

Auslegung eines RangeExtender-Antriebsstrangs mit Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle

Mounir Nasri¹, Holger Dittus¹

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (German Aerospace Centre)

Institut für Fahrzeugkonzepte (Institute of Vehicle Concepts)

mounir.nasri@dlr.de

Batterieelektrische Fahrzeuge, die für den urbanen Verkehr ebenso wie für längere Strecken geeignet sein sollen, werden mit einem RangeExtender ausgerüstet sein. Die Brennstoffzelle als RangeExtender stellt eine vielversprechende Lösung zur Substituierung des verbrennungsmotorisch betriebenen RangeExtenders dar. In dieser Arbeit wird ein solches System ausgelegt. Im Fokus stehen die Kopplung zwischen Batterie, Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle und einem Wasserstoff-Metallhydridspeicher.

Anhand vorhandener Systemmodelle wie z. B. Brennstoffzelle, Batterie und Metallhydridspeicher wird mittels der AlternativeVehicles-Bibliothek ein Gesamtfahrzeugmodell entwickelt, wobei insbesondere thermische Modelle zu erweitern und parametrieren sind. Für die thermische Kopplung zwischen Hochtemperaturbrennstoffzelle und Wasserstoffspeicher wird ein Hochtemperatur-Kühlkreislauf modelliert. Die Batterie-temperierung hingegen wird im Modell mit Hilfe eines Niedertemperatur-Kühlkreislaufs abgebildet. In Anbetracht der Herausforderungen, die heute an moderne KFZ gestellt werden, können mehrere Szenarien wie z.B. Kaltstart oder Warmbetrieb erstellt werden. Für diese Szenarien werden geeignete Betriebsstrategien entwickelt und in das Gesamtfahrzeugmodell integriert. Anhand verschiedener Fahrzyklen wird das thermische und elektrische Gesamtsystem-Verhalten untersucht.

1 Einleitung

Um die von der EU-Kommission vorgegebene Emissionsminderung von 60 % gegenüber 1990 im Verkehrsbereich zu erreichen, sind alternative Antriebskonzepte mit geringeren Emissionen als die bisherigen, auf Verbrennungsmotoren basierenden Antriebe, erforderlich.

In dem von der Europäischen Kommission vorgelegten Weißbuch Verkehr 2011 konkretisiert die EU-Kommission die Ziele im Verkehrsbereich, danach soll bis 2030 der Anteil der mit konventionellen Kraftstoffen betriebenen PKW halbiert und in den Städten bis 2050 auf null reduziert werden [1].

Eine vielversprechende Lösung sind batterieelektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-RangeExtender, die für den urbanen Verkehr ebenso wie für längere Strecken geeignet sind. Sie vereinen die Vorteile von verbrennungsmotorischen Hybridantrieben hinsichtlich Komfort und Reichweite mit denen von reinen Elektrofahrzeugen hinsichtlich der Emissionsfreiheit.

Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische

Thermodynamik ein fahrzeugtauglicher Antriebsstrang mit Hochvolt-Batterie, Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle (HT-BZ) und Metallhydridspeicher, für die Wasserstoffspeicherung, entwickelt und getestet. Auf Grundlage vorhandener Systemmodelle wird mit Hilfe der DLR-eigenen Modelica-Bibliothek AlternativeVehicles (AV) [2] der RangeExtender-Antriebsstrang modelliert und das dazu passende Thermomanagementkonzept entwickelt. Um die thermischen und elektrischen Anforderungen verschiedener Fahrzyklen an das Gesamtsystem zu ermitteln, wird der Antriebsstrang in das Hotzenblitz-Fahrzeugmodell [3] integriert. Die technischen Daten von Hotzenblitz sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Klasse	Kleinstwagen
Motorleistung	12 kW
Leergewicht	830 kg

Tabelle 1. Kenndaten Hotzenblitz

2 Komponenten des RangeExtender-Antriebsstrangs

2.1 Brennstoffzellensystem

Das Brennstoffzellen-Gesamtsystem besteht aus 4 Modulen (gestrichelter Kasten) mit jeweils drei Stacks à 89 Zellen. Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind die Stacks eines Moduls untereinander in Reihe geschaltet. Ein Strang besteht aus der seriellen Anordnung von zwei Modulen. Die beiden resultierenden Einzelstränge sind parallel verschaltet.

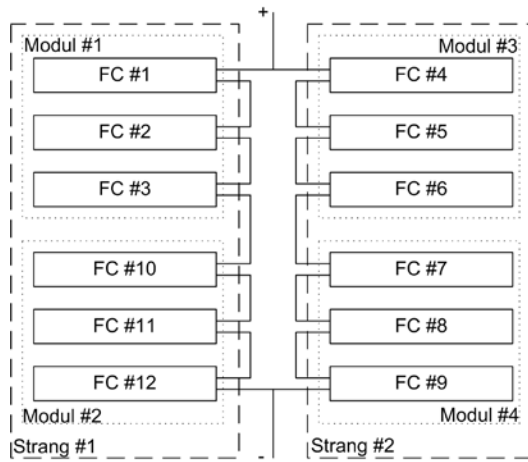


Abbildung 1. Verschaltung der Brennstoffzellen-Module

Für die Modellierung der Brennstoffzelle wird ein kennfeldbasiertes Modell verwendet [4]. Dieses Modell ist für Systemsimulationen, bei denen eine hohe Rechengeschwindigkeit gefordert ist, gut geeignet [2]. Die Polarisationskennlinie wird aus Messungen und Datenblättern übernommen. Für die thermische Simulation ist die Vorgabe der thermischen Masse von großer Bedeutung, da die Verlustleistung zur Änderung der Temperatur der thermischen Masse führt. Die thermische Verlustleistung der Brennstoffzelle ist proportional zur Spannungsdifferenz von Leerlaufspannung (U_0) und tatsächlicher Spannung (U_{Stack}) [5] und wird wie folgt berechnet

$$P_{Verlust} = (N \cdot U_0 - U_{Stack}) \cdot I$$

mit N Anzahl der Zellen, $U_0 = 1,23$ V und I der Batteriestrom

2.2 Metallhydridspeicher

Das Sorptionsspeicher-Modell ist ein 0-dimensionales Speichermodell und basiert auf Gleichgewichtsreak-

tionen [6]. Die Massenbilanz wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{1}{RT} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{n}}{\pi(R_o^2 - R_i^2)L} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\rho_s}{2MMH} \frac{\partial q}{\partial t} = 0$$

wobei p der Druck im Reaktionsbett, T die gemittelte Wasserstofftemperatur im Metallhydridbett, R die universelle Gaskonstante, n der Wasserstoffmassenstrom, R_i der Innenradius, R_o der Außenradius, L die Länge des Reaktionsbets, ε die Porosität des Metallhydridbets, ρ_s die Dichte des Metallhydrids, MMH die gemittelte molekulare Masse des Metallhydrids und q die Wasserstoffkonzentration im Metallhydrid ist.

Die Energiegleichung lautet:

$$\left(\frac{p}{RT} C_p H_2 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_s C_{ps} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\rho_s \Delta H}{2MMH} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2h_{bed} R_i}{\varepsilon(R_o^2 - R_i^2)L} (T - T_m) = 0$$

wobei $C_p H_2$ die Wärmekapazität von Wasserstoff, C_{ps} die Wärmekapazität des Metallhydrids, H die isostere Adsorptionswärme des Wasserstoffs im Metallhydrid, h_{bed} der Gesamtwärmeübertragungskoeffizient zwischen Kühlmedium und Metallhydridbett und T_m die Temperatur des Kühlmediums ist.

Durch Anpassung der geometrischen Größen Länge oder Radius kann der Metallhydridspeicher skaliert werden.

2.3 Batterie

Parallel zu dem BZ-Gesamtsystem sind Akkus geschaltet. Da die Systemspannung des BZ-Systems im Bereich 350...400 V liegt, wurde das Akkupack aus 93 seriell verschalteten Li-Ion-Zellen aufgebaut. Die Ladeschlussspannung der Zellen liegt bei 4,0 V, die gesamt Ladeschlussspannung damit bei 372 V

Die AV-Bibliothek stellt zwei unterschiedliche Batteriemodelle zur Verfügung (ein kennfeldbasiertes und ein impedanzbasiertes Modell) [6]. Das kennfeldbasierte Batteriemodell wird hier für die Modellierung der Einzelzellen benutzt. Mit Hilfe von Kennfeldern aus Datenblättern werden abhängig von Ladezustand, Strom und Temperatur die entsprechenden Werte für den Innenwiderstand und die Ruhespannung vorgegeben.

3 Thermisches Modell

Das Kühlsystem für den RangeExtender-Antriebsstrang besteht aus einem Hochtemperatur- und Niedertemperatur-Kühlkreislauf und wird in der Simulationsumgebung Dymola umgesetzt. Der Hochtemperatur-Kühlkreislauf stellt den thermischen Kreislauf des Brennstoffzellensystems dar und besteht aus Hochtemperaturbrennstoffzelle, Metallhydridspeicher, Pumpe, Hochtemperaturkühler und den zugehörigen Leitungen (siehe Abbildung 2). Die Arbeitstemperaturen der HT-BZ liegen zwischen 100 °C und 160 °C. Der Auslösetemperaturbereich, in dem Wasserstoff aus dem Alanat des Metallhydridspeichers gelöst wird, beginnt bei 100 °C. Durch einen Thermoölkreislauf werden die beiden Komponenten miteinander gekoppelt. Als Kühlmittel wird UCOTHERM S-15-A verwendet. UCOTHERM ist eine synthetische, wasserfreie, jedoch wasserlösliche Wärmeträgerflüssigkeit aus Polyalkylenglykol-Derivaten und speziell für den Einsatz mit Vorlauf-Temperaturen zwischen +100 °C und +205 °C vorgesehen. Wegen des produktspezifisch sehr hohen Viskositätsindex ist die Flüssigkeit auch bei tiefen Temperaturen verwendbar [7].

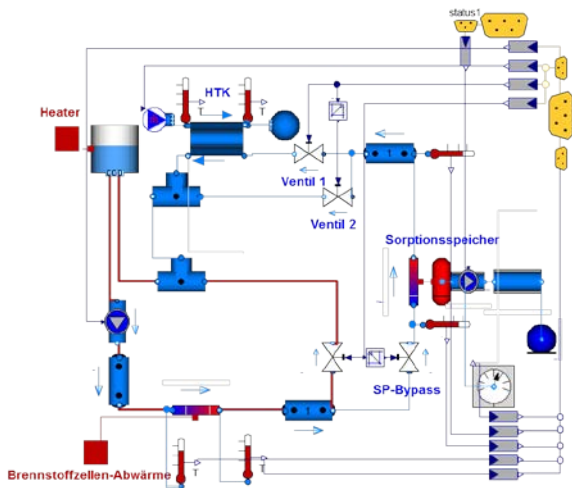


Abbildung 2. Hochtemperatur-Kühlkreislauf

Die Batterietemperierung wird im Modell mit Hilfe eines Niedertemperatur-Kühlkreislaufs mit dem Kühlmittelgemisch Wasser/Glykol abgebildet. Aus Leistungs- und Lebensdauergründen soll die Batterie nur in einem bestimmten Temperaturfenster betrieben werden: Ab Betriebstemperaturen von 50 °C wird die Batterielebensdauer reduziert und eine Leistungsmin- derung ist feststellbar. Bei sehr niedrigen Temperaturen unter ca. 10 °C lässt die Leistung der Batterie ebenfalls deutlich nach und der Wirkungsgrad sinkt.

Wie es in **Abbildung 3** zu erkennen ist, verbindet der Batteriekreislauf die elektrischen Komponenten Batterie und Motor (EM) mit einem Niedertemperaturkühler (NTK), der die überschüssige Verlustwärme an die Umgebung überträgt. Die dargestellten Ventile (Ventil 1, 2 und 3) werden für die Zu- und Abschaltung einiger Kühlkreiszweige abhängig vom aktuellen Betriebszustand verwendet: Wenn ein schnelles Aufheizen der Batterie bei fehlender Motorabwärme gewünscht ist, wird nur das Ventil 2 geöffnet. Zur Abfuhr der Batterieabwärme wird nur das Ventil 1 geöffnet.

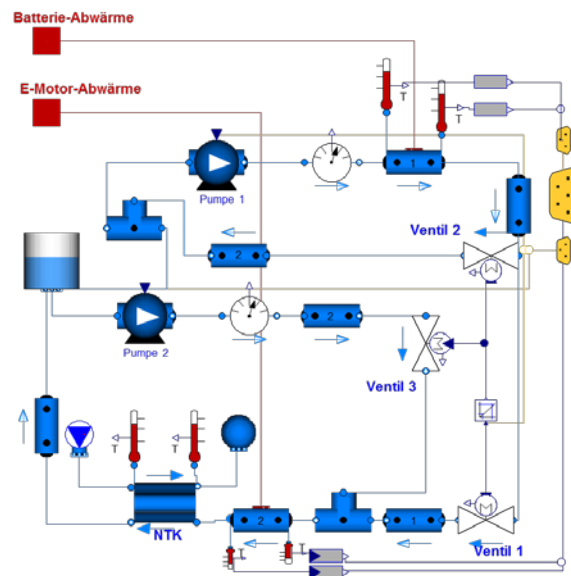


Abbildung 3. Niedertemperaturkreislauf

4 Betriebsstrategien

Für die folgenden thermischen Szenarien Kaltstart, hohe Betriebstemperaturen und Leistungssprung werden Betriebsstrategien entwickelt.

4.1 Kaltstart

Um die Temperatur der Brennstoffzelle zuerst auf 110 °C zu erhöhen, wird in der Startphase nur der rot eingezeichnete kleine Kühlkreis zugeschaltet (Abbildung 2). Durch eine externe Energiequelle (z. B. PTC-Heizer) wird das Kühlmittel geheizt. Danach wird der Sorptionsspeicher-Bypass (SP-Bypass) voll geöffnet, um den Speicher schnell zu erwärmen. Infolge der Erwärmung wird Wasserstoff freigesetzt. Da die Brennstoffzelle noch nicht aktiv ist und damit kein Wasserstoff verbraucht wird, erhöht sich der Druck im Tank (siehe Abbildung 4). Bei einem Wasserstoffdruck von ca. 10 bar im Speicher erfolgen die

Abschaltung der elektrischen Heizung und der Start der Brennstoffzelle.

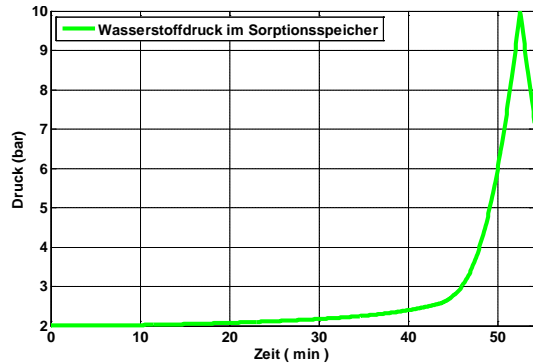


Abbildung 4. Wasserstoffdruckverlauf beim Aufheizen des Metallhydridspeichers

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, dauert es mit einer 3 kW PTC-Leistung ungefähr 43 Minuten, bis die Brennstoffzelle eine Betriebstemperatur von ca. 110 °C erreicht. Die Aufheizzeit eines Brennstoffzellensystems mit 50 kg Gesamtmasse und 900 J/kgK thermischer Kapazität von Umgebungstemperatur auf 110 °C ist von der Heizleistung abhängig und liegt im Falle 20 °C Umgebungstemperatur zwischen 5 Minuten für 18 kW Heizleistung und 30 Minuten für 4 kW.

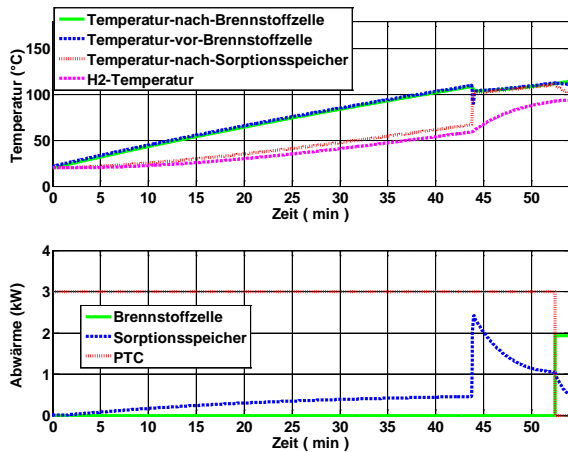


Abbildung 5. Temperatur- und Wärmeentwicklung während der Start-Phase

4.2 Warmbetrieb

Die Hauptaufgabe in der Warmbetrieb-Phase besteht darin, die Temperatur der Brennstoffzelle im empfohlenen Betriebsbereich zu halten. Damit die obere Grenztemperatur (160 °C) nicht überschritten wird, öffnet sich der Thermostat (Ventil 1 in der Abbildung 2) bei 150 °C. Damit wird der Hochtemperaturkühler

mit in den Kreislauf eingeschlossen und die überschüssige Wärme an die Außenluft abgegeben. Alternativ kann diese Abwärme auch für die Aufheizung des Innenraums verwendet werden. Der Luftmassenstrom durch den Hochtemperaturkühler wird so geregelt, dass die Kühlmittelintrittstemperatur der Brennstoffzelle 155 °C beträgt.

Abbildung 6 zeigt, dass nachdem die Betriebstemperatur der Brennstoffzelle 160 °C erreicht hat, eine zusätzliche Kühlung durch den Luftwärmetauscher im Falle einer simulierten Fahrt auf dem Artemis-Road-Fahrzyklus nicht notwendig ist (der Luftmassenstrom durch den Hochtemperatur ist gleich 0 kg/s).

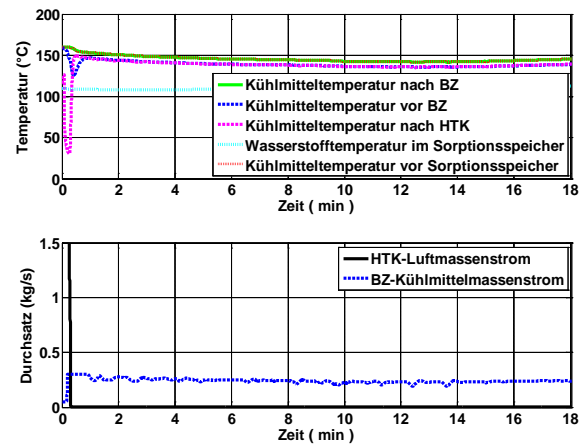


Abbildung 6. Temperatur und Massenstrom des Kühlmittels, Fahrprofil: ARTEMIS_Road

4.3 Leistungssprung

Das untere Diagramm der Abbildung 7 zeigt, dass bei einem Speichervolumen von ungefähr 0.022 m³ die Artemis-Motorway-Fahrt nach 6 Minuten abgebrochen wird, da der Druck des gasförmigen Wasserstoffs zu gering ist und damit der Sorptionsspeicher nicht in der Lage ist, den für die BSZ zusätzlich benötigten Wasserstoff zu liefern. Die Verdopplung des Speichervolumens führt dazu, dass genügend gasförmiger Wasserstoff während der Fahrt im Sorptionsspeicher freigesetzt wird.

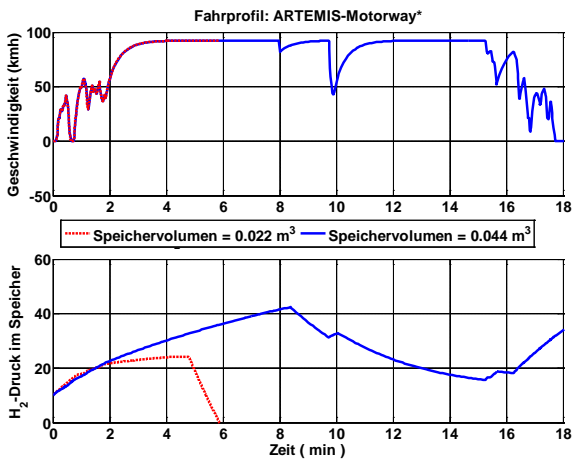


Abbildung 7. Ist-Geschwindigkeit, H₂-Druck im Speicher, Fahrprofil: ARTEMIS_Motorway¹

5 Variantenrechnung Gesamtsystem

Wie in Abbildung 8 gezeigt, werden in das Gesamtfahrzeugmodell vom Hotzenblitz-Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von ungefähr 1050 kg die beiden Kühlmittel-Kreisläufe, der RangeExtender-Antriebsstrang und das ThermoRegler-Modul integriert. Der originale Elektromotor GT 20 mit einer Dauerleistung von 12 kW wird nicht ersetzt.

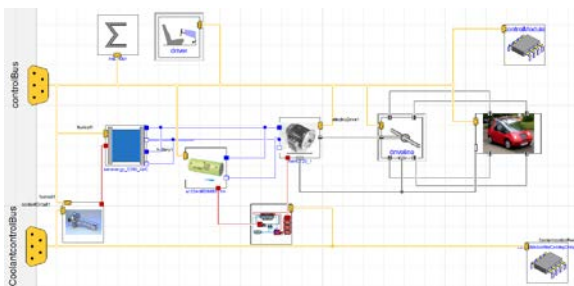


Abbildung 8. Gesamtfahrzeugmodell inklusiv Kühlmittelkreisläufe und ThermoRegler

Für die Simulation wird beispielhaft der neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) gewählt. Der Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit ist in Abbildung 9 dargestellt. Wie es im Bild zu erkennen ist, beträgt die maximale erreichbare Geschwindigkeit aufgrund der geringen Antriebsleistung des Hotzenblitz-Fahrzeugs lediglich 90 km/h.

Als beispielhaftes Ergebnis sind in Abbildung 10 die berechneten Leistungen der Brennstoffzelle und der Batterie aufgetragen.

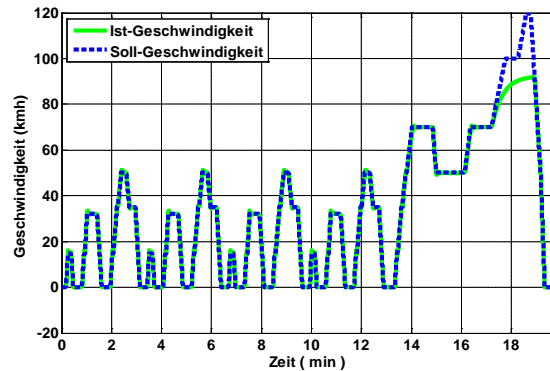


Abbildung 9. Geschwindigkeitsverlauf im NEFZ

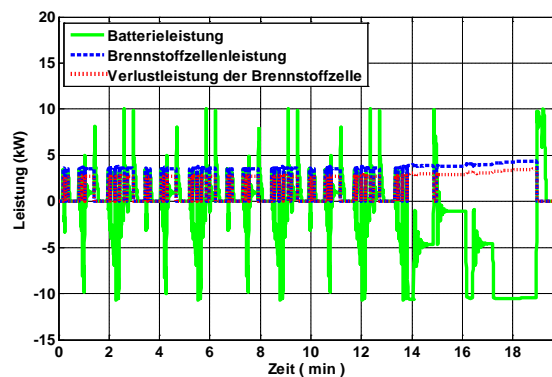


Abbildung 10. Leistungen Batterie und Brennstoffzellensystem (Fahrprofil NEFZ)

In Abbildung 11 ist der Verlauf der Kühlmitteltemperatur am Ein- und am Austritt des Brennstoffzellensystems aufgetragen. Wie man erkennt, ist die Temperatur der Brennstoffzelle in dem vom Hersteller empfohlenen Betriebsbereich (zwischen 100 °C und 160 °C) gehalten. Die Ergebnisse verschiedener Fahrprofile wie z. B. der H₂-Verbrauch und die elektrische Energie aus der Batterie bezogen auf 100 km sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

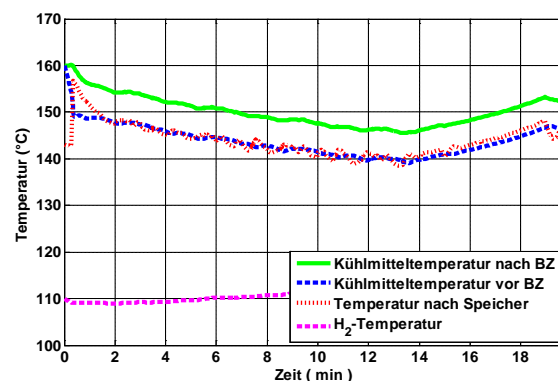


Abbildung 11. Temperaturverläufe im HT-Kühlkreis (Fahrprofil NEFZ)

¹ Aufgrund 12 kW Motor-Dauerleistung beträgt die maximale Geschwindigkeit des Hotzenblitz ca. 90 km/h

	NEFZ	ARTEMIS Urban	FTP75
H₂-Verbrauch (kg/100 km)	0.47	0.62	0.46
Wärme für H₂- Freisetzung (kwh/100 km)	8.77	16.60	8.23
Energie aus der Batterie (kwh/100 km)	7.17	10.80	7.20
Gesamtenergie- bedarf (kwh/100 km)	13.40	18.26	13.60

Tabelle 2. Ergebnisse verschiedener Fahrprofile bezogen auf 100 km

6 Zusammenfassung

Mit der AlternativeVehicles-Bibliothek des DLR wurde ein kompletter RangeExtender-Antriebsstrang mit Hochtemperatur-Brennstoffzelle und thermischem Kreis modelliert und in ein Fahrzeugmodell integriert. Mit dem erstellten Modell wurden verschiedene Szenarien wie Kaltstart und Warmbetrieb untersucht und die dazu passenden Betriebsstrategien entwickelt.

Das thermische und elektrische Gesamtsystemverhalten wurde anhand verschiedener Fahrzyklen untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass je nach Fahrzyklus die Abwärme der Brennstoffzelle nicht ausreicht, um bei einem Leistungssprung schnell genug eine ausreichende Menge Wasserstoff aus dem Metallhydridspeicher auszulösen. Dieses Problem konnte durch Vergrößerung des Speichervolumens gelöst werden.

Zur Berücksichtigung der für die Kabinenklimatisierung notwendigen Energie ist in einem nächsten Schritt geplant, zusätzlich ein Innenraummodell zu erstellen und ins Gesamtfahrzeugmodell zu integrieren. Mit diesem thermischen Gesamtmodell können dann weiterführende Untersuchungen zum Energie- und Thermomanagement an Brennstoffzellenfahrzeugen durchgeführt sowie geeignete Betriebsstrategien, die auch die Beheizung der Kabine berücksichtigen, entwickelt werden

7 Abkürzungen

AV	Alternative Vehicles-Bibliothek
EM	Elektrischer Motor
HT-BZ	Hochtemperaturbrennstoffzelle
HTK	Hochtemperaturkühler
HV	Hochvolt
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NTK	Niedertemperaturkühler
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PTC	Positiver Temperaturkoeffizient
SOC	State of Charge (Ladezustand)

8 Referenzen

- [1] EU-Kommission. *Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. Brüssel, 28.3.2011.
- [2] J. Ungethüm; D. Hülsebusch; H. Dittus und T. Braig. *Simulation von alternativen Fahrzeugantrieben in Modelica*. ASIM Conference, Ulm 2010.
- [3] H. E. Friedrich. und P. Treffinger. *Hylite Technologieplattform für Brennstoffzellenhybride*. ATZ05, 2006.
- [4] D. Hülsebusch; J. Ungethüm und et al. *Multi-disziplinäre Simulation von Fahrzeugen*. ATZ10, 2009.
- [5] D. Wenger. *Metallhydridspeicher zur Wasserstoffversorgung und Kühlung von Brennstoffzellenfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [6] Z. Jianga; R.A. Dougala und et al. *Simulation of a thermally coupled metal-hydride hydrogen storage and fuel cell system*. Journal of Power Sources 142, S. 92–102, 2005.
- [7] Fragol Schmierstoff GmbH & Co. KG. *Thermöl UCOTHERM Datenblatt*.