## Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

## Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:** Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

> Endbericht erstellt am 31/03/2020

# Projekttitel: KEYTECH4EV

Projektnummer: 855237

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm	
Projektstart	01/02/2017	
Projektende	31/01/2020	
Gesamtprojektdauer	36 Monate	
(in Monaten)		
ProjektnehmerIn	AVL List GmbH.	
(Institution)		
AnsprechpartnerIn	Dr. Peter Bardosch	
Postadresse	Hans-List-Platz 1, 8020 Graz	
Telefon	0316 787 - 0	
Fax		
E-mail	info@avl.com	
Website	www.avl.com	

## KEYTECH4EV

Development and Demonstration of Key Technologies for Low-cost Electric Vehicle Platforms

#### AutorInnen:

Peter Bardosch AVL Alexander Schabel AVL Clemens Poteschil HÖRBIGER Bernhard Marius CEET Stefan Hemmer EK Alexander Schärfl MAGNA Patrick Pertl HyCentA Daniel Ritzberger IMM Jörg Worschech IESTA

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inh	naltsverzeichnis	.4
2	Eir	nleitung	.5
2	2.1	Aufgabenstellung	.5
2	2.2	Schwerpunkte des Projektes	.5
2	2.3	Einordnung in das Programm	.6
2	2.4	Verwendete Methoden	.6
2	2.5	Aufbau der Arbeit	.9
3	Inh	altliche Darstellung1	11
4	Erç	gebnisse und Schlussfolgerungen1	13
2	ŀ.1	Ergebnisse	13
2	1.2	Schlussfolgerungen	10
5	Au	sblick und Empfehlungen	11
6	Lite	eraturverzeichnis	12
7	An	hang	12
8	Ko	ntaktdaten	12

## 2 Einleitung

## 2.1 Aufgabenstellung

Das Projekt KEYTECH4EV verfolgte das übergeordnete Ziel eines kostengünstigen und CO<sub>2</sub> freien Antriebskonzepts auf Basis von Brennstoffzellen- und Batterietechnologie. In der Industrie werden diese bereits entwickelt, allerdings mit dem Schwerpunkt von Antriebssysteme einem reinen Brennstoffzellenantrieb (große Brennstoffzelle, sehr kleine Batterie, z.B. Toyota Mirai) bzw. reinen Batteriefahrzeugen (große Batterie, z.B. Tesla). Der innovative Ansatz des KEYTECH4EV Projektes ist die Kombination beider Technologien in ein hybridisiertes Gesamtsystem, unter Ausnutzung aller möglichen Synergien. Vorstudien zeigten, dass mit diesem Ansatz die Kosten von 15-20% reduziert werden können, unter Erreichung aller Spezifikationen (Fahrbarkeit, Effizienz, etc.). Zusätzlich können weitere Nachteile von Batteriefahrzeugen wie kurze Reichweite und lange Ladezeiten komplett vermieden werden.

### 2.2 Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt KEYTECH4EV war ein horizontal und vertikal stark integriertes Vorhaben mit einem industriellen Entwicklungsdienstleister (AVL), mit Komponenten und Subsystemherstellern (Hörbiger, Magna, ElringKlinger), Forschungseinrichtungen (TU Graz, TU Wien, HyCentA) und mit dem Klein- und Mittelunternehmen IESTA. Das Projekt wurde zentral über eine Spezifikationsdefinition gestartet und führte dann in parallele Aktivitäten zur Entwicklung von zentralen Schlüsseltechnologien für dieses Antriebssystem. In Folge wurden alle Schlüsseltechnologien und Innovationen auf System- und Fahrzeugebene integriert und validiert. Das zentrale Projektziel war die Entwicklung der Schlüsseltechnologien für den Aufbau eines hybridisierten Brennstoffzellen Batterie-Demonstrationsfahrzeuges. Das Fahrzeug sollte folgende Ziele erreichen:

- Energieeffizienz verglichen von etwa 2.5 L Benzin (äquivalent) pro 100km
- Reduktion der Antriebsstrangkosten um >15%
- Zero CO2
- Reduktion der Leistungsdegradation der Brennstoffzelle um 50%
- Reichweite >500km
- Fahrbarkeitsziele wie vergleichbare Serienfahrzeuge

Eine zusätzliche zentrale Motivation für das Projekt war die Etablierung einer nationalen/europäischen Wertschöpfungskette für Brennstoffzellentechnologie. Die Innovation des Vorhabens und die industriell marktrelevante Zielsetzung wurden unterstrichen durch die Teilnahme von 5 globalen Fahrzeugherstellen als assoziierte Partner.

## **2.3** Einordnung in das Programm

Das Projekt KEYTECH4EV adressiert folgende Schwerpunkte des Energieprogramms (2. Ausschreibung):

- Themenfeld 2 Energieeffizienz und Energieeinsparungen (Energieeffizienz & Energieeinsparung)
- TF 2/2.3 Brennstoffzelle und Wasserstoff (Brennstoffzelle & Wasserstoff)
  - In Bezug auf TF2/2.3 werden die folgenden Themen aus der Ausschreibung adressiert:
    - Entwicklung von Brennstoffzellen-Stacks
    - Verbesserte Brennstoffzellenkomponenten
    - Effizientes und kostenoptimiertes Brennstoffzellensystem

Das Projekt *KEYTECH4EV* und seine Partner hatten das klare Ziel, ein österreichisches Brennstoffzellen-Fahrzeug für den globalen Markt zu entwickeln. Ein schneller Markteintritt ist in verschiedener Hinsicht wichtig:

i) Es ermöglicht eine frühzeitige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs (insbesondere bei Einführung als Großserienfahrzeug) und kann damit zur Erreichung der globalen Klimaziele rasch beitragen.

ii) Es werden den österreichischen Automobilzulieferer erhebliche neue Chancen auf dem Weltmarkt eröffnet, um die Wettbewerbsfähigkeit der Automobiltechnik aus Österreich auch im Bereich der Brennstoffzellentechnologien zu stärken.

iii) Und nicht zuletzt wird es dadurch möglich, die nächste Dekade zum "E- und BZ-Fahrzeuge-Jahrzehnt" zu machen.

Abschließend kann festhalten werden, dass das Projekt *KEYTECH4EV* nicht nur langfristige Klimaziele auf globaler Ebene sondern auch gezielt strategische Ziele auf regionaler Ebene unterstützt.

### **2.4** Verwendete Methoden

Grundsätzlich fokussierte sich das Projekt KEYTECH4EV auf die Entwicklung von Schlüsseltechnologien bzw. -komponenten zur Erreichung der definierten Projektziele. Diese Schlüsselkomponenten wurden als aktuell größten Verbesserungspotentiale bzw. Marktbarrieren für die Einführung der Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellentechnologie identifiziert. Diese wurden nun im Rahmen des Projektes mit Innovationen weiter aufgewertet, ohne die Kosteneffizienz aus den Augen zu verlieren.

Schlüsseltechnologien/- komponenten	Beitrag zu den übergeordneten Zielen	Beitrag zu den ibergeordneten Zielen KEYTECH4EV	
Antriebsstrang- & Fahrzeugarchitektur	Energieeffizienz	Verbesserung der Energieeffizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen auf unter 100 MJ/100 km	Alle WPs

# Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

		Innovatives Brennstoffzellen-/Batterie-	
Kosten		Hybrid-Antriebsstrangkonzept zur	Alle
		Kostensenkung um 15%	WPs
		Keine CO2-Emissionen durch den	Alle
	CO <sub>2</sub>	Finsatz von Wasserstoff	WPs
		Fabrzeug mit einer Reichweite von min	Alle
	Fahrzeugreichweite	500 km	WPs
		Frfüllung aller	
	Fahrharkeit	Fahrbarkeitsanforderungen von	Alle
		Serienfahrzeugen	WPs
		Reduzierung der Degradierung des	۵۱۱۵
	Lebensdauer	PEM-Systems auf 1%/1 000 h	WPs
	Energieeffizienz	Vereinfachte Architektur des Hybrid-	WP2
	Kosten Fahrbarkeit	PEM-Systems zur Verbesserung von	WI 2, W/P7
	& Vehicle Range	Effizienz und Leistungsdichte	W/P8
		Integration von frequenzbasierten	VIIO
PEM SYSTEM	Lebensdauer und	Brongtoffzellen Diagnoson in das DEM	WP7,
	Kosten	System ohno zugätzliche Herdware	WP8
	Labanadayar und	System onne zusatzliche hardware	
	Kooton	diagneephoeierten Kentrellmethoden	VVΓ7, Μ/D0
	Fobrborkoit	Stock Diottform zur Erfüllung der	VVFO
		Anforderungen der Automobilindustrie	MIDO
	Energieenizienz,	Anorderungen der Automobilindustne	WPZ,
	Panizeugreichweite	Kesten	VVP4
PEM STACK Module	& Lebensuauer	Cooignotoo Dooign für die	
	Kosten	Geeignetes Design für die	WP4
		Integrierte Derinkeriekempenenten	
	Kosten	(Ventile Sensoren Injektor/Eighter )	WF4, W/D2
		Poduktion der Kosten für die Speicher	VFJ
	Kaatan	Zulinder durch die Einführung von	
	KUSIEII	zyinder durch die Eindrifung von	VVFS
Wassarstoff	Kastan 8	Poduziorung von Volumon/Gowicht doc	
Speichersystem	Eshrzougroichwoite	desamten Speichersystems	WP5
operchersystem		Weniger Schnittstellen/Verbindungen für	
	Koston	reduzierte Montageschritte und	W/D5
	NUSLEIT	verbesserte Dichtheit	VVFJ
		Hohe Systemintegration im PEM-Stack-	
	Kosten		WP3
H. Injektor/Eightor	Koston	Reduktion von Hilfssystemen	W/D3
	Enorgiooffizionz 8	Poduktion dos Enorgiovorbrauchs von	VVF J
		Hilfsevetemen	WP3
		Entwicklung von auf Echtzoit	
	Laboradouar	Sustemmodellierung besierenden	W/D7
Diagnose	LEDENSUQUEI	Diagnocomothedee	VVF /
	Labanadauar		
	Lebensdauer	Nombination von	VVP/

## Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

	Lebensdauer	frequenzmessbasierten Diagnosen (THDA) und neuen modellbasierter Ansätzen zum Hinzufügen neuer Funktionalitäten Neue Nachweisverfahren zur Erkennung von Wasserstoffmangel unter allen Betriebsbedingungen	WP7
	Energieeffizienz, Fahrbarkeit & Fahrzeugreichweite	Prädiktive Modelle zur Steuerung für Wärme- und Energiemanagement	WP2, WP6
Energy & Thermal Management	Energieeffizienz, Fahrbarkeit & Fahrzeugreichweite	Energieoptimierte Hybrid- Betriebsstrategien zur Verbesserung der Gesamtsystem-Effizienz	WP2, WP6, WP8
	Energieeffizienz, Fahrbarkeit & Fahrzeugreichweite	Kopplung der 2 Hoch- und Niedertemperatur-Kühlkreisläufe im Fahrzeug zur Reduzierung von Volumen und Gewicht	WP2, WP6, WP8
	Kosten- & Energieeffizienz	Innovative HiL-Testverfahren für eine frühe Validierung im Fahrzeug ohne Hardware-Integration	WP7, WP8
Testen und Kalibrierung	Kosten- & Energieeffizienz	Neue Testmethoden für die Integration von Systemkomponenten zur beschleunigten Systementwicklung, Inbetriebnahme und Steuerungsentwicklung	WP3, WP4, WP5, WP7
	Kosten- & Energieeffizienz	Neue Methodik für PEM-System und Fahrzeugkalibrierung basierend auf modellbasierter Steuerung und DoE- Methoden	WP7, WP8

Die Projektziele, Schlüsseltechnologien und -innovationen wurden im Rahmen der folgender WP-Struktur analysiert, entwickelt, integriert und evaluiert:

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 1: WP-Struktur von KEYTECH4EV

## 2.5 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von der geschilderten Methodik und WP-Struktur wurden die Projektziele und Schlüsseltechnologien in den WPs wie folgt bearbeitet:

#### Schlüsseltechnologie Antriebsstrang und Fahrzeugarchitektur (WP2, WP6, WP8, WP9)

Innovative Hybrid-Brennstoffzellen-/Batterie-Antriebsstrang-Architektur für:

- Gesamtkostenreduktion des Antriebsstrangs im Vergleich zu reinen Brennstoffzellen- und reinen Batteriekonzepten
- Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz durch optimiertes Management der Hybridleistung und der Energiemanagement Strategien
- Erfüllung der Zielvorgaben für die Fahrbarkeit von Serienfahrzeugen und eine Fahrzeugreichweite von 500 km

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Schlüsseltechnologie PEM-System (WP7)

Entwicklung einer vereinfachten PEM-Systemarchitektur mit:

- Integriertem H<sub>2</sub>-Einspritzer/Ejektor
- Integrierter mess- und modellbasierter Diagnoseansatz
- Diagnosebasierte Systemsteuerung
- Entwicklung einer fortschrittlichen PEM-Systemdiagnose auf der Basis von THDA (elektrische Impedanzmessung) und Echtzeitsystemmodellen
- Erweiterung der Diagnosefunktionalität auf kritische Ausfallmodi wie H2-Unterversorgung
- Entwicklung von Kalibrierungsmethoden für PEM-Systeme

#### Schlüsseltechnologie PEM-Stack (WP4)

Entwicklung eines Stack-Moduls zur Erfüllung der Anforderungen der Automobilindustrie an:

- die Leistungsdichte, die Dynamik und die Lebensdauer
- die Erhöhung der Gesamtleistungsdichte über die Integration von Anlagenkomponenten (Ventile, Sensoren usw.) in die Stack-Module
- die Eignung und das Handling der umfangreichen automobilrelevanten Tests

#### Schlüsseltechnologie H2-Injektor / Ejektor (WP3)

Entwicklung einer kompakten Injektor/Ejektor-Einheit mit integriertem Ventiltreiber zur vollständigen Integration in PEM-Systeme:

- Erfüllung der Lebensdauer-Anforderungen des Automobilbereichs
- Vermeidung eines zusätzlichen Gebläses für die Wasserstoffrückführung
- Entwicklung der PMW-Signal-basierten Injektor-Steuerung und Prüfung von optimierten Parametern

#### Schlüsseltechnologie Energie- und Wärmemanagement (WP6)

Entwicklung eines Energie- und Wärmemanagement mit:

- Optimierten Hybrid-Betriebsstrategien zur Maximierung der Gesamtenergie-Effizienz
- Analysen und Entwicklung des Wärmemanagementsystems für die Brennstoffzelle, Batterie und andere Komponenten der Leistungselektronik
- Integration verschiedener Kühlkreisläufe (Hochtemperatur, Niedertemperatur) unter Berücksichtigung von Synergieeffekten

Die Aufgabenstellungen wurden in einem Lastenheft zusammengefasst (WP2), in den einzelnen WPs (3-8) entwickelt, in den Demonstrator integriert (WP8) und schließlich evaluiert (WP9).

## **3** Inhaltliche Darstellung

Die inhaltliche Darstellung erfolgt anhand der definierten WPs von KEYTECH4EV.

#### WP2 Specification Development

Der Fokus im WP2 lag auf der Erarbeitung der Anforderungen für die Schlüsseltechnologien sowie den Fahrzeugdemonstrator. Als Startpunkt für die Erarbeitung der Anforderungen wurden die Projektziele von *KEYTECH4EV* sowie die Schlüsselinnovationen herangezogen. Es wurde die Demonstrator-Fahrzeugbasis ausgewählt und dann die einzelnen Anforderungen für die Schlüsseltechnologien entwickelt. Sobald der erste stabile Entwurf der Anforderungen definiert war, wurde dieser mit den unterschiedlichen OEM, die via LoI in das Projekt eingebunden waren, diskutiert und einzelne Anforderungen bzw. deren Grenzen nachjustiert. Diese Feinjustierung wurde dann wieder mit den Projektzielen sowie den Vorgaben aus der Demonstratorplattform abgeglichen und mögliche Abweichungen identifiziert. Dies diente dann wiederum als Basis des nächsten Entwicklungsschrittes der Anforderungen. Dieser Prozess wurde aufgrund der intensiven Einbindung der OEM (inkl. dem Neueintritt eines weiteren OEM im Laufe des Anforderungsentwicklungsprozesses) noch 2 weitere Male durchlaufen, bis die endgültige Anforderungsarchitektur mit allen Detaillierungen erstellt war.

Insgesamt wurden 436 funktionelle Anforderungen für die Schlüsseltechnologien und die Fahrzeug-Demonstratorplattform sowie 24 nicht-funktionelle Anforderungen, die die Bereiche von Fahrkomfort und Fahrbarkeit abdecken, erfasst. Diese 24 nicht-funktionellen Anforderungen repräsentieren jeweils den relevanten Einstiegspunkt und die Rahmenbedingungen für die entsprechenden Anforderungen, die seitens der führenden OEM für Fahrzeuge entwickelt und standardisiert wurden.

#### WP3 Development of injector/ejector unit with integrated valve driver

Ziel dieses WP war die Entwicklung eines Injektors für die H2-Gasmessung und Druckregelung sowie einen Ejektor für die H2-Rückführung und Druckrückgewinnung mit integrierter Ventiltreiberelektronik. Die integrierte Einheit ist gewichtsoptimiert und kompakt gebaut, um ihre Verwendbarkeit in unterschiedlichen Brennstoffzellensystemen zu ermöglichen. Sie enthält alle relevanten Schnittstellen zum Stackmodul bzw. dessen Gehäuse.

Diese Lösung soll den Standard für Brennstoffzellensysteme der nächsten Generation setzen und in zukünftigen BZ-Fahrzeugen kommerzialisiert werden. Im Projekt sollen dadurch die definierten Leistungs- und Kostenziele erreicht werden.

#### WP4 Development stack and stack module

Eine intensive Komponentenentwicklung war aufgrund der grundlegend neuen Anforderungen an einen PEM-Brennstoffzellenstack in einem automobilen Hybridsystem notwendig, um die Projektziele zu erreichen. Dazu mussten Laborversuche zur Komponentenauswahl auf Zellebene (MEA, GDL), zu Betriebsstrategien und zum Abbauverhalten des verwendeten Materials durchgeführt werden, um in iterativen Entwicklungsschritten eine Ausbalancierung von Leistung und Kosten zu erreichen. Dabei sollten folgende Ziele im Rahmen der Entwicklungsarbeiten realisiert werden:

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Bau von Einzelzellen und Shortstacks für experimentelle Aktivitäten
- Entwicklung von Stack-Komponenten zur Einhaltung von Kostenzielen und zur Leistungssteigerung
- Verbesserung des Stack-Designs zur Minimierung der negativen Effekte kritischer Betriebsbedingungen wie z.B. Gefrieranlauf, dynamische Laständerungen, Feuchtigkeit usw.
- Entwicklung einer spritzgegossenen Medienversorgungseinheit mit System-integrierten BoP-Komponenten (Ventile, Sensoren, etc.)
- Bereitstellung von drei Stackmodulen in voller Größe (Stack + Medienversorgungseinheit, 60 kW) für die Systementwicklung (WP7), Erprobung der APR-Einheit (WP3) und Integration in das Demonstrationsfahrzeug (WP8)

#### WP5 Hydrogen Storage System

Dieses WP fokussierte sich auf die Konzeption, Entwicklung und Aufbau eines Wasserstoffspeichertanks für den Fahrzeug-Mitteltunnel. Dies wurde in folgenden Schritten realisiert:

- Konzept für kosten- und gewichtsoptimierten Wasserstoffspeicher
- Entwurf für automobiles Wasserstoff-Speichersystem
- Systemvorprüfung für sicheren Fahrzeugbetrieb
- Systemaufbau für den Fahrzeugeinbau
- Modellbasierte Berechnung des Tankfüllstands

#### WP6 Energy and Thermal Management

Ziel war es, ein optimiertes Kühlsystem für ein PEMFC-System aufzubauen. Es wurde eine sehr effiziente Kühlleistung angestrebt, die hauptsächlich durch optimierte Komponenten und Regelungsstrategien erreicht wurde. Dabei sollte eine Überdimensionierung der Komponenten vermieden werden. Ferner sollten erweiterte Aussagen zum thermodynamischen Verhalten des gesamten Antriebsstrangs für verschiedene Straßenprofile wie z.B. Bergpfade (höchster Kühlbedarf) gemacht werden.

#### WP7 PEM system development, diagnostic & calibration

Der Ausgangspunkt für dieses Projekt ist ein 10kW-Labor-PEM-System, das für einen Range Extender entwickelt wurde. Die Leistungsziele waren für *KEYTECH4EV* deutlich anspruchsvoller im Bereich von 50-60 kW, wie auch hinsichtlich Effizienz und Dynamik. Bisher wurde auch die Diagnostik nicht in die die Systemarchitektur direkt integriert. In diesem Projekt wurden daher auch neue Ansätze für die Diagnose auf der Basis von Echtzeitmodellen entwickelt. Zusätzlich wurde ein völlig neuer und innovativer Ansatz für die Kalibrierung von PEM-Systemen eingeführt. Folgende Entwicklungsarbeiten wurden durchgeführt:

- Design, Entwicklung und Aufbau eines ~50kW PEM-Systems
- HW- und SW-Implementierung von Diagnosefunktionen in die Leistungselektronik
- Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Erkennung kritischer Betriebsbedingungen
- Entwicklung von Methoden zur Kalibrierung von PEM-Systemen

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

• PEM-System-Tests

#### WP8 Demonstration & Vehicle Integration

WP8 fokussierte sich auf die Integration der Entwicklungsergebnisse aus WP3-WP7 und den gesamtheitlichen Aufbau der Demonstratorplattform. Dabei werden folgende Entwicklungen durchgeführt:

- Aufbau und Montage des *KEYTECH4EV*-Fahrzeugdemonstrators
- Entwicklung von Fahrzeugsteuerungen
- Kalibrierung und Inbetriebnahme des Fahrzeugs
- Beschaffung aller Teile und Subsysteme
- Fahrzeug Packaging & Design

#### WP9 Technology Evaluation

WP9 konzentrierte sich auf die Evaluierung der Entwicklungsergebnisse sowie der Projektziele auf Basis der Demonstratorplattform. Dazu wurden folgende Entwicklungsarbeiten durchgeführt:

- Chassis Dyno Tests
- Teststreckentests
- Test auf öffentlichen Straßen
- Generelle Technologie-Evaluierung
- Fahrzeug-Benchmarking

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### 4.1 Ergebnisse

#### • WP3 Development of injector/ejector unit with integrated valve driver

Einleitend wurde eine umfassende Literaturstudie zur Bewertung der geometrischen Beziehungen zwischen Parametern wie Düsendurchmesser und Düsenabstand zum Ejektor durchgeführt. Hinsichtlich der definierten Wasserstoffdurchfluss-

und Rezirkulationsrate wurde eine grobe Geometrie für die erste Ejektorkonstruktion definiert. Parallel dazu wurde auch der Injektor entworfen. Als Injektor wird ein elektromagnetisches Ventil verwendet. Das Steuersignal basiert auf der Pulsweitenmodulation (PWM). Das Gehäuse des Injektors und alle anderen wasserstoffhaltigen Komponenten sind aus Gründen der Haltbarkeit aus wasserstoffresistentem



Abbildung 2: Injektor/Ejektor Einheit

Material gefertigt. Zur Minimierung des Schwingungs- und Geräuschpegels ist das Ventil mit zwei dämpfenden O-Ringen am Außendurchmesser befestigt. Die Einspritzdüse ist als separates Teil ausgeführt und kann direkt in den Injektor eingeschraubt werden. Dadurch können verschiedene Düsentypen mit unterschiedlichen Geometrien einfach eingesetzt werden. Aufgrund des modularen Aufbaus der Rezirkulationseinheit kann das Injektorrohr ausgetauscht werden, um andere Injektorgeometrien zu realisieren.

Als Ausgangsbasis für die CFD-Simulationen wurden Ejektorgeometrien aus der Literatur mit entsprechenden Systemanforderungen verwendet. Basierend auf der ersten Auslegung der Injektor/Ejektor-Einheit wurden am HyCentA CFD-Simulationen sowie von HOERBIGER und ELRINGKLINGER Integrationsstudien durchgeführt. Es wurden 6 Varianten zur Integration der Injektor/Ejektor-Einheit entwickelt. Gemeinsam mit allen WP3-Partnern und AVL wurde jeder Entwurf bewertet. Schließlich wurde die beste Konfiguration ausgewählt. ELRINGKLINGER hat schließlich eine Adapterplatte ausgelegt, um den Stack funktionssicher mit der Injektor/Ejektor-Einheit zu verbinden. Abbildung 2 zeigt den Zusammenbau der Injektor/Ejektor-Einheit einschließlich der Adapterplatte auf dem Medienmodul.

Die experimentellen Tests am HyCentA zielten darauf ab, die 3D-CFD-Simulation der Injektor/Ejektor-Einheit zu validieren. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der angewandten Betriebsfrequenz und der Öffnungsdauer des Injektorventils auf die Rezirkulationsrate quantifiziert. Die Tests wurden in Form stationärer Messungen durchgeführt. Reiner Wasserstoff sowie Gasgemische aus Wasserstoff und Stickstoff (bis zu 30 % N2) wurden verwendet, um die realen Betriebsbedingungen in einem Brennstoffzellensystem zu simulieren. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau mit den Teilsystemen:

- 1. Präzise Messung des Wasserstoffverbrauchs
- 2. Dosieranlage für Stickstoffbeimischung
- Massendurchflussregler zur Einstellung des Wasserstoffstroms (zur Simulation des Brennstoffzellensystems )
- Prüfling (bestehend aus Injektor/Ejektor-Baugruppe und Auslass-Attrappenplatte)



Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 4 zeigt den Prüfstand und die Baugruppe bestehend aus:

1. Injektor/Ejektor-Baugruppe

2. Adapter-Platte (zwischen Medienmodul und Injektor/Ejektor-Baugruppe)

3. Auslass-Attrappenplatte für emulierten Anodenstrom

4. Medienmodul (Wasserstoff-, Luft- und Kühlmittelein- und -auslass)

Nach der Durchführung von Dichtheitsprüfungen für das gesamte System wurde der Injektor-/Ejektor-Prototyp

Abbildung 4: Prüfstand am HyCentA

zunächst mit reinem Wasserstoff als Rezirkulationsmedium getestet. Die wichtigsten Grenz- und Anfangsbedingungen für die Tests sind die Wasserstofftemperatur (15°C), der Durchmesser der Injektordüse (1,8 mm), der Eingangsdruck des Injektors (10 bar(a)) und die Injektorfrequenz (10 Hz). Basierend auf den Randbedingungen und zusätzlichen Anpassungen zur Minimierung der Druckverluste auf dem Prüfstand wurden die Auswertungen mit Wasserstoff/Stickstoff-Gemischen durchgeführt. Für die Versuche mit reinem Wasserstoff wurde das gleiche Lastprofil verwendet. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse für Gasgemische mit 10, 20 und 30% Stickstoffgehalt.



Abbildung 5: Rezirkulationsrate und Druckverluste über den Injektor-Massenstrom für verschiedene Gasgemische

Die niedrigsten Rezirkulationsraten treten erwartungsgemäß bei der Mischung mit 30% Stickstoff auf. Im Vergleich zu den Messungen mit reinem Wasserstoff die ist Rezirkulationsrate im

Teillastbetrieb ca. 40% und im Volllastbetrieb ca. 50% geringer. Die Ergebnisse zeigen, dass geeignete Spülstrategien (Spülterminierung) unerlässlich sind, um die Rezirkulationsrate in geeigneten Grenzen zu halten. Der Einfluss unterschiedlicher Stickstoffgehalte auf die Druckverluste ist gering. Etwas höhere Verluste treten bei höheren Gasflüssen auf.

Die Messergebnisse bestätigten auch die Ergebnisse der 3D-CFD-Simulation für das Injektor/Ejektorsystem.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen Experiment und Simulation für den Betrieb mit reinem Wasserstoff im Volllastbetrieb. Nach der Anpassung der Wandrauhigkeit des Simulationsmodells zeigt die Validierung ausgezeichnete Korrelationen. Die Rezirkulationsrate konnte mit einer Genauigkeit von >99% mittels der Simulation berechnet werden.



Abbildung 6: Validierungsergebnisse des Injektor/Ejektorsystems im Volllastbetrieb mit reinem Wasserstoff

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Druckverluste im Anodenpfad einen erheblichen Einfluss auf die Rezirkulationsrate haben. Eine Reduzierung der Druckverluste von 0,3 auf 0,23 bar führt zu einer Steigerung der Rezirkulationsrate von 36% im Volllastbetrieb mit reinem Wasserstoff. Die gleichen Trends konnten auch bei Wasserstoff/Stickstoff-Gemischen beobachtet werden. Darüber hinaus führt ein erhöhter Stickstoffgehalt zu geringeren Rezirkulationsraten. Dieses Verhalten muss bei den Spülstrategien berücksichtigt werden. Daneben beeinflussen auch Injektorparameter wie Düsendurchmesser und -länge sowie die Injektorimpulsfrequenz die Ejektorleistung. Daher wurden weitere Tests durchgeführt und mittels der Ergebnisse konnten Verbesserungspotentiale insbesondere im Teillastbetrieb identifiziert werden.

#### • WP4 Development stack and stack module

Für dieses Projekt wurde ein 300-Zellen-Brennstoffzellen-Stackmodul entwickelt, hergestellt und auf dem Prüfstand mehreren Systemtests unterzogen. Diese Systemtests zielte darauf ab, die Leistung und Homogenität des Stacks zu evaluieren sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von einzelnen Zellen, die parallel von der TU Graz zur Ermittlung von Optimierungsparametern durchgeführt wurden, zu verifizieren und umzusetzen.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Das 300-Zellen-Brennstoffzellen-Stackmodul zeigte eine außergewöhnliche Leistung, eine hervorragende Betriebsstabilität und Homogenität eine aute der Zellspannung. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse ElringKlingerder Standard-UI-Kurve bei 2.5 bar **Betriebsdruck** einschließlich der resultierenden Leistungskurve. Das Stack-Modul erreichte einen elektrischen Strom von > 380 A bei einer durchschnittlichen Zellspannung von 0.6 V. Die resultierende Leistung des Stacks beträgt



>70 kWel, was das in diesem Projekt festgelegte Ziel ist.







Abbildung 9: Montage des Brennstoffzellen-Stackmoduls während des Shaker-Tests

Abbildung 7: UI- und PI Kurve des 300-Brennstoff-Zellen Stack Moduls

Zusätzlich zu den hervorragenden Leistungsdaten zeichnet sich das 300-Zellen-Brennstoffzellen-Stackmodul durch eine homogene Zellspannungsverteilung aus. veranschaulicht Abbilduna 8 die Zellspannung jeder Zelle bei 2,5 bar Betriebsdruck und einem elektrischen Strom von 370 A. Man erkennt, dass die Differenz zwischen der minimalen und maximalen Zellspannung an dieser Stelle <49 mV beträgt und bestätigt Qualität damit die hohe des ElringKlinger-Brennstoffzellen-Stackmoduls.

Zusätzlich zu den geschliderten Anforderungen an das Stack-Modul im Betrieb muss das Brennstoffzellen-Stack-Modul Stöße und Vibrationen ertragen können, die durch den Betrieb des Prototypen-Fahrzeugs verursacht werden. Nicht nur das Stackmodul muss diese Stöße ertragen und während seiner Lebensdauer gasdicht bleiben, sondern auch das Stackträgersystem bestehend aus einer festen und einer schwimmenden Halterung muss solche Belastungen ertragen können. Das Trägersystem ist somit eine entscheidende

Komponente für die Integration des Stackmoduls in die

Fahrzeug-Demonstratorplattform und muss entsprechend ausgelegt werden. Die DIN EN 60068 2 wurde herangezogen, um die Schock- und Vibrationsprüfungsreihen zu planen und so zu verifizieren, dass die Konstruktion des Stackmoduls und des Tragsystems den geforderten Schockbelastungen standhalten kann.

Die Schock- und Vibrationstests wurden an einem 300-Brennstoffzellen-Stackmodul durchgeführt, um sicherzustellen, dass Stack und Trägersystem den Anforderungen des Projekts entsprechen. Zusätzlich wurde der Stack mit Zellspannungsüberwachungskontakten (CMVCs) und einem CVMC-Schutz ausgestattet, der die CMVCs auf den Bipolarplatten fixiert (beide Komponenten sind Standardkomponenten von ElringKlinger und werden daher auch in diesem Projekt eingesetzt). Das Stackmodul wurde dann den folgenden Tests unterzogen:

- Sweep-Test (DIN EN 60068-2-6) bei 10 bis 1000 Hz entlang jeder Achse
- 8 h Stochastische Vibrationtests (DIN EN 60068-2-64) zwischen 5 Hz und 200 Hz entlang jeder Achse
- Schocktests (DIN EN 60068-2-27) bis zu 30 g für 11 ms entlang jeder Achse

Abbildung 9 zeigt den Aufbau am Shaker-Prüfstand, bei dem der Stack horizontal auf dem Prüfstand montiert war. Nach jedem Versuch wurden ein Lecktest und eine optische Inspektion des Stacks und der CVMCs durchgeführt, um eventuelle Gaslecks oder geometrische Anomalien, die durch die Tests verursacht wurden, zu identifizieren. Die Kriterien für das Bestehen des Leckage-Tests nach jedem Experiment waren die gleichen wie für den Lecktest nach der Montage des Brennstoffzellen-Stackmoduls. Das 300-Zellen-Brennstoffzellen-Stackmodul erzielte während der gesamten Tests außergewöhnliche gute Ergebnisse und bestand jedes Schock- und Vibrationsexperiment erfolgreich:

- Das Brennstoffzellen-Stackmodul bestand alle Leckage-Tests.
- Die CVM-Kontakte lösten sich nicht.
- Optische Inspektionen ergaben keine Auffälligkeiten.

Dieses hervorragende Ergebnis spricht sowohl für das Stack-Design als auch für die Konstruktion des Trägersystems. Die geometrischen Daten des getesteten Trägersystems wurden an AVL weitergeleitet, um damit die Fahrzeugintegration durchzuführen (WP8 Task 8.1).

#### • WP5 Hydrogen Storage System

Auf der Grundlage der Anforderungen aus WP2 wurden erste Einbauuntersuchungen (siehe Abbildung 10) durchgeführt, um den möglichen Einbauraum für Wasserstoffbehälter zu ermitteln. Das Ergebnis war, dass der größte verfügbare Raum im Bereich der Reserveradmulde liegt, wo 2 identische Behälter mit einer Speicherkapazität von jeweils ca. 1,45 kg H<sub>2</sub> integriert werden können. Diese Behältergröße stand zur Verfügung und musste im Rahmen des Projekts nicht neu konstruiert werden.

Ein dritter Behälter derselben Größe wurde hinter den Rücksitzen im Kofferraum platziert, um die notwendigen Änderungen an der Fahrzeugstruktur zu minimieren. Ein weiterer möglicher Einbauraum wurde im Bereich des Fahrzeug-Mitteltunnels identifiziert. Dafür wurde im Rahmen des Arbeitspakets 5.1 ein spezieller Behältertyp entworfen. Um die Anforderung von insgesamt 5,24 kg Wasserstoff an Bord zu erfüllen, sollte dieser Behälter eine Mindestwasserstoffkapazität von 0,89 kg haben.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 10: Packaging-Untersuchungen

Behälter Nr., Lage	Volumen [NI]	H2 Kapazität [kg]
Behälter 1: Ersatzradwanne	36	1.45
Behälter 2: Ersatzradwanne	36	1.45
Behälter 3: Trunk	36	1.45
Behälter 4: Mitteltunnel	22	0.89
Summe	130	5.24

#### Tabelle 1: Behälter-Lage und Speicherkapazitäten

In einem ersten Schritt wurde ein Vorentwurf des mittleren Tunnelbehälters durchgeführt. Um die endgültige äußere Geometrie des Behälters für das Fahrzeugpaket festzulegen, wurde dieser erste Entwurf des Behälterdesigns als Dummy (Schaummodell) hergestellt, einschließlich des Behälterventils und des erforderlichen Freiraums für Toleranzen sowie Druck- und Wärmedehnung des Behälters (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Einbauuntersuchung des Mitteltunnelbehälters im Fahrzeug

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Für die neuen Mitteltunnelbehälter war die Verwendung neuer Materialien, insbesondere alternativer Kohlenstofffasern, geplant. Ziel war es, Kohlenstofffasern mit einem besseren Leistungs-/Kostenverhältnis zu verwenden, d.h. es werden weniger Kohlenstofffasern benötigt, um die gleiche Leistung (mechanische Festigkeit) zu erreichen, bei nur geringer Kostensteigerung pro Kilogramm Kohlenstofffaser. Insgesamt soll eine Kostenverbesserung für den Behälter durch eine ebenfalls verbesserte Speicherkapazität aufgrund geringerer Wandstärken realisiert werden.



Mit diesem neuen Fasertyp wurde ein erster Behälterentwurf, basierend auf dem 200-bar-Liner-Werkzeug / Geometrie, prototypisch hergestellt (siehe Abbilung 12). Daher hat die Nabe (auf dem Tank-Ventil-Schnittstelle) das Design wie beim 200-bar-Behälter. Es musste daher ein hochfester Stahl verwendet werden (anstelle von Aluminium).

Abbildung 12: Tankprototyp für den Mitteltunnel

Für den Mitteltunnelbehälter wurden einige Behälter von führenden Wettbewerbern analysiert, um den Stand der Technik zu evaluieren.



Abbildung 13: Benchmark Untersuchungen von H2-Behältern

Tabelle 2: Permeationsergebnisse an Liner-Proben bei verschiedenen Druckniveaus und Temperaturen

Druck / Temperatur	Liner Sample 1	Liner Sample 2
H <sub>2</sub> Permeation Rate @ 700 bar / 15 °C	5 Ncm <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>	4 Ncm <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>

#### Verbundwerkstoff (Faser- und Harzsystem)

Wie bereits angesprochen wurde im Rahmen dieses Projekts ein neuer Fasertyp getestet, der eine etwa 20 % höhere Zugfestigkeit im Vergleich zur hochmodernen Faser T700 von Toray bietet, die normalerweise für Hochdruckbehälter verwendet wird. Die höheren Kosten für diese neue Faser werden durch die geringere benötigte Fasermenge und die Zeitersparnis im Produktionsprozess (Wickeln und Aushärten des Behälters) kompensiert. Insgesamt konnte ein leichterer Druckbehälter mit erhöhter Kapazität (aufgrund der geringeren Wandstärke) bei gleichen Kosten erreicht werden. Um die Fasereigenschaften (mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit, Wechselwirkung mit dem Seite 20 von 42

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Harzsystem usw.) vor der Konstruktionsphase des Behälters zu untersuchen, wurden grundlegende Wickelversuche mit bestehenden Auskleidungen von CNG-Behältern durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden für die endgültige Konstruktion des 700-bar-Behälters verwendet.

#### Boss & Liner Design

Ein besonderes Augenmerk wird auf Gestaltung und die die Geometrie des Liners gelegt. Ziel war eine homogene es, Lastverteilung zu realisieren, um die lokalen Spannungsspitzen zu vermeiden. Daher wurde ein glatter Übergang vom Kuppelabschnitt zur Öffnungsstelle entworfen. Dies führt zu sehr geringen lokalen Spannungserhöhungen entlang



der Linerkontur und einer guten Abbildung 14: Schematische Darstellung von Boss und Liner Aufbau Produzierbarkeit mit geringen Materialanhäufungen. Darüber hinaus kann der Behälter nach hydraulischen Tests im Produktionszyklus wesentlich einfacher entleert werden. Der schematische Aufbau der realisierten Lösung ist in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 15: Verringerte Spannungsverteilung von Boss und Liner

Der kritischste Bereich ist der Übergang vom Kragen zum zylindrischen Teil. In Bereich tritt diesem die maximale mechanische Spannung auf, die zu einem Versagen der Nabe führen kann insbesondere bei Druckwechseln. Mittels FEA (Finite-Elemente-Bewertung) wurden die Ereignisse Berstfestigkeit (> 1.575 bar Mises. Spannung von Tresca & Hauptnormalspannung) und Zyklenfestigkeit (> 45.000 Zyklen 20 bis 875 bar Dauersicherheitsfaktor. Degradationsfaktor) untersucht und dann optimiert (siehe Abbildung 15).

#### Liner

Das Know-how von Magna in Bezug auf CNG-Behälter und Liner-Materialien ist die Grundlage für die Materialauswahl des Liners. Die Hauptherausforderung im Gegensatz zu CNG-Behältern war das H<sub>2</sub>-Permeationsverhalten. Daher wurden die derzeit verwendeten Materialien auf ihre Barriereeigenschaften getestet, zusammen mit Benchmarking-Materialien von Konkurrenzprodukten. Diese Materialien werden

in realen Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt und erfüllen die derzeit gültigen Normen. Der Vergleichstest wurde auf Probenbasis mit Wasserstoff bei 200 bar durchgeführt. Abbildung 16 zeigt die Wasserstoff-Permeationsrate der Materialien über die Probendicke (variiert von 1,9 bis 4,4 mm). Für

besseren Vergleich einen der Permeationseigenschaften ist die Permeationsrate ebenfalls auf eine Materialdicke von 1 mm normiert. Beide verwendeten Materialien bieten den gleichen Permeationswiderstand das Referenzwie material 2 und sind doppelt so gut wie das Referenzmaterial 1. Daher dieses Material für wurde die Realisierung des Liners verwendet



Abbildung 16: H<sub>2</sub>-Permeationsrate des Linermaterials

#### Dichtungssystem

Die Vorschriften für Wasserstoffbehälter in EC79/2009 und UN ECE R134 verlangen eine Tieftemperaturfähigkeit des Behälters und damit des Dichtungssystems bis -40 °C. Darüber hinaus werden zukünftige Kundenanforderungen -50 oder sogar -60 °C erfordern, so dass die O-Ringe zur Dichtung modifiziert bzw. getauscht werden müssen. Nach einer Literaturrecherche konnten einige O-Ring-Werkstoffe mit guten Tieftemperatureigenschaften identifiziert werden:

#### Tabelle 3: Rahmenbedingungen für Abdichtungssystem

	CIIR Chlor-Butyl	FVMQ Flur-Silikon Gummi	Butyl
Härte [Shore]	72	80	85
TR10 Wert [°C]	-53	-59	-60
Glasübergangstemp. Tg [°C]	-63	-64	-71

Diese drei Dichtungsmaterialien wurden auf ihre Tieftemperaturfähigkeiten getestet:

- Prüfung mit einer speziellen Vorrichtung (Dichtungssituation analog Zylinderdichtungsstelle, einschließlich eines Buchsenausschnitts) und einem Prüfwerkzeug (O-Ring nur in einer Nut ohne Buchsenausschnitt installiert)
- Temperaturstufen: +23 / +85 / -40 / -50 / -60 °C
- Druckstufen: 5 / 10 / 20 / 50 / 100 / 300 / 700 / 860 bar
- Prüfgas ist Helium, Leckmessung über Lecksucher Pfeiffer HLT560
- Temperaturüberwachung an Komponenten über Thermoelemente

Basierend auf den Testergebnissen wurde die Entscheidung für den Werkstoff FVMQ aufgrund seiner Shore-Härte in Kombination mit den Tieftemperatureigenschaften und den Abdichtungseigenschaften getroffen.

#### **Behälterproduktion**

Für die Herstellung der Liner wurde ein vorhandenes Blasformwerkzeug auf Basis der neuen optimierten Linerkontur angepasst. Nach der Liner-Fertigung und der Komponentenbeschaffung (Buckel für beide Enden, O-Ring, Fasern, Harz) wurden Liner und Buckel für den Wickelprozess zusammengefügt (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Liner-Aufbau

Nach jedem Produktionslos wurden die Zylinder auf ihre mechanische Festigkeit geprüft (hydraulische Berst- und hydraulische Wechselprüfungen) und für die Optimierung der Verbundstruktur und der Wicklungsschichten der nächsten Behältergeneration verwendet.

#### Tests für die Homologation der Behälterprototypen

Neben der allgemeinen Grundmaterialprüfung, dem Eignungsnachweis und den Konstruktionsarbeiten musste in einem nächsten Schritt die strukturelle Festigkeit nachgewiesen werden. Der Prüfungsschwerpunkt lagt dabei auf dem geplanten Einsatz im Demonstratorfahrzeug von max. 4 Jahren. Deshalb wurden folgende Tests durchgeführt:

- Hydraulischer Berstversuch Anforderung: Berstdruck > 1,575 bar bei > 3 Proben Ergebnis: Behälter erreichten einen Berstdruck > 1,632 bar
- Hydraulischer Zyklusversuch Anforderung: > 16.200 Zyklen 20 -875 bar bei > 2 Proben

Gesamt-Ergebnis: kein Behälter zeigte eine Leckage oder einen Bruch, der verbleibende Berstdruck war > 1.690 bar.



Abbildung 18: Liner hydraulischer Bersttest

Auf der Grundlage des in WP2 analysierten vorläufigen Fahrzeugpackagings wurde das Befestigungssystem für die Wasserstoffbehälter bestehend aus zwei separaten Modulen entworfen:



Wasserstoffspeichersysteme im Fahrzeug

Für das Wasserstoffspeichersystem wird ein fortschrittlicher Druckregler (siehe Abbildung 20) verwendet. Diese neue und sehr kompakte Einheit bietet bei gleicher Funktionalität und Leistung eine signifikante Gewichtsreduzierung von > 85 % gegenüber Standard-Systemen, wie sie z.B. für die B-Klasse F-Cell von Daimler verwendet werden.

- Modul mit 2 Behältern am Fahrzeugheck

mehrere Konsolen für die Montage konstruiert.

Die entsprechenden Modulrahmen bestehen

Aluminium auf der Grundlage einer leichten und modularen Großserienkonstruktion (Abbildung

geeignet für Produktionsmethoden wie Strangguss,

- Modul mit einem Behälter im Mitteltunnel (neu entwickelt im Rahmen des KEYTECH4EV-Projekts) Die Reserveradwanne wurde entfernt, und es wurden

Abbildung 20: Wasserstoff-Druckregler für KEYTECH4EV

aus

19,

In der letzten Phase der Entwicklung des Mitteltunnelbehälters gab es mehrere zusätzliche Testaktivitäten, die für die Prototyp-Homologation erforderlich waren (siehe Abbildung 21). Die anschließenden Tests wurden durchwegs positiv abgeschlossen:



Abbildung 21: Konformitätsbescheinigung des TÜV

- Drucktests: 1,050 bar, kein Schaden oder Leckage
- Dichtheitstest: dicht bis 860 bar.
- Bersttest: > 1,575 bar

Druckguss oder Schmieden).

- Zyklischer Drucktest: 45.000 Zyklen, 20 875 bar kein Bruch
- > 2x valve installation Nabendrehmoment-Test: toraue
- H<sub>2</sub> Permeationstest: < 2.8 Ncm<sup>3</sup>/h/l
- Fülltest (kalt): schnelles Füllen des Behälters an einer analogen Tankstelle

#### Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Einige dieser Tests wurden unter Beteiligung des TÜV durchgeführt, um die Prototyp-Zertifizierung für den Behälter zu erhalten. Der positive Abschluss dieser Prüfungen zusammen mit Berechnungsberichten, Materialtests / -zertifikaten usw. führte zu einer vom TÜV ausgestellten Konformitätsbescheinigung (siehe Abbildung 22). Aufgrund der Einschränkungen der Verwendung innerhalb des Prototyps (max. Anzahl der Füllzyklen, max. Betriebsdauer, min./max. Temperaturen) wurde die folgende Prüfplakette auf dem Behälter angebracht:

MAGNA	Type of Fuel: Serial Number: Volume: Date of Manufacture: Date of Pressure Test: DO NOT USE AFTER: Test Pressure: Nominal Working Pressure: Max. allowable Pressure: Max/min allowable Temp.:	H <sub>2</sub> / CHG ONLY HF_215_SN000010 22 Liter 11 / 2018 11 / 2018 11 / 2022 105.0 MPa 70.0 MPa (+15 °C) 87.5 MPa -20 °C / +85 °C
•	Max/min allowable Temp.: Number of Filling Cycles: Manufacturer:	-20 °C / +85 °C 1,800 - only at approved filling stations Magna Steyr Fuel Systems GesmbH / AUSTRIA

Abbildung 22: Prüfplakette für den Mitteltunneltank

Schließlich konnten alle spezifizierten Parameter für den Mitteltunneltank erfüllt bzw. übererfüllt werden:

Projektspezifikation:

- Dimension: d=215 mm, l=1,108 mm
  Speicherkapazität: V=22 L, m=0.9 kg
  Gewicht (leer): 18 kg
- Nutzungsdauer: max. 2 a
- Max. Füllzyklen: 500x

Projektergebnisse:  $\rightarrow$  d=214 mm, l=1,103 mm  $\rightarrow$  V=22 L, m=0.9 kg  $\rightarrow$  18 kg  $\rightarrow$  max. 4 a  $\rightarrow$  1,800x

### • WP6 Energy and Thermal Management

Basierend auf den Anforderungen von WP2 und einer Design- und Simulationsphase wurde das thermische Konzept für das Demonstrator-Fahrzeug entwickelt. Das thermische System wurde auf drei Kühlkreisläufe aufgeteilt, um sicherzustellen, dass die Zielkomponententemperaturniveaus für die gegebenen Umgebungsbedingungen eingehalten werden können:

- Niedertemperatur (LT)-Kühlkreislauf, bestehend aus dem Antriebsstrang E-Motor, E-Motor-Elektronik, Brennstoffzellen-Boost-Konverter und Kompressor und dessen Inverter-Elektronik, wie in Abbildung 23 dargestellt.
- Hochtemperatur-Kühlkreislauf (HT), bestehend aus dem Brennstoffzellen-Stack, der Wärmetauscher-Kathode (HX) und der HX-Anode, wie in Abbildung 24 dargestellt.
- Batteriekühlkreislauf, der nur einen A/C-Kältemittel-Kühlmittel-Wärmetauscher und die HV-Batterie umfasst

Die beiden Varianten des HT-Kreislaufs (siehe Abbildung 24) sind sehr ähnlich, was die erforderliche Energie für die Kühlung (Pumpenleistung, Lüfterleistung usw.) und die Kühlleistung (maximale Wärmeabgabe, niedrigstes Kühlmitteltemperaturniveau) betrifft. Der Hauptunterschied besteht darin, wie ein zusätzlicher Wärmetauscher (Sub-HX) im HT-Kühlsystem hydraulisch angeschlossen wird. In der Seite 25 von 42 Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Version v05 wird der Sub-HX einschließlich einer kleinen Bypassleitung hinter dem Hochtemperaturkühler in Reihe geschaltet. In der Version v06 wird die gleiche Sub-HX-Komponente parallel zum Hochtemperaturkühler angeschlossen.



Abbildung 23: Endgültiges LT-Wärmesystemkonzept



Abbildung 24: Endgültige HT-Wärmesystemkonzept-Varianten (links v05, rechts v06)



Abbildung 25: Komponenten des Kühlkreislaufs des Brennstoffzellensystems (HT-Kreislauf): IMI Präzisionstechnik motorgesteuertes 3-Wege-Ventil (links), AB-Micro Hochleistungs-Brennstoffzellen-Kühlpumpe (rechts)

In einem nächsten Schritt wurde das Kühlsystem für das PEM-Brennstoffzellensystem die in Prüfstandsversion des KEYTECH4EV-Systems integriert. Die Auswahl der Komponenten für den Kühlkreislauf des Brennstoffzellensystems (HTbasierte Kreislauf) auf den Simulationsergebnissen. Das tatsächliche Layout des Hochtemperaturkreislaufs (Brennstoffzellensystem) ist in Abbildung 24 rechts dargestellt. Der Nebenkühler ist gemäß den Simulationsergebnissen in Reihe mit dem Hauptkühler geschaltet. Als vorgegebene Randbedingungen Kathodenwaren der und der Anodenwärmetauscher feste Bestandteile. Es zeigte sich,

dass diese Reihenschaltung von Haupt- und Nebenkühler - beide parallel zum Brennstoffzellen-Stack einen ausreichenden Kühlmitteldurchsatz zur Konditionierung von Luft und Wasserstoff ermöglicht. Zusätzlich wurde eine Blende zur Einstellung der Durchflussmenge hinzugefügt. Weitere Komponenten,

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

die dem Versuchsträger entnommen wurden, waren der PTC-Heizer HT6.1, der Kabinenwärmetauscher HE3.3, der Hauptkühler H3.1, das Absperrventil V3.2 des Kabinenheizers und der Ausgleichsbehälter ET3.1. Dabei wird der PTC-Heizer nicht nur als zusätzliche Wärmequelle für die Kabinenheizung genutzt. Eine weitere Funktion ist die Unterstützung des Kaltstarts als zusätzliche elektrische Last zur schnelleren Aufheizung des Systems. Aufgrund des hohen Stack-Druckabfalls wurde eine Hochleistungs-Kühlmittelpumpe von AB-Micro benötigt, siehe Abbildung 25 rechts. Um den gesamten Systemdruckabfall zu überwinden, wurde die Kühlpumpendrehzahl durch den Lieferanten modifiziert. Für die Regelung der Einlasstemperatur des Brennstoffzellen-Stacks war ein Mischventil erforderlich, um den Anteil des Kühlmittels, das den Kühler umgeht, zu regeln, siehe Abbildung 98 (V3.1). Das 3-Wege-Ventil von IMI Precision Engineering stellt eine leichte und kompakte Lösung für die Automobilindustrie dar, siehe Abbildung 25 links. Um die elektrische Leitfähigkeit des Kühlmittels niedrig zu halten, wurde

ein Ionenaustauscher (I2M) gewählt. Für die Verbindungen wurden Siliziumschläuche mit geringer Ionen-Extraktion (Silflex) und Bosch-Kfz-Sensoren für die Druck- und Temperaturmessung verwendet. Die Silikonschläuchen mit verbundenen Komponenten des Kühlkreislaufs sind der Prüfstandsversion in des Brennstoffzellensystems in Abbildung 26 zu sehen. Der vorhandene Niedertemperatur (LT)-Kühlkreislauf des Passat GTE wird zur Kühlung der zusätzlichen Leistungselektronik verwendet. Die Kühlleistung ist für zusätzliche Komponenten



Abbildung 26: Brennstoffzellen-Kühlsystem mit Si-Schlauchverbindungen (blau)

ausreichend. Antriebsstrang, Antriebsumrichter und Abwärtswandler wurden von einem Fahrzeug E-Golf übernommen. Verdichtermotor, Verdichterwandler und DC/DC-Wandler wurden als neue Komponenten zum LT-Kühlkreislauf hinzugefügt, siehe Abbildung 27.

Die ersten Tests und die Inbetriebnahme des Brennstoffzellensystems wurden im HyCentA durchgeführt. Das Volumen und der Druckabfall des BrennstoffzellenStacks wurden mit einem "BrennstoffzellenStack-Dummy" nachgebildet. Hinsichtlich des Kühlkreislaufs wurde eine Blende verwendet, um den Druckabfall des BrennstoffzellenStacks nachzuahmen, siehe unten.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 27: Aktuelle Version des Kühlkreislaufs der Leistungselektronik (LT-Kühlkreislauf); Komponenten des Brennstoffzellensystems werden in den bestehenden LT-Kühlkreislauf integriert

Leistung des Kühlsystems des Fahrzeug-Brennstoffzellensystems:

Innerhalb des Fahrzeugsystems wurde die Leistung des Kühlsystems auf der Teststrecke und auf einem Prüfstand am Fahrgestellprüfstand getestet (siehe Abbildung 28). Die Ergebnisse der Leistung des Fahrzeug-Kühlsystems sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 121 km/h und 21,5 °C Umgebungstemperatur beträgt die verfügbare Dauerleistung des Brennstoffzellensystems ohne Verletzung der maximalen Stackaustrittskühlmitteltemperatur von 85 °C 43 kW, siehe Abbildung 30. Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 151 km/h und 20°C Umgebungstemperatur ist die





Abbildung 30: Leistungstest des Kühlsystems bei 121 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit

Abbildung 28: KEYTECH4EV Fahrzeug auf dem Chassis Dyno Prüfstand für Kühlsystemleistungstests



Abbildung 30: Leistungstest des Kühlsystems bei 151 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit

maximal verfügbare kontinuierliche Systemleistung nur geringfügig höher, siehe Abbildung 29. Im Prinzip steht eine höhere Systemleistung zur Verfügung. Sobald die Temperaturgrenze erreicht ist, wird die Derating-Funktion aktiviert und reduziert die Leistung, um die Austrittstemperatur unter 85°C zu halten. Die Leistungsbegrenzung hängt hauptsächlich von der fahrzeugspezifischen Kühlluft-Strömungsgeschwindigkeit ab, die für den Kühler zur Verfügung steht.

#### • WP7 PEM system development, diagnostic & calibration

Ausgehend von Gesamtfahrzeuganforderungen und Fahrzeugsimulationen (AVL CRUISE) wurden die Anforderungen an das PEM-Brennstoffzellensystem ermittelt (siehe auch WP2). Diese PEM-Brennstoffzellensystemanforderungen sind die Grundlage für PEM-Brennstoffzellensystemsimulationen (AVL CRUISE M und MATLAB/Simulink), die wiederum die Anforderungen auf Komponentenebene (entsprechend den Prozessen im V-Modell) liefern. Zu den Anforderungen auf Systemebene gehören z.B. Umgebungsbedingungen, Dynamik, Kaltstartfähigkeit und Lebensdauer des PEM-Brennstoffzellensystems. Als Herzstück des PEM-Brennstoffzellensystems wird der Brennstoffzellen-Stack auch einen erheblichen Einfluss auf die Komponentenanforderungen haben. Die betrieblichen Anforderungen an den Brennstoffzellen-Stack wurden daher sehr detailliert mit dem Stack-Lieferanten diskutiert. In Abbildung 31 ist der prinzipielle Aufbau eines Brennstoffzellensystems dargestellt:



<u>Cathode path:</u> = Air- or. oxygen supply
 <u>Anode path:</u> = Hydrogen supply
 Coolant circuit: = Stack cooling

•  $\frac{\text{Coolant circuit:}}{\text{Coolant circuit:}} = \text{Stack cooling}$ 

#### Abbildung 31: Aufbau des KEYTECH4EV-Brennstoffzellensystems

Die richtige Auswahl der Balance of Plant (BoP) – Komponenten (Nebenaggregate) und die Betriebsführung sind wesentlich, um die Anforderungen an Lebensdauer und Effizienz zu erfüllen. Die zentrale Rolle der Medienversorgung ergibt sich nicht nur aus der Versorgung mit reaktiven Gasen, sondern auch aus der entsprechenden Medienkonditionierung. Letztere ist speziell auf die Anforderungen des Brennstoffzellen-Stacks abgestimmt. Für einen optimalen Wirkungsgrad und zur Minimierung der Degradationsraten der Elektroden und der Polymerelektrolytmembran müssen vier Hauptparameter innerhalb bestimmter Grenzen gesteuert werden. Die Regelung dieser Parameter muss

für jeden Lastpunkt angepasst werden, wird von der Medienversorgung und -konditionierung übernommen und kann daher in 4 Hauptaufgaben unterteilt werden:

1) Massenflusskontrolle: Die Menge der für den Betrieb eines Brennstoffzellensystems zuzuführenden Gase hängt von der Leistungsanforderung ab, die das Brennstoffzellensteuergerät vom Fahrzeugsteuergerät erhält. Aus dem elektrischen Strom bzw. der elektrischen Ladungsmenge können die erforderlichen Massenströme für Wasserstoff und Luftsauerstoff durch die Faraday'schen Gesetze bestimmt werden. Die berechneten Massenströme werden in der Regel mit einem entsprechenden Sicherheitsfaktor multipliziert, um einen lokalen Brennstoffmangel im Brennstoffzellen-Stack zu verhindern, der zu Kohlenstoffkorrosion und damit zur Degradierung der Elektroden führen würde.

**2)** Relative Luftfeuchtigkeitskontrolle: Die Leistung eines Brennstoffzellen-Stacks ist stark vom Wassergehalt in der Polymerelektrolytmembran abhängig. Dies beeinflusst die Protonenleitfähigkeit und damit den ohmschen Spannungsverlust im Stack erheblich. Aus diesem Grund ist das Wassermanagement im Brennstoffzellensystem eines der kritischsten Themen. Typischerweise werden PEM-Brennstoffzellen-Stacks bei einer Temperatur zwischen 65 °C und 80 °C betrieben, um Spannungsverluste aufgrund der Reaktionskinetik zu minimieren. Um eine hohe relative Luftfeuchtigkeit (80% < rH < 100%) im Stack zu erhalten, wird das austretende Produktwasser zur Befeuchtung der Ansaugluft verwendet. Durch die Regelung der relativen Feuchte in den zugeführten Medien kann ein Austrocknen der Membran und damit einhergehende Leistungs- und Lebensdauerverluste verhindert werden. Eine weitere Aufgabe der Feuchteregelung ist es, einer möglichen Wasser-Überflutung des Brennstoffzellen-Stacks entgegenzuwirken, die insbesondere im transienten Betrieb auftreten kann. Die Ansammlung von flüssigem Wasser in den porösen Strukturen der Elektroden, die bei einer relativen Feuchte von über 100% stattfindet, führt zwangsläufig zu einer unzureichenden Gas-Versorgung des Stacks.

**3) Druckregelung:** Die Leistung eines Brennstoffzellen-Stacks steigt signifikant mit dem Druck der dem Brennstoffzellensystem zugeführten Gase. Mit steigendem Druck wird die Diffusion reaktiver Gase durch die porösen Elektrodenstrukturen, insbesondere bei hohem Leistungsbedarf, erhöht und damit die Spannungsverluste im Brennstoffzellen-Stack reduziert. Bei erhöhtem Systemdruck dürfen jedoch zu keinem Zeitpunkt große Druckdifferenzen zwischen Anoden- und Kathodenmodul auftreten, da dies zu einer starken mechanischen Überlastung der Polymerelektrolytmembran führen würde. Gleichzeitig ist zu beachten, dass der Systemdruck auch die relative Feuchte im Brennstoffzellensystem beeinflusst, die mit steigendem Druck zunimmt. Die exakte Steuerung des Drucks ist daher entscheidend für den optimalen Betrieb und die Verlängerung der Lebensdauer eines Brennstoffzellen-Stacks.

**4) Temperaturregelung:** Aufgrund der physikalischen und thermodynamischen Zusammenhänge zwischen Druck, Temperatur und relativer Feuchte müssen auch die Temperaturen der reaktiven Gase und des Brennstoffzellen-Stacks geregelt werden. Wie bei der Problemstellung 2 dargelegt, wird für den optimalen Betrieb eines Brennstoffzellensystems die relative Luftfeuchtigkeit typischerweise zwischen 80% und 100% gehalten. Bei hoher Last wird der Druck im Brennstoffzellen-Stack wie o.g. beschrieben erhöht. Da die relative Feuchte mit dem Druck steigt und zusätzlich die Wasserproduktion im Stack bei hoher Last zunimmt, kann es leicht zu einer Flutung der Zellen und des Stacks mit Wasser kommen. Folglich muss die Temperatur des Brennstoffzellen-Stacks entsprechend erhöht werden, um die relative Feuchte im Stack konstant zu halten und eine Flutung der Elektroden zu verhindern.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die genaue Regelung von Massenstrom, relativer Feuchte, Druck und Temperatur in einem Brennstoffzellensystem ist aufgrund der komplexen thermodynamischen Wechselwirkungen der einzelnen Parameter eine sehr anspruchsvolle Aufgabe während der Systementwicklung.

Dementsprechend erfordert sie die Kenntnis und das Verständnis des genauen Zusammenspiels der einzelnen Betriebsparameter, um ein leistungsstarkes Brennstoffzellensystem für Fahrzeugantriebe zu entwickeln.

Die Komponenten der PEM-Systementwicklung mit dem **Brennstoffzellen-Stack** einschließlich des Stackgehäuses, der CVM und anderer in das Gehäuse integrierter Komponenten, die für die Integration in das Fahrzeug vorgesehen sind, wurden für eine erste Inbetriebnahme und einen grundlegenden Funktionstest auf dem Prüfstand installiert. Ein Bild des integrierten Stacks mit Gehäuse ist in Abbildung 32 zu sehen.

Zur Inbetriebnahme Brennstoffzellendes systems wurden verschiedene Tests nach Test-Protokollen für PFMvordefinierten Brennstoffzellensystemtests von AVL durchgeführt. Dazu gehören HV-Sicherheits-Wasserstoffsicherheitstests tests. und der Inbetriebnahmetest mit Plausibilitäts-prüfungen der Sensoren und Funktionstests der Aktoren. Während des Wasserstoff-Sicherheitstests wird eine Dichtheitsprüfung innerhalb der Anode des Brennstoffzellen-Stacks durchgeführt. Die allererste Versorgung des Brennstoffzellensystems mit Wasserstoff ist in Abbildung 33 dargestellt. Der Zellspannungsentlastungstest



Abbildung 32: Stackgehäuse für die Erstinbetriebnahme



Abbildung 33: Erstmalige Messung der Zellspannungen während der Dichtheitsprüfung an der Anode

zur Überprüfung der Membran auf mögliche Löcher ist in Abbildung 34 zu sehen. Es sind keine frühen Spannungsabfälle der einzelnen Zellen zu erkennen, was beweist, dass es keine signifikanten Löcher in der Membran gibt.

Subsystem-Tests wie das Kühl-Subsystem und das Kathoden-Subsystem wurden bereits vor den ersten Gesamtsystemtests durchgeführt. Beispielsweise wurde der Kompressorbetrieb bei verschiedenen Geschwindigkeiten mit aktiver Verzögerung getestet.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

#### Brennstoffzellensystem-Tests und Kalibrierung:

Ausgehend Basissatz von einem von Kalibrierungsparametern, die aus Systemsimulationen gewonnen wurden, wurden die Parameter unter realen Betriebsbedingungen weiter modifiziert und optimiert. Als Beispiel ist der Anfahrvorgang vor und nach der Optimierung/Modifikation in Abbildung 35 und in Abbildung 36 zu sehen. Es zeigt eine steilere Stromrampe und die Vermeidung von OCV-Perioden während **Systemanlaufs** des (die Spannung bleibt nahe 0,85 V pro Zelle).



Abbildung 34: Ableitungstest von Zellspannungen zur Analyse des Membranzustandes

Ein weiterer wichtiger Entwicklungsschritt ist in Abbildung 38 und 37 zu sehen, die der Anodendruckregelung gewidmet ist. Große Schwankungen des Anodendrucks sind in Abbildung 38 mit etwa 100 mbar zu erkennen, die zu periodischen Verletzungen des zulässigen Differenzdrucks zwischen Anode und Kathode führen. Nach der Optimierung, die eine Vorsteuerung und PID-Abstimmung enthielt, sind die Druckschwankungen deutlich reduziert (Abbildung 37). Dadurch kann der Differenzdruck zwischen Anode und Kathode weiter erhöht werden, um den Stack nahe am optimalen Zellen-Differenzdruck des NM5-Stacks betreiben zu können.

Weitere Systemleistungstests wie IV-Kurve oder dynamische Tests wurden mit dem Brennstoffzellensystemen durchgeführt sowie weitere Optimierungen innerhalb des Fahrzeugs vorgenommen (Kühlsystemleistung, De-rating...), um so das Betriebsverhalten des Systems zu verbessern.



Seite 32 von 42

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Optimierung

#### • WP8 Demonstration & Vehicle Integration

Die Fahrzeugintegration erfolgte in 3 Hauptschritten: i) Umrüstung des VW Passat GTE in ein reines Elektrofahrzeug, ii) Integration des Brennstoffzellensystems und seiner Komponenten und iii) Integration des Wasserstoffspeichersystems.

## Erster Schritt: Umrüstung des VW Passat GTE Plug-in-Hybrid-Elektro-Basisfahrzeugs in ein reines Elektrofahrzeug

Der kosteneffizienteste Ansatz zur Umrüstung des VW Passat PHEV-Basisfahrzeugs in ein reines Elektrofahrzeug bestand darin, die Vorteile der "MQB-Plattform" von VW zu nutzen, indem das bestehende E-Antriebssystem eines VW e-Golf (Modell 2017) in den VW Passat GTE integriert wurde (siehe Abbildung 39). Da beide Fahrzeuge die gleiche Motorraumkonstruktion aufweisen, passt das E-Antriebssystem des e-Golf mit nur geringfügigen Anpassungen (z.B. der Halbwellen) in den VW Passat GTE.



Abbildung 39: Konvertierung des VW Passat GTE von einem PHEV zu einem reinem EV

Der Umbau des Basisfahrzeugs umfasste die folgenden Arbeitsschritte:

- Demontage des PHEV-Antriebsstrangs aus dem Passat-Fahrzeug
- Mechanische, elektrische und hydraulische Integration des e-Golf e-Antriebssystems in den VW Passat GTE

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Integration des Rapid-Prototyping-Fahrzeugsteuergerätes der AVL in den VW Passat GTE
- Entwicklung einer Gateway-Software und Restbussimulation, um die Steuerung und den Betrieb des e-Golf e-Drive innerhalb des VW Passat GTE zu ermöglichen
- Inbetriebnahme und Kalibrierung des E-Antriebs im VW Passat GTE als reiner EV-Antriebsstrang

Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse des Umbaus:



Abbildung 40: VW Passat GTE nach seinem Umbau in ein reines EV

#### Zweiter Schritt: Integration des Brennstoffzellensystems und seiner Komponenten

Nach der Umrüstung auf ein reines E-Fahrzeug war der nächste Schritt die Integration des Brennstoffzellensystems. Die folgenden Schritte wurden dabei durchgeführt:

- Detaillierte Auslegung des Brennstoffzellensystems sowie des Wasserstofftanksystems für die Fahrzeugintegration.
- Beschaffung der erforderlichen Hardware-Komponenten
- Integration des Brennstoffzellensystems:
  - Herstellung und Integration des neu entwickelte
     Brennstoffzellen-Stack-Gehäuse in den VW
     Passat GTE integriert (siehe Abbildung 41)
  - Integration der Schlüsselkomponenten des Brennstoffzellensystems



Abbildung 41: Vorderwagen des Passat GTE mit integrierten Brennstoffzellen-Fahrzeugkomponenten (Stackgehäuse, DC/DC-Wandler, Antriebsstrang-Wechselrichter, Anoden-Wärmetauscher, ...)

in das KEYTECH4EV-Demonstrationsfahrzeug

- o Herstellung der Halterungen für alle Komponenten des Brennstoffzellensystems
- Integration und Anpassung des Fahrzeugkühlsystems an die Anforderungen an das Wärmemanagement des Brennstoffzellensystems

#### Dritter Schritt: Integration des Wasserstoff-Tank-Systems

Nachdem nun das Brennstoffzellensystem und alle seine Komponenten ins Fahrzeug integriert wurden, war der nächste Schritt der Einbau der Wasserstoffspeichertanks. Dabei wurden folgende Arbeiten durchgeführt (siehe Abbildung 42):

- Alle Wasserstoff-Speicherbehälter und die entsprechenden Halterungen wurden hergestellt.
- Die Befestigungspunkte für die Montagehalterung wurden im Fahrzeug installiert.
- Ein mechanischer Integrationstest des Wasserstofftanksystems wurde durchgeführt.
- Das Wasserstoff-Druckregelventil und seine Montagehalterung sind verfügbar; Fahrzeugintegration läuft
- Die Integration des Füllbehälters in das Demonstrationsfahrzeug wurde technisch abgestimmt und vorbereitet
- Verlegung der Wasserstoffversorgungsleitung



Abbildung 42: Fahrzeuganpassungen für den Einbau der Wasserstofftanks

Die bei Magna / WP5 vormontierten und getesteten Tank-Submodule wurden schließlich bei AVL in das Fahrzeug eingebaut. Es mussten nur noch einige wenige Komponenten integriert und separat montiert werden, wie z.B. der Füllbehälter und die Hochdruckleitung. Um die Komponenten des Wasserstoff-Speichersystems vor Bordsteinen oder Steinschlag zu schützen, wurden Schutzabdeckungen (aus Kohlefaser und Aluminium) angebracht.

Um das gesamte System (einschließlich der zusätzlichen Anschlüsse) mit Wasserstoff auf Leckage und Funktionsfähigkeit zu prüfen, wurde das Tanksystem in 2 Schritten unter Druck gesetzt:

 Schritt 1: Zunächst wurde das System mit einer einzigen Hochdruckflasche mit Füllarmatur auf 50 bar gefüllt, ähnlich wie an einer normalen Füllstation. Mit einem Handdetektor wurde das unter Druck stehende System, beginnend vom Füllbehälter bis zur Brennstoffzelle, auf Undichtigkeiten untersucht (siehe Abbildung 43). Der betankte Wasserstoff wurde anschließend auch für erste Funktionstests des Brennstoffzellensystems verwendet.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 43: Erster Schritt der abschließenden Tests am Fahrzeug mit 50 bar Wasserstoff

 Schritt 2: Nun wurde das Wasserstoff-Tanksystem an der Tankstelle des HyCentA auf den maximalen Füllstand bzw. max. Fülldruck gesetzt und mit der gleichen Testprozedur auf Dichtheit geprüft, einschließlich aller Testschritte wie zuvor (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44: Finaler Dichtheitstest at HyCentA

# WP9 Technology Evaluation

#### Task 9.1: Chassis dyno tests

2019 November Im wurden Prüfstandsversuche am internen Prüfstand der AVL durchgeführt. Hauptziel der Tests war die Abstimmung des Hochleistungsbetriebs, da das nicht für Fahrzeug noch den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen war. Es wurden sowohl reguläre Fahrzeug-Prüfstandsversuche ohne



Temperaturkonditionierung als auch Tests in heißer Umgebung durchgeführt und die Betriebsstrategie des Systems entsprechend angepasst. Abbildung 45 zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit, die FCS-Leistung sowie die Umgebungstemperatur während der Prüfstandsversuche. Während der Tests wurde die FCS-Leistung manuell eingestellt, um die stationären Bedingungen schneller zu erreichen und somit die Testdauer zu verkürzen.

Die Tests mit niedriger und mittlerer Belastung (NEFZ, WLTC) wurden auf der Teststrecke in Gratkorn durchgeführt. Diese Tests entsprechen hinsichtlich der Testdauer und der durchschnittlichen Leistung dem NEFZ/WLTC.

#### Task 9.2: Test track tests

Auf der Teststrecke in Gratkorn wurden 2019 über mehrere Monate viele Testfahrten durchgeführt. Die Kalibrierung der Hybridstrategie, die Implementierung verschiedener Fahrmodi und die Fahrbarkeit wurden entwickelt und verbessert. Abbildung 46 verschiedene zeigt zwei Hybridstrategien. Während bei FCS-Strategie 1 die Leistungsanforderung direkt aus der Gaspedalstellung berechnet wird, wird bei Strategie 2 eine bestimmte Grundlast gefordert, die verhindern soll, dass die HV-Batterie mit der Zeit entladen wird. Außerdem wird das Austrocknen des Stacks während des langen Niedriglastbetriebs minimiert. Es stellte sich heraus, dass Strategie die Strategie 2 hinsichtlich des Wasserstoffverbrauchs effizienter ist. Jedoch musste für die Lastanforderung eine Geschwindigkeitsabhängigkeit definiert werden. da die Geräusche während des Niedriglastbetriebs auffällig waren. Die Fahrbarkeit wurde sowohl von AVL-internen Experten als auch von allen Projektpartnern bewertet.



Abbildung 47 zeigt die Zellspannungsbandbreite für beide Strategien. Es ist davon auszugehen, dass

sich eine geringere Zellspannungsbandbreite im Betrieb positiv auf die Lebensdauer auswirkt. Die Testumgebung in Gratkorn erlaubte auch die Untersuchung eines extremen Fahrprofils. Abbildung 48 zeigt einen Fahrzyklus mit hoher Fahrzeugbeschleunigungsund verzögerungsfrequenz. Obwohl die Betriebsstrategie 2 eine Entladung der HV-Batterie verhindern sollte, SOC kann der in dieser Extremsituation nicht aufrechterhalten werden. Hier müssen in Zukunft Kompromisse gefunden werden. So kann z.B. die maximale Leistungsabgabe je nach SOC der Batterie begrenzt werden.



Abbildung 48: Betriebsstrategieoptimierung

#### Task 9.3: Public road tests

Zum Zeitpunkt der Berichterstattung war die Genehmigung für die öffentliche Straßennutzung noch nicht abgeschlossen. Dennoch kann das Fahrzeug im batterieelektrischen Modus auf öffentlichen Straßen betrieben werden.

Die Zertifizierung des Wasserstoffspeichersystems ist abgeschlossen, so dass das Fahrzeug an öffentlichen Stationen betankt werden kann. Abbildung 49 zeigt den des Betankungsvorgang **KEYTECH4EV-**Fahrzeugs an der Wasserstoff-Tankstelle in Graz, Murpark. Diesem Betankungsvorgang gingen einige Befüllvorgänge und Dichtheitsprüfungen im HyCentA voraus. Abbildung 49 zeigt den Druck, die Temperatur (Tank 1) und



Abbildung 49: H<sub>2</sub> Betankung an der öffentlichen Tankstelle im Murpark Graz; Druck, Temperatur und SOC über der Zeit

den Ladezustand (SOC) des Wasserstoffspeichers über die Zeit. Abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Anfangsdruck stoppt die Tankstelle den Befüllvorgang bei einem bestimmten Druckniveau. In diesem Fall wurden 90% SOC ausgehend von 14% nach ca. 3 Minuten Betankungszeit erreicht.

#### Task 9.4: Test data evaluation and validation

Das Brennstoffzellensystem (FCS) wurde auf dem Prüfstand ausgiebig getestet. Ein Standard-Charakterisierungstest ist der UI-Test, bei dem das System von Volllast bis Leerlauf und rückwärts betrieben wird, siehe Abbildung 50, Abbildung 51. Abbildung 52 zeigt das Testergebnis eines UI-Tests. Jeder Lastpunkt wird für eine bestimmte Zeit gehalten, und nach der Stabilisierungszeit werden Mittelwerte der einzelnen Messungen berechnet. Das Ergebnis der Systemnettoleistung und des Systemwirkungsgrades ist in Abbildung 51 zu sehen.



Abbildung 50: UI-Testergebnisse, 30 sec. Durchschnittswerte für Effizienz und Systemleistung



Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Am Prüfstand wurde auch die transiente Ansprechzeit des FCS optimiert. Abbildung 53 zeigt den k Current I und Stack-Strom, den Anoden-Stack Kathodendruck sowie die maximale, mittlere und minimale Zellspannung über der Zeit. Ziel der Kalibrierung war es, niedrige Zellspannungen zu vermeiden und Druckdifferenz 2 750 eine gewisse oltage zwischen Anode und Kathode zu Cell halten. Abbildung 54 zeigt das Kalibrierung. Ergebnis der Ausgehend von 9 kW konnte nach 1,2 s eine Systemnettoleistung von 45,2 kW erreicht werden!



Abbildung 53: FCS dynamische Kalibrierungsergebnisse



## 4.2 Schlussfolgerungen

Betrachtet man die Gegenüberstellung der Projektziele und der erreichten Projektergebnisse (siehe folgende Tabelle) so kann man festhalten, dass alle Projektziele erreicht und sogar übertroffen wurden:

Übergeordnete Ziele	Projektziele	Erreichte KEYTECH4EV Lösungen
Energieeffizienz	<100MJ/100km WTW Energieverbrauch	Basierend auf dem Hybridisierungsansatz von 60% Batterie und 40% Brennstoffzelle für den Antrieb wurde ein WTW-Energieverbrauch von 100MJ/100km erreicht.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Kosten	Kosten des Antriebsstrangs mindestens 15% unter dem FCEV- oder BEV-Ansatz	Basierend auf Annahmen bezüglich der Kosten- und Volumenszenarien für Antriebsstrangelemente hat AVL ein Kostensenkungspotenzial von 15 bis 18% des KEYTECH-Konzepts im Vergleich zu einem Brennstoffzellen-dominierten und einem reinen BEV- Antriebsstrang (jeweils mit einer Reichweite von mindestens 500 km) bestätigt.	
CO <sub>2</sub> Bilanz	Zero CO <sub>2</sub> g/km	Null CO <sub>2</sub> g/km mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	
Fahrzeugreichweite	>500 km	Aufgrund der Verfügbarkeit von H <sub>2</sub> -Tanks im Demonstratorfahrzeug konnten nur ca. 4 kg H <sub>2</sub> gespeichert werden. Bei neu entwickelten Zylindern, die auf dieses spezielle Fahrzeug zugeschnitten sind, können mindestens 5,4 kg H <sub>2</sub> gespeichert werden, was eine Reichweite von mehr als 500 km ermöglicht.	
Fahrbarkeit	ldentisch mit Serienfahrzeugen	it Identisch mit Serienfahrzeugen	
Lebensdauer	Reduzierung der Brennstoffzellen- Degradationsrate um 50% bis 1% pro 1000 Std.	Diese Frage konnte in diesem Projekt auf Grund der Projektlaufzeit nicht eingehend untersucht werden und wird in Folgeprojekten behandelt.	

Zwei weitere Forschungsprojekte HyTruck und FC-IMPACT werden auf den Ergebnissen von KEYTECH4EV aufbauen und dazu dienen, die Wasserstoff- und Brennstoffzelle-Technologien weiter zu entwickeln und so den schnellen Gewinn von Marktanteilen sowie die Führerschaft bei innovativen Wasserstofftechnologien in Österreich zu ermöglichen.

#### 5 Ausblick und Empfehlungen

Mit den erzielten Projektergebnissen und Innovationen für die Brennstoffzellen-Schlüsseltechnologien konnte ein großer Schritt in Richtung Markteinführung und Serientauglichkeit der H2-Brennstoffzellen-Antriebstechnologie gemacht werden. Auch die Teilergebnisse des Projekts wie THDA-Brennstoffzellendiagnose Österreich als attraktiven Standort tragen dazu bei. für Technologieentwicklungen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzelle für die Automobilbranche weiterzuentwickeln, da im Projekt KEYTECH4EV neue Technologien und neues Wissen für die nächste Generation von Wasserstofffahrzeugen prototypisch entwickelt wurde.

Gerade die in diesem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse sowie die Konzentration auf Schlüsseltechnologien für den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb bieten einerseits die Basis für weitere kooperative Forschungsprojekte und andererseits das Potential für industrielle Entwicklungsprojekte für die im Projekt engagierten OEMs.

## 6 Literaturverzeichnis

## 7 Anhang

## 8 Kontaktdaten

ProjektleiterInP. BardoschInstitut/UnternehmenAVL List GmbHKontaktadresseHans-List Platz 1, 8020 Graz, Austria,Tel: +43 – 316 787 0info@avl.comhttps://www.avl.com/home

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen: ElringKlinger AG (Deutschland) Magna Steyr Engineering AG & Co KG HOERBIGER Ventilwerke GmbH & Co KG HyCentA Research GmbH Institut für Mechanik und Mechatronik, Technische Universität Wien Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Technische Universität Graz Institut für Innovative Energie- & Stoffaustauschsysteme