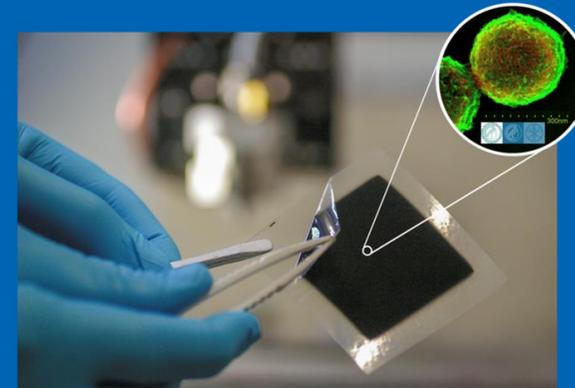


# Hochskalierbare Herstellung von CCM am ZBT

„From Lab to Fab“



05.02.2025 1. ZBT-Wasserstofftage

O. Pasdag

u.a. basierend auf den Projektergebnissen des NRW-Projekts „R2R-CCM“ in Kooperation mit den Partnern Laufenberg GmbH und der UDE

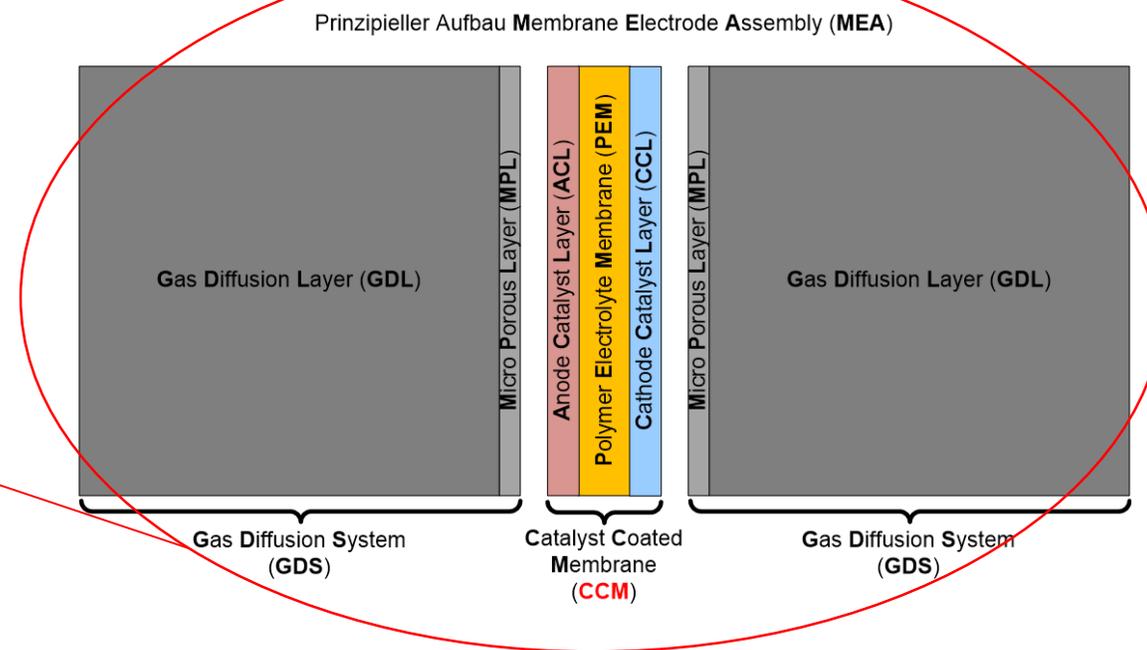
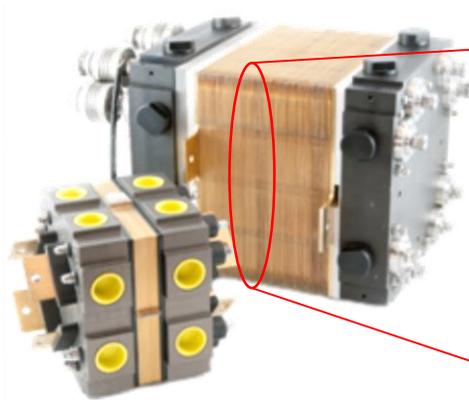


Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen



Quelle: Laufenberg GmbH, Pilotanlage zur CCM Herstellung

- Elektrochemisch aktive Schichten am Beispiel der PEM-Brennstoffzelle
- CCM-Leistungsoptimierung: Die schwarze Kunst...
- Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

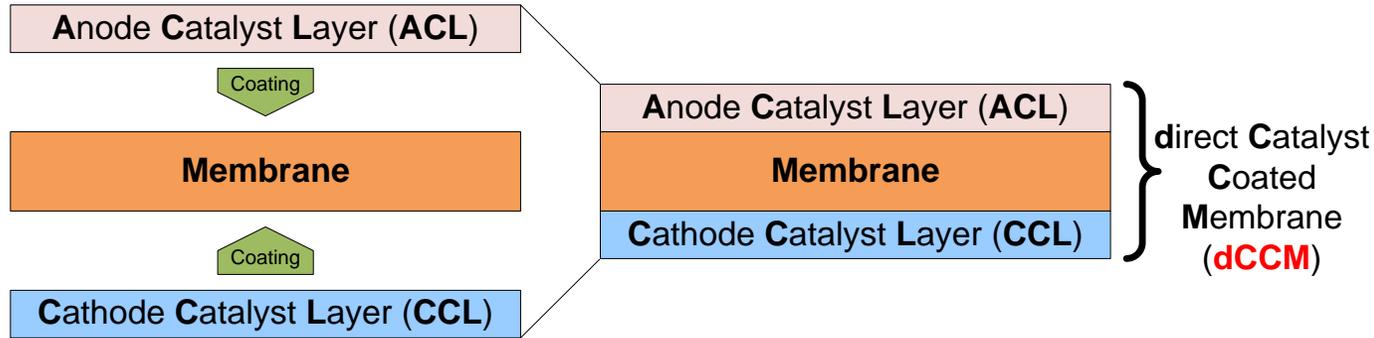


Maßstäbliche Darstellung MEA-Aufbau

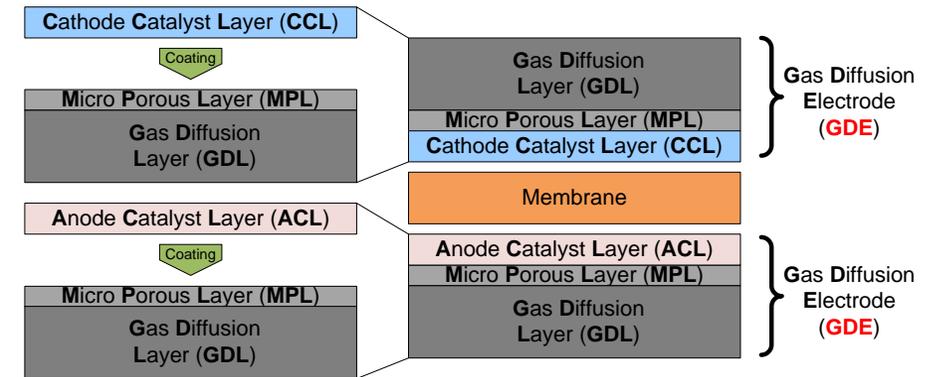
# Elektrochemisch aktive Schichten am Beispiel der PEM-BZ

Drei Grundtypen von MEA: dCCM, dGDE, iCCM (oder Mischformen bei Anode / Kathode)

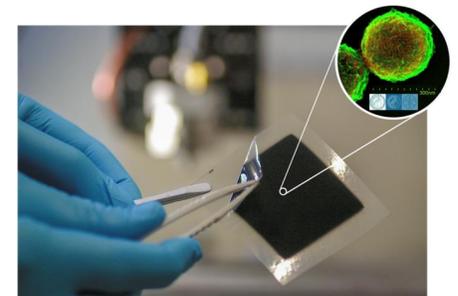
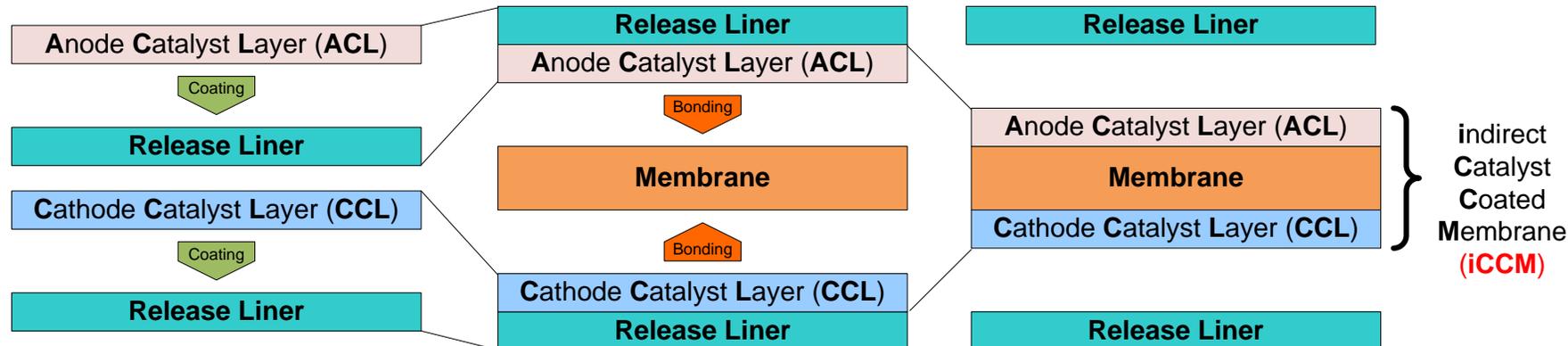
**dCCM** Membran sehr hydrophil, schwierig mit Nassfilm zu beschichten



**dGDE** vielversprechend, aktuell nicht state of the art

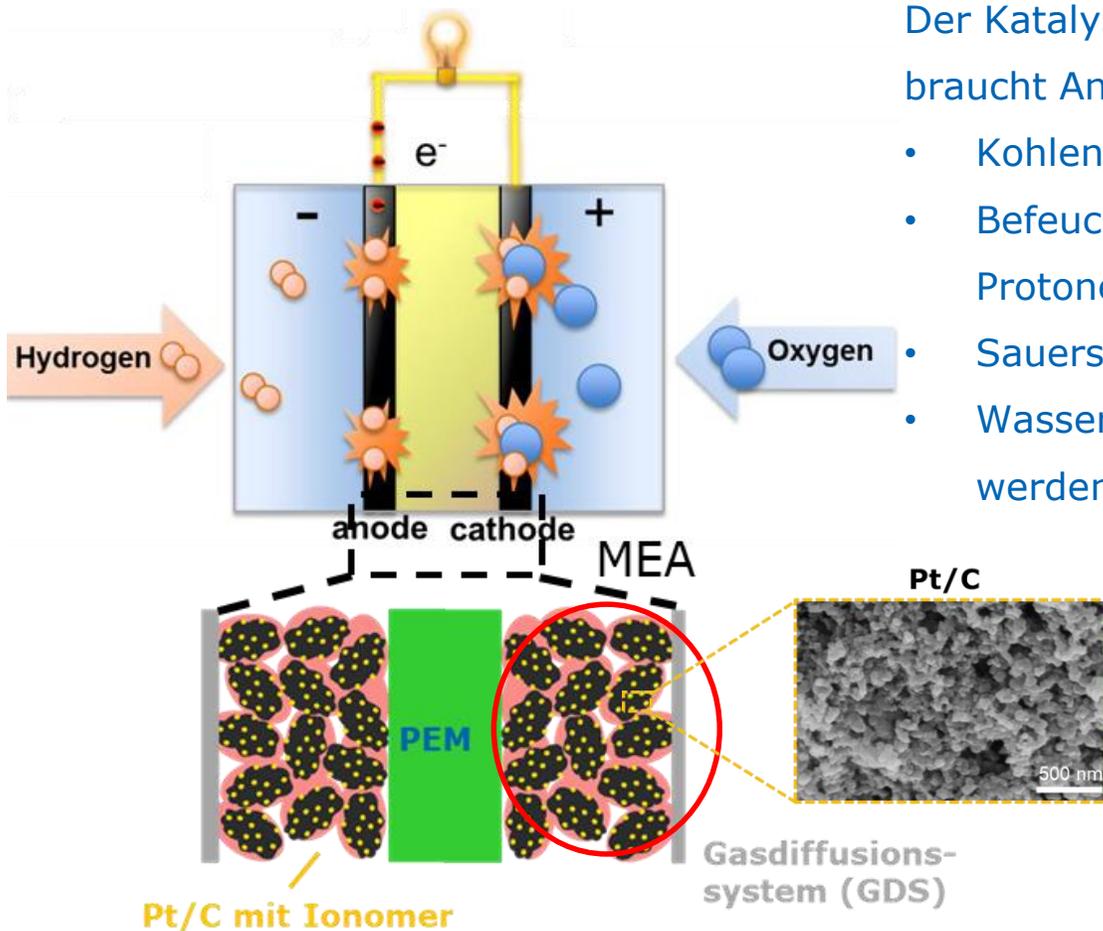


**iCCM** (aufwändig, aber zielführend, state of the art)



# Elektrochemisch aktive Schichten am Beispiel der PEM-BZ

Where the magic happens: Die Dreiphasengrenze



Der Katalysator als Reaktionszentrum braucht Anbindung an

- Kohlenstoff als Elektronenleiter
- Befeuchtetes Ionomer als Protonenleiter
- Sauerstoff als Oxidationsmittel
- Wasserdampf muss abgegeben werden können

Optimale Schichtstruktur (Theorie)

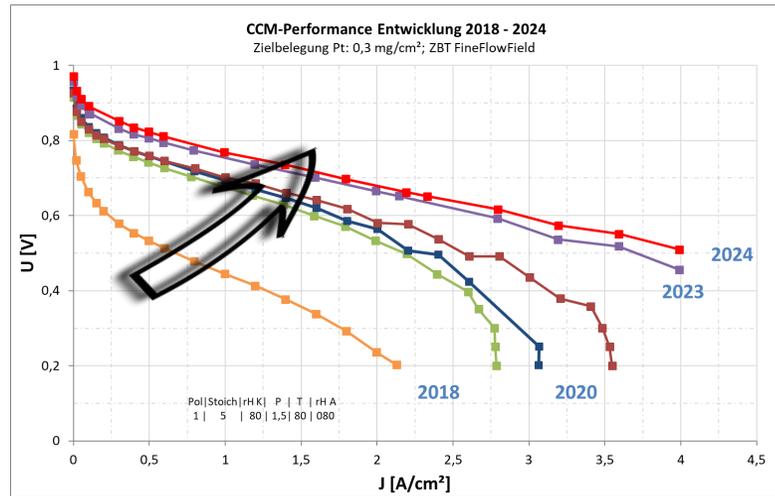
- Viele, gleich-verteilte, erreichbare Platin-Zentren
- Gute Porenstruktur für geringe Diffusionsverluste
- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Hohe protonische Leitfähigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit

Trade-Off als Herausforderung:

- Großer Porenanteil → geringe Diffusionsverluste aber auch geringe Leitfähigkeiten
- Kleiner Porenanteil → hohe Leitfähigkeiten aber hohe Diffusionsverluste → schlechte Pt-Erreichbarkeit

→ Das große Ziel: Eine optimale Poren- bzw. Feststoffverteilung

Die Realität ist zu komplex für eine exakte Modellbildung



## DoE-gestütztes "Try and Error"

- Iterative Optimierung der CCM-Leistungsfähigkeit durch Verknüpfung mit den Herstellungsparametern
- Analyseergebnisse der Zwischenprodukte
- Optimierung von Katalysatorschichten wegen vieler ungeklärter Zusammenhänge in der Dreiphasengrenze immer noch eine „schwarze Kunst“

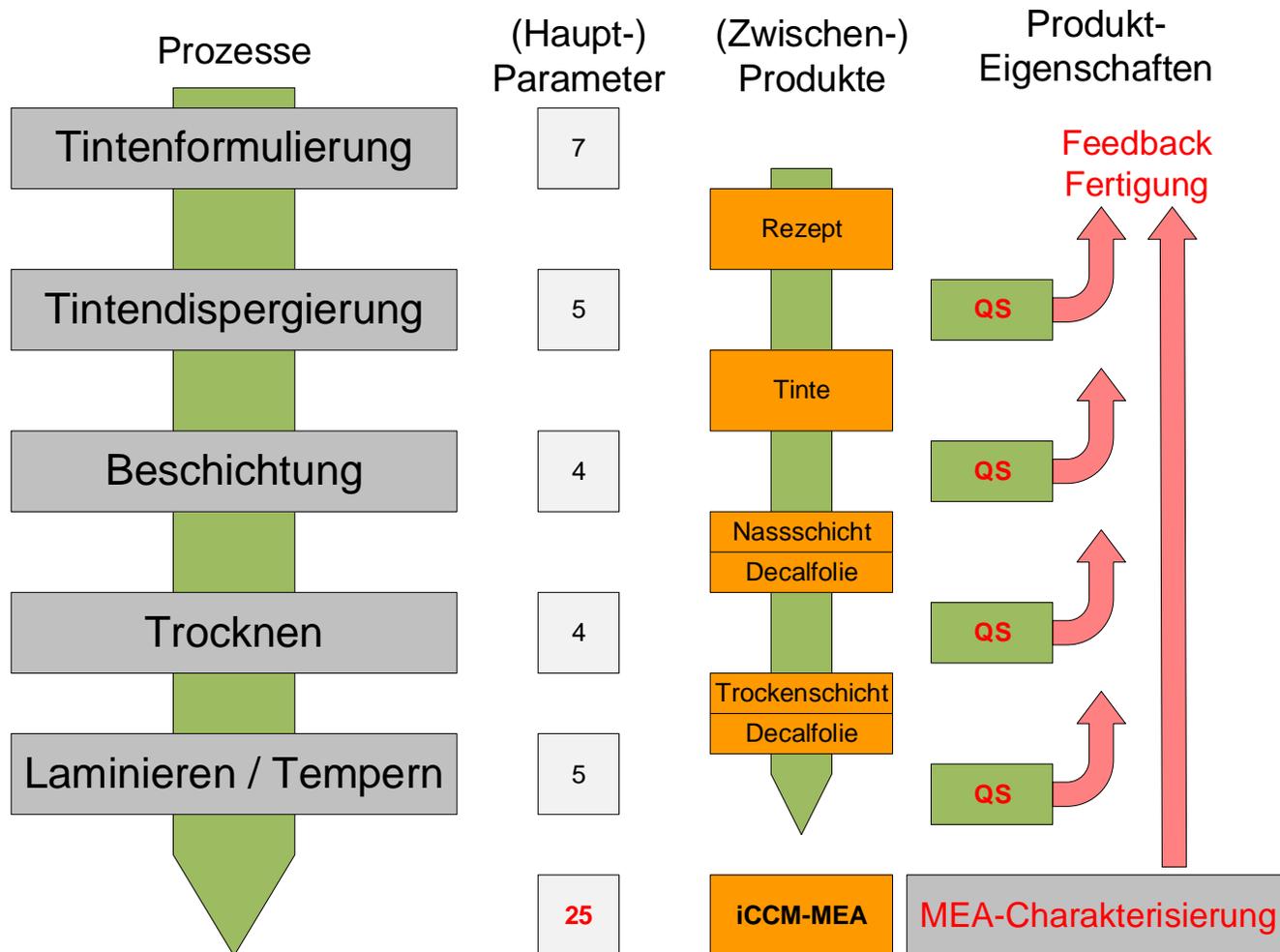
- Die theoretisch optimale Schichtstruktur ist (noch) nicht modellierbar
- „Maßschneidern“ ist mit aktuellen Fertigungsmethoden nicht unmittelbar umsetzbar
- **Forschungsarbeit zur Modellbildung ist ein wichtiger Ansatz zur Leistungsoptimierung!**



www.pixabay.com

# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

## Reproduzierbare Herstellung von hochperformanten CCM mit skalierbaren Laborgeräten



25 Fertigungsparameter in Kombination mit jeweils z.B. drei Variationen ( $3^{25}$ ) → Design of Experiments (DoE) erforderlich!

Mittels DoE und anderen einschränkenden Bedingungen konnte die Anzahl der Versuche auf ca. 200 verschiedene, umsetzbare Fertigungsabläufe reduziert werden.

# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

## Tintenformulierung für stabilen Prozess UND hohe Performance

### Prozessparameter Rezeptur

- Feststoffe
  - Ionomertyp
  - Katalysatortyp
  - Ionomer/Kohlenstoff-Verhältnis
- Lösungsmittel
  - Alkoholtyp
  - Alkohol/Wasser-Verhältnis
- Feststoffanteil
- Reihenfolge Komponentenzugabe



### QS: Produkteigenschaften

- Komponenten wiegen...

# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

Dispergieren und Tintenconditionierung → stabile Tinte

## Prozessparameter Scherkraftdispergierer

- Zeit
- Scherrate
- Glasgeometrie / Kühlung?

## Prozessparameter Tintenconditionierung

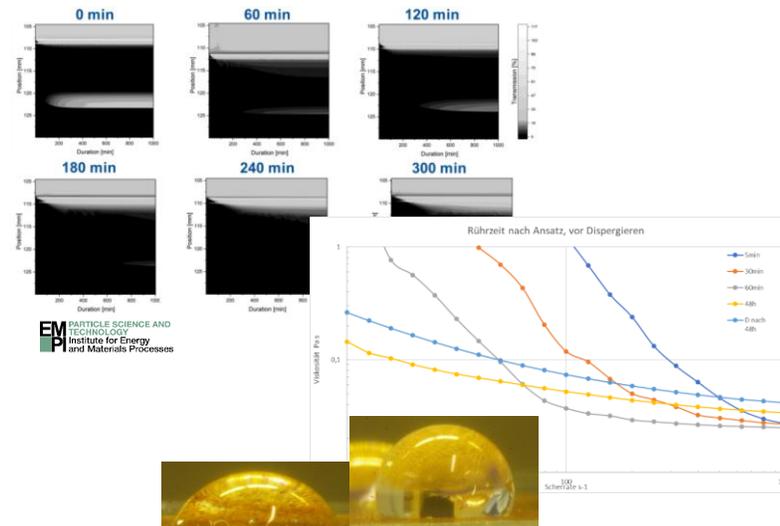
- Rührzeit
- Rührtemperatur

## QS: Produkteigenschaften

- Homogenität → Analytische Zentrifuge
- Viskosität → Rheometer
- Oberflächenenergie / -spannung



Nicht skalierbar:  
Sonotrode



Skalierbar:  
Scherkraftdispergierer



# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

Beschichtung → homogene Nassschicht

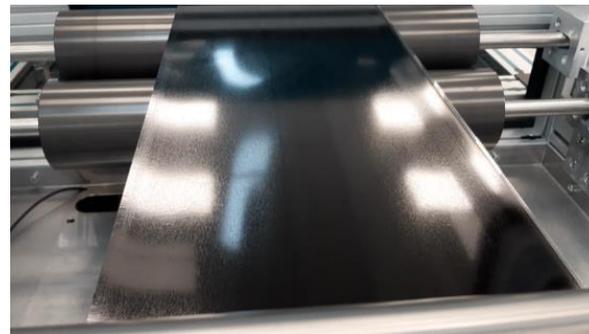
## Prozessparameter Rakelverfahren

- Substrat (Oberflächenenergie, Maschinengängigkeit)
- Rakelspalt
- Tischgeschwindigkeit
- Dosierrate

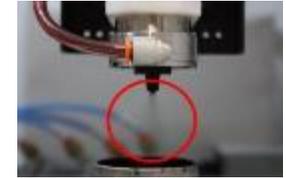
## QS: Produkteigenschaften

- Optische Kontrolle
- Nassfilmdicke

**LAUFENBERG**  
COATED FUEL CELL COMPONENTS



Nicht skalierbar:  
Ultraschallsprühen



Skalierbar: Rakelverfahren, Schlitzdüse



# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

Trocknung → homogene Trockenschicht

## Prozessparameter Durchlauftrockner

- Temperatur
- Volumenstrom
- Bahngeschwindigkeit

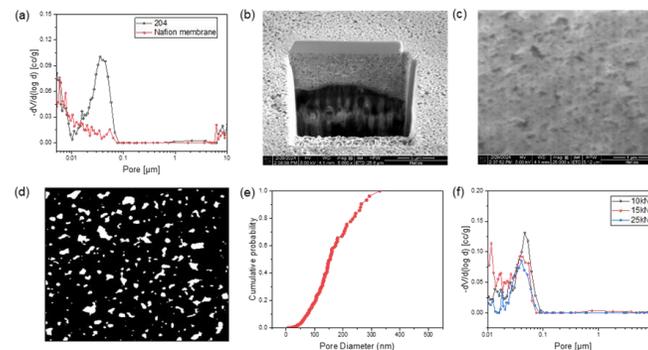
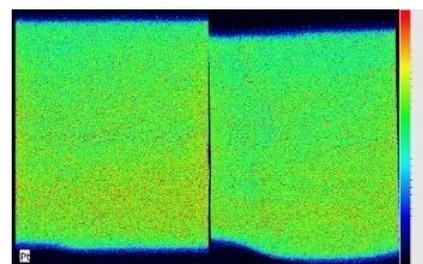
## QS: Produkteigenschaften

- Optische Kontrolle
- Trockenfilmdicke
- Platinbelegung
- Porengrößenverteilung



Nicht R2R-fähig:  
Trockenofen

R2R-fähig:  
Durchlauftrockner



# Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

## Laminieren und Tempern → CCM

### Prozessparameter Heißkalander

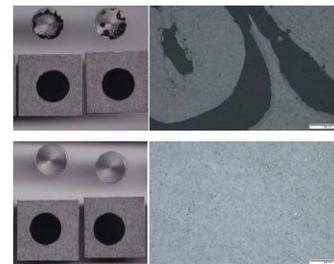
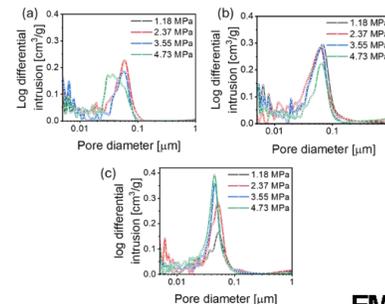
- Temperatur
- Druck
- Bahngeschwindigkeit

### Produktparameter CCM

- Membrantyp
- Anodenschichttyp
- Kathodenschichttyp

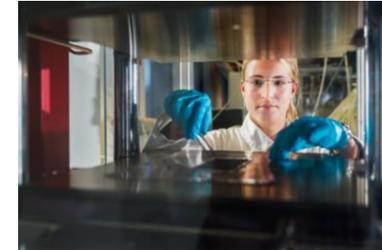
### QS: Produkteigenschaften

- Übertragungsqualität
- Finale Porosität
- Haftschichtfestigkeit



EMPT PARTICLE SCIENCE AND TECHNOLOGY  
Institute for Energy and Materials Processes

Nicht R2R-fähig:  
Heißpresse



[www.vogt-labormaschinen.de](http://www.vogt-labormaschinen.de)

R2R-fähig: Heißkalander



<https://mtixtl.com>

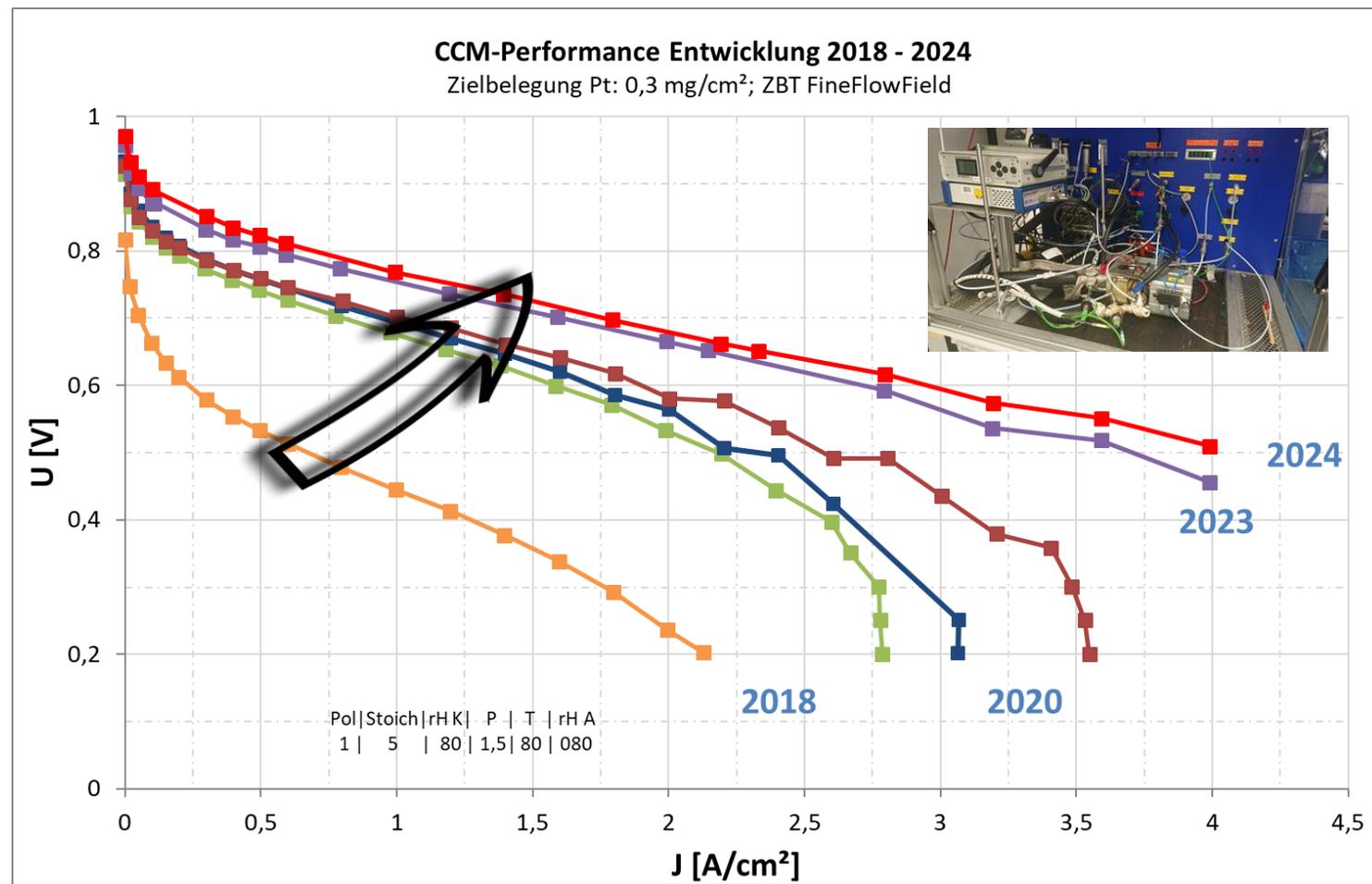
## Performance-Test unter realen BZ-Bedingungen

### Prozessparameter BZ-Test

- GDS-Typ
- Flowfield-Geometrie
- Stöchiometrie
- Temperatur
- Relative Feuchte A+K
- Systemdruck

### QS: Produkteigenschaften

- Polkurven
- EC-Kenngrößen mittels EIS, HFR, CV...



## Hochskalierbare Herstellung von CCM am ZBT

„From lab to fab“

# Thanks for your attention!

05.02.2025

1. ZBT-Wasserstofftage

O. Pasdag