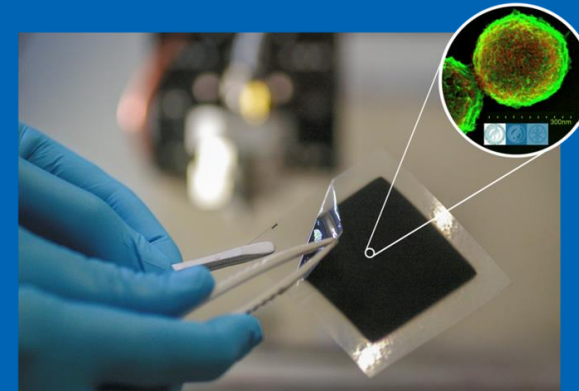


Hochskalierbare Herstellung von CCM am ZBT

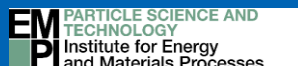
„From Lab to Fab“



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

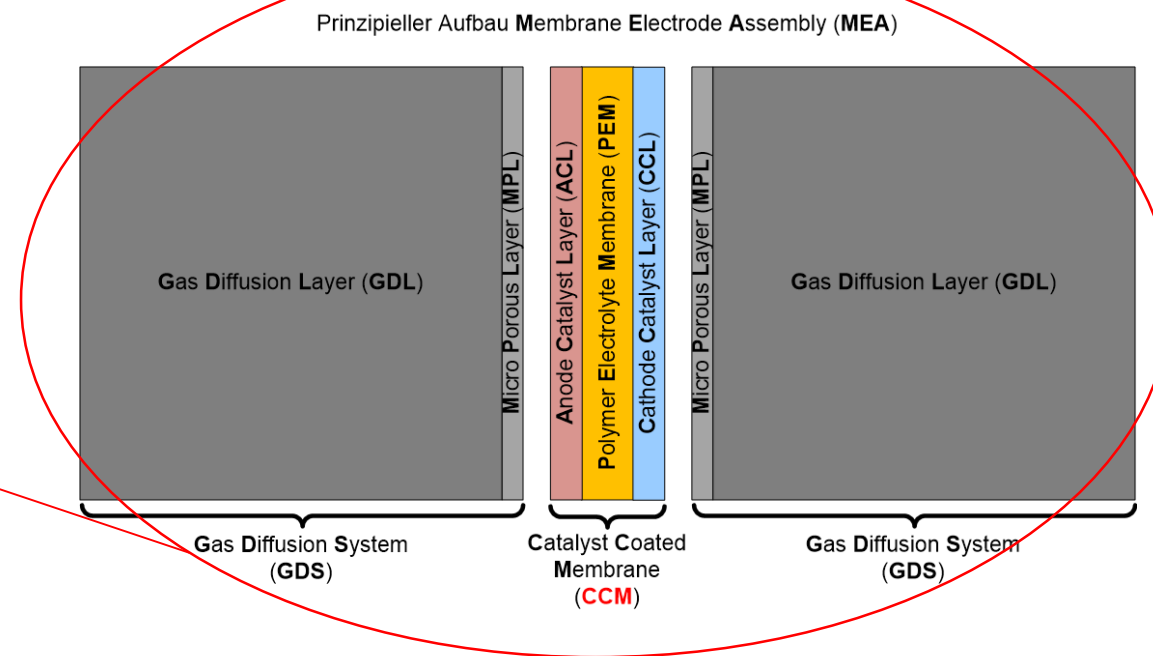
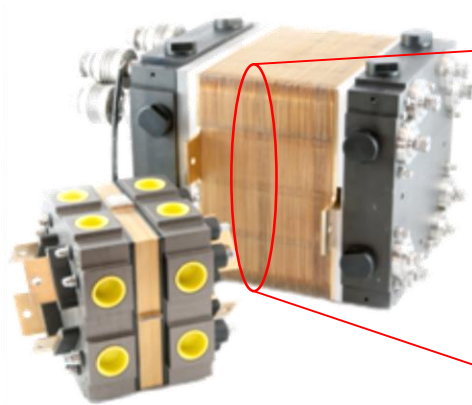


Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen



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

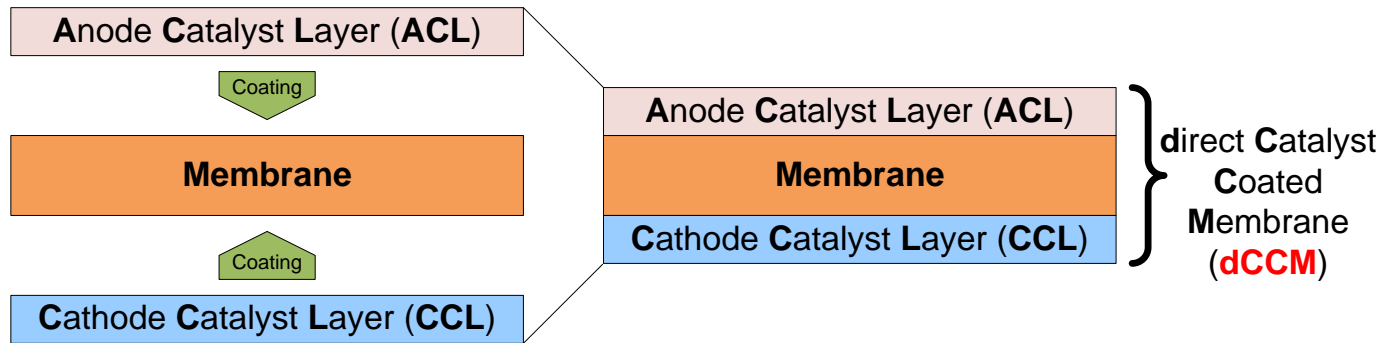


Maßstäbliche Darstellung MEA-Aufbau

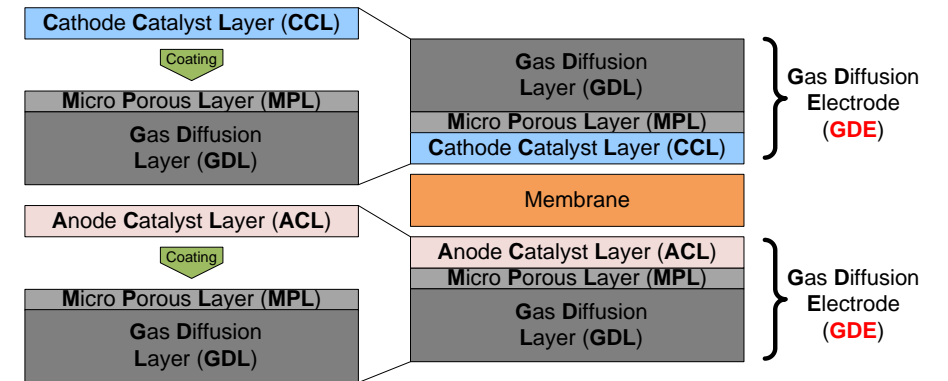
Elektrochemisch aktive Schichten am Beispiel der PEM-BZ

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

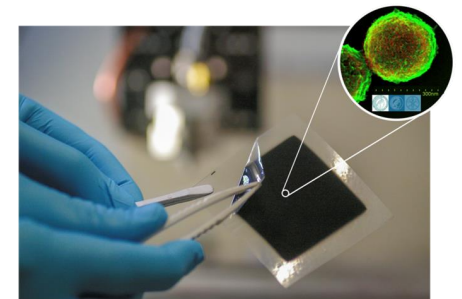
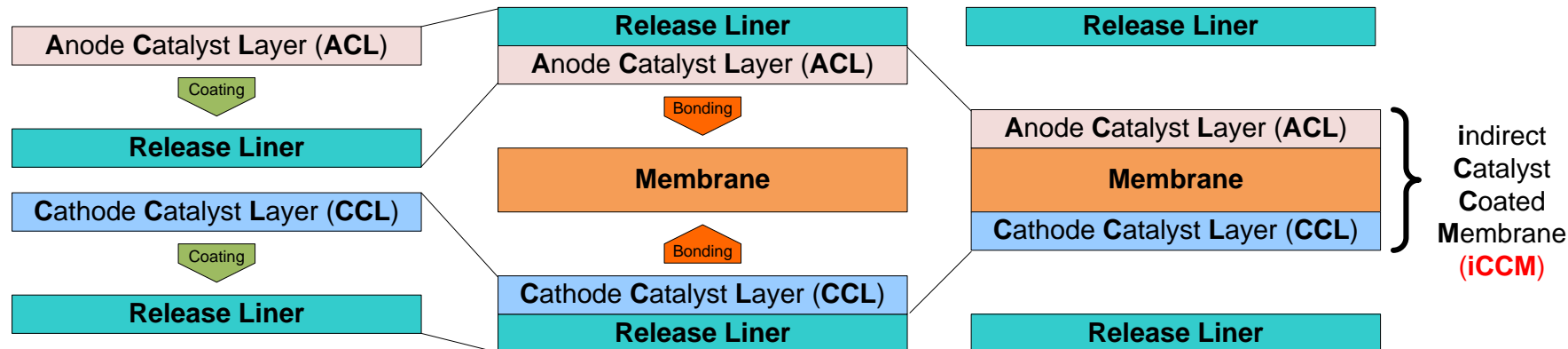
dCCM Membran sehr hydrophil, schwierig mit Nassfilm zu beschichten



dGDE vielversprechend, aktuell nicht state of the art

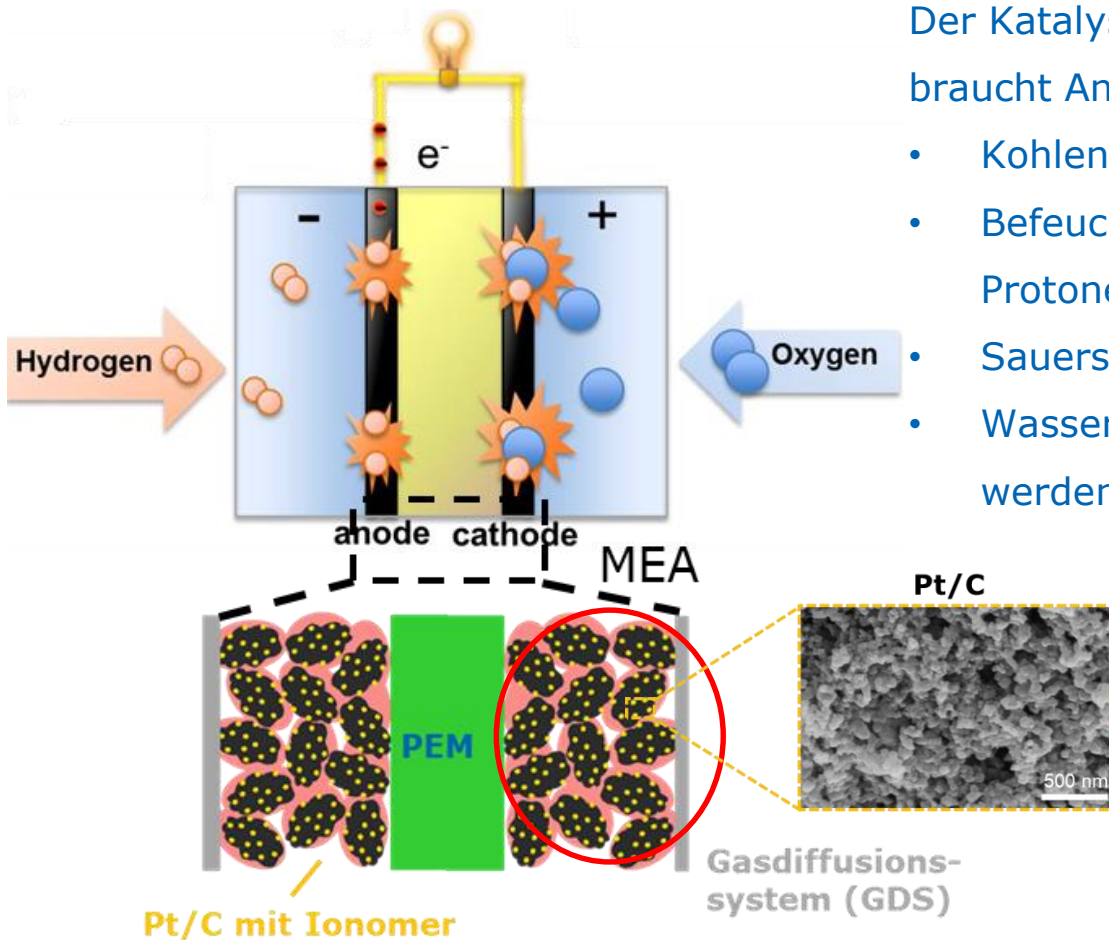


iCCM (aufwändig, aber zielführend, state of the art)



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)

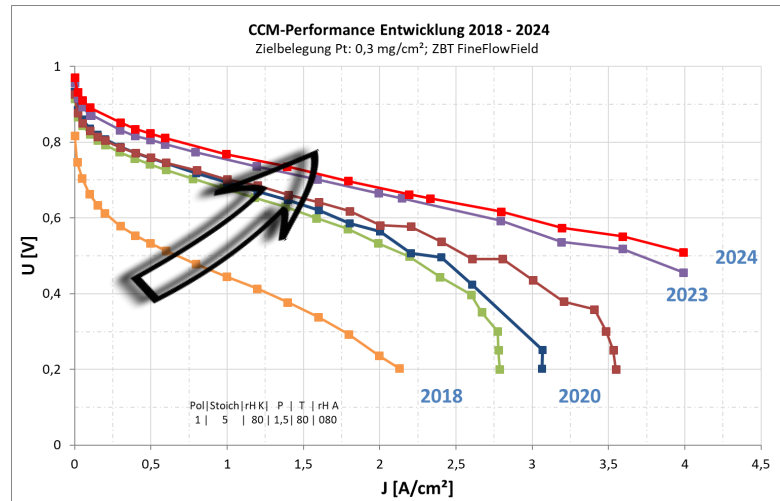
- Viele, gleich-verteilte, erreichbare Platin-Zentren
- Gute Porenstruktur für geringe Diffusionsverluste
- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Hohe protonische Leitfähigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit

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“

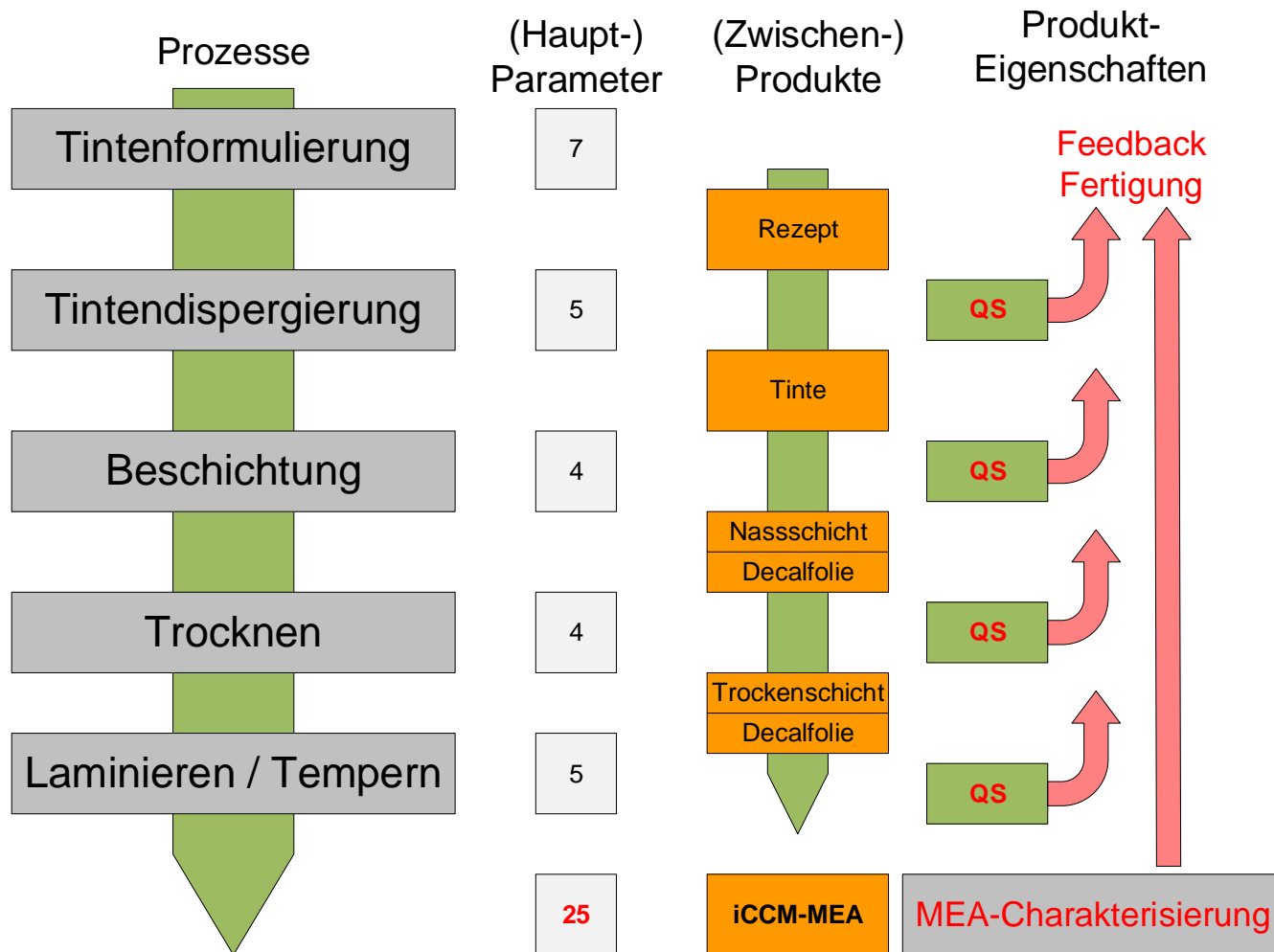
- Die theoretisch optimale Schichtstruktur ist (noch) nicht modellierbar
- „Maßschneidern“ ist mit aktuellen Fertigungsmethoden nicht unmittelbar umsetzbar
- **Forschungsarbeit zur Modellbildung ist ein wichtiger Ansatz zur Leistungsoptimierung!**



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!

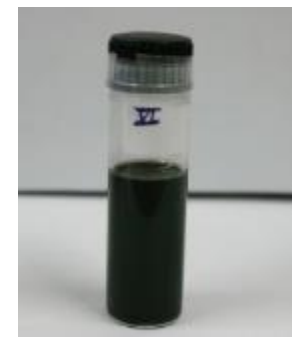
Mittels DoE und anderen einschränkenden Bedingungen konnte die Anzahl der Versuche auf ca. 200 verschiedene, umsetzbare Fertigungsabläufe reduziert werden.

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

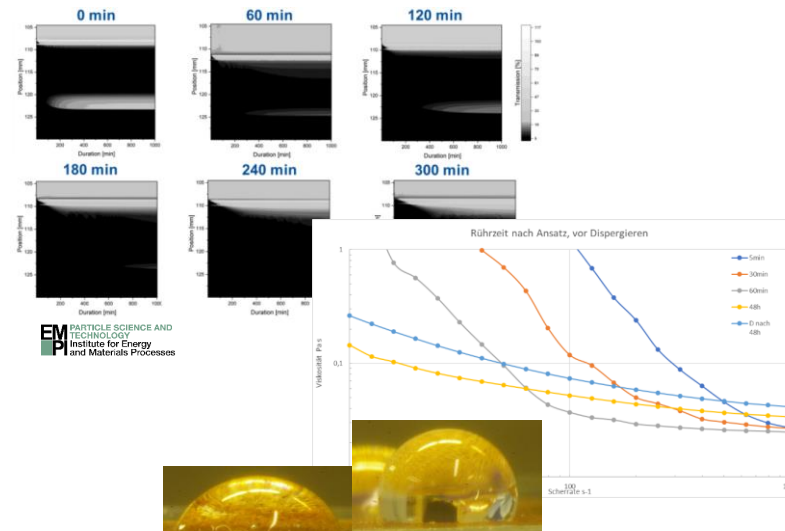
- Rührzeit
- Rührtemperatur

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

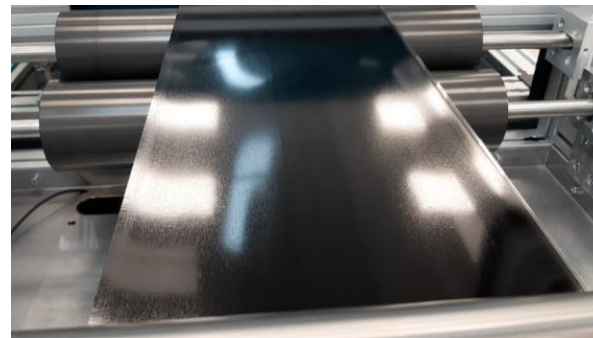
Prozessparameter Rakelverfahren

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

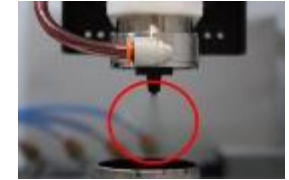
QS: Produkteigenschaften

- 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 Durchluftrockner

- Temperatur
- Volumenstrom
- Bahngeschwindigkeit

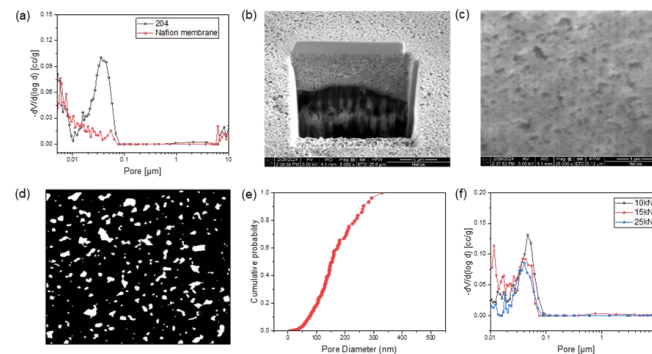
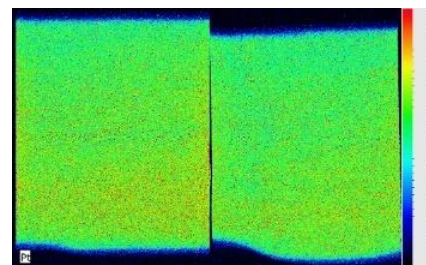
QS: Produkteigenschaften

- Optische Kontrolle
- Trockenfilmdicke
- Platinbelegung
- Porengrößenverteilung



Nicht R2R-fähig:
Trockenofen

R2R-fähig:
Durchluftrockner



Fertigung im Detail: iCCM from Lab to Fab

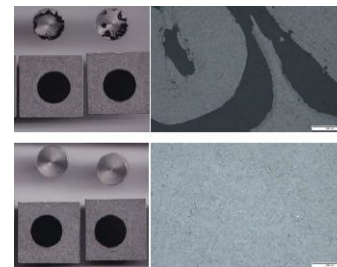
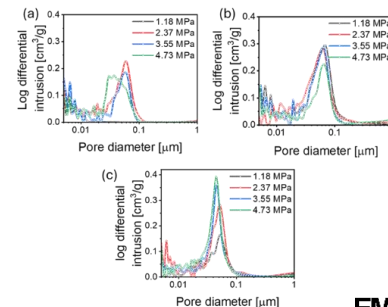
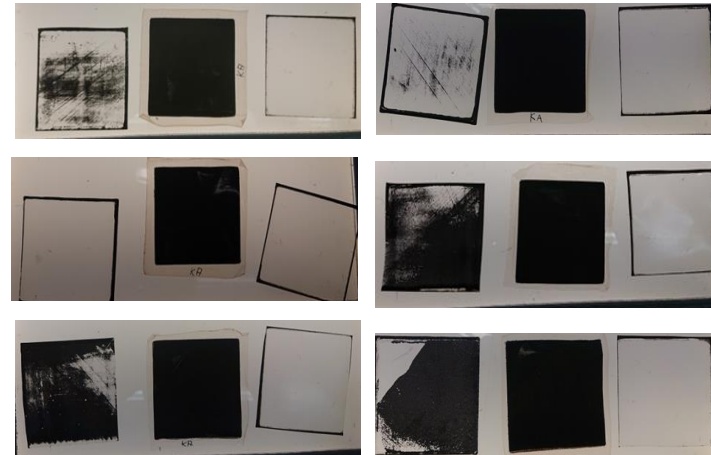
Laminieren und Tempern → CCM

Prozessparameter Heißkalander

- Temperatur
- Druck
- Bahngeschwindigkeit

Produktparameter CCM

- Membrantyp
- Anodenschichttyp
- Kathodenschichttyp



EM PARTICLE SCIENCE AND TECHNOLOGY
 Institute for Energy and Materials Processes

Nicht R2R-fähig:
 Heißpresse



www.vogt-labormaschinen.de

R2R-fähig: Heißkalander



<https://mtixtl.com>

QS: Produkteigenschaften

- Übertragungsqualität
- Finale Porosität
- Haftschichtfestigkeit

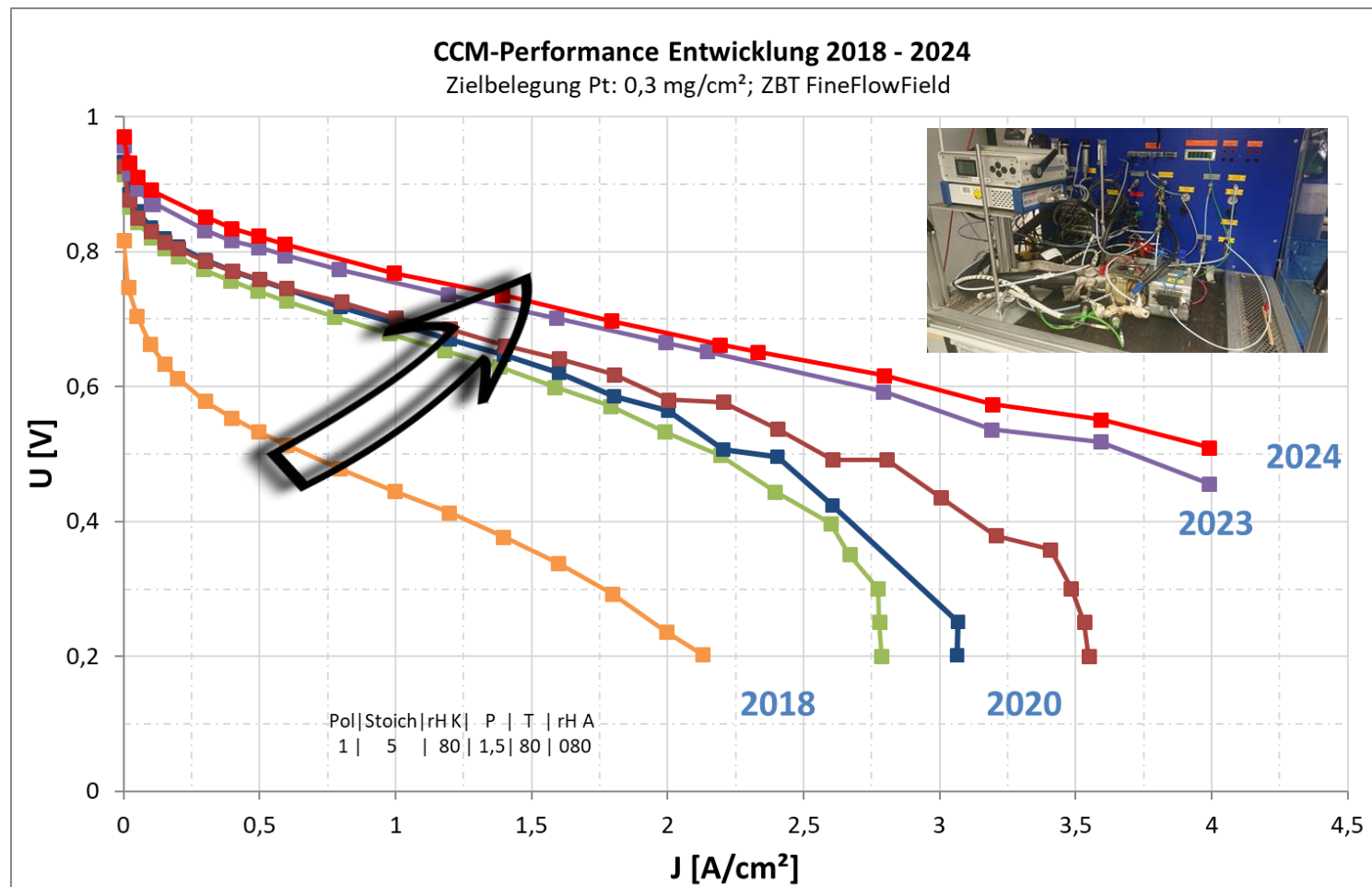
Performance-Test unter realen BZ-Bedingungen

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