



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2025

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 01IF22342N / 22342 N

Faserverstärkte Compound-Folien-Bipolarplatten für kompakte Leichtbau-Brennstoffzellen

Laufzeit:

01.07.2022 - 30.06.2025

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH,
Duisburg

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Technische Universität Kaiserslautern

Schlussbericht vom 30.11.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF22342N

Thema

Faserverstärkte Compound-Folien-Bipolarplatten für kompakte Leichtbau-Brennstoffzellen

Berichtszeitraum

01.07.2022 - 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V.
Bliersheimer Str. 58 - 60
47229 Duisburg

Forschungseinrichtung(en)

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH (ZBT)
Carl-Benz-Str. 201
47057 Duisburg

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW)
Erwin-Schrödinger-Straße 58
67663 Kaiserslautern

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Herstellung Compoundfolien (ZBT)	3
1.2	Arbeitspaket 2: Herstellung faserverstärkter Folien (IVW)	4
1.3	Arbeitspaket 3: Charakterisierung (ZBT/IVW)	9
1.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung Folien-Brennstoffzelle (ZBT/IVW)	21
1.5	Arbeitspaket 5: Entwicklung Umformprozess Bipolarplatte (IVW)	33
1.6	Arbeitspaket 6: Brennstoffzellentest (ZBT, IVW)	38
2	Verwendung der Zuwendung	52
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	53
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	53
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft	53
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	54
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	56

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die folgende Projektbeschreibung ist entsprechend der Reihenfolge der Arbeitspakete strukturiert. Daher kann es zu nichtlinearen Übergängen zwischen den Inhalten kommen. Verweise auf frühere oder zukünftige Aspekte werden jedoch gegeben, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen.

1.1 Arbeitspaket 1: Herstellung Compoundfolien (ZBT)

Für die Herstellung der dünnwandigen Compound Bipolarplatten (BPP) werden am ZBT zunächst hochgefüllte Graphit-Polymer-Compounds am Doppelschnecken- bzw. Ringextruder hergestellt. Diese Compounds werden anschließend in einer Mühle zu einem homogenen Granulat ($< 4\text{ mm}$) weiterverarbeitet. Das Compound-Granulat kann dann in einen Einschneckenextruder als Basis der Folienextrusionslinie des ZBT überführt werden. Dort schmilzt das Compound erneut auf und gelangt durch eine Breitschlitzdüse (Breite: 250 mm) mit variablem Spaltmaß zum Kalandrierer. Das Spaltmaß des Kalandriers kann variiert werden und ermöglicht in Abhängigkeit des Füllstoffanteils, der Viskosität und des Massedurchsatzes bei den hier verwendeten hochgefüllten Compounds eine minimale Dicke der Folien von knapp unter $400\text{ }\mu\text{m}$, wobei die beiden Kalandrierwalzen gleichzeitig die Oberflächen der Compoundfolie glätten. Die Produktionsanlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

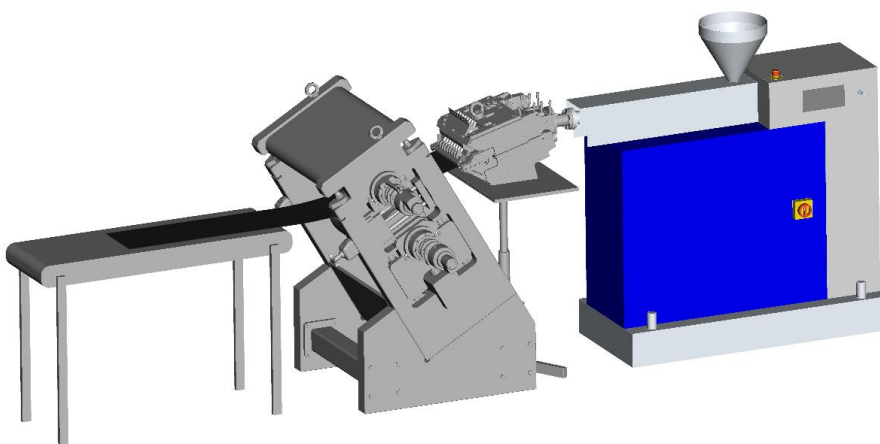


Abbildung 1: Skizze der Folienproduktionsanlage mit Kalandrierer, Breitschlitzdüse und Einschneckenextruder (links), sowie austretende Compoundfolie nach Durchlaufen des Kalandriers

Da die Breitschlitzdüse für einen relativ engen Viskositätsbereich ausgelegt und simuliert wurde, lassen sich nur Materialien in der Nähe des Viskositätsfensters homogen über die Breitschlitzdüse verarbeiten. Eine weitere Problemstellung des Verfahrens ist, dass nicht alle Polymere für das Kalandrieren zu Folien geeignet sind. Selbst innerhalb einer Polymertypen (bspw. Polypropylen (PP)) gibt es enorme Unterschiede hinsichtlich Viskosität, Elastizität, E-Modul, etc., so dass die Auswahl stark begrenzt ist. Nachfolgende Abbildung 2 stellt eine optimal aus der Breitschlitzdüse tretende Schmelze mit inhomogenen Schmelzeaustritten gegenüber.

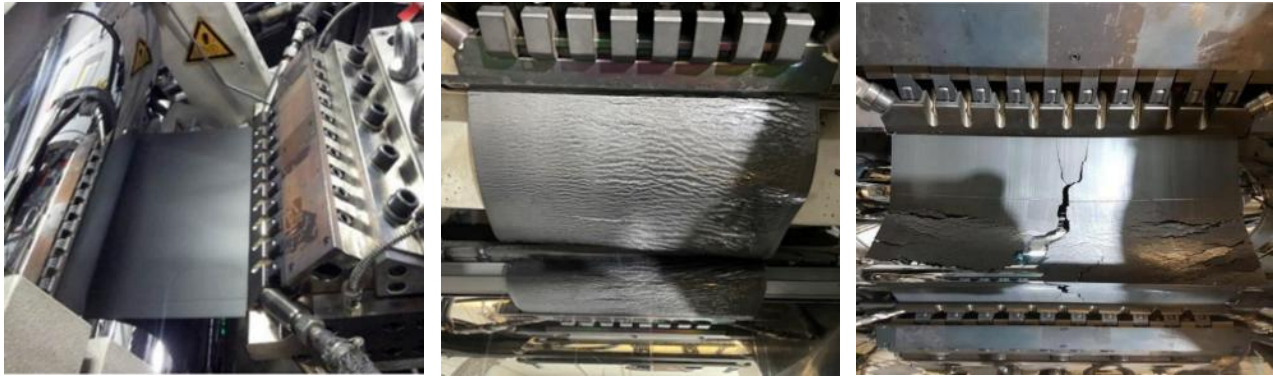


Abbildung 2: Verschiedene Qualitäten des Schmelzeaustritts aus der Breitschlitzdüse. Perfekter Düsenaustritt (links); inhomogener Düsenaustritt durch falsche Wahl des Polymers (mittig); zu hoher Füllgrad und damit zu hohe Viskosität (rechts)

Mittels des zuvor beschriebenen Produktionsverfahrens wurden im ersten Schritt vier verschiedene Compoundmaterialien zu Folien verarbeitet (Tabelle 1). Diese Musterfolien wurden an den Projektpartner IVW verschickt, um erste Charakterisierungsmethoden/-verfahren an den hochgefüllten Folien zu erproben. Die dazu zur Verfügung gestellten Folien unterscheiden sich hinsichtlich des Matrixpolymers, des Gesamtfüllstoffanteils und der Dicke, sodass am IVW die Eignung der Fasereinbringung erprobt werden konnte.

Tabelle 1: Materialzusammensetzung und Dicke der extrudierten Compoundfolien

Pos.	Füllstoffanteil	Dicke
1	77 Gew% in PP1	0,72 mm
2	72 Gew% in PP2	0,52 mm
3	73 Gew% in PP3	0,76 mm
4	70 Gew% in PP3	0,37 mm

1.2 Arbeitspaket 2: Herstellung faserverstärkter Folien (IVW)

Zur Herstellung von ultradünnwandigen faserverstärkten BPP wurden textile Halbzeuge – also die Applikation von Fasern auf eine Compoundfolie – mittels eines variothermen Pressprozesses gefertigt (Abbildung 3). Hierbei wurde ein Imprägnierdruck von bis zu 76 bar und Temperaturen bis zu 220 °C eingestellt.

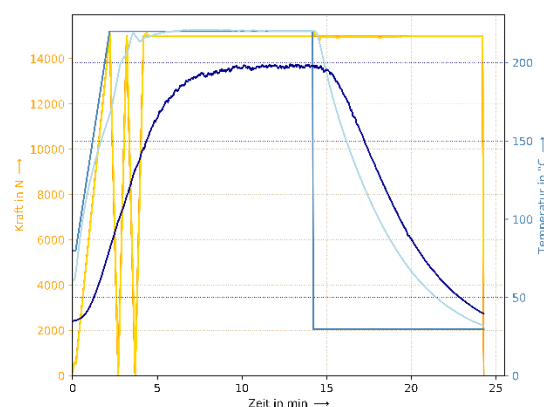


Abbildung 3: Variothermer Pressprozess (links) Beispielhafte Prozessparameter jeweils mit eingestellt und gemessenem Druck bzw. Temperatur (rechts)

Im Rahmen des Versuchsplans wurden verschiedene Faktoren variiert, um deren Einfluss auf die Material- und Festigkeitseigenschaften zu untersuchen (vgl. Abbildung 4). Zu den untersuchten Parametern gehörten:

- **Faserart und Platzierung:** Einsatz von gespreizten unidirektionalen (UD)-Fasern und UD-Prepreg, deren Position im Stackaufbau und innerhalb der Ebenen sowie mit bzw. ohne Bepulverung.
- **Fasertyp, Faserlängen und Gewichtsanteil:** Verwendung von unbehandelten und pyrolysierten Kurzfasern in Längen von 5, 10 und 20 mm in den Gewichtsanteilen 5, 15, 30 Gew%.
- **Prozessbedingungen:** Variation von Trennmitteln und Trennfolien, Anpassung der Haltezeiten und Prozessdrücke sowie die Untersuchung unterschiedlicher Reinigungsverfahren und Reinigungsmittel.
- **Optimierung der Maßhaltigkeit der Presslinge:** Untersuchung der Laserschneidung als Nebenuntersuchung zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit

Diese systematische Analyse zeigt, dass der lokale Einsatz von UD-Prepreg-Tape die beste mechanische Anbindung und Verstärkung gewährleistet. Gleichzeitig sorgt die gezielte Platzierung dafür, dass der elektrische Widerstand niedrig bleibt, da das Grundmaterial in den übrigen Bereichen ungestört ist. Eine Beispielrechnung aus einer Parallelschaltung von perfektem Isolator und einem Bipolarplattenwiderstand zeigt:

- $R_1 = \infty$ (perfekter Isolator)
- $R_2 = 0,020 \Omega$

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{0,02 \Omega} = 0 + 50 \Omega^{-1} \Rightarrow R_{ges} = \frac{1}{50 \Omega} = 0,02 \Omega$$

Dies gilt nur als Vereinfachung für den Fall des ohmschen Gesetzes. Widerstandsänderungen infolge höherer Stromdichte und der daraus entstehenden Jouleschen Wärme führen zu einer erhöhten Verlustleistung.

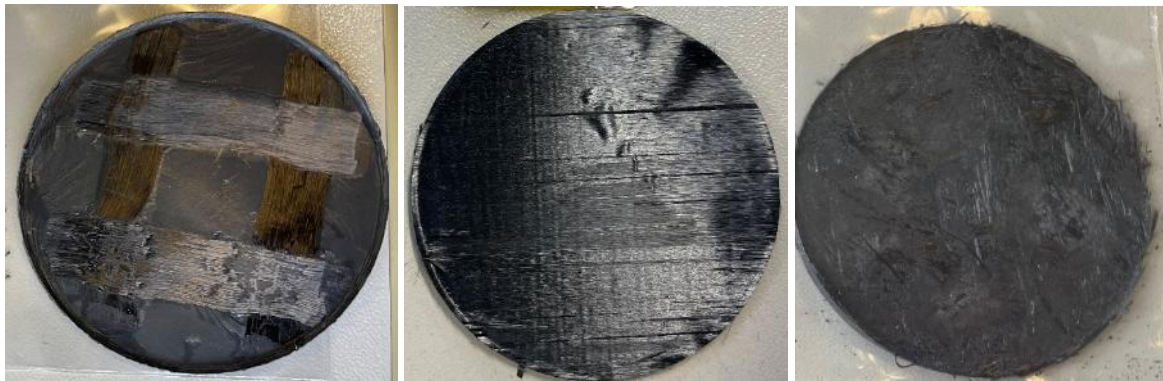


Abbildung 4: Verschiedene textile Verstärkungen auf einer Rundprobe: UD-PP-CF66-Tape (links), gespreizte C-Fasern (mitte), Langfaserverstärkung (rechts)

Herstellung der faserverstärkten Rundproben Version 1:

Zunächst wurden seitens IVW Rundproben mit Faserverstärkung bereitgestellt. Diese unterscheiden sich in der Anordnung der Fasern und dem Matrixmaterial. Die Proben P1 - P4 wurden aus dem Folien-Matrixmaterial 70 Gew% in PP3 hergestellt, wohingegen für die restlichen Proben Compoundpulver verwendet wurde. In nachfolgender Tabelle 2 sind die jeweiligen Proben detailliert beschrieben.

Tabelle 2: Herstellparameter der faserverstärkten Rundproben / Version 1

Probe	Beschreibung
P1	2 Lagen pro Seite mit gespreizten C-Fasern, die auf PI-Folie fixiert wurden. Beim Trennen der PI-Folie sind C-Fasern abgezogen worden. Die Verstärkungslagen sind um 90Grad verdreht. Das Folienmaterial ist Mat4 G-R-PP4 30 %
P2	1 Lage pro Seite mit gespreizten C-Fasern, die auf PI-Folie fixiert wurden. Beim Trennen der PI-Folie sind C-Fasern abgezogen worden. Die Verstärkungslagen sind um 90Grad (vor der zu Rückseite) verdreht → Krümmung der Probe. Das Folienmaterial ist Mat4 G-R-PP4 30%
P3	#-Lagenmuster von ursprünglich 5 mm breiten Tafnex-Prepreg (CF-PP, Dicke 0,16 mm) → Durch Pressprozess sind die Prepreglagen dünner und breiter geworden. Das Folienmaterial ist Mat4 G-R-PP4 30 % Die Probe ist ungeschliffen und wurde mit PTFE-Trenngewebe gegenüber dem Werkzeug geschützt
P4	#-Lagenmuster von ursprünglich 5 mm breiten Tafnex-Prepreg (CF-PP, Dicke 0,16 mm) → Durch Pressprozess sind die Prepreglagen dünner und breiter geworden. Das Folienmaterial ist Mat4 G-R-PP4 30 % Die Probe ist ungeschliffen und wurde mit PI-Trenngewebe gegenüber dem Werkzeug geschützt
P4-1	#-Lagenmuster von ursprünglich 5 mm breiten Tafnex-Prepreg (CF-PP, Dicke 0,16 mm) → Durch Pressprozess sind die Prepreglagen dünner und breiter geworden. Das Folienmaterial ist Mat4 G-R-PP4 30 % Die Probe ist angeschliffen und wurde mit PI-Trenngewebe gegenüber dem Werkzeug geschützt
P5	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 5 Gew% c-Fasern ohne Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P5-1	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 15w% C-Fasern ohne Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P5-2	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 30 Gew% C-Fasern ohne Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P6	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 5 Gew% C-Fasern mit Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P6-1	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 15 Gew% C-Fasern mit Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P6-2	Pulver aus Antragsvorversuchen 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) + 30 Gew% C-Fasern mit Schlichte, geschnitten in ca. 10 mm Länge PTFE-Trennfolie
P7	Referenzmaterial 100 % Pulver ohne Zusätze Pulver ist 75 Gew% Graph. in PP (ZBT) PTFE-Trennfolie

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- PTFE-Folie sehr gut zum Trennen geeignet
- Geringe Imprägnierung der Fasern bei Bepulverung der gespreizten Fasern
- Entschlichtung verschlechtert das Handling

- Bepulverte, kurzfaserverstärkte Probekörper zeigen eine schwache Kohäsion und erfordern einen hohen Fertigungsaufwand.
- Makroskopisch ist zu erkennen, dass trockene Fasern (Kurzfasern oder in gespreizter Form) nicht komplett in die Polymermatrix eingebettet sind, da das imprägnierende Polymer unzureichend vorhanden ist (Abbildung 5).
- Lokaler Einsatz von UD-CF-PP-Tape ist wegen guter Anbindung der Favorit

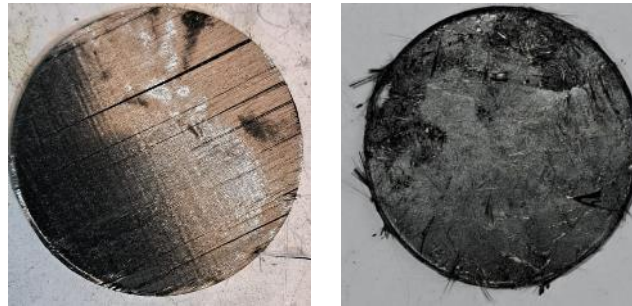


Abbildung 5: Faserverstärkte Rundproben P2 und P6-1

Im nächsten Schritt wurden die in Tabelle 2 beschriebenen unstrukturierten faserverstärkten Proben am ZBT hinsichtlich ihrer elektrischen Widerstände vermessen. Anschließend wurden die Proben mit Hilfe eines vorhandenen Prägestempels einseitig mit funktionellen Strukturen (Strömungsfeld, engl: Flowfield) versehen (Abbildung 6). Ziel der Prägeversuche war zunächst zu ermitteln, ob sich die faserverstärkten Folien umformen lassen.

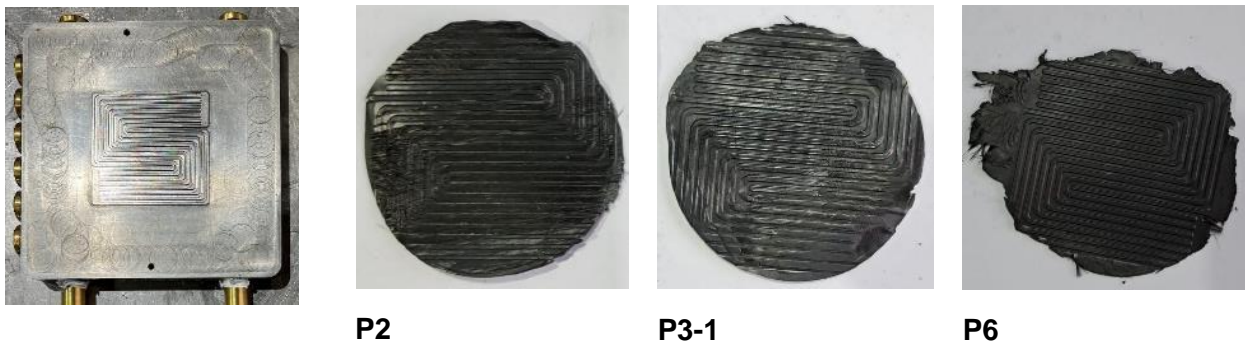


Abbildung 6: 50 mm x 50 mm Prägestempel und geprägte faserverstärkte Folien

In den Testversuchen konnten diverse Herausforderungen durch das Prägen identifiziert werden:

- Verkleben der Proben an der Form
- Entstehung von Rissen bzw. Löchern
- Verformung bzw. Verkrümmung der Proben
- Loslösen der Fasern

Durch Anpassung der Prägeparameter und das bessere Einarbeiten der Fasern konnten die meisten der zuvor genannten Probleme gelöst werden. So wurde bspw. das Anhaften der Probe am Prägestempel durch Reduzierung der Prägetemperatur und Reduzierung der Entformungstemperatur minimiert. Weiterhin wurde die Rissbildung durch Optimierung der Prägekraft behoben.

Auf eine Vermessung der elektrischen Widerstände wurde vorerst verzichtet, da Verzerrungen durch die anisotrope Faserverstärkung zu großen Unebenheiten der Proben führten. Mit Hilfe einer Druckmessfolie „Prescale“ wurden am ZBT internen elektrischen Widerstandsteststand (s. Seite 9) die Kontaktflächen zum Messpol überprüft. Der Abdruck einer solchen Druckmessfolie ist nachfolgend dargestellt (Abbildung 7).

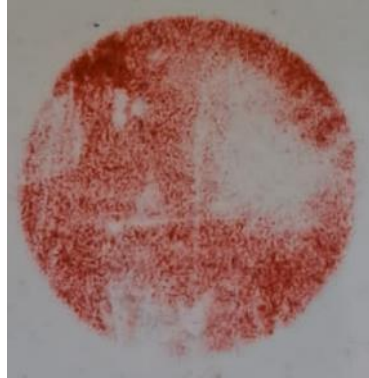


Abbildung 7: Abdruck einer Druckmessfolie zwischen faserverstärkter Probe und Druckstempel im elektrischen Widerstandsteststand

Deutlich zu erkennen ist, dass die Probe durch ihre Wölbungen nicht flächig Kontakt zum Messpol aufweist, so dass eine Auswertung der flächenspezifischen Durchgangswiderstände zu hohe Ungenauigkeiten zeigte.

Herstellung der faserverstärkten Rundproben Version 2:

Auf Basis der Erfahrungswerte, welche bei der Charakterisierung der faserverstärkten Rundproben der ersten Version gesammelt werden konnten, wurde ein weiterer Entwicklungszyklus zur Probenherstellung durchgeführt. Primär wurde versucht faserverstärkte Folien derart herzustellen, dass keine Fasern abstehen und die Proben eine möglichst plane Oberfläche aufweisen, so dass bei der Bestimmung der elektrischen Widerstände möglichst geringe Messungenauigkeiten entstehen. Die faserverstärkten Rundproben der Versuchsreihe 2 bestehen aus Folien des Materials mit 70 Gew% in PP3 und Kohlestofffasern, die in unterschiedlichen Orientierungen, Kombinationen und Verfahrensparametern eingearbeitet wurden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Herstellparameter der faserverstärkten Rundproben Version 2

Sample	Layer	Fiber type	Fiber size	Press parameters
1	● + ●	none	none	220°C & 15 kN
5	▢ + ● + ▢	CF-PP strip	2.5 mm wide	220°C & 15 kN
7	● + + ● +	CF-PP strip	2.5 mm wide	220°C & 15 kN
10	● + + ●	splayed C-fibers	whole area	220°C & 15 kN
13	■ + + ● + ■	splayed C-fibers	whole area	220°C & 15 kN
K1	● + + + ●	CF-PP strip	1.1 – 1.2 mm	220°C & 15 kN
K2	● + + + ●	CF-PP strip	1.5 – 1.6 mm	220°C & 15 kN
K3	● + + + ●	CF-PP strip	2.1 – 2.3 mm	220°C & 15 kN

● foil ▢ hashtag fiber pattern | line fiber pattern |||| splayed fiber ■ milled compound

Im Gegensatz zu den Proben der ersten Version sind die Oberflächen der zweiten Version frei von abstehenden Kohlefasern (Abbildung 8). Zudem konnte nachgewiesen werden, dass selbst sehr stark gespreizte, trockene Faserlagen mit einer minimalen Dicke von bis zu drei Kohlenstofffasern nicht mit dem Compoundmaterial der Bipolarfolien imprägnierbar sind. Die beiden Phasen liegen getrennt voneinander vor und bilden keinen lastübertragenden Verbund aus, wie in Abbildung 8 (rechts) ersichtlich. Die schlechte

Imprägnierbarkeit deckt sich mit Beobachtungen aus den Screening-Versuchen (s. Seite 5ff). Mangels Imprägnierbarkeit der Faserlagen mit Compoundmaterial musste somit ein vorimprägniertes Fasermaterial (mit Standard-PP-Matrix) herangezogen werden. Der Wechsel des Matrixmaterials für die Faserverstärkung führt zu dem Schluss, dass das Material der Bipolarfolien und die Faserverstärkung nicht elektrisch in Reihe liegen dürfen, da die Faserverstärkung mit der herkömmlichen PP-Matrix ohne Graphit- und Ruß-Partikel eine elektrisch isolierende Schicht bildet. Faserverstärkung und Compoundmaterial müssen daher parallel angeordnet werden, damit der Strom über das Compound-Material fließen kann. Hierdurch ist der lokale Einsatz matrixreicher Prepregs sinnvoll. Ein vielversprechendes Probendesign mit minimalem Probenverzug und optimalen mechanischen sowie elektrischen Eigenschaften ist daher die Kreuzverstärkung (K1 – K3).

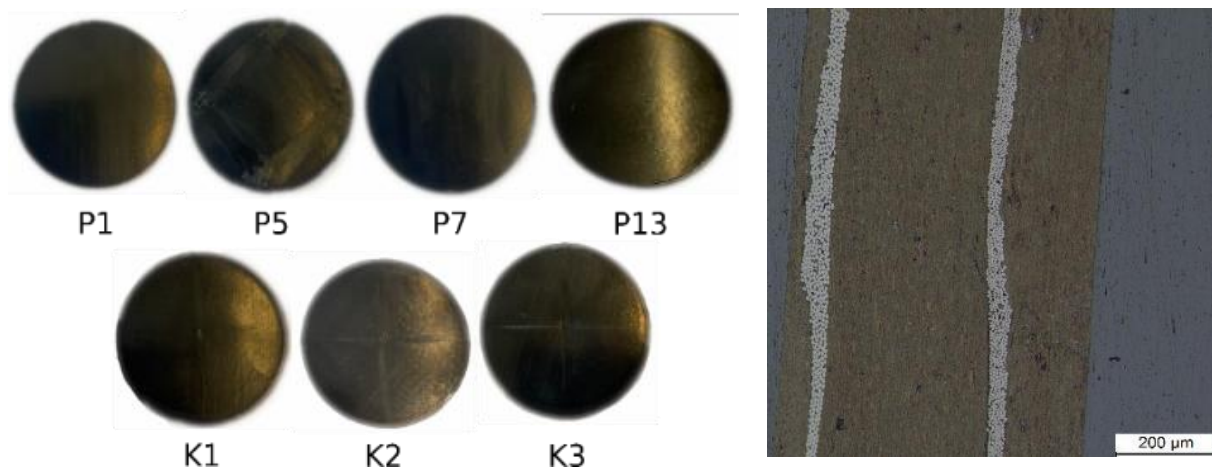


Abbildung 8: Faserverstärkte Rundproben Version 2 (links); Querschnittsansicht (rechts)

Mit den so entwickelten Proben konnten am IVW und ZBT weiterführende Untersuchungen (elektrische Leitfähigkeit, Wasserstoffpermeation, mechanische Stabilität) durchgeführt werden.

1.3 Arbeitspaket 3: Charakterisierung (ZBT/IVW)

Charakterisierung unstrukturierter Folien

Elektrische Charakterisierung

Zunächst wurden die in Tabelle 1 dargestellten unstrukturierten und nicht mit Fasern versehenen Folien am ZBT hinsichtlich ihrer elektrischen Durchgangswiderstände charakterisiert. Zur Vermessung der Durchgangswiderstände wurde ein eigens aufgebauter Widerstandsteststand verwendet. Mit Hilfe des Teststands ist es möglich, die flächenspezifischen Durchgangswiderstände zellrealistisch zu vermessen (Abbildung 9).

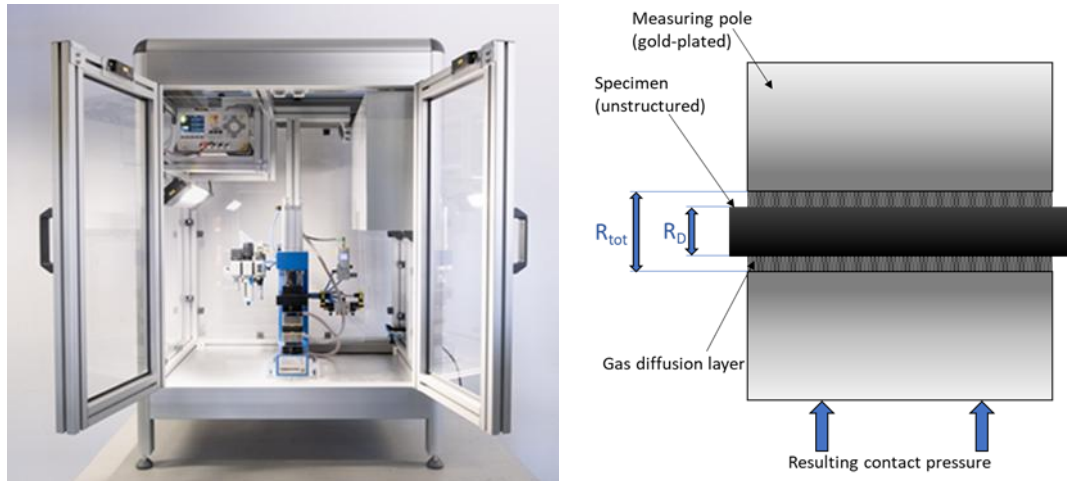


Abbildung 9: Widerstandsteststand "BePPel" mit schematischem Messprinzip

Sogenannte Gasdiffusionsfilme (GDLs) werden auf vergoldete Messpole bestehend aus Kupfer montiert, die die Kontaktierung zur Probe verbessern. Sobald die Probe eingelegt wird, können verschiedene Anpressdrücke vorgegeben werden bei denen die Probe hinsichtlich ihrer Widerstände charakterisiert wird. Dazu werden verschiedene Stromstärken durch die Probe geschickt und der resultierende Spannungsabfall über die Messpole gemessen. Nach Abzug des zuvor bestimmten Eigenwiderstands des GDL-Paares wird der flächenspezifische Durchgangswiderstand berechnet. Die erhaltenen elektrischen Widerstände der unstrukturierten Probenkörper sind in Abbildung 10 dargestellt.

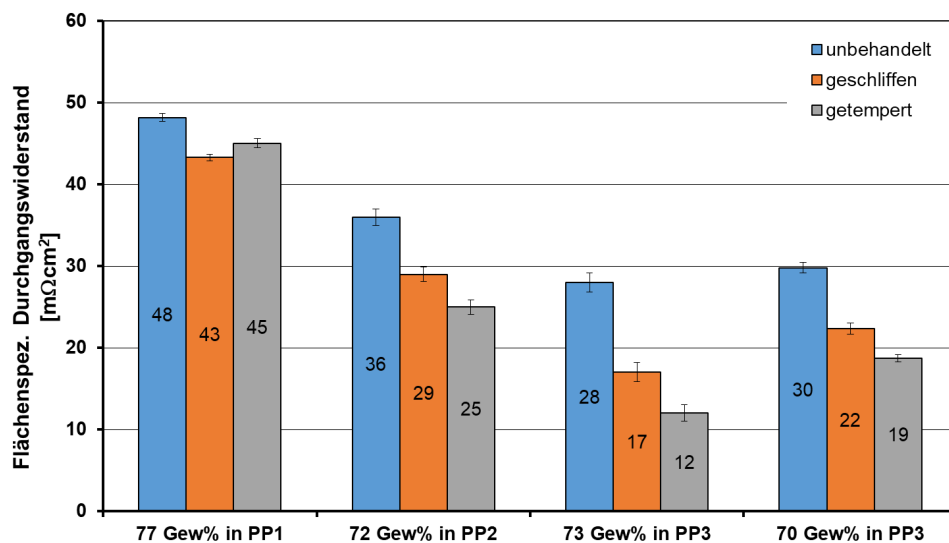


Abbildung 10: Flächenspezifische Durchgangswiderstände an flachen Probenkörpern bei 20 bar Anpressdruck

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht einzig der Gesamtfüllgrad zu geringen Widerständen führt. Das Material mit 77 Gew% Füllstoffgehalt weist in dem Vergleich den höchsten flächenspezifischen Durchgangswiderstand auf. Dieser Fakt ist durch zwei Faktoren zu erklären. Zum einen weist dieses Material den geringsten Rußgehalt bei gleichzeitig dem höchsten Graphitgehalt auf. Leitruß, der hier verwendet wurde, führt bei gleichem Anteil zu wesentlich geringeren Widerständen als Graphit. Zum anderen wurde hier ein thermoplastisches Polyolefin (PP1) verwendet, was eine geringere Kristallinität aufweist. Eine höhere Kristallinität führt bei gefüllten Polymeren dazu, dass die Füllstoffe aus den kristallinen Bereichen verdrängt und somit mehr durchgängige elektrische Leitpfade ausgebildet werden. Die geringere Kristallinität bei PP2 erklärt, weswegen das

mit 72 Gew% beaufschlagte Polymer PP2 schlechter elektrisch leitfähig ist als das im Vergleich dazu tiefer gefüllte 70 Gew% in PP3, wobei die Füllstoffverhältnisse von Graphit zu Ruß nahezu identisch sind. Zudem zeigt sich, dass sich die elektrischen Widerstände durch ein Schleifen der Oberflächen verringern lassen, da die polymerreiche Oberfläche abgetragen und die leitfähigen Füllstoffe freigelegt werden. Eine weitere Verringerung des Durchgangswiderstands wird durch das Tempern erreicht. Das Tempern auf Temperaturen knapp unter der Schmelztemperatur des Kunststoffs führt zu höherer Kristallinität, was, wie bereits weiter oben erwähnt, die Füllstoffe aus den kristallinen Bereichen verdrängt und die Wahrscheinlichkeit zur Ausbildung von elektrischen Leitpfaden begünstigt.

Für die Charakterisierung der unstrukturierten faserverstärkten Proben wurden zwei Folien ohne Kohlefasern zusammengepresst/ „verschweißt“ um als Referenz zu dienen. Diese ist als Sample 1 deklariert. Nach der Herstellung der in Tabelle 3 gelisteten Proben wurden diese am druckabhängigen Widerstandsteststand elektrisch charakterisiert. Abbildung 11 stellt die gemessenen Widerstände der Proben vergleichend gegenüber.

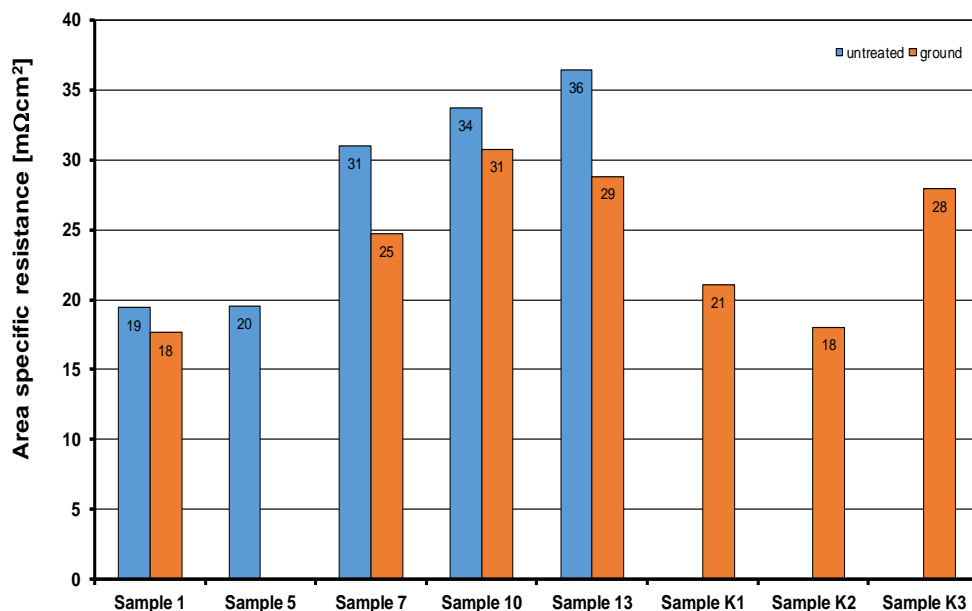


Abbildung 11: Flächenspezifische Durchgangswiderstände der unstrukturierten faserverstärkten Rundproben bei 20 bar Anpressdruck/ Version 2

Soweit möglich, wurden die Proben zunächst unbehandelt vermessen, anschließend geschliffen, um die polymere Randschicht zu entfernen und den Kontaktwiderstand zu verringern, und erneut vermessen. Die Probe 5 konnte nur im unbehandelten Zustand gemessen werden, da sich nach dem Schleifen Fasern von der Oberfläche lösten. Da die Proben K1 - K3 eine weiterhin eine Wölbung aufwiesen, wurden diese zunächst glattgeschliffen und nur in diesem Zustand vermessen. In nachfolgender Abbildung ist ein Abdruck mittels drucksensitivem Papier der Probe K2 zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass aufgrund der Wölbung nur der Randbereich und ein kleinerer Punkt in der Mitte kontaktiert wird und ein großer Bereich keinen – oder mit nur sehr geringer Anpresskraft – Kontakt zur Messtechnik erhält. Zudem ist die Fläche für den Stromfluss wesentlich geringer als bei komplett flächig kontaktierten Proben, was zu höheren Stromdichten und einer stärkeren Erwärmung und folglich zu einem im Vergleich höheren elektrischen Widerstand führt.

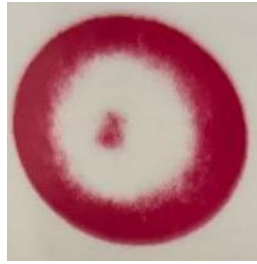


Abbildung 12: Abdruck mittels drucksensitiven Papiers an Probe K2

Ähnliches Verhalten zeigten auch Probe K1 und K3. Aufgrund der kreuzförmigen Einbringung der Fasern entsteht eine radiale Spannung ausgehend von der Probenmitte und führt zu einer konkaven Wölbung. Mittels nachträglicher Oberflächenbehandlung konnte eine ebene Oberfläche generiert werden. Die Probe K2 zeigt keine Steigerung der Widerstände gegenüber der Referenzprobe 1 und befürwortet damit den theoretischen Ansatz der parallelen Widerstandsanordnung (s. Seite 5).

Insgesamt lässt sich aus den in Abbildung 11 dargestellten Widerstände schließen, dass die Ausrichtung und Menge der Fasern einen erheblichen Einfluss auf die flächenspezifischen Durchgangswiderstände aufweisen. Mit der richtigen Anordnung der Fasern und der optimalen Fasergröße ist es möglich, die Widerstände niedrig und nahe der Referenzwerte unverstärkter Proben zu halten. Der Einfluss der Faserbreiten ist bei den Proben K1, K2 und K3 deutlich zu erkennen. Bei einer Erhöhung der Faserbreite zeigt sich ein tendenziell erhöhter elektrischer Widerstand im Materialverbund.

Wasserstoffpermeabilität

Die Through-plane-Permeationseigenschaften der Materialproben werden am ZBT durch einen eigens dafür entwickelten Teststand bestimmt (Abbildung 13).

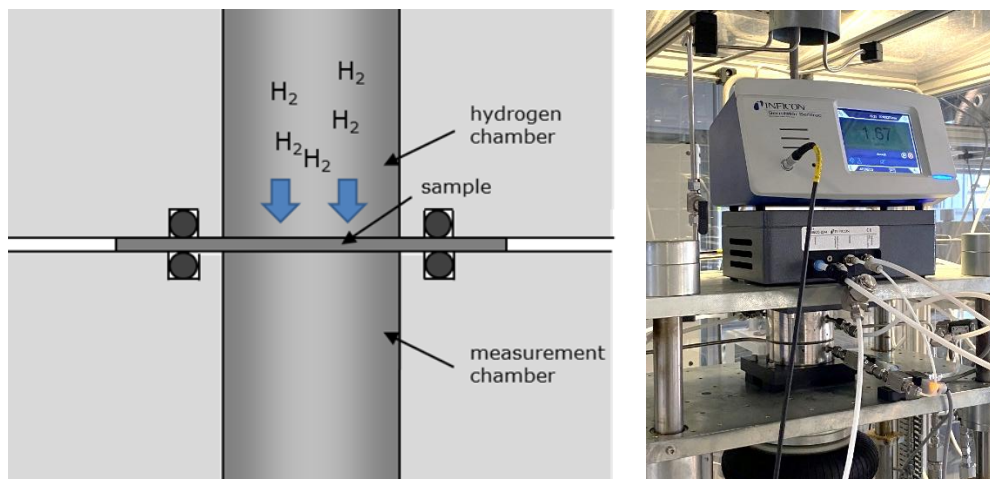


Abbildung 13: Aufbau der Permeationsmessung zur Bestimmung der Wasserstoffpermeation an flachen Proben

Eine Seite der Probe wird mit 100 % Wasserstoff bei einem relativen Druck von 1 bar beaufschlagt. Auf der anderen Seite der Probe befindet sich die Messkammer mit Luft atmosphärischen Drucks, in welche der Wasserstoff durch die Probe diffundieren kann. Beide Kammern sind nach außen mit Magnetventilen verschlossen und dichten gegenüber der Probe mit O-Ringen aus Fluorkautschukmischung (FKM). Nach vorher definierter Zeit wird eine Probe durch Öffnen der Magnetventile und Starten des Probennahmezyklus des an den Wasserstoffsensors angeschlossenen Probennahmegerätes AP29ECO genommen und mit einer Auflösung von 0,1 ppm Wasserstoff in Luft analysiert. Der Kalibrierpunkt wird bei 10 ppm definiert. Werte von $\pm 50\%$

um den Kalibrierpunkt liefern Genauigkeiten von $\pm 10\%$. Es werden so lange Proben mit unterschiedlichen Akkumulationszeiten genommen bis sich aus mindestens fünf Messpunkten eine stabile Leckagerate innerhalb der angegebenen Genauigkeiten bestimmen lässt.

Aus der gemessenen Konzentration, dem Volumen der Messkammer und der Messzeit wird die absolute Leckrate in $\text{mbar} \cdot \text{l/s}$ bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird diese Einheit umgerechnet in cm^3/s (flächen- und partialdruckspezifisch) und in Barrer ($10\text{E}-08 \text{ cm}^2/\text{s}$ zusätzlich dickenspezifisch). Der am ZBT definierte maximal zulässige Permeationskoeffizient für eine BPP beträgt $15\text{E}-08 \text{ cm}^2/\text{s}$.

In Abbildung 14 sind die Permeationskoeffizienten der ersten extrudierten Referenz-Folien aus Tabelle 1 (a), Ergebnisse aus unterschiedlichen Vorbehandlungen der Proben (b) sowie die Ergebnisse der faserverstärkten Folien (c) dargestellt. Weiterhin dient die Bewertungsskala ausgehend von Erfahrungswerten des ZBT für Compound-BPP zur Einordnung der Ergebnisse.

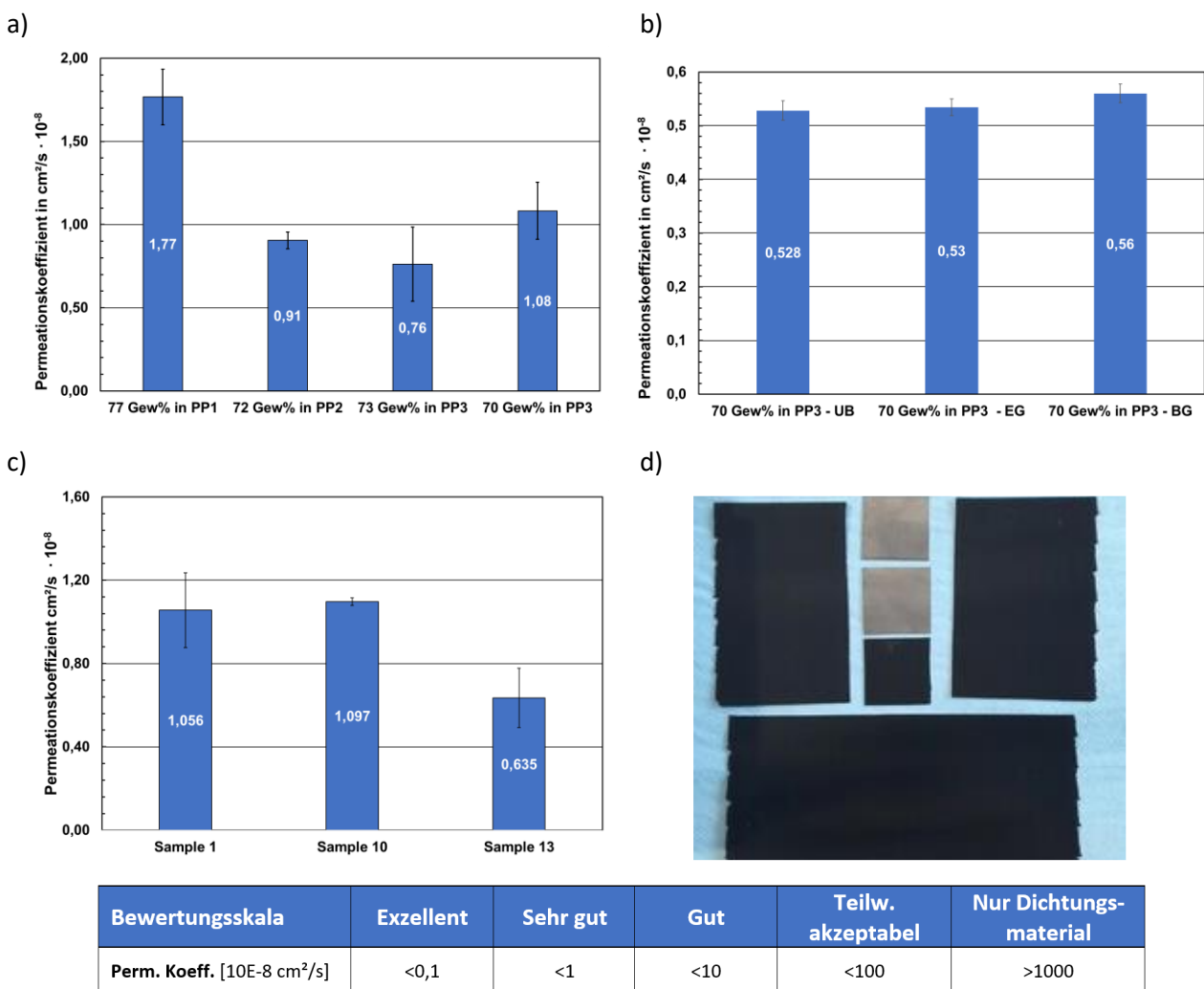


Abbildung 14: Permeationskoeffizienten an: a) unstrukturierten extrudierten Folien; b) unbehandelten (UB), einseitig (EG) und beidseitig (BG) geschliffenen Folien; c) unstrukturierten faserverstärkten Rundproben / Version 2; d) Probenvorbereitung

Um die Eignung der un- sowie faserverstärkten Proben als Bipolarplattenmaterial zu bestimmen, muss eine bestimmte Wasserstoffdichtigkeit erreicht werden. Analog zu den DoE-Vorgaben legt das ZBT Grenzwerte für Permeationskoeffizienten fest. Ziel ist es demnach, einen Permeationskoeffizienten von weniger als $10 \text{ E}-8 \text{ cm}^2/\text{s}$ zu erreichen. Mit Permeationskoeffizienten von $\leq 1\text{E}-08 \text{ cm}^2/\text{s}$ bzw. $1,08\text{E}-08 \text{ cm}^2/\text{s}$ sind die

Referenz-Folien als sehr gasdicht zu bezeichnen (a). Selbst die Probe mit 77 Gew% Füllstoff in PP1 weist mit $1,77 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ einen sehr geringen Permeationskoeffizienten auf und ist somit bedenkenlos als BPP in der Brennstoffzelle einsetzbar. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Einbringung der Kohlefasern in das Compound mit 70 Gew% in PP3 und guten elektrischen Widerständen sowie geringen Permeationskoeffizienten, wurden nachfolgend alle zur Verfügung gestellten Folienmuster aus diesem Compound hergestellt.

Zudem wurde die Folienrezeptur mit 70 Gew% Füllstoff in PP3 hinsichtlich des Permeationskoeffizienten gegenüber H_2 in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung vermessen (b). Dafür wurden, wie in (d) dargestellt, aus der Mitte der Folie ein Streifen entnommen und dreigeteilt. Eine der drei erhaltenen Probe wurde unbehandelt, eine nur einseitig und die dritte beidseitig nassgeschliffen vermessen. Zwar steigen die Permeationskoeffizienten durch ein Nachbehandeln der Folien leicht an, diese sind allerdings mit Permeationskoeffizienten von $< 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ weiterhin als sehr gasdicht gegenüber Wasserstoff zu bewerten.

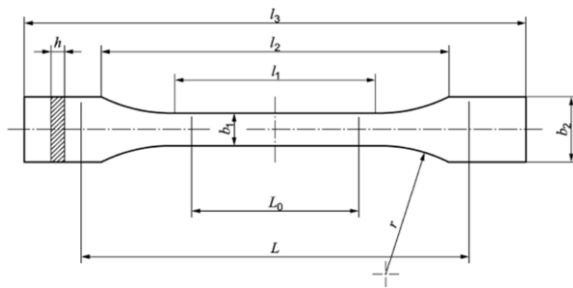
Aus der zweiten Version der faserverstärkten Rundproben wurden schließlich drei Varianten hinsichtlich ihrer Permeation gegenüber H_2 untersucht (c). Die ermittelten Permeationskoeffizienten liegen sämtlich auf sehr niedrigem Niveau, sodass die Proben über die Materialfläche hinweg als „dicht“ einzustufen sind. Hinsichtlich der In-Plane-Permeation entlang der eingebetteten Fasern besteht jedoch grundsätzlich das Risiko der Ausbildung von Kanälen, über die Wasserstoff austreten könnte. Dieser Effekt kann mit dem vorhandenen Prüfstand zwar nicht direkt detektiert werden, jedoch erlaubt die kontinuierliche Druckmessung in der abgeschlossenen Wasserstoffkammer Rückschlüsse auf potenzielle Leckagen durch einen Vergleich des Druckverlusts.

Im direkten Vergleich zwischen dem unverstärkten Referenzmaterial und den faserverstärkten Proben zeigte sich kein signifikanter Unterschied im Druckabfall der Wasserstoffkammer. Daraus wird geschlossen, dass die In-Plane-Wasserstoffpermeation entlang der Fasern bei der getesteten Faseranzahl und Probengeometrie keinen wesentlichen Einfluss auf das Permeationsverhalten ausübt. Dennoch sollte dieser Aspekt bei höheren Fasergehalten oder veränderten Faserarchitekturen vertieft untersucht werden.

Unter den im Projekt berücksichtigten Bedingungen wird das Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Bipolarplatten somit als geeignet für den Einsatz in Brennstoffzellen bewertet.

Mechanische Charakterisierung - Zugversuche

Als grundlegende mechanische Charakterisierung wurden Zugversuche an den unverstärkten Compoundfolien durchgeführt. Hierfür wurden aus extrudierten Folien des Materials vier Zugproben vom Typ 1B der DIN EN ISO 527-2 (Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2) per Laserschneiden herauspräpariert (Abbildung 15). Dafür wurden sowohl Proben in Extrusionsrichtung (longitudinal) der Folie wie auch Proben senkrecht zur Extrusionsrichtung (transversal) entnommen. Die Proben wurden mit einem stochastischen Muster aus weißer Grundierung und schwarzen Punkten per Sprühlack für die spätere optische Dehnungsmessung versehen.



Maße in Millimeter

Probekörpertyp		1A	1B
l_3	Gesamtlänge ^a	170	≥ 150
l_1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten ^b	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Breite an den Enden	20,0 ± 0,2	
b_1	Breite des engen Teils	10,0 ± 0,2	
h	Bevorzugte Dicke	4,0 ± 0,2	
L_0	Messlänge (bevorzugt)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Messlänge (zulässig auf Anforderung für die Qualitätskontrolle oder wenn festgelegt)	50,0 ± 0,5	
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1	115 ± 1

^a Die empfohlene Gesamtlänge von 170 mm für Typ 1A ist im Einklang mit ISO 294-1 und ISO 10724-1. Für einige Werkstoffe kann es notwendig sein, dass die Schulterbereiche verlängert werden (z. B. $l_3 = 200$ mm), um einen Bruch oder Schlupf in den Klemmen der Prüfmaschine zu verhindern.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, aus l_1 , r , b_1 und b_2 , aber innerhalb der angegebenen Toleranzen.



Abbildung 15: Oben: Maße des verwendeten Zugprobekörpertyps 1B (DIN EN ISO 527-2), unten: geschnittene Probe inkl. Lackmuster.

Geprüft wurden die Proben auf einer Universalprüfmaschine (ZwickRoell) mit pneumatischen Klemmen und einer Kraftmessdose von 10 kN. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Die Prüfungen wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 80 °C (Betriebstemperatur der Brennstoffzelle) in einer Temperatorkammer durchgeführt. Die Dehnungsmessung erfolgte zum Schutz der Probe kontaktlos optisch per Videoaufnahme des Versuchs mittels Kamerasystem und anschließender DIC Auswertung (Digital Image Correlation) mittels der Software GOMCorrelate (Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH). Längs- und Querdehnung wurden hier vollflächig über die gesamte parallele Prüffläche ermittelt und nach Bestätigung der Homogenität wurde hieraus ein Mittelwert gebildet. Es wurden pro Satz sechs Zugproben geprüft und aus diesen jeweils eine Mittelwertkurve plus einhüllendem Streuband (Standardabweichung) berechnet. E-Modul und Poissonzahl wurden abweichend von der Norm zwischen 0 % und 0,08 % ermittelt, da der Standard-Auswertebereich (0,05 % - 0,25 %) bereits über den linearen Bereich der Kurven hinausging (siehe Abbildung 16 unten). Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 16 und Tabelle 4 zusammengefasst. Trotz fehlender Faserverstärkung zeigt sich eine kleine Anisotropie aufgrund des Extrusionsprozesses. Zugfestigkeit bzw. Bruchdehnung reduzieren sich beim Blick von longitudinal zu transversal um ca. 10 % bzw. ca. 25 % bei beiden Prüftemperaturen. Der E-Modul ist unabhängig von der Prüfrichtung. Die erhöhte Prüftemperatur reduziert Festigkeit bzw. Modul um ca. 45 % bzw. ca. 70 % und erhöht die Bruchdehnung um ca. 160 %.

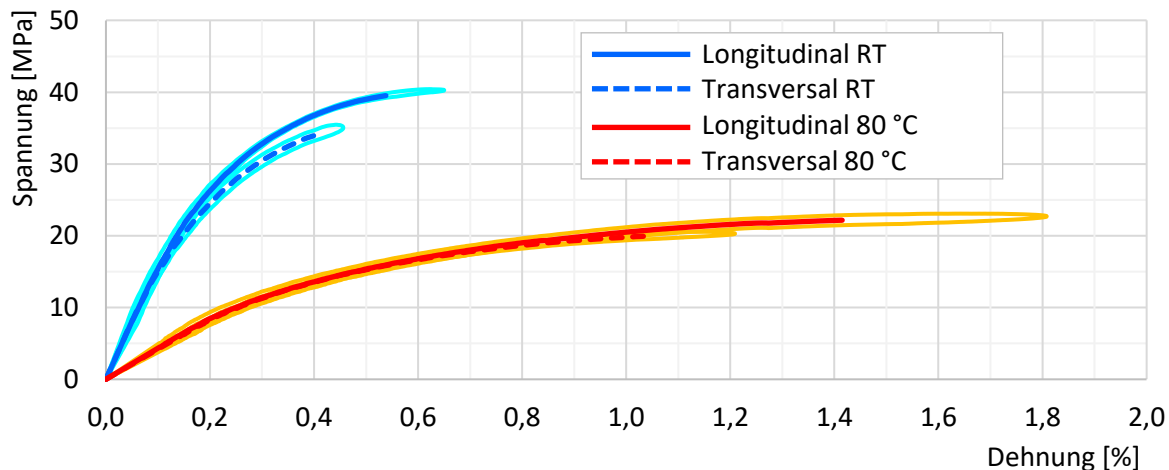
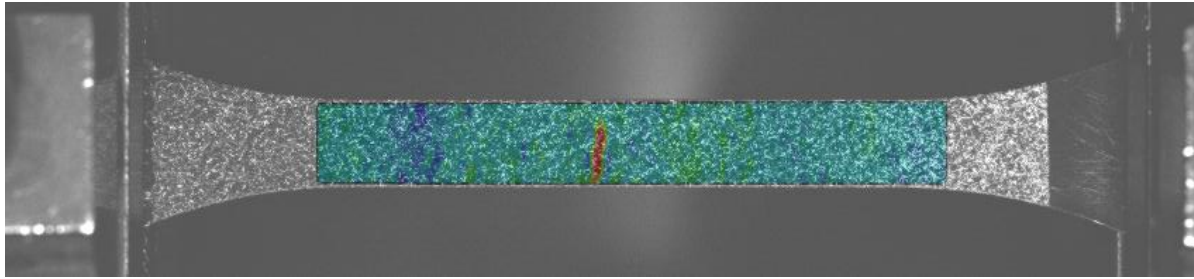


Abbildung 16: Zugversuchsergebnisse. Optische Dehnungsmessung direkt vor dem Bruch, farbliche Darstellung der Längsdehnung (oben); Spannungs-Dehnungs-Kurven als Mittelwertkurve plus Streuband (unten)

Tabelle 4: Mechanische technische Kennwerte der unverstärkten Compoundfolien

	Festigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Poissonzahl [-]
Longitudinal 23 °C	38,96 ± 1,96	15,83 ± 2,27	0,54 ± 0,11	0,05 ± 0,11
Transversal 23 °C	34,16 ± 1,30	15,65 ± 0,99	0,41 ± 0,04	0,16 ± 0,09
Longitudinal 80 °C	21,82 ± 1,68	4,34 ± 0,58	1,42 ± 0,39	0,20 ± 0,16
Transversal 80 °C	19,75 ± 0,40	4,21 ± 0,24	1,04 ± 0,17	0,21 ± 0,18

Diese Daten bilden die Grundlage für den Material-Input des Simulationsmodells. Hierfür wurde in der FE-Software Abaqus (Dassault Systèmes) ein Materialmodell mit den Bausteinen Elastic (E-Modul und Poisson-Zahl), Plastic (wahre plastische Dehnung über wahrer Spannung) und Ductile Damage (Bruchdehnung, Triaxialität und Dehnrage) bedatet. Hierfür wurden die Mittelwertkurven (technische Spannung & technische Dehnung) des Zugversuchs über den logarithmischen Ansatz in wahre Spannung und Dehnung umgerechnet und über Trennung von elastischer und plastischer Dehnung (ab Abweichung vom linearen Verlauf) in die oben genannten Materialmodelle eingepflegt. Zur Kontrolle dieses Kalibrierungs-Prozesses wurde ein Ein-Element-Test (Abbildung 17 oben rechts) durchgeführt, um die resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve mit den Input-Daten zu vergleichen. Nach erfolgreicher Übereinstimmung wurde der Zugversuch direkt nachsimuliert und analog zum Versuch ausgewertet (Spannungsberechnung über Reaktionskräfte und Probenmaße, Dehnungsberechnung über Mittelwert der gesamten parallelen Prüflänge). Das Modell und die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt.

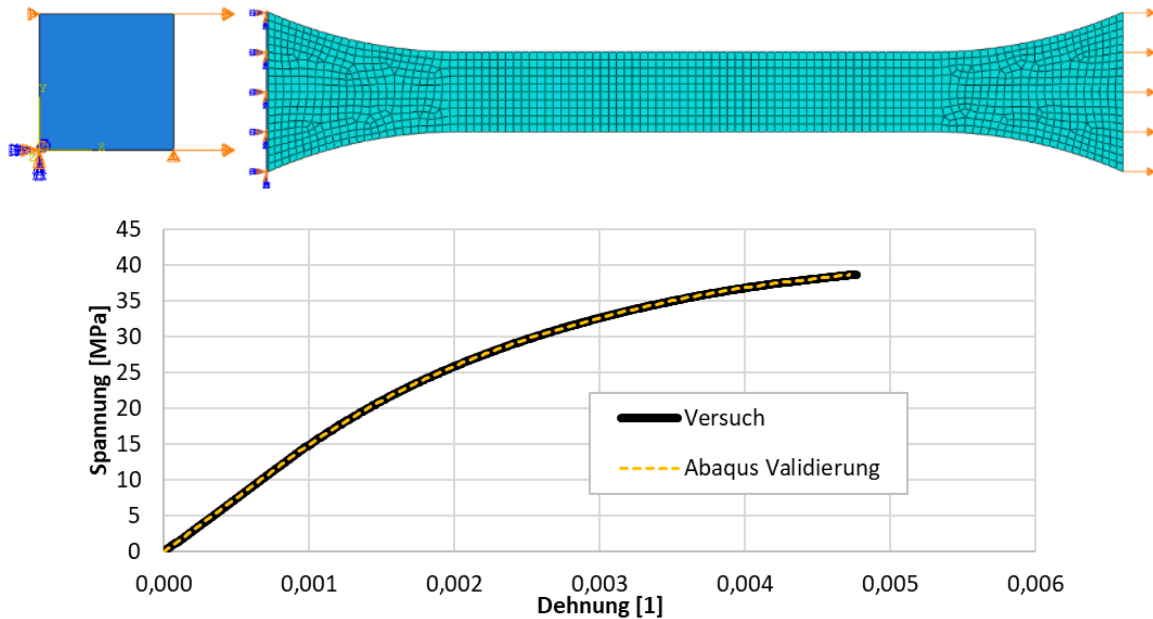


Abbildung 17: Modell und Ergebnisse zur Spannungsberechnung

Mechanische Charakterisierung – Biegeversuche

Zur weiteren Charakterisierung und Validierung des Simulationsmodells (s. Seite 26) wurden aus unverstärkten Compoundfolien rechteckige Biegeproben ausgeschnitten. Die Prüfung erfolgte auf einer Gabo-DMA-Maschine mit einer 100 N Kraftmessdose bei 80 °C (Betriebstemperatur der Brennstoffzelle). Die Stützweite betrug 20 mm und die Prüfgeschwindigkeit 1,79 mm/min. Diese Prüfgeschwindigkeit entspricht derselben Dehnrates des Zugversuchs von 1,07 %/min zwecks Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuche. Prüfung und Auswertung erfolgte soweit möglich in Anlehnung an DIN EN ISO 178 (Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften) mit der Berechnung der Randfaser-Biegespannung und -Biegedehnung. Zudem wurden flache Biegeproben präpariert und geprüft, die beidseitig mittig mit verschiedenen breiten Tapes (Tafnex™, CF/PP) verstärkt wurden.

Per FE-Simulation wurden diese Biegeversuche nachsimuliert. Die Biegeproben wurden als ein Viertel-Modell mit quadratischen, nicht-reduzierten 3D-Volumenelementen (C3D20) aufgebaut und mit dem Material aus den Zugversuchen bedatet. Zur Tapeverstärkung wurde das Modell den Proben entsprechend partitioniert und mit Tapeeigenschaften (TAFNEX™, CF/PP UD Tape von Mitsui Chemicals Europe GmbH in der Datenbank CAMPUS) versehen. Da die Datenblattwerte nur für Raumtemperatur vorlagen, wurden die Eigenschaften für 80 °C aufgrund von Werkstoffkennwerten vergangener Projekte mit PP hieraus mittels Abschwächungsfaktoren berechnet ($E_1=108$ GPa, $E_2=E_3=1,56$ GPa, $G_{12}=G_{13}=0,48$ GPa, $G_{23}=0,35$ GPa, $\nu_{12}=\nu_{13}=0,35$, $\nu_{23}=0,4$). Das ¼-Modell wurde mit symmetrischen Einspannbedingungen gehalten (Abbildung 18 unten links) und die Auflager und die Druckfinne als Analytical Rigids modelliert. Der Referenzpunkt der Druckfinne wurde mit einer vertikalen Deformation beaufschlagt und für den Kontakt von Probe zu Auflagern/Druckfinne eine Kontaktbedingung (Tangential Behavior, Penalty) mit einem Reibungskoeffizienten von 0,3 definiert. Prüfaufbau, Simulationsmodell und Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

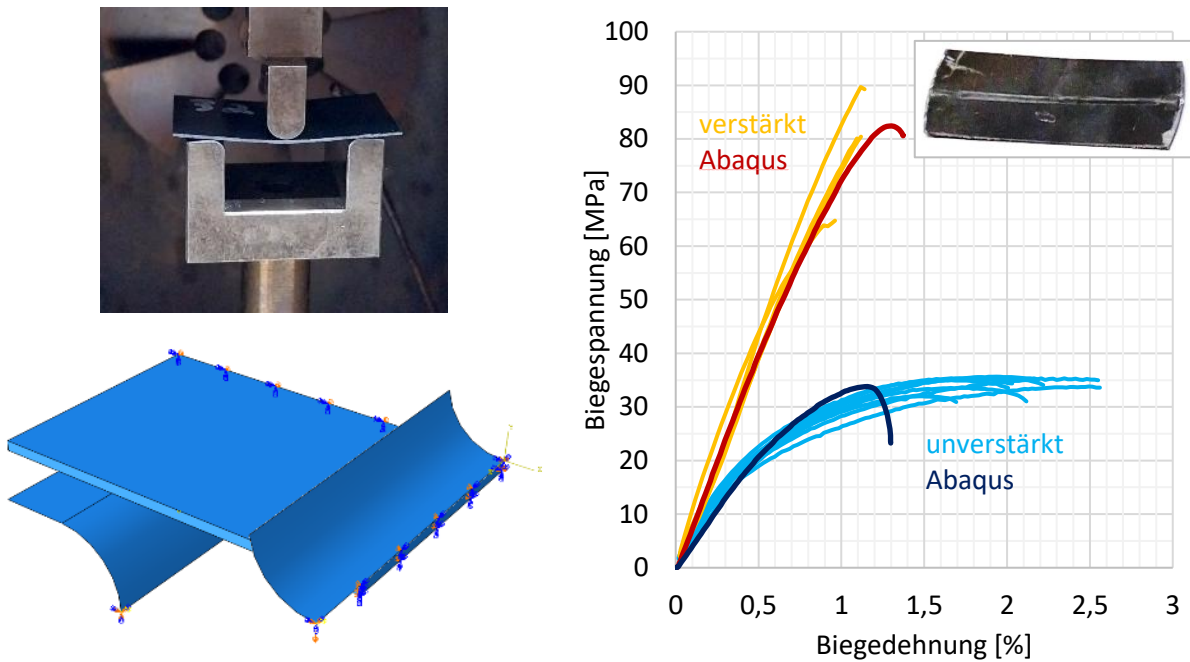


Abbildung 18: Biegeprüfung von Compoundfolien. Oben links: Prüfaufbau mit einer unverstärkten Probe. Unten links: Simulationsmodell als 1/4 mit symmetrischen Einspannbedingungen. Rechts: Ergebnisse von Prüfung und Simulation unverstärkter und verstärkter Compoundfolien.

Charakterisierung von geprägten 25 cm² Proben

Aus den Folien mit einem Füllstoffgehalt von 70 Gew% wurden mehrere 25 cm² bipolare Halbplatten (BPHP) geprägt. Bedingt durch die Tatsache, dass die Folien während des Prägevorgangs an dem Prägewerkezeug hafteten und sich nur schwer entformen ließen, wurden unterschiedliche Trennmittel getestet. Nach dem Entformen wurden die geprägten BPHP z.T. mit Isopropanol und Aceton gereinigt und elektrisch charakterisiert. Bei dieser Untersuchung lag der Fokus auf dem Einfluss des Trennmittels und dem verwendeten Reinigungsmittel, primär Aceton. Die Proben wurden zunächst ohne Oberflächenbehandlung und anschließend im geschliffenen Zustand vermessen. Die elektrischen Widerstände sind nachfolgend dargestellt.

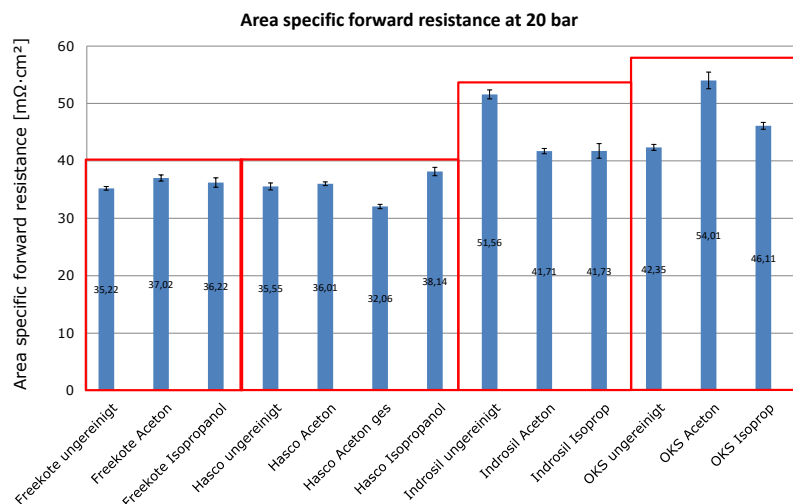


Abbildung 19: Flächenspezifische Durchgangswiderstände an geprägten Folien mit einem Füllstoffgehalt von 70 Gew% Graphit und Ruß in PP

Bei den verwendeten Trennmitteln Freekote und Hasco handelt es sich um silikonfreie, wohingegen die verwendeten Trennmittel Indrosil und OKS silikonhaltig sind. Die Verwendung der silikonhaltigen Trennmittel resultiert in dieser Untersuchung in höheren Widerständen. In die geprägten Folien wurde zunächst eine Bahn fräst, um im Anschluss das Fasertape einzulegen (s. Seite 33 ff). Dabei wurden unterschiedlich breite Tapes sowohl nur unidirektional als auch über Kreuz eingelegt. Abbildung 20 zeigt einiger dieser Proben.



Abbildung 20: Geprägte Folien ohne Fasertape, mit unterschiedlich breiten Fasertapes und über Kreuz verarbeitetes Tape

Bei der elektrischen Charakterisierung dieser mit Kohlefasern versehenen BPHP wurde die im Teststand jeweils über und unter der Probe positionierte GDL beschädigt. Bei Anlegen eines definierten Anpressdrucks im Teststand, bei dem der Widerstand realitätsnah gemessen wird, zeigte sich die in Abbildung 21 dargestellten Brüche in der GDL.

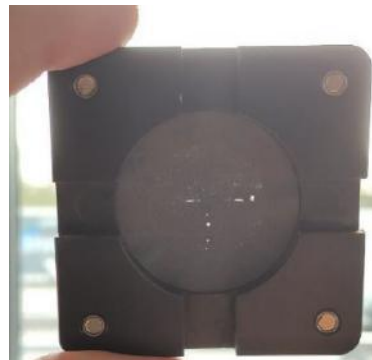
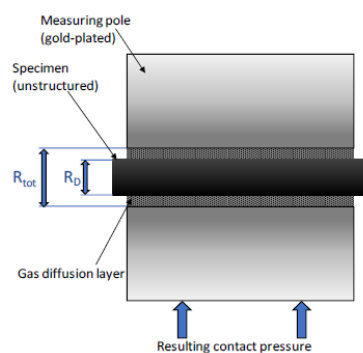


Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Messkopfs und beschädigte GDL nach Vermessung der BPP mit kreuzförmigem Fasertape

Ein Linienscan über einen Steg der geprägten Folie im 90° Winkel zur eingelegten Faser zeigte, dass durch das Fräsen der Nut für das Einlegen des Fasertapes scharfe Kanten entstehen, die die GDL beschädigen (Abbildung 22). Durch eine Überarbeitung des Fräsvorgangs konnte diese Fehlerquelle behoben werden.

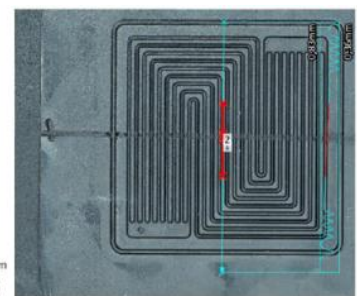
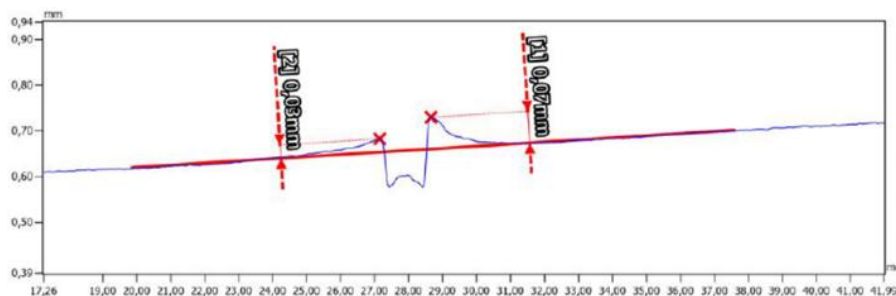


Abbildung 22: Topographie einer geprägten Folie mit Linienscan im 90 ° Winkel zur eingelegten Faser

Mechanische Charakterisierung

Die umgeformten Biegeproben wurden mit einer beidseitigen mittigen Tapeverstärkung wie bereits die unstrukturierten Proben geprüft (Abbildung 23). Verschiedene Tapebreiten von 2 - 3,5 mm wurden eingebracht, sodass der Breitenanteil der Tapes zwischen 20 % und 35 % lag (Probenbreite 10 mm). Die Nachsimulation der Proben erfolgte hier mittels Shell-Elementen (S4R) mit einer Kantenlänge von 0,05 mm.

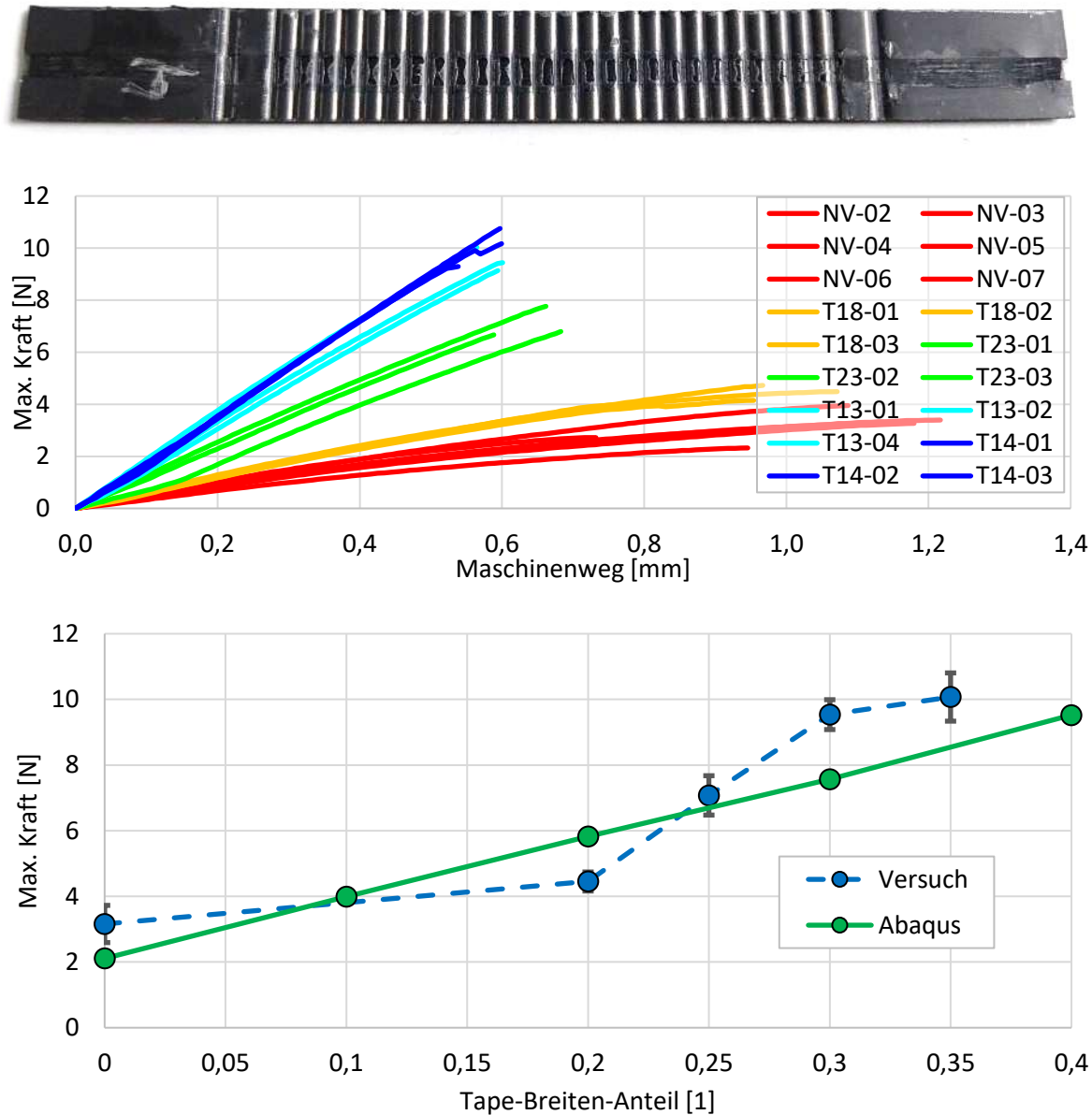


Abbildung 23: Prüfergebnisse verschiedener mit Tape verstärkter umgeformter Biegeproben. Tape-verstärkte umgeformte Biegeprobe (oben); Kraft-Weg-Kurven der Biegeprüfung (mitte); Maximale Biegekräfte aus der Prüfung und der Simulation über dem Tape-Breitenanteil (unten).

Die Versuche zeigen eine klare Verstärkungswirkung der Fasern auf, indem Steifigkeit und maximale Kraft mit zunehmendem Tape-Breitenanteil steigen. Dieser Anstieg über den Tapebreitenanteil ist allerdings nicht-linear. Die Übereinstimmung von Prüfung und Simulation ist in diesem Fall nur beschränkt gegeben. Erwartungsgemäß zeigen die Simulationen einen linearen Anstieg der maximalen Kraft über den Tapebreitenanteil, wobei die Werte teils über und teils unter den experimentellen Werten liegen. Optische Untersuchungen zeigten auf, dass die in der Simulation einfachen idealen Angaben von Tapedicke, -breite und exakter

Einbettung in die umgebende Compoundfolie nur bedingt in den Proben reproduzierbar auftreten, was Abweichungen in den Werten erklären kann. Darüber hinaus ist der hier geprüfte Lastfall (hohes Verhältnis von Stützweite zu Probendicke) nur bedingt anwendbar auf den Lastfall der Brennstoffzelle. Durch das Aufeinander-schichten der BPP wirkt der Verspanndruck in Dickenrichtung und erzeugt dabei kaum Biegespannungen, sondern Druck und Schubspannungen (s. Seite 26).

1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung Folien-Brennstoffzelle (ZBT/IVW)

Prägeprozess 25 cm² Bipolarplatte

Zum Einbringen der für die Funktion einer BPP notwendigen Strömungskanäle in die elektrisch leitfähigen Folien wird am ZBT ein Prägeprozess entwickelt. Dazu wurde in einem ersten Schritt ein Prägewerkzeug mit austauschbaren Stempeln entwickelt. Dieses Prägewerkzeug wird in einer temperierbaren 100 t Hydraulikpresse aufgespannt und zur Umformung der in AP2 hergestellten faserverstärkten Folien verwendet. Das entwickelte Prägewerkzeug ist in Abbildung 24 dargestellt und besteht aus einer oberen/unteren Stempel-form mit integrierten Kanalstrukturen und jeweils einer Tasche zur Aufnahme austauschbarer Stempelein-sätze. Die modulare Bauweise ermöglicht unterschiedliche Funktionsstrukturen für den Prägeprozess zu eva-luieren, ohne dass eine Neufertigung des gesamten Werkzeuges notwendig wird. Fertigungskosten, -zeit und -aufwand lassen sich dadurch maßgeblich einsparen. Die Stempel sind als Positiv bzw. Negativ der abzubil-denden Folienstruktur ausgeführt, sodass beim Schließen des Werkzeuges die Struktur des oberen Stempels in die des unteren eintaucht. Die entwickelten Stempelgeometrien stellen sicher, dass bei der Formgebung die Folie einen konstanten Querschnitt erhält und eine gleichmäßige mechanische Festigkeit erzielbar bleibt. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau des Werkzeuges mit den auswechselbaren Stempeleinsätzen dar-gestellt.

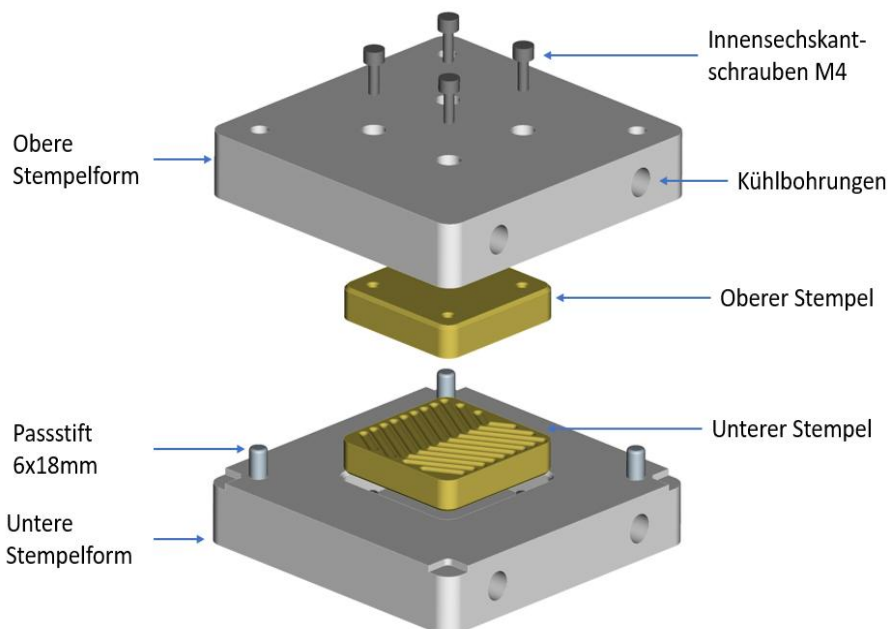


Abbildung 24: Aufbau des Prägewerkzeugs für das 25 cm² BPP-Design

Die Wellenlänge λ (Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stegen), die Kanaltiefe t , die Stegbreite s , die Nutbreite n und die Dicke d der Folie stellen die zu variierenden Geometrieparameter der Stempel dar (vgl. Abbildung 25). Die Auslegung der Strukturen erfolgte zunächst mit der Intention, die Parameter zu vali-dieren, um möglichst optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Länge & Breite der Prägestrukturen betrugen

zunächst 50 mm x 50 mm zur Herstellung repräsentativer Probekörper. Daraus resultierende Erkenntnisse über notwendige Geometrieanforderungen und dem Fertigungsverfahren werden in die spätere Entwicklung des finalen Bipolarplattendesigns übertragen.

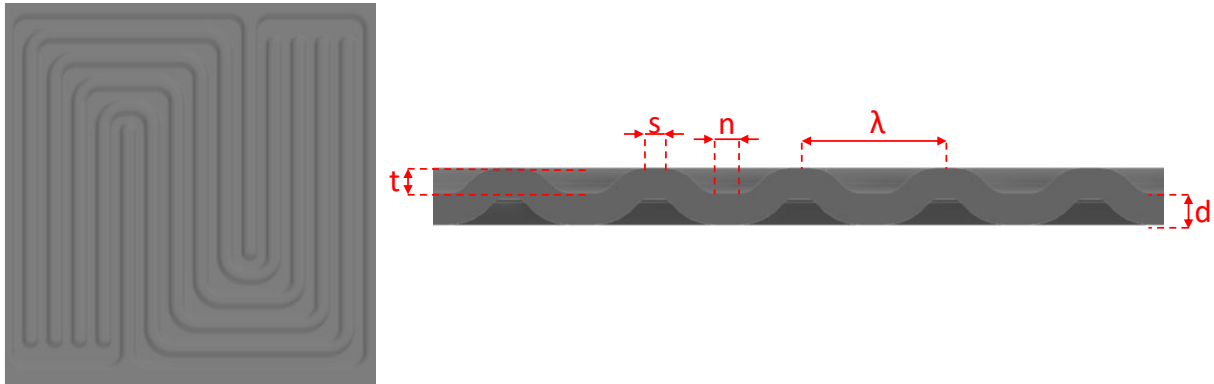


Abbildung 25: Konstruktion des Stempelwerkzeug und Geometrieparameter

In einem ersten Schritt wurden drei Stempel-Geometrie-Varianten entwickelt, die in nachfolgender Tabelle beschrieben werden:

Tabelle 5: Geometrieparameter der Stempelvarianten

	λ [mm]	t [mm]	s [mm]	n [mm]
Stempel V1	1,83	0,32	0,25	0,3
Stempel V2	1,5114	0,32	0,25	0,2
Stempel V3	1,7494	0,52	0,1965	0,2



Abbildung 26: Gefertigte Prägestempel (links); mit den verschiedenen Einlegern geprägte Folien (rechts)

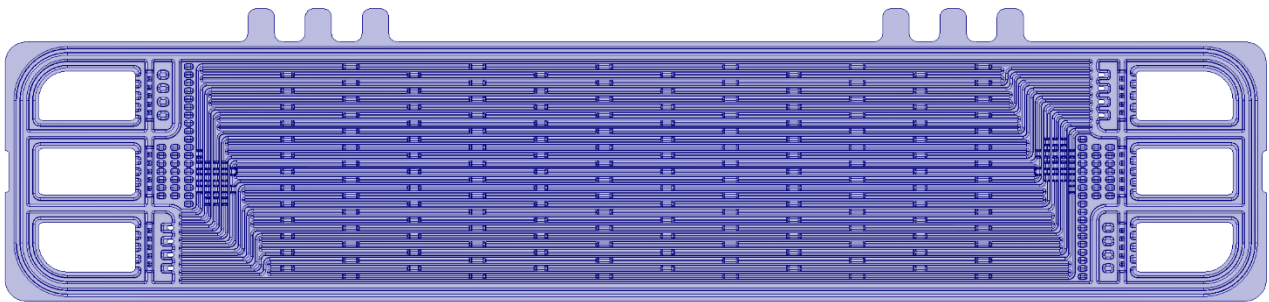
Als wesentliche Beurteilungsmerkmale zur erforderlichen Stempelgeometrie lassen sich die Entformungseigenschaften und die Verformbarkeit der Folien heranziehen. Der Prägevorgang selbst wird mit der Erwärmung der Folie auf Erweichungstemperatur des Kunststoffes eingeleitet. Es folgt das Einlegen der Folie in das vorgeheizte Werkzeug und das anschließende Prägen mit einer definierten Kraft über einen festgelegten

Zeitraum. Der Einfluss der eingearbeiteten Fasern in die Folien ist bei dem Prägevorgang ebenfalls zu untersuchen. Somit konnten aus Stempel V2 Proben hergestellt werden, mit welchen die Prägegüte bei unterschiedlichen Parametern als sehr gut bewertet werden konnte.

Auslegung 100 cm² Bipolarplatte

Ausgehend der vorangegangenen Erkenntnisse wurde am ZBT ein punktsymmetrisches Bipolarplattendesign für die 100 cm² Folien entwickelt. Die Rahmenbedingung für das Design sind eine Foliendicke von 300 µm bis 400 µm, eine aktive Fläche von 100 cm² (Flowfield 200 mm x 50 mm), stirnseitige Ports und eine Z-förmige Verteilerstruktur (Abbildung 27).

Kathodenseite (Ebener Kanalgrund in der Dichtungsnut)



Anodenseite (Kühlseitige Dichtsicke in der Dichtungsnut)

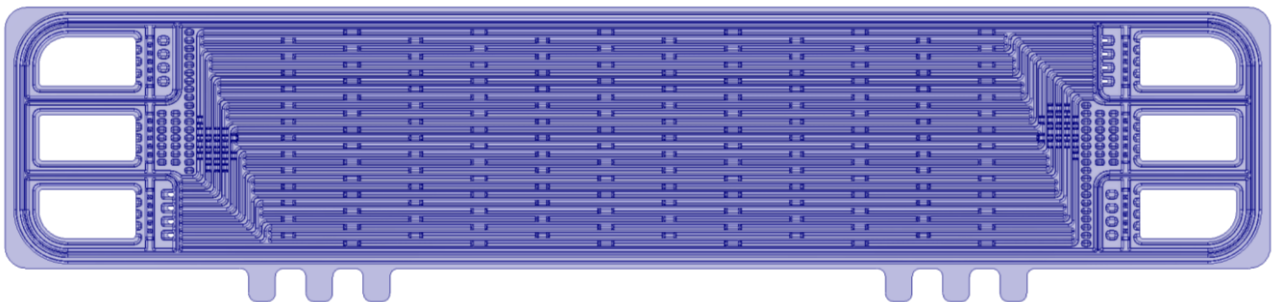


Abbildung 27: Konstruierte Designs für anoden- und kathodenseitige bipolare Halbplatte

Eine Besonderheit der BPP ist die vorgesehene Einzelspannungserfassung (engl.: Cell Voltage Monitoring, CVM). Hierzu werden seitlich Fahnen freigeschnitten, die den Anschluss von Flachsteckhülsen ermöglichen. Um eine Beschädigung der übereinander gestapelten Fahnen beim Anbringen der Flachstecker zu verhindern, werden die Anschlüsse seitwärts kaskadiert platziert. Damit ist ein Anschluss der Hülsen an drei horizontal versetzten Fahnen mit geringem Abstand zueinander möglich. Aufgrund der Fragilität des Materials sind zwei Fahnen-Sets vorgesehen, sodass im Falle eines Bruchs weitere Ersatzanschlüsse bereitstehen.

Hinsichtlich der Dichtungskonzepts wurde sich primär entschieden sowohl aktiv- als auch kühlseitige mittels dispenster Silikondichtung abzudichten (Abbildung 28). Das symmetrische Design von anoden- und kathodenseitiger BPHP vereinfacht nicht nur den Konstruktionsprozess und die Stackplanung sondern ermöglicht auch die flexible Verwendung der BPHP als „Anode“ oder „Kathode“.

Für die primäre in diesem Projekt verfolgte Variante wird die Vollplatte aus jeweils einem Anoden- und einem Kathodendesign gefertigt. Hierbei wird kühlseitig auf der Anode eine sehr feine Dichtung aufgetragen, die gegen den planen Grund der Kathode abdichtet. Eine zweite Möglichkeit bietet die Kombination zweier Anodendesigns, wobei nur eine der beiden Platten kühlseitig mit Dichtung versehen wird. Hierdurch kann

wahlweise die Toleranz für die Dichtungsapplikation entschärft werden, jedoch besitzt diese Kombination vermehrt kritische Geometrien in beiden Dichtsicken. Letzte Variationsmöglichkeit ist das Verkleben der flachen Fronten zweier Kathodendesigns, wobei die Entwicklung eines Klebprozesses einen deutlich vermehrten Entwicklungsaufwand mit sich zieht.

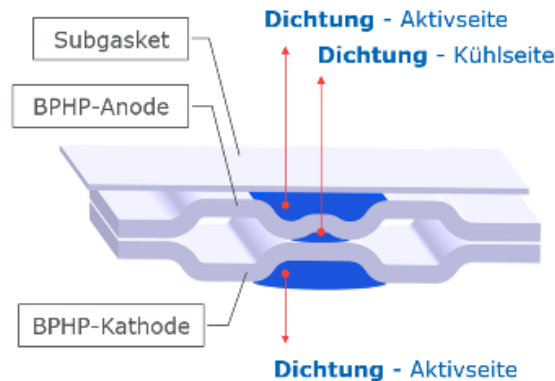


Abbildung 28: Dichtungskonzept der BPP aus anoden- & kathodenseitiger BPHP

Simulation des Flowfielldesigns

Hinsichtlich der Druckverluste und der Massentransporte wurden verschiedene Simulation von Wasserstoff- und Luftweg sowie der Kühlung durchgeführt (Abbildung 29, Abbildung 31).

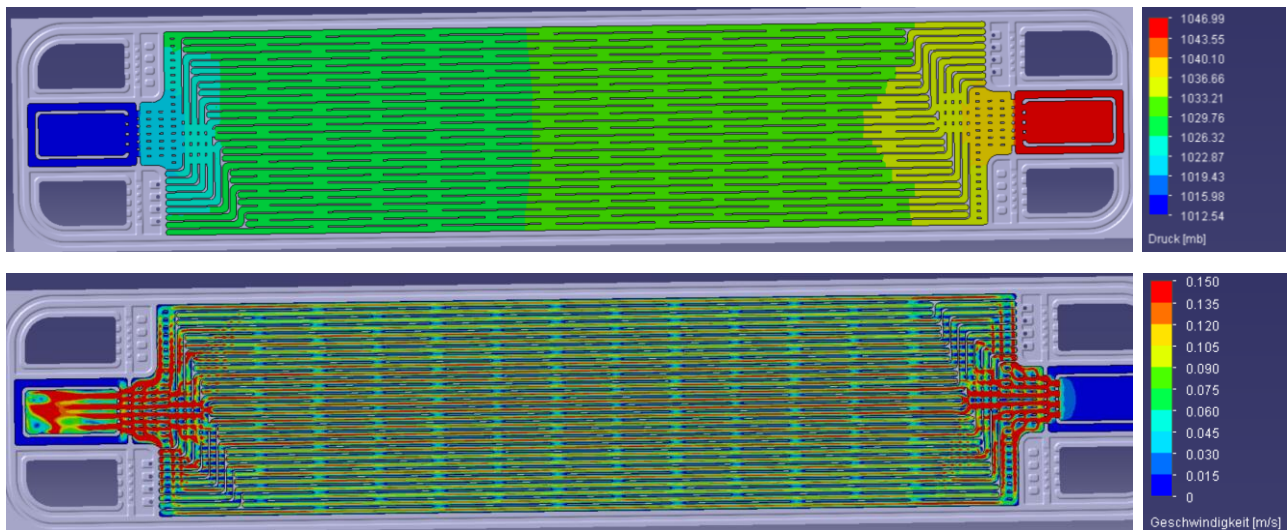


Abbildung 29: Simulation der 100 cm² BPP in FloEFD: Kühlweg; Druckverlust (oben), Geschwindigkeitsverteilung (unten)

Anhand der Simulation der Geschwindigkeitsverteilung ist ersichtlich, dass sich das eintretende Kühlmedium gleichermaßen auf der gesamten Breite der Kühlstruktur verteilt und eine recht homogene Geschwindigkeit über die gesamte Kühlstruktur vorherrscht. Zudem zeigt sich im symmetrischen Aufbau ein gleichmäßiger Druckabfall im Bereich der angestrebten Grenzen. Die Summe der CFD-Simulationen zeigt, dass alle Randbedingungen (Druckverluste, Massenströme usw.) erfüllt werden. Dies wird durch eine Simulation belegt, die die Massenflüsse der einzelnen Kühlkanäle vertieft (Abbildung 30). Mit einer Standardabweichung der Kühlleistung von 6,6 % ist eine homogene Wärmeabfuhr an allen Stellen gegeben.

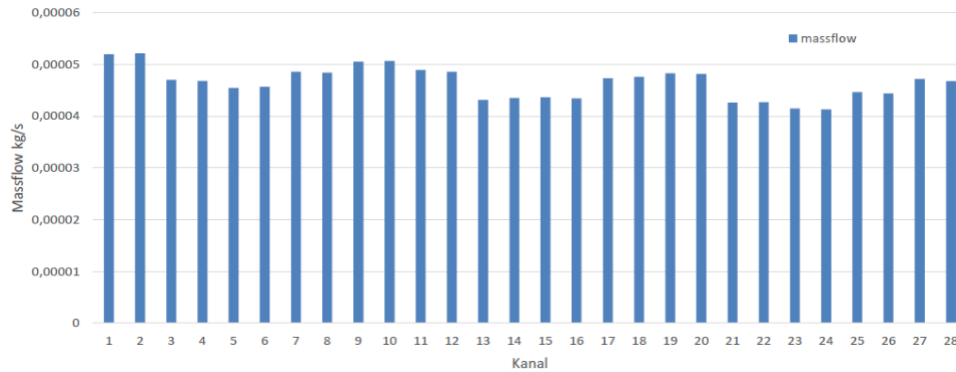


Abbildung 30: CFD Strömungssimulation (FloEFD) kühlseitiger Massenfluss der einzelnen Kanäle

Darüber hinaus wurde das Wasserstoff- sowie das Druckluftverhalten simuliert. Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der Druckluftseite. Während im Z-Verteiler recht hohe Geschwindigkeiten auftreten, reduzieren sich diese in den parallelen Strömungskanälen deutlich. Die Druckverteilung befindet sich mit den angesetzten Volumenströmen im angestrebten Bereich.

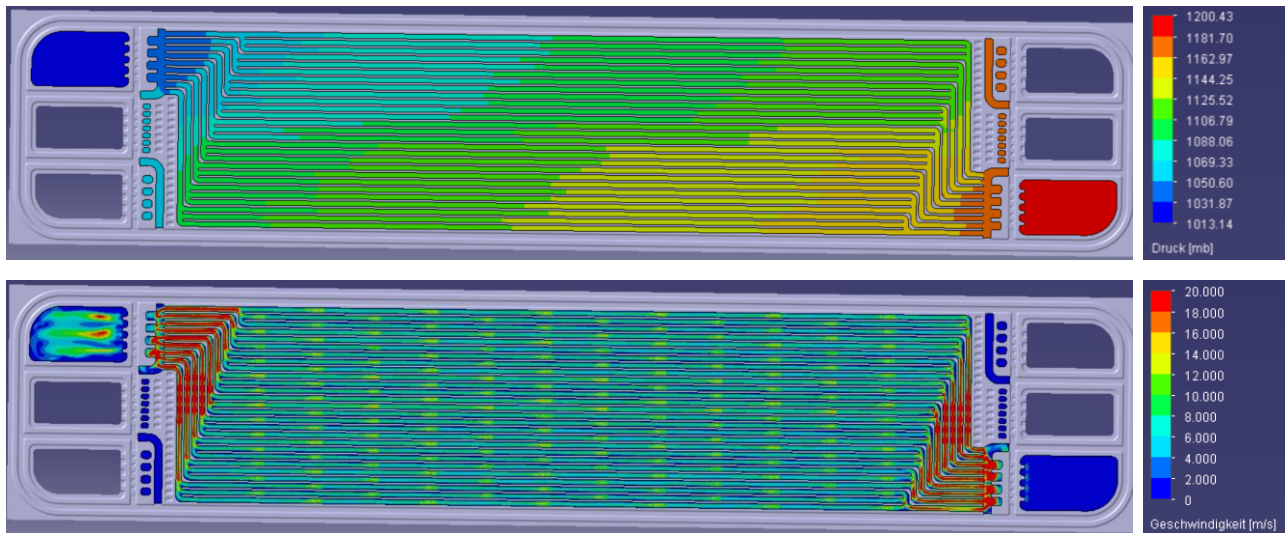


Abbildung 31: Simulation der 100 cm² BPP in FloEFD: Luftweg; Druckverlust (oben), Geschwindigkeitsverteilung (unten)

Elektrische Charakterisierung der 100 cm² Bipolarplatte

Die geprägten 100 cm² BPP wurden an dem in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen Teststand elektrisch vermessen. Dabei wurden mehrere unbehandelte, eine geschliffene und eine assemblierte BPP vermessen. Zur Assemblierung wurden die Halbplatten exakt aufeinander positioniert und mit Klebeband, sowie Flachsteckhülsen wie sie für die Einzelspannungserfassung (s. Seite 23) verwendet werden, fixiert. Die so erhaltenen Durchgangswiderstände sind in Abbildung 33 dargestellt.

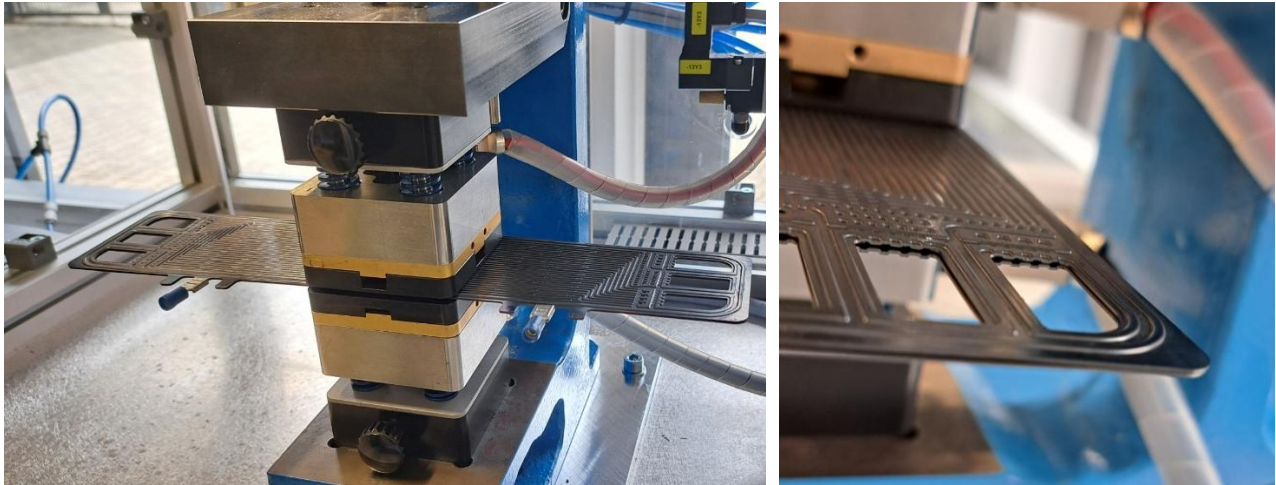


Abbildung 32: Assemblede Bipolarplatte im Teststand zur Bestimmung des elektrischen Durchgangswiderstands

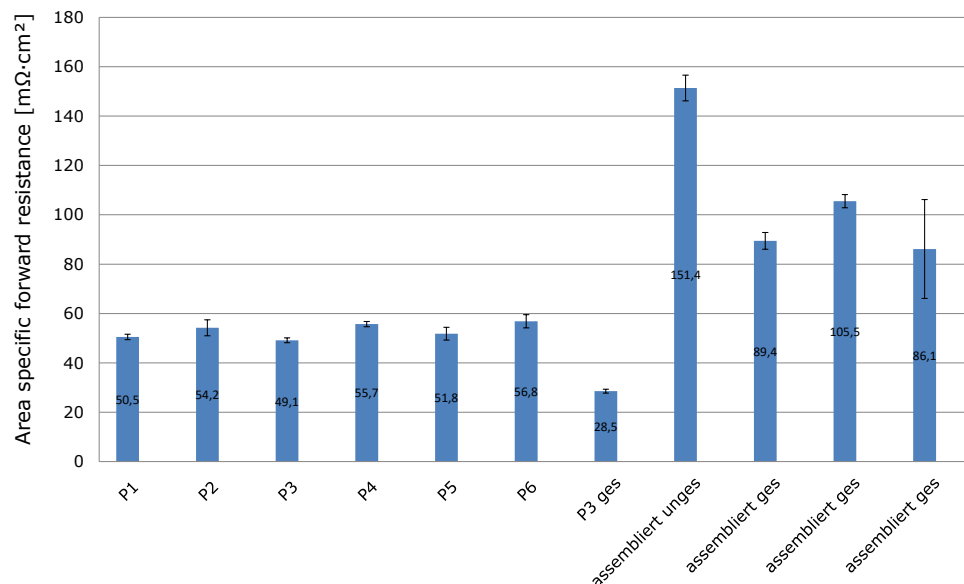


Abbildung 33: Erhaltene Durchgangswiderstände an den strukturierten 100 cm² Bipolarplatten (unbehandelt, geschliffen und assemblert) bei 20 bar Anpressdruck

Die Ergebnisse der elektrischen Untersuchung zeigen, dass die Widerstände grundsätzlich höher sind als die der unstrukturierten Proben. Dies liegt daran, dass der flächenspezifische Durchgangswiderstand mit der Fläche des Messpols berechnet wird und nicht mit der realen Kontaktfläche von GDL zu Probe (hier Stege der strukturierten Folie). Weiterhin ist auch hier ersichtlich, dass die Widerstände durch eine Oberflächenbehandlung sinken (P3 vs. P3 ges).

Durch eine Assemblierung der Folien steigt der Widerstand deutlich an, um mehr als das doppelte einer einzelnen Halbplatte. Der Grund dafür liegt in dem zusätzlichen Kontaktwiderstand zweier Halbplatten. Dieser ist deutlich höher als der Kontaktwiderstand von Halbplatte zu GDL und dominiert den resultierenden Gesamtwiderstand.

Mechanische Simulation der Bipolarplatten

Zur FE-Simulation der BPP für den Einsatz in der Brennstoffzelle musste zunächst der Lastfall beschrieben werden. In der Brennstoffzelle werden die Wiederholelemente bestehend aus MEA, Bipolarplatte (anoden-

und kathodenseitig) sowie die Dichtungen aufeinander gestapelt und im Stack verpresst. Es herrscht eine Betriebstemperatur von 80 °C und der Verspanndruck beträgt 20 bar (2 MPa) bezogen auf die Stegflächen. Die Stegflächen haben einen Längenanteil der Wellenform von ca. 34 %, sodass ein Verspanndruck von 2 MPa auf diesen Stegflächen einer imaginären Plattenspannung von ca. 0,67 MPa entspricht, wenn man sie auf die Gesamtfläche bezieht. Zudem liegen in den verschiedenen Kanälen ein Gasdruck von 1-2 bar bzw. ein Flüssigkeitsdruck von 0,5 bar an (siehe Abbildung 34).

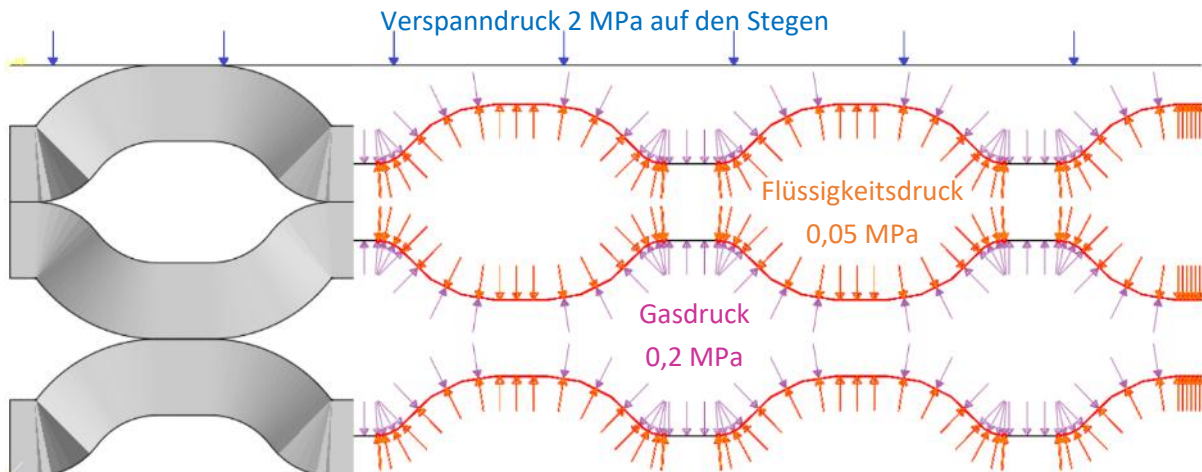


Abbildung 34: Skizze zu den drei Lasten auf die Bipolarplatten in der Brennstoffzelle.

Weiterhin musste für die Simulation der BPP ein Ersatz-Modell definiert werden. Die finale BPP hat eine aktive Fläche von 100 cm² und Radien im 1/10 mm Bereich (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36). Dadurch ist eine vollflächige, komplett die Platte abbildende Simulation in diesem Rahmen nicht umsetzbar. Daher wurde eine kleinste Zelle definiert, die von der Mitte des unteren Steges zur Mitte des oberen Steges reicht. Die Sollgeometrie der Wellenform wurde in Abaqus 2D gezeichnet und als Part definiert. Das Modell wurde in 0,01 mm Schritten von der Oberfläche ausgehend partitioniert, um später die Dicke der Faserverstärkung variabel zuordnen zu können (Abbildung 36 rechts). Vernetzt wurde das Modell mit quadratischen voll integrierten 2D Volumelementen (CPS8) mit einer Kantenlänge von ca. 0,01 mm. Das Modell wurde an den seitlichen Rändern mit symmetrischen Boundary Conditions versehen und oben und unten zwischen Rigid-Linien platziert. Diese wurden mittels Kontaktbedingungen (Tangential Behavior, Penalty, Reibungskoeffizient: 0,3) für das Zusammendrücken der Folie verwendet. Das Zusammendrücken der Folie erfolgte über die vertikale Verschiebung der oberen Linie und die Mediendrucke über Linienlasten (pressure) auf den Folienoberflächen (Abbildung 37). Bei der Betrachtung der resultierenden Spannung zeigt sich, dass die Mediendrucke nach Aufbringen des Verspanndrucks einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Spannungen haben. Daher wurden sie für die weiteren Simulationen ignoriert. Die Werkstoffkennwerte werden AP3 entnommen.

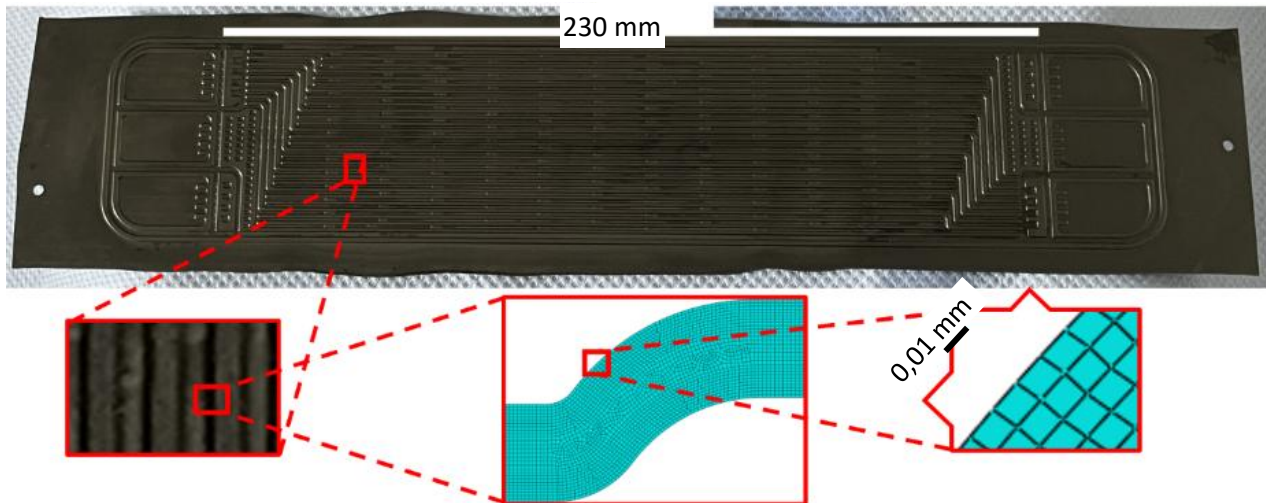


Abbildung 35: Verbildlichung der Größenordnungen in der Simulation der Bipolarplatte.

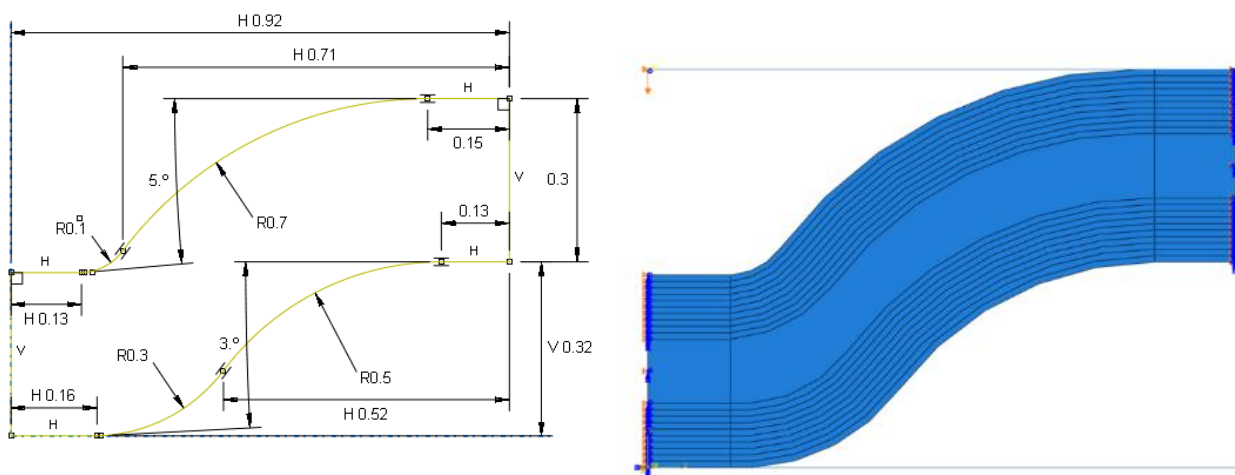


Abbildung 36: 2D-Modellzelle der Bipolarplatte: Zeichnung als Basis des Modells (links); Resultierender Part mit symmetrischen Einspannbedingungen und Partitionierungen für variable Materialzuweisung (rechts)

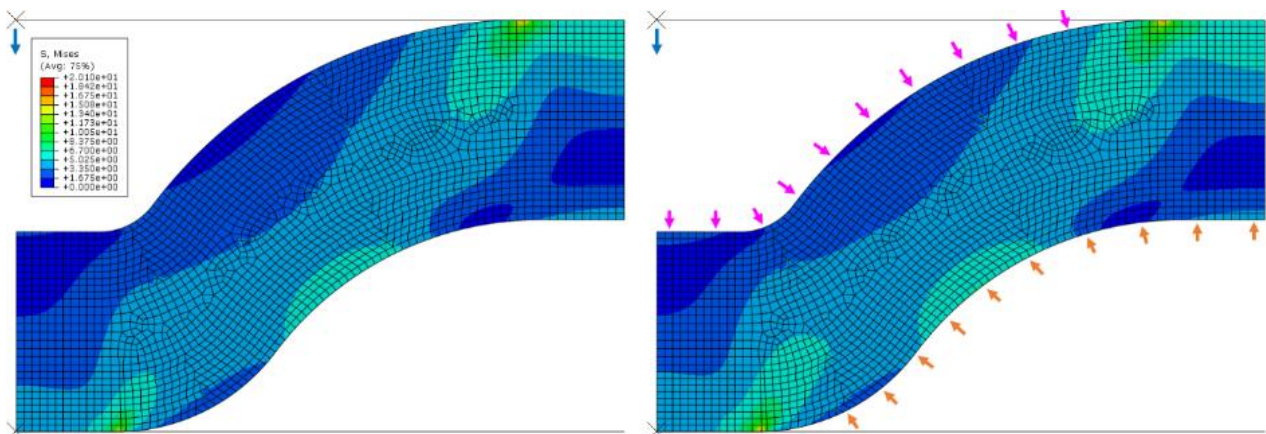


Abbildung 37: Vergleichsspannung eines unverstärkten Modells nach Aufbringen des Verspanndrucks (links) und zusätzlichem Aufbringen des Flüssigkeits- und Gasdrucks (rechts).

In Abbildung 38 sind Änderung der Spannung in der Matrix durch die Faserverstärkung bei gleicher Deformation sichtbar.

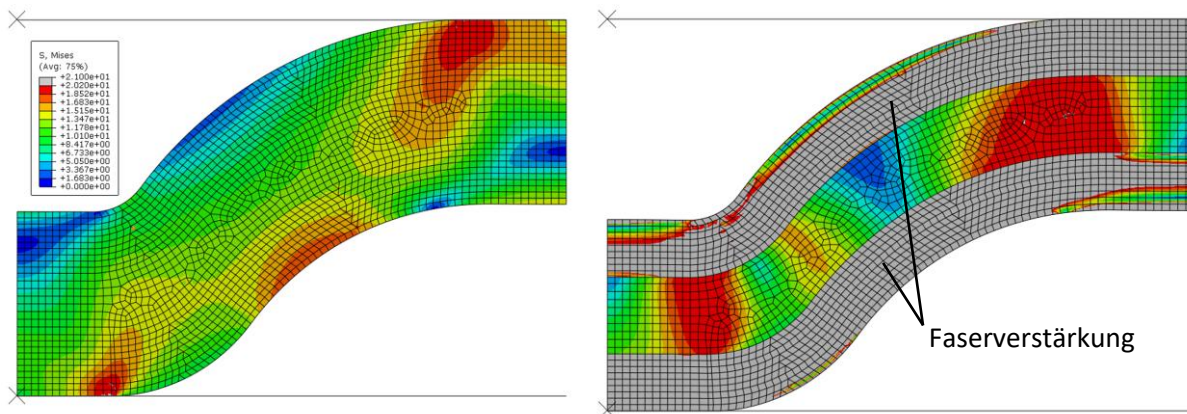


Abbildung 38: Vergleichsspannung eines unverstärkten Modells (links) und eines Tape-verstärkten Modells (rechts) bei gleicher Deformation mit sichtbarem Einfluss auf die Spannung.

Zur Auswertung dieser kleinen Zell-Simulationen bezüglich der Bipolarplattenbelastung wurden Plattenspannung und Plattendehnung definiert. Für die Plattenspannung wurde die resultierende vertikale Reaktionskraft RF2 am Referenzpunkt der oberen Rigid-Linie durch die gesamte Fläche der Zelle geteilt. Da es sich um eine 2D-Simulation handelte war die Plane Stress Thickness 1 mm. Die Länge der Zelle betrug 0,92 mm (s. Abbildung 36 links). Diese imaginäre Plattenspannung bezieht somit die gesamte Verspannkraft – in Dickenrichtung der BPP – auf die Gesamtfläche der BPP unabhängig von der Wellenform. Die Plattendehnung wurde aus der vertikalen Verschiebung desselben Referenzpunktes und der ursprünglichen Länge zwischen den, die Platte zusammendrückenden, Rigid-Linien gebildet (bei einer Foliendicke von 0,3 mm entspricht die Ursprungslänge 0,62 mm, s. Abbildung 36 links). Die hieraus gebildete Plattendehnungs-Plattenspannungs-Kurve ist also eine Beschreibung der Gesamtantwort der BPP auf vertikale Drucklast. Diese Kurve ist somit abhängig von der Foliendicke, der Wellengeometrie, der Kennwerte und der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Compoundmatrix sowie der Art der Faserverstärkung und dessen Eigenschaften. Hierfür wurden nun vergleichende Simulationen mit Auswertung der Plattenspannungs-Plattendehnungs-Kurve bis zum Versagen des ersten Elements durchgeführt in denen die Foliendicke (0,2, 0,3 und 0,4 mm) und die Dicke (0,04, 0,06 und 0,09 mm) und Art (UD-Tape und wirr-orientierter Kurzfasern) der Faserverstärkung variiert wurden. Die Faserverstärkung wurde über die partitionierte Geometrie an der Ober- und Unterseite der Folie gesetzt (siehe Abbildung 36). Die Simulation mit wirr-orientierter Kurzfasern soll die Abweichungen zur unidirektionalen Endlosfasern abschätzbar machen. Für die Eigenschaften dieser beispielhaften Wirrfaserverstärkung wurde eine mikromechanische Analyse mit der Software GeoDict (Math2Market) durchgeführt. Die Daten für die mechanischen Kennwerte der Matrix und Fasern sowie Länge und Orientierungstensor der Fasern wurden aus diesem und einem vergangenen Projekt herangezogen und resultierten in $E_1=17,3$ GPa, $E_2=6,26$ GPa, $G_{12}=2,01$ GPa, $\nu_{12}=0,38$. Die resultierenden Plattenspannungs-Plattendehnungs-Kurven sind in Abbildung 39 zusammengefasst.

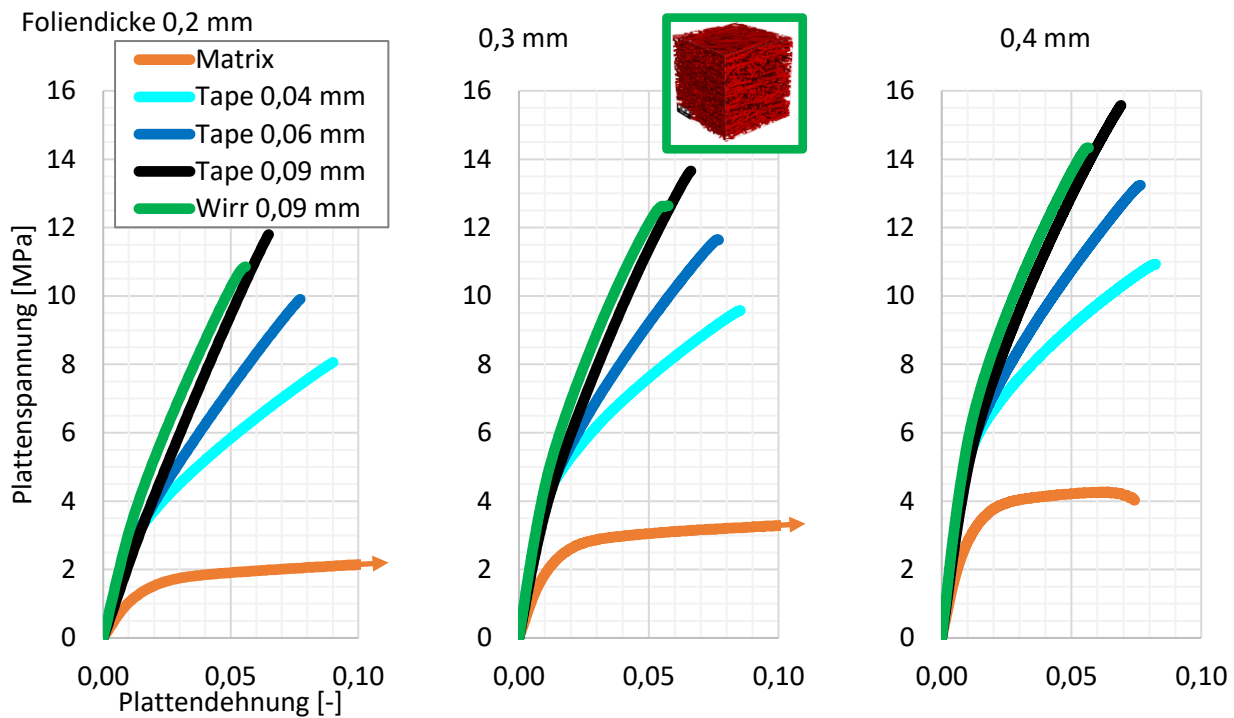


Abbildung 39: Simulationsergebnisse der Zellen-Simulation. Resultierende Plattenspannungs-Plattendehnungs-Kurven für verschiedene Foliendicken und Faserverstärkungen und mikromechanisches Modell der Wirrfaserverstärkung (mittig oben).

Die Wirkung der Faserverstärkung zeigt sich sowohl in Steifigkeit als auch Festigkeit. Die höhere Steifigkeit und die nur geringfügig niedrigere Festigkeit der Wirrfaserverstärkung im Vergleich zur UD-Tape-Verstärkung zeigt den Einfluss des höheren Schubmoduls auf und bestätigt, dass der Lastfall nicht von Biegespannungen dominiert wird, was einen höheren Unterschied zur UD-Verstärkung hervorrufen würde.

Es erfolgte eine analytische Betrachtung der gesamten BPP mittels dieser Plattenspannungs-Plattendehnungs-Kurven. Hierfür wurden für die verschiedenen Foliendicken (0,2, 0,3 und 0,4 mm) die verschiedenen Faserverstärkungen (Tape mit einer Dicke von 0,04, 0,06 und 0,09 mm, Wirrfaserverstärkung mit einer Dicke von 0,09 mm) in verschiedenen Breitenanteilen eingebracht (Abbildung 40). Je Foliendicke wurden für jede der vier Faserverstärkungen die jeweiligen Plattenbruchdehnungen verglichen und die kleinere hiervon als Plattenbruchdehnung dieser Kombination gesetzt. Aus den Plattenspannungs-Plattendehnungs-Kurven der Komponenten wurden nun die Plattenspannungen ermittelt, die der Plattenbruchdehnung entsprechen. Mittels dieser parallelgeschalteten Plattenspannungen kann über verschiedene Anteile von Matrix und Faserverstärkung die Gesamtantwort der BPP mittels einer Mischungsregel ermittelt werden.

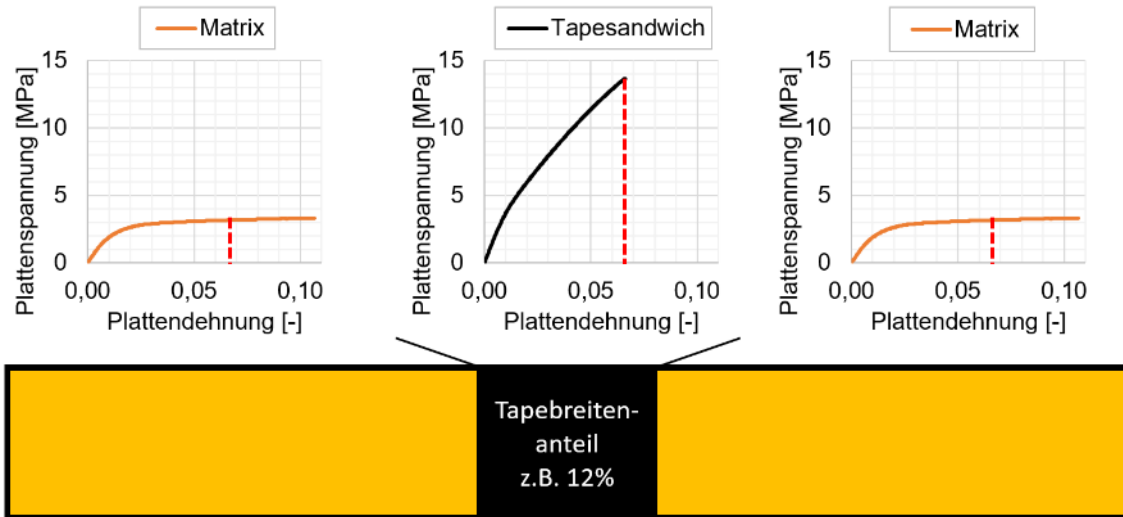
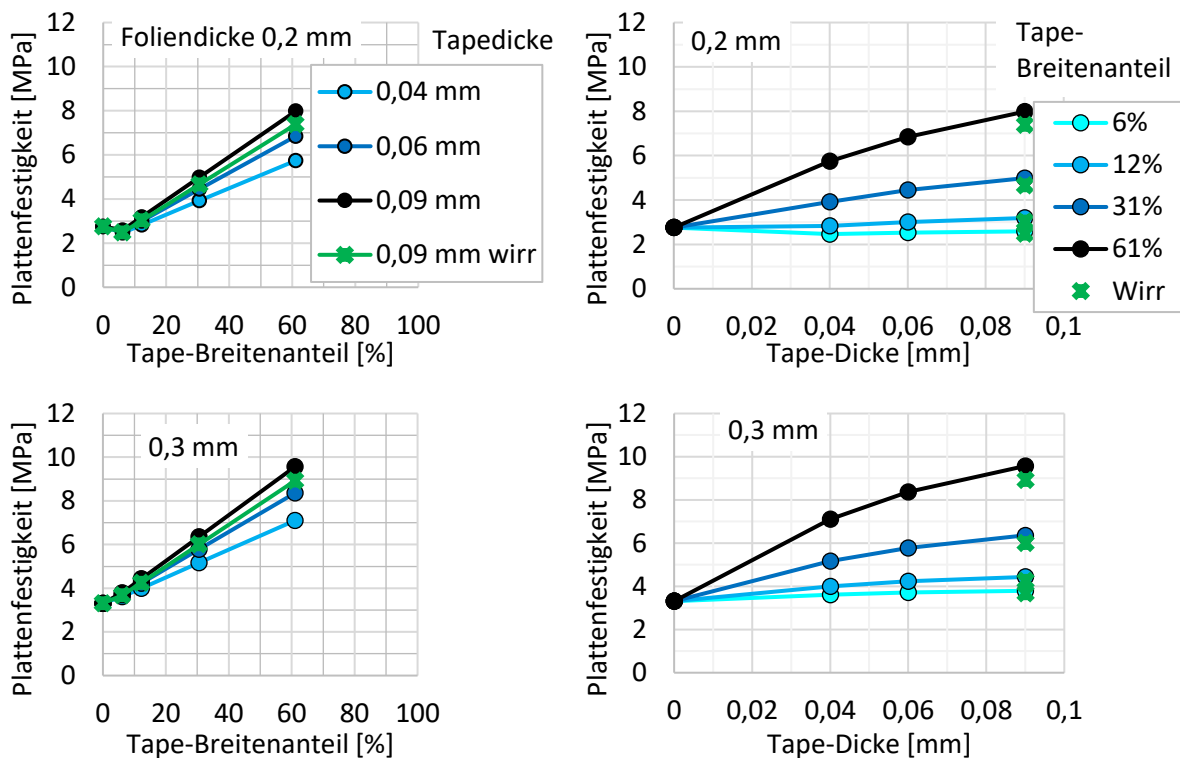


Abbildung 40: Skizze zur analytischen Berechnung der Bipolarplatte mit verschiedenen Breitenanteilen der Faserverstärkungen.

Diese resultierenden Werte der Plattenfestigkeit sind in Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 in verschiedenen Darstellungen zusammengefasst. Naturgemäß erhöhen alle Parameter (Foliendicke, Tapedicke und Tape-Breitenanteil) die resultierende Plattenfestigkeit durch die steifere und festere Taperegion trotz reduzierter Plattendehnung.



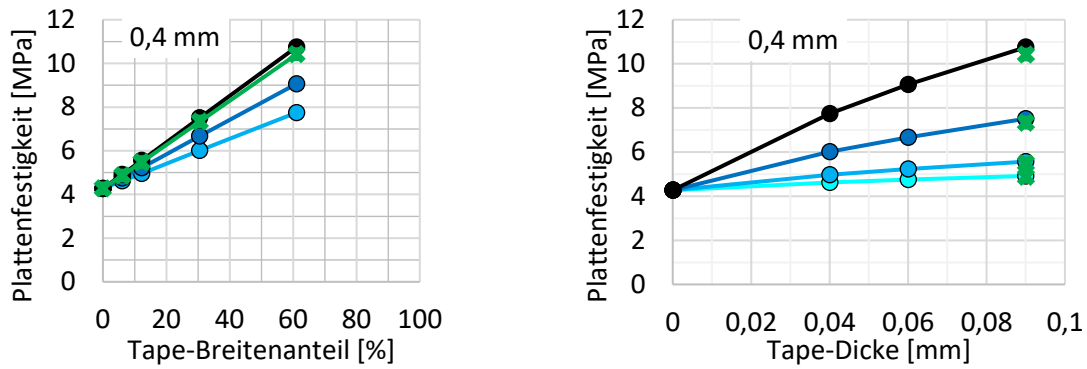


Abbildung 41: Ergebnisse der Parametervariationssimulation des Plattendickendrucks. Plattenfestigkeit über Tapebreitenanteil für verschiedene Foliendicken mit der Tapedicke als Scharparameter (links). Plattenfestigkeit über Tapedicke für verschiedene Foliendicken mit der Tapebreitenanteil als Scharparameter (rechts).

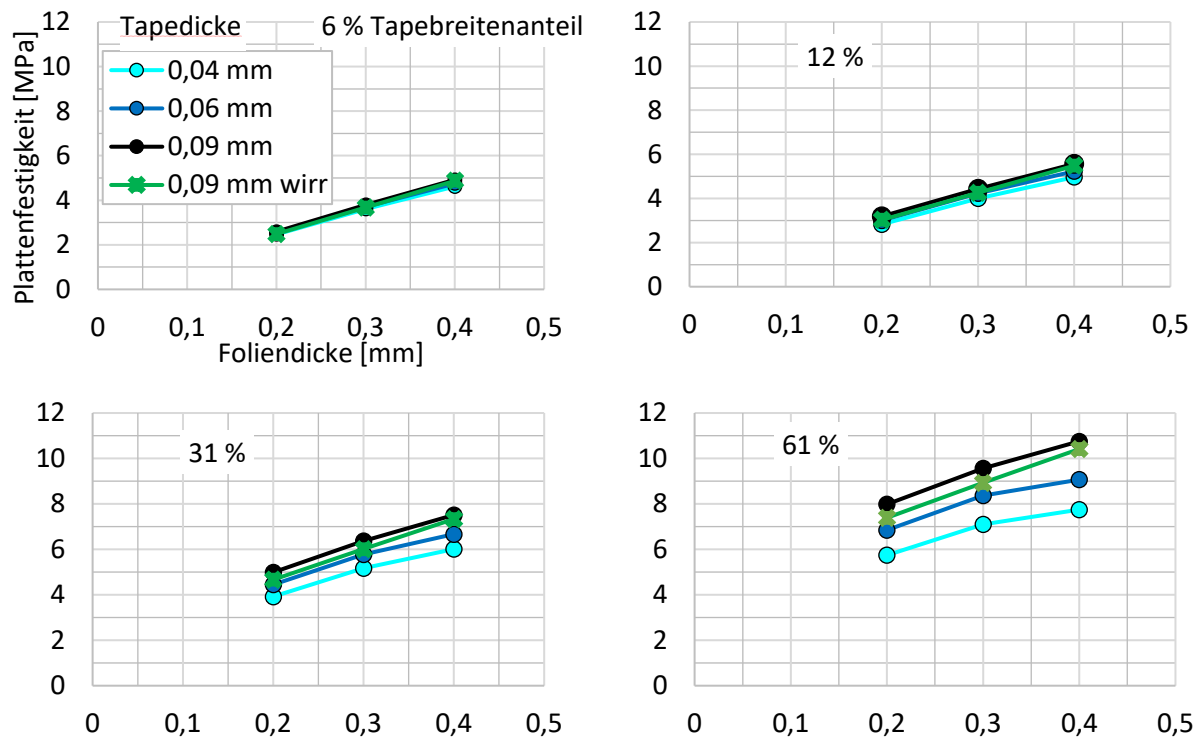


Abbildung 42: Ergebnisse der Parametervariationssimulation des Plattendickendrucks. Plattenfestigkeit über Foliendicke für verschiedene Tapebreitenanteile mit der Tapedicke als Scharparameter.

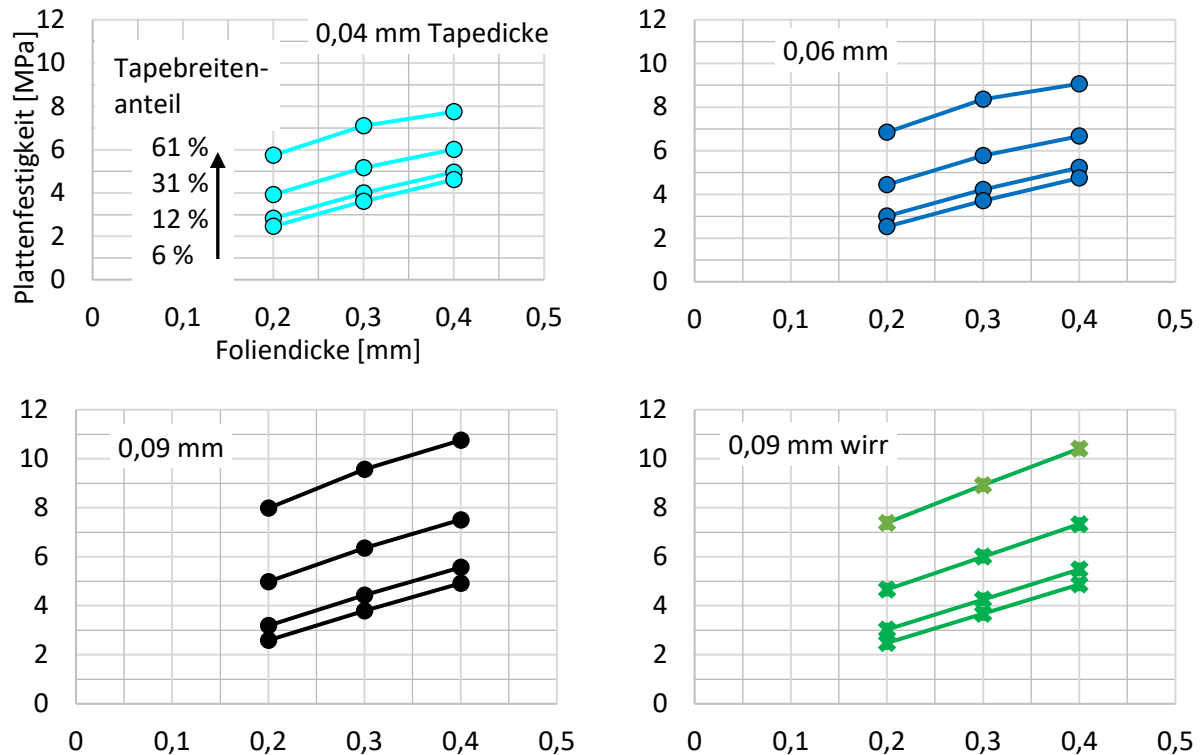


Abbildung 43: Ergebnisse der Parametervariationssimulation des Plattendickendrucks. Plattenfestigkeit über Foliendicke für verschiedene Tapedicken mit dem Tapebreitenanteil als Scharparameter.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der Betriebsdruck nicht das mechanische Hauptproblem darstellt. Der Verspanndruck von 2 MPa auf den Stegen entspricht <2 MPa auf die Gesamtfläche bezogen, was hier mit der Plattenspannung gemacht wurde. Somit ist bezüglich des Betriebsdruck rein aus der dieser Perspektive eine weitere Wandstärkenreduktion möglich. Das Hauptproblem der Mechanik ist das Handling der BPP (vgl. Seite 49) welches zu diesem Zeitpunkt keinem definierten Lastfall entspricht, der in der Simulation zur Auslegung verwendet werden kann. Diese Problematik soll im Folgeprojekt experimentell wie simulativ angegangen werden.

1.5 Arbeitspaket 5: Entwicklung Umformprozess Bipolarplatte (IVW)

Umformprozess – 25 cm²

Verschiedene Nutgeometrien wurden im Prägeversuch untersucht (Abbildung 44 (2)), dazu wurden unterschiedliche Folien mit den drei verschiedenen Einsätzen an einer Heißpresse nahe der Schmelztemperatur geprägt. Es konnten keine Risse identifiziert werden, so dass sich alle drei Geometrien als geeignet für die Folien erwiesen haben. Das Prägemuster führt zu einer Längung der Platte, was den lokalen Einsatz von UD-Tape vor Herausforderungen stellt, vgl. Abbildung 45. Durch die mangelhafte Nachführbarkeit (hohe Steifigkeit) der Fasern ergab sich eine schlechte Abbildung der Wellenform durch die Tapes.

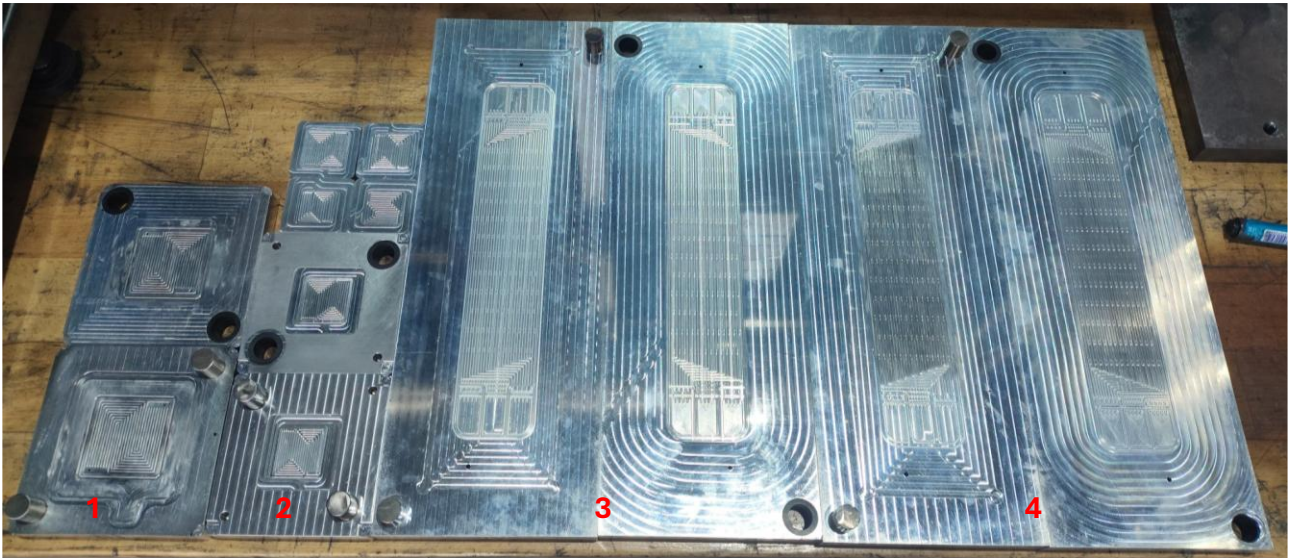


Abbildung 44: Gefertigte Prägestempel: Bei Prägestempel Nr. 2 wurden verschiedene Einleger mit unterschiedlichen Geometrien gefertigt

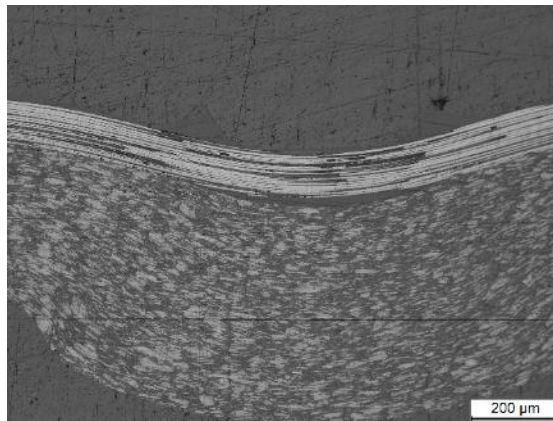


Abbildung 45: Fehrender Kontakt der Faserverstärkung im Nuttal

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden verschiedene Strategien entwickelt. Besonders zufriedenstellende Ergebnisse lieferte das Einlegen des UD-Tapes in eine zuvor gefräste Nut. Mittels eines Fräasers wurden Nuten in einer Tiefe von 0,1 mm gefräst. Das Tape wurde anschließend vor dem Umformvorgang in diese Nut eingelegt. Diese Methode sorgt dafür, dass die Verstärkung beim Umformen konturtreu bleibt, nicht durch das Werkzeug plattgedrückt wird (und ausgedrücktes reines PP die Oberfläche versiegelt) und sich aufgrund der besseren Nachführbarkeit optimal in die Wellenstruktur einfügt. Die Nuttiefe von 0,1 mm bei einer einzulegenden Tapedicke von 0,16 mm wurde in einer Versuchsreihe als am besten ermittelt, was das Einfügen des Tapes in den Gesamtverbund angeht.

Somit ergab sich hier eine grundsätzliche Änderung der Herangehensweise der Fertigung. Durch die Unmöglichkeit UD-Faserlagen mit dem Compoundmaterial zu imprägnieren (s. Seite 8 ff) musste auf eine vorimprägnierte Faserverstärkung (mit elektrisch nicht leitfähigem Standard-PP) gewechselt werden, die im Fertigungsprozess der Umformung den Schnitt mit der Nutfräsung erforderlich machte.

Somit konnten faserverstärkte Bipolarplatten hergestellt werden an welchen weitere Untersuchungen erfolgen konnten (siehe folgende Abschnitte). Es ist jedoch anzumerken, dass sich der Fertigungsprozess durch diese Zusatzschritte von einer industriellen Umsetzbarkeit entfernt haben.

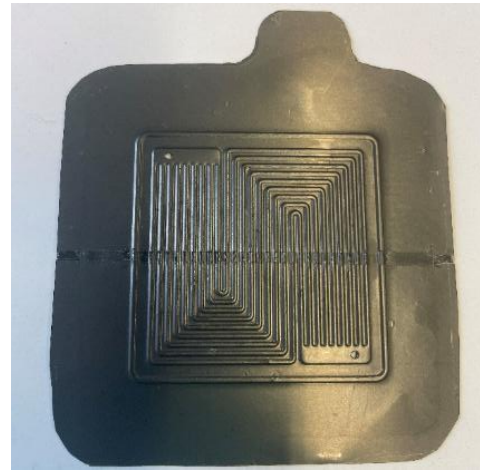
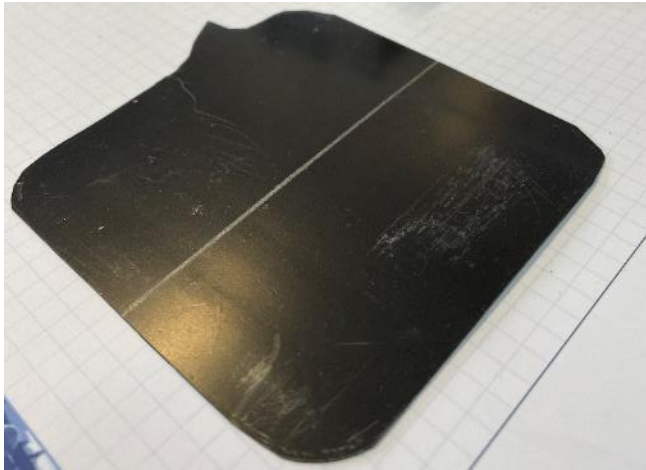


Abbildung 46: Prozessverbesserungen durch eine 0,1 mm tiefe Nut für die textile Verstärkung

Um die Anforderungen an die Maßhaltigkeit zu erfüllen, zeigt sich, dass ausschließlich das Fließpressen der Folie eine ausreichend hohe Präzision gewährleistet. Dazu wird das Werkzeug ohne Tauchkante, sondern mit einem breiten Rand konstruiert, sodass es auf Block gefahren werden kann.

Umformprozess – 100 cm²

Parallel zur Prägung der 25 cm² - BPP wurde mit der Entwicklung des Umformprozesses der 100 cm² BPP begonnen. Abbildung 47 zeigt ein Beispiel der strukturierten Folien ohne Zuschnitt. Zur weiteren Verarbeitung wird das stirnseitige Positionierungsloch verwendet.



Abbildung 47: Umgeformte BPP (Anode und Kathode)

Für die faserverstärkten 100 cm² BPP wurden insgesamt 13 unidirektionale Faserbündel orthogonal zur Flow-fieldrichtung in das Material eingebracht. Auch hier wurden zuvor (analog zu oben) kleine Kanäle mit einer Breite von 1 mm und einer Tiefe von 0,1 mm in die Platte eingefräst, in welche entsprechend passend ≤ 1 mm breite Tape-Streifen eingelegt und mit umgeformt werden konnten (s. Abbildung 48).

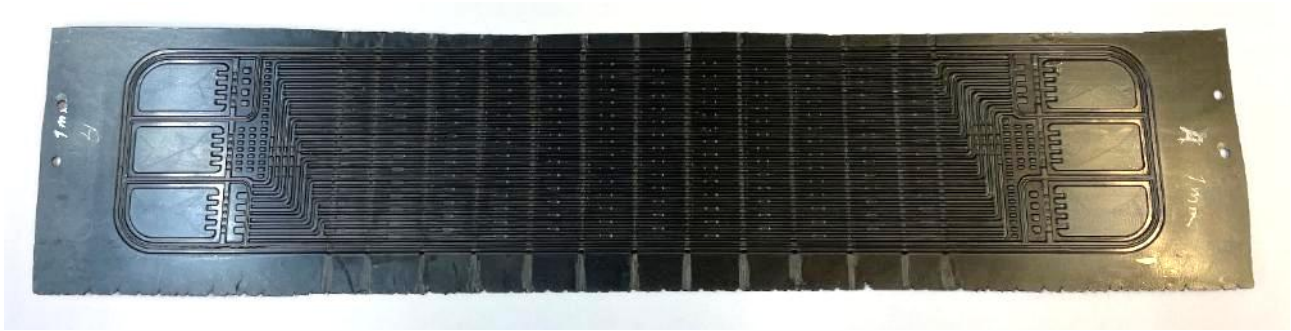


Abbildung 48: Unbesäumte, faserverstärkte Bipolarplatte in Demonstratorgröße; Tapebreite ca. 1mm

Qualitätssicherung

Zur Sicherung der Plattenqualität wird die Genauigkeit der Prägung stichprobenartig überprüft. Verwendet wird dafür ein Laserscanner (Keyence LJ-X), wobei Höhenniveaus mit einer Genauigkeit von 1/1000 mm aufgezeichnet und mittels unterschiedlicher Herangehensweisen ausgewertet werden können. Zur Untersuchung der Dichtnut sowie der Strömungskanäle in Höhe und Breite wurden individuelle Methoden entwickelt und mit den Sollwerten der CAD-Zeichnung verglichen. Die Methodik der Datenerfassung wird in Abbildung 49 und die damit zu vergleichenden Sollwerte in Abbildung 50 (oben rechts) dargestellt.

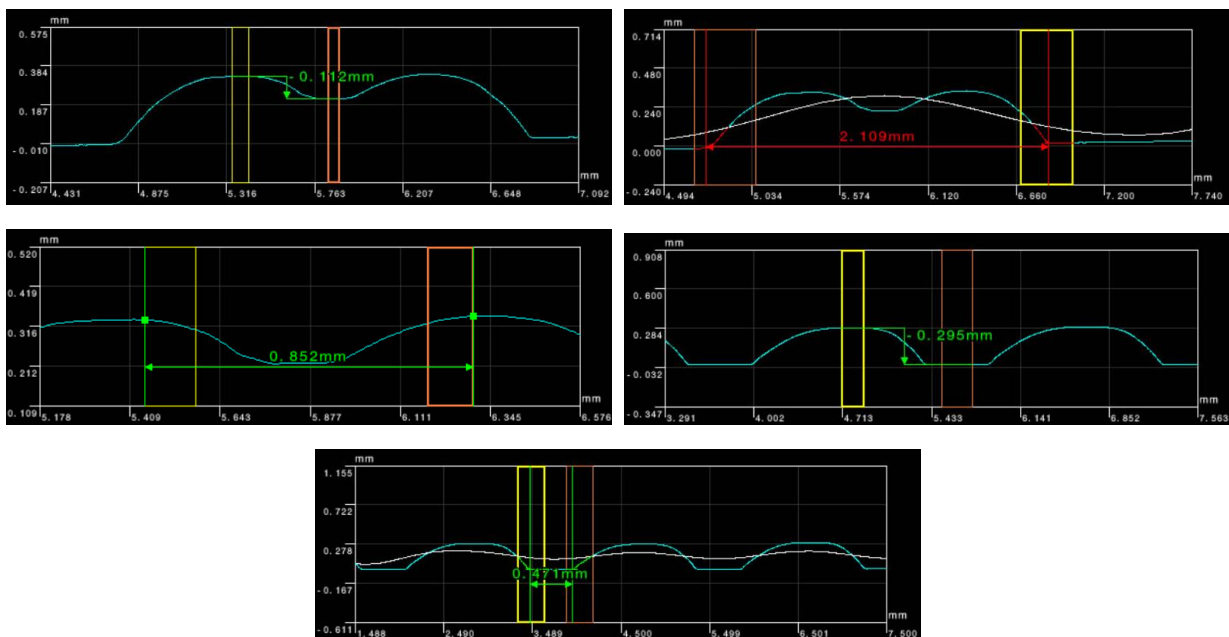


Abbildung 49: Untersuchung der Plattentopographie zur Validierung der Plattenqualität und Prägestruktur

Während die stichprobenartige Untersuchung gute Ergebnisse zeigt, sind vor allem erste Prägeversuche der BPP mangelhaft. Insbesondere die feinen Geometrien der kühlseitigen Dichtnut sind zu Beginn unscharf wodurch die Applikation der Dichtung erschwert oder verhindert wird. Spätere Prägewiederholungen mit optimierten Pressverfahren zeigen bessere Ergebnisse. Ein Ausschnitt der Messergebnisse zeigen die Mittelwerte sowie Abweichungen drei untersuchter Platten im kritischen kühlseitigen Dichtnutbereich. Insbesondere der in Abbildung 50 blau gefärbte Bereich zeigt erhöhte Abweichungen im Vergleich zu den restlichen Eckstellen.

		Soll (mm)	Ist (mm)				St. Abw.
Dichtsicke	h1	0,12	0,133	0,123	0,112	0,113	0,009
Dichtnut	h2	0,35	0,332	0,338	0,319	0,332	0,009
Dichtsicke	p	0,97	0,98	0,979	0,784	0,818	0,01
Dichtnut	w	2,19	2,133	2,125	2,107	2,126	0,02

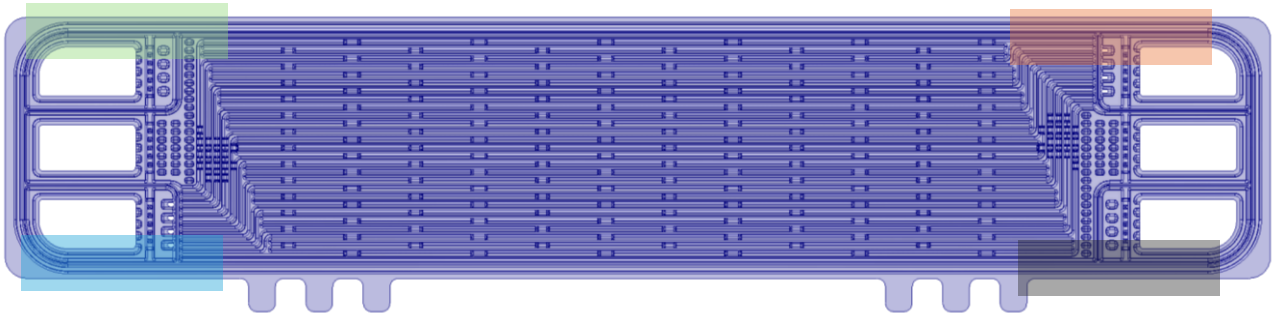
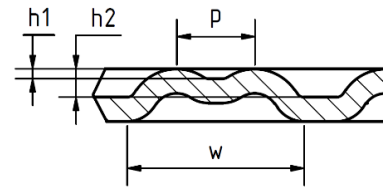


Abbildung 50: Soll / Ist Abgleich der Bipolarhalbplattengeometrien

Weiterhin wurde die Platte im Querschnitt untersucht (Abbildung 51), wobei die BPP orthogonal zum Flow-field mittels Fräsvorgang getrennt wurden. Hier zeigen sich Schwankungen in der generellen Plattendicke, was sich im Stacking immens auf die Kraftverteilung und das Leistungsverhalten auswirken kann. So zeigen Ausschussplatten in der Plattenmitte eine bis zu 20 % höhere Plattendicke als an den stirnseitigen Randbereichen.

Zudem können an einigen wenigen Platten ein immenser Verzug zwischen den aufsteigenden Flanken beobachtet werden. Letztlich sind scharfkantige innere Radien entlang der Kanalstruktur erkennbar (Abbildung 51, rot markiert). Die kleinen Radien innerhalb des Prägewerkzeugs von 0,1 mm sind demnach zu scharfkantig, um gleichmäßige Rundungen entlang der Beugung zu erzeugen. Eckige Übergänge, wie hier deutlich zu sehen, befürworten ein frühes Versagen der Platten. Aus diesem Grund war zu Beginn ein hoher Ausschuss an 100 cm² BPP zu verzeichnen, was lange Prozesszeiten und Wiederholungen zur Folge hatte.

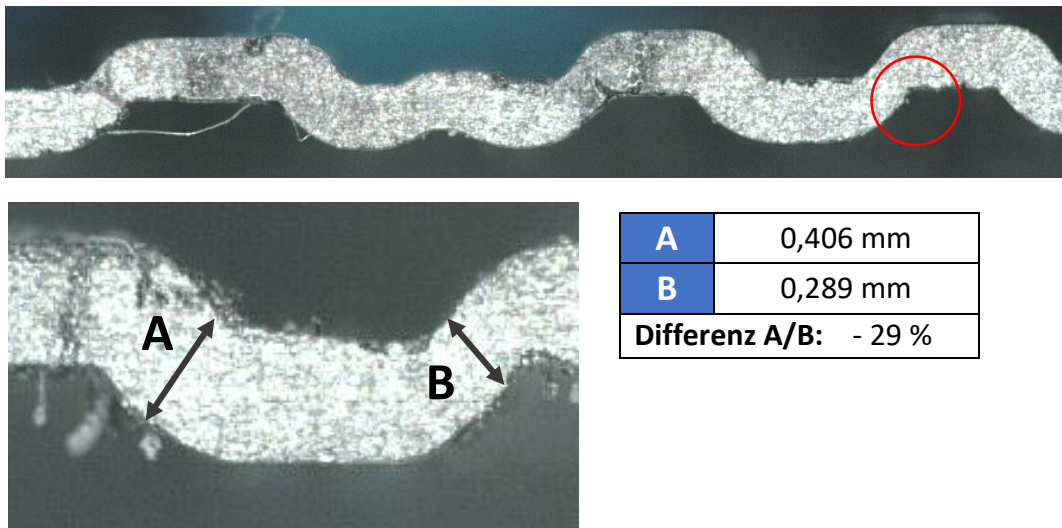


Abbildung 51: Querschnitt der geprägten 100 cm² BPP nach Schliff und Dichtungsapplikation: Prägeverformung

Im Verlauf des Projektes konnte die Formqualität somit zunehmend verbessert werden, jedoch waren nur begrenzte Anpassungen im Fertigungsprozess möglich. Aufgrund des hohen Risikos, die Form durch eine

Überarbeitung der Strukturen untauglich zu machen, wurde auf die Überarbeitung des Prägewerkzeugs verzichtet.

Weitere Werkzeugentwicklung

Für die Entwicklung des aktiven und kühlseitigen Dichtungskonzepts wurde eine Vakuumvorrichtung konstruiert und gefertigt, um während der Applikation der Dichtung sowie bei der Qualitätssicherung eine plane Oberfläche der BPP zu gewährleisten. Die Vakuumvorrichtung besteht aus einer Aluminium- und einer POM-Platte, die im späteren Verlauf miteinander verschraubt werden. Zusätzlich wird nachträglich eine lasergeschnittene Dichtung auf der POM-Platte in die Dichtungsuten geklebt, um die Portöffnungen der BPP während des Vakuumierens zu verschließen. Außerdem ermöglicht diese Vorrichtung, sowohl die aktive als auch die Kühlseite der BPP zu verspannen und erspart den zusätzlichen Fertigungsaufwand einer weiteren Vorrichtung. Die BPP werden am Vakuumtisch angesogen und die Silikondichtung mittels Dispenser aufgetragen.

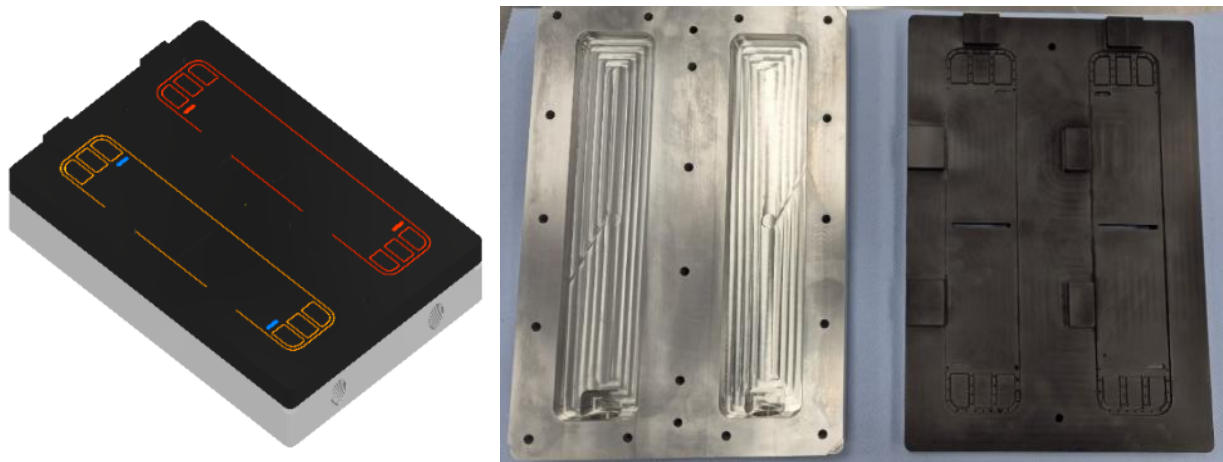


Abbildung 52: Konstruktion und angefertigte Vakuumvorrichtung zur Applikation von Dichtungen auf den Folien-BPP

Zudem wurden Adapterplatten für den ZBT internen Dichtprüfstand entwickelt, um die Tauglichkeit der BPHP und der Dichtung vor dem Stackeinsatz prüfen zu können.

1.6 Arbeitspaket 6: Brennstoffzellentest (ZBT, IVW)

Die Beschreibung von Arbeitspaket 6 ist in zwei Teile gegliedert: die einzellige Voruntersuchung (25 cm²) am Baltic-Prüfstand und die hochskalierte Short-Stack-Testung (100 cm²).

Die einzellige Voruntersuchung dient dazu, schnell Aussagen zu Materialkombinationen und Fasereinbettungen in einem vorgegebenen Zell-Design zu treffen, ohne dafür einen vollständigen Stack inklusive Endplatten, Medienverteilung etc. entwickeln zu müssen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen werden soweit möglich genutzt, um die Entwicklung und den Einsatz der 100 cm² Compound-Bipolarplatten zielgerichtet zu unterstützen.

Für die 100 cm²-Versuche sind zusätzlich zu den typischen Nachbearbeitungsschritten der BPP (Besäumen, Oberflächenbearbeitung, Dichtungsapplikation) die Planung, Konstruktion und Fertigung weiterer Stackkomponenten erforderlich. Parallel dazu wird eine geeignete Stacking-Vorrichtung entwickelt. Darauf folgen *Ex-situ*-Prüfungen der BPP, die Stackassemblierung und die *In-situ*-Prüfung des Stacks. Abschließend werden die Ergebnisse ausgewertet, interpretiert und verglichen.

Baltic-Versuch – 25 cm²

Für den Zellversuch der 25 cm² BPHP wird der Standard-Baltic-Versuchsaufbau qCF FC25 für die Anwendung dünnwandiger BPPs angepasst. Zu diesem Zweck werden auf der Anoden- und Kathodenseite jeweils Adapterplatten gefertigt, auf denen die strukturierten Proben platziert werden. Die Kombination aus Anoden- bzw. Kathoden-BPP und den entsprechenden Adapterplatten ist in Abbildung 53 dargestellt. Da die *In-situ*-Testung von beidseitig geprägten dünnwandigen Compound BPPs erstmals am ZBT durchgeführt wird, orientieren sich die Adapterplatten zunächst größtenteils dem derzeit verwendeten metallischen Testdesign. Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich bei der Einzelspannungserfassung an der Anode: Aufgrund der Einbausituation ist eine Messung an der herausstehenden Fahne, wie an der Kathode, nicht möglich. Stattdessen wird ein Leiter durch die Adapterplatte unter die anodenseitige BPP geführt. Die feinen Litzen des Leiters werden radial nach außen gebogen, um größtmöglichen Kontakt zur Probe herzustellen. Die Durchführung wird anschließend abgedichtet. Das Thermoelement wird seitlich in die Adapterplatte integriert. Der Testaufbau musste derart in mehreren Zyklen optimiert werden, bis eine robuste und reproduzierbare Vermessung möglich war, die den gewünschten Ergebnissen entsprach.

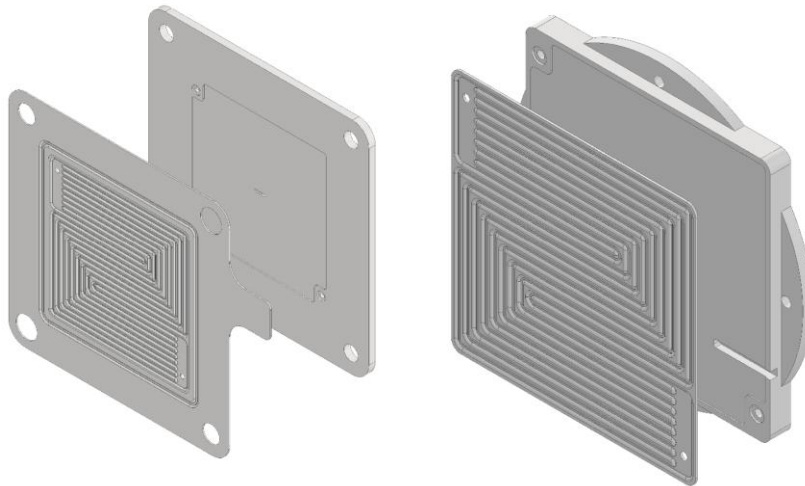


Abbildung 53: Baltic-Testversuch Aufbau; Kathode (links) und Anode (rechts)

Die heißgepressten BPP-Proben werden entsprechend den Anoden- bzw. Kathoden-Designs besäumt; dabei sind unterschiedliche Ausführungsmerkmale zu berücksichtigen, die das Verhalten im Zellbetrieb maßgeblich beeinflussen. Die Kathodenprobe wird großflächig auf der Adapterplatte positioniert und durch äußere Haltestege fixiert. Die Anodenprobe hingegen wird in einen Rahmen eingesetzt und über die äußeren Kanten geführt.

Aufgrund der Materialeigenschaften der dünnwandigen Compound-BPP treten im Betrieb mehrere mechanische und thermische Wechselwirkungen auf, die für die Auslegung und den Betrieb des Einzellars sowie für den späteren Stackbetrieb entscheidend sind. Die wichtigsten beobachteten Effekte sind im Folgenden beschrieben.

- Mechanische Verformung und Relaxation unter Anpressdruck
- Dichtungseinfluss auf Durchströmung und lokale Kompression
- Thermische Erweichung und lokale Wärmeabfuhr
- Änderung der elektrischen Kontaktfläche infolge Randbedingungen und Fixierung

Mechanische Verformung und Relaxation unter Anpressdruck

Beim Verpressen der Zelle wird die im Querschnitt wellenförmige Struktur der BPP entlang der Kontaktstellen orthogonal belastet. Übersteigt die aufgebrachte Anpresskraft die intrinsische Steifigkeit des Verbundmaterials (s. Seite 26), flacht die Kanalstruktur ab, wodurch das Material nach außen ausweicht. Dieser Effekt ist insbesondere auf der Anodenseite kritisch, da die Platte hier über die Kanten der Adaptierung geführt wird. Hier ist eine präzise Positionierung erforderlich, um Ports und Flowfield korrekt mit den angrenzenden Komponenten auszurichten. Damit konnten folgende kritische Bereiche identifiziert werden:

Zu geringer Spielraum: Die BPP verklemmt sich, wodurch lokale Biegespannungen an den Kanten entstehen. Diese führen zu Materialrissen, insbesondere entlang der dünnen Ränder in der Nähe der Gas-Ports (Abbildung 54, mitte).

Zu großer Spielraum: Die Platte kann nicht genau positioniert werden und verrutschen oder sich unkontrolliert ausweiten, was zu Undichtigkeiten (Bypässen) und einer Überdeckung der Gasports führt.



Abbildung 54: Anode im Rahmenelement vor Testung (links), nach Testung mit Bruch (mitte), mit Verstärkungselementen (rechts)

Zur Lösung des Problems wurden verschiedene Spielräume sowie indirekte Fixierungen zwischen BPP und Rahmen systematisch getestet. Auf diese Weise konnte ein optimaler Zuschnitt sowie eine optimale Platzierungstechnik identifiziert werden, wobei auf die Verwendung von Fremdmitteln (z. B. Kleber) verzichtet werden konnte.

Dichtungseinfluss auf Durchströmung und lokale Kompression

Die Reaktionsgase werden orthogonal durch den Zellrahmen und die Adapterplatten in die BPP geführt, bevor sie in den aktiven Zellbereich eintreten. Zur Gewährleistung der Dichtheit wird die BPP über einen O-Ring gegen das Adapterstück abgedichtet.

Aufgrund des Überstandes der BPP über den O-Ring wirkt der Strömungsdruck direkt auf die Plattenoberfläche. Dadurch kann sich im Bereich der Ports eine lokale Ausbuchtung („Vulkan“) bilden, die in die Gasdiffusionslage (GDL) hineinragt und den lokalen Druckabfall stark erhöht. Während der Gasdruck innerhalb der Strömungskanäle keinen wesentlichen Einfluss hat (s. Seite 26 f), ist der Druck an den engen Gasports von entscheidender Bedeutung.

Zur Minimierung dieses Effekts wurden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Verstärkungspunkte umlaufend um die Ports auf der BPP, um das Hochbiegen zu unterbinden (Abbildung 54, rechts).

- Angepasste Adapterplattengeometrie auf der Anodenseite, um eine ideale Druckverteilung in der Zelle zu erzielen (Änderung im Vergleich zum klassischen metallischen Testaufbau).
- Untersuchung verschiedener O-Ring-Konfigurationen (Härte & Größe), um eine leakagefreie Abdichtung bei gleichzeitiger Minimierung lokaler Spannungen zu erreichen.

Thermische Erweichung und lokale Wärmeabfuhr

Mit steigender Betriebstemperatur nimmt die mechanische Stabilität des Verbundwerkstoffs ab. Dies führt zu einer Zunahme der zuvor beschriebenen Effekte – insbesondere dem lokalen Nachgeben unter Anpressdruck und der Verformung im Portbereich. Durch Variation von Temperatur und Anpresskraft konnten die kritischen Grenzparameter und Betriebspunkte identifiziert werden, bei dem die Stabilität des Materials und die Dichtheit der Zelle gewährleistet bleiben, ohne die elektrische Kontaktierung oder den Gastransport signifikant zu beeinträchtigen.

Nach Umsetzung der oben genannten Optimierungsmaßnahmen konnten sowohl zwei Referenzmessungen mit unmodifizierten BPPs als auch zwei Messungen mit faserverstärkten Varianten erfolgreich durchgeführt werden. Die folgenden Ergebnisse (IU-Kurven und Druck-Strom-Verläufe) zeigen den Einfluss der Materialmodifikation auf den Zellbetrieb.

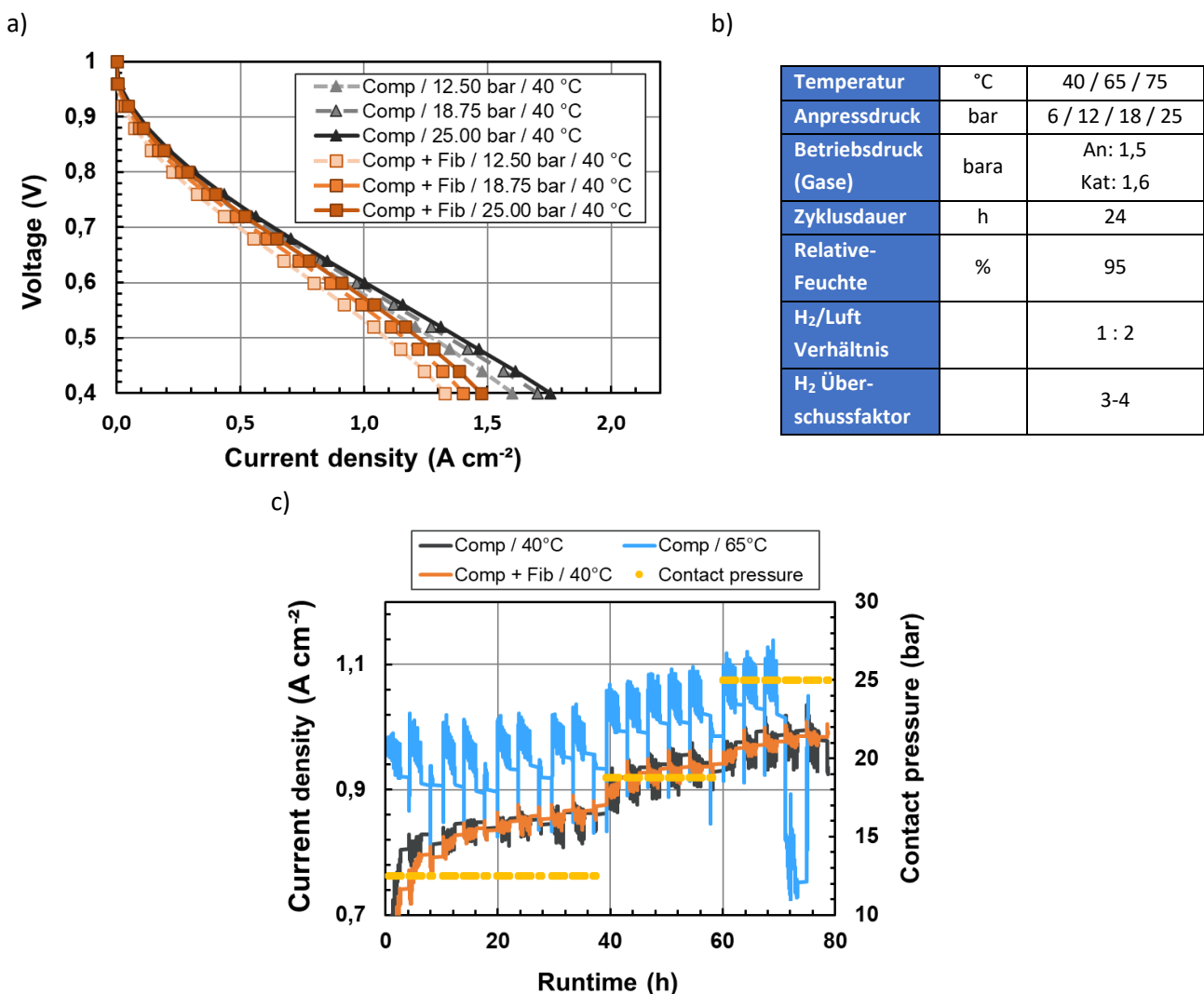


Abbildung 55: *In-Situ* Baltic Testing: a) jU-Kurve zu Referenz und Faserversuchen Verlauf der Stromdichte @0,6 V über den Versuchsverlauf bei ansteigender Anpresskraft

Jeder Versuch wird bei einer festgesetzten Temperatur und einem Gasdruck durchgeführt. Der Gasdruck sowie einige weitere Randbedingungen zur Gewährleistung der Teststandsicherheit werden in einer Vorab-Untersuchung gezielt auf das BPP-Design eingestellt. Variiert wird innerhalb eines Versuchs ausschließlich die Anpresskraft auf die BPP, sodass die Belastung sukzessiv eindimensional auf die BPP erhöht wird. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen werden Materialien mit Verschleiß oder elektrochemischer Degradation wie dichtende Komponenten oder die Membran-Elektroden-Einheit nach jedem Versuch erneuert.

Zelltests zu Beginn der Versuchsreihe bei geringer Temperatur zeigen sowohl für das reine Compound als auch für das faserverstärkte Design stabile Stromdichte-Verläufe. Bei einem Anstieg der Temperatur auf 65 °C versagt das Referenz Material bei maximaler Anpresskraft. Innerhalb der Druckanalyse ist bereits vorab ein ansteigender Trend der Druckverluste erkennbar, die auf ein Abbrechen des Versuches hinweisen. Als Ursache für das Versagen wird der Zellaufbau identifiziert, welcher bei minimalem Nachgeben des Materials kritische Scherspannung auf das Material ausübt. Versuche bei höheren Temperaturen waren demnach nicht durchführbar. Hierfür wurde die bereits angesprochene Überarbeitung der Adapterplatte durchgeführt.

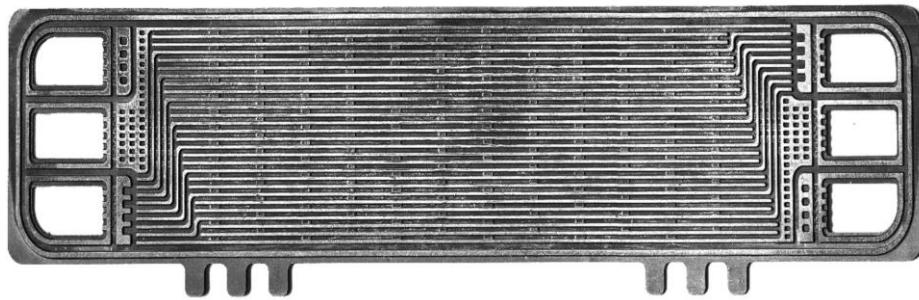
Weiterhin brach das Fasermaterial beim 65 °C Versuch innerhalb der Fasereinbettung und kann aufgrund fehlender Ersatzmaterialien nicht weiter - oder erneut - vermessen werden.

1.6.2 Short-Stack-Versuch – 100 cm²

Bipolarplattenzuschnitt und Stackingprozess

Der Außenbeschnitt der BPP ist der wesentliche Aspekt in der Vorbereitung des Brennstoffzellentests. Die Arretierung der Zellkomponenten im Stackingprozess basiert auf einen stirnseitigen L-Anschlag. Für eine präzise Ausrichtung der BPP muss eine primäre Kontaktierung der Platten mit dem Arretierungselement sichergestellt werden. Aus diesem Grund werden die BPP im Vergleich zu den übrigen Stackkomponenten umlaufend 200 µm größer gefertigt. Dieser Schritt umgeht die Problematik, dass Fertigungstoleranzen von Endplatten, Medienverteiler und BPP bei gleichen Außenmaßen dazu führen können, dass die BPP keinen Führungskontakt erhält. Damit Endplatte und Medienverteiler dennoch individuell präzise platziert werden können, werden im Stackingprozess Endmaße genutzt, um einen indirekten Kontakt herzustellen und die künstlichen Größendifferenzen auszugleichen.

a)



b)

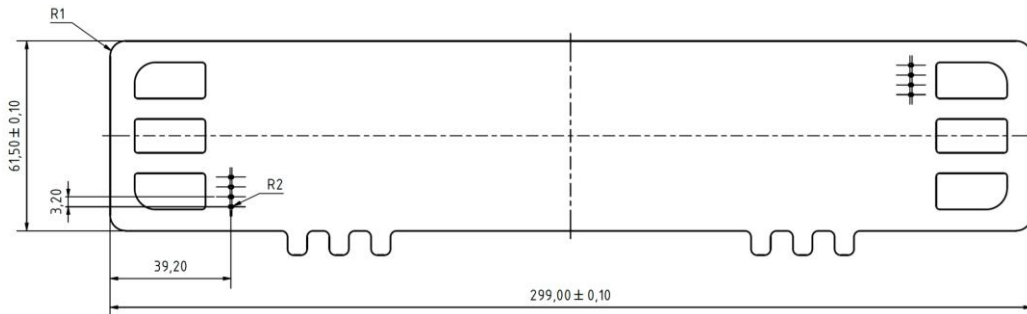


Abbildung 56: Besäumte bipolare Halbplatte; a) nach Besäumung und Schleifprozess; b) als schematische Darstellung mit wesentlichen Abmessungen

Basierend auf diesem Design werden die Stackkomponenten (Endplatte, Medienverteiler, MEA) und die Vakuumvorrichtungen für die Nachbereitung (Besäumung, Dichtungsapplikation) der BPHP angefertigt. Nach der Besäumung werden die Platten einem händischen Schleifprozess unterzogen, wobei die oberflächliche Polymerschicht entfernt wird. Dieser Standardprozess reduziert den Kontaktwiderstand der BPHP und steigert die Performance des BZ-Stacks (s. Seite 9 ff.).

Fertigung der Stackkomponenten

Zusätzlich zu den BPHP werden die weiteren benötigten Komponenten des BZ-Stacks gefertigt (Abbildung 57)

Pos.	1	2.1	2.2	3	4	5
Bezeichnung	Endplatten	Medien-verteiler	Isolations-platte	Strom-abnehmer	GDL	MEA
Anz.	2	1	1	2	-	-
Material	Aluminium 6061	POM	POM	Kupfer (galvanisiert)	-	-



Abbildung 57: Darstellung der gefertigten Stackkomponenten für den 100 cm² Short-Stack

Die Stackkomponenten werden ohne BPP verpresst und mittels Druckpapiers auf Inhomogenitäten oder derartige Artefakte bei unterschiedlichen Anpresskräften geprüft.

Dichtungsentwicklung/Applikation

Mit der Fertigstellung der Vakuumvorrichtung für die Dichtungsapplikation (AP 4) wurde mit der Entwicklung der Dichtungen begonnen. Dabei wird zwischen zwei Entwicklungsrichtungen unterschieden. Aktivseitig wird sowohl auf der Anode als auch auf der Kathode Dichtungsmaterial aufgetragen. Kühlseitig zwischen den BPHP wird ausschließlich auf der Anode eine sehr feine Dichtung entwickelt (Abbildung 58).

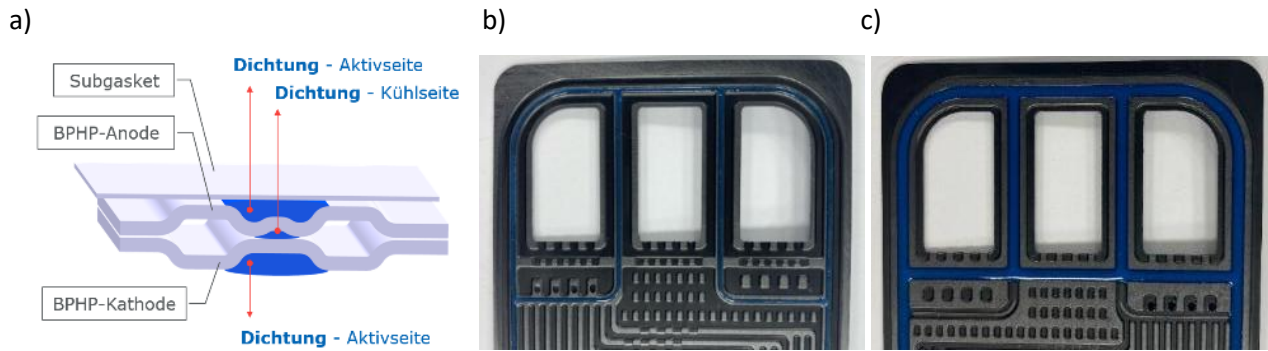


Abbildung 58: Dichtungskonzept; a) Querschnittsdarstellung des assemblierten Zellpaares; b) Dichtung Anode Kühlseite; c) Dichtung Anode Aktivseite

Zuvor wurden jedoch mittels CAM-Software die Dichtungsnutbahnen aus den CAD-Daten der BPP auf die Dispenseranlagen übertragen, um das Dispensieren entlang der Bahnen zu ermöglichen. Da die Platten jedoch durch den Fertigungsprozess einen leichten Verzug aufweisen und somit nicht exakt mit den CAD-Daten übereinstimmen, mussten die importierten CAM-Daten in der Dispenseranlage zusätzlich an die realen Geometrien der BPHP angepasst werden. Dies stellte sicher, dass die Dosierung stets exakt innerhalb der Dichtungsnut erfolgt.

Den Start der Dichtungsentwicklung bildete die Kühlseite der Anoden-BPHP. Hier wird die Dichtung plan („auf Null“) verpresst, da sie über einen Steg direkt gegen die gegenüberliegende Hälfte der BPHP gepresst wird, um eine effektive Abdichtung zu erzielen. Um eine Verpressung auf null in einer schmalen Dichtungsnutbreite von $970\text{ }\mu\text{m}$ und Tiefe von $120\text{ }\mu\text{m}$ realisieren zu können, muss das Dichtungsmaterialverhalten als auch die Dichtungshöhe optimiert werden.

Die Viskosität sowie das thixotrope Fließverhalten des Dichtungsmaterials müssen beim Applizieren exakt abgestimmt werden, damit das Material beim Dispensieren formstabil in der schmalen Nut verbleibt, ohne zu verlaufen oder die Nut zu überfüllen. Ein stark thixotropisches Verhalten ist erwünscht.

Neben dieser Formstabilität ist gleichzeitig ein definiertes Fließverhalten erforderlich, damit an T-Verbindungen (Abbildung 60)), also an Übergangsstellen zwischen dem Anfang oder Ende einer Dichtbahn und einer bereits applizierten Dichtung, ein kontrolliertes Verschmelzen der Materialverläufe möglich ist. Auf diese Weise kann die BPP kompakter gestaltet und beispielsweise Toträume vermieden werden.

Diese Anforderungen stellen eine der zentralen Herausforderungen bei der Umsetzung einer sehr dünnen Dichtung in Kombination mit einer Nullverpressung dar. Sie konnten durch die gezielte Anpassung des Dichtungsmaterials mithilfe geeigneter Additive und dünneren Dosiernadeln erfolgreich gelöst werden.

Die Dichtungshöhe wurde in mehreren Iterationsschritten optimiert, indem sowohl die Programmierung der Dispenseranlage angepasst als auch Kraftabdruckfolien eingesetzt wurden. Ziel war es, eine gleichmäßige Kraftverteilung über die gesamte Dichtkontur zu gewährleisten. Durch die gezielte Findung und Einstellung geeigneter Prozessparameter, insbesondere der Dosiermengen und Dosierhöhen, konnte eine Dichtung für die Kühlseite erfolgreich entwickelt und appliziert werden. Anschließend wurden die Dichtungsnuthöhen vermessen. Die Messergebnisse zeigen eine mittlere Höhe von $48\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Toleranz von $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$.

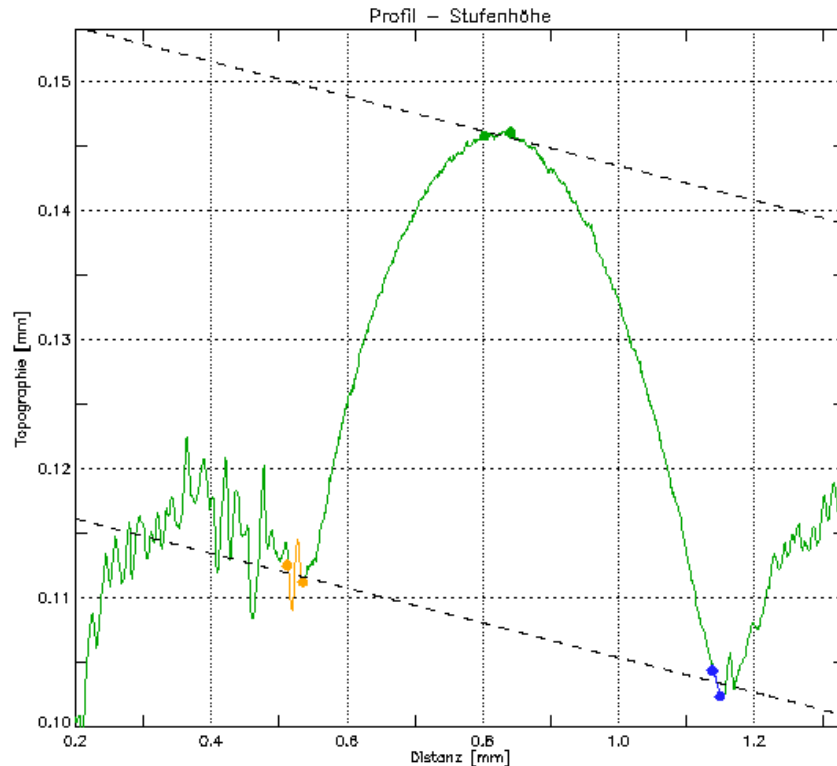


Abbildung 59: Höhenmessung der Kühldichtung mittels FRT (Höhe = 39 μm)

Nach der Entwicklung der Dichtung auf der Kühlseite der Anoden-BPHP wurde mit der Dichtung auf der Aktivseite der Anode als auch der Kathoden-BPHP begonnen (siehe Abbildung 60).

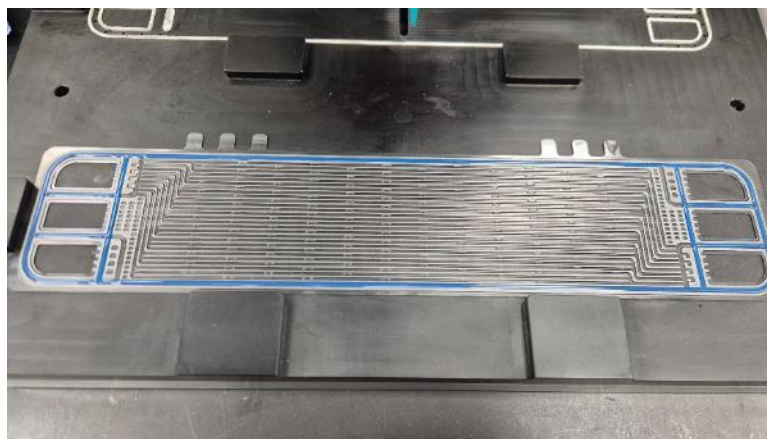


Abbildung 60: BPHP in Vakuumvorrichtung zur Dichtungsapplikation der Aktivseite

Auch für die Aktivseite wurde zunächst die Viskosität sowie das thixotrope Fließverhalten des Dichtungsmaterials gezielt angepasst. Da die Dichtungsnutbreite mit etwa 1,8 mm deutlich breiter ist als auf der Kühlseite, musste das Material ein verbessertes Fließverhalten aufweisen, um die Nut gleichmäßig mit der gewünschten Dichtungshöhe zu befüllen. Diese wurde durch die Anpassung des Materials für die Aktivseite erfolgreich erzielt.

Eine weitere Herausforderung stellt, wie bereits auf der Kühlseite, die Ausbildung von T-Verbindungen dar. Dabei wird eine bereits applizierte Dichtung mit einer weiteren Dichtbahn verschmolzen, um eine durchgängige Abdichtung zu gewährleisten. Für eine prozesssichere Umsetzung ist eine präzise Anpassung der Start- und Stoppbereiche beim Dosieren erforderlich. Zudem müssen die Dosierparameter speziell für die T-

Verbindungen entwickelt und optimiert werden, um eine homogene Verbindung ohne Materialüberlappung zu realisieren.

Für die Aktivseite ergeben sich zwei unterschiedliche Entwicklungen, da die Dichtnuttiefe für die Anodenseite 230 µm und für die Kathodenseite 350 µm unterschiedlich sind. Dabei ergeben sich für jede Seite unterschiedliche Dosierparameter, die entwickelt und finalisiert wurden.

Nach Abschluss der Dichtungsentwicklung wurden die Dosierprogramme für die Applikation der Dichtung auf mehrere BPHP eingesetzt. Aufgrund von fertigungsbedingtem Plattenverzug waren jedoch weitere Anpassungen an den Dosierprogrammen erforderlich, um eine präzise und reproduzierbare Applikation sicherzustellen.

Tabelle 6: Dichtungshöhe über dem Steg

	Soll (µm)	Ist (µm)
Aktivseite	200 bis 240	160 bis 220
Kühlseite	40 bis 56	38 bis 58

Stackassemblierung & Teststandintegration

Wesentliche Kenngröße in der Stackassemblierung ist die benötigte Kraft zur Komprimierung der Dichtung auf das Nennmaß, als Mindest-Verspannkraft ist im Falle des 100 cm²-Stacks 13,6 kN berechnet worden. Vor der Assemblierung wurden Kraftabdrücke mittels zwei-Komponenten Druckfolie aufgenommen, um eine sichere Kontaktierung und homogene Kraftverteilung im Zusammenspiel mit den weiteren Zellkomponenten nachzuweisen.



Abbildung 61: Kraftabdruck bei 20 kN Anpresskraft zwischen BPHP und MEA

Vorlaufende Untersuchungen zeigten, dass die komplexe Anoden-Dichtnut die Schwachstelle im System darstellt. Anpresskräfte über 15 kN haben bei vereinzelt Proben Brüche hervorgerufen. Somit wird die Verspannkraft im Stackingprozess sukzessiv erhöht, bis die Mediengänge bei einem Druck von 0,6 barg Luftdruck dicht getestet werden können. Tabelle 7 zeigt den Soll-Ist-Vergleich der präparierten Systeme und deren Komponentendicke im Vergleich vom unkomprimierten zum komprimierten Zustand.

Tabelle 7: Komprimierung der Zellkomponenten

Pos.	Bezeichnung	Anz.	Soll (mm) unkomprimiert	Ist (mm) unkomprimiert	Ist (mm) komprimiert
1	BPP	2	0,4	0,42 - 0,45	0,42 - 0,45
2	Flowfield	2	0,35	0,36 – 0,40	0,35 – 0,39
3	Dichtung (Kühlseite)	2	0,05	~ 0,05	0,0
4	Dichtung (Aktivseite)	1	~ 0,28	~ 0,25	~ 0,15
5	Subgasket	1	0,1	0,1	0,1
6	Membran	1	0,02	0,02	0,02
7	GDL	1	0,2	0,2	0,14
Gesamt			2,04	~ 2,29	~ 2,03

Die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Komponenten benötigen ein präzises System, welches die Arretierung ermöglicht. Zur Erreichung der Genauigkeit werden zwei L-Konsolen auf einer Platte montiert, wobei ein Teil in x-Richtung verschiebbar bleibt und somit an den Stack herangeführt werden kann. Endplatte und Isolationsplatte werden mittels Endmaß um 200 µm erweitert, sodass auch diese Komponenten kein Spiel im Aufbau finden.

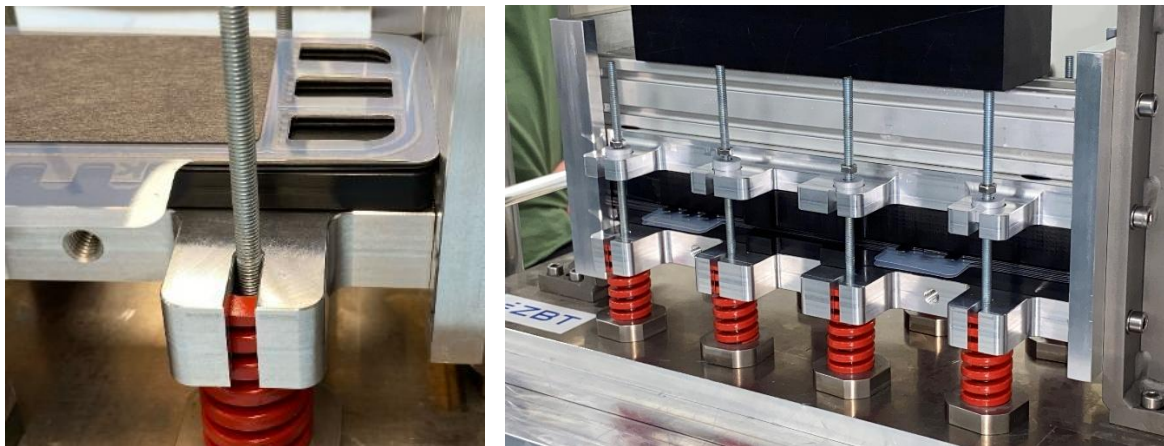


Abbildung 62: Stackingprozess: Positionierung der BPHP und MEA sowie Verspannung in der Stapelvorrichtung

Aufgrund eines hohen Ausschusses der geprägten BPHP als auch vermehrter Bruchraten in der Nachbereitung konnte zunächst nur ein zwei-zelliger Shortstack erfolgreich assembliert werden. Nach Testung der Dichtigkeit aller Mediengänge (H₂, Luft, Kühlwasser) bei 0,6 barg Luftdruck folgt die Integration des Stacks in den Teststand. Hierfür werden die Aufhängung, die Medienanschlüsse sowie die Einzelspannungserfassung angepasst und montiert (Abbildung 63).



Abbildung 63: BZ-Shortstack Integration in den Teststand (links) und CVM-Anschluss über Flachstecker (rechts)

Brennstoffzellenversuch

In einem ersten Versuch zeigt der Zwei-Zeller nach ca. 24 h Betrieb eine Leckage im Kühlweg. Aufgrund der intrinsischen Entspannung des Stacks durch Erwärmung und Bewegung, kann es notwendig sein den Stack nachzuspannen. Zwar war der Stack nach dem Betrieb merklich gelockert, ein Nachspannen erzielte in diesem Fall jedoch keine Verbesserung. Innerhalb der Versuchszeit konnte eine Strom-Spannungskurve (IU-Kurve) aufgenommen werden.

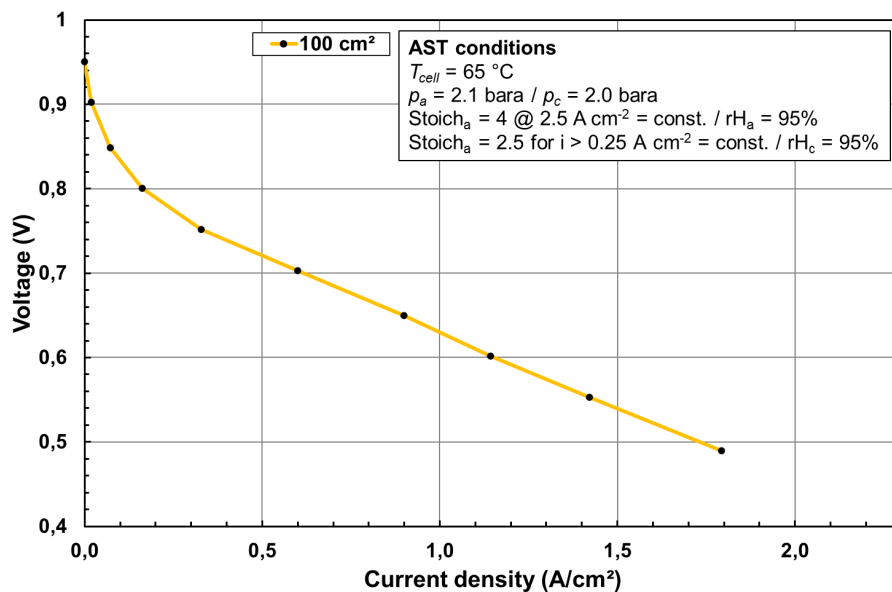


Abbildung 64: jU-Kurve 100 cm² Short Stack nach 24 h Betrieb

Post mortem Untersuchung

Die Post-mortem Untersuchung der BPHP zeigt einen Bruch der Anoden entlang der Dichtnut (Abbildung 65). Auffällig ist dabei, dass der Bruch nur entlang der Längskante eintritt, dort wo das Material aufgrund des parallelen geradlinigen Flowfields am meisten Verzerrung erfährt. Weitere optische Untersuchungen zeigen, dass die bereits identifizierte Dickendifferenz zwischen den auf- und absteigenden Flanken weiterhin besteht und eine mechanische Schwachstelle darstellen.

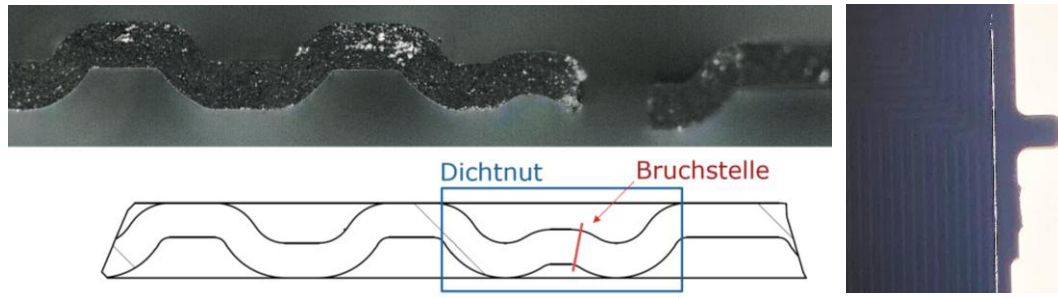
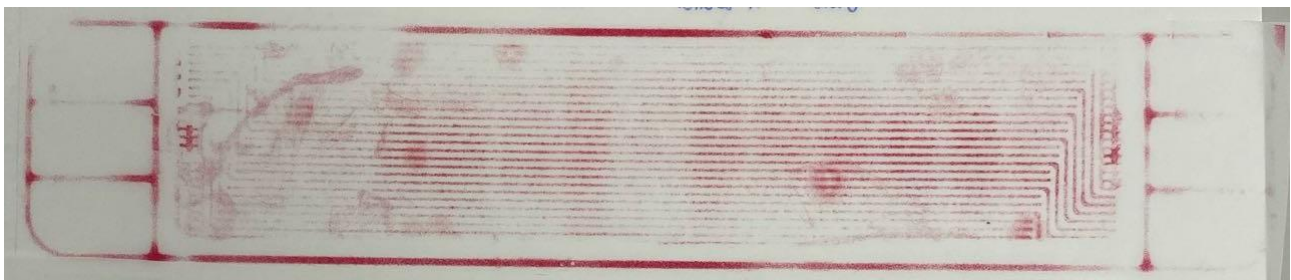


Abbildung 65: Querschnittsbild der geprägten 100 cm² BPP nach Schliff und Dichtungsapplikation: Bruchstelle nach Kompression und Zellbetrieb

Mit dem Versagen des ersten Versuches wird ein neuer Stack gestapelt, wobei BPP aus leicht abweichenden Mischverhältnissen nachgeprägt wurden. Die BPP sind damit flexibler und sollen den Höhenunterschieden besser anpassbar sein. Weiterhin wurde die kühlseitige Dichtungshöhe im zweiten Anlauf von ca. 100 µm auf 40 µm Überstand verringert, um Risiken von Spannungen und Überquellungen von Dichtungsmaterial in der Dichtnut signifikant zu verringern. Der neue zwei-zellige Shortstack zeigte bis zu einer Anpresskraft von 10 kN erwartbare Undichtigkeiten. Mit einer Anpresskraft von 12 kN wurde der Stack zur Kontrolle erneut geöffnet und die selbigen Bruchstellen wie zuvor identifiziert.

In einem letzten dritten Anlauf wurde auf die zweite Variante des Dichtungskonzeptes gesetzt, wobei zwei anodenseitige BPHP – also jeweils mit gewellter Doppelnut für die Dichtung – für eine Vollplatte verwendet werden. Ziel war es mehr Raum für das Dichtungsmaterial zu schaffen, mit dem Risiko, dass nun beide BPHP potenzielle Bruchschachstellen besitzen. In diesem Setup wurden die Anpresskräfte schrittweise (5 / 7 / 9 / 11 / 13 [kN]) innerhalb des Stacks in unterschiedlichen Konfigurationen mittels Druckpapier analysiert. Abbildung 66 zeigt exemplarisch die Ergebnisse bei 9 kN Anpresskraft.

a) BPP vs. Medienverteiler + Stromabnehmer



b) BPP vs. BPP



Abbildung 66: Kraftabdrücke der 100 cm² Folie bei 9kN Anpresskraft: a) Zwischen BPP Randplatte und Medienverteiler/Stromabnehmer; b) Zwischen benachbarten BPP (BPP jeweils aus „Anoden“ und „Kathoden“ Design)

Mithilfe der Untersuchung soll festgestellt werden, ob trotz individueller, ausgleichender Dichtungsapplikation aufgrund von Dickenabweichungen wesentliche Inhomogenitäten oder schädliche Spannungen innerhalb der Zelle auftreten. Die Ergebnisse der BPP vs. Medienverteiler zeigen, dass sowohl bei geringen als auch hohen Anpresskräften eine Dominanz in der Mitte der BPP und entlang der T-Stücke besteht. Die stirnseitigen Randbereiche erfahren deutlich weniger Kompression. Lokale Druckspitzen erhöhen das Bruchrisiko immens. Im Gegensatz dazu ist die Kraftverteilung zwischen zwei angrenzenden BPP deutlich homogener, da sich die Dichtungen hier flexibel gegeneinander komprimieren. Dennoch ist auch hier ein Druckgradient entlang des Flowfields sichtbar.

Aufgrund der mangelnden Zeit und der immensen Dauer der identifizierten notwendigen Überarbeitungsschritte wurde die weitere In-situ-Testung im Stack gestoppt. An dieser Stelle wurden generelle Überlegungen zur Verbesserung der Fertigungsschritte angestellt. Aufgrund der begrenzten Projektdauer können diese jedoch nicht fortgeführt werden.

2 Verwendung der Zuwendung

Forschungseinrichtung 1 – Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH – ZBT

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
- Es wurden über den Zeitraum vom 01.07.2022 – 30.06.2025 wissenschaftliche Mitarbeiter mit 23,48 Personenmonaten (HPA-A) und 0,064 Personenmonaten (HPA-B), technische Mitarbeiter mit 4,618 Personenmonaten (HPA-C) und 8,142 Personenmonaten (HPA-E) und wissenschaftliche Hilfskräfte (HPA-D) mit 6,55 Personenmonaten beschäftigt.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Ausgaben für Geräte wurden nicht beantragt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Ausgaben für Leistungen Dritter wurden nicht beantragt.

Forschungseinrichtung 2 – Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH – IVW

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - Es wurden über den Zeitraum vom 01.07.2022 – 30.06.2025 wissenschaftliche Mitarbeiter mit 26,08 Personenmonaten (HPA-A), technische Mitarbeiter (HPA-E) mit 6,49 Personenmonaten und wissenschaftliche Hilfskräfte (HPA-F) mit 2,69 Personalmonaten beschäftigt.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Ausgaben für Geräte wurden nicht beantragt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Ausgaben für Leistungen Dritter wurden nicht beantragt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Aufwendungen für das Personal waren für die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse notwendig. Der Personaleinsatz entsprach dabei weitgehend dem Arbeitsplan aus dem Projektantrag und war angemessen und notwendig.

Aufgrund von Einschränkungen durch die Corona-Pandemie bzgl. der Labor- und Technikumsarbeit, sowie Lieferverzögerungen auch durch den Ukraine-Krieg, waren die Arbeiten an dem Projekt zu Beginn nur eingeschränkt möglich. Es wurden in 2022 am ZBT wesentlich weniger Personenmonate gebucht als in der ursprünglichen Projektplanung angedacht. Der Arbeitsstand beider Forschungsstellen konnte in 2023 trotz intensivierter Arbeiten nicht aufgeholt werden, weshalb im Januar 2024 eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 12 Monate beantragt wurde. Die Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 30.06.2025 wurde bewilligt.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Materialhersteller wie AFPT, fiberior GmbH, Easicomp GmbH haben durch das Projekt Hinweise auf die nötige Werkstoffeigenschaften erhalten, die zur Teilhabe am Brennstoffzellen-Markt erforderlich sind. Maschinenbauunternehmen wie ASH Automation Steeg & Hoffmeyer und IngAMPro erhielten einen Einblick in die Anwendung, um Maschinen für diesen Markt anzubieten, wobei sie durch das Projektwissen eine Markteintrittserleichterung erfahren haben. Firmen mit Simulations-Schwerpunkt wie Math2Markt und Intelligent Simulation können durch ihre Produkte/Entwicklungsleistungen Werkstoff- und Bauteilentwicklungen gezielter und fundierter vorantreiben. Graphitlieferanten, wie die im PA vertretenen Firmen Georg H. Luh GmbH, Graphit Kropfmühl GmbH und Imerys Graphite and Carbon, erhielten zusätzliches Know-how hinsichtlich der Vor- und Nachteile verschiedener Graphite, speziell der Partikelgrößen und Morphologien.

Der Halbzeughersteller Centroplast, der Bipolarplatten-Lieferant Eisenhuth und der Compoundeur Ensinger, erlangten fachkundiges Wissen über die Einflüsse der Extrusionsparameter und die verwendeten Rohstoffe auf die physikalischen Eigenschaften der Compounds bzw. der späteren hochgefüllten Bipolarfolien.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die erzielten Projektergebnisse ließen sich nur durch die Beteiligung des PA erzielen. Durch den intensiven Austausch mit den Firmenvertretern bei den vier PA-Treffen, konnten Lösungen gefunden und Fortschritte erzielt werden. Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich direkt bei den Unternehmen umsetzen und dienen der eigenen Weiterentwicklung. Der Einsatz von Kohlefasern in den Compound-Bipolarfolien erschließt neue Märkte für die CBF-Hersteller und Distributoren.

Der voraussichtliche Nutzen der Forschungsergebnisse für KMU liegt in den Bereichen:

- Energietechnik, rationale Energieumwandlung, Energieeffizienz
- Fertigungstechnik
- Erneuerbare Energien
- Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Nr.	Ziel	Rahmen	Datum, Zeitraum	Bemerkung
Publikation der Projektinformationen auf der jeweiligen Homepage IVW / ZBT + social Mediakanäle	1	Bekanntmachung der Projektinhalte, des Förderträgers, der Laufzeit und von Ergebnissen	Homepage des IVW und ZBT sowie über social Media wie twitter, Linked In	Ab Laufzeitbeginn	Seit 02/2023 auf ZBT Homepage Seit 03/2023 auf IVW Homepage; aktualisiert 01/2024 Linked In-Post online seit 03/2024

					Linked In-Post online seit 09/2024
Pressemitteilung zum Projektstart	2	Informationstransfer zur breiten Öffentlichkeit	Versch. Zeitschriften der Branche	Ab Laufzeitbeginn	IVW Jahresberichte 2022, 2023 & 2024
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	3	Vorstellung und Diskussion aktueller Projektergebnisse und Abstimmung mit PbA	Projekttreffen am IVW oder ZBT	4 x während der Projektlaufzeit	1. PA-Sitzung am 06.12.2022 mit 17 Teilneh. 2. PA-Sitzung am 29.11.2023 mit 20 Teilneh. 3. PA-Sitzung am 17.09.2024 mit 14 Teilneh. 4. PA-Sitzung am 06.05.2025 mit 11 Teilneh.
Workshop „AiF-Brennstoffzellen-Allianz“ des ZBT	4	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen	Vortrag und Poster zu den laufenden Projektarbeiten	2023 und 2024	Noch nicht erfolgt
Vorstellung der Ergebnisse auf versch. Veranstaltungen (SKZ-Fachtagung, Polymer Processing Society Europe)	5	Information eines breiten Fachpublikums zu den Zielen und Ergebnissen des Projektes	Vortrag Polymer Testing World	2023 und 2024	14/ 15.06.2023
Vorstellung der Ergebnisse		Information für ein breites Publikum aus anderem Herstellungsbereich	Innovationsforum Spritzgießen in Villingen-Schwenningen	03.04.2025	Zusätzliche Ausstellung von Folienmustern auf Table-Top
Vorstellung des Projektes auf Stand der K-Messe	6	Informationstransfer für interessierte Fachleute	Düsseldorf	Oktober 2022	Erste Folienexponate auf Messestand von 19.10.-26-10.2022
Vorstellung des Projekts auf der Compounding World			Essen	Juni 2023	14/ 15.06.2023 Folienmuster auf Messestand
Vorstellung des Projekts auf der hycell Messe			Stuttgart	September 2023	Folienmuster auf Messestand
Vorstellung des Projekts auf der Hannover Messe			Hannover	April 2024	Folienmuster auf Messestand
Vorstellung des Projekts 9. Marktplatz Zulieferer „Brennstoffzellenproduktion - Von der Innovation auf den Markt“			Berlin	September 2024	Strukturierte Folienmuster

Vorstellung des Projekts auf der hy-fcell Messe Vorstellung des Projekts auf SKZ Tagung „Kunststoffe in Brennstoffzellen & Elektrolyse“ Vorstellung des Projekts auf der JEC Vorstellung des Projekts auf der Hannover Messe Vorstellung des Projekts auf der K-Messe			Stuttgart Duisburg Paris Hannover Düsseldorf	Oktober 2024 November 2024 März 2025 März/ April 2025 Oktober 2025	Strukturierte Folienmuster auf Messestand Strukturierte Folienmuster auf Tabletop Gespräche am Messestand Strukturierte Folienmuster auf Messestand Faserverstärkte strukturierte Folienmuster auf Messestand
Vortrag und Paper bei der CGEE 2023 in Ankara 9. Marktplatz Zulieferer „Brennstoffzellenproduktion - Von der Innovation auf den Markt“ Poster auf der Hydrogen Energy Symposium Vortrag & Poster auf dem Hydrogen Energy Symposium	7	Wissenstransfer innerhalb der Wissenschaft	Vortrag/Paper Poster Poster Poster/Vortrag	August 2023 Februar 2024 September 2024 Oktober 2024/ November 2025	Vorstellung des Projekts Paper in Journal of Energija (JOE) veröffentlicht 9. Marktplatz Zulieferer „Brennstoffzellenproduktion - Von der Innovation auf den Markt“ Hydrogen Energy Symposium Hydrogen Energy Symposium
Akademische Lehrveranstaltungen	8	Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse in Lehrveranstaltungen	Mitarbeit studentischer Hilfskräfte im Projekt	fortlaufend	Mitarbeit von stud. Hilfskräften
Information von Verbänden	9	Institutionalisierter Know-how-Transfer an interessierte Firmen durch Verbände z. B. GKV, TecPart e.V., VDMA	Gezieltes Informieren der Repräsentanten der Verbände zum Stand der Arbeiten	fortlaufend	Noch nicht erfolgt
Information und Beratung interessierter Unternehmen	10	Direkter Know-how-Transfer zu Unternehmen, vornehmlich KMU	Information von interessierten Unternehmen außer- und innerhalb des PA	fortlaufend	Gespräche mit Unternehmen zur Extrusion von BPP sind gelaufen

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Das Projekt und seine Ergebnisse sollen weiterhin auf regionalen, nationalen und internationalen Messeauftritten wie z.B. der JEC dargestellt und mit entsprechenden Firmen besprochen werden. Darüber hinaus soll ein Transfer des Projektwissens über IVW-Aktivitäten (Arbeitskreise, Thementage, ...) in Industrieverbänden wie Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK) und Composites United e.V. (CU) erfolgen.

Das ZBT stellt die hergestellten Bipolarfolien auf internationalen Messen wie der K-Messe aus und präsentiert die Forschungsergebnisse u.a. auf der gemeinsam mit dem SKZ veranstalteten Tagung „Kunststoffe für Brennstoffzellen und Elektrolyse“.

Die Umsetzbarkeit der geplanten Transfermaßnahmen wird aufgrund der bisherigen Erfahrungen als sehr hoch eingeschätzt.

Abseits davon wurde ein Folgeprojekt beantragt, um mit einer anders gedachten Faserverstärkung näher an eine industrielle Umsetzbarkeit heranzukommen. Auch hier sind ähnliche Transfermaßnahmen wie in diesem Projekt geplant.