

Hybride Brennstoffzellencluster für Bus- und Bahnanwendungen im ÖPNV

M. Klingner ^{a1}, M. Schneider ^{a2}

^a Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
Zeunerstraße 38, 010 69 Dresden, Deutschland

Kurzfassung:

Die Einführung von Wasserstofftechnologien in die Verkehrstechnik gestaltet sich offenkundig aufwendiger, als noch vor wenigen Jahren apostrophiert. Auch wenn der Automobilbau gegenwärtig stärker auf die Entwicklung effizienter Hybridtechnologien orientiert und die Investitionen in die Brennstoffzellenentwicklung eher stagnieren, sind die Potentiale wasserstoffbasierter Antriebe nach wie vor von hoher strategischer Bedeutung.

Besonders im ÖPNV, wo der Flottenbetrieb deutlich geringere infrastrukturelle Anforderungen stellt als im Individualverkehr, werden Wasserstoffantriebe vor allem im innerstädtischen Verkehr in absehbarer Zeit ein Alternative zu oberleitungsgebundenen elektrischen Verkehrssystemen bieten können. Die inzwischen zahlreichen europäischen aber vor allem auch nordamerikanischen BZ-Bus-Projekte sind ein erster Schritt zur Einführung dieser Technologien.

Dass BZ in konventionellen Straßenbahnsystemen sowohl aus technischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen die wegseitigen Oberleitungen derzeit nicht verdrängen werden, ist u.a. Ergebnis einer Studie, die als einführender Teil des Europäischen FELICITAS-Projektes³ (Fuel Cell power - train and clustering for heavy duty transport) die Implementierungsmöglichkeiten von Hochleistungsbrennstoffzellen analysierte. Die klassische Straßenbahn ist für einen BZ-basierten Antrieb zumindest unter Annahme des gegenwärtigen Technologiestandes deutlich zu schwer. In der Regel werden Straßenbahnen pro 10 t Fahrzeugmasse mit etwa 100 kW Antriebsleistung ausgelegt. Allein der Bauraum für den Einbau eines entsprechenden 400 kW - 900 kW BZ-Systems einschließlich des zugehörigen Wasserstoffspeichers ist selbst in Hochflurfahrzeugen nicht verfügbar. Darüber hinaus übersteigt das Gewicht eines solchen BZ-Systems einschließlich der Speichermodule die zulässigen Achslasten um ein Vielfaches.

Im Vortrag wird gezeigt, dass trotz dieser offensichtlichen Widersprüche neben BZ-Bussen auch Wasserstoffbahnen auf der Basis neuer Fahrzeug- und BZ-Technologien die Zukunft des Öffentlichen Verkehrs prägen werden. Die Antriebstechnologien künftiger BZ-Busse oder Wasserstoffbahnen werden hybride Brennstoffzellencluster sein, die bezüglich Lebensdauer, Leistungsverfügbarkeit, Energieeffizienz, Sicherheit und Kosten an die Erfordernisse Öffentlicher Transportsysteme angepasst werden können.

Schlagworte: Brennstoffzellen, Hybridisierung, ÖPNV

¹ e-mail: matthias.klingner@ivi.fraunhofer.de; URL: <http://www.ivi.fraunhofer.de>

² e-mail: mareike.schneider@ivi.fraunhofer.de; URL: <http://www.ivi.fraunhofer.de>

³ www.felicitas-fuel-cells.info

1 Einleitung

Brennstoffzellen-basierte Antriebs- und APU-Systeme im Pkw-Bereich sind seit einigen Jahren in der Entwicklung und Erprobung. Auch in höheren Leistungsbereichen, z.B. in Bussen, wurden Brennstoffzellen bereits demonstriert. Basierend darauf steigt zunehmend das Interesse, solche Technologien auch für Schwerlastfahrzeuge einzusetzen.

Derartige Anwendungen stellen nicht nur hinsichtlich des Leistungsbereiches wesentlich höhere Anforderungen als beim Pkw, sondern auch bezüglich Leistungsdynamik, Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Komponenten sowie Reichweite des Fahrzeuges. Das Projekt FELICITAS widmet sich diesen Fragestellungen für schwere Fahrzeuge auf Straße, Schiene und zu Wasser. Übergreifend werden die Anforderungen und technischen Probleme des Brennstoffzelleneinsatzes in Bussen, Trucks, leichten und schweren Schienenfahrzeugen sowie Schiffen untersucht [1].

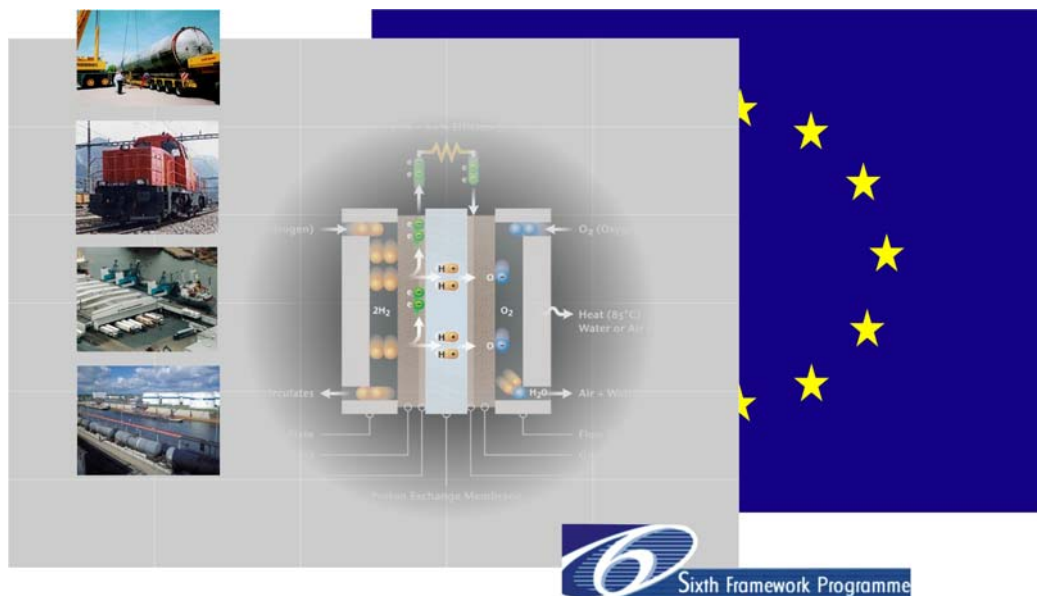


Abb.1-1: FELICITAS - Fuel cell power-trains and clustering in heavy-duty transport

Ein Schwerpunkt der Projektarbeit ist die systematische Erarbeitung der Anforderungsprofile an Brennstoffzellenantriebe und APUs (auxiliary power unit) in den untersuchten Fahrzeugklassen (Abb. 1-2). Die Ergebnisse dieser Arbeiten bestimmen nicht nur die zukünftigen Aufgaben bei der Brennstoffzellenentwicklung, sondern liefern auch die Randbedingungen für Systemdesign und Simulation.

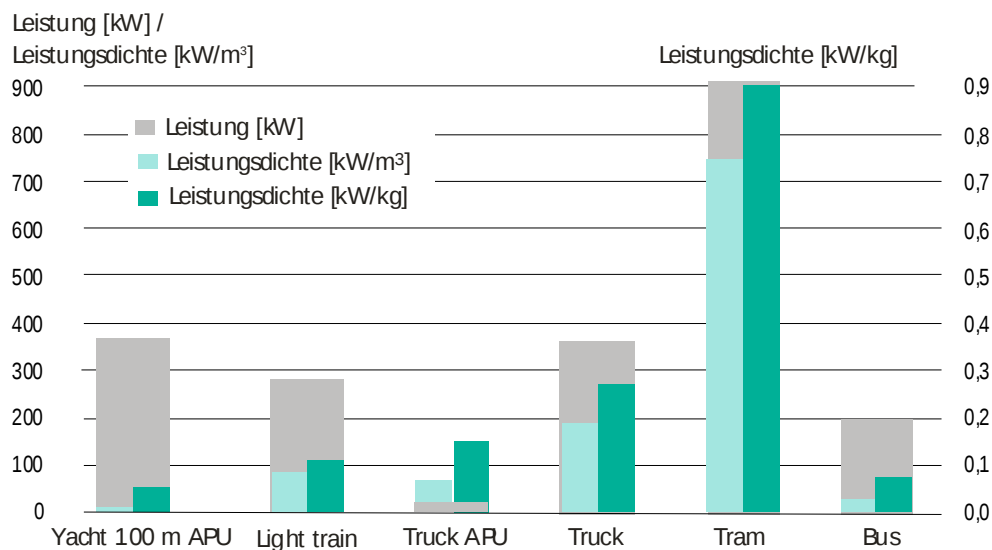


Abb. 1-2: Erforderliche Leistung sowie volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte ausgewählter Anwendungen in schweren Fahrzeugen

Den untersuchten schweren Fahrzeugen ist gemeinsam, dass, abweichend vom Pkw oder anderen mobilen Anwendungen, Antriebsaggregate eine Lebensdauer von 20.000 bis 40.000 h und MTBF-Zeiten (mean time between failure) von 5.000 bis 10.000 h aufweisen müssen, da sie meist über viele Jahre rund um die Uhr im Einsatz sind.

Aufgrund der hohen erforderlichen Leistungen zum Betrieb der Fahrzeuge und der oft großen Reichweiten, die im marinen Bereich mehr als 10.000 km und auf dem Land zumindest einige 100 bis 1.500 km erreichen, müssen erhebliche Mengen an Kraftstoff als Energielieferant zur Verfügung stehen.

Dieser wiederum sollte im Sinne der Gesamteffizienz mit hoher Energiedichte gespeichert werden können, was für die Verwendung flüssiger Kohlenwasserstoffe spricht.

Darüber hinaus sind die Umgebungsbedingungen für Brennstoffzellen in den hier besprochenen Fahrzeugen nicht selten sehr anspruchsvoll - Luftverschmutzung, große Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel, hoher Salzgehalt etc.

Zur Untersuchung spezieller technischer Aufgabenstellungen wurden im Rahmen des Projektes stellvertretend für die Vielfalt an Fahrzeugklassen zwei Szenarien ausgewählt - die APU in einer Luxusyacht und der Busantrieb im Nahverkehr - die einerseits typische Problemstellungen beinhalten auf der anderen Seite aber beim derzeitigen Stand der Technik in naher Zukunft umsetzbar erscheinen.

Die rauen marinen Umgebungsbedingungen (Salzgehalt, Vibrationen) stellen besondere technische Anforderungen an Brennstoffzellen-basierte APUs auf Luxusyachten. Darüber hinaus müssen Leistungen von einigen Hundert Kilowatt bei großer Reichweite aufgebracht werden, was Kohlenwasserstoffe als Kraftstoff nahe legt. Auf der anderen Seite spielen Leistungsdichte (Abb. 1-2) und Kostenfaktoren eine untergeordnete Rolle.

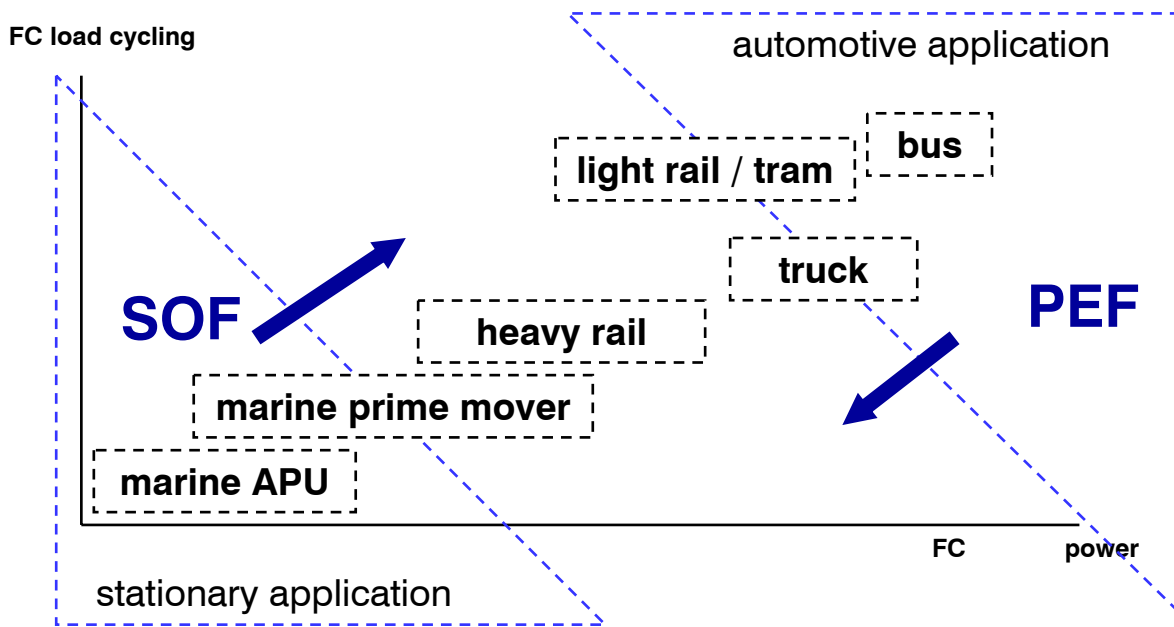


Abb. 1-3: Applikation der Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) und Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC) im FELICITAS - Projekt

Im FELICITAS-Projekt kommen für Schiffsanwendungen SOFC-Technologien zum Einsatz, die aus stationären Brennstoffzellensystemen hoher Leistung weiterentwickelt werden. Antriebssysteme für Busse und leichte Bahnen werden auf der Grundlage der Brennstoffzellentechnologien aus dem Automotivbereich aufgebaut und erprobt (Abb. 1-3).

Für Brennstoffzellen-Antriebe in Nahverkehrsbussen bestehen bereits Erfahrungen aus Demonstrationsprojekten wie CUTE. Aus solchen Projekten ist bekannt, dass vor allem die hohe Dynamik, mit der die Antriebsleistung zur Verfügung stehen muss, für die Lebensdauer der eingesetzten PEFC (polymer electrolyte fuel cells) problematisch ist.

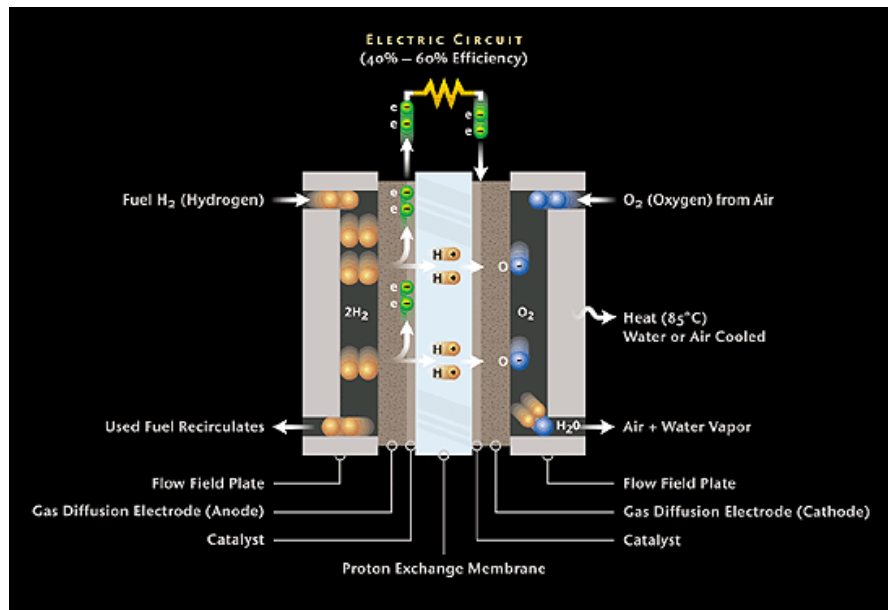


Abb. 1-4: Energiewandlung in PEFC (Quelle: Ballard)

Schnelle Lastwechsel führen u.a. zu mechanischen Beanspruchungen der proton exchange membran (Abb. 1-4) und erschweren darüber hinaus auch eine gleichmäßige Befeuchtung der Membran, die für die Protonenleitfähigkeit unerlässlich ist.

Im Sinne von hoher Zuverlässigkeit und Systemeffizienz werden deshalb in FELICITAS zwei Ansätze verfolgt - das Clustering von PEFC-Systemen aus dem Automobilbau und die Hybridisierung mittels Energiespeicheraggregaten.

Das Clustering von hoch entwickelten Systemen geringerer Leistung liefert skalierbare Systeme höherer Zuverlässigkeit und Flexibilität. Wesentliches Augenmerk liegt hier bei der Entwicklung angepasster, effizienter Nebenaggregate wie z. B. des Kühlsystems.

Die Hybridisierung mittels Energiespeichern (Superkapazitäten, Batterien, Schwungrad) wird als wesentliches Instrument zur Reduzierung der dynamischen Belastung von Brennstoffzellen gesehen.

2 Modulare PEFC - Systeme

2.1 PEFC-Clustering und Hybridisierung

Obwohl die Brennstoffzellensysteme im CUTE-Projekt die Erwartungen hinsichtlich der Lebensdauer deutlich übertroffen haben, sind die kompakten, mobilen PEFC Systeme wie das HY80-System von NuCellsys mit im Mittel 2.000 bis 3.000 Betriebsstunden noch weit entfernt, die Lebensdauieranforderungen in Verkehrssystemen des ÖPNV auch nur annähernd zu erfüllen.

Deutlich erhöht werden können die Betriebsstunden der einzelnen Brennstoffzellensysteme jedoch, wenn sie in Kombination mit einem leistungsfähigen Energiespeicher betrieben werden. Vorausschauende Energiemanagementfunktionen sorgen dafür, dass die dynamischen Lastanforderungen an die Zellen reduziert werden. Als Speicherkomponente kommen spezielle SuperCap / Li-Ionen- Batteriespeicher zum

Einsatz, die ein auf den Brennstoffzellenantrieb und das Lastprofil abgestimmtes Leistungs- / Energiedichteverhältnis aufweisen.

Im FELICITAS-Projekt wurde die Leistungsaufnahme eines Buszyklus in anspruchsvollem Terrain (Buslinie 42 Stuttgart) simulativ aufgearbeitet, um diese realen Lastdaten dann dem Lebensdauertest eines hybridisierten HY80-Systems auf dem Teststand zugrunde legen zu können. Allein durch die Hybridisierung konnte auf dem Teststand nahezu eine Verdopplung der Lebensdauer erreicht werden.

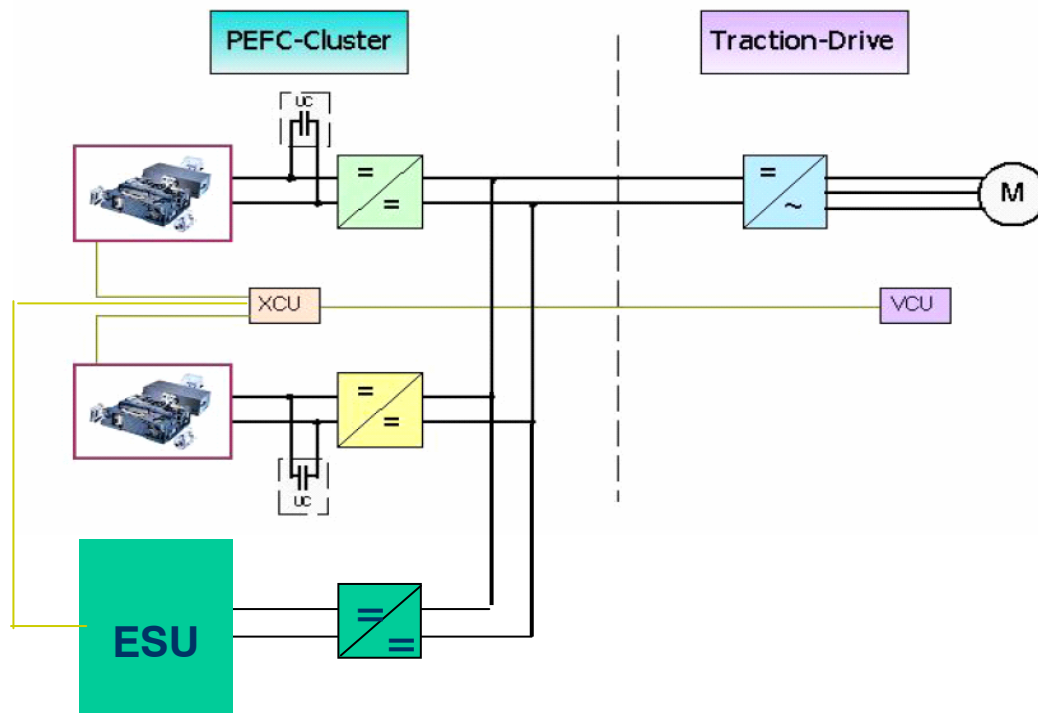


Abb. 2-1: PEFC Cluster aus zwei HY80 – Systemen (FELICITAS), SuperCaps am Ausgang der FC - Systeme und Energiespeichereinheit am Zwischenkreis

Die Energiespeicher werden in verschiedenen Konfigurationen in die PEFC-Cluster eingebunden. Die direkte Parallelschaltung von SuperCaps an den Ausgang der einzelnen PEFC-Systeme (Abb.2-1) hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Wandlerelemente benötigt werden. In dieser Schaltung sind die Energiespeicher jedoch nicht unabhängig von dem PEFC-System steuerbar, nur ein geringer Teil des Speichers wird ausgelastet und besonders in den hohen Leistungsbereichen ist die Speicherkapazität der SuperCap niedrig, da die Ausgangsspannung des PEFC-Systems mit wachsender Leistungsabgabe absinkt.

Im FELICITAS-Projekt wurde daher neben parallelen SuperCaps am Ausgang der PEFCs der kombinierte Li-Ionen Batterie/SuperCap Speicher über DC/DC-Steller direkt auf den Fahrzeugzwischenkreis (560V) geschaltet.

Diese Konfiguration wird derzeit in der AutoTram[®], dem intermediären Versuchsfahrzeug des Fraunhofer-Instituts, in Dresden getestet.

Die für die Traktion einer zweigliedrigen Version der AutoTram[®] notwendige Nettoleistung des Brennstoffzellensystems beträgt je nach Streckenprofil etwa 120kW_{el}.

Durch Clusterung mehrerer kleinerer Brennstoffzellenstacks kann jeder Stack in der Nähe seines optimalen Arbeitspunktes betrieben und die erforderliche Leistung durch Zu- und Abschalten einzelner Stacks bereitgestellt werden. Die Anzahl der lebensdauerverkürzenden idle-Betriebszustände (Leistungsabgabe <10kW im HY80 System) wird damit erheblich reduziert.

Die Clusterbildung aus mehreren kleinen FC-Stacks bietet darüber hinaus die Vorteile, dass das Fahrzeug auch bei Ausfall eines Subsystems noch operabel ist, der betroffene FC-Stack einfach ausgetauscht werden kann und dass das System in kleinen Leistungsstufen ohne Aufwand skalierbar ist.

Alternativ zu den derzeit verwendeten 2x70kW_{el} PEFC in der AutoTram sollen in weiterführenden Projekten neuartige Hochtemperaturmembranen eingesetzt werden. Bei diesen Zellen liegt die optimale Arbeitstemperatur im Bereich von 160 - 180 °C. Damit gestaltet sich die Abfuhr der Reaktionswärme einfacher. Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit des Protonentransports in der Membran von der Feuchte. Generell werden deutlich längere Betriebszeiten für die Hochtemperaturmembrane erwartet.

Die Abbildung 2-2 zeigt die am Fraunhofer ISE aufgenommene Kennlinie einer Hochtemperaturbrennstoffzelle.

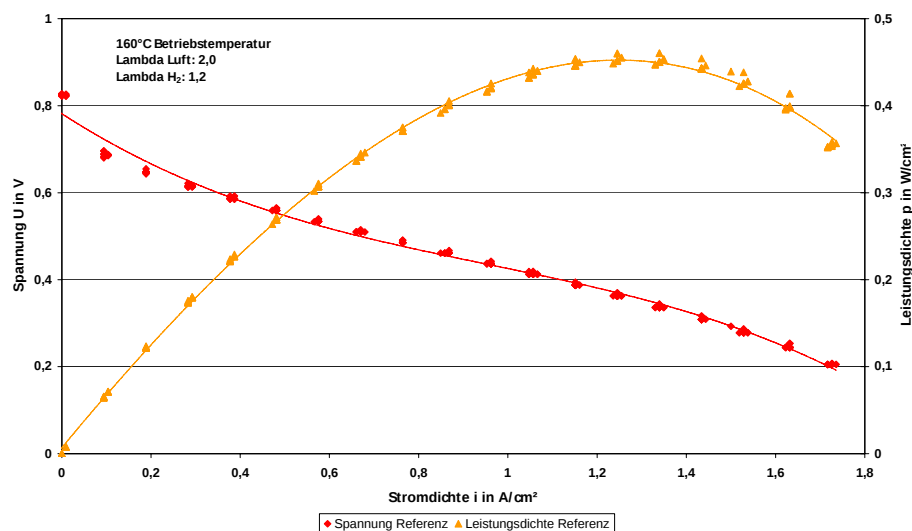


Abb. 2-2: Strom-Spannungs-Charakteristik einer Hochtemperaturbrennstoffzelle

Diese Technologie befindet sich jedoch derzeit noch in einem weitgehenden Entwicklungsstadium.

2.2 Alterungsidentifikation in PEFC - Systemen

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des FELICITAS-Projektes ist die Identifikation der Alterungsprozesse bzw. des Alterungszustands der Brennstoffzellen während des Betriebes.

Die Aussagen über die maximal erreichbare Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen sind einerseits für die Auslegung von Antriebssystemen, Festlegung von Wartungsintervallen und nicht zuletzt für die Kalkulation von Garantieleistungen von grundlegender Bedeutung. Andererseits kann auch über das Energiemanagement auf die Alterungsprozesse Einfluss genommen werden.

Im hybriden Antriebssystem besitzt der Brennstoffzelle als Primemover einen Freiheitsgrad in der Leistungsabgabe (vgl. Abbildung 2-3).

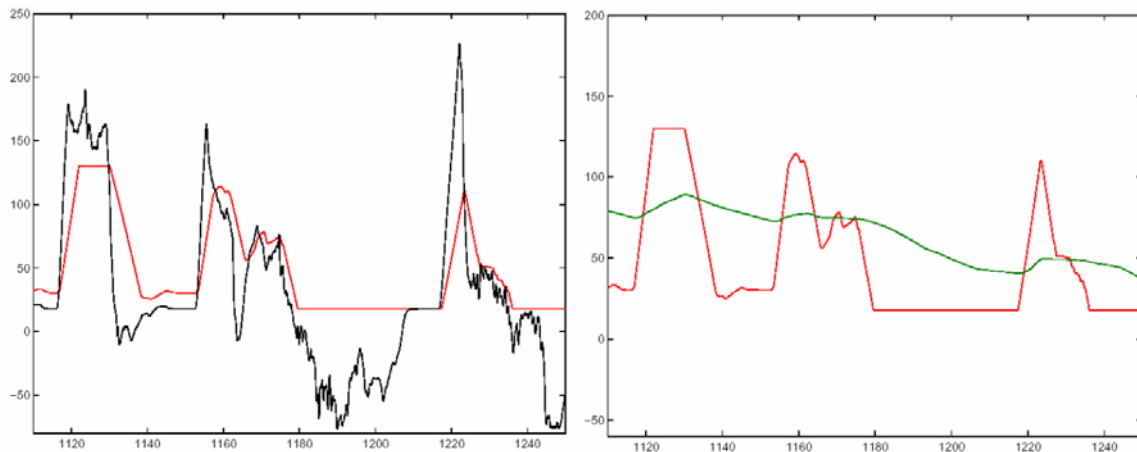


Abb. 2-3: Leistungsabgabekurven der Brennstoffzelle für Fahrzyklus «Linie 42»
Fahrprofil (schwarz), Load-following (rot) und State of Charge - following (grün)[2].

Zur energetischen Abdeckung eines bestimmten Fahrprofils (schwarzer Verlauf in Abbildung 2-3) sind mehrere Leistungsabgabekurven (rot/grüner Kurvenverlauf) möglich. Diese können sich im momentanen Leistungsniveau, in Leistungsdynamik, im Start-/Stopp- Verhalten, nicht jedoch im mittleren Leistungsniveau unterscheiden. Vermehrte Start- und Stop- Vorgänge, lange Betriebsweisen im Leerlauf und hohe Dynamik verursachen Zustände im Innern des Brennstoffzellenstacks, die unterschiedliche Alterungsprozesse fördern (vgl. [3]).

Um für ein bestimmtes Fahrprofil die Leistungsabgabe hinsichtlich der Lebensdauer optimieren zu können, müssen Informationen verfügbar sein, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer bestimmten Belastung und dem daraus resultierenden Alterungsfortschritt beschreiben.

2.2.1 Alterungsprognosemodell

Das am Fraunhofer IVI entwickelte Alterungsmodell bildet den Alterungsprozess über die Trendentwicklung eines internen Parametersatzes ab. Der Parametersatz besteht im wesentlichen aus elektrochemischen Kenngrößen und Materialwerten wie z.B. der Austauschstromdichte an Kathode und Anode, $i_{O,K}$ und $i_{O,A}$ oder der spezifischen Leitfähigkeit der Membran, κ . Die Parameter geben Auskunft über den Zustand der Stackkomponenten.

Zur Validierung des Alterungsmodells sind i.d.R. umfangreiche Messungen notwendig, in denen Brennstoffzellensysteme unter verschiedenen Belastungszyklen dauergetestet und bei denen die Veränderung der internen Parameter aufgezeichnet werden. Da derartige Messungen mit erheblichen Kosten und aufwendigen

Stackdiagnosen verbunden sind, wurde nach alternativen Validierungsmöglichkeiten gesucht.

Ansatzpunkte bieten Messdaten, die während Langzeiterprobungen von Fahrzeugflotten aufgenommen wurden. Sehr umfangreiche Messdaten sind während des Betriebs der FCell Fahrzeugflotte von DaimlerChrysler oder der Citaro Brennstoffzellenbusse im Europäischen CUTE Projekt aufgezeichnet worden. Allerdings stehen hier lediglich Systemdaten wie z. B. Strom und Spannung, verschiedene Zustandsgrößen wie Temperatur und Druck, Kontrollparameter und Ventilstellungen zur Verfügung. Der Alterungszustand kann daher nur aus den Betriebsgrößen geschätzt werden.

2.2.2 Identifikation des Alterungsprozesses

Am Fraunhofer IVI wird daher auch eine Methodik erarbeitet, um aus der Messung von Stackspannung und -strom den Alterungsfortschritt zu identifizieren. Aus dem Verlauf der Strom-Spannungs-Charakteristik ist der Zustand eines Stacks sehr differenziert abzuleiten.

Grundlage des Modellansatzes ist die allgemeine Strom-Spannungs-Charakteristik einer Brennstoffzelle nach Gleichung (1).

$$E = E^0 - \sum_i \eta_i \quad (1)$$

Darin stellen η_i die einzelnen Überspannungskomponenten aufgrund Ladungsdurchtritt, Ladungstransport und limitiertem Gastransport und E^0 das Ruhepotenzial der Brennstoffzelle dar. Die einzelnen Überspannungen werden z.B. in [4, 5, 6, 7, 8] detailliert beschrieben. Die einzelnen Terme sind abhängig von der Stromdichte und internen Parametern, die sich im Laufe der Zeit mit fortschreitender Alterung verändern.

Ein stark reduziertes Modell beschreibt Gleichung (2). Darin wurde der Einfluss der Temperatur auf das Ruhepotenzial sowie die Mischpotenzialbildung aufgrund interner Leckagen in der Leerlaufspannung E_{OCV} zusammengefasst. Der Einfluss der Temperatur, der Gaszusammensetzung und der spezifischen Kathodenoberfläche auf die Durchtrittsüberspannung wird in der effektiven Austauschstromdichte der Kathode $i_{0,K}$ erfasst. Der elektrische Elektronenleitwiderstand in den Leitern sowie der Protonenleitwiderstand in der Membran sind in dem inneren Widerstand R_i gebündelt. Die Konzentrationsüberspannungen aufgrund des limitierten Gastransports bei hohen Stromdichten wurden durch einen vereinfachten Ansatz nach [8] mit den empirischen Faktoren m und n betrachtet. Die Partialdrücke der Reaktionsedukte p_{H_2} und p_{O_2} sind abhängig vom aktuellen Strom.

$$E = E_{OCV} + \frac{RT}{zF} \ln \left[p_{H_2} (p_{O_2})^{\frac{1}{2}} \right] - b_K \cdot \ln \left(\frac{i}{i_{0,K}} \right) - i \cdot R_i - m \cdot e^{n \cdot i} \quad (2)$$

Für diesen Modellansatz lassen sich die Parameter aus den Strom- und Spannungsmessungen über leistungsfähige Identifikationsverfahren (parametrische, nichtlineare Regression mit der Methode kleinster Fehlerquadrate) bestimmen. Vorgegeben werden dazu physikalisch plausible Startwerte und Grenzen der gesuchten Parameter.

Tabelle 1: Grenzen und Startwerte für Parameteridentifikation

	E_{OCV}	b_K	$i_{0,K}$	R_i	M	n
untere Grenze	0,8 V	0,0232 V	0,05 mA/cm ²	0,01 cm ² /S	0 V	0 cm ² /A
Startwert	1,0 V	0,0500 V	0,20 mA/cm ²	0,12 cm ² /S	3,7E-5 V	8 cm ² /A
obere Grenze	1,2 V	0,1521 V	0,70 mA/cm ²	1,00 cm ² /S	1,0 E-3 V	20 cm ² /A

Die Ergebnisse der Parameteridentifikation für einen Datensatz sind beispielhaft in Abbildung 2-4 dargestellt:

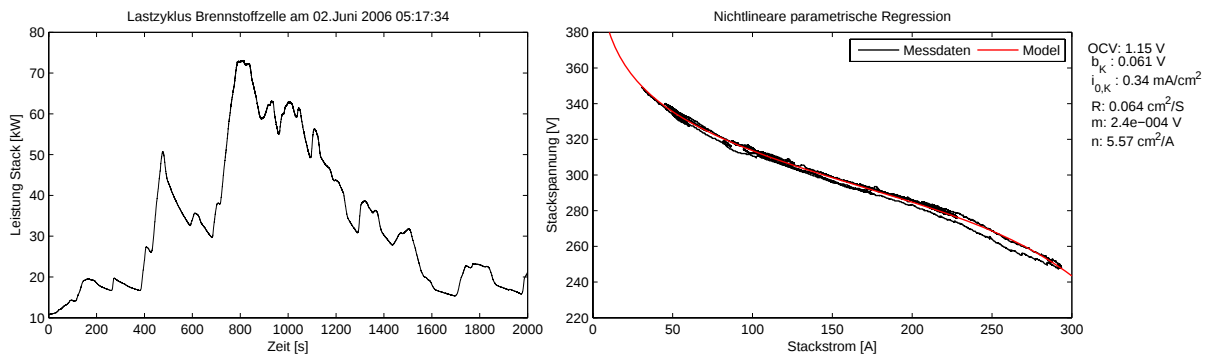


Abb. 2-4: Parameteridentifikation für Lastzyklus vom 2. Juni 2006

Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Modelansatz und Messdaten. Die identifizierten Parameter liegen im plausiblen Bereich.

2.3 Energiemanagement hybrider Brennstoffzellencluster

Aufbauend auf den Erkenntnissen über die Alterungsprozesse an PEFC wird ein Energiemanagement für das hybride Brennstoffzellencluster (Abb. 2-5) entwickelt [9, 10, 15], das den zwei Optimierungskriterien

- lebensdauerschonende und
- energieoptimale Fahrweise

folgt. Der Einsatz der Brennstoffzellen und die Nutzung des Energiespeichers erfolgt vorausschauend, d.h. unter Verwendung von Informationen über den im Zeithorizont t_H zu erwartenden Verlauf der Antriebsleistung P_M .

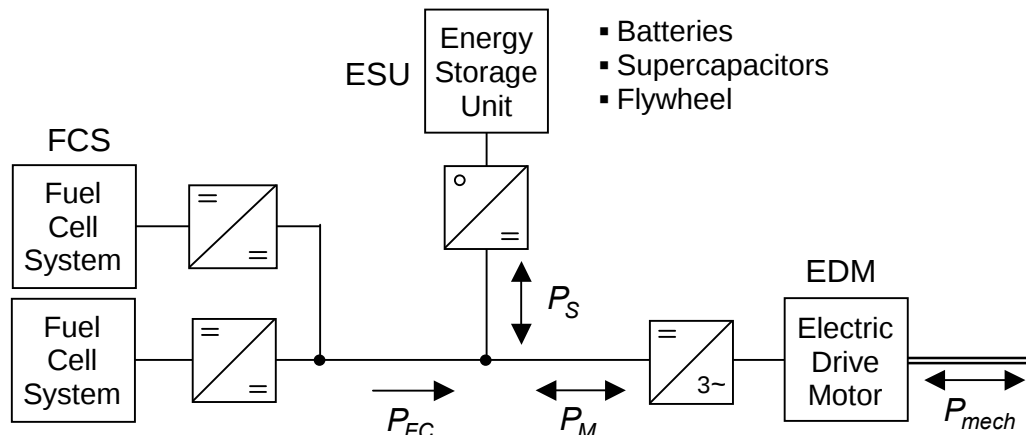


Abb. 2-5: Optimierung der Leistungsabgabe der Brennstoffzellen P_{FC} und des Energieinhaltes des Speichers bei prognostiziertem P_S

Bei der Optimierung werden Beschränkungen bezüglich der Gradienten der Lastwechsel an den FC-Systemen sowie der minimalen und maximalen Leistungsabgabe berücksichtigt (Abb. 2-6).

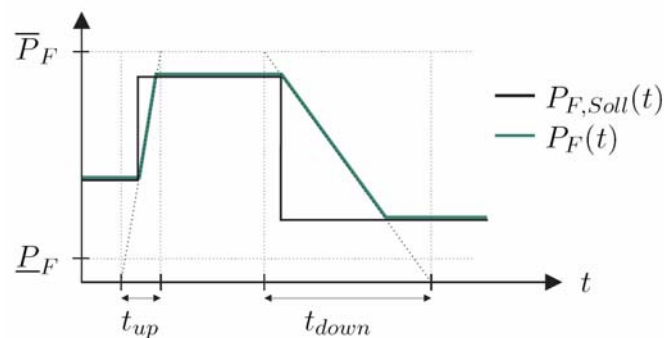


Abb. 2-6: Beschränkungen bezüglich der Leistungsabgabe der Brennstoffzellen PFC

Der leistungsabhängige Verbrauch an Wasserstoff kann durch stückweise lineare Funktionen angenähert werden (Abb. 2-7).

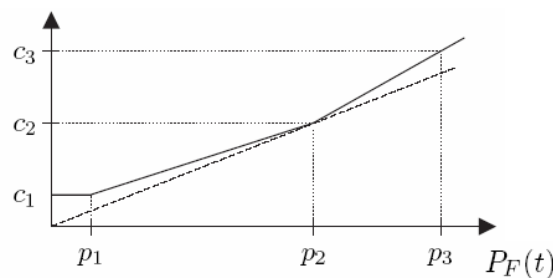


Abb. 2-7: Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzellen P_{FC} in Abhängigkeit von der Leistungsabgabe

Im Vortrag wird der vorausschauende Einsatz des Energiespeichers demonstriert. Die Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme konnte in diesen hybriden Antriebskonfigurationen deutlich erhöht werden.

2.4 Erprobung in der AutoTram

Mit dem Demonstrations- und Experimentierfahrzeug AutoTram[®] steht am IVI⁴ der Prototyp für eine moderne, umweltverträgliche und vor allem kostengünstige BusBahn Technologie zur Verfügung. Die Erprobung des hybriden Brennstoffzellenclusters der AutoTram[®] erfolgt derzeit auf dem Testgelände (Abb. 2-8).



Abb. 2-8: AutoTram auf dem Testgelände und HY80-TwinCluster im Dachbereich

Unter Verwendung der Positionssignale des Spurführungssystems und elektronischer Karten ist eine Prädiktion der Motorleistung PS im Zeithorizont von 150 bis 200 sec problemlos möglich. Basierend darauf wird vorausschauend der Einsatz der bordseitigen Energiespeicher koordiniert, das Zu- und Abschalten der Stacks sowie Nebenaggregate gesteuert und die Brennstoffzellen möglichst gleichmäßig in einem Bereich optimaler Wirkungsgrade betrieben. Das GPS-basierte Energiemanagement trägt signifikant zur Erhöhung der Lebensdauererwartung von FC-Systemen bei.

3 Ausblick

Künftig soll die Weiterentwicklung und Produktion einer für den Öffentlichen Personenverkehr zulassungsfähigen Version der AutoTram[®] (Abb. 3-1) ein industrielles Konsortium im westsächsischen – ostthüringischen Raum übernehmen.

Verkehrstechnische Vorzüge dieser nächsten AutoTram[®]-Generation sind

- einfach gestaltete Fahrwege in beliebigen Ebenen,
- schmales Lichtraumprofil,
- innovatives Fahrzeugdesign,
- leichte Fahrzeugkonstruktion,
- koppelbare 12-m-, 24-m- und 36-m-Fahrzeuge,
- Ein- und Zweirichtungsbetrieb,
- große Transportkapazität bei flexibler Zugfolge,
- hohe Ausweichflexibilität,
- hohe Sicherheits- und Verfügbarkeitsstandards sowie
- hohe Umweltverträglichkeit.

⁴ www.ivi.fhg.de/frames/images/autotram/autotram_deu.mpg

Die modular aufgebaute BusBahn [12, 14] besteht aus separat nutzbaren, elektrohydraulisch lenkbaren, zweiachsigen Fahrzeugsegmenten (12 m), die zu gummibereiteten Zügen mit einer Gesamtlänge von bis zu 36 m für den Ein- oder auch Zweirichtungsbetrieb flexibel koppelbar zusammengestellt werden können (Abb. 3-1).

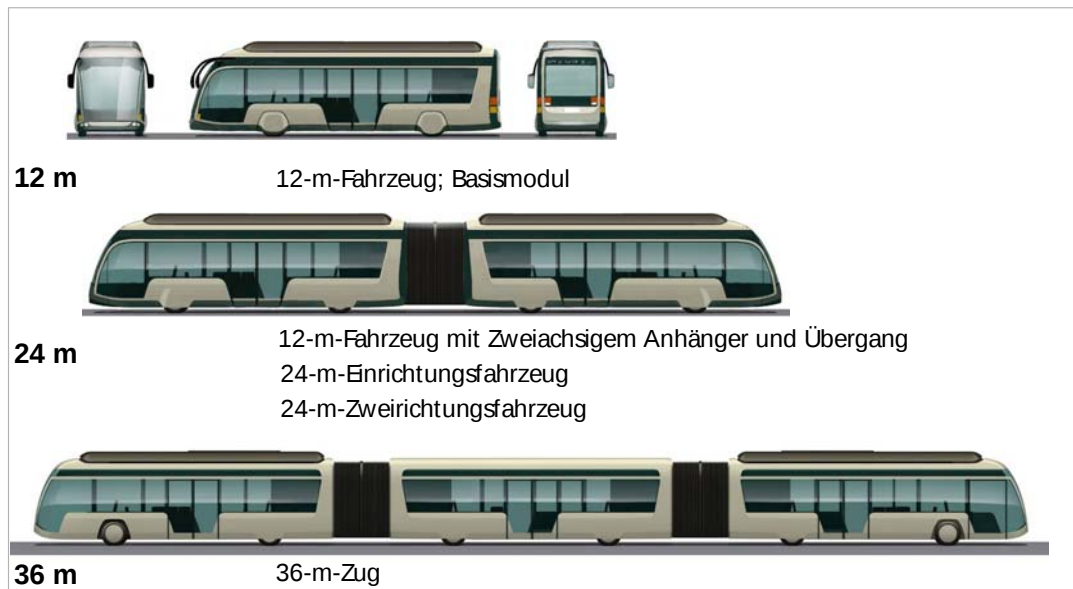


Abb. 3-1: Zulassungsfähige, mehrgliedrige Versionen der AutoTram®⁵

Die Transportkapazität (200 - 300 Personen) der 24-m- und 36-m-Züge liegt im Bereich kleinerer Straßenbahnen, jedoch mit dem Vorzug, im Mittel nur 50 bis 70 Prozent der Lebenszykluskosten eines vergleichbaren schienengebundenen Systems zu beanspruchen. Die 12-m-Fahrzeugsegmente sind bereits mit einem elektrischen Antriebsstrang ausgerüstet, der standardmäßig über einen Hybridantrieb mit dieselelektrischem Antriebsaggregat und großem Energiespeicher verfügt. Allein aus dem Energiespeicher kann das Fahrzeug etwa 2 km rein elektrisch, d.h. emissionsfrei fahren.

Ein vollständig emissionsfreier Betrieb ist unter Verzicht auf Oberleitungen durch die Implementierung des hybriden PEFC-Clusters möglich. Die Entwicklung und Piloterprobung einer zulassungsfähigen 24-m-BusBahn mit Wasserstoffantrieb ist Zielstellung eines weiterführenden Projektes.

Eine 24m- Version der AutoTram® bietet im Vergleich zu der 12-m- bzw. 36-m-Version besonderes günstige Voraussetzungen für die Implementierung der Brennstoffzellentechnologien. Dies betrifft vor allem die derzeit bereits praktizierte Zulassung von 24-m-Fahrzeugen, die beschränkte, für diese Anwendung jedoch ausreichende Leistung eines 120-kW-Clusters sowie die infrastrukturellen Anforderungen, die für 36-m-Züge mit separaten Busspuren erheblich höher wären.

Abb. 2-9 demonstriert anschaulich, dass mit dem Einbau der Brennstoffzellen, H₂- und Energiespeicher sowie der Hilfsaggregate die Transportkapazität der konzipierten AutoTram® nur unwesentlich eingeschränkt wird.

⁵ www.ivf.fhg.de/frames/images/autotram/autotram.avi

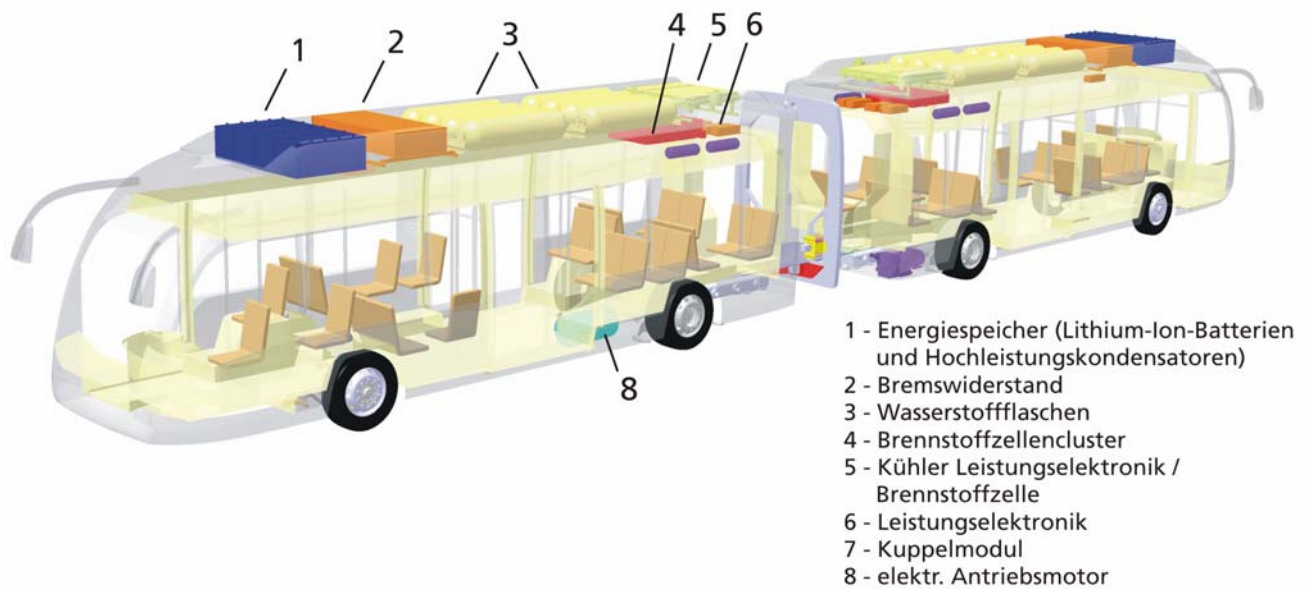


Abb. 2-9: Ausstattung der AutoTram® in der Version der Wasserstoffbahn

Die 36-m- aber auch die 24-m-Version der künftigen AutoTram® wird mit einem kontaktlosen Spurführungssystem ausgestattet sein, dass als automatisches Fahrerassistenzsystem eine exakte Einhaltung des Lichtraumprofils auch ohne Schienenweg garantiert [13]. Das System arbeitet mit GPS -Signalen in Kombination mit einem Kamerasystem.

Danksagung:

Teile der hier dargestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Union im Rahmen des Projektes FELICITAS gefördert.

Literatur

- [1] M. Schneider, M. Klingner, Brennstoffzellensysteme für schwere Fahrzeuge auf Straße, Schiene und zu Wasser – Erste Ergebnisse des EU-Projektes FELICITAS, VDI-Berichte Nr. 1975, 2006.
- [2] Maier, B. und Bartholomäus, R.; Felicitas D.III.2.1.1, Relieved Operating Strategies with regards to PEFC system durability; 2006.
- [3] Jonas, K.; Felicitas D.IV.2.2.1, Literature Review of Degradation mechanisms; 2007.
- [4] Mann, R.; Amphlett, J.; Hooper, M.J. und Roberge, P.; Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell; Journal of Power Sources, 2000, 86, 173–180.
- [5] Amphlett, J.; Baumert, R.; Mann, R.; Peppley, B.; Roberge, P. and Harris, T.; Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel

- Cell, I. Mechanistic Model Development; Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142 (1), 1-8.
- [6] Amphlett, J.; Baumert, R.; Mann, R.; Peppley, B.; Roberge, P. und Harris, T.; Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell, II. Empirical Modell Development; Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142 (1), 9-15.
 - [7] Hamann, C. und Vielstich, W.; Elektrochemie; Wiley-VCH, 2005.
 - [8] Kim, J.; Lee, S. & Srinivasan, S.; Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Emperical Equation; Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142 (8), 2670-2674.
 - [9] R. Bartholomäus and A. Fischer: Energy Management of Fuel Cell Vehicles Operating in Fixed-Route Service. 3rd European Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) Forum, July 4-8, 2005, Lucerne, Proceedings CD File No. B095, 19 p.
 - [10] R. Bartholomäus: Modelling and Optimal Control of Hybrid Fuel Cell Vehicles. Report, Fraunhofer-IVI, 2006, 90 p.
 - [11] Wiel, M.; Klingner, M.: Innovation im öffentlichen Nahverkehr als Motor für Umwelt und Wirtschaft VDV-Jahrestagung, Halle / Saale, 19./20.Juni 2007.
 - [12] Wiel, M.; Böge, S. (Hübner GmbH, Kassel); Schmidt, B. (Göppel Bus GmbH, Nobiz/Ehrenhain): Vom 12m-Bus zum 36m-BRT-System - Ein modulares Fahrzeugkonzept für den Personennahverkehr; VDI-Tagung München, 14./15. Juni 2007, VDI-Berichte Nr. 1986, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2007, S. 381-397.
 - [13] Wagner, S.; Bartholomäus, R.; Zipser, S.; Bäker, B.: Spurtreue Mehrachslenkregelung für ein allradgelenktes Gelenkfahrzeug; VDI-Tagung Wiesloch, 23./24. Mai 2007, VDI-Berichte Nr. 1977, V DI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2007, S. 633-646.
 - [14] Böge, S. (Hübner GmbH, Kassel); Wiel, M.: Modulare und umweltfreundliche Konzepte für den ÖV; Stadtverkehr 03 / 2007, EK-Verlag, Freiburg, S. 13-15.
 - [15] Bartholomäus, R.; Fischer, A.; Klingner, M.: Real-Time Predictive Control of Hybrid Fuel Cell Drive Trains; Fifth IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Monterey Coast, California, USA, August 20-22, 2007.
 - [16] Klingner, M.; Schneider, M.: Sustainable Urban Transport - not only a Vision; Sustainable Neighbourhood - from Lisbon to Leipzig through Research (L2L), Leipzig, 8.-10. Mai 2007.