

# Entwicklungsansatz für On Bord - Ladesysteme

Markus Hubner, M. Sc, DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, [Markus.Hubner@dlr.de](mailto:Markus.Hubner@dlr.de)  
Christoph Fischer, M. Eng, DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, [Christoph.Fischer@dlr.de](mailto:Christoph.Fischer@dlr.de)  
Dipl.-Ing. Bastian Mayer, DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, [Bastian.Mayer@dlr.de](mailto:Bastian.Mayer@dlr.de)  
Dr. Michael Schier, DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, [Michael.Schier@dlr.de](mailto:Michael.Schier@dlr.de)

## Kurzfassung

Zur Erhöhung der Reichweite von konventionellen Elektrofahrzeugen bietet sich der Einsatz von Range-Extender-Modulen auf Basis von Brennstoffzellen an. Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wird die Eignung von Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen erforscht. Diese Brennstoffzellen weisen neben elektrischen Wirkungsgraden von ~ 40 % auch hohe Abwärmepemperaturen auf einem Temperaturniveau von  $T \sim 170$  °C auf. Zur Konzeptvalidierung wurde ein Brennstoffzellenprüfstand aufgebaut, um die Aufheizzeit und die dafür benötigte Energiemenge zu bestimmen. Durch ein neues Brennstoffzellenkühlsystem werden Einsparpotentiale beim stationären Erhaltungsheizen erwartet. Weiter wird durch das neue Kühlsystem eine Verbesserung der Wärmenutzung angestrebt. Außerdem wird der Klimatisierungsbedarf eines Demonstratorfahrzeugs anhand von verschiedenen klimatischen Bedingungen am Klimarollenprüfstand untersucht. Dadurch wird eine Dimensionierungs- und Validierungsgrundlage sowohl für die im Projekt erstellten Simulationsmodelle als auch für das Thermomanagementkonzept geschaffen. Die gewonnenen Daten dienen nach der Integration des Brennstoffzellensystems ins Fahrzeug als Vergleichsgrundlage. Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse zusammen.

## Abstract

To increase the range of conventional electric vehicles the use of range extender modules based on fuel cells is of interest. The Institute of Vehicle Concepts at the German Aerospace Center investigates the suitability of high-temperature PEM fuel cells. These fuel cells have electrical efficiencies of ~ 40 % and waste temperature levels of  $T \sim 170$  °C. For concept validation, a fuel cell test bench was designed to determine the heating time and the amount of energy what is needed for this. With a new fuel cell cooling system savings in stationary heating maintenance can be expected. Next, a performance increase of the heat-utilization is desired by the new cooling system. In addition, a demonstrator vehicle is investigated based on different climatic conditions at the roller testbench to determine the amount of energy requested for air conditioning. Thus, a sizing and validation basis is created for the simulation models created in the project as well as for the thermal management concept. The collected data are used as a basis for comparison after the integration of the fuel cell system into the vehicle. This paper summarizes the results.

## 1 Einleitung

Zum Erreichen des Zieles, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen zu betreiben, erfordert es hohe Anstrengungen in der Erhöhung der Attraktivität für die potentiellen Kunden. Um die Nutzerakzeptanz für die Elektromobilität zu erhöhen, wird am Institut für Fahrzeugkonzepte an neuen Energiekonzepten geforscht. Die Erhöhung der Reichweite steht dabei im Mittelpunkt. Dazu eignen sich besonders Brennstoffzellen, die die Funktion eines On-Bord-Ladesystems und damit eines Range-Extenders übernehmen und eine lokal emissionsfreie Fahrweise ermöglichen. Diese Art der Energiewandlung bietet den Vorteil, dass dadurch einerseits die Traktionsbatterie während der Fahrt nachgeladen werden kann und sich andererseits zusätzlich der Wärmebedarf für die Innenraumheizung durch Nutzung der Abwärme decken läßt, was wiederum die Reichweite erhöht. Im Rahmen des Projektes HT-BZ-REX, welches vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft in Baden-

Württemberg gefördert wird, soll ein bestehendes Elektrofahrzeug mit einer modularen Brennstoffzelle ausgerüstet werden. Das besondere hierbei ist der Einsatz einer HT-PEM Brennstoffzelle. Diese bietet aufgrund der Nutzung einer anderen Membran gegenüber konventionellen NT-PEM Brennstoffzellen den Vorteil einer höheren Betriebstemperatur von bis zu 170 °C. In diesem Projekt soll untersucht werden, inwieweit der Einsatz einer solchen HT-PEM-BZ in der mobilen Anwendung energetisch sinnvoll ist. Die Projektlaufzeit beträgt 3 Jahre. Das Projekt HT-BZ-REX wird im Kontext eines zusätzlichen Projektes am DLR Standort in Lampoldshausen aufgebaut, in welchem eine Wasserstofftankstelle errichtet werden soll. Um den Pendlerverkehr zwischen den beiden Standorten Stuttgart und Lampoldshausen zu ermöglichen, soll das mit der Brennstoffzelle ausgerüstete Fahrzeug die einfache Hin- und Rückfahrt ohne Nachtanken oder Aufladen ermöglichen. Diese Bedingung wurde neben der Modularität des Systems als Anforderung vorgegeben. Als De-

monstratorfahrzeug dient ein Elektrosmart der aktuellen Generation, **Bild 1**.

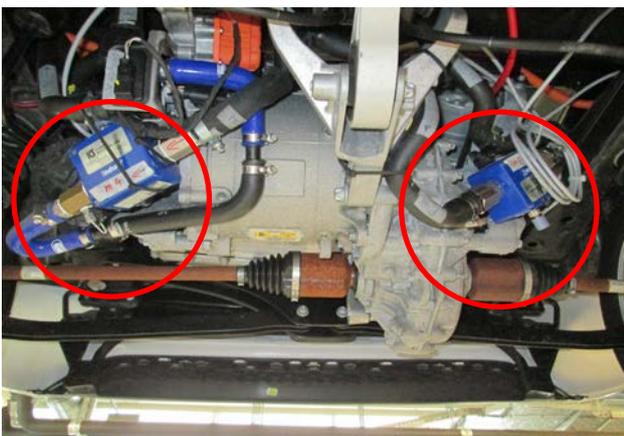


**Bild 1:** Demonstratorfahrzeug im Projekt HT-BZ-REX.

## 2 Anforderungen

### 2.1 Demonstratorfahrzeug

Zum Sammeln der Daten für eine fundierte Datenbasis wurde der Elektrosmart mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet. Für die Messdatenverarbeitung und -aufnahme wird auf die bewährte Messtechnik der Firma ifm zurückgegriffen. Die Bestimmung von Traktionsleistung und Traktionsenergie wird über eine integrierte Strom- und Spannungsmessung im Antriebsstrang durchgeführt. Für das Thermomanagement werden der reale Energiebedarf für die Fahrzeuginnenklimatisierung über Stromsensoren an Hochvoltheizer und Klimakompressor gemessen. Weiter wurden in das Kühlsystem fünf Durchflusssensoren, zwölf PT100-Thermoelemente und drei Differenzdrucksensoren zur Erfassung der Wärmeströme von Traktionsbatterie, Leistungselektronik, Elektromotor und Hauptkühler integriert, s.a. **Bild 2**.



**Bild 2:** Durchflusssensoren zur Erfassung der Kühlmittel-Durchsätze für die Leistungselektronik (links) und für den E-Motor (rechts).

### 2.2 Testumgebung für Gesamtfahrzeug

Für eine erste Bestimmung des Energiebedarfs wurde am klimatisierbaren und wasserstofftauglichen Allradrollenprüfstand des DLR eine normkonforme Messung durchgeführt. Der Klimarollenprüfstand bietet seit 2007 eine einzigartige Testumgebung für Industrieprojekte und DLR - eigene Forschungsprojekte, und wird im weiteren Verlauf zur Validierung der umgesetzten Konzepte dienen.



**Bild 3:** Demonstratorfahrzeug auf dem Rollenprüfstand.

Der Prüfstand (**Bild 3**) ist für alle Fahrzeugklassen geeignet. Es können sowohl Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch Elektrofahrzeuge vermessen werden. Ein Alleinstellungsmerkmal ist die spezielle Zertifizierung für den Betrieb mit Wasserstoff. Die dafür notwendige Mess- und Sicherheitstechnik wurde bereits beim Bau des Prüfstands mit eingeplant und wird im weiteren Verlauf des Projekts intensiv genutzt. Mit vier unabhängig voneinander angetriebenen Rollen können Fahrzeuge mit einer Radgeschwindigkeit von bis zu 200 km/h und einer Antriebsleistung von 100 kW pro Achse getestet werden. Ein Fahrtwindgebläse ermöglicht realitätsnahe Bedingungen bis zu einer Geschwindigkeit von 120 km/h. Die gesamte Prüfstandkammer ist auf Temperaturen von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  und relative Luftfeuchten bis zu 80 % klimatisierbar. Fahrzeuge von 1,6 m bis 4 m Länge passen in die Kammer, somit können vom Kleinfahrzeug wie dem im Projekt eingesetzten Smart bis hin zu einem Transporter alle Fahrzeugklassen getestet werden.

Durch die mit dem Rollenprüfstand gekoppelte Fahrprofilsoftware ist es möglich, sowohl kundenspezifische als auch alle Standardfahrzyklen zur Verbrauchsermittlung zu fahren. Zusätzlich sind auch Fahrprofile mit Steigungen und Gefällen realisierbar. Somit kann die ermittelte Pendlerfahrt nach Lampoldshausen unter gleichbleibenden Bedingungen im Teststand nachgefahren werden.

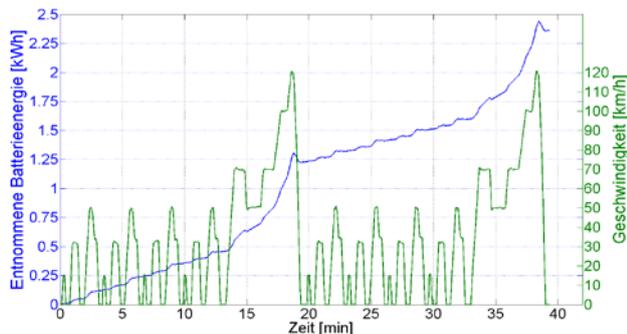
Die Prüfstandautomatisierung berechnet dazu in Echtzeit aus den fahrzeugspezifischen Parametern und der Fahrgeschwindigkeit die für die jeweilige Geschwindigkeit auf der Straße real auftretenden Fahrwiderstände. Diese werden dann über den Rollenantrieb an das Fahrzeug weitergegeben. Der Wasserstoffverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen kann durch zwei unterschiedliche Messsysteme erfasst werden.

### 2.3 Normkonformer Traktionsenergiebedarf (NEFZ)

Zur Erstinbetriebnahme des Demonstratorfahrzeugs wurde der Traktionsenergiebedarf nach DIN EN 1986-1 auf dem Rollenprüfstand ermittelt. Die Norm schreibt einen aus vier Schritten bestehenden Ablauf vor.

1. Entladen der Batterie mit 70 % (hier: 87,5 km/h) der Maximalgeschwindigkeit bis das Fahrzeug keine 65 % (hier: 81,25 km/h) der Maximalgeschwindigkeit halten kann oder 100 km gefahren sind.
2. Laden der Batterie für max. 12 h oder das Fahrzeug signalisiert das Ende des Ladevorgangs.
3. Innerhalb von 4 Stunden muss dann der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) zwei Mal gefahren werden.
4. Innerhalb von 30 Minuten muss das Fahrzeug wieder mit dem Ladegerät verbunden werden. Die aufgenommene Ladeenergie  $E$  und die Ladedauer, sowie die gefahrene Strecke werden erfasst.

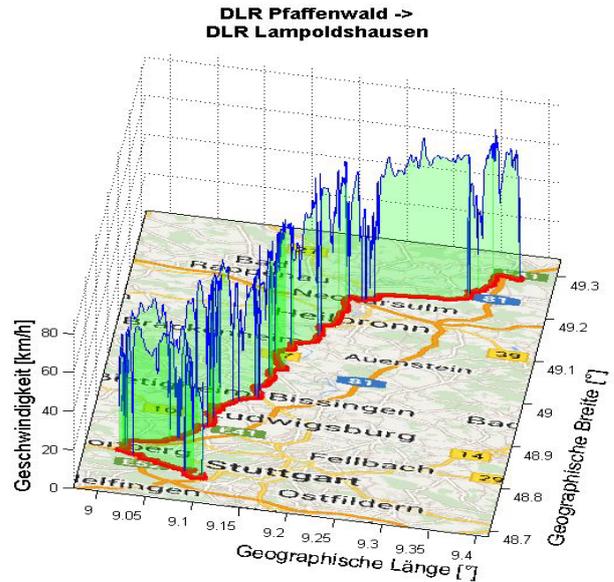
Der normkonforme Traktionsenergiebedarf ergibt sich aus dem Quotient der Ladeenergie und der Fahrstrecke der zwei auf dem Prüfstand gefahrenen NEFZs von 21,76 km. Der getestete E-Smart benötigt pro Kilometer eine normkonforme Energiemenge von 0,1119 kWh, s. **Bild 4**. Die auf die Strecke bezogene Energie beträgt 0,1085 kWh/km.



**Bild 4:** Batterieenergie und Geschwindigkeit während der normkonformen Verbrauchsmessung

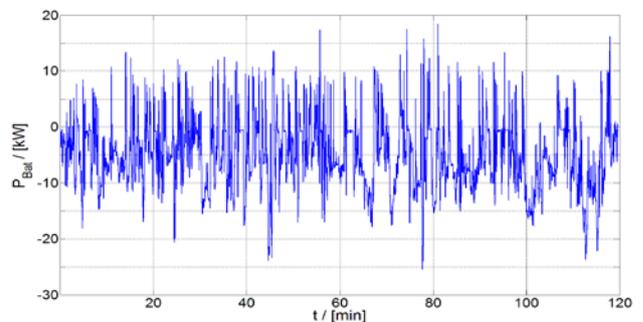
### 2.4 Pendlerfahrt von Lampoldshausen nach Stuttgart

Für den Einsatz als Pendlerfahrzeug wurde die Strecke von Stuttgart nach Lampoldshausen vermessen. Am Tag der Fahrt herrschten mit  $\sim 18^\circ\text{C}$  angenehme Bedingungen. Das Verkehrsaufkommen war am frühen Nachmittag moderat und es traten keine Standzeiten im Stau auf. **Bild 5** zeigt den Geschwindigkeitsverlauf der Fahrt zwischen Stuttgart und Lampoldshausen.



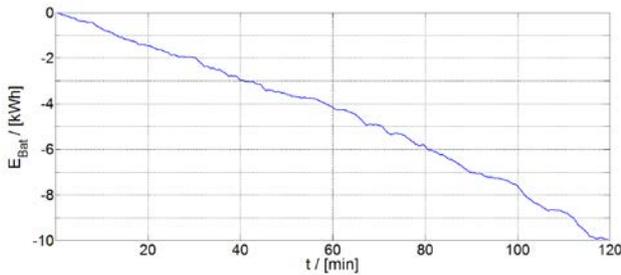
**Bild 5:** Streckenprofil von Lampoldshausen nach Stuttgart.

Die 91 Kilometer lange Überlandstrecke ist mit dem Demonstratorfahrzeug in knapp 2 Stunden zurückgelegt worden. Gestartet wurde in Stuttgart auf einer Ausgangshöhe von 451 Metern über dem Meeresspiegel. Nach Bergabfahrt bis auf circa 160 Meter musste gegen Ende ein leichter Anstieg bis Lampoldshausen auf circa 300 Höhenmeter bewältigt werden. Die maximal gefahrene Geschwindigkeit betrug 85 km/h, die mittlere Geschwindigkeit 45,8 km/h.



**Bild 6:** Ladeleistung (positiv) und Entladeleistung (negativ) der Traktionsbatterie auf der Strecke Stuttgart  $\rightarrow$  Lampoldshausen.

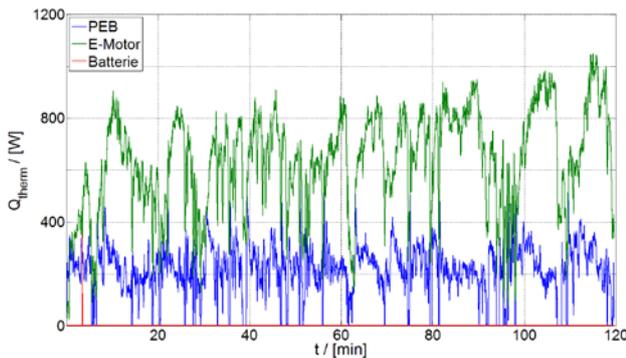
In **Bild 6** ist das Leistungsprofil für das Ladeverhalten der Traktionsbatterie aufgetragen. Es setzt sich aus der Ladeleistung, der Traktionsleistung und dem Leistungsbedarf für die Nebenverbraucher wie beispielsweise Hochvolt-PTC Heizer und Klimakompressor zusammen. Die Traktionsbatterie ist im Fahrbetrieb mit einem Maximalwert von  $P_{\text{Bat}} = -25,4 \text{ kW}$  bei einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von  $-5 \text{ kW}$  belastet worden. Die im rekuperierenden Betrieb gemessene Spitzenleistung betrug  $+18,4 \text{ kW}$ , im Mittel  $4,8 \text{ kW}$ .



**Bild 7:** Aus der Batterie entnommene Energie auf der Fahrt Stuttgart → Lampoldshausen.

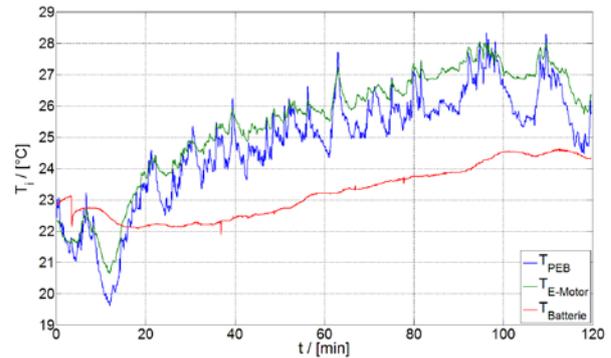
In **Bild 7** ist der zeitliche Verlauf der entnommenen Energie der Traktionsbatterie einzusehen. Auf der gesamten Fahrtstrecke von Stuttgart nach Lampoldshausen werden 10 kWh benötigt. Das Rekuperationspotential auf der Strecke wurde zu 1,6 kWh ermittelt, was circa 14 % der entnommenen Batterieenergie entspricht. Pro km Fahrstrecke ergibt sich ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 0,11 kWh/km.

**Bild 8** zeigt den zeitlichen Verlauf der von den Antriebstrangkomponenten während der Fahrt an das Kühlsystem übertragenen Verlustleistungen.



**Bild 8:** An das Kühlmittel abgegebene thermische Verlustleistung der Komponenten Leistungselektronik (PEB), Elektromotor (E-Motor) und Traktionsbatterie (Batterie).

Das Kühlsystem wurde auf der gesamten Messfahrt mit einer Durchflussmenge von ca. 13 l/min durchströmt. Dabei wurde vom Elektromotor (E-Motor in Abbildung 2-8) im Mittel 600 W und von der Leistungselektronik (PEB) ca. 200 W an das Kühlmittel abgegeben. Eine Kühlung der Traktionsbatterie (Batterie) wurde während der gesamten Fahrt nur am Anfang kurzzeitig benötigt. Insgesamt wurden vom Fahrzeugkühlsystem ca. 800 W über den Hauptkühler an die Umgebung abgeführt. In **Bild 9** sind die Kühlmittelaustrittstemperaturen der Antriebstrangkomponenten dargestellt. Man erkennt das relativ geringe Temperaturniveau im Bereich zwischen 25 und 30 °C, das zur Aufheizung der Kabine nur bedingt genutzt werden kann. Die Nutzung der Brennstoffzellenabwärme auf hohem Temperaturniveau verspricht eine deutlich bessere Effizienz der Energienutzung.



**Bild 9:** Kühlmittelaustrittstemperaturen der Komponenten Leistungselektronik (PEB), Elektromotor (E-Motor) und Traktionsbatterie (Batterie).

Die Kühlmittelaustrittstemperaturen von Leistungselektronik und Elektromotor steigen während des Betriebs auf ca. 30 °C an. Der Temperatursensor an der Traktionsbatterie hingegen misst einen langsamen, kontinuierlichen Anstieg der Kühlmitteltemperatur während der Fahrt. Durch die langsame Erwärmung der Batterie treten vermutlich Wärmeleitungseffekte im Kühlmittel auf, wodurch die Zunahme der Temperatur am Sensor trotz nicht aktivem Kühlsystem zu erklären wäre. Die wichtigsten Ergebnisse der Pendlerfahrt von Stuttgart nach Lampoldshausen sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

$x_{\text{Strecke}}$	$V_{\text{mittel}}$	$P_{\text{Bat,m}}$	$E_{\text{Bat}}$	$P_{\text{therm,mot}}$	$P_{\text{therm,LE}}$
92 km	46 km/h	-5 kW	10 kWh	~800 W	~200W

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Fahrergebnisse Stuttgart → Lampoldshausen.

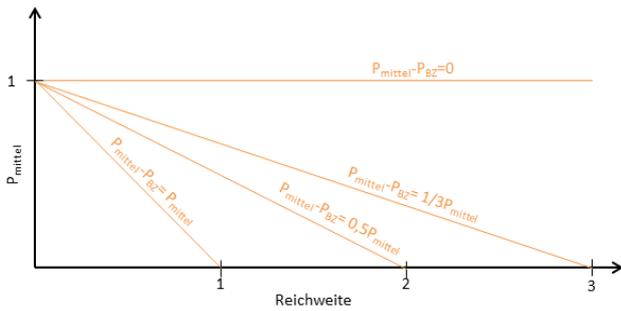
### 3 Auslegung der On Bord-Ladeinheit

Die Methode zur Auslegung eines Range Extenders wird anhand der genannten Strecke Stuttgart-Lampoldshausen vorgestellt. Für die Hin- und Rückfahrt auf der Pendlerstrecke werden für die Traktion 20 kWh an elektrischer Energie benötigt. Dies übersteigt die in der Batterie speicherbare Energie von 17,8 kWh um 13 %, was den Einsatz einer On Bord – Ladeinheit notwendig macht. Im Folgenden wird eine einfache Methodik zur Festlegung der Dimensionierung für die Systemgrößen Tank und Leistung vom Brennstoffzellen-Ladesystem erörtert.

#### 3.1 Festlegung des Hybridisierungsgrads

Maßgebende Auslegungsgröße ist die Testfahrt aus Kapitel 2.4. Aktuell wird am Institut für Fahrzeugkonzepte eine statistische Auswertung sämtlicher Pendlerverkehrsfahrten durchgeführt, um die Auslegungsgrößen weitergehend zu verifizieren und die Methodik zu detaillieren.

**Bild 10** zeigt den Einfluss des Hybridisierungsgrads auf die Reichweite.



**Bild 10:** Einfluss der mittleren Leistung auf die Reichweite

Auf der Ordinate wird der mittlere spezifische Leistungsbedarf  $P_{\text{mittel}}$  aufgetragen. Dieser ist in der Regel abhängig vom Lastprofil der Strecke und wird zur prinzipiellen Erklärung der Vorgehensweise normiert. Die Abszisse zeigt die theoretische Reichweite des Fahrzeugs bei verschiedenen Leistungsklassen des On Bord-Laders. Dieser wird im konstanten Lastpunkt  $P_{\text{BZ}}$  betrieben. Die folgenden in **Tabelle 2** zusammengefassten Hybridisierungsstrategien wurden für das Pendlerverkehrskonzept betrachtet. Die Speicherlast definiert das Energie-Beitragsverhältnis von Batterie und  $\text{H}_2$ -Speicher am gesamten Traktionsenergiebedarf.

	Hybrid.-strategie	Energielieferant
1	$P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = P_{\text{mittel}}$	100 % Batterie + 0 % $\text{H}_2$
2	$P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = \frac{1}{2} * P_{\text{mittel}}$	50 % Batterie + 50 % $\text{H}_2$
3	$P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = \frac{1}{3} * P_{\text{mittel}}$	33 % Batterie + 66 % $\text{H}_2$
4	$P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = 0$	0 % Batterie + 100 % $\text{H}_2$ .

**Tabelle 2:** Diskutierte Hybridisierungsstrategien ( $p_{\text{mittel}}$  = mittlere aus der Batterie entnommene Leistung,  $P_{\text{OBLE}}$  = Leistung der On Bord-Ladeeinheit)

Strategie 1:  $P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = P_{\text{mittel}}$

Das Elektrofahrzeug fährt ohne On Bord-Ladesystem rein batteriebetrieben. Die mittlere Traktionsleistung  $P_{\text{mittel}}$  wird komplett von der Batterie zur Verfügung gestellt. Die Reichweite des Fahrzeugs wird dabei ausschließlich durch die Batteriekapazität begrenzt.

Strategie 2:  $P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = 0,5 * P_{\text{mittel}}$

Das On Bord-Ladesystem wird auf 50 % der benötigten mittleren Traktionsleistung ausgelegt, was einer Verdoppelung der Reichweite im Vergleich zum batteriebetriebenen Fahrzeug entspricht. Der Energieinhalt zum Bewältigen der Strecke wird jeweils zu 50 Prozent in der Traktionsbatterie und im Wasserstofftank gespeichert.

Strategie 3:  $P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} = \frac{1}{3} * P_{\text{mittel}}$

Die Brennstoffzelle liefert im Mittel  $\frac{2}{3}$  der Traktionsleistung. Bei im Vergleich zum reinen Batteriefahrzeug glei-

cher Batteriegröße kann das Range-Extender-Konzept die dreifache Reichweite zurücklegen. Dabei werden 66 % der Gesamtreichweite aus dem Energieinhalt des Wasserstoffs gedeckt. Wegen des Mehrbedarfs an Wasserstoff muss ein größerer Wasserstofftank gewählt werden, was höhere Anforderungen an das Packaging des On Bord-Ladesystems stellt.

Strategie 4:  $P_{\text{mittel}} - P_{\text{OBLE}} \leq 0$

Für den Fall, dass die Brennstoffzelle gleich oder mehr elektrische Leistung liefert als für die mittlere Traktionsleistung benötigt wird, wird die Reichweite ausschließlich über die mitgeführte Menge an Wasserstoff begrenzt. Die Batteriekapazität dient in dieser Hybridisierungsstrategie nur noch als Pufferspeicher für die im Fahrbetrieb auftretenden Leistungsspitzen beim Beschleunigen oder Rekuprieren.

Mit den in Kapitel 2.4 ermittelten Reichweitenanforderungen an das Pendlerfahrzeug zwischen Stuttgart und Lampoldshausen wurden die in **Tabelle 3** zusammengefassten Dimensionierungsgrößen für das On Bord-Ladesystem erarbeitet.

Strategie	1	2	3	4
$P_{\text{OBLE}}$	0 kW	2,5 kW	3,33 kW	5 kW

**Tabelle 3:** Leistungsklassen der Brennstoffzelle für verschiedene Auslegungsstrategien.

Im Projekt wird das Range-Extender-Konzept nach Ansatz Nr. 4 mit einer benötigten Leistung von  $P_{\text{OBLE}} = 5 \text{ kW}$  weiter verfolgt. Die mittlere Traktionsleistung wird im Betrieb auf der Pendelstrecke rein durch die elektrische Ausgangsleistung der Brennstoffzelle abgedeckt. Die limitierende Größe für die Reichweite ist dadurch nicht die Traktionsbatterie, sondern ausschließlich die Menge an mitgeführtem Wasserstoff. Dadurch kann der Einsatz als Pendlerfahrzeug zwischen den DLR-Standorten Stuttgart und Lampoldshausen effektiv umgesetzt werden, da keine Ladezeiten für die Traktionsbatterie mit einkalkuliert werden müssen. Mit der ausgelegten Brennstoffzelle kann die Traktionsenergie komplett aus dem Wasserstoff erzeugt werden, wodurch bei ausreichender  $\text{H}_2$ -Tankgröße ein Nachladen der Traktionsbatterie entfällt und nur die Wasserstoffspeicher aufgefüllt werden müssen.

### 3.2 Hochtemperaturbrennstoffzelle (HT-PEM) als On Bord-Ladesystem

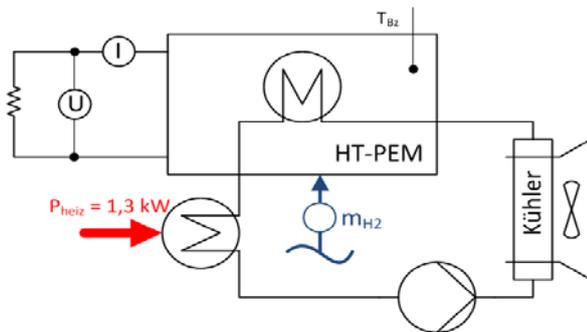
Für das Range Extender Fahrzeug kommt ein neues, wassergekühltes Hochtemperatur Brennstoffzellensystem (HT-PEM) mit nominell 6 kW elektrischer Ausgangsleistung zum Einsatz. Der darin verbaute HT-PEM-Stack besteht aus 120 mit Phosphorsäure dotierten Polybenzimidazol – Membranen (PBI). Diese erlauben im Gegensatz zu Niedertemperatur – PEM – Brennstoffzellen einen Betrieb bei bis zu 180 °C Stacktemperatur. Nachteile der

neuartigen Brennstoffzellentechnologie sind aktuell lange Vorheizzeiten. Der Stack muss auf eine Starttemperatur von  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  vorgeheizt werden, bevor ein Systemstart erfolgen kann. In der PBI-Membran darf sich kein flüssiges Wasser bilden. Durch das Wasser würde die für die Protonenleitung ausschlaggebende Phosphorsäure aus der Membran ausgewaschen werden, was die Lebensdauer der Brennstoffzellen reduzieren würde. Durch das hohe Temperaturniveau weisen diese Brennstoffzellen eine sehr hohe CO-Toleranz von bis zu 5 % auf, was den Einsatz von reformiertem Wasserstoff ermöglicht. Als alternativer Energieträger zu reinem Wasserstoff kann Methanol eingesetzt werden. Dieser hat gegenüber Wasserstoff Vorteile bei der Speicherung, ist aber nicht mehr emissionsfrei. Bei der Reformation von Methanol entstehen als Edukte der für den Betrieb benötigte Wasserstoff und als Abfallprodukt Kohlenstoffdioxid. Aus diesem Grund wird dieses Thema bei der Umsetzung des Range Extender-Konzeptes nicht weiter verfolgt, als Energieträger kommt ausschließlich Wasserstoff zum Einsatz.

Aktuell werden im Bereich Fahrzeugthermomanagement am Institut für Fahrzeugkonzepte innovative Abwärmekonzepte ausgearbeitet, berechnet und bewertet. Ausgewählte Thermomanagementkonzepte werden im weiteren Projektverlauf demonstriert und evaluiert.

### 3.3 Charakterisierung der HT-PEM

Wichtige Systemkenngrößen für den Einsatz als On Board-Ladesystem sind eine energetische Bewertung und die Aufheizzeit der Brennstoffzelle. Dafür wurde das HT-PEM System auf einem vom DLR IFK entwickelten Brennstoffzellenprüfstand untersucht, **Bild 11**.



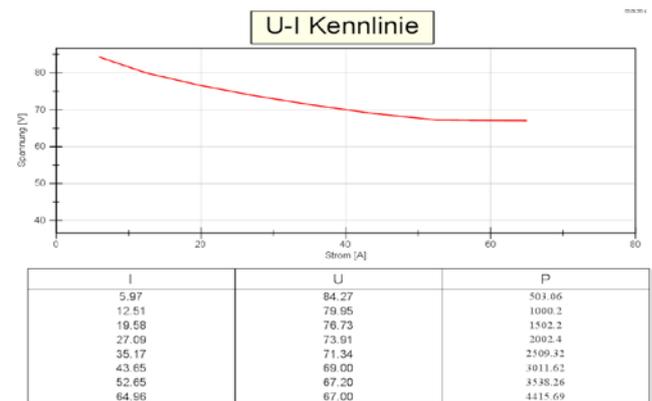
**Bild 11:** Messschema für diskutierte Größen.

Auf dem Prüfstand kann das Hochtemperaturbrennstoffzellensystem elektrisch und thermisch gemessen werden. Neben Strom- und Stackspannung sind sämtliche Massenströme und Temperaturen sowohl an der Kathode als auch im Kühlsystem erfassbar. Der Wasserstoffverbrauch wird über einen Coriolissensor gemessen. Der Wasserstoffverbrauch beinhaltet auch die Purgeverluste des im Dead-End-Modus betriebenen Brennstoffzellensystems. Zum Zeitpunkt der Messungen stand noch kein externes Kühlsystem für das Brennstoffzellensystem zur Verfügung. Deswegen musste auf das vom Hersteller mitgelieferte Kühlsystem zurückgegriffen werden, was die nomi-

nelle Stackleistung auf 4,5 kW elektrischer Ausgangsleistung begrenzt. Der Aufheizvorgang der Brennstoffzelle erfolgt über in das Kühlmittel integrierte Heizelemente mit einer Leistungsaufnahme von 1,3 kW elektrisch.

#### 3.3.1 Elektrische Kenngrößen

Das Brennstoffzellensystem liefert bei kleinen Leistungen eine Ausgangsspannung von circa 80 V. Aufgrund der Tafelgleichung fällt mit steigender Leistung die Stackspannung auf circa 65 V bei 4,5 kW, s. **Bild 12**. Für den Einsatz im Fahrzeug als On Board-Ladeeinheit muss aus diesen Gründen ein Step Up-Converter zum Einsatz kommen, um eine Verbindung mit dem Hochvolt-System des Fahrzeuges herstellen zu können.



**Bild 12:** U-I Kennlinie SerEnergy S120 LC.

Bei konstantem Betrieb mit 4 kW wurde ein Wirkungsgrad von 42 % gemessen. Der Wirkungsgradverlauf in **Bild 13** zeigt, dass bei einem Betrieb zwischen 1,5 kW und 4,5 kW elektrischer Ausgangsleistung Wirkungsgrade zwischen 42 % und 40 % erreicht werden können.

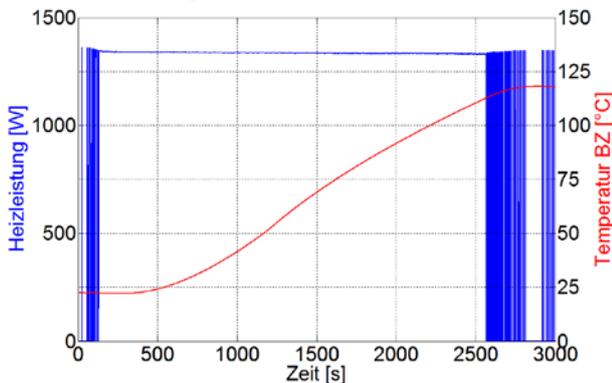


**Bild 13:** Wirkungsgradkennlinie SerEnergy S120.

#### 3.3.2 Aufheizverhalten der HT-PEM

In **Bild 14** ist die Heizleistung des Heizelements über der

Zeit sowie der Temperaturverlauf an der hinteren Endplatte der Brennstoffzelle aufgetragen. Ein Start der Brennstoffzelle ist nach ca. 52 min möglich. Dafür musste das System von 22 °C auf seine Starttemperatur von 115 °C erwärmt werden, was einen Energieverbrauch 0,96 kWh zur Folge hatte.

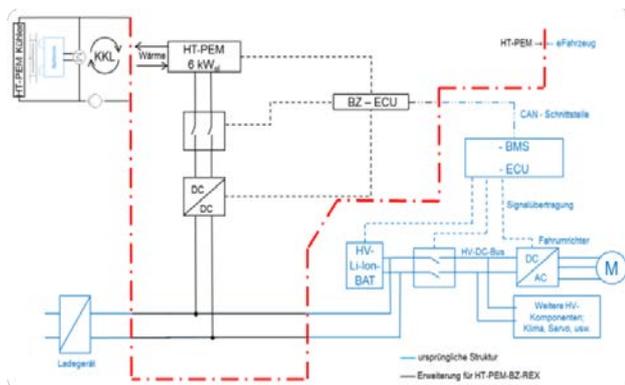


**Bild 14:** Heizleistung und Temperatur am Sensor auf der hinteren Endplatte der Brennstoffzelle.

Für das stationäre Erhaltungsheizen des Brennstoffzellenstacks auf 115 °C mussten vom Heizer 440 Watt aufgewendet werden. Wegen der im Bild 11 aufgezeigten unvorteilhaften Anordnung von Heizelement und Kühler wird dieser beim Erhaltungsheizen ständig durchströmt. Das hat einen erhöhten Leistungsbedarf des Heizelements gegenüber einem anderen Systemaufbau zur Folge. Simulationen ergaben, das theoretisch lediglich eine Heizleistung von etwa 17 W notwendig wäre, um die Brennstoffzelle auf dem Temperaturniveau von 115 °C zu halten. Die theoretische Heizleistung beträgt damit lediglich 4 % der ursprünglich gemessenen Heizleistung.

### 3.3.3 Einbindung ins Fahrzeug

Die Einbindung des On Bord-Ladesystems in das Fahrzeug erfolgt sowohl elektrisch als auch thermisch [1].



**Abbildung 3-1:** Übersichtsbild der verfahrenstechnischen Integration einer HT-PEM ins Versuchsfahrzeug.

Die elektrische Ausgangsleistung der Hochtemperaturbrennstoffzelle wird über einen Hochsetzsteller auf das Spannungsniveau des Fahrzeugzwischenkreises angepasst. Die thermische Integration wird über einen separaten Kühlkreislauf ins Fahrzeug erfolgen, welcher einen

modularen Ein- und Ausbau des On Bord-Ladesystems ermöglichen soll.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Vor der Inbetriebnahme des Forschungsfahrzeugs wurde in einer normkonformen Basisvermessung dessen Energieverbrauch zu 0,11 kWh/km bestimmt. Als Referenzstrecke für die Auslegung wurde die Pendlerstrecke zwischen dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart und dem DLR-Standort in Lampoldshausen gewählt. Die mittlere Geschwindigkeit auf der 92 km langen Überlandstrecke beträgt circa 46 km/h. Während der Fahrt wurde die Traktionsbatterie mit 10 kWh entladen. Für Hin- und Rückfahrt verdoppelt sich die benötigte Energiemenge auf 20 kWh, was die aktuelle Batteriekapazität des Forschungsfahrzeugs übersteigt. Der hier verfolgte Lösungsansatz beinhaltet den Einsatz einer 6 kW On Bord-Ladeeinheit auf Brennstoffzellenbasis, deren Systemgröße anhand einer Auslegungsmethodik bestimmt wurde.

Bei der Messfahrt zeigte sich, dass die Pendlerstrecke vom DLR-Standort Stuttgart zum Standort Lampoldshausen und zurück nicht mit einer Batterieladung zurückgelegt werden kann. Anhand der Auswertung der gewonnenen Daten wurde eine Methodik zur elektrischen Auslegung einer On Bord-Ladeeinheit aufgezeigt. Aktuell wird am Institut eine Versuchsreihe am Klimarollenprüfstand durchgeführt, um den Mehrverbrauch des Forschungsfahrzeugs bei der Klimatisierung im Sommer- und im Winterbetrieb näher zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Daten dienen einerseits zur Validierung der entwickelten Simulationsmodelle in der Alternatives Vehicles Bibliothek, und zusätzlich als Auslegungsgrundlage für neue, innovative Thermomanagementkonzepte [2]. Ein bewertetes Konzept soll im späteren Projektverlauf auf dessen Eignung im Fahrzeug untersucht werden.

## 5 Literatur

- [1] Hubner, M.: Alternative Antriebskonzepte und Aktivitäten des Instituts FK im Bereich Elektromobilität: Duisburg: 6. Wissenschaftsforum Mobilität, 2014.
- [2] Braig, T.; Dittus, H.; Weiss-Ungethüm, J.; Engelhardt: The Modelica Library „Alternative Vehicles“ for Vehicle System Simulation. In: SNE Simulation Notes Europe, 22(2)2012, S. 101-106.