

Schlussbericht

EXTERN

über das Förderprojekt

WIR!-HZwo-Smart-Bipolar

Intelligente Composite-Bipolarplatten mittels Spritz- prägen

mit der Laufzeit

01.11.2021 – 31.10.2024

der Projektpartner

- TU Chemnitz Professur Alternative Fahrzeugantriebe (FKZ:03WIR1412D)
- TU Chemnitz Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (FKZ:03WIR1412D)

Autoren:	Datum:	Gefördert vom
Barth, Eric Emmrich, Jens Hübner, Phillip	24.07.2025	 Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	Teil I - Kurze Darstellung.....	3
1.1	Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde	3
1.2	Ablauf des Vorhabens	5
1.3	Wesentliche Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Teil II - Eingehende Darstellung	8
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen und Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen.....	8
2.1.1	Präzisierung der Zielstellung (AP1).....	8
2.1.2	Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen (AP2)	11
2.1.3	Entwicklung und Bau der erforderlichen Werkzeuge, Vorrichtungen, Automatisierungskomponenten und Steuerungsprogramme (AP3)	16
2.1.4	Prozessentwicklung zur Herstellung von Bipolarplatten.....	27
2.1.5	Entwicklung eines Prüf- und Qualitätskonzeptes.....	35
2.1.6	Prototypenbau einer Brennstoffzelle.....	39
2.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	42
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	43
2.3	Voraussichtlicher Nutzen und insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	43
2.4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	43
2.5	Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen.....	43
	Literaturverzeichnis.....	45

1 Teil I - Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

Der Erfolg der Energie- und Mobilitätswende wird in naher Zukunft an der erzielbaren Ressourcen- und Energieeffizienz sowie der Marktdurchdringung entsprechender Technologien gemessen werden. Um eine umfassende Nutzung des „grünen Wasserstoffs“ als zentrales Bindeglied der Sektorenkopplung zu etablieren, wie im Energiekonzept der Bundesregierung sowie der EU deklariert, bedarf es intensiver Entwicklungen in Schlüsseltechnologien für langlebige sowie mit hohem Wirkungsgrad arbeitende Systeme in skalierbaren Serienfertigungen. Für das Erreichen der ambitionierten Ziele stehen unter anderen neuartige Brennstoffzellensysteme im Fokus, um die erforderliche Umwandlung von chemischer in elektrische Energie zu bewältigen. Bipolarplatten sind neben den protonenleitenden Membranen (MEA's) zentrale Funktionskomponenten einer Brennstoffzelleneinheit und müssen als wechselwirkende Systemkomponenten immer aufeinander abgestimmt sein. Das Gesamtsystem einer Brennstoffzelleneinheit besteht neben zahlreichen peripheren Baugruppen aus mindestens einem Stack, welcher sich aus vielzähligen (zehn bis hunderte) Platten-Membran-Einheiten zusammensetzen. Dadurch besitzt besonders die Bipolarplatte (BPP), welche wiederum aus zwei Bipolarhalbplatten (BPHP) besteht, ein sehr hohes Einflussvermögen auf den Wirkungsgrad, den Bauraum, das Gewicht und die Preisgestaltung von Brennstoffzellen [Lan16].

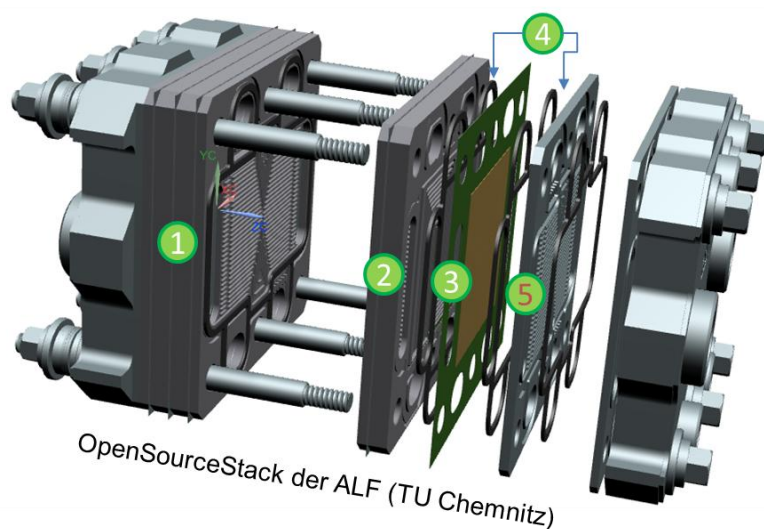


Abbildung 1: Explosionsdarstellung eines Brennstoffzellenstacks (1) mit den Funktionskomponenten: einzelne funktionsfähige Brennstoffzelle (2); MEA und zugehörigen Gas-Diffusionslagen (3); Dichtungen (4); Bipolarhalbplatte (5)

Für gegenwärtige Brennstoffzellentypen kommen dabei drei verschiedene Materialsysteme in Frage [HCS05, Lan16]:

- Metalllegierungen
- Graphite
- Composite

Die Verwendung von Polymer/Graphit-Composite bietet dabei die aussichtsreichste Kombination aus fertigungs- und anwendungsspezifischen Potential. Zu begründen ist dies insbesondere durch gute elektromechanische Eigenschaften, lange Lebensdauer und gleichzeitig rentable Herstellbarkeit ausgehend von der Nutzung klassischer Fertigungsstrukturen wie dem Spritzgießverfahren [MOW20].

Die hauptsächlichen Ziele dieses FuE-Projekts „WIR!-HZwo-Smart-Bipolar“ gliedern sich darin, die Polymer/Graphit-Bipolarplatte durch den Einsatz eines neuartigen und eigens entwickelten Spritzprägeverfahrens sowie der zugehörigen Compound-Rezeptur:

- neue Leistungsbereiche (mechanisch und elektrisch) für Polymer/Graphit-Bipolarplatten zu erschließen,
- ein gutmütigeres Bearbeitungsverhalten zu erzielen,
- eine höhere Robustheit für Entformungs- und Montagearbeiten zu erhalten und
- konkurrenzfähige Produktabmessungen im Vergleich zu metallischen Bipolarhalbplatten herstellen zu können.

Ermöglicht werden soll dies, durch die materialschonende gleichmäßige Druckverteilung im Spritzprägeprozess, die dabei auftretenden kurzen Fließwege und das Erwirken einer definierten Materialmorphologie mittels intelligenter Temperatursteuerung des Werkzeuges (Variothermie). Um die erforderlichen mechanischen Eigenschaften zu erreichen, sollen zudem kritische Bauteilsegmente durch die Einbettung spezifisch konfektionierter Textilstrukturen verstärkt werden.

Abbildung 2 zeigt die Prozessabfolge entlang des zu entwickelnden Spritzprägeprozesses bis hin zur In-line Überwachung.

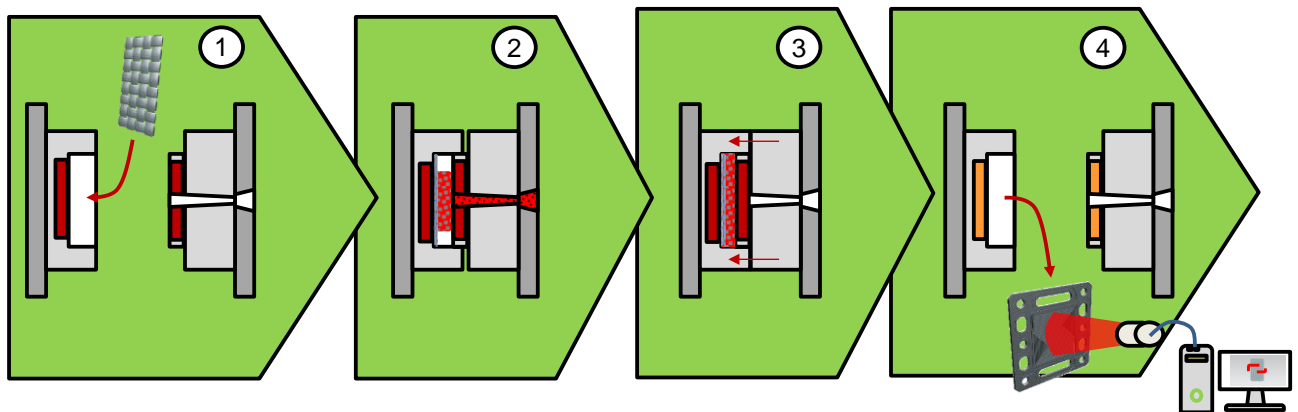


Abbildung 2: Schematische Abfolge des angestrebten Spritzprägeprozesses: Vortemperieren und Textileinleger fixieren (1); Werkzeug auf vordefinierte Rastposition transferieren und die Kavität befüllen (2); Werkzeug komplett schließen (3); Abkühlen, Auswerfen und Sichtkontrolle (4)

Für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben konnte auf die weitreichenden Erfahrungen aus bisherigen Arbeiten der TU Chemnitz zurückgegriffen werden. Die Fachgruppe Kunststofftechnologien und Maschinenkonstruktion an der Professur SLK beschäftigt sich seit ihrer Gründung mit der Entwicklung von Prozess- und Verfahrenstechniken für die Kunststoffverarbeitung und der Werkzeug- und Bauteilentwicklung, wobei besonders die Entwicklung von Leichtbautechnologien für den Strukturleichtbau mit hoher Funktionsintegration im Fokus stehen. Ebenso sind die Erfahrungen der Professur für Alternative Fahrzeugantriebe im Bereich der Wasserstofftechnologien von hohem Wert, um einerseits die Anforderungen an die herzustellenden Bipolarplatten zu definieren und andererseits dessen Funktionsweise mit entsprechender Prüftechnik zu untersuchen. Das Knowhow im Bereich des Werkzeugbaus für Präzisionsteile beim Projektpartner WESKO GmbH ist ebenso von enormer Bedeutung, um den hohen Toleranzanforderungen gerecht werden zu können. Die Verarbeitung von den hochgefüllten Compounds ist für alle Projektpartner ein neues Forschungsfeld, weshalb dieses FuE-Projekt sehr wichtig für die zukünftige Ausrichtung der Beteiligten ist.

Die gemeinsame Wissensbasis bildet der OpenSourceStack 050 (OSS050), welcher als offen zugängliche Forschungsplattform seitens des Projektpartners Professur für Alternative Fahrzeugantriebe bereits im Vorfeld entwickelt wurde und durch den HZwo e.V. zur Verfügung gestellt wird. Während bei

allen vorhergehenden Projekten der OSS050 auf metallischen Bipolarplatten sich zusammensetzte, sollte nun aufgrund verschiedener Vorteile eine kunststoffbasierte Bipolarplatte der zentrale Baustein des OSS050 sein. Bereits vor Projektbeginn konnten zu diesem Zweck erste Erfahrungen zur Verarbeitung der hochgefüllten Compounds gesammelt und mit einem verhältnismäßig einfachen Werkzeugaufbau die „Machbarkeit“ nachgewiesen werden. Daran anknüpfend sollte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Steigerung der Produktivität eine Einkavitätenlösung inkl. Herstellungsprozess entwickelt werden.

National und International sind metallische Bipolarplatten bereits weit verbreitet und z. B. in [AOP19] und [PYL14] wissenschaftlicher Untersuchungsgegenstand gewesen. Aufgrund der chemischen Beständigkeit und damit verbundenen langen Lebensdauer sowie dem Potential der standardisierten Serienherstellung mittels industriell weit verbreiteten Technologien werden parallel kunststoffbasierte Bipolarplatten erforscht. Zu nennen sind das Heißpressen, das Spritzgießen und das Folienextrudieren mit anschließendem Prägeprozess [HTS19, IGF15_1, IGF15_2, Tah14]. Allen kunststoffbasierten Lösungen sind die begrenzenden mechanischen Eigenschaften gemeinsam, da die spröden Werkstoffe zum frühzeitigen Brechen neigen. Mit Blick auf den Stand der Wissenschaft und Technik für spritzgegossene Bipolarplatte offenbarte sich vor Projektbeginn ein geteiltes Meinungsbild. Von „unmöglich“ bis „sehr gut geeignet“ gibt es verschiedenste Aussagen, wobei nur wenig Literatur verfügbar ist. Allgemeiner Konsens war zu Projektbeginn, dass die Herstellung ausschließlich mittels dem variothermen Spritzprägeprozess möglich ist [BGM+20, Bir18, Dör12, Kai08, Kre08, KR13, IGF15_2].

1.2 Ablauf des Vorhabens

Das nationale Forschungsvorhaben erforderte in allen Arbeitspaketen einen hohen Grad an Kommunikation und Absprachen der Aufgaben zwischen allen Verbundpartnern. Für die Koordination fand unter der Führung des Projektkoordinators WESKO GmbH ein intensiver Austausch in Form von gemeinschaftlichen Projekttreffen, kleineren Projekttreffen mit fachspezifischen Austausch und Online-Videokonferenzen statt. Alle Konsortialpartner waren in mehreren Arbeitspaketen zugeordnet. Die Teilarbeitspakete von AP1 bis AP7 werden in Tabelle 1 detaillierter erläutert:

Tabelle 1: Hauptarbeitspakete und deren Inhalt

Hauptarbeitspaket	Inhalt
1. Präzisierung der Zielstellung	Die Zieldefinition für die Entwicklung der neuen Bipolarplatte stand im Vordergrund. Diese Aufgabe wurde hauptsächlich von der TU Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe (ALF), mit Unterstützung durch Schunk Kohlenstoff GmbH und Wesko GmbH durchgeführt.
2. Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen	Die rheologische Charakterisierung und Optimierung der Polymer/Graphit-Compounds fand an der TU Chemnitz, Professur Strukturbaue und Kunststoffverarbeitung (SLK) und Schunk Kohlenstoff GmbH statt. Materialkarten zur Unterstützung der Werkzeugentwicklung wurden erstellt und das Verhalten von Verstärkungstextilien analysiert.
3. Entwicklung und Bau der erforderlichen Werkzeuge, Vorrichtungen, Automatisierungskomponenten und Steuerungsprogramme	In dieser Phase wurden die Demonstratorwerkzeuge durch die Wesko GmbH und Strobelt CAD/CAM Service GmbH gebaut und getestet, um Konstruktionshinweise für das finale Werkzeug zu sammeln. Die Fokusbereiche liegen auf variothermer Temperierung, Angussgestaltung und Formnestkonstruktion sowie der Integration textiler Einleger.

Hauptarbeitspaket	Inhalt
4. Prozessentwicklung zur Herstellung von Bipolarplatten	Die TU Chemnitz und Wesko entwickelten die Prozessparameter für eine homogene Eigenschaftsverteilung innerhalb der Bipolarplattenstruktur. Außerdem erfolgte durch Strobelt die Präzisionsnachbearbeitung der Funktionsstrukturen zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Oberflächenqualität.
5. Entwicklung eines Prüf- und Qualitätskonzepts	Die TU Chemnitz, Professur Strukturbau und Kunststoffverarbeitung (SLK), entwickelten eine zerstörungsfreie Monitoring-Methode für die Serienfertigung. Ein zugehöriger Prüfadapter wurde durch die Wesko GmbH bereitgestellt. Die Eignung der Bipolarplatte für Brennstoffzellenanwendungen übernahm die Professur ALF der TU Chemnitz.
6. Prototypenbau einer Brennstoffzelle	Ein erster Prototyp wurde gebaut, um die entwickelten Bipolarplatten unter realen Betriebsbedingungen zu testen und das Gesamtkonzept zu validieren.
7. Technologie- und Wissenstransfer	In dieser abschließenden Phase wurden die Ergebnisse dokumentiert und der Wissenstransfer durch Veröffentlichungen und Präsentationen sichergestellt. Die Aufgabe der industriellen Umsetzung übernahmen alle beteiligten Partner gemeinsam.

Die Erfolgskontrolle erfolgte mit den Tabelle 2 zusammengefassten Meilensteine, welche ebenso bereits bei der Antragsstellung definiert wurden.

Tabelle 2: Meilensteine zum Gesamtvorhaben

Nr.	Zeitpunkt	Beschreibung	Zielparameter
M1	01/22	Numerische Werkzeugauslegung und aufstellen von Prozessanforderungen abgeschlossen	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungsverhalten der Materialrezeptur rheologisch erfasst (Scherviskositäten, Verarbeitungstemperaturbereich) • Thermische und strömungsmechanische Auslegung abgeschlossen
M2	04/23	Konstruktion und Auslegung des Werkzeuges abgeschlossen	<ul style="list-style-type: none"> • Aufspannmaße für < 350 t Spritzgießmaschine • Auslegung für 140 - 200 °C Betriebstemperatur • Min. 2 Fixerkomponenten für textile Einleger vorgesehen • Modulare Einsätze für ebene und strukturierte Platte
M3	06/24	Erste Bipolarplatten hergestellt	<ul style="list-style-type: none"> • Abmessung (130 x 130 x 2) mm • Matrix: PPS • Graphitanteil > 70 % Gew.

Nr.	Zeitpunkt	Beschreibung	Zielparameter
			<ul style="list-style-type: none"> • Spanende Strukturgebung für min. 2 unterschiedliche geometrische Ausführungen abgeschlossen
M4	10/24	Erfolgreicher Projektabschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Abmessung (130 x 130 x kleiner 2) mm • Matrix: PPS • Graphitanteil > 75 % Gew • Textil integriert und strukturiert

1.3 Wesentliche Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des FuE-Projekts wurde auf Basis des vorab erarbeiteten Kenntnisstandes begonnen ein Versuchswerkzeug zu entwickeln, um einerseits den grundlegenden Prozess zu erforschen und die Grenzen bei der geometrischen Gestaltung der herzustellenden Bipolarhalbplatten zu ergründen. Zu diesem Zweck erfolgte die Entwicklung einer „Demonstratorplatte“, welche wesentliche Elemente eines Flussfelds enthielt, allerdings bei der Kanaltiefe, -breite und Entformungsschrägen variierte. Als weiter wichtiger Bestandteil sind die integrierte Langlöcher zu erwähnen, um deren Einflussverhalten beim Schmelzefluss näher untersuchen zu können. Weitere parallel entwickelte Formeinsätze bieten zudem die Möglichkeit sogenannte „Blank Plates“ (ebene Platten) herzustellen. Diese sind zum einen sehr wichtige für grundlegende Parameterbestimmungen die Verwendung findenden Compounds und zum anderen das Vorprodukt für spannend herzustellenden Bipolarplatten. Damit verbunden war die Zielstellung einerseits Flussfelder zu optimieren und andererseits für die spannende Bearbeitung einen wirtschaftlichen Ansatz zu entwickeln, Bipolarhalbplatten für Kleinserien herstellen zu können.

Auf Basis der gesammelten Ergebnisse wurde letztendlich ein weiteres Spritzprägewerkzeug entwickelt, gebaut und bemustert. Mit diesem konnten erfolgreich Bipolarhalbplatten sowohl im Spritzpräge- und Spritzprozess, variotherm und isotherm hergestellt werden. Als besonderes einschränkend hat sich bei der Prozessführung die Wahl des Compounds herausgestellt. Ergänzend wurden mit den hergestellten Platten Einzeller aufgebaut und deren Betriebsfähigkeit erfolgreich nachgewiesen.

Innerhalb der TU Chemnitz gibt es zwischen den verschiedenen Fachbereichen eine intensive Zusammenarbeit im Bereich der Wasserstofftechnologien. Die gemeinsam erarbeitete Kompetenz ist essentiell für den neuen Masterstudiengang „Wasserstofftechnologie“ sowie zahlreiche neue Projektakquisitionen innerhalb dieses Technologiebereichs. Zudem gibt es auch einen Austausch auf diesem Gebiet mit anderen Forschungseinrichtungen. Zu nennen sind unter anderem das ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V., das ZBT - Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH, das Fraunhofer IWS - Institut für Werkstoff- und Strahltechnik und das KUZ – Kunststoffzentrum Leipzig gGmbH.

2 Teil II - Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen und Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen

2.1.1 Präzisierung der Zielstellung (AP1)

Zusammenstellung, Analyse und Abstraktion von Randbedingungen, Anforderungen und Einflussgrößen an das Plattendesign und Prüfprozesse auf Basis OSS Plattform (AP1.2)

Als Basis für die Auslegung der Randbedingungen und die Anforderungen an das Plattendesign wird die Open-Source-Stack (OSS) Plattform der Professur ALF herangezogen. Für das Projektvorhaben HZwo:Smart-Bipolar wird dabei ein äußeres BPP-Plattenabmaß von 130 mm · 130 mm bei einer Aktivfläche von 50 cm² gewählt. In Abbildung 3 sind die äußeren Abmaße, die Größe der Aktivfläche sowie das Design der Medienkanäle und Mediendurchführungen für eine graphitische Kathoden-BPP des OSS050 dargestellt.

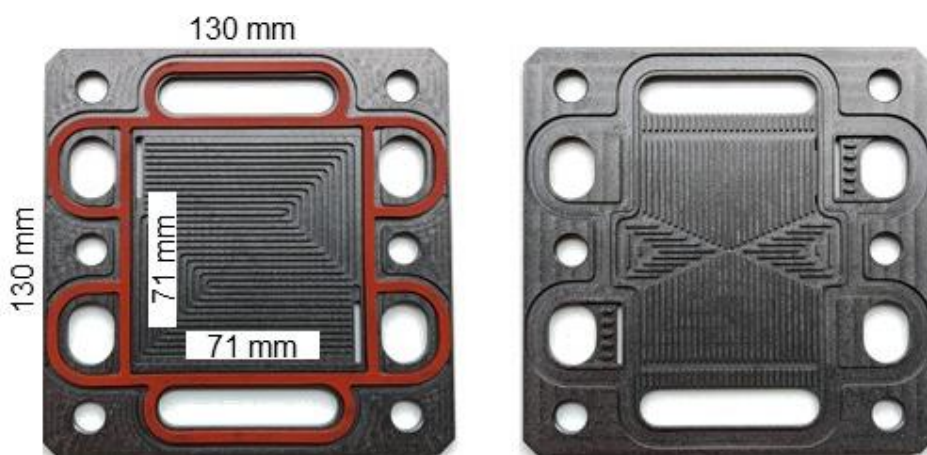


Abbildung 3: gefräste, graphitische Kathoden-Halbplatte des OSS050 (Medienseite mit Flachdichtung links, Kühlseite rechts)

Das gefräste, graphitische Design ermöglicht eine einfache Adaption der Grundparameter an die Randbedingungen alternativer Herstellungsverfahren, wie bspw. an das Fertigungsverfahren des Spritzprägens. Dabei sind die Randbedingungen zum einem durch die konstruktive Gestaltung als auch durch die Restriktionen der Fertigung definiert. Für das Spritzprägen sind zum aktuellen Zeitpunkt keine standardisierten Gestaltungsvorschriften verfügbar. Aus diesem Grund wird in aktuellen Forschungsthemen vorwiegend das Spritzgussverfahren im Zusammenwirken mit der notwendigen Materialforschung betrachtet.

Tabelle 3: Randbedingungen für die Synthese-Auslegungs-Methodik

Randbedingungen Konstruktive Auslegung		Randbedingungen Betriebsparameter	
Aktivflächengröße	50 cm ²	Mediendrucke Anode:	1,5 bara
Aktivflächenlänge und -breite	71 mm ± 3 mm	Kathode:	1,5 bara
Mechanische Vorspannung	1,5 N/mm ²	Medientemperaturen Anode:	80 °C
Kanalweite	1,0 mm - 2,0 mm	Kathode:	80 °C
Landbreite	0,4 mm - 1,0 mm	Relative Feuchte Anode:	0,8
Kanalaußenradius	≤ 0,1 mm	Kathode:	0,8
Kanaltiefe	≥ 0,5 mm	Stöchiometrie Anode:	1,2
		Kathode:	1,8

Als leistungsspezifische Zielgröße wird für die Einzelzelle eine Leistung von 25 W/Zelle definiert. Zur konzeptionellen Vorauslegung des Plattenlayouts wird die an der Professur ALF entwickelte Synthese-Auslegungs-Methodik angewandt. Dieses Tool ermöglicht unter Eingabe der Randbedingungen bezüglich der konstruktiven Auslegung und der Betriebsparameter die Erstellung von Lösungsvarianten nach einer definierten Matrix und einer anschließenden analytischen Bewertung. In Tabelle 3 sind die gewählten Zielrandbedingungen für den Synthese-Auslegungs-Algorithmus dargestellt. Im Weiteren werden die Flussfelder nach Grundtypen strukturiert und gemäß dem Stand der Technik nach Serpentina-, Parallel- oder Wellenflussfeldern geordnet. Zudem werden die Medienzufuhr und -abfuhr berücksichtigt, unter anderem mit der Betrachtung von gleichläufigen oder gegenläufigen Strömungsrichtungen.

In Abbildung 4 sind zwei dieser Grundtypen an einer schematischen Bipolarplatte mit den entsprechenden Medienkanälen und Dichtungsbereichen dargestellt. Die Anodenseite (rot) und Kathodenseite (blau) werden separat betrachtet und ausgelegt.

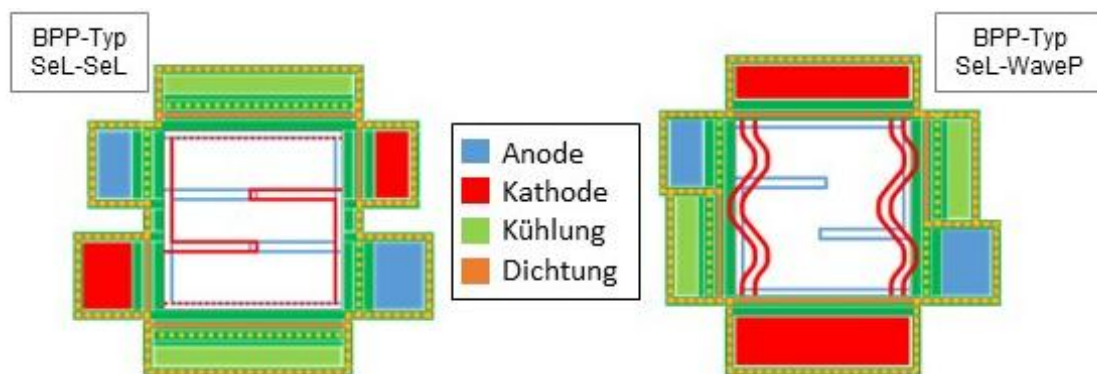
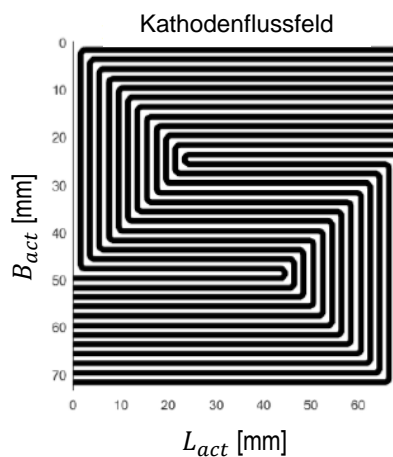


Abbildung 4: Darstellung zwei ausgewählter Flussfeldgrundtypen aus dem Synthese-Auslegungs-Tool im Vergleich

Nach Vergleich der Flussfeldgrundtypen und Variation der Kanal- sowie Flussfeldparameter ergab das beidseitige Serpentinflussfeld (Abbildung 4 links) in erster Vorauslegung das beste Ergebnis.



<i>Konstruktionskennwerte</i>	Kathodenflussfeld
Länge konstr. Aktivfläche	68,00 mm
Breite konstr. Aktivfläche	73,53 mm
Flussfeldtyp	Serpentine Längs
Kanalanzahl	12
Schleifen- / Mäanderzahl	1
Res. Randabstand	0,765 mm
Kurvenanzahl	4
Kurvenradius	1,0 mm
Kurvenwinkel	90°
Kanallänge	200,3 mm
Projizierte Kanaloberfläche	29,86 cm ²
Projizierte Landoberfläche	20,14 cm ²
Kanal-Aktivflächen-Verhältnis	0,5972

Die Bewertung erfolgt innerhalb des Tools aufgrund leistungs- und fertigungsspezifischer Kennwerte der Flussfeldvarianten. Zudem wird das Zusammenwirken der Anoden- und Kathodenseite berücksichtigt. Mit Hilfe der Ergebnisse können dann spezifische Kennwerte für die konstruktive Gestaltung der

BPP abgeleitet werden. Die wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 2 für das Kathodenflussfeld zusammengestellt.

Das Fertigungsverfahren Spritzprägen erfordert konstruktive Maßnahmen die sich mit denen einer klassischen metallischen Bipolarplatte (BPP) gleichen. Wesentlicher Unterschied ist jedoch die Plattendicke, da das Compound-Material hier im Vergleich zur metallischen Platte deutlich restriktiver ist. Die BPP-Plattendicke muss so dimensioniert werden, dass eine ausreichende Bruchsicherheit bei Belastungen im Bereich der Aktivfläche von 1,0 - 2,5 MPa gewährleistet wird. Die Zielgröße der BPP-Plattendicke liegt zwischen 0,8 mm und 3,0 mm, welche in den Voruntersuchungen mit dem Testdemonstrator bezüglich der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit validiert wird. Weiterhin müssen für die Entformbarkeit aus der Kavität des Spritzprägewerkzeugs entsprechend umsetzbare Mindestradien, Ausformschrägen und Kanaltiefen beachtet werden.

Diese geometrischen Kenngrößen (Vgl. Abbildung 5) wurden für den Testdemonstrator wie folgt definiert:

- Mindestradien R_{out_min} & $R_{in_min} = 0,1$ mm
- Ausformschrägen Kanalflanke $KFW = 30^\circ$
- Kanaltiefe $0,3$ mm \leq $KT \leq 0,5$ mm

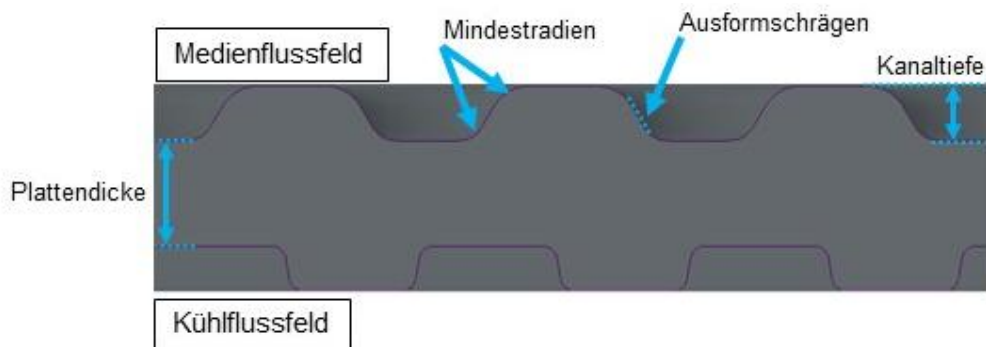


Abbildung 5: Festgelegte geometrische Kennwerte infolge fertigungsspezifischer Restriktionen

Zusammenstellung, Analyse und Abstraktion von Randbedingungen, Anforderungen und Einflussgrößen an die Fertigungsprozesse (AP1.3)

Das Vorgehen zur Entwicklung und Charakterisierung von Polymer/Graphit-Bipolarplatten mittels eines entwickelnden Spritzprägeprozesses sind die hier folgend aufgezählten Punkte:

- Design: Der erste Schritt bei der Entwicklung von Bipolarplatten ist die Erstellung eines Designs. Das Design wird auf Basis des OSS050 gestaltet. Dieses erfüllt die Anforderungen von Brennstoffzellen, wie z. B. die Gewährleistung des Flüssigkeitsflusses.
- Prototyping: Nach dem Designprozess erfolgt die Erstellung von Prototypen der Bipolarplatten. Dies wird durch CNC-Bearbeitung erfolgen und durch Leistung Dritter Strobel CAD/CAM Service.
- Teststrukturen: Die Teststrukturen dienen der Funktions- und Leistungsprüfung der Bipolarplatte. Dazu gehören bei der Herstellung im Spritzprägeverfahren die vollständige Formfüllung, das Minimieren von Bindenähten sowie von Lufteinschlüssen und das Entformungsverhalten zu gewährleisten.
- Flussfeld: Auf Basis der erstellten Teststrukturen und dem Nachweis, dass die Bipolarplatte die Anforderungen der Brennstoffzelle erfüllt, wird ein Flussfeld erstellt. Es ist wichtig sicherzustellen, dass alle Bipolarplatten im Flussfeld ordnungsgemäß funktionieren und der Flüssigkeitsfluss durch die Brennstoffzelle gewährleistet ist. Daher wird nach erfolgreicher Bipolarplattenherstellung ein Stack aufgebaut und getestet.

- Optimierung: Wenn die Bipolarplatten mit Flussfeld im Stack installiert sind, können weitere Tests durchgeführt werden, um die Leistung der Brennstoffzelle zu optimieren. Hier können verschiedene Parameter wie Durchflussrate, Temperatur und Druck angepasst werden, um die Leistung der Brennstoffzelle zu verbessern. Zudem können unterschiedliche GDLs sowie MEAs und Dispersionen zum Einsatz kommen.

Bezüglich Teststrukturen wurden verschiedene Konzepte verglichen. Als Testdemonstrator wurde sich im gesamten Konsortium in den Vorversuchen auf eine Geometrie mit drei verschiedenen Funktionselementen festgelegt. Die Bauteildimensionen umfassen 130 mm x 130 mm. Die Dicke soll zwischen 0,8 mm und 3 mm liegen. Zu den Funktionselementen (Abbildung 6) gehören Langlöcher (vollständige Aussparung und Verdünnung auf 0,5 mm), Flussfelder (Var. Geometrie; Stegbreite 0,9 mm – 1,3 mm, Höhe 0,3 mm – 0,5 mm) und Noppen (Formschrägen von 2° - 8°, Höhe 0,4 mm – 1 mm, Breite 1,1 mm – 2,2 mm). Diese werden in unterschiedlichen Geometrien und Dimensionen variiert. Die Qualitätsindikatoren nach denen die Untersuchungen bewertet werden, sind die vollständige Formfüllung, Bindenähte, Lufteinschlüsse und Entformungsverhalten.

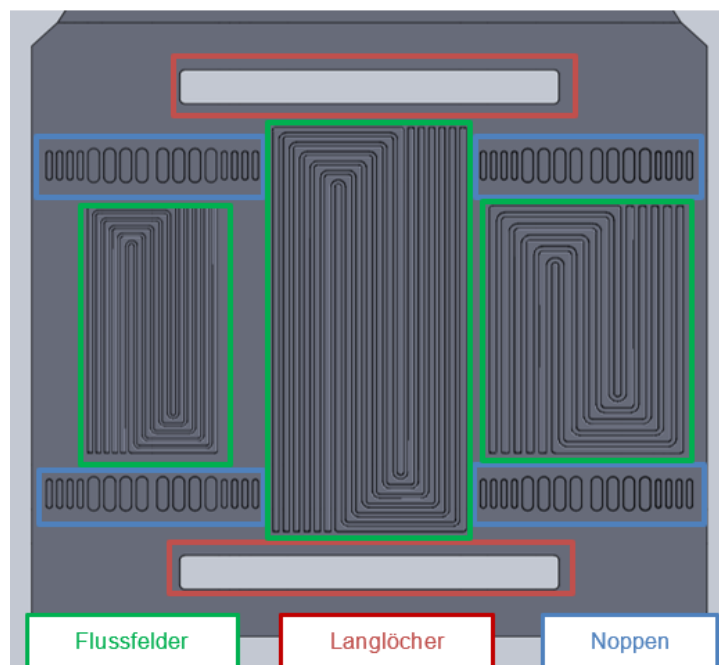


Abbildung 6: Bipolarhalbplatte mit Funktionselementen

Der Bau des Werkzeuges für die Vorversuche wird mit austauschbaren Formeinsätzen vorgesehen, so dass für die weiteren Versuche auch komplexe Flussfelder für die Herstellung der Kathoden-Bipolarhalbplatte integriert werden können. Nach abgeschlossenen Vorversuchen wird das Werkzeug weiterhin eine Kavität besitzen. Die kritischen Anforderungen wurden in einem Anforderungskatalog zusammengeführt.

2.1.2 Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen (AP2)

Entwicklung geeigneter Prüfkörper für elektrische und mechanische Voranalysen (AP2.4)

Die elektrische Widerstandsmessung ist ein wichtiger Schritt bei der Charakterisierung von Bipolarplatten für Brennstoffzellen. Zur Bestimmung der elektrischen Materialeigenschaft des Compounds, kommt es bei der Entwicklung der Prüfkörper zum Einsatz unstrukturierter Einzelproben.



Abbildung 7: 80/20-Grafit/PP-Spritzgusschmelze

Für diesen speziellen Fall hat WESKO ein Werkzeug mit modularen Formeinsätzen gebaut. Über das Projekt hinweg sollen unterschiedliche Varianten (unstrukturiert, strukturiert und Kathodenstruktur) der Formeinsätze zum Einsatz kommen. Für die elektrischen Voranalysen wird ein unstrukturierter Formeinsatz eingesetzt. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit benötigt einen minimalen Durchmesser von 3 cm und eine Plattendicke von 1 mm bis 3 mm. Diese Maße sind mit dem vorhandenen 130 mm x 130 mm Einleger gegeben und die Dicke kann über das passende Tauchkantenwerkzeug mit Abstandsplättchen auf der vorhandenen KraussMaffei 320 Spritzgießmaschine stattfinden.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wird der Prüfkörper auch aus gepressten Grafitplatten gefräst, geprüft und dann mit dem spritzgeprägten PP/Grafit-Material verglichen. Ziel ist es neue Leistungsbe-reiche (mechanisch und elektrisch) für Polymer/Graphit-Bipolarplatten bei gutmütigeren Bearbeitungsverhalten zu erschließen.

In Vorversuchen wurde das Verhalten des 20/80-PP/Grafit-Compounds in der KM 320 untersucht. Durch den hohen Grafitanteil und der dementsprechend geringen Fließfähigkeit musste das Aufschmelz- und Fließverhalten bei Austritt aus der Schneckendüse ohne Werkzeug betrachtet werden. In Abbildung 7 ist die aus der Düse austretende Schmelze erkennbar. Es kommt zu einem festen Verbund, in dem das Grafit mit dem PP gebunden ist.

Messkonzept zur Voruntersuchung der Halbzeuge und Prüfkörper (AP2.5)

Für die Leitfähigkeitsmessungen kommt ein von der Professur ALF eigens entwickelter und aufgebauter Prüfstand zum Einsatz. Im Verlauf des Projekts wurde dieser ursprüngliche Prüfaufbau sowohl konstruktiv als auch hinsichtlich der Steuerung weiterentwickelt und optimiert. Dadurch ist es nun möglich, eine automatisierte Messprozedur durchzuführen, die reproduzierbare und valide Messergebnisse gewährleistet.

Die ICR-Widerstandsmessung (ICR - Interfacial Contact Resistance) beruht auf dem ohmschen Gesetz und ist in der DIN 4880 (Messverfahren zur Bestimmung des elektrischen Durchgangswiderstands (through-plane) an Bipolarplatten) definiert. Dabei wird ein bekannter elektrischer Strom durch den zu messenden Prüfkörper geleitet, während man die über den Widerstand abfallende Spannung erfasst. Die zur Messung erforderliche Vorspannkraft wird über einen pneumatischen Zylinder auf die Prüfkörper aufgebracht. Durch den Einsatz eines Proportional-Druckregelventils lässt sich der Kraftbereich variabel im Bereich von 0 bis 5000 N einstellen. Bezogen auf eine belastete Kontaktfläche von 5 cm² ergibt sich daraus eine maximal erzielbare Flächenpressung von 1000 N/cm². Die Leiter für Stromführung und Spannungsmessung werden auf zwei unterschiedliche Weisen kontaktiert. So wird der Strom über die gesamte wirksame Kontaktfläche des Kupferelements in die GDL eingeleitet, während der Spannungsabfall über eine vergoldete Kontaktspitze erfasst wird. So kann der Übergangswiderstand zwischen Messleiter und Prüfkörper minimiert werden. In Abbildung 8 ist der schematische Prüfaufbau des Leitfähigkeitsprüfstands dargestellt.

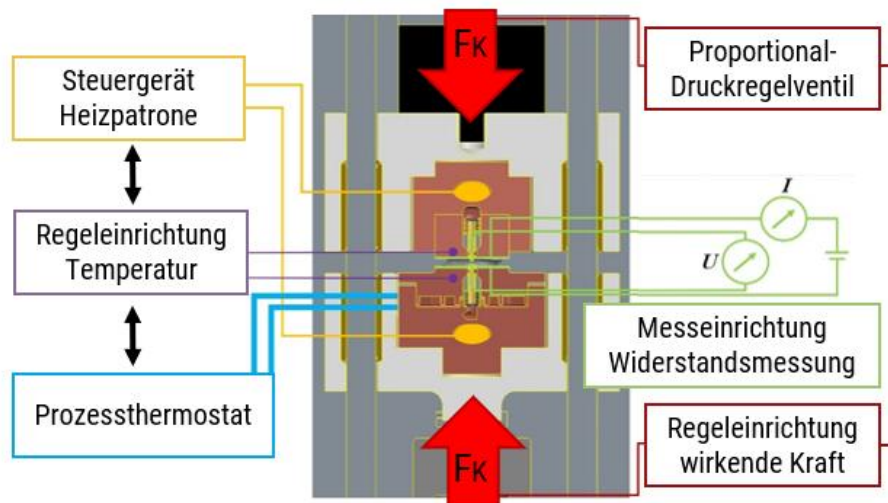


Abbildung 8: Schematischer Prüfaufbau des Leitfähigkeitsprüfstands

Optional kann die Probe mittels des Prozessthermostat Typ Lauda T2200 und speziell angepassten Kontaktelementen mit integriertem Pt100-Temperatursensor in einem Bereich von -20 °C bis 180 °C temperiert werden. In Abbildung 9 ist der Prüfaufbau des Leitfähigkeitsprüfstands mit den entsprechenden Hauptkomponenten dargestellt. Die Ansteuerung der Antriebseinheit, und die Auswertung der wirkenden Vorspannung in der Kraftmessdose erfolgt über eine Beckhoff SPS-Steuerungseinheit.

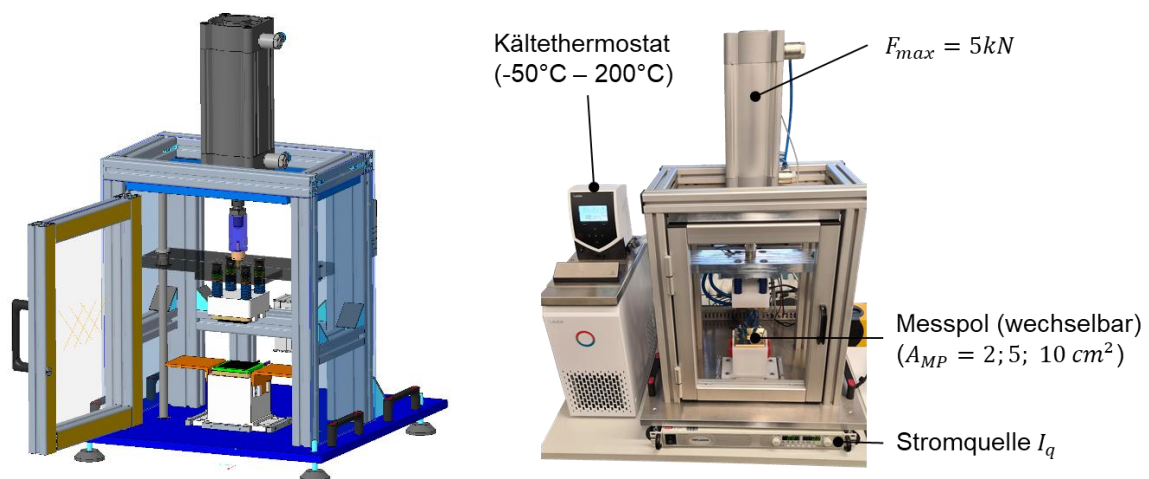


Abbildung 9: Prüfaufbau zur Kontaktwiderstandsmessung im Wasserstofflabor der Prof. ALF

Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit von rein-graphitischen und Compound-Materialien, wurde sich an der DOE-Richtlinie für Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen bezüglich der Messbedingungen orientiert. Das Messkonzept für die Voruntersuchungen sieht folgende Randbedingungen vor:

- Gewählte Messpunkte Vorspannung: 100, 150, 200 N/cm²
- Vermessung bei Raumtemperatur (20°C) oder Betriebstemperatur (80°C)
- Probendicke variabel, min. 0,5 mm
- Probengröße mind. 5 cm², bei Rundprobe Durchmesser mind. 2,524 mm
- DOE-Target 2025 – flächenspezifischer Widerstand BPP: 0,01 Ω*cm²

Referenzmessungen an reingraphitischen und metallischen Bipolarplatten (AP2.6)

Zunächst wurden erste trough-plane (TP) Referenzmessungen an rein-graphitischen und metallischen Materialproben durchgeführt. Für die Messungen an reinem Graphit liegen der Professur Alternative Fahrzeugantriebe hochgefüllte Proben des Herstellers Mersen in 2,48 mm Probendicke vor. Für die

Referenzmessungen an metallischen Proben wurden Proben aus unbeschichteten, hochreinen Titan mit 99,9 % Reinheit in 0,55 mm Probendicke vermessen. Die Probenhalbzeuge wurden dabei zunächst in Quadrate (äußere Abmaße 20 • 20 mm) gefräst und anschließend bezüglich des flächenspezifischen Widerstands am Leitfähigkeitsprüfstand vermessen und analysiert. Dabei sind in Abbildung 10 die Mittelwerte aus jeweils drei Messreihen an unterschiedlichen Messpunkten pro Probenmaterial dargestellt.

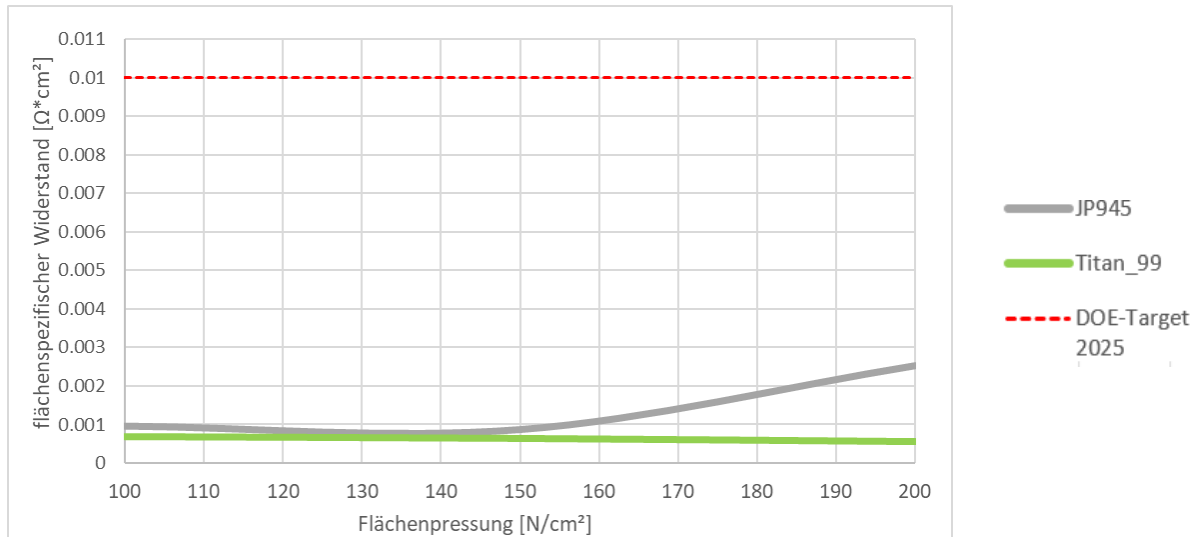


Abbildung 10: Ergebnisse der Widerstandsmessungen an rein-graphitischen und metallischen Probenkörpern

Sowohl die Messungen für die rein-Graphiten Proben des Herstellers Mersen als auch die hochreinen Titanproben weisen sehr geringe flächenspezifische Widerstände auf, welche deutlich unter dem DOE-Target 2025 liegen. Die Titan-Proben liefern über gesamten Vorspannbereich nahezu konstante Messwerte, wohin die Messungen der rein-Graphit Proben ab ca. 145 N/cm² leicht ansteigt. Dieser Anstieg konnte bei allen drei Messreihen detektiert werden, was vermutlich auf die Oberflächenkontaktierung und das Eindringen der Messspitze mit der draus resultierenden erhöhten Kontaktfläche zurückzuführen ist. Bei diesen geringen Widerständen nahe der Kurzschlussspannung des Prüfstands hat die kontaktierte Oberfläche einen entsprechend großen Einfluss auf das Messergebnis.

Elektrische Leitfähigkeitsanalyse verschiedener hochgefüllter Compounds und Halbzeuge und des Verbundes (AP2.7 und AP2.8)

Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die Arbeitspakete 2.7 und 2.8 gemeinsam dargestellt. Weiterführend zu bereits durchgeführten Referenzmessungen wurden unterschiedliche Graphit-Kunststoff-Zusammensetzungen mit verschiedenen Graphitanteilen vermessen:

- 80% Graphit- 20% TPE (Thermoplastisches Elastomere) – 1,5 mm – geprägt
- 80% Graphit- 20% PPS (Polyphenylensulfid) – 2,1 mm – gepresst
- 70% Graphit- 30% PP (Polypropylen) – 2,0 mm – geprägt
- 80% Graphit- 20% PP (Polypropylen) unbearbeitet – 2,5 mm – spritzgeprägt
- 80% Graphit- 20% PP (Polypropylen) überfräst – 2,1 mm – spritzgeprägt

Dabei wurden für jedes Probenmaterial jeweils mindestens 3 Messreihen an unterschiedlichen Messpunkten der Halbzeuge durchgeführt. Die in Abbildung 11 dargestellten Messergebnisse bilden dabei jeweils den Mittelwert der Messreihen ab. Zusätzlich zu den Messergebnissen ist das DOE-Target 2025 aufgeführt.

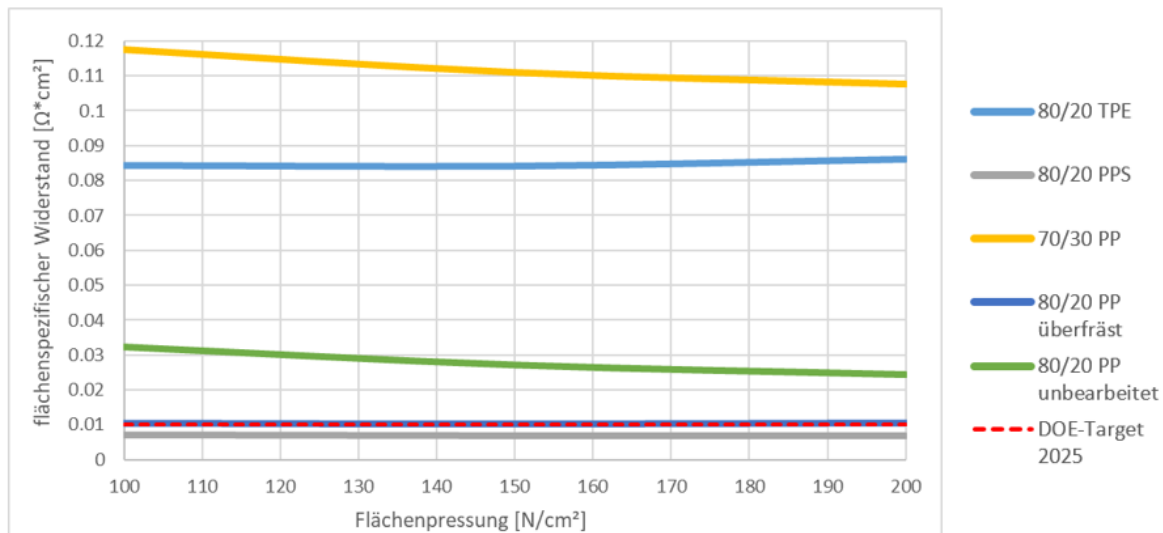


Abbildung 11: Flächenspezifischer Widerstand verschiedener Compounds und Verfahren

Zunächst lässt sich erkennen, dass für alle Materialien plausible Messungen durchgeführt werden konnten und das sowohl der Kunststoff-Anteil im Compound als auch der verwendete Kunststoff als Polymerkomponente einen erheblichen Einfluss auf den flächenspezifischen Widerstand haben. Es lässt sich außerdem erkennen, dass mit steigender Flächenpressung konstante oder teilweise geringe flächenspezifische Widerstände zu messen sind. Lediglich die Probe 80/20 TPE weist mit steigender Flächenpressung leicht erhöhte Widerstände auf. Dies ist vermutlich auf Änderung der effektiv bedrückten Kontaktfläche zurückzuführen, da der TPE-Compound als flexible Materialzusammensetzung ausgeführt ist. Gleichzeitig weist das 80/20 TPE-Material den höchsten flächenspezifischen Widerstand (ca. $0,084 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ bei 150 N/cm^2) der Materialien mit 80% Graphit auf. Den niedrigsten flächenspezifischen Widerstand liefern die heißgepressten 80/20 PPS-Proben mit einem flächenspez. Widerstand von ca. $0,007 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ bei 150 N/cm^2 Flächenpressungen. Diese Messwerte liegen somit deutlich unter dem DOE-Target für 2025, jedoch sind sowohl die TPE- als auch die PPS-Materialien aktuell noch nicht für den Spritzprägeprozess kompatibel.

Die im Projekt priorisierte Vorzugslösung als Material zum Herstellen von spritzgeprägten Bipolarplatten bildet die Materialcompounds mit PP (Polypropylen) ab. Dazu wurden Proben mit 70 % und 80 % Graphitanteil im Compound vermessen. Es fällt auf, dass die unbearbeitete Probe 70/30 PP im Vergleich zur unbearbeiteten 80/20 PP Probe ca. 4-mal so hohe flächenspezifische Widerstände liefert (70/30 PP mit $0,028 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ zu $0,111 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ für 80/20 PP bei 150 N/cm^2 Flächenpressung). Der Anteil an Graphit im Compound hat demzufolge einen signifikanten Einfluss auf die elektrischen Widerstände. Weiterhin konnte durch das Überfräsen der 80/20 PP das Ausbilden einer Randschicht sowie deren Einfluss auf die flächenspezifischen Widerstände nachgewiesen werden. So liegen die überfrästen 80/20 PP Proben mit $0,011 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ bei 150 N/cm^2 Flächenpressung genau im Bereich des DOE-Target 2025 und damit ca. 150 % niedriger als die unbearbeiteten Proben. Daraus lässt sich schließen, dass eine nachgelagerte Oberflächenbehandlung (Sandstrahlen, Fräsen, chemisches Entfernen etc.) und das Abtragen der Randschicht für die spritzgeprägten Bipolarplatten durchaus sinnvoll erscheint. Jedoch konnten auch mit den unbehandelten 80/20 PP Proben bereits gute Leistungskennwerte bei den durchgeführten Einzelzellmessungen erzielt werden, welche das Performance-Ziel von 25 W/Zelle bereits erreichen (siehe AP 6.3).

2.1.3 Entwicklung und Bau der erforderlichen Werkzeuge, Vorrichtungen, Automatisierungskomponenten und Steuerungsprogramme (AP3)

Numerischen Füllsimulation und Temperaturberechnung (AP3.3)

Für die Entwicklung der erforderlichen Werkzeuge werden entwicklungsbegleitende Fließsimulationen durchgeführt. Grundlage bildet eine verfügbare Materialkarte in der Software Autodesk Moldflow, bei welcher die PPS-Matrix mit 75 % Graphit gefüllt ist. Während zu Projektbeginn ausschließlich mit dieser Materialkarte gearbeitet wurde, wurden zentrale Parameter im Projektverlauf auf das eigentliche PP/Graphit Compound mit 80 % Graphitanteil angepasst.

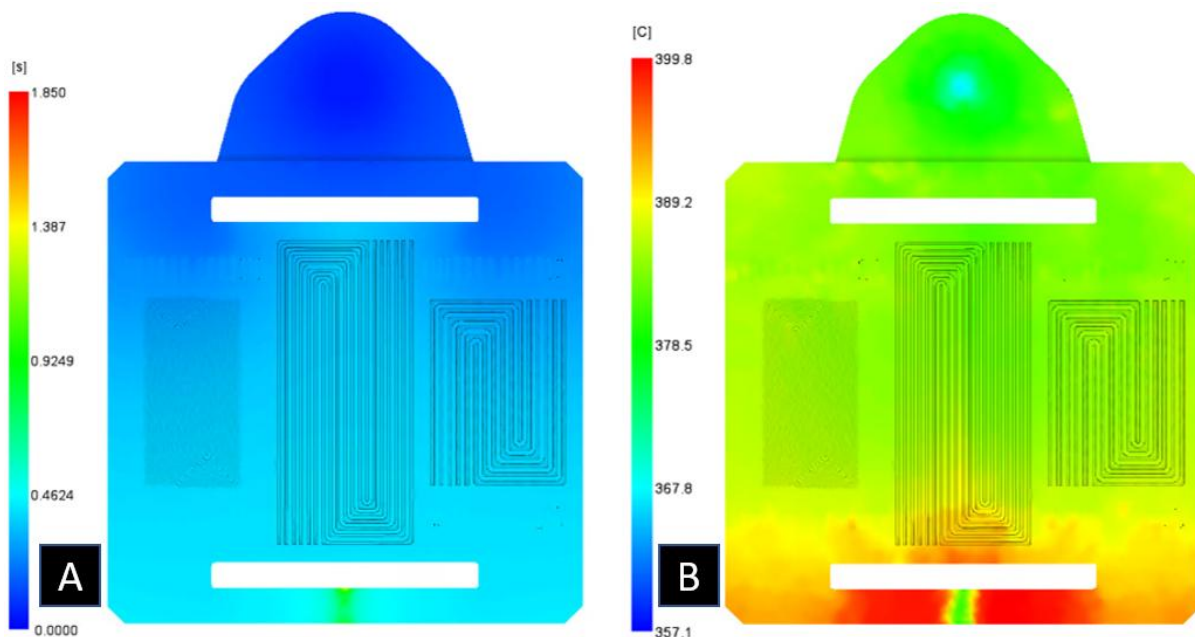


Abbildung 12: Demonstrator Vorderseite; Bild A: Füllzeit; Bild B: Fließfronttemperatur

Abbildung 3Abbildung 12 zeigt beispielsweise Berechnungsergebnisse für das Demonstratorwerkzeug. Dementsprechend ist bei dem Spritzprägeprozess eine Füllzeit von 0,93 s notwendig. Bei der Fließfronttemperatur ist erkennbar, dass im unteren Teil der Platte unter dem Langloch die Fließfront eine 60 °C höhere Temperatur als die Schmelztemperatur besitzt. Ursache ist die wirkende Scherung im Material. Zwischen diesen Extremen kommt es zu einer ca. 15 K kälteren Stelle, welches darauf hinweist, dass es zu einer Bindenahtbildung durch die zwei aufeinanderstoßenden Fronten im Spritzprägeprozess führen kann. Aufgrund dieser Berechnungsergebnisse wurde unter anderen entschieden die Orientierung der Langlöcher vertikal auszurichten.

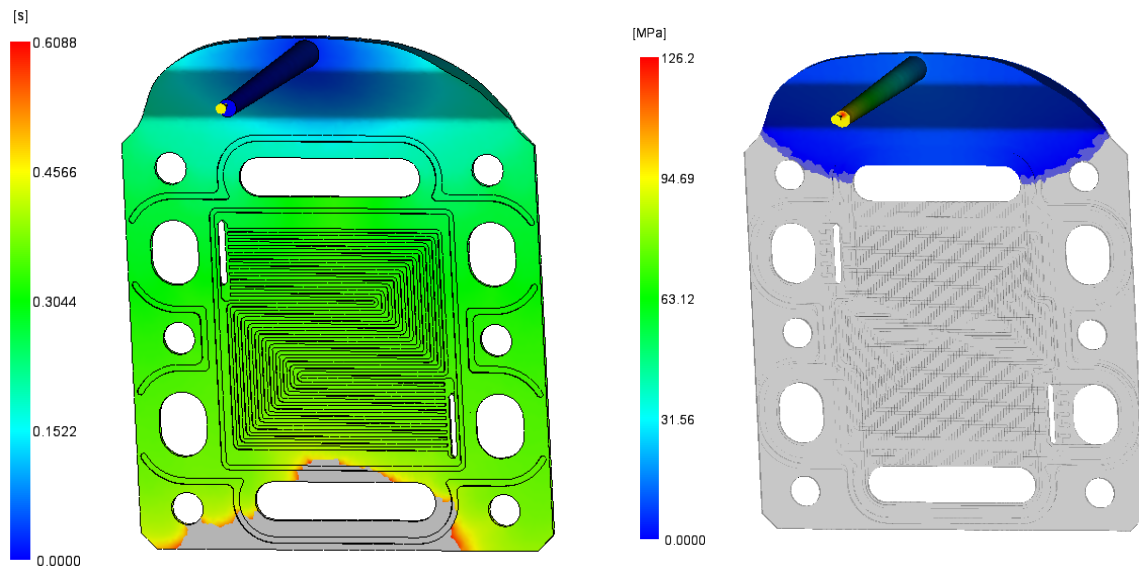


Abbildung 13: Geometrische Optimierung des Angusses

Nach Abschluss der Versuche und umfangreichen Erkenntnisgewinnen wurde der Entwicklungsprozess für die eigentliche Bipolarhalbplatte begonnen. Ein wesentlicher Entwicklungsaspekt war die geometrische Gestaltung des Angussbereiches. Ausgehend vom einen horizontalen Filmanguss mittig über die halbe Plattenbreite (Vgl. Abbildung 12), wurde zunächst die Ausdehnung über die gesamte Plattenbreite erweitert. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die strömungsgerechtere Kanalgestaltung (Vgl. Abbildung 13) deutliche Vorteile bzgl. Füllzeit und maximalen Werkzeuginnendruck hat.

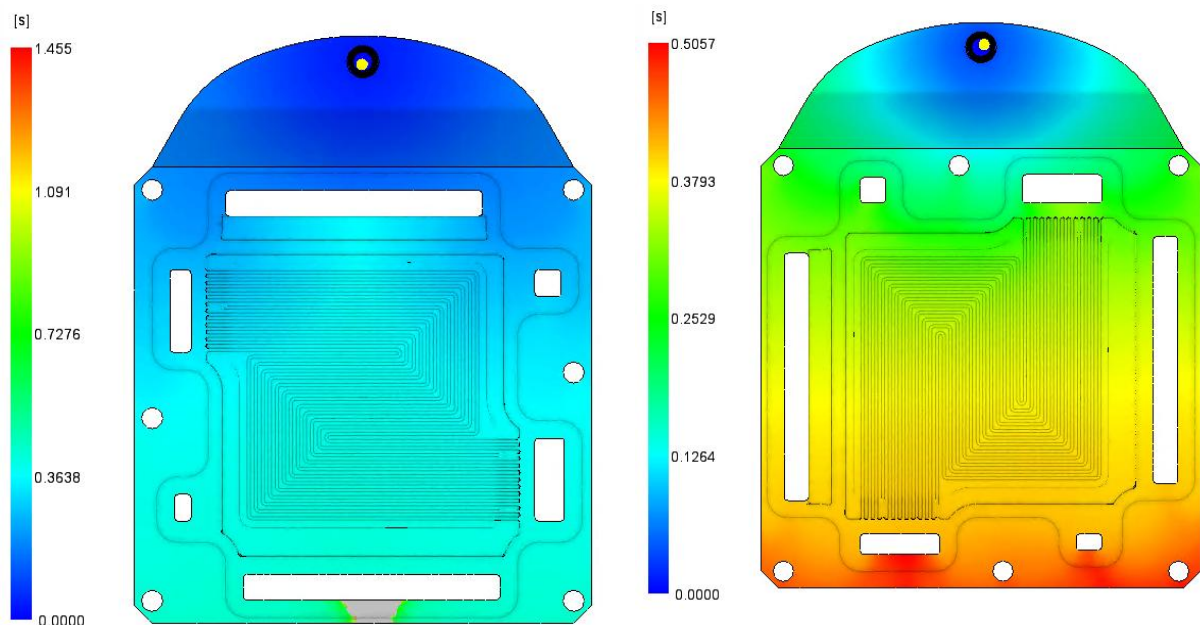


Abbildung 14: Einfluss der Langlöcher auf die Füllzeit

Abbildung 14 zeigt den enormen Einfluss der Ausrichtung der Langlöcher auf die Füllzeit. Während bei der horizontalen Ausrichtung selbst nach 1,45 s keine komplette Füllung erreicht werden kann, wird bei der vertikalen Ausrichtung die komplette Formfüllung nach 0,5 s erreicht.

Eine weitere Fragestellung war, ob weitere Verbesserungen erreicht werden können, wenn die Langlöcher teilweise mit Spritzgussmasse ausgefüllt werden. Die Fließfront könnte gleichmäßiger fließen

und resultierende Drücke weiter reduziert werden. Anhand Abbildung 15b ist erkennbar, dass das teilweise Ausfüllen der Langlöcher gegenüber Abbildung 15a sogar eine längere Füllzeit zur Folge hat.

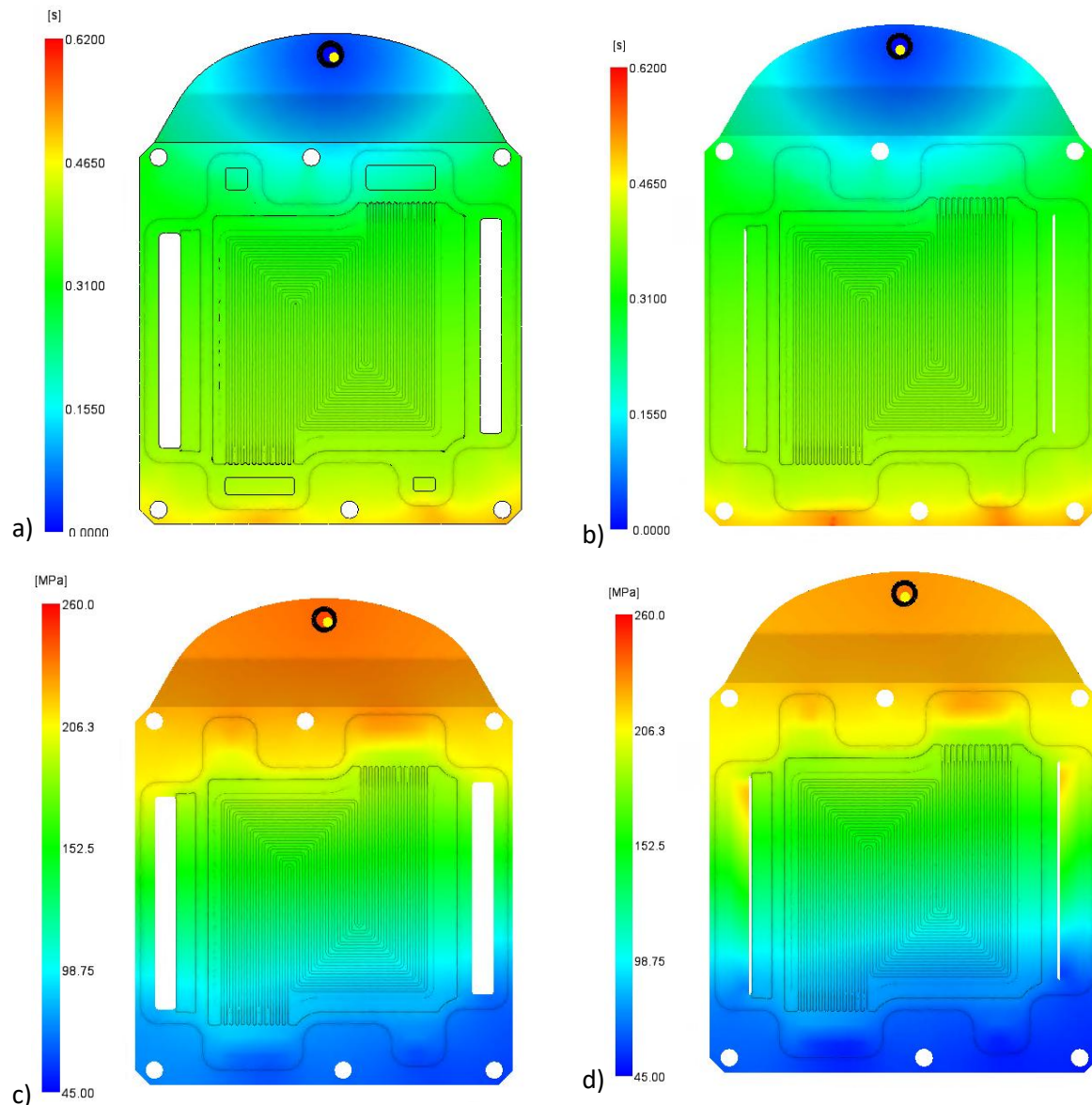


Abbildung 15: Einfluss des teilweise gefüllten Langlochs auf das Füllverhalten

Bei den resultierenden Fließdrücken ist hingegen bei Abbildung 15d gegenüber Abbildung 15c ein geringfügiger Vorteil erkennbar. Aufgrund des sehr ähnlichen Berechnungsergebnisses und der zusätzlich erforderlichen Nacharbeit im Anschluss des Spritzprozesses für das Freilegen der Langlöcher (Ver- und Entsorgungskanal für das Kühlmedium) wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Das Simulationsergebnis der finalen Geometrie zeigt Abbildung 16. Während bei der Füllzeit keine Verbesserungen nachweisbar sind, zeigt sich eine deutliche Verbesserung beim Werkzeuginnendruck. Ursache ist neben den zahlreichen Optimierungen bei der Anguss- und Plattengeometrie insbesondere die zwischenzeitlich ebenso weiterentwickelte Materialkarte. Statt PPS-Matrix findet nun eine PP-Matrix Anwendung, was in Verbindung mit den eingestellten Temperaturwerten ein deutlich verarbeitungsfreundlicheres Verhalten zeigt. Folglich ist ein direkter Vergleich mit den oben erläuterten Simulationen nicht möglich. Nichtsdestotrotz ist in Abbildung 16 zu erkennen, dass ausgehend vom Anguss

ein Werkzeuginnendruck von 37 MPa bis zum Fließwegende von ca. 16 MPa wirkt. Diese geringe Differenz lässt auf ein sehr gutes Nachdruckverhalten schließen, was sich positiv auf die Maßhaltigkeit und dem Verzug auswirken wird.

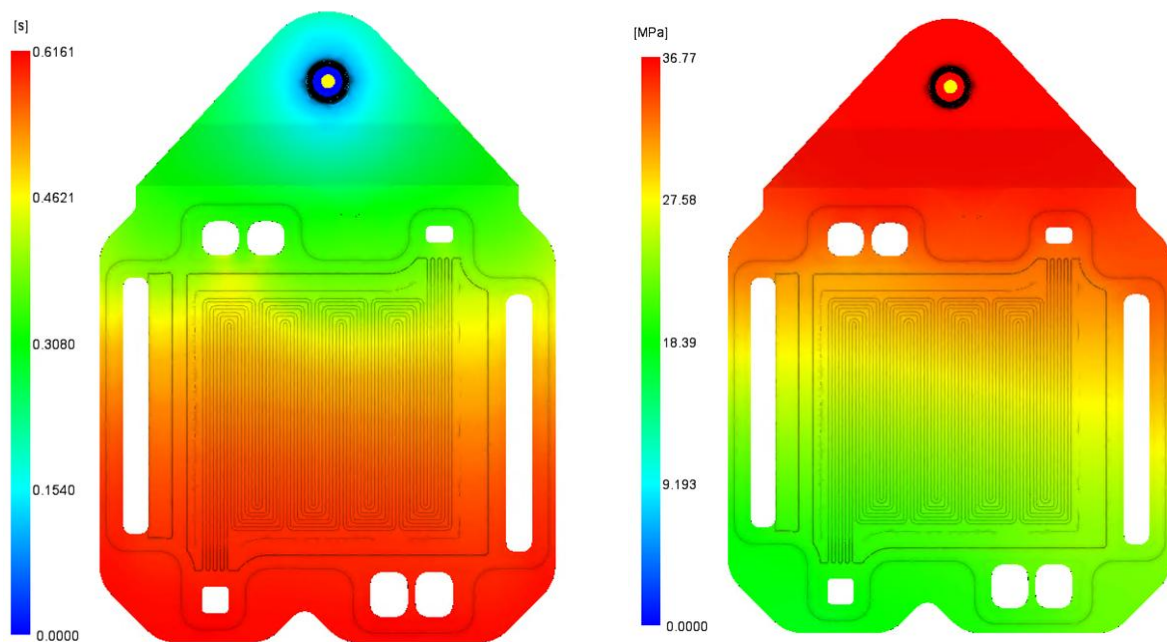


Abbildung 16: Finale Geometrie

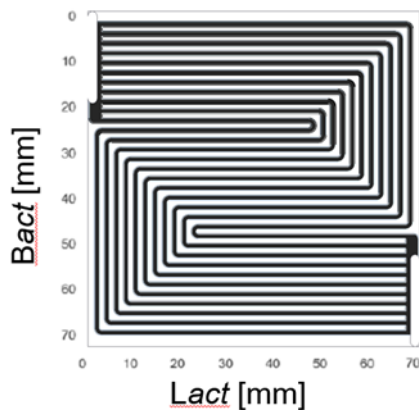
Entwicklung fertigungsgerechter filigraner Kanal- und Abdichtungsstrukturen für den Spritzprägeprozess auf Basis des OpenSourceStacks (OSS) (AP3.8)

Der Open Source Stack OSS050 (Aktivfläche 50cm²) der Professur Alternative Fahrzeugantriebe bildet die Basis für die Entwicklung des Plattendesigns der spritzgeprägten Bipolarplatten. Im Laufe des Projekts wurde verschiedene Iterationsschritte für das Flussfeldlayout mit Hilfe der Synthese-Auslegungsmethodik der Professur ALF erstellt und anschließend an die Design-Richtlinien des Spritzprägeprozesses angepasst, wobei die gewählten Betriebsparameter für das Synthese-Auslegungstool aus AP 1.2 allgemein gültig sind.

So wurden im Projektverlauf von HZwo:Smart-Bipolar zwei Varianten von Bipolarplattendesign in Abhängigkeit der verfügbaren Werkzeugkavitäten erstellt. Die Variante 1 ist dabei als primäre Variante zum Abbilden der zu Projektbeginn festgelegten Anforderungen bestimmt. Variante 2 stellt eine Performance-orientierte Lösung dar.

Variante 1 – Anoden- und Kathodendesign kompatibel zu 1-Kavitäten-Werkzeug

Besonderes Augenmerk bei der BPP-Auslegung lag dabei auf dem Design von symmetrischen Bipolarplatten in beiden Achsen, sodass die hier entworfene Bipolarplatte sowohl als Anoden- als auch als Kathoden-Bipolarplatte verwendet werden kann. So wird für das Spritzprägewerkzeug bei der BPP-Herstellung nur eine Kavität benötigt und die Werkzeug- als auch die Produktionskosten können reduziert werden. Jedoch ist dieses Layout aufgrund der Kompromissfindung zwischen Anoden- und Kathoden-vorzugsvariante aus dem Synthese-Auslegungstool nicht auf die maximale Leistungsfähigkeit optimiert. In Tabelle 4 sind die finalen Konstruktionskennwerte für das Flussfeldlayout mit einer Aktivfläche von 50,41 cm² dargestellt. Da die Anoden- und Kathoden-Halbplatten identisch sind, gelten diese Kennwerte für beide.

Tabelle 4: Finale Konstruktionskennwerte für das Flussfeldlayout der Variante 1

<i>Konstruktionskennwerte</i>	Flussfeld
Länge konstr. Aktivfläche	71,00 mm
Breite konstr. Aktivfläche	71,00 mm
Flussfeldtyp	Serpentine Längs
Kanalanzahl	11
Schleifen- / Mäanderzahl	1
Res. Randabstand	1,239 mm
Kurvenanzahl	4
Kurvenradius	1,0 mm
Kurvenwinkel	90°
Kanallänge	211,2 mm
Projizierte Kanaloberfläche	31,07 cm ²
Projizierte Landoberfläche	19,34 cm ²
Kanal-Aktivflächen-Verhältnis	0,6214

Nach der Finalisierung des Flussfeldlayouts mussten die entsprechenden Medien- und Kühlports für die ermittelten Durchsätze ausgelegt werden. Aufgrund der BPP-Symmetrie mussten die Mediensammelereinlässe und -auslässe identisch ausgeführt werden. Das heißt, der Dimensionierungsfaktor zwischen Einlass und Auslass beträgt 1. Nachfolgend sind die geometrischen Abmaße der Medien- und Kühlports aufgeführt:

- Medienports (Anode & Kathode)
 - Breite: 20,697 mm
 - Länge: 15,015 mm
 - Radien: 7,508 mm
 - Querschnittsfläche: 262,387 mm²
- Kühlports
 - Breite: 57,520 mm
 - Länge: 12,000 mm
 - Radien: 6,000 mm
 - Querschnittsfläche: 659,343 mm²

Weiterführend wurde die Gesamtkonstruktion der Bipolarplatten mit den entsprechend fertigungstechnisch notwendigen Geometrien bezüglich des Spritzprägens ausgestattet. Die konstruktiven Grenzwerte bezüglich der abbildbaren Radien und Winkel beim Spritzprägeprozess konnten mit Hilfe der Demonstra-torplatte ermittelt werden. Diese Erkenntnisse wurden mit in die Konstruktion übernommen, sodass alle Seiten mit Ausformschrägen ($\phi \geq 10^\circ$) versehen wurden. Außerdem wurden alle Kanten abgerundet ($R_{min} \geq 0,1$ mm). In Abbildung 17 ist links ein Designentwurf sowie rechts das finale BPP-Layout dargestellt. Die Randbereiche bzw. die Passivflächen des Designentwurfs (Abbildung 17, links - grau dargestellt) mussten aufgrund einer unzureichenden Füllung und einem ungleichmäßigen Schmelzeverlauf in den Fließsimulationen im Bereich der Zugankerbohrungen angepasst werden. So wurden die Anlageflächen der Zuganker bzw. der Zugankerbohrungen minimiert, können aber bei der Zellmontage weiterhin als Zentrierung genutzt werden. Zusätzlich wurden die Randbereiche Anguss-fen reduziert. Die Randbereiche Angussnah wurden weitestgehend erhalten, um eine gleichmäßigen Schmelzzufuhr und -verlauf zu gewährleisten.

Das Layout der Kühlseite kann unabhängig von dem Flussfelddesign der Medienseite ausgelegt werden, da das Spritzprägen verfahrenstechnisch beidseitig verschiedene Strukturen ermöglicht. Bei der

Arbeitspaket Ap 4.6. In nachfolgender Abbildung 19 sind die finalen Bipolarplatten der Variante 1 als dargestellt, welche von der Fa. Strobel zur Validierung in 2 mm Plattendicke gefräst wurden.

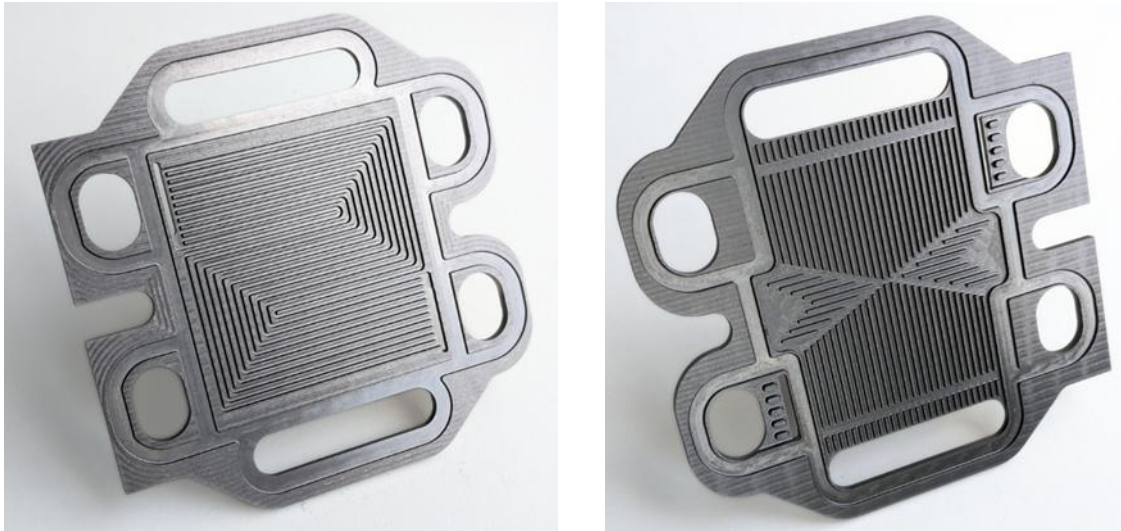
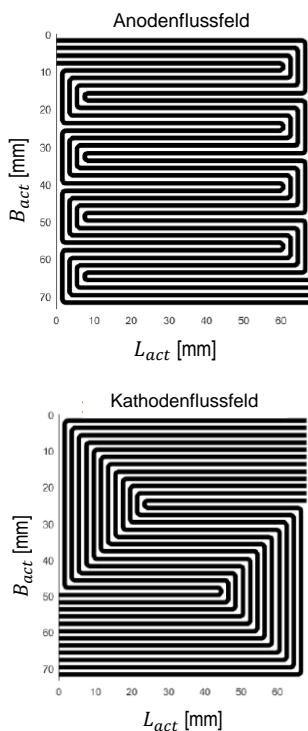


Abbildung 19: Finale, gefräste Bipolarplatte der Variante 1- links: Medienseite, rechts: Kühlseite

Variante 2 – separates Anoden- und Kathodenflussfelddesign

Für die zweite entwickelte Variante wurden die entsprechenden Anode- und Kathodenflussfelddesign unabhängig voneinander ausgelegt. Die Festlegung der Konstruktionskennwerte erfolgte analog zu Variante 1 mit Hilfe der Synthese-Auslegungs-Methodik, wobei als Zielgröße die Zelleistung referiert wurde. Als Basis wird hier der OSS050 Variante 2 mit einem nicht-symmetrischen Grundkonzept verwendet. So-mit ist eine Fertigung der Anoden- und der Kathodenplatte in nur einer Werkzeug-Kavität nicht möglich. Ziel der Variante 2 ist es, die maximale Leistungsfähigkeit des im Projekt entwickelten Material-Compounds in Zellversuchen zu ermitteln und zu validieren (siehe AP 6.3). In nachfolgender Tabelle 5 sind die entsprechenden Werte für das Anoden- und Kathodenflussfeld aufgeführt:

Tabelle 5: Festgelegte Konstruktionskennwerte für das Anoden- und Kathodenflussfeldlayout der Variante 2



Konstruktionskennwerte	Anodenflussfeld	Kathodenflussfeld
Länge konstr. Aktivfläche	68,00 mm	68,00 mm
Breite konstr. Aktivfläche	73,53 mm	73,53 mm
Flussfeldtyp	Serpentine Längs	Serpentine Längs
Kanalanzahl	4	12
Schleifen- / Mäanderzahl	4	1
Res. Randabstand	0,765 mm	0,765 mm
Kurvenanzahl	16	4
Kurvenradius	1,0 mm	1,0 mm
Kurvenwinkel	90°	90°
Kanallänge	597,1 mm	200,3 mm
Projizierte Kanaloberfläche	29,67 cm ²	29,86 cm ²
Projizierte Landoberfläche	29,33 cm ²	20,14 cm ²
Kanal-Aktivflächen-Verhältnis	0,5935	0,5972

Die benötigten Medienports wurden passend zur benötigten Mediendrucke und Massenströme aus AP 1.2 ausgelegt. Analog zur Variante 1 wurden die Konturen der Dichtung ebenfalls für den Einsatz von Flachdichtungen angepasst. Weiterhin wurden die benötigten Ausformschrägen und Radien zum Entformen der Bipolarplatten aus dem Spritzprägewerkzeug in die Konstruktion implementiert. In Abbildung 20 sind die gefrästen Anoden- und Kathodenbipolarplatten der Variante 2 in einem Vorkonzeptstand aufgeführt.

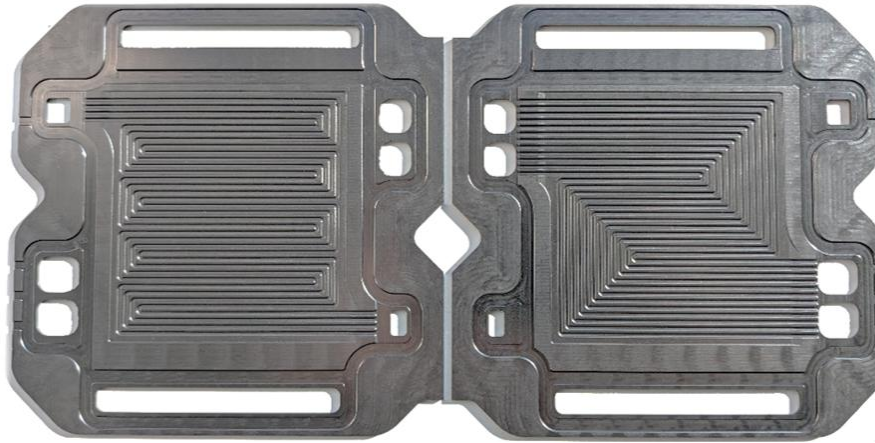


Abbildung 20: Medienseiten der BPP für Variante 2 – links: Anoden-BPP, rechts: Kathoden-BPP

Betrachtungen zu Qualitätskonzepten für die Serienfertigung von Bipolarplatten mit und ohne textilen Einleger (AP3.9)

Für die qualitative und quantitative Überprüfung der hergestellten Kanalplattenstrukturen als auch der Dichtungskonturen werden unterschiedliche Prüfprozesse und Messverfahren zur Anwendung gebracht:

- optische Oberflächen und Konturprüfung mittels 3D-Digitalmikroskops, Nutzung der Fokuspunkt-variationsfunktion zur Oberflächenvermessung, Toleranzanalysen
- laser-optische Oberflächenprüfung mittels 3D-Laserscanningmikroskop, Oberflächen-Rauheitsprüfung
- Ermittlung von mechanischen Tragbildern der Plattenkontur unter Anwendung von drucksensitiver Druckmessfolie mit nachgelagerter Digitalisierung und softwarebasierten Auswertung
- Leckage- und Dichtheitsprüfung von hergestellten Plattenstrukturen unter Anwendung eines bei ALF vorhandenen Dichtheitsprüfstandes für Bipolarplatten
- elektrische Leitfähigkeitsuntersuchungen zur Ermittlung von typischen Widerstandskennwerten der Plattenmaterialien sowie der Übergangswiderstände zwischen Zellkomponenten

Zur Leckageprüfung von Brennstoffzellenkomponenten steht der Professur Alternative Fahrzeugantriebe der Dichtheitsprüfstand DG 10 020/1 der Firma DAM zur Verfügung (siehe Abbildung 21). Hierbei können einzelne Bipolarplatten, Shortstacks aber auch komplette Brennstoffzellenstacks auf Leckagen in Abhängigkeit der Vorspannung und der Mediendrucke untersucht werden. Der Prüfstand verwendet Luft als Prüfgas in einem Druckbereich von 0 bis 6 bar(a) mit einem detektierbaren Leckage Bereich von 0,06 bis 20 cm³/min. Die maximale Vorspannkraft beträgt dabei 40.000 N.

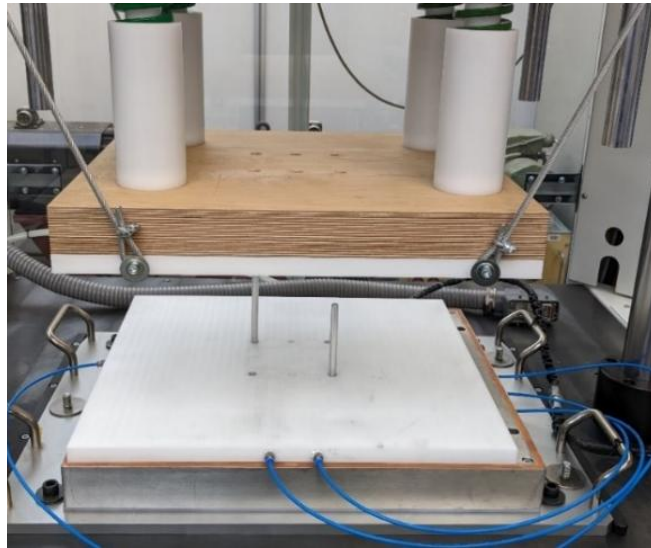


Abbildung 21: Dichtungsprüfstand der Firma DAM inklusive Vorrichtung zur Aufnahme von Bipolarplatten

Zur Leckageprüfung von Bipolarplatten wurde eine Druckabfall-Testprozedur angelehnt an die ASTM E29030-13 (Standard Practice for Decay Leak Test Method) und die DIN 62282-2-100 (Brennstoffzellenmodule - Sicherheit) entwickelt. Das Verfahren dient zur Bestimmung der Leckagerate von Bipolarplatten, welche einer positiver Druckdifferenz ausgesetzt sind und basiert auf der Druckabfallmessung (quantitative Messung der Leckagerate). In Abbildung 22 sind die wichtigsten Kennzahlen und ein schematischer Druckverlauf des Leckageprüfprozesses aufgeführt.

- Prüfbedingungen bei 20 °C
- Zeitdauer Prüfzyklus gesamt: 30 s
- Füllzeit: 5 s
- Stabilisierungszeit: 15 s
- Messzeit: 10 s
- Fülldruck Flowfield 200 mbar
- Fülldruck Kühlmittel 500 mbar
- Verspannkraft 10 kN (entspricht 1,5 N/mm² Vorspannung siehe Stackauslegung AP 1.2)

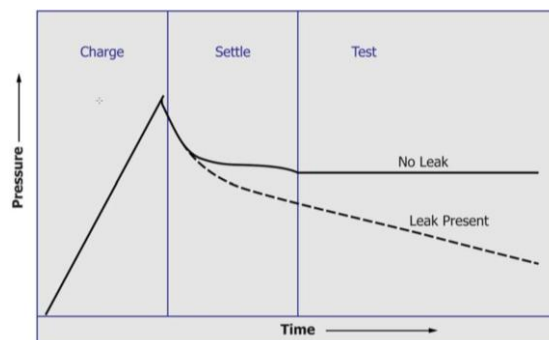


Abbildung 22: links - Kennzahlen der Leckageprüfung, rechts - schematischer Druckverlauf der Testprozedur

Hierbei wurde der Prüfling sowohl an der Anoden- als auch an der Kathodenseite gleichmäßig mit einem Druck von 3,2 bar(a) Stickstoff beaufschlagt. Die Membran wurde dabei durch eine undurchlässige PEN-Folie substituiert. Nachfolgend wurde der Gasfluss unterbrochen, und die Druckdifferenz wurde über einen Zeitraum von mindestens 10 Minuten beobachtet. Nach einer anfänglichen Setzzeit von 2 Minuten wurde die Druckdifferenz im Vergleich zum Testbeginn erfasst und über die geforderten 10 Minuten hinweg aufgezeichnet. Die dabei im Mittel über jeweils 5 Messreihen auftretende Leckagerate von 2 mbar/min auf der Anodenseite und 3 mbar/min auf der Kathodenseite im Bereich der geforderten Werte des EU-Testprotokolls. Dieses sieht eine Leckage bis zu 3 mbar/min als akzeptabel an. Gemäß DIN IEC/TS 62282-7-1 wird ein Druckabfall bis 5 mbar/min als ausreichend betrachtet.

Zusätzlich zur Prüfung der eigentlichen Dichtigkeit der Bipolarplatten bzw. des Einzelzellaufbaus, wurden Untersuchungen bezüglich der Permeation der verwendeten Materialien durchgeführt. Die Untersuchung des Permeationsverhaltens der verwendeten Materialien ist essenziell, um eine Funktion der Brennstoffzelle zu gewährleisten. Der übermäßige Gasdurchtritt durch die BPP zwischen Anoden- und Kathodenseite aber auch zur Kühlseite kann zum Totalausfall der eigentlichen Zelle führen. Bei der

Entwicklung des Permeationsprüfaufbaus wurde sich am DOE-Target 2025 (Technical Target for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components) orientiert. Der Permeationsprüfaufbau besteht aus 2 Kammern (Primäre- und sekundäre Kammer), welche durch die entsprechende Materialproben getrennt sind. Die primäre Kammer wird mit 100 mbar(a) Wasserstoffdruck beaufschlagt, wobei die sekundäre Kammer permanent mit Wasserstoff bei einem Druck von 100 mbar(g) durchströmt wird (1 bar Druckdifferenz zwischen den Kammern). In Abbildung 23 sind die Kenndaten der Permeationsmessung sowie ein Bild der eigens entwickelten Permeationskammer dargestellt.

- Probenform: Kreisrund, \varnothing 60 mm
- manometrisches Prinzip \rightarrow Messung der Druckänderung in Messkammer über 24 h
- primäre Kammer (Messkammer): 100 mbar Absolutdruck
- Sekundäre Kammer: 100 mbar Relativdruck
- Druckdifferenz zwischen den Kammern \rightarrow 1 bar
- Sek. Kammer durchströmt mit reinem Wasserstoff @100 ml/min
- Messdauer i.d.R. 24 h
- DOE-Target 2020 $< 2,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$ (STP)
- DOE-Target 2025 $< 1,3 \cdot 10^{-14} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$ (STP)
- Normbedingung (STP): 20 °C, 1 atm, 100% RH

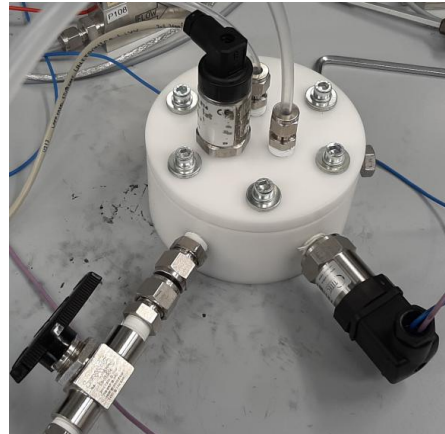


Abbildung 23: links - Kenndaten der Permeationsmessung, rechts - Aufbau der Permeationsmesskammer

Wichtigste Kenngröße bei den Permeationsmessungen ist die Permeanz. Diese gibt das Verhältnis der Gasdurchlässigkeit zur Differenz der Partialdrucks des Gases in beiden Kammern an. Die Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Mediendrucke, etc.) sind während des Versuchs aufzuzeichnen und die Messergebnisse im Anschluss auf die Normbedingungen (STP – „Standard Temperature & Pressure“) umzurechnen.

Für die Permeationsmessungen wurden von der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK) im Spritzgussverfahren hergestellte Compoundplatten mit einer Materialzusammensetzung von 80/20 (80 % Graphit-, 20 % PP-Anteil) und einer Plattenstärke von 1,96 mm bereitgestellt. Aus diesen Platten wurden anschließend drei zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 60 mm gefräst und im Permeationsprüfstand charakterisiert.

Bei der ersten Probe konnte ein Druckausgleich innerhalb von 2137 s gemessen werden, der auf eine fehlerhafte Dichtung im Prüfaufbau zurückzuführen war. Aufgrund der defekten Dichtung erfolgte zudem eine ungleichmäßige Krafteinleitung in die Probe, was zu Rissen im Randbereich führte. Daher war die erste Probe für weitere Messungen nicht geeignet. Für die Vermessung der Proben 2 und 3 wurden neue Dichtungen eingebaut, und entsprechende Messungen gemäß der Prüfprozedur wurden über einen Zeitraum von 24 Stunden durchgeführt. Die ermittelten Messergebnisse sind im Folgenden aufgeführt:

- **Probe 1** – Dichtung defekt – kompletter Druckausgleich nach 2137 s bzw. 35min
- **Probe 2** – Druckänderung (24 h): 31,43 mbar - Permeanz (STP): $1,69 \cdot 10^{-12} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$
- **Probe 3** – Druckänderung (24 h): 55,61 mbar - Permeanz (STP): $3,97 \cdot 10^{-12} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$

Nach Rückrechnung der Messergebnisse auf die Standard-Bedingungen (STP) konnten für die Probe 2 und 3 konsistente und nachvollziehbare Messergebnisse erzielt werden. Das DOE-Target für 2020 ($< 2,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$) konnten beide Proben abbilden. Die Ergebnisse liegen jedoch knapp unter dem DOE-Target für 2025 ($< 1,3 \cdot 10^{-14} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$). Trotz der leicht erhöhten Permeationsraten im Vergleich

zum DOE-Ziel für 2025 konnte im Rahmen ergänzender Einzelzellenversuche nachgewiesen werden, dass die eingesetzten Compound-Materialien (Graphit-PP-Matrix) grundsätzlich für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen geeignet sind. Die Ergebnisse der Einzelzellmessungen bestätigten die funktionale Eignung hinsichtlich Dichtigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und mechanischer Stabilität unter realitätsnahen Betriebsbedingungen (siehe AP 6.2).

Die Ergebnisse zur Tragbilduntersuchung zur Aufnahme der Druckverteilung sind in AP 5.3 und die Messungen zur elektrischen Leitfähigkeit bzw. des flächenspezifischen Widerstands in AP 2.8 dargestellt.

Experimentelle Untersuchungen zum Benetzungs-, Imprägnier- und Konsolidierungsverhalten von textilen Einlegern mit hochgefüllten Polymer/Grafit-Compounds (AP3.10)

Das Benetzungs-, Imprägnier- und Konsolidierungsverhalten von hochgefüllten Polymer/Grafit-Compounds hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Art und Konzentration des Füllstoffs, der Polymermatrix und den Prozessbedingungen. Im Allgemeinen sind hochgefüllte Compounds schwieriger spritzzuprägen, da die hohen Füllstoffkonzentrationen dazu führen können, dass die Schmelze eine sehr hohe Viskosität hat und sich nicht ausreichend von der Schneckeneinheit transportieren lässt und somit das Formfüllverhalten der Werkzeugkavität beeinträchtigt wird.

Um das Benetzungs-, Imprägnier- und Konsolidierungsverhalten zu verbessern, können verschiedene Methoden angewendet werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Füllstoffkonzentration zu reduzieren, um eine bessere Benetzung und Imprägnierung zu ermöglichen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von geeigneten Verdünnungsmitteln, um die Viskosität der Polymermatrix zu reduzieren und somit das Eindringen in den Füllstoff zu erleichtern. Auch die Prozessbedingungen wie Temperatur, Druck und Verarbeitungszeit können angepasst werden, um eine bessere Benetzung und Imprägnierung zu ermöglichen. In Extrusionsuntersuchungen wurden erfolgreich auf einem Zweischneckencompounder ERMAFA verdünntes Compound mit 40% PP-Matrix und 60% Grafit-Füllstoff sowie mit 30% PP-Matrix und 70% Grafit-Füllstoff hergestellt. Das Grundmaterial bestand aus 20% PP-Matrix sowie 80% Grafit-Füllstoff und wurde mit reinem PP vermischt. In Abbildung 24 ist das verdünnte 30/70-PP/Grafit-Granulat zu erkennen.



Abbildung 24: 30/70-PP/Grafit-Granulat

Die Anwendung der hergestellten Compounds im Spritzprägewerkzeug zusammen mit den textilen Einlegern zeigte deutliche Unterschiede zwischen der Imprägnierung mit Naturpolymer und grafitgefülltem Compound (Abbildung 25). Während das Naturpolymer PP den textilen Einleger gleichmäßig

imprägnierte, ist dies mit dem graphitgefüllten Material nicht gelungen. Ursache war insbesondere das Herausziehen des textilen Einlegers aus der dafür vorgesehenen Halterung im Versuchswerkzeug.



Abbildung 25: Versuche mit textilen Einleger und Naturpolymer

2.1.4 Prozessentwicklung zur Herstellung von Bipolarplatten

Musterung des Plattenspritzprägewerkzeugs, Durchführung von Füllstudien, Durchführung von Parameterstudien, Variation des Compounds (AP4.5) + Musterung des Bipolarspritzprägewerkzeugs, Durchführung von Füllstudien, Durchführung von Parameterstudien, Variation des Compounds (AP4.7)

Zu Projektbeginn wurde ein Plattenspritzprägewerkzeug entwickelt, welches mit zwei verschiedenen Einsätzen ausgestattet war. Ein Einsatz hatte zwei glatte Oberflächen, während der andere Einsatz speziell für die Bipolarplatte mit Funktionselementen (Demonstratorplatte) ausgelegt war. Mithilfe beider Formeinsätze wurden erfolgreich Platten mit Dicken von 2,5 mm und 4 mm im Spritzprägeprozess hergestellt, wobei ein Materialmix aus PP (20%) und Graphit (80%) verwendet wurde (siehe Abbildung 26)



Abbildung 26: Spritzgeprägte glatte Platte PP 20/80 (A); Spritzgeprägte Demonstratorplatte PP 20/80 (B)

Bei der Demonstratorplatte traten verschiedene Probleme auf. Zu nennen sind u. a. Schwimmhäute, welche sich aufgrund eines zu hohen Einspritzvolumens ausbilden und ungewollt, gefüllte Medienkanäle in der Plattengeometrie (Langlöchern, siehe Abbildung 27A). Ursache sind vermutlich stirnseitig

angebrachte Radien an den federnd gelagerten Stempeln, welche gleichzeitig als Niederhalter für das Textil dienen sollten. Der auf die projizierte Fläche wirkende Schmelzedruck während des Einspritzens führt zum Zurückdrücken dieser gefederten Stempel und Ausfüllen des freigewordenen Volumens. Zusätzlich wurde festgestellt, dass Noppen mit einer 2°-Entformungsschräge nicht korrekt entformt werden können (siehe Abbildung 26B, roter Kreis). Bei den glatten Platten ist eine Abweichung der Ebenheit von bis zu 0,55 mm feststellbar und folglich aktuell weit von den hohen geforderten Qualitätsansprüchen entfernt (Abbildung 27B).

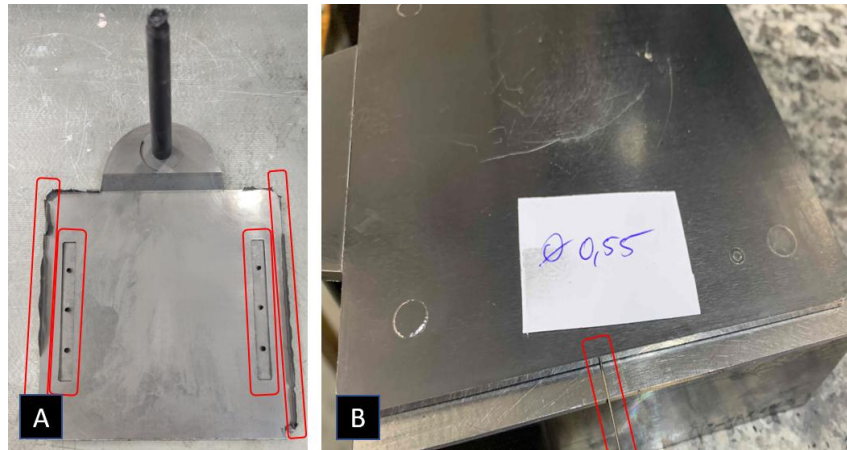


Abbildung 27: Fehler bei Spritzgeprägte Demonstratorplatte PP 20/80 (A); Spritzgeprägte glatte Platte PP 20/80 (B)

Die glatten Platten wurden vom Projektpartner Strobel in die benötigten Kathoden- und Anodenformen gefräst und anschließend von der ALF in eine Brennstoff-Einzelzelle eingebaut. Nach der ersten Temperierung mit dem Kühlmedium auf etwa 80 °C traten verstärkte, unerklärliche Blasenbildungen im Kühlmittelrücklauf auf.



Abbildung 28: Spritzgießmaschine ENGEL 450 (A); Variotherme, hochglanzpolierte düsenseitige Werkzeughälfte (B)

Im Projektverlauf wurde auf Basis der gesammelten Erfahrungen ein weiteres 1-Kavitäten-Werkzeug entwickelt. Das Werkzeug wurde speziell für hohe Temperaturen ausgelegt und hochglanzpoliert. Die Musterung und die Füllversuche mit dem SLK-Compound (CCC1) fanden an der Spritzprägemaschine Engel 450 Duo mit spezieller Schnecke zur Grafitcompoundverarbeitung und Spritzprägausrüstung statt (Abbildung 28). Folgende Werkzeugparameter wurden eingestellt:

- Vorlauftemperatur (3 min Vorwärmzeit mit 220°C)
- 2 mm Prägehub
- Abkühltemperatur 80 °C (ca. 2min)
- max. Einspritzgeschwindigkeit (erreichen der Spritzdruckbegrenzung)

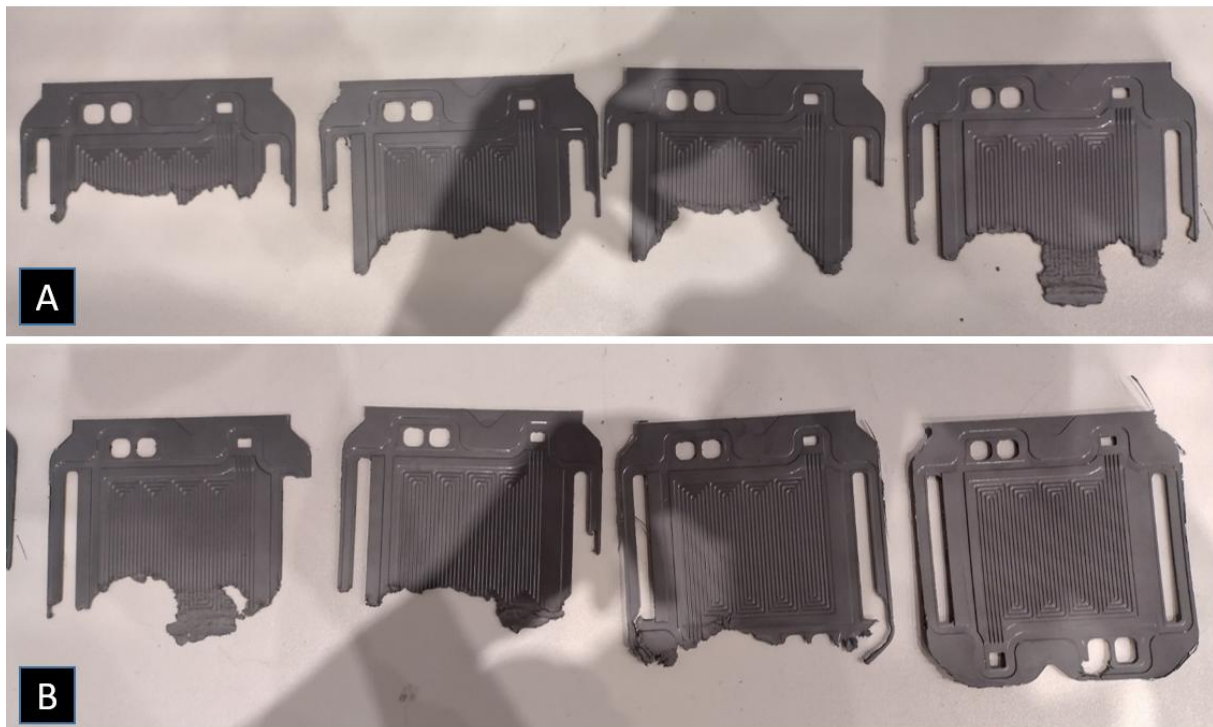


Abbildung 29: Formfüllstudien mit konst. steigendem Volumen von A links nach B rechts

Abbildung 29 zeigt die visuellen Unregelmäßigkeiten der Formfüllstudie mit konst. steigendem Volumen. Dabei weisen alle Bauteile Bereiche mit unvollständiger Füllung auf. Die unvollständig gefüllten Bereiche befinden sich überwiegend im unteren und mittleren Teil der Geometrien. Der obere Bereich (an den Öffnungen oder Anschlüssen) scheint überwiegend korrekt geformt zu sein, was darauf hinweist, dass der Fluss der Schmelze zunächst korrekt startet, aber auf halbem Weg stockt. Die Ränder sind ungleichmäßig und weisen teilweise Abrisse oder unregelmäßige Konturen auf.



Abbildung 30: Komplett gefüllte Anodenplatte Variante 2 (A); Fehlerfreie Formfüllung bis zum Fließwegende (B)

Das optimal eingestellte Volumen hat eine spritzgeprägte CCC1-Anoden-Platte mit 1,5 mm Wandstärke und sauberer Formfüllung bis zum Fließwegende erzielt. Eine hohe Maßhaltigkeit sowie fehlerfreie Oberfläche waren das Ergebnis. (Abbildung 30)

Iterative Entwicklung zu Randschicht- und Hinterspritzungseffekten, Ermittlung von Verbundfestigkeiten (AP4.6)

In Kapitel 4.5 wurde u. a. die Blasenbildung im Brennstoff-Einzelzeller beschrieben, die durch flüchtige Stoffe verursacht sein könnte. Um auszuschließen, dass diese Stoffe während des Spritzprägeprozesses in die Bipolarplatte gelangt sind, wurden entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Platte als auch das Granulat (Ensinger PP 20/80) mittels Dampfraum-Gaschromatographie auf flüchtige organische Verbindungen analysiert. Abbildung 31 zeigt das Detektorsignal über die Retentionszeit. Dieses Signal ermöglicht es, das Vorhandensein und die Konzentrationen von Verbindungen in den Proben zu bestimmen sowie qualitative Informationen über die Identität der Verbindungen, basierend auf ihren charakteristischen Retentionszeiten und detektierten Signalen, zu liefern. Es ist zu erkennen, dass sich die Kurven fast überall überschneiden. Teilweise ist die Intensität im Granulat höher als in den Platten, da durch das Spritzprägen wahrscheinlich einige reaktive Stoffe ausgegast worden. Daher lässt sich festhalten, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Ausgasungen durch ein Reinigungsmittel oder während des Prägeprozesses verursacht wurden, da sich die Kurven fast überall überschneiden.

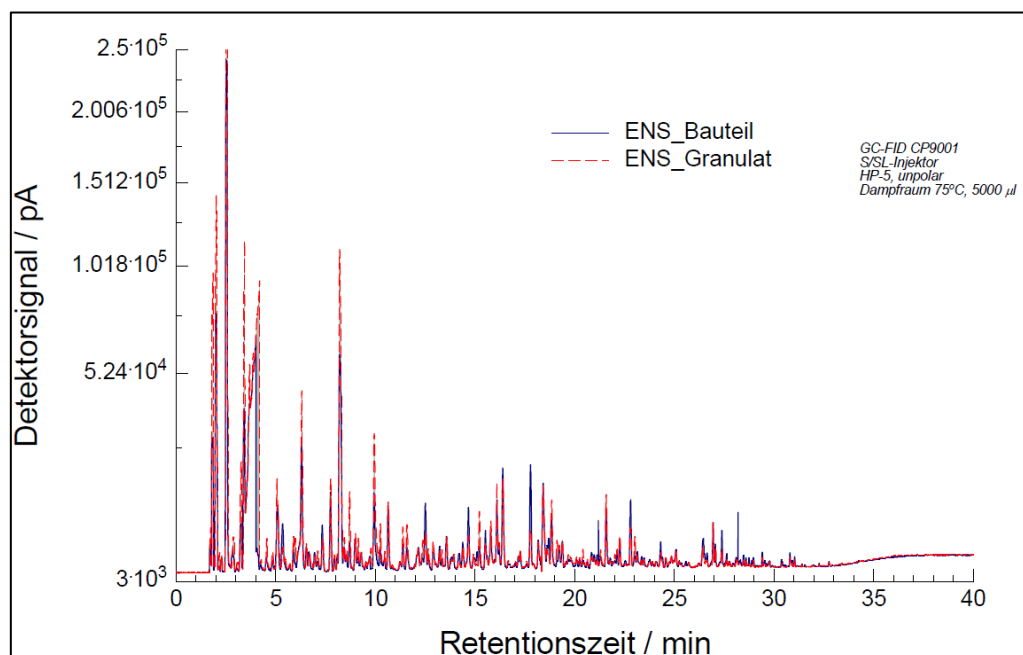


Abbildung 31: Dampfraum-Gaschromatographie

Um das verwendete Material besser zu verstehen, wurden Veraschungs- und Partikelgrößenanalysen durchgeführt. Bei dem Bipolarplatten-Material handelt es sich um PP-Graphit 20/80 der Fa. Ensinger. Folgende Bestandteile sind laut Hersteller enthalten: PP, Leitruß, Kohlefaser, Additive und Graphit. Die genaue Zusammensetzung wird von Ensinger nicht genannt. Bei der Veraschung des PP-Graphits 20/80 von Ensinger wurde das PP vollständig kalziniert, wobei sich herausstellte, dass 86,42 % Glührückstand verbleiben. Dieser Glührückstand erschien als hellgraues feines, schmieriges Material. Die anschließende Partikelgrößenanalyse sollte Informationen über die Größe und Verteilung von Partikeln im Glührückstand liefern. Abbildung 32 zeigt das von Camsizer X2 erstellte Partikelgrößendiagramm. Es sind hauptsächlich kleine Partikeldurchmesser bis zu 100 µm zu erkennen, wobei der Volumenanteil

p_3 bei über 30 % liegt. Das Verhältnis q_3 beträgt hierbei über 1,2 [%/ μm]. Der kumulative Verteilungswert Q_3 für 50 % liegt bei $Q_3(50) = 30,65 \mu\text{m}$. Bei Durchmessern über 100 μm liegt der Volumenanteil p_3 nicht über 2 % und q_3 nicht über 0,1 [%/ μm].

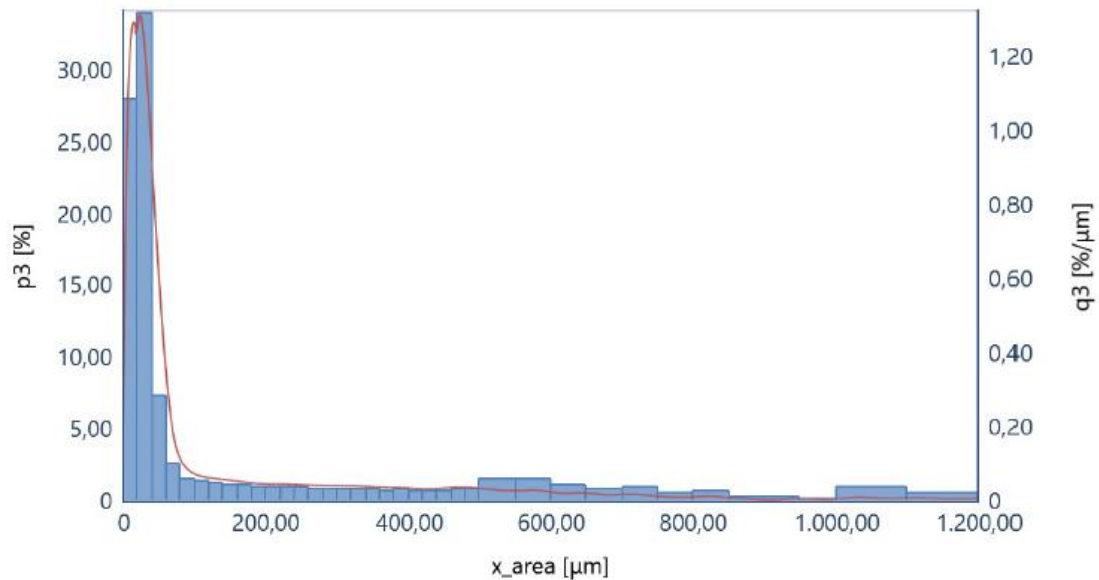


Abbildung 32: Partikelgrößendiagramm

Die Interpretation dieses PP-Graphitmaterials anhand des Partikelgrößendiagramms gestaltet sich schwierig, da durch die Verarbeitung ein kompakter Verbund entsteht, der auch nach der Veraschung noch kompakt vorliegt. Selbst durch vorsichtiges mechanisches Zerkleinern lassen sich die vorhandenen Agglomerate nicht auflösen. Darüber hinaus ist der Rußanteil aus dem PP im Veraschungsrückstand enthalten. Zur Vermeidung von Agglomeraten bietet sich eher die Analyse des Ausgangsgraphits an.

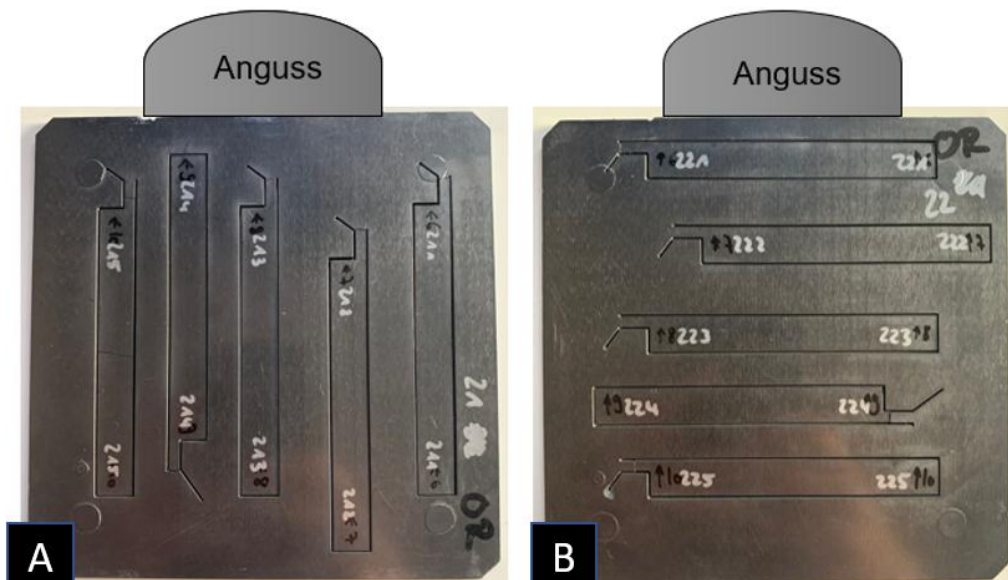


Abbildung 33: Entnommene Proben längs (A) und quer (B) zur Fließrichtung

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wurden sowohl 2,5 mm als auch 4 mm dicke spritzgeprägte Platten verwendet, für die das Testverfahren der Drei-Punkt-Biegung gemäß DIN 178 angewendet wurde. Dieses Prüfverfahren dient der Charakterisierung der Biegefestigkeit und der Bruchdehnung der Platten. Abbildung 33 zeigt, wo die Proben aus den Platten entnommen wurden. Die 16

Proben wurden mittels Wasserstrahl aus den Platten geschnitten und mit einer Zwick/Roell Z5.0 geprüft. Abbildung 34 gibt die Biegefestigkeit und die Bruchdehnung für die 2,5 mm und 4 mm dicken Prüfkörper wider.

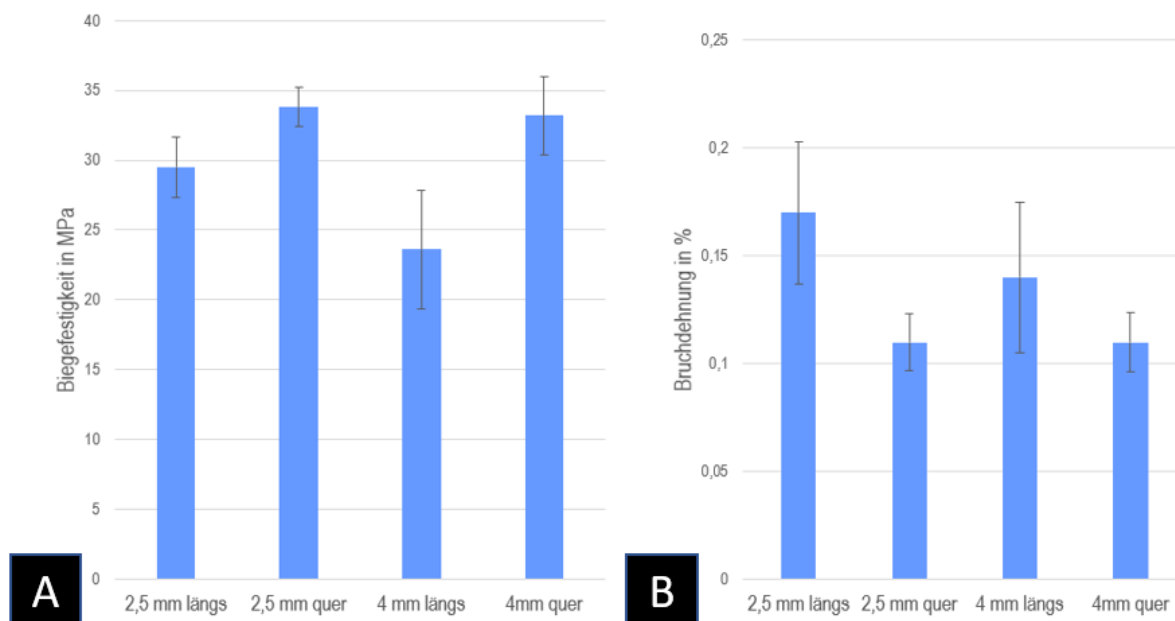


Abbildung 34: Biegefestigkeit (A) und Dehnung (B)

Bei den 2,5 mm dicken Prüfkörpern wurde ein Mittelwert der Biegefestigkeit von 29,5 MPa längs und 33,8 MPa quer ermittelt. Alle weiteren Daten sind in Tabelle 6 festgehalten. Zu erkennen ist, dass die Biegefestigkeit quer zur Fließrichtung größer ist als längs dazu. Die Bruchdehnung verhält sich antiproportional dazu. Verglichen mit dem Department of Energy liegen die Biegefestigkeiten der Probekörper unter den Vorgaben von 2025 ($\sigma_B > 40$ MPa).

Tabelle 6: Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung

	<i>Biegemodul</i>	<i>Max. Biegespannung</i>	<i>Biegedehnung</i>
<i>2,5 mm Prüfkörper längs</i>			
<i>Mittelwert</i>	21 400 MPa	29,5 MPa	0,17%
<i>Standardabweichung</i>	2 870 MPa	2,15 MPa	0,033%
<i>2,5 mm Prüfkörper quer</i>			
<i>Mittelwert</i>	32 000 MPa	33,8 MPa	0,11%
<i>Standardabweichung</i>	2 500 MPa	1,42 MPa	0,013%
<i>4 mm Prüfkörper längs</i>			
<i>Mittelwert</i>	17 930 MPa	23,6 MPa	0,14%
<i>Standardabweichung</i>	2 230 MPa	4,21 MPa	0,035%
<i>4 mm Prüfkörper quer</i>			
<i>Mittelwert</i>	29 420 MPa	33,2 MPa	0,11%
<i>Standardabweichung</i>	2 140 MPa	2,80 MPa	0,014%

Untersuchung des Materialverhaltens mit Hilfe von Schliffproben und Mikroskopie (AP4.8)

Für die Probenentnahme wurde ein kleines Stück einer glatten Platte aus PP/Grafit-20/80-Compound ohne Textil sorgfältig herausgeschnitten. Die Größe der Probe wurde auf wenige Millimeter festgelegt,

um sicherzustellen, dass die Rasterelektronenmikroskopie (REM) die gewünschte Auflösung abbilden kann. Für die Sicherstellung der Oberflächenreinheit, wurde eine gründliche Reinigung durchgeführt. Zur Verbesserung der Oberflächenleitfähigkeit und um Ladeeffekte zu minimieren, wurde eine zusätzliche leitfähige Beschichtung aufgebracht. Das Material der Beschichtung war Gold und wurde in einem Sputter-Coater aufgebracht.

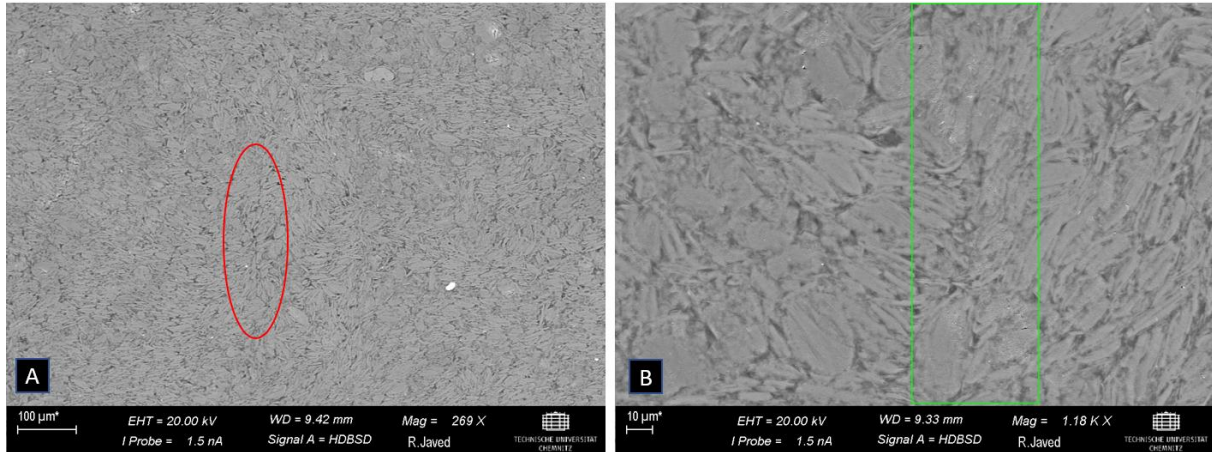


Abbildung 35: Bindenaht in der 4mm Platte; Vergrößerung 1.18 X (A); 400 X (B)

Zielstellung der Bildaufnahme ist die Analyse der Morphologie, Struktur und Zusammensetzung der Probe. Abbildung 35A zeigt erratische Verwirbelungen des schieferförmigen Graphites und eine Bindenaht (Abbildung 35B). Ein eindeutige 3-Schichtausbildung nach dem klassischen 3-Schicht-Modell ist nicht erkennbar. Die erkennbaren Bindenähte und chaotische Orientierung der Graphitpartikel im Bauteil resultieren wahrscheinlich aus dem Spritzprägeprozess heraus. Die Schmelze strömt in Form eines Freistahls in die Kavität, bricht mitunter in mehrere Strömungspfade und verbindet sich schließlich in der Pressphase zu dem geschlossenen Bauteil.

Um genauere Informationen über die Morphologie, Struktur und Zusammensetzung zu erhalten, wurde zusätzlich eine Röntgeninspektion an einem Ausschnitt einer glatten Platte aus PP/Grafit-20/80-Compound ohne Textil durchgeführt. Folgende Aufnahmen wurden angefertigt:

- Röntgen-CT-Scan mit Übersichtsaufnahme der gesamten Platte (130x130x2,5mm) zur Abbildung der generellen Gegebenheiten
- Röntgen-CT-Scan eines Detailbereiches mit Augenmerk auf die Verteilung sichtbarer Füllstoffe.

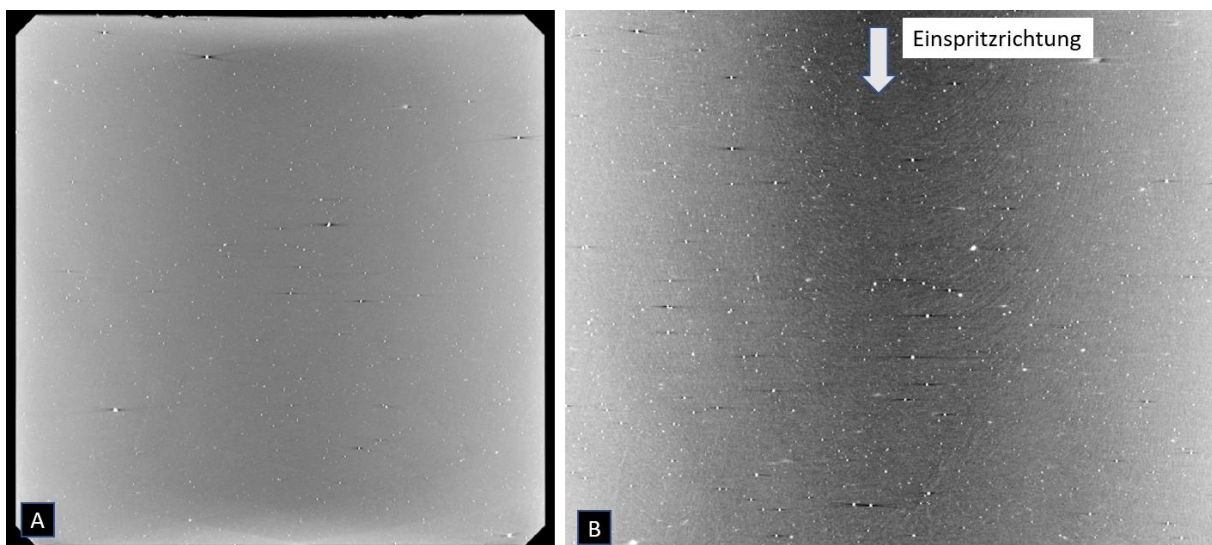


Abbildung 36: CT Bilder Gesamtplatte (A), Detailausschnitt der Gesamtplatte (B)

In einem ersten Schritt wurde die gesamte Platte mittels Röntgen CT mit einer Auflösung 68 μ m gescannt. Die dabei entstandenen Bilder zeigt Abbildung 36. Dabei wurden Fremdpartikel mit höherer Röntgendichte (helle Punkte), die gleichmäßig im gesamten Material verteilt sind, sichtbar. Die Füllstoffe auf Carbonbasis sind in dem Übersichtsscan aufgrund der geringen Auflösung zunächst nur vage erkennbar. Zusätzlich wird die Abbildung dieser Füllstoffe durch die Fremdpartikel beeinträchtigt. In vergrößerten Abbildung 36B ist die Fließfront erkennbar. Es gibt unter der Einspritzung konzentrische Kreise und in den Randbereichen der Fläche irregulär ausgerichtete, verwirbelte Bereiche.

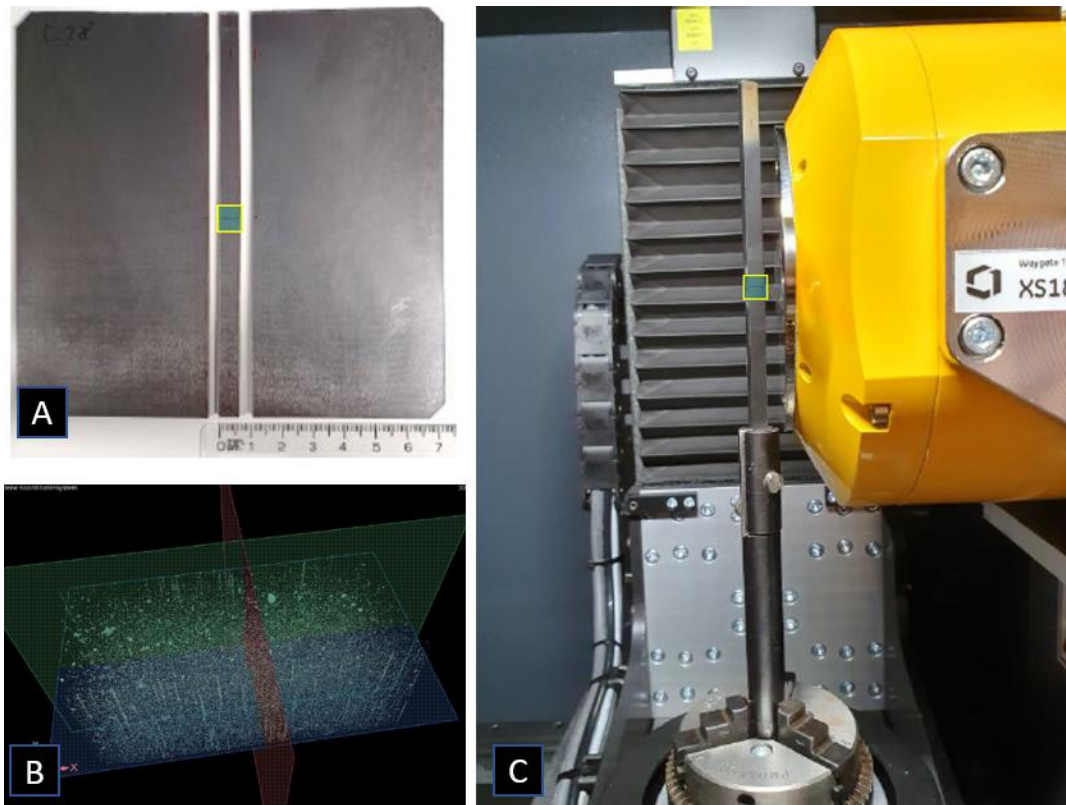


Abbildung 37: Prüfobjekt und herausgetrennte Detailprobe (A); 3D-Darstellung des Scanbereichs (B); Streifenförmige Probe vor Röntgenquelle innerhalb des Computertomograph (C)

Zur Erfassung weiterer Details, wurde nachfolgend ein Detailscan einer kleineren Probe durchgeführt. Dafür erfolgte die Entnahme eines Teilstückes aus der Platte durch geeignete Trennschnitte. Die Position der Detailaufnahme ist in Abbildung 37A erkennbar. Der effektive Scanbereich hat die Maße (6 x 3,5 x 2,5) mm. Die resultierende Auflösung beträgt 2 μ m. In Abbildung 37C ist die streifenförmige Probe vor der Röntgenquelle platziert. Abbildung 37C zeigt eine 3D-Darstellung der einzelnen Schnitte im räumlichen Koordinatensystem. Eine Verteilung von Fremdpartikeln mit höherer Röntgendichte (helle Punkte) im Material ist deutlich erkennbar.

Abbildung 38 zeigt eine detaillierte Aufnahme. Es sind sowohl kugelförmige als auch faserartige Partikel erkennbar. Die kugelförmigen Partikel sind Kugelgraphit. Eine gekennzeichnete Partikel hat einen Durchmesser von ca. 17 μ m. Generell sind Fasern und Partikel „gut gemischt“. Eine Vorzugsrichtung ist nicht erkennbar. Zudem sind auch hier die Fremdpartikel mit höherer Röntgendichte (kein Carbon) sind erkennbar. Diese Fremdpartikel sind, wie auch in Abbildung 39, gleichmäßig im gesamten Material verteilt. Die Art des Materials kann nicht spezifiziert werden. Vermutlich sind dies Metallpartikel, welche aufgrund von anderweitigen Versuchen mit dem Compounder, in die Probe gelangt sind. Für zukünftige Untersuchungen ist aus diesem Grund auf eine ausreichende Reinigung der Maschinen zu achten.

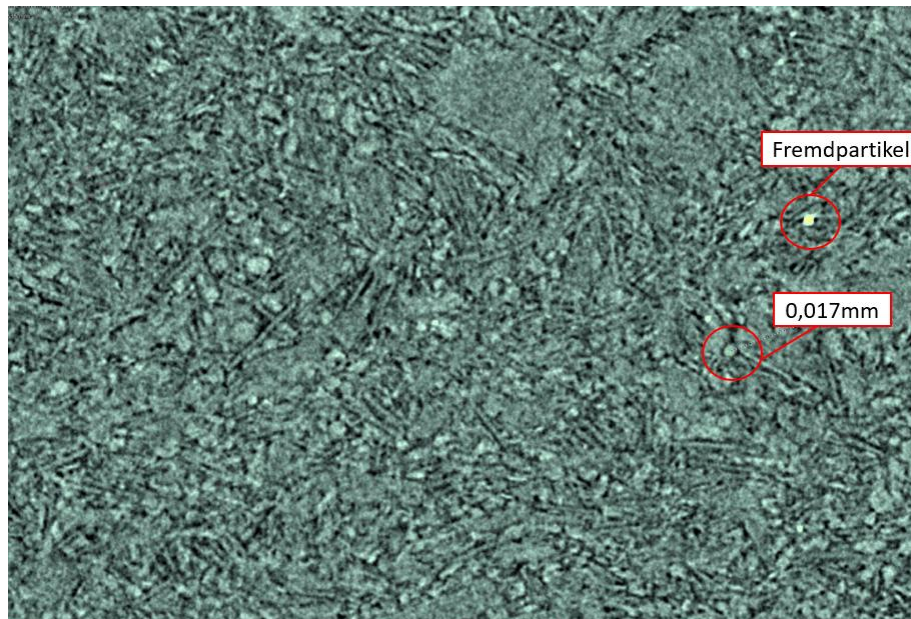


Abbildung 38: Detailaufnahme

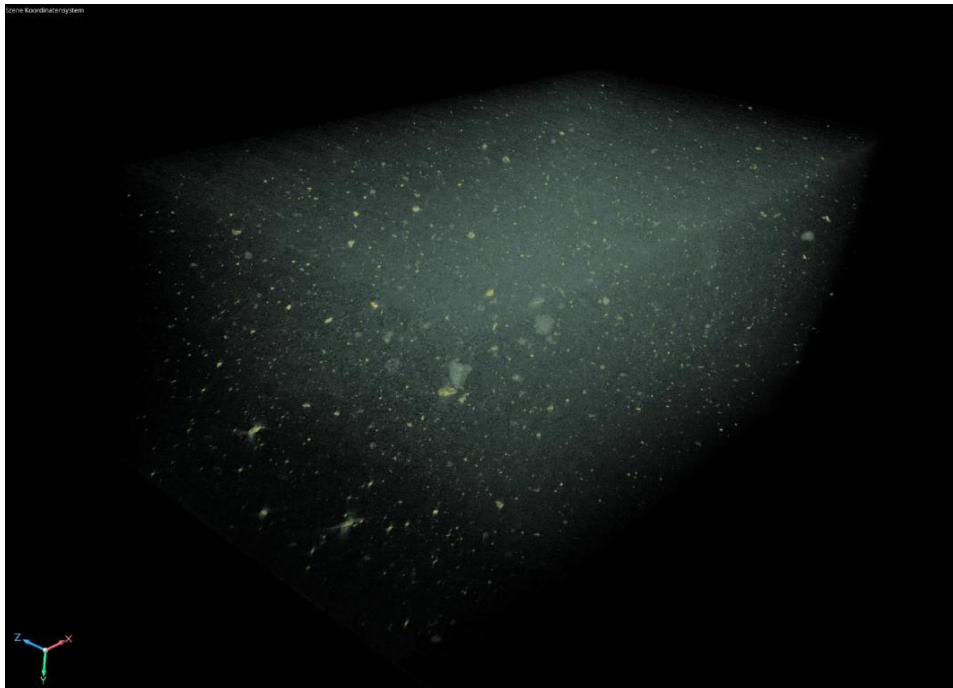


Abbildung 39: Blick in das Volumen auf die „Fremdpartikel“

2.1.5 Entwicklung eines Prüf- und Qualitätskonzeptes

Kanalquerschnittsbetrachtungen / Mikroskopie (Beurteilung des Fertigungsprozesses hinsichtlich der Ausformbarkeit von Kanalquerschnittskonturen) (AP5.2)

Im Rahmen der qualitativen und quantitativen Bewertung der gefertigten Bipolarplattenstrukturen sowie der Demonstratorplatte werden verschiedene Prüfverfahren und Messtechniken angewendet. Die optische Inspektion der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Konturen zur Beurteilung der Fertigungsprozesse erfolgt unter Einsatz eines 3D-Digitalmikroskops der Firma Keyence, welches über eine Fokusvariationsfunktion zur dreidimensionalen Oberflächenvermessung verfügt. In Abbildung 40 ist die Vermessung einer spritzgeprägten Kathoden-Bipolarplatte aus 80/20 PP dargestellt.

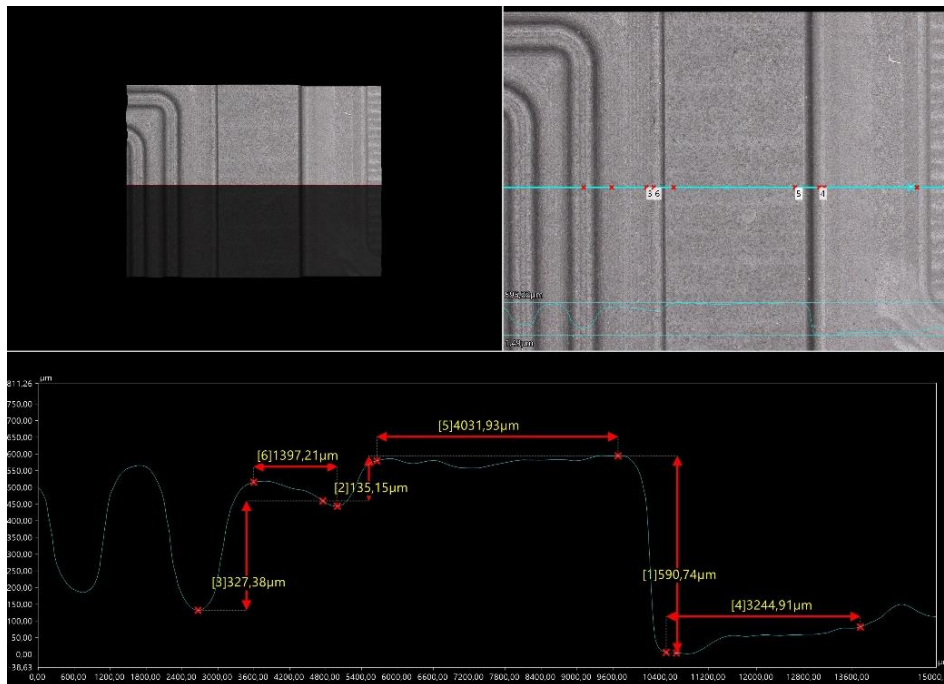


Abbildung 40: Optische Vermessung und Analyse der Höhenprofile einer spritzgeprägten BPP am Keyence VHX-7000

Durch die mikroskopischen Untersuchungen konnten die Höhenprofile der Bipolarplatten analysiert und mit den im 3D-CAD-Modell vorgesehenen Strukturen verglichen werden. Dabei zeigte sich, dass sowohl die gefrästen Bipolarplatten der Firma Strobel als auch die spritzgeprägten Varianten aus dem Werkzeugeinsatz der Firma Wesko eine hohe Maßgenauigkeit aufweisen. Sämtliche form- und funktionsrelevanten Konturen, wie beispielsweise Ausformschrägen und Radien, konnten präzise abgebildet werden, wodurch die Einhaltung der geforderten Toleranzen sowie die Ausformbarkeit der Kanalquerschnittskonturen bestätigt werden konnte.

Analyse des mechanischen Tragbildes der Bipolarplatten mittels Druckverteilungsmessungen und Auswertung (AP5.3)

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 5.3 wurden verschiedene Einzelzellenkonfigurationen mit unterschiedlichen Dichtungsvarianten hinsichtlich ihrer Druckverteilung untersucht. Zur Durchführung der Messungen kamen Druckmessfolien des Typs Prescale – Super Low Pressure (LLW) der Firma Fujifilm Europe zum Einsatz. Diese Folien besitzen einen Empfindlichkeitsbereich von 0,5 MPa bis 2,5 MPa und eignen sich somit optimal für die angestrebte mechanische Vorspannung von 1,5 MPa in der Aktivfläche der Brennstoffzelle.

Zur Applikation der mechanischen Vorspannung auf den Einzelzellaufbau wurde die elektrische Presse des Typs Schmidt Electric Press 345 der Professur Alternative Fahrzeugantriebe eingesetzt. Diese verfügt über eine integrierte Kraft-Weg-Überwachung sowie eine maximale Vorspannkraft von 12 kN. Zur realitätsnahen Erfassung der resultierenden Druckverteilung wurde die Druckmessfolie in die relevanten Ebenen des Zellstapels eingebracht.

Die relevanteste Ebene ist dabei die MEA-Ebene (Mittenlage zwischen Anoden- und Kathodenplatte), in welcher die Druckmessfolie die CCM substituiert. In dieser Ebene können so direkt Rückschlüsse über die Druckverteilung in der Aktivfläche und somit über die Zellfunktion getroffen werden. Zusätzlich wird die Druckmessfolie aber auch in die Ebenen zwischen Kanal- und Separierplatte sowie zwischen Separierplatte und Endplattensystem eingebracht.

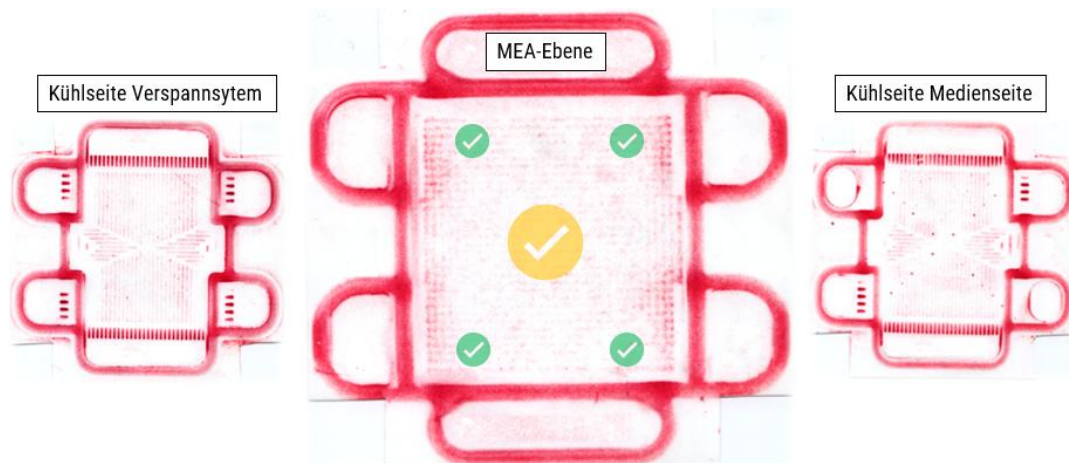


Abbildung 41: Tragbilduntersuchung für die relevanten Stack-Ebenen bei 10kN Vorspannung

Das Design der spritzgeprägten Bipolarplatten wurde für den Einsatz mit Flachdichtungen (Dichtungshöhe komprimiert ca. 850 μm , Dichtungsbreite ca. 3mm) ausgelegt. Als Gasdiffusionslage wurde die SGL Sigracet 36BB mit einer Ausgangsdicke von 280 μm für die Tragbilduntersuchungen verwendet. In Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Tragbilduntersuchung für dieses Setup bei einer Vorspannung von 10 kN dargestellt.

Die durchgeführten Tragbildanalysen zeigen für das vorliegende Versuchssetup bei 10 kN Vorspannkraft (entspricht 1,5 N/mm^2 Vorspannung) eine homogene Kraftverteilung ohne lokale Druckspitzen über sämtliche Schichten des Stacks. Auf allen Ebenen sind die Dichtkonturen umlaufend zu erkennen, was auf eine ausreichend gleichmäßige Kontaktierung sowie die Dichtheit der Komponenten hinweist. Lediglich im mittleren Bereich der Aktivfläche auf MEA-Ebene wurden lokal geringere Vorspannungen im Vergleich zu den Randbereichen beobachtet. Durch die Variation der GDL-Dicke oder auch der Dichtungshöhen könnte diesem Verhalten gegebenenfalls entgegengewirkt werden. Dennoch konnte in den in AP 3.9 durchgeführten Dichtheitsuntersuchungen sowie den in AP 6.2 Einzelzellmessungen eine vollumfängliche Funktionalität des Stack-Aufbaus bestätigt werden.

Entwicklung eines Qualitätskonzeptes für die Serienfertigung von Bipolarplatten mit und ohne textilen Einleger (AP5.4)

Ein Qualitätskonzept für die Serienfertigung von Bipolarplatten könnte mehrere Phasen und Maßnahmen umfassen, um sicherzustellen, dass die Platten die geforderten Standards und Spezifikationen für die Verwendung in Brennstoffzellen erfüllen. Folgende Maßnahmen enthält das entwickelte Konzept:

- Materialprüfung der Rohmaterialien
 - Überprüfung der angelieferten Rohmaterialien (z. B. Polymer/Graphit-Compounds, Verstärkungstextilien) auf spezifische Eigenschaften wie Viskosität, Partikelgröße, Dichte und Reinheit.
- Prozessüberwachung und -kontrolle
 - Inline-Überwachung der Fertigungsparameter: Einsatz von Sensoren zur kontinuierlichen Überwachung kritischer Parameter wie Temperatur, Druck und Füllgeschwindigkeit während des Spritzprägeverfahrens.
 - Variotherme Temperierungskontrolle: Da die variotherme Temperierung entscheidend für die Qualität der Bipolarplatten ist, sollten die Temperaturzyklen genau überwacht und bei Abweichungen automatisierte Anpassungen vorgenommen werden.
- Zerstörungsfreie Prüfung

- Ultraschallprüfung: Einsatz von Ultraschallprüftechniken zur Identifizierung von Lufteinschlüssen, Materialfehlern oder unzureichender Imprägnierung der Verstärkungstextilien.
- Thermografische Analyse: Verwendung von Infrarotkameras, um thermische Homogenität zu überprüfen und potentielle Fehlerstellen oder strukturelle Unregelmäßigkeiten sichtbar zu machen.
- eometrie- und Maßhaltigkeitsprüfung: Einsatz von Messinstrumenten (z. B. optische Scanner oder taktile Messtechnik) zur Sicherstellung der Einhaltung von Toleranzen bei der Plattendicke, Flächenparallelität und Passform.
- Funktions- und Leistungstests
 - Elektrische Leitfähigkeit: Testen der elektrischen Leitfähigkeit jeder Platte, um sicherzustellen, dass sie die geforderte Leitfähigkeit für die optimale Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle erfüllt.
 - Thermische Leitfähigkeit: Überprüfung der thermischen Eigenschaften, um sicherzustellen, dass die Platte eine ausreichende Wärmeabfuhr ermöglicht.
 - Permeabilitätsprüfung: Prüfung der Dichtheit und Durchlässigkeit jeder Platte, da eine perfekte Dichtung für die Funktionsfähigkeit der Brennstoffzelle notwendig ist.

Prüfung der Maßhaltigkeit mittels optischer Messmethoden (AP5.5)

Zur Prüfung der Maßhaltigkeit wurde eine zerstörungsfreie Methode angewendet, bei der die Geometrie und Maße des Bauteils unmittelbar nach der Herstellung überprüft werden können. Der Versuchsaufbau beinhaltet eine 2,5D-Vermessung mit einem Laser-Profilsensor Keyence LJ-X8400. Anhand dessen ist die Plattendicke, die Flächenparallelität und Passform messbar. Zu diesem Zweck wurden glatte Platten nach der jeweiligen Versuchsreihe sortiert, mit dem Angusspunkt in Bewegungsrichtung des Förderbandes auf dieses gelegt (Abbildung 42A) und mit definierter Geschwindigkeit unter die Vermessungseinrichtung hindurch befördert.

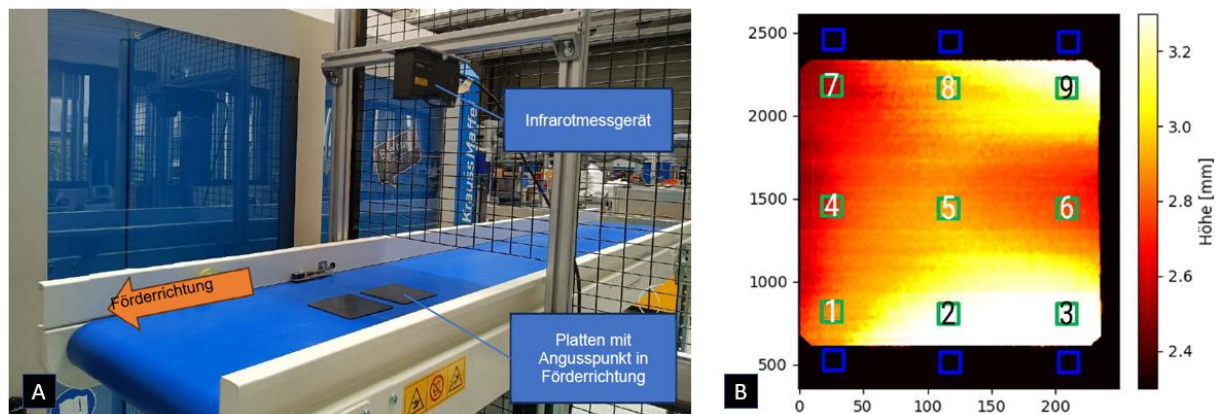


Abbildung 42: -Messaufbau bestehend aus Förderband und Infrarotmessgerät mit Förderrichtung (A); Neun Messbereiche auf der Platte und sechs Messbereiche als Referenz neben der Platte (B)

Für die Erfassung der Daten wurde zudem ein Algorithmus programmiert. Dieser ermöglichte es, auf den Platten in neun definierten Bereichen mehrere Punkte zu ermitteln. Außerhalb der Platten wurden weitere sechs Messbereiche zusätzlich vermessen. Diese bilden den Referenzpunkt als „Nullhöhe“. In Abbildung 42B sind die Messpunkte graphisch dargestellt. Der ursprüngliche Angusspunkt befindet sich in der Graphik links von Messpunkt 4. Die Differenzen aus gemittelter „Nullhöhe“ und gemittelter Bereiche auf der Platte ergeben die jeweilige Plattenhöhe im Messpunkt auf der Platte.

2.1.6 Prototypenbau einer Brennstoffzelle

Montage der Brennstoffzellen Komponenten (AP6.1)

Die präzise Positionierung der Einzelkomponenten im Zellstapel erfordert eine externe Vorrichtung, da das finale Layout der BPP keine internen Ausrichtungsstrukturen enthält. Für die Komplettierung und den Zusammenbau des Einzelzellaufbaus wurde die Stapelvorrichtung der OSS-Plattform der Professur Alternative Fahrzeugantriebe verwendet, welche sowohl die horizontale Stabilisierung der Einzelkomponenten als auch die vertikale Kompression zur Verspannung ermöglicht (siehe Abbildung 43).

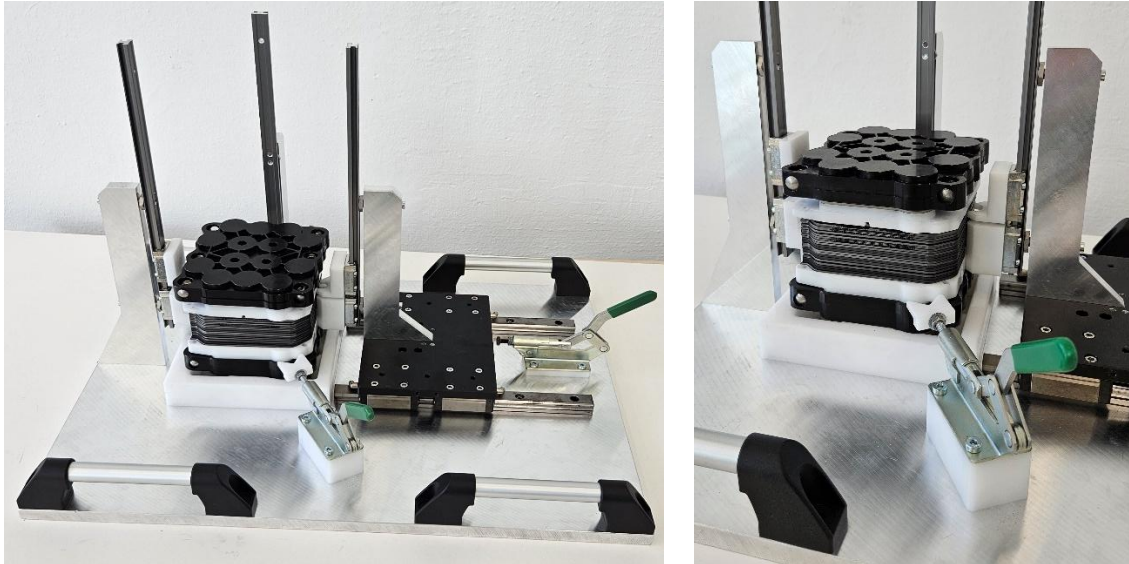


Abbildung 43: Variable Stapelvorrichtung für die OSS-Plattform, Beispielbilder mit einem Short-Stack (10 Einzelzellen)

Für den Zusammenbau mussten die Einzelkomponenten entsprechend vorbereitet werden. Das betrifft unter anderem den Zuschnitt der Dichtungen (Medien- als Kühldichtung; vgl. Abbildung 44), der Gasdiffusionslagen, der Membran sowie der Subgasket-Folien zur Herstellung der Membran-Elektroden-Einheit (kurz MEA).

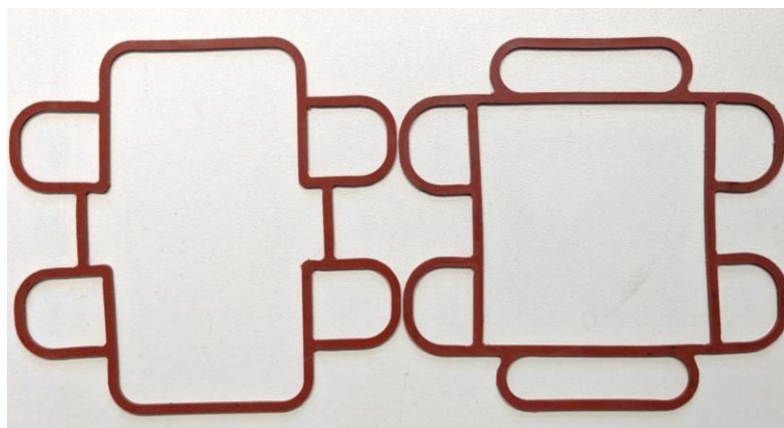


Abbildung 44: Per Lasercutter zugeschnittene Flachdichtungen – links: Kühldichtung, rechts: Mediendichtung

Funktionsnachweis und Vergleich mit Referenzsystemen (AP6.2)

Um den Funktionsnachweis des Einzelzellaufbaus durchführen zu können, wurde dieser nach der Komplettierung in den FuelCon Prüfstand der Professur Alternative Fahrzeugantriebe eingebaut (siehe Abbildung 45). Nach dem Prüfen der Dichtheit der Medien- und Kühlversorgung sowie des Stackaufbaus über interne Leckagetestprogramm des Horiba FuelCon Prüfstands erfolgte der Break-In der Membran. Dies ist ein essenzieller und entscheidender Vorgang, um die Membran-Elektroden-Einheit

(MEA) optimal zu aktivieren und eine stabile, reproduzierbare Leistungsfähigkeit sicherzustellen. Für die Break-In Prozedur wird sich dabei am „EU harmonised test protocols for PEMFC MEA testing in single cell configuration for automotive applications“ orientiert. Dieser sieht folgende Schritte vor:

- Cycle Step 1 (Perform Once): Hold 0.6V for 60 mins
- Cycling Step 2 (Perform 9 times): Hold 0.7V for 20 mins, then hold 0.5V for 20 mins
- Constant Current Operation: Hold at 200 mA/cm² for 720 mins (12 hrs)
- Parameter:
 - Fuel: Hydrogen, 1.2 Stoich, 100% RH
 - Oxidant: Air, 2.0 Stoich, 100% RH
 - Temperature: 80 °C
 - Pressures: 2,5 bara

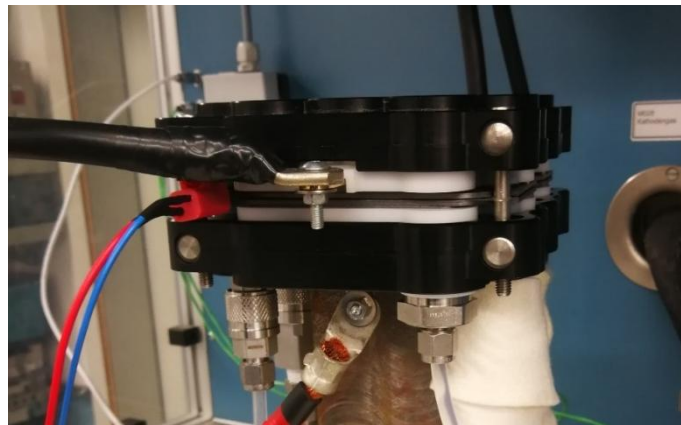


Abbildung 45: Vollständiger Einzellaufbau mit spritzgeprägten Bipolarplatten auf den Prüfstand

Nach dem Break-In kann dann die U/I bzw. die die P/I Kennlinie unter den gewählten Betriebsparametern aufgenommen werden. Die Messergebnisse der Zellversuche für den Open-Source -Stack OSS050 mit gefrästen Compound-Bipolarplatten unbekannter Material-Zusammensetzung sind in Abbildung 46 dargestellt. Dabei kommt eine Gore-Membran mit beidseitig aufgebrachter Elektrode mit jeweils 0,4 mg Platin pro cm² zum Einsatz. Als Gasdiffusionslage wird die Freudenberg H23C9 verwendet. Mit diesem Setup konnte eine maximale Leistung von ca. 36 W bei einer maximalen Spannung von 1,8 A/cm² erreicht werden. Diese Werte stellen gute Messergebnisse dar und können weiterführend als Referenz genutzt werden.

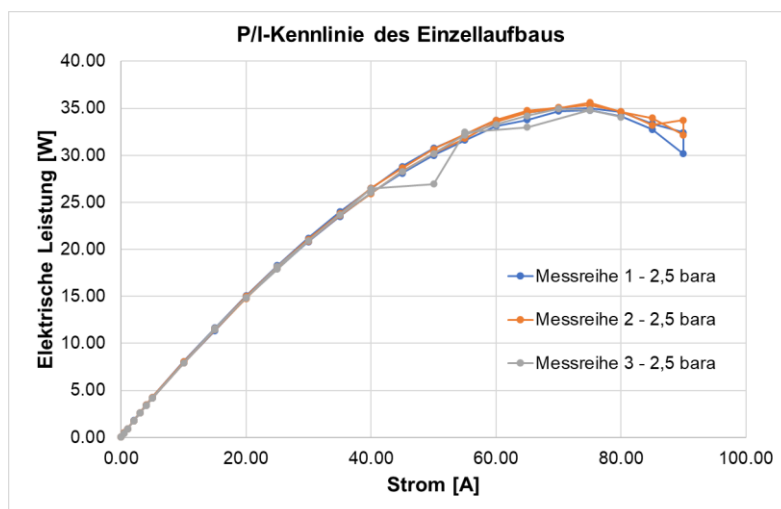


Abbildung 46: P/I-Kennlinie des Einzellaufbaus des OSS050 für drei Messreihen

Untersuchung des Einflusses spritzgeprägter Bipolarplatten mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Struktur auf die Leistungsfähigkeit (AP6.3)

Um den Einfluss von der spritzgeprägten Bipolarplatten mit den notwendigen konstruktiven als auch Materialspezifischen Anpassungen valide untersuchen zu können, wurde bei allen Zellversuchen die identische Membran-Elektroden-Einheit (MEA) eingesetzt. Lediglich die Gasdiffusionslage wurde variiert und die SGL Sigracet 36BB verwendet, was aus den Vorversuchen zu den Tragbildanalysen zur Optimierung der Druckverteilung resultierte. Sowohl die Betriebsparameter der Break-In-Prozedur als auch die Parameter bei den eigentlichen Leistungsmessungen der Zelle sind identisch. In nachfolgender Abbildung 47 sind die Messergebnisse der für den Spritzprägeprozess optimierten Bipolarplatten der Variante 2 dargestellt, welche aus dem im Projektverlauf entwickelten 80/20-PP-Compound gefertigt wurden. So konnte eine Zelleistung von ca. 29 W bei einer maximalen Spannung von 1,2 A/cm² erzielt werden. Es fällt auf, dass die Kennlinie im Bereich hoher Stromdichten über die 3 Messreihen nicht konstant verläuft. Dies ist vermutlich auf Konzentrationsverluste innerhalb der Zelle in Folge von Massentransportverlusten der Reaktanten zurückzuführen. Ein möglicher Einflussparameter könnte dabei die Gasdiffusionslage spielen. Aber auch ein Einfluss der Membranhydratation (bspw. unzureichende Abfuhr des Reaktionswassers) wäre denkbar. Trotz der im Vergleich zum Referenzsystem etwas niedrigere Zelleistung konnten die geforderte leistungsspezifische Zielgröße von 25 W/Zelle erreicht werden, was für die verwendete Membran-Elektroden-Einheit (MEA) gute Messergebnisse darstellt. Das entwickelte 80/20 PP Compound in Verbindung mit spritzgeprägten Bipolarplatten ist für den Einsatz in PEM-Brennstoffzellen uneingeschränkt geeignet.

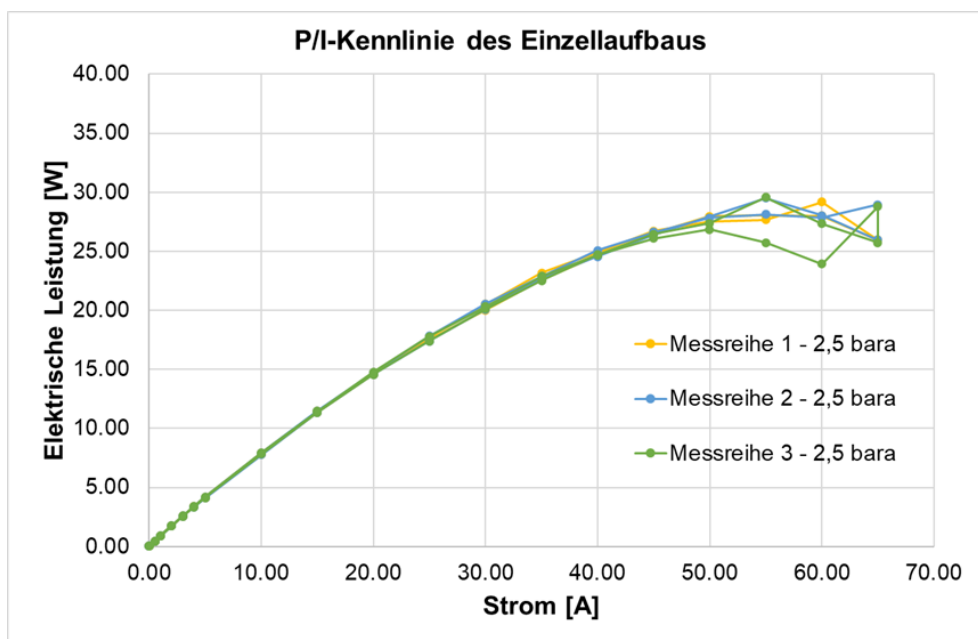


Abbildung 47: P/I-Kennlinie des 80/20 PP Compounds für 3 Messreihen

Materialanalyse der Bipolarplatten nach dem Einsatz auf Betriebseinflüsse und Lebensdauerprognose (AP6.5)

Zur Untersuchung der Schädigungsmechanismen der Bipolarplatten nach dem Einsatz auf Betriebseinflüsse wurden verschiedene potenzielle Schädigungsmechanismen wie Korrosion, Verschleiß, Materialermüdung, chemische Degradation und thermische Einflüsse analysiert. Der Fokus lag dabei auf der Bruchproblematik der getesteten Platten.

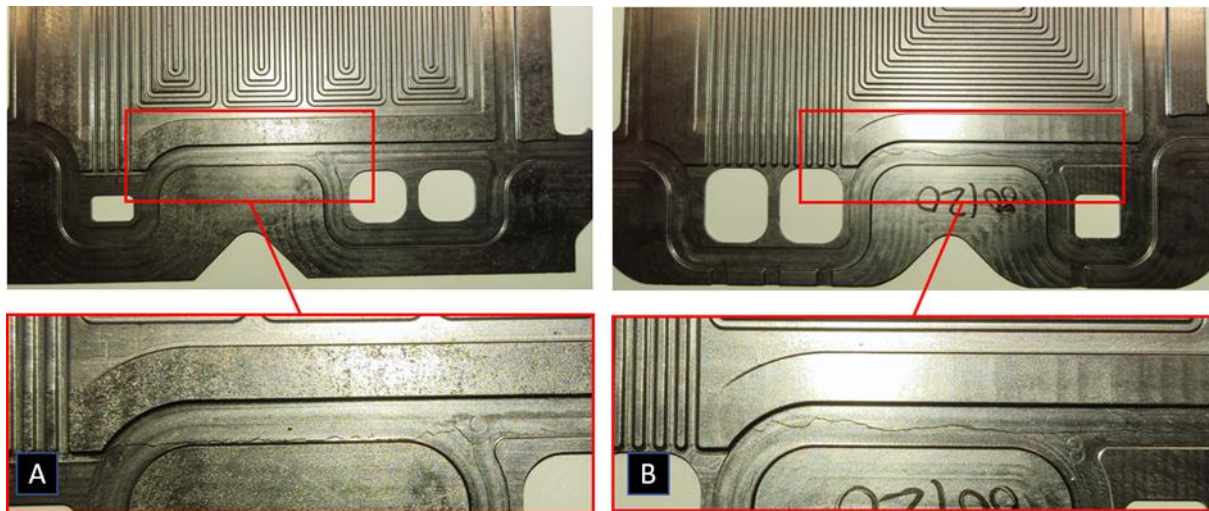


Abbildung 48: Risse in Dichtungsnut von Anode (A) und Kathode (B)

Die getesteten Platten sind aus glatten Platten gefräste 80/20 Graphit/PP aus CCC1. Die Platten wurden verbaut und nach dem Break-in im Einzelzeller wieder ausgebaut. Dh. sie waren mind. 12h in Betrieb, siehe AP 6.2. Beim Ausbau der ersten Charge sind die Platten gebrochen (siehe Abbildung 48). Es konnte nicht eindeutig geklärt werden, ob diese Brüche während des Betriebs oder auch beim Ein- und Ausbau durch Spannungsspitzen im Dichtgrund, Verspannungen, Druckdifferenzen oder Temperatureinflüsse verursacht wurden. Um die Belastung der Platten zu reduzieren, wurden verschiedene Änderungen eingeleitet. Eine zentrale Maßnahme war die Anpassung der Geometrie durch den Einsatz dickerer Platten, um die mechanische Belastung zu verringern. Ergänzend dazu wurde die Dichtungshöhe optimiert und dickere Gasdiffusionslagen verwendet. Diese sollten helfen, Spannungsspitzen im Dichtbereich zu minimieren und so die Stabilität der Platten zu erhöhen. Die optimierten Platten sind dicht und bruchfrei geblieben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Optimierungsmaßnahmen ausreichend waren und, dass keine weiteren Anpassungen erforderlich waren.

2.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben der Projektmittel zu den einzelnen Positionen entsprachen im Wesentlichen dem Finanzierungsplan des Projekts. Die Mittel wurden sparsam, wirtschaftlich und im Sinne des Projekts zielführend zur Durchführung der Forschungsarbeiten entsprechend der einzelnen Arbeitspakete eingesetzt. Die Projektmittel wurden dabei zeitnah abgerufen und verwendet.

Die folgende Übersicht beinhaltet die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.

Partner		Personalausgaben (0812 – 0822)	Sachliche Verwaltungsausgaben (ohne 0835)	Vergabe von Aufträgen (0835)	Gegenstände und andere Investitionen (0850)
TU Chemnitz – SLK + ALF	beantragt:	136.081,95	56.709,40	87.465,-	0
	abgerechnet:	136.081,01	56.709,40	87.465,-	0

Weitere Ausführungen sind dem zahlenmäßigen Nachweis zu entnehmen.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wegen der Komplexität, der grundlegenden Vielfältigkeit und des hohen wissenschaftlichen Anspruchs konnte die Finanzierung des Projekts nicht aus der Grundfinanzierung der TU Chemnitz durch das Land Sachsen erfolgen. Die Bereitstellung von Fördermitteln durch den Bund war die notwendige Grundlage für die erfolgreiche Durchführung des Forschungsprojekts.

Das Vorhaben fokussierte auf die speziellen Bedürfnisse und Forderungen des regionalen Mittelstands, insbesondere der kunststoffverarbeitenden Industrie, sowie der Notwendigkeit eine Basis für die großserienfähige Herstelltechnologie compoundbasierter Bipolarplatten für deren Anwendung in PEM-WasserstoffBrennstoffzellen zu entwickeln. Die geleistete Arbeit ist aufgrund der betrachteten Vielfältigkeit und der erreichten Ergebnisse als überdurchschnittlich und angemessen zu bewerten.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen und insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Wissenschaftler der TU Chemnitz haben entlang der gesamten Wertschöpfungskette des hergestellten Einzelzellers mit graphitischen Bipolarplatten weiterführenden Forschungsbedarf aufgezeigt und leistungsfähige Partnerschaften und Netzwerke aufgebaut. Insbesondere der ganzheitliche Charakter des Projektes, welcher alle Stufen der Brennstoffzellenauslegung und -herstellung betrachtete, hat eine signifikante Ausweitung der potentiellen Forschungsfelder ermöglicht. Auf Basis des erarbeiteten Know-hows können neue Forschungs- und Entwicklungsprojekte initiiert und Know-how transferiert werden.

Alle Projektpartner konnten von den Erkenntnissen aus dem Projekt partizipieren. Es konnten alle Partner weitere Kompetenzen sowie Wissen in ihrem Gebiet aufbauen und können somit einen Vorsprung gegenüber der Konkurrenz erweitern. Zudem sind die dokumentierten Erkenntnisse aus dem Projekt für alle Projektpartner zugreifbar

2.4 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit, ist für die relevanten Teilarbeitspakete der TU Chemnitz kein Fortschritt bei anderen Stellen bekanntgeworden. Die Ergebnisse sind im Vergleich zu anderen öffentlich zugänglichen Stellen als sehr gut zu bewerten und mindestens von vergleichbarer Qualität.

2.5 Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen erfolgten bereits während der Projektlaufzeit:

Datum	Veröffentlichung	Art der Veröffentlichung
28.06.2022	Wiesehütter M.: HZwo-SmartBipolar - Entwicklung und Charakterisierung von Polymer/Graphit-Bipolarplatten mittels eigens zu entwickelnden Spritzprägeprozesses; SmartERZ Bündnistreffen, Annaberg-Buchholz	Vortrag
06.07.2023	Gnüchtel S.: HZwo-SmartBipolar - Entwicklung und Charakterisierung von Polymer/Graphit-Bipolarplatten mittels eigens zu entwickelnden Spritzprägeprozesses; SmartERZ Bündnistreffen, Annaberg-Buchholz	Vortrag
25.- 26.10.2023	Emmrich J.; Strobelt M., Barth Eric, Sten Richter, Lothar Kroll, Nico Keller, Phillip Hübner, René Schmiedel, Thomas v. Unwerth, Sebastian Gnüchtel, Steffen Scholtz,	Ausstellung

	Andreas Ebert, Michael Wiesehütter: HZwo – SmartBiPolar, Clean Hydrogen Convention, Dresden	
11.06.2024	Emmrich J.; Barth Eric, Sten Richter, Lothar Kroll, Nico Keller, Phillip Hübner, René Schmiedel, Thomas v. Unwerth, Sebastian Gnüchtel, Steffen Scholtz, Andreas Ebert, Michael Wiesehütter: HZwo – SmartBiPolar, HZwo Projektkolloquium, Chemnitz	Vortrag
13.06.2024	Gnüchtel S.: HZwo-SmartBipolar - Entwicklung und Charakterisierung von Polymer/Graphit-Bipolarplatten mittels eigens zu entwickelnden Spritzprägeprozesses; SmartERZ Bündnistreffen, Annaberg-Buchholz	Vortrag
13.06.2024	Emmrich J. Barth Eric, Sten Richter, Lothar Kroll, Nico Keller, Phillip Hübner, René Schmiedel, Thomas v. Unwerth, Sebastian Gnüchtel, Steffen Scholtz, Andreas Ebert, Michael Wiesehütter.: HZwo-SmartBipolar; SmartERZ Bündnistreffen, Annaberg-Buchholz	Ausstellung
12.- 16.10.2024	Emmrich J. Barth Eric, Sten Richter, Lothar Kroll, Nico Keller, Phillip Hübner, René Schmiedel, Thomas v. Unwerth, Sebastian Gnüchtel, Steffen Scholtz, Andreas Ebert, Michael Wiesehütter.: HZwo-SmartBipolar; Fakuma, Friedrichshafen	Ausstellung
13.11.2024	Richter S., Emmrich J. Barth E., Keller N., Schaarschmidt P.: Herausforderungen bei der Herstellung von graphitischen Bipolarhalbplatten im Spritzprägeprozess für die Anwendung im PEM FC; FC3 Fuel Cell Conference, Chemnitz	Vortrag

Literaturverzeichnis

AOP19	Alo, O. A.; Otunniyi, I. O.; Pienaar, H.: Manufacturing methods for metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell. <i>Materials and Manufacturing Processes</i> , vol. 34, no. 8, pp. 927–955, 2019
BGM+20	Brokamp, S.; Grundler, M.; Majewski, M.; Firat, E.; Beckhaus, P.: igPPSBip - Großformatige, dünnwandige, vollstrukturierte und kostengünstige spritzgegossene Bipolarplatten aus PPS für die Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle. Abschlussbericht zum BMWi 03ET6068A, 2020
Bir18	Birkholz, A.: Erweiterte Materialmodellierung zur Spritzgießsimulation unter Berücksichtigung zulässiger Schmelzebeanspruchung hochgefüllter Thermoplaste. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2018
Dör12	Dörner, J.: Spritzgießen elektrisch leitfähiger Thermoplaste – Prozesstechnik und Modellbildung. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2012
HTS19	Hassan, N. U.; Tunaboynu, B.; Soydan, A. M.: A Competitive Design and Material Consideration for Fabrication of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Bipolar Plates. <i>Designs</i> 2019, 3, 13
[HCS05]	Hermann, A.; Chaudhuri, T.; Spagnol, P.: Bipolar plates for PEM fuel cells. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> 30, 2005, p.p. 1297 - 1302
IGF15_1	IGF-Forschungsvorhaben 498 ZN: Kontinuierliches Fertigungskonzept zur Herstellung großflächiger Compound-Bipolarplatten. 2015
IGF15_2	IGF-Forschungsvorhaben 455 ZN: Verfahrensentwicklung eines variothermen Spritzgießprozesses zur Herstellung großdimensionierter Bipolarplatten für den Einsatz in reformatgespeisten Hochtemperatur PEM-Brennstoffzellen mit einer Nennleistung von mindestens 2 kWel. für KWK Anwendungen. 2015
[Lan16]	Langemann, M.: Bipolar Plate Materials for Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2016
Kai08	Kaiser, R.: Bipolarplatten für Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen aus thermisch und elektrisch hochleitfähigen thermoplastischen Kunststoffen: Rezeptierung, Herstellung, Charakterisierung und Anwendung. Dissertation, 2008
Kre08	Kreuz, C.: PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound. Dissertation, Universität Duisburg Essen, 2008
KR13	Kiraly, A.; Ronkay, F.: Developing bipolar plates for fuel cells.. <i>Plastics Research Online</i> , 1-3 (2013), doi: 10.2417/spepro.004938
[MOW20]	Melideo, D.; Ortiz Cebolla, R.; Weidner, E.: Life Cycle Assessment of Hydrogen and Fuel Cell Technologies. European Commission JRC Technical Report, 2020
PYL14	Peng, L.; Yi, P.; Lai, X.: Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , vol. 39, no. 36, pp. 21127–21153, 2014.
Tah14	Taherian, R.: A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. <i>Journal of Power Sources</i> Vol. 265, 2014, pp. 370 – 390