

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



## **Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKF 98 (öffentliche Version)**

**BMVI Verbundprojekt EMSigBZ:  
Schlussbericht der Greenerity GmbH - Teilprojekt Fertigungskonzepte CCM (AP4)**

### **Greenerity GmbH**

Zuwendungsempfänger

### **03B11012B**

Förderkennzeichen

### **Vorhabenbezeichnung:**

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) – Phase II:  
**Entwicklung eines modularen und skalierbaren Produktionssystems zur Herstellung von Brennstoffzellen-Stacks**

### **Laufzeit des Vorhabens und Projektpartner:**

01.03.2019 – 31.08.2022 (gemäß Änderungsbescheid vom 22.09.2021)



### **Aufgabenstellung und Projektziele: EMSigBZ**

Konkrete Herausforderungen auf dem Weg (zur Industrialisierung und Kundenwertigkeit) sind:

- Hohe Flexibilität in der Produktion von Brennstoffzellen bei gleichzeitig hoher erforderlicher Genauigkeit für das Ablegen und Stapeln der Bipolarplatten, Gasdiffusionslagen und der CCM (Catalyst-Coated-Membrane)
- Reduktion der Stückkosten
- Qualifizierung geeigneter Handhabungs- und Messtechnikkonzepte
- Qualifizierung geeignetes Messsystem zur In-Line-Prüfung qualitätsrelevanter Produkt- und Prozessmerkmale

### **Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung**

Greenerity Entwicklungsziele und Meilensteinplanung:

Ziel der Integration einer Post-Handling-Maschine (PHM) in den CCM-Rollen Handling Prozess (AP4.2) ist das Umspulen, den Längsschnitt sowie die Randbesäumung von CCM-Rollen und die Möglichkeit das zuführen einer Schutzfolie zu ermöglichen. Zusätzlich bietet eine PHM die Möglichkeit einer Inline-Qualitätsinspektion und einer Fehlermarkierungen zu integrieren, welche eine automatisierte Verarbeitung von CCM-Rollen ermöglicht.

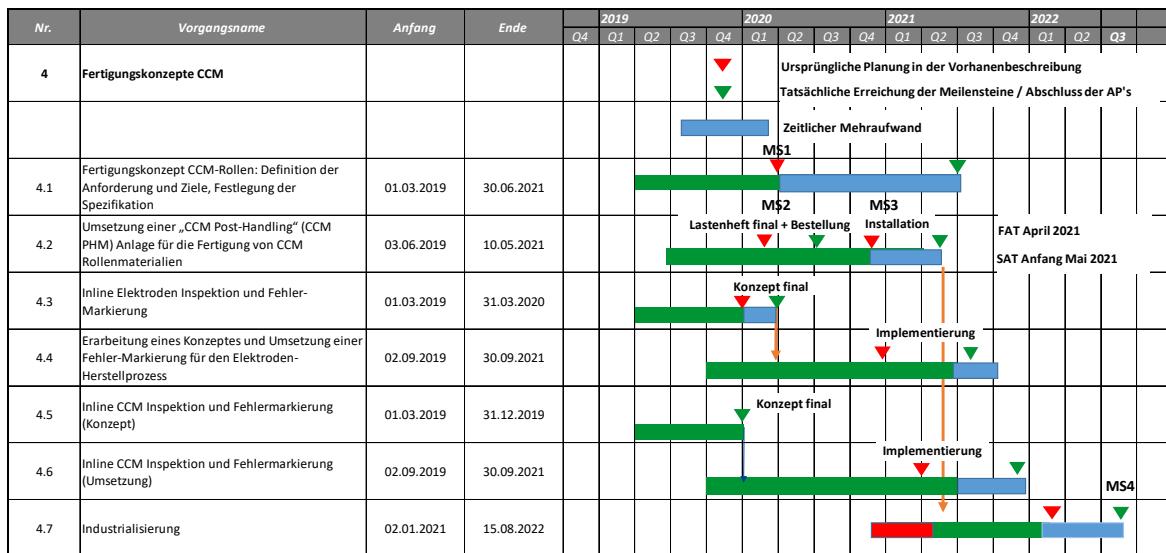
**Definition der Anforderung und Ziele**, sowie die Festlegung einer mit den Projektpartnern abgestimmten Spezifikation für CCM-Rollen bis März 2020 (**Meilenstein 1**).

Ziel im Projekt (AP 4.4) ist die Beschaffung und Implementierung eines neuen Systems für die Fehlermarkierung auf der Katalysatorelektrode. Im ersten Schritt wird ein Konzept erarbeitet, welches auf Basis des bestehenden Inspektionssystem Fehlstellen auf der Katalysatorelektrode markiert. Mögliche Fehler werden klassifiziert und in einem Fehlerkatalog beschrieben. Das System muss nicht zulässige Fehler sicher erkennen und markieren (anhand eines Fehlerkataloges). Im zweiten Schritt muss das System eine nachhaltige Fehlstellenübertragung bis zur CCM-Rolle gewährleisten, sowie bei steigenden Produktionsgeschwindigkeiten eine Markierungsgenauigkeit von  $\pm 2,0$  mm sicherstellen können.

Basierend auf abgestimmten Qualitätskriterien (AP 4.5 und AP 4.6) wird die Spezifikation für die In-Line CCM-Inspektion und der Defekt und Fehlermarkierung erstellt. Als Abschluss von Prozessversuchen steht die **Erstellung des Lastenhefts** bis März 2020 (**Meilenstein 2**).

Dabei beinhaltet diese Spezifikation auch markierte Defekte der Membran des Herstellers. Dabei müssen Fehlerstellen mit einer sehr hohen Genauigkeit erkannt und durch ein Markierungssystem gekennzeichnet werden. Das Markierungssystem der CCM-Rolle muss mit den Projektpartnern abgestimmt werden, um in nachgeschalteten Anlagen die Vereinzelung in Sheets gewährleisten zu können. **Die Beschaffung und Integration der Post Handling Maschine**, mit einer Inline-Qualitätskontrolle und Markierung, ist bis für Oktober 2020 geplant (**Meilenstein 3**).

Ziel der Industrialisierungsphase (AP4.7) ist es, die in AP 4.6 neu etablierten Fertigungsprozesse der CCM-Rolle zu analysieren. Hierfür wird unter anderem die Prozessstabilität untersucht und eine Prozessfähigkeitsanalyse durchgeführt. Es werden alle notwendigen APQP (Advanced Product Quality Planning) Dokumente erstellt. Ziel ist es, den beteiligten Projektpartnern das bestmögliche CCM auf Rolle Produkt für den automatisierten Stackaufbau zur Verfügung zu stellen, um die Anforderungen an Volumen, Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Zum Projektende soll ein **Technologiereifegrad (TRL) von 4-5** erreicht werden (**Meilenstein 4**).



Grafik Nr. 1: Projektplanung

Die Greenerity Entwicklungsarbeiten wurden in 7 verschiedene Arbeitspakete unterteilt

#### AP 4.0: Fertigungskonzept CCM (Catalyst-Coated-Membrane) Rolle

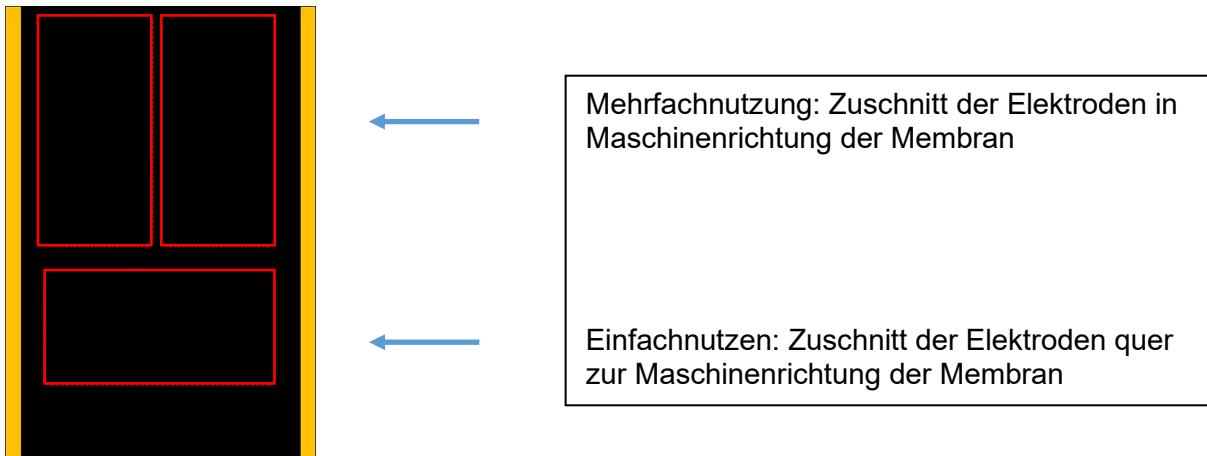
#### AP 4.1: Fertigungskonzept CCM-Rolle Generation 2: Definition der Anforderungen und Ziele, Festlegung der Spezifikation

##### 4.1.1: Aufbau der CCM-Rollen und Optimierung der Materialausnutzung:

Vier Verschiedene CCM-Designs (A, B, C und D) wurden für den Zuschnitt von vollflächigen CCM-Sheets aus den CCM-Rollen bewertet. Final wurden hiervon zwei ausgewählt.

Die Schnittstellen der verschiedenen Rollenprozesse wurden im Detail zwischen den Partnern abgestimmt. Der Aufbau der verschiedenen CCM-Rollen, die Membran- und Elektrodenbreiten, zulässige Toleranzen für die Lage und Größe der Elektroden auf der Membran sowie die zulässigen Klima- und Verarbeitungsbedingungen wurden spezifiziert.

Die Materialausbeute wurde für zwei verschiedenen Membranrollenbreiten optimiert. Hierfür wurden die Elektrodenbreiten spezifiziert, Einfach- oder Mehrfachnutzen bewertet, sowie die Ausrichtung der Elektroden beim Zuschnitt berücksichtigt.



Grafik Nr. 2: Darstellung Einfach- und Mehrfachnutzung

Bei der CCM-Sheet Ausbeute pro  $\text{m}^2$  Membran wurde eine Ausnutzung von bis zu 85 % erreicht. Die CCM-Sheet Ausbeute pro  $\text{m}^2$  Elektrode konnte auf bis zu 94 % gesteigert werden.

#### 4.1.2: Spezifikation der Verarbeitungsbedingungen und Toleranzbetrachtung beim Zuschnitt der CCM-Sheets:

Die Membran / CCM ändert ihre Größe in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur. Das Quellen und Schrumpfen der Membran / CCM ist anisotrop und somit unterschiedlich in Längs- und Querrichtung. Damit ElringKlinger / EKPO den CCM-Sheet mit den Stackkomponenten verbinden kann und auch die Dichtigkeit sicher gewährleistet ist, müssen hohe Toleranzanforderungen bei der Größe der CCM-Sheets erfüllt werden. Diese Toleranzen setzen sich im Wesentlichen aus den Toleranzen des Schneidprozesses und den Dimensionsänderungen in Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchtigkeit zusammen. Aus diesem Grund müssen die Anforderungen an die Umgebungsbedingungen bei der Herstellung und Verarbeitung der CCM-Rolle möglichst genau abgestimmt werden.

Um den Einfluss der Klimabedingungen auf die optimale Ausrichtung der CCM-Sheets in der Rolle (Materialausnutzung) und der Einhaltung der geforderten Toleranzen beurteilen zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen an drei unterschiedlichen CCM-Type durchgeführt.

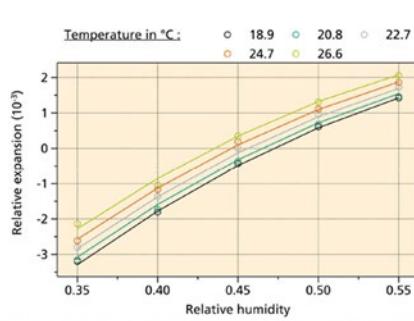


Abbildung 10: Relative Längenausdehnung der Probe (Richtung MD) in Abhängigkeit der Feuchte für verschiedene Temperaturen.

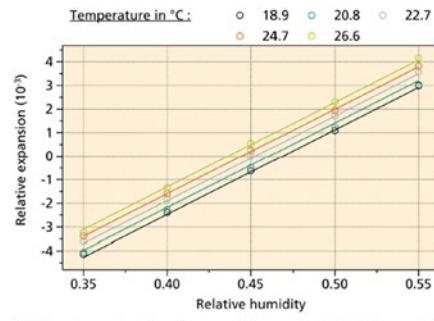


Abbildung 6: Relative Längenausdehnung der Probe (Richtung TD) in Abhängigkeit der Feuchte für verschiedene Temperaturen.

Grafik Nr. 3 und 4: Dimensionsänderungen der CCM / Membran am Beispiel Typ B in Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Maschinenrichtung MD und quer zur Maschinenrichtung TD.

Ergebnis: Die vom Projektpartner ElringKlinger / EKPO spezifizierten Profiltoleranzen der CCM-Sheets, können bei den definierten Temperatur und Luftfeuchtigkeitsbedingungen und der Berücksichtigung der Ausrichtung beim Zuschnitt, mit allen 3 CCM-Typen eingehalten werden.

#### 4.1.3: Definition und Einhaltung von Materialgrenzen:

Für die sichere Verarbeitung der CCM-Rollen ist es elementar die Materialeigenschaften zu kennen und Grenzwerte zu definieren.



Grafik Nr. 5: Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Belastung

An drei verschiedene CCM-Typen wurden umfangreiche Messreihen durchgeführt. Für die Auslegung der Greenerity Post-Handling-Maschine (PHM) und für die CCM-Rollenschneidanlage von ElringKlinger / EKPO, wurde eine maximalen Zugspannung spezifiziert.

#### 4.1.4: Erstellung von technischen Zeichnungen

Die Schnittstellen der verschiedenen Rollenprozesse wurden im Detail zwischen den Partnern abgestimmt. Der Aufbau der verschiedenen CCM-Rollen, max. Dimensionen und Gewichte, Membran- und Elektrodenbreiten, zulässige Toleranzen für die Lage und Größe der Elektroden auf der Membran sowie die zulässigen Klima- und Verarbeitungsbedingungen wurden spezifiziert.

Aktuell verfügt die CCM-Post Handling Maschine („PHM“) leider nicht über eine Messsystem, das in der Lage ist, die Toleranzen z.B. die Lage der Elektroden auf der Membran über die gesamte Länge der Rolle zu bestimmen.

**Weitere Arbeiten:** Auswahl und Implementierung eines weiteren Messsystems in die PHM um die spezifizierten Toleranzdaten (z.B. Lage der Elektroden auf der Membran) über die gesamte Länge der Rolle aufnehmen zu können.

#### 4.1.5: Entwicklung und Abstimmung einer geeigneten Transport- und Lagerverpackung

Unter dem Stichpunkt Produktsicherheit, wurden umfangreiche sicherheitstechnische Untersuchungen zum Brandverhalten, Selbstentzündungstemperatur, Mindestzündenergie und der elektrostatischen Aufladung durchgeführt.

Beispiel elektrostatischen Aufladung:

Bei der Fertigung von CCM-Rollen auf der PHM kann es durch das Auf- und Abwickeln der verwendeten Materialien zu elektrostatischen Aufladungen bzw. Entladungen kommen. Um den Einfluss auf die Produktsicherheit und die Produktqualität bewerten zu können, wurden CCMs vom Typ C mit ESD (Electro Static Discharge) beschlossen.

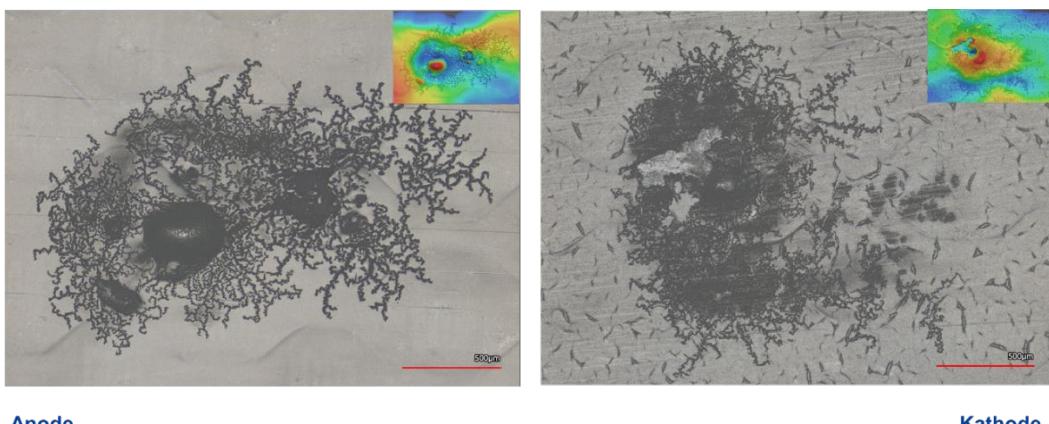


Bild Nr. 1 und 2: Mikroskopische Analyse der veränderten Katalysatorschichten

Die Ergebnisse zeigen, dass elektrostatische Entladungen die Produktqualität negativ beeinflussen können. Eine Vermeidung von ESD ist somit dringend empfohlen.

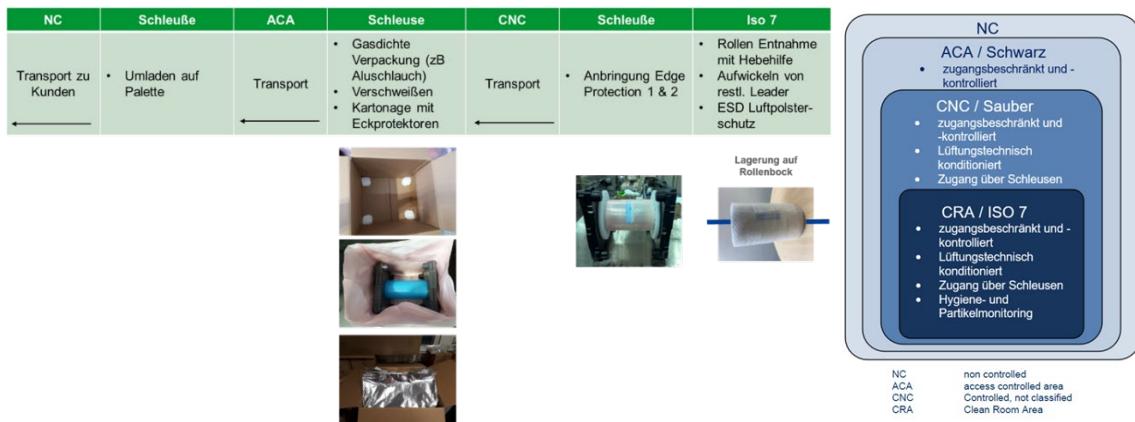
#### ESD und luftfeuchtigkeitsdichte Verpackung:

Die CCM-Rolle wird zum Produktschutz in eine ESD taugliche Luftpolsterfolie eingewickelt. Um die luftfeuchtigkeitsdichte Verpackung zu realisieren, wurde ein spezieller ESD tauglicher 3D Aluminium kaschierter Mehrlagenschlauch ausgewählt und eine dafür geeignetes Folienschweißgerät bestellt. Zusätzlich wurde ein Konzept für eine ESD ableitfähige Verpackungsumgebung (Tisch, Sicherheitsschuhe, Matten etc.) erarbeitet.

#### Technische Sauberkeit:

Definition: Bei elektronischen Baugruppen wird unter dem Begriff Technische Sauberkeit das Fehlen von Partikeln (metallisch, nicht-metallisch, Fasern etc.) auf Bauteilen verstanden, die den weiteren Fertigungsprozess bzw. die korrekte Funktion des Bauteils bzw. der Baugruppe beeinträchtigen oder verhindern können.

Zusammen mit ElringKlinger (EKPO) wurde das Verpackungskonzept im Hinblick auf die Anforderungen der technischen Sauberkeit bewertet und optimiert. Hierzu wurden ein Logistikkonzept erarbeitet, das die Anforderungen und Arbeitsschritte in den verschiedenen Fertigungsbereichen bei Greenerity und EKPO berücksichtigt. Die Greenerity - Logistik vom Reinraum (CRA) über verschiedene Schleusen bis zur Übergabe an den Spediteur (NC), sowie die ElringKlinger – Logistik vom nicht kontrollierten Bereich (NC) über verschiedene Schleusen bis in den Reinraum CRA).



Grafik Nr. 6 und 7: Logistikkonzept im Hinblick auf die technische Sauberkeit

Im Projekt wurde eine Aufnahme der IST – Zustände für die Greenerity Fertigungsumgebung am Standort Hanau-Wolfgang und für die Bauteile (CCM-Rollen) durchgeführt. Personal Ressourcen wurde aufgebaut. Vorläufige Prüffrequenzen, Grenzwerte und eine Ausreißerregelung wurden definiert. Zusätzlich wurde eine Roadmap für die kontinuierliche Weiterentwicklung und Optimierung der Umgebungsbedingungen und deren Überwachung aufgestellt.

Alle spezifizierten Anforderungen an die Luftdichtigkeit, ESD (Electro Static Discharge) und die technische Sauberkeit wurden in das finale Konzept integriert und eine Verpackungsnorm erstellt.



Bild Nr. 3 - 9 Verpackungsbeispiel

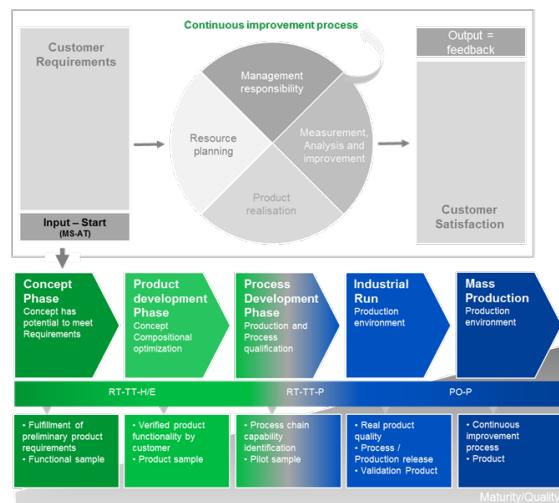
Mittel- und langfristig sollten die Verpackung und zugehörige Logistik noch weiter optimiert werden:

Offene Punkte für ein finales, langfristiges Design:

- Einweg / Mehrweg (Umlaufgebinde)
- Außenverpackung: Pappe, GLT (Plastik)
- Reinigung der Umlaufgebinde (Verpackung, Rollenkerne, ...)
- Transport innerdeutsch, europäisch, weltweit (Ein/Zwei-Konzeptlösung)
- Substitution Aluschlauch
- Bewertung der Gasdichtheit

#### 4.1.6: Erstellung von CCM-Produktspezifikationen

Im Projekt EMSigBZ wurden 3 verschiedene CCM-Typen qualifiziert. Gemäß APQP (Advanced product quality planning) haben alle CCM-Typen die verschiedenen Phasen der Konzept-, Produkt- und Prozessentwicklung durchlaufen.



Grafik Nr.8: Produkt- und Prozessentwicklung gemäß APQP (Advanced product quality planning)

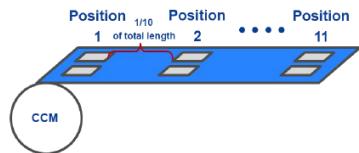
Für den final ausgewählte CCM-Produkt wurde zum Projektende die APQP-Phase 4 (Industrial Run) erreicht.

In der Projektlaufzeit wurden mehrere Produkt-Spezifikationen erstellt.

In den Spezifikationen wurden unter anderem alle funktionsrelevanten Eigenschaften der CCM-Produkte definiert und die Grenzen für die SC Merkmale (significant characteristics) festgelegt.

Diese Werte werden für jede Charge / Batch (Zusammensetzung der CCM) bestimmt und im CoA (Certificate of Analysis) dokumentiert.

Für alle Merkmale wurden Homogenitätsprüfungen über die Breite und Länge der CCM-Rolle durchgeführt und die erweiterten Messunsicherheit (Performance) bestimmt.



Grafik Nr. 9 Beispiel Probenahme für Homogenitätsprüfung

Des Weiteren sind folgende Dokumente und Inhalte Bestandteil der Spezifikation: Bestellnorm, Lieferformen, Aufbau und Zeichnung der CCM-Rollen, Technisches Produktdatenblatt, Fehlerkatalog, Art der Fehlermarkierung, Prüfzertifikate, Rückverfolgbarkeit der Produktzusammensetzung, Verpackungsvorschriften und Versandabwicklung.

#### **AP 4.2: Umsetzung einer „CCM Post- Handling“ (CCM PHM) Anlage für die Fertigung von CCM-Rollenmaterialien**

Die Integrationsziele einer CCM Post Handling Anlage sind:

- Das Umspulen von CCM-Rollen zu ermöglichen
- Längsschnitt sowie Randbesäumung von CCM-Rollen
- Die Möglichkeit zu schaffen, eine Schutzfolie (Liner) zu integrieren
- Umsetzung einer Inline-Qualitätskontrolle
- Umsetzung einer Inline-Fehlermarkierung

Die Anlagenkosten sind im Projektverlauf gestiegen und liegen deutlich über dem geplanten Budget. Zusätzlich wurde die Anlage leider etwas größer als geplant. Somit ergaben sich Schwierigkeiten, die PHM in den dafür vorgesehenen Klimaraum zu integrieren. Aus diesem Grund musste die Anlage noch einmal optimiert werden.

- Veränderte Bahnführung durch Verschiebung der Rollenantriebe sowie der Schneidstation
- Angepasste Unterbringung der Inspektionseinheiten für CCM Ober- und Unterseite
- Integration der umgestalteten PHM in den Greenerity Reinraum

Die Notwendige Anpassung des Reinraums für die neuen Anlagenmasse wurden in Q2 2021 abgeschlossen.

Nach der Umsetzung der notwendigen Umbau- und Optimierungsmaßnahmen wurde die Anlage im Mai 2021 ausgeliefert und in den Greenerity Reinraum integriert. Der SAT (Site Acceptance Test) wurde gestartet und intensive Arbeiten (Datensammlung, Teaching und Qualifikation) zur Erkennung und Markierung der spezifizierten Fehler auf der CCM-Rolle durchgeführt.

Details siehe AP 4.7: Industrialisierung.

### AP 4.3: Inline Elektroden Inspektion und Fehlermarkierung: Definition der Anforderung und Ziele, Festlegung der Spezifikation

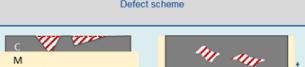
Im Projekt wurde eine Produkt Fehlerkatalog erarbeitet. Dieser beschreibt die möglichen Fehlerklassen und deren Ausprägungen. Dieser bildet die Grundlage für die Festlegung von Grenzmustern und der Beschreibung von n.i.O. CCM-Produkten (siehe AP 4.5).

### AP 4.4: Erarbeitung eines Konzepts und Umsetzung einer Fehlermarkierung für den Elektroden-Herstellungsprozess

In diesem Arbeitspaket findet die Technologieauswahl für die Fehlermarkierung der Elektroden statt. Als Technologie für die Umsetzung wurde in der Vorhabenbeschreibung des Projektes eine kontrollierte Elektrodenabnahme als permanente Fehlermarkierung für den Elektroden-Herstellungsprozess definiert. Für den aktuellen Fertigungsprozess wird diese Technologie aus Kosten- und Ressourcengründen jedoch noch nicht eingesetzt. Die Fehlererkennung und Markierung bei der Elektrodenherstellung wird durch die Inline-Kontrolle und Markierung der PHM kompensiert.

### AP 4.5: Inline CCM-Inspektion und Fehlermarkierung: Definition der Anforderungen und Ziele, Festlegung der Spezifikation (Konzept)

Die Fehlerklassen bei der CCM-Herstellungsprozess wurden mit den Projektpartnern abgestimmt. Die hier aufgezählten Fehler sind im Fehlerkatalog detailliert beschrieben. Die Fehlertoleranzen dienen als Grundlage für die Definition von zulässigen und nicht zulässigen Fehlerbildern. Bei der Erzeugung von definierten Löchern in der Membran und der CCM, sowie deren Erkennung, wurde sehr eng mit dem KIT / wbk zusammengearbeitet.

Pos.	Item	Description	Defect scheme
1	Catalyst void (anode or/and cathode)	Min. size of missing catalyst areas (catalyst layer has missing areas, the blank membrane is visible but not damaged)	
2	Particulate contamination (Area)	Min. size of particle contaminating the CCM (e.g. fiber, hair, etc.)	
3	Particulate contamination (Length)		
4	Membrane defect or CCM folds	Deformation of the CCM (inversible)	
5	Imprint on CCM (currently classified as Palpable flaw/defect)	Min. size of palpable deformation (e.g. decal imprint on catalyst layer, edge)	
6	Handling traces on CCM	Handling marks (e.g. finger prints, etc.) which could be seen on the active area	

Grafik Nr. 10: Aufstellung der im CCM-Herstellungsprozess auftretenden Fehlerklassen

Ferner legt es die Grundlage für die Spezifikation des in der Post-Handling Maschine eingesetzten Inspektionssystems fest. CCM-Muster wurden für das Teaching des Inspektionssystem bereitgestellt. Viele Fehlertypen wurden zusätzlich elektrochemisch getestet, um den Einfluss auf die Funktionalität bewerten zu können. Die Erkenntnisse sind in die Spezifikation eingeflossen.

Die PHM ist in der Lage, die spezifizierten Fehler:

- auf den Elektroden
- auf der Membran (Kennzeichnung durch den Lieferanten)
- und Defekte, die während der CCM-Herstellung (Lamination) entstehen können,

zu erkennen und diese in eine einheitliche Fehlermarkierung auf der CCM-Rolle zu übertragen.

In einem Materialprotokoll werden die Fehlerkategorie, die Lage und die Länge der Fehler dokumentiert.

#### **AP 4.6: Inline CCM-Inspektion und Fehlermarkierung (Umsetzung)**

Über den Projektzeitraum wurden dem Projektpartner ElringKlinger / EKPO Dummy CCM Rollen (3 x 200 lfm schwarze PET-Film) für die ersten Handlings- und Rollenschneidversuche zur Verfügung gestellt. Das Fehlermarkierungssystem wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Dem Partner EKPO wurden insgesamt CCM-Rollen mit einer Länge von ca. 800 Metern für die Anlagenoptimierungen bereitgestellt. Eine finale Ausführung der Fehlermarkierung wurde abgestimmt und in einer Bestellnorm und Produktspezifikation dokumentiert.

#### **AP 4.7: Industrialisierung**

Die Arbeiten zum Thema Industrialisierung wurden Anfang 2021 gestartet. Die PHM-Anlage wurde am 17 August 2020 bestellt und am 21 Mai 2021 bei Greenerity angeliefert. Im Mai 2021 hat der FAT (Factory Acceptance Test) beim Lieferanten der Anlage stattgefunden. Im Juni 2021 wurde im Rahmen der PQ (Performance – Production Qualification) die allgemeine Funktionsfähigkeit der Anlage (SAT- Side Acceptance Test) bei Greenerity geprüft. Basierend auf Maschinen-Spezifikation sowie abgestimmter CCM-Rollen Spezifikation. Hierfür wurde eine Referenz CCM Rolle hergestellt. Die Fehlerklassen, die Anzahl, die Größen und die Position auf der CCM-Rolle wurden mittels visueller Prüfung (Mitarbeiter) bestimmt. Mit dieser Referenz CCM Rolle wurde das inline Elektroden Inspektionssystem angelernt und Datensammlungen erstellt. Das Kamera- und Beleuchtungssystem, die Auswertesoftware sowie das Fehlermarkierungssystem wurden kontinuierlich optimiert.

Die SAT und die Optimierung der PHM konnten leider nicht wie geplant vollumfänglich im Juni abgeschlossen werden. Das System war noch nicht in der Lage alle spezifizierten Fehlerklassen sicher zu erkennen und zu markieren.

Beispiel: Fehlerklasse Nr.: 1.1 Fehlende Katalysatorschicht



Bild Nr. 10: Dieser im Fehlerkatalog spezifizierte Fehler wurde vom System nicht immer sicher erkannt und markiert

Um die notwendigen MSA1 und MSA7 (Messsystem Analyse / Messmittel Fähigkeitsanalyse) durchzuführen zu können, mussten weitere Optimierungen an der Hard- und Software vorgenommen werden. Zur Verbesserung der Fehlererkennung muss die Auflösung der Kameras erhöht werden. Hierfür ist ein erneuter Umbau der PHM-Anlage notwendig (Verringerung des Abstandes zwischen Kamera und der CCM-Rolle). Der mechanische Umbau der Kamera- und Beleuchtungssysteme wurde im September 2021 abgeschlossen.

Durch eine Verdoppelung der Kameraauflösung, konnte die Bestimmung der exakten Fehlergröße deutlich verbessert werden.

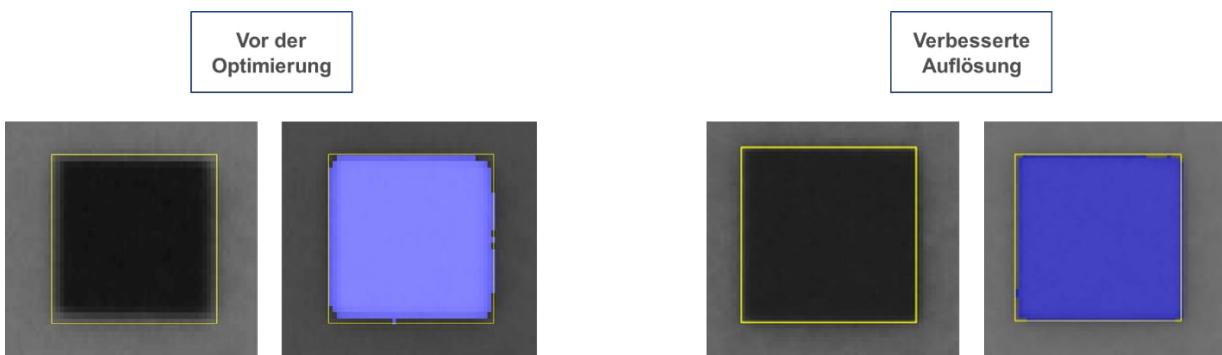
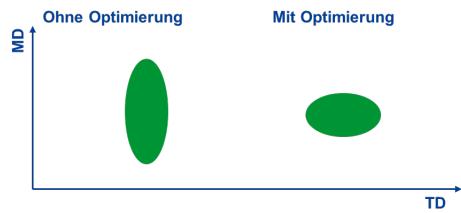


Bild Nr. 11 und 12: Bild des in der PHM verbauten Kamerasytems vor und nach der Optimierung

Darüber hinaus müssen auch weitere Anpassungen an der Software durchgeführt werden.

Beispiel: Durch die Erhöhung der Auflösung und Optimierung der Software konnte ein systematischer Offset zwischen der Maschinenrichtung MD und der Querrichtung TD korrigiert werden.



Grafik Nr. 11: Offsetoptimierung bei der Bestimmung der Fehlergröße und Position

Im Januar 2022 wurden weitere Optimierungen an der Software der PHM umgesetzt und eine zweite MSA7 (Messsystem Analyse / Messmittel Fähigkeitsanalyse) erfolgreich durchgeführt.

Ziel der MSA 7: Beurteilung der Reproduzierbarkeit sowie Genauigkeit der Fehlererkennung und Markierung.

#### **Verfahrensdetails/Materialbeschreibung:**

CCM-Typ: C  
Design: C  
CCM-Laufmeter: 70 m  
Anzahl der Messdurchläufe: 4 Runs (jeder Lauf benötigt einen Rücklauf; Insgesamt 8 Materialdurchfahrten)  
Anzahl der untersuchten Merkmale: 473

Die MSA 7 wurde im Februar 2022 erfolgreich abgeschlossen. Der Abgleich der untersuchten Merkmale mit dem spezifizierten CCM-Fehlerkatalog wurde durchgeführt. Durch dieses Referenzieren entstand ein Inspektionsrezept / Setting der PHM. Die finale Bewertung mit dem Projekt-partner EKPO (ElringKlinger) und die Freigabe der PHM erfolgte am 18.02.2022.

Die erste CCM-Rolle wurde im März 2022 bei Greenerity gefertigt, mittels PHM inline geprüft, markiert und an EKPO ausgeliefert. Eine weitere CCM-Rolle wurde im Juni 2022 an EKPO verschickt.

## **Zielerreichung**

Alle Projektziele und Meilensteine der Vorhabenbeschreibung wurden erreicht.

Greenerity Ziele AP4:

- Umsetzung einer „CCM-Post-Handling“ Anlage für die Fertigung von CCM-Rollenmaterialien
- Erarbeitung eines Konzeptes und Umsetzung einer Fehlermarkierung für den Elektroden-Herstellungsprozess
- Erarbeitung eines Konzeptes und Umsetzung einer Inline-Inspektion und Fehlermarkierung für den CCM-Herstellungsprozess
- Industrialisierung: Der Technologiereifegrade der CCM-Rollen-Fertigung soll zum Projektende auf das Level TRL 4 - 5 angehoben werden

## **Weitere Arbeiten nach Projektende und Anschlussmöglichkeiten für Folgeprojekte**

- Implementierung eines weiteren Messsystems in die PHM, zur Lagebestimmung der Elektrode auf der Membran
- Technische Sauberkeit: Routinemäßige Analyse der Bauteile (CCM-Rollen) und kontinuierliche Verbesserung der Prozesse und Methoden, um die Anforderungen vollumfänglich einhalten zu können
- Industrialisierung: Weiterentwicklung der CCM-Rollenprozesse zur Serienreife / Massenfertigung (TRL 8-9)

## **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Greenerity rechnet aufgrund der steigenden Nachfrage nach Brennstoffzellen, durch die kommerzielle Einführung von mehreren zehntausend Fahrzeugen pro Jahr und der daraus resultierenden hohen Anzahl an Membran-Elektroden-Einheiten pro BZ-Stack mit einem Bedarf von mehreren Millionen MEAs bei jedem Brennstoffzellen- und Fahrzeugherrsteller. Seit der Gründung der Greenerity sowie deren Vorgängerorganisation (Solvicore GmbH & Co. KG) ist die Anzahl der Mitarbeiter seit 2006 im Wesentlichen in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Produktion von 35 auf ca. 220 im Jahr 2023 angestiegen. Mit dem international agierenden Großkonzern Toray Industries, Inc. aus Japan als Eigentümer hat die Greenerity die Voraussetzungen, zunächst am Standort Deutschland den bestehenden Forschungs- und Fertigungsstandort in Hanau und Alzenau auszubauen und die Fertigung der Schlüsseltechnologie für die Brennstoffzelle nachhaltig in Deutschland zu etablieren und zu verankern.

Ausgehend von den in Deutschland aufzubauenden Technologieplattformen in Forschung, Entwicklung und Produktion wird in den kommenden Jahren ein Export von Produkten in Wachstumsmärkte, aber auch eine Etablierung von Fertigungsstandorten in der Nähe der Bedarfsmärkte stattfinden. Auf diesem Weg und im Besonderen durch die enge Kooperation der nationalen Projektpartner im Bereich Fertigung kann sich der Technologiestandort Deutschland auch beim Thema Brennstoffzelle international behaupten.

Für die Entwicklung und Fertigung von Membran-Elektroden-Einheiten werden bei Greenerity Rohstoffe von Lieferanten aus dem In- und Ausland eingesetzt. Vorrangiges Ziel ist es, die Zuliefererkette in Deutschland zu stärken und z.B. GDL-Komponenten von Freudenberg oder Rohstoffe / Katalysatoren von Umicore zu verwenden. Oftmals muss aber leider auf ausländische Lieferanten z.B. bei der Membran zurückgegriffen werden, da wettbewerbsfähige Materialien in Deutschland nicht zur Verfügung stehen. Bei der Weiterentwicklung und dem Ausbau der MEA-Entwicklung (Forschungs- und Testlaboratorien) und der MEA-Fertigungskapazität in der Produktion, werden hauptsächlich nationale und lokal ansässige Lieferanten und Dienstleister ausgewählt.

Greenerity sieht in der Durchführung des Projektes eine sehr große Chance, die MEA-Fertigungstechnologie entscheidend weiterzuentwickeln. Die hohen Anforderungen an die Leistung und Lebensdauer der MEAs, die Komplexität der Fertigungstechnologie sowie der steigende Kosten- druck stellen ein hohes technisches und wirtschaftliches Risiko dar. Dabei ist die erfolgreiche Durchführung solcher Entwicklungsvorhaben personalintensiv und erfordert hochqualifizierte Mitarbeiter und den Einsatz modernster und kostspieliger Methoden. Der erforderliche Mittelrückfluss kann erst nach einer erfolgreichen, breiten Markteinführung erfolgen, die wiederum von der Erreichung aller Ziele hinsichtlich Kosten, Leistung und Lebensdauer abhängt. Außerdem gibt es ein sehr hohes Risiko, dass evaluierte Technologien und getätigte Investitionen revidiert werden müssen, da es aktuell noch keine Erfahrungswerte für die Massenfertigung von Brennstoffzellensystemen und deren Komponenten gibt. Die neue Technologie wird außerdem mit vielen, bereits etablierten, Technologien und damit verbundenen starken Lobbyinteressen konkurrieren müssen. Deshalb kommen zu den technischen Risiken noch die allgemeinen Marktrisiken für die Einführung der automobilen Brennstoffzelle inklusive der noch fehlenden Wasserstoffinfrastruktur. Einen weiteren wichtigen Risikofaktor stellen die sehr intensiven nationalen Förderprogramme in anderen Wirtschaftsräumen dar. So gibt es in China, Japan, Korea, Kanada, Großbritannien und den USA sehr direkte staatliche Zuschüsse, um den Aufbau der Zuliefererindustrie im Bereich Elektromobilität inklusive der Brennstoffzelle durch nationale Firmen zu stärken. Mit Hilfe der Zuwendung des Bundes kann die Position der Zuliefererentwicklung in Deutschland gestärkt werden und die diversen direkten Risiken auf ein Maß reduziert werden, das überhaupt erst für Greenerity die Durchführung des Projektes ermöglicht.

Die größte Herausforderung bei der Markteinführung der Brennstoffzelle stellen die sehr hohen Herstellkosten dar. Die Entwicklungen im Bereich Photovoltaik haben eindrucksvoll bestätigt, dass die aus dem Automotive-Sektor bekannten Skaleneffekte durch vollautomatische Großserienproduktion ein entscheidender Schlüssel zur Senkung der Herstellkosten sind. Zudem kommen die derzeit vorwiegend manuellen Produktionssysteme aufgrund der stetig wachsenden Bedarfe an ihre Grenzen.

Um bei den Automobilkunden in der Phase der Auswahl, Entscheidungsfindung und Einführung der BZ-Technologie erfolgreich zu sein, muss der Lieferant den Endkunden bei wechselnden, langsam ansteigenden Bedarfen mit qualitativ einwandfreien Produkten zu gleichzeitig attraktiven Preisen beliefern können. Die Komplexität der Aufgabenstellung und der finanzielle Aufwand kann von dem einzelnen Partner nicht ohne Unterstützung durch öffentliche Förderung bewältigt werden.

Alle geleisteten Arbeiten, standen in unmittelbarem Zusammenhang mit den in diesem Projekt definierten Aufgaben und waren für die Zielerreichung notwendig. Es wurde ein angemessener Entwicklungsaufwand für die Erreichung der verschiedenen Meilensteine aufgewendet.

## **Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans**

Greenerity ist seit vielen Jahren als Entwickler und Lieferant von Membran-Elektroden-Einheiten für Brennstoffzellen in verschiedenen Anwendungsbereichen tätig. Die im geplanten Projekt angestrebte Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren von Membran-Elektroden-Einheiten für die automobile Anwendung wird den Reifegrad der gegenwärtigen Technologie deutlich erhöhen. Die Herausforderung für die Greenerity wird es sein, die Tätigkeit, die in den vergangenen Jahren sehr entwicklungslastig war, sowie die Produktion, die in der Vergangenheit eher im Pilotmaßstab einzuordnen war, in den industriellen Maßstab zu überführen. Um der sich aktuell stark beschleunigenden Markteinführung der Brennstoffzellen-Technologie folgen zu können, ist hierfür die Etablierung einer nachhaltigen Fertigungsplattform mit solider Qualitäts- und Kostenbasis erforderlich, die dann im ersten Schritt für die Volumenfertigung in Deutschland und perspektivisch für den Aufbau von Fertigungsstandorten in den Bedarfsmärkten genutzt werden können.

Auf diesem Weg und den damit verbundenen Optimierungen im Bereich Fertigungstechnologie (Automatisierung) kann eine Reduzierung der System- und MEA (CCM)-Kosten erreicht werden. Greenerity geht davon aus, dass durch die Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts der Jahresbedarf an m<sup>2</sup> CCM auf Rolle für die ElringKlinger BZ-Stacks in den nächsten Jahren deutlich ansteigen wird. Grundlage für diese Annahme ist, dass der Stack skalierbar ist und flexibel sowohl für mobile (Busse, LKWs, Gabelstapler,...) als auch für automobile Anwendungen einsetzbar sein wird.

Ein leistungsfähiges und kostengünstiges Brennstoffzellensystem bedeutet einen signifikanten Know-how-Zuwachs für die deutsche Automobil- und Zulieferbranche, verbunden mit einem positiven Effekt auf den Arbeitsmarkt und das Wirtschaftswachstum. Die Projektergebnisse stärken die Marktposition deutscher Firmen gegenüber dem Wettbewerb in USA und Asien. Die von Greenerity entwickelten und in Deutschland hergestellten MEAs können über das Projekt hinaus auch von anderen Firmen (Systembauern) eingesetzt werden und ermöglichen somit einen breiten Markteintritt im Bereich der Brennstoffzellentechnologie. Die fundamentale Entwicklung und nachhaltige Etablierung der MEA- und der damit verbundenen Fertigungstechnologie am Standort Deutschland verbessert die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Deutschland im globalen Wettbewerb rund um das Thema Elektromobilität, zu dem die Brennstoffzelle in Zukunft einen wesentlichen Beitrag leisten wird.

Die Entwicklung der notwendigen Systeme zur Handhabung der einzelnen BZ-Komponenten in der engen Partnerschaft zwischen ElringKlinger und dem wbk als Automatisierungsexperten eröffnet neue Chancen der Verwertung über die Partner.

## **Wissenschaftliche/technische Verwertungsaussichten**

Um eine breite Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie zu ermöglichen, ist eine Reduzierung der System- und Komponenten-Kosten unerlässlich. Die Komponentenkosten werden maßgeblich durch die aktuell sehr hohen Materialkosten und die zurzeit noch fehlende Automatisierung der Fertigungsprozesse verursacht. Die Kostentreiber der Fertigung der MEAs liegen vornehmlich in den niedrigen Fertigungsvolumina und damit verbundenen geringen linearen Fertigungsgeschwindigkeiten, vergleichsweise hohen Ausschussraten und hohem Aufwand in der Qualitätssicherung zur Prüfung der Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte. Das Potenzial zur Kostenreduktion bei Greenerity liegt vor allem in der Optimierung und Weiterentwicklung bestehender Prozesse, beispielsweise durch die Erhöhung der linearen Fertigungsgeschwindigkeit (Be-

schichtungs- und Laminationsprozesse), die Implementierung eines Verfahrens für die intermittierende Beschichtung von Membranen, Direktbeschichtung oder den Einsatz geeigneter „in process“ Kontrollen für das Erreichen von robusten Fertigungsprozessen. Die wesentliche Herausforderung im Rahmen des Projekts liegt in der exponentiellen Steigerung der Produktionsmengen von einem noch Einzelstück basierten Prozess heute zur industriellen Fertigung von Rollenware in der Zukunft. Dabei sind eine Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeiten um den Faktor 10 bis 20, die Integration von Messtechnik in die Linie zur 100 % in-process Qualitätssicherung, die Abstimmung der die Qualität sichernden Maßnahmen sowie eine Weiterentwicklung der Produktions- und Messtechniken erforderlich.

**Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die Elektromobilität gewinnt weltweit rasant an Bedeutung. Die Entwicklung der Brennstoffzellen-technologie wird von vielen Firmen forciert. Viele deutsche Automobilhersteller schließen Allianzen mit Firmen aus Übersee oder Asien, um den Entwicklungsrückstand in Deutschland zu kompensieren. Aus diesem Grund sollten die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie in Deutschland weiter gefördert und die Marktposition gestärkt werden. Gute Fortschritte wurden z.B. in den Förderprojekten Autostack Core und Projekt Autostack Industrie auf dem Gebiet dieses Vorhabens gemacht. Auch viele Hersteller von MEA-Komponenten (Membran, Ionomer, GDL und Katalysatoren) haben während des Vorhabens interessante und vielversprechende neue Produkte entwickelt und Fertigungskapazitäten ausgebaut, um die stark steigenden Bedarfe erfüllen zu können.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



## Kurzbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98 (öffentliche Version)

### BMVI Verbundprojekt EMSigBZ: Kurzbericht der Greenerity GmbH - Teilprojekt Fertigungskonzepte CCM (AP4)

**Greenerity GmbH**

Zuwendungsempfänger

**03B11012B**

Förderkennzeichen

#### Vorhabenbezeichnung:

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) – Phase II:  
**Entwicklung eines modularen und skalierbaren Produktionssystems zur Herstellung von  
Brennstoffzellen-Stacks**

Laufzeit des Vorhabens und Projektpartner: 01.03.2019 – 31.08.2022



#### Aufgabenstellung und Projektziele: EMSigBZ

Konkrete Herausforderungen auf dem Weg (zur Industrialisierung und Kundenwertigkeit) sind:

- Hohe Flexibilität in der Produktion von Brennstoffzellen bei gleichzeitig hoher erforderlicher Genauigkeit für das Ablegen und Stapeln der Bipolarplatten, Gasdiffusionslagen und der CCM (Catalyst-Coated-Membrane)
- Reduktion der Stückkosten
- Qualifizierung geeigneter Handhabungs- und Messtechnikkonzepte
- Qualifizierung geeignetes Messsystem zur In-Line-Prüfung qualitätsrelevanter Produkt- und Prozessmerkmale

Greenerity Entwicklungsziele im Arbeitspaket 4.0: Fertigungskonzept CCM (Catalyst-Coated-Membrane) Rolle.

Projektziel: Entwicklung und Integration einer Post-Handling-Maschine (PHM) in den CCM-Rollen Handling Prozess. Die Anlage soll das Umspulen, den Längsschnitt sowie die Randbesäumung von CCM-Rollen sowie die Zuführung einer Schutzfolie ermöglichen. Die PHM soll die Möglichkeit bieten, eine Inline-Qualitätsinspektion und eine Fehlermarkierung zu integrieren und damit eine automatisierte Verarbeitung von CCM-Rollen zu ermöglichen.

#### **Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Der Partner Greenerity ist ein führender Lieferant von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) für die nachhaltige Energieversorgung in den Bereichen Automotive, Mobilität und Hausenergie. Greenerity verfügt über das Produkt-Know-how der MEA und ihrer Herstellungsverfahren im Status Quo. Für die Herstellung der CCM existieren jedoch lediglich manuelle oder kleinserienfähige

Prozesse und Prozessabfolgen, ausgereifte Fertigungskonzepte sind nicht bekannt. Bestehende Methoden, Fertigungsabfolgen und Optimierungsansätze (Ist-Zustand), speziell für die Herstellung, Verarbeitung und Qualitätskontrolle von CCM-Rollenmaterial, sind bis dato nicht bewertet. Im Projekt EMSigBZ werden hierfür unter anderem auch Erkenntnisse und Ergebnisse aus bereits abgeschlossenen Projekten (z.B. MAS-TECH) genutzt und weiterentwickelt. Im BMVI-Projekt MAS-TECH wurden Fertigungskonzepte für die Herstellung von CCM-Rollenmaterial entwickelt. Des Weiteren wurden Konzepte für die kontinuierliche Qualitätskontrolle der Katalysatorschichten und der MEA erprobt.

### **Wesentliche Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

In diesem Projekt wurde speziell die CCM (Catalyst-Coated-Membrane) Fertigung als Rolle zu Rolle Verfahren optimiert. Die aktuellen Prozesse der CCM-Fertigung wurde weiterentwickelt und stabilisiert, um die notwendige Prozesssicherheit zu erreichen. Die Optimierung der Materialausnutzung, in erster Linie die Vermeidung, aber auch Erkennung, Markierung und Reduzierung von Produktfehlern standen im Vordergrund.

Die PHM ist in der Lage, die spezifizierten Fehler:

- auf den Elektroden
- auf der Membran (Kennzeichnung durch den Lieferanten)
- und Defekte, die während der CCM-Herstellung (Lamination) entstehen können,

zu erkennen und diese in eine einheitliche Fehlermarkierung auf der CCM-Rolle zu übertragen. In einem Materialprotokoll werden die Fehlerkategorie, die Lage und die Länge der Fehler dokumentiert.

Das neue CCM auf Rolle Produkt kann nun für den automatisierten Stackaufbau zur Verfügung gestellt werden. Die steigenden Anforderungen an Volumen, Qualität- und Wirtschaftlichkeit können mit diesem Produkt besser erfüllt werden. Greenerity konnte mit der Durchführung des Projektes die MEA-Fertigungstechnologie entscheidend weiterentwickeln.

Die drei Projektpartner arbeiten in einem Netzwerk aus nationalen Zulieferern und Forschungspartnern wie Instituten und Hochschulen. Die Abstimmung in diesem Netzwerk ist auch in dem geplanten Projekt gegeben, z.B. bezüglich der Auswahl der zu verwendenden Komponenten oder Anlagentechnik, der Durchführung der begleitenden Untersuchungen und der Erprobung. Für den Herstellungsprozess der Brennstoffzelle bei ElringKlinger / EKPO sind sowohl auf der Seite der BZ-Komponenten als auch bei Fertigungsanlagen und Infrastruktur vorrangig nationale Lieferanten involviert.