

Schlussbericht

für das Forschungsvorhaben

HZwo:SuSyMobil – Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen

bestehend aus den Sachberichten I und II

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Fördermaßnahme: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II

Förderbereich: Forschung, Entwicklung und Innovation –
Schwerpunkt: Nachhaltige Mobilität

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter dem Förderkennzeichen 03B11022B gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektträger:

Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Postfach 61 02 47, 10923 Berlin

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.,
Hansastraße 27C, 80686, München
für ihr

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz

Sachbericht Teil I – Kurzbericht

ZE: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz		Förderkennzeichen: 03B11022B
Vorhabensbezeichnung:	Verbundvorhaben NIP II: „HZwo:SuSyMobil – Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen“ Projektsäule 2 – Großserien-Fertigungstechnologien für Endplattenmodule	
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 – 28.02.2025	
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 28.02.2025	

AP2.1: Entwurf, Konstruktion und Optimierung des EMM-Funktionsmusters für den Aluminiumdruckguss und -porendruckguss

Im Vorhaben wurden biegesteife Endplatten für Brennstoffzellen-Stacks entwickelt, die anschließend im Druckguss und Porendruckguss gefertigt wurden. Zunächst wurden mit Hilfe eines morphologischen Kastens grundlegende Varianten gegenübergestellt und gemeinsam mit den Projektpartnern ein erfolgversprechender Entwurf ausgewählt. Nachdem das Design und der verfügbare Bauraum definiert waren, wurden mithilfe der Topologie-Optimierung lastgünstige und gewichtsoptimierte Strukturen berechnet. Auf Basis von Füll- und Erstarrungssimulationen, die der Projektpartner Handtmann durchführte, wurde der Entwurf nach gießtechnischen Gesichtspunkten optimiert und die Endplattenmodule finalisiert, indem Bohrungen, Gewinde und Nuten hinzugefügt wurden. Handtmann fertigte auf Basis der entwickelten Endplatten das Druckgusswerkzeug (Werkzeug 2) und modifizierte ein vorhandenes Werkzeug für Testreihen zur Weiterentwicklung der Porendruckguss-Technologie (Werkzeug 1). Das IWU unterstützte Handtmann beratend bei der Werkzeugfertigung.

Fazit: Erfolgreiche Konstruktion einer oberen massiven Endplatte mit hoher Steifigkeit und Erarbeitung der Grundlagen für die Herstellung von Druckgusswerkzeugen.

AP2.2: Technologieadaption Aluminium-Porendruckguss

Für die Herstellung von Endplatten nach dem Porendruckgussverfahren (AP 2.7) war es nötig, den Wissensstand für das Porendruckgussverfahren aufzubereiten und mit Handtmann zu vertiefen. Gemeinsam leiteten beide Partner eine Parameterkonstellation für die Herstellung von Porendruckgussteilen her, die in Stichversuchen bei Handtmann überprüft wurden. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse legten Handtmann und Fraunhofer IWU die in einem Versuchsprogramm zu berücksichtigende Einflussgrößen (Parameter der Druckgießanlage) und Zielgrößen (Modellgrößen) fest. Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein statistischer D-optimaler Versuchsplan gewählt, mit dem die Signifikanzen der Einflussgrößen ermittelt und Modelle für die Zielgrößen im untersuchten Versuchsraum abgeleitet wurden. Als Einflussgrößen wurden die Geschwindigkeit des Stempels in der 1. und 2. Phase des Druckgusses sowie der Pressrest gewählt. Die Zielgrößen waren die Gussteilmasse, die Oberflächenqualität der Gussteile die Dehn- und Streckgrenzen und die Porenverteilung. Für die Gießversuche wurde das modifizierte Druckgusswerkzeug 1 genutzt. Gegossen wurden etwa 100 Teile. Die minimal erreichte Gussteilmasse lag bei 299 g, die ohne Oberflächenfehler bei 330 g. Das massive Referenzgussteil wog 411 g. Die bei akzeptabler Oberflächenqualität erreichte Gewichtseinsparung lag somit bei ca. 20 %. Ein Teil der Druckgussteile wurde von Handtmann im Zugversuch geprüft (Dehn-, Streckgrenze, Bruchdehnung). Die Dehn- und Streckgrenzen fielen mit zunehmender Probendicke leicht ab. Für die Bruchdehnung war keine eindeutiger Trend erkennbar. Die Messwerte schwankten aufgrund der unterschiedlichen Massen und ungleichen Porenverteilungen merklich. Es ist davon auszugehen, dass die Poren in den Proben als Sollbruchstellen wirkten und je nach Anzahl, Form und Größe bei unterschiedlichen Spannungen/Dehnungen zum Bruch führten.

Auf Basis oben beschriebener Ergebnisse wurde das Industrialisierungspotenzial des Porendruckgussverfahrens abgeschätzt.

Fazit: Die Technologie des Porendruckgusses wurde erfolgreich weiterentwickelt und auf Anlagen von Handtmann appliziert. Die Gewichtseinsparung bei akzeptabler Oberflächenqualität lag bei 20 %.

AP 2.4: Mechanisches Werkstoffverhalten, Korrosionsverhalten und Korrosionsschutz sowie Dichtigkeit von wasserstoffbelasteten Brennstoffzellenkomponenten aus Guss-Aluminium

Das IWU unterstützte die Arbeiten des Partners TU BAF mit der Bereitstellung von Mustern und der

Diskussion der Ergebnisse.

AP2.5: Skalierbare und funktionsintegrale elektrische Isolierung, mechanische Druckverteilung sowie Medienverteilerstrukturen

Aufgabenstellung im Projekt war die Entwicklung einer für die Herstellung im Spritzguss ausgelegten elektrisch isolierenden, druck- und medienverteilenden Platte (IDM-Platte). Diese Aufgabe konnte unter Zuhilfenahme verschiedener computergestützter Konstruktions- und Simulationsprogramme erfolgreich ausgeführt werden, nachdem seitens am Projekt beteiligter Partner die angrenzende Peripherie definiert war. Eine besondere Herausforderung bestand darin, alle drei Funktionen kompakt im Plattendesign ohne gegenseitige Beeinträchtigung zu integrieren. Hierzu wurden nach ersten CAD-Entwürfen verschiedene Simulationen durchgeführt, um z. B. die Spannungsverteilung im Stack sowie den Medienfluss zu prüfen und anzupassen. Nachdem die Konstruktion abgeschlossen war, führte die TU Chemnitz Realversuche an prototypisch hergestellten Bauteilen durch, welche von der Fa. Flach Präzisionstechnik GmbH bereitgestellt wurden. Darauf aufbauend wurden die Modelle an die Versuchsergebnisse angepasst. Der Partner Flach Präzisionstechnik stellte dann auf Basis der CAD-Entwürfe des Fraunhofer IWU IDM-Platten mittels Fräsens her und schätzte die spritztechnische Umsetzbarkeit simulativ ab. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung war die optionale Erweiterung des Brennstoffzellen-Stacks für verschiedene Leistungsstufen. Dies wurde als Konzeptstudie betrachtet und ausgearbeitet. Über den potenziell modularen Aufbau der IDM-Platten wie auch der Endplatten kann einerseits die Leistung des Stacks erhöht werden, als auch das Spritzgusswerkzeug erweitert werden.

Orientiert wurde sich am Vorgängerprojekt „NIP II: HZwo-STACK“, in dem bereits Erkenntnisse zur Materialauswahl und Aussagen zur Simulation getroffen wurden. Ebenso relevant war der von der TU Chemnitz bereitgestellte Open Source Stack OSS50, der als Referenz diente.

Da es sich im hier beschriebenen Teilbereich des Projekts grundlegend um eine konstruktive Auslegung der Platten handelt, wurde nur bedingt auf Erkenntnisse vorangegangener Studien zurückgegriffen, sondern die Ergebnisse beruhen auf dem Wissen und der Erfahrung der Projektpartner und der stetigen Anpassung der Teilergebnisse während des Entwicklungsprozesses.

Fazit: Erfolgreiche Entwicklung und Herstellung einer spritzgegossenen elektrisch isolierenden, druck- und medienverteilenden IDM-Platte.

AP2.6: Skalierungs- und Baukastenkonzepte für gegossene Endplatten-Manifold-Module

Im AP wurden erfolgreich Skalierungs- und Baukastenkonzepte für Brennstoffzellen-Stacks entwickelt. Da CAD, Gießwerkzeug und Schnittstellen eng miteinander in Endplattensystem verknüpft sind, entwickelten die Partnern die Konzepte gemeinsam. Die Konzepte berücksichtigten Anpassungen in Höhe (y), in Länge (x) und Breite (z) des Stacks. Die Skalierung in y-Richtung ist am einfachsten umsetzbar und bedarf der geringsten Anpassungen. Komplexer, aber noch mit einem akzeptablen Aufwand umsetzbar, ist die Skalierung/Modularisierung in x-Richtung. Die Skalierung in z-Richtung entspricht einer völligen Neukonstruktion und ist somit nicht sinnvoll. Auf Basis der Skalierungsmöglichkeiten wurden Baukastenkonzepte abgeleitet und erläutert.

Fazit: Erfolgreiche Ableitung von Skalierungs- und Baukastenkonzepten.

AP2.7: Experimentelle Realisierung von Forschungsfunktionsmustern zum Endplatten-Manifold Modul

Handtmann fertigte mit dem Werkzeug 2 eine größere Stückzahl an Funktionsmustern (massive und poröse obere Endplatten, massive untere Endplatten) im Druckguss. Das IWU unterstützte die Vorbereitungsarbeiten und einen Teil der Abgüsse (Orientierungsversuche massive Platte, Abgüsse im Porendruckguss). Gegossen und appliziert wurden: massive obere Endplatte und untere Endplatte; massive obere Endplatte mit Medienzufuhr, Stutzen eingegossen; massive obere Endplatte mit Medienzufuhr, Stutzen reibrührgeschweißt, eloxiert/nicht eloxiert; poröse obere Endplatte.

Mittels metallografischer und röntgenografischer Untersuchungen wurde an ausgewählten Gussteilen die Porenverteilung geprüft.

Das Werkzeug 2 wurde für einen optimalen Abguss der massiven Platten ausgelegt. Die damit verbundene Orientierung der Platte war senkrecht im Werkzeug. Aufgrund der Schwerkraftwirkung sammelten sich die Gasblasen überwiegend in der oberen Plattenhälfte. Im Projekt fehlten die zeitlichen und finanziellen Mittel, ein weiteres und für den Porendruckguss optimiertes Druckgießwerkzeug (waagerechte Ausrichtung der Platte) zu entwickeln, zu fertigen und auszutesten. Die Projektpartner gehen davon aus, dass mit einer waagerechten Anordnung der Platte im Werkzeug eine deutlich homogenere Porenverteilung in der Endplatte erreichbar ist.

Fazit: Erfolgreicher Abguss massiver und poröser Endplatten mit und ohne Stutzen.

Sachbericht Teil II

ZE: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz		Förderkennzeichen: 03B11022B	
Vorhabensbezeichnung:	Verbundvorhaben NIP II: „HZwo:SuSyMobil – Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen“ Projektsäule 2 – Großserien-Fertigungstechnologien für Endplattenmodule		
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2021 – 28.02.2025		
Berichtszeitraum	01.12.2021 – 28.02.2025		

1. Wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

AP 2 Großserienfertigungstechnologie für Endplatten-Manifold-Module (EMM)

AP 2.1 Entwurf, Konstruktion und Optimierung des EMM-Funktionsmusters für den Aluminiumdruckguss und -porendruckguss

AP 2.1.1 Erarbeitung eines Lastenheftes für das EMM-Funktionsmuster basierend auf OSS300-Stackplattform (Responsible (R): IWU)

Gemeinsam diskutierten die Projektpartner die grundlegenden Parameter des avisierten EMM-Funktionsmusters und legten diese in einem Lastenheft fest. Das Lastenheft ist Basis für alle weiteren Unterpakete des AP 2.

AP 2.1.2 CAD-Entwurf von Funktionsmustern (R: IWU), gießtechnische Auslegung, Ableitung der Konstruktion des Werkzeug 2 (R: Handtmann)

Zunächst wurden vom IWU in einem morphologischen Kasten mehrere grundlegende Varianten gegenübergestellt (**Abb. 1**). In einem iterativen Prozess mit den Projektpartnern wurde daraus der beste Entwurf ausgewählt. In den Entwurf flossen die im Lastenheft festgelegten Parameter ein. Die grundlegende Forderung war dabei ein gleichmäßiger Druckaufbau über dem Aktivbereich des Stacks. Der entstehende Anpressdruck darf weder zu groß noch zu klein sein. Die Toleranz ist mit ca. 1 N/mm² sehr gering. Um diese Forderung zu erfüllen, sollte die Durchbiegung des Endplattenmoduls so gering wie möglich sein. Der Anwendungsfokus der Brennstoffzelle liegt im mobilen Bereich, somit sollte eine geringe Masse ein weiteres Ziel darstellen. Den finalen Entwurf des Funktionsmusters zeigt **Abb. 1** rechts.

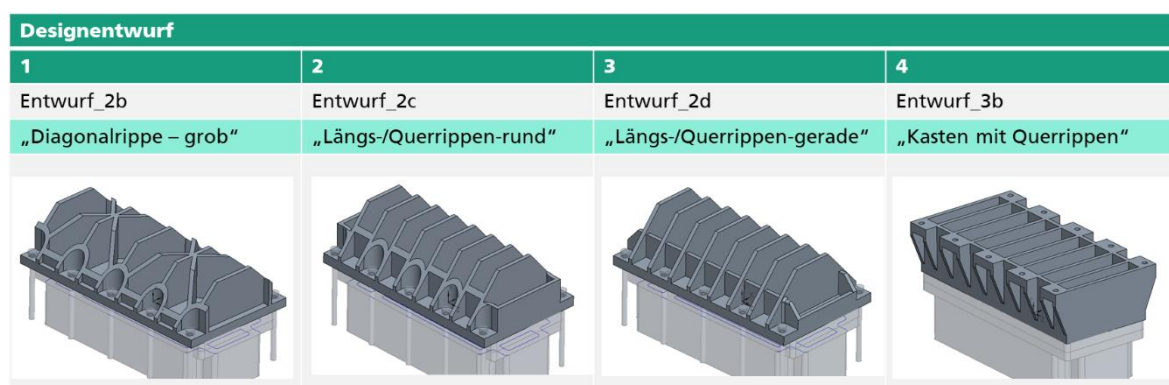


Abb. 1: Verschiedene Entwürfe (Auswahl) für das Endplatten-Modul.

AP 2.1.3 Simulation statischer Eigenschaften und Topologie-Optimierung von Funktionsmustern (R: IWU)

Nachdem das grundlegende Design und der zur Verfügung stehende Bauraum definiert waren, konnten mit Hilfe der Topologie-Optimierung lastgünstige Strukturen für das Endplattendesign berechnet werden. Die computergestützte Methode ermittelt in einem iterativen Prozess für einen zuvor definierten Bauraum (Designraum) die bestmögliche Materialanordnung im vorliegenden mechanische System (**Abb. 2**). Die berechneten Strukturen wurden weiter ausgearbeitet und fortlaufend mittels statischer

Simulationen überprüft. Das Ziel war eine möglichst geringe Durchbiegung unter der notwendigen Stackvorspannung bei kleinstmöglicher Masse.

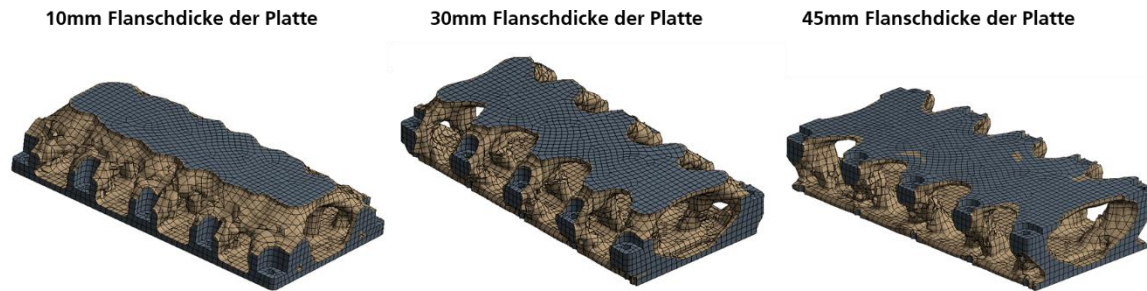


Abb. 2: Verschiedene Flanschdicken bei Materialreduzierung (50 mm Plattendicke, 70-75 % Volumenreduzierung).

AP 2.1.4 Füll- und Erstarrungssimulation für Druckguss (R: Handtmann, Support (S): IWU)

Das IWU unterstützte Handtmann bei der Vorbereitung der Füll- und Erstarrungssimulationen.

AP 2.1.5 Detailkonstruktion von finalen Funktionsmustern (R: IWU)

Das gießtechnisch optimierte Modell des Endplattenmoduls wurde konstruktiv finalisiert (**Abb. 3**). Dazu wurden Features, welche für die Funktion bzw. die Montage notwendig sind (Bohrungen, Gewinde, Nuten etc.), eingebracht. Es musste sichergestellt werden, dass Dichtungen rund um die medienführenden Kanäle unter allen Umständen den notwendigen Anpressdruck erhalten, um ihre Aufgabe zu erfüllen zu können. Zusätzlich wurden Gewinde eingebracht, um das Endplattenmodul mit den beiden Medienverteilplatten vormontieren zu können. Dies erleichtert die finale Stack-Montage erheblich.

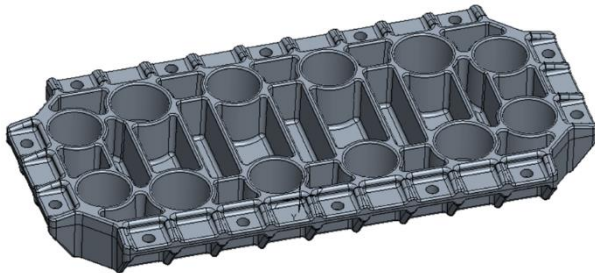


Abb. 3: Konstruktiv finalisiertes gießtechnisches Modell des Endplattenmoduls.

AP 2.1.6 Entwicklung/Modifikation eines Druckguss-Versuchswerkzeug (Werkzeug 1) – Gießversuche, Reibschweiß-, Eingieß- und Beschichtungsversuche (R: Handtmann, S: IWU, ESKA)

Für die Voruntersuchungen wählte Handtmann als verantwortlicher Projektpartner ein Druckguss-Werkzeug aus und modifizierte es für die Untersuchungen (s. Bericht Handtmann). Die Projektpartner (IWU, ESKA) unterstützen die Auswahl durch die Vorgabe von Mindestanforderungen.

AP 2.1.7 Entwicklung eines Druckgusswerkzeuges (Werkzeug 2) für das finale EMM (Werkzeugbau, Anpassungen, Gießtests) lt. AP2.7 (R: Handtmann, S: IWU)

Aufgabe des Partners Handtmann im AP war es, ein Druckgusswerkzeug für die Herstellung von Endplatten-Funktionsmustern zu entwickeln und herzustellen. Das IWU unterstützte mit der Vorgabe der Endplattenkonstruktion und in gemeinsamen Beratungen die Definition der Werkzeuganforderungen.

Das Arbeitspaket 2.1 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

AP 2.2 Technologieadaption Aluminium-Porendruckguss

AP 2.2.1 Modifikation des Gießverfahrens, Erarbeitung von Parametern zur Herstellung, iterativer Abgleich zwischen Verfahrensgrenzen-Konstruktionsdaten (R: Handtmann, S: IWU)

Ziel des Aluminiumdruckgusses ist es, in kurzer Zeit eine große Stückzahl meist dünnwandiger Gussteile herzustellen. Um dies zu erreichen, müssen die Strömungsvorgänge optimiert werden, dass keine Luft in die Metallschmelze eingeschlossen wird. Zudem müssen die Voraussetzungen für einen guten

Wärmeaustausch und eine gleichmäßige Wärmeverteilung zwischen Schmelze und Werkzeug geschaffen werden. Im Vorhaben wurde auf Basis der Erfahrungen von Handtmann in einem ersten Schritt massive Endplatten-Funktionsmuster im Druckguss gegossen. Die Parameter dafür wurden von Handtmann in entsprechenden Optimierungsschritten (Gießsimulation) erarbeitet.

In einem zweiten Schritt wurden die Gießabläufe bewusst so gestaltet, dass in den Gussteilen idealerweise eine homogene, feine Porenstruktur entsteht und auf diesem Weg Endplatten-Funktionsmuster gefertigt wurden, die gegenüber den massiven Mustern leichter sind. Um dieses Ziel zu erreichen, erarbeiteten die Projektpartner Handtmann und IWU gemeinsam Gießparameter für das Porendruckgussverfahren. Folgende Einflussgrößen wurden in den Gießversuchen bei Handtmann variiert:

- Geschwindigkeit Stempel 1. Phase,
- Geschwindigkeit Stempel 2. Phase,
- Pressrest.

Für die experimentellen Untersuchungen in AP 2.2.3 wählten die Projektpartner Handtmann und IWU eine Gießform (**Abb. 4, Abb. 5**) entsprechend den folgenden Kriterien:

- Auswahl einer verfügbaren Gießform mit ähnlichen Abmessungen wie die Endplatte,
- Realisierung unterschiedlich breiter Fließwege (2,5 bis 6,5 mm) für die Entnahme von Zugproben,
- Ausbildung von Stegen zur Nachbildung der Endplattenversteifung,
- geringer Umarbeitungsaufwand der Gießform,
- keine Evakuierung der Form vor Abguss.

Weitere Ausführungen zum Arbeitspaket sind dem Bericht von Handtmann zu entnehmen.



Ausschnitt einer Seite des eingebauten Gießwerkzeugs



Gussteil mit Angusssystem und Überlaufbohren

Abb. 4: Gießwerkzeug für die experimentellen Untersuchungen in AP 2.2.3 und darin gefertigtes Gussteil.

AP 2.2.2 Konzeptbetrachtungen zum neuartigen gießtechnischen Ansatzes Porendruckguss zur Einsparung von Material (R: IWU, S: Handtmann)

Dem Porendruckguss liegt die Idee zugrunde, über das Einspülen von Luft in das flüssige Aluminium eine feinverteilte Porenstruktur im Gussteil einzustellen. Gleichzeitig sollen eine fehlerfreie Abbildung der äußeren Gussteilgeometrie und Oberflächenqualität erreicht werden. Diese Idee widerspricht grundsätzlich dem üblichen Ansatz des Druckgusses, der auf porenfreie Gussteile abzielt.

Um die Zielstellung zu erreichen, musste von den empfohlenen Gießparametern abgewichen und eine Parameterkonstellation an der Druckgießmaschine eingestellt werden, die das gleichmäßige Einspülen von Luft in die Schmelze begünstigt. Dazu sind Eingriffe in die Phasenfolge beim Gießen, die sich aus der Vorfüllphase (1), der Formfüllphase (2) und der Nachdruckphase (3) zusammensetzt, nötig:

- (1) Die Schmelze wird relativ langsam bis zum Anschnitt befördert, so dass die im Angusssystem komprimierte Luft über Entlüftungskanäle und durch die Formteilungsebene entweichen kann.
- (2) In der Formfüllphase wird die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit in die Form gepresst. Da die Formfüllzeit sehr niedrig ist, findet quasi keine Entlüftung der Form statt.
- (3) In der Nachdruckphase am Ende der Formfüllung wird ein hoher statischer Druck aufgebaut und damit das Gussteil mit Schmelze nachgespeist und die enthaltene Luft komprimiert.

Indem die einzelnen Phasen modifiziert und damit das Einspülen von Luft in die Schmelze provoziert

und das Komprimieren der Luft zum Teil unterbunden werden, ist es möglich, den Anteil eingeschlossener Luft in Form feiner Poren im Gussteil bis zu einem gewissen Maß zu erhöhen, ohne die Bauteilqualität maßgeblich zu verringern. Die Einstellmöglichkeiten dafür sind anlagenabhängig. Da das Optimierungsziel beim Druckguss üblicherweise bei der Reduzierung des Porenanteils liegt, sind Untersuchungen (Gießversuche) nötig, in denen das „Verstellen“ der Gießparameter und die damit verbundenen Abweichungen systematisch analysiert werden. Die Gießparameter wurden für die Anlage von Handtmann erarbeitet.

- [1] Arbeitsgemeinschaft Metallguss GmbH; Wochenschule Druckgießen; Aalen; 2017.
- [2] Patent WO 2014/166841; Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft e. V. und SMA Solar Technology AG; Veröffentlichungsdatum: 16.10.2014.
- [2] Wikipedia; Stichwort Druckguss; <https://de.wikipedia.org/wiki/Druckguss#Phasenfolge>; letzte Bearbeitung: 15.08.22, letzte Prüfung: 11.04.23.

AP 2.2.3 Experimentelle Untersuchungen zum neuartigen gießtechnischen Ansatzes Porendruckguss zur Einsparung von Material (R: Handtmann, S: IWU)

Das Ziel des Arbeitspaket bestand darin, in experimentellen Untersuchungen die vorliegenden Erfahrungen/Kenntnisse zum Porendruckgusses auf eine Druckgießanlage von Handtmann zu übertragen, die Ergebnisse zu verifizieren, günstige Parameter für die Porendruckguss-Methode zu erarbeiten, nachzuprüfen und eine mögliche Materialeinsparung abzuschätzen. Die in den Arbeitspaketen AP 2.2.1 und AP 2.2.2 vorgenommenen Abstimmungen und herausgearbeiteten Randbedingungen waren Basis für die in diesem Arbeitspaket durchgeführten Untersuchungen (Bühler-Druckgießanlage, variierbare Einflussgrößen, Versuchsplan).

Gemeinsam legten die Projektpartner Handtmann und IWU die in den Versuchen zu untersuchenden Einflussgrößen (Parameter der Druckgießanlage) und Zielgrößen fest. Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein statistischer D-optimaler Versuchsplan (**Tab. 1**) gewählt, der es erlaubt, die Signifikanz der Einflussgrößen zu ermitteln und ein Modell für den untersuchten Versuchsraum zu erstellen. Als Zielgrößen wurden die Gussteilmasse, die Oberflächenqualität der Gussteile und die Festigkeit von Zugproben, die aus Gussteilen entnommen wurden, definiert (nicht in **Tab. 1** dargestellt).

Tab. 1: Versuchsplan.

Nr.	Geschwindigkeit 2. Phase	Pressrest	Geschwindigkeit 1. Phase
1	6,00	8,0	0,1
2	6,00	8,0	1,3
3	1,50	8,0	0,1
4	3,75	8,0	2,5
5	6,00	16,5	0,1
6	6,00	25,0	0,1
7	6,00	16,5	2,5
8	6,00	25,0	2,5
9	1,50	25,0	2,5
10	6,00	8,0	2,5
11	1,50	25,0	0,1
12	1,50	8,0	2,5
13	1,50	16,5	1,3
14	3,75	25,0	1,3
15	3,75	16,5	0,1
16	3,75	16,5	1,3

Gegossen wurden etwa 100 Teile. Die minimal erreichte Gussteilmasse lag bei 299 g, die minimale erreichte Masse ohne Oberflächenfehler betrug 330 g. Das massive Gussteil (Referenz) wies ein Gewicht von 411 g auf. Die größte erreichte Gewichtseinsparung lag bei ca. 27 %, die Einsparung bei akzeptabler Oberflächenqualität des Gussteils bei ca. 20 %. Häufig, aber nicht immer, ging mit einem niedrigen Gewicht eine geringe Oberflächenqualität der Gussteile (Löcher, Risse) einher (**Abb. 5**).



Versuch 1-1, Qualität „fehlerfrei“



Versuch 3-4, Qualität „unzureichend“ (Löcher in Oberfläche)

Abb. 5: Gussteile mit unterschiedlicher Oberflächenqualität.

Die Auswertung des statistischen Versuchsplans ergab für das Gussteilgewicht und die Gussteilqualität je ein Modell des Versuchsraums, wobei die Signifikanz der Einflussgrößen unterschiedlich ausgeprägt war. Die Modelle wiesen Bestimmtheitsmaße von 77 % (Gewicht) und 91 % (Qualität) bei einer Wahrscheinlichkeit von 95 % auf.

Auf Basis der Modelle sind Vorhersagen für die Zielgrößen in Abhängigkeit von den eingestellten Einflussgrößen möglich. In **Abb. 6** ist als Beispiel das Modell für das Gussteilgewicht bei einer „Geschwindigkeit 1. Phase“ von 0,7 m/s dargestellt

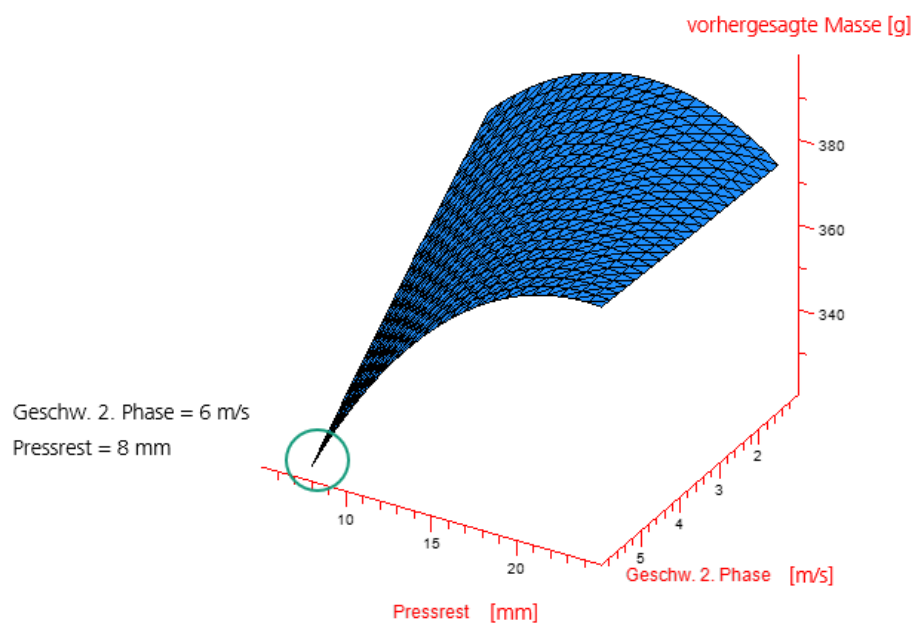


Abb. 6: Modell des Gussteilgewichts bei einer „Geschwindigkeit 1. Phase“ von 0,7 m/s.

Da die Zielgrößen meist nicht die gleichen Abhängigkeiten von den Einflussgrößen besitzen, muss in der Praxis häufig ein Kompromiss für die Einstellungen der Einflussgrößen gefunden werden, so auch für die beiden Zielgrößen Gussteilgewicht und -oberflächenqualität. Für die Suche der günstigsten Einstellungen wurde ein Zielgewicht von „300 g“ und eine Oberflächenqualität von „1“ (fehlerfrei) vorgegeben. Da ein Gussteil nur bei einwandfreier Qualität verwendet werden kann, wurde die Gussteil-Oberflächenqualität gegenüber dem Gussteilgewicht zweifach gewichtet. Aus diesen Vorgaben wurde mit der Statistiksoftware Cornerstone folgende Niveaus der Einflussgrößen ermittelt:

- Geschwindigkeit Phase 1: 2,5 m/s,
- Geschwindigkeit Phase 2: 6,0 m/s,
- Pressrest: 11,3 mm.

Mit diesen Vorgaben lässt sich ein Bauteilgewicht von 346 g (16 % Gewichtseinsparung) und eine Oberflächenqualität von 1,1 erreichen.

Ein Teil der Gussteile wurde röntgenografisch untersucht, um Hinweise auf die Porenverteilung und die

Porengröße zu erhalten. Die Gussprobe V14-2 (375 g, „1“) liegt etwas oberhalb des oben angegebenen Optimums (346 g, Qualität „1“) und weist relativ kleine Poren und eine homogene Porenverteilung im Gussteil auf (**Abb. 7**).

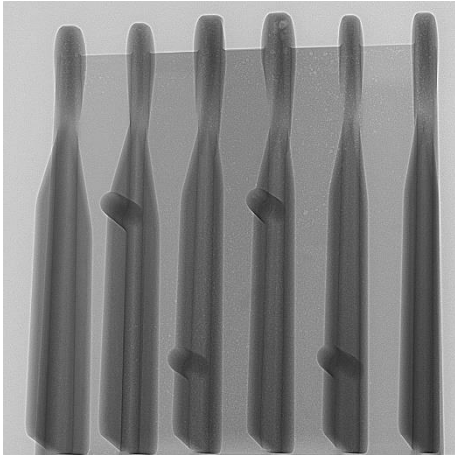


Abb. 7: Röntgenaufnahme des Gussteils V14-2 (375 g, „1“), weiße Punkte = Poren.

Nachdem die Bauteile gewogen und beurteilt wurden, arbeitete Handmann aus ausgewählten Gussteilen Zugproben heraus (**Abb. 8, Abb. 9**) und führte Zugversuche durch. Geplant war, an jedem Versuchspunkt aus einer Probe Zugproben durch Fräsen zu entnehmen. Die Probenentnahme wie auch die Ermittlung der Dehn- und Streckgrenzen sowie Dehnung gelang aufgrund der Porenstruktur der Proben nicht komplett, sondern nur für die Versuchspunkte 3, 6-9, 11 und 13-16. Alle im Zugversuch ermittelten Ergebnisse sind in **Abb. 10 bis Abb. 12** dargestellt. Es kann festgehalten werden, dass die Dehngrenze wie auch die Streckgrenze mit zunehmender Stegdicke im Allgemeinen leicht abfallen. Für die Bruchdehnung ist keine eindeutiger Trend erkennbar. Die Werte der Dehn- und Streckgrenzen und Bruchdehnungen schwanken für die einzelnen Stegdicken deutlich. Ursachen stellen sicherlich die unterschiedlichen Massen der einzelnen Gussproben (370 bis 386 g) und die ungleichen Porenverteilungen in den Gussproben dar. Für die Streckgrenze sind die Schwankungen der Messwerte besonders groß. Es ist anzunehmen, dass die beim Druckguss in die Proben eingebrachten Poren als Sollbruchstellen fungieren und je nach Anzahl, Form und Größe bei sehr unterschiedlichen Zugspannungen zum Bruch führen.

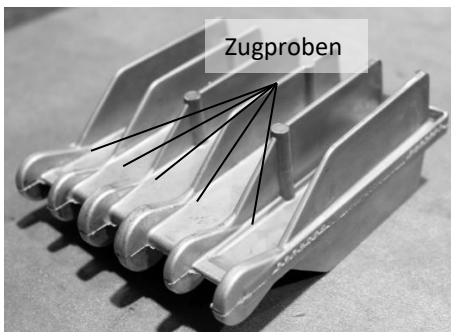


Abb. 8: Finales Gussteil mit Bereichen der Zugproben.

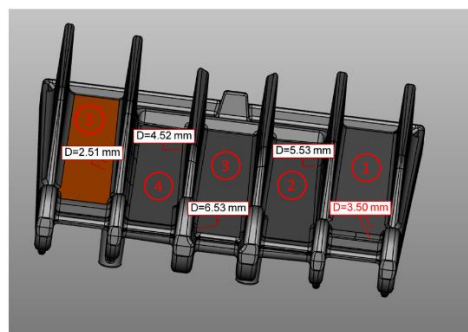


Abb. 9: Bereiche und Bezeichnungen der Zugproben.

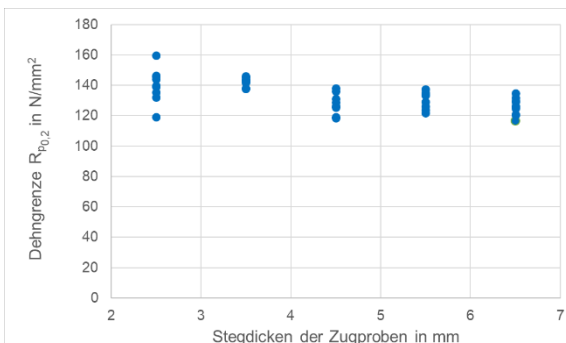


Abb. 10: Dehngrenze $R_{p0,2}$ der Zugproben.

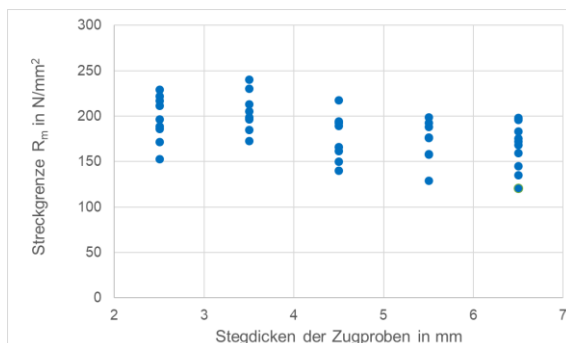


Abb. 11: Streckgrenze R_m der Zugproben.

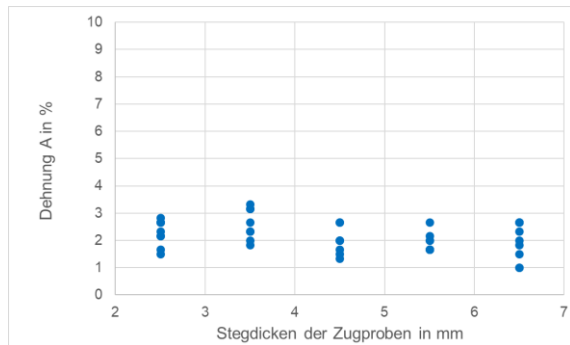


Abb. 12: Dehnungen der Zugproben.

In Ergänzung zu diesen Arbeiten wurden metallografische Untersuchungen durchgeführt und Röntgenaufnahmen angefertigt, die Aufschluss über die Porosität gegossener poröser Endplatten gaben. Die Ergebnisse sind im AP 2.7.1 sowie in **Tab. 2** (Bsp.: „Poröse obere Endplatte“) und **Tab. 3** (Nr. 5) zusammengefasst und wurden auch publiziert (GIESSEREI, CP+T, siehe Publikationsliste).

AP 2.2.4 Ableitung des Industrialisierungspotenziales unter Berücksichtigung relevanter Anwendungsfelder / Stückzahlen (R / Responsible: Handtmann, S / Support: IWU, Bearbeitungszeit: 06/24 – 08/24)

Das Industrialisierungspotential wurde vom verantwortlichen Projektpartner Handtmann dargestellt. Das IWU unterstützte die Arbeiten beratend. Deshalb wird nur auf die Schwerpunkte verwiesen:

- Ist das Prinzip des Porendruckgießens grundsätzlich machbar?
- Wo liegen die Grenzen der Materialeinsparung für das ausgewählte Gussteil?
- Ist eine gleichmäßige Porenverteilung im Gussteil erreichbar?
- Welche Schwierigkeiten haben sich herausgestellt bzw. wo liegen die Herausforderungen?
- Verwertbarkeit auch für andere Bauteilspektren möglich?
- Möglicher alternativer Problemlösungsansatz.

Das Arbeitspaket 2.2 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

AP 2.4 Mechanisches Werkstoffverhalten, Korrosionsverhalten und Korrosionsschutz sowie Dichtheit von wasserstoffbelasteten Brennstoffzellenkomponenten aus Guss-Aluminium (R: TU BAF, S: alle)

Aufgabe des Partners TU BAF im AP2.4 war es, im Projektverlauf an hergestellten Mustern Werkstoffuntersuchungen durchzuführen. Das IWU unterstütz(t)e die Arbeiten in den Unterarbeitspaketen 2.4.1 bis 2.4.6 (03/2022-10/2023) mit der Bereitstellung von Mustern und der Diskussion der Ergebnisse.

Das Arbeitspaket 2.4 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

AP 2.5 Skalierbare und funktionsintegrale elektrische Isolierung, mechanische Druckverteilung sowie Medienverteilerstrukturen

AP2.5.1 Schnittstellendefinition zum hochintegralen Endplatten-Manifold Modul

In diesem Arbeitspaket wurden in Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern die grundlegenden Schnittstellen der Isolations-Druckverteilungs-Medienverteilungsplatte (IDM-Platte) zu den angrenzenden Komponenten erarbeitet. Aus den Erfahrungen der beteiligten Projektpartner und der Vorgängerprojekte (z. B. „HZwo:Stack“) sowie Literaturrecherchen wurden die Anforderungen und Eigenschaften der IDM-Platte wie folgt zusammengefasst:

- elektrische Isolation des Stacks zum Endplatten-Manifold-Modul,
- Verteilung der mechanischen Belastung auf die verschiedenen Oberflächenbereiche des Stacks (Dichtungsbereiche sollen mit höherem Druck, Diffusionsbereiche mit geringerem Druck beaufschlagt werden),
- Führung und Verteilung der Medien (Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser, Kühlmittel) vom Endplatten-Manifold-Modul in den Stack und aus dem Stack heraus.

Darüber hinaus wurden wesentliche Kriterien für die geometrische Ableitung der Schnittstellendetails definiert:

- nur eine IDM-Platte trägt die Funktionen der Medienführung und -verteilung; die andere IDM-Platte ist "blind" und hat nur statische Funktion,
- Zweiteilung der funktionstragenden IDM-Platte zur gezielten Einführung einer Medienverteilerstruktur,
- Möglichkeit der direkten Durchleitung des Wasserstoffs durch die Endplatte (Vermeidung des Kontakts der Aluminiumbauteile mit Wasserstoff sowie anderen Medien),
- Integration der Stromabnehmerplatte (Vermeidung des Kontakts der Stromabnehmerplatte mit den Medien),
- schnelle und einfache Anpassungsfähigkeit an neue Bipolarplatten-Layouts.

AP 2.5.2 CAD-Grundentwurf einer IDM-Platte mit Festigkeits- und Tragbildsimulation

Die Geometrie der IDM-Platte ist unter anderem abhängig von der Geometrie der Bipolarplatte und der oberen und unteren Endplatten. Die CAD-Konstruktion der IDM-Platten konnte also erst nach Finalisierung der anderen Geometrien beginnen. Nach der Definition der endgültigen Geometrien (ohne Detailkonstruktion) wurde die erste FE-Simulation durchgeführt. Ziel dieses Arbeitspakets war es, durch Optimierung der Geometrie der IDM-Platte die Spannungen gleichmäßiger und gezielter über den Stack zu verteilen. Zu diesem Zweck wurde eine Parameterstudie durchgeführt, die die Auswahl des Kunststoffes, die Plattendicken (untere und obere Platte der funktionstragenden IDM-Platte) und die Integration von Geometrieelementen in die Platte umfasste. Die FE-Simulation wurde mit ANSYS Workbench 2022R2 durchgeführt. Unter Berücksichtigung der in AP 2.5.1 definierten Kriterien wurden potenziell geeignete Kunststoffe (PA6, POM, PEEK und PPS) ausgewählt, aus denen die IDM-Platte hergestellt werden kann.

Die Parameterstudie führte zu folgenden Ergebnissen:

- signifikanter Einfluss der Veränderung der Endplattengeometrie auf die Spannungslokalisierung im Stack,
- sehr großer Einfluss des Kunststoffes auf die Spannungsverteilung im Stack,
- Optimierung der unteren der beiden medienführenden IDM-Platte führt zu hoher Spannungslokalisierung an der kontaktierten Bipolarplatte,
- gezielte Krafteinleitung in den Stack durch Optimierung der oberen IDM-Platte; untere Endplatte kann lokale Spannungsspitzen kompensieren,
- kein signifikanter Einfluss der Dicke der IDM-Platten.

Abb. 13 zeigt eine schematische Darstellung des CAD-Modells der zweiteiligen funktionstragenden IDM-Platte im Stack.

Die detaillierte Auslegung der IDM-Platten erfolgte nach dem endgültigen Design der oberen und unteren Endplatten. Zudem erfolgte eine mechanische Charakterisierung (Zugversuche) ausgewählter Kunststoffe für die endgültige Spezifikation des IDM-Plattenmaterials. Nachdem das Design der Endplatten nahezu final definiert war, wurde mit der detaillierten Ausarbeitung der Isolier-, Druck- und Medienverteilerplatte begonnen. Durch stetige Konstruktionsanpassung wurde die Spannungsverteilung innerhalb der Aktivfläche so weit optimiert, dass größere Felder zu hoher bzw. niedriger Spannung vermieden werden konnten. Im Weiteren wurde die Konstruktion an die spätere Fertigung mittels Kunststoff-Spitzgießen angepasst. **Abb. 14** zeigt das komplett überarbeitete Design der beiden Teile der zweigeteilten oberen IDM-Platte. Gut zu erkennen ist die Medienführung im Bereich der Anschlussöffnungen am Rand der Platte. Da die an den Medienanschlüssen koppelnden Schläuche einen runden Durchmesser aufweisen, jedoch die Kanäle innerhalb des Stacks rechteckig sind, musste die Medienführung von rund zu eckig überführt werden. Außerdem ist die Anpassung an die Fertigung mittels Spritzguss anhand der Verrippung im mittleren Bereich der Platten zu sehen.

Die **Abb. 15** zeigt die Spannungsverhältnisse zum Stack. Links in der Abbildung ist zu erkennen, dass die Spannungsverteilung über den Bereich der Dichtfläche zum Stack nahezu konstant ist. Demzufolge ist die Dichtung laut Simulation gut bedrückt und ein Austreten der beiden Reaktionsmittel und des Kühlwassers sollte unterbunden sein. Aufgrund von Deformationen der IDM-Platten nach dem Verspannen des Stacks reduziert sich die Spannung der Dichtfläche vermutlich hin zu den äußeren Bereichen der Aktivfläche. Die wirkliche Funktionsfähigkeit wird sich daher erst im Betrieb in einem Test mit prototypischen Bauteilen zeigen.

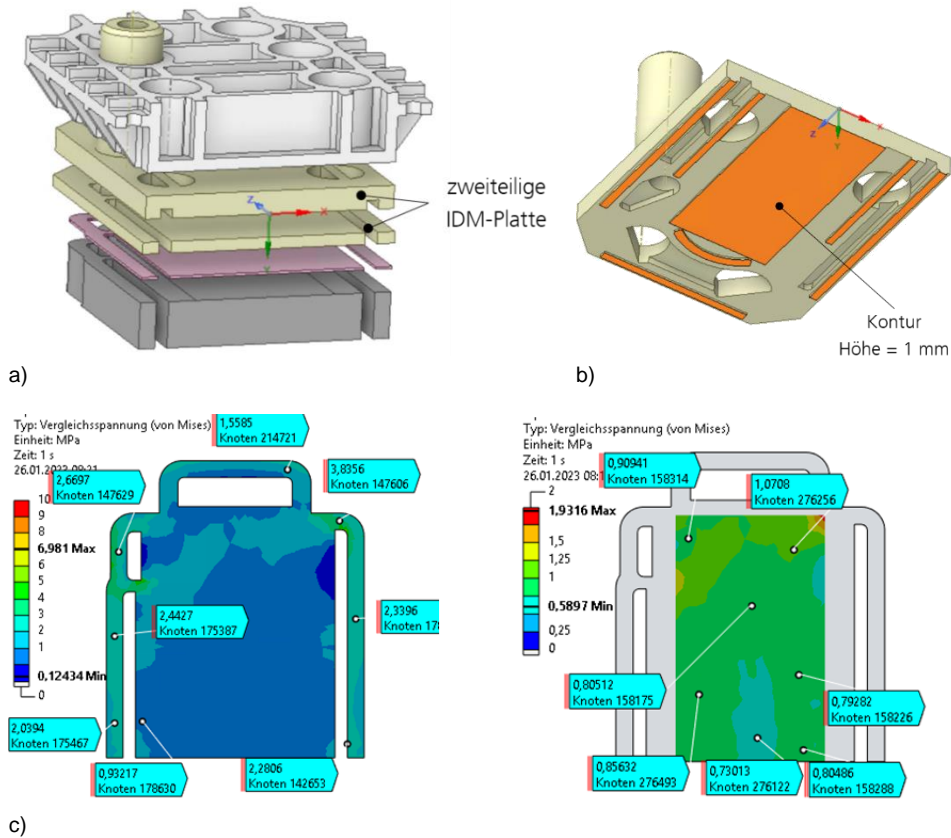


Abb. 13: a) Mittlerer Querschnitt des ersten Brennstoffzellen-Stack-Modells; b) Obere IDM-Platte mit einer Kontur; c) Spannungsbild im Stack

In der rechten Darstellung ist die simulative Spannungsverteilung über der Aktivfläche ersichtlich. Diese Aktivfläche ist genügend homogen bedrückt, um die geplante Leistung zu erbringen, jedoch die empfindlichen Komponenten wie MEA (englisch für Membran-Elektroden-Einheit) oder GDL (englisch für Gas-Diffusions-Schicht) im Aktivbereich nicht zu schädigen. Im Randbereich tritt eine höhere Spannung auf, da der Brennstoffzellen-Stack entlang der Außenkontur verspannt wird. Im größten Teil des Aktivbereichs liegt die Spannung im angestrebten Bereich. Die Unterseite des Stacks wird mit mehreren Schraubendruckfedern beaufschlagt, die dazu dienen die beim Verspannen aufgebrauchte Kraft in die Unterseite des Stacks zu leiten. Weiter dienen sie dem Ausgleich gewisser Setzungserscheinungen und thermischen Ausdehnungen der Komponenten während des Betriebs der Brennstoffzelle.



Abb. 14: CAD-Darstellung der beiden oberen IDM-Platten mit den einzelnen Ebenen der Medienübergabe, rechts: Unterseite medienlenkende IDM-Platte mit Stromabnehmer zur Stackseite.

Zur besseren Verteilung der durch die Federn übertragenen Kräfte wurde eine metallische Platte zwischen die untere IDM-Platte und die Federn eingesetzt (Abb. 16). Mit einer Parameterstudie wurden

die am besten geeigneten Parameter mittels Simulation ermittelt. Diese waren das Material der IDM-Platte, deren Dicke, die Orientierung der Federn, sowie der Federdrahtquerschnitt.

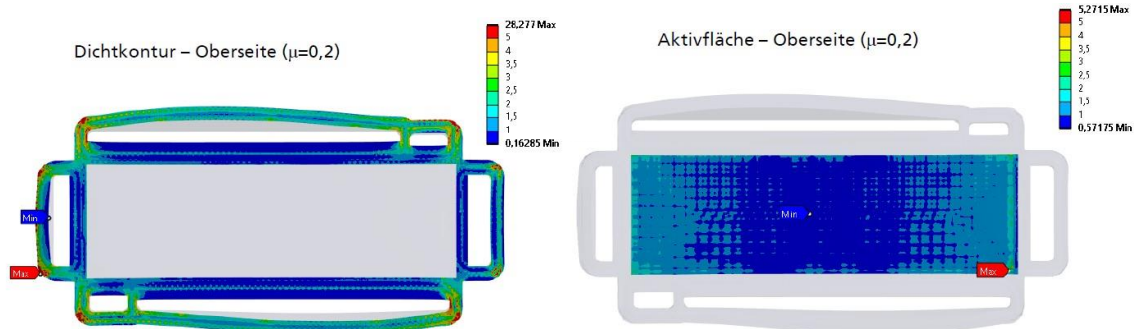


Abb. 15: Statisch-mechanische Simulation der Druckverteilung im Stack; links- Dichtkontur; rechts- Aktivfläche.

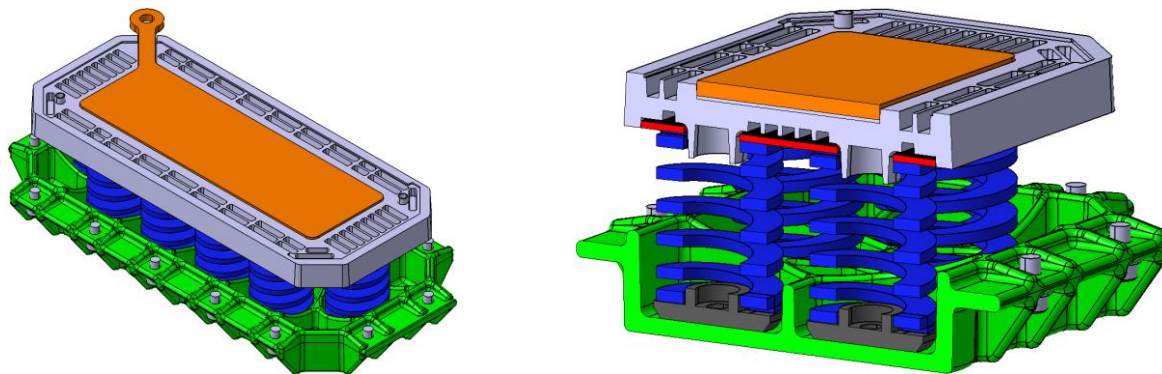


Abb. 16: links: Zusammenbau des unteren Endplattenmoduls inklusive Endplatte (grün), IDM-Platte (hellgrau), Federpaket (blau) und integrierter Stromabnehmerplatte (orange); rechts: Schnittdarstellung durch ZSB des unteren Endplattenmoduls mit metallischer Platte (rot), Gummimatte zum Toleranzausgleich (schwarz) und Federaufnahmen zu besserer Montage (anthrazit)

AP 2.5.3 Strömungstechnische Simulation und Optimierung der Mediensammlerzuleitungen

Im AP 2.5.3 wurde die Strömung in den Mediendurchführungen der IDM-Platte simuliert. Ziel war es, das Design des Mediensammlers und der Mediendurchführungen iterativ zu verbessern, um den Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems zu erhöhen. Erste Strömungssimulationen wurden mit ANSYS Discovery durchgeführt (**Abb. 17**).

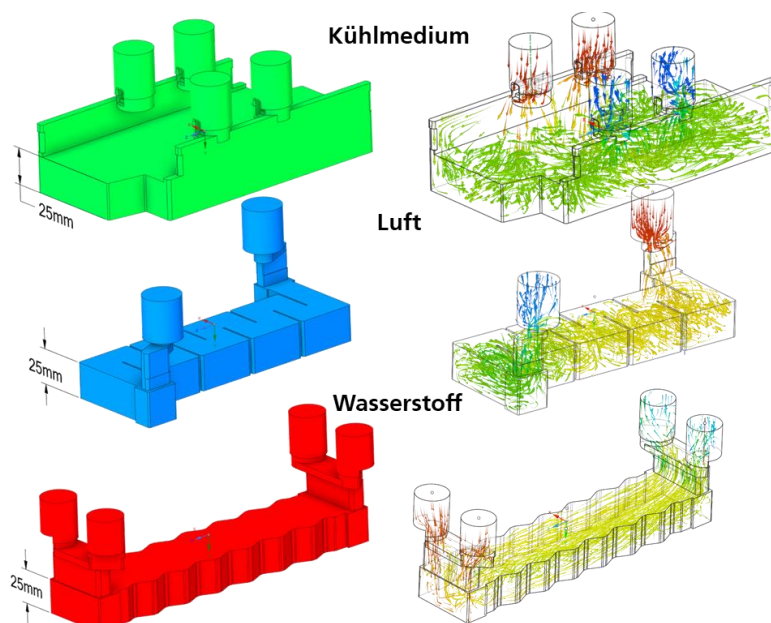


Abb. 17: Fluidsimulation.

Dabei wurde das CAD-Modell vereinfacht, um die Rechenzeit zu verkürzen. Jedes Medium (Wasserstoff, Luft, Kühlmedium) wurde separat simuliert, um die Strömungsverluste an jeder Komponente zu untersuchen und weiter zu optimieren.

Basierend auf den Ergebnissen der Simulationen wurden stetig weitere Maßnahmen zur Optimierung der Mediensammlerdurchführungen im Stack ergriffen.

AP 2.5.4 Segmentierung in fertigungsgerechte und möglichst beidseitig am Stack verwendbarer Einzelteile (Gleichteile-Ansatz)

Im AP 2.5.4 wurde ausgehend vom CAD-Grundentwurf die Möglichkeit eines Gleichteilansatzes, d. h. für die einzelnen IDM-Platten die exakt gleiche Geometrie zu verwenden, betrachtet. Dies war jedoch aufgrund der verschiedenen Anforderungen an die jeweilige Platte nur bedingt umsetzbar. Lediglich die Abmaße der auszulegenden Platten konnten gleich gehalten werden. Dadurch kann bei der Fertigung der einzelnen Platten auf ähnliche Werkzeuge bzw. austauschbare Module zurückgegriffen werden, was zu einer Kostenersparnis für die auszulegenden Spritzgusswerkzeuge und damit geringere Anschaffungskosten für den Hersteller führt.

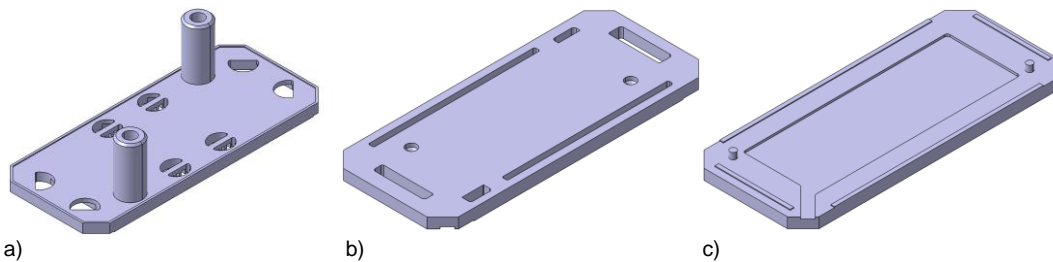


Abb. 18: Verschiedenen IDM-Platten: a) Medienführungsplatte; b) Medienverteilplatte; c) IDM-Platte auf Blindseite

Wie unter **AP 2.5.2** bereits erwähnt, erfuhren die IDM-Platten während der Auslegungsphase eine komplette Überarbeitung, wie in **Abb. 19** dargestellt. Eine Auslegung der IDM-Platten als Gleichteil war jedoch weiterhin nur sehr begrenzt realisierbar. Da stark voneinander abweichende Anforderungen an die einzelnen Platten gestellt sind, mussten in Summe drei Platten mit verschiedenen Geometrien genutzt werden. Die äußeren Abmessungen konnten jedoch gleich gestaltet werden, sodass sich der Unterschied nur auf den Bereich innerhalb der Außenkontur begrenzt. Dadurch konnte für die drei Platten geometrisch gleiches Ausgangsmaterial (Halbzeug) genutzt werden. Wie ebenfalls in Abschnitt **AP 2.5.2** erwähnt, wurden die Platten auch im Hinblick auf die Fertigung mittels Spritzguss optimiert. Auch hier ergaben sich auf Grund der verschiedenen angrenzenden Bauteile und Anforderungen verschiedene Ausführungen der Auslegung. Größere Massenanhäufungen wurden konstruktiv vermieden, um ein ungleichmäßiges Zusammenziehen beim Abkühlen der spritzgegossenen Platte zu vermeiden.

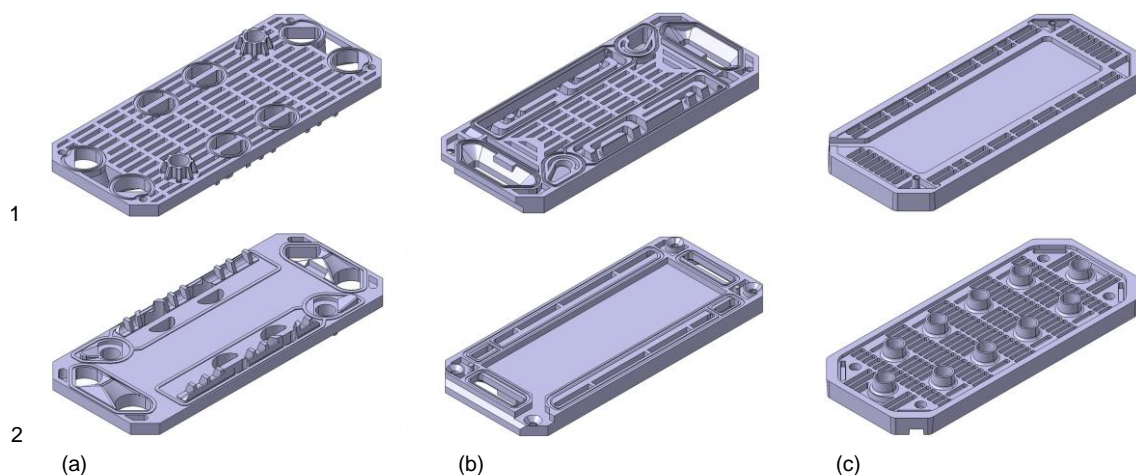


Abb. 19: Ober- (1) und Unterseiten (2) verschiedener IDM-Platten: a) Medienführungsplatte, b) Medienverteilplatte, c) untere IDM-Platte (Blindseite).

AP 2.5.5 Überprüfung und Feinkorrektur durch Festigkeits-, Tragbild- und Strömungstechnische Simulation

Alle IDM-Platten wurden parallel zum fortlaufenden Entwicklungsprozess durch Simulationen immer wieder überprüft und das Design der IDM-Platten finalisiert. Zur Fertigung erster Prototypen durch spanende Bearbeitung wurden die CAD-Modelle an den Projektpartner BERND FLACH Präzisionstechnik GmbH & Co. KG (FLACH) übergeben. Nach Fertigstellung der gefrästen Bauteile (**Abb. 20**) erfolgte ein erster Zusammenbau des Stacks. In den damit durchgeführten Testläufen (AP 2.5.9, AP 2.7.4) erfolgten Funktionstest an der Brennstoffzelle mit allen Komponenten durch Projektpartner (TU Chemnitz). Über die erzielte Leistung können dann Rückschlüsse gezogen werden, ob die Druckverhältnisse im Stack genügen, um die angestrebte Leistung zu erreichen. Aus Gründen der Verfügbarkeit wurde im Projekt auf POM als Material zurückgegriffen, welches ähnliche mechanische Kennwerte liefert wie das sich bereits in industrieller Anwendung verbreitete PEEK.

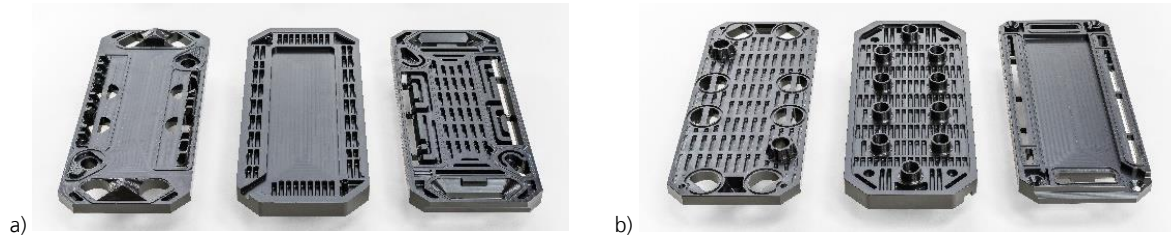


Abb. 20: Frästechnisch hergestellte Prototypen der IDM-Platten (Flach)
a) Oberseite, von links nach rechts: medienführende, untere, medienverteilende IDM-Platte,
b) Unterseite, von links nach rechts: medienführende, untere, medienverteilende IDM-Platte.

AP 2.5.6 Erarbeitung der für die Baukastenentwicklung erforderlichen Varianz in den Komponenten

In Anlehnung an die unter AP 2.6 vorgestellten Skalierungsvarianten ergeben sich entsprechende nötige Anpassungen an die IDM-Platten. In der Variante A entstehen für die IDM-Platten keine Änderungen, in der Variante B, muss der mittlere Teil geringfügig angepasst werden. Um die obere IDM-Platte skalierbar zu gestalten, müssen die Kanalstrukturen zur Kühlmedienverteilung im äußeren Bereich angepasst werden (vgl. **Abb. 33**).

AP 2.5.7 Ableitung eines spritzgussgerechten Konstruktionsstandes mittels Spritzguss-Simulation

Wie in Abschnitt AP 2.5.5 erwähnt, wurden die auskonstruierten CAD-Modelle der IDM-Platten an den Projektpartner FLACH zur Überprüfung der Herstellung mittels Spritzguss übergeben. Bereits während der Entwicklungs- und Konstruktionsphase der Platten fand ein regelmäßiger Austausch zwischen Fraunhofer IWU und FLACH statt. Auf die Ergebnisse dieses Arbeitspakets wird im Abschlussbericht des Projektpartners näher eingegangen.

AP 2.5.8 Herstellung von endkonturnahen Erstmustern mittels Frästechnologie

Aufbauend auf den Ergebnissen aus AP 2.5.1 bis 2.5.5 entstanden bei dem Projektpartner FLACH erste gefräste, prototypische Bauteile der IDM-Platten. Diese sind in **Abb. 20** dargestellt. Im Abschlussbericht des Projektpartners wird näher auf den hier erwähnten AP eingegangen.

AP 2.5.9 Mechanische Belastungstests und Druckverteilungsanalysen zur IDM-Platte

In Abschnitt AP 2.5.5 wurde bereits beschrieben, dass der hier behandelte AP unter Verantwortung der TUC lag. Weitere Ausführungen sind dem Abschlussberichts des Projektpartners zu entnehmen.

AP 2.5.10 Iterative Anpassungen zum Konzeptentwurf auf Basis der Belastungs- und Tragbild-ergebnisse sowie Spritzgussimulation

Nach der finalen Auslegung der Konstruktion und Simulation war die Fertigung der einzelnen Komponenten angestrebt. Daran anschließend wurden ein bzw. mehrere Testläufe des zusammengebauten Stacks durchgeführt. Dabei wurde dessen Funktionsfähigkeit geprüft und entsprechende Anpassungen an die Geometrie vorgenommen werden. Ziel war die fehlerfreie Funktion des Stacks im Betrieb ohne Leckagen und die Erzielung der im Projekt angestrebten Leistung. Hierzu wurde mithilfe von Druckmessfolie die Druckverteilung innerhalb der IDM-Platten und zwischen den weiteren Platten geprüft. Zu sehen ist das sich ergebende Druckbild der medienleitenden, oberen IDM-Platte zum ebenen Untergrund, welcher den Stack abbilden sollte. Dabei zeichneten sich Stellen, welche Druck erfuhren, deutlich

auf der Folie ab. Andere Stellen im Dichtungsbereich wiesen keine deutliche Verfärbung der Folie auf, was darauf schließen lässt, dass hier keine bzw. eine nur ungenügende Druckübertragung stattfand (**Abb. 21**).



Abb. 21: Druckmessfolie nach Druckversuch medienleitenden IDM-Platte zu ebenem Untergrund.

Gut zu erkennen ist die deutliche rote Einfärbung der Folie am oberen und unteren Rand der IDM-Platte. Die seitlichen Bereiche, in denen die Sauerstoffzufuhr erfolgt, und der Bereich der aktiven Reaktionszone sind dagegen kaum oder nicht zu erkennen. Dies liegt einerseits an der zentralen Krafteinleitung durch die verwendete Presse und die ungenügende Dicke der Stromabnehmerplatte im Bereich der aktiven Reaktionszone. Auch der Bereich um den Wasserstoffzufluss ist nicht homogen bedrückt. Hierdurch ergab sich Handlungsbedarf für die IDM-Platten. Als erste Maßnahme wurde die Dichtnut angepasst. Diese war im ersten Versuch als Steg ausgeformt und sollte als Gegenstück zur Dichtnut in diese eintauchen (**Abb. 22**). Zusammen mit geeignetem Dichtmaterial sollte hier eine komplette Abdichtung sowie die Weiterleitung der aufgebrachten Verspannkraft erfolgen.



Abb. 22: Links: untere und obere IDM-Platte, mittig: untere IDM-Platte mit Dicht-Nut; rechts: obere IDM-Platte mit Dicht-Steg.

Aufgrund von Fertigungstoleranzen passten die Bauteile nicht exakt zueinander. Deshalb wurde entschieden, den Steg/die Feder der oberen, medienführenden IDM-Platte (**Abb. 22** rechts) zu entfernen, so dass eine ebene Fläche entstand (**Abb. 23**).



Abb. 23: Obere, medienführende IDM-Platte mit nachgefräster Dichtkontur.

Hierbei kam es allerdings zu einem Verquetschen der O-Ring-Dichtung. Dies führte zum Verengen der Zuflüsse der Medien, was zu einem Leistungsverlust bei der späteren Anwendung führen könnte. Lösungsansatz war nun, den Bereich, der zuerst als Steg/Feder ausgeführt war, als weitere Nut auszuführen. Um eine Abdichtung zu schaffen, die die Dichtnut im richtigen Maß ausfüllt, wurde entschieden, diese mittels Dispersion aufzubringen (**Abb. 24**). So wurde auch das Problem des verengten Querschnitts gelöst.



Abb. 24: Obere, medienführende IDM-Platte mit erneut nachgefräster Dichtkontur (so dass eine Nut entsteht) und mittels Dispersion aufgetragenes Dichtmittel.

Durch die iterativen Anpassungen der einzelnen Bauteile ergab sich bei den letzten Tests folgendes Ergebnis: Im Vergleich zu **Abb. 21** ergab sich ein ähnliches Druckbild. Unter Verwendung einer 0,5 mm starken Silikonbeilage unter der Stromabnehmerplatte ergab sich jedoch eine deutlich zu erkennende Verfärbung im aktiven Reaktionsbereich (**Abb. 25**).

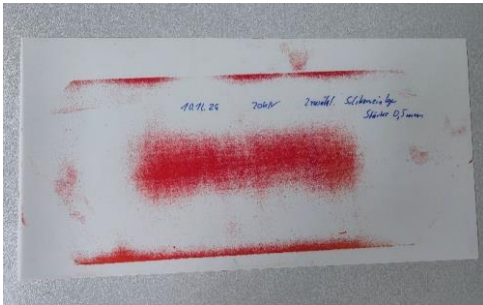


Abb. 25 Druckmessfolie der 2. Iterationsschleife zur Anpassung der Druckverteilung.

Der äußere Bereich ist ähnlich zu **Abb. 21** nicht homogen bedrückt, da wie zuvor durch die zentral eingebrachte Kraft nur der innere Bereich Druck erfuhr. Da sich aber selbst unter dieser ungünstigen Krafteinleitung die seitlichen Bereiche leicht abzeichnen, sollte sich bei einer umlaufenden Verspannung, wie im realen Anwendungsfall vorgesehen, ein Druck in ausreichender Höhe ergeben. Innerhalb der IDM-Platten erscheint die Druckverteilung genügend (**Abb. 26**).



Abb. 26 Druckmessfolie der oberen IDM-Platten, links: obere IDM-Platten untereinander, rechts: untere, medienleitende IDM-Platte zum Stack.

Zu erwähnen ist hier die inhomogene Verteilung zum Randbereich hin. Dies liegt, wie zuvor bereits erwähnt, an der ungünstigen Lastverteilung durch die verwendete Presse. In der realen Anwendung wird durch die Verspannung an sowohl der langen als auch der kurzen Seite an beiden Stellen Kraft eingebracht. Das dürfte zu ausreichendem Druck führen.

Von Seiten des Projektpartners FLACH wurde bzgl. nötigen Änderungen auf Grund der Erkenntnisse der Spritzgussimulation keine Anpassung der Konstruktion gefordert.

Das Arbeitspaket 2.5 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

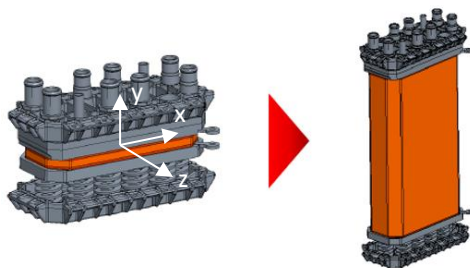
AP 2.6 Skalierungs- und Baukastenkonzepte für gegossene Endplatten-Manifold-Module (R:

IWU)

Das Ziel im Arbeitspaket 2.6 bestand darin, Skalierungs- und Baukastenkonzepte für gegossene Endplatten-Manifold-Module aufzuzeigen. Die verschiedenen Zielstellungen wurden in Unterarbeitspaketen fixiert:

- AP 2.6.1: CAD-Entwurf eines EMM-Funktionsmusters mit der Maßgabe der Skalierbarkeit (R: IWU S: TU Chemnitz)
- AP 2.6.2: Entwicklung eines Konzepts für ein modulares Gießwerkzeug (Werkzeugeinsätze) (R: Handtmann, S: IWU)
- AP 2.6.3: Konzept für ein Anschlusssystem mit skalierbaren Schnittstellen (R: ESKA, S: IWU)

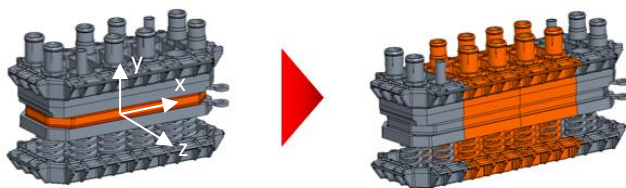
Da CAD (AP 2.6.1), Gießwerkzeug (AP 2.6.2) und Schnittstellen (AP2.6.3) eng miteinander in Endplattensystem verknüpft sind, betrachteten die Partnern die Unterarbeitspakete gemeinsam und entwickelten gemeinsame Konzepte. Die Skalierung umfasst die Skalierbarkeit in die drei Raumrichtungen x, y und z. Je nach Raumrichtung ergaben sich unterschiedliche Möglichkeiten und Schwierigkeitsgrade für die Skalierung. Der Schwierigkeitsgrad nimmt von der y- (Höhe) über x- (Länge) zur z-Richtung (Breite) zu. **Abb. 27** bis **Abb. 29** geben einen Überblick der Ansätze. Die für die Skalierung und das Baukasten-system nötigen wichtigsten Änderungen sind ebenfalls in den Bildern zusammengefasst.



Die kleinsten Änderungen ergeben sich in y-Richtung durch eine Anpassung der Stackhöhe

Bauteil	Notwendige Anpassungen
Medienanschlüsse	Anzahl erhöht sich bei steigendem Medienbedarf ⁽¹⁾
Endplatte	Keine
IDM-Platten_oben	Keine
Bipolar-Platten	Anzahl vergrößert sich (1-XXX)
IDM-Platten_unten	Keine
Federsystem	Ggf. müssen die Federhöhen (Federwege) angepasst werden ⁽²⁾
Endplatte_unten	keine

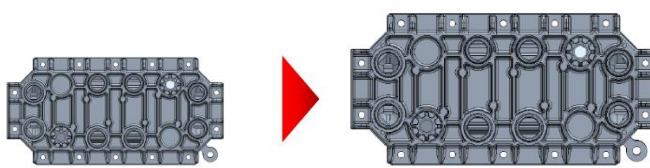
Abb. 27: Skalierungs- und Baukastenkonzept – Skalierung in y-Richtung (Anpassung der Stackhöhe, Variante A).



Die Skalierung in x-Richtung zieht gewisse notwendige Anpassungen nach sich

Bauteil	Notwendige Anpassungen
Medienanschlüsse	Anzahl erhöht sich bei steigendem Medienbedarf ⁽³⁾
Endplatte	Skalierung in x-Richtung ⁽⁴⁾
IDM-Platten_oben	Skalierung in x-Richtung ⁽⁵⁾
Bipolar-Platten	Skalierung in x-Richtung, Anzahl gleich ⁽⁶⁾
IDM-Platten_unten	Skalierung in x-Richtung ⁽⁷⁾
Federsystem	Anzahl erhöht sich je nach Modulen ⁽⁸⁾
Endplatte_unten	Skalierung in x-Richtung ⁽⁸⁾

Abb. 28: Skalierungs- und Baukastenkonzept – Skalierung in x-Richtung (Variante B).



Die Skalierung in z-Richtung macht umfangreiche Anpassungen notwendig

Bauteil	Notwendige Anpassungen
Medienanschlüsse	Größere Querschnitte notwendig ⁽¹⁰⁾
Endplatte	Anpassung von Breite, Dicke, Größe der funktionellen Elemente ⁽¹¹⁾
IDM-Platten_oben	Anpassung der Kanalstruktur notwendig ⁽¹²⁾
Bipolar-Platten	Anpassung der Flussfelder notwendig ⁽¹³⁾
IDM-Platten_unten	Anpassung an verändertes Federsystem ⁽¹⁴⁾
Federsystem	Anzahl und Anordnung der Federn muss angepasst werden
Endplatte_unten	Anpassung an Federsystem und höhere Steifigkeit notwendig ⁽¹⁵⁾

Abb. 29: Skalierungs- und Baukastenkonzept – Skalierung in x- und z-Richtung.

Nachfolgend werden die Arbeitspakete AP2.6.1 bis AP2.6.4 einzeln betrachtet.

AP2.6.1 CAD-Entwurf eines EMM-Funktionsmusters mit der Maßgabe der Skalierbarkeit (R: IWU, S: TU Chemnitz)

Für die Skalierung der Brennstoffzelle stehen die drei Koordinatenrichtungen x, y und z (**Abb. 30**) zur Verfügung. Die notwendigen Anpassungen sind dabei unterschiedlich komplex.

Anpassungen in y-Richtung

Die Skalierung des Stacks in y-Richtung ist am wenigsten aufwändig, da nur die Stackhöhe geändert werden muss. Die Änderung der Stackhöhe wird mit der Erhöhung oder Verringerung der Anzahl der Bipolar-Platten erreicht (**Abb. 27**). Die Zahl der Bipolar-Platten ist entscheidend für die Leistung des Stacks. Die Veränderung der Zahl der Bipolar-Platten erfordert eine Anpassung der Medienzufuhr (Kühlwasser, Wasserstoff). Mit zunehmender Anzahl Bipolar-Platten steigt deren Medienbedarf (Wasserstoff, Luft, Kühlmedium), siehe **Abb. 31**. Ab einer gewissen Menge sind die Anschlussquerschnitte in der

Endplatte und die Kanalquerschnitte im Stack nicht mehr in der Lage, die erforderlichen Medien durchzuleiten. Dann sind weitere Anpassungen notwendig. Die im Projekt entwickelte obere Endplatte besitzt bereits je zwei Medienanschlüssen für Luft und Kühlwasser. Für einen kleineren Stack reicht jeweils ein Anschluss. Die nicht benötigten Anschlüsse können in der Endplatte verschlossen bleiben, nur die benötigten werden aufgefräst. Beim Wasserstoff reicht ein Anschluss auch bei größeren Stacks aufgrund dessen geringer molekularer Dichte.

Die Brennstoffzellen-Stacks erwärmen sich im Betrieb trotz permanenter Kühlung. Damit entstehen thermisch induzierte Verformungen. Diese beeinflussen die Stackvorspannung. Die Aufgabe des integrierten Federsystems besteht darin, dies auszugleichen. Je größer die Stackhöhe, desto größer die Verformungen. Somit werden bei größeren Stackhöhen auch größere Federwege erforderlich und die Federn müssen ggf. angepasst werden.

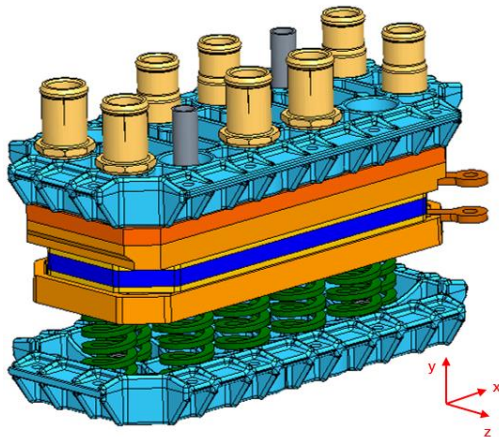
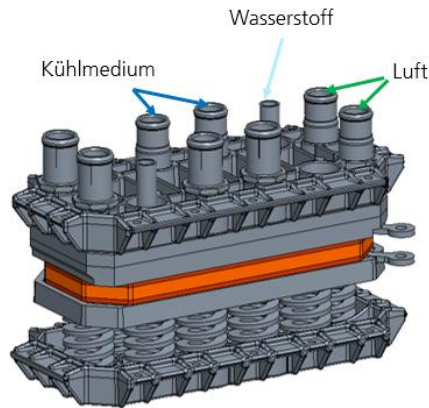


Abb. 30: Brennstoffzelle und Koordinatensystem.



Medieneinlässe (Auslässe gegenüberliegend)

Abb. 31: Medienschnittstellen an einem Stack.

Anpassungen in x-Richtung

Die Skalierung des Stacks in x-Richtung und eine damit verbundene Leistungssteigerung ist mit einer Modularisierung des Stacks umsetzbar (**Abb. 28**, **Abb. 32**). Diese Vorgehensweise ist aufwändiger als eine Erweiterung in y-Richtung. Um die Skalierung erfolgreich umsetzen zu können, muss der ursprüngliche Stack in End- und Zwischenmodule zerlegt werden.

a) Obere Endplatte

Durch die regelmäßige Gestaltung der Endplatte mit wiederkehrenden Elementen entlang der x-Achse kann ein modulares Design entstehen. Die Anzahl der Zwischenmodule kann dabei (fast) beliebig erweitert werden. Die mit der Skalierung in x-Richtung verbundenen notwendigen Anpassungen sind in **Abb. 28** aufgeführt. Mit der Variation der Zahl der Zwischenmodule können verschiedene Leistungsklassen adressiert werden (**Abb. 32**).

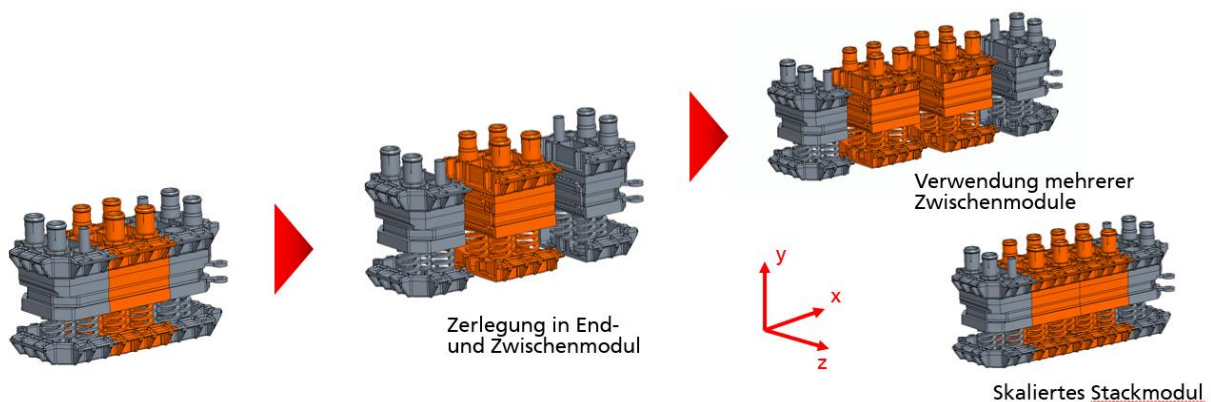


Abb. 32: Skalierung eines Stack in x-Richtung durch Modularisierung.

Die Leistungssteigerung erfolgt überproportional zum Massezuwachs im Vergleich zu zwei oder mehreren Einzelstacks. Die Konstruktions- und Berechnungsdaten können modularisiert werden. Die Skalierung ist allerdings nicht beliebig erweiterbar, da die Medienverteilung sonst zum Problem wird. Aus Kostengründen erscheint die Verwendung von mehreren Einzelstacks günstiger, da in diesem Fall keine

weiteren Anpassungen notwendig werden. Die Modularisierung von Druckguss- und Spritzgusswerkzeug wird aus Kostengründen nur eine theoretische Lösung darstellen, da die Komplexität gegenüber angepassten Neuwerkzeugen deutlich größer ist.

Durch eine einfache Modularisierung des Brennstoffzellen-Stacks in x-Richtung erhöht sich die Anzahl der Anschlüsse für das Kühlmedium proportional mit. Die Anschlüsse für Luft und Wasserstoff sind in den Endmodulen enthalten und müssen nicht mit angepasst werden. Solange die Versorgung des Stack mit diesen Medien gewährleistet ist, kann das System beliebig vergrößert werden.

b) Obere IDM-Platten

Die Skalierung der IDM-Platten in x-Richtung kann durch eine Modularisierung des Aufbaus erreicht werden. Für die obere IDM-Platte ist eine Modularisierung ohne Probleme möglich. An der unteren IDM-Platte sind Anpassungen in den seitlichen Bereichen zur Medienführung und -verteilung notwendig (**Abb. 33**).

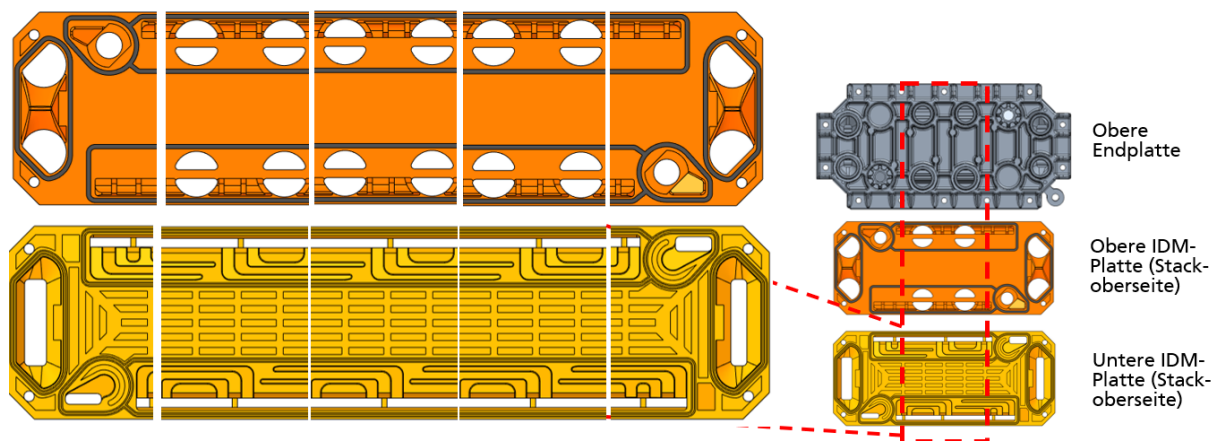


Abb. 33: Skalierung der oberen IDM-Platten des Stack in x-Richtung durch Modularisierung.

c) Bipolar-Platten

Die Skalierung der Bipolar-Platten in x-Richtung kann ebenfalls durch eine Modularisierung des Aufbaus erreicht werden (**Abb. 34**). Insbesondere die Flussfelder und ihre Kanalstrukturen müssen jedoch auf eine Modularität angepasst werden. Makroskopisch gesehen scheint dies möglich. Durch die große Feinheit der Kanalstrukturen im Flussfeld ist die Modifikation der Präge-/Schneidwerkzeuge mit einem hohen Aufwand verbunden. Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen scheint es daher zielführender, jeweils separate Werkzeuge für die einzelnen Plattengrößen zu gestalten.

d) Untere IDM-Platte

Die untere IDM-Platte weist funktionell eine geringere Komplexität auf. Es muss nur die Anordnung der Federn berücksichtigt werden (**Abb. 35**). Eine Modularisierung ist mit geringem Aufwand möglich.

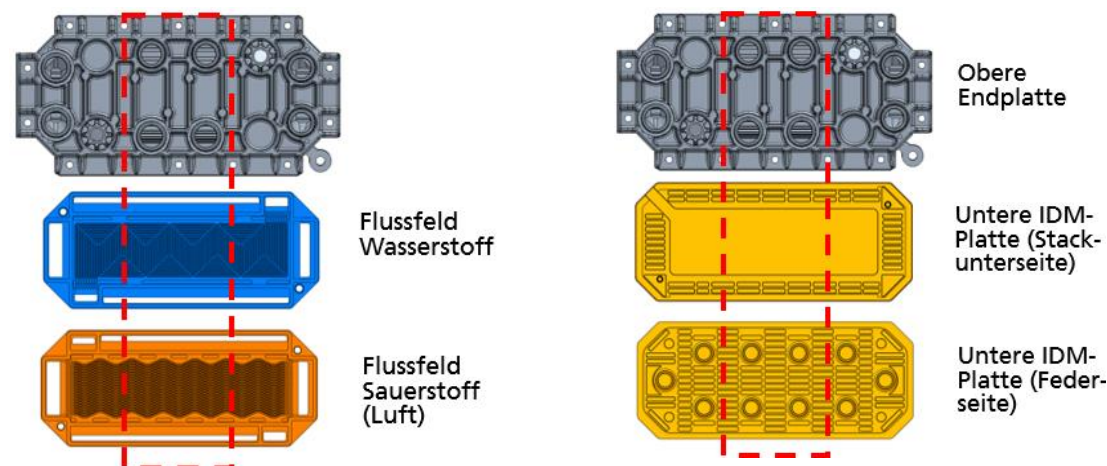


Abb. 34: Skalierung der Bipolar-Platten eines Stack in x-Richtung durch Modularisierung.

Abb. 35: Skalierung der unteren IDM-Platte des Stack in x-Richtung durch Modularisierung.

e) Untere Endplatte

Die untere Endplatte weist keine Mediendurchführungen auf. Es muss bei der Modularisierung nur die Integration des Federsystems berücksichtigt werden. Dafür sind kleinere Anpassungen notwendig, wie zum Beispiel die Rippenanordnung (**Abb. 35**). Eine Modularisierung ist mit geringem Aufwand möglich.

Anpassungen in z-Richtung

Die Skalierung des Stacks in z-Richtung ist mit dem größten Anpassungsaufwand verbunden (**Abb. 29**, **Abb. 36**). Es müssten alle Elemente modifiziert werden. Der Aufwand ist mit einer Neukonstruktion vergleichbar. Das Design der Komponenten kann prinzipiell beibehalten werden, aber Wanddicken und funktionelle Elemente müssen für jedem Einzelfall angepasst werden.

Die Skalierung in z-Richtung erfordert umfangreiche Anpassungen. Der Nutzen und die Grenzen der Vorgehensweise werden wie folgt abgeschätzt:

- Nutzen: Die Leistungssteigerung erfolgt überproportional zum Massezuwachs (verglichen mit 2 Einzelstacks). Die Konstruktionsdaten können weiterverwendet, müssen jedoch zwingend angepasst werden.
- Grenzen: Die Skalierung in Querrichtung erfordert zahlreiche Anpassungen. Nahezu alle Komponenten müssen verändert werden. In den meisten Fällen reichen einfache Skalierungen in der Konstruktion nicht aus. Durch die konstruktiven Änderungen müssen auch die Berechnungen (Steifigkeit, Durchbiegung) neu durchgeführt werden. In der Summe entspricht der Aufwand einer Neukonstruktion, es entsteht eine neue Stack-Baugröße mit ähnlichem Design.

Eine Skalierung nur in z-Richtung bringt keine Vorteile, es muss in x- und z-Richtung gleichzeitig skaliert werden (**Abb. 36**).

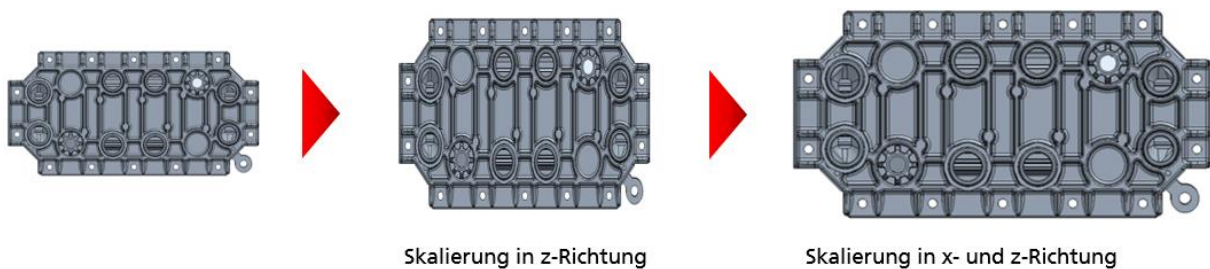


Abb. 36: Skalierung der oberen Endplatte des Stack nur in z-Richtung bzw. kombiniert in x- und z-Richtung.

a) Obere Endplatte

Mit der Skalierung in z-Richtung wächst die wirksame Aktivfläche. Damit steigt auch der Medienbedarf. Konstruktiv kommen keine Anschlussmöglichkeiten hinzu, somit müssen die Anschlussquerschnitte größer werden (**Abb. 38**). Dies zieht konstruktive Änderungen im Design nach sich, die sich auf die Steifigkeit der Endplatte auswirken.

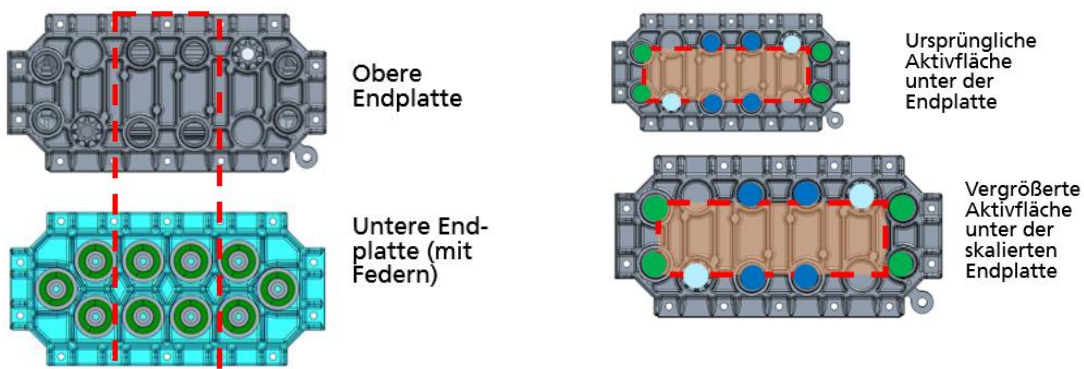


Abb. 37: Skalierung der unteren Endplatte des Stack in x-Richtung durch Modularisierung.

Abb. 38: Skalierung der oberen Endplatte des Stack in x- und z-Richtung: Vergrößerung der Anschlussquerschnitte.

Mit der Skalierung der Endplatte in der Fläche wächst auch die notwendige Vorspannkraft. Die Querschnittsfläche der Zuganker muss in gleichem Maße steigen (größere Gewinde). Weiterhin steigt die Stützweite zwischen den Zugankern (**Abb. 39**). Soll die Durchbiegung konstant bleiben, muss die Dicke der Endplatte zunehmen. Da aber auch der Schraubenabstand zunimmt, muss die Durchbiegung neu berechnet werden. Bei der Skalierung muss beachtet werden, dass zum Beispiel auch Rippen- und

Wandstärken mitwachsen, dies kann mit technologischen Parametern kollidieren.

b) Obere IDM-Platten

Eine Skalierung der oberen IDM-Platten ist prinzipiell vorstellbar. Zu beachten sind dabei veränderte Strömungsverhältnisse in den Medienkanälen. Weiterhin sind Maximalwandstärken im Spritzguss zu berücksichtigen. Die Versteifungsmuster im Platteninneren müssen hier ggf. angepasst werden. Für die skalierten Komponenten sind in jedem Fall neue Werkzeuge notwendig.

c) Bipolar-Platten

Bei den Bipolar-Platten müssen die Strömungsfelder an die neuen Geometrien angepasst werden. Die Kanalstrukturen können nicht durch einfaches Skalieren erzeugt werden. Für die skalierten Komponenten sind auf jeden Fall neue Werkzeuge notwendig.

d) Untere IDM-Platte

Die Oberseite der unteren IDM-Platte für die Aufnahme der Elektrode lässt sich prinzipiell skalieren. Zu beachten sind Mindest- bzw. Maximalwandstärken für den Spritzguss. Die Unterseite muss konstruktiv überarbeitet werden, da sich bei größerer Aktivfläche das Federsystem verändern wird (mehr und ggf. größere Federn). Für die skalierten Komponenten sind auf jeden Fall neue Werkzeuge notwendig.

e) Untere Endplatte

Wie die untere IDM-Platte muss auch die untere Endplatte an das veränderte Federsystem angepasst werden. Entsprechend der neuen Federanordnung ist die Verrippung neu zu gestalten. Analog zur oberen Endplatte vergrößert sich auch hier die Stützweite der Verschraubung, so dass eine größere Biegesteifigkeit notwendig wird (höhere und ggf. breitere Rippen). Für die skalierten Komponenten sind auf jeden Fall neue Werkzeuge notwendig.

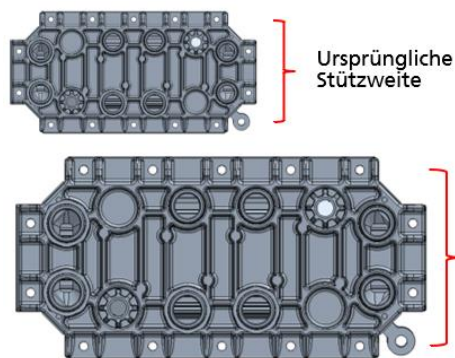


Abb. 39: Skalierung der oberen Endplatte des Stack in x- und z-Richtung: Vergrößerung der Stützweite.

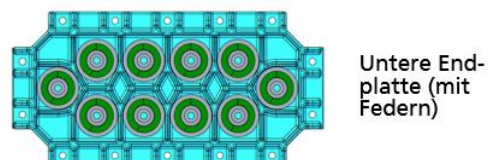


Abb. 40: Unteren Endplatte mit Federn, skaliert in x- und z-Richtung.

Baukastenkonzepte

Aus den genannten Skalierungsmöglichkeiten ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, ein Baukastensystem zu planen:

a) Skalierung in y-Richtung

Eine Skalierung in y-Richtung ist einfach realisierbar. Die Änderung der Stackleistung wird mit der Erhöhung oder Verringerung der Anzahl der Bipolar-Platten erreicht (**Abb. 27**). Die Veränderung der Zahl der Bipolar-Platten erfordert eine Anpassung der Medienzufuhr (Kühlwasser, Wasserstoff). Werden in den Endplatten bereits Öffnungen für Medienanschlüssen vorgesehen, die nach dem Gießen in Abhängigkeit von der gewünschten Stackleistung geöffnet werden, ist eine Anpassung der Stackleistung über die Zahl der Bipolar-Platten realisierbar. Die Optionen für die Medienanschlüsse müssen auch bei den IDM-Platten berücksichtigt werden. Ebenso muss Kompatibilität zu den Bipolar-Platten bestehen. Die thermisch induzierte Verformungen sind abhängig von der Stackhöhe und müssen mit vorher ausgelegten und vorrätigen Spann-/Federsystemen ausgeglichen werden.

Fazit: Es können mehrere Varianten eines Stack mit einer unterschiedlichen Anzahl Bipolar-Platten und damit verschiedene Leistungsklassen vorgehalten werden. Für diese Varianten sind die Medienzufuhr und die Spannkkräfte im Vorfeld angepasst.

b) Skalierung in x-Richtung

Eine Leistungssteigerung kann erreicht werden, indem der Stack modular aufgebaut wird (**Abb. 32**), d. h., in Abhängigkeit von der gewünschten Leistung werden zwischen die Randmodule Zwischenmodule gesetzt. Die dafür nötigen Konstruktions- und Berechnungsdaten können modularisiert werden. Die Skalierung ist nicht beliebig erweiterbar, da die Medienverteilung sonst zum Problem wird. Aus Kostengründen erscheint die Verwendung von mehreren Einzelstacks günstiger, da in diesem Fall keine weiteren Anpassungen notwendig werden. Durch eine einfache Modularisierung des Brennstoffzellen-Stacks in x-Richtung erhöht sich die Anzahl der Anschlüsse für das Kühlmedium proportional mit. Die Anschlüsse für Luft und Wasserstoff sind in den Endmodulen enthalten und können nicht mit angepasst werden. Solange die Versorgung des Stacks mit diesen Medien gewährleistet ist, kann das System beliebig vergrößert werden.

Fazit: Eine Skalierung ist möglich. Ob die Skalierung gegenüber der Verwendung mehrere Stacks ökonomische Vorteile bringt, muss von Fall zu Fall abgeschätzt werden.

c) Skalierung in z-Richtung (x- und z-Richtung)

Eine Skalierung nur in z-Richtung bringt keine Vorteile. Die Skalierung gleichzeitig in x- und z-Richtung ist sinnvoll. Allerdings ist der Aufwand sehr hoch. Die Einzelheiten wurden im Abschnitt „Anpassungen in z-Richtung oben detailliert.

Fazit: Der Aufwand für die Skalierung in x- und y-Richtung entspricht der Auslegung eines einzelnen Stacks, so dass die Modulbauweise in x- und z-Richtung nicht sinnvoll ist und keine ökonomischen Vorteile bringt.

AP 2.6.2 Entwicklung eines Konzepts für ein modulares Gießwerkzeug (Werkzeugeinsätze) (R: Handtmann, TU Chemnitz)

Für die Bearbeitung und den Abschluss des Arbeitspakets war Handtmann verantwortlich. Unterstützt wurden die Arbeiten von der TU Chemnitz. Die durchgeführten Arbeiten und die erarbeiteten Ergebnisse sind den Berichten der beiden Partner zu entnehmen.

AP 2.6.3 Konzept für ein Anschlusssystem mit skalierbaren Schnittstellen (R: Eska, TU Chemnitz)

Für die Bearbeitung und den Abschluss des Arbeitspakets war Eska verantwortlich. Unterstützt wurden die Arbeiten von der TU Chemnitz. Die durchgeführten Arbeiten und die erarbeiteten Ergebnisse sind den Berichten der beiden Partner zu entnehmen.

AP 2.6.4 Konzept für eine großserientaugliche Produktion des Endplatten-Manifold-Moduls im Aluminiumdruckguss (R: Handtmann, S: IWU, Bearbeitungszeit)

Für die Bearbeitung und den Abschluss des Arbeitspakets war Handtmann verantwortlich. Unterstützt wurden die Arbeiten vom IWU. Die durchgeführten Arbeiten und die erarbeiteten Ergebnisse sind dem Bericht des Partners zu entnehmen.

Das Arbeitspaket 2.6 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

AP 2.7 Experimentelle Realisierung von Forschungsfunktionsmustern zum Endplatten-Manifold Modul (R: Handtmann)

AP 2.7.1 Herstellung von zwei Funktionsmustern (Gießformen Konstruktion, Topologie-Optimierung, gießtechnische Anpassung (R: Handtmann, S: IWU)


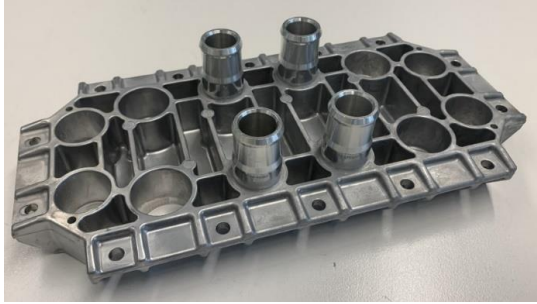

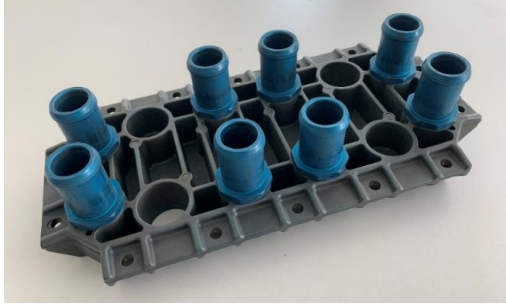
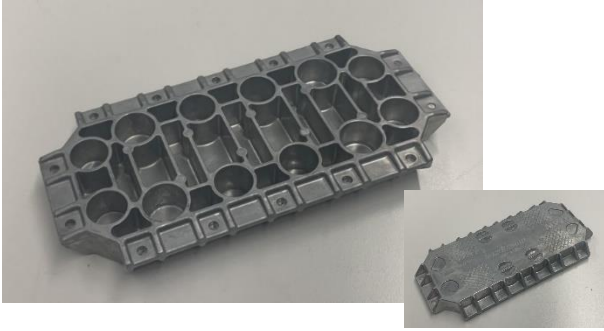

Handtmann fertigte eine größere Stückzahl an Funktionsmuster (massive und poröse obere Endplatten, massive untere Endplatten) im Druckguss. Das IWU unterstütze die Vorbereitungsarbeiten und einen Teil der Abgüsse (Orientierungsversuche massive Platte, Abgüsse im Porendruckguss).

Handtmann stellte den Projektpartnern abgegossene Endplatten für Untersuchungen zur Verfügung. Die Funktionsmuster wurden von den Partner finalisiert. Abgegossen wurden massive obere und untere sowie poröse obere Endplatten (**Tab. 2**). Daraus gefertigt wurden Endplatte mit Medienzufuhr (Stützen reibrührgeschweißt (z. T. eloxiert) und eingegossen):

- massive obere Endplatte;
- massive obere Endplatte mit Medienzufuhr, Stützen eingegossen;
- massive obere Endplatte mit Medienzufuhr, Stützen reibrührgeschweißt;

- massive obere Endplatte mit Medienzufuhr, Stutzen reibrührgeschweißt, eloxiert;
- poröse obere Endplatte;
- massive untere Endplatte.

Tab. 2: Im Vorhaben hergestellte Endplatten-Typen.

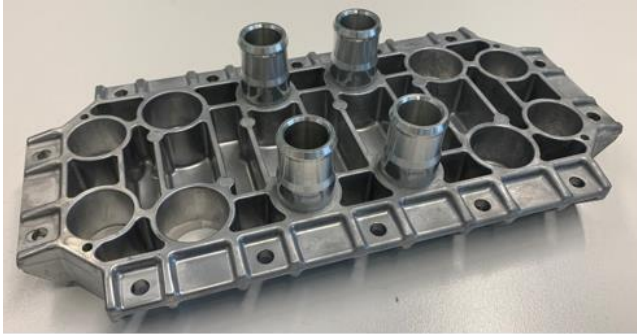
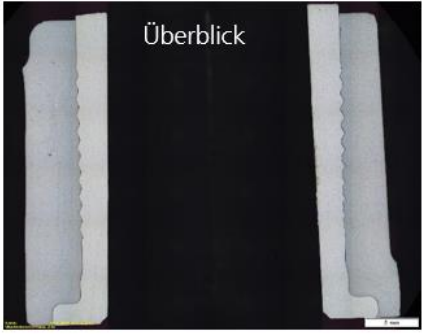
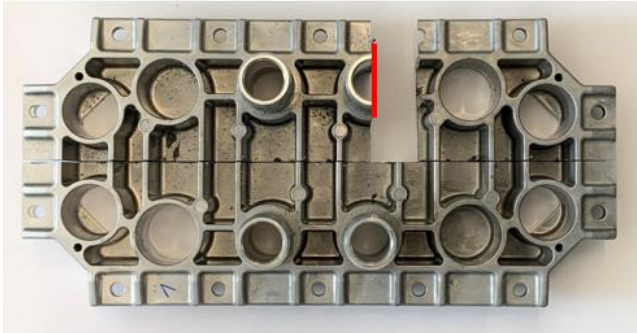

Endplatten-Typ	Fotos und Bemerkungen
Massive obere Endplatte (einseitig) 	Massive obere Endplatte mit eingegossenen Stutzen (einseitig) 
Massive obere Endplatte mit reibrührgeschweißten Stutzen (einseitig) 	Massive obere Endplatte mit reibrührgeschweißten und eloxierten Stutzen (einseitig) 
Poröse obere Endplatte (beidseitig) 	Massive untere Endplatte (einseitig) 

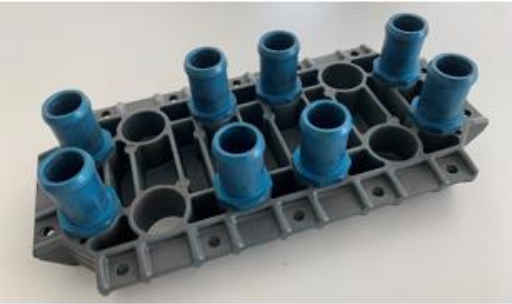
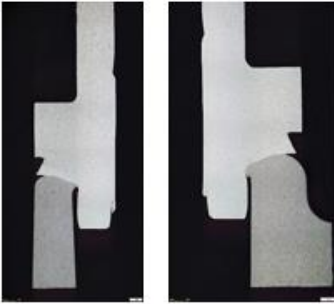

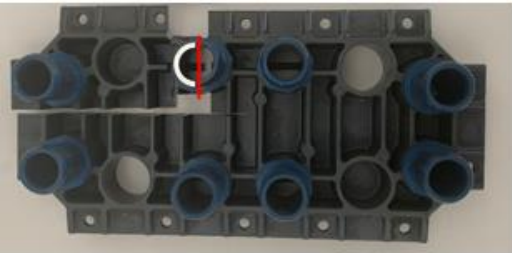
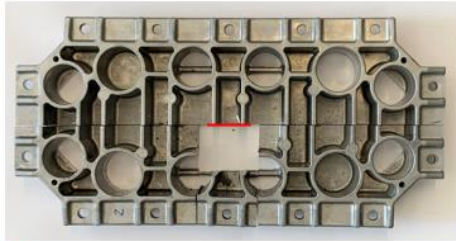

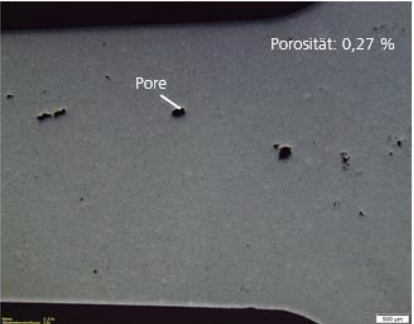


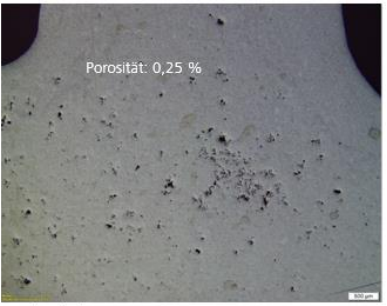
An ausgewählten Funktionsmustern wurden Proben entnommen und an diesen Schlibfbilder hergestellt (Tab. 3). Nachfolgend werden die einzelnen Beispiele diskutiert:

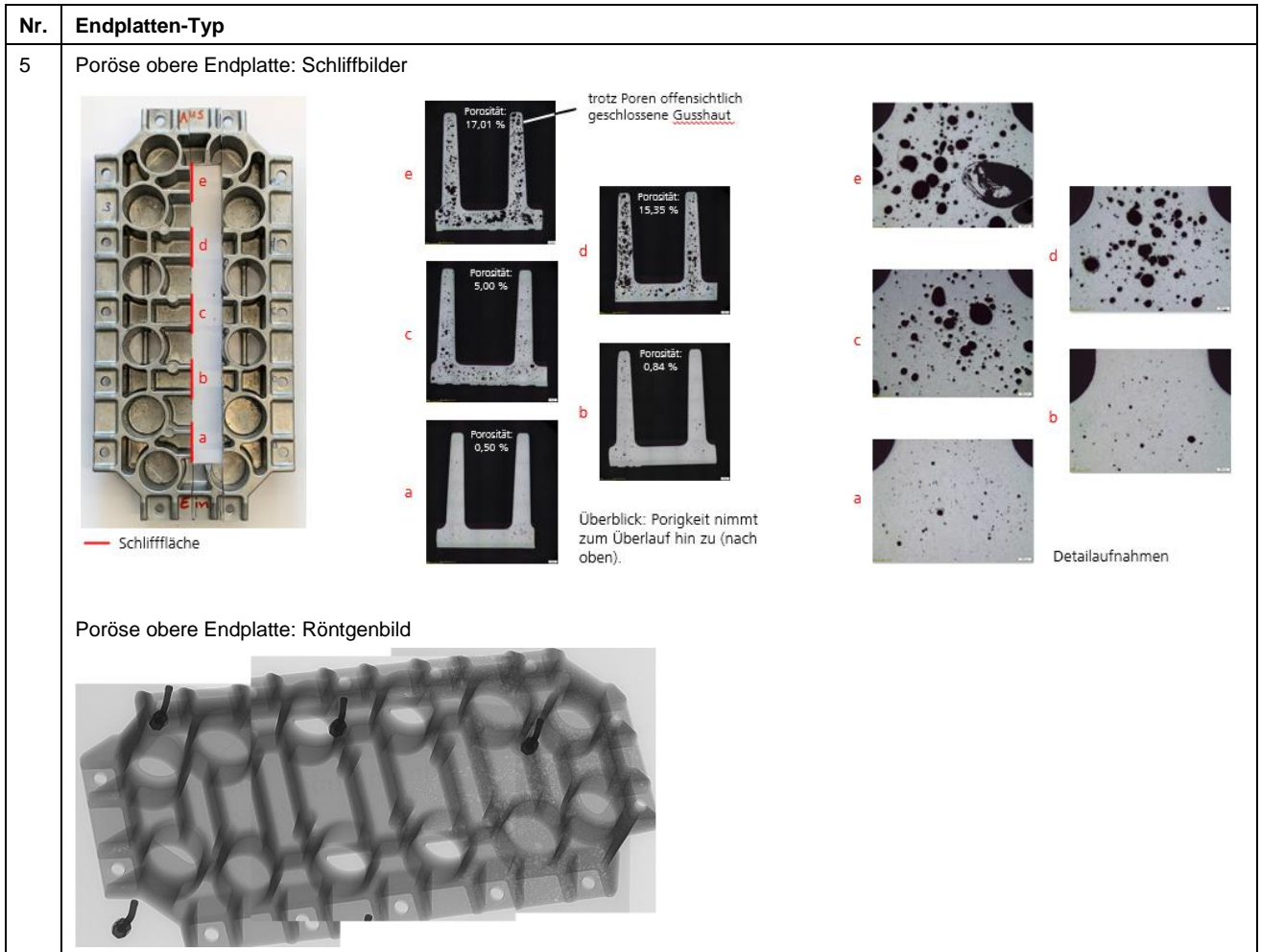
- Nr. 1: Das Überblicksbild zeigt den eingegossenen Stutzen einer massiven oberen Endplatte in der Aluminiummatrix. Die Verbindung erfolgte überwiegend durch Formschluss (siehe Detailaufnahme). Es ist möglich, dass auch Stoffschluss und Kraftschluss durch Aufschumpfen der Matrix eine Rolle bei der Verbindungsbildung spielten, wobei ersteres eher unwahrscheinlich ist, weil die Aluminiumstutzen typischerweise eine Oxidschicht aufweisen. Spätere Dichtheitstest zeigten, dass die Verbindung zwischen Stutzen und Matrix dicht war.
- Nr. 2: Die Abbildungen zeigen eine massive, obere Endplatte, in die die Stutzen mittels Reibrührschweißens eingebracht wurden. Anhand des Schlibfbildes wird angenommen, dass zwischen Stutzen und Matrix Stoffschluss eingetreten ist.
- Nr. 3: Das dritte Beispiel zeigt den Schlibb einer massiven, oberen Endplatte. Die Analyse verdeutlicht, dass die Porosität des Gussteils an der analysierten Stelle ca. 0,3 % beträgt. Damit liegt die Porosität unter den typischen 1-3 Volumenprozent druckgegossener Aluminiumteile (J. R. Davis: Aluminum Casting Technology, Verlag: ASM International, 1995).
- Nr. 4: Eine ähnlich niedrige Porosität wie im Beispiel Nr. 3 wies die massive, untere Endplatte auf.

- Nr. 5: Das Beispiel 5 zeigt Schliffbilder einer porösen oberen Endplatte, die in verschiedenen Bereichen der Platte aufgenommen wurden. Das Druckgusswerkzeug wurde für einen optimalen Abguss der massiven Platten ausgelegt. Die damit verbundene Orientierung der Platte war senkrecht. Aufgrund der Schwerkraftwirkung sammelten sich die Gasblasen überwiegend in der oberen Plattenhälfte. Deutlich spiegeln die Schliffbilder dies wider. Die Röntgenaufnahme untersetzt diese Erkenntnis. Im Projekt fehlten leider die zeitlichen und finanziellen Mittel, ein weiteres und für den Porendruckguss optimiertes Druckgießwerkzeug (waagerechte Ausrichtung der Platte) zu entwickeln, zu fertigen und auszutesten. Die Projektpartner gehen jedoch davon aus, dass mit einer waagerechten Anordnung der Platte im Werkzeug eine deutlich homogenere Porenverteilung erreichbar ist. Die Überprüfung muss in Folgeprojekten stattfinden.

Tab. 3: Schliffbilder von Proben ausgewählter Funktionsmuster.

Nr.	Endplatten-Typ
1	<p data-bbox="261 640 724 667">Massive obere Endplatte, eingegossene Stützen</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;">   </div> <p data-bbox="261 1379 450 1406">— Schlifffläche</p> <p data-bbox="935 1379 1487 1429">Detailaufnahme: Grenzfläche Endplatte – Stützen (Beleg für Spalt: Unschärfen bei Verstellung des Mikroskop-Fokus)</p>

Nr.	Endplatten-Typ
2	<p>Massive obere Endplatte, reibgeschweißte Stützen</p>   <p>Überblick</p>  <p>Detailaufnahme: Grenzfläche Endplatte – Stützen, Stoffschluss kann angenommen werden</p>  <p>Schlifffläche</p>
3	<p>Massive obere Endplatte</p>  <p>Schlifffläche</p>  <p>Überblick</p>  <p>Detailaufnahme</p> <p>Porosität: 0,27 %</p> <p>Pore</p>
4	<p>Massive untere Endplatte</p>  <p>Schlifffläche</p>  <p>Überblick</p>  <p>Detailaufnahme</p> <p>Porosität: 0,25 %</p>



Das Arbeitspaket 2.7 wurde inhaltlich wie geplant abgeschlossen.

2. Verwertung der Ergebnisse

Der nachfolgende Verwertungsplan lehnt sich an die „Tabelle Verwertung 03B11022B.docx“ und den „Sachbericht III_Erfolgskontrollbericht.docx“ an.

Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
Öffentlichkeitsarbeit		
1	Die Veröffentlichung der Projektergebnisse zur „Entwicklung einer Stack-Endplatte im Aluminiumdruckguss“ und zum „Korrosionsverhalten“ erfolgte gemeinsam mit den Projektpartnern in verschiedenen Fachzeitschriften und auf mehreren wissenschaftlichen Veranstaltungen (siehe Sachbericht II, Kapitel 4).	05/2025 (erfüllt)
2	Die Veröffentlichung der Projektergebnisse zum Thema „Porendruckguss“ erfolgte bereits in den Fachzeitschriften „GIESSEREI“ und „Casting plant and technology international CP+T“ (siehe Sachbericht II, Kapitel 4).	03/2025 (erfüllt)
3	Mit der Veröffentlichung des Artikels in der Fachzeitschrift „GIESSEREI“ wurden die Projektergebnisse automatisch dem Fachausschuss Druckguss des Bundesverbands der Deutschen Gießerei-Industrie e. V. bereitgestellt, dass die Fachzeitschrift ein Medium des Vereins ist. Der SMA Solar Technology AG wird die Publikation noch zur Verfügung gestellt.	01/2025 (erfüllt)
4	Vermarktungsmaßnahmen nach Projektende zum Thema „Porendruckguss“ umfassen wie bereits im Projektverlauf die Analyse der Zielgruppe	

Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
	<p>(Druckgießer), die Ermittlung geeigneter Produkte gemeinsam für das Verfahren mit den Druckgießern und die Präsentation der Projektergebnisse Dritten gegenüber. Hierbei kommen nationale (Albert Handmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG) und internationale Partner (ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkei; Yeşilova Holding, Türkei; FÉMALK Zrt., Ungarn) in Frage.</p> <p>Im Rahmen der Vermarktungsmaßnahme wurde dem Unternehmen Albert Handmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG in Biberach das Thema „Porendruckguss“ bereits vorgestellt und nach geeigneten Produkten gesucht. Da das Portfolio des Unternehmens jedoch überwiegend auf lasttragende Automobilteile zielt, konnte kein geeignetes Produkt ermittelt werden.</p> <p>Das Fraunhofer IWU wird weiterhin auf Basis der Ergebnisse Projektakquisition zum Thema Porendruckguss betreiben.</p>	
Sicherung und Weiterentwicklung des erarbeiteten Know-hows		
5	<p>Im Projekt wurde die Technologie des Porendruckgusses gemeinsam mit dem Partner Handmann Leichtmetallgießerei Annaberg GmbH weiterentwickelt und in Gießversuchen überprüft. Dem Partner liegen alle theoretischen und praktischen Erkenntnisse vor, so dass in zukünftigen Projekten die Anwendung der Technologie geprüft und realisiert werden kann. Die Nutzung der Ergebnisse obliegt der Handmann Leichtmetallgießerei Annaberg GmbH.</p>	02/2025 (erfüllt)
6	<p>Weiterentwicklung der Technologie des Porendruckgusses in Folgeprojekten bei erfolgreicher Einbindung eines Industriepartners.</p> <p>Für Erkenntnisse, die über das bereits bestehende Patent WO14166841 A1 hinausgehen, wird bei ausreichend neuen Ansprüchen eine neue Erfindungsmeldung in Erwägung gezogen.</p> <p>Das Patent WO14166841 A1 hält momentan die Fraunhofer-Gesellschaft allein. Das Unternehmen SMA Solar Technology AG (SMA) hat als Miterfinderin ihre Rechte aus wirtschaftlichen Gründen aufgegeben. SMA erachtet die Technologie jedoch weiterhin als aussichtsreich.</p>	laufend
7	<p>Nutzung und Weiterentwicklung des Know-hows zur Entwicklung, Auslegung (Berechnung/Simulation) und Konstruktion von IDM-Platten und Endplatten in Folgeprojekten.</p>	laufend

3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen einer Internetrecherche konnte kein Anbieter/Hersteller ermittelt werden, der kommerziell druckgegossene Endplatte für Stacks aus Aluminium anbietet. Ebenso konnte über die Webseiten <https://scholar.google.com/>, „Sciondirect.com“ und „Researchgate.net“ (Stand: 05/2025) keine Forschungsaktivitäten nachgewiesen werden, die sich mit dem Thema unmittelbar auseinandergesetzt haben.

Hingegen liegen, wie auch schon im Antrag teilweise dargestellt, Untersuchungsergebnisse vor, die sich mit der Gewichtsoptimierung und Erhöhung der Biegesteifigkeit von Endplatten auseinandersetzen. Beispiel sind:

Leichtbauweise:

S. Wagner u. a.: Optimierung von Andruckstrukturen für Mikrobrennstoffzellen in Leichtbauweise. Mikrosystemtechnik Kongress 2009, 12./14.10.2009, Berlin, 978-3-8007-3183-1

Stahl-Aluminium-Hybridgusstechnologie:

F. Mielke u. a.: Local Reinforcement of a Fuel Cell End Plate for Package Improvements Using Steel-Aluminium Hybrid-Casting Technology. International Journal of Automotive Technology 26 (2024) 8: 1-16 DOI: 10.1007/s12239-024-00129-0

Endplatte mit Wabenkern:

Zibin Mao u. a.: Design of Honeycomb-Filled End Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Topology Optimization. Energy Technol. (2024) 12, DOI: 10.1002/ente.202400432

Additiv gefertigte Endplatten von Brennstoffzellen:

D. Herzog u. a.: Optimization and design for additive manufacturing of a fuel cell end plate Journal of Laser Applications. (2022) 11

4. Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit

Die Projektpartner organisierten im Verbundvorhaben die Öffentlichkeitsarbeit gemeinsam und veröffentlichten die Projektergebnisse in zahlreiche Publikationen.

Fachveröffentlichungen:

Schmiedel, R.; von Unwerth, T.; Keller, N.; Chhaniyara, D. P.; Mandel, M.; Krüger, L.; Schneider, F.; Hohlfeld, J.; Hannemann, C.; Petschel, H.; Bayer, F.; Günther, A.; Ihle, R.; Flach, S. (2024): Großserientechnologische Fertigung von Endplatten-Verspannsysteme für Brennstoffzellenstacks. Paper im Konferenzband 3. Fuel Cell Conference Chemnitz (FC³) 2024, 2024. 978-3-95735-189-0

Keller, N.; von Unwerth, T.; Schmiedel, R. (2024): Untersuchung unterschiedlicher Systemtopologien und -komponenten mittels eines 1 kW-Testsystems für Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen: Konstruktion und Aufbau des Anodensubsystems. Paper im Konferenzband 3. Fuel Cell Conference Chemnitz (FC³) 2024, 2024. 978-3-95735-189-0

J. Hohlfeld, C. Hannemann, F. Schneider, C. Fritsch, A. Günther, H. Petschel, T. Wember, R. Schmiedel: Porendruckguss – ein Weg, Aluminium einzusparen? GIESSEREI (2025) 1, S. 38 - 46

J. Hohlfeld, C. Hannemann, F. Schneider, C. Fritsch, A. Günther, H. Petschel, T. Wember, R. Schmiedel: Pore-die-casting - a way to save aluminum? Casting plant and technology international CP+T (2025) 1, pp. 41 - 49

Chhaniyara, D. P.; Mandel, M.; Krüger, L. Electrochemical Characterization of Aluminum Alloy AlSi10Mg(Fe) for Its Potential Application as End Plate Material in Fuel Cells. Metals 2025, 15, 332. <https://doi.org/10.3390/met15030332>

Posterbeiträge:

Schmiedel, R.; Keller, N.; von Unwerth, T. (2022): HZwo:SuSyMobil, Stack- und Systemkomponenten von PEM-Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen. Poster

Veranstaltungen:

- 14.06.2023: Kongress der Wasserstoffantriebe, Chemnitz: Vortrag im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsplattform Open Source Stack
- 04./05.06.2024: Woche der Umwelt, Berlin: Stand mit Ausstellung der Projektergebnisse im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsplattform Open Source Stack
- 11.06.2024: HZwo Projektkolloquium, Chemnitz: Vortrag, Vorstellung der Projektergebnisse
- 12.06.2024: Kongress der Wasserstoffantriebe, Chemnitz: Ausstellung der Projektergebnisse
- 24.09.2024: NOW Marktplatz Zulieferer, Berlin: Vortrag und Ausstellung der Projektergebnisse
- 08.10.2024: Hy-fcell, Stuttgart: Vortrag im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsplattform Open Source Stack
- 26./27.02.25: 12. Landshuter Leichtbau-Colloquium (LLC), Leichtbau – Grenzen überwinden und Innovationen gestalten, Ausstellungsstand der Fraunhofer IWU, Thema: Zelluläre Werkstoffe, <https://www.haw-landshut.de/netzwerke-cluster/cluster/cluster-detailseite/veranstaltungen/landshuter-leichtbau-colloquium/fachausstellung>
- 07.05.2025: Swiss Saxonian Hydrogen Forum: Research and Industrie hand in hand: Vortrag im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsplattform Open Source Stack

Wie im Verwertungsplan des Instituts vorgesehen, wurden Beiträge des Instituts beim Landshuter Leichtbau-Colloquium und in der Fachzeitschrift Gießerei realisiert. Die Teilnahme an der Tagung Met-foam konnte nicht verwirklicht werden, da zum Zeitpunkt der Tagung noch nicht alle Ergebnisse vorlagen. Ersatzweise erfolgte eine Publikation der Ergebnisse in der internationalen Fachzeitschrift „Casting plant and technology international CP+T“.