EXPERIMENTELLE FEHLERURSACHEN BEI DER UNTERSUCHUNG VON ERTRAGBAREN SCHICHTSCHÄDIGUNGEN IN HINBLICK AUF DAS KORROSIONSVERHALTEN VON BESCHICHTETEN 1.4404-METALLFOLIEN

David Eckart[1,a], Alexander Bauer[2,b], Thomas von Unwerth[1,c] und Birgit Awiszus[2,d]

[1]Professur Alternative Fahrzeugantriebe, Technische Universität Chemnitz
[2]Professur Virtuelle Fertigungstechnik, Technische Universität Chemnitz
[a]David.Eckart@mb.tu-chemnitz.de, [b]Alexander.Bauer@mb.tu-chemnitz.de,
[c]THomas.von-Unwerth@mb.tu-chemnitz.de, [d]Birgit.Awiszus@mb.tu-chemnitz.de

Getrieben durch die weltweiten Bemühungen zur CO2-Reduktion für mobile Anwendungen stellt die Brennstoffzelle als alternativer Energiewandler einen Schwerpunkt der aktuellen Forschungstätigkeit dar. Während die allgemeine Funktionstüchtigkeit bereits mehrfach durch Kleinserien verschiedener OEMs bewiesen wurde, scheitert eine breite Markteinführung nach wie vor an den hohen Fertigungskosten des Systems. Insbesondere metallisch umgeformte Bipolarplatten werden als aussichtsreiche Möglichkeit zur Kostenreduktion von Polymerelektrodenmembran (PEM)-Brennstoffzellensystemen angesehen. Den vergleichsweise günstigen Werkstoffkosten und der hohen Produktivität von Umformprozessen steht die Herausforderung gegenüber, dass Metalle in saurer Umgebung dazu neigen, in Lösung zu gehen. Die ausgeschwemmten Ionen verunreinigen die Membrane Electrode Assembly (MEA) und führen letztendlich zu deren Versagen. Daher ist eine Beschichtung zum Korrosionsschutz zwingend notwendig. Diese setzt gleichzeitig den Kontaktwiderstand herunter und erhöht den Wirkungsgrad des Systems. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Beschichtungsprozess vor dem Umformen, auf planares Substrat zu bevorzugen, da geneigte Oberflächen diesen erschweren. Dazu muss die Voraussetzung erfüllt werden, dass die Beschichtung nach dem Umformvorgang weiterhin ausreichend Korrosionswiderstand bietet und der Kontaktwiderstand innerhalb des Zielwertes bleibt.

Um ebendiese Relationen näher zu erforschen, erfolgte zunächst die Herstellung von Probekörpern mit einem definiert eingebrachten Umformgrad. Als Probenmaterial wurde eine mit amorphem Kohlenstoff beschichtete 1.4404-Metallfolie der Dicke 0,1 mm genutzt. Dazu konnte innerhalb von numerischen Berechnungen zunächst ein Spektrum verschieden ausgeprägter Umformgrade im einachsigen Zugversuch berechnet werden, während nachfolgend die experimentelle Herstellung mit Hilfe einer Zug-Druck-Prüfmaschine erfolgte.

Die nachfolgend geplante Erforschung der Abhängigkeit von dem nach Department of Energy (DoE) gemessenen Korrosionsstrom führte zu umfassenden Herausforderungen bei der Erfassung der Korrosionsstromdichten. Um diese näher zu detaillieren erfolgte eine Analyse zum Aufbau der Messsysteme sowie den damit einhergehenden bereits identifizierten Problemen im Dichtkonzept.

Nachfolgend wurde eine exakte Betrachtung der weiterführenden Messunsicherheiten sowie damit einhergehender Interpretationsschwierigkeiten der Messergebnisse dargestellt. Als Auswertungsgröße dienten hierfür die innerhalb der Experimente ermittelten Messkurven.

Schlagwörter: PEM Brennstoffzelle; metallische Bipolarplatten; Korrosionsschutz; Umformprozess

1. EINLEITUNG

Der Einsatz von metallischen Bipolarplatten innerhalb von Polymerelektrolytmembran-(PEM-) Brennstoffzellensystemen stellt einen wesentlichen Schritt für die breite Markteinführung von Brennstoffzellen im automobilen Segment dar. Die Reduktion von Herstellungskosten durch eine umformtechnische Fertigung, in Kombination mit den guten mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Metallen beinhaltet die Chance eine breite Marktdurchdringung von Brennstoffzellensystemen zu ermöglichen. Den positiven Eigenschaften gegenüber steht die Neigung von Metallen in saurer Umgebung in Lösung zu gehen. Die dadurch ausgetragenen Ionen führen zu einer Verunreinigung der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) der Brennstoffzelle, woraus letztlich ein Zellversagen resultiert. Aus diesem Grund ist es notwendig metallische Bipolarplatten mit einer zusätzlichen Beschichtung vor Korrosion zu schützen. Mit Hilfe der zum Einsatz kommenden Schichten lässt sich darüber hinaus der Kontaktwiderstand verringern, wodurch der Gesamtwirkungsgrad des Systems erhöht werden kann. Aufgrund der Produktivität wäre eine Beschichtung vor dem Umformprozess zu bevorzugen, da das Aufbringen auf dem planaren Halbzeug eine homogenere Schichtausbildung zulässt. Die bei der Umformung auftretenden Mechanismen wie die Vergrößerung der Bauteiloberfläche durch Dehnung oder die hohe Materialbeanspruchung in den Kontaktbereichen wirken der Schutzfunktion der Schicht entgegen. Dennoch muss die aufgebrachte Beschichtung weiterhin für einen ausreichenden Korrosionswiderstand und der Einhaltung des Zielwerts für den Kontaktwiderstand sorgen. In Bezug auf die Beschichtung metallischer Bipolarplatten wurden bereits vielfältige Forschungsprojekte durchgeführt, zu welchen sich in [Asri, 2017] eine ausführliche Zusammenfassung findet.

Innerhalb weiterer aktueller Forschungsthemen wird das Beschichten vor der Umformung (Pre-Coating) ebenfalls kritisch mit dem Beschichten nach der Umformung (Post-Coating) verglichen. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit sieht die Literatur meist das Verfahren des Pre-Coatings als effizientere Variante im Vorteil [Kinlechner, 2015]. Bei Betrachtung der Beeinflussung der Schichteigenschaften durch einen nachfolgenden Umformprozess zeigen sich verschiedene Forschungsergebnisse. Generell wurde in mehreren Forschungsvorhaben bereits nachgewiesen, dass der Umformprozess den Korrosionswiderstand herabsetzt. Dabei spielen sowohl die eingesetzten Verfahren, als auch die Prozessparameter eine Rolle. Der Unterschied der Korrosionsstromdichte unbeschichteter Proben zwischen nicht umgeformten, hydromechanisch tiefgezogenen und rein mechanisch hergestellten Proben bewegt sich im anodischen Bereich zwischen 6,7 µA/cm^2 bis 9,4 µA/cm^2 und im kathodischen Bereich zwischen 5,7 µA/cm^2 bis 7,8 µA/cm^2. [Dur, 2011] Eine weitere Feststellung wurde in [Dundar, 2010] gemacht, wobei speziell eine sinkende Stempelgeschwindigkeit bei der Umformung zu einem Herabsetzen des Korrosionswiderstands führte, da eine höhere Anzahl an Oberflächendefekten auf den Proben entstand. In [Dur, 2014] wird erläutert, dass bei durchgeführten potentiostatischen Korrosionstests mit Chromnitrid- und Zirkoniumnitrid-Schichten unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge die Ziele des

Department of Energy (*DoE*) erreicht werden konnten. Beim Einsatz von potentiodynamischen Korrosionstests konnten hingegen nur die Zirkoniumnitrid-Schichten mit einer Schichtdicke von 1 µm die entsprechenden Zielanforderungen erfüllen. In diesem Fall konnten demnach nur geringe Unterschiede zwischen vor (0.56 µA/cm^2) oder nach der Umformung (0.33 µA/cm^2) beschichteten Folien ermittelt werden [Dur, 2014].

Zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit von Substraten für den Einsatz als Material für Bipolarplatten hat das *DoE* für ein konventionelles Dreielektroden-Korrosionszellen-Setup Prüfbedingungen und Grenzwerte definiert, welche die Haltbarkeit des Materials über eine im Automotive-Bereich übliche Lebensdauer von 5000 h beschleunigt nachstellen sollen. Mit dieser Festlegung hat das *DoE* einen Standard gesetzt, auf welchen sich nahezu alle Forschergruppen weltweit beziehen. Die zu untersuchende Probe bildet die Arbeitselektrode und wird gemäß des *DoE* zum einen potentiostatisch bei +0,6 V zur Referenz Ag/ AgCl und Umspülung mit Luft, getestet, um die Bedingungen an der Kathode nachzustellen. Zum anderen erfolgen die Tests potentiodynamisch, bei einer Spannung zwischen -0,4 V und +0,6 V und Umspülung mit Argon, zur Nachstellung der Betriebsbedingungen an der Anode. Die gemessene Korrosionsstromdichte über 24 Stunden erlaubt Rückschlüsse über in Lösung gegangenen Ionen und damit den Korrosionswiderstand des Substrates. Die Grenzwerte werden in Tabelle 1 des *DoE* zusammengefasst.

Tabelle 1: DoE Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components [DoE, 2019]

Merkmal	**Einheit**	**2015 Status**	**2020 Ziele**
Kosten	$/kW$_{net}$	7	3
Gewicht	kg/kW$_{net}$	<0.4	0.4
H_2 Permeations–koeffizient	Std cm^3/(sec cm^{2}Pa) @ 80°C, 3 atm, 100% RH	0	<1.3x10^{-14}
Korrosion, anodisch	µA/cm^2	no active peak	<1 and no active peak
Korrosion, kathodisch	µA/cm^2	<0.1	<1
elektrischer Kontaktwiderstand	S/cm	>100[j]	>100
Spezifischer Flächenwiderstand	ohm cm^2	0.006	<0.01
Biegefestigkeit	MPa	>34 (kohlenstoff–basiert)	>25
Dehnbarkeit	%	20–40	40

Aus der Tabelle 1 wird ersichtlich, dass 1 µA/cm^2 vom *DoE* als Grenzwert für die Korrosionsbeständigkeit definiert worden ist, auch wenn Maximalwerte von 0,1 µA/cm^2 bereits 2015 als Stand der Technik erreicht wurden.

Das Ziel der im Rahmen der vorliegenden Publikation durchgeführten Untersuchungen ist es somit, eine Relation zwischen eingebrachtem Umformgrad und gemessener Korrosionsstromdichte herzustellen. Perspektivisch kann darauf aufbauend ein idealer Umformgrad definiert und eine zukünftige Bipolarplatte entsprechend als mittels Precoating umsetzbare Konstruktion ausgeführt werden, welche die vorgegebene Grenze von 1 µA/cm² mit einer zu definierenden Sicherheit ausnutzt.

2. EXPERIMENTELLES UND NUMERISCHES SETUP

Das für die experimentellen Untersuchungen genutzte Versuchsmaterial war ein 0,1 mm dicker 1.4404-Edelstahl mit einer chemischen Zusammensetzung wie folgt: C: 0,024; Si: 0,39; Mn: 1,26; P: 0,03; S: 0,05; Cr: 16,58; Ni: 10,06; Mo: 2,03. Auf die Metallfolien wurde nachfolgend eine amorphe Kohlenstoffbeschichtung mittels Verdampfung durch Elektronenstrahl aufgebracht.

Um die Proben auf die Zugversuche zum Einbringen eines definierten Umformgrads vorzubereiten wurden diese mittels Laser-Micro-Jet-Verfahren (wasserstrahlgeführter Laser) aus dem Coil getrennt. Die Nutzung dieses Verfahrens wurde notwendig, um die Rauheit an den Probenrändern und damit die Einflüsse der Randbereiche auf die mechanische Belastung möglichst gering zu halten. Als Probengeometrie erfolgte die Nutzung von Streifenproben (Längsseite in Walzrichtung) der Abmessungen 200 mm x 20 mm. Das Einbringen eines gezielten Umformgrads in das Material wurde mit Hilfe der Zug-Druck-Prüfmaschine *Zwick Z050/TH3S* bei einer Traversen-geschwindigkeit von 0,5 mm/s durchgeführt (Abbildung 1).

Abbildung 1: Universalprüfmaschine Zwick Z050/TH3S

Um eine exakte Berechnung des mit einer definierten Längenänderung einher-gehenden Umformgrads zu ermöglichen wurde eine numerische Simulation der Zugversuche innerhalb von *simufact.forming 15.0*[1] berechnet. Die Vernetzung des Bauteils erfolgte mit Hexaeder-Elementen der Kantenlängen 0,5 mm und vier

[1] Simufact.forming, Version 15.0, Simufact Engineering GmbH, 2019

Elementen über die Bauteildicke. Die Materialdaten für das numerische Modell (Fließkurve und Anisotropiewerte) entstammen einer ausführlichen mechanischen Charakterisierung der experimentell verwendeten 1.4404-Edelstahlfolien. Auch der restliche Modellaufbau orientierte sich an den Rahmenbedingungen, welche für die experimentelle Versuchsdurchführung zuvor aufgeführt wurden.

Der Aufbau der elektrochemischen Untersuchungen erfolgte nach der Richtlinie der *DoE* mit Hilfe einer chemischen Korrosionszelle in Dreielektrodenkonfiguration der Fa. *Bio Logic Science Instruments* für planare Proben. Der Grundkörper kann optional aus Kunststoff gewählt werden, um die chemische Beständigkeit zu der, wenn auch in geringer Konzentration, verwendeten Flusssäure zu gewährleisten. Die Ag/AgCl Referenzelektrode sowie das als Gegenelektrode verwendete Platinnetz sind passend aus dem Zubehör von *Bio Logic* bezogen. Die Temperierung erfolgt in einem Laborofen der *Memmert GmbH* und die elektrische Messung über ein *M204* Potentiostatmodul der *Metrohm AG*. Zur Referenzierung ist ein weiterer Potentiostat der A*METEK, Inc.* vorhanden. Die Zuführung der Prozessgase erfolgt über Rotameter der *ROTA Yokogawa GmbH & Co. KG*. Der gesamte Messaufbau ist in Abbildung 2 zu sehen.

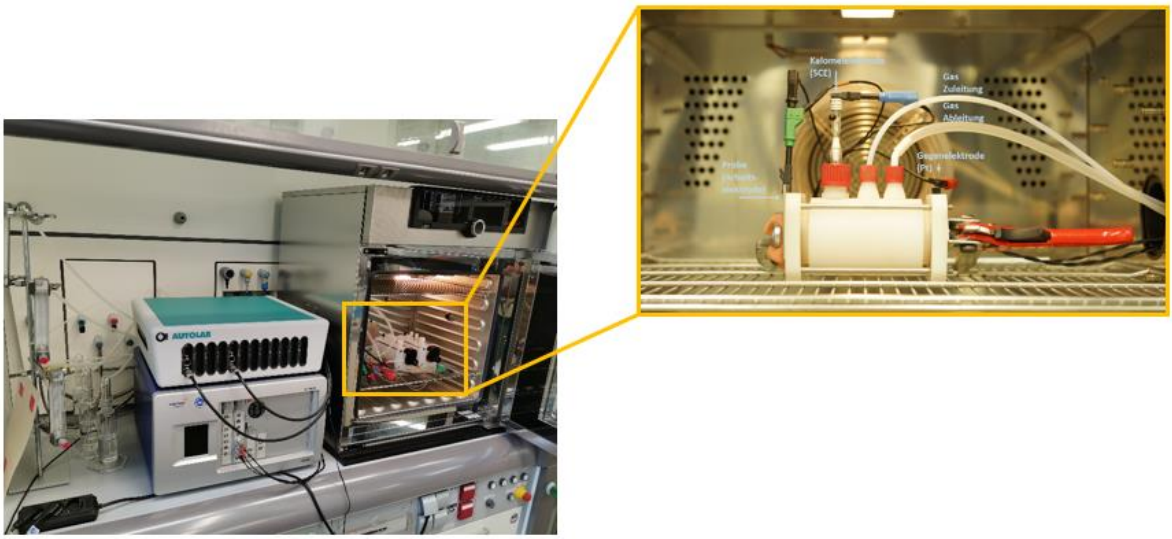

Abbildung 2 Messaufbau elektrochemische Korrosion

Die Aufnahme der Messwerte, insbesondere der gesuchten Stromstärke, erfolgt über einen Laborrechner und die firmeneigene Software der *Metrohm AG*. Als Elektrolyt kommt eine Lösung aus Schwefelsäure und Flusssäure entsprechend der *DoE*-Vorgabe zum Einsatz.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Innerhalb der numerischen Berechnungen wurden neben dem nicht umgeformten Ausgangszustand vier weitere umgeformte Zustände definiert eingestellt, welche für die elektrochemischen Analysen Anwendung fanden. Um eine exakte Definition der plastischen Deformation zu erfassen, erfolgt die Auswertung über den Umformgrad,

der im ideal einachsigen Zustand als logarithmische Formänderung nach Gleichung 1 definiert ist.

$$\varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0} \qquad \text{Gl. 1}$$

Generell erfolgt auch beim Zugversuch neben dem Materialfluss in Längsrichtung φ_l ein Materialfluss aus der Bauteildicke (Ausdünnung) φ_h, sowie eine Verringerung der Breite (Einschnürung) φ_b, weswegen für die numerische Umformberechnung das Gesetzt der Volumenkonstanz gilt (Gleichung 2).

$$0 = \varphi_l + \varphi_b + \varphi_h \qquad \text{Gl. 2}$$

Dementsprechend wurden die vorab definierten Längenänderungen der Proben mit den parallel dazu numerisch berechneten Umformgraden korreliert (Abbildung 3).

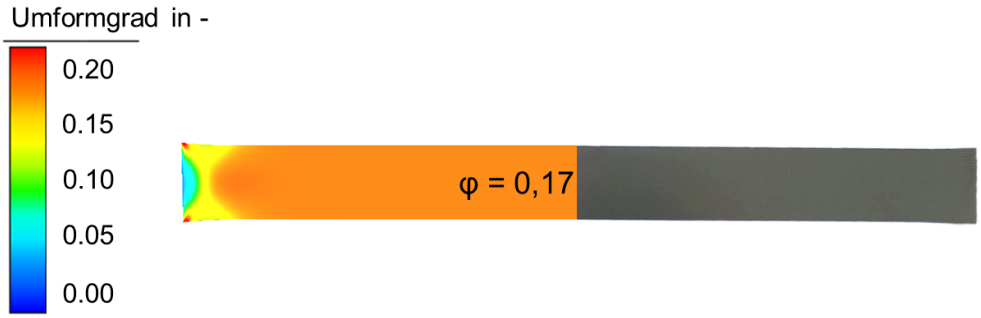

Abbildung 3: Ergebnis Zugversuch für Δl_1 = 25 mm, links: FEM (Umformgrad), rechts: Experiment

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Korrelation von Längenänderung im Zugversuch und Umformgrad

Definierte Längen-änderung in mm	**Umformgrad in -**
Δl_1 = 25 mm	φ_1 = 0,17
Δl_2 = 40 mm	φ_2 = 0,26
Δl_3 = 65 mm	φ_3 = 0,40
Δl_4 = 80 mm	φ_4 = 0,47

Anhand der hergestellten Proben wurden die Zuschnitte für die Korrosionsunter-suchungen immer jeweils aus der Probenmitte entnommen, da diese Bereiche einen homogen verteilten Umformgrad zeigten.

Erste Messungen zur Bestimmung des Ausgangswertes von nicht umgeformtem, unbeschichtetem Material mit dem beschriebenen Setup lieferten unerwartet hohe Korrosionsstromdichten. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, lag die Messkurve schon nach kurzer Zeit mehrere Zehnerpotenzen über dem Zielwert der *DoE* von 1 µA/cm² (Zielwert angezeigt durch orangen Pfeil).

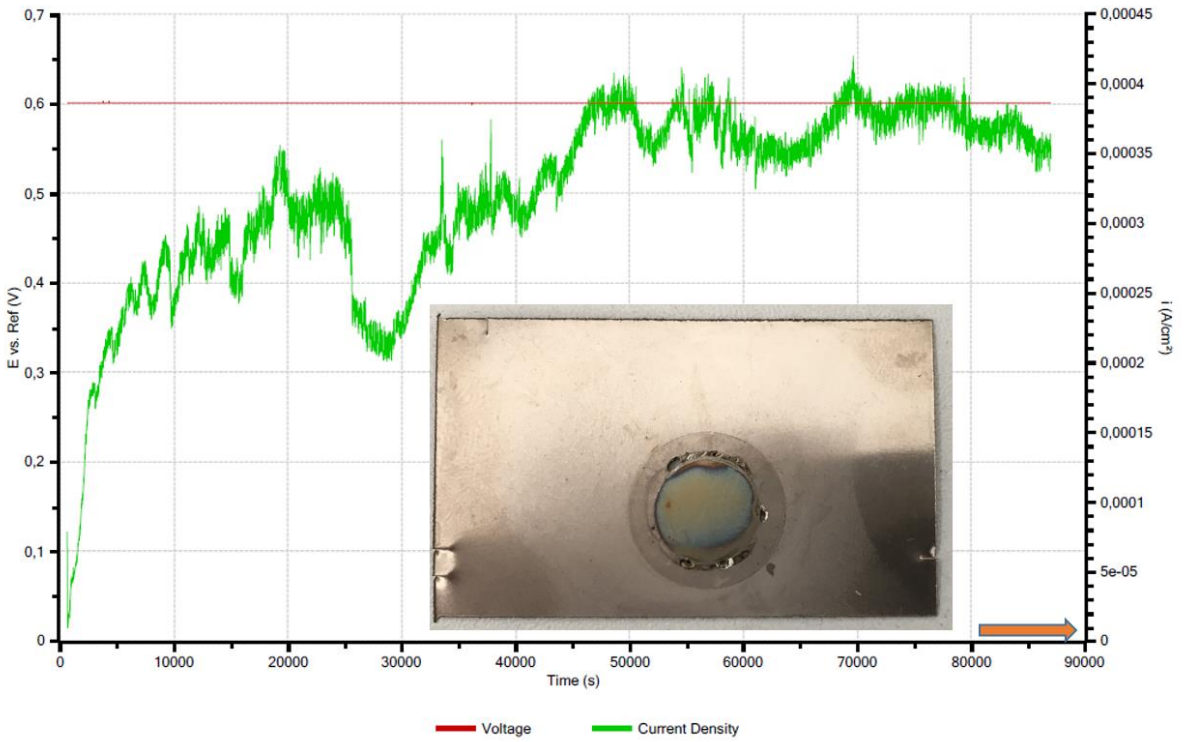

Abbildung 4: statischer Korrosionstest mit standardmäßiger Zelle an unbeschichtetem 1.4404

Ebenfalls abgebildet ist die Probe nach dem Korrosionstest. Gut zu erkennen sind der Abdruck des Dichtrings auf dem Blech und die extrem starke Ausspülung des Grundmaterials an der inneren Kante des Dichtrings. Die eigentliche Messfläche des Bleches zeigt bei dieser Probe eine deutliche Verfärbung mit blauen Rändern und einer grünlich bis gelben Fläche in der Mitte sowie einen roten Punkt am linken Rand. Ein vergleichbares Fehlerbild konnte mehrfach mit dem vom Hersteller konzipiertem Dichtkonzept nachgestellt werden. Durch eine Recherche nach alternativen Dichtmethoden und Probenpräparationen, bei mehreren Firmen für Laborausrüstung und dem damit verknüpften technischen Support, konnte die Fehlerursache identifiziert werden. Es handelt sich dabei um ein Fehlerbild, welches durch die Flachdichtung im Funktionsprinzip als Dichtung und spezieller durch die Eingrenzung der Messfläche hervorgerufen wird. Bei der standardmäßigen Zelle grenzt die Flachdichtung durch ihren Innendurchmesser die Messfläche ab und ist somit direkt dem Elektrolyt ausgesetzt. Sollte dieser Dichtring an dessen Kante nicht vollständig abschließen, kann dieser von Elektrolyt teilweise unterwandert werden und sorgt somit für ein starkes ringförmiges Korrosionsverhalten unter der Kante des Dichtringes. Als Abhilfe wurden zusätzlich Klebemasken angeschafft, welche die Messfläche begrenzen. Die Abdichtung erfolgt nun über Polytetrafluorethylen-Dichtringe, welche in einer neu eingebrachten Dichtnut sitzen. Die Durchgangsbohrung der Messzelle wurde aufgebohrt um eine vollständige Benetzung der Messfläche mit Elektrolyt zu gewährleisten. Durch die vorgenommenen konstruktiven Änderungen an der Messzelle wurde eine Funktionsteilung erzielt. Die Messfläche wird von der Klebemaske begrenzt, die Abdichtung der Zelle übernimmt die Flachdichtung, welche auf der Klebefläche dichtet. Abbildung 5 zeigt links die bearbeitete Endplatte der

Korrosionszelle mit der eingebrachten Bohrung und dem neuen Dichtring. Rechts ist eine Probe mit aufgebrachter Klebemaske zu sehen.

Abbildung 5: Bearbeitete Endplatte der Korrosionszelle und Klebemaske

Die so präparierten Proben lieferten Korrosionsstromdichten in dem zu erwartenden Bereichen. Des Weiteren war auch optisch keine starke Korrosion an der Kante der Klebemaske festzustellen.

Mit Hilfe der so modifizierten Korrosionszellen wurden die präparierten Blechproben untersucht. Mit dem Ziel, die Messzelle vor ausgetragenen Ionen zu schützen, erfolgte die Messreihenfolge analog des eingebachten Umformgrads aufsteigend, beginnend mit nicht umgeformtem Substrat. Sowohl die Messkurven der kathodischen, als auch der anodischen Testzyklen zeigten dabei aus der Literaturrecherche zu erwartende Werte. Bei einer ersten Auswertung konnte festgestellt werden, dass die Messkurven mit steigendem Umformgrad erhöhte Absolutwerte zeigten. Um dies zu verifizieren erfolgten erneute Referenzmessungen von gleichen Umformgraden zwischen Messungen, welche am Anfang der Messreihe durchgeführt wurden, einer gründlich gereinigten Zelle sowie einer Zelle, welche lediglich mit deionisiertem Wasser gespült wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt.

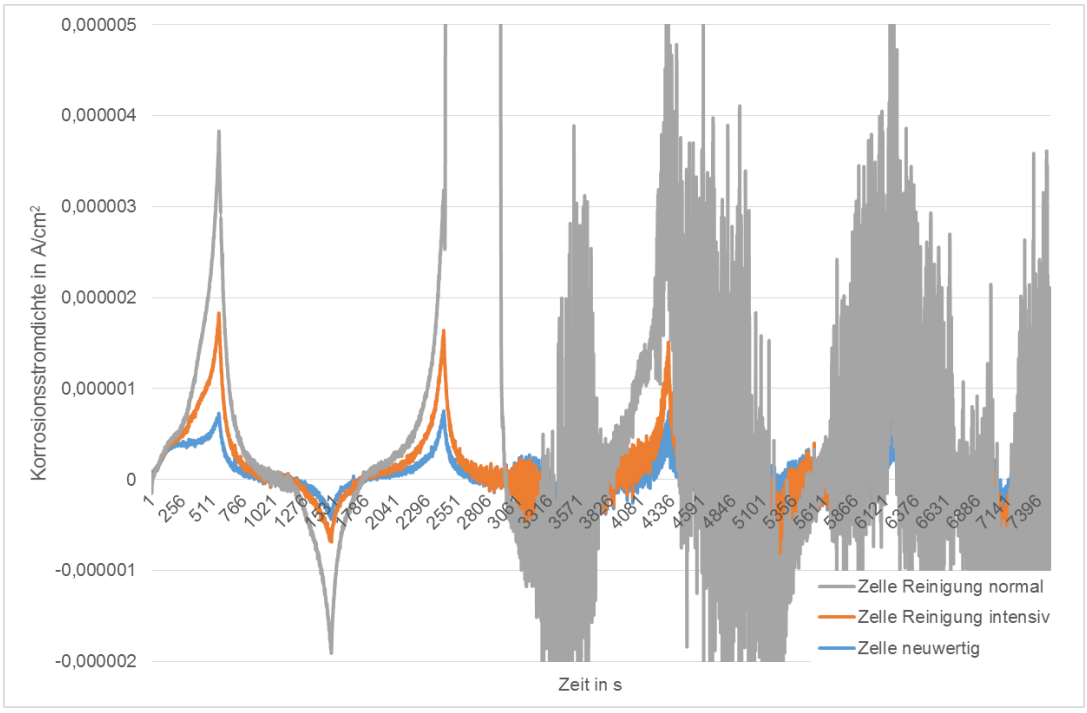

Abbildung 6 Vergleichsmessung anodischer Korrosion gleicher Umformgrade

Die Abbildung zeigt die Graphen von drei Proben mit einer Umformung von Δl_1 = 25 mm in folgenden Zuständen:

- Blau: Messung am Anfang der Messreihe nach drei Messungen in der Zelle, normale Spülung mit deionisiertem Wasser zwischen den Messungen
- Orange: Messung nach der eigentlichen Messreihe, nach 15 Messungen, anschließend gründliche Reinigung im Ultraschallbad, gefolgt von mechanischer Reinigung mit Bürsten und Ethanol und abschließendem Spülen mit deionisiertem Wasser
- Grau: Messung nach der eigentlichen Messreihe nach 15 Messungen, dazwischen jeweils Spülen mit deionisiertem Wasser

Ersichtlich wird, dass trotz gründlicher Reinigung der Zelle deutlich höhere Korrosionsstromdichten gemessen werden, als mit der Zelle im Ausgangszustand. Die graue Kurve liegt nochmals deutlich über den Messwerten, der gereinigten Zelle und erzeugt insbesondere zum Ende der Testzeit signifikant hohe Ausschläge. Diese Verifizierung lässt daher den Rückschluss zu, dass sich der Effekt des erhöhten Umformgrades mit einer schleichenden Verunreinigung der Messzellen überlagert. Wie hoch der jeweilige Anteil der genannten Effekte bei der einzelnen Messung ist, lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht definieren. Grundsätzlich kann eine Erhöhung der Stromdichten mit höheren Umformgraden festgestellt werde, die genaue Quantifizierung blieb aufgrund der genannten Messschwierigkeiten jedoch aus.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung von Streifenzugproben (1.4404-Edelstahl, Dicke 0,1 mm) zur Erforschung einer Korrelation zwischen einem definierten Umformgrad und dem dazugehörigen Korrosionsstrom konnte zunächst innerhalb der numerischen Berechnung und anschließend experimentell umgesetzt werden. Im Rahmen der nachfolgenden Korrosionsuntersuchungen zeigte sich jedoch, dass die am Markt bezogenen Korrosionsstrommesszellen konstruktive Mängel im Bereich der Dichtung aufweisen, welche insbesondere bei der Arbeit mit metallischen Substraten und der einhergehenden hohen Belastung mit herausgelösten Ionen und der Neigung zu Spaltkorrosion auftreten. Die beschriebenen konstruktiven Änderungen in Zusammenwirken mit der Präparation der Messfläche konnten diese Probleme beheben. Dennoch musste weiterführend festgestellt werden, dass die Messzellen, mit einer durch Drehen hergestellten Kunststoffoberfläche mit den angewendeten Reinigungsmethoden nicht rückstandsfrei sauber gehalten werden können und somit sukzessive die Messkurven beeinflussten. Grundlegend konnte ein erhöhter Korrosionsstrom mit erhöhtem Umformgrad beobachtet werden. Um eine exakte Quantifizierung durchführen zu können, muss zunächst der Messablauf und -aufbau in Hinblick auf Reproduzierbarkeit verbessert werden. Ein möglicher Ansatzpunkt dazu bildet eine Verbesserung der Oberfläche der Messzelle in Bezug auf Oberflächenrauheit und Gestaltabweichungen durch Bearbeitungsspuren. Perspektivisch

erscheint der Einsatz von alternativen Grundmaterialien oder chemisch beständigen Beschichtungen sinnvoll. Kurzfristig stellt der standardmäßige Glaszylinder einen ersten Ansatzpunkt als Alternative dar. Bei der Konzeption des Prüfaufbaus wurde sich vorab bewusst gegen dessen Einsatz entschieden, da eine Unverträglichkeit mit der in geringer Konzentration eingesetzten Flusssäure befürchtet wurde. Sollte sich jedoch die Oberfläche als beständiger und effektiver zu reinigen herausstellen, ohne dabei chemisch angegriffen zu werden, könnte dies ein Ansatz zur Lösung darstellen. Hierzu muss zunächst ebenfalls das Verhalten der Zelle über mehrere Messreihen beobachtet und quantifiziert werden.

ACKNOWLEDGEMENTS

Diese Forschungsarbeit wurde mitfinanziert durch den Europäischen Sozialfonds (ESF) sowie durch Steuermittel auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes im Rahmen des Forschungsprojektes HZwo:BIP – Bipolarplatten aus Sachsen (Antragsnummer: 100256457, Clusternummer: 3304) getragen durch die Sächsische Aufbaubank (SAB).

REFERNCES

[Asri, 2017] Asri, Nur Fawwaz; Husaini, Teuku; Sulong, Abu Bakar; Majlan, Edy Herianto; Ramli, Wan; Daud, Wan: Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: A review. International Journal of Hydrogen Energy 42, S. 9135-9148, 2017

[Kinlechner, 2015] Kinlechner, L.: Verbundvorhaben miniBIP – metallische bipolare Platten aus beschichteten Hochleistungswerkstoffen. Konferenzbeitrag: 2. Statusseminar Brennstoffzelle, Berlin, 2015

[DoE, 2019] Department of Energy: DOE Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components, Internetpräsenz, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components#bipolarplate, Zugriff: 09/2019, 2019

[Dur, 2011] Dur, Ender; Cora, Ömer Necati; Koc, Muammer: Effect of manufacturing conditions on the corrosion resistance behavior of metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 196, S. 1235-1241, 2011

[Dur, 2014] Dur, Ender; Cora, Nacati Ömer; Koc, Muammer: Effect of manufacturing process sequence on the corrosion resistance characteristics of coated metallic bipolar plates. Journal of Power Sources 246, S. 788-799, 2014

[Dundar, 2010] Dundar, F.; Dur, Ender; Mahabunphacha, S.; Koc, Muammer: Corrosion resistance characteristics of stamped and hydroformed proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. Journal of Power Sources 195, S. 3546-3552, 2010