

Zielgrößen und Spannungsfelder beim Vergleich von Herstellungsverfahren für metallische Bipolarplatten

Sebastian Porstmann*, Stefan Polster, Franz Reuther, Sebastian Melzer, Matthias Nagel, Verena Psyk und Martin Dix

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz, Germany

* **Korrespondenz:** sebastian.porstmann@iwu.fraunhofer.de; Tel.: +49 371 5397-1348

Elektrochemische Energiewandler sind eine hervorragende Möglichkeit, die Energieversorgung der Zukunft zu sichern. Eine Schlüsselkomponente der hierfür benötigten Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen und -Elektrolysezellen ist die Bipolarplatte. Für die Herstellung metallischer Bipolarplatten sind verschiedene umformende Fertigungstechnologien geeignet, die sich hinsichtlich erreichbarer Fertigungskosten, Endeigenschaften der Bipolarplatte und technologischer Prozessgrenzen unterscheiden. In diesem Artikel werden die aktuell präferierten Fertigungstechnologien wie die wirkmedienbasierte Blechumformung, sowie das Hohlprägen und das Hohlprägewalzen zur Herstellung von metallischen Bipolarplatten miteinander verglichen und bewertet.

KEYWORDS: ENERGIEWANDLER, BRENNSTOFFZELLEN, PEMBZ, PEMEZ, BIPOLARPLATTE, HERSTELLUNG, QUALITÄT

Objectives and fields of tension in the comparison of manufacturing processes for metallic bipolar plates

Sebastian Porstmann*, Stefan Polster, Franz Reuther, Sebastian Melzer, Matthias Nagel, Verena Psyk and Martin Dix

Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU, Chemnitz, Germany

* **Correspondence:** sebastian.porstmann@iwu.fraunhofer.de; Tel.: +49 371 5397-1348

Electrochemical energy converters are an excellent option to secure the energy supply of the future. A key component of the polymer electrolyte membrane fuel cells and -electrolyser cells required for this purpose is the bipolar plate. Various forming technologies with different manufacturing costs, final properties of the bipolar plates, and technological process limits are suitable for the fabrication of metallic bipolar plates. In this article, the currently preferred manufacturing technologies to produce metallic bipolar plates like precisely media-based sheet forming as well as hollow embossing and roll embossing, are compared and evaluated.

KEYWORDS: ENERGY CONVERTER, FUEL CELLS, PEMFC, PEMEC, BIPOLAR PLATE, MANUFACTURING, QUALITY

1 Einleitung und Motivation

Mit der Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft wird es möglich, einen großen Beitrag zur Reduktion von Treibhausemissionen zu leisten. Das gelingt insbesondere dann, wenn grüner Wasserstoff in ausreichenden Mengen erzeugt, effizient gespeichert, transportiert und verwertet werden kann. Hierfür hat die Bundesregierung mit der „Nationalen Wasserstoffstrategie“ einen entsprechenden Handlungsrahmen geschaffen. Die Brennstoffzelle steht hierbei im Fokus der Wasserstoffnutzung. Das gilt für stationäre wie auch mobile Anwendungen. Prognosen des VDMA zufolge, kann der Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) im Jahr 2030 auf bis zu sechs Prozent und bis 2040 auf ca. 12 % steigen [1]. Bezogen auf das in den letzten fünf Jahren durchschnittliche jährliche Produktionsvolumen von ca. 91,5 Mio. Pkw und Nutzkraftfahrzeugen [2], entspricht das über 10 Mio. Kraftfahrzeugen pro Jahr. Für die Erzeugung von Wasserstoff werden Elektrolyseure und für die Verwertung Brennstoffzellen in unterschiedlich Ausführungsvarianten genutzt. In beiden Bereichen haben sich Polymer-Elektrolyt-Membran-Systeme, kurz PEM-Systeme, als besonders geeignet erwiesen. Bei der Erzeugung und der Verwertung werden in den PEM-Systemen Bipolarplatten (BPP) zur Verteilung der Reaktanten benötigt. Hierfür eignen sich als Grundwerkstoff Metalle und grafitbasierte Verbundwerkstoffe, wie in [3] näher beschrieben wird.

Im Rahmen dieses Beitrages stehen metallische BPP und die verschiedenen umformenden Fertigungstechnologien zu deren Verarbeitung im Fokus der Betrachtungen. Hintergrund und Motivation ist dabei, dass die Eigenschaften der BPP, deren Produktionsrate, Verfügbarkeit und Stapelbarkeit [4], wesentlich durch das zum Einsatz kommende Fertigungsverfahren beeinflusst werden. Es ist daher unabdingbar, die technologischen Prozessgrenzen zu geeigneten Umformverfahren zu ermitteln und anhand der Ergebnisse Schlussfolgerungen für zukünftige Prozessketten und Fertigungsszenarien zu ziehen. Hierbei stellen die Senkung von Fertigungskosten, die Steigerung der Produktionsrate pro Anlage und die Definition von zwingend zu erreichenden Qualitätsmerkmalen übergeordnete Ziele dar. Hintergrund ist, dass u. a. die aktuellen BPP-Kosten für Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMBZ) für den Pkw-Bereich zu hoch erscheinen. Ferner reicht die aktuelle BPP-Verfügbarkeit aufgrund der zu geringen Produktionskapazität bzw. Produktionsraten nicht aus, um im Pkw-Bereich größere Segmente abzudecken. Eine Einschätzung zu Kostenpositionen und -faktoren für PEMBZ-Stapel wurde in Analysen des U.S. Department of Energy (DOE) in [2,3] vorgestellt.

2 Herausforderungen bei der umformtechnischen Herstellung von Bipolar-Halbplatten

Vorrangig werden in diesem Artikel umformtechnische Herstellungstechnologien für metallische Bipolar-Halbplatten (BPHP) in der Anwendung Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMBZ) thematisiert, wobei die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse teilweise auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar sind, wie z. B. PEM-Elektrolysezellen (PEMEZ). Die Entwicklung von prozesssicheren Umformstrategien für die Herstellung von Fluss- und Verteilerfeldstrukturen bei möglichst hohen Produktionsraten kann nur erreicht werden, wenn alle auf den Umformprozess einflussnehmenden Teilaspekte Berücksichtigung finden und aufeinander abgestimmt sind. Aus diesem Grund werden nachfolgend die spezifischen Herausforderungen, die sich aus der BPHP-Geometrie und der Verfahrenstechnologie ergeben, auszugsweise dargestellt und deren Wechselwirkungen mit dem Umformprozess bzw. die sich daraus ergebenden Spannungsfelder analysiert. Im Rahmen dieser Analyse geht es vorerst nicht darum, die Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und weitere Betriebseigenschaften der hier

aus fertigungstechnischer Perspektive analysierten BPHP bzw. BPP zu bewerten. Der Fokus liegt auf dem vertiefenden Vergleich verschiedener Umformtechnologien und deren Bewertung anhand einer Referenz-BPHP zur Gewährleistung gleicher Randbedingungen. Hierbei wird eine Einschätzung zu den realisierbaren Produktionsraten, der Prozessrobustheit und der umformtechnisch reproduzierbaren Halbzeugqualität gegeben.

2.1 Einflüsse aus unterschiedlichen Bauteilgeometrien, Flussfeldstrukturen

Die Gestalt der BPHP nimmt nicht nur auf die spätere Performance der Brennstoffzelle Einfluss, sondern stellt unterschiedliche Anforderungen an den Umformprozess und beeinflusst zugleich die umformtechnisch realisierbare Bauteilqualität. Die Umformung von verschiedenen Bereichen der BPHP (Flussfeldstruktur FFS, Verteilerbereiche, Dichtkanäle und Bereiche der Medienzuführung) geht grundsätzlich mit inhomogenen Formänderungs- und Spannungszuständen einher, die sich vorrangig in unterschiedlichen Abweichungen zur Sollgeometrie niederschlagen. Kanalübergänge und Kanalenden sind häufig aufgrund der lokalen Dehnungszustände kritisch und müssen ggf. technologiespezifisch angepasst werden, um das Umformvermögen des Werkstoffes nicht zu erschöpfen. Die technologischen Grenzen hinsichtlich der umsetzbaren Kanalquerschnittsgeometrien (Kanaltiefe, Kopfradien, Kanalabstand, Flankenwinkel) variieren ebenfalls je nach Umformverfahren.

Die Einflüsse unterschiedlicher FFS auf den Umformprozess sind exemplarisch in Abbildung 1 unter Verwendung des rost- und säurebeständigen Edelstahls X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) mit einer Ausgangsblechdicke von 0,10 mm dargestellt. Vier unterschiedliche FFS mit gleichen Kanalquerschnittsgeometrien wurden durch FE-Simulationen eines Tiefziehprozesses verglichen (starre Wirkflächensimulation, einheitlicher Reibungskoeffizient $\mu_s = 0,10$). Diese Referenzgeometrien wurden am Fraunhofer IWU im laufenden Forschungsprojekt "Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten – Hohlprägen vs. Hohlprägewalzen" der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA [5] entwickelt, um verschiedene Umformtechnologien vergleichend zu bewerten. Die Besonderheit an diesen BPHP-Geometrien ist, dass nicht nur verschiedene Kanalstrukturen berücksichtigt wurden, sondern auch das ganzheitliche Plattendesign mit Verteilerstruktur und Medienports. In Abhängigkeit des jeweiligen Flussfeldes gehen Kanalstrukturen, Umlenkungen und andere Verprägungen einerseits mit einer geometrisch bedingten Versteifungswirkung einher, andererseits rufen diese aber auch nach dem Umformprozess unterschiedlich stark ausgeprägte Rückfederungserscheinungen und Ebenheitsabweichungen hervor, die ggf. technologisch zu kompensieren sind.

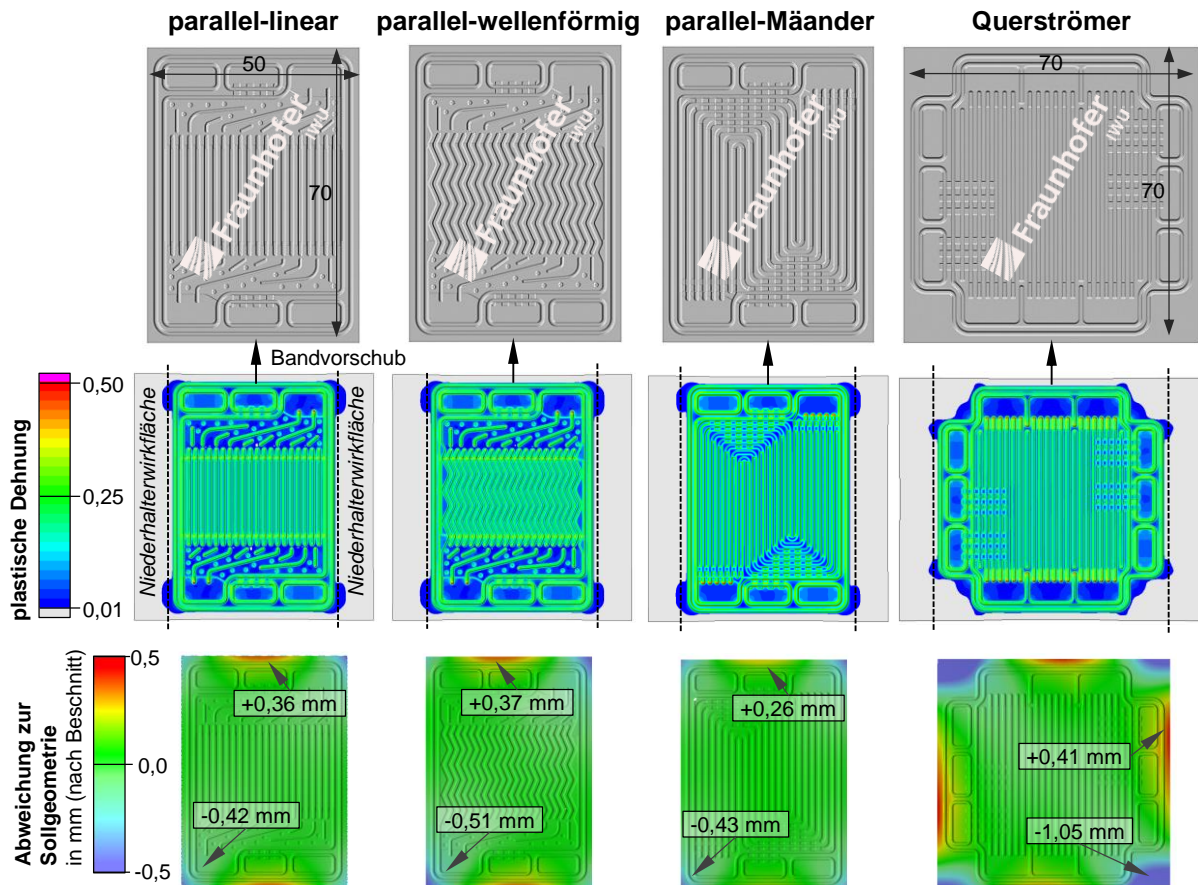


Abbildung 1: BPHP mit unterschiedlichen Flussfeldstrukturen (FFS) und deren Auswirkungen auf die plastische Dehnung und Geometrieabweichung in der Tiefziehsimulation (Folgeverbundprozess).

2.2 Einflüsse aus unterschiedlichen Blechdicken

Ein wesentlicher Parameter bei der umformtechnischen Herstellung metallischer BPHP ist weiterhin die Ausgangsblechdicke, die sich für PEMBZ im Bereich von 0,05 – 0,10 mm bewegt. Generell ist die umformtechnische Verarbeitung solcher dünnen Metallbänder herausfordernd aufgrund von hoher Neigung zur Faltenbildung, geringerem Formänderungsvermögen und Schwierigkeiten beim Handling und Positionieren. Die Verwendung von Blechdicken bis 0,05 mm ist vorrangig durch eine Verringerung des Werkstoffeinsatzes und der Höhe sowie des Gewichts der Brennstoffzelle getrieben, führt aber auch zu einer geringeren Grenzformänderung sowie zu einer verringerten Eigensteifigkeit und Knickstabilität, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Faltenbildung im Umformprozess erheblich steigt. Als Werkstoffe sind für BPHP für PEMBZ-Anwendungen vorrangig rostfreie Edelstähle und ferner Titanlegierungen von Bedeutung, deren unterschiedliches Umformverhalten und -vermögen ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbaren Bauteileigenschaften ausübt.

Diese Einflussfaktoren lassen sich zum Teil auch auf die Herstellung von BPP für PEM-Elektrolysezellen (PEMEZ) übertragen. Aufgrund der höheren Ausgangsblechdicke (0,2 – 0,5 mm) besteht hier eine größere Eigensteifigkeit mit positivem Effekt auf die Tendenz zur Faltenbildung. Die größeren Flächenformate von PEMEZ (bis 5.000 cm²) gegenüber PEMBZ (bis 800 cm²) führen aber zu höheren Prozesskräften bei der umformtechnischen Herstellung.

2.3 Einflüsse der Umformtechnologie auf die BPHP-Qualität

Neben der BPHP-Sollgeometrie und den Halbzeugeigenschaften des Feinstbleches nehmen das Umformverfahren und die Prozessrandbedingungen in hohem Maße Einfluss auf die realisierbare BPHP-Qualität. Im Kontext der metallischen BPHP-Herstellung sind hauptsächlich Fertigungstechnologien wie die wirkmedienbasierte Blechumformung, sowie das Hohlprägen und das Hohlprägewalzen relevant. Die inkrementelle Blechumformung wird insbesondere wegen ihrer vergleichsweise geringen Produktionsrate in diesem Beitrag nicht näher behandelt, kann jedoch für Sonderanwendungen und beim Prototypenbau von BPP vorteilhaft sein [6].

Bevor im Abschnitt 3 anhand einer konkreten Referenz-BPHP auf die Details der Verfahrensunterschiede eingegangen wird, soll an dieser Stelle überblicksweise erwähnt werden, dass sich die unterschiedlichen Verfahrensprinzipien hinsichtlich Prozesskinematik, Werkzeug- und Anlagenkonzept auch in unterschiedliche Bauteilqualitäten niederschlagen. So können sich rückfederungsbedingte Ebenheitsabweichungen nicht nur in Abhängigkeit der FFS unterschiedlich ausbilden, sondern die Wahl der Umformtechnologie selbst kann unterschiedlich stark ausgeprägte Abweichungen hervorrufen. Bestimmte Kombinationen aus BPHP-Geometrie bzw. deren Orientierung im Band und der Umformtechnologie können Abweichungen über die tolerierbaren Grenzwerte hinaus verstärken (bspw. feststellbar beim Hohlprägewalzen von FFS mit parallel-linearen Kanälen quer zur Bandlaufrichtung). Eine systematische und vollumfängliche Erfassung aller Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichsten Bauteilgeometrien und den einzelnen Umformverfahren ist äußerst komplex und bedarf auch zukünftig weiteren Untersuchungen. Grundlegend ist entscheidend, kontinuierlich Erfahrungen über die technologischen Zusammenhänge auszubauen, um die Umformprozesse so anzupassen, dass die Anforderungen an die Bauteilqualität eingehalten werden können.

3 Ergebnisse des technologischen Verfahrensvergleiches zur BPHP-Herstellung

Der detaillierte technologische Verfahrensvergleich wird in diesem Artikel anhand einer konkreten BPHP-Referenzgeometrie durchgeführt, um möglichst gleiche Randbedingungen zu gewährleisten. Die ausgewählte Geometrie (Abbildung 2) stellt eine Anoden-BPHP einer funktionsfähigen Demonstrator-Brennstoffzelle dar, die in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE [7] entwickelt wurde. Die Randbedingungen bei der Auslegung der Geometrie entstammen hauptsächlich geometrischen Restriktionen der Brennstoffzellen-Testvorrichtung (Baltic high amp Testzelle) des Fraunhofer ISE (z. B. die halbkreisförmigen Ausbuchtungen der Randkontur im Bereich der Medienzu- und -abführung) sowie den strömungstechnischen Anforderungen einer miniaturisierten Zelle. So wurde beispielsweise die Kanaltiefe auf 0,24 mm gegenüber der in der Praxis üblichen Tiefe von ca. 0,40 mm reduziert, um den nötigen Druckverlust über den kurzen Strömungsbereich darzustellen.

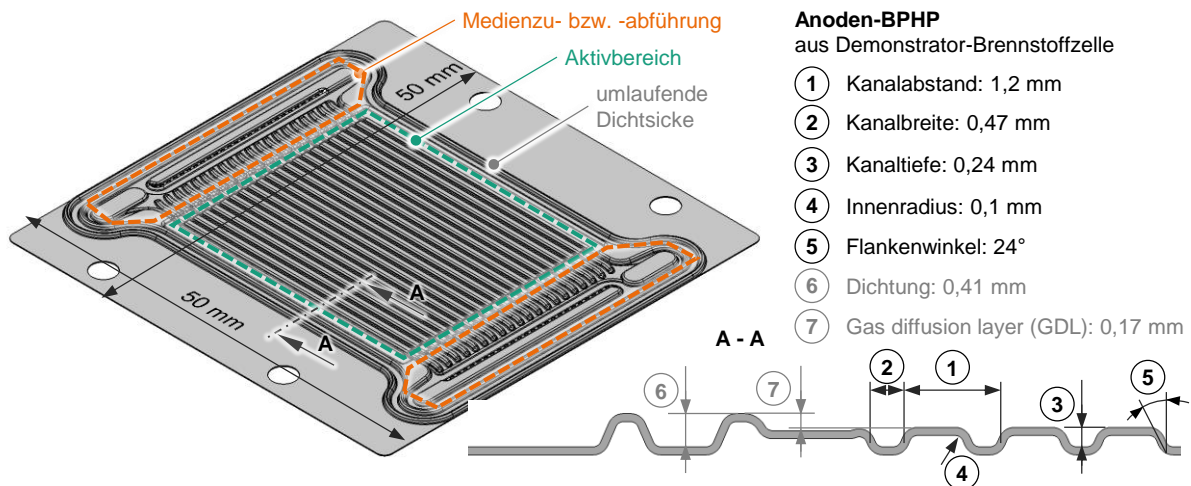


Abbildung 2: Referenzgeometrie Anoden-BPHP mit parallel linearer Flussfeldstruktur.

Folgende Kriterien werden nachfolgend für den qualitativen Verfahrensvergleich herangezogen:

- die Komplexität und der Fertigungsaufwand des Umformwerkzeuges
- die notwendige Umformmaschine, Transporteinrichtungen und evtl. Zusatzaggregate
- der Werkstoffausnutzungsgrad
- die Bauteilqualität hinsichtlich Ebenheitsabweichungen von der Sollgeometrie
- der Ausformgrad der Kanalstrukturen
- die erzielbare Produktionsrate

Übliche Zielstellungen für die Gesamtebenheit der einzelnen BPHP betragen ≤ 1 mm, weil sich größere Unebenheiten negativ auf die Elektrode-Membran-Einheit (engl. Membrane electrode assembly MEA) bzw. die Gasdiffusionsschicht (engl. Gas diffusion layer, GDL) auswirken können (lokale Druckspitzen o. Scherkräfte) oder das Stapeln zum Stack erschweren. Aufgrund der filigranen Kanalstrukturen sind Fertigungstoleranzen für Aktivteile im Bereich $\pm 0,005$ mm anzustreben. Die Basis für den Verfahrensvergleich bilden sowohl simulative als auch teilweise experimentelle Untersuchungen. Als BPHP-Grundwerkstoff kommt der Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) mit einer Ausgangsblechdicke von 0,10 mm zum Einsatz. Die getroffenen Aussagen beziehen sich zunächst ausschließlich auf die Referenz-BPHP und sind nur teilweise auf andere FFS und größere Plattengeometrien übertragbar, weil sich dort bspw. Rückfederungseffekte und Ebenheitsabweichungen in anderer Intensität ausbilden können.

3.1 Hohlprägen

Das Hohlprägen ist ein etabliertes Umformverfahren zum Einbringen von Versteifungssicken in Blechbauteilen [8, 9]. In der Regel wird die konstante Ausgangsbleche als Spalt zwischen den Formwerkzeugen (Stempel und Matrize) vorgehalten. Bei der umformenden Herstellung von BPHP kann es – äquivalent zum klassischen Tiefziehen – vorteilhaft sein, zusätzlich einen Niederhalter zur Steuerung des Werkstoffnachfließens im Randbereichen zu verwenden, um die Faltenbildung zu verringern (Abbildung 3).

Die Aktivteile werden im Umformwerkzeug über diverse Führungselemente, z. B. Führungssäulen, zueinander ausgerichtet, was hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Formteilfertigung und der Führungselemente stellt.

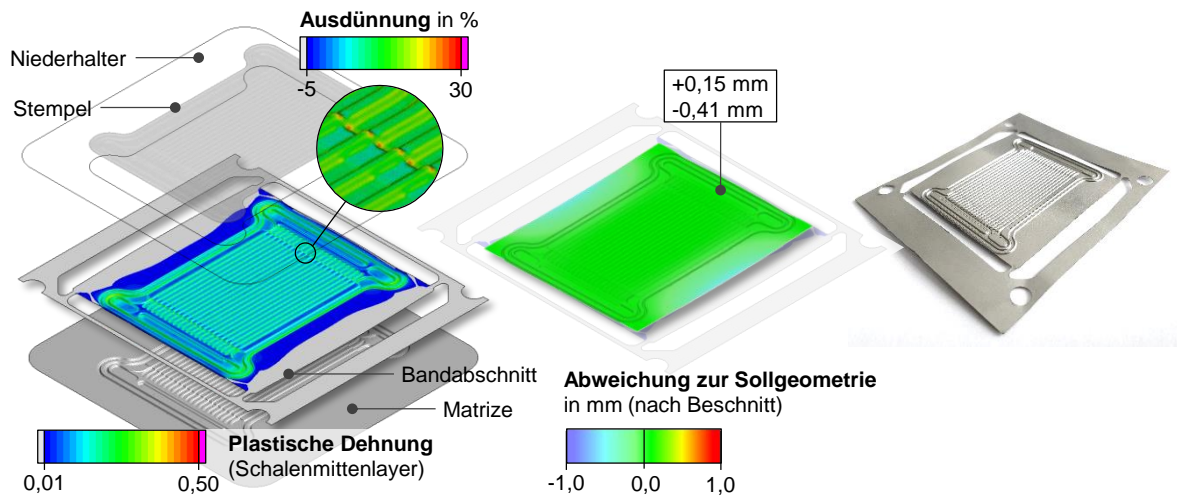


Abbildung 3: FE-Simulation des Hohlprägens am Beispiel einer Demonstrator-BPHP; links: Werkzeugaufbau und plastische Dehnung nach erfolgter Umformung; Mitte: Abweichung des rückgefederten Bauteils zur Sollgeometrie nach dem Beschnitt; rechts: umgeformtes Realbauteil.

Im betrachteten Referenzfall wird das Halbzeugband während des Pressenhubes mittels Niederhalter mit 30 kN gegen die Matrize geklemmt und der Stempel mit einer Kraft von 150 kN in die Matrize gedrückt, sodass die Kanalstrukturen ausgeformt werden (Abbildung 3). Dabei legt sich der Werkstoff jeweils an die Kopfradien (hervorstehende Geometrien) von Stempel und Matrize an. Dadurch kommt es zu prozessbedingten Werkstoffausdünnungen (hier bis 32 %), aus denen geometrische Abweichungen vom Referenzquerschnitt mit konstanter Blechdicke resultieren. Diese Abweichungen treten vorrangig im Bereich der Kanalflanken auf. Durch Variation der Niederhalterkraft kann der seitliche Einzug des Werkstoffs gesteuert und einer kritischen Ausdünnung entgegengewirkt werden. Mit einer Schwankungsbreite von absolut 0,5 mm, ermittelt auf Basis der Umformsimulation, ergibt sich eine ähnliche Sollgeometrieabweichung wie im Falle der wirkmedienbasierten Umformung. Das genannte Werkzeugkonzept wurde als Folgeverbundwerkzeug auf einer Feinschneidpresse realisiert. Hintergrund ist zum einen sowohl eine erreichbare Pressenhubfrequenz von 30 – 40 Hub/min als auch die mögliche Kombination von Prägen und Schneiden in einem Werkzeug. Für den nötigen Teiltransport innerhalb des Werkzeuges wird die BPHP aus einem Tragstreifen partiell freigeschnitten und umgeformt. Nach jedem Hub wird der Blechstreifen weiter transportiert, was bei einer Blechdicke von 0,05 – 0,1 mm nur durch geeignete Transportelemente, Positionierungselemente und einen nachgelagerten Zugmechanismus anstatt dem üblichen vorgelagerten Vorschubapparat möglich ist. Die Ausbringung erfolgt in der Trennstufe durch Abtrennen der Anbindung zum Tragstreifen und Ablage auf ein Förderband, welches seitlich aus dem Werkzeug bzw. der Presse herausläuft. Mit den Werten für Bandvorschub je Hub (60 mm) und Bandbreite (70 mm) ergibt sich ein akzeptabler Materialausnutzungsgrad (ca. 60 %). Die nötige Pressentechnik ist bei vielen Firmen der Branche vorhanden und kann mit geeigneten Werkzeugen genutzt werden.

3.2 Wirkmedienbasierte Blechumformung

Bei der wirkmedienbasierten Umformung wird das Blech über ein Fluid mit einem hydrostatischen Druck beaufschlagt und somit in die Matrize geformt. Im Umformwerkzeug wird deshalb nur eine Werkzeuggravur benötigt, was einen technologischen Vorteil gegenüber anderen Verfahren darstellt (Abbildung 4). Die Ausrichtung, Führung und das Eintuschieren von mehreren Formwerkzeugen zueinander mit hohen Genauigkeitsanforderungen entfällt, wodurch die Komplexität und die Anschaffungskosten des Werkzeuges sinken.

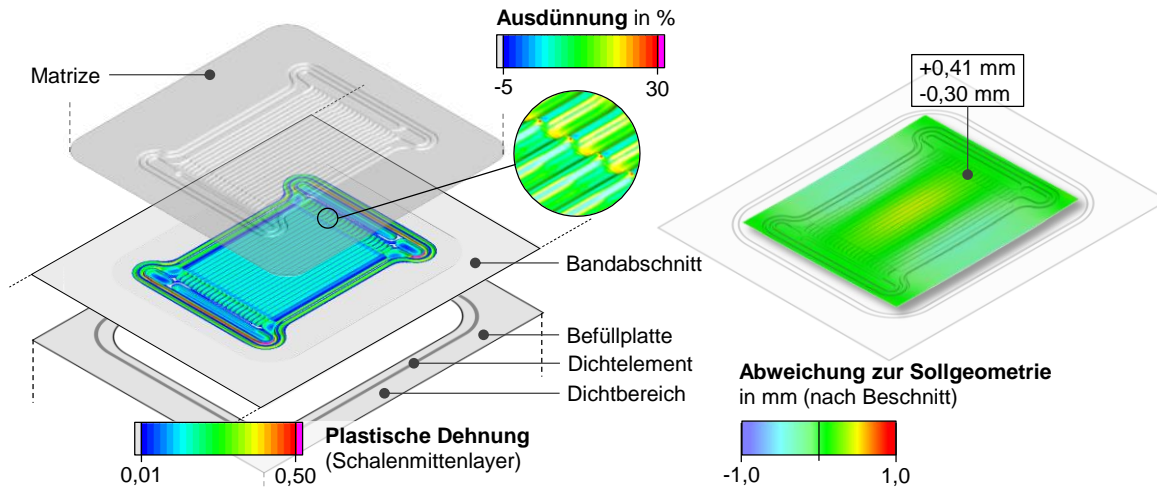


Abbildung 4: FE-Simulation der wirkmedienbasierten Umformung einer Demonstrator-BPHP; links: Werkzeugaufbau und plastische Dehnung nach erfolgter Umformung; rechts: Abweichung des rückgefederten Bauteils zur Sollgeometrie nach dem Beschnitt.

Am Fraunhofer IWU wird die Abdichtung des Befüllraumes mit einer Kombination aus Stützring und O-Ring realisiert, die in einer umlaufenden Nut konturnah zur umlaufenden BPHP-Begrenzung in der Befüllplatte positioniert sind. Außerhalb dieser Dichtung ist eine ebene Distanzfläche (ca. 4.000 mm² mit > 150 MPa Druckfestigkeit) vorzuhalten, die die Zuhaltkraft der Presse vor dem Aufbau des entgegenwirkenden Innendruckes (250 MPa) auf die Wirkfläche innerhalb der Dichtung (2500 mm²) aufnimmt. Der nötige Materialzuschnitt muss daher ebenfalls eine entsprechende Größe (90 mm x 75 mm) haben, was zu einem recht geringen Materialausnutzungsgrad (ca. 37 %) führt.

Alternativ dazu kann auch eine ausschließliche Dichtung über die Planfläche [10] oder über eine eingeprägte Dichtsicke [11] vorgenommen werden. Zur annähernd vollständigen Ausformung der Referenz-BPHP wird ein Wirkmediendruck von 250 MPa benötigt, was sich auch in entsprechend hohen Zuhaltkräften (750 kN) niederschlägt. Damit liegt die benötigte Pressenkraft mindestens um den Faktor 4 höher als beim Referenzfall Hohlprägen. Für die wirkmedienbasierte Umformung von PEMBZ-BPHP mit bis zu 800 cm² Fläche werden daher Hydroformpressen mit hohen Schließkräften (i. d. R. 35.000 – 50.000 kN) benötigt, was gepaart mit der notwendigen Wasserhydraulik, inklusive Druckübersetzer, mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Aus diesem Kontext heraus wird am Fraunhofer IWU aktuell ein Werkzeugsystem zum passiven Hydroforming von BPHP entwickelt, bei dem der Umformdruck durch die Pressenschließbewegung direkt im Werkzeug und nicht durch externe Druckaggregate erzeugt wird [12 – 14]. Perspektivisch sollen damit nicht nur Taktzeiten reduziert, sondern auch verschiedenste Pressen zum wirkmedienbasierten Umformen von BPHP genutzt werden können. Wirkmedienbasiert-geformte BPHP weisen eine hohe Bauteilqualität und gute Ebenheit auf,

weil hohe Ausformgrade durch Kalibrieren gegen eine einzige Referenzwerkzeugfläche resultieren und nur geringe Rückfederungseffekte auftreten. Für die Referenz-BPHP wird simulationsbasiert eine Schwankungsbreite der Sollgeometrieabweichungen von absolut 0,7 mm prognostiziert.

Darüber hinaus zeichnet sich das wirkmedienbasierte Umformen durch sehr gute Oberflächenqualität und einen gleichmäßigen Umformcharakter infolge des vollflächig wirkenden Umformdruckes aus [15]. Als markantester Nachteil des wirkmedienbasierten Umformens von BPHP sind die realisierbaren Produktionsraten aufzuführen, da sich übliche Taktzeiten mit einer Fertigung vom Coil bei ca. 7 BPHP/min bewegen [1]. Aufgrund der bei Bipolarplatten vergleichsweise großen wirkenden Flächen ist eine konventionelle Mehrfachfertigung zur Steigerung der Produktionsrate nur eingeschränkt möglich. Perspektivisch könnte jedoch das in [16, 17] vorgestellte Konzept einer übereinander gestapelten Mehrfachfertigung in einem Werkzeug interessant sein.

3.3 Hohlprägewalzen

Beim Hohlprägewalzen wird das Band zwischen zwei rotierenden Formwerkzeugen inkrementell umgeformt. Das Walzen von metallischen BPHP rückt aufgrund der potenziell hohen Produktionsraten von bis zu 120 BPHP/min [3] zunehmend in den Fokus. Diverse Grundlagenstudien zeigten bereits die generelle Eignung der Prozesstechnologie zur BPHP-Fertigung [18 – 20]. Trotzdem ist der derzeitige Technologiereifegrad niedriger als bei den etablierten Verfahren der wirkmedienbasierten Blechumformung bzw. des Hohlprägens, weil eine sichere Umsetzung im industriellen Serienprozess noch Gegenstand aktueller Bestrebungen ist. Ein stabiler Produktionsprozess ist aus technologischer Sicht deutlich schwieriger umzusetzen als im Fall des Hohlprägens oder der wirkmedienbasierten Blechumformung. Die kontinuierliche Rotation der Formwalzen bedingt ein inkrementelles Umformverhalten, welches ohne entsprechende Gegenmaßnahmen eine zunehmende Faltenbildung während der Flussfeldausformung nach sich zieht. Weitere unerwünschte Nebeneffekte sind größere Ebenheitsabweichungen nach dem Walzprozess durch Rückfederungseffekte infolge geringerer Abstreckung im Umformprozess (absolute Abweichung 1,3 mm, Abbildung 5).

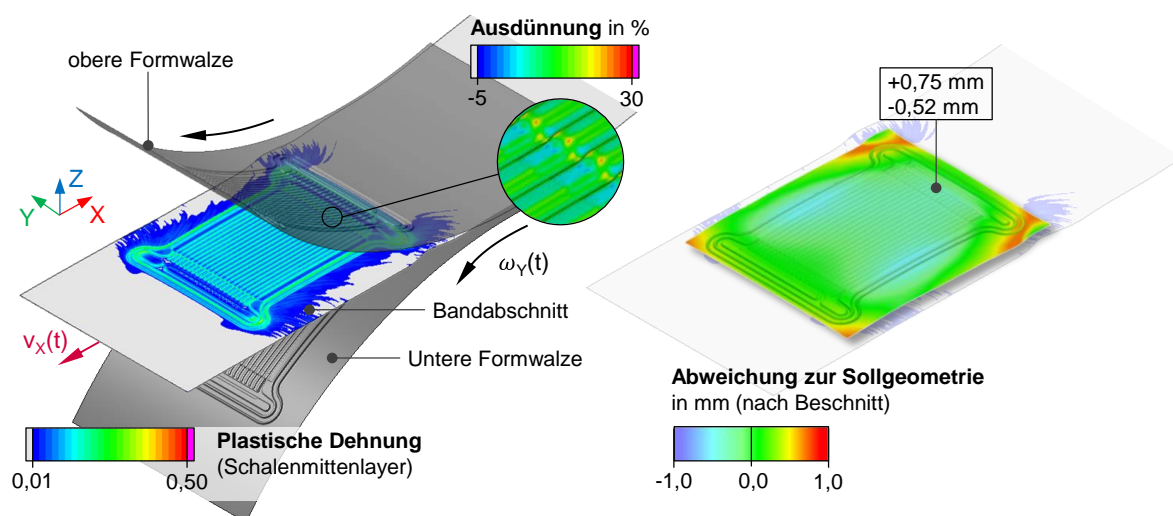


Abbildung 5: FE-Simulation des Hohlprägewalzens am Beispiel einer Demonstrator-BPHP; links: Formwalzenpaar und plastische Dehnung nach erfolgter Umformung; rechts: Abweichung des rückgefederten Bauteils zur Sollgeometrie nach dem Beschnitt.

Der Ausformgrad und die ausdünnungsbedingten Abweichungen zur idealisierten Querschnittsgeometrie sind ähnlich zu den beim Hohlprägen festgestellten Effekten. Darüber hinaus kann der Werkstoffausnutzungsgrad perspektivisch sogar größer ausfallen, weil im Gegensatz zum Hohlprägen (seitliche Bandführung bzw. Niederhalterwirkfläche) oder zur wirkmedienbasierten Blechumformung (Dichtfläche) kaum zusätzliches, später abzutrennendes Material (Aufschlag ca. 5 mm) erforderlich ist (prognostizierter Materialausnutzungsgrad 70 %). Im vorliegenden Referenzfall betragen die maximalen Kräfte zum Hohlprägewalzen nur 13 kN und liegen bedingt durch den inkrementellen Umformcharakter deutlich niedriger als bei den anderen betrachteten Verfahren. Perspektivisch könnte dies gerade für die walztechnische Herstellung von großflächigen Elektrolyseurplatten interessant sein.

Anlagenseitig sind vorrangig der Aspekt der Walzensynchronisierung (mechanisch über Verzahnung oder durch Synchronisation der Antriebe) mit hohen Genauigkeitsanforderungen und Maßnahmen zur Erhöhung der Bandabstreckung entscheidend. Aktuelle Tätigkeiten am Fraunhofer IWU zum Hohlprägewalzen sind die simulationsbasierte Prozessauslegung und kontinuierliche Weiterentwicklung der Walzkonzepte [21]. Als technologische Besonderheiten für die numerische Abbildung sind einerseits dynamische Effekte durch das kontinuierlich bewegte Band zu nennen, andererseits ist werkstoffseitig die Abbildung von Dehnrateneffekten (für die hier betrachtete Referenz-BPHP $\dot{\varphi} = 0 - 30 \text{ s}^{-1}$ bei 20 U/min mit Walzendurchmesser 200 mm) relevant. Durch die Umformsimulation werden aktuell die verschiedenen technologischen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Prozesseinflüsse verglichen und bewertet. Als wesentliche technologische Stellgrößen sind aktuell die Überlagerung von Zugspannungen in Bandlaufrichtung und quer dazu zu nennen, weil diese sowohl hinsichtlich der Faltenbildung als auch in Bezug auf die Abstreckung und resultierende Geometrietreue positive Auswirkungen auf den Prozess haben können. Aktuell ist auf Basis dieser Untersuchungen eine Pilotwalzanlage mit mehreren Walzgerüsten am Fraunhofer IWU im Aufbau. Diese soll zur Erprobung und Weiterentwicklung einer walztechnischen BPHP-Herstellung mit Bandbreiten bis 170 mm dienen.

4 Herausforderungen im Kontext der Prozesskettenbetrachtung bis zur BPP

Bei der Diskussion unterschiedlicher Umformtechnologien darf der Betrachtungshorizont nicht nur allein auf die BPHP-Produktion beschränkt bleiben, weil sich die resultierenden Produktionsraten je nach Umformprozess gravierend unterscheiden können und demzufolge auch unterschiedliche Anforderungen an vor- bzw. nachgelagerte Prozessschritte im Kontext der gesamten Prozesskette zur BPP-Herstellung ergeben. Unter diesen erweiterten Betrachtungshorizont fällt neben der Umformung die Bandführung bzw. der Bauteiltransport, das Trennen, das Fügen der Kathoden- und Anoden-BPHP zur BPP und das Beschichten. Die übergeordnete Herausforderung besteht in der Synchronisierung dieser Einzelprozesse unter Gewährleistung einer ausreichend guten und reproduzierbaren Produktqualität.

Je höher die Produktionsrate, desto herausfordernder gestaltet sich ein automatisierter Bauteiltransfer von filigranen, biegeschlaffen BPHP unter Erreichung der erforderlichen Positioniergenauigkeiten von $\pm 0,01 \text{ mm}$. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an eine prozessintegrierte Qualitätskontrolle hinsichtlich Datenerfassung, -verarbeitung und -visualisierung bzw. Prozessregelung. Größere Produktionsraten und demzufolge niedrigere Taktzeiten sind vor allem auch für das Trennen der BPHP herausfordernd. Für die Prozessketten mit translatorischen

scher Umformwerkzeuggestaltung (wirkmedienbasierte Umformung und Hohlprägen) und einem sequenziellen Bandvorschub werden das Lasertrennen oder Scherschneiden favorisiert. Herausforderungen liegen dabei in der Realisierung einer ausreichend guten Schnittflächenqualität und der Einhaltung der notwendigen Maß- und Formtoleranzen. Für das Hohlprägen sind perspektivisch verschiedene, bevorzugt synchron zum kontinuierlichen Bandvorschub wirkende Trennverfahren wie beispielsweise das Rotationsscher- und Rotationsquetschschneiden (ggf. in mehreren Stufen) oder das Lasertrennen denkbar, wobei hier die Gewährleistung der Schnittflächenqualität unter höheren Produktionsraten eine noch größere Herausforderung darstellt.

In den Teilprozessen verursachte Ebenheits-, Form- oder Positionierabweichungen wirken sich vorrangig im nachfolgenden Fügeprozess der Kathoden- und Anoden-BPHP zur BPP negativ aus. In der Regel kommen dafür Fügeverfahren ohne Zusatzschweißstoffe zum Einsatz, die äußerst sensitiv auf Spaltbildungen, d. h. auf Bereiche, in denen keine Flächenanlage der Fügepartner erreicht werden kann, reagieren.

Diese aufgeführten Punkte stellen auszugsweise dar, welche weiteren Herausforderungen, Spannungsfelder und gegenseitige Wechselwirkungen bestehen, wenn der Betrachtungshorizont weg vom umformtechnischen Einzelprozess hin zur Entwicklung gesamter Prozessketten zur Herstellung von BPP erweitert wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der vorgestellten Referenz-BPHP (Abbildung 2) werden die Umformtechnologien wirkmedienbasierte Umformung, Hohlprägen und Hohlprägewalzen durch simulationsbasierte und teilweise experimentelle Studien vorgestellt und untersucht. In Tabelle 1 ist zusammenfassend ein qualitativer Ergebnisvergleich dargestellt.

Tabelle 1: Einschätzung der betrachteten Verfahren am Beispiel der vorgestellten Referenz-BPHP.

Verfahren Vergleichskriterien	Wirkmedienbasierte Umformung	Hohlprägen	Hohlprägewalzen
geringe Komplexität und geringer Fertigungsaufwand des Umformwerkzeuges	+ <i>nur ein Werkzeugaktivteil mit Referenzkontur</i>	+ / - <i>zwei zueinander auszurichtende Formwerkzeugteile</i>	- <i>komplexe Fertigung der Walzengravur mit hohen Genauigkeitsforderungen</i>
geringer Umfang der notwendigen Anlagentechnik und Zusatzaggregate	- <i>hydraulische Presse mit hohen Schließkräften, zusätzlich Wasserhydraulik</i>	+ <i>Tiefziehpresse</i>	- <i>synchronisierte Walzanlage mit mehreren Walzstichen</i>
Materialausnutzungsgrad	- <i>hier 37 %</i>	+ <i>hier 60 %</i>	++ <i>hier 70 %</i>
Bauteilqualität hinsichtlich Ebenheitsabweichungen (Ziel ≤ 1 mm)	+ <i>hier 0,7 mm</i>	+ <i>hier 0,5 mm</i>	-- <i>hier 1,3 mm</i>
Bauteilqualität hinsichtlich Ausformgrad der Kanalstrukturen	++ <i>ideales Kalibrieren gegen eine Referenzfläche</i>	+ <i>Abstrecken des Bandes zwischen Kanälen unter Ausdünnung</i>	+ <i>Abstrecken des Bandes zwischen Kanälen unter Ausdünnung</i>
erzielbare Produktionsrate (nur Einzelprozess, ohne Parallelisierung)	- <i>hier 7 BPHP/min</i>	+ <i>hier 60 BPHP/min</i>	++ <i>~ 120 BPHP/min</i>
Legende: ++ sehr gut, + gut, +/- befriedigend, - ausreichend, -- mangelhaft			

Wie in diesem Artikel erläutert und in Tabelle 1 dargestellt, sind die Produktionsraten für das Hohlprägen und das wirkmedienbasierte Umformen verfahrensbedingt begrenzt, allerdings ist der Technologiereifegrad hier bereits höher als beim Hohlprägewalzen. Eine signifikante Steigerung der Ausbringungsmenge ist nur durch Parallelisierung dieser Verfahren möglich.

Um beim Hohlprägewalzen eine höhere Technologiereife zu erzielen, sind in weiterführenden Untersuchungen verschiedene technologische Maßnahmen zu erproben. Hierfür muss der Umformprozess umfassend untersucht und weiterentwickelt werden, um die erzielbare Geometriequalität, Produktionsrate und Robustheit zu ermitteln sowie unter Beachtung der vorherrschenden Wechselwirkungen auf ein Maximum zu steigern.

6 Danksagung

Die Autoren / Autorinnen bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) für die Förderung des IGF-Vorhabens „Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten - Hohlprägen vs. Hohlprägewalzen“, Vorhaben-Nr. 21715 BR. Weiterhin bedanken sich die Autoren / Autorinnen bei der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. für die Förderung des internen Forschungsprojektes HOKOME „Entwicklung hochproduktiver und kosteneffizienter R2R-Fertigungsmethoden für Komponenten von Brennstoffzellenstacks“.

7 Quellen

- [1] Rassmann, A.: Brennstoffzelle wird den Fahrzeugmarkt verändern. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://elektromobilitaet.vdma.org/viewer/-/v2article/render/49414976>.
- [2] Statista: Anzahl produzierter Kraftfahrzeuge weltweit von 2000 bis 2020. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151749/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-automobilproduktion/>.
- [3] 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. *Journal of Manufacturing Processes* 2020; 60: 366 – 383. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041>.
- [4] Porstmann, S.; Wannemacher, T.; Richter, T.: Overcoming the Challenges for a Mass Manufacturing Machine for the Assembly of PEMFC Stacks. *Machines* 2019;7(4):1–20. <https://doi.org/10.3390/machines7040066>.
- [5] Polster, S.; Porstmann, S.: FOSTA Projekt Bipolarplatten: Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten – Hohlprägen vs. Hohlprägewalzen. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://hzwo.eu/project/fosta-bipolarplatten-praegen/>.
- [6] Gies, S.; Beckhaus, P.: Entwicklung der inkrementellen Mikroumformung zur Funktionsmusterherstellung metallischer Bipolarplatten: Abschlussbericht P1247 (IGF-Projekt Nr. 14 EWN, der Forschungsvereinigung FOSTA); 2019.
- [7] Baum, C.: Wasserstoff – so bleiben wir mobil. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/wasserstoff-so-bleiben-wir-mobil/autoantrieb-brennstoffzelle.html>.
- [8] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. 12th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; 2018.
- [9] Lange, K.; Liewald, M.: Lehrbuch der Umformtechnik: Band 3: Blechumformung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1975.
- [10] Siegert, K.: Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg; 2015.
- [12] Blankl, A.: Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2008. Bamberg: Meisenbach; 2009.

- [12] Albert, A.: Passives Hydroforming zur Herstellung von Bipolarplatten. Passives Hydroforming zur Herstellung von Bipolarplatten. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://www.hy-ber.de/de/struktur-und-leistungsangebot/bipolarplatten-produktion/Passives-Hydroforming-bipolarplatten.html>.
- [13] Budai, A. F.; Achimaş, G.; Neugebauer, R.; Pröhl, M.: Method and Tool Design for Passive Sheet Metal Hydroforming on Conventional Single Action Presses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2013;135(2). <https://doi.org/10.1115/1.4023455>.
- [14] Melzer, S.: Vorrichtung zur Umformung eines Werkstücks, Presse mit einer solchen Vorrichtung sowie Verfahren zur Umformung eines Werkstücks (DE 10 2013 020 280 B3); 2013.
- [15] Bell, C.; Corney, J.; Zuelli, N.; Savings, D.: A state of the art review of hydroforming technology. *Int J Mater Form* 2020;13(5):789 – 828. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>.
- [16] Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG: Von der individuellen Einzelanlage bis hin zur skalierbaren Fertigungslinie. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://www.graebener.com/de/fertigungsanlagen>.
- [17] Kapp, D.: Hydroformwerkzeug (EP 2 221 125 B1); 2009.
- [18] Bauer, A.; Härtel, S.; Awiszus, B.: Manufacturing of Metallic Bipolar Plate Channels by Rolling. *JMMP* 2019;3(2). <https://doi.org/10.3390/jmmp3020048>.
- [19] Abeyrathna, B.; Zhanga, P.; P. Pereira, M.; Wilkosz, D.; Weiss, M.: Microroll forming of stainless steel bipolar plates for fuel cells 2019, 5 February 2019:3861–75.
- [20] Zhang P, Pereira M, Rolfe B, Daniel W, Weiss M. Deformation in Micro Roll Forming of Bipolar Plate. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017;896:12115. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/896/1/012115>.
- [21] Porstmann, S.; Polster, S.: FOSTA-Projekt Bipolarplatten: Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten - Hohlprägen versus Hohlprägewalzen. Letzter Zugriff am 17.10.2021, verfügbar über: <https://www.hy-ber.de/de/struktur-und-leistungsangebot/bipolarplatten-produktion/fosta-bipolarplatten.html>.