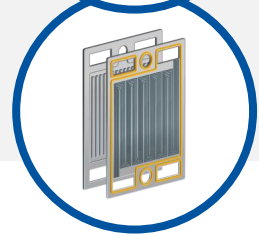
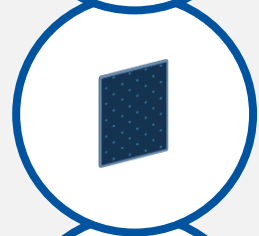
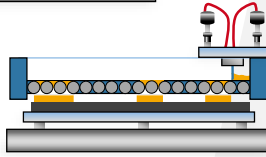
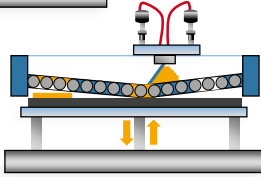
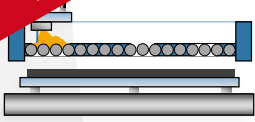


Auch als kostenlose  
Broschüre erhältlich  
Kontaktieren Sie uns unter:  
[info@pem.rwth-aachen.de](mailto:info@pem.rwth-aachen.de)



# PRODUKTION VON BRENNSTOFFZELLEN- KOMPONENTEN

Neue Auflage



**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY



Brennstoffzellen



Der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen beschäftigt sich mit der Produktionstechnik der Brennstoffzelle. Die Aktivitäten erstrecken sich innerhalb des Maschinenbausektors von der kosteneffizienten Produktion der Komponenten des wasserstoffbetriebenen Antriebsstrangs über innovative Mobilitätslösungen bis hin zur gesamten Emissionsreduktion. Durch nationale und internationale Projekte in Unternehmen verschiedener Wertschöpfungsstufen sowie Beteiligungen in zahlreichen Forschungsprojekten bietet PEM weitreichende Expertise.



**PEM der RWTH Aachen**

Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“  
Bohr 12  
52072 Aachen

[www.pem.rwth-aachen.de](http://www.pem.rwth-aachen.de)

Die VDMA Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen unterstützt Hersteller von Brennstoffzellenkomponenten und -systemen in Deutschland beim Ausbau des Industriernetzwerks. Sie bietet derzeit über 80 führenden national sowie international aktiven Herstellern und Zulieferern eine Kommunikationsplattform zur Vernetzung und gemeinsamen Interessenvertretung. In Projektgruppen werden technische Lösungen zur Optimierung und Kostenreduktion von Brennstoffzellensystemen und -komponenten sowie zum Aufbau der Serienfertigung erarbeitet.



**VDMA**

VDMA Brennstoffzellen  
Friedrichstraße 95  
10117 Berlin

[vdma.org/brennstoffzellen](http://vdma.org/brennstoffzellen)

# Autorin und Autoren

PEM der RWTH Aachen



**Dr.-Ing. Heiner Heimes**  
Geschäftsführender Oberingenieur  
[h.heimes@pem.rwth-aachen.de](mailto:h.heimes@pem.rwth-aachen.de)



**Mario Kehrer, M. Sc.**  
Oberingenieur  
[m.kehrer@pem.rwth-aachen.de](mailto:m.kehrer@pem.rwth-aachen.de)



**Sebastian Hagedorn, M. Sc.**  
Gruppenleiter Fuel Cell  
[s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de](mailto:s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de)



**Julius Hausmann, M. Sc.**  
Fuel Cell  
[j.hausmann@pem.rwth-aachen.de](mailto:j.hausmann@pem.rwth-aachen.de)

VDMA



**Gerd Krieger**  
Geschäftsführer der Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen  
[gerd.Krieger@vdma.org](mailto:gerd.Krieger@vdma.org)



**Jana Müller**  
Projektmanagerin Brennstoffzellenproduktion  
[jana.Mueller@vdma.org](mailto:jana.Mueller@vdma.org)



**Haben Sie Fragen?**

**Sprechen Sie uns an!**

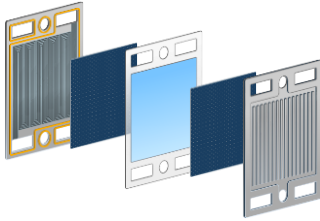


Aachen, Oktober 2022  
PEM der RWTH Aachen und  
VDMA AG Brennstoffzellen  
2. Auflage  
ISBN: 978-3-947920-25-9

# Übersicht

## einer PEM-Brennstoffzelle

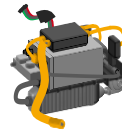
### Brennstoffzellenkomponenten



### Brennstoffzellenstack



### Brennstoffzellensystem



#### Komponentenfertigung

#### Stackfertigung

#### Systemfertigung

In dieser Broschüre wird die Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten als Teil des Produktionsprozesses von Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen schematisch dargestellt.

Die Brennstoffzellenkomponenten **Bipolarplatte**, **Gasdiffusionsschicht** und **katalysatorbeschichtete Membran** werden unter Verwendung unterschiedlicher Materialien über verschiedene Produktionsprozesse hergestellt. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik zeigt diese Broschüre eine mögliche Fertigungsfolge der Komponentenproduktion. Die vorliegende Auswahl dient als Diskussionsgrundlage für die Branche. Weitere Prozessschrittkonfigurationen sind ebenso denkbar wie gewünscht. Auf alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung von Brennstoffzellenkomponenten wird deshalb in Auszügen hingewiesen. In gemeinsamer Diskussion mit dem Lehrstuhl PEM oder dem VDMA können alternative Prozessvarianten näher spezifiziert werden.

# Technologieentwicklung

## der PEM-Brennstoffzelle

Zur flächendeckenden Einführung der Brennstoffzellentechnologie bedarf es Produkt- und Prozessinnovationen, die auf eine Reduktion der Produktionskosten abzielen. Dabei ist eine Skalierung der Produktionszahlen bei gleichzeitiger Erfüllung konstanter Qualitätsanforderungen notwendig. Der Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen hat sich dies zum Ziel gesetzt und konnte unter anderem folgende Forschungsthemen identifizieren:

### Prozessinnovation (Beispiel)

#### Komponentenfertigung

- Substitution des Decal-Verfahrens
- Erhöhung des Anteils der „Rolle-zu-Rolle“-Verfahren in der Produktion

#### Stackfertigung

- Hochgeschwindigkeitsstacking
- Verkürzung der Stack-Aktivierungszeit

### Produktinnovation (Beispiel)

#### Komponentenfertigung

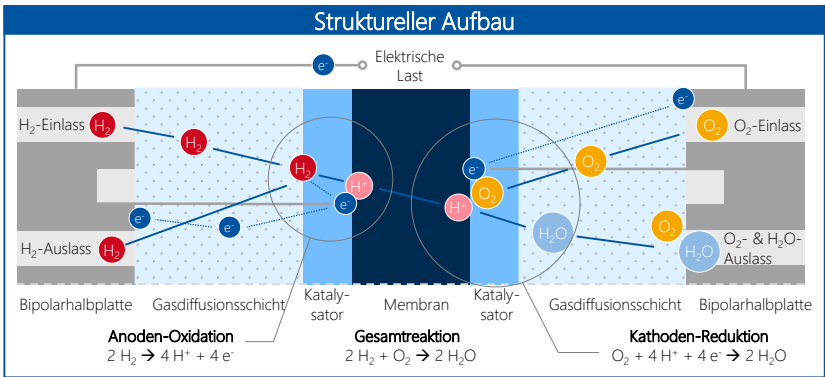
- Entwicklung klebbarer Bipolarplatten
- Konstruktion von „Zwischenplatten“ zur Steigerung der Produktmodularität

#### Stackfertigung

- Vereinigung von Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und Bipolarhalbplatte (BPHP) zu einem Bauteil

# Funktionsprinzip

einer PEM-Brennstoffzelle



Der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie durch die PEM-Brennstoffzelle liegt folgendes Funktionsprinzip zugrunde:

- Über die Strömungskanäle der **Bipolarhalbplatten** (engl. Bipolar Half Plate, BPHP) wird anodenseitig die Wasserstoffzufuhr, kathodenseitig die Sauerstoffzufuhr realisiert.
- Über die **Gasdiffusionsschicht** (engl. Gas Diffusion Layer, GDL) diffundiert der Wasserstoff zur Anodenseite der **katalysatorbeschichteten Membran** (engl. Catalyst Coated Membrane, CCM).
- Der Wasserstoff wird katalytisch oxidiert, und unter Abgabe von Elektronen bilden sich H<sup>+</sup>-Ionen, die über die feuchte Membran zur Kathodenseite gelangen. Die Elektronen werden über einen äußeren Stromkreis zur Kathodenseite geleitet.
- Der Sauerstoff auf Kathodenseite wird durch die Elektronen reduziert und reagiert mit den H<sup>+</sup>-Ionen aus der Membran zu H<sub>2</sub>O (Wasser), das abgeführt wird.

# Brennstoffzellentypen

im Vergleich

Die folgende Darstellung zeigt eine Übersicht zu den aktuell in Industrie und Forschung verfügbaren Brennstoffzellentypen, ihren Reaktionsmedien sowie der üblichen Betriebstemperatur.

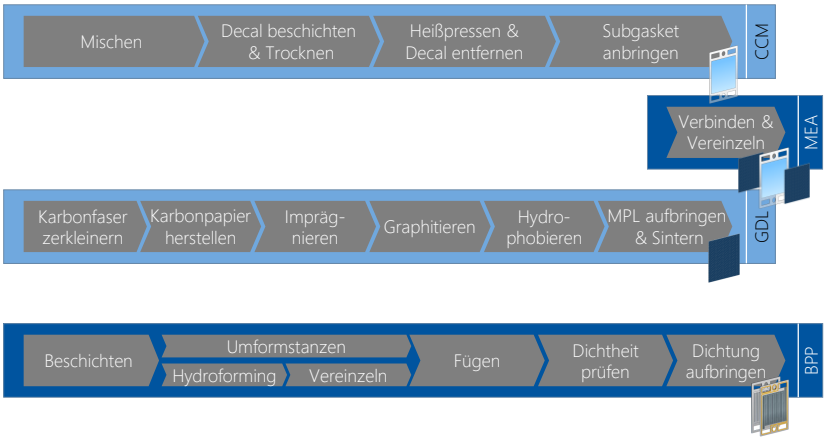
Brennstoffzellentyp		Anode ein/aus	Ionen-transport	Kathode aus/ein	Temp. [°C]
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	H <sub>2</sub> gasförmig CO	← O <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> Luft	900
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	H <sub>2</sub> gasförmig CO	← CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> Luft CO <sub>2</sub>	650
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	H <sub>2</sub>	→ H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O gasförmig O <sub>2</sub> Luft	220
HT-PEMFC	High Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H <sub>2</sub>	→ H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O gasförmig O <sub>2</sub> Luft	160
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	CH <sub>3</sub> OH CO <sub>2</sub>	→ H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O flüssig O <sub>2</sub> Luft	90
LT-PEMFC	Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H <sub>2</sub>	→ H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O flüssig O <sub>2</sub> Luft	80
AFC	Alkaline Fuel Cell	H <sub>2</sub>	← OH <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> gasförmig	80

# Produktionsprozess

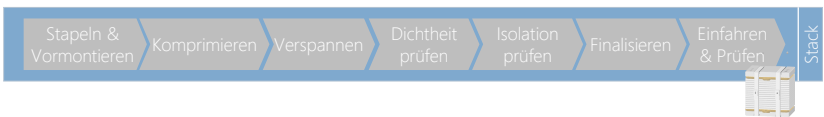
## von PEM-Brennstoffzellenkomponenten

- Die Prozesskette für die Serienfertigung von PEM-Brennstoffzellensystemen unterscheidet sich je nach Anwendung und jährlich produzierter Stückzahl. Einheitliche Standards sind aufgrund des **Manufakturcharakters** in der Brennstoffzellenfertigung aktuell noch nicht vorhanden.
- Die Produktion eines PEM-Brennstoffzellensystems kann in die drei übergeordneten Schritte **Komponentenfertigung**, **Stackfertigung** und **Systemfertigung** gegliedert werden.
- Im Rahmen dieser Broschüre werden die Prozessschritte vorgestellt, die den **aktuellen Stand der Technik** in der Fertigung von PEM-Brennstoffzellenkomponenten ausmachen.
- Die Fertigung des Brennstoffzellenstacks sowie des -systems wird im Rahmen einer separaten Broschüre („Produktion von Brennstoffzellensystemen“) näher erläutert.

### Komponentenfertigung:



### Stackfertigung\*:



### Systemfertigung\*:



\*Bestandteil der Broschüre „Produktion von Brennstoffzellensystemen“

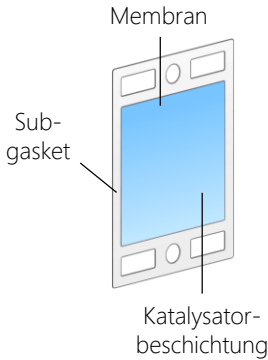
Prozessschritt    Zwischenprodukt    Endprodukt

# Übersicht

## der PEM-Brennstoffzellenkomponenten

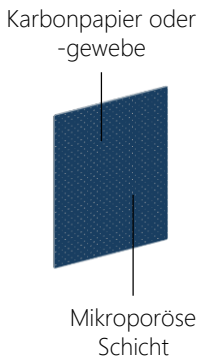


### Katalysatorbeschichtete Membran



- Die mit Platinkatalysator beschichtete Polymermembran wird als katalysatorbeschichtete Membran (engl. Catalyst Coated Membrane, CCM) bezeichnet.
- Es befindet sich jeweils eine Katalysatorschicht auf der Anoden- und der Kathodenseite. Die Schichten unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und Dicke.
- Über die CCM findet der Wasserstoffionentransport statt, die Katalysatorschichten ermöglichen die Oxidation respektive die Reduktion.

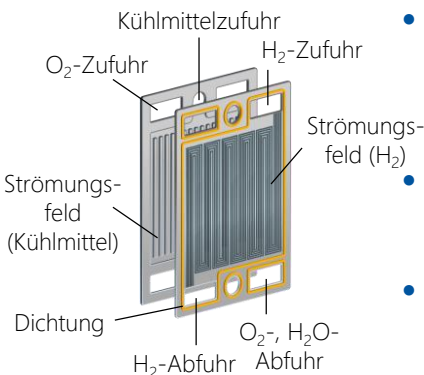
### Gasdiffusionsschicht



- Die Gasdiffusionsschicht (engl. Gas Diffusion Layer, GDL) besteht aus Karbonpapier oder -gewebe und hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle.
- Die GDL ermöglicht die gleichmäßige Verteilung der Reaktionsmedien auf die Katalysatorschichten der Anoden- sowie der Kathodenseite.
- Die mikroporöse Schicht (engl. Microporous Layer, MPL) verbessert die Regulierung des Wasserhaushaltes an den Elektroden.



### Bipolarplatte



- Die Bipolarplatte (engl. Bipolar Plate, BPP) besteht in der Regel aus zwei Bipolarhalbplatten, die je nach Material (metallisch\* oder graphitisch) geformt, beschichtet und gefügt werden.
- Über die BPP werden die Reaktionsmedien befördert und die Reaktionswärme aus der Brennstoffzelle abgeführt.
- Die BPP ist elektrisch leitend und speist somit die Elektronen in den Verbraucherstromkreis.

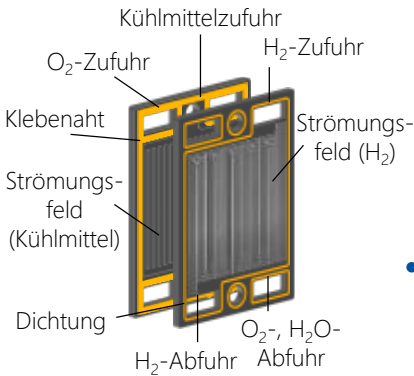
\*im Fokus dieser Broschüre

# Graphitische Bipolarplatte

Informationen zum Produkt in Form eines Exkurses



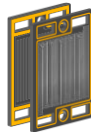
## Graphitische Bipolarplatte



- Das Material einer Bipolarplatte für die Anwendung in langlebigen Brennstoffzellen bringt ideale Eigenschaften mit sich. Dazu zählen hohe Korrosionsfestigkeit, hohe mechanische Festigkeit, geringer Grenzflächenkontaktwiderstand, hoher Kontaktwinkel, Undurchlässigkeit für Reaktionsgase und keine Sprödigkeit.
- Auch Compound-Bipolarplatten bilden eine Alternative zu Metall und bestehen aus polymergebundenen, hochgefüllten Compound-Materialien auf Graphitbasis.

## Besonderheiten

Durch das andersartige Grundmaterial unterscheiden sich die produkt- und prozessseitigen Eigenschaften von graphitischen Bipolarplatten gegenüber metallischen Bipolarplatten deutlich. Beispielsweise werden zwei Bipolarhalbplatten durch eine Klebnaht gefügt. Auch die Formgebung unterscheidet sich erheblich vom Prozess der metallischen Bipolarplatten. Beide Produkte bringen Vor- und Nachteile mit sich.



### Vorteile

- Lebensdauer beträgt mehr als 40.000 Betriebsstunden
- Hohe Korrosionsfestigkeit
- Niedriger Grenzflächenkontaktwiderstand
- Bei Graphit-Verbundwerkstoff: höhere elektrische Leitfähigkeit durch ein höheres Kohlenstoff-Polymer-Verhältnis

### Nachteile

- Höheres Volumen
- Sprödigkeit
- Geringere mechanische Festigkeit
- Höhere Produktionskosten bei großer Stückzahl
- Erschwerte Produzierbarkeit aufgrund des mechanischen Werkstoffverhaltens

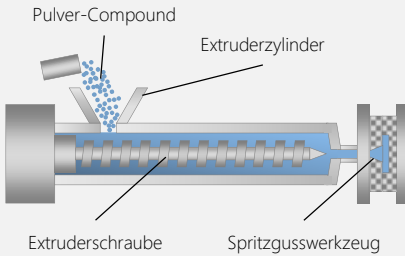
# Herstellung graphitischer BPP

## Auszug wesentlicher Produktionsprozesse



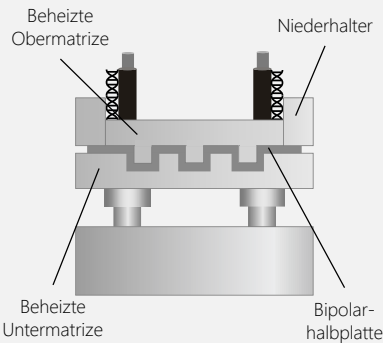
Graphitische Bipolarplatten unterscheiden sich in der Fertigung von metallischen Bipolarplatten. Die Formgebung und das Kleben als mitunter wesentliche Unterschiede in der Produktion werden im Folgenden erläutert.

### Spritzgießen



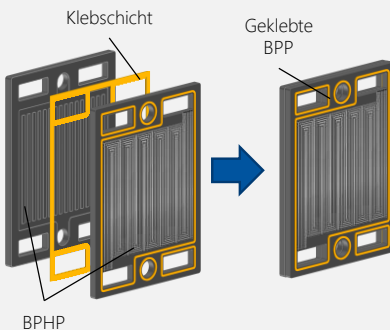
- Das Pulver-Compound wird einem Extruder zugeführt und zu einer homogenen Masse geschmolzen.
- Die homogene Masse wird durch die Windung der Extruderschraube zum Spritzgusswerkzeug transportiert und diesem hinzugefügt.
- Es folgt die Bauteilformgebung und der Auswurf der Bauteilgeometrie aus dem Werkzeug.

### Formpressen



- Das Formpressen erfordert eine Presse, ein Formwerkzeug und Formmasse.
- Berücksichtigung von Parametern wie Niederhalte- oder Presskraft
- Überschüssiges Formmassenmaterial sorgt für Füllung von Hohlräumen.
- Verluste durch hohe Prozessausschussraten und das Überschussmaterial

### Kleben der BPHP



- Kleb- oder Dichtstoff wird direkt auf die BPHP aufgetragen und verrutscht nicht mehr.
- Zum Dichten werden z. B. „cure in place gaskets“ verwendet, die nach Aufbringung aushärten.
- „Nicht klebrige“ Stoffe haben nach Aushärtung die Eigenschaften einer Dichtung.
- „Dauerklebrige“ Stoffe bilden eine Verklebung im klassischen Sinne.
- Haftklebstoffe sind z. B. Klebebänder oder Transverfilme. Sie bieten prozesstechnische Vorteile.





# Mischen

## CCM-Fertigung

### Anodenrezeptur (Beispiel)

**Katalysatorpulver:**

Platinbeschichtetes Kohlenstoffsubstrat (ca. 15 Gew.-%)

**Lösungsmittel:**

Entionisiertes Wasser (ca. 40 Gew.-%) und bspw. Methanol (ca. 40 Gew.-%)

**Binder:**

Ionomerlösung (ca. 5 Gew.-%)

### Kathodenrezeptur (Beispiel)

**Katalysatorpulver:**

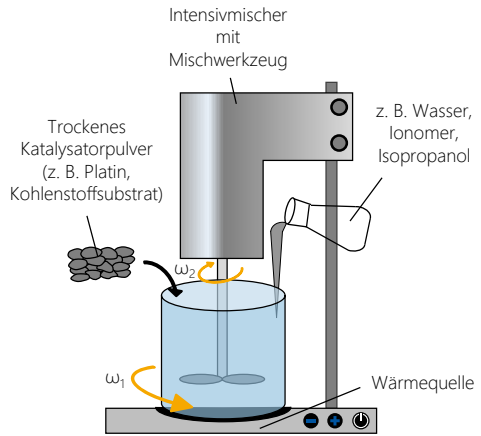
Platinbeschichtetes Kohlenstoffsubstrat (ca. 20 Gew.-%)

**Lösungsmittel:**

Entionisiertes Wasser (35 Gew.-%) und bspw. Methanol (35 Gew.-%)

**Binder:**

Ionomerlösung (ca. 10 Gew.-%)



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Durch Energieeintrag werden mehrere voneinander getrennte Ausgangsmaterialien über ein rotierendes Werkzeug zu einer Katalysatorfarbe verbunden.
- Die Katalysatorfarbe besteht maßgeblich aus Kohlenstoffsubstrat (z. B. Carbon black) und Katalysatormaterial (bspw. Platin, Platin-Ruthenium, Platin-Kobalt). Zur Herstellung der Katalysatorfarbe wird außerdem Ionomer und Lösungsmittel (z. B. Wasser, Isopropanol) benötigt.
- Das Anrühren der Katalysatorfarbe für die Anodenschicht und die Kathodenschicht der CCM erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen getrennt voneinander.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Platingehalt Kathodenseite: ca. 0,4 mg/cm<sup>2</sup>
- Platingehalt Anodenseite: ca. 0,1 mg/cm<sup>2</sup>
- Atmosphäre: Kontaminationsfrei
- Mischdauer: > 1 h
- Mischtemperatur: 2 °C
- Mischgeschwindigkeit: 600 – 4.000 U/min

### Technologiealternativen

- Schaufelmischer
- Rotationskugelmischer
- Ultraschallmischer

### Qualitätseinflüsse

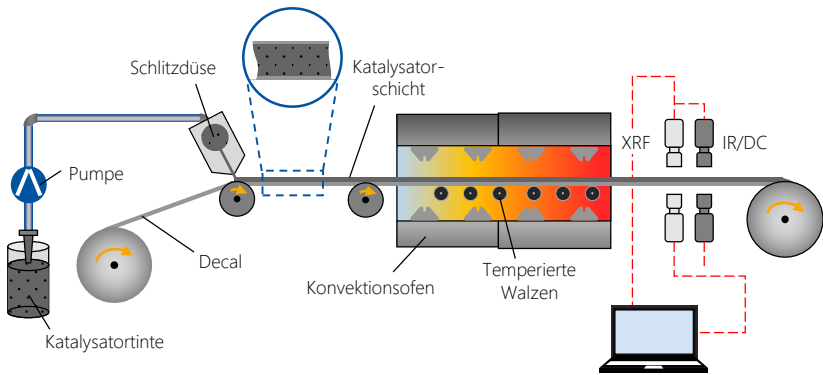
- Mischdauer
- Mischtemperatur
- Mischwerkzeug
- Umgebungsbedingungen

### Qualitätsmerkmale

- Porosität
- Gleichmäßige Platinbeladung
- Viskosität

# Decal beschichten & Trocknen

## CCM-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Bei Anwendung des Decal-Verfahrens handelt es sich um eine indirekte Beschichtung der Polymermembran mittels Decal-Transfer-Trägerfolie, im Folgenden „Decal“ genannt. Das Verfahren ermöglicht eine trockene Beschichtung der feuchtigkeitsempfindlichen Polymermembran.
- Die im vorherigen Schritt hergestellte Katalysator-tinte wird auf das Decal (z. B. Polytetrafluorethylen [PTFE], Polypropylen [PP]) per Schlitzdüse aufgebracht.
- Das beschichtete Decal wird anschließend in einen Konvektionsofen überführt und getrocknet.
- Nach Verdampfen der Lösungsmittel wird das Decal hinsichtlich der Homogenität, Partikelgröße sowie Dicke der Katalysatorschicht geprüft. Dies kann unter Verwendung von Infrarot/Gleichstrom- (IR/DC) und/oder Röntgenfluoreszenzsystemen (XRF) stattfinden.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Beschichtungsdicke (Anode): 3 - 15  $\mu\text{m}$
- Beschichtungsdicke (Kathode): 10 - 30  $\mu\text{m}$
- Bahngeschwindigkeit: 0,1 - 1 m/min
- Trocknungszeit: ca. 4 Min.
- Trocknungstemperatur: ca. 30 - 70  $^{\circ}\text{C}$  (Luft)  
120 - 160  $^{\circ}\text{C}$  (beheizte Rollen)

#### Technologiealternativen

- Transferwalze
- Siebdruck, Tintenstrahldruck, Tiefdruck
- Rakel
- Infrarottrocknung, Lasertrocknung
- Extrusion

#### Qualitätseinflüsse

- Viskosität der Katalysator-tinte
- Auftragswerkzeug
- Ofentemperatur

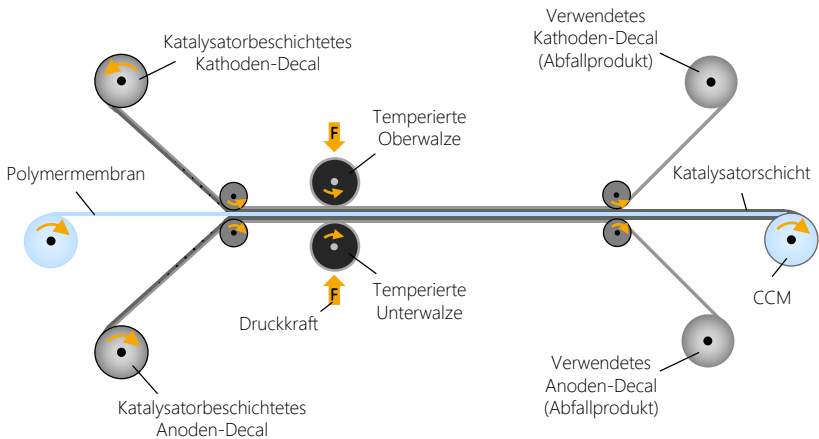
#### Qualitätsmerkmale

- Schichthomogenität
- Partikelgröße
- Schichtdicke
- Restfeuchte nach Trocknung

# Heißpressen & Decal entfernen



## CCM-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die Übertragung der trockenen Katalysatorschicht vom Decal auf die Polymermembran erfolgt per Heißpressvorgang. Da die Produktivität dieses Schrittes maßgeblich von der Heißpressmethode abhängig ist, wird ein Rolle-zu-Rolle-Prozess empfohlen.
- Kathoden- und Anoden-Decal werden der Ober- und Unterseite der Polymermembran gleichzeitig zugeführt und zwischen das Walzenpaar gebracht.
- Für eine gute Übertragbarkeit der Katalysatorschicht bringt das temperierte Walzenpaar (100 - 170 °C) die Polymermembran auf Glasübergangstemperatur und erzeugt einen konstanten Liniendruck.
- Im Anschluss werden Kathoden- und Anoden-Decal, analog zum Entfernen eines Aufklebers (engl. „decal“), abgezogen und bilden ein Abfallprodukt.
- Die CCM ist fertiggestellt und wird zu einem Coil aufgewickelt.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Liniendruck: 150 - 250 N/cm
- Temperatur: 100 - 170 °C

#### Technologiealternativen

- **Direkte Membranbeschichtung**
- Siebdruck, Tintenstrahl, Tiefdruck, Rakel, additive Schichtherstellung
- **Indirekte Membranbeschichtung**
- Transferwalze
- Beschichtung der GDL (GDE-Ansatz)

#### Qualitätseinflüsse

- Decal-Qualität
- Kombination von Walzentemperatur, Vorschubgeschwindigkeit und Anpressdruck
- Dauer der aktiven Krafteinwirkung

#### Qualitätsmerkmale

- Rückstandsfreies Decal
- Zerstörungsfreiheit von Katalysatorschicht und Polymermembran
- Gleichmäßige Haftung der Katalysatorschicht

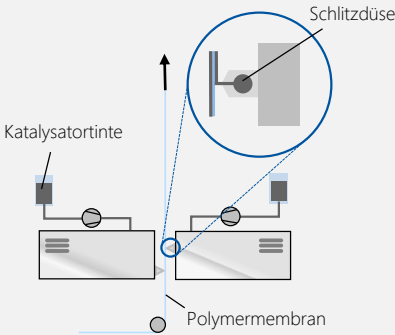
# Alternativer Katalysatorauftrag

## Beschichtungskonzepte und Forschungsansätze



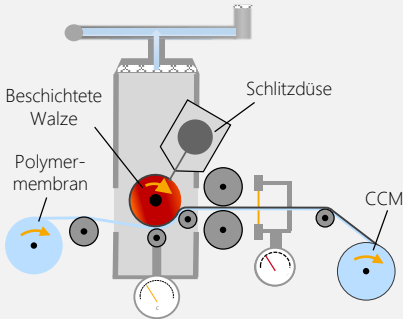
Die zuvor gezeigte Decal-Methode gilt als eine mögliche Option zur Membranbeschichtung. Alternativ sind die folgenden Vorgehensweisen denkbar:

### CCM-Direktbeschichtung:



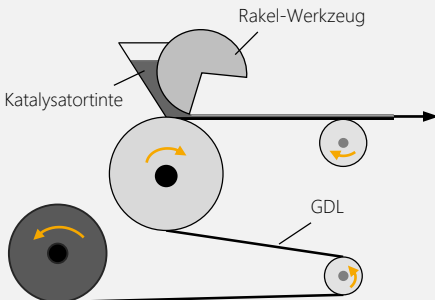
- Die Polymermembran wird in vertikaler Richtung beidseitig mittels Schlitzdüsen beschichtet.
- Die vertikale Ausrichtung ermöglicht Bauraumersparnis und eine beidseitige Beschichtung bei gleicher Schichtqualität.
- Aufgrund der hohen Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Polymermembran muss Riss- und Wellenbildung entgegengewirkt werden.

### Indirekte Beschichtung per Transferwalze:



- Die Katalysatorfarbe wird auf ein mit Teflon beschichtetes Zwischenelement (bspw. eine Walze) aufgebracht und (teilweise) getrocknet.
- Die Übertragung findet nach dem Vorbild des Heißpressens auf der Unterseite des Zwischenelementes statt, wo die Polymermembran entlanggeführt wird.
- Das Zwischenelement muss gereinigt werden, bevor es abermals beschichtet wird.

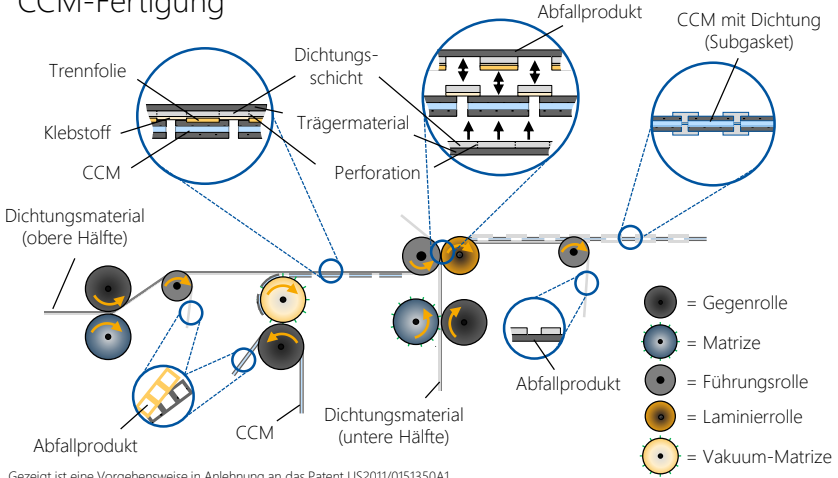
### GDE-Ansatz:



- Die Katalysatorfarbe wird direkt auf die GDL appliziert, es entsteht eine sogenannte Gas Diffusion Electrode (GDE).
- Die GDE wird anschließend auf die Ober- und Unterseite einer Polymermembran aufgebracht und zur MEA laminiert.
- Gezeigt ist die Beschichtung per Rakel, wobei die Dicke der Katalysatorfarbe präzise eingestellt werden kann.

# Subgasket anbringen

## CCM-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die obere Hälfte des Subgaskets (dt. „Subdichtung“), bestehend aus Trägermaterial, Klebstoff, PET-Dichtungsschicht und Trennfolie, wird zunächst mittels Matrice perforiert, und anschließend wird überschüssige Trennfolie entfernt.
- Aus der zugeführten CCM wird mittels Vakuu-Matrice Material in festgelegter Form herausgetrennt und an die obere Hälfte der Dichtung geheftet.
- Die untere Hälfte der Dichtung, lediglich aus Trägermaterial und PET-Dichtungsschicht bestehend, wird ebenfalls zunächst perforiert und per Laminierrolle auf die Unterseite des CCM-Materials gepresst.
- Gleichzeitig wird der perforierte Teil des oberen Trägermaterials samt Trennfolie entfernt und entsorgt.
- Zuletzt wird der perforierte Teil des unteren Trägermaterials entfernt.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Vorschubgeschwindigkeit: 30 m/min
- Matrizengeometrie: Produktabhängig
- Anpressdruck bei Fügeprozess: Materialabhängig

### Technologiealternativen

- Spritzgießen einer Rahmendichtung
- Aufbringen des Subgaskets per Roboter

### Qualitätseinflüsse

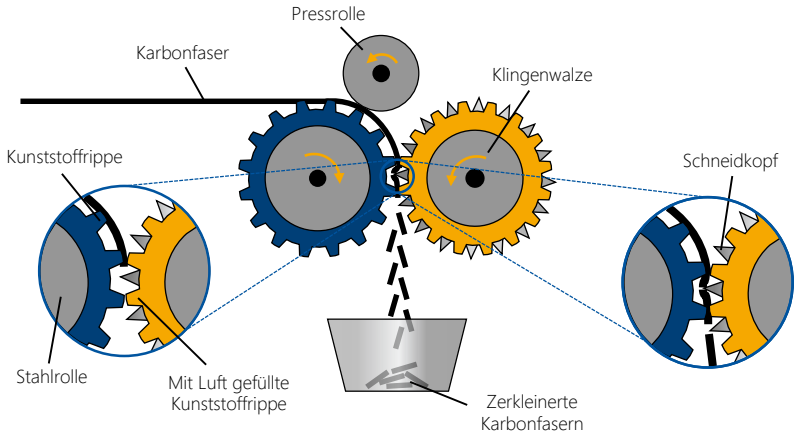
- Axialer, radialer und Winkelversatz der Walzen zueinander
- Positionstoleranz zwischen Dichtung und CCM

### Qualitätsmerkmale

- Positionsgenaue Dichtung
- Keine Verunreinigung auf der MEA-Oberfläche
- Festigkeit der Verbindung

# Karbonfaser zerkleinern

## GDL-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Zur Herstellung der GDL werden trockene Karbonfasern zerkleinert.
- Der Faserstrang wird über eine Stahlrolle mit Kunststoffrippen (blau) geführt und durch eine Pressrolle in Position gehalten.
- Die Schneidköpfe der rotierenden Klingenwalze beaufschlagen den Faserstrang mit Druck in Querrichtung und führen zum Bruch der Faserfilamente, bis die Faser vollständig durchtrennt ist. Dabei treiben mit Luft gefüllte Kunststoffrippen (orange) die geschnittenen Fasern geräuschlos aus.
- Das Rotationschneidewerkzeug ist in der Lage, mit hoher Geschwindigkeit zu arbeiten. Die für das Verfahren typische Schneidkopfabnutzung wird durch den Schnitt „ins Leere“ minimiert.
- Die 6 bis 12 Millimeter großen Fasern werden in einem Auffangbehälter gesammelt und für die nachfolgende Karbonpapierherstellung verwendet.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Schnittrate: 9 m/min
- Partikelgröße: 6 - 12 mm
- Anpressdruck der Pressrolle: 0,1 MPa

### Technologiealternativen

- Guillotineschneiden

### Qualitätseinflüsse

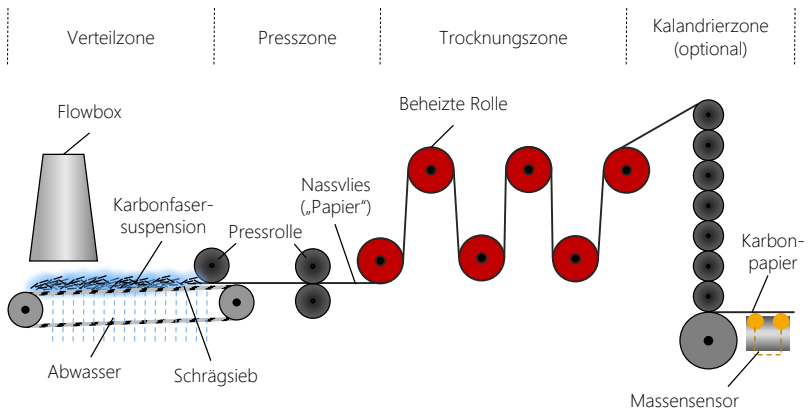
- Schärfe der Schneidköpfe
- Form der Schneidköpfe
- Material der Schneidköpfe

### Qualitätsmerkmale

- Partikelform
- Oberflächenmorphologie

# Karbonpapier herstellen

GDL-Fertigung



## Komponentenfertigung

## Stackfertigung

## Systemfertigung

- Geschnittene Kohlenstofffasern werden zusammen mit einem Binderpolymer innerhalb einer sogenannten Flowbox zu einer Suspension verarbeitet und gleichmäßig auf ein Schrägsieb aufgebracht.
- Das Schrägsieb ist mit Kunststoffgewebe bespannt und ermöglicht den Abfluss von Wasser, hält jedoch die Kohlenstofffasern zurück.
- Beim anschließenden Pressen wird durch weiteres Entfernen von Wasser der Feststoffgehalt der Papiersuspension erhöht; es entsteht Nassvlies („Papier“).
- Unter Beibehaltung der Blattstruktur wird in der Trocknungseinheit das Volumen des Papiers reduziert und der Binder gehärtet.
- Optional wird die Oberflächenstruktur durch Kalandrieren festgelegt. Gekühlte Walzen pressen das Karbonpapier zusammen und entfernen letzte Faserungen und Schwammstrukturen.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Produktivität: 300 - 320 m<sup>2</sup>/h
- Flächengewicht: 15 - 70 g/m<sup>2</sup>
- Materialstärke: 150 - 300 µm
- Binderanteil: < 25 %

### Technologiealternativen

- Spunlace-Vliesherstellung
- Gewebeerstellung

### Qualitätseinflüsse

- Wassergehalt der Suspension
- Höhen- oder Kraftmessung beim Kalandrieren
- Güte der Faserdispersion
- Homogene Binderverteilung
- Bahnspannung

### Qualitätsmerkmale

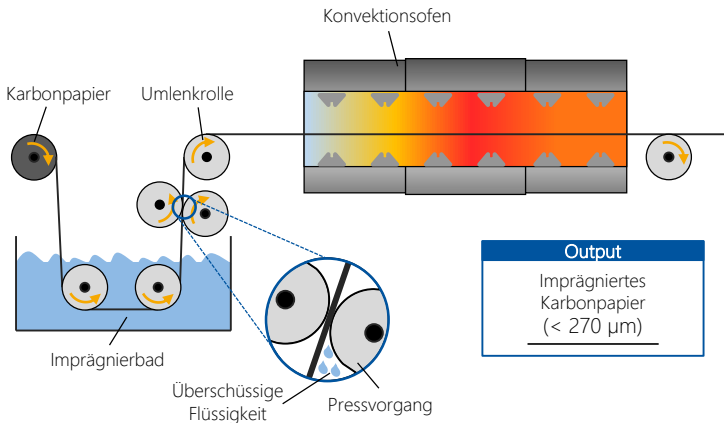
- Gleichmäßige Materialstärke
- Glätte des Materials
- Nassfestigkeit des Papiers
- Schädigungsfreie Oberfläche

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,5 - 1,0 Mio. €

# Imprägnieren

## GDL-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Das Karbonpapier wird mit einem duroplastischen Harz (z. B. Phenolharz) imprägniert, so dass eine gewünschte Materialfestigkeit sowie Porosität erreicht werden. Außerdem werden die elektrische und die thermische Leitfähigkeit nach Durchlaufen des Graphitierungsprozesses erhöht.
- Nach Durchlaufen des Imprägnierbades wird überschüssige Flüssigkeit durch einen Pressvorgang entfernt.
- Verbliebene Lösungsmittel werden innerhalb eines Konvektionsofens bei ca. 150 °C verdampft, und das Harz wird gehärtet.
- Alternativ zum kontinuierlichen Prozess wird das Karbonpapier nach der Trocknung vereinzelt abwechselnd mit Separatorpapier bei erhöhter Temperatur gestapelt und anschließend verpresst.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Trocknungstemperatur: 150 °C
- Materialstärke: 200 - 270 µm

#### Technologiealternativen

- Infrarottrocknung
- Stapeln mit Separatorpapier

#### Qualitätseinflüsse

- Zusammensetzung des Imprägniermaterials
- Trocknungstemperatur
- Trocknungszeitraum

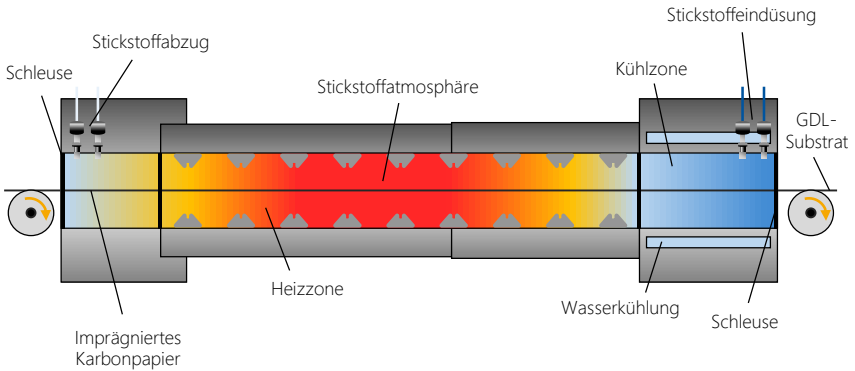
#### Qualitätsmerkmale

- Materialstärke
- Materialdichte



# Graphitieren

## GDL-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die Graphitierung (auch Hochtemperatur-Carbonisierung) des duroplastischen Harzes führt zu einem höheren Elastizitätsmodul, einer erhöhten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie einer oxidativen Beständigkeit.
- Das Karbonpapier wird in einem Ofen unter Schutzgasatmosphäre (Stickstoff, Argon) oder in Vakuum auf Temperaturen von ca. 1.400 bis 2.000 °C (im Batchprozess mehr als 2.000 °C) erhitzt.
- Die Bandware durchläuft unterschiedliche Temperaturzonen innerhalb der Heizzone und wird schließlich in einer Kühlzone auf Raumtemperatur abgekühlt.
- Das Endprodukt hat eine Materialstärke von 150 bis 300 µm.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Prozesstemperatur: 1.400 - 2.500 °C
- Materialstärke: 150 - 300 µm
- Dichte des Papiers: 0,2 - 0,3 g/cm<sup>3</sup>
- Prozessdauer < 5 Min. (< 15 Min. bei Batchprozess)
- Vakuum oder Schutzgasatmosphäre

### Technologiealternativen

- Graphitierung unter Schutzgasatmosphäre
- Batchcarbonisierung unter Vakuum oder Schutzgas

### Qualitätseinflüsse

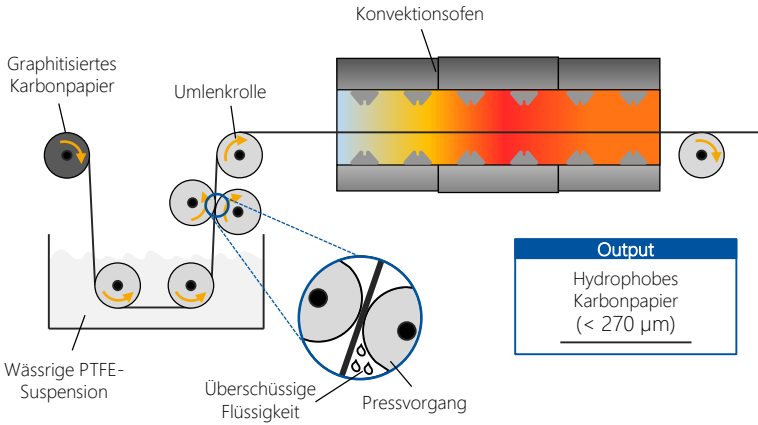
- Temperaturverlauf
- Schwelgasführung (Abführung der Pyrolyseprodukte)
- Inertisierung des Ofens

### Qualitätsmerkmale

- Pyrolysegrad des Harzes > 99,5 %
- Ablagerungsfreies Produkt
- Leitfähigkeit des Materials
- Kohlenstoffgehalt

# Hydrophobieren

## GDL-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Das GDL-Substrat wird in eine wässrige Polytetrafluorethylen (PTFE)-Suspension getaucht, wobei überschüssige Suspension entfernt wird. Dieser Prozess trägt zur Verbesserung der hydrophoben Eigenschaften bei.
- Der PTFE-Gehalt der späteren GDL wird durch den Anteil des PTFE in der Suspension eingestellt.
- Verbliebene Lösungsmittel werden durch Ofentrocknung entfernt und die PTFE-Partikel durch Sintern bei ca. 300 °C bis 350 °C an das Grundmaterial gebunden.
- Die Geschwindigkeit des Trocknungsprozesses beeinflusst die PTFE-Verteilung im Material. Durch schnelles Trocknen verbleibt das PTFE in Oberflächenzonen, langsames Trocknen sorgt für eine ganzheitliche Verteilung.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Trocknungstemperatur: 300 - 350 °C
- PTFE-Massenanteil: 5 - 10 Gew.-%
- Papierdicke: 200 - 270 µm
- Materialalternative: Fluorethylen-Propylen (FEP)

#### Technologiealternativen

- Infrarottrocknung
- Lufttrocknung
- Sprühen
- Pinselauftrag

#### Qualitätseinflüsse

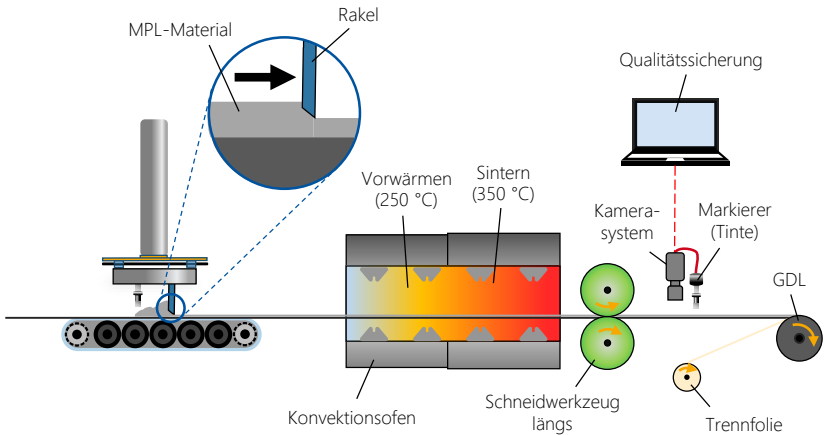
- Zusammensetzung des Imprägniermaterials
- Trocknungstemperatur
- Trocknungszeitraum

#### Qualitätsmerkmale

- Homogene PTFE-Verteilung

# MPL aufbringen & Sintern

## GDL-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die mikroporöse Schicht (engl. „Microporous Layer“, MPL), bestehend aus Kohlenstoff- oder Graphitpartikeln und polymerem Bindemittel (z. B. PTFE), besitzt eine Porengröße zwischen 100 und 500 nm, während das Karbonpapier eine Porengröße von 10 bis 30  $\mu\text{m}$  besitzt.
- Primäre Funktion der MPL ist das Wassermanagement, da sie flüssiges Wasser effektiv von den Katalysatorschichten abführt.
- Die MPL wird hier über ein Rakelverfahren mit einer Schichtdicke von weniger als 50  $\mu\text{m}$  auf das Karbonpapier aufgebracht.
- Zur Reduzierung von Rissbildung wird das Lösungsmittel langsam verdampft. Das Sintern ermöglicht eine ausreichende Haftung der MPL.
- Abschließend wird das Material besäumt und auf Qualitätsmängel überprüft sowie markiert. Das Aufwickeln erfolgt unter Zuhilfenahme von Trennfolie.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Porengröße: 100 - 500 nm
- Schichtdicke: < 50  $\mu\text{m}$
- Dauer des Sinterprozesses: < 10 Min.
- Sintertemperatur: ca. 300 - 350 °C

### Technologiealternativen

- Schlitzdüse
- Siebdruck
- Sprühauftrag
- Aufrollen

### Qualitätseinflüsse

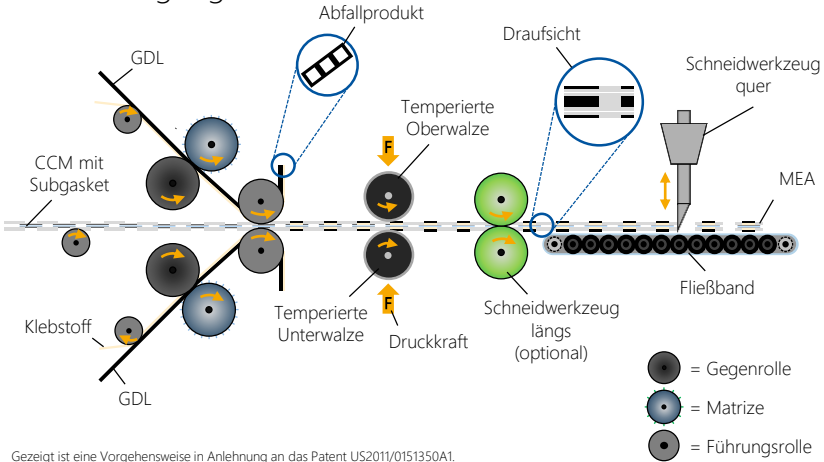
- Sinterzeit
- Temperaturverlauf beim Sintern
- MPL-Material

### Qualitätsmerkmale

- Haftung des MPL auf Karbonpapier
- Keine Überschreitung des Schmelzpunktes
- Schädigungsfreie MPL-Oberfläche
- Glätte

# Verbinden & Vereinzeln

## MEA-Fertigung



Gezeigt ist eine Vorgehensweise in Anlehnung an das Patent US2011/0151350A1.

### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die CCM wird beidseitig mit der GDL verbunden und anschließend vereinzelt. Es entsteht eine MEA mit Dichtung.
- Die GDL wird mit Klebstoff versehen und anhand der vorgegebenen Geometrie perforiert.
- Die perforierte GDL wird auf die Ober- sowie Unterseite der MEA mit Dichtung geheftet.
- Das Fügen erfolgt im Anschluss mittels Heißpressvorgang.
- Der Prozessschritt ist mit der Vereinzlung beendet. An dieser Stelle ist neben der querseitigen Vereinzlung je nach Produkt- und Prozessauslegung außerdem eine längsseitige Vereinzlung möglich.
- Da die MEA verglichen mit der Bipolarplatte die „ungenauere“ Komponente darstellt, bedarf diese besonderer Aufmerksamkeit beim Toleranzmanagement.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Temperatur Heißpressvorgang: 100 - 160 °C
- Anpressdruck: 1.000 - 10.000 kg/cm<sup>2</sup>

### Technologiealternativen

- Diskontinuierlicher Heißpressvorgang
- Additive Schichtherstellung

### Qualitätseinflüsse

- Axialer, radialer und Winkelversatz der Rollen
- Kombination von Walzentemperatur, Vorschubgeschwindigkeit und Anpressdruck
- Dauer der aktiven Krafteinwirkung
- Dickenschwankungen und unregelmäßige Schnittkanten der porösen GDL

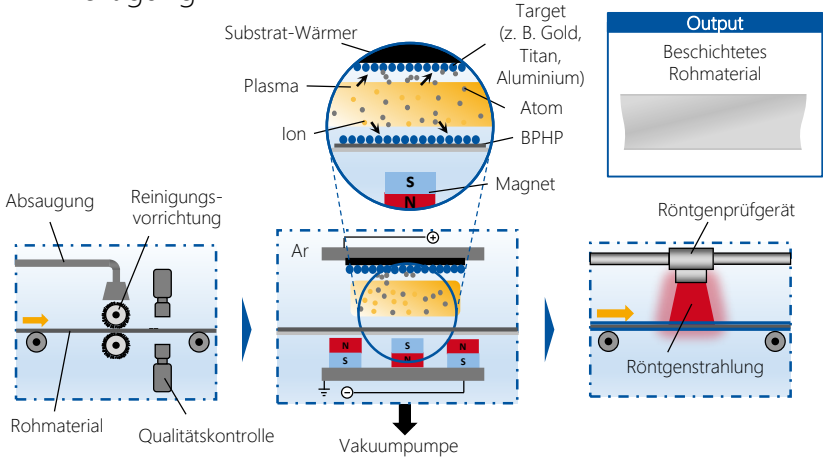
### Qualitätsmerkmale

- Positionsgenauigkeit der GDL
- Festigkeit der Fügeverbindung
- Maßhaltigkeit der Schnittgeometrie



# Beschichten

## BPP-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die Beschichtung des Rohmaterials für die Bipolarhalbplatten wird mittels PVD-Verfahren (engl. „Physical Vapour Deposition“, CVD) durchgeführt.
- Die Oberfläche des Rohmaterials wird zunächst von beiden Seiten gereinigt und deren Qualität anschließend überprüft.
- Das Rohmaterial wird innerhalb einer mit Inertgas (z. B. Argon) gefüllten Vakuumkammer positioniert, das Inertgas wird ionisiert und bildet ein Plasma.
- Das Target (Beschichtungsmaterial, bspw. Gold, Titan, Aluminium) wird mit durch das Plasma gebildete Ionen beschossen. Atome des Targets werden gelöst, bewegen sich zum Substrat (hier: das Rohmaterial) und diffundieren in dessen Oberfläche.
- Nach dem Austritt des beschichteten Rohmaterials aus der Vakuumkammer wird ihre Wandstärke unter Verwendung von Röntgenstrahlung gemessen.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Temperatur: 450 - 500 °C
- Vakuumdruck:  $1 \times 10^{-1}$  -  $1 \times 10^{-7}$  mbar
- Schichtdicke: 0,1 - 6,3  $\mu\text{m}$
- Taktzeit: ca. 2 - 5 Min.

#### Technologiealternativen

- Alternative Beschichtungsmaterialien: Titanitrid, Chromnitrid, amorpher Kohlenstoff
- Chemical Vapour Deposition (CVD)
- Nitrieren
- Galvanisches Beschichten

#### Qualitätseinflüsse

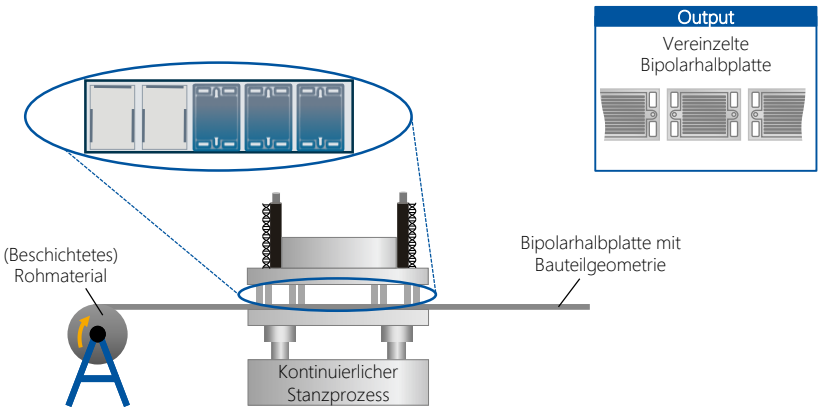
- Inertgas
- Beschichtungsmaterial
- Form des Substrats

#### Qualitätsmerkmale

- Elektrische Leitfähigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

# Umformstanzen

BPP-Fertigung



## Komponentenfertigung

## Stackfertigung

## Systemfertigung

- Das (beschichtete) Rohmaterial für die Bipolarhalbplatten (z. B. 1.4301, 1.4404) wird von einem Coil abgerollt und in die Stanzanlage eingeführt.
- Durch den hochgenauen Transfer wird das Material unterhalb des Formwerkzeugs positioniert und das Presswerkzeug aufgebracht.
- Das Aufbringen der Presskraft führt zur plastischen Verformung des Materials und zum Schneiden von Freikonturen.
- Unterschiedliche Verformungen und Freikonturen der Bipolarhalbplatten sind möglich; diese werden durch unterschiedliche Werkzeugstufen realisiert.
- Vorteile des Umformstanzens sind die hohe Wiederholgenauigkeit und die hohe Taktzeit.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Taktzeit: 30 - 50 BPP/min
- Presskraft: 460 - 11.000 kN (46 - 1.100 t)
- Hubweg: 200 - 600 mm
- Mindestanzahl der Druckpunkte: 4
- Mögliche Materialstärken: 0,05 - 1 mm
- Toleranz Materialstärke: ca. 0,01 mm

### Technologiealternativen

- Tiefziehen
- Spritzgießen
- Gummikissen-Pressen
- Rolle-zu-Rolle-Formen
- Hydroforming

### Qualitätseinflüsse

- Umformdruck
- Klemmkraft
- Umformeigenschaften des Basismaterials
- Bauteilgeometrie
- Maschinensteifigkeit

### Qualitätsmerkmale

- Hohe Taktzeit
- Bruch- und Schädigungsfreiheit
- Gleichmäßige Flowfield-Struktur
- Hohe Wiederholgenauigkeit

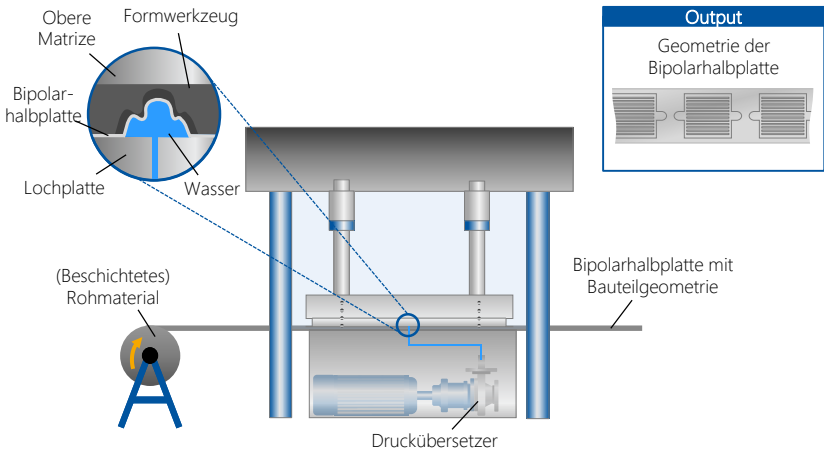
Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 1,5 - 2,0 Mio. €



# Hydroforming

## BPP-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Das (beschichtete) Rohmaterial für die Bipolarhalbplatte (z. B. 1.4301, 1.4404) wird von einem Coil abgerollt, in die Hydroforming-Anlage eingeführt und unter dem Formwerkzeug positioniert.
- Durch Herabführen der oberen Matrize wird ein Anpressdruck (auch Klemmkraft) auf Material, Formwerkzeug und untere Matrize aufgebracht.
- Anschließend wird mittels Druckübersetzer Wasser unter Hochdruck gebracht und durch die Lochplatte geleitet. Dies führt – vorgegeben durch die Gestaltung des Formwerkzeuges – zur plastischen Verformung des Materials und somit zur Bildung der Bauteilgeometrie.
- Zur Erhöhung der Ausbringungsrate können mehrere Bauteilgeometrien gleichzeitig geformt werden.
- Durch einen abschließenden Reinigungsprozess wird das umgeformte Material von Rückständen gesäubert.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Umformdruck: 1.000 - 4.000 bar
- Prozesszeit: ca. 5 - 10 Sek. pro Platte
- Arbeitsmedium: Wasser
- Mögliche Materialstärken: 0,05 - 1 mm
- Toleranz Materialstärke: ca. 0,01 mm

### Technologiealternativen

- Stanzen
- Tiefziehen
- Spritzgießen
- Prägen
- Gummikissen-Pressen
- Rolle-zu-Rolle-Formen

### Qualitätseinflüsse

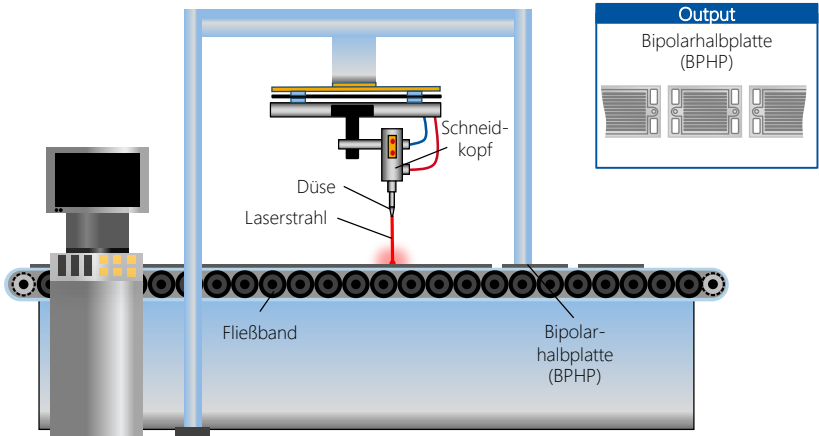
- Umformdruck
- Klemmkraft
- Umformeigenschaften des Basismaterials
- Bauteilgeometrie
- Maschinensteifigkeit

### Qualitätsmerkmale

- Bruch- und Schädigungsfreiheit
- Gleichmäßige Flowfield-Struktur
- Hohe Wiederholgenauigkeit
- Sehr geringe Rückfederung

# Vereinzeln

## BPP-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Der Fertigungsschritt „Vereinzeln & Beschneiden“ ist nur im Falle des Hydroformings und nicht des Umformstanzens notwendig.
- Bipolarhalbplatten werden vereinzelt und mittels Laserbeschnitt in die gewünschte Kontur gebracht.
- Innerhalb des Schneidkopfes wird der Laserstrahl durch eine Linse fokussiert und auf das Blech projiziert. Der hohe Energieeintrag führt zu einer Trennung des Materials.
- Die Schneidoptik ist auf einem sogenannten XY-Portal montiert und die präzise Bewegung des Schneidkopfes innerhalb eines vorgegebenen Bereiches ermöglicht.
- Beschichtete sowie unbeschichtete Materialien können bearbeitet werden.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Arbeitsbereich: 500 - 1.500 mm
- Laserausgangsleistung: 500 - 2.000 W
- Vorschubgeschwindigkeit: 20 - max. 300 m/min bei 0,2 mm Wandstärke
- Genauigkeit: 10 - 50  $\mu\text{m}$

### Technologiealternativen

- Stanzen
- Feinschneiden, Scherschneiden
- Remote-Laserschneiden

### Qualitätseinflüsse

- Art des Lasers
- Schnittgeschwindigkeit
- Fokussierung
- Prozessbedingte Verunreinigungen

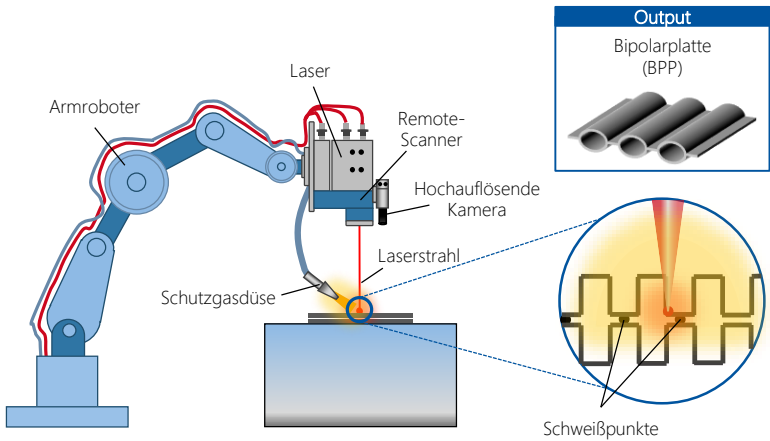
### Qualitätsmerkmale

- Gratfreie Kanten
- Keine Beeinträchtigung der Beschichtung
- Verzugfreier Beschnitt



# Fügen

## BPP-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Im Fügeprozess werden zwei Bipolarhalbplatten zu einer Bipolarplatte verschweißt.
- Die Fokussierung des Laserstrahls und der daraus resultierende hohe Energieeintrag in die Metalloberfläche erwärmt das Metall auf Schmelztemperatur und erzeugt eine stoffschlüssige Verbindung.
- Um Oxidation zu vermeiden, wird der Schweißvorgang unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt.
- Zur Prozessüberwachung und Qualitätssicherung kann der Schweißprozess mittels Sensorik aufgenommen und ausgewertet werden.

### Prozessparameter & -anforderungen

- Taktzeit: 10 - 120 Sek.
- Vorschubgeschwindigkeit: < 60 m/min
- Laserleistung: ca. 500 - 1.000 W
- Wandstärke Material: ca. 100 - 250  $\mu\text{m}$

### Technologiealternativen

- Klebtechnik
- Hartlöten
- Additive Fertigung

### Qualitätseinflüsse

- Positionierung und Verspannung der Bipolarhalbplatten
- Größe der Wärmeeinflusszone
- Prozesstemperatur im Schweißpunkt
- Wellenlänge des Laserstrahls
- Art des Schutzgases

### Qualitätsmerkmale

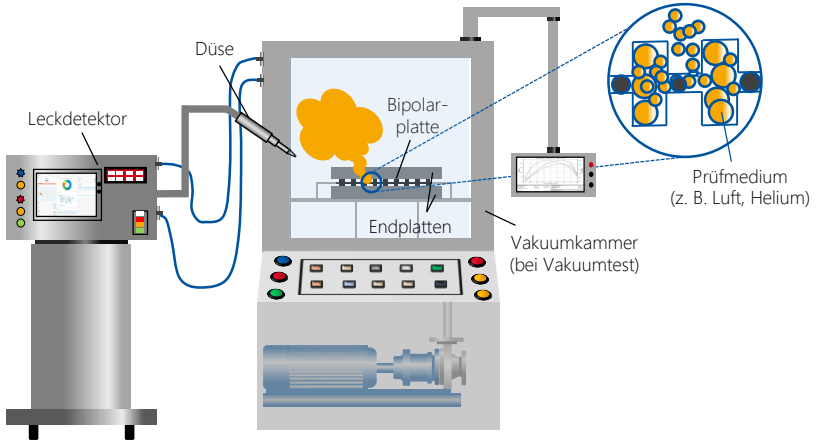
- Bauteilverzug
- Festigkeit der Schweißpunkte
- Mediendichte Verschweißung
- Keine Schmauchspuren

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,8 - 0,9 Mio. €

# Dichtheit prüfen

BPP-Fertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die Bipolarplatten werden abschließend auf Dichtheit überprüft.
- Beim Vakuumtest werden diese innerhalb einer Vakuummutter mit einem Prüfmedium (z. B. Helium) gefüllt und dessen Partialdruck in einer Vakuummutter gemessen.
- Bei erhöhtem Prüfmedium-Partialdruck in der Mutter können Leckagen der Bipolarplatten mit einem Massenspektrometer-Lecksucher (MSLD) identifiziert werden. Dieses Verfahren kann für schärfere Prüfvorgaben verwendet werden.
- Beim Druckabfalltest wird Luft als Prüfmedium in den Prüfling eingeleitet, und Leckagen werden durch Abfall des Luftdrucks im System detektiert.
- Die Rahmenbedingungen zum Bestehen der Leckageprüfung sind vom Hersteller selbst festzulegen. Nach Bestehen des Leckagetests ist die Produktion der Bipolarplatte abgeschlossen.

## Prozessparameter & -anforderungen

- Testdruck: ca. 1 - 1,5 bar
- Taktzeit: ca. 40 Sek.
- Prüfsensibilität:  $3 \times 10^{-2}$  mbar/s (Luft)  
 $2 \times 10^{-6}$  mbar/s (Helium)
- Prüfgas: **Luft**, Helium, Stickstoff, Wasserstoff

## Technologiealternativen

- Durchflussmessung
- Ultraschall-Detektion
- Outside-in-Verfahren

## Qualitätseinflüsse

- Testdruck
- Genauigkeit Leckdetektor
- Geometrie der Brenngaskanäle

## Qualitätsmerkmale

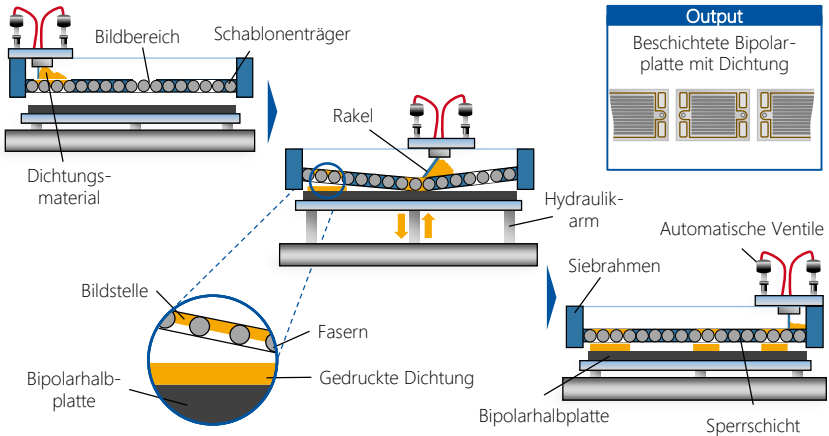
- Keine Verformung oder Zerstörung der Bipolarplatte
- Dichtheit der Bipolarplatte

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,2 - 0,4 Mio. €

# Dichtung aufbringen

## BPP-Fertigung



### Komponentenfertigung

### Stackfertigung

### Systemfertigung

- Die BPP-Dichtungen werden mittels Siebdruckverfahren auf die Bipolarplatte aufgebracht.
- Das Dichtungsmaterial wird per Düse auf den Schablonenträger aufgetragen und durch die Bewegung des Rakels durch die Bildbereiche gepresst.
- Während die Sperrschichten kein Dichtungsmaterial auf die Bipolarplatte übertragen können, sind die Bildbereiche des Schablonenträgers durchlässig. Diese Zonen sind individuell einstellbar.
- Die Bipolarplatte wird mittels Hydraulikarm in unmittelbare Nähe des Schablonenträgers gebracht, so dass ein einwandfreies Aufbringen der Dichtung möglich ist.
- Die überflüssige Druckschicht wird durch die Rakel an den Rand der Druckform befördert und für den nächsten Druckvorgang verwendet.

#### Prozessparameter & -anforderungen

- Taktzeit: < 3 Sek.
- Wandstärke Dichtung: 0,3 - 0,5 mm
- Geschwindigkeit Rakel: 50 mm/s

#### Technologiealternativen

- Dispensieren
- Formed-in-Place-Foam-Gasket (FIPFG)
- Insert-Spritzgießen
- Stanzen

#### Qualitätseinflüsse

- Prozessgeschwindigkeit
- Abstand zwischen den Fasern des Schablonenträgers
- Dosiermenge

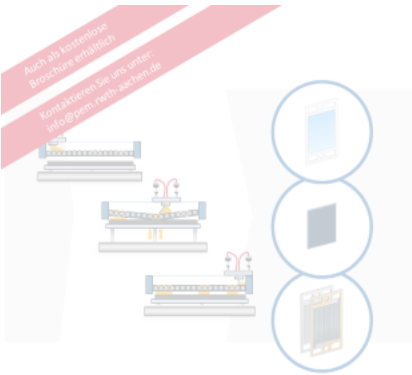
#### Qualitätsmerkmale

- Positionsgenauigkeit der Dichtung
- Gleichmäßiger Dichtring

# Weitere Informationen

## zu Brennstoffzellenstacks und -systemen

Die im Rahmen dieser Broschüre erläuterte Produktionskette der Brennstoffzellenkomponenten wird durch die Produktion von Stack und System fortgesetzt. Für weitere Informationen hinsichtlich dieser kann die unten aufgeführte Broschüre herangezogen werden. In dieser wird detailliert auf die Produktionsschritte zur Montage des Stacks und der Systemassemblierung sowie die damit verbundenen Gesamtkosten eingegangen.



PRODUKTION VON  
BRENNSTOFFZELLEN-  
KOMPONENTEN

Neue Auflage



PRODUKTION VON  
BRENNSTOFFZELLEN-  
SYSTEMEN

Neue Auflage

