Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6

Verfahren zur gezielten Einbringung von Defektbildern in Bipolarplatten

Qualitätssicherung von Brennstoffzellen

J. Buchholz, R. Börgardts, D. Goes, F. Stamer, G. Lanza

ZUSAMMENFASSUNG Referenzbauteile mit Defektmerkmalen sind essentiell für die Erprobung von Prüfverfahren in der Qualitätssicherung der Brennstoffzellenfertigung. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit von defekten Bipolarplatten wird in diesem Beitrag ein Lösungsansatz vorgestellt, bei dem die zu untersuchenden Defektbilder gezielt in die Geometrie der Bipolarplatte eingebracht werden. Für ausgewählte Fehlermerkmale werden geeignete Verfahren zur Fehlereinbringung ermittelt, erprobt und technologisch umgesetzt.

STICHWÖRTER

Brennstoffzelle, Qualitätssicherung, Fertigungstechnik

Quality assurance for fuel cells

ABSTRACT Reference components with defect characteristics are essential for evaluating test methods in the quality assurance of fuel cell production. Due to the poor accessibility of defective bipolar plates, this article presents a solution approach in which the defect images to be examined are specifically introduced into the geometry of the bipolar plate. Suitable methods for defect insertion are determined, tested and technologically implemented for selected defect characteristics.

1 Einleitung

Die Nutzung der PEM-Brennstoffzelle zur Umwandlung von grünem Wasserstoff in elektrische Energie stellt eine zentrale Technologie für künftige nachhaltige Energiesysteme dar. Für die nächsten Jahre wird ein jährliches Umsatzwachstum von 15-30 % erwartet [1]. Darüber hinaus hat die Anzahl der Patentanmeldungen im Bereich Wasserstofftechnologien signifikant zugenommen [2]. Dies verdeutlicht die zunehmende Relevanz und den Fokus auf Innovationen in diesem Forschungsbereich. Zentrale Herausforderung für die Skalierung der Brennstoffzellentechnologie sind die hohen Kosten, die bei der Herstellung der benötigten Einzelkomponenten entstehen. Durch das Remanufacturing können diese Kosten reduziert werden, indem nach Ende des Lebenszyklus des Gesamtsystems die intakten Bauteile wiederverwendet bzw. wiederaufgearbeitet werden [3].

Eine wesentliche Herausforderung in der Brennstoffzellenproduktion liegt in der Qualitätssicherung der Einzelbauteile, insbesondere der Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) und der Bipolarplatten (BPP). Diese werden aufeinander gestapelt und bilden den Stack als Kernelement des Brennstoffzellensystems. Produktionsfehler einzelner Komponenten können durch die serielle Verschaltung der Zellen zu erheblichen Einschnitten in der Funktion des Brennstoffzellensystems führen oder im kritischen Fall einen Komplettausfall des Stacks bedingen [4, 5]. Werden bei der Montage nicht nur Neubauteile sondern auch wiederaufgearbeitete Komponenten aus dem Remanufacturing verwendet, so steigen die Anforderungen an die Qualitätssicherung der Einzelteile. Zusätzlich zu den üblichen Defektbildern aus der linearen Produktion sind neue Fehlermerkmale aus der Feldnutzung und der Demontage zu prüfen, wodurch die Auftretungswahrscheinlichkeit von Defektbildern deutlich zunimmt [6]. Aus diesen Gründen ist in der linearen und der zirkulären Fertigung eine 100 %-Prüfung der Einzelteile vor der (Re)- Montage unerlässlich. Optische Inline-Messsysteme können hier einen Beitrag liefern, indem sie direkt in die Produktionslinie integriert werden [7]. Derartige Systeme bieten den Vorteil, eine Vielzahl von Merkmalen bei geringen Taktzeiten zu überprüfen – einschließlich Oberflächenqualität, Beschichtung und dreidimensionaler Geometrien [8]. Aus diesem Grund werden optische Messsysteme bereits in unterschiedlichsten Branchen angewandt, wie beispielsweise der Batteriezellenproduktion [9]. Die Anwendung in der Brennstoffzellenfertigung wurde hingegen in der Literatur kaum beleuchtet.

Für die Erprobung und Validierung optischer Messtechnik zur Prüfung definierter Merkmale hinsichtlich Defekten sind Untersuchungen mit Defektbauteilen essenziell. Die Ergebnisse ermöglichen es, die Auswertesoftware der Prüfsysteme so zu konfigurieren, dass der Anteil fehlerhafter Prüfergebnisse, wie beispielsweise die fälschliche Bewertung eines Ausschussteils als Gutteil, minimiert wird. Aufgrund der geringen Stückzahlen aktueller Brennstoffzellensysteme sind reale Defektbauteile jedoch schwer zugänglich – ein Problem, das im Kontext des Remanufacturing, das sich aktuell noch im Entwicklungsstadium befindet, noch deutlicher wird.

Ein möglicher Lösungsansatz, der in diesem Beitrag vorgestellt wird, ist die Verwendung von Referenzbauteilen, in die mittels geeigneter Fertigungsverfahren gezielt Defektbilder eingebracht werden. Hierbei stellen sich zwei Herausforderungen dar: Einerseits gilt es zu klären, welche Merkmale beziehungsweise Defekt-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

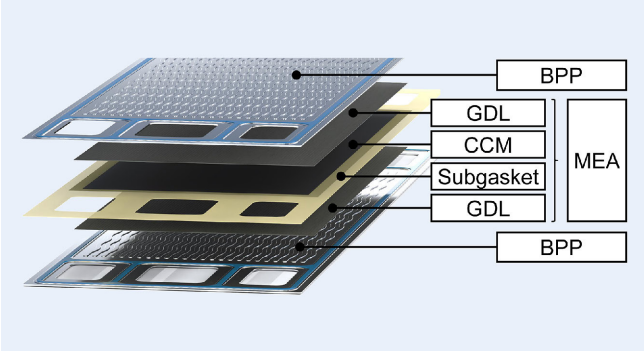

Bild 1. Aufbau einer Brennstoffzelle.
Grafik: wbk, Karlsruher Institut für Technologie

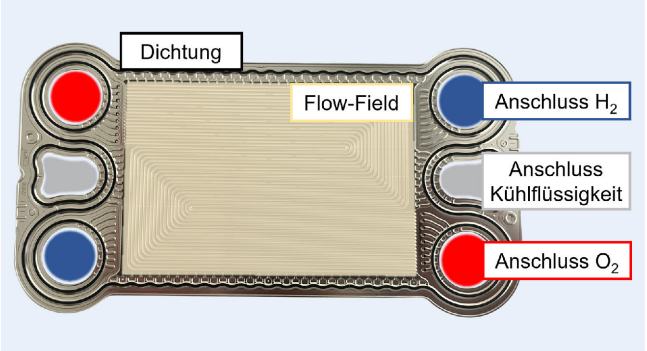

Bild 2. Merkmale einer Bipolarplatte.
Grafik: wbk, Karlsruher Institut für Technologie

bilder für das Brennstoffzellensystem als besonders kritisch anzusehen sind und mittels Inline-Messtechnik geprüft werden müssen. Andererseits muss ermittelt werden, welche fertigungstechnischen Verfahren geeignet sind, um diese Defektbilder in die Referenzbauteile einzubringen. In diesem Beitrag wird der Fokus insbesondere auf Defektbilder der Bipolarplatte gelegt. Diese weist im Vergleich zur Membran-Elektroden-Einheit eine längere Lebensdauer auf und ist somit besser für das Remanufacturing geeignet [10].

2 Grundlagen der Brennstoffzellentechnik

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise von Brennstoffzellen gegeben. Besonderer Fokus liegt dabei auf den charakteristischen Eigenschaften der Bipolarplatte (BPP), die mittels optischer Messtechnik geprüft werden soll.

2.1 Aufbau und Funktionsweise eines PEM-Brennstoffzellenstacks

Das Grundkonzept von Brennstoffzellensystemen ist bereits seit vielen Jahren bekannt [11]. Dennoch werden zum aktuellen Stand der Technik verschiedene Brennstoffzellensysteme in der Literatur erforscht, die hinsichtlich ihres Aufbaus und der verwendeten Medien erheblich variieren können [12]. Der Stack bildet das Kernelement des Brennstoffzellensystems. Im Allgemeinen besteht dieser aus mehreren, in Reihe geschalteten Einzelzellen, die unter Druck zusammengepresst werden. Die in diesem Beitrag untersuchte PEM-Brennstoffzelle verwendet eine Polymer-Elektrolyt-Membran zur Trennung der Medien Wasserstoff und Sauerstoff. Der Aufbau einer Zelle innerhalb des Brennstoffzellenstacks ist in **Bild 1** veranschaulicht.

Eine Zelle setzt sich jeweils aus zwei Monopolarplatten und einer Membran-Elektroden-Einheit zusammen, die, wie in Bild 1 dargestellt, zueinander angeordnet sind. Werden die Zellen aufeinandergestapelt, so grenzen jeweils zwei Monopolarplatten aneinander an. Sie werden deshalb meist in Form einer Bipolarplatte zusammengefasst [10]. Der Aufbau der Membran-Elektroden-Einheit kann abhängig von dem betrachteten Design der Brennstoffzelle variieren. Die in diesem Beitrag betrachtete Brennstoffzelle verwendet eine MEA bestehend aus jeweils zwei Gasdiffusionsschichten (GDL), dem Subgasket, und der katalysatorbeschichteten Membran (CCM) [5].

Die Reaktionsmedien (Wasserstoff und Sauerstoff) werden der Brennstoffzelle isoliert voneinander zugeführt. Die Geometrie der Anschlüsse stellt sicher, dass auf einer Seite der Platte der Wasserstoff und auf der anderen Seite der Sauerstoff vorliegt. Die besondere Sicken-Geometrie, auch Flow-Field genannt, ermöglicht eine homogene Verteilung der Medien und bildet die aktive Fläche der Bipolarplatte, auf der die GDL jeweils liegt. An der CCM oxidieren die Wassermoleküle und reagieren mit den reduzierten Sauerstoffmoleküle zu Wasser [5]. Dabei werden Elektronen abgegeben, die bei Anschluss eines externen Verbrauchers in Form von Strom gemessen werden können. Die Katalysatorbeschichtung auf der Membran ist notwendig, damit die Reaktion auch bei geringeren Temperaturen stattfinden kann [13].

Sowohl die MEA als auch die Bipolarplatte weisen hohe Kosten in deren Herstellung auf. Bei der MEA liegen dieser besonders in den kritischen Rohstoffen, die für die Katalysatorschicht auf der Membran verwendet werden [14].

2.2 Charakteristische Merkmale der Bipolarplatte und deren Funktion

Die große Anzahl an Fertigungsschritten bei der Herstellung der Bipolarplatte ermöglicht die Integration einer Vielzahl funktionsrelevanter Eigenschaften. Zu den charakteristischen und funktionsrelevanten Merkmalen der BPP zählen unter anderem das Flow-Field, dessen Beschichtung, die Dichtung und weitere Merkmale wie Positionierungshilfen [5]. **Bild 2** stellt einen typischen Aufbau einer kommerziell erwerbbaren Bipolarplatte für PEM-Brennstoffzellen dar.

Das Flow-Field ist durch seine spezielle Geometrie entscheidend für die gleichmäßige Verteilung der Reaktionsgase. Damit die Brennstoffzelle möglichst effizient arbeiten kann, ist ein enger Kontakt zur GDL für eine hohe elektrische Leitfähigkeit und breite Medienkanäle für einen möglichst hohen Gasdurchfluss notwendig [15]. Darüber hinaus trägt das Flow-Field zur Kühlung des Brennstoffzellenstacks bei und gewährleistet den Abtransport des durch die Reaktion entstehenden Wassers [15]. Die Beschichtung des Flow-Fields trägt zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit bei. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn das Grundmaterial der Bipolarplatte keine optimalen elektrischen Eigenschaften aufweist [16]. Dies ist zum Beispiel bei den weit verbreiteten Edelstahlplatten der Fall, die aufgrund der Langlebigkeit des Materials in aggressiven Umgebungen häufig genutzt werden. Neben der Leitfähigkeit wird die Beschichtung auch zur

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 1. Priorisierung der identifizierten Defektbilder von Bipolarplatten.

Defektbild	Fehlende Dichtung	Delle	Biegung	Kratzer	Löcher	Entfernte Beschichtung	Partikel auf Flow-Field	Korrosion
Kürzel	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Priorisierung	Sehr hoch	Hoch	Gering	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel

Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit der BPP eingesetzt [17].

Die Dichtung der Biploarplatte spielt eine kritische Rolle in der Sicherstellung der Systemintegrität. Sie verhindert das Austreten der Reaktionsmedien und sorgt gleichzeitig für die Trennung dieser, um gefährliche Reaktionen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff zu vermeiden [18]. Weitere Merkmale der Bipolarplatte sind Positionierhilfen, welche für die präzise Ausrichtung der Bipolarplatten bei der Montage relativ zur MEA und benachbarten Bipolarplatten verwendet werden.

3 Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen werden im ersten Schritt die durch die Messtechnik zu prüfenden Merkmale und Defektbilder der Bipolarplatten erarbeitet und klassifiziert. Anhand von Quellen aus der Literatur werden diese anschließend hinsichtlich Ihrer Relevanz bewertet und verglichen. Die Gewichtung der Merkmale erlaubt eine Priorisierung für die darauffolgenden Betrachtungen.

Basierend auf den wichtigsten identifizierten Merkmalen und Defektbildern werden im zweiten Schritt geeignete Fertigungsverfahren zur gezielten, reproduzierbaren Einbringung von Defektbildern in Bipolarplatten gesammelt. Zur Bewertung der Fertigungsverfahren und Ermittlung der optimalen Lösung werden spezifische Anforderungen definiert und die erarbeiteten Lösungsansätze diesbezüglich bewertet und verglichen. Abschließend erfolgt die Erprobung erster Fertigungsverfahren zur Einbringung von Defektbildern in Bipolarplatten.

3.1 Definition der Defektbilder

Anhand der in Kapitel 2 erwähnten relevanten Eigenschaften und Merkmalen der Geometrie von Bipolarplatten werden im Folgenden mögliche Defektbilder (D1-D8) abgeleitet und hinsichtlich Ihrer Relevanz verglichen und bewertet, **Tabelle 1**.

Eine zentrale Anforderung an die Bipolarplatte ist die Sicherstellung der Dichtheit sowohl innerhalb der einzelnen Zellen durch Trennung der Medien als auch nach außen. Leckage der Medien nach außen führt zu einem erhöhten Verbrauch der verwendeten Gase. Ein direkter Kontakt zwischen Wasserstoff und Sauerstoff ist als deutlich kritischer einzuschätzen, da dieser zu chemischen Reaktionen und somit zu schwerwiegenden Beschädigungen des Brennstoffzellensystems und der Umgebung führen kann. Defekte, die die Trennung der Medien negativ beeinflussen, sind daher als besonders kritisch einzustufen [18].

Die Abdichtung zwischen den Medien erfolgt bei der betrachteten Bipolarplatte an verschiedenen Stellen. Zwischen der Bipolarplatte und dem Subgasket wird meist ein Elastomer als Dichtungsmaterial verwendet, das durch das Verspannen des Stacks komprimiert wird und somit die Dichtheit zwischen den Medienzuläufen und der aktiven Fläche beziehungsweise dem Flow-Field

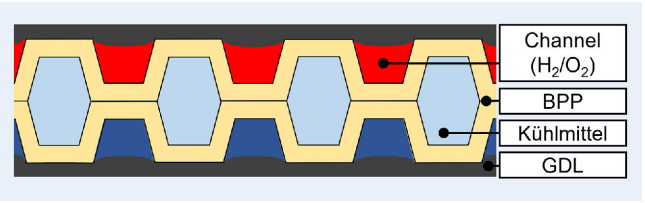

Bild 3. Querschnitt des Flow-Fields einer Bipolarplatte mit anliegenden GDL-Lagen und Medien. *Grafik: wbk, Karlsruher Institut für Technologie*

sicherstellt [18, 19]. Eine fehlerhafte Abdichtung zwischen Bipolarplatte und Subgasket kann durch das Fehlen von Dichtungsmaterial entstehen (D1). Bei einer möglichen Demontage der Platte in Anwendungen des Remanufacturing könnte das Dichtungsmaterial beispielsweise durch ein Werkzeug beim Auftrennen des Stacks für das Remanufacturing entfernt werden [20]. Ebenfalls denkbar ist das fehlerhafte Aufbringen der Dichtung im ursprünglichen Fertigungsprozess der Bipolarplatte.

Eine Verformung der Bipolarplatte kann ebenfalls zu Undichtheiten zwischen BPP und Subgasket führen. Liegt beispielsweise eine Delle im Dichtungsbereich der Bipolarplatte vor, so kann dies einen negativen Einfluss auf den Verpressvorgang des Stacks haben (D2). Wird die Elastomer-Dichtung nur mit einer geringen Kraft oder im kritischen Fall gar nicht komprimiert, so kann dies an dieser Stelle eine Leckage zur Folge haben. Die Medien werden nicht vollständig voneinander getrennt, wodurch es zu Wirkungsgradverlusten oder einer stark beeinträchtigten Funktion kommen kann. Ebenfalls denkbar ist eine Verbiegung des Blechs über die Länge der Platte (D3). Da diese Verformung jedoch durch das Verpressen des Stacks in gewissen Maßen kompensiert werden kann, sind Verbiegungen als deutlich weniger kritisch einzuschätzen.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass fehlendes Dichtungsmaterial als kritischer Defekt zu betrachten ist. Auch Verformungen wie Dellen sind zu berücksichtigen, während Verbiegungen über die gesamte Plattenlänge eher als unkritisch eingeschätzt werden können, da sie durch das Verpressen kompensiert werden können.

Die Geometrie bzw. das Material der Bipolarplatte selbst dient ebenfalls zur Trennung der Medien Wasserstoff, Sauerstoff und Kühlflüssigkeit, siehe **Bild 3**. Wird das dünnwandige Blech beschädigt, so kann dies ebenfalls zu Kontakt zwischen den Medien und damit zu kritischen chemischen Reaktionen führen. Defektbilder wie tiefe Kratzer (D4) oder Löcher (D5) auf der Oberfläche der BPP sind daher als sehr kritisch einzuschätzen. Aufgrund der dünnen Blechdicke können Dellen (D2) ebenfalls ein Durchstoßen des Materials bedingen. Die Entstehung derartiger Defekte ist beispielsweise bei der Demontage für das Remanufacturing durch ein Werkzeug oder bei der Handhabung der Platten denkbar. Das Defektbild eines Kratzers (D4) ist auch dann nicht zu vernachlässigen, wenn das Material der Bipolarplatte nicht durchstoßen wird. Durch derartige Defekte wird das beschädigte Mate-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Konzeptsynthese und -bewertung für Defektbild D1: Fehlendes Dichtungsmaterial.

Anforderung	Genauigkeit	Reproduzierbarkeit	Zeitlicher Aufwand	Wechselwirkung mit Umgebung	Gewichtete Summe
Gewichtung	4	5	2	4	
CNC-gesteuertes Abschaben	4	3	3	5	57
Fräsen mittels Stirnfräser	4	4	3	4	58
Lokales Erhitzen der Dichtung	2	3	2	2	35
CNC-gesteuertes Schleifen	3	4	3	4	54

rial besonders angreifbar für Korrosion, wodurch im langfristigen Betrieb Leistungsverluste auftreten können oder gegebenenfalls der Stack ausfällt [21].

Neben der Dichtheit der Bipolarplatte stellt die hohe Leitfähigkeit der Bipolarplatte eine der wichtigsten Anforderungen dar [16]. Diese ist notwendig, um Leistungsverluste durch den Innenwiderstand des Stacks zu minimieren. Wird die Beschichtung im Bereich des Flow-Fields beschädigt oder entfernt (D6), so steigt der elektrische Widerstand der Bipolarplatte. Ursache für einen derartigen Defekt könnte beispielsweise die Relativbewegung und damit Reibung zwischen Bauteilen bei der Montage oder beim Transport sein. Ebenfalls denkbar ist Kontakt zwischen Werkzeug und Bipolarplatte bei der Demontage des Stacks im Bereich des Remanufacturing oder die fehlerhafte Beschichtung im ursprünglichen Fertigungsprozess.

Anhaftende Partikel (D7) oder Korrosion (D8) auf dem Flow-Field können ebenfalls die Leitfähigkeit reduzieren und somit die Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellenstacks negativ beeinträchtigen [22]. Ebenfalls denkbar ist eine Beschädigung der angrenzenden GDL, welche sich wiederum in der Leistungsfähigkeit des Stack wiederspiegeln sollte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Defektbilder, wie fehlerhafte Dichtung, Dellen, Kratzer und Löcher aufgrund der damit verbunden Probleme der Dichtheit als sehr kritisch einzuschätzen sind und damit in den Untersuchungen mit höchster Priorität untersucht werden sollten (siehe Tabelle 1). Entfernte Beschichtung, Fremdpartikel, Korrosion oder Flüssigkeiten auf dem Flow-Field sind ebenfalls nicht zu vernachlässigen, aber sekundär zu betrachten.

3.2 Konzeptvergleich geeigneter Fertigungsverfahren zur gezielten und reproduzierbaren Einbringung von Defekten in Bipolarplatten

Für die erarbeiteten Defektbilder werden im nächsten Schritt mögliche Verfahren zur gezielten Einbringung in die Idealgeometrie gesammelt, verglichen und der beste Lösungsansatz ermittelt. Nach der obigen Analyse hat der Defekt des fehlenden Dichtmaterials (D1) den höchsten Einfluss auf die Funktion der Brennstoffzelle. Eine 100 %-Prüfung sämtlicher Bauteile hinsichtlich dieses Defektbildes ist somit unabdingbar. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieses Beitrags insbesondere auf den Defekt des fehlenden Dichtmaterials (D1) eingegangen. Für die Synthese der Konzepte wurden unterschiedliche Kreativtechniken, wie morphologischer Kasten und die 6-3-5 Methode, verwendet und vier mögliche Lösungsansätze ermittelt: Das Abschaben der Dichtung mittels CNC-gesteuertem Werkzeug, die Verwendung eines Stirnfräsers, das lokale Erhitzen und damit Aufschmelzen der Dichtung und das CNC-gesteuerte Abschleifen der Dichtung.

Um die zu erarbeitenden Konzepte gegenüberstellen zu können, müssen zuvor geeignete Bewertungskriterien ermittelt werden. Ein zentraler Aspekt ist die maximal erreichbare Genauigkeit beziehungsweise Präzision der Verfahren bei der Einbringung der Defekte, um sicherzustellen, dass auch kleinste, kritische Fehlerbilder hergestellt werden können. Weitere betrachtete Parameter sind die Reproduzierbarkeit des Defektbildes und dessen Position, der zeitliche Aufwand der Bearbeitung und der Einfluss auf andere Merkmale der BPP. Da diese Kriterien hinsichtlich ihrer Relevanz variieren, wird eine Gewichtung eingeführt, die **Tabelle 2** zu entnehmen ist. Da die entwickelten Verfahren in zukünftigen Untersuchungen mit einer Vielzahl zu prüfenden Bauteilen angewandt werden sollen, liegt ein besonderer Fokus auf der Reproduzierbarkeit der Verfahren. Da bereits kleinste Defektbilder einen Einfluss auf die Funktion der Brennstoffzelle haben können, ist auch die maximal erreichbare Genauigkeit des Fertigungsverfahrens von großer Relevanz, während der zeitliche Aufwand eher als Nebenaspekt gewichtet wird. Unter dem Kriterium der Wechselwirkung mit der Umgebung sind Nebeneffekte der Bearbeitung, wie Oberflächenqualität, chemische Beeinflussung des Materials, usw. zusammengefasst, die mit einer mittleren Gewichtung bewertet werden.

Die Bewertung der Lösungsansätze erfolgt ebenfalls in einer Skala von 1-5. Hinsichtlich der maximalen Genauigkeit bei der Einbringung der Defekte sind das CNC-gesteuerte Abschaben und die Fräsmaschine durch die breite Auswahl möglicher Werkzeuge dem Schleifen leicht überlegen. Bei der lokalen Erhitzung ist ein weniger scharfer Übergang zwischen den Bereichen mit entfernten und nicht-entfernten Dichtmaterial zu erwarten. Bezüglich der Reproduzierbarkeit der Defektbilder bieten das Fräsen, das Schleifen und das lokale Erhitzen den großen Vorteil, dass das entfernte Material aufgrund der rotierenden Schneide bzw. des Aufschmelzens entfernt wird. Wird das Dichtmaterial abgeschabt, so sind Materialreste am Ende des Bearbeitungswegs zu erwarten, dessen Ausprägung stark variieren kann. Bezüglich des zeitlichen Aufwands sind sämtliche Verfahren vergleichbar, da sie stets eine fixe Einspannung und das Verfahren des Werkzeugs benötigen. Lediglich bei dem lokalen Erhitzen ist eine erhöhte

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 3. Konzeptsynthese und -bewertung für Defektbild D6: Beschädigte Beschichtung.

Anforderung	Genauigkeit	Reproduzierbarkeit	Zeitlicher Aufwand	Wechselwirkung mit Umgebung	Gewichtete Summe
Gewichtung	4	5	2	4	
CNC-gesteuertes Abschaben	4	4	3	2	50
Fräsen mittels Stirnfräser	4	4	3	4	58
CNC-gesteuertes Schleifen	3	4	3	4	54

Zeitdauer für das Schmelzen des Materials zu erwarten. Das Erhitzen der Bipolarplatte ist auch hinsichtlich der Beeinflussung benachbarter Bereiche als ungünstig einzuschätzen. Für das Schleifen und Fräsen sind zwar Spuren auf der bearbeiteten Oberfläche zu erwarten, die einen Einfluss auf das Defektbild haben werden, jedoch sind diese deutlich weniger kritisch einzuschätzen als die Beschädigung anderer Bereiche der Bipolarplatte. Das Verfahren mittels Abschaben ist in dieser Bewertung der besser geeignete Lösungsansatz.

Der Vergleich der gewichteten Summen für die Lösungsalternativen macht deutlich, dass das lokale Erhitzen der Dichtung für die weitere Betrachtung weniger sinnvoll ist. Die zwei besten Lösungsansätze sind somit das CNC-gesteuerte Abschaben und das Fräsen mittels Stirnfräser, die im weiteren Verlauf dieses Beitrags in praktischen Versuchen erprobt werden sollen.

Aufgrund der hohen Ähnlichkeit der fertigungstechnischen Bearbeitung für die Einbringung der Defektbilder wird neben dem fehlenden Dichtungsmaterial (D1) auch das Fehlerbild der beschädigten Beschichtung (D6) untersucht. Die identifizierten, potentiell geeigneten Fertigungsverfahren haben dementsprechend eine hohe Übereinstimmung, siehe **Tabelle 3**. Der Ansatz des Aufschmelzens des Materials ist für das Entfernen der Beschichtung des Flowfields aufgrund der hohen Schmelztemperaturen auszuschließen. Das Verfahren der Laserablation stellt eine Alternative dar, bei der gezielt Materialschichten von einem Bauteil mittels Laser entfernt werden. Aufgrund der hohen Betriebskosten sowie dem Problem der gezielten Ablation ohne Einfluss auf das restliche Werkstück kann dieses Konzept jedoch verworfen werden [23]. Die Kriterien für die Bewertung der weiteren Lösungsansätze, deren Gewichtung und die Skala der Kriterien wurden analog zu der Bewertungsmatrix für Defektbild D1 angenommen.

Wie der Bewertungsmatrix entnommen werden kann, unterscheiden sich die Lösungsalternativen hinsichtlich mehrerer Kriterien kaum. Das Fräsen, Abschaben und Schleifen unterscheiden sich durch die gleiche Art der Ansteuerung und benötigter Montagevorrichtung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und des zeitlichen Aufwands kaum. Die reduzierte Genauigkeit beim Schleifen ist auf die begrenzte Werkzeuggröße und damit verbundene Defektgröße zurückzuführen. Die größten Unterschiede liegen bei der Wechselwirkung mit der Umgebung. Für das CNC-gesteuerte Abschaben sind für das Entfernen der Beschichtung im Vergleich zur Dichtung deutlich höhere Normalkräfte notwendig. Werden diese zu groß, so kann dies zu einer Verformung des Blechs führen. Zu kleine Kräfte können wiederum einen unvollständigen Abtrag der Beschichtung bedingen. Ähnlich zu der Betrachtung der zu entfernenden Dichtung (D1) sind auch an dieser Stelle für das Schleifen und Fräsen entsprechende Beschädigungen der Oberflächen durch die Bearbeitung zu erwarten. Weitere Wechselwirkungen mit der Umgebung sind unwahrscheinlich.

Die Ergebnisse der Bewertungsmatrix machen deutlich, dass das Fräsen mittels Stirnfräser und das Abschleifen der Beschichtung die besten Lösungsansätze darstellen. Um die Annahmen dieser ersten Bewertung zu untermauern und die identifizierten Fertigungsverfahren weiter zu untersuchen, werden diese im Folgenden in Versuchen erprobt und die Ergebnisse diskutiert.

3.3 Versuchsaufbau und Ergebnisse

Für die Defektbilder fehlendes Dichtungsmaterial (D1) und beschädigte Beschichtung (D6) wurden die zwei jeweils vielversprechendsten Lösungsansätze identifiziert. Im Folgenden werden diese nun durch Versuche weiter untersucht und die Ergebnisse verglichen und bewertet.

Für die Entfernung der Dichtung haben sich die Verwendung eines Stirnfräsers und das CNC-gesteuerte Abschaben als die zwei besten Konzepte herausgestellt. Für den Versuch mit der Fräsmaschine wurde die Bipolarplatte in einer üblichen CNC-Fräsmaschine eingespannt und mit einem Stirnfräser bearbeitet. Dabei wurde der Fräskopf vertikal in Richtung der Bipolarplatte verfahren, bis die Dichtung vollständig entfernt wurde. Anschließend wurde der Fräser um ein gewisses Maß in horizontaler Richtung bewegt, um einen definierten Abschnitt der Dichtung zu entfernen. Für das Abschaben mittels Werkzeugs mit scharfer Kante wurde ein Metallkeil verwendet, der vertikal mit einer definierten Kraft auf die Dichtung der Bipolarplatte gedrückt und anschließend horizontal verfahren wurde.

Die Ergebnisse beider Versuche wurden daraufhin mit einem hochauflösenden Mikroskop untersucht. Wie in **Bild 4** zu erkennen, konnte mit beiden Methoden die Dichtung im Bearbeitungsbereich vollständig entfernt werden. Die Oberfläche der mit der Fräsmaschine bearbeiteten Bipolarplatte (a) zeigt mit ihrem kreisförmigen Muster die typischen Merkmale einer gefrästen Oberfläche. Das Entfernen der Dichtung mittels Keil (b) hinterlässt hingegen deutlich weniger Spuren auf der Oberfläche der Bipolarplatte. Bei dieser Variante bleibt jedoch ein Rückstand der abgeschabten Dichtung zurück. Es wird deutlich, dass bei der Wahl des Bearbeitungsverfahrens eine Abwägung zwischen Genauigkeit der zu entfernenden Dichtungslänge und der Oberflächengüte getroffen werden muss.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

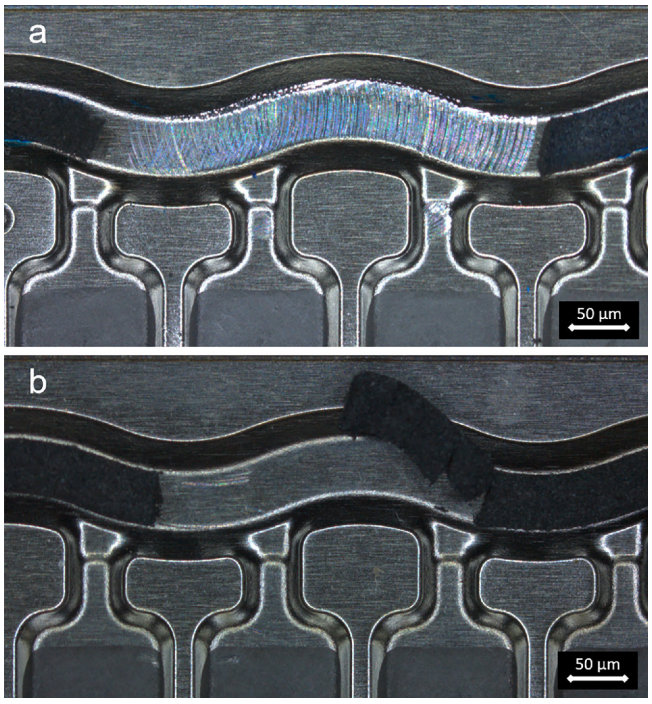

Bild 4. Versuche zur Defekteinbringung in die Dichtung (a: Fräsmaschine, b: Metallkeil). *Foto: wbk, Karlsruher Institut für Technologi*

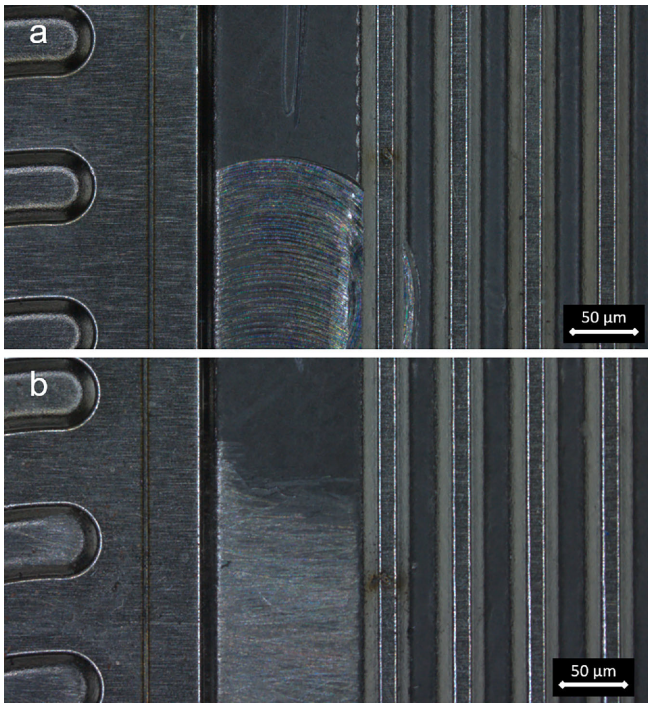

Bild 5. Versuche zur Defekteinbringung in die Beschichtung (a: Fräsmaschine, b: manuell Schmirgelpapier). *Foto: wbk, Karlsruher Institut für Technologie*

Im Anschluss an den Versuch zur Entfernung des Dichtungsmaterials mittels Fräsmaschine wurde ebenfalls die Defekteinbringung einer fehlerhaften Beschichtung (D6) untersucht. Dabei wurden der Fräs- und der Schleifprozess als vielversprechendste Ansätze erprobt. Bei dem Versuch mittels Fräsmaschine wurde die Bipolarplatte analog zum vorherigen Versuch eingespannt und anschließend mit einem Stirnfräser bearbeitet. Der Fräskopf wurde vertikal in die Beschichtung eingefahren und dann horizontal bewegt, um einen definierten Abschnitt der Beschichtung zu entfernen. Als Vergleichsbasis wurde ein manueller Versuch mit Schleifpapier durchgeführt. Die Bipolarplatte wurde fest eingespannt und das Schleifpapier parallel zur langen Seite der Bipolarplatte vor und zurück bewegt. Ein mikroskopisches Bild des Ergebnisses ist in **Bild 5** dargestellt.

Mit beiden Verfahren konnte die Beschichtung vollständig entfernt werden, auf der Oberfläche der beiden Platten sind jedoch jeweils unterschiedliche Merkmale festzustellen. Beim Fräsversuch (siehe Bild 5a) ist erneut das typische kreisförmige Muster wie im vorherigen Versuch für die Dichtung (siehe Bild 4a) zu erkennen. Im Gegensatz dazu weist der manuelle Versuch mit dem Schmirgelpapier eine andere Oberflächenstruktur auf (siehe Bild 5b). Die Tiefe der Eindringung in das Material ist zwar geringer, die Richtung der Bearbeitung ist jedoch auch hier deutlich erkennbar. Da die Beschädigung der Beschichtung in der Produktion oder bei der Demontage eher durch eine geradlinige Relativbewegung entsteht, ist das erlangte Defektbild mittels Fräsmaschine als eher ungünstig im Vergleich zur Bearbeitung mit Schleifpapier zu bewerten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Beschaffung und Herstellung von Defektbauteilen stellt eine zentrale Herausforderung für die Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Qualitätssicherung von Bipolarplatten dar. Dies ist besonders für Anwendungen des Remanufacturing kritisch. Werden Bipolarplatten mit dem Ziel einer Wiederverwendung oder Aufbereitung aus einem Brennstoffzellenstack separiert, so kann die Platte durch den Prozess der Demontage und den Betrieb im Feld zusätzliche Defektbilder aufweisen, die zu prüfen sind. Aus diesem Grund wurden im ersten Schritt die relevanten, zu prüfenden Merkmale von Bipolarplatten ermittelt und hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Dabei wurden die Defektbilder fehlendes beziehungsweise beschädigtes Dichtungsmaterial, Dellen, Kratzer und Löcher in der Bipolarplatte als besonders kritisch identifiziert. Aufgrund der hohen Relevanz der Dichtheit sowohl innerhalb der Brennstoffzelle als auch nach außen wurden für das Defektbild des fehlenden Dichtungsmaterials tiefergehende Untersuchungen angestellt und mögliche Fertigungsverfahren zur Einbringung des Defektbilds in Referenzbauteile erarbeitet und bewertet. Dabei lag ein besonderer Fokus auf der Reproduzierbarkeit und der erreichbaren Präzision bei der Einbringung der Defektbilder. In den durchgeführten Versuchen konnte festgestellt werden, dass das Dichtungsmaterial sowohl mittels Stirnfräser als auch durch Abschaben mittels CNC-geführten Werkzeug vollständig entfernt werden kann. Während Letzteres vor allem durch die geringe Beschädigung der Bauteiloberfläche hervorsticht, bietet der Fräsprozess Vorteile durch den sauberen Übergang zwischen bearbeiteten und nichtbearbeiteten Bereich der Bipolarplatte. Beide Verfahren sind dementsprechend für die Herstellung von Defektbauteilen für die Erprobung von Systemen zur Qualitätssicherung als geeignet einzuschätzen. Durch weitere Versuche mit variierender Geometrie der Werkzeuge kann die Qualität der erstellten Defektbilder weiter optimiert werden und die Reproduzierbarkeit der Fertigungsverfahren geprüft werden. Für eine vollständige Prüfung der funktionsrelevanten Merkmale von Bipolarplatten sind in zukünftigen Arbeiten weitere Defektbilder

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

hinsichtlich möglicher Fertigungsverfahren zur Einbringung in Referenzbauteile zu untersuchen. Die erreichten Ergebnisse dieses Beitrags ermöglichen das gezielte, reproduzierbare Einbringen von Defektbildern in Bipolarplatten, die anschließend für die Erprobung und Validierung von Qualitätssicherungs-Systemen eingesetzt werden können.

FÖRDERHINWEIS

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
03HY113C

Literatur

[1] Fraunhofer ISI: Brennstoffzellen: Wie entwickeln sich Technologien, Markt und Produktion in Zukunft weiter?. Stand: 2023. Internet: https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2023/presseinfo- 10-brenn-stoffzellen-wie-entwickeln-sich-technologien-markt-und-produktion-weiter.html. Zugriff am 20. November 2024
[2] Zhou, H.; Dai, J.; Chen, X. et al.: Understanding innovation of new energy industry: Observing development trend and evolution of hydrogen fuel cell based on patent mining. International Journal of Hydrogen Energy 52 (2023), pp. 548-560
[3] Schmidt, P.A.: The Contribution of new Production Technologies and Circular Economy Towards meeting the Future Demand of Proton-exchange Membrane Fuel Cells – A Literature Review. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Edit.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022. Hannover: publish-Ing. 2022, pp. 73-82
[4] Zhao, L.; Hong, J.; Yuan, H. et al.: Dynamic inconsistent analysis and diagnosis of abnormal cells within a high-power fuel cell stack. Electrochimica Acta 464 (2023) #142897
[5] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
[6] Lange, U.: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. Berlin: VDI ZRE 2017
[7] Fraunhofer IPM: Brennstoffzellenproduktion der Zukunft. Stand: 2023. Internet: https://www.ipm.fraunhofer.de/de/presse_publikationen/Presseinformationen/brennstoffzellenproduktion-iskaB-projekt.html. Zugriff am 20. November 2024
[8] Traxler, L.; Ginner, L.; Breuss, S. et al.: Experimental Comparison of Optical Inline 3D Measurement and Inspection Systems. IEEE Access 9 (2021), pp. 53952-53963
[9] Kurfer, J.; Westermeier, M.; Tammer C. et al.: Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. CIRP Annals 61 (2012) 1, pp. 1-4
[10] Tang, A.; Crisci, L.; Bonville, L. et al.: An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Renewable and Sustainable Energy 13 (2021) #022701
[11] Varga, Á: Introduction to Fuel Cell Technology. In: Kuang, K.; Easler, K. (Edit.): Fuel Cell Electronics Packaging. Boston: Springer 2007, pp. 1-32
[12] Han, F; Yoon S.; Raghavan, N. et al.: Technological trajectory in fuel cell technologies: A patentbased main path analysis. International Journal of Hydrogen Energy 50 (2024), pp. 1347-1361
[13] Yan, M.; Ren, J.; Dong, S. et al.: A bibliometric and content analysis of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells. International Journal of Electrochemical Science 18 (2023) #100350
[14] Klell, M.; Eichlseder H.; Trattner, A.: Brennstoffzellen. In: Klell, M.; Eichlseder, H.; Trattner, A. (Edit.): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, S. 141-198
[15] Zhang, Y.; Tu, Z.: Flow-field design of the bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell: Problem, progress, and perspective. Applications in Energy and Combustion Science 17 (2024) #100244
[16] Gao, X.; Chen, J.; Xu, R. et al.: Research progress and prospect of the materials of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). International Journal of Hydrogen Energy 50 (2024), pp. 711-743
[17] Liu, R.; Jia, Q.; Zhang, B. et al.: Protective coatings for metal bipolar plates of fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 47 (2022) 54, pp. 22915-22937
[18] Zhao, J.; Guo, H.; Xing, Y.: A review on the sealing structure and materials of fuel-cell stacks. Clean Energy 7 (2023) 1, pp. 59-69
[19] Gaugler, B.; Glück, R.; Speidel, A. et al.: Die metallische Bipolarplatte - Effiziente Lösung für Brennstoffzellenstacks. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 82 (2021) 9, S. 52–57
[20] Assadi, A. A.; Goes, D.; Baazouzi, S. et al.: Challenges and prospects of automated disassembly of fuel cells for a circular economy. Resources, Conservation & Recycling Advances 19 (2023) #200172
[21] Liu, G.; Hou, F.; Peng, S. et al.: Process and challenges of stainless steel based bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 29 (2022) 5, pp. 1099-1119
[22] Macauley, N.; Papadias, D. D.; Fairweather, J. et al.: Carbon Corrosion in PEM Fuel Cells and the Development of Accelerated Stress Tests. Journal of The Electrochemical Society 165 (2018) 6, pp. 3148-3160
[23] Dowding, C.: 19 - Laser ablation. In: Lawrence, J.; Pou, J.; Low, D.K.Y.; Toyserkani, E. (Edit.): Advances in Laser Materials Processing. Woodhead Publishing 2010, pp. 575-628

Johannes Buchholz, M.Sc.
johannes.buchholz@kit.edu
Tel. +49 152 / 3950-2659
Foto: wbk Institut für Produktionstechnik

Richard Börgardts, B.Sc.

Dominik Goes, M.Sc.

Dr.-Ing. Florian Stamer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-6 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -