

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2: Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger:

FAU Erlangen-Nürnberg, Professur für Fluidsystemtechnik (FST)¹

Förderkennzeichen:

03B10409B

Vorhabenbezeichnung:

Konzeptionierung und Aufbau eines Heavy Duty Brennstoffzellensystems (FCS-HD)

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2021 bis 31.05.2025

Berichtszeitraum: 01.12.2021 bis 31.05.2025

Inhalt

1. Zielsetzung	2
2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	2
AP 4.1: Konzeption einer Testumgebung für das Versorgungssystem	2
AP 4.2: Nachbildung eines Stapels im Versorgungssystem.....	3
AP 4.3: Erstellung eines 1D-Simulationsmodells zur Abbildung des Ver-sorgungssystems und seiner Komponenten.....	3
AP 4.4: Messtrategie und Messtechnik.....	5
AP 4.5: Konzeption einer optisch zugänglichen Strahlpumpe	7
AP 4.6: Messung des Komponentenverhaltens/-eigenschaften im ges. Betriebsbereich	7
AP 4.7: Messung des Systemverhaltens für unterschiedliche Betriebsfäl-le	8
AP 4.8: Entwicklung eines Anoden-Kathoden-Moduls (AKM).....	8
3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	9
4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	10
5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	11
6. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	11
7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF.....	12

¹Die Arbeitsgruppe von Prof. Wensing war bei Beantragung des Vorhabens Teil des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik (LTT). Während des laufenden Projektes wurde die Arbeitsgruppe als *Professur für Fluidsystemtechnik (FST)* eine eigenständige und unabhängige Institution der FAU. Es wird daher nun der neue Name offiziell auch in diesem Dokument geführt. Die neue Anschrift der Professur für Fluidsystemtechnik lautet: Cauerstr. 4, 91058 Erlangen.

1. Zielsetzung

Das Projekt *Fuel Cell System Heavy Duty* zielte darauf ab, die besonderen Herausforderungen der Brennstoffzellentechnologie für schwere Nutzfahrzeuge zu adressieren. Während wasserstoffbetriebene Brennstoffzellensysteme bereits in verschiedenen Mobilitätssektoren eingesetzt werden, bestehen für den Nutzfahrzeubereich weiterhin offene Fragen zur Effizienz, Langlebigkeit und optimalen Integration von Subsystemen. Insbesondere die Gewährleistung eines stabilen Betriebs unter hoher Last sowie die Optimierung von Wasser- und Wärmemanagement stellen zentrale Herausforderungen dar. Ein wesentliches Ziel des Projekts war daher die systematische Untersuchung und Weiterentwicklung von Schlüsselkomponenten innerhalb des Brennstoffzellensystems. Dazu zählten insbesondere Befeuchter und passive Strahl-Rezirkulationspumpen, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Effizienz des Gesamtsystems haben. Es bestand die Notwendigkeit, neue Prüfmethoden und Simulationsansätze zu entwickeln, um diese Komponenten unter realistischen Betriebsbedingungen detailliert zu analysieren und zu optimieren. Die Professur für Fluidsystemtechnik (FST) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg konnte dabei auf bestehende Expertise im Bereich Wasserstofftechnologien und thermodynamischer Prozesse aufbauen. Ein vorhandener FuelCell-Brennstoffzellenprüfstand der Firma HO-RIBA diente als Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen, reichte jedoch nicht aus, um die spezifischen Anforderungen des Projekts zu erfüllen. Daher war die Entwicklung spezialisierter Prüfstände erforderlich, um sowohl stationäre als auch dynamische Betriebszustände realitätsnah nachbilden zu können. Durch die enge Zusammenarbeit von experimentellen Untersuchungen und Simulationen hat das Projekt dazu beigetragen, Brennstoffzellensysteme für schwere Nutzfahrzeuge leistungsfähiger, effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten und damit die Technologiereife weiter voranzutreiben.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP 4.1: Konzeption einer Testumgebung für das Versorgungssystem

Zusammenfassung:

Die Untersuchung des Verhaltens von Brennstoffzellen (BZ) im Hinblick auf die Kopplung von Ein- und Auslasströmen hat verdeutlicht, dass nur eine echte Brennstoffzelle diese Dynamik präzise darstellen kann. Das ursprüngliche Konzept eines großen Systems wurde aufgrund der generierten Erkenntnisse angepasst: Der Prüfstand wurde in spezialisierte Einheiten aufgeteilt. Diese Prüfstände tragen zu einer detaillierten und präzisen Untersuchung der Brennstoffzellentechnologie bei, indem sie spezifische und kontrollierte Testbedingungen für verschiedene Systemkomponenten bereitstellen. Es zeigte sich, dass kommerziell verfügbare Teststände die Anforderungen an eine präzise thermodynamische Analyse der Einzelprozesse nicht erfüllen, sodass alle nötigen Prüfstände komplett selbst entwickelt wurden. Die neuen Prüfumgebungen umfassen:

- Prüfstand für MEA-Charakterisierungen (AP4.2)
- Prüfstand für konventionelle Befeuchter (AP 4.2)
- Prüfstand für Sensoren (AP 4.4)
- Prüfstand für Strahl-Rezirkulationspumpen mit optischer Zugänglichkeit (AP 4.5)
- Prüfstand für den Wassertransport durch Membranen (AP 4.8)

Für die Nachbildung des Gesamtsystems wurde ein neuer Ansatz verfolgt, in dem die Einzelprüfstände virtuell gekoppelt werden. Dafür wurde eigenes eine einfache Testhardware aufgebaut, um in der Plattformentwicklung unabhängig von den tatsächlichen Komponentenprüfständen zu sein und damit

an diesen den Forschungsbetrieb nicht zu beeinträchtigen. Dieser Prüfstand für die virtuelle Modellkopplung (X-in-the-Loop) wird in AP 4.7 näher beschrieben

AP 4.2: Nachbildung eines Stapels im Versorgungssystem

Zusammenfassung:

Da aus der Konzeptentwicklung in AP 4.1 hervorging, dass nicht ein großer Versorgungsprüfstand gebaut wird, sondern einige spezialisierte Prüfstände benötigt werden, wurden in AP 4.2 entsprechend die spezialisierten Prüfstände entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Wie aus der Zusammenfassung des AP 4.1 hervorgeht, wurden in AP 4.2 speziell Prüfstände zur MEA-Charakterisierung und zu konventionellen Befeuchtern bearbeitet.

Um die Anforderungen eines BZ-Stapels tiefer zu analysieren, wurde ein HORIBA FuelCon Evaluator C Prüfstand in Betrieb genommen, der für Einzelzellen und kleinere Stacks konzipiert ist. Ausgestattet mit der Baltic Fuel Cell Schnellspannvorrichtung (49 cm²), ermöglicht er einen schnellen und effektiven Austausch von Membranen sowie eine hohe Reproduzierbarkeit durch einen pneumatisch gesteuerten Anpressdruck.

Zur Gewährleistung einer zuverlässigen und reproduzierbaren Prüfstandsnutzung wurden standardisierte Verfahren für das Hoch- und Herunterfahren des Prüfstands und die Anpassung der Betriebsparmeter entwickelt. Von hoher Relevanz war dabei ein effizientes Hochfahrprogramm des Prüfstands bezüglich der Temperatureinregelung sowie zeitgleich das Vermeiden von großen Druckdifferenzen zwischen dem Wasserstoff und dem Luftpfad. Ein skriptbasierter automatisierter Betriebsmodus wurde entwickelt, um diese Prozesse zu optimieren. Unterschiedliche Prozessgrößen wie Volumenströme, Drücke, Taupunkttemperatur und Zelltemperatur wurden evaluiert und standardisiert.

Im Bereich der Membrancharakterisierung wurden Verfahren zur Vermessung unspezifizierter Membranen entwickelt. Der Einfahrprozess (Break-in-Procedure) ist entscheidend, um die Membranen zu befeuchten und zu konditionieren, wobei verschiedene Methoden wie die Nutzung befeuchteter Gase evaluiert wurden. Zusätzlich wurde die Messmethode der Zyklischen Voltammetrie geprüft, um elektrochemische Reaktionen und die aktive Katalysatoroberfläche zu charakterisieren. Ziel war es, reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen und den optimalen Betriebszustand festzulegen.

Bei der Membrancharakterisierung am kommerziellen Prüfstand HORIBA FuelCon Evaluator C stellte sich heraus, dass der Prüfstand in der Einhaltung thermodynamischer Randbedingungen erhebliche Mängel aufweist, sodass eine thermodynamische Analyse der Ergebnisse nicht möglich war. Die ursprünglich angenommene hohe Reproduzierbarkeit der Messungen war bei stark veränderten thermodynamischen Randbedingungen nicht gegeben. Daraufhin wurde eine neue MEA-Charakterisierungsumgebung AxCell entwickelt, aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet.

Im Vergleich zur ursprünglichen Planung wurden keine erheblichen Änderungen vorgenommen. Durch die geschickte Anpassung des Konzepts auf spezialisierte Einzelprüfstände konnte deutlich tiefer und wissenschaftlicher geforscht werden und die Grenzen aktueller etablierter Technik aufgezeigt werden und neue Perspektiven durch innovative Ideen, wie z.B. die Gas- und Feuchteanalyse mittels Raman-sensor (AP 4.4) sowie die Flüssigwassernutzung in Membranbefeuchtern (AP 4.8), aufgezeigt werden.

AP 4.3: Erstellung eines 1D-Simulationsmodells zur Abbildung des Versorgungssystems und seiner Komponenten

Zusammenfassung:

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst einzelne Komponenten des BZ-Systems modelliert und anschließend in einer übergeordneten Struktur zusammengeführt. Zu Beginn des Projekts fand die Mo-

dellierung mit Matlab Simulink statt. Bei den ersten komplexen Komponenten zeigten Einschränkungen bei der Modellierung. Nach intensiver Recherche wurde entschieden zukünftig in der Modellierungsumgebung Modelica zu arbeiten, die für thermodynamische Modellierung sehr gut geeignet ist.

Einzelzelle

Als erstes wurde im Rahmen einer Masterarbeit (MA) eine detaillierte Modellierung der MEA durchgeführt. Dieses Modell löst normal zur Membranfläche alle Stoff- und Wärmeströme auf. In weiteren Arbeiten wurde dieses Modell so erweitert, dass es durch Sequenzierung möglich wurde auch eine Auflösung entlang des Strömungskanals zu realisieren.

Membranbefeuchter

Sehr früh im Projekt wurde auch die Befeuchtung durch pröse Medien betrachtet und damit konzeptionell untersucht, ob es sinnvoll ist in der Befeuchtereinheit das Kathoden- und das Anodenabgas gemeinsam zu nutzen. Dies erwies sich schnell als nicht sinnvoll heraus, wodurch der Fokus auf klassische Membranbefeuchter gelegt wurde. Hier entstand schnell die Idee flüssiges Wasser zu nutzen. Da dies in einer planaren Membranbefeuchterbauform einfacher zu realisieren war, als in einer tubularen Bauweise, wurde der planare Membranbefeuchter detailliert modelliert. Die ersten Modelle waren noch in Matlab Simulink abgebildet. Später wurden die Modelle in Modelica übertragen und weiter ausdetailliert. Ergebnis ist ein Modell für planare Membranbefeuchter, das flüssiges Wasser berücksichtigt und Temperatureffekte durch Kondensation einbezieht. Begleitend dazu wurden Experimentelle Untersuchungen in AP 4.8 durchgeführt, die maßgeblich zur Modellbildung und Validierung beigetragen haben.

Strahlpumpe

Ein zentrales Bauteil im Projekt war die Strahlpumpe, die als passives Element erhebliche Energieeinsparung im Rezirkulierspfad möglich macht. Die Teil-Pumpleistung, die durch die Strahlpumpe abgedeckt wird, kann an elektrischer Leistung an der aktiven Rezirkulationspumpe eingespart werden. Mit Hilfe des Modells wurden die Potentiale und Grenzen von Strahlpumpen als passive Elemente im Rezirkulationspfad aufgezeigt. Es konnten einige Publikationen erzeugt werden, durch die weitere direkte Industrieprojekte zur Strahlpumpenauslegung entstanden sind. Validiert wurde das Modell mit Hilfe des in AP4.5 beschriebenen Strahlpumpenprüfstands

Weitere Balance of Plant (BoP) Komponenten

Weitere BoP Komponenten, wie Wärmetauscher, aktive Rezirkulationsgebläse, Ventilatoren, Kühlmittelpumpen, usw... wurden in Modelica neu aufgebaut oder waren bereits als Bausteine vorhanden.

Spraybefeuchtung

Auf Basis der großen Expertise in Sprayprozessen wurde auch die Befeuchtung mit Wassersprays zunächst sehr einfach abgebildet. Erste sehr positive Ergebnisse wurden genutzt, um einen weiteren Projektantrag zu stellen, der inzwischen genehmigt wurde. Das Thema wird im Parallelprojekt tiefergehend untersucht und zeigt Potential die klassische Befeuchtung mittels Membranen in großen Systemen abzulösen.

Gesamtsystem

Für das Gesamtsystem wurde eine modulare Struktur in Modelica entwickelt, in der es nun einfach möglich ist Komponenten, die nach einer definierten Bauanleitung modelliert sind, miteinander zu verknüpfen. Das Gesamtmodell hat außerdem eine definierte Schnittstelle nach „außen“, um externe Tools, wie einen Optimierer programmiert in Python, den Zugriff zu ermöglichen.

Gesamtsystemoptimierung

Ein Optimierungswerkzeug wurde in Python programmiert. Das Optimierungswerkzeug kann auf das Gesamtmodell in Modelica zugreifen und verschiedenen Auslegungs-Parameter zur Systemdimensionierung durchiterieren, um eine optimale Lösung zu finden. Dabei können verschiedene Kostenfunktionen genutzt werden. Bisher sind Kostenfunktionen für den Verbrauch, die Effizienz, das Gewicht sowie den CO₂ Fußabdruck im Optimierer hinterlegt, können aber um weitere Zielgrößen oder eine Kombination mit Gewichtung erweitert werden. Für die Optimierung wird ein Lastprofil aus der Anwendung vorgegeben.

AP 4.4: Messtrategie und Messtechnik

Zusammenfassung:

Wie bereits in AP 4.1 und AP 4.2 beschrieben, gibt es keine kommerziell erhältlichen Prüfstände, die eine wissenschaftliche, thermodynamische Analyse der Prozesse in Brennstoffzellensystemen ermöglichen. Hauptgrund dafür ist, dass es keine passende Sensorik gibt. Daher haben wir eigene Lösungsansätze verfolgt für:

- Robuste Feuchtemessung mit hoher Zeitlicher Auflösung > 1Hz
- Messung der Gaszusammensetzung online – speziell an den FC-Ausgängen und im Rezirkulationspfad
- Temperaturverteilung in der Brennstoffzelle

Sensorprüfstand

Zunächst wurde ein Sensorprüfstand aufgebaut, um Sensoren zur Bestimmung der Gaszusammensetzung zu messen, insbesondere die Konzentrationen von Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff sowie der Wassergehaltsbestimmung. Der Prüfstand wurde in Betrieb genommen und ist mit Massendurchflussreglern (MFC), zwei Vordruckreglern von Bronkhorst und zwei Wasserabscheidern ausgestattet. Das System nutzt „controlled evaporator mixer“ (CEM) für die Befeuchtung der Gase. Alle steuerbaren Komponenten sind auf einen Flowbus aufgeschaltet und werden durch eine pythonbasierte Schnittstelle automatisiert gesteuert.

Etablierte Feuchtemesstechnik

Am Sensorprüfstand wurden etablierte Sensoren für die Feuchtemessung getestet. Diese Sensoren basieren darauf, dass sich die Kapazität des aktiven Sensormaterials ändert, sobald sich Wasser in dem Material anlagert. Diese Sensoren sind für eine bestimmte Temperatur und einen bestimmten Druck kalibriert, da der Stoffübergang ins Material davon abhängig ist. Zur Einhaltung der Temperaturen sind die teuren, in der Forschung verwendeten Sensoren, mit einer aktiven Beheizung ausgestattet. Eine Kompensation für typische Druckänderungen gibt es nicht. Außerdem ist das Messprinzip dynamisch durch den Stofftransport in das Material hinein und aus dem Material heraus eingeschränkt. Ein großes Problem haben die Sensoren, sobald flüssiges Wasser das Sensormaterial berührt. Das führt direkt zur Sättigung des Sensormaterials und zum Ausfall des Sensors. In diesem Fall muss der Sensor zunächst aufwendig getrocknet werden. Da typische Betriebsbedingungen in Brennstoffzellen nahe 100 % RH sind, ist Kondensation am Sensormaterial und damit Flüssigwasserkontakt relativ häufig.

Etablierte Messung der Gaszusammensetzung

Typischerweise werden die Gaszusammensetzungen in der Brennstoffzellenforschung mit Gaschromatographen (GC) und Massenspektrometer (MS) durchgeführt. Obwohl diese Messgeräte in der chemischen Analytik bewährt sind, sind sie nicht geeignet für dynamische Prüfstandsanalysen an Brennstoffzellensystemen. Bei der GC ist die Analysedauer im Minutenbereich die größte Einschränkung, bei der MS die Empfindlichkeit auf Flüssigwasser.

Robuste Messung der Gaszusammensetzung

Da der FST viel Erfahrung mit dem Einsatz optischer Messtechnik in dynamischen thermodynamischen Systemen hat, wurde im Rahmen des Projekts die Ramanmesstechnik als alternative etablierter Methoden zur Messung der Gaszusammensetzung, und damit auch der Feuchte, erprobt. Dazu wurde ein spezieller Raman-Laser, ein passendes Spektrometer, sowie diverse Optikkomponenten angeschafft. Die Sensorik wurde zunächst am oben genannten Sensorprüfstand erprobt und verschiedene Kalibriermethoden getestet. Der Einsatz der Messtechnik auf diesem Gebiet ist neu, und hat sich zügig etabliert. Die Ergebnisse haben auf internationalen Konferenzen für Anerkennung und Interesse gesorgt. Die Raman-Streuung ist eine elastische Streuung an Atombindungen. Die Wellenlänge des gestreuten Lichts ist spezifisch für die relevanten Stoffe Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Wasser. Das Verhältnis der Streuintensitäten ist direkt proportional zu den Stoffmengen der Stoffe, sodass daraus die prozentuale Zusammensetzung bestimmt werden kann. Im Rahmen des Projekts wurde neben der relativen Kalibrierung auch ein absolute Kalibrierdaten in Bezug auf den Partialdruck für den relevanten Druckbereich 1-3 bar erstellt. In einem nachfolgenden Projekt soll die Messtechnik zu einem kompakten Sensor weiterentwickelt werden. Perspektivisch kann aus den Streusignalen neben der stofflichen Zusammensetzung auch Temperatur und Druck abgeleitet werden.

Schlierenmesstechnik

In AP4.5 wurde ein optisch zugänglicher Strahlpumpenprüfstand entwickelt. Mit der Schlierenmesstechnik konnten die Strömungsstrukturen im Überschallbereich visualisiert werden und die Länge der Durchmischungszone von Primär- und Sekundärströmung vermessen werden. Mit dieser Messtechnik nutzt man minimale Unterschiede in der optischen Dichte aus, die sich durch Strömungs- und Druckfelder ergeben. Aus diesen Visualisierungen können wichtige Größen zur Modellvalidierung gezogen werden. Die Methode hat sich als sehr hilfreich für die Strahlpumpenauslegung erwiesen.

Temperaturmessung in der Brennstoffzelle

Vor allem, um Kondensationseffekte in der Brennstoffzelle zu untersuchen möchte man die Gastemperatur in den Strömungsfeldkanälen kennen. Dadurch, dass diese mit typischen Höhen und breiten von 0,5 mm und sehr klein sind, kommen klassische Thermoelemente oder Temperatursensoren nicht in Frage. Eine interessante Lösung basiert auf der Längenänderung von Glasfasern. Diese können sehr dünn gefertigt werden. Dazu haben wir mit dem FAU-Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik kooperiert, die in anderen Anwendungen Erfahrungen mit der Messtechnik haben. In der Erprobungsphase wurden 200 µm dicke Fasern verwendet, es sind aber auch noch dünnere auf dem Markt verfügbar. In die Faser wurden sogenannte Bragg-Gitter eingebracht. Jedes der Bragg-Gitter kann später als Temperaturmessstelle benutzt werden. In einer Faser kann somit an mehreren Stellen die Temperatur gemessen werden. In unseren Tests wurden bis zu 5 Messstellen auf 5 cm Länge verteilt. Für die Nutzung der Messtechnik müssen spezielle Zugänge in die Brennstoffzelle zur Verfügung stehen, deswegen musste eigens ein BZ-Stapel selbst gebaut werden, um die Messtechnik zu erproben. Bei konstantem Druck erwies sich die Messtechnik als sehr praktikabel. Bei dem aktuellen Einbaukonzept ist die Faser fest mit dem BZ-Strömungsfeld verbunden. Die minimalen Größenänderungen bei Druckvariationen haben dadurch Fehlmessungen erzeugt. Daher muss die mechanische Integration in Folgeprojekten überarbeitet werden.

BZ-Stapel Eigenbau

Wie zuvor erwähnt musste für die Erprobung der Glasfasertemperaturmessung und für die Ramanmessung in den Strömungskanälen ein eigener BZ-Stapel entwickelt werden, der die entsprechenden Zugänge bereitstellt. Durch dieses Projekt konnten viele praktische Erkenntnisse zum BZ-Stapelbau erarbeitet werden, insbesondere der Zusammenhang zwischen Dichtungsstärken und Lagenaufbau in der Zelle. Es kamen Druckmessfolien zum Einsatz, um die Presskraftverteilung zu überprüfen.

AP 4.5: Konzeption einer optisch zugänglichen Strahlpumpe

Zusammenfassung:

Es wurden wichtige Schritte bei der Strahlpumpenforschung erfolgreich durchgeführt. Dabei konnte erhebliche Expertise bei der Thermodynamik von Strahlpumpen aufgebaut werden. Von Grund auf wurden thermodynamische Simulationsmodelle zur Beschreibung der komplexen physikalischen Effekte in der Strahlpumpe erstellt. Mithilfe des Simulationsmodells wurde schließlich eine optisch zugängliche Strahlpumpe ausgelegt, aufgebaut und experimentell untersucht. Die Konzeptionierung einer optisch zugänglichen Strahlpumpe war zwar deutlich aufwändiger als die Fertigung einer "klassischen" Strahlpumpe, allerdings trägt die optische Zugänglichkeit maßgeblich zu einem verbesserten Verständnis der komplexen Prozesse im Bauteil bei und hilft, Optimierungsmöglichkeiten und Betriebsstrategien für Strahlpumpen in der technischen Anwendung zu identifizieren. Dafür, dass die Strahlpumpe bisher nur mit Druckluft, ohne Sekundärstrom und gegen Umgebungsdruck betrieben wurde, waren die erzielten experimentellen Ergebnisse bereits vielversprechend und das grundlegende Funktionsprinzip der Strahlpumpe konnte auch nachgewiesen werden. Wie gut die Strahlpumpe bei realen Betriebsbedingungen funktioniert, wird sich bei künftigen Messungen zeigen.

Insbesondere durch die Teilnahme an Konferenzen konnte ein guter Überblick über die Strahlpumpenaktivitäten in der deutschen und internationalen Forschung gewonnen werden. Der Betrieb einer optisch zugänglichen Strahlpumpe hebt die Professur deutlich von anderen Instituten ab. Aufgrund der Tatsache, dass momentan ein großes Interesse der Industrie an Strahlpumpen für Antriebssysteme besteht, soll die Strahlpumpenforschung an der Professur über das Projekt hinaus fortgesetzt werden. Das im Rahmen des FCS-HD Projekts aufgebaute Wissen soll in künftigen Projekten genutzt, vertieft und erweitert werden. Konkret sind weitere Aktivitäten zur Strahlpumpe als Teil eines Forschungsprojekts vorgesehen, zudem wird bereits ein Industrieauftrag im Bereich Strahlpumpe bearbeitet.

Zu den Forschungsaktivitäten zur Strahlpumpe im Rahmen des FCS-HD Projekts wurde seit dem letzten Zwischenbericht eine weitere Veröffentlichung erstellt, die beigelegt ist.

AP 4.6: Messung des Komponentenverhaltens/-eigenschaften im ges. Betriebsbereich

Zusammenfassung:

Charakterisierung einer MEA im gesamten Betriebsbereich

Nach der Entwicklung von Einfahrprozeduren und der Optimierung der Betriebsparameter des FuelCon wurde das Betriebskennfeld einer MEA umfassend vermessen, einschließlich Variation von Temperatur, Feuchte, Durchfluss und Druck. Dabei konnten wertvolle Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit und zum Betriebsverhalten der MEA gewonnen werden.

Vermessung der Befeuchterkomponente Bubbler

Die Befeuchtung der Gase beeinflusst die Leistung der Brennstoffzelle erheblich. Daher wurde die Befeuchterkomponente, hier als Bubbler, mit Fokus auf die Einstellgenauigkeit der relativen Feuchte untersucht. Ein Kennfeld ermittelte die Auswirkungen von Wasserlevel, Wassertemperatur, Durchflussgeschwindigkeit und Druck. Der Raman-Sensor, validiert durch einen Vaisala-Feuchtesensor, zeigte, dass der Taupunkt nur wenig von Druck und Durchfluss abhängt. Bei hohen Taupunkttemperaturen traten jedoch Probleme auf, vermutlich aufgrund von Kondensation zwischen Bubbler und Messpunkt. Zudem war die Temperaturregelung nahe der Umgebungstemperatur ungenau, da der Bubbler nicht gleichmäßig erhitzt wurde. Insgesamt zeigte der Bubbler ein träges Verhalten, das schnelle Taupunktänderungen erschwerte. Es wurde die Messungenauigkeit im Betrieb untersucht. Bei einer maximalen Taupunkttemperaturabweichung von 5,5 °C wurde eine tatsächliche Feuchte von 65 % statt der Sollfeuchte von 100 % gemessen, was die Leistung der Brennstoffzelle stark beeinträchtigte. Zur

Verbesserung wurde ein neues Konzept entwickelt, bei dem die notwendige Wassermenge über einen Massendurchflussregler in einen Verdampfer geleitet wird, der sie mit einem trockenen Gasstrom vermischt. Erste Tests zeigen, dass Verdampfer eine höhere Dynamik ermöglichen, da der Wassermassenstrom schnell angepasst werden kann. Die Taupunkttemperatur steigt nach ca. 30 Sekunden Einregelzeit. Der derzeit limitierende Faktor ist die Aufheizzeit von etwa 15 Minuten. Der Vorteil des Systems liegt jedoch darin, dass der Prüfstand nur einmalig aufgeheizt werden muss, und die Wasserbeladung über die zugeführte Wassermenge und nicht durch Temperaturregelung erfolgt.

AP 4.7: Messung des Systemverhaltens für unterschiedliche Betriebsfälle

Zusammenfassung:

Im Projektantrag wurde ursprünglich vorgesehen, einen Prüfstand zu entwickeln, der die Funktionalität und Effizienz des Gesamtsystems durch das Zusammenspiel aller Komponenten im relevanten Betriebsbereich für Nutzfahrzeuge umfassend untersucht. Geplant war ein modular gestalteter Prüfstand, der die Beurteilung verschiedener Kombinationen unterschiedlicher Bauteilausführungen als Gesamtsystem ermöglicht. Die Konzeptentwicklung in AP 4.1 hatte allerdings als Ergebnis spezialisierte Einzelprüfstände zu bauen, die anschließend virtuell zu einem Gesamtsystem gekoppelt werden können. Entweder direkt live oder im Nachgang von Messungen, indem die Ergebnisse als Modelle vorliegen. Das AP 4.7 ist dadurch stark mit AP 4.3 verflochten.

Die in AP 4.3 angesprochene Schnittstelle des Gesamtmodells ermöglicht neben einem Optimierungswerkzeug auch die Anbindung an reale Prüfstände. Im Hintergrund kommuniziert eine Serverarchitektur sowohl mit dem Modell, als auch mit Datenaustauschservern der Prüfstände, sowie mit einer Datenbank. Dies ermöglicht Komponenten, die nur als Hardware auf dem Prüfstand zur Verfügung stehen, aber noch nicht als virtuelle Komponente im Modell abgebildet sind, dennoch in der Gesamtsystemanalyse zu berücksichtigen. Statt von einer Modellkomponente werden die Werte vom jeweiligen Komponentenprüfstand abgerufen. Um diese Methodik an günstiger Hardware entwickeln und testen zu können wurde der X-in-the-loop Prüfstand „Felicity“ aufgebaut. Damit werden verschiedene Nutzungsstrategien dieser komplexen Architektur aus Modellen, Hardware, Datenbanken und Optimieren systematisch untersucht. Die ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend enorme Zeit- und Kosteneinsparungen in der BZ-Entwicklung auf Komponenten- und Systemebene zu ermöglichen. Die Weiterführung des Themas liegt dem PTJ als neue Projektskizze vor und erste Reaktionen lassen auf eine Bewilligung hoffen.

AP 4.8: Entwicklung eines Anoden-Kathoden-Moduls (AKM)

Zusammenfassung:

In Arbeitspaket 4.8 wurde eine Änderung des Projektziels weg von der Identifikation festigkeitskritischer Komponenten hin zur Entwicklung des AKM vorgenommen. Das neuartige Anoden-Kathodenmodul fasst erstmals die Entfeuchtung und Befeuchtung auf der Anoden- und Kathodenseite sowie die Temperierung in einer einzigen Komponente zusammen. Aufgrund der einzigartigen Kombination von Konditioniereinheiten für beide Seiten des Brennstoffzellensystems wird die Entwicklung des AKM als sehr innovativ angesehen, da es bislang keine vergleichbare kombinierte Systemkomponente gibt, die diese Funktionen vereint.

Zuerst wurde eine Materialauswahl für die Membran getroffen. Die Membran ist entscheidend für den Wassertransport innerhalb des AKM, während sie gleichzeitig gasdicht sein muss. PFSA-Membranen wurden aufgrund ihrer hohen Wasserdurchlässigkeit, herausragenden Gasdichtheit sowie thermischen und chemischen Stabilität als besonders geeignet identifiziert. Diese Faktoren machen sie ideal für den Einsatz im Brennstoffzellensystem, zudem werden sie bereits erfolgreich in herkömmlichen Befeuchtern verwendet.

Die ausgewählte Materialklasse wurde in eine Simulationsumgebung integriert und eingehend untersucht, wie in Arbeitspaket 4.3 beschrieben. Mit einem neuartig entwickelten Prüfstand wurde der Einfluss von Flüssigwasser auf den Wassertransport innerhalb des Anoden-Kathoden-Moduls (AKM) untersucht. Finanziert durch Projektmittel wurde der Prüfstand entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen. Er zeichnet sich durch eine optisch zugängliche Prüflingskammer aus, deren Neigungswinkel verstellbar ist, um das Verhalten der Membran im Kontakt mit flüssigem Wasser zu erforschen. Dieser ermöglicht die Untersuchung einer Befeuchtermembran unter verschiedenen Bedingungen, wie Membranart, variierenden Temperaturen, Drücken, Durchflussraten und Wassermengen. Die Messergebnisse wurden erfolgreich mit der Simulationsumgebung abgeglichen und zeigten eine hohe Übereinstimmung.

Nach der Inbetriebnahme des Prüfstands wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Die Messreihen umfassten Variationen der Betriebsbedingungen, welche typisch für mobile Anwendungen in schweren Nutzfahrzeugen sind. Untersucht wurden Drücke von 1 bis 2,5 bar, Stickstoffmassenflüsse von 1,5 bis 2,5 Nl/min und Temperaturen von 50 °C bis 80 °C. Das Transportverhalten der Befeuchtermembran wurde mit und ohne flüssiges Wasser analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass Temperaturerhöhungen die Wassertransferrate steigern, während Druckzunahmen diese verringern. Höhere Massenströme an trockenem Gas erhöhen den Stofftransport. Flüssiges Wasser erhöht signifikant die Wassertransferrate und die relative Feuchte am trockenen Ausgang der Prüflingskammer. Diese Erkenntnisse stimmen mit der Theorie des Schröders Paradoxon überein, das die verbesserte Wassertransfer-eigenschaft der PFSA-Membran bei flüssigem Wasser erklärt. Im Rahmen von AP 4.8 diente das Simulationsmodell aus AP 4.3 zur Analyse und zum Abgleich der Messdaten zur Untersuchung der Stofftransporteigenschaften von Befeuchtermembranen. Der Prüfstand wurde automatisiert, um lange Messreihen effizient durchzuführen und auszuwerten. Die Automatisierung erfolgt über eine OPC-Schnittstelle der Prüfstands-SPS, die Daten an ein Pythonskript übermittelt. Das Skript umfasst die automatisierte Steuerung von Messpunkten, die Aufzeichnung von Komponenten- und Sensorwerten in einer SQLite-Datenbank mit einer Zeitauflösung von 200 ms sowie kontinuierliche Sicherheitsabfragen. Sicherheitsmeldungen werden per Push-Benachrichtigungen an das Smartphone des Prüfstandsführers gesendet, was eine ortsungebundene Überwachung ermöglicht. Der Prüfstand unterstützt auch eine Remote-Steuerung.

Für Messungen über 80 °C wurde neben einer Acrylglas-Prüflingszelle eine zweite Prüflingskammer aus Edelstahl gefertigt. Zu den für den Prüfstand beschafften Sensoren für die relative Feuchtigkeit wurden erfolgreiche Validierungsmessungen durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass kapazitive Feuchtesensoren nach Kontakt mit Flüssigwasser längere Ausfallzeiten haben. Trocknungsvorgänge können die Ausfallzeiten verkürzen.

Zur Anwendbarkeit des AKMs im Gesamtsystem wurden verschiedene Systemkonfigurationen entwickelt, die die Effizienz beim Wasser- und Wärmemanagement verbessern. Diese beinhalten die Entkopplung von Wassergewinnung und -bereitstellung durch Tanksysteme. Ferner wurden verschiedene Strategien für die zielgerichtete Wasserzufuhr in das AKM evaluiert. Aufgrund dieser innovativen Entwicklungen wurde ein Patent angemeldet. Das Patent wurde durch ein Nachanmeldungsverfahren um die Implementierung einer Zwischenschichtstruktur erweitert, welche Schwankungen bei geringer Flüssigwasserzufuhr ausgleicht, indem sie das Wasser gleichmäßig auf der Membran verteilt. Messungen innerhalb dieses Arbeitspakets bestätigen die Machbarkeit dieser Innovationen.

3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verlauf des Projekts wurde deutlich, dass zugekaufte Prüfstände für die spezifischen Anforderungen der thermodynamischen Bilanzierung und der Untersuchung einzelner Brennstoffzellenkomponenten nur bedingt geeignet sind. Insbesondere die eingeschränkte Möglichkeit zur Integration zusätzlicher

Sensorik sowie die begrenzte Flexibilität der Prüfstandssteuerung stellten erhebliche Herausforderungen dar. Der bereits vor Projektbeginn vorhandene FuelCon Evaluator verdeutlichte diese Einschränkungen, sodass eine strategische Neuausrichtung erforderlich wurde. Um eine präzisere und anpassungsfähigere Versuchsinfrastruktur zu schaffen, wurden im Projektverlauf eigens entwickelte Prototypenprüfstände konzipiert und aufgebaut. Diese bieten nicht nur eine höhere Flexibilität in der Sensorintegration, sondern reduzieren auch langfristig die Betriebskosten, da Wartungs- und Serviceleistungen externer Anbieter entfallen. Die Prüfstände bestehen aus modularen Einzelkomponenten wie Massenflussreglern, Verdampfern, Heizschläuchen und Feuchtesensoren, die individuell konfiguriert wurden, um spezifische Untersuchungen durchzuführen.

Die wichtigsten kostentechnischen Positionen innerhalb des Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Prüfstand für Sensoren (A 4.4)** – Entwicklung und Validierung innovativer Sensortechnologien zur Feuchte- und Gasanalyse
- **Prüfstand für den Wassertransport durch Membranen (A 4.8)** – Untersuchung der Flüssigwasser-Diffusion und deren Einfluss auf den Stofftransport
- **Prüfstand für konventionelle Befeuchter (A 4.6)** – Analyse und Optimierung bestehender Befeuchtungssysteme
- **Prüfstand für eine optisch zugängliche Strahlpumpe (A 4.5)** – Visualisierung und experimentelle Untersuchung der Strahlpumpencharakteristik
- **Brennstoffzellenprüfstand (AxCell)** – Weiterentwicklung der Brennstoffzellenvermessung am Shortstack
- **Gesamtsystemsimulationsumgebung (Felicity, X-in-the-Loop)** – Entwicklung einer gekoppelten Simulationsplattform zur realitätsnahen Systembewertung

Durch die gezielte Entwicklung und Implementierung dieser Prototypenprüfstände konnten maßgebliche wissenschaftliche und technische Fortschritte erzielt werden, die über das Projekt hinaus eine nachhaltige Nutzung und Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse ermöglichen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Arbeiten waren von zentraler Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung und Verwertung der Ergebnisse. Ein zentraler Aspekt war die Entwicklung und Optimierung neuer Prüfstände, die es ermöglichen, innovative Technologien unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Da derartige Prüfstände bisher nicht in dieser Form existierten, war es erforderlich, neuartige Lösungen zu entwickeln, um die spezifischen Projektziele erreichen zu können. Darüber hinaus spielte die Prototypenentwicklung eine entscheidende Rolle. Die erarbeiteten Konzepte und technischen Lösungen waren nicht einfach aus bestehenden Systemen übertragbar, sondern erforderten eine gezielte Neuentwicklung. Dies machte eine umfassende Test- und Validierungsphase notwendig, um sicherzustellen, dass die erarbeiteten Prüfstände den Standards genügen. Ein weiterer wichtiger Aspekt war die gleichzeitige Veröffentlichung und Bereitstellung der Ergebnisse. Die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden sind nun allgemein zugänglich und können in verschiedenen Anwendungsfeldern weiter genutzt werden. Ohne die intensive Forschung und Entwicklung wäre es nicht möglich gewesen, die angestrebten Fortschritte zu realisieren. Das Projekt hat nicht nur zur technologischen Weiterentwicklung beigetragen, sondern auch wertvolles Wissen generiert, das langfristig einen Mehrwert für die Wissenschaft und Industrie bietet.

5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der voraussichtliche Nutzen der Projektergebnisse erstreckt sich sowohl auf wissenschaftliche als auch auf wirtschaftliche Anwendungsbereiche und bildet die Grundlage für weiterführende Entwicklungen.

Ein wesentlicher Aspekt ist die technische Verwertbarkeit der erzielten Erkenntnisse, insbesondere im Bereich der Membranbefeuchtertechnologie. Die neu entwickelten Konzepte zur aktiven Nutzung von Flüssigwasser in Membranbefeuchtern eröffnen neue Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung von Brennstoffzellensystemen. Die dazugehörige Patentanmeldung und eine Nachanmeldung unterstreichen das wirtschaftliche Potenzial dieser Technologie. Konkrete Verwertungsoptionen umfassen Lizenzvergaben an Industriepartner sowie die Integration der Ergebnisse in zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Darüber hinaus wurden wertvolle methodische und technologische Grundlagen geschaffen, die in zukünftige Entwicklungen einfließen. Die in Modelica aufgebaute System-Modell-Umgebung für Brennstoffzellensysteme bietet eine leistungsfähige Plattform für die virtuelle Entwicklung und Optimierung von Brennstoffzellensystemen, was sowohl in der Forschung als auch in der industriellen Anwendung von großem Nutzen ist.

Für die nähere Zukunft sind mehrere konkrete Maßnahmen geplant:

- **Weiterentwicklung des AxCELL-Prüfstands** mit einer geplanten Erweiterung um Degradationskopplung, aktuell in der Antragsphase bei PTJ mit positiver Rückmeldung
- **LincFlow-Prüfstand**, welcher die vielversprechende Alternative der Spray-Befeuchtung weiter untersucht
- **Iwanka-Projekt (KSB-Stiftung)** zur Analyse neuartiger Systemarchitekturen und deren optimierter Wärmeintegration

Zusätzlich wird die in diesem Projekt erlangte Strahlpumpen-Auslegungskompetenz in Form von Dienstleistungen für industrielle Anwendungen weiterverwertet. Zudem besteht die Möglichkeit, die entwickelten Gassensor-Technologien in Form von Messdienstleistungen oder als kommerzielles Produkt weiter zu nutzen.

Durch die enge Zusammenarbeit von Forschung und Lehre – mit über 20 Abschlussarbeiten und der Integration der Projektergebnisse in den akademischen Lehrbetrieb – wird sichergestellt, dass das gewonnene Wissen nachhaltig weitergetragen wird und die nächste Generation von Fachkräften darauf aufbauen kann.

6. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Brennstoffzellensysteme sind Gegenstand aktueller Forschung, jedoch ist die Anwendungsorientierung und die eingehende Betrachtung des Versorgungssystems und seiner Komponenten mit innovativen Messmethoden und spezifisch entwickelten Prüfeinrichtungen weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal.

7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

2022

- Braun, K., Wolf, M., De Oliveira, A., Preuster, P., Wasserscheid, P., Thiele, S., ... & Wensing, M. (2022). Energetics of Technical Integration of 2-Propanol Fuel Cells: Thermodynamic and Current and Future Technical Feasibility. *Energy technology*, 10(8), 2200343.

2023

- Lindacher, N., Weiß, L., Rieß, S., & Wensing, M. (2023, March). Modeling of ejectors applied in PEMFC systems. Poster presentation at ModVal 2023 - 19th Symposium on Fuel Cell and Battery Modeling and Experimental Validation, Duisburg, DE.
- Lindacher, N., Weiß, L., Rieß, S., & Wensing, M. (2023, July). Modeling of ejectors applied in PEMFC systems 2. Poster presentation at EFCF 2023: Low-Temp. Fuel Cells, Electrolysers & H₂ Processing, Luzern, CH.
- Mull, S., Weiß, L., & Wensing, M. (2023, March). Membrane humidifier model for PEM fuel cell systems. Poster presentation at 19th Symposium on Fuel Cell and Battery Modeling and Experimental Validation, Duisburg.
- Mull, S., Weiß, L., McMackin, M., & Wensing, M. (2023). Membrane humidifier model for PEM fuel cell systems. In Sophie Mull (Eds.), *Proceedings of the European Fuel Cell Forum 2023* (pp. 11). Lucerne.
- Braun, K., Mahayni, Y., Thiele S., Weiß, L. & Wensing, M. (2023). 2-Propanol Fuel Cell System. In Katharina Braun (Eds.), *Proceedings of the European Fuel Cell Forum 2023*. Lucerne.

2024

- Lindacher, N., Weiß, L., Rieß, S., & Wensing, M. (2024). On the Anode Exhaust Gas Recirculation of PEM Fuel Cells Using Passive Ejectors. Poster presentation at 20th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal 2024), Baden, CH.
- Braun, K., Rüppel, B., Weiß, L. & Wensing, M. (2024). In-Situ Measurement Technique for Data Acquisition in Fuel Cells: Enabling Accurate Energy Balance Modeling. Poster presentation at 20th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal 2024), Baden, CH.
- Renner, E., Römpke, S.-M., Mull, S., Braun, K., Weiß, L., Wensing, M., & Schmauß, B. (2024). Fiber Bragg Grating Temperature Sensing in Fuel Cells. In *2024 IEEE Photonics Conference (IPC)* (pp. 1-2). Rom, IT: New York City: IEEE.
- Mull, S., Weiß, L., & Wensing, M. (2024). High-load operating characteristics of planar membrane humidifiers of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for heavy-duty applications. In *Proceedings of the Energy & Propulsion Conference & Exhibition*. Columbus, OH 43215, US: SAE Mobilus.
- Mull, S., Weiß, L., & Wensing, M. (2024, March). Experimental and simulative analysis of the dependence between liquid water amount and mass transfer in a planar membrane humidifier. Paper presentation at 20th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal 2024), Baden, CH.
- Braun, K., Luetzenkirchen, J., Weiss, L., & Wensing, M. (2024). *Advancing Fuel Cell Testing Environments: Overcoming Limitations in Conventional Humidification Methods* (No. 2024-01-4321). SAE Technical Paper.

- Rüppel, B., Lehnert, B., Weiß, L., & Wensing, M. (2024). Long-Term Continuous Gas Diagnostics For Fuel Cell Systems: Development Of An Automatized Raman Metrology. In *Proceedings of the 21st International Symposium on Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*.