaufsystem (Versorgungs-/Zwischentanks, Pumpentechnik, Leitungen/Armaturen, ggf. Wasser-Gas-Abscheidung):
Erforderlich zur Bereitstellung stabiler Betriebsbedingungen (Durchflussrate und

Wasserqualität) und zur Minimierung peripheriebedingter Streuungen, sodass Änderungen von Zellspannung und Widerständen belastbar den geprüften Komponenten zugeordnet werden können.

- Wasserqualitäts- und Freisetzungsmonitoring (z. B. pH- und Leitfähigkeitsüberwachung, Inline-Ionenaustausch zur Sammlung ausgetragener Spezies):
Erforderlich zur Überwachung der Medienqualität im Langzeitbetrieb und zur Identifikation ausgetragener Ionen/Materialanteile als Degradationsindikatoren. Dies unterstützt die Interpretation von Korrosions- und Grenzflächenmechanismen und deren Korrelation mit elektrischen Diagnosedaten (z. B. HFR-Trends).
- Temperierung/Thermomanagement (Thermostat, Wärmetauscher, Temperatursensorik):
Erforderlich zur reproduzierbaren Einstellung und Stabilisierung definierter Betriebstemperaturen (auch während dynamischer Prüfprotokolle), da Korrosionsverhalten, Passivierung und Kontaktwiderstand stark temperaturabhängig sind.
- Automatisierung/Regelung und Dateninfrastruktur (Steuer-/Regelkonzept, Messdatenlogging, strukturierte Datenspeicherung):
Erforderlich für stabilen Langzeitbetrieb, protokolltreue Durchführung der Prüfsequenzen, sicherheitsrelevante Systemrückmeldungen sowie die nachvollziehbare Speicherung und Auswertung umfangreicher Mehrzellen-Datensätze (Einzelzellspannungen, Sensordaten, EIS/HFR-Diagnostik).

Beitrag zur Zielerreichung:

- Der Mehrzellen-Teststand war das zentrale Werkzeug, um eine hohe Anzahl an Varianten unter identischen Bedingungen zu vergleichen und belastbare Aussagen zur Stabilität, zu Grenzflächenmechanismen sowie zur Übertragbarkeit der Prozessketten in Richtung Upscaling abzuleiten.

2.2 Elektrochemische Mess- und Diagnosetechnik

Zur eindeutigen Bewertung von Degradationsmechanismen wurde eine diagnosetaugliche elektrochemische Messtechnik benötigt. Die Mehrkanalfähigkeit war zentral, um Parallelvergleiche im Mehrzellenbetrieb effizient und unter vergleichbaren Randbedingungen durchführen zu können.

- Mehrkanal-EIS-fähige Messtechnik und zugehörige Peripherie:
- Erforderlich zur Mehrkanal-Diagnostik im 5-Zellen-Betrieb (u. a. Spannungserfassung und impedanzbasierte Auswertung mittels EIS).
- Ermöglichte frühzeitiges Erkennen kontakt- und passivierungsgetriebener Veränderungen sowie die Quantifizierung widerstandsbezogener Alterungseffekte über die Zeit.

2.3 Mess- und Regeltechnik (Sensoren, Pumpen, Temperierung)

Die Stabilität der Betriebsbedingungen ist Voraussetzung für aussagekräftige Langzeitmessungen. Kontinuierliches Messen und Regeln reduziert Streuungen, erhöht die Reproduzierbarkeit und erleichtert die Plausibilisierung der Daten.

- pH-/Leitfähigkeits-/Temperatur-/Durchfluss-Messtechnik sowie Pumpen- und Regelungskomponenten:
- Notwendig zur Stabilisierung der Betriebsbedingungen in Langzeitmessungen und zur frühzeitigen Erkennung von Abweichungen (z. B. Durchflussänderungen oder Drift der Wasserqualität).
- Vermeidet Fehlinterpretationen des Komponentenverhaltens durch peripheriebedingte Störeinflüsse.

2.4 Materialien und Verbrauchsmittel für Beschichtung und Analytik

Die Erforschung der galvanischen Schichtsysteme erfolgte iterativ und erforderte die wiederholte Herstellung vergleichbarer Mustersätze sowie die begleitende Charakterisierung. Entsprechend waren Materialien, Chemikalien und Verbrauchsmittel notwendig, um reproduzierbare Prozessfenster und stabile Schichtzustände zu erarbeiten.

- Elektrolyte/Chemikalien, Vorbehandlungsmittel, Substrate/Proben, Verbrauchsmaterialien:
- Notwendig für Vorbehandlung, Abscheidung und Nachbehandlung/Stabilisierung sowie für die wiederholte Mustersatzherstellung.
- Erforderlich für begleitende Charakterisierung zur Bewertung von Schichtqualität, Reproduzierbarkeit und Stabilitätsverhalten und zur Überführung ex-situ Erkenntnisse in operando Tests.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Zuwendung war notwendig, da die Entwicklung galvanischer Schutzschichten für PEM-Elektrolyse-Komponenten mit operando Validierung einen hohen Infrastruktur-, Personal- und Materialaufwand erfordert, der aus der Grundausstattung einer Universität in der Regel nicht abgedeckt werden kann.

Die Arbeiten waren angemessen, da die Projektlogik eine iterative Abfolge aus (i) Prozessentwicklung, (ii) ex-situ Screening, (iii) operando Validierung, (iv) Ursachenanalyse und (v) erneuter Optimierung erforderte. Insbesondere die Mehrzellen-Charakterisierung ist aufwändig, jedoch für belastbare Aussagen zur Langzeitstabilität und zur industriellen Übertragbarkeit zwingend erforderlich. Der Mitteleinsatz diente damit unmittelbar der Zielerreichung (Kostenreduktion durch Substratwahl/Edelmetallreduktion bei gleichzeitiger Stabilität).

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

Die Ergebnisse liefern wertvolle Beiträge zur Senkung von Material- und Herstellungskosten von PEM-Elektrolysekomponenten, indem galvanische Prozessketten für Schutzschichten etabliert und unter operando Bedingungen bewertet wurden. Der Nutzen ergibt sich sowohl aus

den technischen Erkenntnissen (Stabilität/Mechanismen) als auch aus der Ableitung skalierbarer Prozessketten.

4.1 Technischer Nutzen

- Nachweis, dass galvanisch erzeugte Beschichtungen – bei geeigneter Vorbehandlung und Stabilisierung – das Potenzial haben, die hohen Anforderungen in PEM-Elektrolyseuren zu adressieren.
 - Etablierung einer skalierbaren Prozesskette für ausgewählte BPP-Beschichtungen (inkl. Erkenntnissen zu kritischen Grenzflächen/Defektmechanismen).
 - Reduktionsansätze für Pt-Beschichtungen auf PTLs bei gleichzeitig stabiler Kontaktierung und operando Bewertbarkeit.
 - Umfangreiche operando Validierung im Mehrzellen-Teststand: über 25 Vergleichstests mit mehr als 120 getesteten Komponenten (BPP- und PTL-Varianten) zur robusten Ableitung von Stabilitätsaussagen, Prozessfenstern und Transferfähigkeit.
-

4.2 Wirtschaftlicher/industrieller Nutzen

- Perspektive zur Kostensenkung durch Einsatz von Edelstahlsubstraten (BPP) und reduziertem Edelmetalleinsatz (PTL), sofern die identifizierten Grenzflächen-/Defektmechanismen Prozess- und Montage-seitig beherrscht werden.
 - Industriekompatibilität durch Nutzung etablierter Galvanik- und Wärmebehandlungsprozesse sowie definierbarer Qualitätsmerkmale (Schichtdicke, Homogenität, Defektdichte, Kontaktwiderstand).
 - Die parallele Mehrzellenprüfung unterstützt eine effiziente Variantenbewertung und beschleunigt Optimierungs- und Auswahlzyklen für eine industrielle Umsetzung.
-

4.3 Konkrete Planungen für die nähere Zukunft

- Weiterführung der Langzeitvalidierung mit Fokus auf reproduzierbare Montage-/Handlingbedingungen und standardisierte Abnahmekriterien.
 - Nutzung der Ergebnisse als Grundlage für Anschlussvorhaben und Transfer in industrielle Prozessketten.
-

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

Während der Projektlaufzeit wurden einschlägige Veröffentlichungen und industrielle Entwicklungen im Umfeld der PEM-Elektrolyse fortlaufend verfolgt. Insgesamt bestätigten externe Entwicklungen, dass Kostenreduktion und Dauerhaftigkeit weiterhin maßgeblich durch Verbesserungen auf der Anodenseite bestimmt werden, insbesondere bei Bipolarplatten (BPP) und porösen Transportschichten (PTL). Parallel dazu ist die Reduktion kritischer Materialeinsätze – vor allem von Edelmetallen in Beschichtungen und der Katalysatorschicht – ein zentrales Thema.

Wesentliche beobachtete Trends:

- Starker Fokus auf Kostenreduktion und Langzeitstabilität anoden-seitiger Komponenten (BPP, PTL) bei niedrigen pH-Werten und hohen anodischen Potentialen.
- Breiter Konsens, dass Kontaktwiderstände und deren Anstieg über die Zeit zentrale Performance- und Degradationsindikatoren sind (Passivierung, Grenzflächenstabilität).
- Zunehmende Bedeutung von Defekt- und Kantenkorrosion sowie Montage-/Handling-Einflüssen als häufige Ursachen lokaler Schädigung.
- Weiterentwicklungen zur Reduktion des Edelmetalleinsatzes in Beschichtungen (z. B. dünnere Pt-Schichten bzw. alternative Schichtkonzepte) bei gleichzeitiger Kontaktstabilität.
- Hohe Relevanz der Reduktion der Katalysatorbeladung (insbesondere auf der Anode) als zusätzlicher, stark verfolgter Hebel zur Kostensenkung.
- Zunehmender Einsatz von operando-/Mehrzellen-Validierung zur Qualifizierung, da ex-situ Tests allein das Stack-Verhalten nicht ausreichend abbilden.
- Verstärkte Bemühungen um standardisierte Testprotokolle und Benchmark-Kriterien, um Vergleichbarkeit zu verbessern und die Variantenselektion zu beschleunigen.

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
20.06.2022	Poster (international)	Stability of protective coatings for stainless steel components in PEM electrolyzers (ISE Topical Meeting, Stockholm)	M. Leimbach, M. Kurniawan, C. Zimmermann, C. Höß, M. Fritz, A. Bund	
14-16.09.2022	Konferenzbeitrag (national)	Untersuchung der Stabilität galvanischer Beschichtungen für Komponenten von PEM-Elektrolyseuren (ZVO-Oberflächentage, Leipzig)	C. Zimmermann, M. Leimbach, M. Kurniawan, C. Höß, M. Fritz, A. Bund	
9-13.10.2022	Konferenzbeitrag (international)	StacIE Project – Characterization of Protective Coatings on Stainless Steel Bipolar Plates for PEM Electrolyzers (242nd ECS Meeting, Atlanta)	M. Leimbach, M. Kurniawan, C. Zimmermann, C. Höß, M. Fritz, A. Bund	
03.2023	Publikation (national)	Abscheidung und Passivierung von Zinn-Nickel-Schichten als Korrosionsschutz für Bipolarplatten in PEM-Elektrolyseuren (ZVO report, Asugabe 03/2023)	C. Aziz, M. Leimbach, A. Bund	ZVO report
06.09. 2023	Poster (international)	Development of tin-nickel coatings for PEM electrolyzer components and operando stability analysis in a test stack (ISE Meeting, Lyon)	M. Kurniawan, M. Leimbach, C. Aziz, C. Höß, M. Fritz, A. Bund	
13-15. 09. 2023	Konferenzbeitrag (national)	Tin-nickel as a corrosion protection for components of PEM Electrolyzers (ZVO Oberflächentage, Berlin)	C. Aziz, M. Leimbach, M. Kurniawan, M. Fritz, A. Bund	
8-12. 10. 2023	Poster (international)	Electrochemical Preparation and Characterization of Gold Coatings on Stainless Steel	C. Höß, M. Leimbach, M.	

		Bipolar Plates for Corrosion Protection in PEM Electrolyzers (244th ECS Meeting, Gothenburg)	Kurniawan, M. Fritz, A. Bund	
8-12. 10. 2023	Konferenzbeitrag (international)	Preparation and Characterization of Tin-Nickel Coatings for Corrosion Protection of PEM Electrolyzer Components (244th ECS Meeting, Gothenburg)	M. Leimbach, M. Kurniawan, C. Aziz, C. Höß, M. Fritz, A. Bund	
11-13. 09.2024	Konferenzbeitrag (national)	Elektrochemische Beschichtung und operando-Untersuchung von Komponenten für PEM-Elektrolyseure (ZVO-Oberflächentage, Leipzig)	M. Leimbach, M. Kurniawan, M. Fritz, A. Bund	
06-11.10.2024	Konferenzbeitrag (international)	Electrodeposition and Characterization of Platinum Coatings on Titanium Porous Transport Layers for PEM Electrolyzers (ECS PRiME, Honolulu)	M. Leimbach, M. Kurniawan, M. Fritz, A. Bund	
11.2025	Publikation (national)	Bewertung des Betriebsverhaltens von Komponenten für Elektrolyseure mit automatisiertem flexiblem Messstand (ZVO report 5/2025)	M. Kurniawan, A. Bund	ZVO report
11.2025	Publikation (international)	Dynamic Testing of Cold Gas Sprayed BPP-PTL Coating System in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis (Peer-review journal, Advanced engineering materials, submitted)	K. Bobzin, M. Erck, K. Jasutyn, K. Radermacher, A. Bund, M. Kurniawan	