ITERATIVER DESIGNPROZESS FÜR HOHLPRÄGE-GEWALZTE ELEKTROLYSEURPLATTEN AM BEISPIEL VON „HYVENTUS“

Franz Reuther, Sebastian Melzer, Alexander Geist, Stefan Polster und Verena Psyk

ABSTRACT: Für die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse werden metallische Platten zur Medienführung und Membrankontaktierung (im Folgenden: Elektrolyseurplatten) benötigt, deren umformtechnische Herstellung nach dem aktuellen Stand der Technik herausfordernd ist: Einerseits ist die Produktionsrate aufgrund der üblicherweise diskontinuierlichen Umformung beschränkt, andererseits sind je nach Plattengröße teilweise immens hohe Umformkräfte notwendig. Walzverfahren können aufgrund der kontinuierlichen, schrittweisen Umformung diese Limitierungen überwinden und sind daher für die Herstellung von Elektrolyseurplatten besonders interessant. Im vorliegenden Artikel wird der HyVentus-Elektrolyseurstack als Open-Source-Plattform der Referenzfabrik.H2 des Fraunhofer IWU vorgestellt und die iterative Vorgehensweise bei der Entwicklung des Stack- und Plattendesigns thematisiert. In diesem Kontext werden funktionstechnische Anforderungen mit strömungstechnischen und umformtechnischen Aspekten in Einklang gebracht. Die umformtechnische Herstellbarkeit der Elektrolyseurplatten im Hohlprägewalzen wird abschließend mit simulationsbasierten und experimentellen Untersuchungen bewertet.

KEYWORDS: Elektrolyse, Wasserstoff, Elektrolyseurplatten, Stack, Umformung, Hohlprägewalzen

1 Einleitung und Motivation

Technische Systeme zur Wasserstoffproduktion und Wasserstoffnutzung gewinnen im Kontext der Energiewende immer mehr Bedeutung. Neben der zunehmenden Produktion von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen [1] wird insbesondere für die Elektrolyseurproduktion in den kommenden Jahren ein stark wachsender Markt prognostiziert. In Anbetracht der derzeitigen Elektrolyseurkapazitäten von 57 MW in Deutschland (2022 [2]) und dem angestrebten Ausbau auf 5 GW bis 2030 (nationale Wasserstoffstrategie [3]) ist von einem massiv steigenden Bedarf an Elektrolyseuren auszugehen. Geplante immense Investitionen in der EU von etwa 40 Mrd. € in grünen Wasserstoff und Elektrolysekapazitäten verdeutlichen den bevorstehenden Markthochlauf [4]. Dies ist zugleich unumgänglich, um den bereits eingeschlagenen Weg der Dekarbonisierung mit Wasserstoffs in vielen Industriezweigen umzusetzen [5, 6].

Als zentrales Bauteil von Elektrolyseuren dienen vielfach zu einem Stack übereinander gestapelte Platten zur Medienführung, im Folgenden **Elektrolyseurplatten**, die die Zuführung des Wassers, die Kühlung des Stacks, die Kontaktierung zur Membran und die Abfuhr der Reaktionsprodukte realisieren (Abbildung 1). Im Gegensatz zu Bipolarplatten in PEM-Brennstoffzellen werden innerhalb von PEM-Elektrolyseuren in der Regel größere Blechdicken im Bereich von 0,5-2 mm verwendet. Aufgrund der geforderten Korrosionsbeständigkeit werden vorrangig beschichtete Edelstahllegierungen oder Titan Grade 1 als Grundwerkstoff der Elektrolyseurplatten eingesetzt [7].

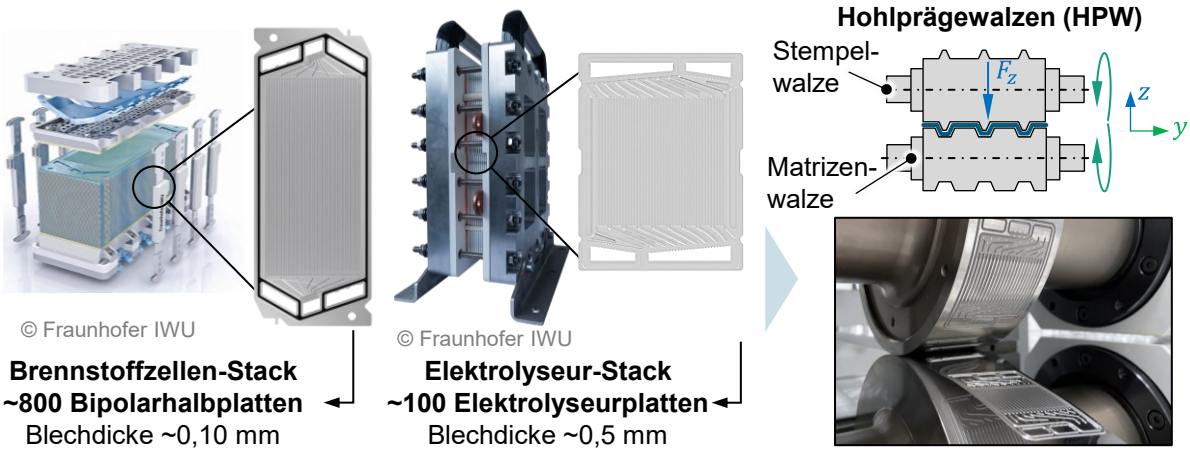


Abbildung 1 links: Metallische Platten zur Medienführung in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren; rechts: Funktionsprinzip Hohlprägewalzen am Beispiel von Bipolarhalbplatten-Demonstratoren.

Für die umformtechnische Herstellung von derartigen Platten zur Medienführung haben sich vorrangig Hohlprägen (HP) und Hochdruckblechumformen (HBU) als serienmäßige Umformverfahren etabliert [8]. Damit können filigrane Kanalstrukturen unter Beachtung der werkstoffspezifischen Formänderungsgrenzen hergestellt werden. Für die Umformung von Elektrolyseurplatten mit einer Blechdicke ≥ 0,5 mm haben diese etablierten Verfahren zwei wesentliche Nachteile: Die Produktionsrate ist aufgrund einer diskontinuierlichen Umformung sowie des separaten Handlings der großen Platten limitiert. Durch die vollflächige Umformung der Kanalstrukturen sind weiterhin große Umformkräfte bzw. Pressenschließkräfte notwendig, sodass die herstellbare Plattengröße beschränkt ist. Zur kostengünstigen, energie- und rohstoffeffizienten Produktion solcher Elektrolyseurplatten ist alternativ dazu eine walztechnische Herstellung durch **Hohlprägewalzen (HPW)** (Abbildung 1 rechts) in Betracht zu ziehen. Dieser vielversprechende technologische Ansatz wurde speziell für die Umformung von Bipolarhalbplatten in Brennstoffzellenanwendungen in den vergangenen Jahren eingeführt und weiterentwickelt [9-11]. Einerseits lassen sich damit perspektivisch größere Produktionsraten bei einer kontinuierlichen Bandbewegung realisieren (Rolle-zu-Rolle-Prozess), andererseits führt die schrittweise kontinuierliche Umformung im HPW zu signifikant niedrigeren Umformkräften [12], was sich im Kontext der Elektrolyseurplattenumformung generell positiv auf die realisierbare Plattengröße auswirkt. Im Gegensatz zu den konventionellen Verfahren ist vor diesem Hintergrund auch die Form der Elektrolyseurplatte ein entscheidender Einflussfaktor, da die Breite der Platte direkt die erforderliche Walzkraft bestimmt. Rechteckige, langgezogene Designs sind generell förderlich im Sinne einer möglichst geringen Walzkraft. Die technologische Herausforderung und zugleich der weitere Forschungsbedarf bestehen aktuell neben der Reduzierung der Faltenbildungstendenz vorrangig in der Verringerung der Ebenheitsabweichungen der umgeformten Platten. Ein **HPW-gerechtes Plattendesign** erfordert zusammenfassend eine explizite Berücksichtigung der technologischen Besonderheiten des HPW.

Neben der technologiespezifischen Herstellbarkeit der Elektrolyseurplatten sind weiterhin die **strömungstechnische Gestaltung** der Medienleitstrukturen und die **funktionstechnische Gestaltung** des Stacks entscheidend im Designprozess. Insbesondere die Auswahl und geometrische Integration eines geeigneten Dichtungssystems prägt, wie in Abbildung 2 anhand von Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen dargestellt, das Plattendesign. Dabei werden sowohl im BPP-Querschnitt als auch im Aufbau der Medienports völlig unterschiedliche

Geometrien benötigt. Dazu kommen unter anderem Aspekte wie eine optimale Strömung in den Verteilstrukturen sowie im eigentlichen Flowfield, die mechanische Stabilität gegen den Betriebsdruck der Zelle, ausreichend breite Kontaktzonen für spätere Fügeoperationen und die Ausbildung von Verbraucherstrukturen im nichtfunktionalen Bereich der Platte, um das Band im Umformprozess ausreichend abzustrecken. Aufgrund der funktionstechnisch notwendigen Kanalhöhen und strömungstechnisch anvisierten Kanalführungen sind Areale des Verteilers und des Dichtungsbereiches in der Regel umformtechnisch kritischer als der unmittelbare aktive Flowfield-Bereich.

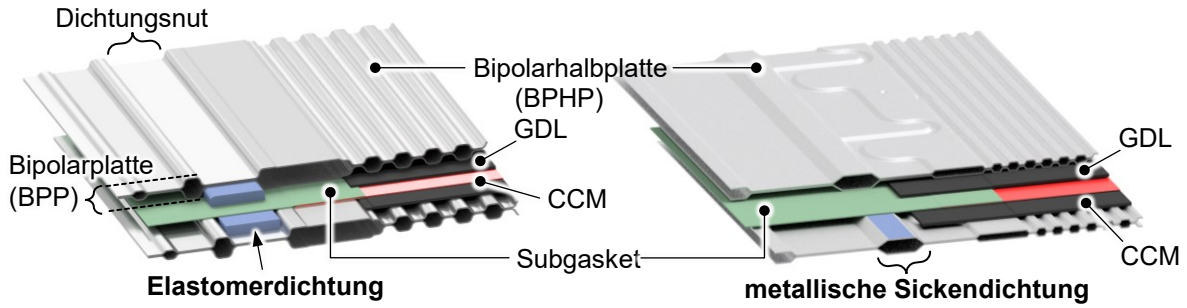


Abbildung 2: Einfluss des Dichtungssystems auf das Plattendesign am Beispiel von Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen, links: Elastomerdichtung, rechts: metallische Sickendichtung.

Zusammenfassend sind für die auftretenden multikriteriellen Zielkonflikte optimale Kompromisse in einem **iterativen Designprozess** zu identifizieren. Im vorliegenden Paper wird die Vorgehensweise dieses iterativen Designprozesses am Beispiel des HyVentus-Elektrolyseurstacks diskutiert und das Zusammenspiel von funktionellem Design, optimaler Durchströmung und prozesssicherer Umformbarkeit mittels Hohlprägewalzen thematisiert.

2 Designprozess zur Auslegung von Elektrolyseurplatten

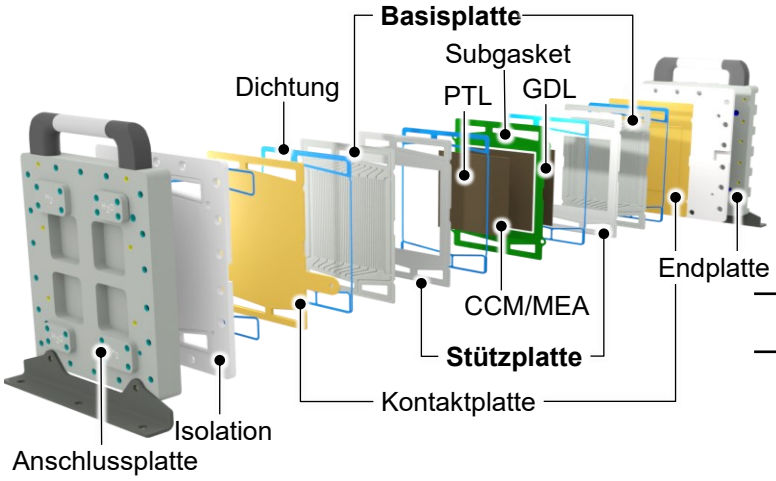
2.1 HyVentus – Open-Source Elektrolyseurstack

Der HyVentus X04-300/10 (Abbildung 3) ist eine Open-Source-Plattform, die von der Referenzfabrik.H2 am Fraunhofer IWU im Rahmen des Förderprojektes “H2Giga-FRHY: Referenzfabrik für hochratenfähige Elektrolyseurproduktion” [13] entwickelt wurde. Das System stellt für viele Teilkomponenten, wie die Elektrolyseurplatten, die porösen Transportlagen (PTL), die Gasdiffusionslagen (GDL), den Membran-Elektroden-Aufbau (MEA) und die Dichtungen, eine Testplattform im industriellen Maßstab dar, um sich bewusst von üblichen Laborgrößen zu lösen. Zentrale Komponenten sind das standardisierte Gehäuse und die eigentlichen Zellen, deren Aufbau zu Vergleichszwecken variiert werden kann:

- **Typ K**: Kunststoffrahmen und ebene Elektrolyseurplatten
- **Typ S**: stanzpaketierte, vollmetallische Zelleinheit
- **Typ M**: profilierte metallische Elektrolyseurplatten

Typ M, der im Folgenden weiter betrachtet wird, besteht hauptsächlich aus folgenden Komponenten (Abbildung 3):

- metallische, umgeformte und geschweißte Elektrolyseurplatte (Basisplatte + Stützplatte)
- Streckmetall-**PTL** auf der Anodenseite
- Streckmetall-**GDL** auf Kathodenseite
- Membran-Elektroden-Aufbau (**MEA**), eingebettet in eine Trägerfolie (Subgasket)
- **Dichtungen** zwischen Elektrolyseurplatte und Membran



Aktive Fläche	300 cm²
Plattengröße	300x350 mm²
Zellleistung	0,8 kW
Anzahl Zellen	10

Abbildung 3: Aufbau des Open-Source Elektrolyseurstacks HyVentus X04-300/10 (Typ M).

Im Stack- bzw. Elektrolyseurplattendesign müssen vielfältige funktionstechnische, strömungstechnische sowie umformtechnische Anforderungen und Restriktionen berücksichtigt werden, um eine optimale Performance des Elektrolyseurs zu erreichen. Dabei stehen viele dieser Anforderungen, wie beispielsweise das grundlegende strömungsoptimale Flowfield-Design, die Größe der Auflageflächen zum Fügen oder der Mindestabstand einzelner Strukturen nicht nur in gegenseitiger Wechselwirkung, sondern teilweise auch in Wiederspruch zu einer möglichst kompakten ressourceneffizienten Bauweise des Stacks. Ein typisches Problem ist in diesem Zusammenhang auch das Dilemma aus strömungstechnisch möglichst tiefen Kanälen im Verteiler- und Flowfieldbereich, die aber umformtechnisch teilweise nicht realisierbar sind. Flachere und dadurch breitere Kanäle sind aber angesichts einer möglichen GDL-Intrusion kritisch zu betrachten. Aus diesem Grund sind Kompromisse innerhalb des **iterativen Designprozesses zu identifizieren**, in dem schrittweise funktionstechnische Designaspekte mit strömungstechnischen und umformtechnischen Aspekten in Einklang gebracht werden müssen.

2.2 Iterativer Designprozess: Stack- und Plattendesign

Die funktionstechnischen Designaspekte der Elektrolyseurplatten wurden im Rahmen von H2Giga-FRHY mittels einer Kombination von **Basisplatten** mit Flowfield und zusätzlichen **Stützplatten** gelöst (Abbildung 4). Letztere überdacht die Kanäle der Basisplatte, sodass der Zellinnendruck (ca. 35 bar) die Membran nicht in die Basisplatte hineindrücken kann. Die beiden Platten werden miteinander verschweißt, um die Mediendichtheit zu gewährleisten. In der Stützplatte ist zudem die Freimachung für die PTL enthalten, um diese gegenüber der Membran auszurichten.

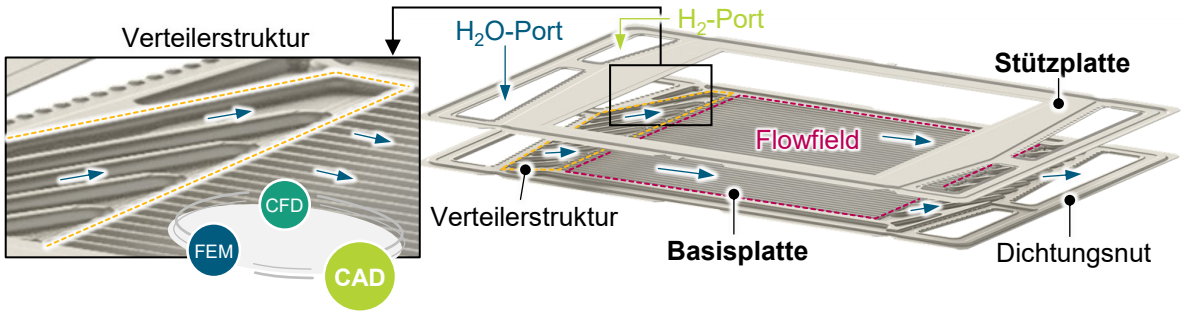


Abbildung 4: Aufbau der Bipolarplatte in HyVentus M04-300/10

Als flexibles **Dichtsystem** wurde eine Einlegedichtung aus einem chemisch stabilen Kautschuk gewählt [14]. Die einzelnen Dichtelemente liegen dabei in einer Nut, welche die Dichtung bei der Montage gegen Verrutschen schützt und im Betrieb gegen den Zellinnendruck stützt (Abbildung 5). Das Dichtsystem muss an den Medienports partiell unterbrochen werden, um die kontinuierliche Medienversorgung im Flowfield zu ermöglichen. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die gegenüberliegende Dichtung ausreichend gestützt wird, damit diese ihre Dichtfunktion nicht verliert. Entsprechend Abbildung 5 wurden beide funktionstechnische Aspekte über eine gewölbeartige Versteifungsstruktur inklusive eingebrachter Durchbrüche gelöst.

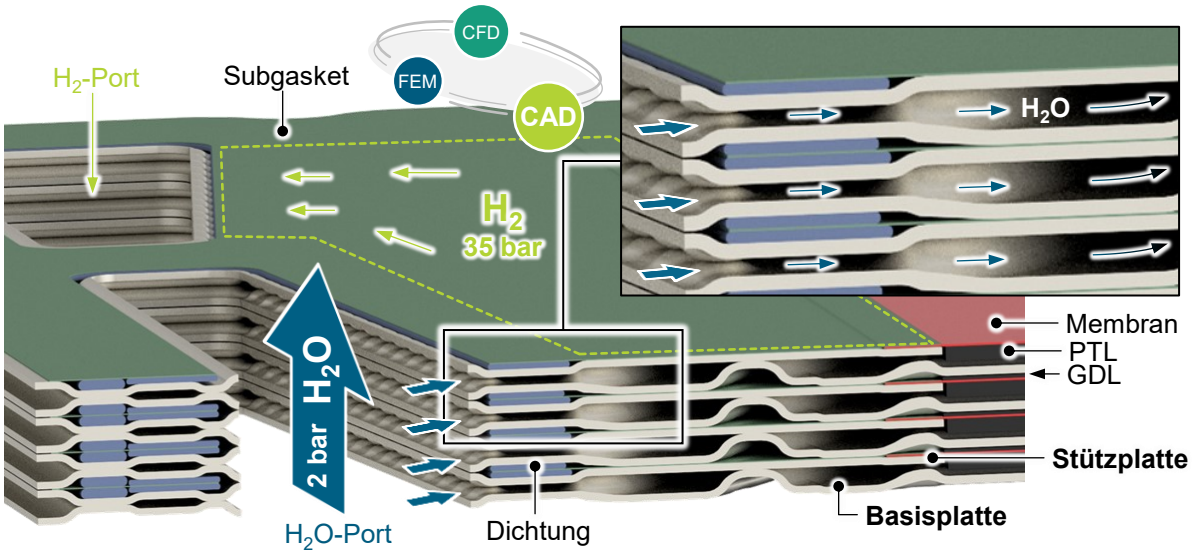


Abbildung 5: Funktionsprinzip Dichtungsdurchgang als Schnitt durch die Zelleinheit Typ "M".

Das durch den H_2O-Port zugeführte Wasser passiert anschließend den Verteilerbereich und wird durch die eingeprägten Leitstrukturen bis an den Anfang des geradlinigen Flowfields aufgeteilt. Diese Leitstrukturen sind so ausgelegt, dass sie auf beiden Seiten der Basisplatte das jeweilige Medium führen und gleichzeitig die aufliegende Stützplatte gegen den hohen Zellinnendruck auf der Wasserstoffseite abstützen können. Im Flowfield der Anodenseite gelangt das durch die PTL verteilte Wasser zur eigentlichen Reaktion an die Membran. Auf der Kathodenseite der Membran tritt der entstandene Wasserstoff sowie das, für den Transport nötige, Wasser aus und wird schließlich über die GDL und das gegenüberliegende Flowfield (entspricht der Rückseite der folgenden Basisplatte) in den H_2-Port abgeleitet.

2.3 Iterativer Designprozess: Strömungssimulation

Eine der Kernaufgaben der Elektrolyseurplatten besteht darin, das flüssige Arbeitsmedium (Wasser) möglichst gleichmäßig und effektiv entlang der reaktiven Oberfläche zu verteilen. Um eine bestmögliche Ausbeute an H_2 und eine gleichmäßige thermische Belastung zu garantieren, ist ein gleichmäßiger Massendurchsatz entlang der porösen Transportlage (PTL) notwendig. Hierfür sind parallel verlaufende Strömungskanäle im Flowfield vorgesehen. Das Flowfield des Wassers hat zwei wesentliche Aufgaben: Die Bereitstellung des Reaktanden für die Reaktion an der Oberfläche der MEA über eine poröse Transportschicht und die Abfuhr der entstehenden Reaktionswärme (konvektive Wärmeabfuhr). Während nur ein geringer Teil des Wassermassenstroms für die elektrochemische Reaktion genutzt wird, dient der überwiegende Teil zur Kühlung des Systems und wird anschließend über die Auslassseite dem Kreislauf zurückgeführt. Dadurch wird ein hoher Gesamtmassenstrom benötigt, welcher bei komplexen Strömungsfeldern zu hohen Druckverlusten führen kann. Mithilfe der numerischen Strömungsfeldberechnung (CFD) kann das Strömungsverhalten einer Zelleinheit analysiert werden (Abbildung 6).

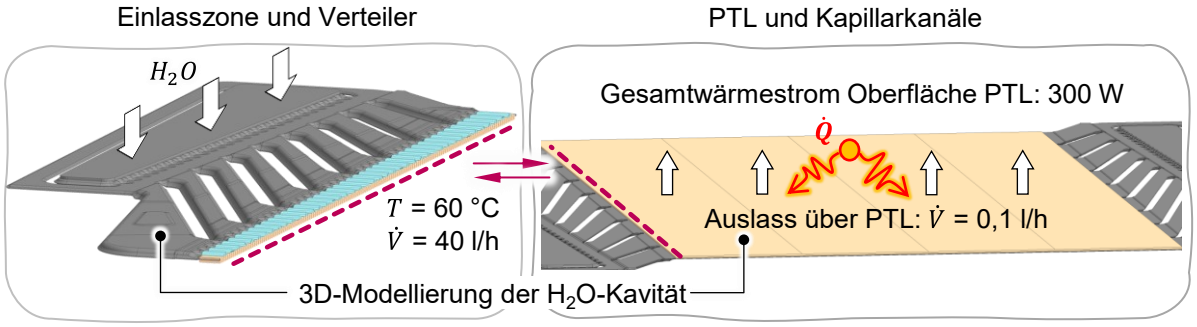


Abbildung 6: Aufbau und Randbedingungen der CFD-Simulation zur iterativen Optimierung des Verteilerbereiches.

Als Eingangsparameter des CFD-Modells werden der Gesamtmassenstrom des Wassers, die Einlasstemperatur und die Umsatzrate bei der elektrochemischen Reaktion definiert. Der Verlustwärmestrom entlang der reaktiven Zone wird über die Reaktionsrate der Reaktionsgleichung abgeschätzt. Dadurch kann die Erwärmung des Bauteils (Temperaturfeld) über den Wärmeübergang berechnet werden. Bei der CFD-Berechnung wird die Fluidregion mithilfe von Volumenelementen vernetzt und die PTL als poröser Festkörper modelliert. Aufgrund der sehr komplexen Strömungsgeometrie werden 5-9 Mio. Volumenelemente für die Diskretisierung der einzelnen Areale benötigt.

Durch Vergleich der CFD-Simulationen und mehrmalige Anpassung (Re-Design) der Strömungsfeldgeometrie wurde die Zelleinheit iterativ optimiert (Abbildung 7). Die Herausforderung dieser Designoptimierung bestand insbesondere in der Gestaltung der Leitstrukturen der Verteilerbereiche auf der Einlass- und Auslassseite, weil hier ein Kompromiss zwischen einer optimalen Strömungsführung und der umformtechnischen Herstellbarkeit gefunden werden muss. Ein wesentliches Zielkriterium der CFD-Analyse war dabei das Vermeiden von hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten, Totwassergebieten und Verwirbelungszonen. Diese sind maßgeblich für Verluste durch Dissipation verantwortlich und führen zu hohen Druckverlusten. Auf der anderen Seite ist ein möglichst konstanter Volumenstrom aller Flowfield-Kanäle wünschenswert, denn eine ungleichmäßige Durchströmung kann den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs reduzieren und zu Hitzestau führen. Am Beispiel des Plattendesigns des HyVentus-Stacks (Abbildung 7) wurden Bereiche mit hoher Strömungsgeschwindigkeit (rote Bereiche) und Totwassergebiete (blaue Bereiche) schrittweise im Zuge des Re-Designs

reduziert. Durch die strömungsgünstige Führung der Leitkanäle kann ein gleichmäßiger Massentransport im Flowfield sichergestellt werden.

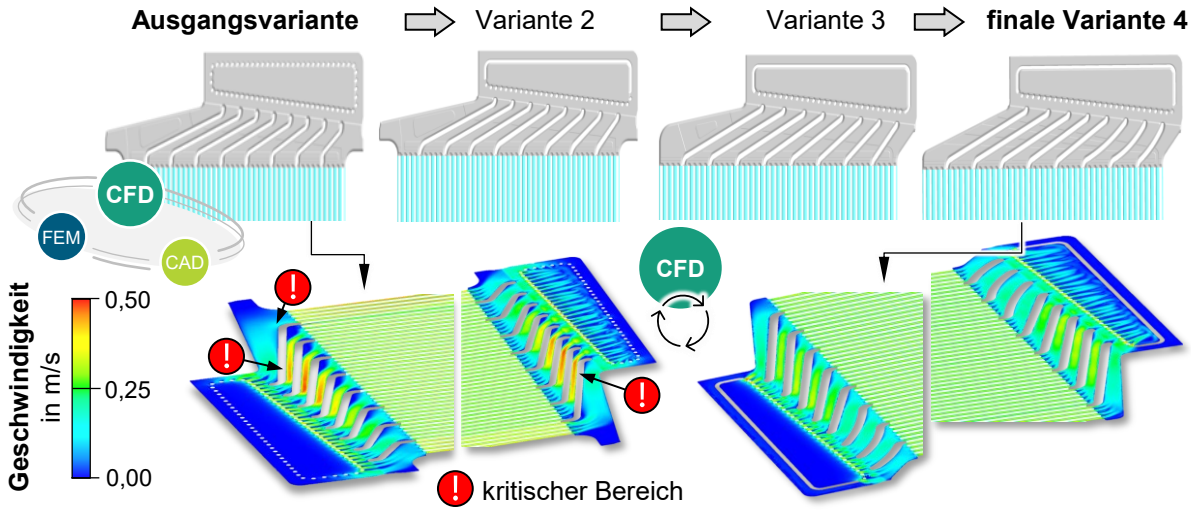


Abbildung 7: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen der Ausgangsvariante (links) und der optimierten Variante (rechts) nach mehreren Iterationsschritten.

2.4 Iterativer Designprozess: Umformsimulation

Funktionstechnische und strömungstechnische Anpassungen des Plattendesigns wirken sich stets auch auf die umformtechnische Herstellbarkeit der Platten aus, weshalb begleitend in jedem Iterationsschritt auch **Umformsimulationen** mittels der finiten-Elemente-Methode (**FEM**) durchgeführt werden. Da sich die Designänderungen in der Regel auf den unmittelbaren Verteilerbereich konzentrieren, ist die Abbildung repräsentativer Ausschnitte der gesamten Platte ausreichend und ermöglicht eine schnelle Machbarkeitsabschätzung. Durch die vergleichbare Umformcharakteristik von Hohlprägewalzen (HPW) und Hohlprägen (HP) wurde eine simulationsbasierte Bewertung in der Phase des iterativen Designprozesses in der Regel nur an vereinfachten HP-Modellen geprüft (Abbildung 8). Erst das finale Design wurde abschließend in einer deutlich aufwändigeren HPW-Simulation berechnet.

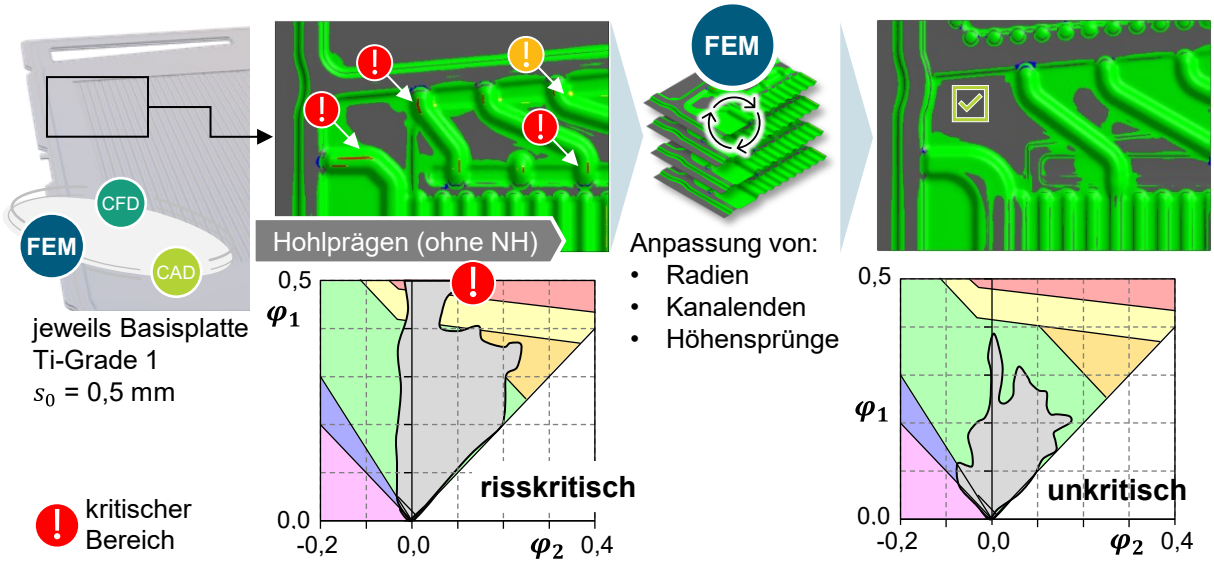


Abbildung 8: Umformtechnische Machbarkeitseinschätzung durch Grenzformänderungsanalyse.

Durch die Einordnung der Dehnungszustände im Grenzformänderungsdiagramm und den Bezug zur experimentell bestimmten Grenzformänderungskurve können lokale Rissbildungen

oder risskritische Bereiche prognostiziert werden. Neben der Modellierung des ggf. anisotropen elastisch-plastischen Materialverhaltens ist dabei ein ausreichender Netzfeinheitsgrad entscheidend, um die lokalen Dehnungsvorgänge im Kanalquerschnitt korrekt abzubilden [15].

Am Beispiel des Plattendesigns des HyVentus-Stacks (Abbildung 8) erfolgte die FEM-basierte Optimierung simultan für die Werkstoffe 1.4404 und Titan Grade 1 für eine initiale Blechdicke von s_0 = 0,5 mm. Die Titanlegierung erwies sich aufgrund der begrenzten Verfestigungsfähigkeit als tendenziell schlechter umformbar, weshalb hinsichtlich der Kanaltiefen und Radien deutliche Kompromisse eingegangen werden mussten, um ein einheitliches Referenzdesign zu erzeugen. Ausgehend von ersten Plattendesigns und den prognostizierten risskritischen Bereichen wurden zunächst Radien und Kanalenden verändert. Teilweise war nachfolgend auch eine Anpassung der Höhenunterschiede bzw. der Kanalhöhen notwendig. Gerade im Verteilerbereich ist der funktionstechnisch zu überbrückende Höhenunterschied der Leitstrukturen umformtechnisch herausfordernd. In diesem Zusammenhang ist stets die enge Verzahnung mit den funktionstechnischen und strömungstechnischen Aspekten im Zuge des iterativen Designprozesses zu beachten.

3 Hohlprägewalzen von Elektrolyseurplatten

3.1 Numerische Vorbetrachtungen über virtuelle Prozessmodelle

Für die Abbildung des HPW von Elektrolyseurplatten können die entwickelten virtuellen Modelle zum HPW von Bipolarhalbplatten für Brennstoffzellenanwendungen [11, 15] äquivalent genutzt werden. Damit ist sowohl eine Prognose der Plattenqualität hinsichtlich Ausformung der Kanalquerschnitte, umformtechnischer Machbarkeit, Faltendbildungstendenzen und resultierenden Ebenheitsabweichungen als auch eine Einschätzung der technologischen Prozesskräfte möglich. Ein Vorteil der virtuellen Prozessmodellierung liegt in den umfassenden Möglichkeiten detaillierter Technologievergleiche, die unter identischen Randbedingungen vorgenommen werden können (Abbildung 9). Bedingt durch die schrittweise kontinuierliche Umformung im HPW stellen sich im Vergleichsfall der Basisplatte des HyVentus-Stacks signifikant niedrigere Walzkräfte ein als in den Vergleichsverfahren HP und HBU. Für den exemplarischen Fall der Basisplatte (1.4404) sind beispielsweise 19.000 kN Schließkraft im HBU zur Gewährleistung der Dichtheit erforderlich (max. Druck 200 N/mm²). Die maximale Pressenkraft im HP ohne Niederhalter (HN) liegt dagegen nur bei 10.600 kN (55 %) und die maximale Walzkraft im HPW bei nur 150 kN (1 %). Diese technologiespezifischen Unterschiede sind nicht nur im Hinblick auf die Anlagendimensionierung und -kosten hervorzuheben, sondern auch bezüglich der Werkzeugbelastung, der elastizitätsbedingten Durchbiegung bzw. Verlagerung der Werkzeuge und den daraus resultierenden Ungenauigkeiten der Platten. Die schrittweise Umformung im HPW führt nach dem aktuellen Entwicklungsstand aber auch zu größeren Ebenheitsabweichungen der Platten nach dem Prozess, was insbesondere für Folgeprozesse und das Stacking kritisch zu sehen ist. Im vorliegenden Beispiel (Abbildung 9) sind Ebenheitsabweichungen δ_E von bis zu 13 mm nach dem Beschnitt bei Titan Grade 1 zu verzeichnen, sodass der gesetzte Grenzwert von δ_E = 5 mm aktuell deutlich verfehlt wird. Eine Umformung durch HBU würde hier im Vergleichsfall insgesamt deutlich geringere Ebenheitsabweichungen hervorrufen. Abgesehen davon ist eine walztechnische Herstellung von derartigen Elektrolyseurplatten auf Basis der Umformsimulationen generell machbar.

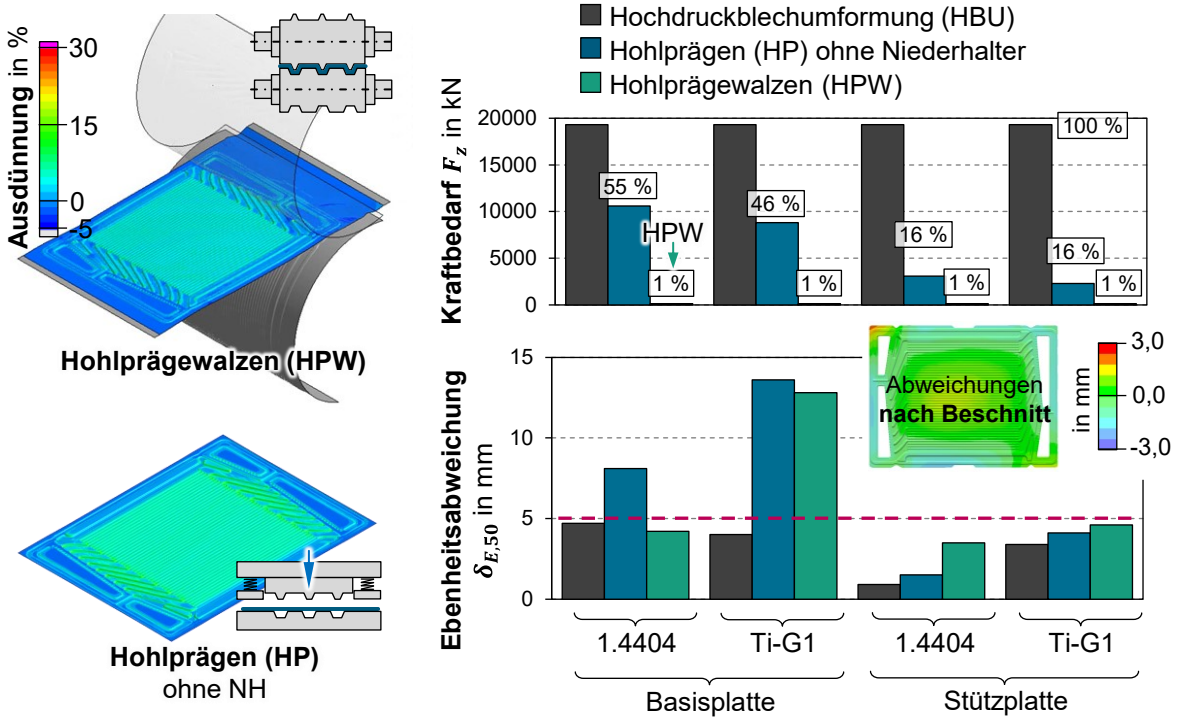


Abbildung 9: Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen Hochdruckblechumformung (HBU), Hohlprägen (HP) und Hohlprägewalzen (HPW) am Beispiel der Umformsimulation der Basisplatte für HyVentus X04-300 /10 (Typ M).

Die technologischen Vor- und Nachteile des HPW, die bereits im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen für die Bipolarhalbplattenumformung für Brennstoffzellenanwendungen abgeleitet wurden [16], können zusammenfassend auch für die Umformung von Elektrolyseurplatten bestätigt werden. Ausgenommen ist hier ausschließlich eine deutlich verringerte Faltenbildungstendenz im HPW aufgrund der größeren Blechdicke. Weitere Optimierungspotenziale bestehen im Zusammenhang mit den größeren Ebenheitsabweichungen – hier sind weiterführend sowohl technologische Maßnahmen zu erörtern als auch das Plattendesign selbst prozessspezifisch zu gestalten. Insbesondere die Areale der Port- und Verteilerbereiche werden im Zusammenhang mit quer- oder schräg orientierten Kanalgeometrien als Ursache rückfederungsbedingter Wölbungen nach dem HPW gesehen, was sich dann final in größeren Ebenheitsabweichungen äußert. Die zugrunde liegenden Wirkzusammenhänge aus Kanalgeometrie, Walzprozess und resultierender Ebenheitsabweichung müssen weiterführend untersucht werden.

3.2 Experimentelle Erprobung

Die walztechnische Erprobung von Basis- und Stützplatten des HyVentus-Elektrolyseurstacks wurde in Kooperation mit Profiroll Technologies GmbH erfolgreich auf einer Verzahnungswalzmaschine Rollex LHP an einzelnen Bandabschnitten umgesetzt (Abbildung 10). Zum Einsatz kamen unterschiedliche Plattendesigns (Abbildung 7), die jeweils für 1.4404 und Titan-Grade 1 im Hohlprägewalzprozess hergestellt wurden. Die experimentellen Vorstudien bestätigen die grundlegende Eignung des Verfahrens zur Elektrolyseurplattenumformung, zeigen gleichzeitig aber auch den weiteren Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Ebenheitsabweichungen auf.

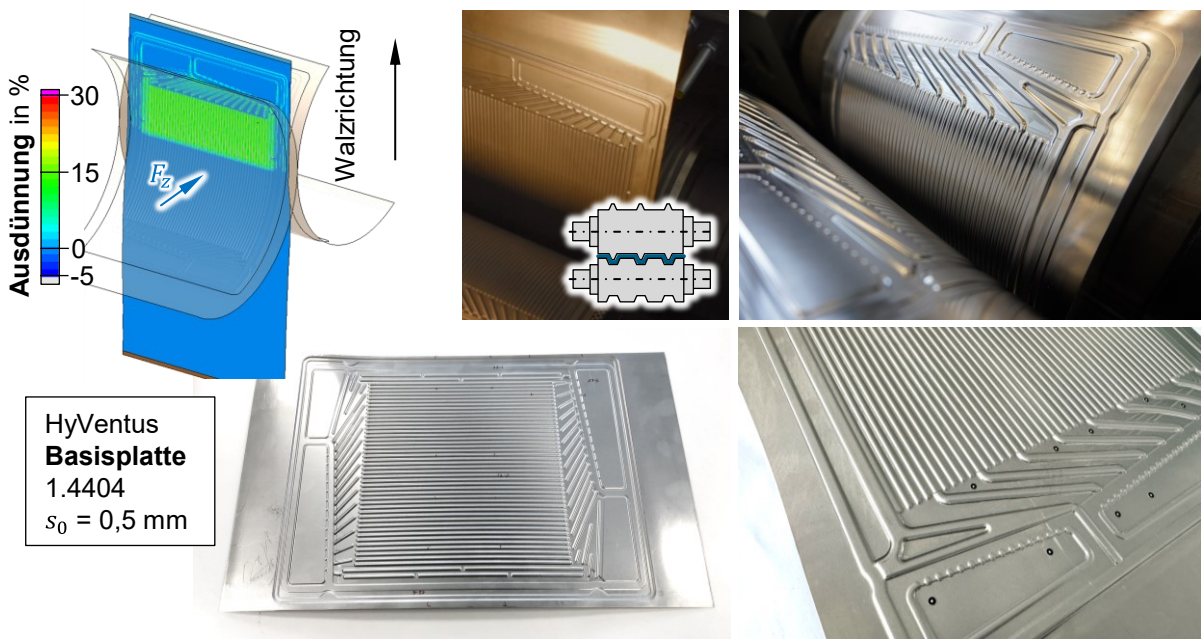


Abbildung 10: Experimentelle Umformversuche zum Hohlprägewalzen von unterschiedlichen Geometrievarianten des HyVentus Elektrolyseurstacks.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel des HyVentus-Elektrolyseurstacks als Open-Source-Plattform der Referenzfabrik.H2 des Fraunhofer IWU wurde gezeigt, dass die gegenseitigen Wechselwirkungen funktionstechnischer, strömungstechnischer und umformtechnischer Aspekte mit teilweise gegensätzlichen Anforderungen ein iteratives Vorgehen und mehrmaliges Re-Design erfordern. Die umformtechnische Herstellbarkeit der Elektrolyseurplatten wurde mit virtuellen Prozessmodellen und experimentellen Vorversuchen nachgewiesen. Eine walztechnische Herstellung mit einer schrittweisen kontinuierlichen Umformung ist insbesondere im Hinblick auf die signifikant niedrigeren Prozesskräfte im Vergleich mit konventionellen Technologien interessant, wenngleich auch aktuell größere Ebenheitsabweichungen der Elektrolyseurplatten resultieren. Dies zeigt zugleich den weiteren Forschungsbedarf auf – die weiterführende technologische Optimierung des Hohlprägewalzens für die Elektrolyseurplattenumformung und das technologiespezifische Plattendesign für möglichst geringe Ebenheitsabweichungen. Dafür müssen insbesondere die zugrunde liegenden Zusammenhänge zwischen komplexer Kanalgeometrie, Walzprozess und den resultierenden Formabweichungen weiter untersucht werden.

Literaturverzeichnis

[1] Riemer, M.; Zheng, L.; Eckstein, J.; Wietschel, M.; Pieton, N.; Kunze, R.: "Future hydrogen demand: A cross-sectoral, global meta-analysis. HYPAT Working Paper 04/2022." 2022, URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/HYPAT_Working_Paper_04_2022_Future_hydrogen_demand.pdf, letzter Zugriff: 22.03.2023.

[2] Hydrogen Europe: "Länder mit der größten Elektrolysekapazität für Wasserstoff in Europa im Jahr 2022 (in Megawatt)." 2024, URL: https://de.statista.com/statistik/

daten/studie/1350003/umfrage/elektrolysekapazitaet-fuer-wasserstoff-nach-laender-in-europa/, letzter Zugriff: 19.08.2024.

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): "Die Nationale Wasserstoffstrategie." 2020, URL: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, letzter Zugriff: 09.11.2023.

[4] Hydrogen Europe: "Geplante Investitionen in grünen Wasserstoff und Elektrolysekapazitäten in Europa nach Ländern bis zum Jahr 2030 (in Milliarden Euro, GW)." 2020, URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1194888/umfrage/geplante-investitionen-in-gruenen-wasserstoff-in-europa-nach-laendern/, letzter Zugriff: 19.08.2024.

[5] Reckter, B.: "Das Wasserstoffproblem - Wie die Chemieindustrie ihr Problem mit dem Wasserstoff lösen will." 2024, URL: https://www.vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/wie-die-chemieindustrie- ihr-problem-mit-dem-wasserstoff-loesen-will/, letzter Zugriff: 19.08.2024.

[6] Iestyn, H.: "Thyssen bangt um Wasserstoffversorgung." 2024, URL: https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/thyssenkrupp-bangt-um-wasserstoffversorgung/,

[7] Wang, T.; Cao, X.; Jiao, L.: "PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects." In: Carbon Neutrality, 1, 1, 2022, DOI: 10.1007/s43979-022-00022-8.

[8] Porstmann, S.; Wannemacher, T.; Drossel, W.-G.: "A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends." In: Journal of Manufacturing Processes, 60, 2020, S. 366–83, DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.041.

[9] Bauer, A.; Härtel, S.; Awiszus, B.: "Manufacturing of Metallic Bipolar Plate Channels by Rolling." In: Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3, 2, 2019, S. 48, DOI: 10.3390/jmmp3020048.

[10] Bauer, A.: "Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Analyse der umformtechnischen Herstellung metallischer Bipolarplatten." Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2020.

[11] Reuther, F.; Dix, M.; Kräusel, V.; Psyk, V.; Porstmann, S.: "Model validation of hollow embossing rolling for bipolar plate forming." In: International Journal of Material Forming, 17, 2, 2024, DOI: 10.1007/s12289-023-01804-w.

[12] Dix, M.; Reuther, F.; Porstmann, S.; Polster, S.; Melzer, S.: "Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten – Hohlprägen vs. Hohlprägewalzen. Forschungsprojekt P 1529 / IGF-Nr. 21715 BR." FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (Hrsg.), 2024.

[13] H2Giga Office: "Das Wasserstoff-Leitprojekt H2Giga.", URL: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/05C4AF0039AB2C08E0637E695E863F24/current/document/H2Giga_Projektbro-sch%C3%BCre.pdf, letzter Zugriff: 16.08.2024.

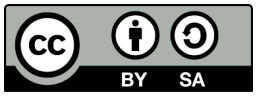
[14] Witte-Bodnar, K.; Wahl, S.; Mordvinkin, A.; Zillmann, S.; Bührig, M.; Wendt, M.; Pander, M.; Naumann, V.; Melzer, S.; Ilse, K.: "Reliability and qualification of gasket materials for PEM electrolysis." 4th International conference on Electrolysis, South Africa, 2023.

[15] Reuther, F.; Psyk, V.; Kräusel, V.; Dix, M.: "Simulation of Hollow Embossing Rolling for Bipolar Plate Forming using LS-DYNA©." 14th European LS-DYNA Conference, Baden-Baden, 2023.

[16] Porstmann, S.; Polster, S.; Reuther, F.; Melzer, S.; Nagel, M.; Psyk, V.; Dix, M.: "Objectives and fields of tension in the comparison of manufacturing processes for metallic bipolar plates." Fuel Cell Conference FC³, Chemnitz, 2021.

AUTORENVERZEICHNIS

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz
Korrespondenz: franz.reuther@iwu.fraunhofer.de; Tel.: +49 371 5397-1520



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet, unter folgender Creative-Commons-Lizenz: CC-BY-SA 4.0.

https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

DOI: https://doi.org/10.60687/2025-0089