

Abschlussbericht zum Verbundprojekt FCPP

Zuwendungsempfänger: Laufenberg	Förderkennzeichen: 03EN5013D
Autor: Dr. Sebastian Kohsakowski	
Vorhabenbezeichnung: FCPP – Fuel Cell Performance Production Teilvorhaben: Entwicklung von innovativen CCMs hergestellt mittels primotypischer Beschichtungsanlage sowie der Benchmark mit einer bei Laufenberg hergestellten Referenz-CCM	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 - 30.06.2025	

1. Aufgabenstellung

Die Kernherausforderungen, welche die Marktdurchdringung von Brennstoffzellen hemmen, sind deren Lebensdauer sowie die hohen Kosten über den gesamten Lebenszyklus. Diese werden bisher maßgeblich durch die Herstellkosten bestimmt und sind auf kostspielige und nicht für die Massenproduktion entwickelte Fertigungstechnologien zurückzuführen¹. Ein wesentlicher Kostentreiber ist der Beschichtungsprozess der Polymerelektrolytmembran mit der Kathode und Anode, da diese in der Großserienproduktion ausschließlich unter Zuhilfenahme eines Supportmaterials beschichtet werden kann (Decal-Methode). Bei der Decal-Methode wird der für die Gesamtreaktion der Brennstoffzelle notwendige Katalysator (i.d.R. Platin bzw. Platinlegierungen) zunächst auf eine Teflon-Folie – auch „Decal-Folie“ genannt – aufgebracht und anschließend per Heißpressverfahren auf die Polymerelektrolytmembran übertragen. Eine direkte Beschichtung der Polymerelektrolytmembran ist nur bedingt möglich, da diese bei Kontakt mit der noch feuchten Katalysatorfarbe beschädigt werden kann. Die Verwendung der Decal-Folie als Supportmaterial ist nicht wertschöpfend und verursacht Kosten-, Anlagen- sowie Materialaufwände, die vermieden werden können². Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde die Decal-Methode zugunsten einer kostengünstigeren und ressourceneffizienteren Produktion durch ein Inline-Beschichtungsverfahren substituiert. Für produzierende Unternehmen bedeutet die Umsetzung des Forschungsprojektes eine Verringerung des Materialeinsatzes, ein geringeres gebundenes Kapital sowie eine Reduktion der Prozesszeit. Hauptanforderung des Vorhabens war die Reduktion der CCM-Produktionskosten bei gleichbleibender Performance sowie Lebensdauer der Brennstoffzelle. Die Innovation des Inline-Beschichtungsverfahrens liegt in der Beschichtungstechnologie selbst. Der Übertrag des Katalysators erfolgt anstelle der Decal-Folie über ein mit Teflon beschichtetes Transportband. Vom Materialauftrag auf das Transportband bis hin zum Übertrag auf die Membran

¹ Töpler, J.; Lehmann, J.: Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

² Bonadies et al.: Manufacturing Fuel Cell Manhattan Project. Philadelphia, 2011.

wird die feuchte Katalysatortinte auf einen Trocknungsgrad gebracht, der eine beschädigungsfreie Beschichtung der Membran ermöglicht. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte zunächst die Entwicklung und der prototypische Aufbau der notwendigen Anlagentechnologie, welche im Anschluss durch die Erprobung einzeln montierter Brennstoffzellen validiert wurde. Hierzu wurden zunächst kleine Mengen CCMs auf der neu entwickelten Anlage produziert und zu prototypischen Einzelzellen montiert, während im Anschluss eine Prüfung auf Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad und Lebensdauer erfolgte. Die Erforschung der robusten, produktionsoptimierten Stackhardware, insbesondere der metallischen Bipolarplatten erfolgt (bei den Projektpartnern) dabei in enger Abstimmung mit der Entwicklung der direktbeschichteten CCM. Schwerpunkte liegen dabei auf der Erforschung robuster Substratmaterialien und Beschichtungen und deren Anforderungen an die Fertigungsprozesse der Bipolarplatten, sowie alliierten Toleranzbetrachtungen hinsichtlich Geometrie und Positionierung der Einzelkomponenten und der Analyse der Auswirkungen der resultierenden Toleranzen auf Performance und Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks.

Schließlich ist ein mit konventionell hergestellten Stacks vergleichbares Produkt zu erwarten.

Die übergeordneten Projektziele (Ziele von Laufenberg in orange markiert) lauteten:

- Entwicklung einer innovativen Beschichtungsmethodik zur Inline-Beschichtung von Polymerelektrolytmembranen
- Aufbau einer kostengünstigen Produktionslinie für die Herstellung von CCM, Einzelzelle und Brennstoffzellenstack
- Erforschung von produktionsoptimierten, robusten Bipolarplatten- und Stackdesigns
- Erforschung von robusten Substratmaterialien und Beschichtungen für metallische Bi-polarplatten und deren fertigungstechnischen Anforderungen
- Erforschung von Komponenten- und Positioniertoleranzen und deren Auswirkungen auf Performance und Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks
- Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung von MEAs, Einzelzellen & Shortstacks auf Leistungsfähigkeit und Alterung
- Entwicklung eines vollautomatischen Prozesses zur schnellen Charakterisierung des Alterungsverhaltens von Brennstoffzellen mit Hilfe von beschleunigten Alterungstests
- Auslegung und Qualifizierung der Systemkomponenten hinsichtlich Performance und Lebensdauer sowie anschließende Implementierung des Brennstoffzellenstacks in einen Stackprüfstand mit den Systemkomponenten
- Modellbildung der Degradation
- On-board Zustandserfassung des Alterungsverhaltens und Lebensdauerprognose

2. Wissenschaftlich-technischer Stand

Produktionsprozess von Brennstoffzellen

Die notwendigen Produktionsschritte zur Herstellung von Brennstoffzellen und -stacks sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Prozesskette beinhaltet im Wesentlichen eine Kombination aus Beschichtungs-, Wärmebehandlungs-, Umform-, Prüf- und Montageschritten. Aufgrund der Forschungsschwerpunkte des Projekts wird im Folgenden insbesondere auf die Produktionskette der CCM eingegangen.

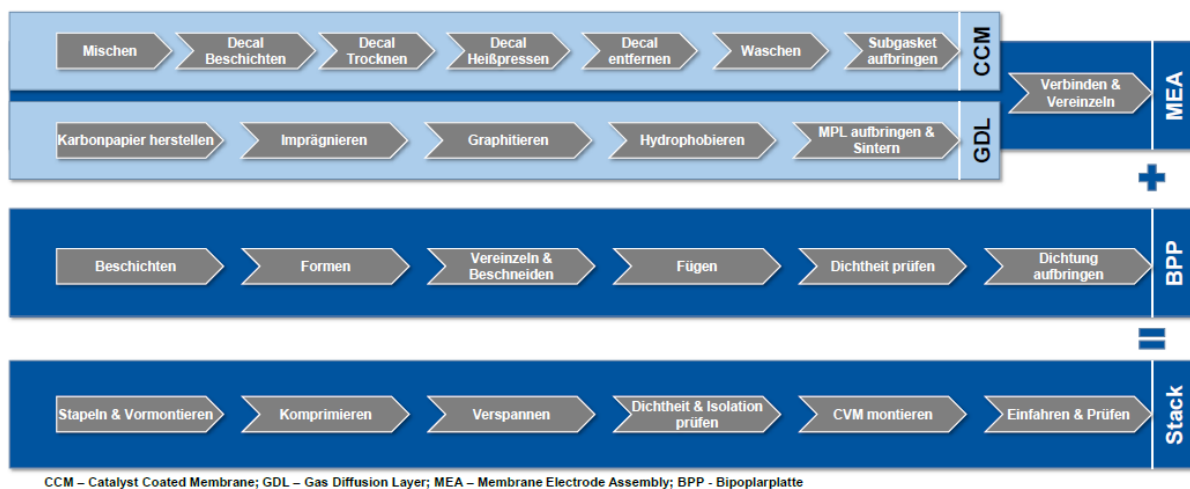


Abbildung 1: Prozesskette zur Herstellung eines Brennstoffzellenstacks

Produktion der CCM

Bei der Herstellung der CCM werden die folgenden Prozessschritte (siehe Abbildung 3.1) durchlaufen: 1.) Katalysatorfarbe mischen, 2.) Decal beschichten, 3.) Decal trocknen, 4.) Heißpressen und 5.) Decal entfernen. Die Herstellung der Katalysatorfarbe, bestehend aus Katalysator (meist Platin-Ruthenium [Anode] und Platin-Kobalt [Kathode]), Ionomer (z.B. PFSI), hydrophobischen Mitteln und bestimmten Lösemitteln (z.B. Wasser oder Glycerin), stellt den ersten Schritt der Herstellung einer CCM dar³. Neben der Zusammensetzung der Farbe spielen im Produktionsprozess Gleichmäßigkeit und Viskosität eine maßgebliche Rolle. Die Katalysatorfarbe wird verrührt oder ultraschalldispargiert, um einen einheitlichen Kontakt der Katalysatorpartikel im Nanobereich mit den anderen Komponenten zu gewährleisten. Im Falle einer zu geringen Viskosität ist die Farbe aufgrund ihrer Flüchtigkeit nicht handhabbar, während eine zu hohe Viskosität eine ungleichmäßige Dispersion und ein erschwertes Trocknen verursacht. Wird sich im Rahmen des Auftragsverfahrens für die Decal-Methode

³ Wheeler, D.; Sverdrup, G.: Status of Manufacturing: Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells. Colorado, 2007.

entschieden, wird eine hydrophile Lösung verwendet. Dies bedeutet, dass ein hydrophiles Perfluorosulfonat-Ionomer (PFSI, z.B. Nafion) als Bindemittel verwendet wird. Dessen adäquate Verwendung innerhalb der Katalysatorfarbe stellt schließlich eine maximale Protonenleitfähigkeit sicher und erhöht so-mit die Performance der Brennstoffzelle. Die Beschichtung der Decal-Folie kann im zweiten Schritt unter Verwendung unterschiedlicher Beschichtungstechnologien erfolgen. Zur Verfügung stehen an dieser Stelle zum Beispiel das Auftragen per Schlitzdüse oder per Rakel. Diese Verfahren zeichnen sich besonders durch ihre geringen Kosten und eine einfache Handhabbarkeit aus. Auf diese Weise wird die Katalysatorfarbe mit einer Schichtdicke von 10-20 µm auf die Decal-Folie übertragen. Im Anschluss erfolgt beispielsweise unter Zuhilfenahme eines Konvektionsofens die Trocknung des Substrates. Das im Substrat verwendete Glycerol hindert die Decal-Folie dabei während des Prozesses an einer spontanen Verbrennung. Unter Zuhilfenahme weiterer chemischer Komponenten kann bei einer Trocknungstemperatur von bis zu 200 °C zerstörungsfrei gefertigt werden⁴.

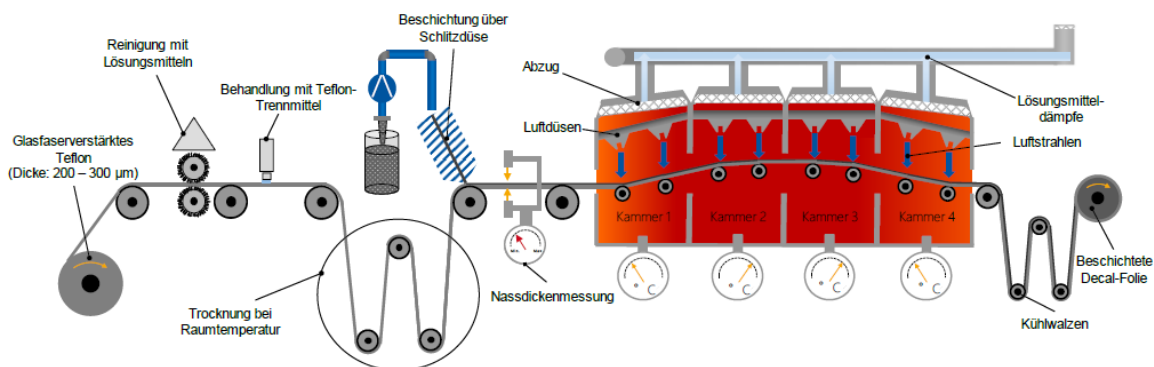


Abbildung 2: CCM-Produktion – Beschichtung und Trocknung der Decal-Folie.

Ist die Trocknung abgeschlossen und die Decal-Folie beschichtet (siehe Abbildung 2), wird die beschichtete Decal-Folie im Rahmen eines Heißpressvorgangs auf die unbeschichtete Polymermembran (z.B. Nafion) gebracht und der Katalysator auf diese übertragen. Darauffolgend wird die Decal-Folie abgezogen und die CCM ist fertiggestellt.

Testing von Brennstoffzellenstacks/Brennstoffzellen

Die Untersuchung der Performance und Lebensdauer von Brennstoffzellenstacks ist sowohl für die Erforschung einer optimalen Betriebsstrategie des Brennstoffzellensystems als auch des

⁴ Frölich, K.: Der Decal-Prozess zur Herstellung katalysatorbeschichteter Membranen für PEM-Brennstoffzellen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2015.

Hybridsystems (mit Batterie) in der jeweiligen Fahrzeuganwendung von besonderem Interesse. Beispielsweise wirkt sich die Beschaffenheit des Fahrprofils im Betrieb auf die Strom-dichte und die Häufigkeit von Lastzyklen aus und hat somit einen erheblichen Einfluss auf die Beanspruchung und Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks. Die Erhöhung der Lebensdauer steht außerdem in direkter Konkurrenz zu notwendigen Maßnahmen zur Kostenreduzierung. Um die Brennstoffzelle auf dem Energiemarkt konkurrenzfähiger zu machen, haben aktuelle Untersuchungen zum Ziel, sowohl Investitions- (z.B. Reduzierung des Katalysatorgehalts auf der CCM) als auch Betriebskosten (z.B. Betrieb bei extremeren Betriebsbedingungen) zu reduzieren. Problematisch ist hierbei allerdings die damit verbundene geringere Lebensdauer der Brennstoffzelle, was sich wiederum negativ auf deren Wirtschaftlichkeit auswirkt. Die Alterung der Brennstoffzelle macht sich dadurch bemerkbar, dass mit zunehmender Betriebszeit in den einzelnen Zellen des Stacks sowohl reversible als auch irreversible Spannungsverluste auftreten, welche zu einem fortschreitenden Leistungsverlust führen. Die irreversiblen Spannungsverluste lassen sich primär auf Degradationsmechanismen innerhalb der Membran und der Katalysatorschicht zurückführen und sind stark abhängig von den Betriebsbedingungen sowie dem Produktionsprozess und damit einhergehenden möglichen Vorschäden. Reversible Spannungsverluste treten über die Zeit in der Regel in Folge eines nicht optimalen Wasser-managements sowie einer Kontamination und Oxidation des Katalysators auf. Um den not-wendigen Leistungsbedarf für das jeweilige Fahrprofil des Brennstoffzellenfahrzeugs bereitstellen zu können, wird typischerweise ein Lebensende des Brennstoffzellenstacks definiert.

In der Regel beschreibt jener Zeitpunkt das Lebensende des Brennstoffzellenstacks, zu dem im Auslegungspunkt nur noch 90% der Leistung im Vergleich zum Lebensbeginn zur Verfügung stehen. Um die geforderte Lebensdauer zu erreichen, ist daher eine zulässige mittlere Degradationsrate (in $\mu\text{V}/\text{h}$) des Brennstoffzellenstacks zu ermitteln. Besonders der transiente Betrieb (Start-/Stopp-Prozeduren) sowie die Zyklisierung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit (hygrothermische Zyklen) wirken sich deutlich auf die Degradationsrate und Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks aus. Außerdem können mögliche Unterversorgungen von kritischen Zellbereichen mit Reaktanden diesbezüglich einen negativen Effekt haben.

Um die Degradation der Brennstoffzelle zu untersuchen, werden typischerweise Einzelzellen geringer aktiver Fläche und/oder Stacks geringer Zellzahl mit synthetischen Lastprofilen oder Stresstests betrieben, welche die Alterung beschleunigen (AST – Accelerated Stress Test). Die im Fahrzeugbetrieb auftretende Dynamik, sowie die bestehenden Gradienten der Temperatur, der relativen Feuchtigkeit sowie der Konzentration der Reaktanden werden hierdurch nicht ausreichend abgebildet. Die ermittelte Degradationsrate und Lebensdauer sind daher nur bedingt auf den Anwendungsfall des

Brennstoffzellenfahrzeugs übertragbar. Es ist daher künftig unabdingbar, geeignete ASTs zu entwerfen, welche einerseits die kontrollierte Alterung bestimmter Komponenten beschleunigen, um auf diese Weise Testzeit und damit Entwicklungskosten zu sparen. Andererseits müssen diese Tests gleichzeitig in ihrer Repräsentativität validiert werden, um dennoch eine zuverlässige Aussage über die Lebensdauer einer Brennstoffzelle treffen zu können.

Modellbildung der Degradation, Betriebsstrategie und Lebensdauerprognose

Bis dato existieren verschiedene semi-empirische und physikalisch motivierte Modellierungsansätze, um die Alterung der Komponenten des Brennstoffzellenstacks in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen (u.a. Spannung, Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Stöchiometrie) und der Strukturparameter (u.a. Katalysatorbeladung, Dicke der Katalysatorschicht, Porositäten, Tortuositäten, Dicke/Äquivalenzgewicht der Membran) simulieren zu können. Jedoch werden häufig entweder stark vereinfachte Modelle verwendet, welche die Gradienten bezüglich der Temperatur, relativen Feuchtigkeit und Konzentration entlang der Strömungskanäle nicht ausreichend berücksichtigen, oder detaillierte Modelle, welche häufig lediglich die Alterung einer bestimmten Zellkomponente betrachten. Eine Herausforderung besteht darin, dass zwischen den Degradationsmechanismen der Zellkomponenten eine komplexe Wechselbeziehung besteht. Die Fehlerdiagnose und Lebensdauerprognose erfordert jedoch einen Ansatz mit einem reduzierten und dennoch präzisen Degradationsmodell, welches langfristig on-board implementiert und durch regelmäßige Zustandserfassung aktualisiert werden kann. Ein Degradationsmodell, welches eine on-board Fehlerdiagnose und Lebensdauerprognose sowie die Optimierung der Betriebsstrategie von Brennstoffzellensystemen unterstützen kann, existiert nach aktuellem Kenntnisstand nicht.

3. Zusammenarbeit der Partner

Die Zusammenarbeit des Projekts ist in der Abbildung 3 dargestellt und zusammengefasst. Dabei war das Projekt in 9 Arbeitspakete aufgeteilt. Laufenberg war vor allem eng verbunden mit dem Projektpartner PEM sowie den assoziierten Partner Olbrich (Dispensionsentwicklung, Anlagen Entwicklung du Erfahrungsaustausch und MEA-Fertigung bzw. CCM-Testung). Diese Arbeiten wurden in den Arbeitspaketen 1, 2 und 3 bearbeitet.

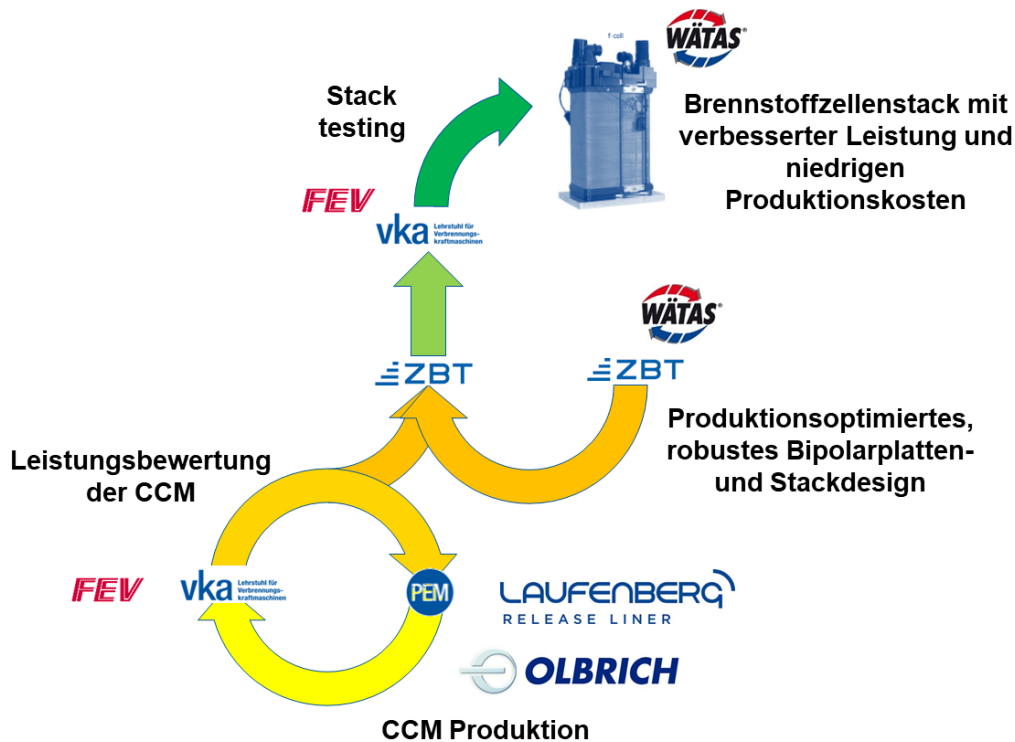


Abbildung 3: Darstellung der Projektablaufstruktur und Zusammenarbeit der Partner.

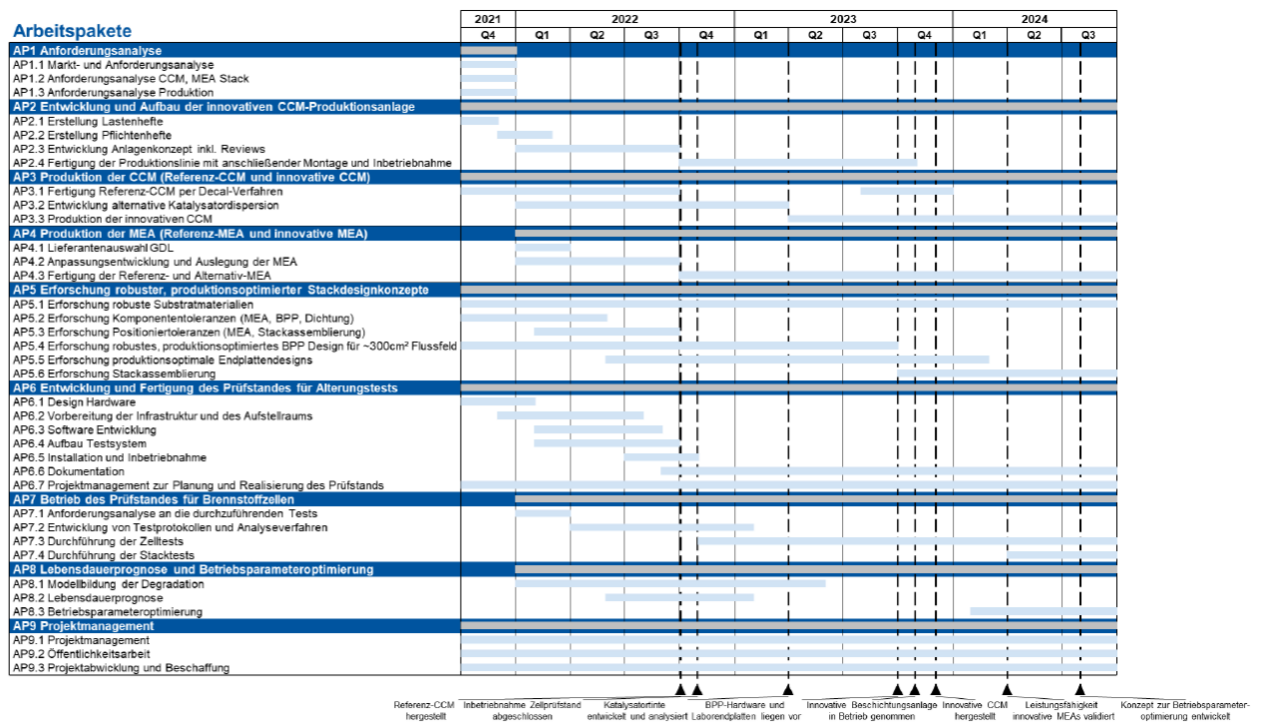


Abbildung 4: Zeit und Arbeitsplan

4. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten

Die erzielten Ergebnisse und die Umsetzung einer innovativen CCM-Herstellungsmethode mit der Umsetzung des Primotyps bei Laufenberg konnte im Rahmen des Projektes zwar nicht vollumfänglich mit der finalen Entwicklung einer kommerzialisierungsreifen innovativen CCM abgeschlossen werden, aber die Erkenntnisse werden genutzt, um in den nächsten 3-4 Jahren der Herstellungsprozess der Brennstoffzellen-CCM auf das neue Herstellungsverfahren umzustellen. Zwar steht die Brennstoffzelle gerade im Bereich der automobilen Anwendung stark in der Kritik und ist rückläufig, Laufenberg hofft aber im Bereich der Schwerlast-, Maritimen-, Flugzeug- und stationären Anwendung mit dem Abschluss der Kommerzialisierung der innovativen CCM einen Beitrag zur Klimaneutralität bis 2025 zu leisten sowie auch schon bis 2030 zur Treibhausgasemissionssenkung beizutragen. Des Weiteren soll die entwickelte Technologie in der Umsetzung und Entwicklung einer innovativen CCM für die Elektrolyse transferiert und angewendet werden. Dies soll in einem Anschluss-Förderprogramm beschleunigt und weiter umgesetzt und die Technologie optimiert und erweitert werden. So würde mit der entwickelten neuen Technologie ein weiterer Anwendungsbereich erschlossen und in einem Zeithorizont von 5-10 Jahren könnten weitere Anwendungsbereiche, wie die CO₂-Elektrolyse, Redox-Flow-Batterien, Alkohol-Brennstoffzellen sowie Carbon-Capture hinzukommen. Zusammenfassend ist der Einfluss der entwickelten Technologie auf die förderpolitischen Ziele noch sehr gering, aber dies

soll in den nächsten 5-10 Jahren stetig ausgebaut und erweitert werden. So wird Laufenberg langfristig seinen Beitrag zum Erreichen einer Treibhausgasneutralität leisten.

5. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

AP1 – Anforderungsanalyse

In der Anfangsphase des Forschungsprojekts konnten die Anforderungen an dem Brennstoffzellensystem detailliert diskutiert und final definiert werden. Für Laufenberg wichtige Anforderungen beziehen sich vor allem auf die Elektrokatalysatoren, die katalysatorbeschichtete Membran (CCM) bzw. Membran-Elektrodeneinheit (MEA) sowie auf die Produktionsprozesse (der CCM bzw. MEA). Dabei wurden folgende Anforderungen an die CCM bzw. MEA sowie deren Produktionsprozess definiert:

Tabelle 1: Anforderungsübersicht an der CCM und MEA.

Komponente/Parameter	Anforderung in FCPP
CCM bzw. MEA	
Katalysatoren	Kommerzieller Pt/C-Katalysator
Totale Pt-Belegung [$\text{mg}_{\text{Pt}}/\text{cm}^2$]	0,35
Katalysatorschichtdicke [μm]	30 – 40
Membranart	Kommerzielle ePTFE-verstärkte PEM,
Membrandicke [μm]	≤ 20
Aktive Fläche [cm^2]	300 – 400
Geometrie [mm]	300 x 133
Gasdiffusionsschicht GDL	
Art	Kommerzielle mit MPL z.B. Freudenberg H23C9
Dicke [μm]	≤ 200

Tabelle 2: Anforderungsübersicht an den Produktionsprozess und Qualitätskontrolle der CCM im Primotyp.

Komponente/Parameter	Anforderung in FCPP
Produktionsgeschwindigkeit [m/min]	1
Produktionsvolumen [m^2]	400
Beschichtungstechnik	Schlitzdüse
Trocknungsmethode	Infrarot-Trocknung
Anpresskraft beim Übertragen [N/mm]	13 - 35
Temperatur beim Übertragen [$^{\circ}\text{C}$]	≥ 150
Qualitätskontrolle	Pt-Belegung (Röntgenfluoreszenzanalyse) Katalysatorschichtdicke trocken (Schichtdickenmessgerät) Katalysatordispersionen (Rheometer)

Die im Rahmen des Projektes nach dem Anforderungskatalog hergestellte innovative CCM konnte im Rahmen des Projektes bei Laufenberg analysiert und mit einer per Decal-Verfahren und jahrelang optimierten Referenz-CCM erfolgreich gebenchmarkt werden.

AP2 – Entwicklung und Aufbau der innovativen CCM-Produktionsanlage

Basierend auf der Anforderungsanalyse konnten in enger Absprache mit dem assoziierten Partner Olbrich Lasten- und Pflichtenhefte erstellt und diese für die erste Konzeptentwicklung zur Verfügung gestellt werden. Basierend auf den definierten Spezifikationen wurde ein erstes Konzept entwickelt und projiziert. Im Rahmen des ersten Projektjahres erfolgte die stetige Weiterentwicklung des Konzeptes und des Primotyp, bis hin zur finalen technischen Umsetzung bei Olbrich und der anschließenden Integration des Systems in die bestehende Pilotanlage. Das hierfür notwendige Leermodul wurde im Rahmen des Projekts umgesetzt und der Primotyp in das Anlagenkonzept der Pilotanlage integriert. Dabei ist das Modul sowohl mit Beschichtungsband als auch normales Schlitzdüsenauftragswerk einsetzbar und die Verwertung und Weiternutzung des Moduls auch nach Projektende universell garantiert.

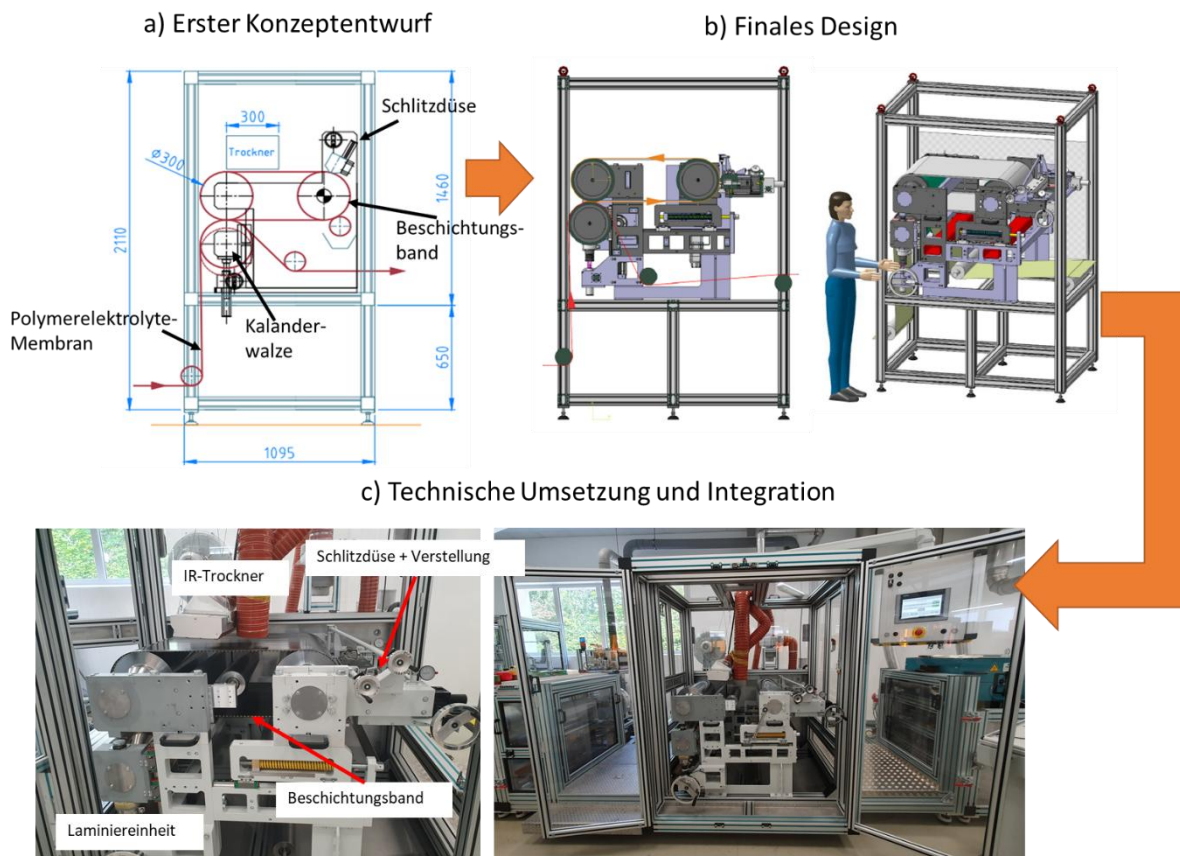


Abbildung 5: Darstellung der Entwicklungskette vom ersten Konzeptentwurf bis zur finalen technischen Umsetzung des Primotyp.

In dem finalen Primotyp wird die Katalysatordispersion mittels Schlitzdüse auf ein PTFE-Beschichtungsband aufgetragen und kann mittels eines IR-Trockners vorgetrocknet bzw. über die beheizten Walzen getrocknet werden. Im Rahmen des Projektes wurden verschieden Bandmaterialien und Hersteller getestet und final mit Olbrich das geeignetste Bandmaterial und Technologie ausgewählt. Die Schlitzdüse kann in verschiedenen Positionen eingesetzt werden und eine Beschichtung zwischen einer 12 Uhr und 16 Uhr-Position durchgeführt werden. Die Katalysatorschicht wird dann anschließend mittels Kalanders bzw. der Laminiereinheit auf die Membran übertragen. Falls eine finale Trocknung notwendig ist, so kann die einseitig beschichtete Membran in den bestehenden Konvektionstrocknern der Pilotanlage getrocknet werden und anschließend aufgewickelt werden. Eine fertige CCM kann durch die Auftragung einer weiteren Elektrode auf der anderen Seite der Membran bzw. der Übertragung einer weiteren Elektrode mittels Decal-Prozesses produziert werden.

Der Primotyp wurde im Rahmen des Projekts vollumfänglich in die Infrastruktur der Pilotanlage integriert und auch zusammen mit einem Dienstleister CE sowie Ex-Schutz zertifiziert und in das Sicherheitskonzept integriert (Abbildung 6 a). So kann der Primotyp sowohl als Beschichtungsmodul (Schlitzdüse + Belt, bzw. Schlitzdüse ohne Belt zur Herstellung von Bahnmaterial) als auch als Laminiermodul sowie Kalanders und das Modul auch nach Beendigung des Projektes variabel eingesetzt werden. Auch eine Kombination mit dem bestehenden Rakel-Beschichtungsmodul in der Zukunft ist denkbar zur Beschichtung von mehreren Schichten auf die Membran (siehe Abbildung 6 b).

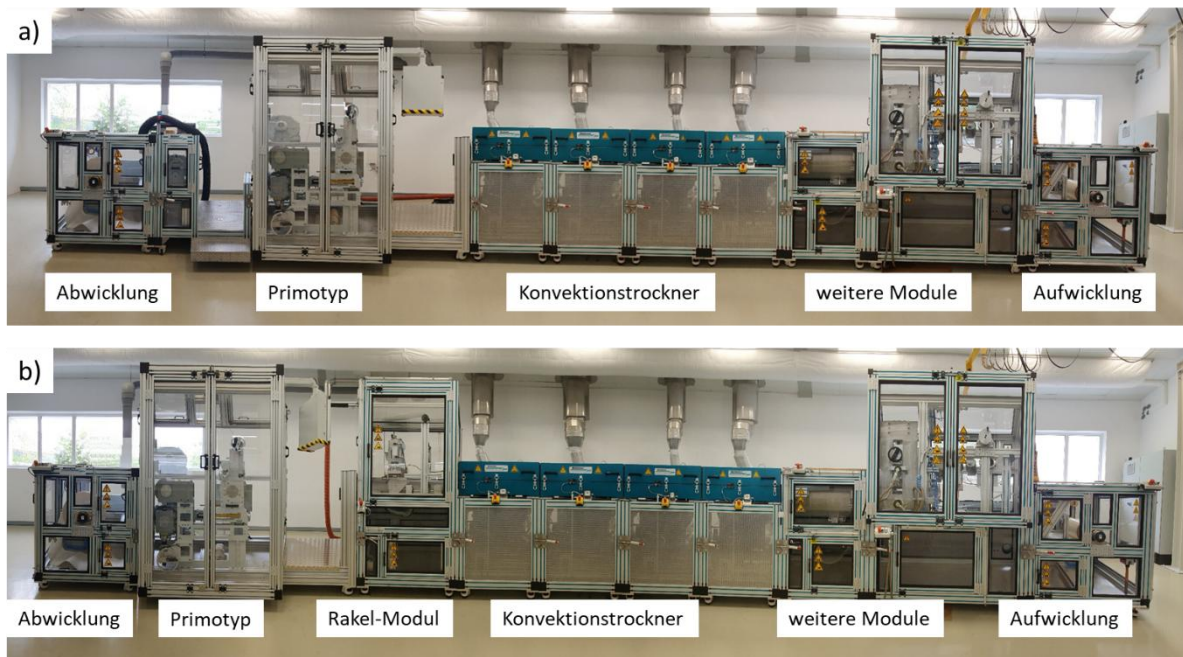


Abbildung 6: A) Konfiguration des Primotyp als innovatives Beschichtungsmodul mittels Beschichtungsband sowie b) Kombination aus Primotyp- und Rakelbeschichtung in der Pilotanlage.

Ermittlung geeigneter Beschichtungsbänder und -materialien

Die Eignung des Beschichtungsbandes für die Auftragung der Katalysatorschicht und anschließende Übertragung auf die Membran wurde im Rahmen des Projektes und vor der finalen Auslieferung und Umsetzung des Primotyps erprobt bzw. geeignete Hersteller und Materialien bestimmt. Als Band-Material wurde bereits im frühen Stadium des Projektes ein glasfaserverstärktes PTFE-Band eingeplant. Neben der Verbindungstelle ist außerdem die Beschichtbarkeit des Materials wichtig. Dies wurde in enger Zusammenarbeit frühzeitig im Projekt mit dem Projektpartner PEM mittels Schlitzdüsen-Beschichtungsexperimente überprüft. Hierfür wurde eine reale Katalysatordispersion per Schlitzdüse im eLab (an der RWTH Aachen) auf eine Proberolle von glasfaserverstärktes PTFE beschichtet. Hier zeigte sich, dass das Material mit der Katalysatordispersion kompatibel ist und es sich beschichten lässt. Die Katalysatorschicht haftet gut auf der Oberfläche und ist homogen.

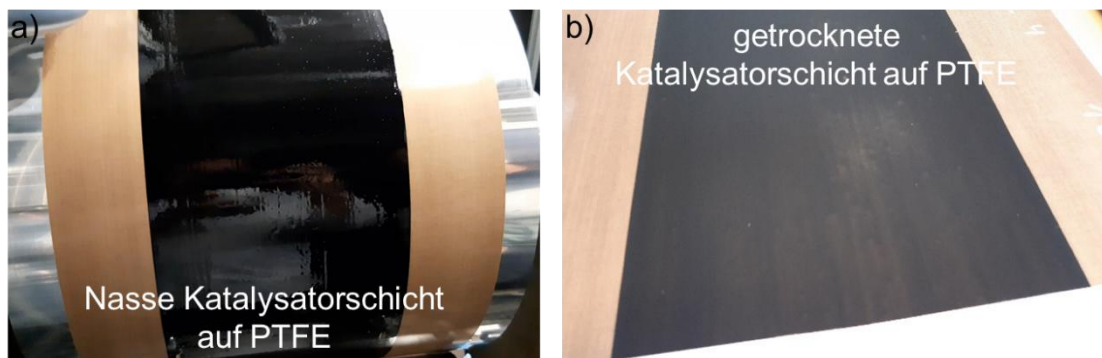


Abbildung 7: a) Nasse Katalysatorschicht auf dem PTFE sowie b) getrocknete Katalysatorschicht auf dem PTFE. Beschichtet mittels Schlitzdüse im eLab an der RWTH Aachen.

Die Eignung von glasfaserverstärkten PTFE-Folien bzw. Bändern konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Die größte Herausforderung im Projekt lag vor allem darin einen Hersteller und ein Material zu finden welches eine geeignete Nahtstelle für den Prozess aufweist. Hier musste eine geeignete Verbindungs-/Klebmöglichkeit ermittelt werden. Die ersten Muster (Hersteller A) wiesen zwar eine gute Homogenität in der Dicke auf, allerdings war die Verbindungstelle deutlich dicker als der Rest des Substrates. Diese Höhendifferenz konnte bis zu 426 μm betragen, was eine Anwendung unmöglich machte.



Abbildung 8: Probematerialien für das Beschichtungsband inklusiver Verbindungsstelle-/naht. Muster 1: Typ 1 von Hersteller A, Muster 2: Typ 2 Glasfaserverstärktes PTFE von Hersteller A inklusive Verbindung (vom anderen Partner durchgeführt, Spezialtechnologie).

Für den Beschichtungsprozess ist diese Art von Naht nicht einsetzbar, da der Abstand der Schlitzdüse zu weit eingestellt werden muss, um eine Berührung der Naht mit der Schlitzdüse zu verhindern. Somit könnte die Katalysatordispersion nicht auf das Band aufgetragen werden. Eine geeignete Bandtechnik konnte im engen Austausch mit Olbrich final ermittelt werden. Dieses Bandmaterial kann ohne fühlbare und messbare Naht angeschafft werden. Ein weiterer Punkt ist die Beschichtbarkeit des Materials und die Übertragungsqualität- bzw. -Quantität. Beide Materialien des Herstellers B wurde mit einer Kathodenkatalysatordispersion im Labormaßstab beschichtet und die Schicht im Trockenschrank getrocknet. Das Abzugs-/Ablöseverhalten konnte einfach mit einem Klebebandstreifen getestet werden. Hier sollte die Schicht komplett von dem Bandmaterial gelöst werden.

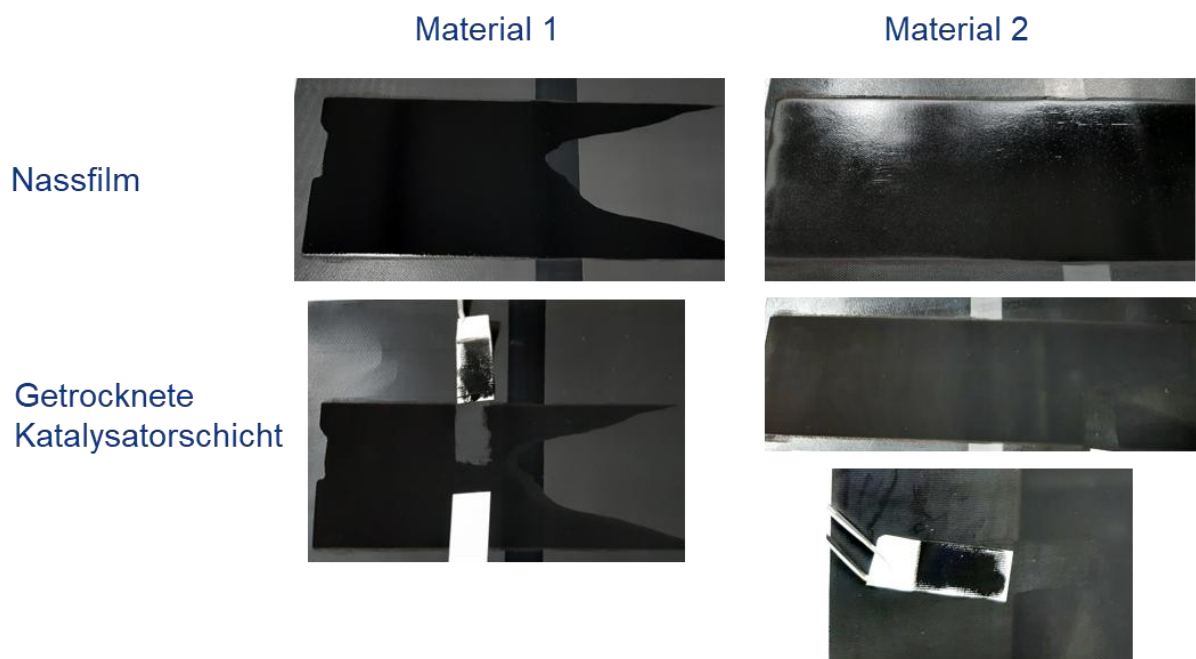


Abbildung 9: Probematerialien für das Beschichtungsband inklusiver Verbindungsstelle-/naht. Muster 1: 2-lagiges Laminatband, antistatisch, Muster 2: 2-lagiges Laminatband, einseitig antistatisch, versiegelte Oberfläche. Unten Ablöseverhalten der Katalysatorschicht beider Materialien.

Beide Materialien ließen sich gut mit der Dispersion beschichten und benetzen. Auch nach der Trocknung wies die Katalysatorschicht eine gute Homogenität und Deckung auf. Bei dem Material 1 wies die Schicht eine leicht höhere Rauigkeit auf. Dies könnte an der nicht versiegelten Oberfläche liegen. Das Abzugsverhalten war bei beiden Materialien sehr gut. Die Katalysatorschicht ließ sich mit dem Klebestreifen sehr gut wieder abziehen. Aus diesem Grund wurde dieser Hersteller für die finale Umsetzung des Beschichtungsbandes ausgewählt und beauftragt.

Inbetriebnahme der einzelnen Einheiten

Neben der Auswahl des Beschichtungsbandes war zu Beginn des Projektes ein weiterer Faktor das optimale Laminierwalzenmaterial zu ermitteln. Hierfür wurde im Technikum von Olbrich Dummy-Schichten auf Decal-Folie hergestellt (Schlitzdüse in 12 Uhr Position) und diese mittels Laminiereinheit auf die Membran übertragen. Hierfür wurde eine metallische beheizbare und eine nicht temperierte gummierte Walze als Gegenwalze eingesetzt. Die Beschichtung einer Dummy-Dispersion (von der Rheologie der realen Katalysatorfarbe nachempfunden) in 12 Uhr Position konnte erfolgreich auf der Decal-Folie realisiert werden. Die Übertragung dieser Schicht auf die Membran konnte nach Optimierung des Bahnverlaufs (beschichtete Decalfolie hat mehr Kontakt zur ca. 100°C heißen Walze) sowie einem Vorheizen der Gummiwalze (direkter Kontakt zur heißen Walze) erfolgreich umgesetzt werden und die Dummy-Schicht vollständig auf die Membran übertragen werden.

Zur Übertragung dieses Verfahrens auf eine reale Katalysatorschicht und die Verwendung dieser Erkenntnisse für den Primotyp wurden in einem weiteren Versuchstag im Technikum dieses Experiment wiederholt. Hierzu wurde an der Pilotanlage mittels Rakel Kathodenschichten auf Decal-Folie hergestellt (analog zur Referenz-CCM-Herstellung in AP 3.1). Anstelle der Decal-Folie mit Dummy-Schicht wurde die mit Katalysator beschichtete Decal-Folie eingespannt und die Übertragung untersucht. Hier wurde schon schnell deutlich, dass keine Übertragung auf die Membran erfolgt und nur Abrieb auf die Membran übertragen wird. Auch die direkte Beheizung der gummierten Walze mit einem IR-Strahler auf bis zu 145 °C brachte nicht die erwünschte Verbesserung. Dementsprechend sind die mit der Dummy-Schicht gesammelten Übertragungserkenntnisse nicht auf die realen Katalysatorschichten übertragbar. Die gummierte Walze ist zu weich, um eine vollständige und gute Übertragung zu ermöglichen. Für den Primotyp wurde aus diesem Grund eine Laminiereinheit aus zwei beheizbaren Stahlwalzen umgesetzt und so eine erfolgreiche Übertragung der Katalysatorschicht auf die Membran realisiert.

Die Einzelbetriebnahme und Testung der Laminiereinheit wurde ohne Beschichtungsband durchgeführt. Hierfür wurden Kathodenschichten auf Decalfolie (mittels Rakel beschichtet) mit der Membran und einer Decalanodenschicht bei verschiedenen Temperaturen und Anpresskräften durch

die Laminiereinheit gezogen (siehe Abbildung 10 a) und anschließend die Übertragungsqualität beurteilt. Für alle hergestellten CCMs mit homogen übertragenden Schichten wurde dann anschließend die Performance im BZ-Teststand bei Laufenberg untersucht. Für die Übertragungstemperaturen 160°C, 170°C und 180°C sind die Polarisationskurven in Abhängigkeit der Anpresskraft zusammengefasst. Die Performanceergebnisse zeigen, dass für die Übertragungstemperaturen von 160°C-170°C und Anpresskräfte von 4-10 kN gute Ergebnisse erzielt werden. Zwar wurden für die höheren Übertragungstemperaturen auch gute Performances erreicht, allerdings konnten bei dieser Temperatur beobachtet werden, dass die Decalfolie leider nicht stabil ist und sich Falten bilden bzw. der Release Film der Folie sich von der PET-Folie löst. Aus diesem Grund sind Übertragungstemperaturen $\leq 170^\circ\text{C}$ ideal.

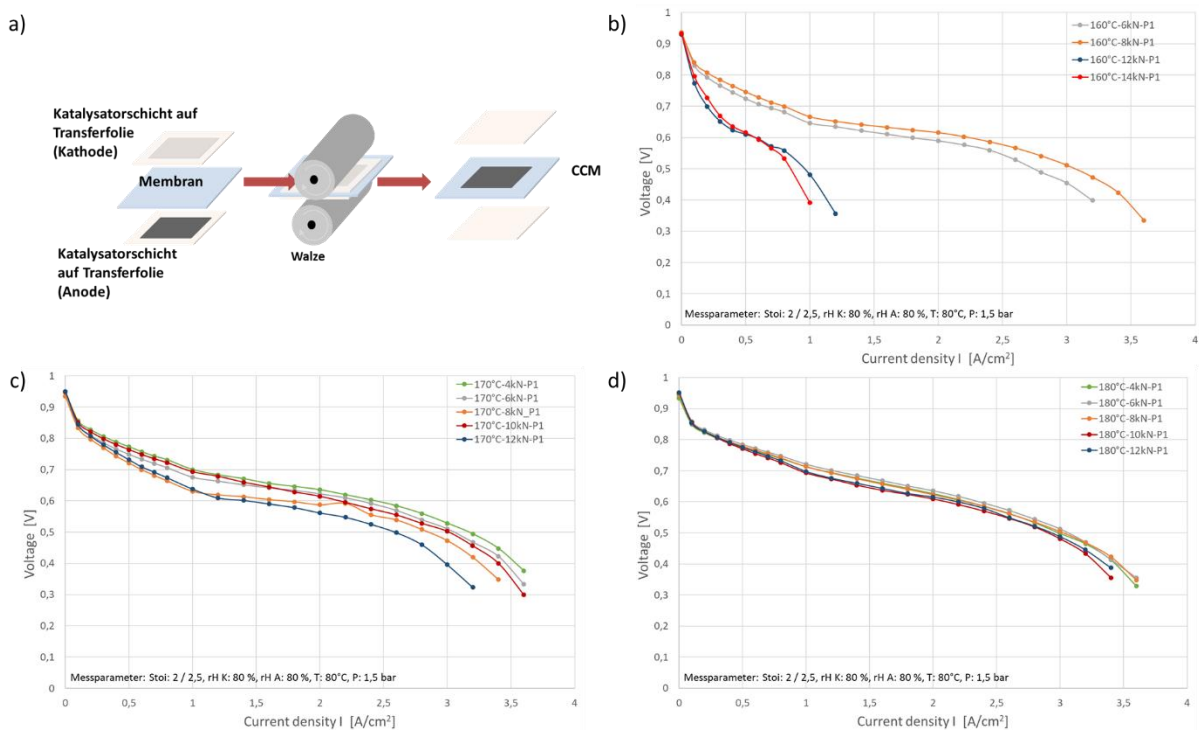


Abbildung 10: a) Schematische Darstellung des Laminierprozesses im Primotyp sowie die zugehörigen Polarisationskurven und Performancemessungen für die Übertragungstemperaturen b) 160°C, c) 170°C und d) 180°C.

Diese Erkenntnisse wurden im Anschluss in den Beschichtung- und Übertragungsprozess vom Beschichtungsband auf die Membran übertragen, um die innovativen CCM mittels Primotyp herzustellen. Die für den Primotyp notwendige Schlitzdüse wurde mit dem Lieferanten ausgelegt, das finale Design festgelegt und mit dem Hersteller im Primotyp in Betrieb genommen.

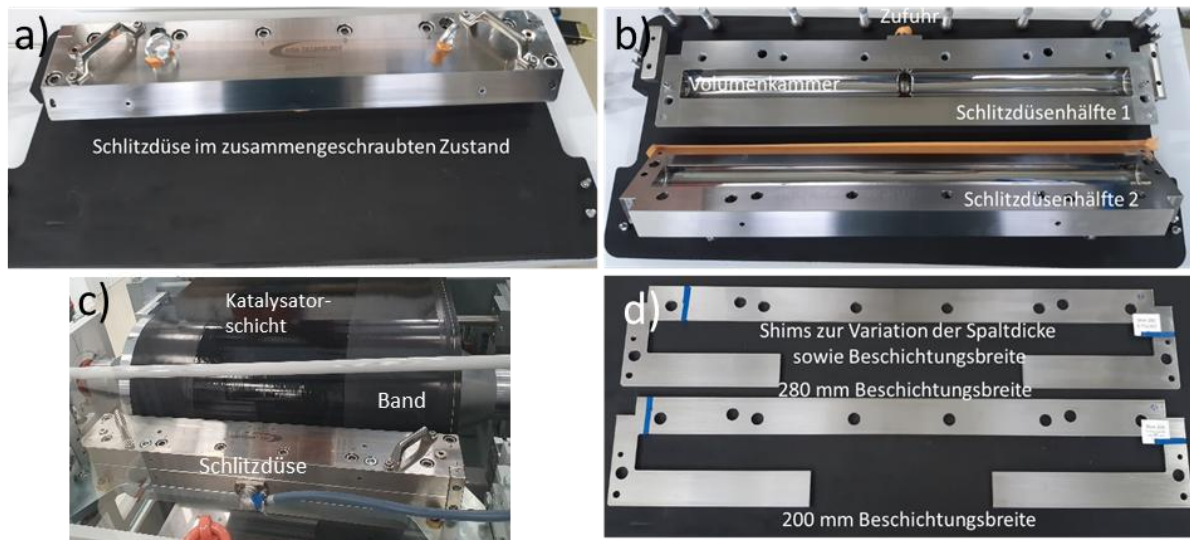


Abbildung 11: Für die Integration in den Primotyp angeschafften Schlitzdüse im zusammengebauten a) sowie offenen Zustand b) sowie c) Im Primotyp im Einsatz zur Herstellung der Katalysatorschicht auf dem Band. D) Für die Einstellung der Spaltdicke sowie Beschichtungsbreite eingesetzten Shims.

Zur Trocknung der Katalysatorschicht auf dem Transportband ist ein IR-Trockner im Primotyp integriert worden. Dass die Trocknung von Katalysatorschichten mittels IR-Strahler erfolgreich erfolgen kann, wurde vorab in der Pilotanlage untersucht. Dieser wurde in die Pilotanlage integriert und die Trocknung der Katalysatorschicht auf der Decal-Folie untersucht. Hierbei zeigte sich eine sehr gute Trocknung der schwarzen Schicht für Bandgeschwindigkeiten von bis zu 5 m/min. Hierfür waren auch nur 40% der 15KW Gesamtleistung notwendig. Höhere Geschwindigkeiten sind damit mit der Steigerung der Leistung des Strahlers möglich.



Abbildung 12: Integrierter IR-Trockner in die Pilotanlage zur Trocknung von Katalysatorschichten auf Decal-Folie sowie IR-getrocknete Katalysatorschicht auf der Decal-Folie

Neben der Trocknung der Katalysatorschicht mittels Ir-Strahler kann die Trocknung durch die Temperatureinwirkung der Laminierwalzen auf das Band erfolgen. Da das Band auf diesen Walzen aufliegt reicht die Temperatur der Walzen aus, die nasse Schicht vorzutrocknen und für die Übertragung auf die Membran vorzubereiten.

AP3 – Produktion der katalysatorbeschichteten Membranen (Referenz-CCM und innovative CCM)

AP 3.1 Dispersionsherstellung und Herstellung der Referenz-CCM

Für die Vorbereitung der Referenz-CCM-Herstellung wurde, die bei Laufenberg etablierte Standard-Katalysator-Dispersion rheologisch untersucht. Hierfür wurde in den ersten Projektmonaten ein Rheometer angeschafft, installiert und in Betrieb genommen. Mit diesem Rheometer ist es möglich scherkraftabhängig die Viskosität von Flüssigkeiten und Dispersionen zu bestimmen. So konnten im Rahmen des Projektes alle Dispersionen rheologisch untersucht und die Dispersionen, für die im Prototyp eingesetzte Schlitzdüse optimiert werden.

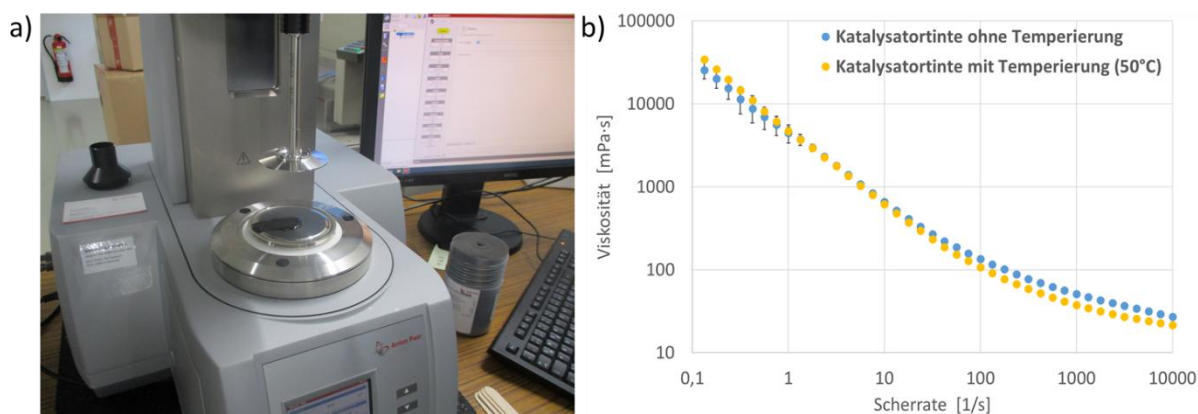


Abbildung 13: a) Foto des im Rahmen des Projektes angeschafften Rheometers und b) rheologische Messungen von zwei Katalysatorfarben nach dem Dispergierungsprozess mit einem Scherkraftdispergierer (ohne Temperierung während des Dispergierens sowie Aufheizen auf 50°C).

Neben der Zusammensetzung der Dispersionen ist der Dispergierungs- bzw. Behandlungsprozess ein weiterer Faktor die Rheologie der Dispersion zu beeinflussen. So wurde eine Katalysatormischung während des Dispergierens auf 50°C temperiert und als Vergleich bei Raumtemperatur verwendet. Dies hat einen Einfluss auf die Verteilung des Ionomers. Den Einfluss der Temperatur auf das Ionomer wird in der Rheologie deutlich, so weist die während des Dispergierens temperierte Tinte eine niedrige Viskosität für Scherkräfte ≥ 50 1/s auf. So kann das installierte Rheometer effektiv für die Entwicklung der alternativen Katalysatordispersion eingesetzt werden und für die Herstellung der Referenz-CCM angewendet werden.

AP 3.1 Fertigung Referenz-CCM per Decal-Verfahren

Für die Herstellung der Referenz-CCM wurde die bestehende Pilotbeschichtungsanlage bei der Firma Laufenberg verwendet. Für die Herstellung der Katalysatorschichten wurden jeweils 3 Ansätze

Kathodendispersion sowie 2 Ansätze Anodendispersion hergestellt und anschließend rheologisch charakterisiert.

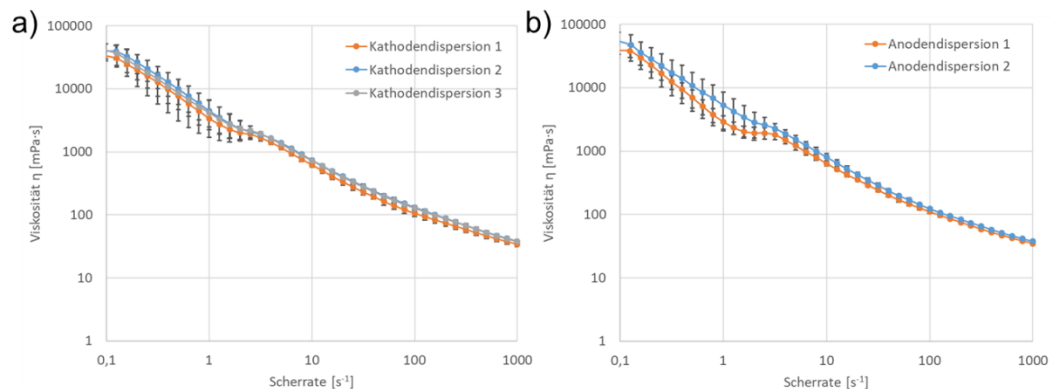


Abbildung 14: Rheologische Messdaten der für die Herstellung der Referenz-CCM eingesetzten a) Kathodendispersionen sowie b) Anodendispersionen.

Die rheologischen Messdaten zeigen, dass sowohl die Kathoden als auch Anodendispersionen sehr reproduzierbar hergestellt werden können und sich die unterschiedlichen Dispersionen trotz leichter Unterschiede in der Zusammensetzung rheologisch kaum voneinander unterscheiden. Die Katalysatorschichten wurden mittels Rakel auf eine beschichtete PET-Folie aufgetragen und in den Konvektionstrockner getrocknet. So könnte Kathoden- sowie Anodenmaterial auf Rolle hergestellt werden. Neben der Herstellung der Kathode und Anode auf dem beschichteten PET wurde ebenfalls eine Kathode sowie Anode auf einer fluorierten Folie beschichtet. Diese weist allerdings ein deutlich schlechteres Maschinenverhalten auf und sorgt für Faltenbildung beim Übertragen auf die Membran.

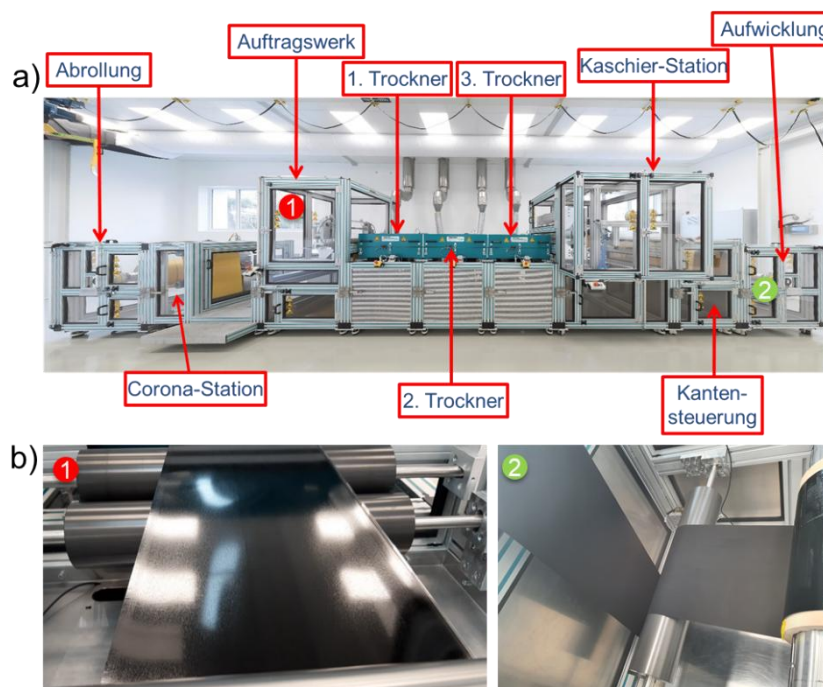


Abbildung 15: a) Foto der Pilotbeschichtungsanlage sowie b) Kathodenkatalysatorschicht im Auftragswerk (Position 1) (nass) sowie kurz vor der Aufwicklung im getrockneten Zustand (Position 2).

In einem anschließenden Schritt wurden jeweils Kathode und Anode mit Hilfe eines beheizbaren Kalenders auf eine kommerzielle Polyelektrolyte-Membran übertragen. So konnte ausreichend Referenz-CCM auf Rolle hergestellt werden. Die Pt-Belegung der Kathode wurde während des Beschichtungsprozess mittels Röntgenfluoreszenz-Messgerät überprüft und die Einstellung in der Maschine angepasst. Die Zielbeladung von 0,35 bis 0,4 mg_{Pt}/cm² konnte so eingestellt werden. Bei der erneuten Analyse der fertigen CCM wurde eine Pt-Belegung von 0,4 mg/cm² bestimmt.

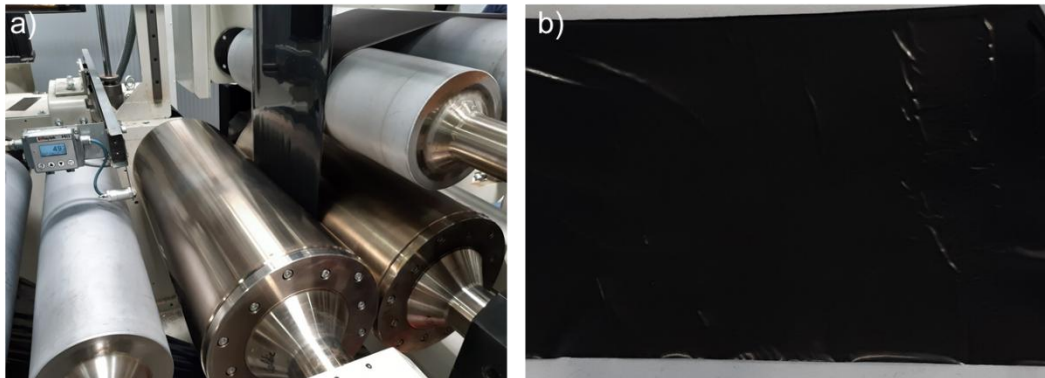


Abbildung 16: a) Foto des verwendeten Kalanderprozess, in dem die Kathode und Anode auf die Membran übertragen werden sowie b) hergestellte Referenz-CCM nach dem Abziehen beider Transferfolien.

Zur Fertigung der MEAs wurden CCMs aus dem Rollenmaterial ausgeschnitten (85 x 85 mm) und dem Partner PEM zur MEA-Fertigung zur Verfügung gestellt. Aus diesen konnte mit einer Randverstärkungsfolie sowie einer GDL aus den CCMs, 7-lagen Membranelektrodeneinheiten (MEAs) gefertigt werden. Die elektrochemische Charakterisierung dieser Referenz-CCM bzw.- MEA ist in AP 3.2 im Vergleich zur innovativen CCM dargestellt.

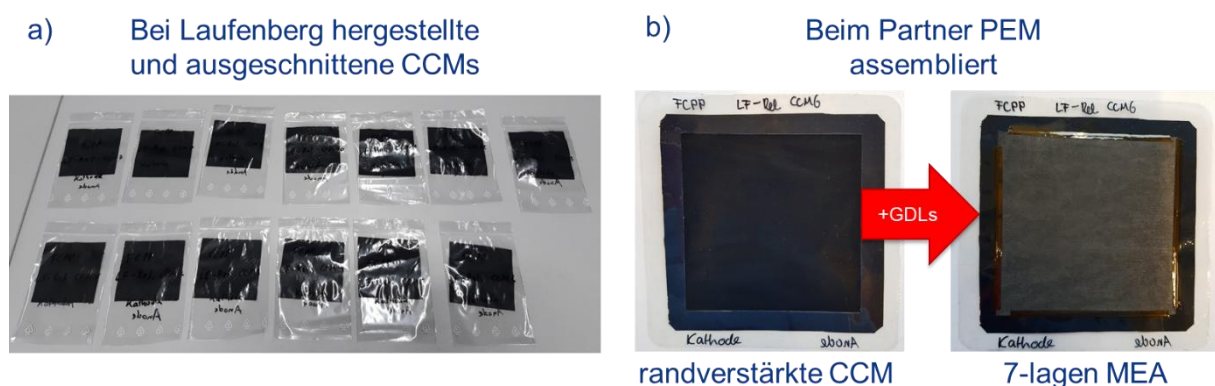


Abbildung 17: a) Bei Laufenberg hergestellte und ausgeschnittene CCMs und b) beim Partner PEM assemblierte CCMs bzw. 7-Lagen MEAs.

Im Rahmen des Projekts konnten verschiedenen Generationen Referenz-CCMs realisiert werden. Diese CCMs wurden am Laufenberg Brennstoffzellen-Teststand (der im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes angeschafft wurde) getestet, um erste aussagekräftige Performance-Messung durchzuführen und einen geeignete Benchmark-CCM für die mittels Primotyp herzustellenden

innovative CCM zu bestimmen. Basierend auf den Erkenntnissen beim Laminieren im Primotyp wurde die Referenz-CCM weiterentwickelt und der Beschichtungs- und Trocknungsprozess sowie auch die Katalysatordispersion optimiert. Die erreichte Steigerung der Performance während des Projektverlaufs ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

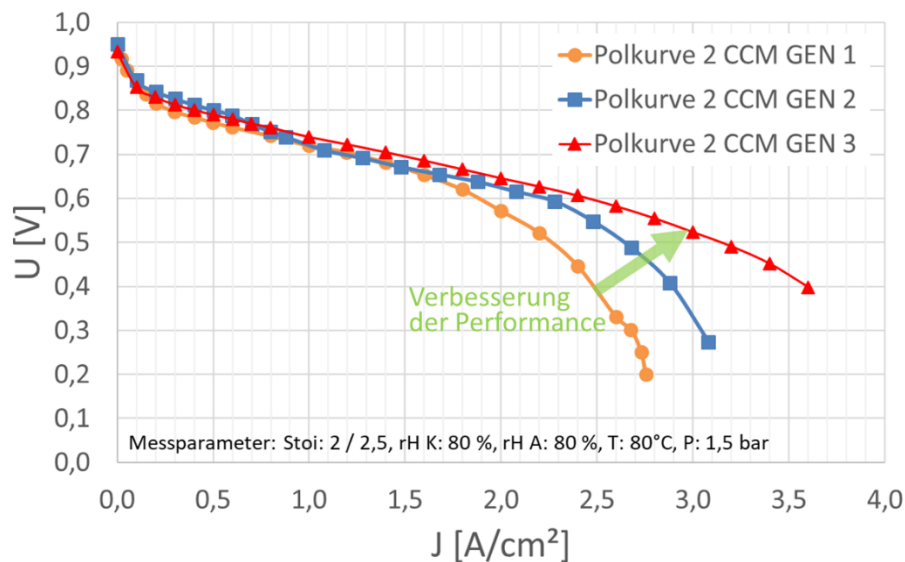


Abbildung 18: Performance-Daten (am Teststand von Laufenberg gemessen) der Referenz-CCMs der 1., 2. und 3. Generation als Benchmark für die innovative CCM.

Die Ergebnisse zeigen gerade im wichtigen Spannungsbereich von 0,6 V eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte um 0,6 A/cm² durch die ganzen Optimierungen. Die 3. Generation ist die finale Entwicklung, die als Benchmark für die innovativen CCMs gilt.

AP 3.2 Entwicklung alternative Katalysatordispersion

Die Ergebnisse sowohl an der Beschichtungsanlage vom Partner PEM als auch bei Olbrich haben gezeigt, dass die etablierten Katalysatordispersionen für die Beschichtung mittels Schlitzdüse in 12 bzw. 16 Uhr Position geeignet sind. Weitere Optimierungen konnten im Rahmen des Projektes durchgeführt werden. Zur Optimierung wurden unterschiedliche Strategien verfolgt. Für die Herstellung der Katalysatorschichten per Schlitzdüsenbeschichtung im Primotyp wurde die Zusammensetzung der Standard-Katalysatordispersionen (Alkohol, Wasser, Ionomer und Katalysator) variiert und der Einfluss des Wassergehalts und des Katalysatorgehalts auf die Rheologie der Dispersion untersucht. Die Viskosität wurde scherkraftabhängig mittels Rheometer bestimmt. In den Messungen der Wassergehaltsvariation zeigt sich allerdings, dass der Einfluss des Wassergehalts nur gering ist. Bei der Beschichtung der Standard-Kathodendispersion (10 wt-%) mittels Schlitzdüse auf den Beschichtungsband zeigte sich, dass die Viskosität zu gering ist. Aus diesem Grund wurde eine

Anpassung der Viskosität durch die Steigerung des Feststoffgehalts durchgeführt (Erhöhung Katalysatormenge in der Dispersion). Dieser Gehalt hat einen enormen Einfluss auf die Viskosität, so kann diese mit der Steigerung des Feststoffgehalts von 10 wt-% auf 15 wt-% um einen Faktor 3 gesteigert werden (siehe Abbildung 19, bei einer Scherrate von 100 1/s).

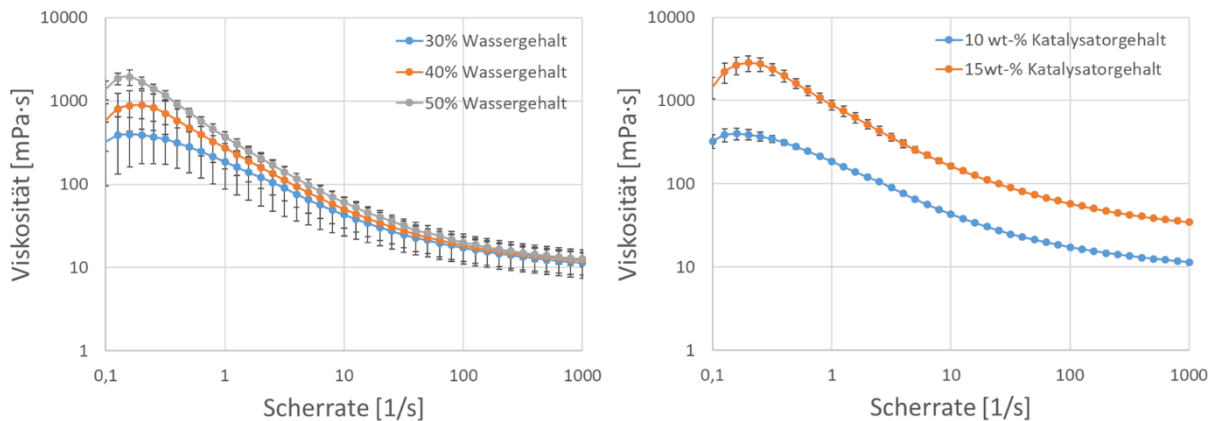


Abbildung 19: Messung der Viskositäten unterschiedlicher Katalysatordispersionen mittels Rheometer. Einfluss des Wassergehaltes (links) sowie des Katalysatorgehalts in der Dispersion (rechts).

Zusätzlich wurde der Dispergierungsprozess der Kathodenkatalysatortinte im Rahmen des Projektes nochmals weiterentwickelt. Zum einen wurde durch Steigerung der Scherrate auf 25.000 U/min die Dispergierzeit auf 1-2 h (für einen üblichen Dispersionsbatch für die Pilotanlage und den Primotyp) reduziert. Zusätzlich wurde der Einfluss der Ionemerkonzentration auf die Dispersion und vor allem Performance untersucht. Hierbei konnte durch Reduzierung des Ionomer-zu-Kohlenstoffverhältnisses (I/C) von 1,05 auf 0,8 eine leichte Steigerung der Performance erzielt werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Rheologie der Dispersion sich nicht verändert hat, was für den Beschichtungsprozess in der Schlitzdüse wichtig war.

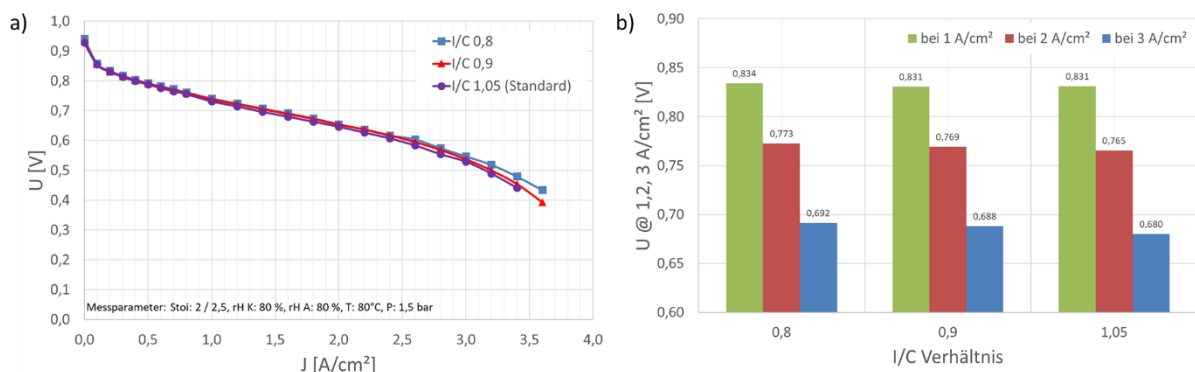


Abbildung 20: Performance-Daten (am Teststand von Laufenberg gemessen) für die unterschiedlichen I/C-Verhältnisse.

Neben der Steigerung der Performance um 1% kann eine Einsparung des Ionomer um 25% erreicht werden, was die Kosten der CCM reduziert. Dies ist ein weiterer Vorteil dieser Optimierung.

AP 3.3 Produktion der innovativen CCM

Auf Basis aller Erkenntnisse der Einzelbetriebnahme und von Arbeitspaket 2 wurden Kathodenschichten mittels Schlitzdüse auf dem Beschichtungs-Belt hergestellt (Abbildung 21 a). Im Rahmen der Produktion hat sich zusätzlich herausgestellt, dass der Einfluss des Ir-Trockners bzw. der Luftstrom zum Ex-Schutz des Trockners einen negativen Einfluss auf die Katalysatorschicht hatte sowie die Anströmung teilweise die Schicht zerstört hat. Aus diesem Grund wurde nur über den thermischen Einfluss der Laminierwalze getrocknet. Anschließend erfolgte die Übertragung der Katalysatorschicht auf die Membran in der Laminiereinheit (Abbildung 21 b & c). Die so hergestellte Halb-CCM konnte in einem weiteren Prozessschritt mit der Kalandereinheit des Primotyps und mittels Commabar-Rakel hergestellten Anodenmaterial auf Decal-Folie zur Voll-CCM assembliert und umgesetzt werden. Die hergestellten Voll-CCMs wurden dem Partner PEM bereitgestellt, um die notwendigen MEAs für den im Projekt entwickelten Stack herzustellen und diesen am TME-Teststand zu analysieren. Zusätzlich erfolgte die Testung der innovativen CCM im Laufenberg-Teststand und der Vergleich mit der Referenz-CCM GEN3. Die Performance-Ergebnisse und die Bilder ausgewählter Voll-CCM Muster zur Herstellung der MEAs beim Projektpartner RWTH Aachen PEM sind in Abbildung 22 zusammengefasst.



Abbildung 21: Herstellung einer Halb-CCM durch Verwendung des Primotyp inklusive Beschichtungs-Belt. A) Schlitzdüsenbeschichtung auf dem Belt, b) Trocknung der Katalysatorschicht mittels Laminierwalzen sowie c) Ansicht unter dem Beschichtungsbelt und die hergestellte Halb-CCM.

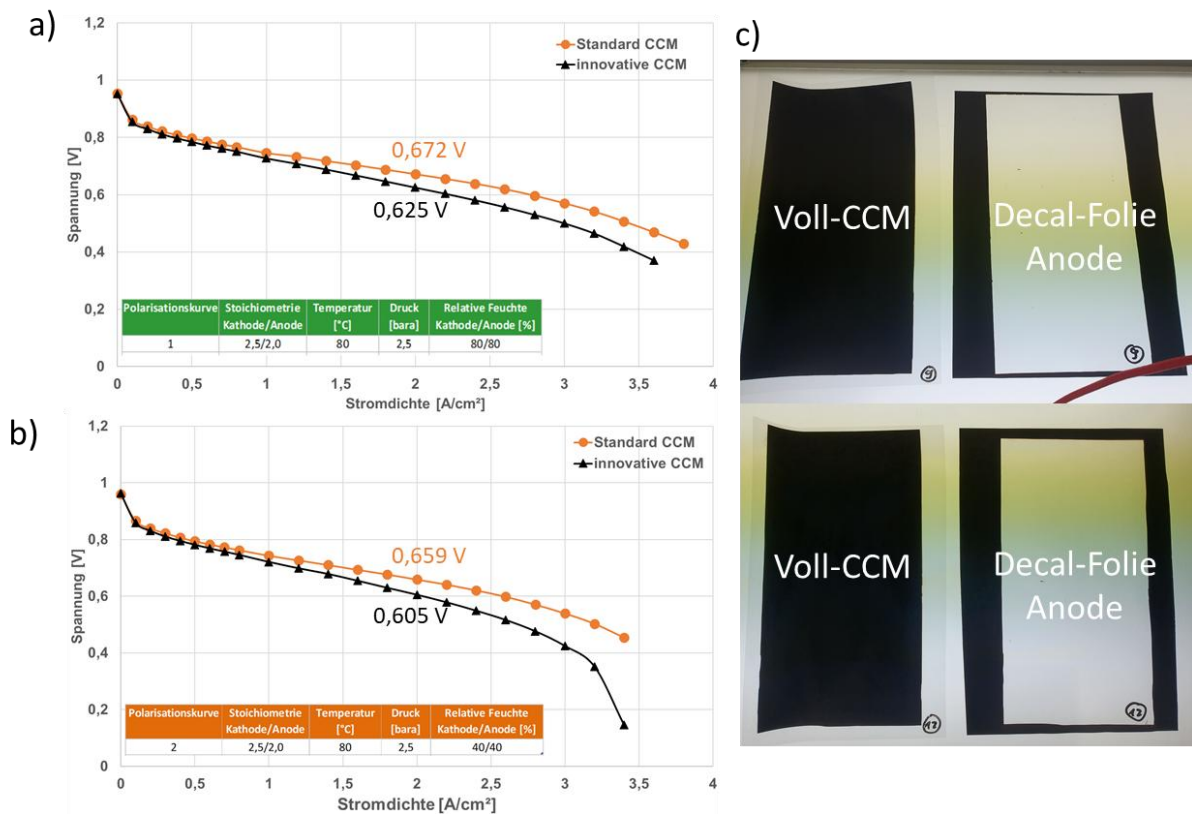


Abbildung 22: Performance-Messungen der hergestellten innovativen CCM im Vergleich zur Referenz-CCM für feuchte Bedingungen a) sowie trockene Bedingungen b) sowie Bilder der innovativen CCMs für die MEA-Fertigung beim Partner PEM.

Allgemein konnte mit der innovativen CCM eine gute Performance erreicht werden. Vergleicht man für eine Stromdichte von 2 A/cm^2 die erreichte Spannung so konnte sowohl für feuchte Messbedingungen als auch trockene Bedingungen eine Spannung von über $0,6 \text{ V}$ erreicht werden. Im Vergleich zur Referenz-CCM lag die Performance allerdings noch 47 mV respektive 54 mV unter der Performance der Referenz-CCM. Dies ist allerdings nicht verwunderlich, da in der GEN3 CCM Erkenntnisse und Knowhow aus über 5 Jahren Optimierung drinstecken. Aufgrund der Verzögerungen bei der Auslieferung und Fertigstellung des Primotyps konnte nur im letzten Projektdrittel an der Umsetzung und Optimierung der innovativen CCM gearbeitet werden. Zusammenfassend konnte somit bereits eine akzeptable Performance mit der innovativen CCM erreicht werden. Die limitierte Zeit und auch die Verzögerung bei der Finalisierung des Teststandes beim Partner TME hat eine weitere Optimierung allerdings nicht möglich gemacht. Nichtsdestotrotz konnte im Rahmen des Projektes ein komplett neues Beschichtungs- und Laminiermodul aufgebaut, in die bestehende Pilotanlagen-Infrastruktur integriert und eine innovative CCM erfolgreich umgesetzt werden.

6. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse können für die Weiterentwicklung und Vereinfachung des CCM-Herstellungsprozesses bei Laufenberg verwendet werden. Zwar ist mit dem Projektende noch kein finales und besseres Produkt entstanden, aber es soll nach Projektende weiter an der Umsetzung gearbeitet werden. Die aufgebaute Anlage und der Prozess soll weiter optimiert und genutzt werden, um in den nächsten 3-4 Jahren eine innovative CCM auf den Markt zu bringen. Auch sind geplant die Anlage und die Erkenntnisse auf die Herstellung einer Elektrolyse-CCM zu übertragen. Hier ist ein Folgeprojekt (Inno2Mass) mit einigen der Partner aus FCPP geplant, um die in FCPP aufgebaute Infrastruktur zu erweitern und zu nutzen. Mit der Vereinfachung des CCM-Herstellungsprozesses plant Laufenberg seinen Stand am CCM-Lieferantenmarkt weiter zu stärken und die Kosten für die Herstellung der CCM, um bis zu 10% zu reduzieren. Zusätzlich wird durch die Substitution des Decal-Rollenmaterials auch Ressourcen eingespart und der Einsatz von übliche etablierte PTFE-basierte Decal-Folie reduziert. Dies ist aufgrund der aktuell herrschenden Diskussion von PFAS-Materialien ein weiterer wichtiger Grund für die weitere Nutzung und Verwertung des Primotyps und der Ergebnisse. Neben der wirtschaftlichen Verwertung erfolgt die wissenschaftliche Verwertung eng mit den Instituten und der Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen und Messen (z.B. Hy-Fcell, Hydrogen Technology Expo und Hydrogen & Fuel Cells Europe). So werden die erzielten Ergebnisse auch wissenschaftlich verwertet

7. Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Im Vergleich des ursprünglichen Zeitplans musste eine kostenneutrale Verlängerung um neun Monate im Anspruch genommen werden. Diese war notwendig, da es im Rahmen der Auslieferung des Primotyps zu Verzögerungen aufgrund von Corona und der Lieferzeitproblematik bei elektrischen Bauteilen gekommen ist. Zusätzlich konnte die geplante Testung der hergestellten CCMs und damit die Optimierung der CCMs nicht in dem geplanten Rahmen durchgeführt werden, da der Teststand beim Partner TME deutlich verzögert in Betrieb genommen wurde. Einige Performance-Messungen wurden deshalb am Laufenberg-Teststand durchgeführt. Dies war im eigentlichen Zeit- und Kostenplan eigentlich nicht geplant, aber es konnte in den Ausgabenplan integriert werden. Trotz des Mehraufwands lagen die umgesetzten Ausgaben 4.591 € unter dem ursprünglich geplanten Budget. Nur für die AFA für Vorhabensspezifische Anlagen wurde die ursprünglich geplanten Ausgaben um

3.232 € überschritten. Diese konnte durch Einsparungen in den Material- und Personalkosten eingespart werden. Hier ist vor allem eine Einsparung für Material-, Personal sowie Reisekosten zu nennen. Diese resultiert aus dem oben genannten Gründen sowie einem geringeren Materialaufwand bei der Dispersionsentwicklung für den Primotyp und die innovative CCM.