

Fit4H2 in Chemnitz am 11. + 12. September 2024

WORKSHOP
Produktionstechnologien für CCM / MEA

Dr. Andreas Willert
Fraunhofer ENAS

Agenda Tag 2

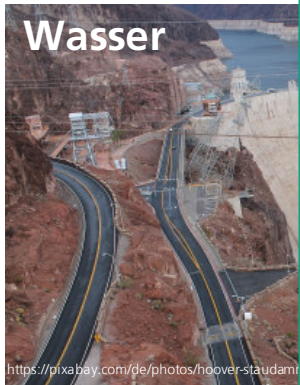
Produktion von Wasserstoff-Systemen



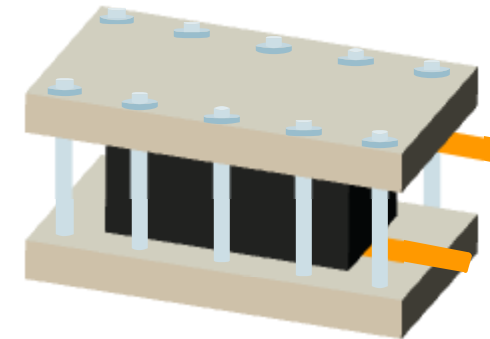
Uhrzeit	Nr.	Themenbereich	Inhalte	Referent:in
09.00 - 10.00 Uhr	21	Produktionstechnologien <i>MEA</i>	- Aufbau - Fertigungstechnologien	Dr. Andreas Willert (ENAS)
10.00 - 11.00 Uhr	22	Referenzfabrik.H2 - live	- Versuchsfeld-Präsentationen Fokus MEA: - Drucktechnologien - Prüfverfahren	Dr. Andreas Willert (ENAS)
11.00 - 12.00 Uhr	(23)	Qualitätssicherung	- Komponenten - Prüftechnologien	Dr. Carmen Meuser / Vladimir Buday
12.00 - 13.00 Uhr		Mittagspause (H2.Block)		
13.00 - 13.30 Uhr			Labor-Präsentationen - Horiba - Materiallabor	Dr. Carmen Meuser / Vladimir Buday
13.30 - 14.30 Uhr	24	Systemkomponenten	- Komponenten - Nutzungsszenarien - Live-Präsentation	Stefan Lohberger
14.30 - 15.00 Uhr		Kaffeepause		
15.00 - 15.30 Uhr		<i>Wertanalyse</i>	- Verfügbarkeit - Kostentreiber - Skaleneffekte - Referenzfabrik.H2	Samu Cardoso/ Dr. Ulrike Beyer
15.30 - 16.00 Uhr	26	Tryout-Areals	- Aufbau - Einsatzgebiete - Wasser	Sören Scheffler Blessed&Gibson
16.00 - 16.30 Uhr	27	H2GP		Sören Scheffler

Produktionstechnologien für CCM/MEA

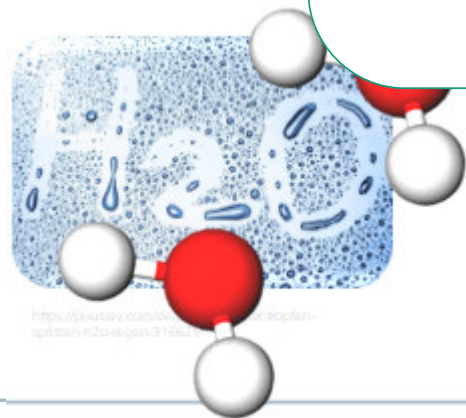
Motivation: **Grün** und -nutzung



Hy-Ventus



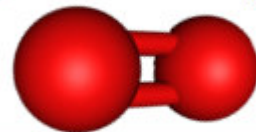
Hy-Victus



Elektrolyse

Wasserstoff H_2

Sauerstoff O_2



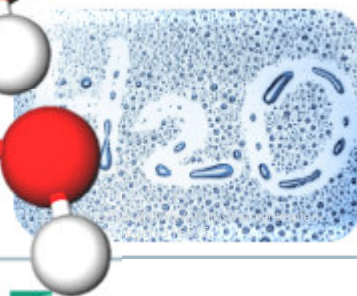
(Chemie
Industrie)

Energie
speicherung

Mobilität

Brennstoff
zelle

Elektrizität



Produktionstechnologien für CCM/MEA

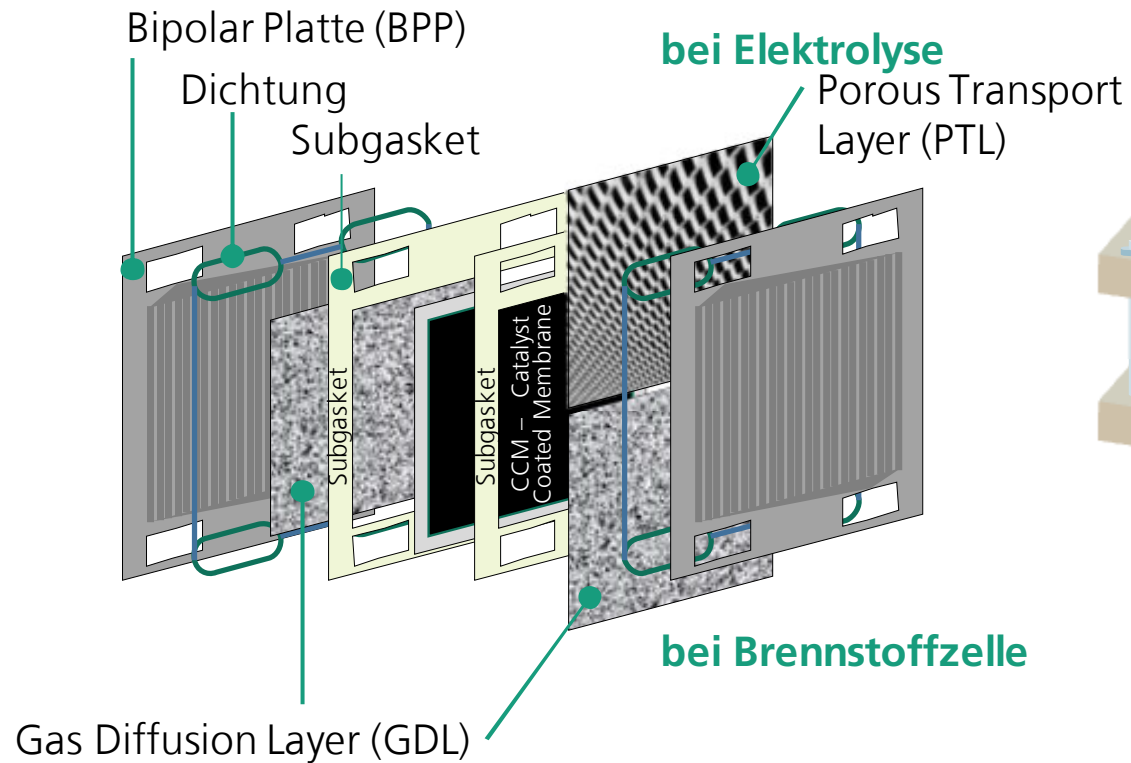
Aufbau eines PEM-Stacks

Stack Elektrolyse

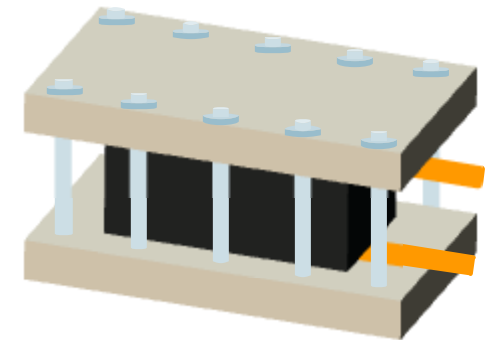


z. B. 10 Zellen Hy-Ventus

Aufbau Einzelzelle



Stack Brennstoffzelle



z. B. 370 Zellen für PKW

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Vor- und Nachteile von Niedertemperatur (80 °C) PEM-Brennstoffzellen

Vorteile PEMFC

- sehr gutes Kaltstartverhalten
- gutes dynamisches Verhalten
- stapeln zu Brennstoffzellen-Stacks möglich
- hohe Stromdichte
- niedrige Betriebstemperatur (NT-PEMFC)
- fester Elektrolyt (kein Auslaufen gefährlicher Flüssigkeiten)

Nachteile PEMFC

- Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen im Brenngas (CO, NH₃, Schwefelverbindungen)
- teurer Katalysator

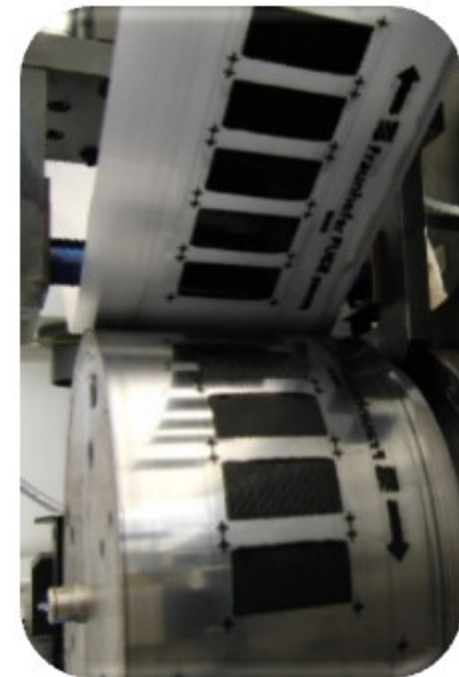
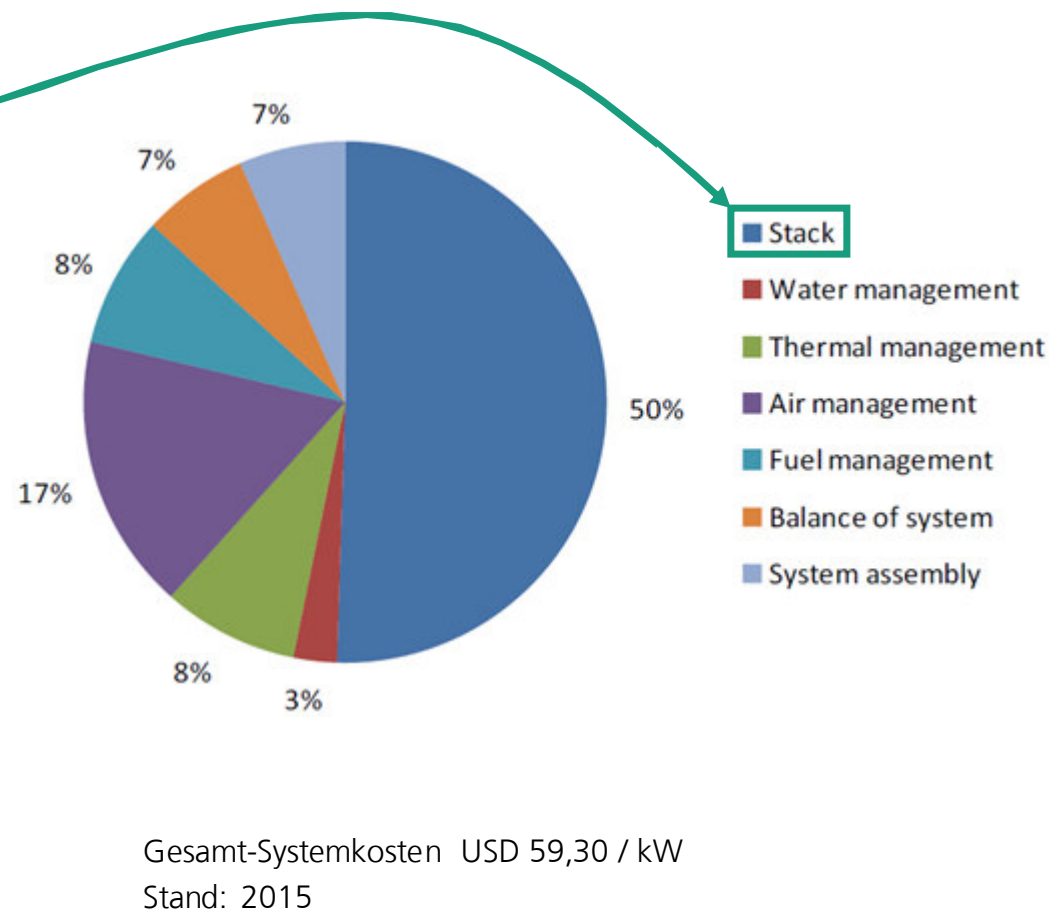
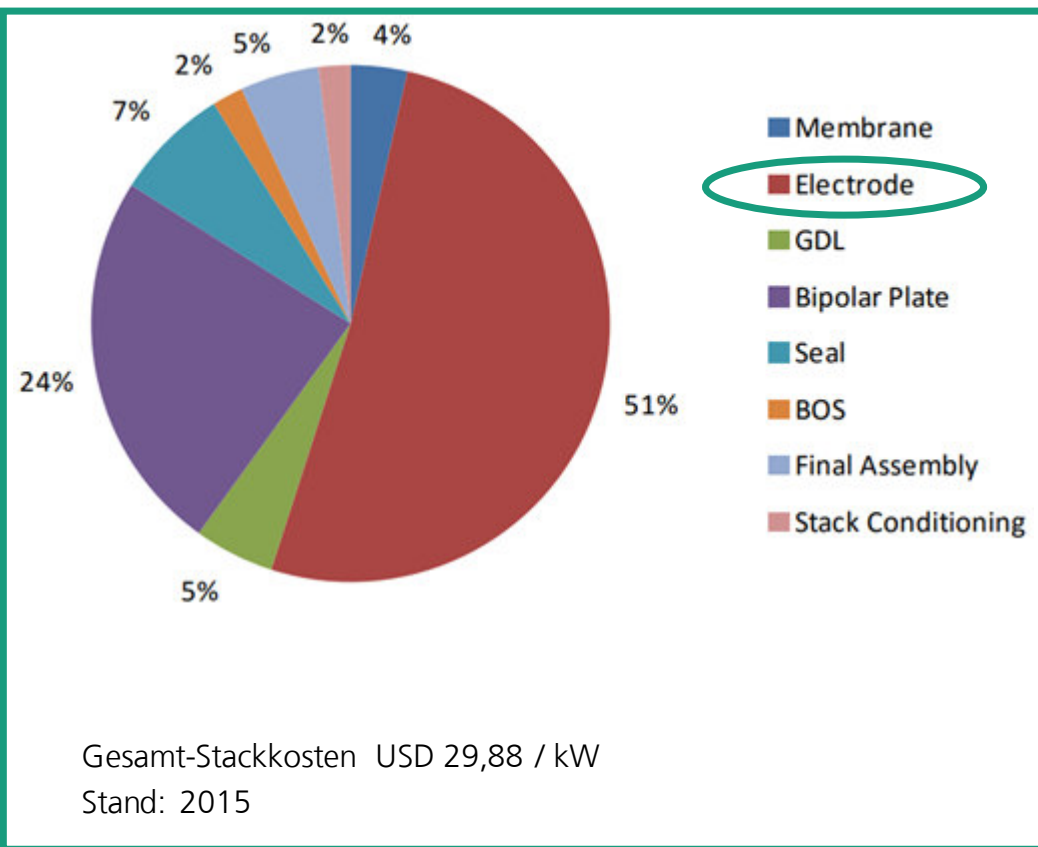


Fig.: catalyst layer on decal substrate
printing technology: gravure printing
source: Fraunhofer ENAS

Stack- und Systemkosten 80 kW_{net} PEM Brennstoffzellensystem

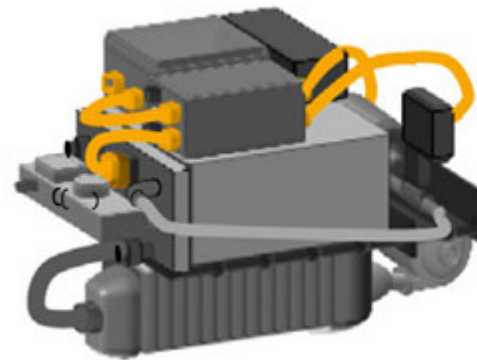
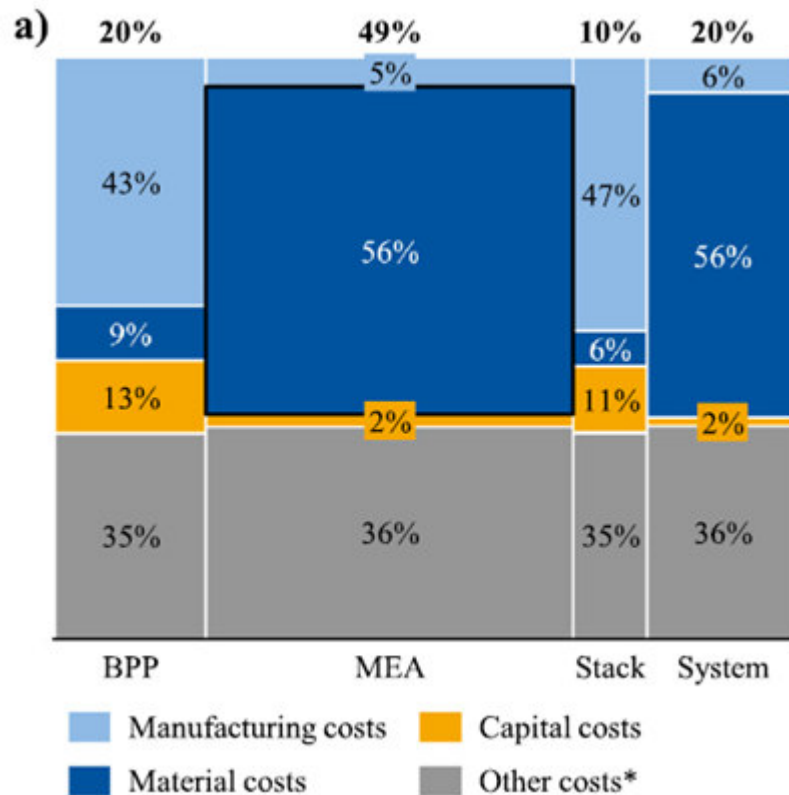
Stand 2015



Referenzen: AustinPower Engineering 2015

Kostenmodell zur Herstellung von 80 kW PEM Brennstoffzellensystem

5.000 PEMFC-Systeme/Jahr, A. Kampker et.al., Stand 2022



Gross system power	80 kW
Maximum power density	0,978 W/cm ²
Platinum usage	0,3 g _{Pt} /kW
Usable volume: Length	25 cm
Usable volume: Width	20 cm
Usable volume: Height	60 cm
Material strength GDL	215 μm
Material strength membrane	25 μm
Material strength BPP	105 μm

* i.e. taxes, administrative, selling, research and development

Referenzen: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.364>

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Agenda

Catalyst Coated Membrane CCM (MEA_{3L})

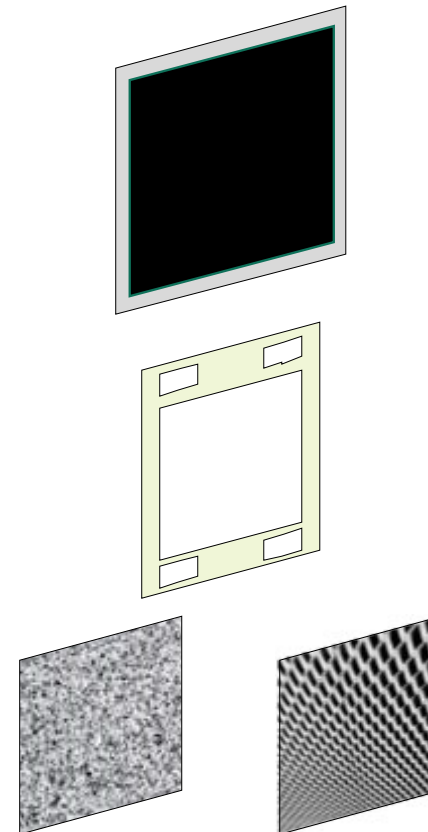
- Begriffe / Definitionen
- Theorie
- Materialien
- Auftragsverfahren

Zellkomponenten (MEA_{5L})

- Subgaskets

Zellkomponenten (MEA_{7L})

- GDL
- PTL



Produktionstechnologien für CCM/MEA

Agenda

Catalyst Coated Membrane CCM (MEA_{3L})

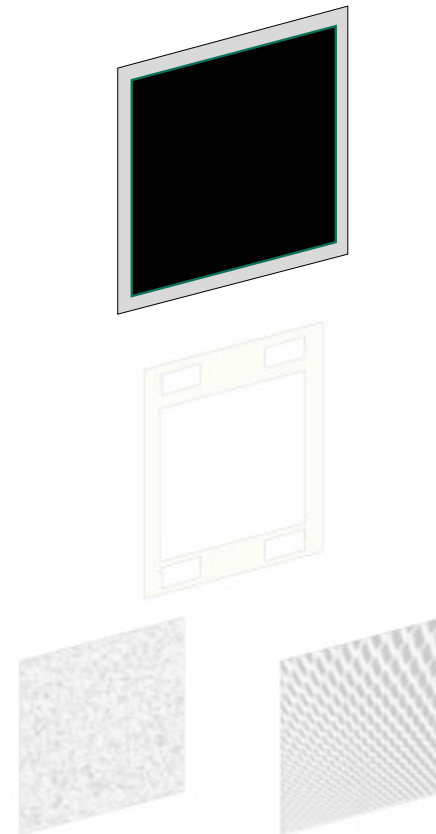
- Begriffe / Definitionen
- Theorie
- Materialien
- Auftragsverfahren

Zellkomponenten (MEA_{5L})

- Subgaskets

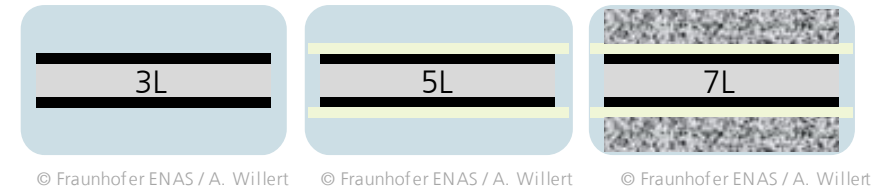
Zellkomponenten (MEA_{7L})

- GDL
- PTL



Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Begriffsdefinitionen



CCM: Catalyst Coated Membrane

mit Katalysator beschichtete Protonen-Exchange (Austausch)-Membran (PEM)

MEA: Membrane Electrode Assembly – Membran-Elektroden-Einheit

3-Lagen MEA_{3L}: identisch mit CCM

Katalysatorschicht – Membran – Katalysatorschicht

5-Lagen MEA_{5L}:

Subgasket – 3-Lagen MEA_{3L} – Subgasket

7-Lagen MEA_{7L}:

GDL / PTL – 5-Lagen MEA_{5L} – GDL / PTL

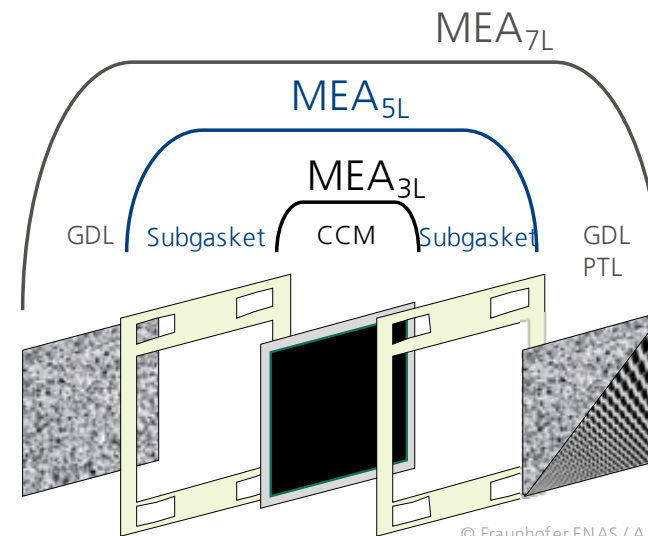


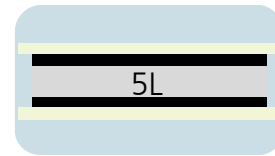
Abb.: Schematische Darstellung einer PEMFC-Zelle mit Einteilung der 3/5/7-lagigen MEA

GDL: Gas Diffusion Layer
(Karbonpapier)

Für die Electrolyzer-Anode:
PTL – porous transport layer
(Titan-basierter Werkstoff)

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA_{5L} / CCM – Begriffsdefinitionen



Überlapp Subgasket mit MEA_{3L}

Abdichtung der MEA_{3L}

MEA_{3L}

Elektrochemische, katalytische Reaktion
Protonen- und Elektronenleitfähigkeit

Manifolds

Ein- und Auslassbereiche
für die Fluide und Gase

Kathode $O_2 + H_2O$

Anode H_2

Kühlkreislauf Kühlmittel

Subgasket (MEA_{5L})

Versteifung der CCM / MEA_{3L}
Abdichtung und Isolation der MEA zur BPP

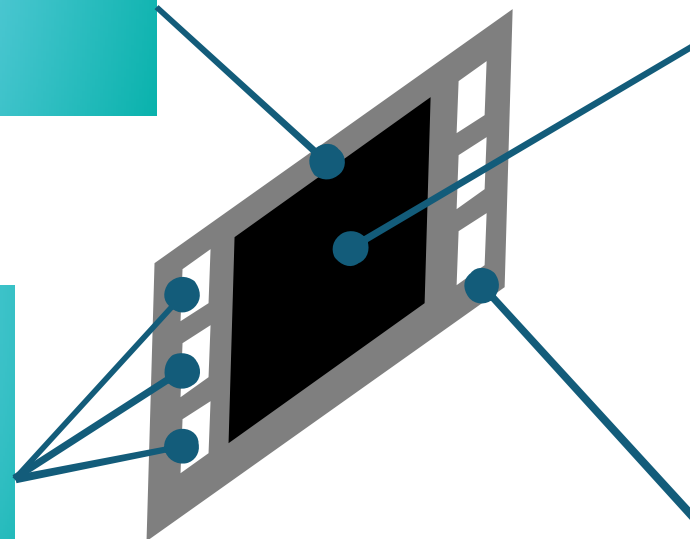


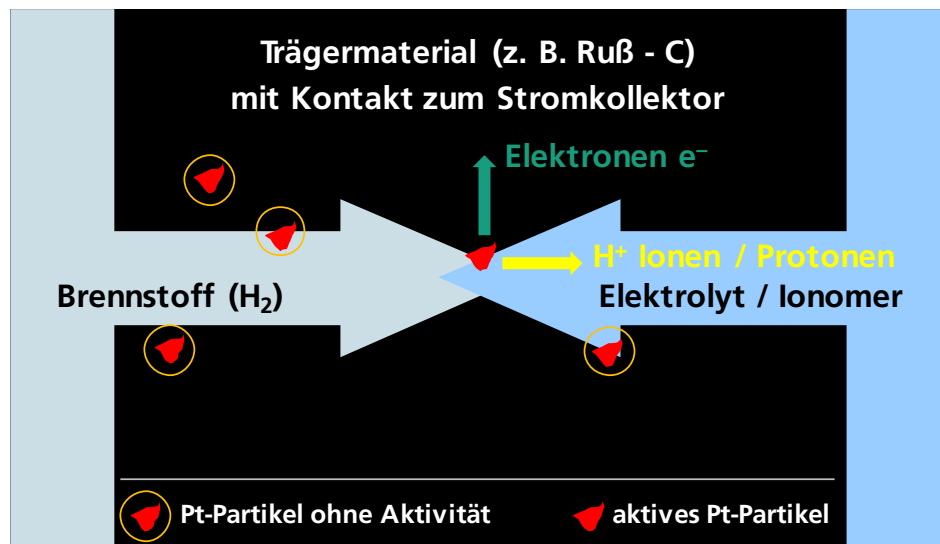
Abb.: Schematische Darstellung einer MEA_{7L}
Quelle: basierend auf [1].

Die Drei-Phasen-Grenze

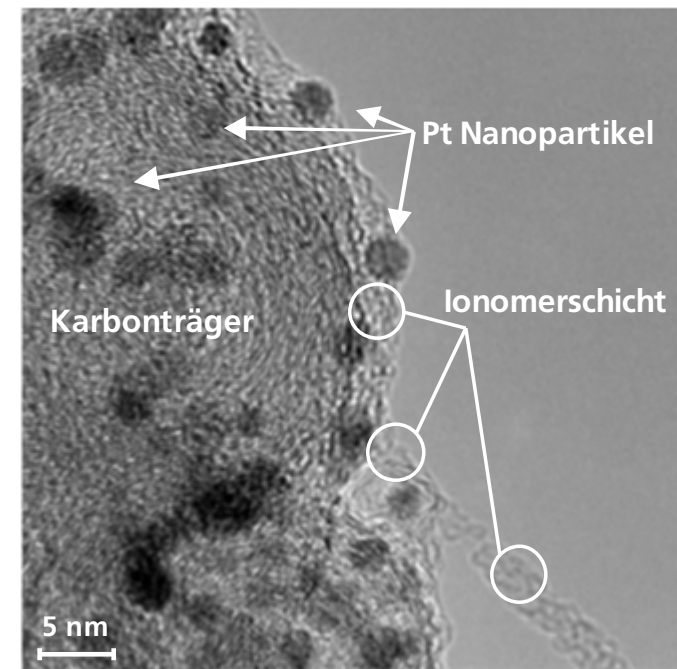
Prinzip der Platin-basierten H_2 -Brennstoffzelle

Die Wasserstoffreaktion findet an der "Drei-Phasen-Grenze" statt zwischen:

Brennstoff (H_2) / Katalysator (Pt) / Elektronenleiter (C) / Ionenleiter (Ionomer)



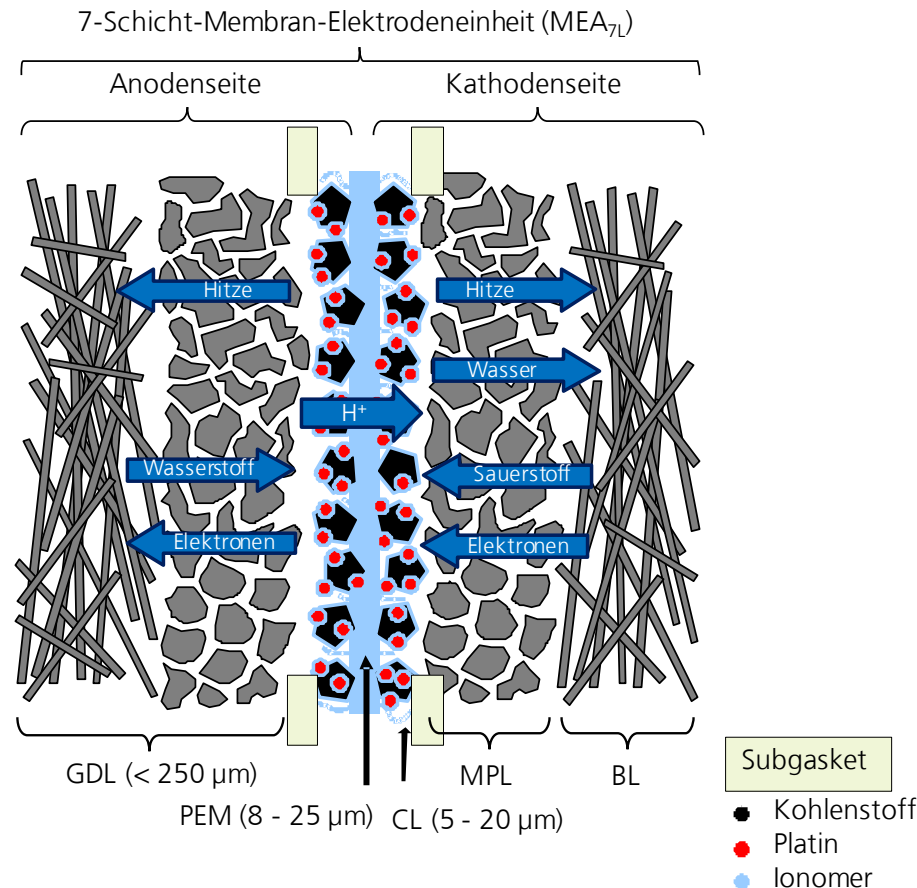
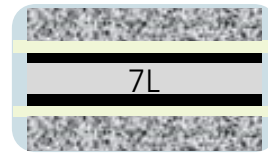
© Fraunhofer ENAS / A. Willert



Source: ECS Transactions, 3 (1) 717-733 (2006)

Produktionstechnologien für CCM/MEA

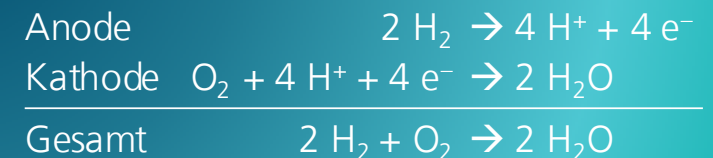
Lagenaufbau MEA_{7L} für eine Brennstoffzelle



Legende

- BL: Base Layer (Basisschicht = Karbonpapier)
- CL: Catalyst Layer (Katalyseschicht)
- GDL: Gas-Diffusion-Layer
- MPL: Micro-Porous-Layer
- PEM: Proton-Exchange-Membran
- H⁺: Wasserstoff-Proton

Elektrochemische Reaktion



Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Materialien Elektrolyseur und Brennstoffzelle



	Elektrolyseur	Brennstoffzelle
Membran	Nafion® 115 [127 µm], 117 [180 µm] Fumasep® 50 .. 120 µm	Nafion® 212 [50,8 µm] , 211 [25,4 µm], reinforced 10 µm Gore® M765.08 (PKW) Fumatech - Automotive 15 .. 30 µm - Stationary 40 .. 50 µm - Military 95 .. 120 µm
Katalysator Anode	[O ₂] Iridium (2,0 .. 3,0 mg/cm ²), Ir/Ru	[H ₂] Platin (≤ 0,1 .. 4 mg/cm ²)
Katalysator Kathode	[H ₂] Platin (0,5 .. 3,0 mg/cm ²)	[O ₂] Platin (0,25 .. 4 mg/cm ²)
Temperatur	< 80 °C	< 80 °C
Zellspannung	1,4 ... 2,0 V	< 0,9 V
typ. Strom	1,0 – 2,5 A/cm ²	~ 1 A/cm ²

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Abschätzung der benötigten Flächen – für CCM/MEA, GDL/PTL



Elektrolyseur:

Annahme: $1 \text{ A/cm}^2 * 2 \text{ V} = 2 \text{ W/cm}^2$

- $1 \text{ MW} \rightarrow 500.000 \text{ cm}^2 = 50 \text{ m}^2$
- $10 \text{ MW} \rightarrow 5.000.000 \text{ cm}^2 = 500 \text{ m}^2$
- $100 \text{ MW} \rightarrow 50.000.000 \text{ cm}^2 = 5.000 \text{ m}^2$
- $1 \text{ GW} \rightarrow 500.000.000 \text{ cm}^2 = 50.000 \text{ m}^2$

Brennstoffzelle:

Annahme: $1 \text{ A/cm}^2 * 0,8 \text{ V} = 0,8 \text{ W/cm}^2$

- $1 \text{ kW} \rightarrow 1.250 \text{ cm}^2 = 0,125 \text{ m}^2$
- $10 \text{ kW} \rightarrow 12.500 \text{ cm}^2 = 1,25 \text{ m}^2$
- $100 \text{ kW} \rightarrow 125.000 \text{ cm}^2 = 12,5 \text{ m}^2$
- $1 \text{ MW} \rightarrow 1.250.000 \text{ cm}^2 = 125 \text{ m}^2$

Zum Vergleich

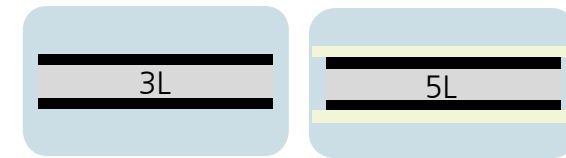
500 Blatt DIN-A4 = $31,25 \text{ m}^2$

1 Rolle Tapete (10,05 m x 0,53 m =) $5,3 \text{ m}^2$

... und dies jeweils mit Vorder- und Rückseite

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM Herstellungsschritte



Katalysator

- Formulierung als Slurry, Tinte, Paste, Dispersion, ...
- Bestandteile: Auf Kohlenstoff geträgerter Katalysator (Pt/Ir/Ru-haltig, ggf. edelmetallfrei), Ionomer, Lösemittel

Auftrag

- Option A: Indirekter Auftrag Katalysator über Zwischenträger (Decal) → 2-Schritt-Prozess
- Option B: Direkter Auftrag Katalysator auf Membran → 1-Schritt-Prozess

MEA CCM

- 3-Lagen-MEA_{3L} / CCM

Sub-gasket

- Hinzufügung Dichtungs- und Montagerahmen

MEA CCM

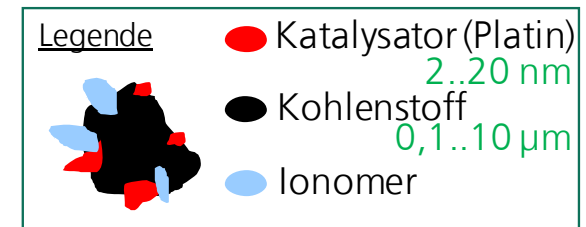
- 5-Lagen-MEA_{5L} / CCM

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Bestandteile (Inkjet-)Tinte / Slurry / Paste / Dispersion

Bestandteile Drucktinte

- **Pt/C: Platin geträgert auf Kohlenstoff** (20 %_{gew} , 40 %_{gew} , 50 %_{gew} , ...)
- **Ionomer** (Hersteller, Short Side Chain, Long Side Chain, ...)
- **Lösemittelgemisch** (Alkohole, Wasser, ...)



© Fraunhofer ENAS / A. Willert

Parameter der Drucktinte

- **Herstellverfahren** (Mahlen von Komponenten, Ultraschallbehandlung, Temperatur, ...)
- **Feststoffanteil**
- **Beladung Katalysator**
- **I/C-Verhältnis** (Ionomer zu Kohlenstoff)
- **Trocknungsparameter** (insbesondere zur Porenbildung)

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option A: Indirekter Auftrag Katalysator über Zwischenträger (Decal)

1. Schritt (Option 1):

Beschichtung des Zwischenträgers (Decal) im Rolle-zu-Rolle-Prozess mit Schlitzdüsenauftrag

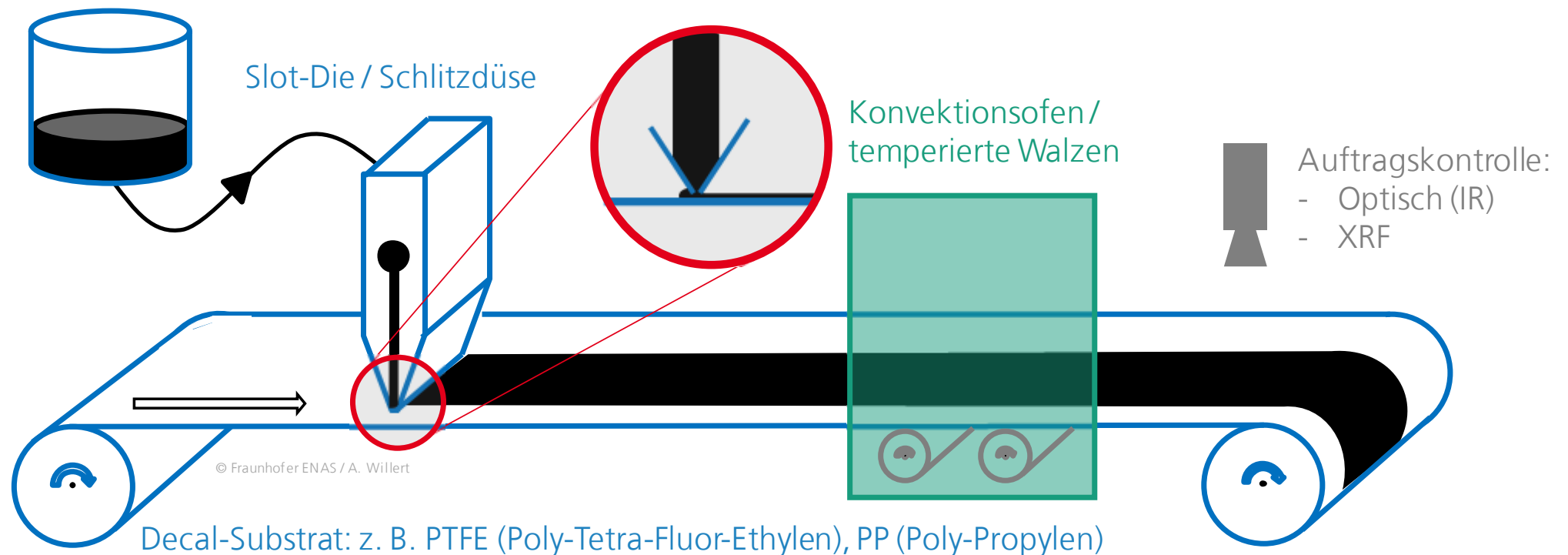


Abb.: Schematische Darstellung der Slot-Die Beschichtung; Quelle: Fraunhofer ENAS.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option A: Indirekter Auftrag Katalysator über Zwischenträger (Decal)

1. Schritt (Option 2):

Beschichtung des Zwischenträgers (Decal) im Rolle-zu-Rolle-Prozess mit Sprühdüsenauftrag

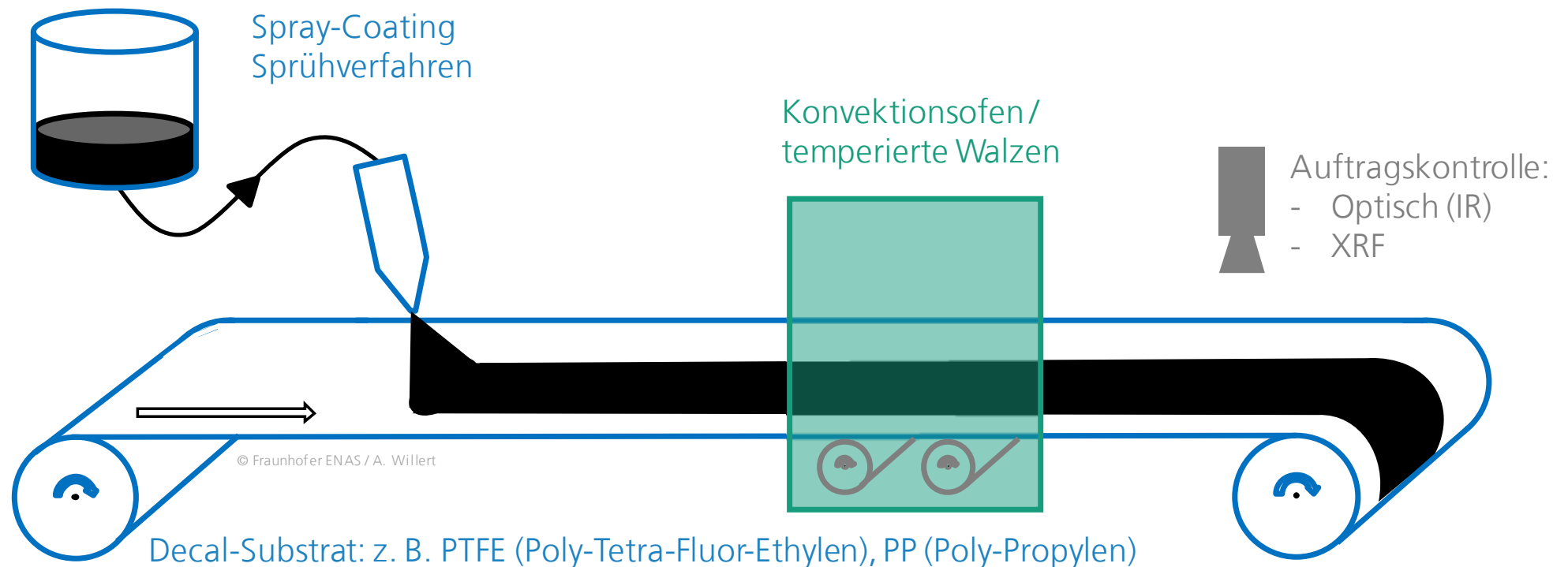


Abb.: Schematische Darstellung der Sprühdüsen-Beschichtung; Quelle: Fraunhofer ENAS.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option A: Indirekter Auftrag Katalysator über Zwischenträger (Decal)

1. Schritt: Beschichtung des Zwischenträgers (Decal) im Rolle-zu-Rolle-Prozess

Prozessparameter und Anforderungen

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

Qualitätsmerkmale

- Schichthomogenität
- Partikelgröße
- Schichtdicke
- Restfeuchte nach Trocknung

Referenzen: RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option A: Indirekter Auftrag Katalysator über Zwischenträger (Decal)

2. Schritt: Heißpressen und Zwischenträger entfernen

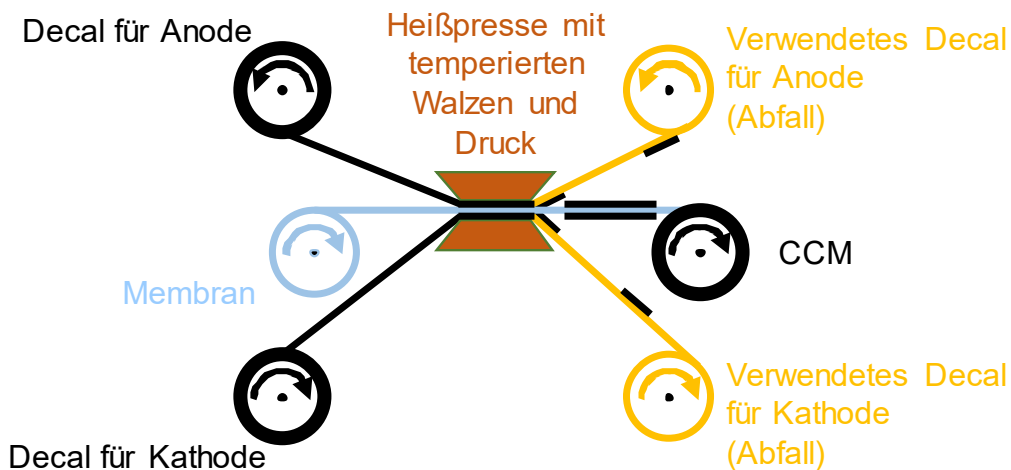


Abb.: Schematische Darstellung Heißpressen zur Herstellung der CCM
Quelle: Fraunhofer ENAS.

Prozessparameter und Anforderungen [1]

- Linienkraft 150 – 250 N/cm
- Temperatur 100 – 170 °C
(Glasübergangstemperatur Membran)

Prozessvorteil [1]

- Trockener Übertrag der katalytischen Schicht

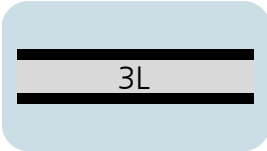
Referenzen: [1] RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>.

Stand der Technik (3 Lagen CCM Herstellung) durch **Schlitzdüsenauftrag** @ ~~ENAS~~

Step 1: Auftrag
Anodenschicht auf Decal

Step 2: Auftrag
Kathodenschicht auf Decal

Step 3: Laminieren der Anode &
Kathode auf die Membran



Schlitzdüse



Decal Substrat

Schlitzdüsen-
beschichtung



Membran

Lamination

Übertragene Katalysatorschicht
(jetzt auf der Membran)

Decal Substrat

Laminierung:
Adhäsion der
katalytischen
Schichten an
die Membran

Verbliebene
Katalysatorschicht
(muss recycelt
werden)

Vollständige Beschichtung
der Katalysatorschicht nach
Stand der Technik

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option B: Direkter Auftrag Katalysator auf Membran

Direkter Auftrag von Katalysator auf die Membran ohne Verwendung der Decal-Zwischenbeschichtung

Mögliche Verfahren: Slot-Die (Schlitzdüse), Inkjet, Siebdruck

Herausforderungen:

- **Hohe Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Membran: Riss- und Wellenbildung**
- **Intrinsische Formstabilität der Membran sehr gering**

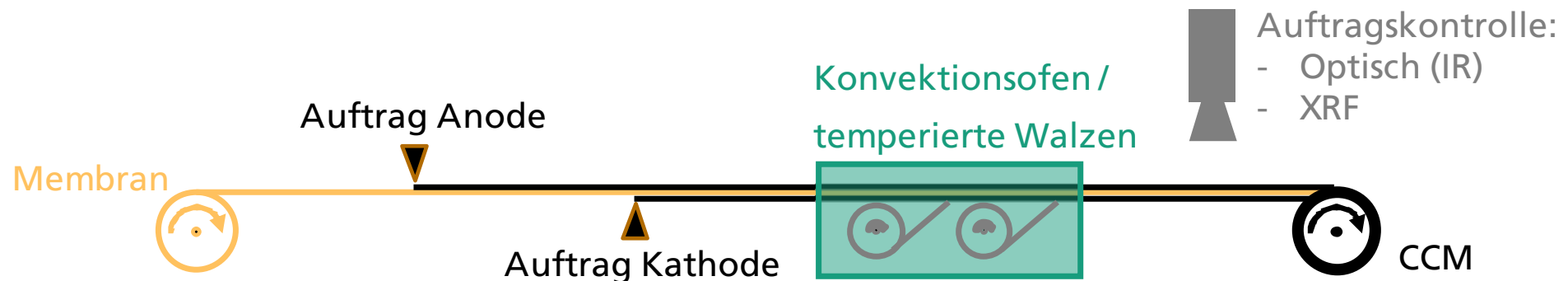


Abb.: Schematische Darstellung zweiseitiger katalytischer Materialauftrag; Quelle: Fraunhofer ENAS.

Eine innovative CCM/MEA Herstelltechnologie

Inkjet Druck @ ENAS

3L

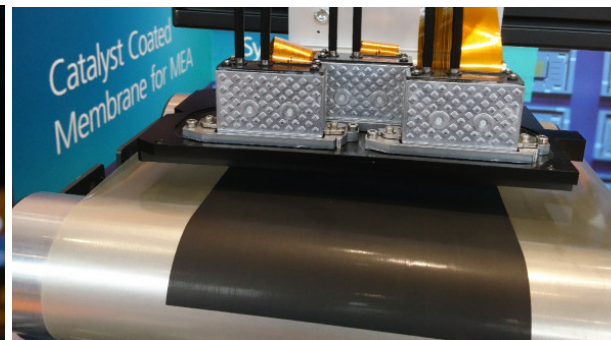
Schritt 1&2: Anoden- & Kathodenschichtherstellung direkt auf der Membran



Vorteile:

- Entfall Zwischenträger
- kein Laminierungsschritt
- kein Materialrecycling

- 33 % weniger Prozessschritte
- 3 % Materialersparnis
- Kostenreduktion der CCM Herstellung ggü. Stand der Technik



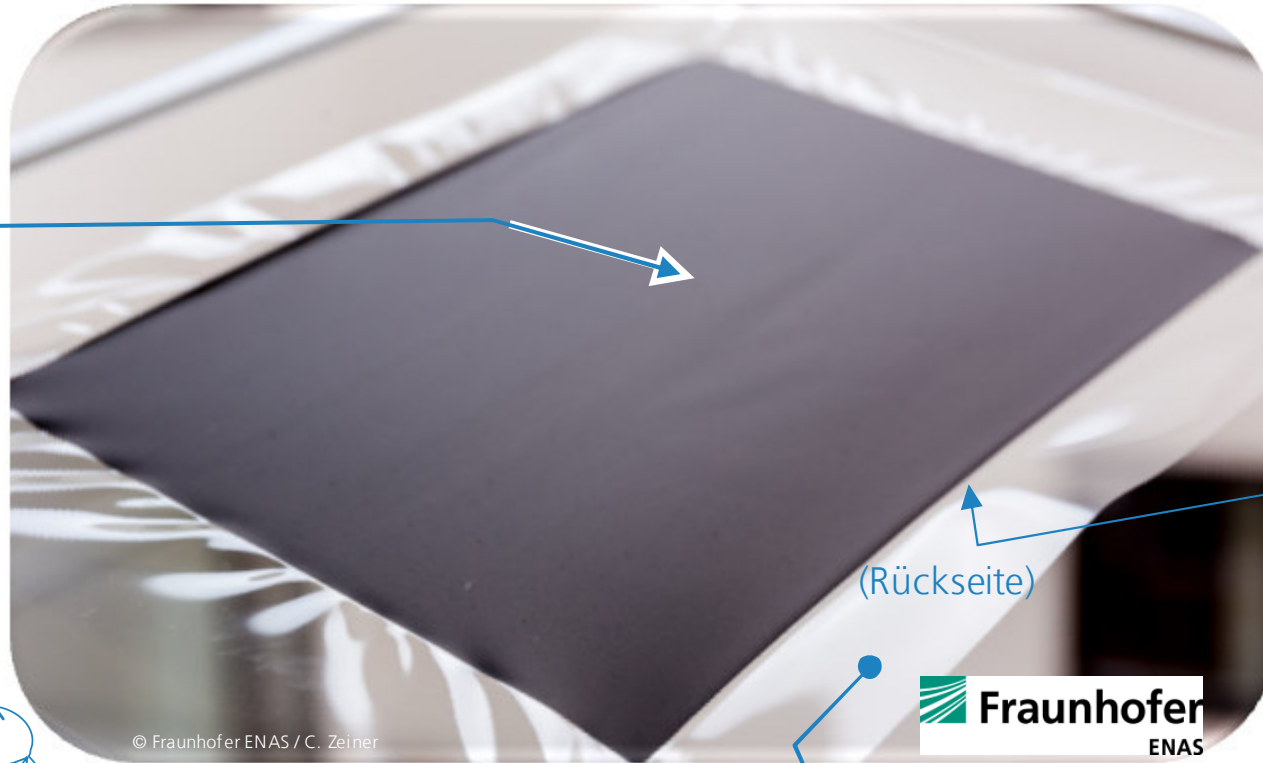
Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Option B: Sieb-gedruckte Catalyst Coated Membrane – CCM = 3-Lagen-MEA_{3L}



für PEMFC

3 .. 15 µm Anode
Pt catalyst /
Carbon support /
Ionomer



10 .. 30 µm Cathode
Pt catalyst /
Carbon support /
Ionomer



15 .. 50 µm Proton Exchange Membrane (PEM) / Ionomer

Abb.: Gedruckte CCM;
Druckverfahren: Siebdruck
Quelle: Fraunhofer ENAS.

Referenzen: Fraunhofer ENAS

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Siebdruck-Technologie

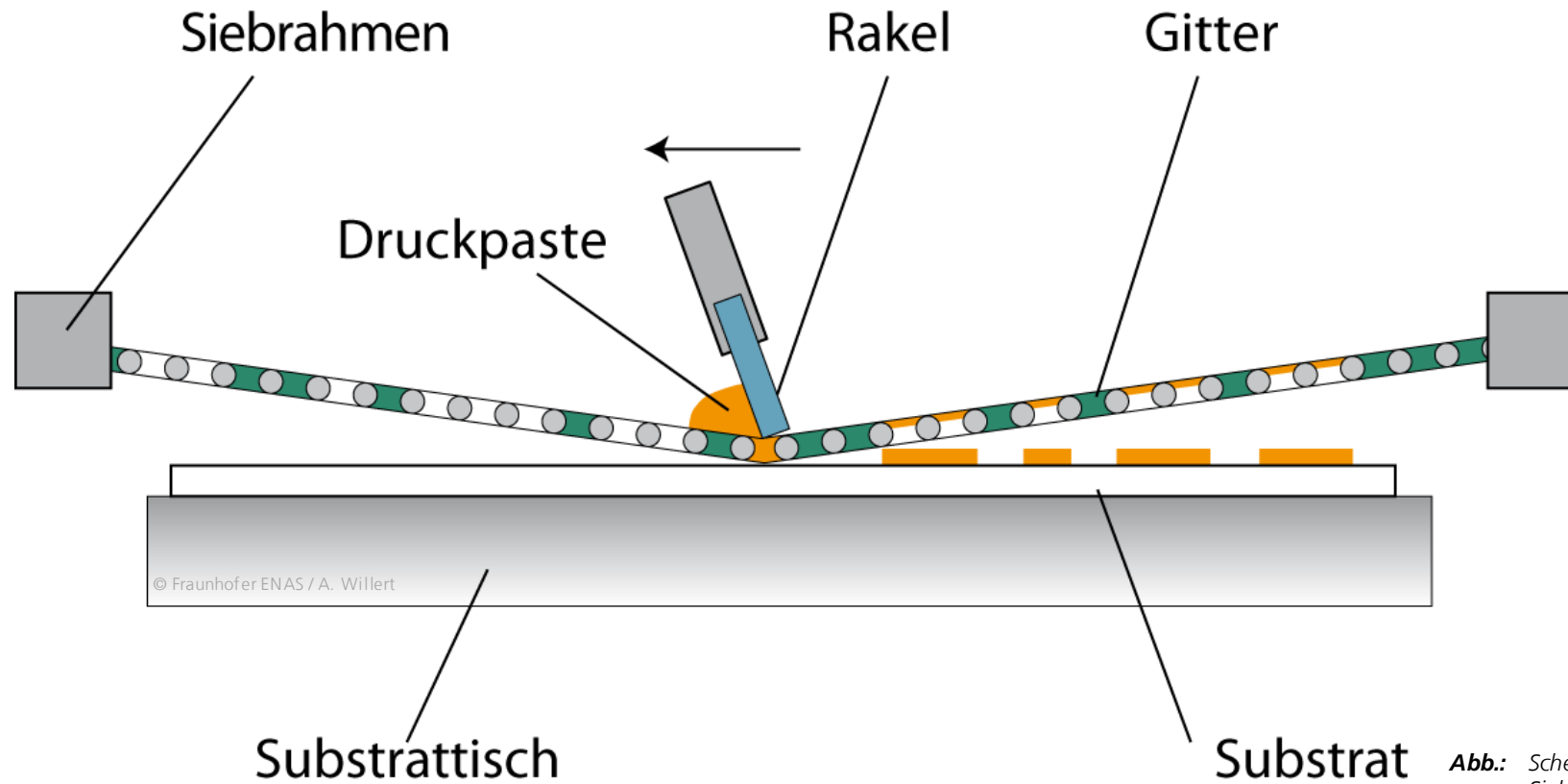


Abb.: Schematische Darstellung der Siebdrucktechnologie
Quelle: Fraunhofer ENAS.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Inkjet-Druck

■ Thermischer Inkjetdruck:

- State-of-the-Art für grafische Druckprozesse (HP, Lexmark, Canon)

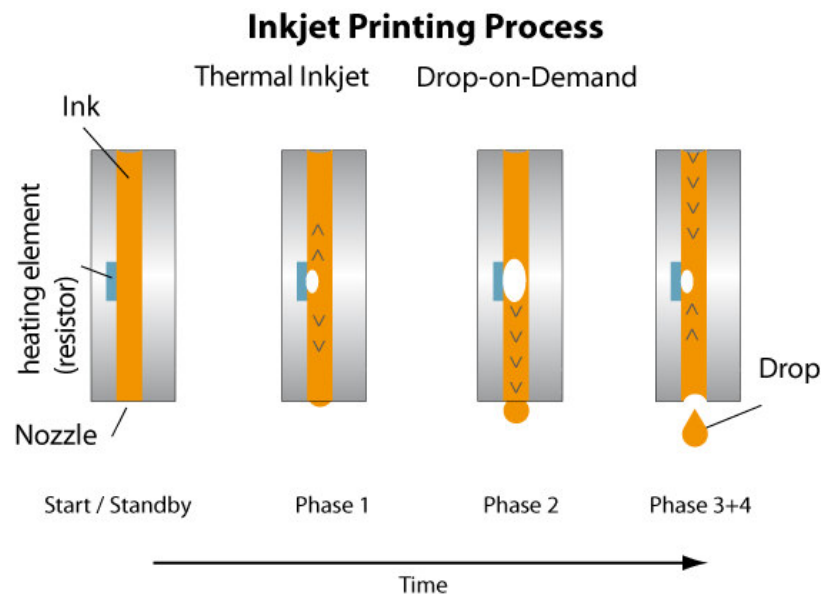


Abb.: Schematische Darstellung thermische Inkjet-Drucktechnik; Quelle: Fraunhofer ENAS.

■ Piezo-Inkjetdruck:

State-of-the-Art für

- Grafische Druckprozesse (Epson)
- Funktionale Drucktinten

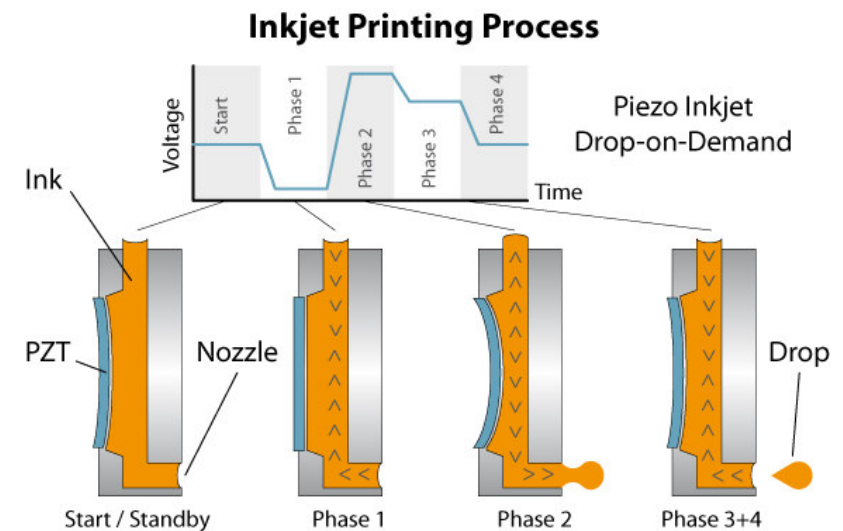


Abb.: Schematische Darstellung Piezo-Inkjet-Drucktechnik; Quelle: Fraunhofer ENAS.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Inkjet Printing – Drop on Demand

PROs

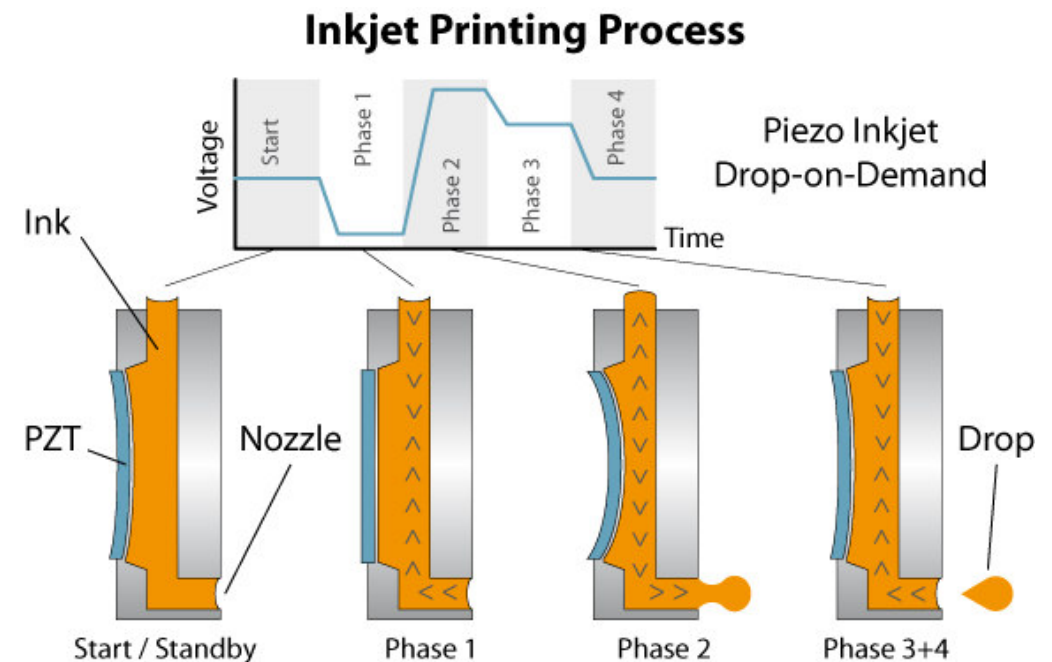
- Kontaktloser Druck
- Dynamische / digitale Bebilderung
- Genaue Positionierung ($< 100 \mu\text{m}$)

FAKTEN

- Tinten: niedrige Viskosität
- Mittlere Auflösung ($> 20 \mu\text{m}$)
- Variabilität der Waveform
- Sehr niedrige Schichtdicke ($> 100 \text{ nm}$)

CONs

- Partikel in der Tinte sind herausfordernd



Produktionstechnologien für CCM/MEA

Herausforderungen für den Inkjet-Druck als CCM Herstelltechnologie

Partikelgrößen und Beladung

- Partikel von 10+ μm (Schlitzdüsenbeschichtung, Siebdruck) sind zu groß für den Tintenstrahldruck
- Inkjet erfordert eine niedrige Viskosität, d. h. einen hohen Lösemittelanteil
- Sedimentation der Tinte
- Verstopfen der Düsen

Chemische Reaktivität der Tinte

- Platin ist auch in der Tinte ein hochaktiver Katalysator
- Das Ionomer ist sehr sauer
- Bestandteile von Inkjetköpfen können zerstört werden

Aufquellen des Substrats

- Lösemittel interagieren mit der Membran

Produktionstechnologien für CCM/MEA

.. und warum trotzdem Inkjet-Druck als CCM Herstelltechnologie?

Sehr großes Potential des Inkjet-Drucks

- ortsgenaue Dosierung des Katalysators → kein Verschnittabfall
- kontaktlose, damit schonende direkte Membranbeschichtung
- Effizienzsteigerung der Zell-Leistung durch Gradientenschichten
 - in der Ebene – nur durch Inkjet möglich
 - senkrecht zur Ebene
- ideales Werkzeug für KMU
- digitale Bebilderung
 - schneller Motivwechsel
 - geeignet für Prototypen
 - geeignet für kundenspezifische Produktion
- kompakte Maschinenbasis

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Projekt MAMA-MEA 01.2018 – 06.2021



Main objective: Development and design of a high volume additive manufacturing process for CCMs suitable for 10 GW/year production.

<https://www.mama-mea.eu/>



MAMA-MEA ALM process



ALM: Additive Layer Manufacturing

Abb.: Schematische Darstellung Herstellverfahren MEA mittels additivem Materialauftrag (Tiefdruck, Inkjetdruck); Inspektion
Quelle: Fraunhofer ENAS

Deposition on decal:

1. Anode
2. Membrane
3. Cathode
4. Frame by printing technologies

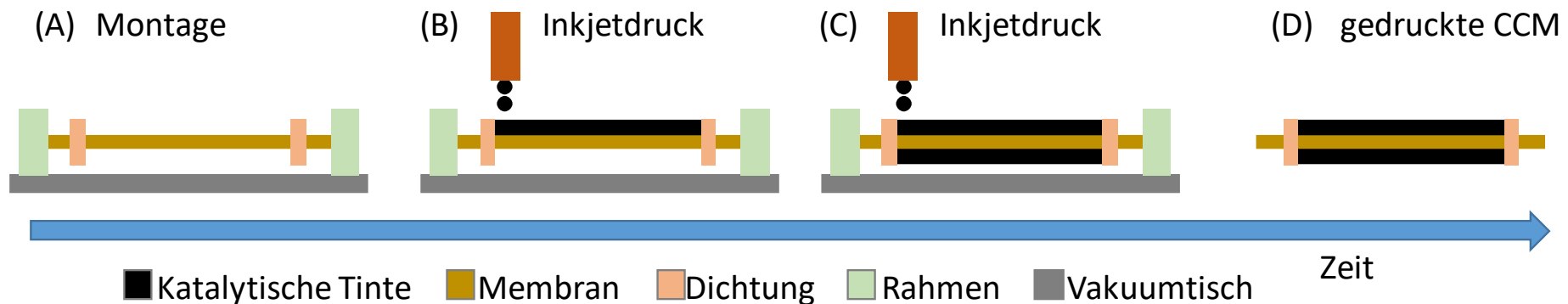
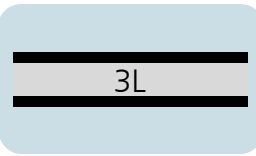


MAMA-MEA - Mass Manufacture of MEAs using high speed deposition processes

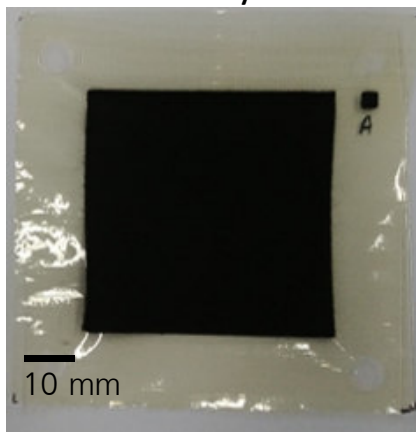
Referenzen: Fraunhofer ENAS

Produktionstechnologien für CCM/MEA

CCM Herstellung durch Inkjetdruck

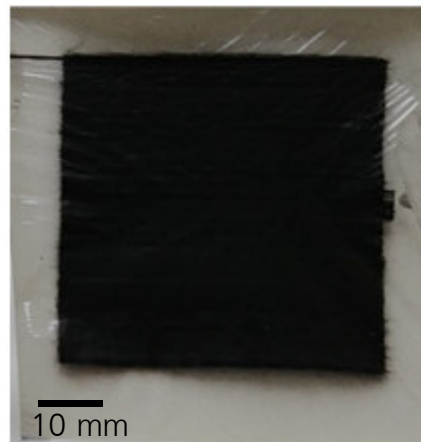


Arbeiten von
Projektpartner:



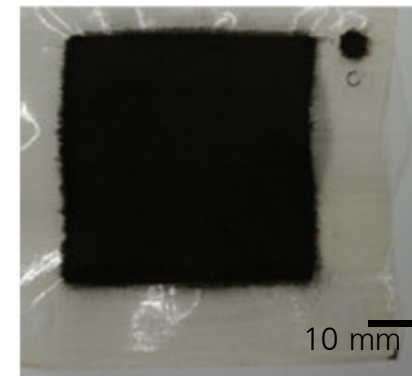
Anode

Abb.: Foto Inkjet-
gedruckte Anode
Quelle: TU Chemnitz.



Vollst. Inkjet-gedruckte CCM

Abb.: Foto Inkjet-
gedruckte CCM
Quelle: TU Chemnitz.



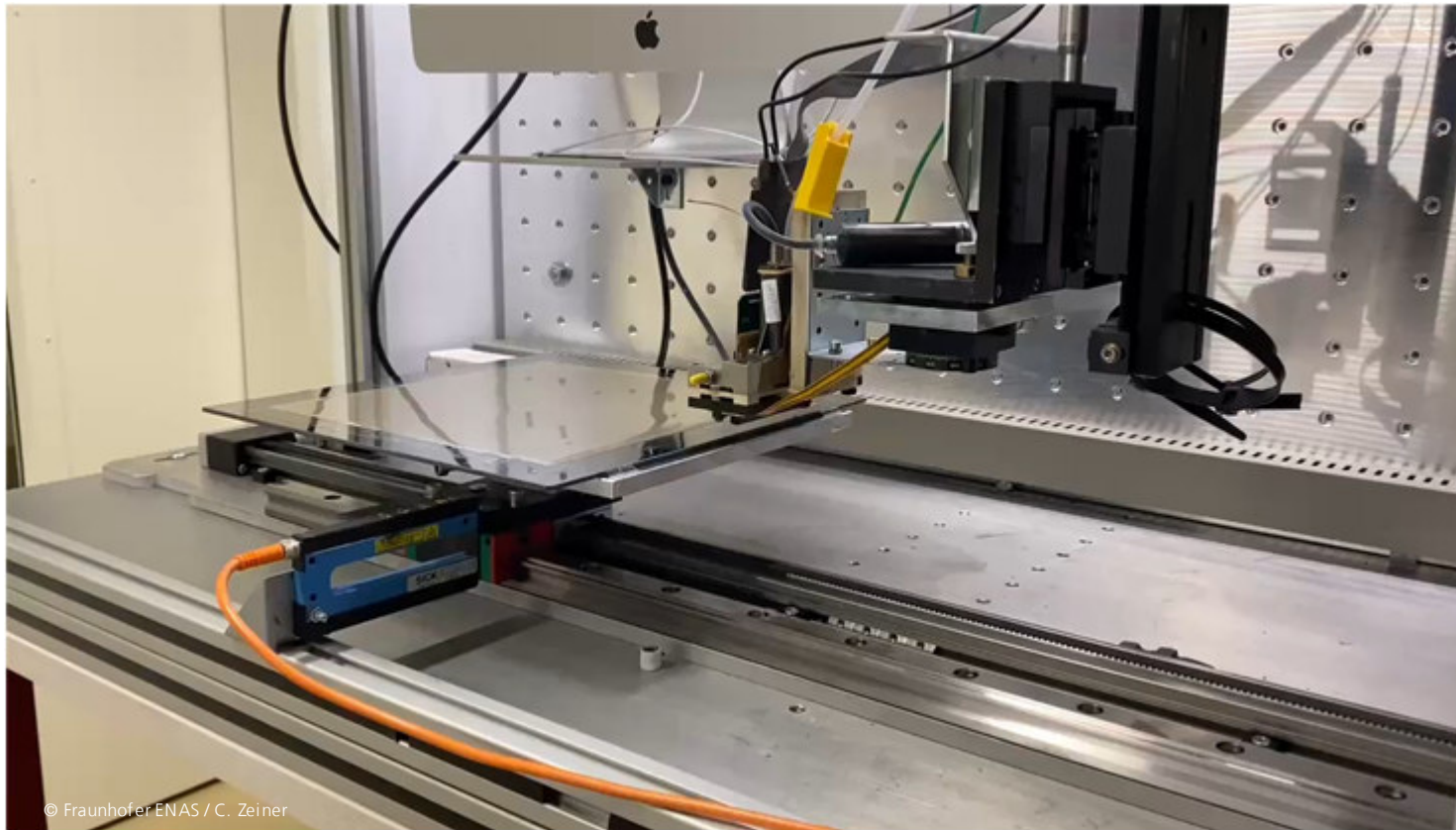
Kathode

Abb.: Foto Inkjet-
gedruckte Kathode
Quelle: TU Chemnitz.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Industrial Inkjet Printing – Laboraufbau

3L



© Fraunhofer ENAS / C. Zeiner

3-Pass Inkjetdruck von
Kohlenstofftinte auf
Membran

Prozessgeschwindigkeit
Labor: 50.8 mm/s

Gesamtfläche
175 mm x 175 mm

Kernkompetenzen CCM/MEA Herstellung

für Brennstoffzellen und Elektrolyseure am Fraunhofer ENAS



Entwicklung von Inkjet-Tinten (Pt / IrO₂) für Brennstoffzellen und Elektrolyseure

Herstellung von katalytischen Inkjet-Tinten



Entwicklung und Optimierung der Druckprozesse, incl. Vor- und Nachbehandlung

Überführung von Laborprozessen in fabrikationsnahe Prozesse

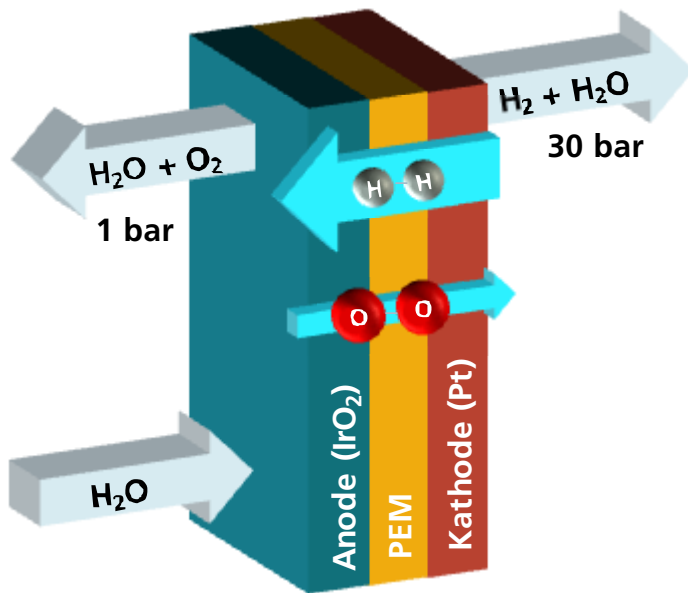


Qualitätskontrolle

Oberflächeneigenschaften (optisch, REM, taktil, Widerstand kontaktlos)
XRF zur Bestimmung der räumlichen Katalysatorverteilung

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Gas Crossover in PEM Elektrolyse

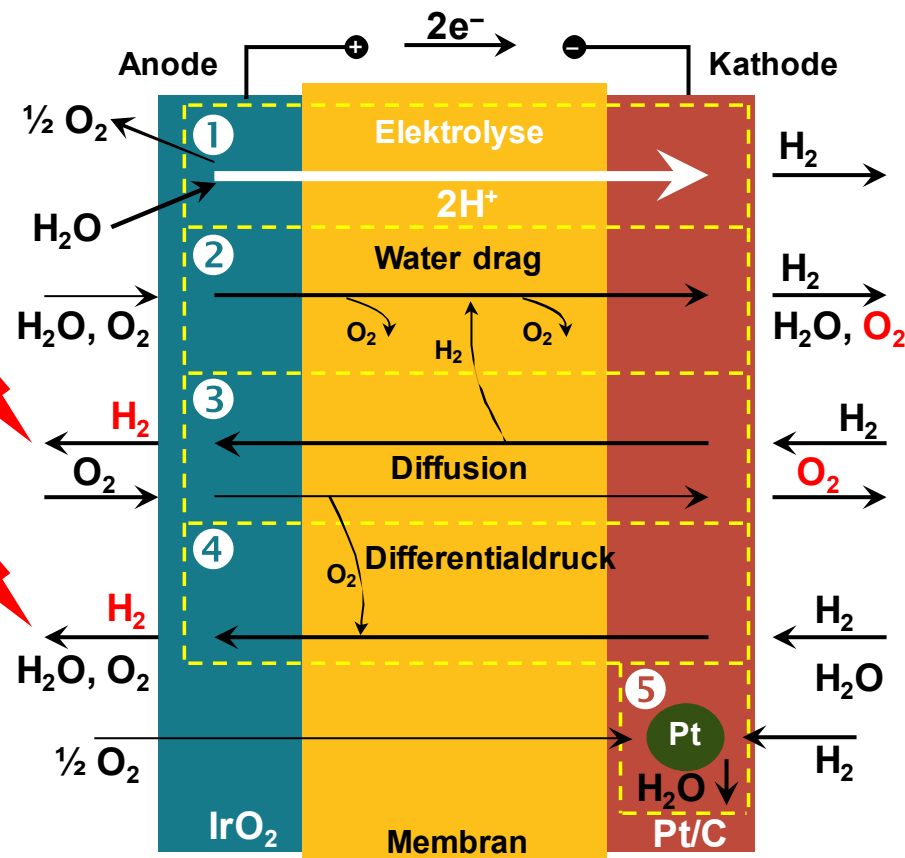


Gas Crossover von Polymer-Elektrolyt Membran (PEM)

- H₂ Permeabilität > O₂ Permeabilität
- Permeation erhöht sich mit
 - Temperatur
 - Hydrierung
 - Stromfluss
 - Differentialdruck
 - Dünnerer Membran
- 4 % H₂ in O₂ oder höher erzeugt ein explosives Gasgemisch (Entflammbarkeitsgrenze)

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Transportmechanismen die Gas Crossover bei PEM Elektrolyse hervorrufen



(1) **Hauptpfad** (Elektrolysereaktion)

(2) **Wasserwiderstand** (H₂O [+ O₂] von Anode zur Kathode)

(3) **Gasdiffusion** (H₂, O₂)

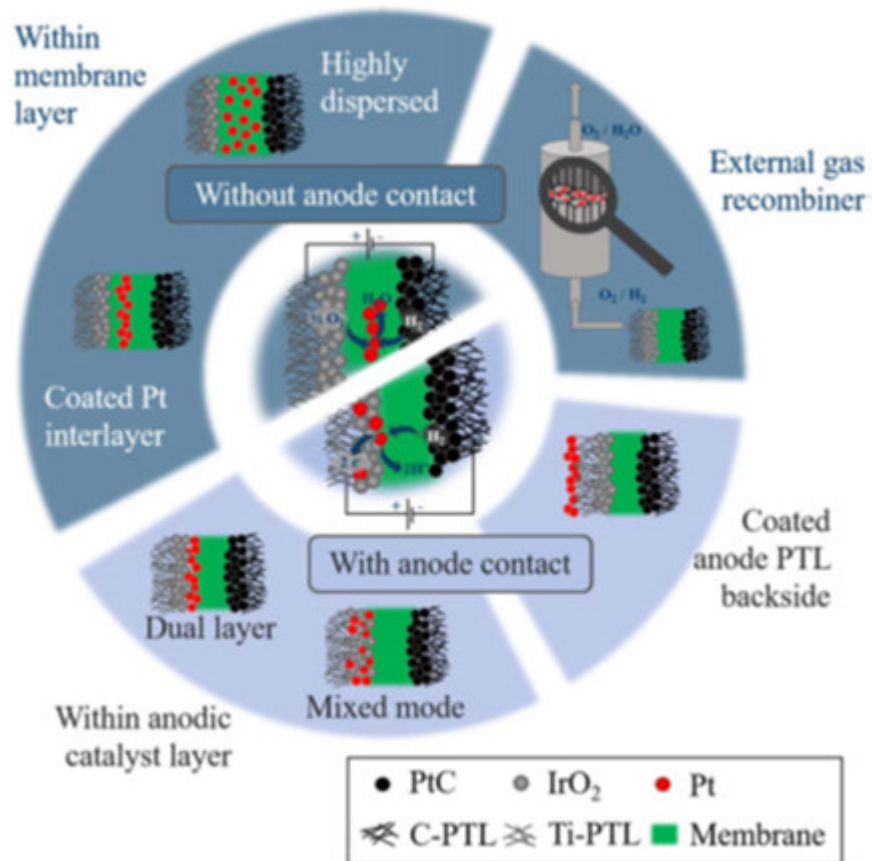
(4) **Differentialdruck** (H₂)

(5) **Pt-Katalyse Rekombination** (H₂ + $\frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$)

Schematische Darstellung der Transportmechanismen, die zum Gasübertritt während der PEM-Elektrolyse führen. Basiert auf: A.H. Abdol Rahim et al. / Journal of Power Sources 309 (2016)

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Ausführungsoptionen von Rekombinationsschichten



Die am häufigsten verwendeten Strategien zur Implementierung eines Rekombinationskatalysators in einer PEM-Elektrolysezelle zur Verringerung des Wasserstoff-Sauerstoff-Gehalts auf der Anodenseite. Der Katalysator wird entweder mit Kontakt zur Anode oder ohne Kontakt eingesetzt. Strategien wie die Verwendung von externen Gasrekombinatoren, die Implementierung eines Rekombinationskatalysators innerhalb der Membran-Elektroden-Einheit (MEA), auf der porösen Anoden-Transportschicht (PTL), innerhalb der anodischen Katalysatorschicht oder eingebaut in die Membran als dünne Schicht oder in hochdisperser Form.

Quelle: Journal of The Electrochemical Society, 2022 169 034522

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Agenda

Catalyst Coated Membrane CCM (MEA_{3L})

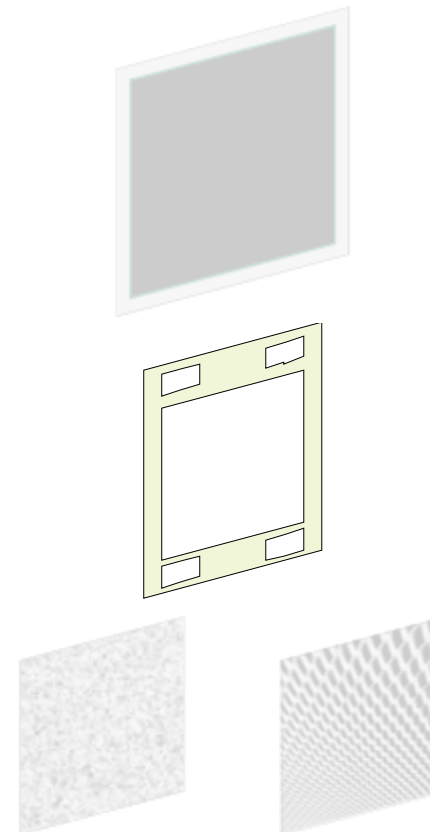
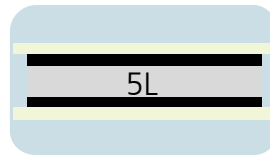
- Begriffe / Definitionen
- Theorie
- Materialien
- Auftragsverfahren

Zellkomponenten (MEA_{5L})

- Subgaskets

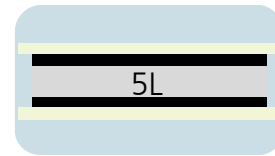
Zellkomponenten (MEA_{7L})

- GDL
- PTL



Produktionstechnologien für CCM/MEA

Zellkomponenten (MEA_{5L}): Subgaskets



Das Subgasket umschließt die CCM / MEA_{3L} ein- oder zweiseitig.

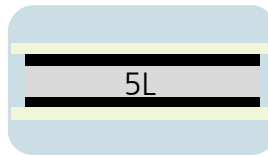
Materialien: Polymerfolien (PET, PEN, Kapton) 25 – 80 µm Dicke, mit Haftvermittler (Klebstoffschicht) versehen

Funktionen

- Preisgünstiger und mechanisch stabiler als Membranfolie; spannt die Membran
- Abdichtung der CCM / MEA_{3L} im Randbereich der aktiven Fläche → Vermeidung von Defekten im Betrieb durch Quellen der Membran
- Zuverlässige Trennung der Gase H₂ und O₂
- Ermöglicht automatisierte Montage
- Elektrische Isolation der BPP

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Subgasket: Hinzufügung Dichtungs- und Montagerahmen



Qualitätsmerkmale

- Positionsgenauigkeit
- Festigkeit der Verbindung
- keine Verunreinigung auf der MEA-Oberfläche

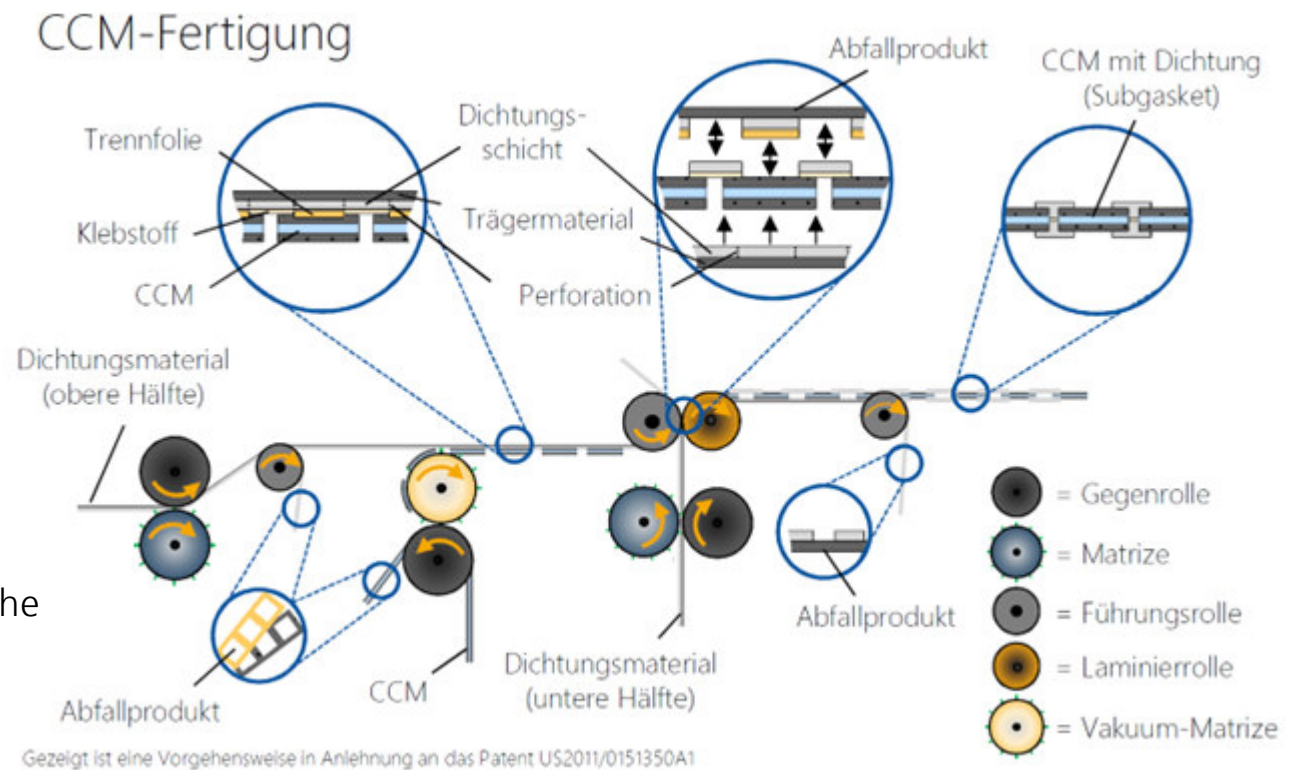


Abb.: Schematische Darstellung der Rolle-zu-Produkt CCM-Fertigung [1].

Referenzen: RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Agenda

Catalyst Coated Membrane CCM (MEA_{3L})

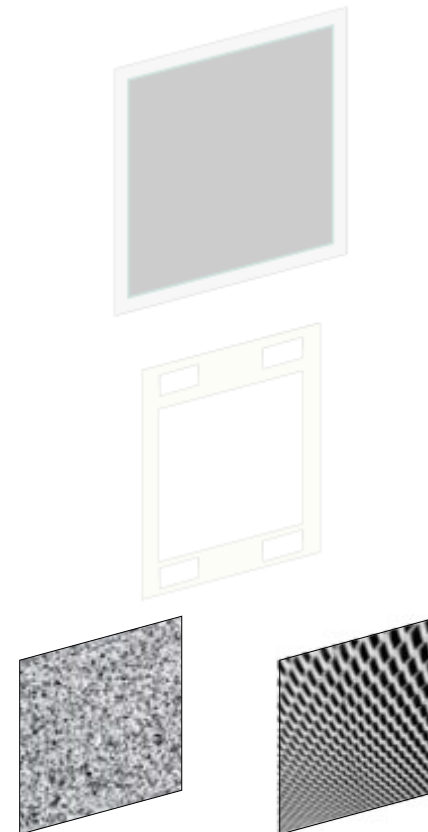
- Begriffe / Definitionen
- Theorie
- Materialien
- Auftragsverfahren

Zellkomponenten (MEA_{5L})

- Subgaskets

Zellkomponenten (MEA_{7L})

- GDL
- PTL



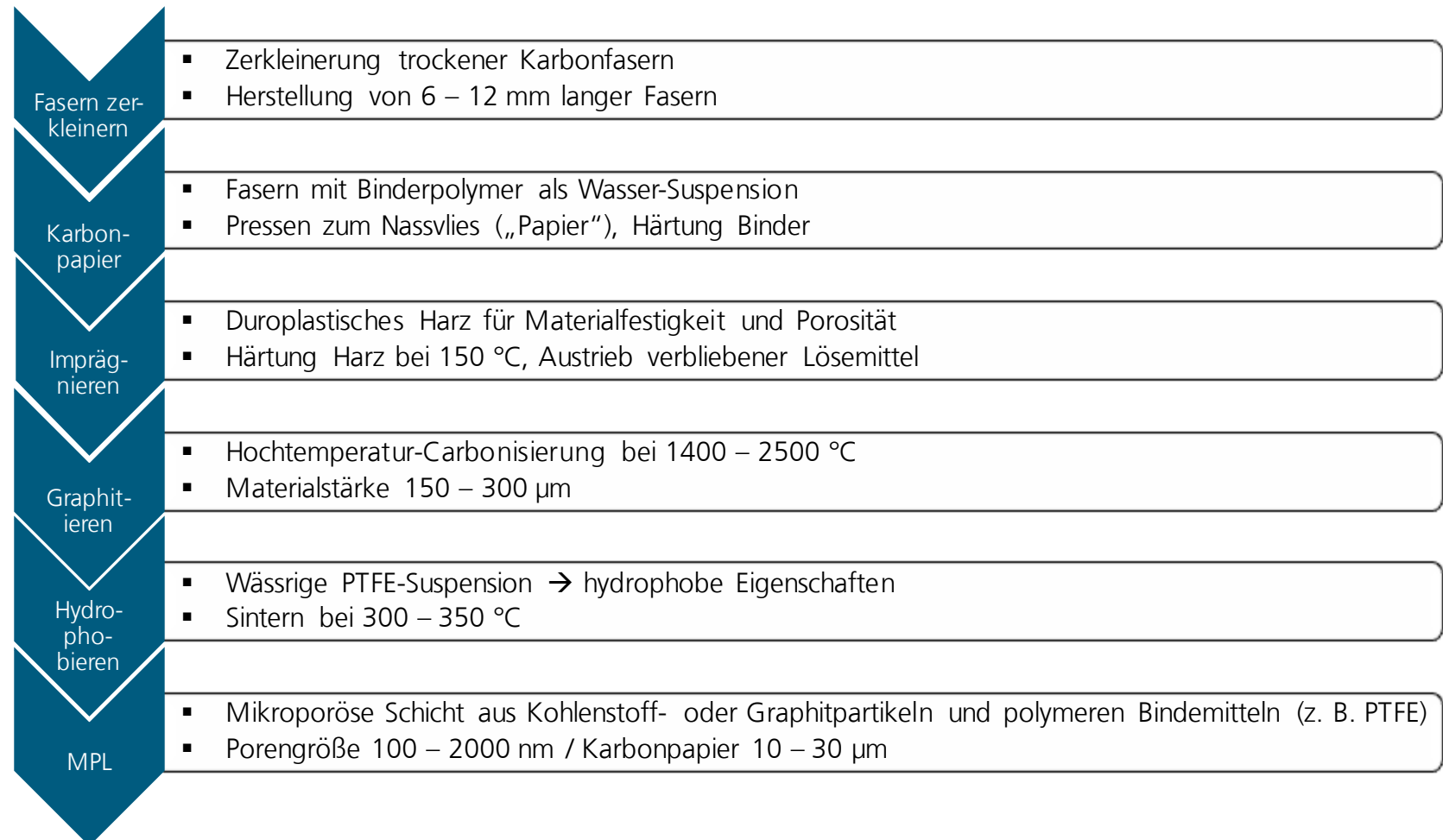
Produktionstechnologien für CCM/MEA

GDL / PTL – Funktionsanforderungen

	Elektrolyseur	Brennstoffzelle
Schicht zwischen CCM und BPP	<p>PTL: Porous Transport Layer</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit▪ Geringer Kontaktwiderstand▪ Anode (O_2) und Kathode (H_2) benötigen beide homogene Wasserverteilung und effiziente Gasabfuhr▪ Anode und Kathode benötigen unterschiedliche PTL zur optimalen Funktion▪ Mechanische Stabilität (hoher Differentialdruck bis 30 bar)	<p>GDL: Gas Diffusion Layer</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, geringer Kontaktwiderstand▪ Diffusionsgetriebener Transport zur gleichmäßigen Gasverteilung über die Fläche▪ Abführung von H_2O▪ Ggf. zusätzlich eine MPL (micro porous layer) an der Katalysatorfläche zur Verbesserung der Regulierung des Wasserhaushaltes an den Elektroden▪ Hydrophobe Eigenschaften
Material	<ul style="list-style-type: none">▪ Anode: poröse Titangewebe, perforierte Titanfolien, gesintertes Titanpulver▪ Kathode: Karbonpapier bzw. Karbongewebe	<ul style="list-style-type: none">▪ Karbonpapier bzw. Karbongewebe

Produktionstechnologien für CCM/MEA

GDL – Herstellschritte



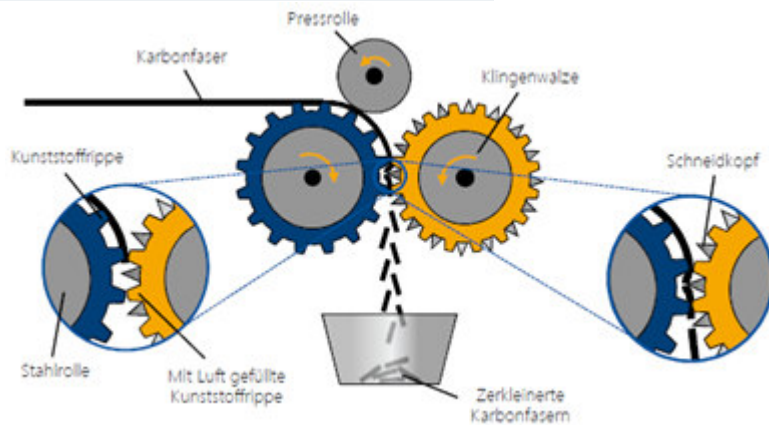
Referenzen: RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

GDL – Herstellschritte

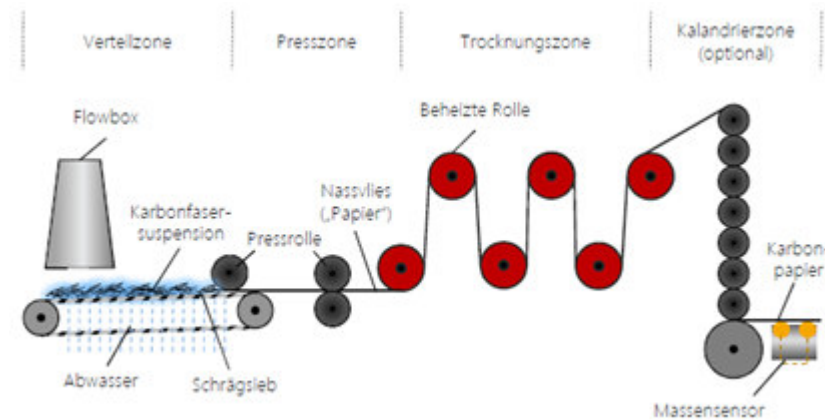
1 – Karbonfasern zerkleinern

Schnitttrate 9 m/min
Partikelgröße 6 – 12 µm



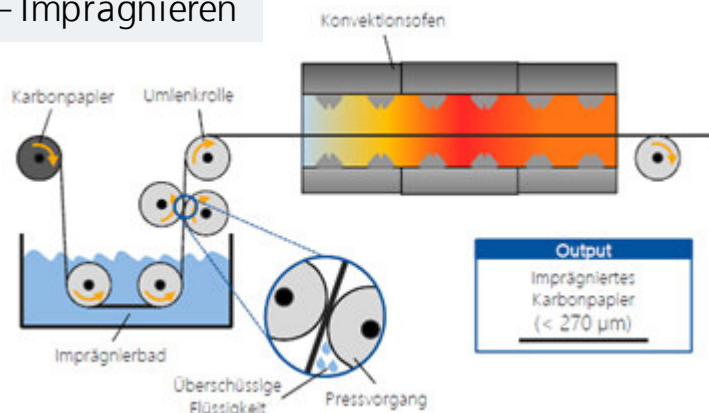
2 – Karbonpapier herstellen

Produktivität 300 – 320 m²/h
Materialstärke 150 – 300 µm

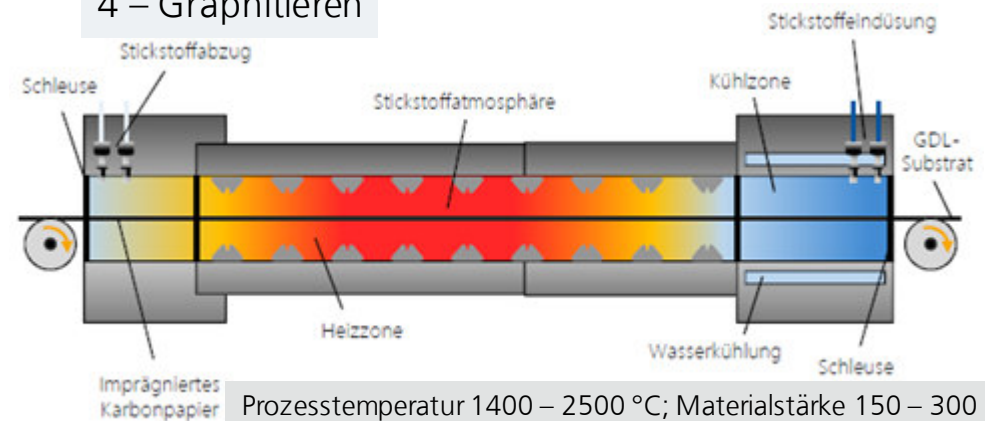


3 – Imprägnieren

Materialstärke 200 - 270 µm



4 – Graphitieren



Prozesstemperatur 1400 – 2500 °C; Materialstärke 150 – 300 µm

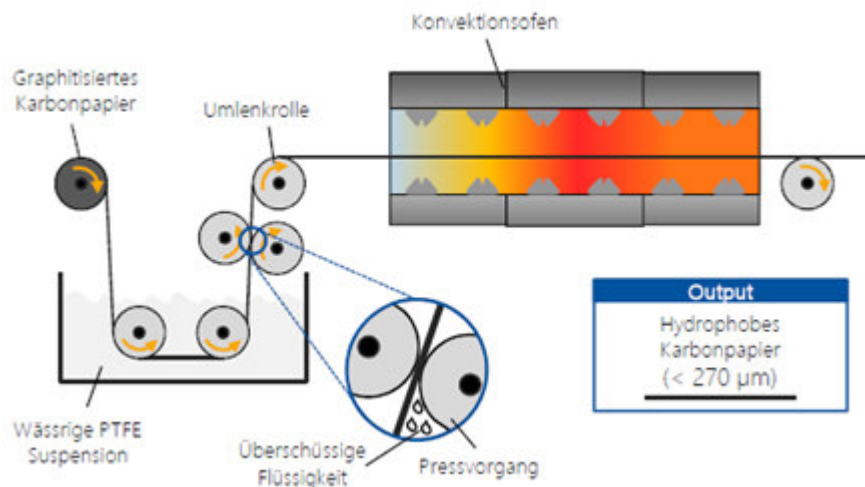
Referenzen: RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

GDL – Herstellschritte

5 – Hydrophobieren

Abb.: Hydrophobieren
Quelle:[1]



Trocknungstemperatur 300 – 305 °C
Papierdicke 200 – 270 µm

6 – MPL aufbringen und sintern

Abb.: MPL-Aufbringung
Quelle:[1]

Schichtdicke < 50 µm

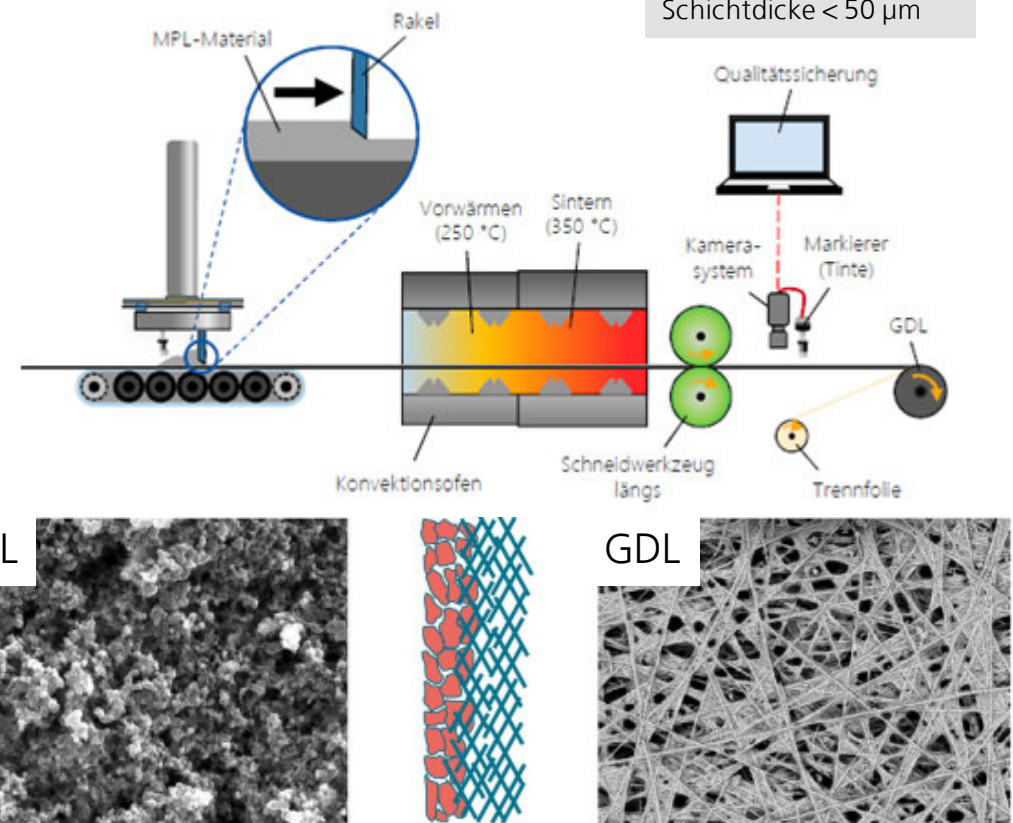


Abb.: REM-Aufnahmen von MPL und GDL sowie Prinzipskizze; Quelle: [2].

Referenzen: [1] RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten,
<https://s.fhg.de/bp9>;
[2] <https://s.fhg.de/a83>; letzter Besuch: 28.06.2021.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

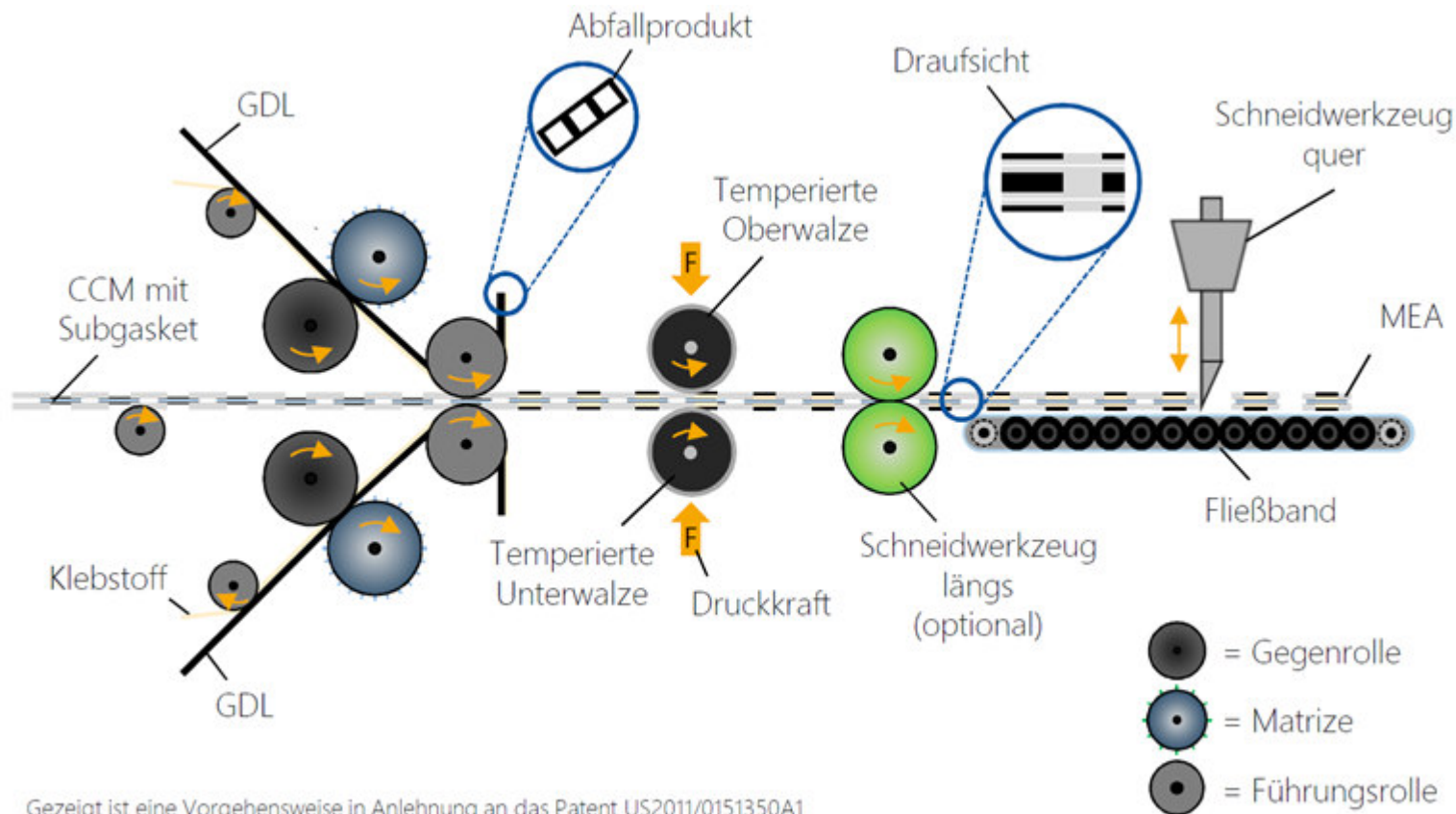
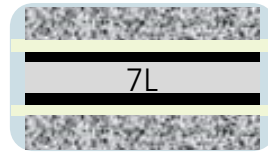
GDL – Weitere Bemerkungen

Betrachtung unterschiedlicher Herstellverfahren für GDL

Dissertation Stephan Mathias Bach, 2015, ISBN 978-3-95806-088-3

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA_{7L}-Fertigung



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

Abb.: Prinzipskizze MEA-Fertigung
Quelle: [1].

Die MEA zeigt, verglichen mit der BPP, die größeren Toleranzen, sodass mit engen Prozessfenstern gearbeitet werden muss.

Referenzen: [1] RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten, <https://s.fhg.de/bp9>.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Projekt SinterGDL 04.2022 – 03.2025 FKZ 03B11019

Stand der Technik

Poröse Graphitmatten oder –platten

→ Mechanische Stabilität, Lebensdauer, Kosten

Partner

Fraunhofer IFAM

Papierfabrik Louisenenthal GmbH

balticFuelCells GmbH

Papiertechnische Stiftung (PTS)

Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR)

Projektziel

Ganzmetallisches GDL, hochporös

→ Einsetzeigenschaften

→ Papiertechnologische Prozesse: organische
Faserstoffe, Füllstoffe, Additive, Metallpulver

→ Makroskopische Strukturierung der GDL soll
Einsatz vereinfachter 3D-siebgedruckter BPP
ermöglichen

→ Strukturierung GDL ermöglicht Integration
vom FlowField

→ Kostengünstiger und kompakter PEM-Stack

Referenzen: <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/sintergdl/> letzter Besuch: 09.12.2022.

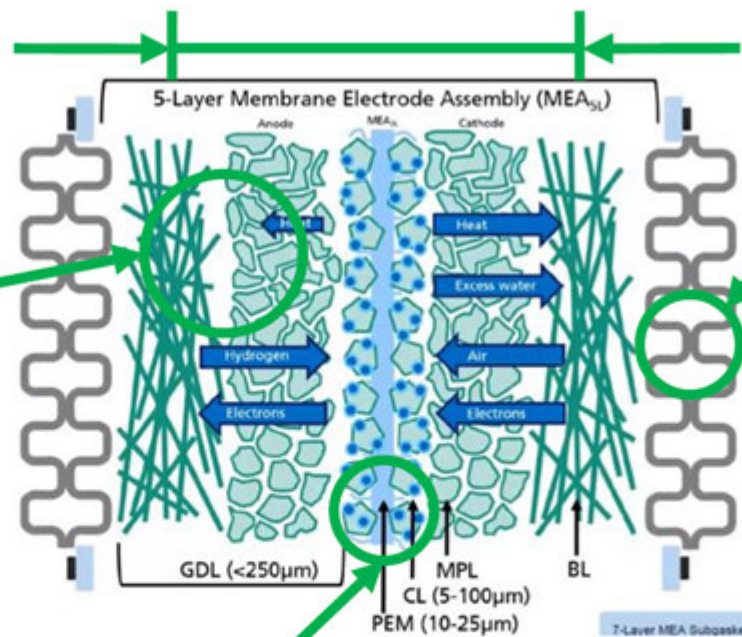
Produktionstechnologien für CCM/MEA

Projekt SinterGDL 04.2022 – 03.2025 FKZ 03B11019

Ziele für die SinterGDL

GDL GasDiffusionsLayer

- Kostenreduktion und/oder
- Höhere Funktionalität
- Mech. Stabilität
- Integrierte Gasverteilung



MEA

- Dünner
- Robuster

Bipolarplatte

- Vereinfachen
- Verschlanen

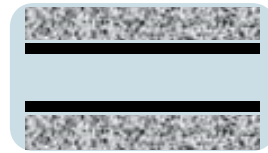
PEM Membran

- Schützen
- Perfekt versorgen

Bild-Quelle: Fraunhofer IPT / KEX

Produktionstechnologien für CCM/MEA

MEA / CCM – Weitere Bemerkungen



Alternative zur Katalysator-Beschichtung der CCM:

Beschichtung der GDL (Gas-Diffusion-Layer), wird als GDE (Gas-Diffusion-Electrode) bezeichnet.

- Prozessablauf: Herstellung Anoden und Kathoden GDE, Heißverpressung mit Membran
- Nachteil: Geringere Katalysatorausnutzung, da die Schichtlage nicht genau definiert

Produktionstechnologien für CCM/MEA

GDE (Gas Diffusion Electrode): GDL mit Katalysatorschicht als alternativer Ansatz

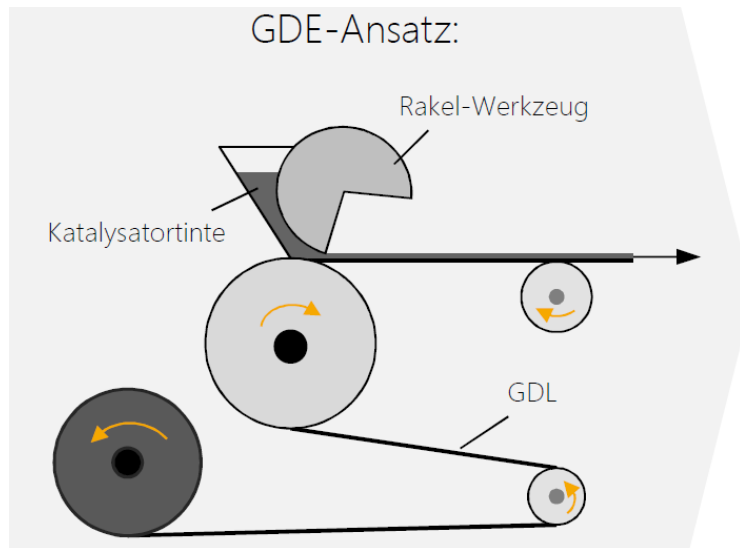
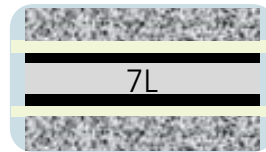


Abb.: Prinzipskizze Katalysator-Beschichtung der GDL
Quelle: [1].

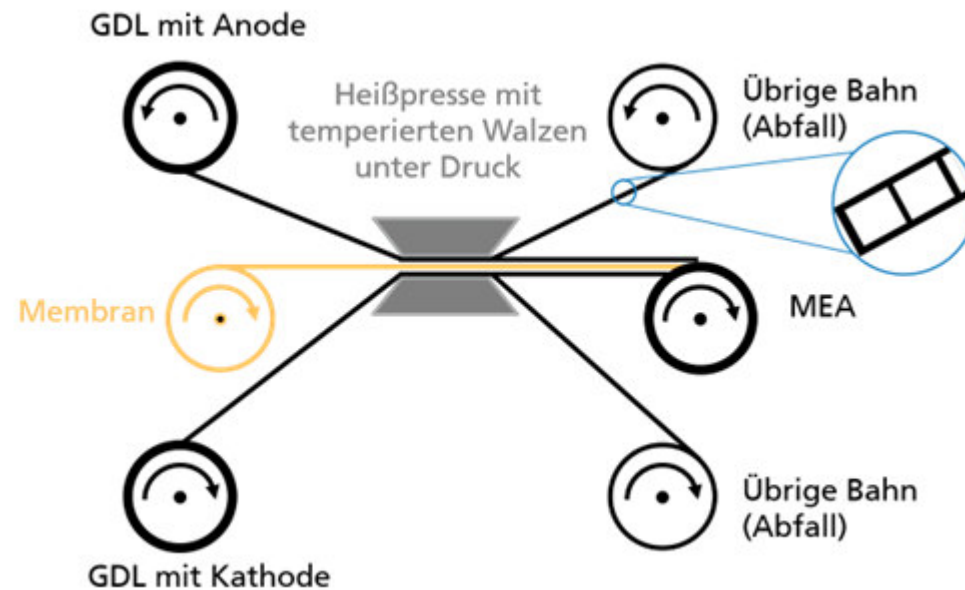


Abb.: Prinzipskizze Herstellung MEA aus GDE
Quelle: Fraunhofer ENAS.

Gezeigt ist die Beschichtung per Rakel, wobei die Dicke der Katalysatortinte präzise eingestellt werden kann.

Referenzen: [1] RWTH Aachen und VDMA: Produktion von Brennstoffzellen-Komponenten, <https://s.fhg.de/bp9>.

Produktionstechnologien für CCM/MEA

Kontakt

Vielen Dank für Ihr Interesse

Dr. Andreas Willert

Telefon +49 371 45001 440

andreas.willert@enas.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS

Abteilung Printed Functionalities

Technologie-Campus 3

09126 Chemnitz, Germany

www.enas.fraunhofer.de

