

# Abschlussbericht BWPLUS

## HoFeM

### Hochratenfähige Fertigung von Medien- und Bipolarplatten

von

Werner Volk  
Optima Life Sciences GmbH

Dr. Steffen Wieland  
Business Excellence Solutions GmbH

Förderkennzeichen: L7524117-118

Laufzeit: 05.04.2024 – 31.12.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Februar 2025



**Baden-Württemberg**  
**Ministerium für Umwelt, Klima**  
**und Energiewirtschaft**

## Kurzfassung

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft als wichtiger Beitrag zur erforderlichen Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen, bedarf in kurzer Zeit den Aufbau von Wasserstofferzeugern sowie auch den Aufbau von Wasserstoffumwandlern wie Brennstoffzellen. Dadurch wird sich in nächster Zeit die Industrie mit der Herausforderung konfrontiert sehen, in kurzer Zeit kostengünstige und qualitativ hochwertige Produkte für diese Bereich produzieren zu können. Für die Herstellung einer Funktionseinheit müssen eine Vielzahl von Medien- oder Bipolarplatten gestapelt und zu einem Stapel (Stack) verbunden werden. Sollen aber die Kosten niedrig gehalten werden, müssen so viele Bauteile wie möglich auf schnell produzierenden Anlagen hergestellt werden.

Auf einer bestehenden (Projekt HyFlex) flexiblen Fertigungsanlage für die Herstellung von Membraneinheiten wie auch deren Systemkomponenten (z.B. Befeuchter) konnten neben den Membranen auch die Medienplatte auf dieser bahnverarbeitenden Anlage hergestellt werden. Hierfür wurden die schnellen Rolle-zu-Rolle- und Rolle-zu-Piece-Prozesse für die Herstellung der Medienplatten in bahnverarbeitenden Fertigungsprozessen genutzt. Es konnte Kunststoffbasismaterial aus zwei verschiedenen Kunststoffen als dünne Folie mit 200 µm Dicker hergestellt und mit der gewünschten Prägung für die Nutzung in einem Befeuchter als Medienplatte umgeformt werden.

Als Ausblick können mit den Ergebnissen die Taktzeit in der Fertigung reduziert und damit auch die Herstellkosten entsprechend verringert werden. Bei Verwendung von hochgefüllten graphitisierten Kunststofffolien muss der Prozess für die Herstellung von Bipolarplatten für die Brennstoffzelle angepasst und geprüft werden. Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zeigen aber, dass die Umformung der Kunststofffolien für Medienplatten prinzipiell machbar ist.

# Inhalt

Kurzfassung.....	iii
Inhalt.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Vorgehen.....	2
2 Anforderungsanalyse.....	3
2.1 Materialauswahl und -spezifikation.....	3
2.2 Ausgewählte Kunststoffmaterialien für prägbare Folien.....	4
2.2.1 PVDF (Polyvinylidenfluorid).....	4
2.2.2 PPS (Polyphenylensulfid).....	4
2.3 Dimensionen.....	5
3 Materialherstellung.....	5
4 Medienplatte.....	6
4.1 Designänderung.....	6
4.2 Berechnung und Simulation.....	6
5 Werkzeug und Fertigungsanlage.....	8
5.1 Werkzeugauslegung.....	8
5.2 Anlagenkonzeption.....	9
6 Ergebnisse.....	11
7 Zusammenfassung.....	13
8 Verwertung.....	14
9 Ausblick.....	15

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Leistungspyramide Kunststoffe.....	3
Abbildung 3.1 PVDF und PPS-Kunststofffolien als Rollenware .....	5
Abbildung 4.1 Medienplatte als Folie CAD-Design .....	6
Abbildung 4.2 FEM-Simulation der Presskräfte .....	7
Abbildung 5.1 Werkzeug Matrize und Stempel.....	8
Abbildung 5.2 Anlagenkonzept.....	9
Abbildung 5.3 Modulkonfiguration auf der MTC (HyFlex Projekt).....	9
Abbildung 5.4 Anlagenaufbau in der Produktionstestanlage bei Optima. ....	10
Abbildung 5.5 Eindrücke bei der Herstellung der Folien.....	10
Abbildung 5.5 Thermogeformte Medienplatte aus PVDF Kunststofffolie .....	11

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Spezifikation Einsatzbereich Brennstoffzelle .....	3
--	---

## Abkürzungsverzeichnis

BZ	Brennstoffzelle. Elektrochemischer Energiewandler.
BPP - Bipolarplatte	Leitfähige Platte, die die Medien zu und abführt und dabei auch die elektrische Ladung von der MEA aufnimmt und weiterleitet. BPP besitzen ein Flowfield, das zur Gleichverteilung der Medien (Wasserstoff und Luft) dient.
MA – Membrane Assembly-	Funktionale Membran zumeist in einem Verstärkungsrahmen aus Kunststoff gefügt. Anwendung: Befeuchter und Wasseraufbereitungseinheiten
MEA – Membrane Electrode Assembly -	Funktionale Membran beschichtet mit Katalysator zumeist in einem Verstärkungsrahmen aus Kunststoff gefügt. Zum Teil noch mit einer GDL versehen. Anwendung: Brennstoffzelle und Elektrolyseur
MP	Medienplatte
MTC	Modularer Test Converter (Produktionstestanlage)
GDL- Gas Diffusion Layer -	Dünne, poröse Schicht mit einer hohen, elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie eine hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit zur Regulierung des richtigen Durchflusses der Reaktionsgase (Wasserstoff und Luft) und des Wassertransport aus der Membranelektrodeneinheit (MEA).
CCM – Catalyst Coated Membrane–	Funktionale Membran mit aufgetragenen Katalysatorschichten
R2R – Roll to Roll -	Rolle zu Rolle Verfahren. Ausgangprodukte sind Rollenware, z.B. CCM und GDL und Produkt ist wieder eine Rolle
R2Piece – Roll to Piece	Rolle zu Einzelteil Verfahren: Ausgangprodukte sind Rollenware, z.B. vorkonfektionierte CCM und GDL und Produkt ist ein Einzelstück z.B. MEA oder MA

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Zur Umsetzung der Energiewende im Bereich Elektrolyseure & Brennstoffzellen muss vorhandenes Know-how schnell erweitert und in Schlüsselfeldern gezielt aufgebaut werden. Aktuell fehlen vor allem geeignete Prozesse zur kostengünstigen und fehlerfreien Produktion einer für Brennstoffzellen zentralen technischen Komponente: der Bipolarplatte und Medienplatten für Befeuchter, die in hochratenfähigen Anlagen hergestellt werden können. Als hochspezifisches Bauteil der Brennstoffzelle muss diese in höchster Qualität in sehr großen Stückzahlen hergestellt werden.

Neuartige Graphit-Polymer-Bipolarplatten die als Rollenware hergestellt und verarbeitet werden können wie auch dünne Kunststofffolien, bieten hier aufgrund der hochratenfähigen Fertigungsverfahren enorme Kostenvorteile gegenüber bisherigen metallischen oder auch heißgepressten Bipolarplatten (BPP). Die Machbarkeitsstudie HoFeM soll vor diesem Hintergrund die Basis für einen Aufbau einer Produktionseinheit ermöglichen, die schnell und gezielt eine kosteneffiziente, skalierbare Großserienproduktion von graphitischen Bipolarplatten und Medienplatten ermöglicht, um bei der Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie auch weiterhin eine führende Rolle einzunehmen. Das Projekt hat zum Ziel, Wissen zu Investitions- und Fertigungskosten, Zykluszeiten bis hin zu Prozessparametern zur prozesssicheren Herstellung von Medienplatten und den damit erzielbaren physikalischen Eigenschaften zu generieren.

Insgesamt wird damit sichergestellt, dass die deutsche Zulieferindustrie inklusive der Kleinen und Mittelständischen Unternehmen den Technologiewandel meistern und dass die Chancen der Marktaktivierung der Brennstoffzellentechnologie in Deutschland genutzt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel des Projekts ist die Darstellung der Machbarkeit um Kunststofffolien auf einer bestehenden, bahnverarbeitenden Anlage im Rolle-zu-Rolle-Prinzip (R2R-Prinzip) zur Herstellung von Medienplatten für Brennstoffzellen und Befeuchter umzuformen und zu verarbeiten. Für diese hochgetaktete Prozesse werden bestehende Komponenten und Designs von Medienplatten für Brennstoffzellen und Elektrolyseure (sogenannten BPPs) wie auch Membraneinheiten zur Befeuchtung der Medienluft für die Brennstoffzelle derart angepasst, dass Sie für die Hochratenproduktion nutzbar sind. Da Medien/Bipolarplatte über andere Fertigungsprozesse gefertigt werden, muss der Aufbau und die Konstruktion der Folie sowie des Flowfields (Strömungsverteilung) neu konzipiert und simuliert werden.

Im Assemblierprozess müssen dann die rollenbasierten Kunststofffolien prozesssicher gehandhabt, ausgerichtet und in Form geschnitten werden. An dieser Stelle sollen Verfahren zum prozess- und qualitätssicheren Positionieren, Schneiden und Umformen entwickelt werden. Für das Umformen sind Betriebsmittel in Form eines Werkzeuges erforderlich. Mit der Umformeinheit wird geprüft, ob die Anlagenbauteile die erforderlichen Genauigkeiten und Produktionsprozesse abbilden können. Auch das Scheiden und positionsgenaue Ablegen für die hochtaktratenfähigen Fertigung erfordert präzise und schnelle Fertigungsprozesse, wofür Prozesse angepasst werden

müssen, da bisher nur Membranmaterialien prozessiert wurden. Mit der Herstellung der Medien-Bipolarplatten sollen die Machbarkeit des Fertigungsverfahrens mit den gegebenen Materialkombinationen für eine hochskalenfähige Produktion erarbeitet werden.

### 1.3 Vorgehen

Im Rahmen eines Machbarkeitsprojekts wurde zuerst eine Prozessanalyse durchgeführt, um verschiedene Materialien für die Medienplatte und der graphitischen Bipolarplatte untersuchen zu können. Ziel war es, eine Spezifikation zu erstellen, die das Material und dessen Verarbeitbarkeit sowie Besonderheiten und die Anforderungen an die Fertigung beschreibt. Die Ergebnisse dieser Analyse bildeten die Grundlage für die Folienproduktion und die Konzeption der Werkzeuge und Fertigungsabläufe.

Auf Basis der in der Spezifikation definierten Anforderungen wurden zwei Kunststofffolien hergestellt. Parallel wurden Anlagenkonzepte zur Prozessierung der Folien auf der bestehenden modularen Testanlage konzipiert. Diese Flexibilität erlaubt es, die Anlage an unterschiedliche Produktionsprozesse und -anforderungen anzupassen.

Parallel zur Umgestaltung der Testanlage wurde eine Designanpassung für eine Herstellung einer Medienplatte aus einer Folie erstellt. Basis dafür war ein bestehendes Designkonzept für eine spritzgegossene Medienplatte bei BES. Ziel war es, die Produktion der Folie auf der Testanlage abbilden zu können. In diesem Kontext wurde die Konstruktion der Werkzeuge sowie deren Betriebsparameter erstellt.

Die zusätzlichen Einzelmodule sowie das Werkzeug wurden bei Optima in die flexible Produktionstestanlage integriert. Nach der Fertigstellung erfolgte die Inbetriebnahme der Module, die nun für die Herstellung und Validierung der Medien- und Bipolarplatten genutzt werden können.

Im letzten Schritt wurden die Medienplatten auf der erstellten Testanlage gefertigt. Dieser Prozess dient der Validierung des Bahnprozesses, um sicherzustellen, dass die gefertigten Medienplatten den festgelegten Spezifikationen entsprechen und die Produktionsabläufe stabil und reproduzierbar sind.

Die produkt- und prozessspezifischen Anpassungen wurden kontinuierlich in enger Abstimmung mit dem Projektpartnern durchgeführt. Diese Zusammenarbeit stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen den Anforderungen der Projektpartner entsprechen und deren spezifische Bedürfnisse berücksichtigt wurden.



## 2 Anforderungsanalyse

### 2.1 Materialauswahl und -spezifikation

Die Anforderungen an das Material und hier insbesondere an die zu verwendenden Kunststoffmaterialien für einen Befeuchter sind durch den Einsatz bei der Brennstoffzelle als sehr hoch anzusehen. Es ergeben sich folgende Anforderungen:

a.) Temperaturbeständigkeit

Dauerbetriebstemperatur wird mehr als 100°C sein.

b.) Hydrolysebeständigkeit

Aufgrund der in der Brennstoffzelle gegebenen Umgebungsbedingungen von 100°C und 3,5 bar<sub>a</sub> Druck sowie Reinstwasser aus der Brennstoffzelle muss das Material hoch hydrolysebeständig sein. Die meisten technischen Kunststoff weisen eine geringe Hydrolysebeständigkeit auf.

c.) Festigkeit

Die Folien sollten aufgrund der hohen Materialkosten so dünn wie möglich sein. Die Anforderungen an die Umgebungsbedingungen von 3,5 bar<sub>a</sub> Druck sowie den Verspannkraften aufgrund der Verpressung des Stacks sind hoch, so dass auch hierfür fast nur Hochleistungskunststoff mit einem E Modul >2.000 MPa in Frage kommen.

Tabelle 2.1 Spezifikation Einsatzbereich Brennstoffzelle

Eigenschaft	Einheit	Testnorm	Bereich
Temperatur	°C		80-110
Druck	bar <sub>a</sub>		3,5
Wasseraufnahme	% rel.	DIN EN 61234	>0,1
Festigkeit	MPa	DIN 53 457	>2.000

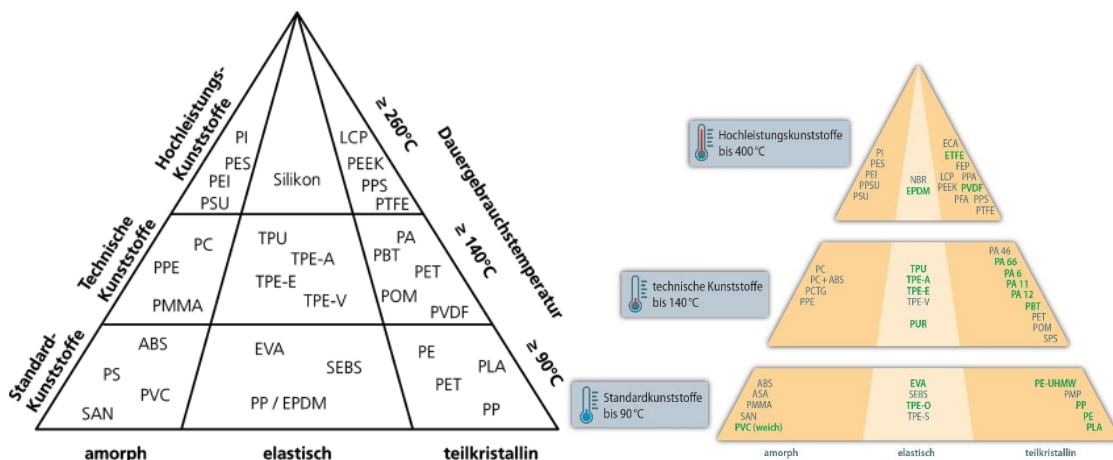


Abbildung 2.1 Leistungspyramide Kunststoffe

Aus dem Leistungspyramide (Abbildung 2.1) ist zu erkennen, dass sich nur technische Kunststoffe oder Hochleistungskunststoffe dafür eignen.

Für die Machbarkeitsstudie wurde der technische Kunststoff PVDF und der Hochleistungskunststoff PPS ausgewählt.

## 2.2 Ausgewählte Kunststoffmaterialien für prägbare Folien

### 2.2.1 PVDF (Polyvinylidenfluorid)

PVDF ist ein opaker, teilkristalliner, thermoplastischer Fluorkunststoff. Die Grundmaterialien für PVDF sind Fluorwasserstoff und 1,1,1-Trichlorethan, die zu Chlordifluorethan und weiter zu Vinylidenfluorid umgesetzt werden. Vinylidenfluorid wird dann in hochreinem Wasser unter kontrollierten Druck- und Temperaturverhältnissen mittels eines Katalysators zu Polyvinylidenfluorid polymerisiert.

Polyvinylidenfluorid verfügt über eine höhere Steifigkeit und Druckbeständigkeit als das artverwandte PTFE. Gleitverhalten und elektrisches Isolierverhalten sind allerdings etwas schlechter. Es besitzt eine hohe Festigkeit und Zähigkeit auch bei tiefen Temperaturen und ist selbstverlöschend. Die Dauergebrauchstemperatur liegt zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $+150\text{ °C}$ . PVDF besitzt eine hohe Beständigkeit gegenüber Chlor, Brom und energiereichen Strahlen. Er weist eine gute bis sehr gute chemische Widerstandsfähigkeit auf. Gegenüber anderen Fluorkunststoffen bietet PVDF in vielen Anwendungsfällen Vorteile: Er lässt sich leicht verarbeiten und hat gute mechanische Eigenschaften.

Polyvinylidenfluorid empfiehlt sich aufgrund seiner hohen Reinheit für den Kontakt mit Reinstwasser und hochreinen Chemikalien. Außerdem ist PVDF speziell für den Korrosionsschutz in der chemischen Industrie geeignet.

### 2.2.2 PPS (Polyphenylensulfid)

PPS ist ein teilkristalliner Hochleistungskunststoff. Durch die Verbindung aromatischer Monomereinheiten über Schwefelatome entstehen besonders widerstandsfähige Polymere, deren gute mechanische Eigenschaften auch bei Temperaturen weit über  $200\text{ °C}$  erhalten bleiben, so dass ein Dauereinsatz je nach Belastung bis  $240\text{ °C}$  möglich ist. Kurzzeitig werden auch Belastungen bei Temperaturen bis zu  $270\text{ °C}$  standgehalten. Herausragend ist zudem die chemische Beständigkeit des PPS gegenüber nahezu allen Lösemitteln, vielen Säuren und Laugen sowie bedingt gegen Luftsauerstoff auch bei hohen Temperaturen.

PPS verfügt neben einer geringen Wasseraufnahme auch über eine gute Dimensionsstabilität und inhärente Flammwidrigkeit. Es hat hervorragende elektrische Eigenschaften (Isolator), ist für die meisten Flüssigkeiten und Gase hochgradig undurchlässig (impermeabel), hat auch bei höheren Temperaturen nur eine geringe Kriechneigung und ist aufgrund seines guten Fließvermögens auch für lange, schmale Formteile und komplexe Werkzeuggeometrien geeignet.

PPS weist zudem einen hohen Zug-Elastizitätsmodul auf und kann auch als dünne Folie für die druckbelastete Medienplatte problemlos genutzt werden.

## 2.3 Dimensionen

Für die Prozessierung in einer bahnerarbeitenden Anlage sollte die Bahnbreite unter 300mm gewählt werden. Die Bahnbreite für den Befeuchter bzw. die Außenmaße des Werkzeugs sind 200mm, so dass die Maße für die Rolle auf eine Breite von 200mm festgelegt wurde.

Die Dicke des Materials sollte im ersten Schritt 200 $\mu$ m sein.

## 3 Materialherstellung

Für die Herstellung der Medienplatten aus einer Folie wurden PPS- und PVDF-Folien mit einer Dicke von 200 $\mu$ m bei zwei verschiedenen Zulieferern gefertigt.

Vor der Prozessierung auf der Anlage wurden die Folienrollen auf eine Breite von 200mm gebracht (geslittet), um Sie in das Werkzeug einführen zu können. Abbildung 3.1 zeigt das schon geslittete Material PVDF auf Rollenbreite 200mm und das PPS auf Rollenbreite 600mm vom Lieferanten.



Abbildung 3.1 PVDF und PPS-Kunststofffolien als Rollenware

## 4 Medienplatte

### 4.1 Designänderung

Nach einer Anforderungsanalyse erfolgt die Designanpassung in Form einer CAD-Konstruktion, um die geformten Folien auf der bahnverarbeitenden Anlage erzeugen zu können. Da eine hohe Anforderung im Hinblick auf die Verpressung der Bauteile bestehen, werden zusätzlich (FEM-) Simulationen durchgeführt. Im weiteren Schritt wird der Aufbau des Werkzeugs bei Optima für die Testanlage begleitet.

Das bisherige Basisdesign der Medienplatte war für eine Herstellung im Spritzgussverfahren und eine rein manuelle Montage mit vielen Einzelteile erarbeitet worden. Mit der Überarbeitung des Designs soll die Fertigung der Medienplatte des Befeuchters vollständig auf der Produktionstestmaschine von Optima erfolgen können. Dazu wurde das bestehende CAD-Design aus der Spritzgussvariante in ein Design, das als geprägte Folie aufgebaut ist, überführt.

Abbildung 4.1 zeigt das abgeleitete CAD-Design der Medienplatte mit zensierten Bereichen (blau - noch nicht patentrechtlich erteilte Schutzrechtsansprüche).

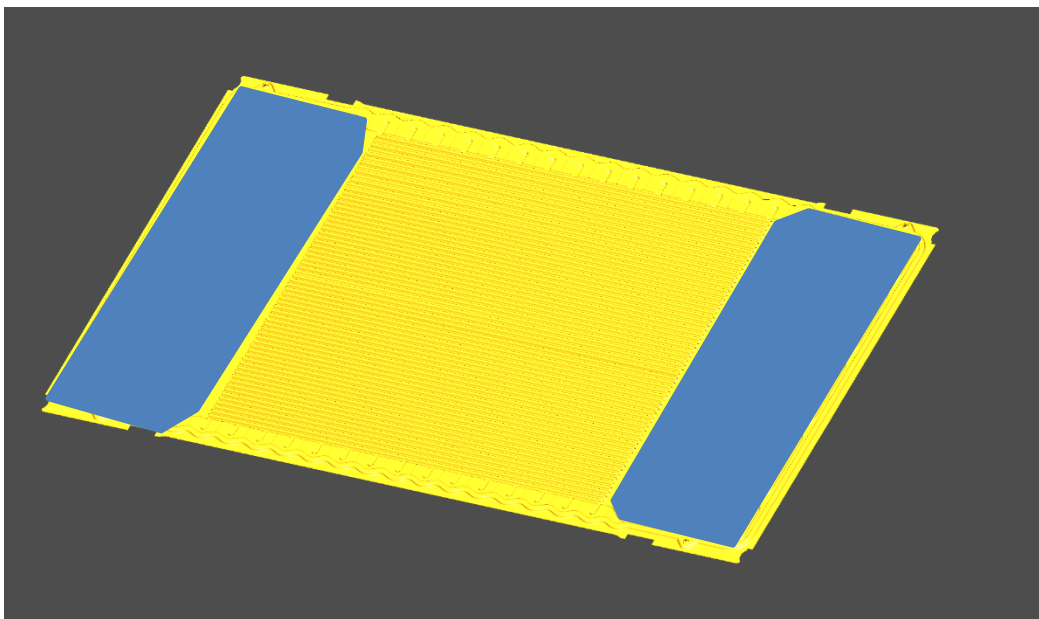


Abbildung 4.1 Medienplatte als Folie CAD-Design

### 4.2 Berechnung und Simulation

Für die technische Auslegung wurden FEM-Berechnungen durchgeführt, die eine optimierte Auslegung der Medienplatte im Hinblick auf mögliche Deformationen zum Ziel haben. Die Verwendung von Kunststoff als Folienmaterial wurde untersucht.

Abbildung 4.2 zeigt die Verformung der Kunststoffolie durch die Verpressung im Stapel. Es zeigt sich, dass die Verformung vernachlässigbar ist und davon auszugehen ist, dass die Folie den spezifizierten Einsatzbedingungen (siehe Kapitel 2) standhält.

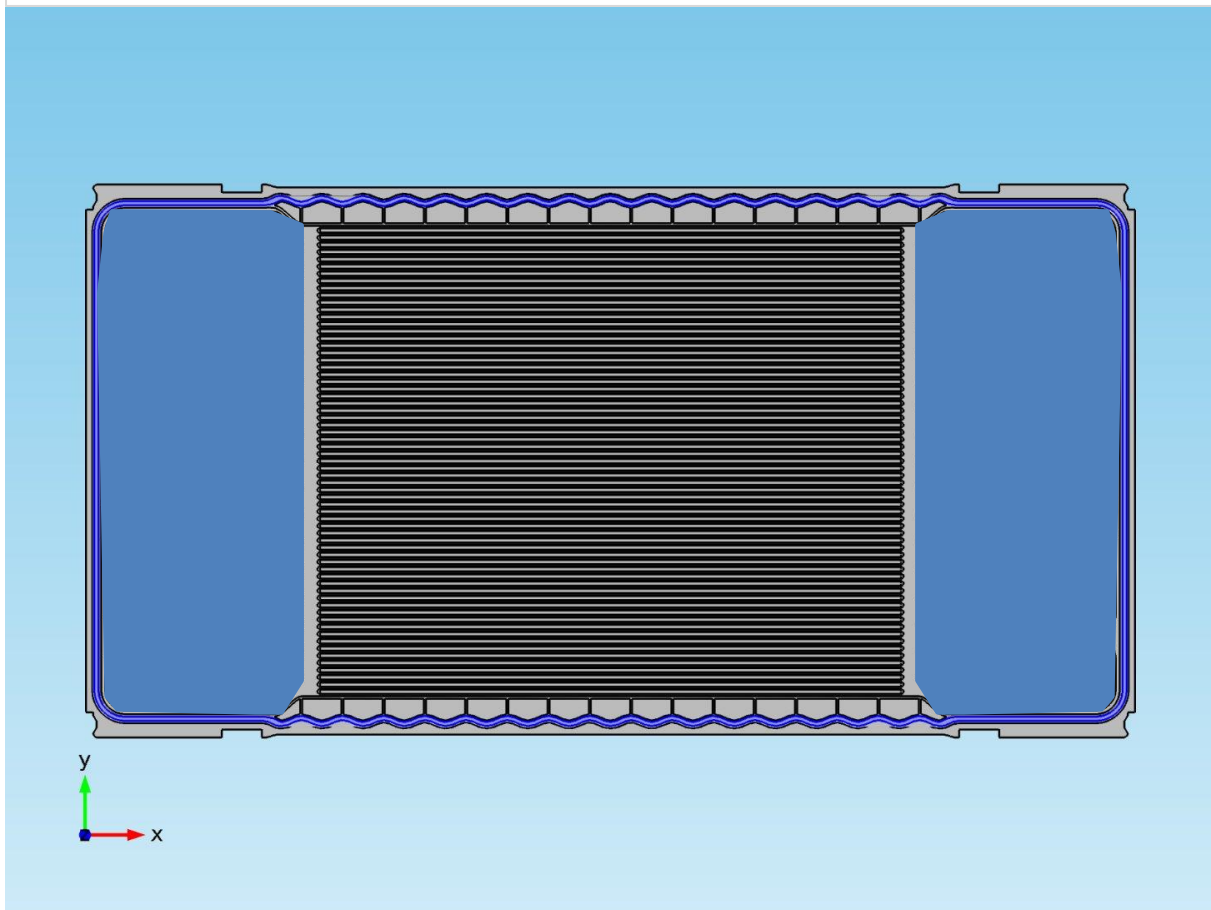
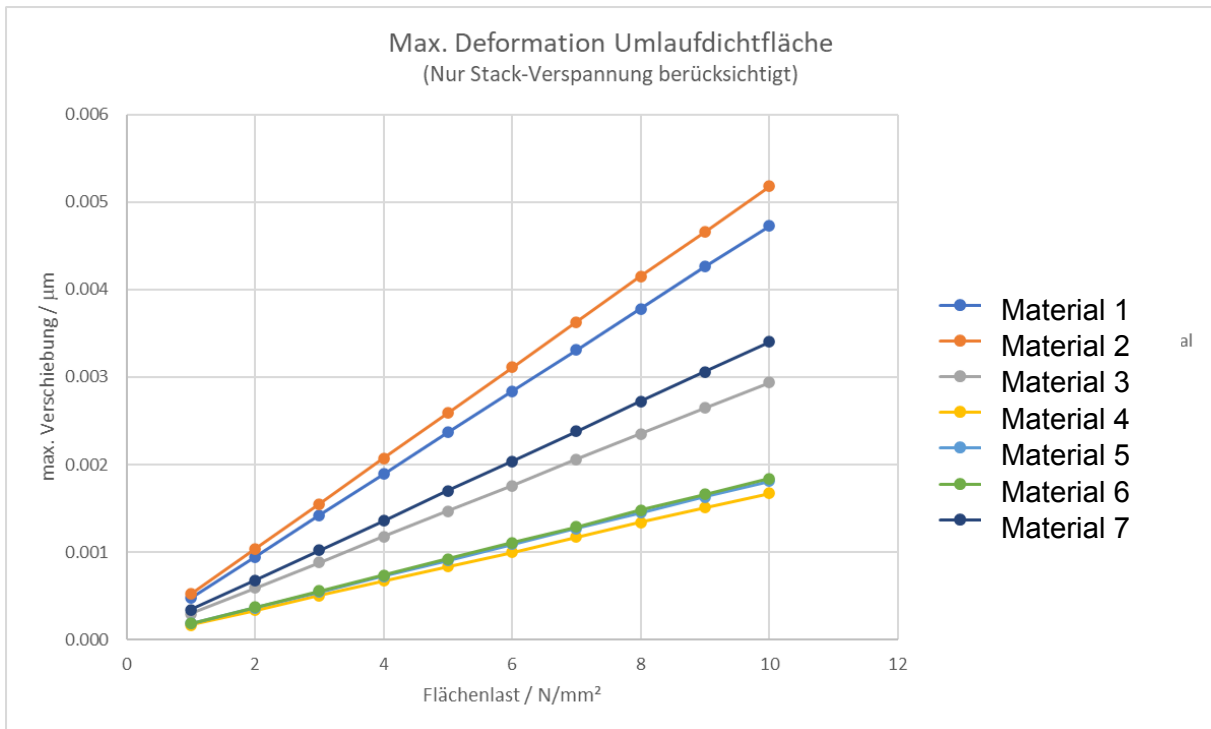


Abbildung 4.2 FEM-Simulation der Presskräfte

## 5 Werkzeug und Fertigungsanlage

Die ca. 200 µm dicke Folie wird in einem Werkzeug, das aus Stempel und Matrize besteht, über einen Thermoformingprozess umgeformt. Die für Medienplatten ausgewählten Materialien sind grundsätzlich thermisch formbar.

### 5.1 Werkzeugauslegung

Die kristallinen Eigenschaften und die ins Material eingebrachten Spannungen hängen stark vom Herstellungsprozess des jeweiligen Herstellers ab und müssen beim Thermoformen berücksichtigt werden.

Ziel ist eine kurze Umformzeit, um auch eine angestrebte Taktzeit von 1 Sekunde pro Formteil zu erreichen. Das ist grundsätzlich machbar, solange die Temperatur das Material im Vorfeld ausreichend umformbar macht.

Die Materialtemperatur sollte beim Thermoformen im Umformungsbereich liegen. Das Werkzeug wurde in zwei Teilen entworfen und gefertigt (Abbildung 5.1) und jeweils mit einer elektrischen Beheizung versehen.

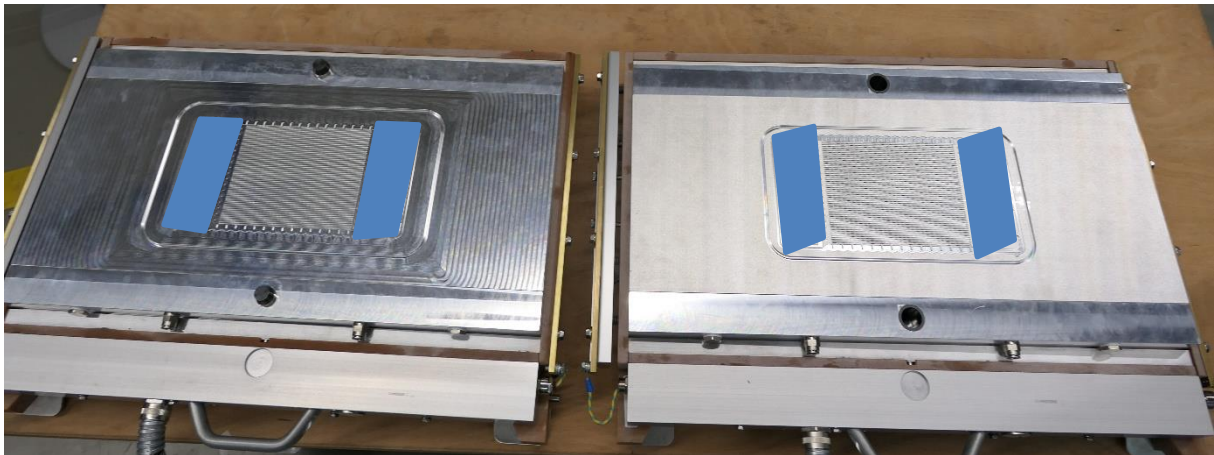


Abbildung 5.1 Werkzeug Matrize und Stempel

## 5.2 Anlagenkonzeption

Mit einem Thermoformspezialisten wurde neben der Werkzeuggestaltung auch ein möglicher Anlagenaufbau konzipiert (Abbildung 5.2). Dieser wurde dann in der vorhandenen MTC abgebildet und um fehlende Module (wie z.B. Heizztunnel) erweitert (Abbildung 5.3).

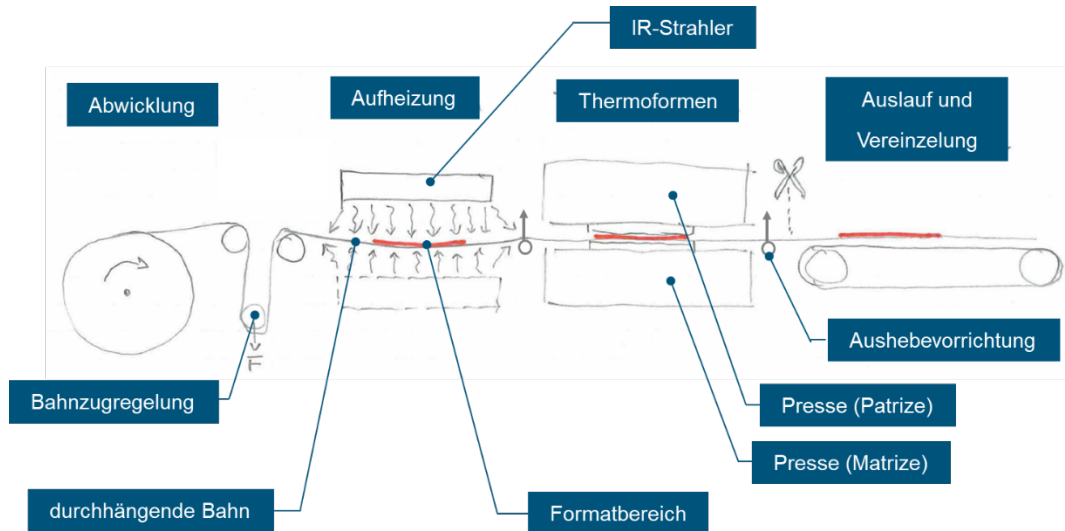


Abbildung 5.2 Anlagenkonzept

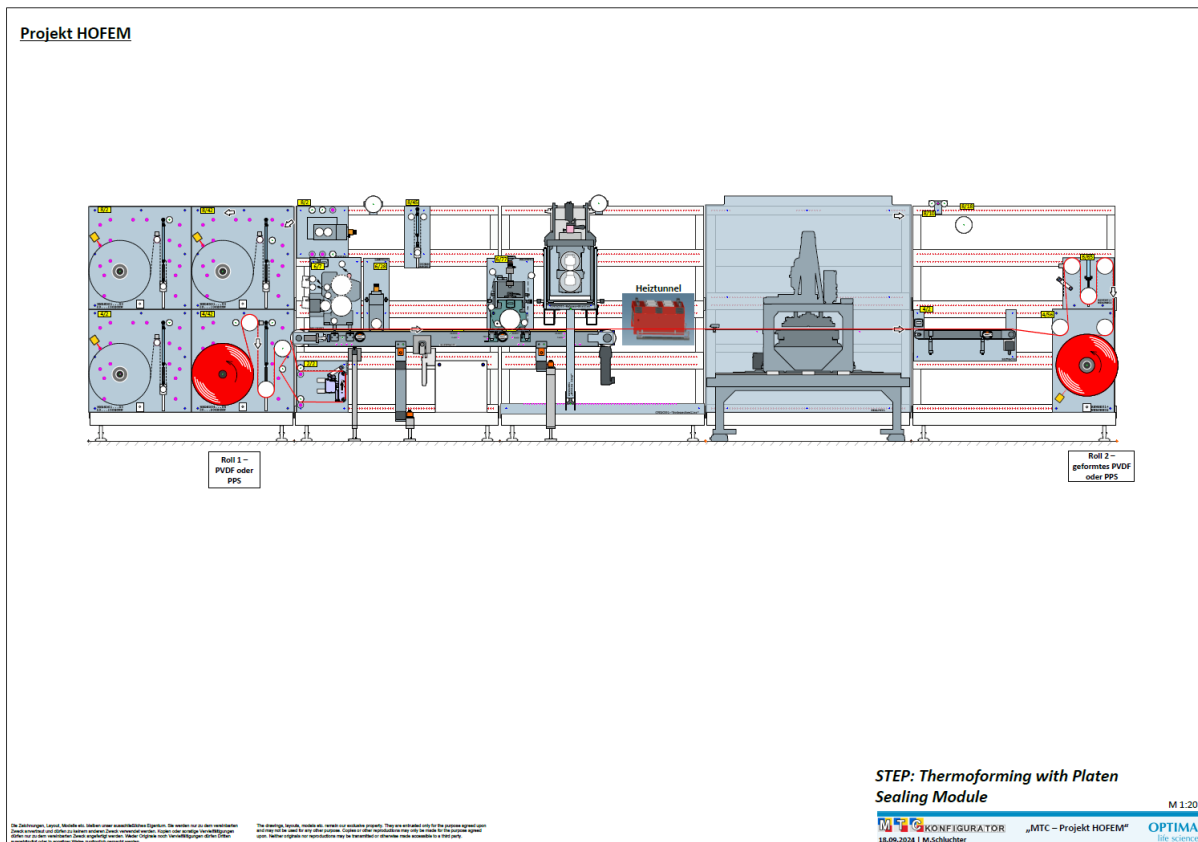


Abbildung 5.3 Modulkonfiguration auf der MTC (HyFlex Projekt)

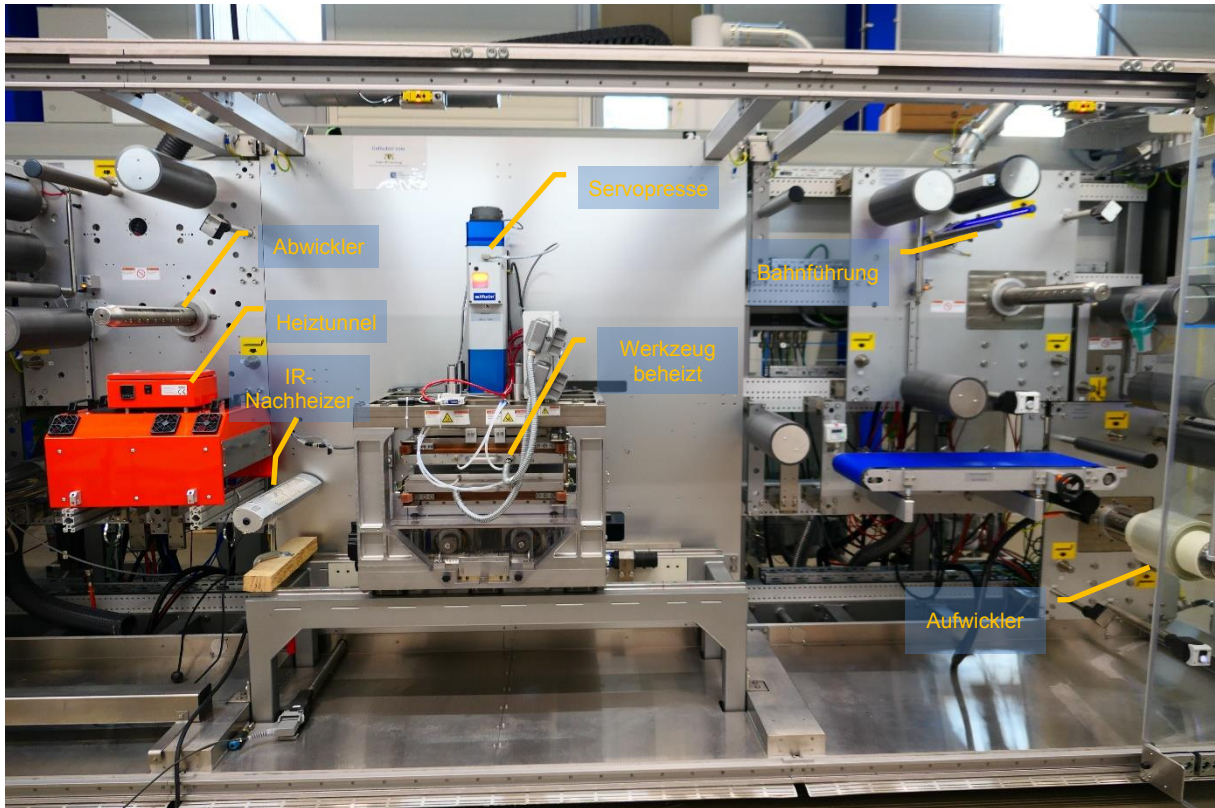


Abbildung 5.4 Anlagenaufbau in der Produktionstestanlage bei Optima.

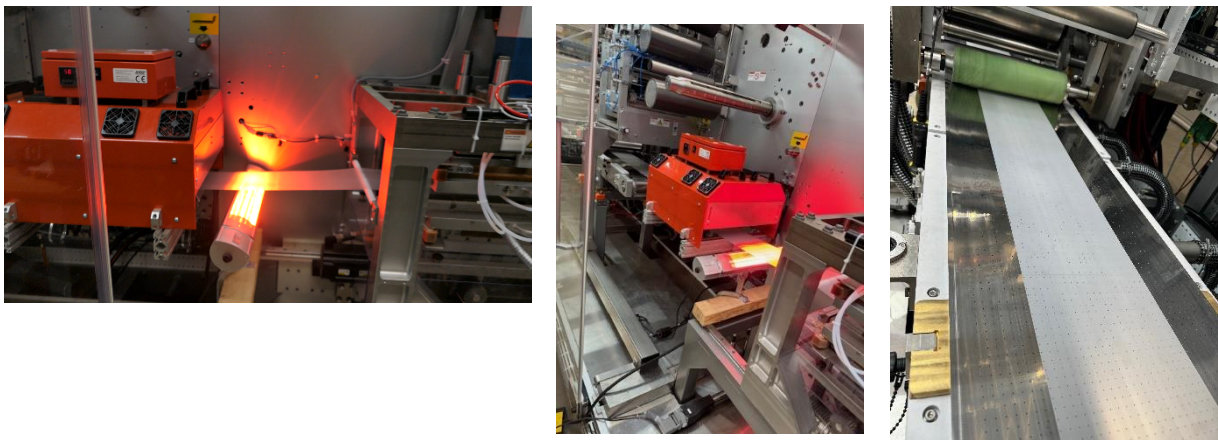


Abbildung 5.5 Eindrücke bei der Herstellung der Folien



## 6 Ergebnisse

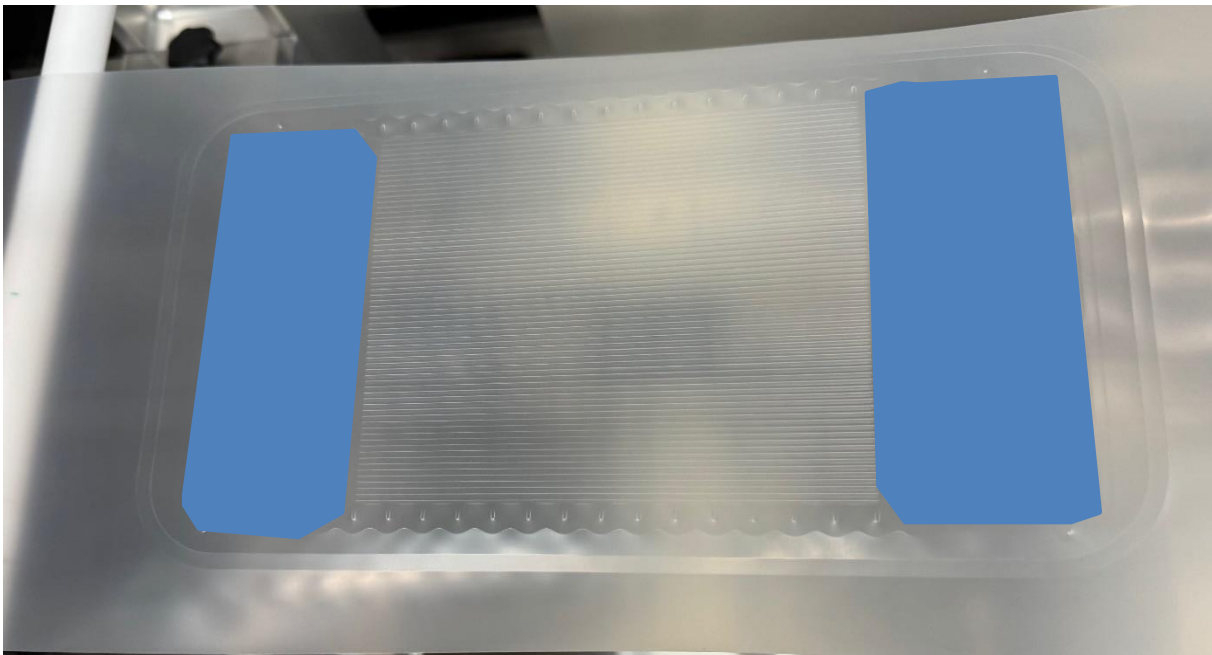


Abbildung 6.1 Thermogeformte Medienplatte aus PVDF Kunststoffolie

Nummer	Siegelzeit [ms]	Kraft [kN]	Temperatur Stempel [°C]	Temperatur Heiztunnel [°C]	Bahngeschw. [m/min]
1	1000	17,5	120	250	10
2	2000	40	120	250	5
3	500	40	120	250	5
4	500	40	120	250	15
5	500	40	160	300	15
6	500	40	150	300	15
7	1500	40	150	270	10
8	1500	40	150	260	10
9	1500	40	140	250	10

Versuch 1 → 2: Erhöhung der Presskraft verbessert den Grad der Ausformung.  
 Versuch 1 bis 4: Produkte können nicht vollständig ausgeformt werden.  
 Versuch 5 bis 9: Erhöhung der Werkzeugtemperatur verbessert Umformgrad und begünstigt Wellenbildung.

Im Rahmen der Versuche konnte der erforderliche Umformgrad bei einigen Produkten aus PVDF erreicht werden, jedoch nur durch eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur. Dieses Vorgehen zeigt, dass der Einfluss der Vorheizstrecke derzeit unzureichend ist und nicht wie vorgesehen hauptsächlich zur Materialerwärmung beiträgt. Für zukünftige Versuche ist eine Optimierung der Vorheizstrecke notwendig, um eine gleichmäßigere Erwärmung des Materials auf die erforderliche Umformtemperatur zu gewährleisten. Diese Aussage kann auch durch Thermoformingtests mit der PPS-Folie bestätigt werden. Mit der vorhandenen Vorheizstrecke (Heiztunnel) mit zu geringer Einstrahlleistung konnte das PPS, das noch höhere Umformtemperaturen benötigt, nur geringfügig umgeformt werden.

Die Versuche zeigten, dass sowohl die Vorwärmtemperatur als auch die Werkzeugtemperatur einen erheblichen Einfluss auf das Formgebungsergebnis haben.

- **PPS-Folien:** Diese benötigten eine vergleichsweise hohe Vorwärmtemperatur, um eine ausreichende Plastifizierung zu gewährleisten. Eine zu niedrige Temperatur führte zu unzureichender Umformbarkeit und Spannungsrissen.
- **PVDF-Folien:** Diese erwiesen sich als flexibler in der Verarbeitung, reagierten jedoch empfindlich auf zu hohe Werkzeugtemperaturen. Eine ungleichmäßige Abkühlung oder zu hohe Vorwärmtemperaturen verursachen Wellenbildung.
- **Einfluss des Servopressendrucks:** Ein erhöhter Druck verbesserte die Detailtreue der Formgebung, insbesondere bei komplexen Geometrien. Jedoch konnte PVDF bei zu niedrigem Druck nicht vollständig umgeformt werden.

Durch eine verbesserte Vorheizstrecke könnte auch die Wellenbildung innerhalb der Produkte verhindert werden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Werkzeugtemperatur nicht höher als die Dauergebrauchstemperatur des Materials eingestellt werden sollte. In den Versuchen wurde dieser Grenzwert jedoch überschritten, was eine Ursache für die beobachtete Wellenbildung sein könnte. Die Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit, die Vorheizstrecke anzupassen und die Werkzeugtemperatur innerhalb der Materialgrenzen zu halten.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde die Machbarkeit zur Herstellung von Medienplatten für Befeuchter aus 200µm dicken Kunststofffolien erfolgreich dargestellt. Ziel des Projekts war es, eine bestehende bahnverarbeitende Anlage so zu erweitern, diese auch Kunststofffolien bearbeiten kann. Dafür wurden Werkzeuge zum Thermoforming und Anlagenbauteile zur Erwärmung der Folie erstellt. Die Inbetriebnahme der Anlagenbauteile wurde planmäßig durchgeführt und verlief erfolgreich, sodass die Anlage ihre Funktion zur Umformung von den Kunststofffolien erfüllen kann.

Als Basis wurde im Rahmen des Projekts ein bestehendes Design der Medienplatte als Spritzgussvariante für die Verwendung als Kunststoffolie adaptiert. Die Entwicklung der Medienplatte umfasste sowohl die Konstruktion der Medienplatte wie auch die Konstruktion des Werkzeugs für das Umformen der Folien.

Die Auslegung und Optimierung der Medienplatte wurden durch Simulationen begleitet. Insbesondere kamen hier FEM (Finite-Elemente-Methode) zur Verformungsanalyse zum Einsatz. Diese Simulationen waren entscheidend, um die Funktionalität der Medienplatte mit einer Materialstärke von nur 200 µm bereits in der Entwicklungsphase sicherzustellen.

Im Projekt wurde ein spezielles Werkzeug entwickelt, mit dem Medienplatten aus zwei verschiedenen Folienmaterialien gefertigt wurden.

Die Umformversuche zeigten, dass ein Umformen der Folien möglich ist. Dafür sind jedoch die Prozessparameter wie Temperaturen in der Vorheizstrecke wie auch im Werkzeug maßgeblich für eine gute und gleichmäßige Ausformung der Medienplatten. Das Projekt verlief erfolgreich, insbesondere die Entwicklung und Inbetriebnahme der Anlagenbauteile der bahnverarbeitenden Anlage. Die Vorheizstrecke muss speziell für Folien aus PPS noch verbessert werden.

Die Untersuchung der Thermoforming-Versuche mit PPS- und PVDF-Folien zeigte, dass eine präzise Einstellung der Vorwärmtemperatur, der Werkzeugtemperatur und des Servopressendrucks entscheidend für die Qualität der geformten Bauteile ist. Während PPS eine höhere Temperaturstabilität erfordert, bietet PVDF eine größere Verarbeitungsflexibilität. Die gewonnenen Erkenntnisse sind entscheidend für die Optimierung von Fertigungsprozessen und die Auswahl geeigneter Prozessparameter in der industriellen Anwendung.

## 8 Verwertung

Mit den im Projekt erzielten Versuchsreihen strebt die Fa. BES die prozesssichere Produktion von Befeuchter- und Brennstoffzellenkomponenten an. Dies soll durch die Erprobung der Medien bzw. Bipolarplatten in hochratenfähigen Prozessen auf der bestehenden Bahnverarbeitenden Anlage erfolgen. Die Erkenntnisse aus dem Projekt dienen der Herstellung von kostengünstigen Medienplatten für Befeuchter. Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass die Herstellung in einer bahnverarbeitenden Anlage möglich ist und damit Kosten gespart werden können.

Die Verwertungschancen liegen darin, dass BES zukünftig Brennstoffzellen Komponenten und Befeuchter in großer Menge kostengünstig und qualitätsgesichert anbieten kann. Kunden aus dem Bereich der Automobilindustrie (PKW- und Heavy-Duty-Bereich), zeigen großes Interesse an Befeuchtersystemen, die sie aktuell allerdings kostenintensiv über den internationalen Markt beschaffen müssen und die zumeist in manueller Fertigung hergestellt wurden.

Mit Hilfe des Projektes kann bei Optima eine neue Fertigungs- und Anlagen-Technologie zur Prozessierung von Kunststofffolien für die Verwendung in der Wasserstoffwirtschaft an den Markt geführt werden, welche das Potential hat, eine Preisreduzierung in der Wasserstofftechnologie zu erreichen und damit eine bessere Marktdurchsetzung erreichbar ist.

Die wissenschaftliche Verwertung der Forschungsergebnisse erfolgt unter anderem durch die regelmäßige Teilnahme beider Projektpartner an Fachmessen wie der f-cell in Stuttgart, der Hannover Messe sowie der Hydrogen Technology Expo. Diese Messen bieten eine ideale Plattform, um aktuelle Entwicklungen im Bereich Produktion von Brennstoffzellentechnologie zu präsentieren und den Austausch mit Industriepartnern und wissenschaftlichen Einrichtungen zu fördern.

Darüber hinaus wird an gezielte Workshops zur Produktionstechnik an führenden Forschungseinrichtungen wie dem ZSW in Ulm und Fraunhofer ISE in Freiburg teilgenommen. Hierbei wird spezifisches Fachwissen in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern geteilt.

Ein intensiver Wissensaustausch findet auch mit dem Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) statt. Durch Abstimmung der Anforderungen in Bezug auf die Verwendung von hochgefüllten Bipolarplattenfolien werden sowohl theoretische als auch praktische Aspekte der Herstellung vertieft und innovative Lösungen erarbeitet.

## 9 Ausblick

Im nächsten Schritt der Untersuchung steht die Optimierung der Vorwärmung der Kunststofffolien im Vordergrund. Derzeitige Herausforderungen hinsichtlich ungleichmäßiger oder unzureichender Heizleistungen sollen durch den Einsatz leistungsstärkerer Heizsysteme überwunden werden. Eine höhere Heizleistung wird nicht nur eine gleichmäßigere Temperaturverteilung innerhalb der Folie ermöglichen, sondern auch den gesamten Umformprozess beschleunigen und stabilisieren. Dies ist besonders wichtig, um eine präzise und reproduzierbare Formgebung zu erzielen.

Parallel zur Optimierung des Vorwärmprozesses eröffnet die Anlage perspektivisch die Möglichkeit, graphit-gefüllte BPP-Folienmaterialien zu bearbeiten. Diese speziellen Verbundstoffe, bei denen die bisher untersuchten Kunststoffmaterialien als Hauptbestandteile integriert sind, bieten aufgrund ihrer mechanischen und elektrischen Eigenschaften ein hohes Potenzial für anspruchsvolle technische Anwendungen. Die Integration von Graphit könnte zusätzliche Vorteile wie verbesserte Leitfähigkeit oder erhöhte Temperaturbeständigkeit mit sich bringen, was die Einsatzmöglichkeiten der umgeformten Bauteile weiter erweitert.

Ein weiterer Meilenstein in diesem Forschungsprojekt wird die Produktion von Medienplatten aus den umgeformten Kunststofffolien sein. Geplant ist, diese Medienplatten zu einem Stapel zu formen, der anschließend umfangreichen Funktionstests unterzogen wird. Die Ergebnisse dieser Tests werden entscheidend sein, um das industrielle Potential der entwickelten Thermoforming-Prozesse abschließend zu bewerten und weitere Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geplanten Optimierungen und Erweiterungen im Thermoforming-Prozess einen bedeutenden Schritt in Richtung einer verbesserten Materialverarbeitung darstellen. Mit der Erhöhung der Heizleistung in der Vorwärmung und der Anwendung auf graphit-gefüllte BPP-Folien wird der Grundstein für innovative und leistungsfähige Kunststoffbauteile gelegt. Die anstehenden Funktionstests der Medienplatten werden dabei helfen, die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu bestätigen und somit den Weg für zukünftige industrielle Anwendungen zu ebnen.

