



Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT

Technologischer Deep-Dive | Die Membran-Elektroden-Einheit der PEM-Brennstoffzelle

Übersicht

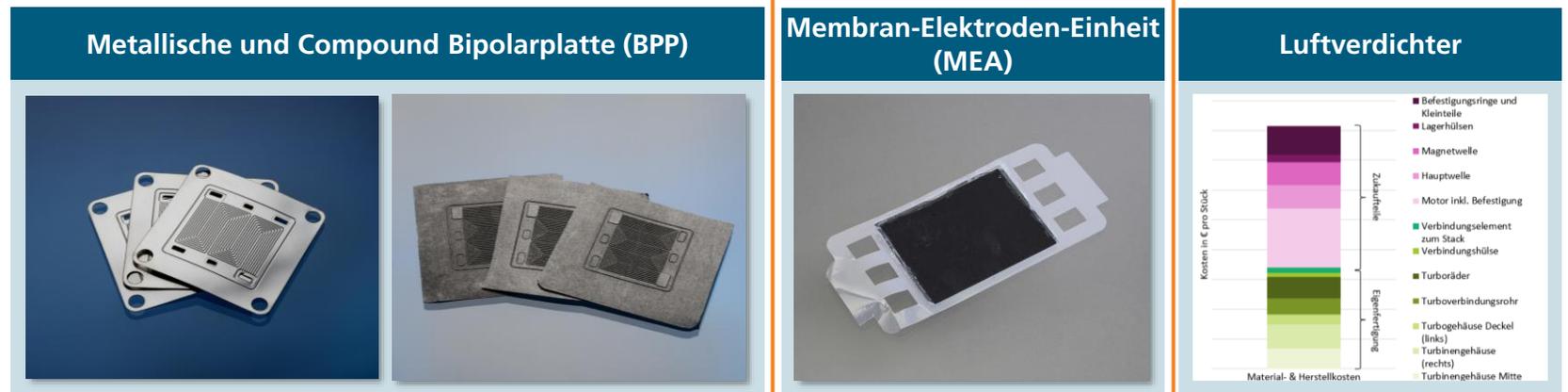
Die Deep-Dives sind eine Ergänzung zu der Studie "Wertschöpfungskette Brennstoffzelle"



In diesem Deep-Dive werden basierend auf dem aktuellen Stand der Technik die Werkstoffe, die Fertigungsverfahren und die Wertschöpfungskette ausgewählter Komponenten der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen) näher betrachtet. Es sei darauf hingewiesen, dass der vorliegende Deep-Dive als Diskussionsgrundlage für die Branche dient und neben den gezeigten Lösungen weitere Werkstoffkonfiguration und Fertigungsalternativen denkbar sind.

Die insgesamt drei Deep-Dives sind als Ergänzung zur Studie „Wertschöpfungskette Brennstoffzelle“ zu verstehen.

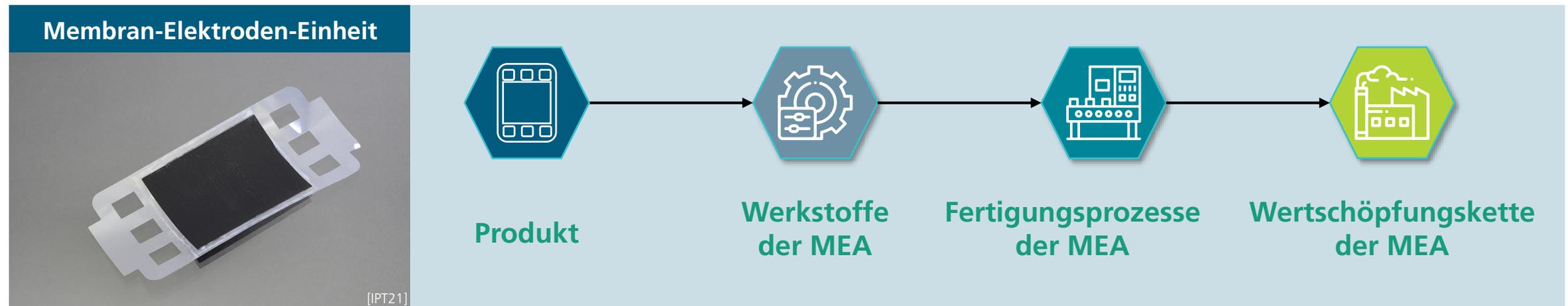
Der Fokus dieser Betrachtung liegt auf:



Dieses Factsheet

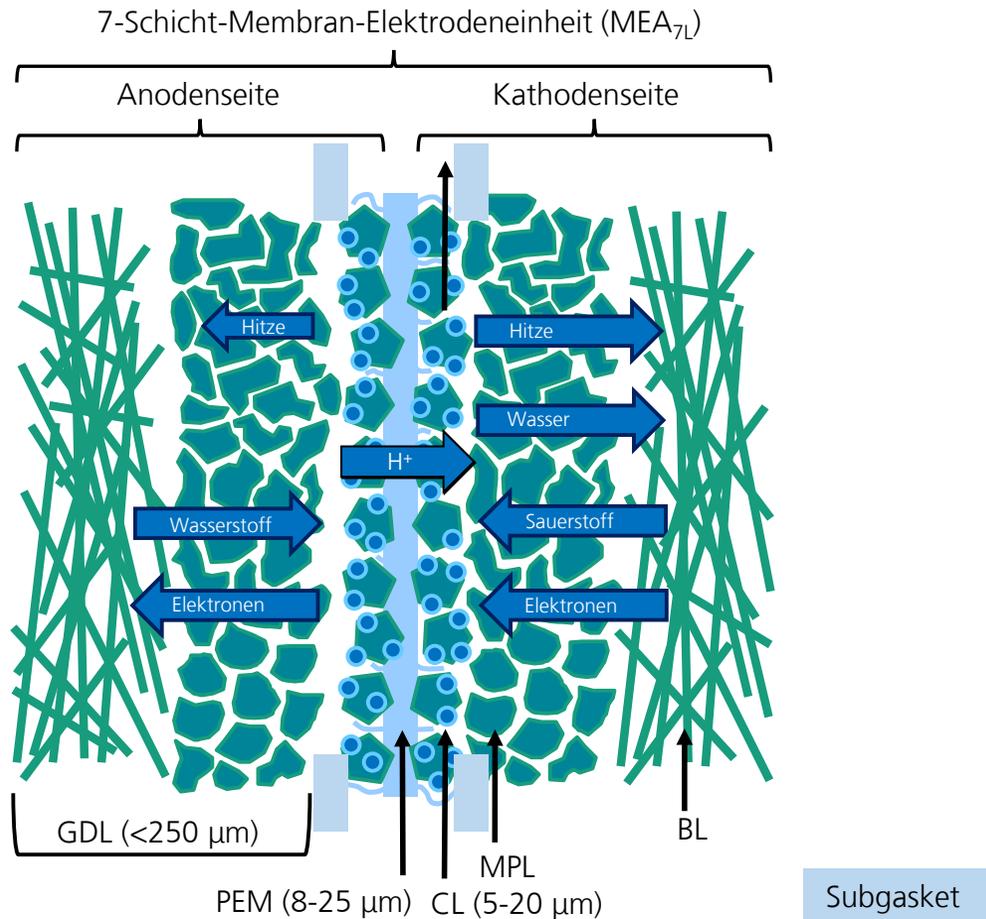
Gliederung des technischen Deep-Dives

Der technische Deep-Dive lässt sich in 4 Bereiche unterteilen



Definition Lagenaufbau MEA_{7L}

Der MEA_{7L} Aufbau besteht aus sieben funktionalen Schichten



Die MEA befindet sich im Brennstoffzellen-Stack zwischen zwei BPPs. Die mittlere Schicht der MEA_{7L} ist die Protonen-Austausch-Membran (engl.: Proton Exchange Membran, PEM). Sie ist auf beiden Seiten mit einer Katalysatorschicht (CL) beschichtet (MEA_{3L}). Eingefasst wird die MEA_{3L} von zwei Subgasket-Schichten (MEA_{5L}) und wird beidseitig von einer gasdurchlässigen Schicht (GDL) bedeckt (MEA_{7L}).

Schichtweise Definition des MEA_{7L} Designs

MEA _{3L} / CCM	PEM + 2 x Katalysatorschichten (engl. Catalyst Layer (CL))	} Auch Catalyst Coated Membrane (CCM) genannt
MEA _{5L}	PEM + 2 x Katalysatorschichten (engl. Catalyst Layer (CL)) + 2 x Dichtungen (engl. Subgasket)	
MEA _{7L}	PEM + 2 x Katalysatorschichten (engl. Catalyst Layer (CL)) + 2 x Dichtungen (engl. Subgasket) + 2 x Gas-Diffusion-Lagen (engl. Gas-Diffusion-Layer (GDL))	

Legende

BL: Base Layer; CL: Catalyst Layer; GDL: Gas-Diffusion-Layer; MPL: Micro-Porous-Layer; PEM: Proton-Exchange-Membran [IPT20]



Grundfunktionen und Anforderungen der MEA_{7L}

MEA_{7L}-Funktionen

- Ermöglichen der elektrochemischen Reaktion
 - Anode: $2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
 - Kathoden: $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
 - **Gesamtreaktion:** $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Ionen- und Elektronenleitfähigkeit
- Dichtungs- und Isolationsfunktion gegen die BPP
- Einleiten und Trennen der Prozessfluide durch Einlassstrukturen (Manifolds)



Anforderungen

- Effizienter Ablauf der elektrochemischen Reaktion
- Lebensdauieranforderungen: 6.000–40.000 Std. (Automotivebereich)
- Vollständige Abdichtung gegenüber der BPP
- Verhindern eines Kurzschlusses zwischen BPPs
- Sicherstellung einer Mindestbetriebsleistung
- Sicherer Zusammenhalt der Fügestellen in der MEA_{7L}



Typische Maße einer MEA_{7L}

- Typische Geometrien für Kfz-Anwendungen (Pkw/Lkw):
 - Größe der aktiven Fläche: 300 cm² (100 x 300 mm)
 - Größe der Außengeometrie: 384 cm² (120 x 320 mm)

[IPT20, IPT21, HAI03, KAU22, DOE17]

Designfeatures und technische Details einer MEA_{7L}

Die verschiedenen Lagen / Geometrien der MEA_{7L} erfüllen unterschiedliche Funktionen

Überlapp Subgasket mit MEA_{3L}

Abdichtung der MEA_{3L}

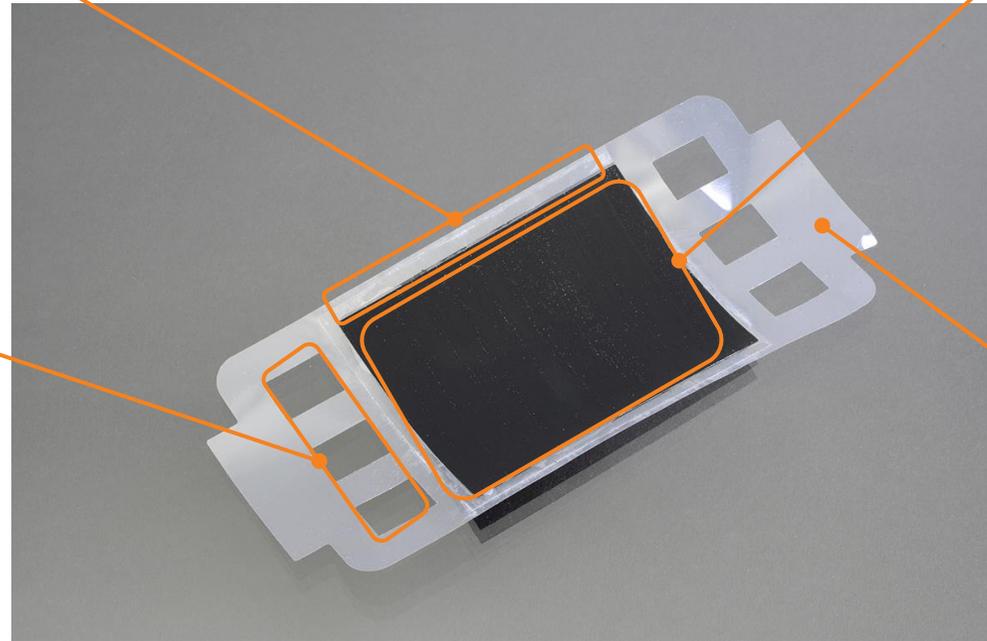
Manifolds

Ein- und Auslassbereiche für die
Fluide

Kathode: $O_2 + H_2O$

Anode: H_2

Kühlkreislauf: Kühlmittel



MEA_{3L}

Bereich der elektrochemischen
Reaktion
Ionen- und Elektronenleitfähigkeit

Subgasket

Abdichtung und Isolation der MEA_{7L}
zur BPP
Zusätzliche Versteifung der MEA_{3L}



Werkstoffe

Bestandteile und Eigenschaften der einzelnen Funktionsschichten

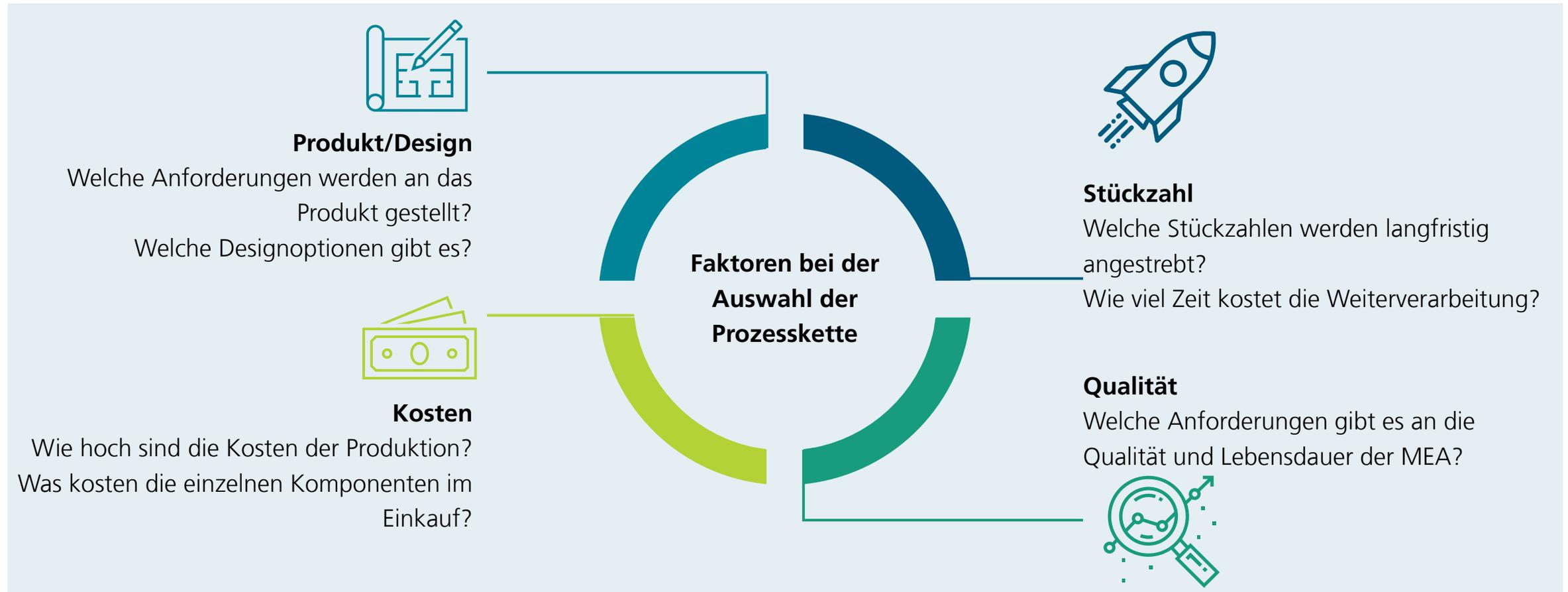
	Membran	MEA _{3L}	MEA _{5L}	MEA _{7L}
Komponenten	PEM	+ 2 x Katalysatorschichten (CL)	+ 2 x Subgasket	+ 2 x Gas-Diffusion-Lagen (GDL)
Material	Ionomer: Nafion, Flemion, Aquivion	Katalysatorschicht (CL): Kohlenstoffträger, Katalysator, Ionomer	Subgasket: Kunststoffe (z.B. PEN) + Haftvermittler (Klebstoffe)	GDL: Carbonpapier- o. Gewebesicht, mikroporöse Schicht aus Kohlenstoffträger + wasserabweisendes Füllmittel (z.B. PTFE)
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dicke: 8-250 µm ▪ Ionenleitfähig ▪ Elektrisch isolierend ▪ Mechanische Widerstandsfähigkeit ▪ Quellfähig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dicke der CL: 1 – 20 µm ▪ Katalytische Aktivität durch Platin (Pt) zur Beschleunigung der elektrochemischen Reaktion ▪ Elektrisch leitfähig ▪ Ionenleitfähig durch Ionomer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dicke abhängig von Stackdesign ▪ Richtwert für Dicke: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 35 – 100 µm ▪ Dichtend ▪ Mechanisch stabilisierend 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dicke der GDL i.d.R. < 280 µm ▪ Carbonpapier- o. Gewebesicht i.d.R. < 200 µm ▪ Mikroporöse Schicht i.d.R. < 50µm ▪ Elektrisch leitfähig ▪ Kompressibel



[IPT21]

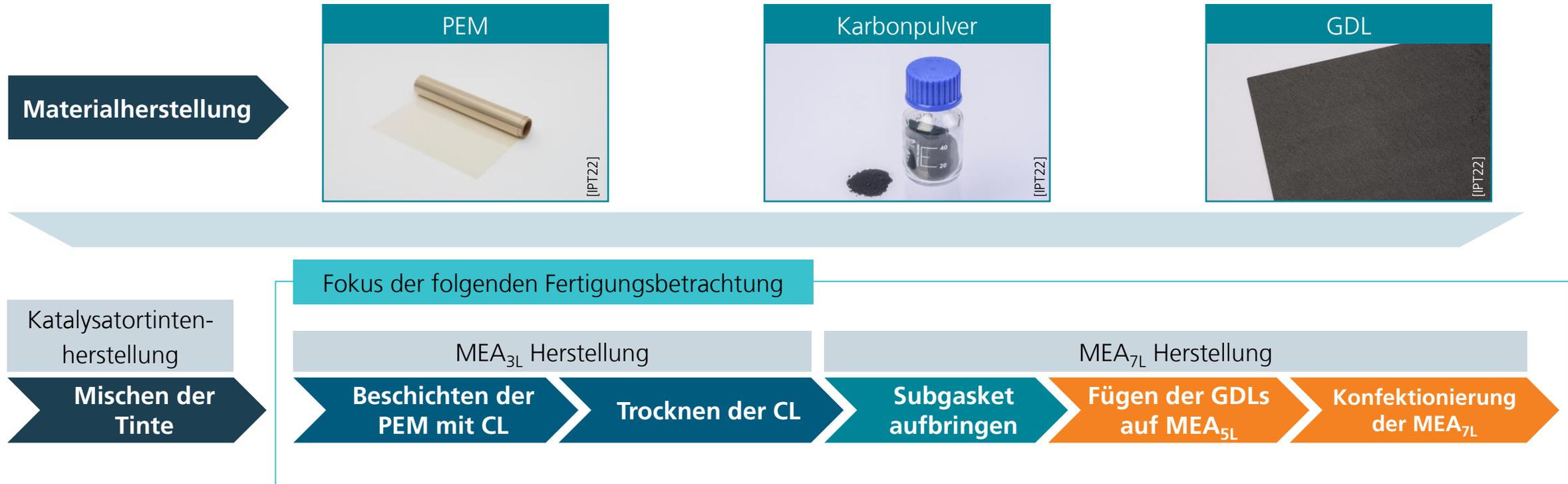
Produktionskonzepte für die MEA_{7L}

Die Auswahl geeigneter Fertigungsprozesse erfolgt auf Basis von vier Faktoren



Prozessetappen zur MEA_{7L} Herstellung

Hauptfokus der Analyse liegt auf der Prozesskette von MEA_{3L} bis MEA_{7L}



Der Schritt der Materialherstellung ist der MEA_{3L} und MEA_{7L} -Fertigungslinie vorgeschaltet.
Die MEA_{3L} und MEA_{7L} -Fertigungslinie werden im folgenden separat betrachtet.

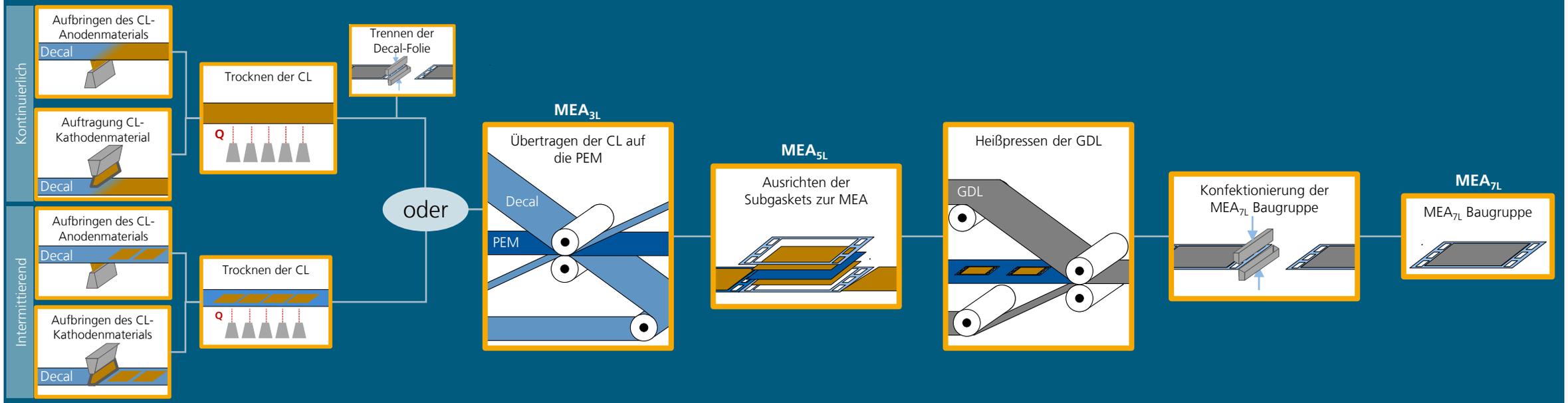
Produktionskonzepte für die Produktion der MEA_{7L}

Detailierung der Produktionskonzepte

Kurzerklärung zur betrachteten Prozesskette

Die Produktion von MEA_{7L} lässt sich in die Produktionsschritte: Beschichten der PEM mit CL, Subgasket aufbringen, Fügen der GDLs auf MEA_{5L} und Konfektionierung* der MEA_{7L} unterteilen. Hierbei sind verschiedene Produktionskonzepte möglich. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es keinen einheitlichen Stand der Technik zur Abfolge der einzelnen Prozessschritte. Die Abfolge der Prozessschritte in der Fertigung hängt sowohl von den verwendeten Prozesstechnologien als auch dem geplanten Stack-Design der MEA_{7L} ab. Für das Aufbringen der CL wird häufig ein kombiniertes Verfahren aus Direktbeschichtung und Decal-Beschichtung angewendet.

Produktionskonzept A: Decal-Beschichtung kontinuierlich oder intermittierend

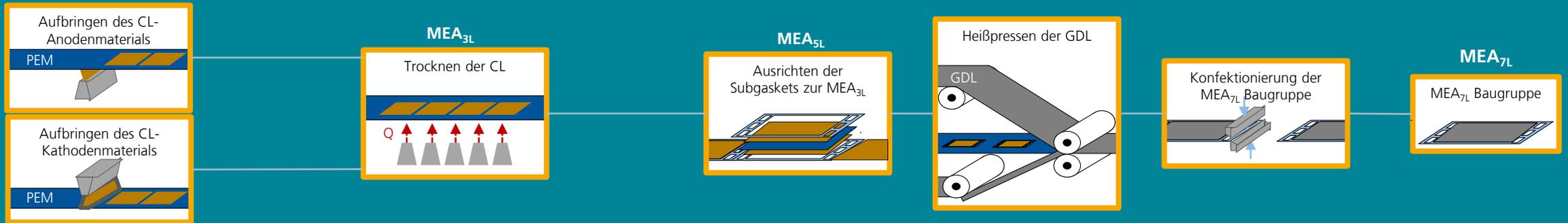


[IPT20]

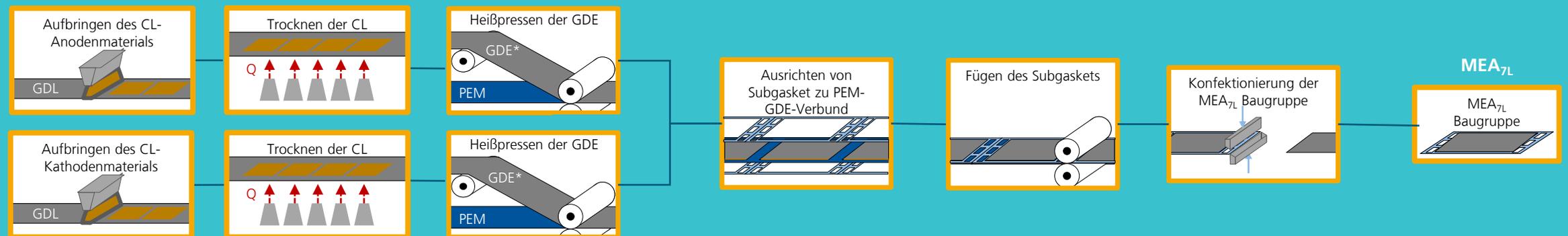
Produktionskonzepte für die Produktion der MEA_{7L}

Detailierung der Produktionskonzepte

Produktionskonzept B: Direktbeschichtung



Produktionskonzept C: Catalyst Coated Substrate (CCS)

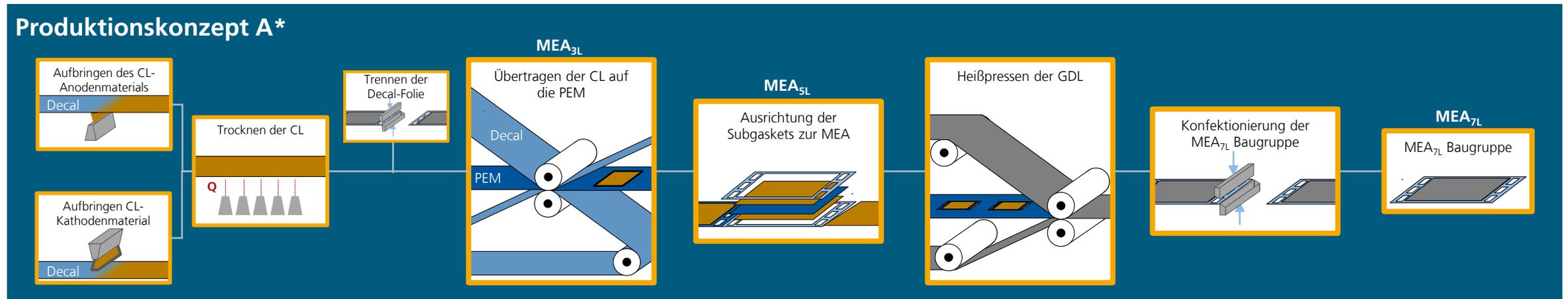


*GDE = Gas-Diffusions-Elektrode

[IPT20]

Produktionskonzepte für die Produktion der MEA_{7L}

Detailierung der Produktionskonzepte



- Durch das Heißpressen der Decal-Folien wird der Direktkontakt der PEM mit der flüssigen Katalysatorfarbe vermieden und das Quellverhalten der PEM im Prozess reduziert.
- Die Handhabung des sensitiven PEM-Materials wird erleichtert.
- Die Trocknung der Katalysatorfarbe wird durch die Verwendung der Decal-Folie vereinfacht



- Durch die indirekte Beschichtung ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt für den Übertrag der Katalysatorschicht auf die PEM nötig.
- Die thermische Einwirkdauer des Heißprägens limitiert die maximale Prozessgeschwindigkeit.
- Es fällt durch den Prozess Abfall von zusätzlichem Decal-Folienmaterial an.

Ein **Up-Scaling** des Prozesses ist **nur** mit einem **parallelisierten Heißpressverfahren** möglich, da die thermische Einwirkdauer der limitierende Faktor ist. Zusätzlich ist die **Minimierung** von **Produktionsabfällen** eine noch **nicht gelöste** Herausforderung und ein wichtiger Punkt für Hochskalierungsfragestellungen.

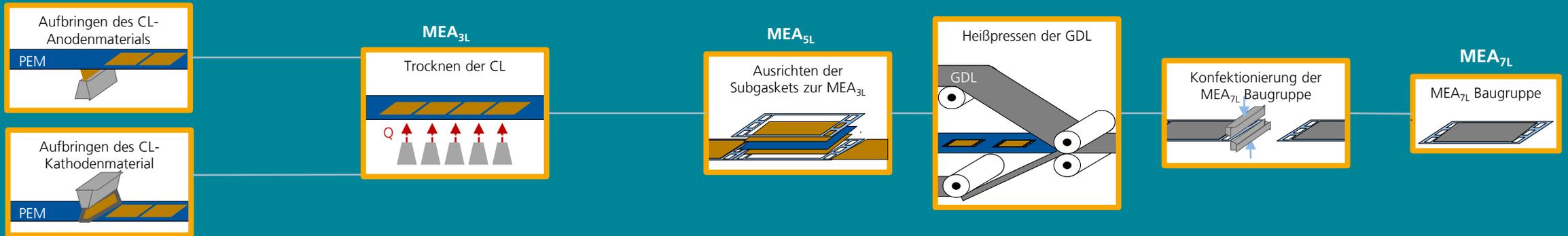
*Abbildung zeigt nur die kontinuierliche Prozessrouten

[IPT20]

Produktionskonzepte für die Produktion der MEA_{7L}

Detailierung der Produktionskonzepte

Produktionskonzept B: Direktbeschichtung



- Durch die direkte Beschichtung wird im Vergleich zum Decal-Verfahren der zeitaufwendige Prozessschritt des Heißpressens eingespart.
- Hohes Potential zum Hochskalieren der MEA_{3L} Fertigungslinie
- Mit Hilfe der Direktbeschichtung ist eine Einsparung von Prozessabfällen möglich.

- Das Quellverhalten der PEM im Kontakt mit der Katalysatorfarbe stellt eine erhebliche Bahnführungs-Herausforderung dar. Für dünne PEMs sind diese Herausforderungen größer.
- Zum jetzigen Zeitpunkt existiert kein für die Direktbeschichtung optimiertes Trocknungsverfahren.
- Materialverfügbarkeiten bspw. der PEM limitieren derzeit stark die Rolle-zu-Rolle Ausbringungsmenge

Die **Herausforderung** der **direkten Beschichtung** besteht in der **Handhabung und Bahnführung** der sensitiven PEM unter Einwirkung der Katalysatorfarbe.

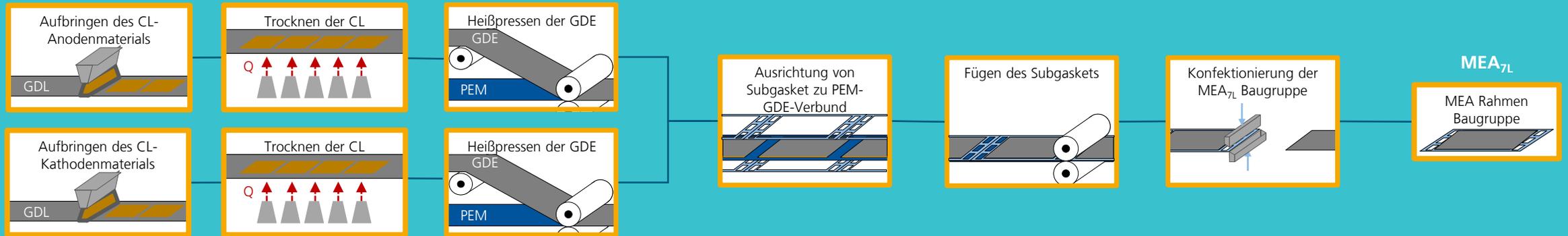
Die doppelte direkte Beschichtung bietet jedoch auch das **Potenzial**, die **Produktivität** des Beschichtungsprozesses, unter Reduktion von Prozessabfällen, **zu erhöhen**.



Produktionskonzepte für die Produktion der MEA_{7L}

Detailierung der Produktionskonzepte

Produktionskonzept C: Catalyst Coated Substrat (CCS)



- Die Beschichtung der GDL mit dem Katalysator vermeidet das direkte Einwirken der Tinte auf die quellanfällige PEM und bietet eine mechanisch stabilere Substratunterlage.
- Auf der GDL ist ein additiver Schichtaufbau möglich.
- Höhere Materialverfügbarkeit von GDLs als Rollenware derzeit, mögliche Einsparung von PEM Material ist möglich



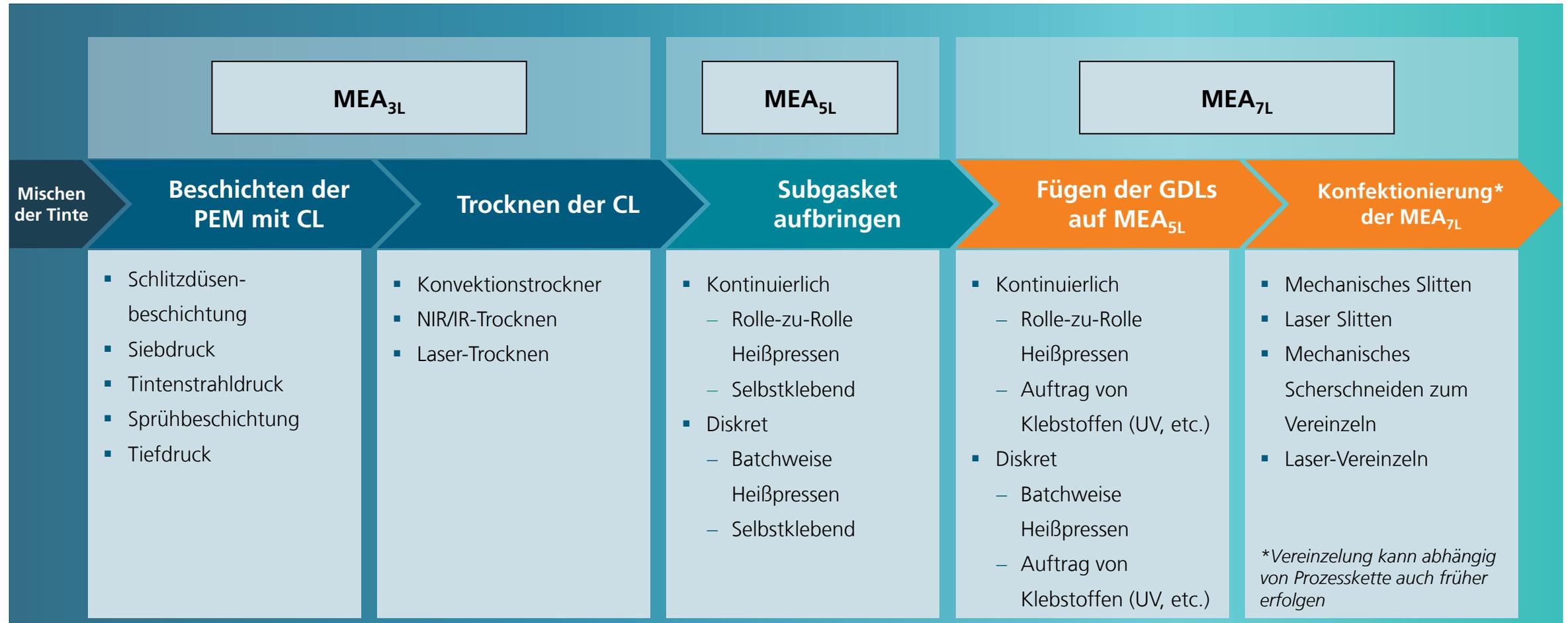
- Durch den Aufbau der GDL ist ein Versickern der Katalysatorfarbe bei der Beschichtung möglich.
- Die Beschichtung der GDL kann zu einem Verlust der Diffusionsfähigkeit führen.
- Die Assemblierung des GDL-Aufbaus mit dem Subgasket ist aufwändiger als bei Decal- oder Direktbeschichtungsverfahren. Stand der Technik MEA_{7L} Designs sind aufwändiger umzusetzen.

Der CCS Prozess bietet die **Möglichkeit** die **CL-Tinte** auf einem mechanisch **stabileren Substrat aufzubringen**. Die **Herausforderungen** des Prozesses bestehen jedoch darin, durch die Beschichtung **nicht** die **Diffusionsfähigkeit** der GDL zu **reduzieren** oder zu unterbinden. Das MEA_{7L} Querschnitts-Design muss angepasst werden.

[IPT20, SCO20]

Technologieübersicht Produktion für MEA

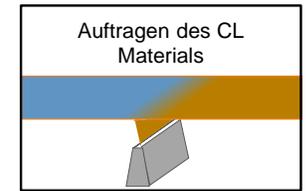
Für jeden einzelnen Prozessschritt stehen mehrere Fertigungstechnologien zur Verfügung



[IPT20]

Technologieübersicht | MEA_{3L}-Fertigung

Es ist eine Vielzahl an Beschichtungsverfahren auf dem Markt verfügbar



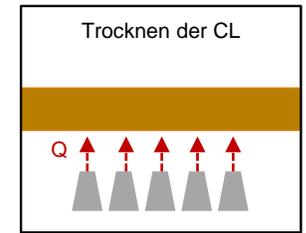
	Kontinuierlich / Intermittierend			Kontinuierlich	Intermittierend
Auswertung	Schlitzdüsenbeschichtung	Siebdruck	Tintenstrahldruck	Sprühbeschichtung	Tiefdruck
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 9
Prozessdauer / Zykluszeit	Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min intermittierend : < 60 m/min Zweiseitig: kontinuierlich: < 50 m/min intermittierend: < 15 m/min Materialgenauigkeit: ±1%	Einseitig: kontinuierlich: < 180 m/min Materialgenauigkeit: ±5%	Einseitig: kontinuierlich: < 300 m/min Hohe Materialgenauigkeit	Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min Zweiseitig: kontinuierlich: < 100 m/min Geringe Materialgenauigkeit	Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min Materialgenauigkeit von ±5%
Vor-/Nachteile Summary	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Genauigkeit/Produktionsgeschwindigkeit + Häufigste verwendete Technik - Mögliche Kanteneffekte bei intermittierender Beschichtung - Dispersionsstabilität hat Einfluss auf die korrekte Beschichtung aufgrund der hohen Scherkräfte beim Auftragen 	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Produktionsgeschwindigkeit + Niedrige Investitionskosten - Hohe Genauigkeiten sind mit höherem Optimierungsaufwand verbunden - Häufiges Reinigen der Siebe notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> + Sehr genaue Technik + Flexible Druckbilder - Hohes Tintenvolumen - Aufwendiges Verfahren - Dispersionsstabilität hat Auswirkungen auf die korrekte Beschichtung aufgrund der hohen Scherkräfte beim Auftragen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Gut für Prototypenfertigung + Günstiges Herstellungsverfahren - Lange Zykluszeit - Niedrigviskose Tinte notwendig - Beschichtungen sind möglicherweise inhomogen - Mögliche Inhomogenitäten an den Rändern der Beschichtung 	<ul style="list-style-type: none"> + Großes Potenzial für hohe Produktionsmengen - Niedrigviskose Tinte notwendig - Mögliche Inhomogenitäten an den Rändern der Beschichtung entstehen



[COA18, MAM18, JAM16]

Technologieübersicht | Trocknen von MEA_{3L}

Die Trocknungsprozesse sind aktuell mit vielen Herausforderungen behaftet



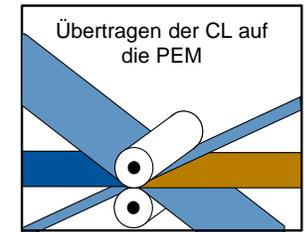
Auswertung	Konvektionstrockner	NIR/IR-Trockner	Lasertrocknung
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 9
Prozessdauer / Zykluszeit	Trockengeschwindigkeit Einseitig/Zweiseitig*: kontinuierlich: < 100 m/min Wärmeeinbringung: Erzwungene Konvektion Trocknung bzw. Lösemittelabfuhr: Luftstrom	Trockengeschwindigkeit Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min Wärmeeinbringung: Strahlungsabsorption, breitbandig Trocknung bzw. Lösemittelabfuhr : Luftstrom	Trockengeschwindigkeit Einseitig: Kontinuierlich, begrenzt durch Schichteffekte Wärmeeinbringung: Strahlungsabsorption, schmalbandig Trocknung: Luftstrom
Vor-/Nachteile Summary	<ul style="list-style-type: none"> + Konvektionstrocknung wird bereits in vielen Industrien eingesetzt - Konventionelle Trockner nur für einseitige Beschichtungen geeignet - Zuführte Luft muss frei von Partikeln sein - Luftstrom kann die Homogenität der Schicht beeinträchtigen und thermische Spannungen hervorrufen - Hoher Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> + Strahlungstrocknung verspricht eine sauberere Technologie zu sein + Einsparen von Trocknerstrecke - Luftstrom kann die Homogenität der Schicht beeinträchtigen und thermische Spannungen hervorrufen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Höhere Leistungsdichten als bei Konvektionstrocknung + Einsparen von Trocknerstrecke möglich + Energieeinbringung in Beschichtungsvolumen + Abstimmbare Wellenlänge + Präzise zeitliche und räumliche Steuerbarkeit der Energieeinbringung + Hohe Energieeffizienz - Niedriges TRL - Höhere Systemkomplexität & Kosten - Laserschutz erforderlich

*Zweiseitige Trocknung nur in der Ausführung als Schwebetrockner möglich



Technologieübersicht | Übertragen von CL auf die PEM

Die CL kann kontinuierlich oder chargenweise aufgebracht werden

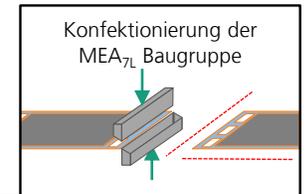


Auswertung	Rolle-zu-Rolle Heißpressen	Chargenweises Heißpressen
Technology Readiness Level	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>
Prozessdauer / Zykluszeit	>10 cm/min <60 s/MEA	~10 cm/min 60 s - 300 s/MEA
Vor-/Nachteile Summary	<ul style="list-style-type: none"> + Schnellerer Prozess im Vergleich zum Chargenweisen Heißpressen - Zusätzlicher Prozess in der Prozesskette - Aufgrund der geringen Kontaktzeit und den hohen Wärmestroms sehr komplex - Hoher Temperaturgradient aufgrund geringerer Transversionsfläche ➤ Up-Scaling ist durch höhere Geschwindigkeit und Parallelisierung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> + Leichte Kontrolle der Prozessparameter wie Presszeit und Wärmestrom - Zusätzlicher Prozess in der Prozesskette - Hohe Investitionskosten - Langsamere Prozess als das Rolle-zu-Rolle Heißpressen ➤ Intermittierender Prozess, aber gleichmäßige Wärme- und Kraftverteilung ➤ Up-Scaling ist nur durch Parallelisierung möglich



Technologieübersicht | Konfektionierung der MEA_{7L} Baugruppe

Für die Konfektionierung bestehen Varianten längs und quer zur Bahn

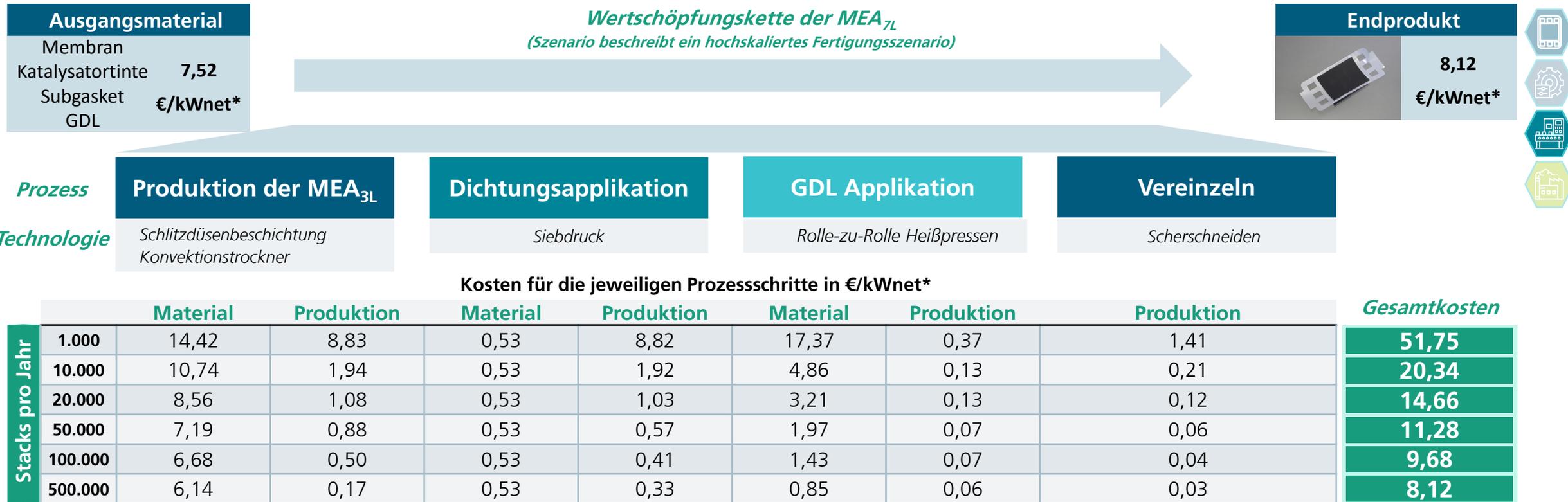


	In Bahnrichtung		Senkrecht zur Bahnrichtung	
Auswertung	Mechanisches Slitten	Laser Slitten	Scherschneiden	Laser-Vereinzeln
Technology Readiness Level	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>	<p>Für Brennstoffzellenproduktion:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p> <p>Industrialisierungspotenzial:</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9</p>
Prozessdauer / Zykluszeit	<p>Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min</p>	<p>Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min</p>	<p>Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min</p> <p>Max. Hubzahl: 100/min</p>	<p>Einseitig: kontinuierlich: < 100 m/min</p>
Vor-/Nachteile Summary	<ul style="list-style-type: none"> + Schlitten ist eine häufig verwendete Technologie in R2R-Prozessen. - Die Lebensdauer der Werkzeuge bestimmt die Betriebskosten - Mögliche Kontamination der MEA_{7L} durch direkten Kontakt der Messer 	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Präzision, hohe Prozessgeschwindigkeit + Flexibel in Bezug auf verschiedene Formate + Weniger Kontamination im Prozess - Kontinuierliches R2R-Laser Slitten ist noch in der Forschung - Laserstrahlen bewirken eine lokale Erwärmung und können die PEM beschädigen 	<ul style="list-style-type: none"> + Das Scherschneiden ist eine häufig verwendete Technologie, auch in R2R-Prozessen. - Die Lebensdauer der Werkzeuge bestimmt die Betriebskosten - Mögliche Kontamination der MEA_{7L} durch direkten Kontakt der Messer 	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Präzision, hohe Prozessgeschwindigkeit + Flexibel in Bezug auf verschiedene Formate - Laserstrahlen bewirken eine lokale Erwärmung, können die PEM beschädigen



Kostenanalyse in der Wertschöpfungskette

Die Fertigung der MEA macht weniger als 10% der Wertschöpfung der MEA-Herstellung aus

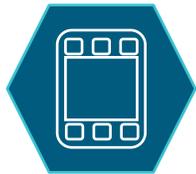


Der Anteil der Materialkosten an den MEA_{7L}-Gesamtkosten wird mit zunehmender Ausbringungsmenge die Kosten bestimmen

*Bezogen auf einen Stack mit einer Netto-Leistung von 80 kW, bei einer produzierten Stackzahl von 500.000 Stacks p.a.

[JAM18]

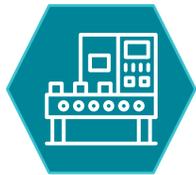
Zusammenfassung für die MEA_{7L}



Membran-Elektroden-Einheit



Werkstoffe



Fertigungsprozesse



Wertschöpfungskette

1

Die **MEA_{7L}** besteht aus insgesamt sieben Schichten. Die mittlere Schicht ist die Protonen-Austausch-Membran (**PEM**). Sie ist auf beiden Seiten mit einer Katalysatorschicht (**CL**) beschichtet (MEA_{3L}). Eingefasst wird die MEA_{3L} von zwei **Subgasket**-Schichten (MEA_{5L}) und wird beidseitig von einer Gas-Diffusions-Schicht (**GDL**) bedeckt (MEA_{7L}). An der MEA_{7L} finden die elektrochemischen Reaktionen statt.

2

Die Beschaffung von **PEM-, Ionomer- und Katalysatorwerkstoffen** bzw. Halbzeugen ist **kostenintensiv** bei meist niedriger Verfügbarkeit bzw. Ausbringungsmenge. Die GDL hat einen großen Massenanteil an der **MEA_{7L}**.

3

Eine **großserientaugliche Prozesskette der MEA_{3L} bis MEA_{7L}** existiert zum jetzigen Zeitpunkt **nicht**. Es gibt verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren. Stand der Technik ist aktuell eine Kombination aus **direkter** und **indirekter** Beschichtung der PEM über das Decal-Verfahren.

4

Die lange Wertschöpfungskette der **MEA_{7L}-Fertigungslinie** reicht von der Materialherstellung der verschiedenen Halbzeuge und Tintenbestandteile bis hin zur Fertigung der MEA_{3L} und Assemblierung der **MEA_{7L}**. Es sind wenige Komplettanbieter mit voller Wertschöpfungstiefe der MEA_{7L} am Markt vertreten. Der Maschinen- und Anlagenbau nutzt derzeit etablierte Standardtechnologien. Aufgrund dessen hat sich **noch keine großserientaugliche Wertschöpfungskette** herausgebildet.



[AME22]

White Spots und Trends in der Entwicklung und Produktion von MEAs

White Spots

Produkt	1	<ul style="list-style-type: none">▪ Auftreten von Alterungseffekten muss weiterhin reduziert werden▪ Gleichbleibende Alterungsbeständigkeit und Energie- bzw. Leistungsdichte bei Reduktion der Katalysatorbeladung
Werkstoffe	2	<ul style="list-style-type: none">▪ Die benötigten Werkstoffe, insbesondere die PEM, das Ionomer und der Katalysatorwerkstoff für die MEA_{3L}, sind aktuell nur in geringen Mengen, von wenig Anbietern und zu hohen Kosten erhältlich
Fertigungsprozesse	3	<ul style="list-style-type: none">▪ Eine großserientaugliche Prozesskette der MEA_{3L} bis MEA_{7L} existiert zum jetzigen Zeitpunkt nicht▪ Energie- und ressourceneffiziente Produktionslinien mit hoher Qualität existieren derzeit nicht▪ Eine doppelseitige, direkte Beschichtung der Membran ist für hohe Stückzahlen wünschenswert, jedoch marktseitig noch nicht verfügbar
Wertschöpfungskette	4	<ul style="list-style-type: none">▪ Es sind wenige Komplettanbieter mit voller Wertschöpfungstiefe der MEA_{7L} am Markt vertreten. Aufgrund dessen hat sich noch keine großserientaugliche Wertschöpfungskette herausgebildet▪ Aufgrund von Individualisierungsbestrebungen der MEA_{3L}-Fertigung ist eine Aufteilung der MEA_{3L}- und MEA_{7L}-Fertigungslinie möglich



Quellen

Kürzel	Quelle
[ADV22]	https://www.advent.energy/2020/06/03/mea/
[AGC22]	https://www.agc-chemicals.com/file.jsp?id=jp/en/products/pdf/S-series_EN.pdf
[AME22]	https://www.ceimig.co.uk/
[AVC19]	https://www.avcarb.com/electrolyzer/
[BAL20]	https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2020/07/02/ballard-announces-\$7.7m-mea-order-from-synergy-joint-venture-in-china
[CAB18]	https://www.cabotcorp.com/-/media/files/product-datasheets/datasheet-fcx-80.pdf?la=en&rev=25503c1338714f4097f98bd80b39b7cc
[CHE22]	https://www.nafion.de/products
[CMC22]	https://en.cmc.de/page/hydrogen-technology-fuell-cells
[COA08]	https://www.coatema.de/de/presse/fachartikel/150-produktionsanlagen-fuer-brennstoffzellen
[DPS22]	https://www.daposy.com/fuel-cells
[ENY20]	https://eny-mobility.de/en/projects/surface-technology.html
[ERL22]	https://www.elringklinger.de/de/produkte-technologien/elektromobilitaet/brennstoffzellen#produkte
[FCE22]	https://fuelcellsetc.com/products-services/
[FRE22]	https://fuelcellcomponents.freudenberg-pm.com/en
[FUM22]	https://www.fumatech.com/Startseite/Membranen/Brennstoffzelle/Produkte%2bfumapem/index.html
[GOR22]	https://www.gore.com/alt-energy
[GRE22]	https://www.greenery.com/about/history/
[HAI03]	Sossina M Haile, Fuel cell materials and components The Golden Jubilee Issue—Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future, edited by S. Suresh., Acta Materialia, Volume 51, Issue 19, 2003, Pages 5981-6000,

Quellen

Kürzel	Quelle
[HER22]	https://www.hannovermesse.de/produkt/pem-brennstoffzellen-katalysatoren/295699/N1459405
[HOA22]	https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover_messe_2022/obs/Binary/A1174753/RotoMEA%20Machines%20v3.pdf
[HYP22]	http://www.hyplat.com/products/product-overview/#product-overview
[ILL22]	https://www.hannovermesse.de/aussteller/illuming-power/N1482811?editor=visitorView&exhibitor=vma3crv0&tdom-loc=idntrzla&scene-node=7tf31hm6
[ION22]	https://ionomr.com/solutions/hydrogen-fuel-cells-pemfc/
[IPT20]	Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie; 2020
[IPT21]	Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie; 2021
[IRD20]	https://irdfuelcells.com/products/
[JAM16]	James Brian, Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications
[JAM18]	Brian D. James et al: Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update; 2018
[JOH21]	https://matthey.com/documents/161599/165395/JM-Fuel-Cells-Brochure-SCREEN-Final-Oct-2020.pdf/f2976f13-c877-d32b-da3d-3abd58ed6407?t=1651020978152
[KAU22]	Gurbinder Kaur, PEM Fuel Cells, Elsevier, 2022
[KRO22]	https://www.kroenert.de/ueberuns/historie?tx_form_formframework%5Baction%5D=perform&tx_form_formframework%5Bcontroller%5D=FormFrontend&cHash=a8aae9c8f273c48d7fa6895e8272b163
[LEN22]	https://lentatek.com/en/solutions/hydrogen-and-fuel-cell-technologies/proton-exchange-membrane-fuel-cell-pemfc-mea
[MAM18]	https://www.mama-mea.eu/wp-content/uploads/2019/10/D1.2_Review-of-scientific-and-technical-literature-about-liquid-deposition-technologies.pdf
[OPT22]	https://www.optima-packaging.com/de-de/brennstoffzelle

Quellen

Kürzel	Quelle
[PAJ22]	https://pajaritopowder.com/de/
[POW22]	https://ion-power.de/about/
[SAI14]	http://www.sainergytech.com/products/fuel-cell-components
[SCO20]	Scott A. Mauger, Jason R. Pfeilsticker, Min Wang, Samantha Medina, A.C. Yang-Neyerlin, K.C. Neyerlin, Caleb Stetson, Svitlana Pylypenko, Michael Ulsh, Fabrication of high-performance gas-diffusion-electrode based membrane-electrode assemblies, Journal of Power Sources, Volume 450,2020,
[SHI22]	http://www.lcd.co.kr/en/page/product/mea_vacuum.html
[SOL22]	https://www.solvay.com/en/brands/aquivion-ion-conducting-polymers
[THY21]	https://d2zo35mdb530wx.cloudfront.net/_binary/UCPthysenkruppBAISSystemEngineering/bc970302-249b-487b-9788-5ffd99a90403/mea_assembly_DIN-A4_vers03.pdf
[TOR22]	https://www.cf-composites.toray/products/electrode/gdl.html
[TRA22]	https://www.tradeindia.com/fp5515197/Cabot-Carbon-Black-Vulcan-XC72R.html
[TRI22]	https://www.trigona.com/deutsch/leistungen-1/kleinproduktionen/
[UMI19]	https://www.unicore.de/de/presse/news/unicore-eroffnet-neues-werk-fur-die-produktion-von-brennstoffzellenkatalysatoren/
[VIN19]	https://www.vinatech.com/eng/fuel-cell/mea.php
[WAN20]	Fundamentals, Materials, and Machine Learning of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Technology; 2020
[YUA]	https://www.pemteco.com/pfsaionmembrane/membrane-electrode-assembly.html