

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1: Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde:

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 Nutzfahrzeugbereich 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 Prüfmethode 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 FuelCon-Brennstoffzellenprüfstand der Firma HORIBA 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.

Ablauf des Vorhabens:

Der Ablauf des Vorhabens verlief gemäß dem aufgestellten Zeitplan entsprechend folgender Tabelle:

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
AP	AP Titel												
4.1	Konzeption einer Testumgebung für das Versorgungssystem												
4.2	Nachbildung eines Stapels im Versorgungssystem												
4.3	Erstellung eines 1D-Simulationsmodells zur Abbildung des Versorgungssystems und seiner Komponenten												
4.4	Messtrategie und die Messtechnik												
4.5	Konzeption einer optisch zugänglichen Strahlpumpe												
4.6	Messung des Komponentenverhaltens/-eigenschaften im ges. Betriebsbereich												
4.7	Messung des Systemverhaltens für unterschiedliche Betriebsfälle												
4.8	Entwicklung eines Anoden-Kathoden-Moduls (AKM)												

Wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

AP 4.1: Innerhalb AP 4.1 wurde ein modulares und flexibles Prüfstandskonzept zur experimentellen Analyse von Komponenten der Balance of Plant (BoP) eines Brennstoffzellensystems für Anwendungen in schweren Nutzfahrzeugen entwickelt. Untersuchungen am bereits vorhandenen FuelCon-Prüfstand ergaben eine Analyse der Einfahrprozedur und den Abhängigkeiten einer Einzelzelle zu verschiedenen Betriebsbedingungen. Diese Analysen lieferten relevante Informationen zur Charakteristik von Brennstoffzellen, die als Grundlage für die Entwicklung neuartiger Prüfumgebungen dienten. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde entschieden, dass die Aufteilung in mehrere Teilprüfstände vorteilhaft ist, verbunden durch eine zentrale Modelgasversorgung, die im Projekt konzipiert, aufgebaut und automatisiert wurde. Diese Prüfstände sind fortgeführt in den Arbeitspaketen AP 4.4, AP 4.6 und AP 4.8. Eine automatisierte Datenaufzeichnung in eine strukturiertere SQLite-Datenbank bietet eine solide Datenbasis für weiterführende Vorhaben. Automatisierte Sicherheitsabfragen ermöglichen einen durchgehenden Prüfbetrieb.

AP 4.2: Es wurde ein Brennstoffzelleprüfling entwickelt. Dieser weist eine aktive Fläche von 49 cm² auf. Der Aufbau umfasst Sensorpositionen für das Testen von Sensoren. Hierbei wurde neuartige faseroptische Temperaturmesstechnik getestet und die Machbarkeit demonstriert. Dies erfolgte in direkter Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der FAU. Innerhalb der Zusammenarbeit wurde eine Abschlussarbeit gemeinsam betreut und eine Veröffentlichung erstellt. Darüber hinaus wurden an dem Brennstoffzelleprüfling Dichtheitsprüfungen und elektrische Leitfähigkeitsprüfungen durchgeführt.

AP 4.3: Es wurden 1D-Simulationsmodelle einzelner BoP-Komponenten und der Brennstoffzelleneinzelzelle entwickelt und analysiert. Zunächst wurde in der Programmierumgebung Matlab/Simulink gearbeitet. Schnell wurden komplexe Verschaltungen notwendig, um die gewünschte Flexibilität im Modell zu gewährleisten. Die Modellierungsumgebung Modelica stellte sich als deutlich anwendungsfreundlicher heraus. Die Einzelkomponentenmodelle wurden daher in Modelica übertragen und dort weiterentwickelt. Durch eine selbstentwickelte Struktur ist es nun möglich schnell verschiedenste Systemarchitekturen aus den Einzelkomponenten aufzubauen. Das bisher detaillierteste Einzelkomponentenmodell beschreibt den Membranbefeuchter. Es ist an eigenen Messwerten validiert. Desweiteren gibt es detaillierte Modelle von Brennstoffzelle und Strahlpumpe. Ein externer Optimierer kann mit Hilfe von Kostenfunktionen Systemoptimierungen in Bezug auf frei wählbare Auslegungsparameter durchführen.

AP 4.4: Sowohl am FST, als auch beim Projektpartner MAN sowie bei anderen Forschenden ist die präzise Gasanalyse im dynamischen Betrieb von Brennstoffzellensystemen ein Problem, da die kommerziell erhältliche Sensorik die gewünschten Informationen nicht verlässlich liefert. Daher wurde in AP 4.4 ein neuartiger Online-Gas-Sensor basierend auf der Raman-Messtechnik entwickelt und validiert. Hierfür wurde eine Messzelle mit optischer Zugänglichkeit konzipiert. Die Messungen an den Projektprüfständen demonstrierten erfolgreich die Machbarkeit. Es ist eine Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Wasser, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff in Echtzeit mit dem Raman-Sensor über ein eigens entwickeltes Python-Skript möglich. Die Genauigkeit der Messung ist von der Messfrequenz abhängig.

AP 4.5: Unter Verwendung der Simulationsergebnisse aus AP 4.3 wurde in AP 4.5 ein Strahlpumpenprüfstand entwickelt. Dieser zeichnet sich durch seine optische Zugänglichkeit aus. Geometrien der Strahlpumpe und verschiedener Düsenkonfigurationen wurden berechnet und konstruiert. Der Prüfstand konnte erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden und ermöglicht die optische Untersuchung von Strahlpumpen. Insbesondere können verschiedene Primärdüsenauslegungen und Düsenaustrittspositionen untersucht werden und die Halslänge der Pumpkammer dimensioniert werden.

AP 4.6: Die Vermessung des Befeuchtertyps „Bubbler“ erfolgte in AP 4.6. Die Bubbler-Befeuchtungstechnik wird häufig in der Prüfstandstechnik von MEA-Charakterisierungsprüfständen eingesetzt. Die Raman-Messtechnik aus AP 4.4 wurde dabei erfolgreich angewendet. Die Regelgenauigkeit der Taupunkttemperatur konnte auf eine Unsicherheit von bis zu 5.5 °C bestimmt werden. Es erfolgte das Erarbeiten eines alternativen Befeuchungskonzepts mittels Verdampfer, welches sich durch höhere Genauigkeiten und schnellere Regelbarkeit auszeichnet. Es wurde ein eigenentwickelter MEA-Charakterisierungsprüfstand mit dieser Befeuchtungstechnik aufgebaut und in Betrieb genommen.

AP 4.7: Die ursprünglich geplante Entwicklung eines umfassenden Systemprüfstands in AP 4.7 wurde ersetzt durch die Entwicklung mehrere spezialisierte Prüfstände inklusive einer virtuellen Modellkopplung. Diese Vorgehensweise wurde konkreter in den Arbeitspaketen AP 4.2, AP 4.3 und AP 4.6 umgesetzt.

Das AP 4.8 wurde auf die Entwicklung eines Anoden-Kathoden-Moduls (AKM) zu Projektanfang abgeändert. Es zeigte sich, dass die Optimierung der Befeuchtungsstrategie unter Ausnutzung sowohl des Kathoden- als auch des Anodenpfads zu bedeutenden Verbesserungen des Gesamtsystems führen kann. Als Material für das AKM wurden gasdichte und wasserleitende PFSA-Membranen identifiziert. Diese wurden im Anschluss in einem neuartig innerhalb des Projekts konzipiertem Prüfstand bezüglich ihrer Stofftransporteigenschaften vermessen. Das Simulationsmodell aus AP 4.3 diente als Auslegungsgrundlage des Prüfstands. Die Untersuchungen zeigten, dass neuartige Betriebsweisen unter Ausnutzung von Kondensatwasser aus der Brennstoffzelle den Stofftransport im Befeuchtungsmodul innerhalb des Brennstoffzellensystems um den Faktor 2-3 steigern können.