

## Sachbericht Teil I - Kurzbericht

ZE: Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Werkstofftechnik		Förderkennzeichen: 03B11022H
Vorhabensbezeichnung:	Verbundvorhaben NIP II: „HZwo:SuSyMobil - Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen“	
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 – 31.05.2025	
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 31.12.2025	

Im Teilprojekt wurden **das elektrochemische Korrosionsverhalten** sowie die **wasserstoffinduzierte Sprödbrech-anfälligkeit** der Aluminiumlegierung für die Brennstoffzellen-Endplatten untersucht. Ziel war die Analyse und Bewertung des Langzeit-Korrosionsverhaltens der Aluminiumlegierung in Kontakt mit den in der Brennstoffzelle geführten und als korrosionsfördernd bewerteten Medien. Eine elektrochemische Korrosionsreaktion wurde zum einen für das Kühlmedium der Brennstoffzelle, Glysantin, und zum anderen mit dem für die anodische Halbzellenreaktion zugeführten Wasserstoff erwartet. Zudem sollten Korrosionsschutzmaßnahmen durch Applikation eines Nickelüberzuges sowie einer **ELOXAL-Beschichtung** bewertet werden. Der aufgetragene Korrosionsschutz sollte zeigen, ob ein Korrosionsangriff durch die oben genannten Medien effektiv vermindert werden kann. Im Laufe der experimentellen Untersuchungen zeigte die ELOXAL-Beschichtung die beste Korrosionsschutzwirkung und wurde als finales Oberflächenfinish gewählt.

Weiterhin wurden die experimentellen Untersuchungen parallel durch **FEM-Simulationsstudien** unterstützt. Die experimentell bestimmten Korrosionskenngrößen wurden für die Prognose des Langzeit-Degradationsverhaltens und zur endkonturnahen Geometrieoptimierung korrosionsgefährdeter Bereiche genutzt.

Zu Beginn des Vorhabens wurden acht Aluminiumlegierungen vom Projektpartner Handtmann Leichtmetallgießerei Annaberg GmbH bereitgestellt, von denen nach Durchführung vergleichender Korrosionsuntersuchungen die geeignetste für die Fertigung der Endplatten gewählt wurde. Die Bewertung der Korrosionsanfälligkeit der Aluminiumlegierung gegenüber dem Kühlmedium erfolgte bei Raumtemperatur sowie bei der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle von 80 °C. Die Wasserstoff-Sprödbrechanfälligkeit wurde elektrochemisch mit einer Permeations-Messzelle sowie in einem Hochdruck-Reaktor untersucht.

Von der final ausgewählten Aluminiumlegierung wurden im ersten Schritt vom unbeschichteten sowie vom ELOXAL-beschichteten Oberflächenzustand elektrochemische Polarisationskurven bei 25 °C und 80 °C aufgenommen. Die Kennlinien wurden anschließend für die simulative Bewertung des Kontaktbereiches Endplatte/Kühlmittel-Medienanschluss verwendet, was eine anwendungsnahe Extrapolation des Langzeitkorrosionsverhaltens erlaubte. Abbildung 1 zeigt die Abhängigkeit des Polarisationsverhaltens in Kontakt mit dem Kühlmedium von der Temperatur und dem Oberflächenzustand unbeschichtet/ELOXAL-beschichtet (Abb. 1a) und die daraus entwickelte FEM-Parameterstudie. Basierend auf dem von den Projektpartnern erstellten CAD-Modell (Abb. 1b) ist exemplarisch in Abb. 1c der berechnete Korrosionsabtrag nach einem Jahr in Kontakt mit dem Kühlmedium für den unbeschichteten Kontaktbereich bei 25 °C gezeigt. Pfeile in Abb. 1c kennzeichnen die am stärksten korrosionsgefährdeten Spalt- und Kantenbereiche.

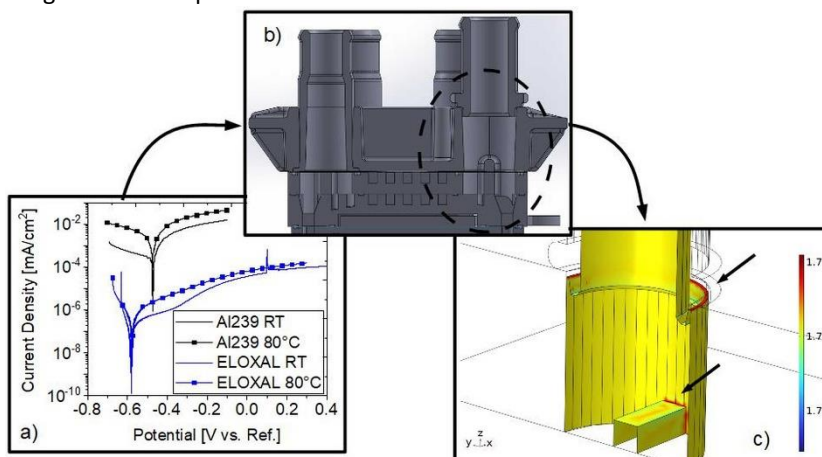


Abb. 1: a) Stromdichte-Potential-Kurven der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Aluminiumlegierung Al239 in Glysantin bei 25 °C und 80 °C. b) Schnitt durch das CAD-Modell für die Simulationsstudien. c) FEM-Simulation an der Kontaktstelle Medienanschluss/unbeschichtete Endplatte nach einem Jahr in Kontakt mit dem Kühlmedium Glysantin bei 25 °C. Pfeile siehe Text.

Für die Auslegung einer korrosionsschutz-optimierten Kontaktstelle Medienanschluss/Endplatte wurde im **Ergebnis** die Variante **eingegossener Medienanschluss + ELOXAL-Beschichtung** empfohlen. Durch diese Fertigungsweise wird die Ausbildung konstruktionsbedingter gefährdeter Korrosionsbereiche deutlich reduziert.

Die experimentellen Untersuchungen zur **Bewertung der Wasserstoffsprödruchanfälligkeit** zeigten eine hohe Sperrwirkung des natürlich gebildeten Passivoxides gegenüber einer Wasserstoff-Permeation auf, sodass die Versuchszeiten der Permeationstests deutlich verlängert werden mussten. Abbildung 2a und 2b zeigen Teilabschnitte der von den Projektpartnern gelieferten Endplatte mit Medienanschluss ohne (Abb. 2a) und mit ELOXAL-Beschichtung (Abb. 2b). Die Permeationsversuche am anwendungsrelevanten Bauteil (Endplatte + Medienanschluss) wurden mit einer **Devanathan-Stachurski-Zelle** sowie einem im Projekt beschafften **Hochdruckreaktor** bei erhöhten Temperaturen durchgeführt (Abb. 2c und d).

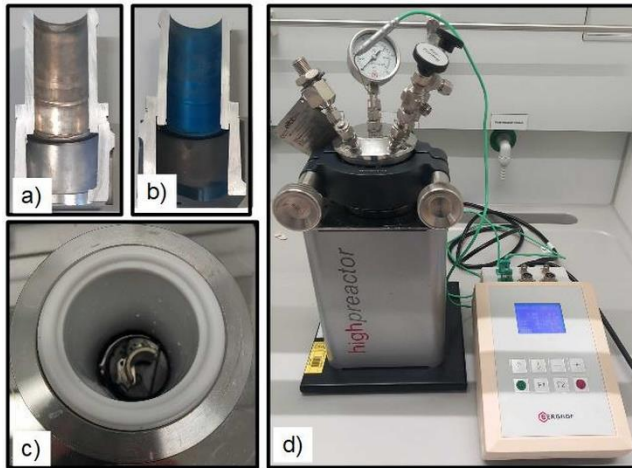


Abb. 2: Reibgeschweißter Medienanschluss + Endplatte a) ohne Beschichtung und b) mit ELOXAL-Beschichtung. c) Detailaufnahme der Probenexposition im Hochdruckreaktor und d) gesamter Versuchstand zur Untersuchung der Wasserstoffsprödruchanfälligkeit bei 80 °C.

Für die parallel durchgeführte **simulative Bewertung des Wasserstoffpermeationsverhaltens** der Aluminiumlegierung wurde zu Beginn auf Literaturwerte für den Diffusionskoeffizienten zurückgegriffen. Zudem wurden für den Anwendungsfall lokale Defektstellen im natürlich gebildeten Passivoxid sowie in der applizierten ELOXAL-Schicht berücksichtigt, die aufgrund der Sauerstoffarmut in der Wasserstoff-Atmosphäre schlecht repassivieren können. Abbildung 3 zeigt eine Multiphysik-Simulationsstudie, die mit der im Projekt beschafften Software **COM-SOL Multiphysics** durchgeführt wurde. Unter Vorgabe von **unterschiedlichen Schädigungsgraden** in der ELOXAL-Beschichtung und den Druckverhältnissen am Medienanschluss der Brennstoffzelle wurde das zeitabhängige Wasserstoff-Permeationsverhalten bei laminar-strömendem Wasserstoffgas in der Endplatte analysiert (Abb.3).

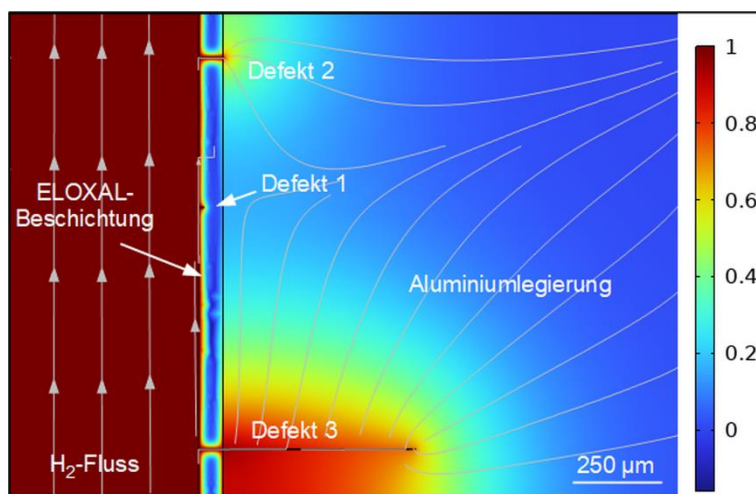


Abb. 3: FEM Simulation des Wasserstoff-Permeationsverhaltens in der ELOXAL-beschichteten Endplatte. Die Multiphysik-Studie berücksichtigt einen laminaren H<sub>2</sub>-Fluss am Medienanschluss mit einem Überdruck von 2,5 bar, multiplen Defekten in der ELOXAL-Beschichtung und einem mittleren Diffusionskoeffizienten der Al-Legierung von  $D \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Auf Basis der Simulations-Ergebnisse und zur **Minimierung der Gefahr einer Wasserstoffversprödung** der Endplatte wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern entschieden, den direkten Kontakt von Wasserstoff mit der Endplatte zu vermeiden und den **Medienanschluss für die H<sub>2</sub>-Zufuhr aus einem hochlegierten Stahl** mit einem deutlich niedrigeren H<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizienten von  $D \sim 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$  zu fertigen.

## Sachbericht Teil II

ZE: Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Werkstofftechnik		Förderkennzeichen: 03B11022H
Vorhabensbezeichnung:	Verbundvorhaben NIP II: „HZwo:SuSyMobil - Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen“	
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 – 31.05.2025	
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 31.05.2025	

### 1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Im Teilprojekt wurde das elektrochemische Korrosionsverhalten und die wasserstoffinduzierte Sprödbuchanfälligkeit der im Gesamtvorhaben eingesetzten Aluminiumguss- und Aluminiumknetlegierungen untersucht. Ziel war die Bewertung der Aluminiumwerkstoffe im Hinblick auf ihre Korrosionsanfälligkeit gegenüber den in der Brennstoffzelle eingesetzten korrosiv-wirkenden Medien und deren Auswirkung bei hohen Expositionsauern. Für die Evaluierung wurden konventionelle Korrosionsanalysen sowie innovative Prüfverfahren zur Abbildung praxisrelevanter Bedingungen durchgeführt. Neben der experimentellen Methodik wurden zudem für die Extrapolation auf lange Zeiträume Finite-Elemente-Simulationen eingebunden. Der Schwerpunkt lag dabei insbesondere auf der Verknüpfung geometrischer und multiphysikalischer Gegebenheiten der finalen Endplatte unter Berücksichtigung einer ausgewählten Korrosionsschutzmaßnahme.

Vom Projektpartner Handtmann Leichtmetallgießerei Annaberg GmbH wurden sechs Aluminiumdruckgusslegierungen (siehe Tabelle 1) für die Korrosionsuntersuchungen zur Verfügung gestellt. Von den sechs Legierungen wurde nach Durchführung der unten diskutierten Versuchsreihen eine Aluminiumlegierung für die Fertigung der Endplatte empfohlen. Vom Projektpartner ESKA Automotive wurden die Medienanschlüsse aus der Aluminiumknetlegierung AlSi1MgCuMn bereitgestellt und mittels Reibschweißen auf der Endplatte angebracht. Als finales Oberflächenfinish wurde auf der Endplatte inkl. Medienanschlüsse eine ELOXAL-Beschichtung appliziert.

Tabelle 1. Auswahl an Aluminiumlegierungen, die vom Projektpartner Handtmann Leichtmetallgießerei für die Untersuchungen bereitgestellt wurden. Final wurde die Legierung 239D für die Fertigung der Endplatte ausgewählt.

Legierung	Zusammensetzung
226D	AlSi9Cu3(Fe)
231D	AlSi12Cu1(Fe)
239D	AlSi10Mg(Fe)
Silafont-36	AlSi10MnMg
Magsimal	AlMg5Si2Mn
TL133	AlSi7Mg

#### AP 2.4.1 Charakterisierung von Guss- und Knetlegierungen bzgl. ihres mechanischen Werkstoffverhaltens und Gefüges

Ziel des ersten Arbeitspakets war die Charakterisierung der Oberflächen- und Mikrostruktur sowie der mechanischen Eigenschaften der in Tabelle 1 gelisteten Aluminiumlegierungen. Der Vergleich der mikrostrukturellen Eigenschaften zeigt charakteristische Gemeinsamkeiten auf, die beispielhaft für die Legierung 239D in Abb. 1 gezeigt sind. Erwartungsgemäß weisen alle Legierungen im Anlieferungszustand eine inhomogene

und aufgeraute Oberfläche (siehe Abb. 1a) sowie nach metallografischer Präparation, die Bildung von Mikrolunkern auf. Diese Oberflächeneigenschaften sind ein charakteristisches Merkmal für im Druckgussverfahren hergestellte Erzeugnisse und bei medialer Beanspruchung bevorzugte Korrosionskeimstellen.

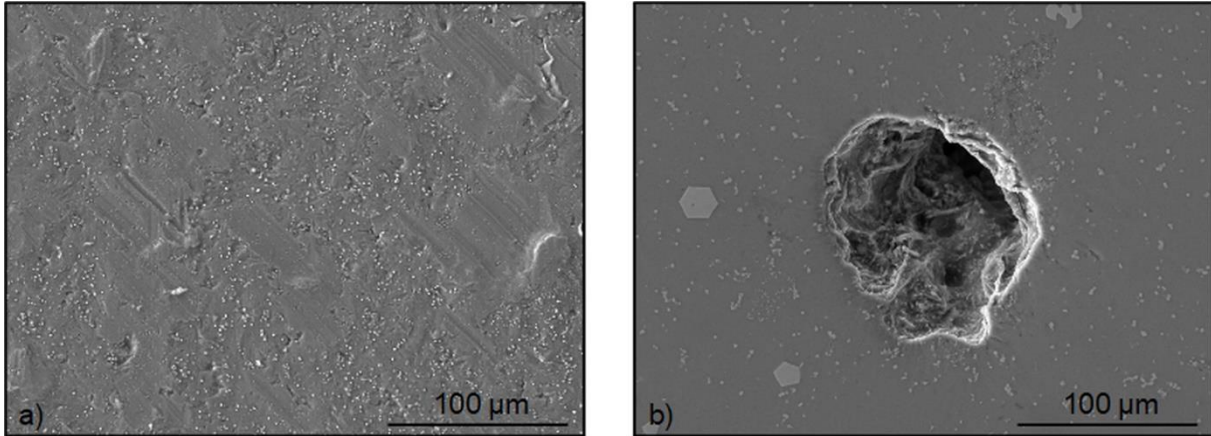


Abb. 1: Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Aluminiumlegierung 239D im Anlieferungszustand a) mit Gushaut und b) nach metallografischer Präparation.

Parallel zu den in diesem Arbeitspaket durchgeführten Testreihen wurden die Versuche zur elektrochemischen Charakterisierung der Korrosionseigenschaften in Arbeitspaket 2.4.2 begonnen. Die Ergebnisse zeigten ein ähnliches Korrosionsverhalten für die sechs in Tabelle 1 gelisteten Aluminiumlegierungen auf. Für die Eingrenzung des breiten Versuchsumfanges wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern die Legierungen 239D und TL133 für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt.

Für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden die Brinell-Härteprüfung, der Zugversuch und der 3-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Abb. 2a zeigt die Ergebnisse der Brinell-Härteprüfung für die Aluminiumlegierungen 239D und TL133. Beide Legierungen weisen vergleichbare Härteeigenschaften auf.

Die Abbildungen 2b und 2c zeigen die Ergebnisse des Zug- und 3-Punkt-Biegeversuches für die Legierungen 239D und TL133. Der Vergleich zeigt, dass die Legierung 239D in beiden Versuchsreihen eine höhere Zug- und geringere Bruchfestigkeit besitzt. Basierend auf den Ergebnissen der mechanischen sowie der Korrosionseigenschaften wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern die Legierung **239D** für die Fertigung der Endplatte ausgewählt.

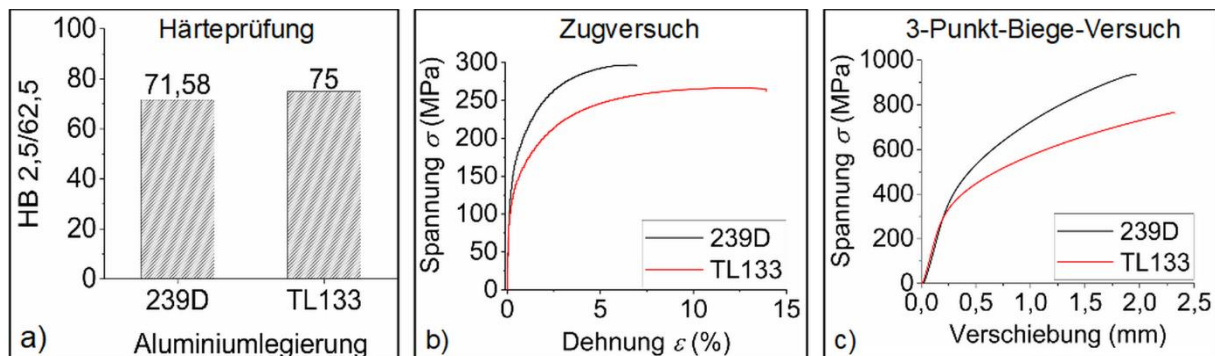


Abb. 2: a) Brinell-Härtewerte sowie b) und c) Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Zug und 3-Punkt-Biege-Versuch der Legierungen 239D und TL133.

#### AP 2.4.2 Untersuchungen zur korrosiven Beanspruchung ausgewählter Al-Werkstoffe

In diesem Arbeitspaket wurden elektrochemische Korrosionsuntersuchungen durchgeführt, um das Degradati-

onsverhalten der Aluminiumlegierungen unter korrosiver Beanspruchung zu bewerten. Es wurden elektrochemische Impedanzspektren und potentiodynamische Polarisationskurven mit den innerhalb des Projektes angeschafften Potentiostaten der Firma Gamry aufgenommen. Alle sechs in Tabelle 1 gelisteten Aluminiumlegierungen wurden metallographisch bis auf eine Oberflächenrauheit von 1  $\mu\text{m}$  präpariert und in einer 0,05 M NaCl + 0,03 %  $\text{NH}_4(\text{SCN})$ -Lösung bei Raumtemperatur geprüft. Der NaCl-haltige Elektrolyt wurde anfangs gewählt um oberflächennahe Schwachstellen der Aluminiumlegierungen zu identifizieren. Für spätere und anwendungsrelevantere elektrochemische Korrosionsversuche wurden mit dem Kühlmittel der Brennstoffzelle Glysantin FC G 20-00/50 geprüft. Die Ergebnisse der Impedanzuntersuchungen (siehe Abb. 3a) zeigen ein vergleichbares Verhalten bei allen sechs Legierungen. Die Legierungen 239D und TL133 weisen die höchsten Impedanzwerte auf, was auf eine höhere Korrosionsbeständigkeit hindeutet.

Anschließend wurden das potentiodynamische Polarisationsverhalten (Abb. 3b) ermittelt. Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied auf, was auf ein vergleichbares Korrosionsverhalten der sechs Aluminiumlegierungen hinweist.

Im Anschluss an die Korrosionsuntersuchungen wurden die Oberflächen am Elektronenmikroskop analysiert. Alle Legierungen zeigen ein vergleichbares Schadbild. Abb. 3c zeigt dies am Beispiel für die Legierung TL133. Erwartungsgemäß sind die bevorzugten Lokalitäten für einen Korrosionsangriff, die in AP 2.4.1 (siehe Abb. 1b) nachgewiesenen Kavitäten. Die Kavitäten begünstigen einen lokalen Tiefenangriff und die Ausbildung von Lochkorrosion in den Legierungen. Zudem kann ausgehend vom Rand der Kavität ein interkristalliner Korrosionsangriff beobachtet werden. Basierend auf den Ergebnissen der Korrosionsuntersuchungen wurden die Legierungen 239D und TL133 für die weiteren im Gesamtprojekt vorgesehenen Analysen vorgeschlagen. Final wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern die Legierung 239D für die Fertigung der Endplatte ausgewählt.

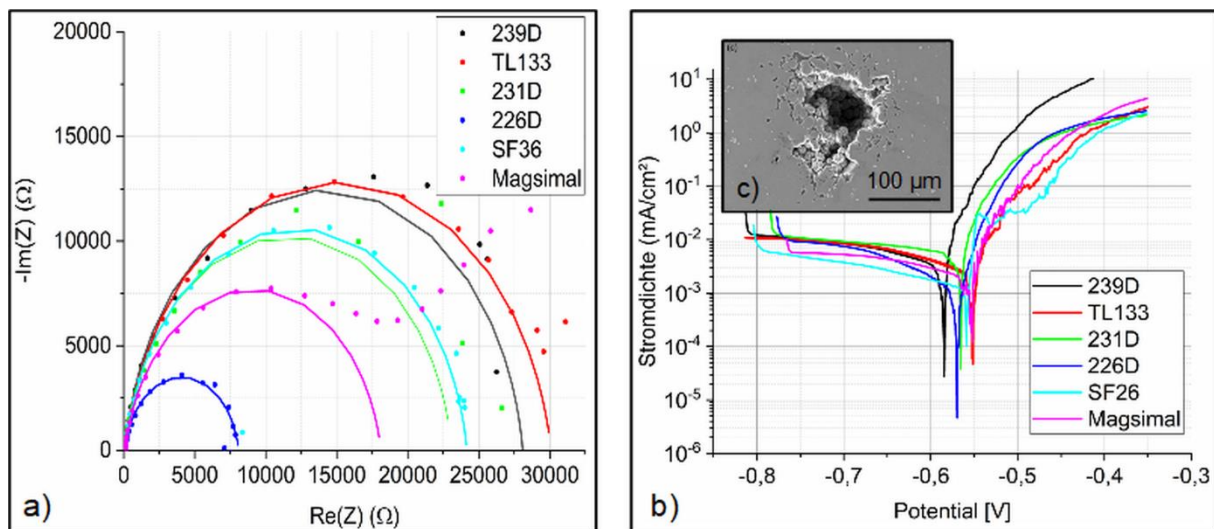


Abb. 3: a) Elektrochemische Impedanzspektren und b) potentiodynamische Polarisationskurven der in Tabelle 1 gelisteten Aluminiumlegierungen in 0,05 M NaCl + 0,03 %  $\text{NH}_4(\text{SCN})$  bei Raumtemperatur. c) Elektronenmikroskopische Aufnahme der Legierung TL133 nach potentiodynamischer Polarisation.

Das Impedanz- und Polarisationsverhalten der ausgewählten Legierung 239D wurde anschließend in Kontakt mit dem in der Brennstoffzelle verwendeten Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50 untersucht. Unter Verwendung der experimentell ermittelten Ergebnisse wurde das Korrosionsverhalten unter Einbeziehung des Enddesigns der Endplatte mit der Methode der Finiten Elemente simuliert. Hierfür wurde die innerhalb des Projektes beschaffte Simulationssoftware COMSOL Multiphysics und das zugehörige Korrosionsmodul verwendet. Abb. 4 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Simulationsstudien für den Ausgangszustand und nach einem Jahr in Kontakt mit dem Kühlmittel.

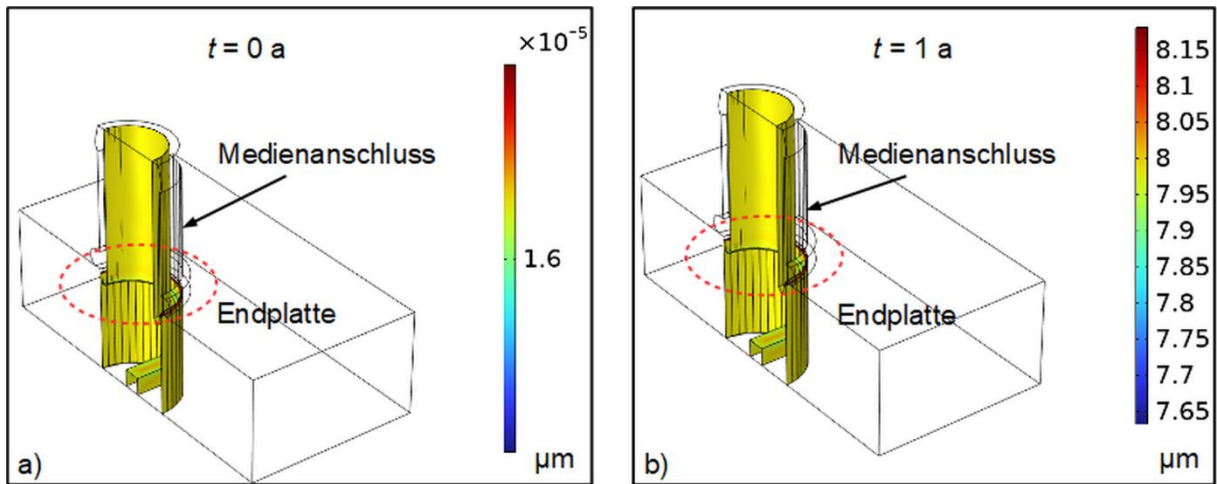


Abb. 4: FEM Simulation des mit dem Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50 in kontakt stehenden Bereiches der Endplatte bei 80 °C a) im Ausgangszustand und b) nach einem Jahr.

Die Ergebnisse zeigen, dass konstruktionsbedingt der Spaltbereich (rot-gestrichelter in Abb. 4a und 4b) zwischen Medienanschluss und Endplatte am stärksten korrosionsgefährdet ist. Nach einem Jahr Exposition wird für den Spaltbereich ein maximaler Materialdickenverlust von 8,15  $\mu\text{m}$  berechnet. Aus korrosionsschutztechnischer Sicht kann dieser geringfügige Materialverlust jedoch als unbedenklich eingestuft werden.

#### AP 2.4.3 Untersuchungen zur Wasserstoffbeladung ausgewählter Al-Werkstoffe

In diesem Arbeitspaket wurde die wasserstoffbedingte Sprödbuchanfälligkeit der Aluminiumlegierungen untersucht. Im ersten Schritt wurden FEM-Simulationen mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführt und die Wirksamkeit des natürlich gebildeten Passivoxides evaluiert. Vergleichend wurden eine ungeschützte Oberfläche (Abb. 5a) und eine Oberfläche mit intaktem Passivoxid (Abb. 5b und 5c) betrachtet. Die für die Berechnungen notwendigen Diffusions-Koeffizienten wurden der Literatur entnommen.

Der Vergleich zeigt, dass bei intaktem Passivoxid auf der Oberfläche der Aluminiumlegierung mit keiner signifikanten Versprödung zu rechnen ist. Das natürlich gebildete Passivoxid besitzt eine ausreichende Schutzwirkung.

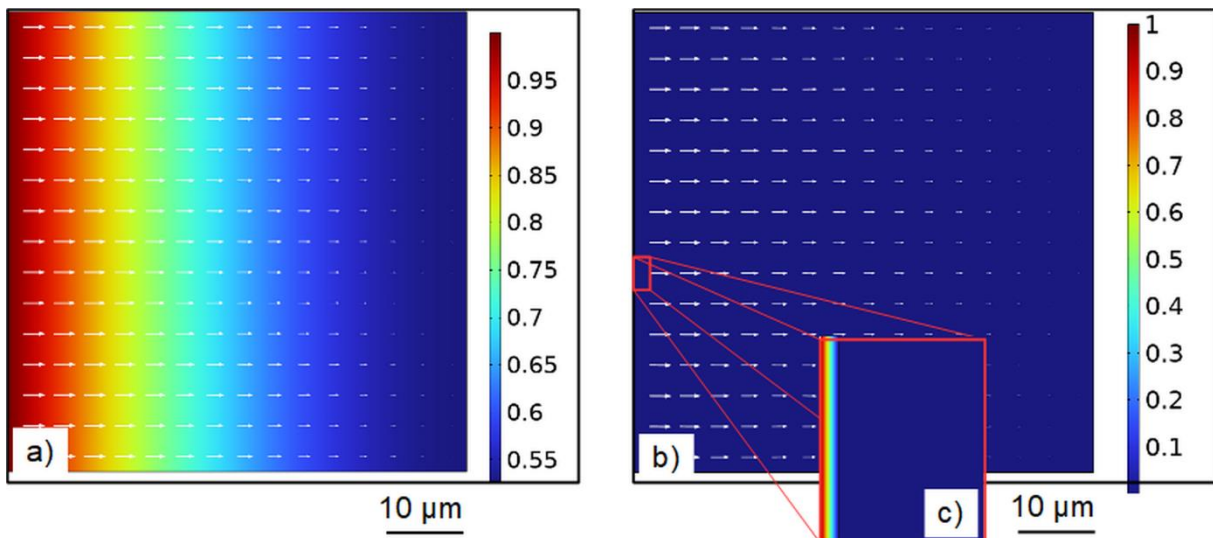


Abb. 5: FEM-Simulationsstudien zur Bewertung des Wasserstoffpermeationsverhaltens in den untersuchten Aluminiumlegierungen. a) Homogenes Permeationsverhalten ohne Berücksichtigung einer Passivoxidschicht.  $D_{\text{eff,Al}} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . b) Permeationsverhalten mit natürlich gebildetem Passivoxid.  $D_{\text{eff,Ox}} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{\text{eff,Al}} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Für die experimentelle Bewertung des Wasserstoff-Permeationsverhaltens wurden eine im Projekt beschaffte Devanathan-Stachurski-Zelle (Abb. 6a) sowie die Potentiostaten der Firma Gamry verwendet. Die Versuchsreihen zum elektrochemischen Wasserstoff-Permeationsverhalten der Aluminiumlegierung zeigten immer einen signifikanten elektrochemischen Korrosionsangriff. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine signifikante pH-Wertänderung an der Grenzfläche zur Aluminiumlegierung im verwendeten Elektrolyten einsetzt, die schließlich zu einer starken Korrosionsschädigung (Abb. 6b) führt. Diese Korrosionsschädigung generiert einen Korrosionsstrom, der den Wasserstoffpermeationsstrom überlagert und die Messergebnisse verfälscht.

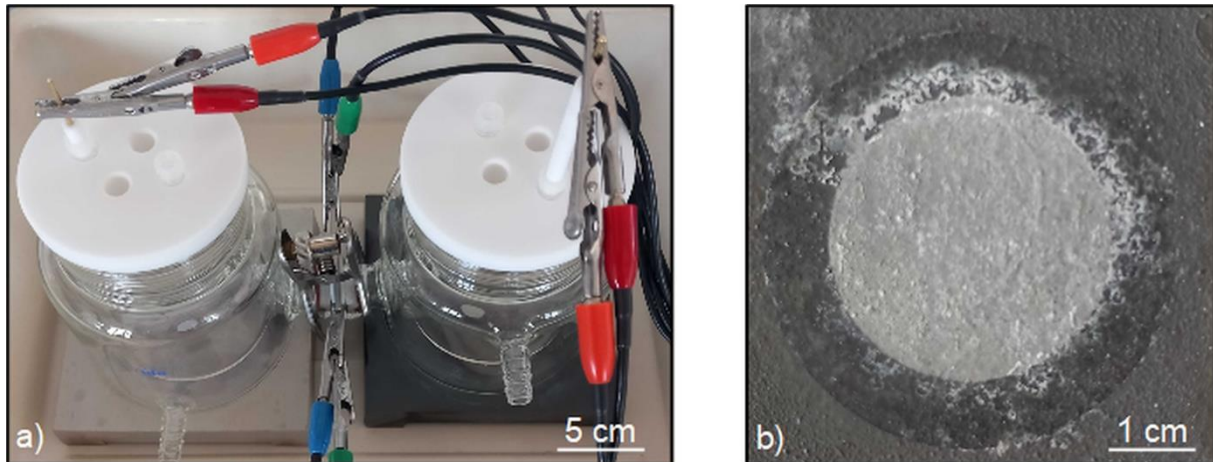


Abb. 6: a) Devanathan-Stachurski-Zelle zur Bewertung des Wasserstoffpermeationsverhaltens. b) Probe nach Beendigung des Permeationsversuchs. Der dem Kühlmedium ausgesetzte Bereich zeigt eine starke Bildung weißer Korrosionsprodukte, was auf eine pH-Wertänderung während des Versuches zurückgeführt wird.

Zur Vermeidung der Korrosionsschädigungen wurden die Versuchsreihen zur Charakterisierung des Wasserstoff-Permeationsverhaltens der Aluminiumlegierung im projektfinanzierten Hochdruckreaktor (Abb. 7a) durchgeführt.

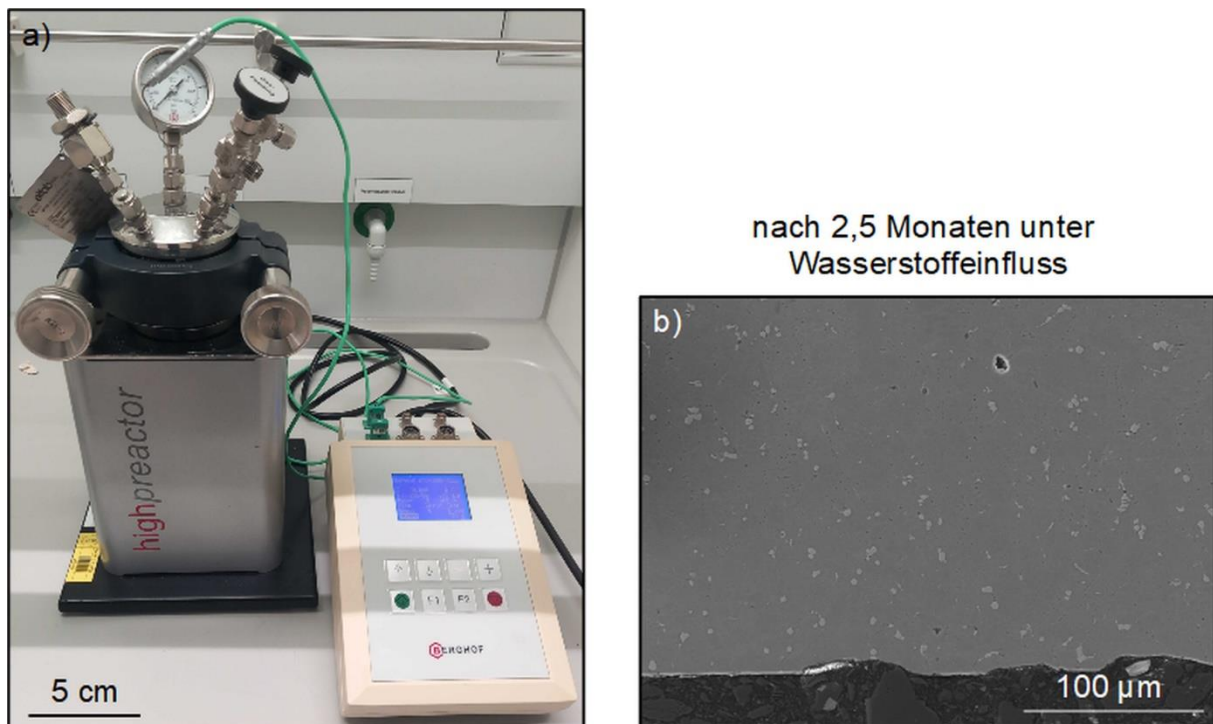


Abb. 7: a) Hochdruckreaktor zur Charakterisierung der Wasserstoffsprödbriechanfälligkeit der untersuchten Aluminiumlegierungen. Die Versuche wurden unter Betriebsbedingungen bei 80 °C durchgeführt. b) Grenzfläche der Aluminiumlegierung 239D nach 2,5-monatiger Exposition.

Die Ergebnisse nach zweieinhalb-monatiger Auslagerung im Reaktor bei 80 °C sowie unter Einfluss von Wasserstoff zeigen keine signifikante Schädigung der Aluminiumlegierung (Abb. 7b). Eine Sprödbuchanfälligkeit konnte nicht nachgewiesen werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das natürlich gebildete Passivoxid eine ausreichende Barrierewirkung gegenüber einer Wasserstoffdiffusion hat. Die experimentellen Ergebnisse sind konsistent mit den Simulationsstudien.

#### AP 2.4.4 Untersuchung von Beschichtungsverfahren zur Sperrwirkung mittels Passivschichten

Zur Verbesserung der Langzeitkorrosionsbeständigkeit wurden Korrosionsschutzschichten auf die ausgewählten Aluminiumlegierungen 239D und TL133 appliziert. Es wurden eine ELOXAL-Beschichtung mit einer Schichtdicke von 2-4 µm und ein chemisch Nickelüberzug mit einer Schichtdicke im Bereich von 9-15 µm auf den Oberflächen appliziert und anschließend elektrochemisch in Kontakt mit dem Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50 charakterisiert.

Die elektrochemischen Korrosionsversuche wurden bei Raumtemperatur sowie bei 80 °C durchgeführt. Die Prüftemperatur von 80 °C wurde gewählt, um die Betriebsbedingungen in der Brennstoffzelle abzubilden. Abbildung 8a zeigt beispielhaft die potentiodynamischen Polarisationskurven der unbeschichteten sowie der Nickel- und ELOXAL-beschichteten Aluminiumlegierung 239D für die jeweilige Prüftemperatur. Die Polarisationskurven zeigen erwartungsgemäß für alle Oberflächenzustände bei 80 °C leicht erhöhte Stromdichten, was auf eine höhere Korrosionsanfälligkeit bei erhöhter Temperatur hindeutet. Der Vergleich der Oberflächenanalysen nach den Polarisationsversuchen lassen jedoch keine signifikanten Schädigungen sowie Änderungen im Schädigungsverhalten erkennen. Die Abbildungen 8b, 8c und 8d zeigen die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Oberflächen nach den Polarisationsversuchen bei 80 °C. Ähnliche Aufnahmen wurden für die Oberflächen nach potentiodynamischer Polarisation bei Raumtemperatur erhalten. Es konnte bei allen Oberflächen keine signifikante Korrosionsschädigung nachgewiesen werden. Ein vergleichbares Verhalten wurde auch für die Aluminiumlegierung TL133 erhalten.

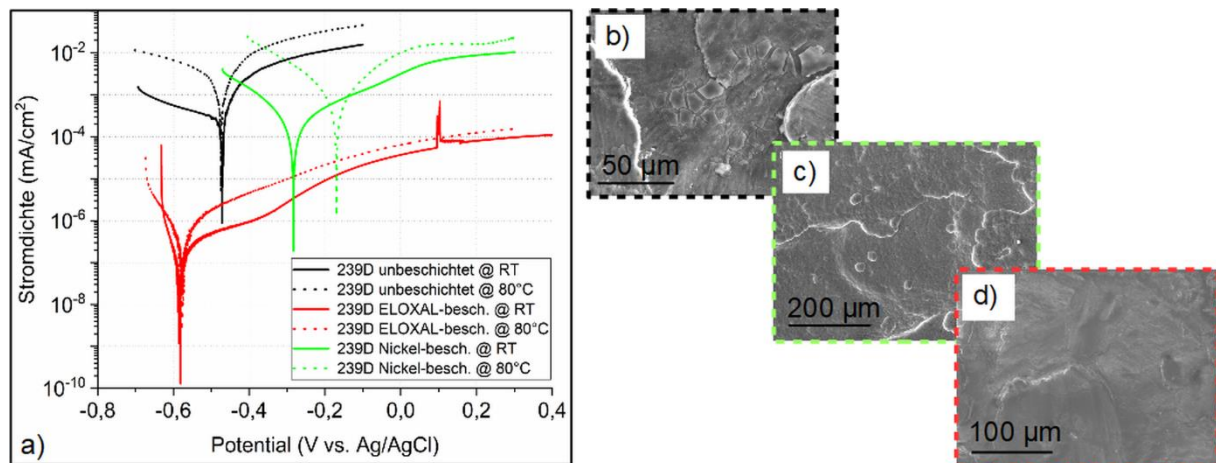


Abb. 8: a) Polarisationskurven der unbeschichteten, der Nickel-beschichteten und ELOXAL-beschichteten Aluminiumlegierung 239D bei Raumtemperatur und 80 °C. b), c) und d) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen nach potentiodynamischer Polarisation bei 80 °C.

Die Ergebnisse der elektrochemischen Korrosionsversuche wurden anschließend für die Langzeit-Evaluierung mit der FEM verwendet. Es wurden Simulationsstudien für die ausgewählten Aluminiumlegierungen 239D und TL133 im unbeschichteten, im chemisch Nickel beschichteten und ELOXAL-beschichteten Zustand bei Raumtemperatur und 80 °C durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 zusammengefasst.

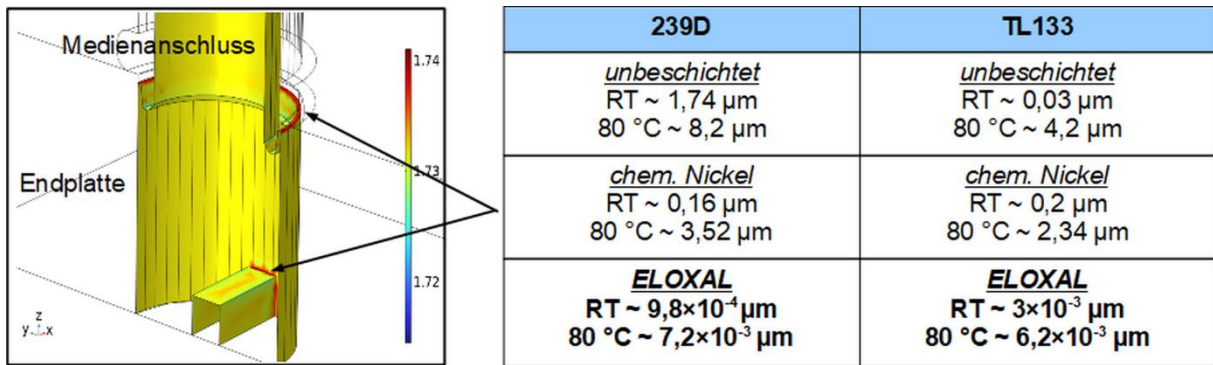


Abb. 9: FEM Simulation des mit dem Kühlmittel Glycantin FC G 20-00/50 in kontakt stehenden Bereiches der Endplatte. Die Tabelle listet die für die Aluminiumlegierungen 239D und TL133 berechneten maximalen Materialabträge nach einem Jahr bei Raumtemperatur (RT) und 80 °C für den unbeschichteten sowie den chemisch Nickel beschichteten und ELOXAL-beschichteten Zustand. Die maximalen Korrosionsabträge werden immer für die Spalt- und Kantenbereiche berechnet (Pfeile).

Die Ergebnisse zeigen konstruktionsbedingt immer den stärksten Korrosionsangriff im Bereich von Spalten und Kanten. Im Vergleich zum unbeschichteten und chem. Nickel beschichteten Oberflächenzustand zeigt die ELOXAL-Beschichtung deutlich geringere Materialabträge im Bereich von wenigen Nanometern.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde die ELOXAL-Beschichtung als Oberflächenfinish für die Fertigung der Endplatte empfohlen. Unter Berücksichtigung dieser geringen Materialabträge kann der ELOXAL-beschichtete Oberflächenzustand als quasi-inert eingestuft werden.

#### AP 2.4.5 Wirksamkeit von Konversionsschichten unter praxisnahen Beanspruchungen

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern die Endplatte aus der Aluminiumlegierung 239D hergestellt. Die Medienanschlüsse für das Kühlmittel und die synthetische Luft wurden durch Reibschweißen angebracht. Anschließend wurde durch einen externen Dienstleister eine ELOXAL-Beschichtung appliziert (siehe Abb. 10a). Die Korrosionsschutzwirkung der Beschichtung wurde unter anwendungsrelevanten Bedingungen durch einen Alterungstest bewertet. Von der ELOXAL-beschichteten Endplatte wurden Proben entnommen (Abb. 10b) und unter Einfluss des Kühlmediums sowie unter dem Einfluss von Wasserstoff für eine Dauer von 2,5 Monaten bei 80 °C untersucht. Die Testreihen unter Wasserstoffeinfluss wurden im projektbeschafften Hochdruckreaktor durchgeführt.

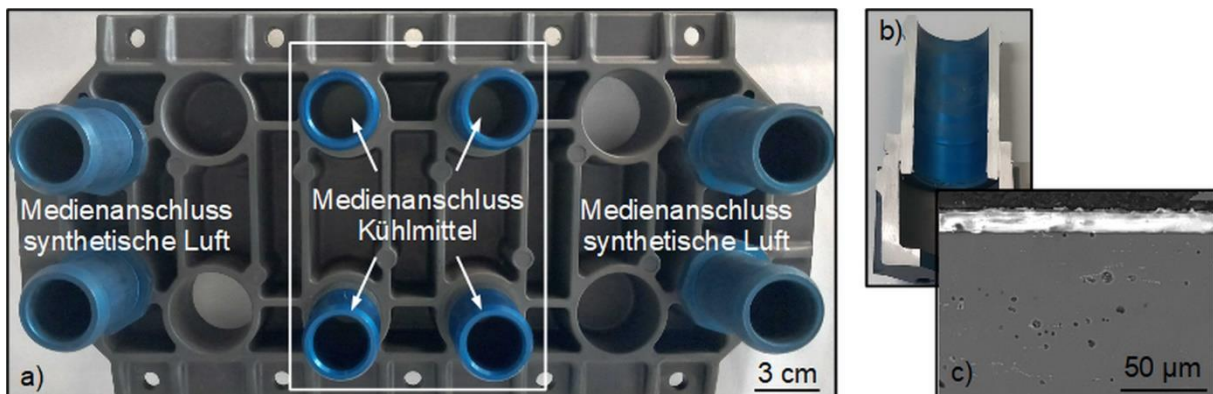


Abb. 10: a) ELOXAL-beschichtete Endplatte mit reibgeschweißten Medienanschlüssen für Kühlmittel und synthetische Luft. b) Aus dem Bereich des Medienanschlusses entnommene ELOXAL-beschichtete Probe für die Auslagerungsversuche. c) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme vom Randbereich der ELOXAL-beschichteten Probe nach dem Auslagerungsversuch unter Wasserstoffeinfluss. Es konnten keine Schädigungen nachgewiesen werden. Die Oberflächenanalyse nach dem Dauertauchversuch im Kühlmedium zeigt ein vergleichbares Verhalten (nicht gezeigt).

Die Oberfläche und der oberflächennahe Bereich zeigen nach Beendigung der Versuchsreihen unter Einfluss von Wasserstoff und Kühlmedium keine signifikanten Schädigungen auf. Daraus lässt sich eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber einem elektrochemischen Korrosionsangriff durch das Kühlmedium sowie einer Wasserstoffpermeation ableiten. Die experimentellen Ergebnisse zur hohen Korrosionsbeständigkeit der ELOXAL-Beschichtung gegenüber dem Kühlmedium bestätigen die Simulationsergebnisse aus Arbeitspaket 2.4.5 (siehe Abb. 9).

Der Einfluss der Wasserstoffsprödbrüchanfälligkeit der Aluminiumlegierung wurde für eine defektbehaftete ELOXAL-Beschichtung simuliert. Für das FEM-Modell wurde ein senkrecht zur Oberfläche vorbeiströmender Wasserstofffluss definiert. Für die Simulationsstudie wurden drei unterschiedliche Defekte vorgegeben. Defekt 1 entspricht einem oberflächlichen Kratzer auf der ELOXAL-Beschichtung und kann als oberflächliche Unstetigkeit in der Schutzschicht aufgefasst werden. Defekt 2 entspricht einer bis zur Aluminiumlegierung durchgängigen lokalen Beschädigung der ELOXAL-Schicht. Defekt 3 definiert ein „worst-case“ Szenario mit einer durchgängigen lokalen Beschädigung der ELOXAL-Beschichtung sowie einer rissbehafteten Aluminiumlegierung. Die Rissflanken werden im Modell ohne ein durchgängiges Passivoxid durch blanke Metalloberflächen beschrieben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 gezeigt.

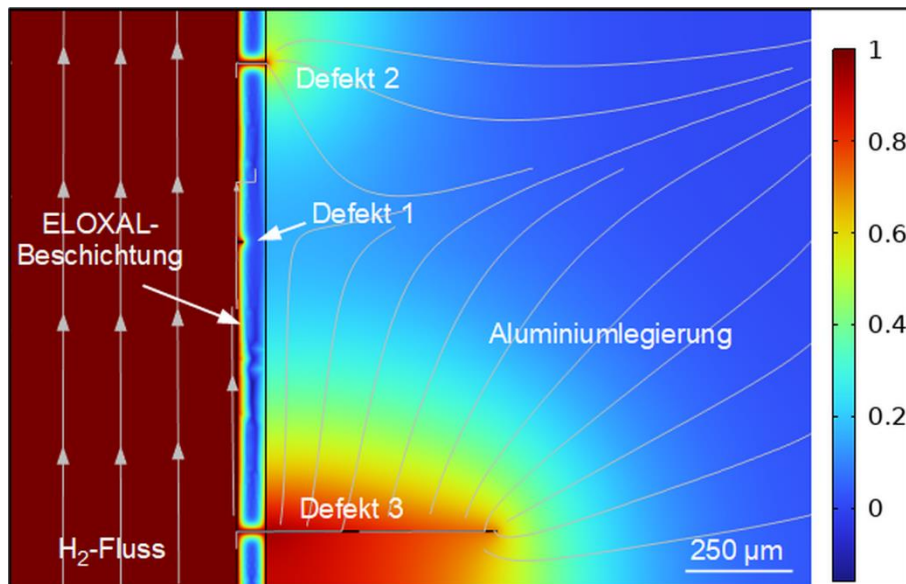


Abb. 11: FEM Simulation des Wasserstoff-Permeationsverhaltens bei defektbehafteter ELOXAL-Beschichtung.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei den intakten Bereichen der ELOXAL-Beschichtung sowie bei Defekt 1 keine signifikante Wasserstoffpermeation in der Aluminiumlegierung einsetzt und eine Sprödbrüchanfälligkeit nahezu ausgeschlossen werden kann. Im Vergleich dazu zeigt sich bei Defekt 2 eine lokale Unterwanderung und gesteigerte Sprödbrüchanfälligkeit im Bereich der Beschichtung. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem derartigen Defekt eine sukzessive Ablösung der ELOXAL-Beschichtung begünstigt wird. Im Bereich von Defekt 3 zeigt sich eine weitreichende und ausgedehnte Wasserstoffsprödbrüchanfälligkeit in der Aluminiumlegierung, die die Langzeitintegrität der Endplatte im Bereich des Wasserstoffmedienanschlusses stark gefährden kann. Entsprechend der gesteigerten Sprödbrüchanfälligkeit eines in der Anwendung nicht ausschließbaren Defektes vom Typ 3 wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern entschieden, den Medienanschluss für die Wasserstoffzufuhr aus einem austenitischen Stahl zu fertigen.

#### **AP 2.4.6 Untersuchung und Bewertung der verwendeten Werkstoffe und Fügeverbindungen bezüglich Spannungsrisskorrosion**

Analog zu Arbeitspaket 2.4.5 wurden für die Versuche zur Spannungsrisskorrosionsanfälligkeit Proben aus dem Bereich des Medienanschlusses der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Endplatte entnommen (siehe

Abb. 10a und 10b). Die Proben wurden in Form von C-Ring-Proben gefertigt und in Abstimmung mit den Projektpartnern eine Spannung gemäß ISO 7539-5 aufgebracht. Die vorgespannten Proben wurden anschließend im Kühlmittel sowie im Hochdruckreaktor unter Wasserstoffeinfluss bei einer Temperatur von 80 °C für 2,5 Monate ausgelagert. Die Oberflächen und oberflächennahen Bereiche wurden anschließend rasterelektronenmikroskopisch analysiert und bewertet. Abbildung 12 zeigt die Randbereiche nach Beendigung des Auslagerungsversuches.

nach 2,5 Monaten unter Wasserstoffeinfluss

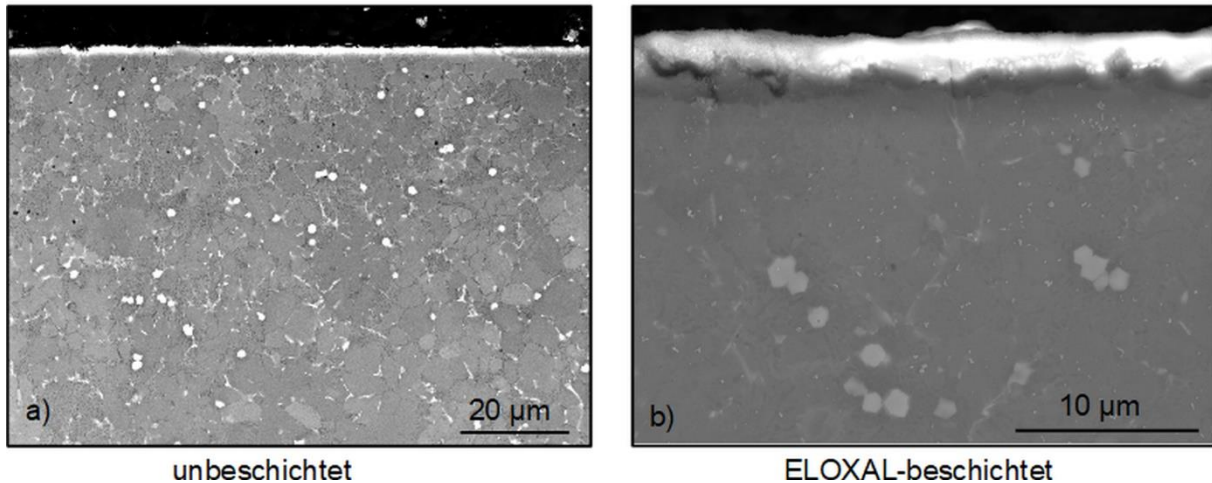


Abb. 12: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der a) unbeschichteten und b) ELOXAL-beschichteten Endplatte nach Beendigung des 2,5-monatigen Spannungsrisskorrosionsversuches unter Wasserstoffeinfluss. Die Ergebnisse des Spannungsrisskorrosionsversuches unter Einfluss des Kühlmittels Glysantin FC G 20-00/50 sind vergleichbar (nicht gezeigt).

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigen die Ergebnisse der FEM-Simulationsstudien unter Annahme eines intakten Passivoxides bzw. intakter ELOXAL-Beschichtung. Es werden keine Risse initiiert, die eine Eindiffusion von Wasserstoff in die Aluminiumlegierung 239D begünstigen. Ein vergleichbares Verhalten wurde ebenfalls unter Einfluss des Kühlmittels Glysantin FC G 20-00/50 beobachtet. Es wurde keine Spannungsrisskorrosionsanfälligkeit nachgewiesen.

#### **AP 2.4.7 Modifikation von Beschichtungsverfahren zur Herstellung von Schichten als Wasserstoffbarriere und Korrosionsschutz**

Die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen sowie der Simulationsstudien zeigen eine sehr hohe Wasserstoffbarrierewirkung und einen ausgezeichneten Korrosionsschutz gegenüber dem Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50. Eine Modifizierung des Beschichtungsverfahrens wurde als nicht notwendig bewertet. Aufgrund der sehr guten Korrosionsschutzwirkung unter medialem Einfluss wird ein ELOXAL-Oberflächenfinish für die Endplatte mit Medienanschlüssen empfohlen.

#### **AP 2.4.8 Überprüfung der Wirksamkeit der Schutzschichten an Funktionsmustern im Labor**

Im letzten Arbeitspaket wurde die Schutzwirkung der applizierten ELOXAL-Beschichtung an endkonturnahen Funktionsmustern evaluiert. Es wurden das mechanische Verhalten sowie das Korrosionsverhalten von beschichteten Endplatten untersucht und vergleichend mit dem unbeschichteten Zustand bewertet. Abbildung 13 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Endplatte im Zugversuch und Biegeversuch.

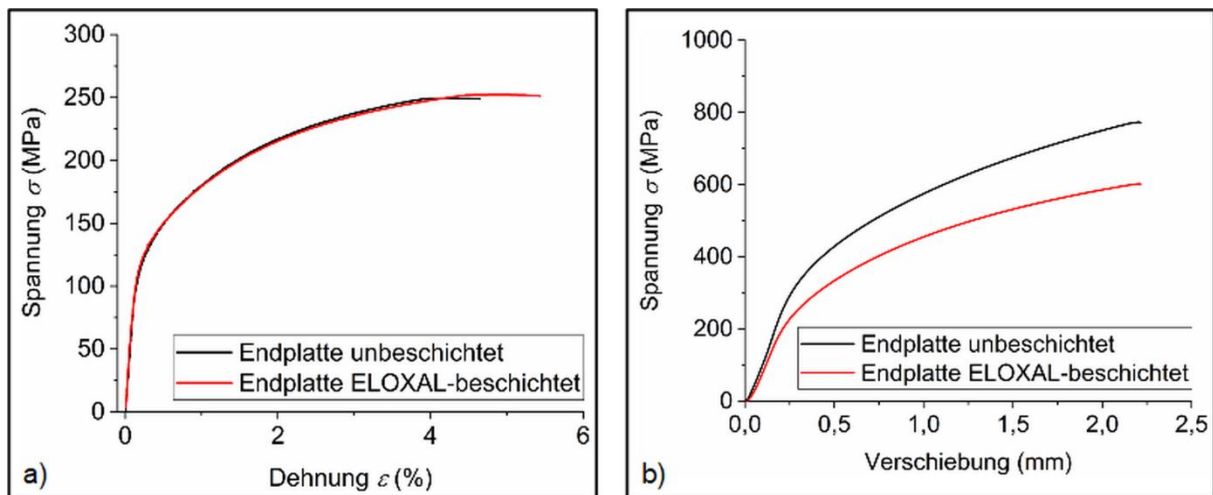


Abb. 13: a) Spannungs-Dehnungs-Kurven der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Endplatte im a) Zugversuch und b) Biegeversuch.

Der Vergleich zeigt, dass die Applikation der ELOXAL-Beschichtung keinen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten der Endplatte im Zugversuch hat (Abb. 13a). Im Biegeversuch (Abb. 13b) kann eine Festigkeitsabnahme nach Applikation der ELOXAL-Beschichtung festgestellt werden. Dies bedeutet, dass bei den beschichteten Proben geringere Kräfte erforderlich sind, um die gleiche bleibende Durchbiegung zu erreichen.

Eine mögliche Ursache hierfür liegt im spröden Werkstoffverhalten der ELOXAL-Schicht. Diese kann im Verlauf des Biegeversuchs frühzeitig versagen und dadurch lokale Spannungskonzentrationen im Grundmaterial erzeugen, die das plastische Fließen begünstigen. Zusätzlich könnten im Rahmen des ELOXAL-Beschichtungsprozesses mögliche eingebrachte Eigenspannungen im Randbereich der Proben die zur Durchbiegung erforderliche äußere Biegespannung reduzieren und so zu einer insgesamt niedrigeren Spannungsaufnahme führen.

Im nächsten Schritt wurde das elektrochemische Korrosionsverhalten der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Endplatte in Kontakt mit dem Kühlmedium untersucht. Es wurden potentiodynamische Polarisationskurven bei Raumtemperatur und bei 80 °C aufgenommen. Auf Grundlage der erhaltenen Polarisationskurven wurden anschließend potentiostatische Halteversuche bei einer anodischen Überspannung von einem Volt gegenüber dem freien Korrosionspotential ( $\Delta U = 1 \text{ V vs. } E_{\text{Corr.}}$ ) durchgeführt. Die anodische Überspannung sollte Polarisationsinflüsse durch den Stack während des Betriebes der Brennstoffzelle abbilden und das Degradationsverhalten auf die Endplatte aufzeigen. Die potentiostatischen Halteversuche hatten eine Gesamtdauer von 100 Stunden.

Abbildung 14 zeigt die potentiodynamischen Polarisationskurven und die Stromdichte-Zeit-Korrelation des 100-stündigen Halteversuches.

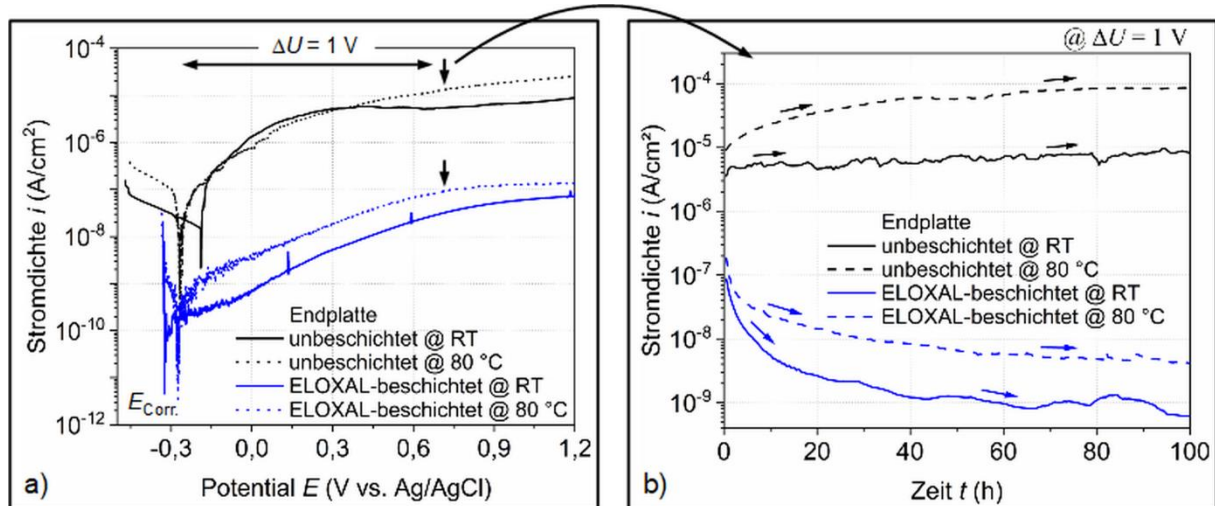


Abb. 14: a) Potentiodynamische Polarisationskurven und b) Stromdichte-Zeitverlauf bei einer anodischen Überspannung von  $\Delta U = 1\text{ V}$  vs.  $E_{\text{Corr}}$  der unbeschichteten und ELOXAL-beschichteten Endplatte in Kontakt mit dem Kühlmedium bei Raumtemperatur und bei 80 °C.

Die Polarisationskurven zeigen eine signifikante Abnahme der Stromdichten nach Applikation der ELOXAL-Beschichtung, was auf eine deutliche Zunahme der Korrosionsbeständigkeit schließen lässt (Abb. 14a). Bei zunehmender anodischer Überspannung zeigen die Kurven eine ausgeprägte Passivierung. Der Vergleich der Kurven bei Raumtemperatur bzw. bei 80 °C lassen erwartungsgemäß eine erhöhte Korrosionsstromdichte mit Zunahme der Temperatur erkennen, was erwartungsgemäß auf eine temperaturstimulierte höhere Korrosionskinetik hindeutet.

Der Vergleich des Stromdichte-Zeit-Verlaufes (Abb. 14b) im potentiostatischen Halteversuch lässt für die unbeschichtete und die ELOXAL-beschichtete Endplatte einen gegenläufigen Trend erkennen. Im unbeschichteten Zustand zeigt sich sowohl für Raumtemperatur als auch für 80 °C eine Zunahme der Stromdichte, die schließlich in eine Sättigung übergeht. Der Kurventrend der Stromdichte weist auf eine anfängliche Korrosionsreaktion hin, die mit Zunahme der Zeit in eine Passivierung übergeht. Der Effekt ist bei 80 °C deutlich stärker als bei Raumtemperatur ausgeprägt. Für die ELOXAL-beschichtete Endplatte ist für Raumtemperatur und 80 °C eine abnehmende Tendenz erkennbar, was auf eine kontinuierliche Passivierung der Grenzfläche zurückgeführt werden kann. Der abnehmende Trend bestätigt die hohe Korrosionsschutzwirkung der ELOXAL-Beschichtung. Nach Beendigung der potentiostatischen Halteversuche bei Raumtemperatur wurden keine signifikanten Schädigungen auf der unbeschichteten bzw. ELOXAL-beschichteten Endplatte festgestellt. Lediglich bei der Prüftemperatur von 80 °C wurden geringfügige Schädigungen beobachtet. Abbildung 15 zeigt die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und vergleicht die Unterschiede nach Beendigung der Versuchsreihe.

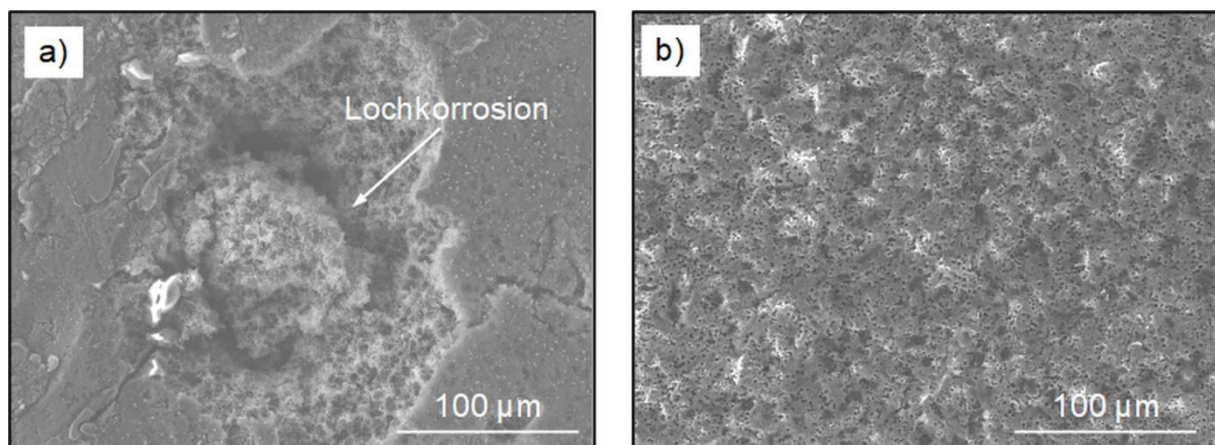


Abb. 15: Rsterelektronenmikroskopische Aufnahmen der a) unbeschichteten und b) ELOXAL-beschichteten Endplatte nach 100-stündigem potentiostatischem Halteversuch im Kühlmittel Glystantin FC G 20-00/50 bei 80 °C.

Die Oberflächenanalyse lässt bei der unbeschichteten Endplatte (Abb. 15a) einen Angriff durch Lochkorrosion erkennen. Die Schädigungen sind nur vereinzelt aufgetreten und deuten auf einen schwachen Korrosionsangriff hin. Der Schädigungsprozess wird auf die Zersetzung des Kühlmittels in Glykol-, Oxal- und Ameisensäure zurückgeführt, was eine pH-Wertabsenkung und schließlich eine Aluminium-Alkoholatkorrosion begünstigt.

Im Vergleich dazu zeigt die ELOXAL-beschichtete Oberfläche keine Schädigungen auf, was auf einen quasi-inerten und sehr korrosionsbeständigen Oberflächenzustand hindeutet. Auf Basis dieser Forschungsergebnisse wird empfohlen die Endplatte sowie die Medienanschlüsse mit einer finalen ELOXAL-Beschichtung zu versehen. Das ELOXAL-Oberflächenfinish erhöht in signifikantem Maße die Korrosionsbeständigkeit der Endplatte, was im Rahmen von Wiederverwertungs- und Recyclingschritten nach Überschreiten der Brennstoffzellennutzungsdauer berücksichtigt werden kann.

Die Teilergebnisse dieses Arbeitspaketes wurden nach Rücksprache mit den Projektpartnern in einem internationalen Journal ([doi.org/10.3390/met15030332](https://doi.org/10.3390/met15030332)) publiziert bzw. auf der Konferenz EUROCORR präsentiert.

Nachfolgend werden Versuchsergebnisse vorgestellt, die nicht Teil des Arbeitsplans im Teilprojekt, jedoch wichtig für die Bewertung der Brennstoffzelle im Betrieb waren. Mit den Projektpartnern wurde der Einfluss der Korrosion der Endplatte auf das Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50 bei 80 °C sowie der Einfluss des Kühlmediums auf die Langzeitstabilität der Isolierplatte aus dem Kunststoff Polyphenylensulfid (PPS) diskutiert. Bei andauernder Korrosion der Endplatte ist davon auszugehen, dass dies eine Erhöhung der Leitfähigkeit des Kühlmediums und dadurch eine weitere Verstärkung der Korrosion der Endplatte bewirken kann. Bei der Isolierplatte aus dem Kunststoff PPS sollte untersucht werden, ob das Kühlmittel einen Einfluss auf dessen Festigkeitsverhalten hat und Leckagen während des Betriebs der Brennstoffzelle begünstigt werden können.

Im Rahmen von zwei Langzeitstudien wurden die Änderung der Leitfähigkeit des Kühlmittels Glysantin FC G 20-00/50 in Kontakt mit der Aluminiumlegierung sowie das Degradationsverhalten des Kunststoffes aus dem die Isolierplatte gefertigt werden soll, bestimmt. Probenmaterial des Kunststoffes PPS wurden für 15 Monate und Probenmaterial der Aluminiumlegierung 239D wurde für insgesamt 30 Monate im Kühlmedium bei 80 °C ausgelagert. Abbildung 16a zeigt den Verlauf der Leitfähigkeitsänderung des Kühlmediums und Abbildung 16b das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Kunststoffes PPS vor und nach der Immersion im Kühlmittel.

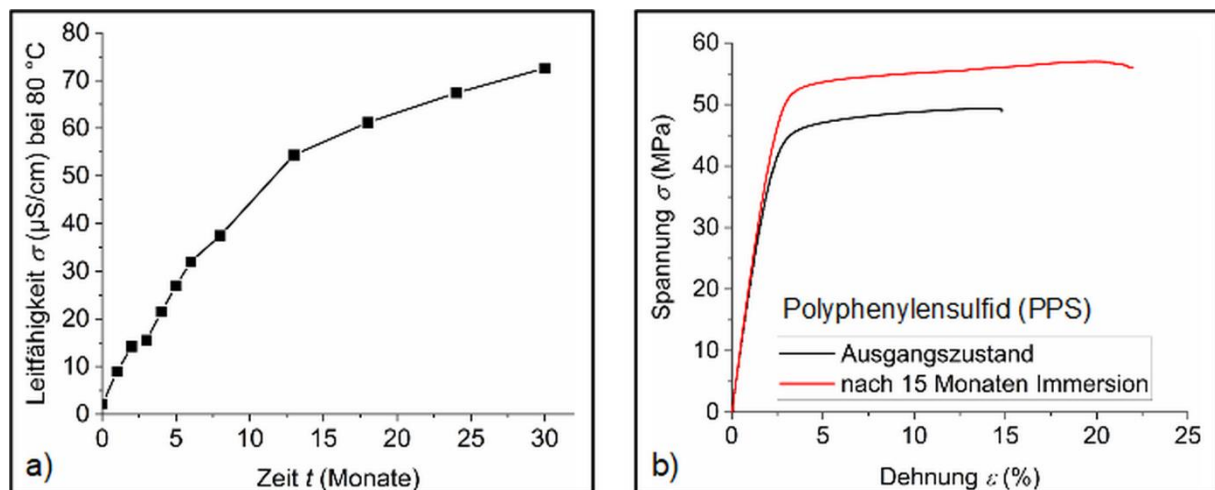


Abb. 16: a) Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit des Kühlmittels Glysantin FC G 20-00/50 in Kontakt mit der Aluminiumlegierung 239D und b) Spannungs-Dehnungs-Kurven des Kunststoffes PPS vor (Ausgangszustand) und nach 15-monatiger Auslagerung in Glysantin FC G 20-00/50 bei 80 °C.

Die kontinuierliche Zunahme der Kühlmittelleitfähigkeit (Abb. 16a) zeigt, dass durch elektrochemische Korrosion Aluminiumionen freigesetzt und im Kühlmittel angereichert werden. Obwohl die Leitfähigkeitssteigerung im betrachteten Zeitraum als nicht signifikant und unbedenklich eingestuft werden kann, gilt eine Leitfähigkeitszunahme als korrosionsfördernd, da diese die Korrosionsfernwirkung begünstigt. Die Ergebnisse bekräftigen, dass eine ELOXAL-Beschichtung als Oberflächenfinish auf der Endplatte appliziert werden sollte, da diese den Effekt

der Leitfähigkeitszunahme durch Korrosion deutlich reduzieren und somit die Langlebigkeit der Endplatte signifikant erhöhen kann.

Der Kunststoff PPS aus dem die Isolierplatte gefertigt werden soll, zeigt eine deutliche Steigerung der Festigkeit nach 15-monatiger Exposition im Kühlmittel Glysantin. Es wird angenommen, dass dieser Effekt auf die Bildung und anschließende Einlagerung von Reaktionsprodukten zurückgeführt werden kann, die innerhalb des betrachteten Zeitraumes eine Verbesserung des mechanischen Verhaltens mit sich bringt.

## **2. Verwertung der Ergebnisse**

Unter Berücksichtigung des ursprünglichen Verwertungsplans wurden die gestellten Ziele erfüllt. Wissenschaftliche Erkenntnisse wurden und werden in den beiden Vorlesungen „Korrosion und Korrosionsschutz“ und „Angewandte Methoden der Korrosionsanalytik“ integriert und für die studentische Ausbildung verwendet. Zudem kann darauf verwiesen werden, dass die grundlagenwissenschaftliche Evaluierung von Korrosionsschutzschichten mit ihrer Übertragbarkeit auf industrielle Maßstäbe mit vorteilhaftem Ergebnis umgesetzt wurde. Die Applikation der industriell applizierten ELOXAL-Schutzschicht zeigt eine sehr gute Korrosionsschutzwirkung, sodass eine Modifikation der Elektrolytzusammensetzung nicht notwendig ist.

Die Erkenntnisse zu Überlagerung von elektrochemischer Korrosion und physikalischer Wasserstoffdiffusion haben ergeben, dass durch die konstruktionsbedingten Eigenheiten der Endplatte im Anwendungsfall von keiner gegenseitigen Beeinflussung auszugehen ist. Die Langzeitkorrosionsversuche unter Betriebsbedingungen haben keine Korrosionsschädigung im Fall der applizierten ELOXAL-Beschichtung aufgezeigt, was für die industriellen Projektpartner einen Mehrwert bei künftigen Dienstleistungen darstellt.

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass die Endplatte aus der Aluminiumlegierung 239D eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber dem Kühlmittel Glysantin FC G 20-00/50 und Wasserstoff bei Raumtemperatur und bei der Brennstoffzellen-Betriebstemperatur von 80 °C hat. Die Korrosionsanfälligkeit der unbeschichtete Aluminiumlegierung gegenüber dem Kühlmittel ist sehr gering und das natürlich gebildete Passivoxid bietet einen ausreichenden Schutz gegenüber einem exzessive Korrosionsangriff.

Im Rahmen der im Projekt untersuchten Korrosionsschutzmaßnahmen wurde nach Applikation des Nickelüberzuges keine deutliche Verbesserung der Schutzwirkung festgestellt. Diese Korrosionsschutzmaßnahme wurde verworfen und für die spätere Anwendung nicht weiterempfohlen.

Im Vergleich dazu wurde gezeigt, dass eine deutliche Steigerung der Korrosionsbeständigkeit nach Applikation einer ELOXAL-Beschichtung erreicht werden kann. Alle Ergebnisse der Korrosionsuntersuchungen belegen eine deutliche Steigerung der Korrosionsbeständigkeit der Oberfläche und lassen unter den gewählten Versuchsbedingungen auf einen quasi-inerten Zustand schließen. Die Korrosionsanfälligkeit geometrisch-bedingter kritischer Spaltbereiche lässt sich dadurch auf ein Minimum reduzieren. Als Folge dieser Korrosionsschutzmaßnahme kann die Langlebigkeit der Endplatte deutlich erhöht und eine Wiederverwertbarkeit nach Ausfall der Brennstoffzelle erreicht werden.

Für die Beständigkeit gegenüber einer Wasserstoffversprödung wurde zudem empfohlen, den Medienanschluss für die Wasserstoffzufuhr aus einem austenitischen Stahl zu fertigen. Die Empfehlung wird darin begründet, dass die hohe Beständigkeit der ELOXAL-Beschichtung bei Intaktheit der Schutzschicht gegeben ist. Im Falle eines lokalen Defektes der Schutzschicht kann diese Beständigkeit nicht mehr garantiert werden und die Wasserstoffsprödruchanfälligkeit steigt deutlich an. Die durchgeführten FEM-Simulationen zeigen, dass aufgrund des vergleichsweise geringen Wasserstoff-Diffusionskoeffizienten eine Wasserstoffanreicherung im Bereich des Defektes innerhalb kurzer Zeit erreicht wird. Dieser potentiellen Schadensursache soll durch Verwendung eines austenitischen Stahles für den Wasserstoffmedienanschluss, welcher sich durch einen deutlich geringeren Wasserstoffdiffusionskoeffizienten auszeichnet, vorgebeugt werden.

In Diskussion mit den Projektpartnern wird vom Institut für Werkstofftechnik die Applikation einer ELOXAL-Beschichtung als Oberflächenfinish für die Endplatte und die Medienanschlüsse sowie die Verwendung eines austenitischen Stahles für den Wasserstoffmedienanschluss empfohlen.

In einem bereits laufendem Nachfolgeprojekt zum Wasserstoffpermeationsverhalten werden die Erkenntnisse zur Aufnahme und Evaluierung der Permeationskurven umgesetzt. Die im Teilprojekt beschafften Potentiostaten

zeigen dabei aufgrund ihrer hohen Messauflösung bereits sehr gute Ergebnisse und sind unverzichtbar für die hochpräzisen Messungen. Zudem werden die Potentiostaten für die studentische Ausbildung sowie für Studien für laufende und geplante Promotionsarbeiten eingesetzt.

Zudem konnte gezeigt werden, dass das Wasserstoffpermeationsverhalten von den untersuchten Aluminiumlegierung nicht elektrochemisch untersucht werden kann. Daher wurden die Versuchsreihen zur Wasserstoffsprödbrochenanfälligkeit der Aluminiumlegierung erfolgreich im projektbeschafften Hochdruckreaktor durchgeführt. Der Reaktor stellt damit die Basis für weitere Forschungsvorhaben von Werkstoffen mit einer hohen Korrosionsempfindlichkeit sowie für Versuchsreihen mit Druck- und Temperaturabhängigkeiten dar.

### **3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Entwicklungen bzw. Produkte, die während der Durchführung des Vorhabens von anderer Stelle bekannt wurden sind nicht bekannt und zeichnen das Teilprojekt mit einem Alleinstellungsmerkmal aus.

### **4. Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit**

Im Rahmen der projektbegleitenden Publikationstätigkeit wurden 2023 Forschungsergebnisse auf der internationalen Tagung EUROCORR in Brüssel vorgestellt. Zudem wurden Teilergebnisse mit dem Schwerpunkt der hohen Korrosionsschutzwirkung der ELOXAL-Beschichtung in dem internationalen Journal *Metals* unter [doi.org/10.3390/met15030332](https://doi.org/10.3390/met15030332) publiziert.