Freiburg, 14.11.2025

Verbundvorhaben H2-Brennstoffzellen-Stack für Luftfahrtanwendungen „H2Sky“

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2

Teilvorhaben der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

Stand:	31.07.2025
Einreichungsdatum:	14.11.2025
Partnerin/Partner:	Teilvorhaben der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V
Autorinnen/Autoren:	Andreas Münchinger
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2-Brennstoffzellen-Stack für Luftfahrtanwendungen „H2Sky“
Laufzeit:	01.03.2022 bis 31.07.2025
Förderkennzeichen:	03B10706F
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I. Zielsetzung und chronologischer Projektablauf

Das Verbundvorhaben „H2Sky“ zielt auf die technologische Weiterentwicklung emissionsfreier Antriebssysteme für die Luftfahrt. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines luftfahrttauglichen Polymerelektrolyt-Membran-(PEM-)Brennstoffzellenstacks als Hauptantriebsquelle für Passagierflugzeuge. Ziel des Projekts ist die Anpassung eines bestehenden automobilen Stackdesigns an die besonderen Anforderungen der Luftfahrt – insbesondere an höhere Betriebstemperaturen, geringere Feuchtegrade sowie erhöhte Anforderungen an Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

Die Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. (kurz Hahn-Schickard) war innerhalb des Projekts für das Arbeitspaket (AP) 1.1.3 „Optimierung von Kohlenwasserstoff-basierten CCMs“ verantwortlich. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung, Herstellung und Optimierung von kohlenwasserstoffbasierten Modell-Elektroden und Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs), die eine fluorfreie und nachhaltigere Alternative zu konventionellen PFSA-basierten Systemen darstellen. Hierbei wurden verschiedene Materialzusammensetzungen unter den Betriebsbedingungen der Luftfahrt charakterisiert und Fertigungsansätze im Labormaßstab umgesetzt. Das gesamte Arbeitspaket unterteilt sich in drei Abschnitte.

- AP 1.1.3.a: Materialscreening kohlenwasserstoffbasierter Elektrolytmaterialien
- AP 1.1.3.c: Herstellung von Modell-Elektroden und Modell-MEAs
- AP 1.1.3.d: Optimierung kohlenwasserstoffbasierter Einzelzellen

Die von Hahn-Schickard hergestellten Modell-Elektroden und MEAs werden von den Projektpartnern – im speziellen das Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg und die Technische Universität München (TUM) – hinsichtlich auftretender Verlustmechanismen charakterisiert. Auf Basis der dadurch gewonnenen Ergebnisse erfolgt die Optimierung der Tintenrezeptur und der Fertigungsansätze durch den Arbeitskreis von Hahn-Schickard. Dem gesamten Arbeitspaket liegt demzufolge ein iterativer Optimierungsprozess zu Grunde.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

II. Resultate

Im Folgenden werden die im Rahmen des Projektes „H2Sky“ erzielten Ergebnisse dargestellt. Die Beschreibung erfolgt arbeitspaketweise und orientiert sich an den im Projektantrag definierten Zielen und Meilensteinen.

AP 1.1.3.a: Materialscreening kohlenwasserstoffbasierter Elektrolytmaterialien

Konventionelle Brennstoffzellenmembranen und -Ionomere basieren überwiegend auf perfluorierten Sulfonsäuren (PFSA), welche in der sauren Brennstoffzellenumgebung exzellente protonische Leitfähigkeiten und eine ausreichend gute chemische Stabilität besitzen. Allerdings sind PFSAs aufgrund ihrer fluorhaltigen Chemie kostspielig[1] und weißen große technische Herausforderungen unter zukünftigen Betriebstemperaturen von über 100 °C auf.[2] Zudem sind sie weder biologisch noch abiotisch abbaubar[3] und werden zunehmend im menschlichen Körper[4] sowie in der Umwelt[3,5] nachgewiesen. Aufgrund ihrer Persistenz und den potentiellen Gesundheitsrisiken prüft die Europäische Chemikalienagentur ein mögliche Beschränkungen von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS), zu denen auch PFSAs zählen.

Die wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nachteile von PFSAs führen zur Suche nach alternativen protonenleitfähigen Materialien für PEM-Brennstoffzellen. Kohlenwasserstoff-Ionomere stellen aufgrund ihrer geringen Gasdurchlässigkeit, erhöhten thermomechanischen Stabilität und ihrer potentiell kostengünstigen Skalierung eine vielversprechende fluorfreie Alternative zu PFASs dar (Abbildung 2).[6] Neue Entwicklungen, vor allem innerhalb der letzten Dekade, führten zu zahlreiche Studien welche die Funktionalität von sulfonierten Kohlenwasserstoffen als Kationenaustauschmaterialien in PEM-Brennstoffzellen bestätigten.[7–9] Während sich erste Untersuchungen ausschließlich auf den Ersatz von PFSA-Membranen durch verschiedene Kohlenwasserstoff-Ionomere konzentrierten, erforschen aktuelle Arbeiten auch deren Einsatz als Elektrolyt in den Elektroden. Unter den potenziellen Polymeren haben sich besonders sulfonierte phenylierte Polyphenylene (sPPP) und deren Derivate als führende Kandidaten herauskristallisiert.[6] Bisherige ex-situ Messungen bescheinigen den Materialien eine PFSA-vergleichbare Protonenleitfähigkeit in feuchter Umgebung und eine ausgezeichnete thermomechanische Stabilität oberhalb von 100 °C. Jüngste in-situ Untersuchungen zeigen, dass vollständig sPPP-basierte PEM-Brennstoffzellen unter Laborbedingungen gleiche Spitzenleistungen wie PFSA-basierte Referenzen erzielen.[8,9] Allerdings besteht eine erhebliche Leistungslücke unter luftfahrtrelevanten Betriebsbedingungen.[9] Unter diesen Bedingungen ist die relative Luftfeuchtigkeit (RH) der einströmenden Gase reduziert (≤ 50 %), die Temperatur erhöht (≥ 95 °C), und an der Kathode liegt Druckluft anstelle von reinem Sauerstoff an. Es liegt ein bemerkenswerter Mangel an Daten in der Forschungsgemeinschaft zu kohlenwasserstoff-basierten PEM-Brennstoffzellen unter anwendungsrelevanten Betriebsbedingungen vor, wobei die dominierenden Verlustmechanismen teilweise unbekannt, unerforscht oder nicht quantifiziert sind. Gemessen an den bisher vielversprechenden Ansätzen wird im vorliegenden Projekt auf eine kommerziell erwerbbare Version von sPPB zurückgegriffen. Dieses wird unter den Markennamen Pemion® von Ionomr Innovations Inc. vertrieben wird.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fazit: Auf Basis der durchgeführten Literatur- und Marktrecherche wurde im Projekt „H2Sky“ ein sulfoniertes, phenyliertes Polyphenylene-Elektrolytmaterial ausgewählt. Dieses wird in kommerzieller Form von der Firma Ionomr Innovations Inc. unter dem Markennamen Pemion® vertrieben wird. Ex-situ-Studien bescheinigen dem Material in Bulkform eine geringe Gasdurchlässigkeit, während die protonische Leitfähigkeit unter feuchten Bedingungen mit der von PFSA-basierten Referenzen vergleichbar ist. Bestehende in-situ-Untersuchungen in Zellform und unter Laborbedingungen (kleine Zellfläche, moderate Betriebstemperaturen, volle Befeuchtung der Reaktionsgase) weisen dem Material vergleichbare Leistungsdichten wie PFSA-basierte Referenzsysteme nach. Ein deutliches Leistungsdefizit liegt jedoch unter luftfahrrelevanten trockenen Betriebsbedingungen vor.

AP 1.1.3.a: Herstellung von Modell-Elektroden und Modell-MEAs

Die Herstellung von Modell-Elektroden und Modell-MEAs erfolgte im Sprühbeschichtungsverfahren. Dabei werden die Elektrodenmaterialien (Ionomer, Lösungsmittel, Elektrokatalysator) zu einer sprühbaren „Tinte“ vermengt und anschließend direkt auf die kohlenwasserstoffbasierte Membran aufgesprüht. Die Arbeitsgruppe von Hahn-Schickard charakterisierte verschiedenartige Tintenformulierungen, welche hinsichtlich Lösungsmittel, Kohlenstoffträger und Ionomergehalt variierten.

Für das Sprühbeschichtungsverfahren sind primär niedrigsiedende Lösungsmittel von Relevanz. Im Gegensatz zu anderen kohlenwasserstoffbasierten Ionomeren wie sulfonierten Polyetheretherketonen (sPEEK), sulfonierten arylenethersulfonen (SPAES) oder sulfonierten Polyphenylenesulfonen (sPPS), ist das im Projekt verwendete Ionomer in Alkohol löslich. Eine angelegte Lösungsmittelstudie ergab ein Leistungsoptimum von kohlenwasserstoffbasierten Elektroden unter Verwendung von Isopropanol (IPA) in einem Massenverhältnis von 1:1 mit Wasser (Abbildung 1). Dabei weißt das IPA-Lösungsmittelsystem im Vergleich zu Methanol- / Ethanol-basierten Systemen eine erhöhte Leistung im Bereich größerer Stromdichten auf. Die dem Lösemittelsystem extrahierte Dielektrizitätskonstante ist deutlich niedriger im Vergleich zu leistungsoptimierten PFSA-Tintensystemen (Abbildung 2).

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

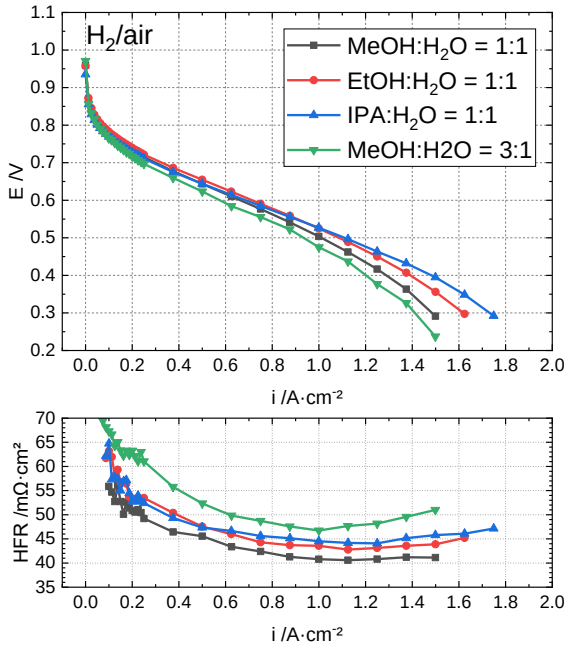

Abbildung 1: Variation des Lösungsmittels und Massenverhältnisses zu Wasser. Die Polarisationskurven wurden unter H_2/Luft, 80 °C, 96 % RH, 101 kPa_{abs} aufgenommen.

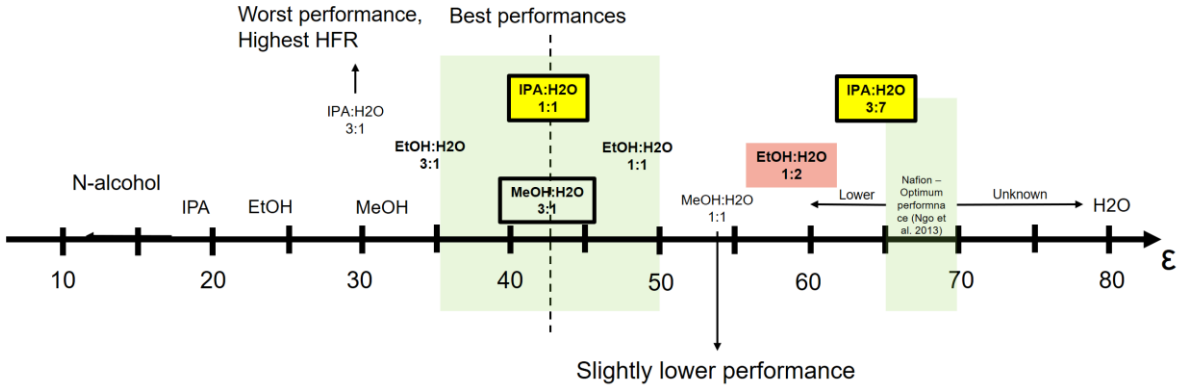

Abbildung 2: Dielektrizitätskonstante verschiedener Lösungsmittel / Lösungsmittelgemische. Die grün-schraffierten Bereiche kennzeichnen das Leistungsoptimum von kohlenwasserstoff- und PFSA-basierten Tinten.

Ähnlich zu Resultaten PFSA-basierter Systeme, beeinflusst die Porösität des Kohlenstoffträgers die Leistung kohlenwasserstoffbasierter Elektroden. Bei einer Platinbeladung von 50-gew.% erzielen hochporöse Kohlenstoffträger (Ketjenblack EC-300J; KB) sowohl unter feuchten, als auch trockenen Betriebsbedingungen eine höhere Leistungsdichte als mikroporöse Systeme mit niedrigerer BET-Oberfläche (Vulcan XC-72R; V) (Abbildung 3). Dabei gleicht die verbesserte Kinetik in Ketjenblack-basierten Systemen den höheren protonischen Kathodenwiderstand im Vergleich zu Vulcan-basierten Referenzen aus (Abbildung 4).

a) b)

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

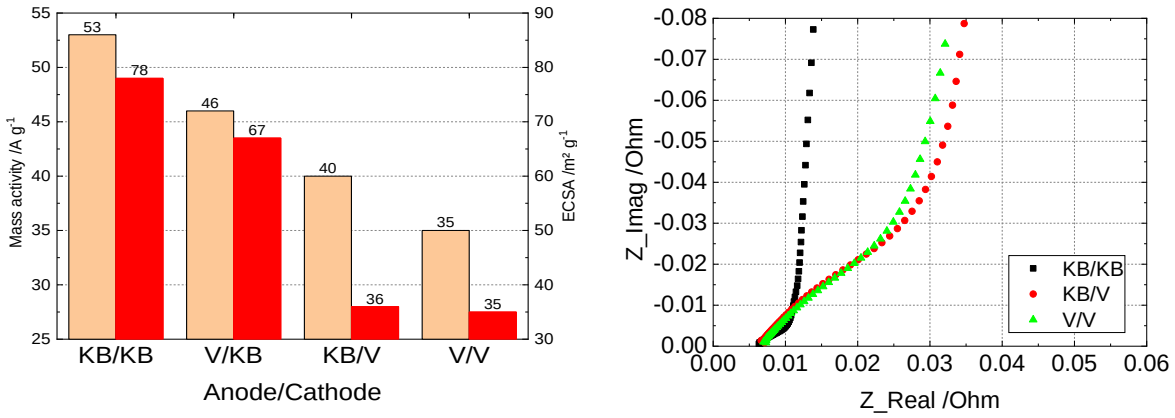

Abbildung 4: a) Massenaktivität und elektrochemisch aktive Oberfläche (ECSA) von kohlenwasserstoffbasierten Zellen mit i) Ketjenblack EC-300J (KB) oder ii) Vulcan XC-72R (V) als Kohlenstoffträger in Anode/Kathode. Testbedingung: H2/O2, 80 °C, 96 % relative Feuchte, 150 kPa_{abs}. b) Nyquistdiagramm von Zellen mit KB und/oder Vulcan auf der Anode/Kathode. Testbedingung: H2/air, 80 °C, 96 % relative Feuchte, 150 kPa_{abs}.

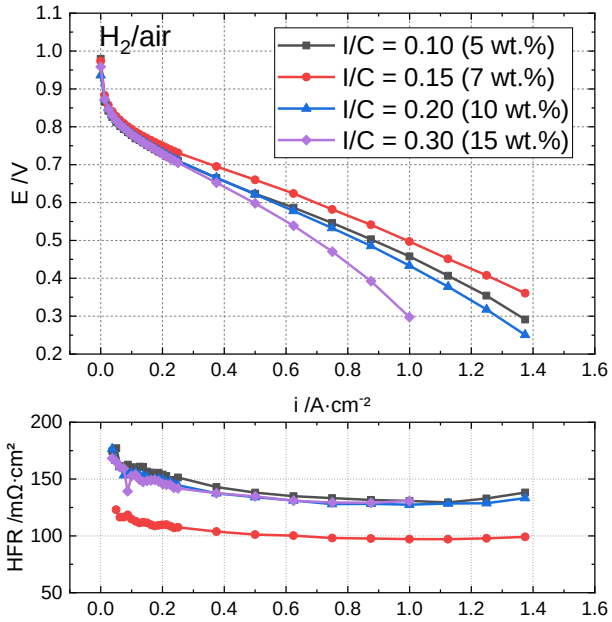

Abbildung 5: a) Variation des Lösungsmittels und Lösungsmittel-zu-Wasser Verhältnis. Testbedingung: H_2/air, 80 °C, 96 % RH, 101 kPa_{abs}. b) Variation des Ionomer/Kohlenstoff-Verhältnis. Testbedingung: H_2/Luft, 80 °C, 96 % RH, 101 kPa_{abs}.

Der leistungsoptimale massenbezogene trockene Ionomergehalt von kohlenwasserstoffbasierten Elektroden wurde von Hahn-Schickard um ein vielfaches niedriger gemessen im Vergleich zu bekannten Gehältern PFSA-basierter Systeme. Dies liegt einerseits an der typischerweise niedrigeren Dichte von kohlenwasserstoffbasierter Systeme, andererseits kann das erhöhten Quellverhalten (besonders unter flüssigen Bedingungen) der Ionomere Einfluss starken Einfluss auf das Sauerstofftransportverhalten nehmen. Für das IPA:Wasser Lösemittelsystem in Kombination mit einem hochporösen KB-Kohlenstoffträger wurde ein

massebezogenes Ionomer zu Kohlenstoff-Verhältnis (I/C ratio) von 0.1 bis 0.2 als Leistungsoptimum identifiziert (Abbildung 5).

Fazit: Leistungsoptimale Tintenformulierungen für das sprühbeschichtete Herstellungsverfahren liegen für ein massenbezogenes IPA:Wasser-Verhältnis von 1:1 vor. Bei einer Platinbeladung von 50 Gew.% erzielen hochporöse Kohlenstoffträger erhöhte Leistungsdichten gegenüber mikroporösen Systemen (vgl. Ketjenblack EC-300J vs. Vulcan XC-72R). Der dabei ermittelte optimale massenbezogene trockene Ionomergehalt liegt in einem Bereich von I/C 0.1 bis 0.2.

AP 1.1.3.d: Optimierung kohlenwasserstoffbasierter Einzelzellen

Ausgehend von den ersten in-situ-Erkenntnissen des Projektpartners IMTEK konnte ein Leistungsdefizit der in AP1.1.3c hergestellten, vollständig kohlenwasserstoffbasierten MEAs im Vergleich zu gängigen PFSA-basierten Referenzen festgestellt werden. Dieses Defizit zeigte sich besonders unter den trockenen Betriebsbedingungen der Luftfahrt und verhindert das Erreichen gesetzter Meilensteine. Als Hauptverlustmechanismus wurde vom Projektpartner IMTEK ein Zielkonflikt zwischen hoher protonischer Elektrodenleitfähigkeit und ausreichendem (Sauerstoff-) Gasttransport in der porösen katalytischen Schicht der Kathode identifiziert. Dadurch wird der maximale volumetrische Ionomergehalt der Kathode auf Werte deutlich unterhalb derjenigen gängiger PFSA-Referenzen begrenzt. In Folge sinkt die Katalysatorausnutzung in kohlenwasserstoffbasierten Elektroden drastisch als Funktion der relativen Kathodenfeuchte, was einen signifikanten Leistungsabfall unter trockenen Betriebsbedingungen hervorruft. Zur Lösung des Konflikts entwickelte die Arbeitsgruppe von Hahn-Schickard sowohl vollständig kohlenwasserstoffbasierte Kathoden mit graduiertem Ionomergehalt als auch Elektroden mit reduzierter Schichtdicke. In beiden Ansätzen skaliert der protonische Widerstand mit dem eingebrachten Ionomergehalt und/oder der katalytischen Schichtdicke. Der Kohlenstoffträger und die sekundäre Pt-Beladung der Elektrode (0.4 mg_{Pt} cm^{-2}) sind konstant gehalten worden.

Eine Graduierung des Ionomergehaltes entlang der katalystsichen Schicht der Elektrode verbesserte die Leistungsdichte im Vergleich zum homogenen kohlenwasserstoffbasierten Referenzsystem aus AP1.1.3c (I/C = 0.2, 50 wt% Pt/C, 0.4 mg_{Pt} cm^{-2}) um maximal 135 % (d.h. von 370 mA cm^{-2} auf 500 mA cm^{-2} unter 0.7 V, 95 °C, 2.5 bar_{abs} und 80 RH) (Abbildung 6a). Dabei wird der protonische Kathodenwiderstand im optimierten System (25 % I/C = 0.4, Rest I/C 0.2) um 42 % gegenüber dem Referenzsystem reduziert. Der Ansatz ist durch auftretende Sauerstofftransportverluste in I/C-Bereichen größer 0.4 limitiert.

Eine Anhebung der massenbezogenen Platinbeladung auf dem Kohlenstoffträger von 50 % auf 70 % reduziert die Schichtdicke von 9,3±0,5 auf 3,7±0,6 und den protonischen Kathodenwiderstand um den Faktor 2,4. Dadurch steigt die Leistungsdichte um 40 % (d.h. von 180 mA cm^{-2} auf 251 mA cm^{-2} bei 0.75 V, 95 °C, 2,5 bar und 50 % RH) (Abbildung 6b). Der

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Ansatz ist herstellungsbedingt und durch den Anstieg kinetischer Verluste hin zu höheren primären Pt-Beladungen limitiert.

Beide Optimierungsansätze weißen den Leistungsnachweis des ersten Meilensteins nach (550 mA cm^{-2} bei 740 mV unter 2 bar_{abs}, T_{mittel} = 90 °C, 80 % RH). Jedoch verbleibt ein Leistungsdefizit zum zweiten Meilenstein und im Allgemeinen zu PFSA-basierten Referenzen unter trockenen Luftfahrtbetriebsbedingungen (Abbildung 6).

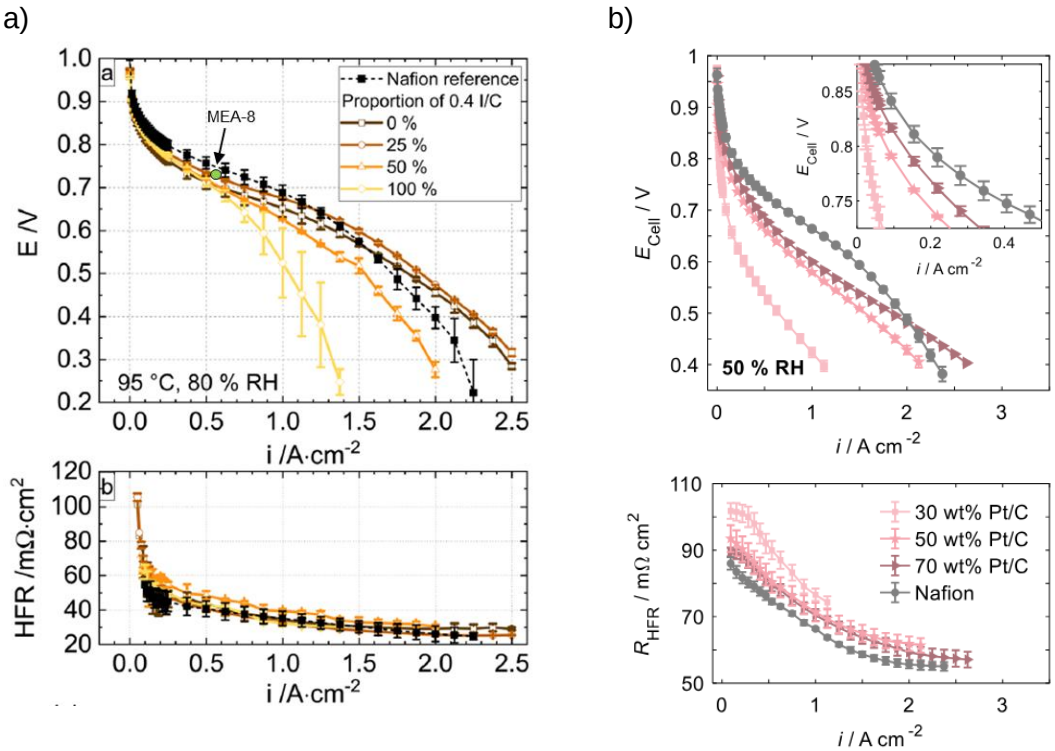

Abbildung 6: a) Darstellung der Polarisationskurven von MEAs mit abgestuften Ionomergehaltsanteilen in der Kathodenschicht (0 %, 25 %, 50 %, 100 %), bezogen auf das Verhältnis I/C = 0,4 im Vergleich zu I/C = 0,2. Zudem ist der Leistungsnachweis MEA-8 eingetragen, der mithilfe einer MEA mit graduellem Ionomer Anteil von 25 % mit einem I/C von 0.4 erreicht werden konnte. Gemessen unter H_2/Luft, 95 °C, 80 % relative Luftfeuchte und 250 kPa_{abs}. b) Exemplarische Polarisationskurven von MEAs mit Verschiedenen Kathodendicken, welche durch Variation der Pt-Beladung des Kohlenstoffträgers erreicht wurde.

1. Fazit: Die Leistung kohlenwasserstoffbasierter Modell-MEAs wird unter trockenen Luftfahrbetriebsbedingungen unter anderem von einem ausgeprägten Zielkonflikt zwischen guter protonischer Leitfähigkeit und akzeptablem Sauerstofftransport in der Kathode bestimmt. Gradiente im Kathoden-Ionomergehalt und/oder Kathoden mit reduzierter Schichtdicke stellen einen Ansatz zur Reduzierung des protonischen Kathodenwiderstandes dar. Die dadurch gemessenen Leistungsdichten weisen die im ersten Projekt-Meilenstein definierten Leistungsanforderungen vollständiger kohlenwasserstoffbasierter Brennstoffzellen nach (550 mA cm^{-2} bei 740 mV unter 2 bar_{abs}, T_{mittel} = 90 °C, 80 % RH). Jedoch sind beide Ansätze limitiert. Ein Leistungsdefizit unter den trockenen Betriebsbedingungen der Luftfahrt verbleibt zu vollständig PFSA-basierten Referenzen.

In einem iterativen Prozess wurde der zweite Meilenstein durch die Weiterentwicklung des Ansatzes dünner Kathoden erreicht. Hierzu charakterisierte der Projektpartner IMTEK

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

verschiedene ungeträgerte Platin-Elektrokatalysatoren (Pt Black, kurz PtB). Auf dieser Grundlage wurde eine optimierte Tintenrezeptur entwickelt, die die Herstellung von Kathoden mit einer Schichtdicke von unter 2,5 µm ermöglichte. Die vom Projektpartner IMTEK charakterisierten PtB-Elektroden konnten den zuvor identifizierten Zielkonflikt zwischen (Sauerstoff-)Transportwiderstand und protonischem Elektrodenwiderstand erfolgreich lösen. Als Ergebnis wurde eine Leistungsdichte von 420 mA cm^{-2} bei 750 mV (2,5 bar_{abs}, T_{Mittel} = 95 °C, 50 % RH) erzielt. Dies stellt erstmals eine mit PFSA-basierten Systemen vergleichbare Leistungsdichte unter trockenen, luftfahrtrelevanten Betriebsbedingungen dar und erfüllt den Leistungsnachweis MEA-9 (siehe Abbildung 7 a). In Abbildung 7 b) wird die Polarisationskurve einer HC- und Pt_3Ni-basierten Elektrode mit einer Edelmetallbeladung von nur 0.3 mg_{Pt} cm^{-2} dargestellt. Unter Vernachlässigung des Membranwiderstandes wird der Leistungsnachweis MEA-10 erreicht, was die Stärke des Einflusses des Membranwiderstandes bei Verwendung von HC Membranen unter trockenen Betriebsbedingungen verdeutlicht.

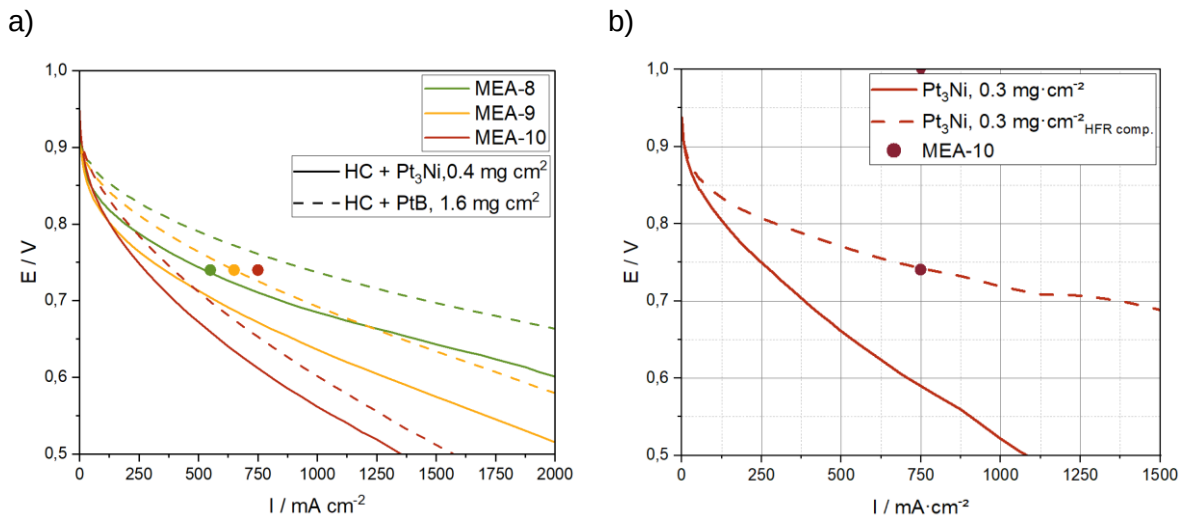

Abbildung 7: Exemplarische Polarisationskurven verschiedener Platin-basierter Katalysatoren bei unterschiedlichen Beladungen. a) Polarisationskurven wurden bei unter den drei, im Umfang des Gesamtvorhabens genannten Meilenstein-Bedingungen (MEA-8, MEA-9 und MEA-10) getestet. b) Polarisationskurve und HFR-freie Polarisationskurve einer CCM mit HC Ionomer und Pt_3Ni katalysator. Es wird verdeutlicht, wie groß der Einfluss des Membranwiderstandes von HC-basierten Membranen bei trockenen Betriebsbedingungen ist.

Allerdings zeigen kohlenwasserstoffbasierte Systeme auf Basis von PtB-Elektrokatalysatoren eine geringere elektrochemisch aktive Oberfläche im Vergleich zu den kohlenstoffgeträgerten Systemen aus AP 1.1.3 c, was zu deutlich erhöhten kinetischen Überspannungen führt. Zur Abmilderung dieses Effekts wurde einerseits die sekundäre PtB-Beladung von 0,4 mg_{Pt} cm^{-2} auf 1,6 mg_{Pt} cm^{-2} erhöht, andererseits wurden ungeträgerte Metallverbindungen mit erhöhter Massenaktivität für die Sauerstoffreduktionsreaktion untersucht. Da derartige Metallverbindungen – wie Pt_3Ni, Pt_3Co oder Pt_3Fe – nach dem Stand der Technik nicht kommerziell in ungeträgerter Form verfügbar sind, wurden Pt_3Ni-Nanopartikel intern mittels eines nasschemischen Syntheseverfahrens hergestellt. Diese

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Nanopartikel wurden anschließend analog zu dem ungeträgerten PtB zu einer Katalysatortinte weiterverarbeitet. Die daraus resultierende CCM zeigte bei identischer Platinbeladung wie das Referenzsystem (0,4 mg_{Pt} cm^{-2}) eine mit PFSA-basierten Systemen vergleichbare Leistungsdichte unter den für die Luftfahrt relevanten trockenen Betriebsbedingungen (siehe Abbildung 7a).

2. Fazit: Vollständig kohlenwasserstoffbasierte Brennstoffzellen mit ungeträgerten Pt-basierten Elektrokatalysatoren in der Kathode erzielen erstmal unter trockenen Luftfahrtbedingungen vergleichbare Leistungsdichten wie vollständig PFSA-basierte Brennstoffzellen. Dabei weißen die hergestellten Elektroden aus Pt black (1.6 mg_{Pt} cm^{-2}) und / oder PtNi (0.4 mg_{Pt} cm^{-2}) Dicken < 2.5 µm auf, wodurch sich der protonische Widerstand unter trockenen Luftfahrtbedingungen minimiert. Die hergestellten Modell-MEAs zeigen Leistungsdichten, welche den Leistungsnachweis des zweiten Leistungsnachweises MEA-9 erfüllen.

III. Ausstehende Meilensteine

Der zu Projektbeginn definierte dritte Leistungsnachweis MEA-10 (750 mA cm^{-2} bei 740 mV unter 2 bar_abs, T_mittel = 100 °C, 40 % RH) konnte nicht erreicht werden (Abbildung 7 a und b). Die niedrige Protonenleitfähigkeit bei derart trockenen Betriebsbedingungen wurde als hauptsächlicher Einflussfaktor hervorgehoben. MEA-10 könnte somit erreicht werden, wenn Kohlenwasserstoff-basierte Membranen mit vergleichbaren Protonenleitfähigkeiten unter trockenen Bedingungen zu ihren PFSA-basierten Gegenstücken verwendet werden könnten. Nachfolgende Untersuchungen sollten sich daher neben den kinetischen Verlustmechanismen in der Kathode insbesondere auf eine Optimierung der Kohlenwasserstoffmembran konzentrieren. Darüber hinaus bestätigte der Projektpartner TUM die Bedeutung ausgeprägter Konditionierungsprofile für kohlenwasserstoffbasierte Elektroden. Ferner identifizierte der Projektpartner IMTEK in beschleunigten Alterungstests verstärkte, leistungsmindernde Degradationsphänomene an den von Hahn-Schickard hergestellten Modellelektroden (siehe Abbildung 8). Es ist ein erneuter Iterationsschritt erforderlich, um die gewonnenen Erkenntnisse der Projektpartner in die Entwicklung zukünftiger Hochleistungs-MEAs auf Basis von Kohlenwasserstoffen einzubeziehen:

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

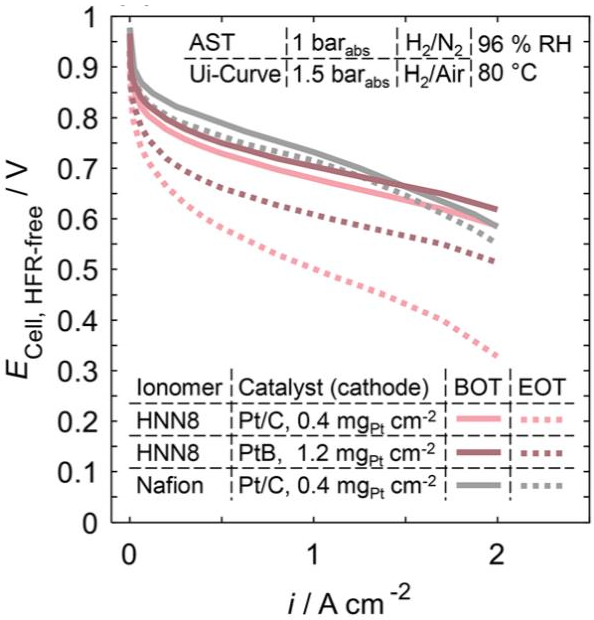

Abbildung 8: Normalisierter Kathoden-Rauheitsfaktor rf (rf/rf^{BOT}) in Abhängigkeit von AST-Zyklen und b) Polarisationskurven am BOT und EOT von vollständig HC- bzw. vollständig PFSA-basierten CCMs mit unterschiedlichen Kathoden-Elektrokatalysatoren. Die Kathoden verwenden Nafion D2020 (I/C = 0,8, 50 Gew.-% Pt/C, Pt-Beladung von 0,41 ± 0,01 mg Pt cm^{-2}) und Pemion® HNN8 mit (i) 50 Gew.-% Pt auf hochoberflächenaktivem Kohlenstoff (Pt/C, 0,42 ± 0,02 mg Pt cm^{-2}) und (ii) nicht-unterstütztem Pt (PtB, 1,2 ± 0,01 mg Pt cm^{-2}).

IV. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Neben den Personalkosten, gab es keinerlei größerer Ausgaben, es wurde sich auf Verbrauchsmaterialien beschränkt.

V. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die finanzielle Umsetzung des geplanten Vorhabens war aus eigenen Mitteln nicht möglich. Es war daher essentiell, eine Finanzierung für die im Finanzierungsplan genannten Kosten zu erhalten. Gleiches gilt für den

Der Projektantrag wurde im Rahmen des Nationalen Innovationsprogrammes „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2“ gestellt, da seitens der EU keine passende Ausschreibung zur Thematik vorlag. Das hier beantragende Konsortium deckt alle Aspekte mit Partnern aus Deutschland ab.

VI. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Projekts H2Sky erzielten Ergebnisse liefern eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung und industrielle Umsetzung Kohlenwasserstoff-basierter MEAs in Brennstoffzellen. Durch die detaillierten Untersuchungen zu Leistungsgrenzen und Degradationsmechanismen konnten zentrale Einflussfaktoren auf die Performance kohlenwasserstoffbasierter Systeme identifiziert und bewertet werden. Für Hahn-Schickard ergeben sich daraus konkrete Anknüpfungspunkte für eine nächste Iterationsstufe im Entwicklungsprozess: Die von den Partnern IMTEK und TUM beobachteten Degradationsphänomene können gezielt in die weitere Optimierung der Materialzusammensetzung und Herstellprozesse einfließen. Geplant ist, die gewonnenen Erkenntnisse in nachfolgenden Untersuchungen systematisch zu validieren und daraus verbesserte Kohlenwasserstoff-Materialsysteme mit erhöhter Stabilität und Leitfähigkeit unter trockenen Betriebsbedingungen abzuleiten. Für den Projektpartner Aerostack eröffnen die im Projekt erzielten Ergebnisse erstmals die Möglichkeit, die entwickelten Materialien im Rahmen von Vollzellen- oder Short-Stack-Tests unter praxisnahen Bedingungen zu evaluieren. Damit kann der Übergang von der Laborzelle hin zu anwendungsrelevanten Demonstratoren vorbereitet werden. Über die Projektpartner hinaus wurde im Rahmen des Vorhabens ein Leistungsbenchmark für Kohlenwasserstoff-basierte Brennstoffzellenmaterialien gesetzt, der als Referenzpunkt für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dient. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse tragen damit wesentlich zur Weiterentwicklung fluorfreier Membran- und Elektrodenmaterialien bei und unterstützen langfristig den Technologiewechsel hin zu nachhaltigen, kosteneffizienten und umweltverträglichen Brennstoffzellensystemen. In der weiteren Projektplanung ist eine fortgesetzte Optimierung der Membranentwicklung vorgesehen, insbesondere mit Blick auf die Verbesserung der Protonenleitfähigkeit und Stabilität unter trockenen Betriebsbedingungen.

VII. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind uns keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt.

VIII. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

- Nguyen et al. Mater. Adv., 2022,3, 8460-8468
- Liepold et al. Journal of Power Sources 624 2024 235537
- Liepold et al. Sustainable Energy Fuels, 2025,9, 5619-5626

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

IX. Literatur

1 Department of Energy (DOE), Heavy-Duty Fuel Cell System Cost - 2022, https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/23002-hd-fuel-cell-system-cost-2022.pdf?Status=Master, (accessed 1 August 2024).

2 K. Goto, I. Rozhanskii, Y. Yamakawa, T. Otsuki and Y. Naito, Development of Aromatic Polymer Electrolyte Membrane with High Conductivity and Durability for Fuel Cell, Polym. J., 2009, 41, 95–104.

3 H. Brunn, G. Arnold, W. Körner, G. Rippen, K. G. Steinhäuser and I. Valentin, PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites, Environ Sci Eur, 2023, 35. DOI: 10.1186/s12302-023-00721-8.

4 S. E. Fenton, A. Ducatman, A. Boobis, J. C. DeWitt, C. Lau, C. Ng, J. S. Smith and S. M. Roberts, Per- and Polyfluoroalkyl Substance Toxicity and Human Health Review: Current State of Knowledge and Strategies for Informing Future Research, Environmental toxicology and chemistry, 2021, 40, 606–630.

5 M. G. Evich, M. J. B. Davis, J. P. McCord, B. Acrey, J. A. Awkerman, D. R. U. Knappe, A. B. Lindstrom, T. F. Speth, C. Tebes-Stevens, M. J. Strynar, Z. Wang, E. J. Weber, W. M. Henderson and J. W. Washington, Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment, Science (New York, N.Y.), 2022, 375, eabg9065.

6 M. Adamski, N. Peressin and S. Holdcroft, On the evolution of sulfonated polyphenylenes as proton exchange membranes for fuel cells, Mater. Adv., 2021, 2, 4966–5005.

7 D. Yazili, E. Marini, T. Saatkamp, A. Münchinger, T. de Wild, L. Gubler, G. Titvinidze, M. Schuster, C. Schare, L. Jörissen and K.-D. Kreuer, Sulfonated Poly(Phenylene sulfone) blend membranes finding their way into proton exchange membrane fuel cells, Journal of Power Sources, 2023, 563, 232791.

8 E. Balogun, M. Adamski and S. Holdcroft, Communication—Non-Fluorous, Hydrocarbon PEMFCs, Generating > 1 W cm −2 Power, J. Electrochem. Soc., 2020, 167, 84502.

9 H. Nguyen, F. Lombeck, C. Schwarz, P. A. Heizmann, M. Adamski, H.-F. Lee, B. Britton, S. Holdcroft, S. Vierrath and M. Breitwieser, Hydrocarbon-based Pemion™ proton exchange membrane fuel cells with state-of-the-art performance, Sustainable Energy Fuels, 2021, 5, 3687–3699.