

Schlussbericht

der Konsortialpartner

Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (FKZ: 19I21035A)

Robert Bosch GmbH (FKZ: 19I21035B)

Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH (FKZ: 19I21035C)

MANN+HUMMEL GmbH (FKZ: 19I21035D)

Woco Industrietechnik GmbH (FKZ: 19I21035G)

Zentrum für Brennstoffzellen-Technik ZBT GmbH (FKZ: 19I21035E)

Zollner Elektronik AG (FKZ: 19I21035F)

über das Förderprojekt

FaeBS

Funktionsauslegung und -erprobung eines innovativen Brennstoffzellen-Systems

Laufzeit: 01.11.2021 – 29.02.2024

öffentlich

Autoren:

Dr. Olav Finkenwirth (BMW)

Hilal Farajallah (Bosch)

Vanessa Frettlöh M.Sc. (KIMW-F)

Michael Frank (M+H)

Lukas Gärtner(WOCO)

Marvin Runge M.Sc. (ZBT)

Thomas Eiber (Zollner)

Datum:

13.08.2024

Gefördert vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Die Verantwortung für den
Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt beim Autor.**

Inhaltsübersicht

I	EINLEITUNG	4
1.	Motivation und Ausgangssituation	5
2.	Projektpartner	6
3.	Zusammenarbeit der Partner und Fördermittelgeber	7
II	ZIELE UND METHODISCHES VORGEHEN	9
1.	Technische Ziele	9
2.	Arbeitsplan und methodisches Vorgehen	12
III	BRENNSTOFFZELLEN SYSTEM (AP 1)	14
	Arbeitspaket 1 Gesamtziele für das FCS	14
	Arbeitspaket 1.1 Gestaltung System- und Komponentenkonzept	14
	Arbeitspaket 1.2 Entwicklung, Konstruktion, Beschaffung und Fertigung Prototypen Brennstoffzellensystem für Prüfstandbetrieb	26
	Arbeitspaket 1.3 Nachweis der konzeptkritischen Funktionen im Gesamtsystem am Prüfstand	31
IV	BRENNSTOFFZELLEN STACK (AP 2)	46
	Arbeitspaket 2 Gesamtziel	46
	Arbeitspaket 2.1 Auslegung und Konstruktion eines Brennstoffzellen-Stacks	47
	Arbeitspaket 2.2 Fertigung und Stack-Montage	54
	Arbeitspaket 2.3 Test und Absicherung zur Konzeptbestätigung	57
V	MEMBRANBEFEUCHTER (AP 3)	63
	Fertigung Prototypen	63
	Test und Validierung	70
VI	LUFTKOMPRESSOR (AP 4)	77
VII	ANODEN-SUBSYSTEM (AP 5)	86
	Arbeitspaket 5.1 – Wasserstoff-Druckregelventil	86
	Arbeitspaket 5.2 – Wasserabscheider	95

VIII	H₂-SENSOREN (AP 6)	109
	Arbeitspaket 6.1 – H ₂ -Niederdrucksensoren	109
	Arbeitspaket 6.2 – H ₂ -Konzentrationssensor	113
IX	DC/DC SPANNUNGSWANDLER (AP 7)	117
X	WERKSTOFFQUALIFIKATION (AP 8)	128
	Arbeitspaket 8 Gesamtziele	128
	Arbeitspaket 8.1 – Definition der Qualitätsmerkmale	128
	Arbeitspaket 8.2 – Materialauswahl Ex-situ Charakterisierung	140
	Arbeitspaket 8.3 – MEA-Herstellung und Anforderungsprofil Analytik	149
	Arbeitspaket 8.4 – Einzelzellen und Abgleich zu ex-situ Materialemission	152
	Arbeitspaket 8.5 – In-/Ex-situ Analytik	155
XI	FAZIT UND AUSBLICK	171
	1. Technologiebewertung	171
	2. Zusammenfassung	173
	3. Weiterer Forschungsbedarf	174
	ANHANG	175
	Abbildungsverzeichnis	175
	Tabellenverzeichnis	182

I EINLEITUNG

Die Dekarbonisierungs- und Wasserstoffstrategie der Bundesregierung ermöglicht neben der Elektromobilität auch die Wasserstofftechnologien des PKW-Antriebs zu stärken. Das Bundeswirtschaftsministerium ermöglicht der Automobilindustrie mit der Richtlinie „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ neue innovative Fahrzeugkonzepte zu entwickeln und damit einen schnelleren und größeren Technologiehub sowie eine höhere Wertschöpfung für Deutschland zu erzeugen. Besonders Automobilhersteller für große Premiumfahrzeuge sehen neben der Elektromobilität auch die Wasserstoffantriebstechnik als eine zukunftsweisende Lösung.

Die Herausforderung für die zukünftigen Wasserstofffahrzeuge ist jedoch, die Komponenten des Wasserstoffantriebs kompakt, effizient und kostengünstig in den Bauraum zukünftiger Elektrofahrzeuge zu integrieren und aus Entwicklungs- u. Ressourcen- gründen bestehende E- Antriebskomponenten und Fahrzeugstrukturen zu übernehmen.

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, Prototypen eines leistungsfähigen innovativen Brennstoffzellensystems (BZS) kompakt und bauraumoptimiert aus innovativen neuen Komponenten zu entwickeln und zu erproben. Der Anspruch des Projekts und der Partner ist es, ein robustes kompaktes Antriebskonzept um 30 % volumenreduziert darzustellen, welches eine höhere Effizienz und ein besseres Wärmemanagement als heutige Wasserstoffantriebssysteme aufweist. Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse sollen die Kompetenz- und Entscheidungsgrundlage für mögliche nächste Entwicklungsschritte der Partner bilden bis hin zu einem möglichen Fahrzeugangebot gegen Ende des Jahrzehnts. Die notwendigen Entwicklungsarbeiten erfolgen in einem stabilen Konsortium, das sich aus namhaften und motivierten Unternehmen des Wasserstoffnetzwerks zusammensetzt. Eine Reihe von KMUs unterstützt das Konsortium in direkter Beauftragung.

1. Motivation und Ausgangssituation

Neben batterieelektrischen PKW bieten wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-PKW eine weitere vollkommen emissionsfreie Antriebsalternative für den motorisierten Individualverkehr. In der BMW-Unternehmensstrategie Antriebe der Zukunft ist die Wasserstoff-Brennstoffzellen Technologie eine Erweiterung des Antriebsstrang-Portfolios der E-Mobilität. Aus diesem Grund begrüßt die BMW AG die visionäre deutsche Wasserstoffstrategie, die maßgeblich durch die Bundesministerien für Wirtschaft und Energie sowie für Verkehr und digitale Infrastruktur initiiert wurde.

Die BMW AG beabsichtigt für einen neuen innovativen sowie kostenorientierten Wasserstoff-Antriebsstrang, das erforderliche Brennstoffzellensystem als auch ein neuartiges und hochintegriertes Wasserstoff-Tanksystem zu entwickeln.

Ziel dieses Vorhabens ist die Funktionsauslegung und -erprobung eines innovativen Brennstoffzellen-Systems (FaeBS) für ein elektrifiziertes BMW-Modell der Premiumklasse. Ein weiterer wichtiger Entwicklungsaspekt in dem Vorhaben ist die heute noch nicht vorhandene Industrialisierung. Die Erfolgsaussichten und die Kundenakzeptanz sind derzeit noch sehr unsicher und zudem nicht ausschließlich vom Fahrzeughersteller abhängig. Die technologischen Herausforderungen und Umsetzungshürden im PKW-Bereich sind dabei sowohl interner als auch externer Natur. Interne Herausforderungen sind die Systemintegration, die Entwicklung der Technologiekonzepte, deren Erprobung auf Komponenten-, System- und Fahrzeugebene sowie die zugehörigen Kosten.

Externe Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Marktumsetzung und Marktakzeptanz sind ein funktionierender Lieferantenmarkt und attraktive Rahmenbedingungen für den späteren Endkunden, als auch die europaweit breitflächig verfügbare H₂-Tankstelleninfrastruktur, die H₂-Betankungskosten mit klimaneutralem „grünen“ Wasserstoff. Aus heutiger Sicht sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für eine Umsetzung im Automobilsektor aufgrund der hohen Herstellkosten noch nicht gegeben. Zudem stellen die externen Voraussetzungen sehr hohe Risiken dar. Gleiches gilt für andere Marktteilnehmer wie Infrastrukturanbieter, deren betriebswirtschaftliche Perspektive vom Wasserstoff-Absatz im PKW-Sektor beeinflusst wird.

Mit diesem Projekt FaeBS wollten wir gemeinsam ein Konzept für ein marktfähiges Brennstoffzellen-System entwickeln, um bei Erfolg idealerweise darauf aufbauend weiter gemeinsam den Weg der Industrialisierung zu gehen.

Konkrete Herausforderungen auf dem Weg zur Kundenwertigkeit waren:

- die Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistung und Lebensdauer,
- die kompakte Systemauslegung zur Integration im Fahrzeug sowie
- der Nachweis der Alltagstauglichkeit auch unter anspruchsvollen klimatischen Bedingungen.

2. Projektpartner

In Abbildung 1 sind die am Förderprojekt FaeBS beteiligten Konsortialpartner aufgelistet.

Konsortialführer	
Bayerische Motoren Werke AG 80788 München Kurzform: BMW	
Verbundpartner	
Robert Bosch GmbH 71701 Schwieberdingen Kurzform: Bosch	
Gemeinnützige KIMW Forschungs-GmbH 58507 Lüdenscheid Kurzform: KIMW-F	
MANN+HUMMEL GmbH 71636 Ludwigsburg Kurzform: MANN+HUMMEL	
Woco Industrietechnik GmbH 63628 Bad Soden-Salmünster Kurzform: Woco	
Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH Carl-Benz-Str. 201 47057 Duisburg Kurzform: ZBT	
Zollner Elektronik AG 93499 Zandt Kurzform: Zollner	

Abbildung 1: Beteiligte wissenschaftliche Institutionen und deutsche Unternehmen.

3. Zusammenarbeit der Partner und Fördermittelgeber

Das Vorhaben wird in einem bewährten Verbund aus Automobilhersteller, Komponentenlieferanten und institutioneller Forschung durchgeführt. Die Arbeiten einem umfassenden, interdisziplinären Ansatz, der Spezialisten aller notwendigen Teilarbeitsgebiete zusammenführt um in gemeinsamen Entwicklungs- und Konstruktionsteams koordiniert die entsprechenden Aufgaben zu bearbeiten. Die verschiedenen Arbeitspakete des Projekts sowie die Beiträge der einzelnen Partner sind in nachfolgender Tabelle 1 visualisiert.

Tabelle 1: Zuordnung der beteiligten Firmen und Institute zu den Arbeitspaketen von FaeBS

		Arbeitspakete									
		AP1 Brennstoffzellen-System	AP2 Brennstoffzellen-Stack	AP3 Membranbefeuchter	AP4 Luftkompressor	AP5.1 Wasserstoff-Druckregelventil	AP5.2 Wasserabscheider	AP6.1 Drucksensoren	AP6.2 H ₂ -Konzentrationsensoren	AP7 DC/DC Spannungswandler	AP8 Werkstoffqualifizierung
Partner	BMW (KF)	APL	APL	P	P	P	P	P	P	P	APL
	Bosch				APL	APL		APL	APL		
	KIMW-F										P
	Mann + Hummel			APL							
	Woco						APL				
	ZBT										P
	Zollner									APL	

Abbildung 2 zeigt die Richtungen der Daten-, Informations- und Hardwareflüsse aller Arbeitspakete untereinander und nennt die verantwortlichen AP-Leiter.

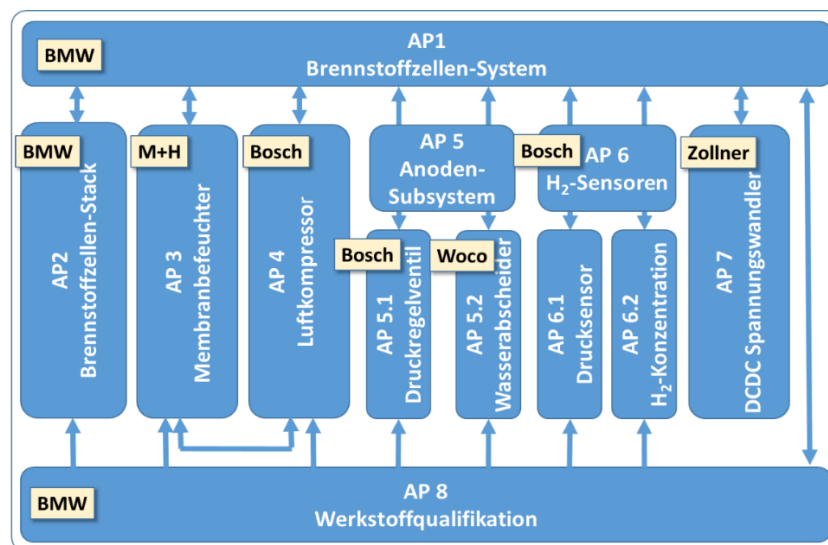


Abbildung 2: Daten-, Informations- und Hardwareflüsse aller Arbeitspakete untereinander.

Es war im besonderen Interesse aller Verbundpartner das Projekt FaeBS mit einer möglichst vollständigen Zielerreichung abzuschließen. Dafür war es notwendig, auf bestimmte Ereignisse, z.B. Verzögerungen oder das absehbare nicht-Erreichen von Zielen, schnell und angemessen zu reagieren und gegenzusteuern. So kam es z.B. ungefähr zur Mitte der Projektlaufzeit zu unvorhergesehenen Verzögerungen bei der Inbetriebnahme der im Rahmen des Projekts entwickelten Brennstoffzellensysteme auf den Prüfständen bei BMW. Um das Projektziel nicht zu gefährden, arbeiteten die Projektpartner einen Aufholplan zur Kompensation der Verzögerungen aus und beantragten beim Projektträger eine 4-monatige Verlängerung der Projektlaufzeit von ursprünglich 24 auf 28 Monate (siehe Abbildung 3)

II ZIELE UND METHODISCHES VORGEHEN

1. Technische Ziele

Grundsätzliche Herausforderungen in der Umsetzung der neuen Technologiegeneration für die Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind insbesondere:

- Die Integration in die gemeinsame BEV-Fahrzeugplattform macht eine deutliche Erhöhung der volumetrischen Leistungsdichte sowie Integration vieler Funktionen in wenige Komponenten und Subsysteme notwendig.
- Die heute für Komponenten des Brennstoffzellensystems verwendeten Polymer Werkstoffe sind zum Großteil noch nicht für die benötigte Dauerhaltbarkeit qualifiziert. Weder sind heute kostengünstige Werkstoffe mit der "Freigabe zum Einsatz in Brennstoffzellenantrieben" verfügbar, noch gibt es Standards zur Erprobung und Freigabe derselben.

Eine hohe Verfügbarkeit des Brennstoffzellensystems bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Hierfür sind nahezu alle Subkomponenten des Systems, als auch die auf dem Steuergerät hinterlegten Softwarefunktionen, um mehrere technische Reifestufen weiterzuentwickeln.

Gesamtziel zusammengefasst:

Gesamtziel des vorliegenden Projektes war es, Prototypen eines leistungsfähigen, kompakten und bauraumoptimierten Brennstoffzellensystems (FCS) für PKW-Antriebe aus technologisch neuartigen Komponenten zu entwickeln, zu integrieren und zu erproben. Der Anspruch des Projekts und der Partner war es, ein robustes Antriebskonzept mit ca. 30 % Volumenreduzierung gegenüber heutigen, vornehmlich asiatischen Wettbewerbsprodukten darzustellen. Die Kompaktheit des Systems und die Restriktionen zukünftiger Automobilarchitekturen bedingten ein besonderes Augenmerk auf das Wärmemanagement. Betriebstemperaturbereiche von -30°C bis $+105^{\circ}\text{C}$ stellten technologisches Neuland dar, das tiefergreifende Forschungen in den Bereichen Material- und Werkstoffentwicklung bedingten sowie umfangreichen Test- und Versuchsbetrieb erforderten. Die für Wasserstoffantriebe typische hohe Effizienz des FCS sollte weiter gesteigert werden, obwohl die geforderte Robustheit und Kompaktheit sowie die teilweise hohen Betriebstemperaturen eigentlich einen gegenteiligen Effekt haben. Die aus dem Projekt FaeBS gewonnenen Erkenntnisse sollen die Kompetenz- und Entscheidungsgrundlage für nächste Produkt- und Technologieentwicklungen der Konsortialpartner und die Grundlage eines möglichen Fahrzeugangebots am Ende des Jahrzehnts bilden.

Um den qualitativen Projektfortschritt objektiv bewerten zu können, wurden in jedem Arbeitspaket Leistungskennzahlen (KPI= Key Performance Indicator) ausgewählt und quantifiziert. Sie ermöglichen die objektive Bewertung des Entwicklungsfortschritts durch messbare Zielgrößen. Wichtige Indikatoren für den Grad der Zielerreichung sind technische Kennwerte die den Zustand eines Systems, einer Baugruppe oder Komponente charakterisieren bzw. genau beschreiben. Für das vorliegende, anwendungsbezogene Projekt FaeBS wurden solche quantitativ fassbaren Kennzahlen, bzw. einen Entwicklungsstand genau beschreibenden Kenngrößen ausgewählt. Für letztere, mehr qualitative Kenngrößen, haben sich die Reifegrade einer Entwicklung in Kombination mit Leistungskennzahlen bewährt. Die Reifegrade (TRL= Technological Readiness Level) und Leistungskennzahlen werden dabei sinnvoll miteinander verknüpft (Tabelle 2). Dieses bewährte Vorgehen kommt auch bei FaeBS zum Tragen.

Tabelle 2: Leistungskennzahlen (KPI) der Arbeitspakete

Lfd. Nr.	KPI	Ist-Wert			Ziel-Wert		
		K-Wert	TRL	TRL	K-Wert	TRL	TRL
KPI 1.1	Virtuelle Integration in zukünftige Fahrzeugfamilien kollisionsfrei umgesetzt	30% Kollisionen – keine bestätigten	2	0% Kollisionen, bestätigte Komponentenmodelle	2	3-4	3-4
KPI 1.2	Spannungsniveau HV Komponenten Brennstoffzellensystem	~400V	3	~850V	3	5	5
KPI 1.3	Systemeffizienz Effizienzpunkt	58%	2	62%	2	5	5
KPI 1.5	Froststart Temperatur / Zeit	-20°C / 60 Sekunden	3	-30°C / 60 Sekunden	3	5	5
KPI 2.1	Steigerung der Volumetrischen Leistungsdichte Stack um 30%	4.2 kW/L	4	5.5 kW/L	4	6	6
KPI 2.3	Betriebstemperatur am Kühlmittelausgang	95 °C	6	105 °C	6	6	6
KPI 2.4	Beschleunigungslasten Verspann-Einheit	300 m/s ²	4	500 m/s ²	4	6	6
KPI 3.1	Wasserübertragungsraten bei 95 °C und 105 °C in g/s pro dm ³	0,5 g/s/dm ³ (Hohlfaser)	4	1 g/s/dm ³ (Flachmembran)	4	6	6
KPI 3.2	Druckverlust Befeuchter dry/wet bei Nennvolumenstrom [hPa]	70/120	6	<50/<100	6	6	6
KPI 3.3	Degradation bei thermischer Wechselbeanspruchung	20 % (1500 h)	4	10 % (1500 h)	4	6	6
KPI 4.1	Dauerlauf inkl. Lebensdauer und start/stopp	2000h 250.000 Start/Stopp*)	5	6000h 500.000 Start/Stopp**)	5	6	6
KPI 4.4	Beschleunigungszeit T90		4	0,8 s	4	6	6
KPI 4.5	Thermisch: Vollast bei max. Kühlmittel Temperatur	Leistungsreduktion	4	1h	4	bestanden	bestanden
KPI 5.1.1	Funktionalität passives Druckregelventil-Rezirkulationsmodul über den gesamten Betriebsbereich inkl. Froststart	teilw. erfüllt	4	erfüllt	4	5	5
KPI 5.1.3	Absicherung Temperaturerhöhung auf 85°C (Peak 105°C)	65°C / 85°C	3	85°C / 105°C	3	5	5
KPI 5.2.1	Wasserstoffverluste über Purge Vorgang	3 – 4 %	3	1 – 2 %	3	6	6
KPI 5.2.2	Druckverlust	35 hPa	4	20 hPa	4	6	6
KPI 5.2.3	Verfügbarkeit Purge-Ventil bei Froststart	25 s	3	0 s (unmittelbar)	3	6	6
KPI 6.1.2	Medientemperatur LPS	- 25°C bis 90°C	4	- 40°C bis 105°C	4	6	6
KPI 6.2.1	Medientemperatur HYS-ex	- 25°C bis 90°C	4	- 40°C bis 105°C	4	6	6
KPI 6.2.3	Genauigkeit Sensor (Stack)	± 1 Vol.-% H2	4	± 0,2 Vol.-% H2	4	6	6
KPI 7.1	Stromdichte	20 A / L	4	40 A / L	4	6	6
KPI 7.2	Volumetrische Leistungsdichte	5 kW / L	4	6 kW / L	4	6	6
KPI 7.4	Spannungsspreizung Eingang / Ausgang	2-3	4	5-6	4	6	6
KPI 8.1	Quantifizierung der Emissionsgrenzwerte für 7 organische, 5 Kationen und 3 Anionen Verunreinigungen	0	2	15	2	5	5
KPI 8.3	Entwicklung einer schnellen in-situ / ex-situ-Methode für die Materialauswahl	1000/2000 h	3	50/500 h	3	5	5

(*Absicherung im FaeBS Projekt, **Serienentwicklungsziel. Erste Indikation mit Blick auf Zielwerte im Projekt erwartet)

2. Arbeitsplan und methodisches Vorgehen

Im Projekt FaeBS wurde ein mehrstufiger Ansatz zur Bearbeitung der Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte verfolgt:

- Ableiten quantitativer Anforderungen an ein zukünftiges FCS aus den zuvor beschriebenen Randbedingungen. Herunterbrechen und Aufteilen dieser Anforderungen an die Subsysteme und Komponenten des FCSs.
- Definition der sich daraus ergebenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und Weiterleitung an die Projektpartner.
- Konzeptionsarbeit und Funktionsoptimierung der für die Zielerreichung wesentlichen Komponenten des FCSs auf Basis zuvor genannter Anforderungen.
- Fertigung der Komponenten sowie Test und Evaluierung gegen die Anforderungen.
- Integration von Komponenten zu kompakten Subsystemen wie z.B. von Luftkompressor/-turbine und Leistungsregler oder den Bauteilen des Wasserstoff-Rezirkulationssystems. Wenn möglich werden Tests auch auf Komponenten- und Subsystem-Level durchgeführt.
- Zusammenführen aller Komponenten und Subsysteme zu einem Prototypen-Gesamtsystem. Dabei wird auf gute Zugänglichkeit für Messgeräte und den schnellen Austausch von Komponenten-Varianten geachtet.
- Test und Optimierung des Komponenten- und System-Designs und des Zusammenspiels aller Funktionen unter den für die Zielgrößen relevanten Randbedingungen wie z.B. hohe Dauerleistung und Betriebstemperaturen als auch Umgebungstemperaturen bis zu -30 °C.

Zwischen den Konsortialpartnern wird ein alle Arbeitspakete umspannender Zeitplan vereinbart. „Taktgeber“ dieses Zeitplans sind die Erfordernisse des Arbeitspakets 1 „Brennstoffzellen-System“, da aus den Anforderungen an das FCS die Anforderungen an die Komponentenentwicklung in den AP 2...7, als auch an die zu verwendenden Werkstoffe für das AP 8 ausgeleitet werden. Ferner sammelt das System die entwickelten Komponenten und Steuergeräte-Funktionen zu einem definierten Synchronisationspunkt, integriert sie zu einem funktionalen Ganzen und testet sie im Systemverbund. Die einzelnen Arbeitspakete haben für sich zwar eigenständige Zeitpläne. Sie werden aber projektübergreifend an 6 zentralen Meilensteinen in den Monaten M1, M6, M8, M12, M20 und M23 synchronisiert.

III BRENNSTOFFZELLEN SYSTEM (AP 1)

AP Leiter: Bayerische Motoren Werke AG

Arbeitspaket 1 Gesamtziele für das FCS

- Integration des FCS in einen, um bis zu 30 % gegenüber dem Vorgänger-System, reduzierten Bauraum. Die angestrebte Kompaktheit der Zielkonfiguration wird virtuell sowie, wo möglich, auf Komponentenebene nachgewiesen.
- Effizientes Wärmemanagement für sehr hohe Leistungsdichten bis 0,8 kW/L und sehr niedrige Umgebungstemperaturen mit Froststarts ab -35 °C.
- Anpassung der Ein- und Ausgangs-Spannung aller Leistungs-Schnittstellen bis 850 V an zukünftige E-Antriebe.
- Erhöhung der Effizienz auf bis zu 62 % in Kunden-relevanten Fahrzyklen.

Im Rahmen der Arbeitspakete AP 2 bis 7 werden die wesentlichen Komponenten für das FCS entsprechend der hier erarbeiteten Anforderungen spezifiziert, auf Komponentenebene getestet und anschließend zu einem Prototypen-Gesamtsystem assembliert. Im Gesamtsystem werden dann die erforderlichen Konzeptnachweise erbracht, die die Grundlage für eine mögliche anschließende Serienentwicklung darstellen.

Arbeitspaket 1.1 Gestaltung System- und Komponentenkonzept

Ausgehend von den Anforderungen des Fahrzeug- und Antriebskonzepts wurde zunächst ein umfassendes Anforderungsset für das Brennstoffzellensystem erarbeitet. Das System „FCS“ (Fuel Cell System) besteht aus mehreren Komponenten, die im Zusammenspiel die gewünschte Funktionalität in Bezug auf die Leistungsabgabe, Wirkungsgrad und Robustheit aufweisen. In diesem Zusammenhang wird auch der „Stack“ als eine von mehreren Komponenten betrachtet, wenngleich dies die Kernkomponente darstellt. Die Peripheriekomponenten, auch BoP-Komponenten genannt (Balance of Plant), versorgen den Stack mit den erforderlichen Medien Wasserstoff, Luft und Kühlmittel und ermöglichen eine optimale Regelung und Diagnose in allen prognostizierten Betriebszuständen. Die Definition von erforderlichen Betriebszuständen / Betriebspunkten des Fahrzeugs ist wesentlich für die Ableitung eines Anforderungssets für das FCS. Im Folgenden sind fünf mögliche Betriebsweisen eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs (FCEV) aufgelistet, die für die Auslegung und Konzeptionierung eines Brennstoffzellensystems maßgeblich sind:

- Idle bzw. Standby-Betrieb: Betrieb des Brennstoffzellensystems bei Minimalleistung bzw. ohne Netto-Leistungsabgabe, jedoch bereit, jederzeit Leistung abzugeben.

- Niederlast-Betrieb: Der Fokus liegt hier auf dem effizienten Betrieb z.B. im Stadtverkehr. Im Leistungsbereich von 12-20 kW netto-Leistung liegt die durchschnittlich benötigte Leistung im Stadtverkehr sowie im Stop- and Go Betrieb. Dieser Betriebszustand ist ein sehr häufig vorkommender Betriebsfall, und muss somit sehr gut bzgl. Verbrauch und Lebensdauer beherrscht werden.
- Hochlast-Betrieb: (z.B. Autobahnfahrt) mit Fokus auf Darstellbarkeit, Effizienz und Leistung. Ziel bei einer Fahrzeug-Auslegung ist, dass die benötigte Dauerleistung durch das Brennstoffzellensystem „zeitinvariant“ bereitgestellt werden kann. Somit ist die benötigte Maximalleistung für eine Fahrt bei Höchstgeschwindigkeit, maßgeblich für die Auslegung der Kühlung sowie der notwendigen Antriebsleistung, die vom Brennstoffzellensystem dauerhaft verfügbar sein muss.
- Bergfahrt mit Anhänger: Hochtemperatur & Hochlast (z.B. Urlaubs-Fahrt mit Wohnanhänger sowie voll beladenem FCEV über Brennerpass im Hochsommer). Dieser Auslegungsfall ist sehr relevant als Betriebspunkt in der oberen Teillast des Brennstoffzellensystems bei höchstmöglicher Betriebstemperatur. Die hohe Temperatur ergibt sich aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs mit Anhänger, und damit einhergehend eingeschränkter Kühlleistung, bei gleichzeitig hohem Leistungsbedarf des Antriebs. Dies ist einer der anspruchsvollsten Betriebszustände eines Brennstoffzellenfahrzeugs.
- Fahrt in größeren Höhen: Höhenprofile bei Hochtemperatur & Hochlast (z.B. Autobahnfahrt USA I-70 Eisenhower-Tunnel auf 3.401 m über Meereshöhe) sind aufgrund des niedrigen Umgebungsdrucks herausfordernd, da die Förderfähigkeit des Kompressors an Grenzen stößt bzw. aufgrund gegebener Betriebsgrenzen des Kompressors die verfügbare Leistung des Brennstoffzellensystems eingeschränkt wird.

Tabelle 3: Kernanforderungen Brennstoffzellensystem

FCS Nettoleistung	130 kW elektrische Leistung	
Maximale Kühlmittel-Austrittstemperatur	105°C	KPI 2.3
Fahrzeug-Kühlleistung	>160 kW	
Leistung in Höhe	1500m amsl min 125 kW P_{FCSnet}	
Systemeffizienz Effizienzpunkt	62 %	KPI 1.3
Systemeffizienz Volllast	45 %	KPI 1.4

Ausgehend vom Grundkonzept eines Brennstoffzellensystems mit einer Wasserstoffversorgung bzw. Rezirkulation, einer Luftversorgung mit Befeuchtung und einem Kühlkreis, sowie einem DC/DC-Wandler und Steuergeräte nebst Sensoren, ergeben sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten für die Auslegung und die geometrische Anordnung zueinander. Alle Komponenten beeinflussen sich gegenseitig und wechselwirken miteinander auch bezüglich der geometrischen Integration, die genauso funktionale Auswirkungen hat. Das betrifft z.B. Druckverluste, Totvolumen, Wassersenken, bis hin zur Mediengleichverteilung durch eine ideale Anströmung der aktiven Komponenten. Es wurden daher verschiedene Systemkonfigurationen und -varianten unter Annahme unterschiedlicher Komponentenkonzepte und -Verschaltungen entwickelt, die anschließend in übergreifenden Systemsimulationen bzgl. der Umsetzbarkeit der erforderlichen Betriebspunkte miteinander verglichen und bewertet wurden. Neben den Komponentenvarianten selbst ist eine Vielzahl an Verschaltungen sowie Integrationsvarianten der Komponenten zueinander möglich.

Neben den funktionalen Fragestellungen muss die geometrische Umsetzbarkeit der System- und Komponenten Varianten gegeben sein. Daher ist eine parallele Betrachtung auf geometrischer sowie funktionaler Ebene essenziell. Darüber hinaus muss die Wirtschaftlichkeit einzelner Komponenten- und Systemkonzepte ebenfalls betrachtet und bewertet werden.

In Tabelle 4 sind einige Komponenten-Varianten des H₂-Systems und Luftsystems beispielhaft aufgeführt. Die Rezirkulation im H₂-System kann z.B. aktiv oder passiv ausgeführt werden und für die Wasserabscheidung können ebenso verschiedene Wirkprinzipien ausgewählt werden. Das Luftsystem mit oder ohne Befeuchtung ausgeführt und der Kompressor mit verschiedenen Turbinenvarianten ausgelegt werden.

Am Ende des Bewertungszyklus ist das Ziel ein System zusammenzustellen, dass alle Fahrzeuganforderungen erfüllt und möglichst effizient betrieben werden kann. Zusammen mit dem Kostenziel handelt es sich also um eine Anforderungs-Spinne, deren Optimum iterativ angenähert werden kann.

Tabelle 4: Beispielhafte Komponentenvarianten eines Brennstoffzellensystems

	Rezirkulation	Aktiv		Passiv (Saugstrahlpumpe)	
		Hochvolt	12V / 24V / 48V	1 / 2 fixe Düse	1 / 2 Variable Düsengeometrie
H2 System	Wasserabscheidung	Aktiv	passiv		
			Zyklonabscheider	Plattenabscheider	Labyrinth Abscheider
Luftsystem	Befeuchtung	KEINE	Flachmembran Befeuchter	Hohlfaser Befeuchter	Wassereinspritzung zur Befeuchtung und Ladeluftkühlung
	Kompressor	ZWEISTUFIG	EINSTUFIG		
	Turbine	n/r	KEINE	Fixe Geometrie	Variable Turbinen Geometrie

Um die in der Tabelle 4 beschriebenen Systemvarianten schnell und effektiv in unterschiedlichen Betriebssituationen bewerten zu können, kam eine stationäre Systemsimulation zum Einsatz. In der Systemsimulation sind die einzelnen Komponenten des Brennstoffzellensystems durch eigene kalibrierte und validierte Komponentenmodelle abgebildet. In frühen Entwicklungsphasen können die Modelle nicht über Versuche validiert werden. Somit ist zur korrekten Abbildung der einzelnen Komponenten in der Systemsimulation die Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern bzw. Experten zu den jeweiligen Komponenten essenziell, da noch keine neuen Komponenten für Prüfstandsversuche zur Verfügung stehen. Im Simulationsmodell werden die unterschiedlichen Verschaltungsmöglichkeiten des Brennstoffzellensystems repräsentiert und bewertet. In Abbildung 4 und Abbildung 5 symbolisieren die einzelnen Kästchen im Schaubild jeweils eine Komponente und deren physikalische Eigenschaften. Für die Gesamt-Systemsimulation werden die Komponenten-Modelle entsprechend den Abbildungen miteinander verknüpft und zu einem Gesamt-System-Modell zusammengesetzt.

Als Beispiel für die Bewertung einer Komponenten-Variante sei eine Konzeptentscheidung im Luftsystem des Brennstoffzellensystems genannt.

Im iX5 Hydrogen ist ein Kompressor mit Turbine mit variabler Turbinengeometrie (VTG) verbaut. Über diese variable Turbinengeometrie kann für jeden Betriebspunkt der optimale Gegendruck eingestellt und gleichzeitig jederzeit die größtmögliche Leistung durch Entspannen der Abluft regeneriert werden. Es bieten sich damit viele Möglichkeiten der Applikation und Optimierung des Brennstoffzellensystems.

Nachteilig ist der zusätzliche Platzbedarf, das zusätzliche Gewicht, die anfälligeren Mechanik, die Gefahr des Einfrierens sowie der Kostenaufwand des VTG-Konzepts.

Es wurde daher untersucht, ob auf die variable Turbinengeometrie verzichtet werden, und stattdessen eine fixe Turbinengeometrie verwendet werden kann. Hier war wichtig, dass es zu keiner Einschränkung des Betriebes des Brennstoffzellensystems

kommt. Eine fixe Turbinengeometrie ohne Wastegate führt zu einer fixen Gegendruck-Kennlinie. Die Druckregelung des Brennstoffzellensystems verliert wesentliche Freiheitsgrade. Somit kommt der Turbinenauslegung in Verbindung mit den Bedarfen und Einschalten des Brennstoffzellenstapels eine wesentliche Bedeutung zu. Es muss in der Turbinenauslegung ein guter Kompromiss gefunden werden, bei dem alle Betriebspunkte ohne Einschränkungen darstellbar sind. Zunächst stand noch im Raum, ein Waste-Gate (Turbinen-Bypass) vorzusehen. Dadurch wäre es möglich gewesen, den sich aus der Turbinenkennlinie ergebenden Gegendruck, durch einen Bypass der Turbine zu reduzieren. Dies war laut der spezifischen Simulationsergebnisse jedoch nicht erforderlich. Somit konnte das Brennstoffzellensystem kompakter, einfacher, robuster und kostengünstiger gestaltet werden.

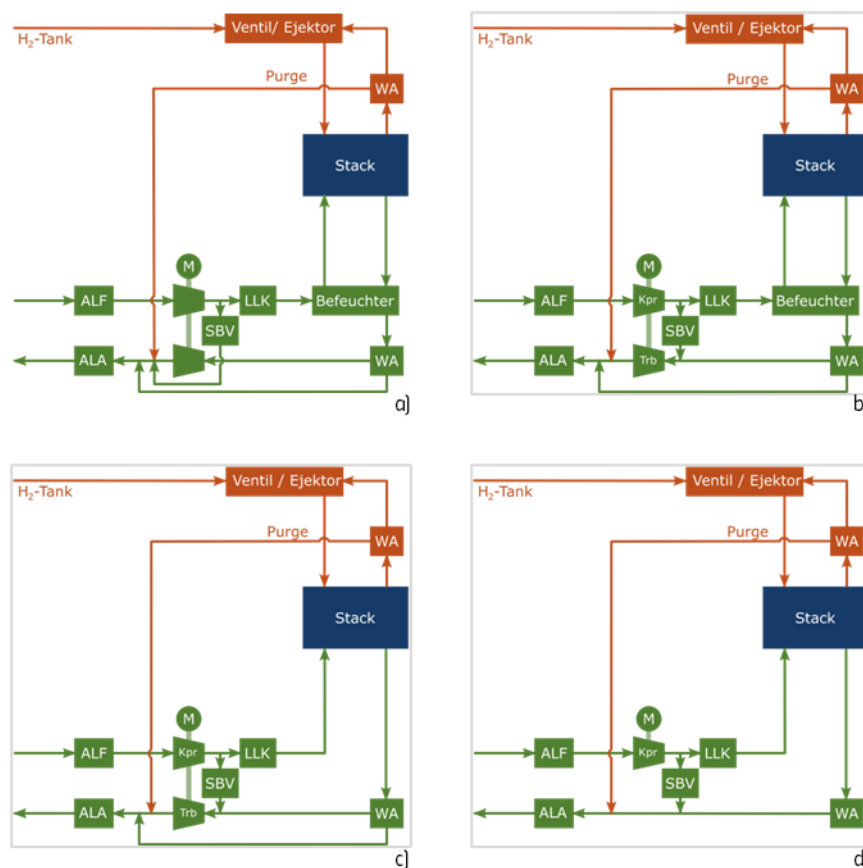


Abbildung 4: Systemkonzept und Komponentenvarianten im Luftsystem (grün).

Abbildung 4 zeigt vier Varianten des Luftsystems (grün) mit unterschiedlicher Verschaltung sowie unterschiedlichen Komponenten-Konzepten, die betrachtet und bewertet wurden. In Variante b wird der Stack-Bypass vor die Turbine geführt. Im Gegensatz dazu wird in Variante a der Stack-Bypass nach der Turbine in die Abflut-Anlage (ALA) geführt.

Der Vorteil von Variante a gegenüber Variante b ist, dass konstantere Gegendruckverhältnisse herrschen, und somit eine modellbasierte Abschätzung des Massenstroms für den Stack-Bypass einfacher und besser umsetzbar ist. Der Stack-Bypass findet unter Anderem Verwendung, wenn Betriebspunkte mit hohem Druck und geringen Luftmassenstrom gewählt werden müssen, die außerhalb des Kompressor-Kennfelds liegen. Hier wird ein für einen Turbokompressor darstellbarer Betriebspunkt eingestellt, der jedoch mehr Luft bedingt als für den Stack benötigt. Die überschüssige Luft wird über den Stack-Bypass am Stack vorbeigeführt.

Bei Variante b ist vorteilhaft, dass diese überschüssige Luft vor der Turbine eingeleitet, und somit Leistung in der Turbine rückgewonnen wird und der Betriebspunkt dadurch effizienter dargestellt werden kann.

In Variante c wurde ein System ohne Befeuchtung betrachtet. Hier sind insbesondere die Betriebspunkte hoher Last und hoher Temperatur herausfordernd für die Brennstoffzellen.

Variante d stellt ein noch weiter vereinfachtes Brennstoffzellensystem ohne Turbine und ohne Befeuchtung dar.

Sollten solche Konzepte wie in Variante c und d zielführend sein, sind diese klar zu bevorzugen, da das Brennstoffzellensystem dadurch deutlich kompakter, einfacher, robuster und kostengünstiger gestaltet werden könnte.

Das final gewählte Systemkonzept ist ähnlich zur Variante a, wobei Variante b optional ebenso vorgehalten wurde, um die Eigenschaften gegenüber Variante a auch im Systemversuch zu vergleichen.

Die Systemsimulationen ergaben, dass sowohl eine Turbine als auch eine Befeuchtung zur Zielerreichung notwendig ist. Somit wurden die Varianten c und d ausgeschlossen. Ausschlaggebend hierfür waren erwartungsgemäß die auslegungsrelevanten Betriebszustände „Bergfahrten mit Anhänger“ und „Hochgeschwindigkeitsbetrieb“.

Insbesondere bei der Bergfahrt mit Anhänger ist das Brennstoffzellensystem gefordert, höchstmögliche Leistungen stabil dazustellen bei begrenzter Kühlleistung des Fahrzeugs aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit mit Anhänger. Um bei diesem Betriebsfall benötigte Leistung und damit entstehende Abwärme über das Kühlsystem an die Umgebung abgeben zu können, wird eine möglichst hohe Betriebstemperatur des Brennstoffzellensystems benötigt. Da bei solch hohen Betriebstemperaturen die Brennstoffzellenmembran austrocknen und damit beschädigt würde, muss mit einem Befeuchter die Zuluft befeuchtet und ein Austrocknen verhindert werden. Auch eine Turbine ist in diesem Betriebsfall sehr zuträglich, da diese die erforderliche Stack-Leistung um den rückgewonnenen Leistungsanteil reduziert.

Die Hauptaufgabe des Wasserstoff-Subsystems in einem Brennstoffzellensystem besteht darin, den Brennstoffzellen-Stack mit ausreichend Wasserstoff zu versorgen. Dabei sind die relevanten Parameter der Stack Eingangsdruck, die Wasserstoffkonzentration und die Stöchiometrie bzw. die Rezirkulations-Rate. Die Hauptkomponenten des Wasserstoff-Subsystems in einem Brennstoffzellensystem sind ein Wasserabscheider mit Wasserspeicher und Spül-Ablassventilen sowie eine aktive oder passive Pumpe und Wasserstoff-Injektoren, um den Umwälz- und Anreicherungsprozess durchzuführen. Diese Komponenten sind entscheidend für die Versorgung des Brennstoffzellen-Stapels mit ausreichend Wasserstoff und die Aufrechterhaltung eines optimalen Betriebs.

In der optimalen Konzeptfindung sowie Anforderungsdefinition des Wasserstoff-Subsystems und seiner Komponenten liegt der Schlüssel und die Grundlage für die Systemeffizienz und Lebensdauer des Brennstoffzellensystems. Komplexe Zielkonflikte müssen in Übereinstimmung gebracht und gegeneinander abgewogen werden.

Bei der optimalen Regel- und Betriebsstrategie des Brennstoffzellensystems besteht ein Zielkonflikt darin, eine optimale Effizienz zu erreichen und gleichzeitig eine Unterversorgung mit Wasserstoff zu vermeiden. Eine Unterversorgung der Brennstoffzellen schädigt diese, was zu einer deutlich verringerten Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stacks führt.

Für die Komponenten des Wasserstoff-Subsystems (AP 5) stellte sich die Spreizung der Betriebspunkte von geringer Leistung bis Volllast als besondere Herausforderung dar.

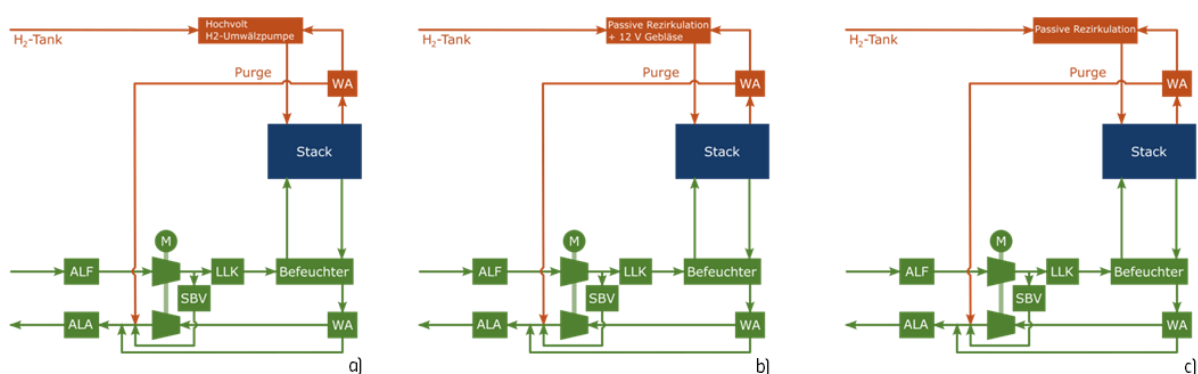


Abbildung 5: Systemkonzept und Komponentenvarianten im Wasserstoffsystem (orange) mit unterschiedlichen Komponenten-Konzepten des Rezirkulationssystems mit a) Hochvolt H₂-Umwälzpumpe, b) passiver Rezirkulation und 12 V Gebläse, sowie c) rein passiver Rezirkulation.

In Abbildung 5 sind drei Varianten des Wasserstoffsystems (orange) mit unterschiedlichen Komponenten-Konzepten des Rezirkulationssystems schematisch dargestellt, die betrachtet und bewertet wurden.

Bei passiven Systemen wird die im komprimierten Wasserstoff steckende Energie verwendet, um über eine Saugstrahlpumpe mit dem für den Betrieb der Brennstoffzelle erforderlichen frischen Wasserstoff den Umwälzvorgang auf der Wasserstoffseite durchzuführen. Der Vorteil ist klar, dass keine aktive elektrische Pumpe zusätzliche Verlustleistung einbringt. Herausfordernd sind Betriebszustände geringer Leistung, da hier kein hoher Wasserstoffverbrauch vorliegt. Im AP5 wird vom Konsortialpartner Bosch ausführlich beschrieben, wie eine Saugstrahlpumpe für den breiten Betriebsbereich von geringer Durchströmung bis Volllast ausgelegt und entwickelt worden ist.

Seitens BMW wurde gemeinsam mit dem Konsortialpartner Bosch ein passives System getestet, welches den gesamten erforderlichen Betriebsbereich abdeckt.

Aus den untersuchten Systemvarianten wurde ein Zielkonzept ausgewählt, das in Abbildung 6 dargestellt ist. Die verbleibenden Konzeptvarianten werden nun durch weiterführende Versuche auf System- und Komponentenebene sowie detaillierte Simulationen weiter analysiert und einer finalen Entscheidung zugeführt.

Basierend auf dem ausgewählten Zielkonzept wurden die spezifischen Anforderungen an die einzelnen Brennstoffzellen-Komponenten abgeleitet und an die Projektpartner übermittelt. Diese Komponentenanforderungen dienen als Grundlage für die Auslegung und Entwicklung der Systemkomponenten in den Arbeitspaketen AP 2-7.

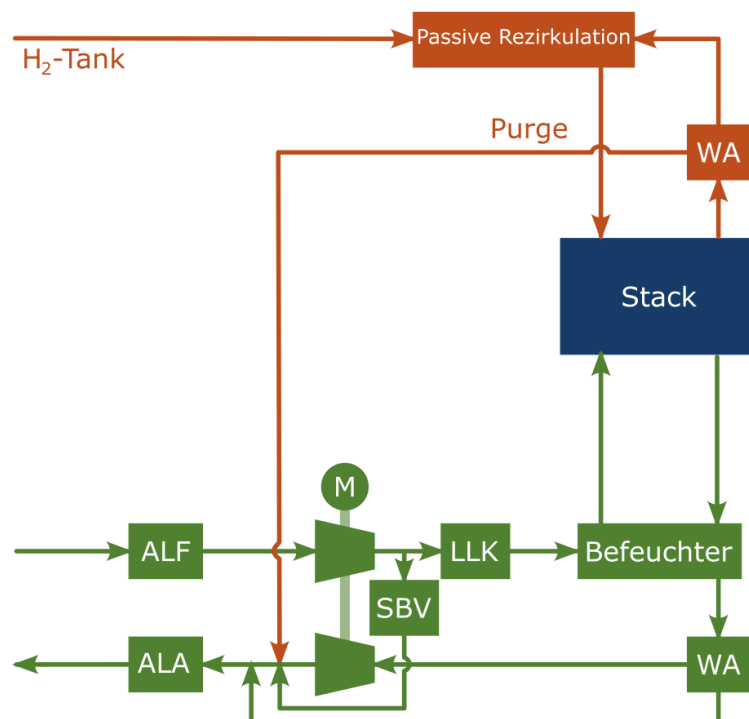


Abbildung 6: Systemschaltbild des gewählten Zielkonzepts mit rein passiver Rezirkulation.

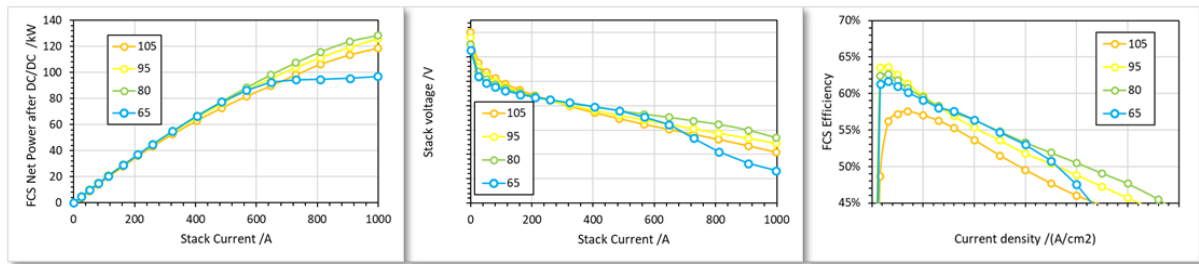


Abbildung 7: Kennfelder aus Systemsimulation unter Berücksichtigung aller FCS-Komponenten.

Unter Berücksichtigung der Leistungs- und Effizienz-Ziele sowie prognostizierter Komponenteneigenschaften, wurden mit Hilfe des repräsentativen Brennstoffzellen-Simulationsmodells Betriebs-Kennfelder erstellt, die als Referenz für den folgenden Systembetrieb verwendet werden.

Beispielhaft für auslegungsrelevante Komponentenanforderungen, abgeleitet aus der Systemsimulation sind in Tabelle 5 Kennzahlen für den Kompressor und die Turbine für den Lastfall 1 (LF1) bei $P_{\max}$ aufgelistet.

Tabelle 5: Auslegungs-Lastfall 1 für das Design von Kompressor und Turbine sowie zur Auslegung von Kompressor-Motor und -Inverter

		LF1
Compressor		
AirCmpr Airflow In (w/o Bearing Flow!)	g/s	125,8
Stack Cathode Dry Airflow In	g/s	124,0
Mass Flow Crtd (100 kPa, 25°C)	g/s	141,4
Air Compressor Pressure In	kPa	91,2
Air Compressor Temperature In	°C	40,0
Cmpr Pressure Ratio	-	2,87
Turbine		
Turbine Dry Airflow In	g/s	103,4
Turbine Water Flow In (vapor phase)	g/s	11,2
Turbine Relative Humidity In	-	0,53
Mass Flow Crtd (100 kPa, 25°C)	g/s	75,4
Turbine Temperature In	°C	80,4
Turbine Pressure In	kPa	171,5
Expansion Ratio	-	1,67
Efficiency Requirement		
Inverter DC In Power	kW	21,57

Im Bericht zu AP 4 wird beschrieben, wie aus den einzelnen Auslegungs-Lastfällen gemeinsam mit dem Konsortialpartner Bosch die Komponente ausgelegt wurde.

Virtuelle geometrische Integration des Brennstoffzellensystems in ein Fahrzeug

Auf Basis des ausgearbeiteten Hauptkonzepts des Brennstoffzellensystems wurde ein Brennstoffzellensystem mit allen Unterkomponenten konstruiert, welches in ein mögliches Zielfahrzeug unter den erforderlichen Randbedingungen integrierbar ist.

Die wichtigste Zielsetzung war, dass neben dem Brennstoffzellensystem der E-Motor zur Berücksichtigung eines Allrad-Antriebs im Motorraum Platz findet. Dies ist eine große Herausforderung und wesentliche Weiterentwicklung gegenüber dem BMW iX5 Hydrogen als Stand der Technik-Referenz (vergleiche Abbildung 8**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

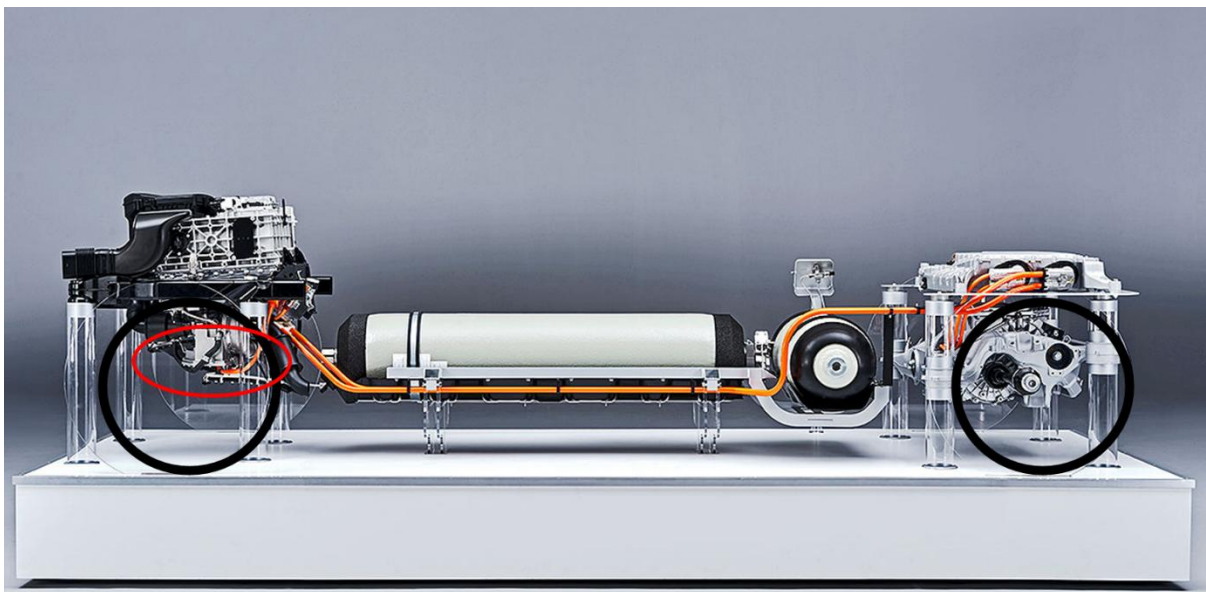


Abbildung 8: Antriebsstrang des aktuellen BMW iX5 Hydrogen mit Hinterradantrieb. Der rot markierte Bereich wird nun für einen E-Motor benötigt.

Um die Integrierbarkeit des Brennstoffzellensystems in künftigen PKW's sicher zu stellen, wurde in enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern ausgearbeitet, wie die Komponenten unter Berücksichtigung der benötigten Eigenschaften und Anforderungen gestaltet werden können, sodass sie die geometrischen Randbedingungen erfüllen.

Neben den im FaeBS-Projekt behandelten Komponenten wurden auch außerhalb des FaeBS-Projekts gemeinsam mit den Konsortialpartnern weitere essenzielle Komponenten betrachtet und konzipiert, ohne die eine vollständige Bewertung nicht möglich gewesen wäre. In Abbildung 9 sind die wesentlichen Komponenten des ögP sowie beispielhaft zwei weitere Komponenten, wie Luftfilter und Steuergerät, die für eine vollständige Betrachtung im Konsortium abgeschätzt und erarbeitet wurden, abgebildet.

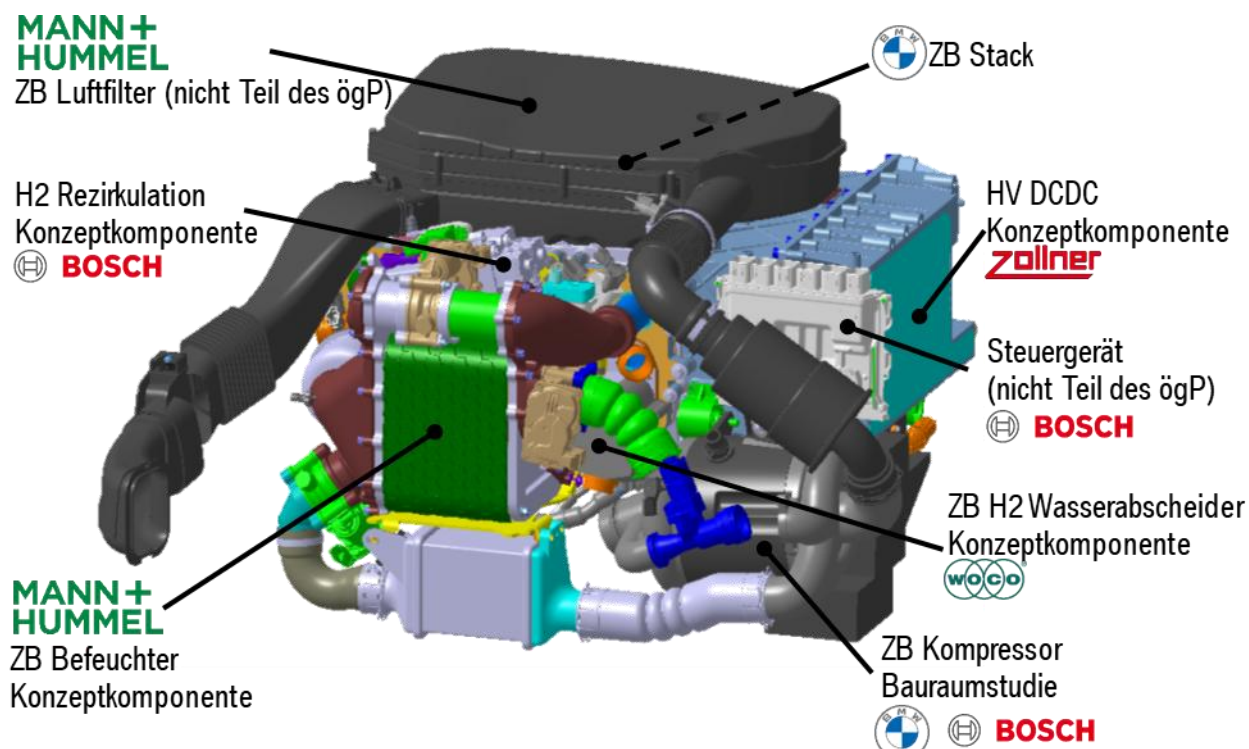


Abbildung 9: Virtueller Nachweis Konformität Fahrzeug-Package im Konsortium über den Umfang des FaeBS Projektes hinaus. Konstruktionsstand 05.09.2022

Eine Integration des Gesamtumfangs in den vorgegebenen Bauraum eines virtuellen Fahrzeugs ist gelungen. Der Konstruktionsstand wurde anschließend zur virtuellen Bewertung der Crash-Eigenschaften des Fahrzeugs vernetzt und mit diesem Modell Crash-Simulationen durchgeführt.

Im Rahmen einer Fahrzeug- und Systemgestaltung ist es essenziell, dass von Beginn an die passive Sicherheit des Fahrzeugs, also auch die Crash-Eigenschaften berücksichtigt werden. Dazu werden frühzeitig Simulationen sowie Expertenabschätzungen konstruktionsbegleitend durchgeführt. Ein Aspekt ist beispielsweise die maximal zulässige Beschleunigung, die in einem Crash-Fall bei Insassen auftreten darf. Diese Anforderung führt dazu, dass im Fahrzeug ausreichend Deformationsstrecke („Knautschzone“) vorhanden sein muss. Dafür dürfen die Bauteile nicht zu viel dieser Deformationsstrecke durch massive Strukturen für den die Deformation verblocken.

Das Maß, worauf geachtet wird, ist die freie Crash-Länge („Deformations-Strecke / Deformations-Länge“). Der theoretisch zur Verfügung stehende Bauraum kann somit nicht komplett genutzt werden bzw. in gewisse Bereiche dürfen nur im Crash kollabierende und nicht verblockende Bauteile verbaut werden, wie beispielsweise Schläuche oder Luftführungs-Bauteile.

Eine Herausforderung war dabei, dass zunächst nicht bekannt war, wie sich die neu entwickelten Komponenten im Crash verhalten. Somit musste beispielsweise für den Befeuchter gemeinsam mit dem Konsortialpartner Mann+Hummel basierend auf Versuchs-, Vergleichs- und Erfahrungswerten sinnvolle Annahmen getroffen werden.

Beim Befeuchter mussten Unterkomponenten und Funktionen zu einem Zusammenbau integriert werden, um eine möglichst kompakte Bauweise zu ermöglichen.

Die gesetzten Ziele und Anforderungen bezüglich Fahrzeug-Crash konnten bestätigt werden. Dies ist besonders wichtig, da das Brennstoffzellensystem eine deutlich andere Struktur im Vorderwagen aufweist als andere Antriebsvarianten, die im betrachteten Fahrzeug untersucht werden.

Somit konnten alle zugesagten Ergebnisse des AP1.1 erreicht werden.

AP 1.1 Ergebnisse

- Mit Anforderungsgebern (Fahrzeug und Antrieb) abgestimmtes Anforderungsset an das Brennstoffzellensystem liegt vor.
- Beschreibung des Brennstoffzellen-Systemkonzepts durch
 - ein repräsentatives Brennstoffzellen-Simulationsmodell und
 - ein Systemschaltbild ist erfolgt.
- Die virtuelle geometrische Integration des FCSs ins Fahrzeug wurde anhand eines CAD-Modells bestätigt.
- Das Anforderungsset für alle Komponenten wurde als Basis für die Komponentenentwicklung mit den Projektpartnern abgestimmt und ausgeleitet.

Arbeitspaket 1.2 Entwicklung, Konstruktion, Beschaffung und Fertigung Prototypen Brennstoffzellensystem für Prüfstandbetrieb

Im Rahmen des AP 1.2 wird basierend auf den Ergebnissen aus AP 1.1 sowie den Komponentenentwicklungen aus AP 2-7 ein Prototypen-Brennstoffzellensystem für den Betrieb am Prüfstand konzipiert, auskonstruiert, beschafft und aufgebaut.

Dieses System hat nicht das Ziel und den Anspruch, bauraumkonform zu sein. Das Prüfstands-Brennstoffzellensystem ist auf einem Wagen über eine Rahmenstruktur montiert. In einer frühen Entwicklungsphase sollen Grundkonzepte auf Komponenten- und Systemebene untersucht werden sowie eine Vielzahl an zusätzlichen Sensoren und Messinstrumenten verbaut werden. Daher werden die Komponenten zwar entsprechend dem Hauptkonzept miteinander „verschaltet“, jedoch über Schläuche und Rohre miteinander verbunden. Dies ermöglicht einen einfachen Austausch fehlerhafter Komponenten sowie bei Bedarf Änderungen in der Verschaltung der Komponenten zur Untersuchung von Konzeptvarianten.

Das Prototypen-Brennstoffzellensystem wird für den Prüfstand aus den im Rahmen des Projekts entwickelten Haupt-Komponenten, aus zu konstruierenden und anzufertigenden Bauteilen (z.B. Blech-Halter oder individuell gebogene Rohre) sowie aus standardisierten Kaufteilen (Meterware wie Schläuche oder Metallprofile) und Einzelteilen (z.B. Schrauben, Scheiben) aufgebaut. Die Haupt-Tätigkeit lag in der individuellen Konstruktion einer Vielzahl an Einzel- und Sonderteilen. Jedes einzelne Bauteil muss virtuell zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden. Für anzufertigende Bauteile müssen individuelle Bauteilkonstruktionen und Zeichnungen erstellt werden.

Bei der Konstruktion des Prototypen-Systems ist wichtig, dass die Montage frühzeitig berücksichtigt wird und die Prozessschritte gemeinsam mit den Monteuren, die später das Brennstoffzellensystem assemblieren, geprüft werden. Die wesentlichen Aufbauschritte und -abläufe werden in einer Aufbauanleitung dokumentiert, damit die Systemmontage reibungslos und planmäßig verläuft. Dennoch ist hier Erfahrung seitens der Monteure notwendig, da immer wieder Unterschiede zwischen der CAD-Konstruktion und den späteren realen Bauteilen auftreten, auf die individuell und flexibel reagiert werden muss.

In Tabelle 6 ist eine Bauteilübersicht aufgelistet, die den enormen Bauteilumfang verdeutlicht.

Tabelle 6: Bauteilübersicht FaeBS Brennstoffzellensystem

ca. Werte	Einzelteile	„Kaufteile“	Anzufertigende Teile
Gesamt	1050	880	135

Damit die Vielzahl an Bauteilen korrekt beschafft und angefertigt wird, war der Meilenstein „Design-Freeze FCS“ besonders wichtig. Beschreibung „DF-FCS“ ist wie folgt:

Tabelle 7: Inhalt Meilenstein Design-Freeze

Abkürzung	Bezeichnung	Typ	Erklärung / Beschreibung
DF	Design Freeze	MS	Zielsetzung - Zeichnungen und Stückliste komplett - 100% der Bauteile in 3D dargestellt - 12V und HV Schaltplan freigegeben, incl. Massekonzept NV und HV Freigegebene Dokumente: 1. Prisma-Ausleitung aller Komponente 2. 12V Schaltplan 3. HV-Schaltplan

Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, welche Dokumente im Vier-Augen Prinzip geprüft zum Meilenstein vorliegen müssen. Dadurch werden Konstruktionsfehler reduziert, denn wenn Bauteile fehlerhaft spezifiziert oder gefertigt werden, fällt dies erst sehr spät beim Zusammenbau des Prototypen-Systems auf. Fehler dann zu beheben, verzögert den Aufbau und das Projekt deutlich. Daher werden im Vorfeld zum Meilenstein „Design-Freeze“ alle Bauteile und alle Bauteil-Schnittstellen im Vier-Augen Prinzip geprüft und bestätigt. Dazu wurde je Bauteil eine Checkliste abgehakt sowie ein Status dokumentiert (vgl. Abbildung 10).

Wesentlicher nächster Schritt war die Beschaffung der einzelnen Bauteile und ein rechtzeitiges Eintreffen der Bauteile im zentralen Prototypen-Lager von BMW, um einen planmäßigen Aufbau der Brennstoffzellensysteme sicher zu stellen.

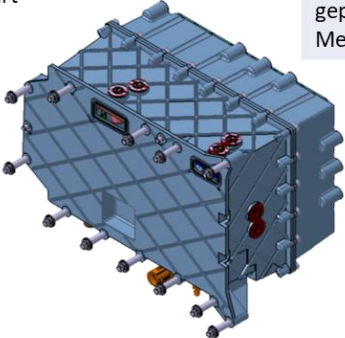
Status: • Halterungspunkte an PST Wagen abgestimmt • Schnittstelle Stack abgestimmt (inkl. BusBars) • Verschraubungen DCDC an Stack in eine Richtung • PA Anschluss (M8) abgestimmt • Schnittstellen Kühlmittelanschlüsse abgestimmt (NW16) • NV Anschluss: abgestimmt & geprüft • HV Anschlüsse: abgestimmt & geprüft • Schnittstellenprüfung durchgeführt			Vorhanden / vereinbart / abgestimmt	Offen
		3D-CAD-Arbeitsmodell	X	
		Komponenten-bauraum	X	
		Zeichnung	X	
		Stücklisteneintrag geprüft (SNR-Al, Menge, BT)	X	

Abbildung 10: Checkliste und Status zum DCDC im Rahmen des Meilensteins "Designfreeze"

Aufgrund der Vielzahl an Bauteilen ist dies ein erheblicher Arbeitsaufwand. Die folgende Abbildung zeigt sehr anschaulich den vollständigen Aufbau des Prototypen-Systems auf dem Prüfstands-Wagen als CAD-Modell. In der Konfiguration kann das System am Prüfstand betrieben werden.

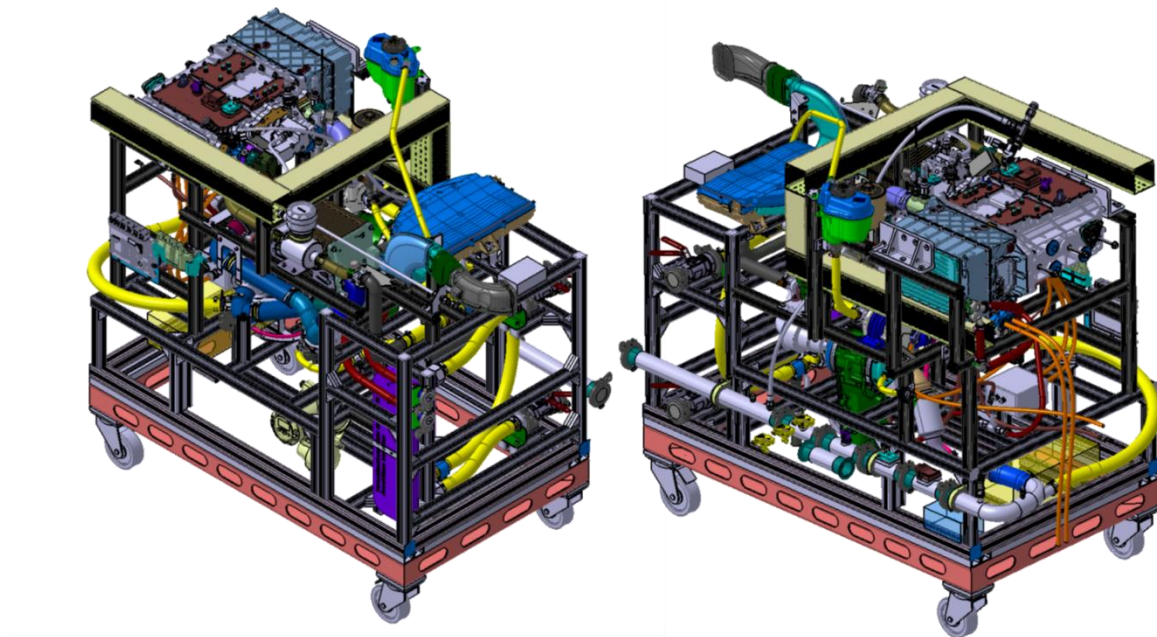


Abbildung 11: CAD-Konstruktion des Prototypen Brennstoffzellensystems zum Meilenstein "Designfreeze" am 06.05.2022

Betriebssoftware für Prüfstands-Betrieb

Parallel zur Konstruktion und Beschaffung der Bauteile wurde auf Basis der bekannten Komponenten-Eigenschaften und des Systemkonzepts eine Betriebssoftware für den Prüfstands-Betrieb erarbeitet. Hierbei wurde auf der Software des Vorgänger-Projektes aufgesetzt, jedoch musste eine Vielzahl an individuellen Anpassungen in allen Teilbereichen der Betriebssoftware auf die neue Hardware sowie das neue Systemkonzept vorgenommen werden.

Im Rahmen des FaeBS-Projektes wurde beispielsweise eine rein passive Rezirkulation im Wasserstoffsystem umgesetzt. Da das vorherige Brennstoffzellensystem eine teilweise aktive und teilweise passive Rezirkulation hat, mussten hier größere Anpassungen vorgenommen werden.

Gleiches gilt für die Druckregelung des Luftsystems. Wie zuvor beschrieben, weist das Vorgängersystem eine variable Turbinengeometrie auf, worüber auch der Gegendruck des Brennstoffzellensystems geregelt wird. Im FaeBS-Brennstoffzellensystem wurde eine Turbine mit fixer Turbinengeometrie gewählt, somit muss dieser Teil der Betriebssoftware gänzlich neu entworfen und umgesetzt werden.

Da der Betriebsbereich des Brennstoffzellensystems auf die höheren Betriebstemperaturen erweitert werden muss, mussten die davon betroffenen Umfänge der Betriebssoftware und Applikation, die das Wasserstoff- Luft- und Kühlsystem betreffen überarbeitet werden.

Über die Systemsimulation wurden für die neue Betriebssoftware initiale Applikations-Parameter festgelegt. Im späteren Systembetrieb müssen diese Parameter aktualisiert und optimiert werden.

Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Betriebsparameter des Kompressors. Für den gesamten Betriebsbereich muss vorab „am Schreibtisch“ ein weitgehend passender Luftmassenstrom und Druck festgelegt werden. Abhängig von den sich real einstellenden Komponenten-Eigenschaften sowie Betriebsbedingungen werden die Betriebsparameter fortlaufend angepasst. Passende vorab ermittelte Betriebsparameter sind für die Erstinbetriebnahme sehr wichtig, damit bei der Erstinbetriebnahme keine Beschädigung von Komponenten riskiert werden.

Montage und Prüfung des Prototypen-Brennstoffzellensystems mit anschließender Übergabe an den Prüfstand für Systemtests

Der geplante Wareneingangs-Termin für alle Bauteile war der 02.10.2022. So sollte eine Montage und Inbetriebnahme (IBN) des Prototypen-Systems zu Beginn 2023 ermöglicht werden. Außerdem sollte zum Konsortialtreffen am 06.12.2022 in München bei BMW allen anwesenden das fertig montierte Brennstoffzellensystem demonstriert werden. Trotz einer Vielzahl an verspätet gelieferten Bauteilen konnte zweiteres erreicht werden. Abbildung 12 zeigt das aufgebaute Prototypen-Brennstoffzellensystem zum Konsortialtreffen am 06.12.2022.

Teilweise mussten zunächst Bauteile verbaut werden, die ihre volle Leistungsfähigkeit noch nicht erreichen konnten und somit im Laufe des Testbetrieb umgebaut werden mussten, auf aktualisierte, verbesserte Bauteile.

Somit war die Leistungsfähigkeit und die Betriebsmöglichkeiten des Brennstoffzellensystems eingeschränkt, worauf im Bericht zu AP1.3 näher eingegangen wird.

Für die Erstinbetriebnahme sowie zur Übergabe des Brennstoffzellensystems von der Brennstoffzellensystemmontage an den Prüfstand muss die korrekte Montage sowie die korrekte Grundfunktion des Brennstoffzellensystems sowie der einzelnen Komponenten sichergestellt sein.

Es wird überprüft, ob jeder Standard- und Prüfstands-Zusatzsensor ausgelesen werden kann und ob korrekte und plausible Werte geliefert werden.

Ebenso wird überprüft, ob alle Aktoren korrekt angesteuert werden können und entsprechend ihrer Spezifikation funktionieren. Zum Teil ist ein Anlernen der Komponenten erforderlich wie das zum Beispiel bei den Drosselklappen der Fall war.

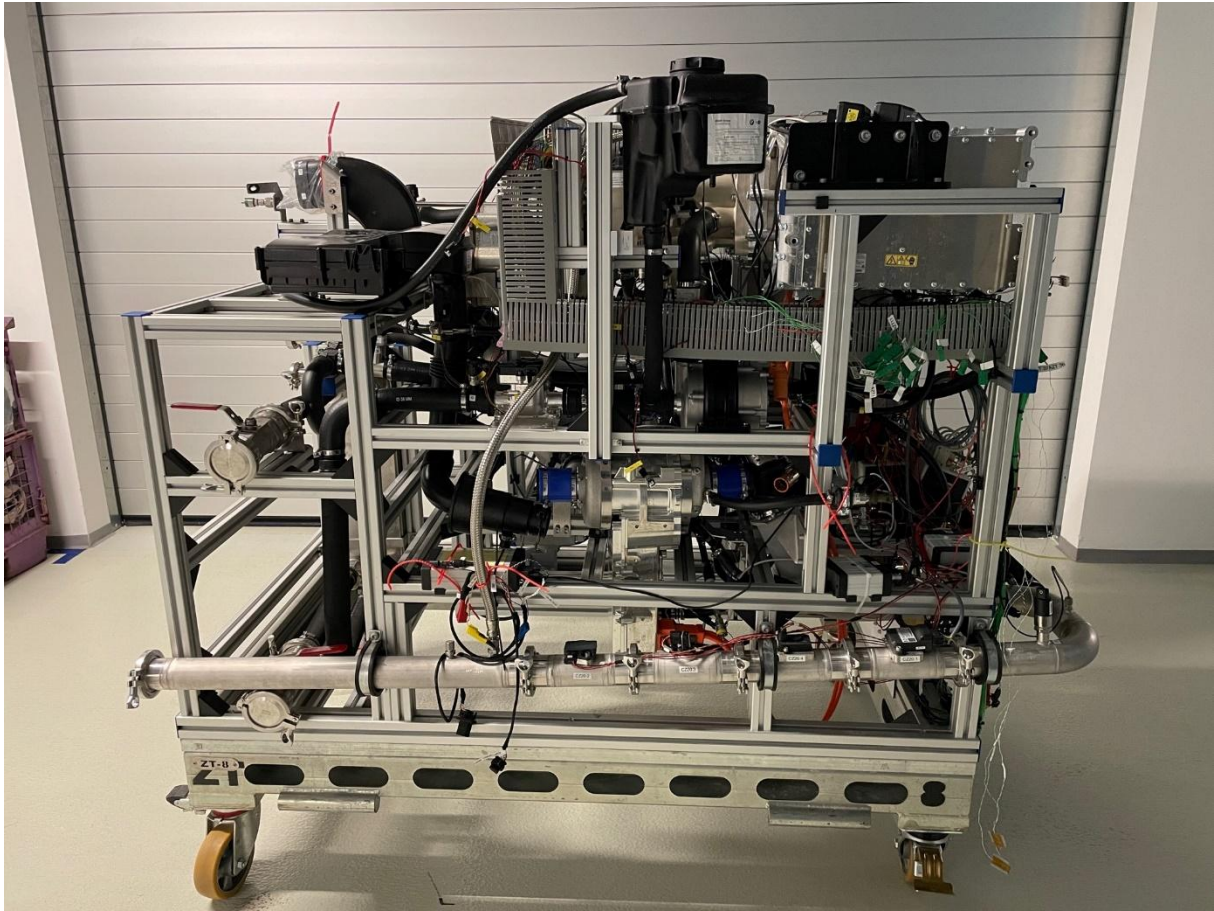


Abbildung 12: Prototypen-Brennstoffzellensystem auf Prüfstandswagen

Es wurden montagebegleitend und nach Abschluss der Montage Dichtheitsprüfungen durchgeführt, um sicher zu stellen, dass nach jedem prüfbareren Montageabschnitt keine Leckagen vorhanden sind bzw. diese schnellstmöglich entdeckt und entsprechend behoben werden können. Sollte eine Leckage erst nach Abschluss der vollständigen Systemmontage festgestellt werden, ist eine Fehlersuche deutlich schwieriger, genauso das Beheben des Fehlers selbst.

Ein weiteres wichtiges Kriterium vor Ausliefern des Brennstoffzellensystems an den Prüfstand ist die Sicherheit des Hochvolt-Systems zu dokumentieren und nachzuweisen. Vor Auslieferung von Hochvolt-Komponenten an BMW wird gefordert, dass diese einzeln geprüft werden müssen. Es wird unter anderem eine Test-Spannung an die Komponenten angelegt und der Hochvolt-Isulationswiderstand gemessen. So müssen vor Verbau der Komponenten im Prototypen-Brennstoffzellensystem bzw. spätestens vor der Freigabe des Brennstoffzellensystems für den Prüfstands-Betrieb alle einzelnen Prüfberichte der verbauten Einzel-Komponenten vorliegen.

Des Weiteren werden auf System-Ebene weitere Prüfungen durchgeführt, um sicher zu stellen, dass auch das Gesamtsystem die erforderlichen Sicherheitskriterien erfüllt.

Mit Abschluss der Systemübergabe konnten alle zugesagten Ergebnisse des AP 1.2 erreicht werden.

AP 1.2 Ergebnis

- Betriebssoftware für Prüfstandsbetrieb
- Konstruktion Prototypen Brennstoffzellen Prototypensystem für Prüfstands Betrieb
- Bestell-Stückliste
- Bestellunterlagen: CAD-Modelle und Zeichnungen aller benötigten Bauteile
- Aufbauanleitung
- Beschaffung der Komponenten für den Aufbau bis zum festgelegten Wareneingangstermin
- Montage und Prüfung des Prototypen Brennstoffzellensystem mit anschließender Übergabe an Prüfstand für Systemtests

Arbeitspaket 1.3 Nachweis der konzeptkritischen Funktionen im Gesamtsystem am Prüfstand

Im Rahmen des Arbeitspakets 1.3 wurden die Prototypen Brennstoffzellensysteme am Prüfstand betrieben und die konzeptrelevanten Umfänge im Systemversuch erprobt und getestet sowie die Anforderungen geprüft und bestätigt

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Brennstoffzellensystem aufgebaut. Für diese beiden Brennstoffzellensysteme wurde unter Berücksichtigung der vorhandenen Prüfstände ein Entwicklungs- und Prüf- und Absicherungsplan erarbeitet.

Für einen stabilen und zuverlässigen Testbetrieb sind reife funktionierende Grundfunktionen als Voraussetzung notwendig. Dies ist insbesondere wichtig, wo umfangreichere Änderungen und Weiterentwicklungen in der Software und den Betriebsfunktionen erfolgt sind. Folgend sind die wichtigsten Grundfunktionen aufgelistet:

- Stack-Wasserstoffversorgung durch H₂-Injektoren und Erwirkung einer H₂-Rezirkulation
- Luftversorgung in jedem Arbeitspunkt (Druck, Luftmasse, Feuchte und Temperatur)
- Austrag des Stickstoffs und Flüssigwasser durch Ansteuerung Drain- und Purge-Ventil auf der Anoden-Seite des Stacks
- Kompressor-Surge-Schutz

- Robuste Strom-/Spannungsregelung des Stacks, beispielsweise während des „normalen“ Betriebs sowie beim FCS-Start / Stop und in Sonderfällen wie Notabschaltung.

Dies wurde in der initialen Planung berücksichtigt, aber auch in der testbegleitenden Anpassung der Test- und Absicherungs-Pläne beachtet.

Aufbauend auf den Grundfunktionen wurden die Funktionen und Betriebsparameter des Brennstoffzellensystems als Basis für den Dauerlauf optimiert. Ziel für den Dauerlauf ist, dass im gesamten Betriebsbereich Betriebsbedingungen gefunden und optimiert werden, die einen Start der Dauererprobung rechtfertigen.

Wichtig ist eine stabile und zuverlässige Stack-Leistungsregelung entlang der dynamischen Betriebsgrenzen. Ebenso muss der Hochtemperaturbetrieb mit Leistungsmanagement inklusive thermischem Derating für Heißbetrieb sichergestellt sein.

Darüber hinaus ist ein wesentliches methodisches Ziel in der Dauerläuferprobung, die Dauerläufe voll automatisiert 24/7 ohne Unterbrechungen durchführen zu können und alle Messdaten automatisiert zu erfassen und abzuspeichern. Dafür müssen IT-seitig die Systeme zur

- Prüfstands-Steuerung und -Überwachung
- Steuerung des Brennstoffzellensystems
- Automatisierter Ablauf der Prüfprotokolle
- Datenaufzeichnung interner Komponentenmessdaten
- Datenaufzeichnung der Prüfstandsmesstechnik
- Datenaufzeichnung aller relevanter Bus-Systeme sowie Sensorik
- Fernzugriff auf alle Systeme

miteinander vernetzt werden und stabil und fehlerfrei zusammenarbeiten.

Im Projekt wurden zwei Brennstoffzellensysteme aufgebaut. Die Verwendung wurde so aufgeteilt, dass auf einem „Entwicklungs-System“ alle Entwicklungsumfänge durchgeführt wurden.

Im Rahmen der Test- und Entwicklungsarbeit besteht das Risiko, dass aufgrund noch nicht optimalen Betriebs eine Teil-Schädigung verfrüht eintritt, da zunächst noch nicht alle Bauteil- und Systemgrenzen bekannt sind. Die optimalen Betriebsbedingungen und -funktionen müssen optimiert und ermittelt werden. Daher ist jedoch die Dauererprobung nicht sequenziell sinnvoll auf dem Brennstoffzellensystem, welches zuvor für Test- und Entwicklungsumfänge verwendet wurde.

Das zweite Brennstoffzellensystem sollte anschließend nahezu unbelastet in die Dauererprobung gegeben werden.

Ein weiterer wesentlicher Umgang im Entwicklungsprogramm am Prüfstand war die Entwicklung neuer Betriebsfunktionen und Optimierungen. Beispielfhaft sei genannt:

- Entwicklung von Funktionen zur Optimierung des Flüssigwassermanagements im Stack auf Anoden-, Kathoden- und Kühlsystem-Seite
- Impedanzmessung im gesamten Strombereich

Erweiternd zum Betrieb unter Normalbedingungen war ein großes Ziel, den sicheren Betrieb auf Komponenten- und Systemebene unter Frost-Bedingungen nachzuweisen und zu optimieren. Für einen sicheren Betrieb bei Frost-Bedingungen wird das Brennstoffzellensystem während des Abschaltens bei erwarteten Frost-Bedingungen konditioniert, d.h. ausgetrocknet und für einen kommenden Froststart vorbereitet. Je besser und schonender die Froststart-Konditionierung durchgeführt wird, desto schneller und besser kann ein Froststart anschließend durchgeführt werden.

Im eigentlichen Froststart wird das Brennstoffzellensystem bewusst und gezielt mit zu wenig Luft betrieben. So wird ein sehr ineffizienter Betriebszustand erreicht, wo bei wenig elektrischer Leistung viel thermische Leistung erzeugt wird. Diese wird benötigt, um das Brennstoffzellensystem schnell aufzuheizen.

Ein schlecht durchgeführter oder nicht ideal optimierter Froststart kann sehr lebensdauerschädigend sein. Daher ist besonders wichtig, dass dieser Betriebszustand bestmöglich optimiert wird. Das Luftsystem ist aufgrund der Charakteristik des Turbokompressors nicht in der Lage, den erforderlichen Betriebspunkt (Massenstrom & Druck) direkt über den Kompressor einzustellen. Somit wird die Luftverarmung dadurch erreicht, dass überschüssige Luft durch den „Stack Bypass“ am Stack vorbei geleitet wird. Hierbei ist herausfordernd und wichtig, dass die korrekte reduzierte Luftmenge dem Stack zugeführt wird. Die Luftmenge, die über den Stack Bypass am Stack vorbei geführt wird, muss also sehr genau eingestellt werden. Dies ist herausfordernd und benötigt umfangreiche Entwicklung sowie Optimierung.

Nach Entwicklungs- und Optimierungs-Blöcken wurden jeweils Test-Sequenzen durchgeführt, um die im jeweiligen Entwicklungs- und Optimierungs-Block erarbeiteten Funktionen beziehnehmend auf die Projektziele nachzuweisen sowie um einen System Performance Check durchzuführen. Abbildung 13

Aufgrund dieser Überlegungen entstand Test- und Erprobungsplan wie in Abbildung 13 dargestellt.

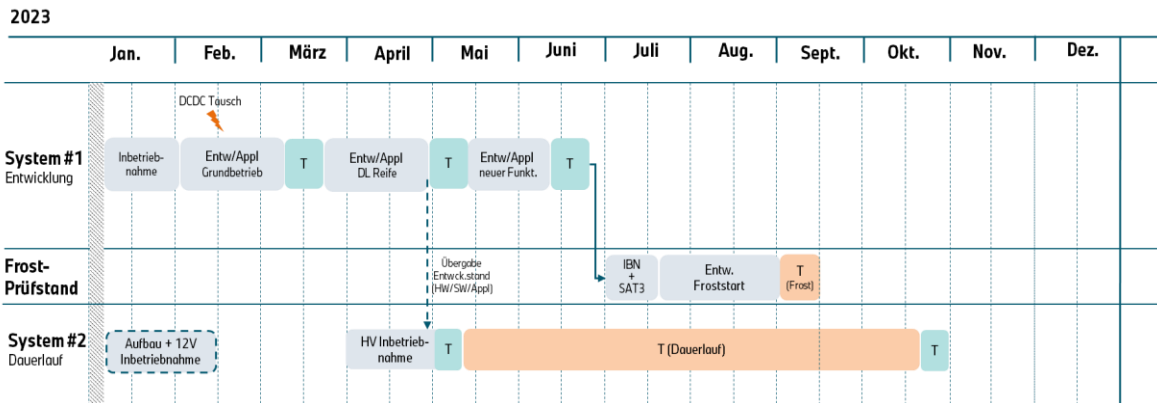


Abbildung 13: Entwicklungs- und Testplan Stand 12/2022.

Im Zuge der Inbetriebnahme traten Herausforderungen auf, zu deren Lösung intensive Fehlersuchen und zum Teil auch Verbesserungen an Komponenten erforderlich waren.

Bereits zum Aufbau des ersten Brennstoffzellensystems wurde bekannt, dass der FC-DC/DC nicht voll belastet werden darf und der Stack-Strom begrenzt werden und im Laufe des Test- und Entwicklungsbetrieb ausgetauscht werden muss, um die zulässige Stromgrenzen anzuheben. Letztlich waren mehrere Hardware-Schleifen erforderlich, in deren Zuge der freigegebene Strom schrittweise auf den maximalen Dauerstrom von 800 A und Peak-Strom zeitlich begrenzt von 1000 A angehoben werden konnte. Die erforderlichen Umbaumaßnahmen konnten nicht im Prüfstand durchgeführt werden, sondern mussten in der Montagewerkstatt erfolgen mit entsprechendem zeitlichem Verzug für den Transport zur Werkstatt und anschließend zurück zum Prüfstand samt erneuter Inbetriebnahme. Darüber hinaus ist der DCDC im Rahmen der Erstinbetriebnahme des Brennstoffzellensystems immer wieder unerklärbar plötzlich ausgefallen. Nach einer langwierigen und zeitintensiven Fehlersuche hat sich herausgestellt, dass ein erhöhter Widerstand im 12 V Kabelbaum vorlag. Die Folge war eine zeitweise zu niedrige 12 V-Spannungsversorgung am DC/DC, weswegen dieser auf Komponenten-Ebene einen „Neustart“ durchgeführt hat. Ein stabiler Systembetrieb war so nicht möglich.

Die neu entwickelten Komponenten wurden erstmalig in einem Systemverbund betrieben. Eine Herausforderung war die CAN-Bus Kommunikation stabil zu etablieren. Eine Fehlersuche hier ist zeitintensiv und herausfordernd, da eine Vielzahl an Komponenten am CAN-Bus angeschlossen sind mit einer Vielzahl an Fehlermöglichkeiten.

Ebenso gab es mehrfach Probleme mit der Dichtigkeit der Kühlmittelpumpe (die damit verbundene Problemlösung wurde außerhalb des FaeBS Projektes erarbeitet). Die Pumpe war mehrfach undicht, zum Teil mit Kühlmittel im Hochvolt-Inverter, was zu einer Notabschaltung führte, da der Hochvolt-Isolationswiderstand nicht mehr gewährleistet war. Um dieses Problem zu lösen, musste mehrfach die

Kühlmittelpumpe gegen neue Bauteile getauscht werden. Letztlich wurde auf eine andere Kühlmittelpumpe eines anderen Herstellers gewechselt, da die Undichtigkeiten nicht gelöst werden konnten.

Diese und weitere Herausforderungen haben dazu geführt, dass ein substanzieller Test- und Erprobungsbetrieb entgegen dem ursprünglichen Plan nicht im Februar, sondern Mitte Mai gestartet werden konnte. Daher wurde das Projekt verlängert und das Entwicklungs- und Testprogramm beschleunigt um die zugesagten Umfänge entwickeln und nachweisen zu können.

Bewertung der System- und Komponentenkonzepte

Zu Beginn des Projekts führte Package Studien im Rahmen von AP1.1 zu der Entscheidung, die Luftventile außerhalb des Befeuchters zu verorten.

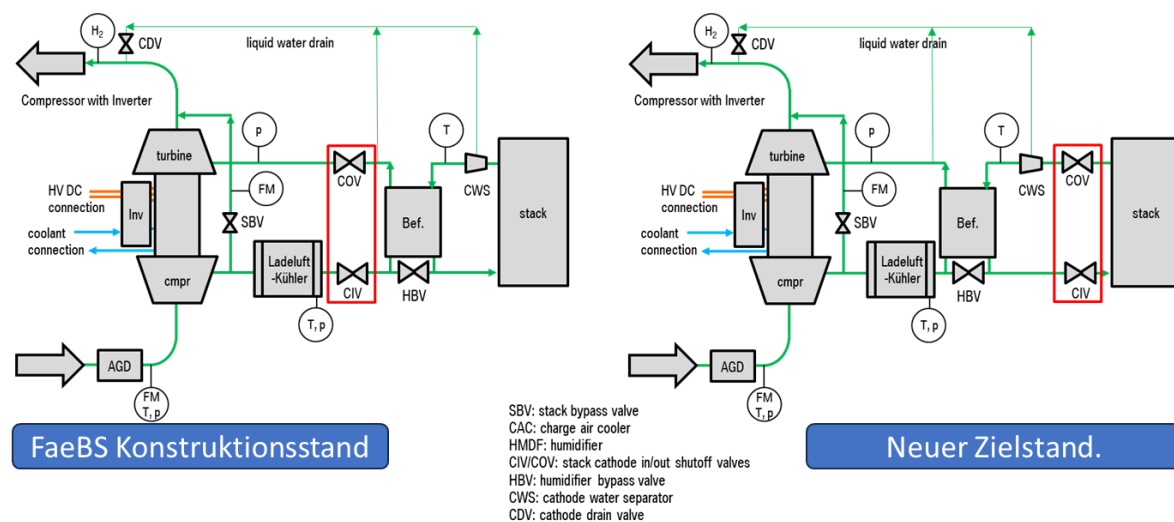


Abbildung 14: Konzeptbewertung Position Luftventile mit richtungsweisendem Ergebnis.

Im Zuge von Prüfstands-Versuchen im Rahmen des FaeBS Projekt hat sich herausgestellt, dass das durch die Luftventile eingeschlossene Luft-Volumen im Systembetrieb eine Herausforderung darstellt. In der Vorbereitung eines Systemstarts dauert die Konditionierung des Luftsystems deutlich länger aufgrund des größeren eingeschlossenen Luftvolumens als gewünscht. Um die durch die Luftventile eingeschlossene Luftmenge zu reduzieren, wurden die Luftventile direkt an den Stack Luft Einlass und Auslass verlegt. Ein überarbeitetes Konzept des Befeuchters hat dies im Gegensatz zur initialen geometrischen Untersuchung im Rahmen von AP 1.1 mittlerweile ermöglicht. Somit konnte aufgrund der Versuche im Rahmen des FaeBS Projektes ein wichtiger Aspekt des Brennstoffzellen-Gesamtsystemkonzept im Rahmen des Brennstoffzellensystems hinterfragt und verbessert werden für ein mögliches Folgeprojekt.

Die weiteren wesentlichen Grundkonzepte des Brennstoffzellensystems werden für ein mögliches künftiges Nachfolgeprojekt im Wesentlichen beibehalten.

Aufbauend auf den Test- und Erprobungsergebnissen wurden die Komponentenkonzepte hinterfragt und optimiert. Weitere Details hierzu sind in den Teilberichten zu den APs 2-7 beschrieben. Beispielhaft sind verschiedene Verbesserungsbedarfe auf Komponenten-Seite erwähnt.

Das gewählte Konzept des internen Aufbaus des Befeuchters zur Folge hatte, dass unter gewissen Umständen der Druckverlust des Befeuchters zum Teil irreversibel anstieg. Dies hat zu Herausforderungen und Einschränkungen im Systembetrieb und in der Systemperformance geführt. Das initial gewählte Komponentenkonzept des Befeuchters konnte nicht bestätigt werden. Im Rahmen von AP 3 wurde hier bereits während des Projekts eine Lösung erarbeitet und bestätigt, die jedoch leider nicht mehr in den Prototypen-Systemen verbaut werden konnte.

Seitens des DC/DC konnte eine Freigabe des maximalen Stroms nicht dauerhaft gegeben werden. Für ein mögliches Folgeprojekt ist die Auslegung und Gestaltung der Komponenten dahingehend optimiert, dass diese Einschränkung nicht mehr vorliegt.

Die Pumpgrenze des Kompressors hatte einen untypischen Verlauf („Knick“), wodurch diese sich hin zu den FCS-Betriebspunkten verschoben hat. Als Reaktion darauf musste die Leistungsdynamik des Brennstoffzellensystems eingeschränkt werden, um ein Überschreiten der Pumpgrenze bei schnellen Leistungsänderungen zu vermeiden. Wenn aufgrund einer schnellen Leistungsänderung schnell der Luftmassenstrom reduziert wird, der Druck sich jedoch nicht im gleichen Maße abbaut, kann kurzfristig die Pumpgrenze des Kompressors überschritten werden. Um dies zu vermeiden, werden Betriebspunkte mit etwas Abstand zur Pumpgrenze gewählt. Aufgrund der Projektlaufzeit und -Randbedingungen war es nicht möglich, eine Verbesserung des Kompressor-Kennfeld während der Projektlaufzeit umzusetzen, da dazu eine neue Auslegung des Kompressors nötig gewesen wäre.

Der Brennstoffzellen-Stack (nicht Teil des FaeBS Projektes) hatte bei einzelnen Zellen in einigen Betriebspunkten einen erhöhten Luftbedarf. Auch hier wurden an verschiedenen Stellen mögliche Verbesserungen identifiziert und vorbereitet.

Dauererprobung des Brennstoffzellensystems

Für die Dauererprobung wurde drei Sequenz aus einem „worst case“ 99 % Kundenprofil, ein BMW interner Hochlast-Zyklus sowie eine simulierte Fahrt über den Brennerpass aneinandergereiht. Diese Zyklen zielen auf unterschiedliche relevante Schadensmechanismen in Brennstoffzellensystemen ab und stellen eine Überhöhung gegenüber üblichen Anwendern dar. In Abbildung 15 ist der Ablauf eines Dauerlaufzyklus dargestellt.

Nach jedem Teilzyklus wurde ein Performance Check durchgeführt. Dazu wurden stufenweise Leistungspunkte von geringer Last bis zur Volllast angefahren (vgl. Abbildung 16). Dadurch kann eng überwacht werden, wie sich die Alterung des Brennstoffzellensystems entwickelt.

Vor dem Start der Dauererprobung wird zunächst sichergestellt, dass alle Betriebsfunktionen die ausreichende Reife für den Dauerbetrieb haben und ein ausführlicher Performance-Check durchgeführt, der als Referenz für folgende degradierte Leistungswerte verwendet wurde.

Außerdem wurde der Datenaustausch der Messdaten aus der Dauererprobung mit den Konsortialpartnern geprüft und bestätigt. Dazu wurde intensiv und umfangreich abgestimmt, welche Messwerte die Konsortialpartner benötigen und seitens BMW entsprechende Maßnahmen getroffen, um diese Messwerte begleitend zur Dauererprobung bereitstellen zu können.

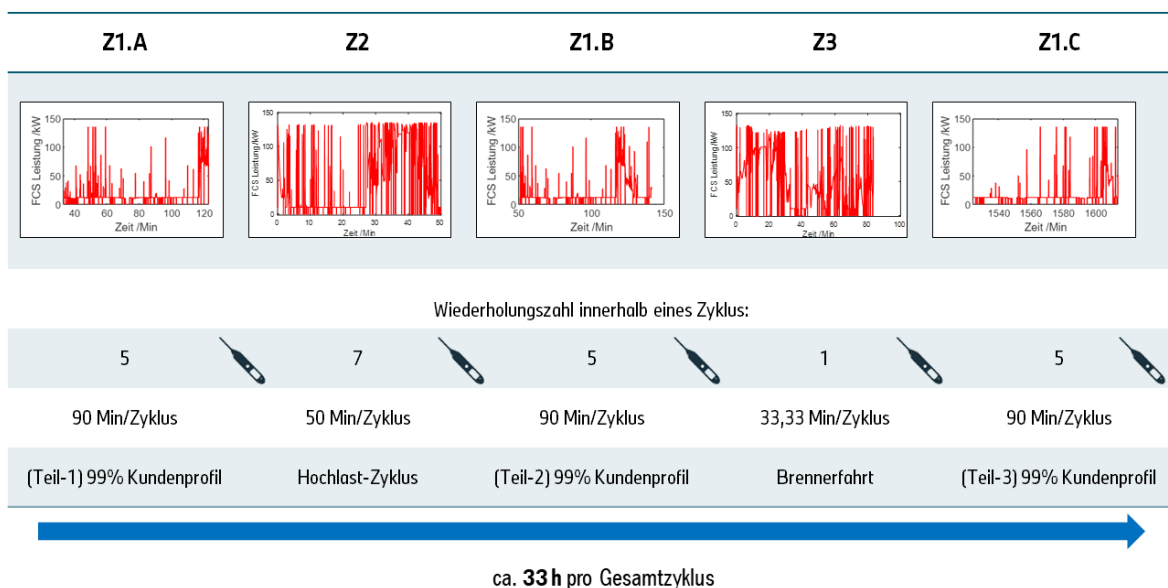


Abbildung 15: Ablauf einer Dauerlauf-Sequenz.

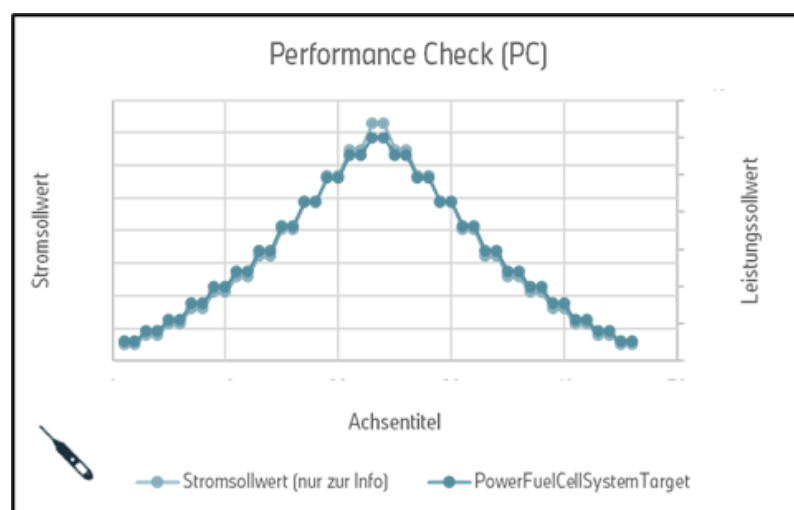


Abbildung 16: Ablauf Performance Check (Dauer ca. 50 min.).

Aufgrund von Einschränkungen auf Komponentenebene konnten die Teilzyklen nicht exakt umgesetzt werden. Die Anpassungen im Dauererprobungszyklus dienen dazu, einen stabilen Systembetrieb zu gewährleisten.

Aufgrund der Begrenzung des Stack-Dauerstrom seitens DC/DC wurden die Profile so angepasst, dass keine Ströme größer 800 A angefahren werden. Auch wenn Leistungspunkte mit Strömen größer 800 A nur kurzzeitig auftreten, wurde diese Maßnahme umgesetzt, um im 24/7 Betrieb ohne Überwachung durch Personal einen sicheren und stabilen Systembetrieb zu begünstigen.

Die maximale Betriebstemperatur wurde für die Dauererprobung auf 92 °C eingeschränkt, da zum spätesten möglichen Beginn der Dauererprobung die Betriebsfunktionen nicht die für einen stabilen Systembetrieb nötige Reife aufgewiesen haben. Die Betriebstemperatur ist ausreichend, um zum Vorgängersystem vergleichbare Betrieb- und Alterungsbedingungen darzustellen.

Eine weitere Anpassung der Dauerlauf-Zyklen war, dass kein Standby-Betrieb mit 0kW Leistung umgesetzt wurde. Stattdessen wurde immer die Mindest-Leistung eingestellt. Dadurch ist kein wesentlicher Einfluss auf die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems zu erwarten.

Um eine Fahrzeuglebensdauer abzubilden, muss das Dauerlaufprofil für eine Dauer von 4000h durchlaufen werden. Im Rahmen des FaeBS Projekts war angestrebt, das Dauerlaufprofil für eine Dauer von mindestens 1000 h, bestenfalls 4000 h, zu betreiben.

Aufgrund des verspäteten Starts der Dauererprobung sowie unvorhergesehener Unterbrechungen der Dauererprobung konnte das Brennstoffzellensystem nur für eine Dauer von 885 h betrieben werden. Eine vollkommen unvorhergesehene Verzögerung ergab sich beispielsweise aufgrund eines Besuchs des deutschen Bundeskanzlers auf der BMW-Betriebsversammlung am 05.12.2023, weswegen die Betankung des BMW-Wasserstoffspeichers zur Prüfstands-Versorgung nicht planmäßig durchgeführt werden konnte.

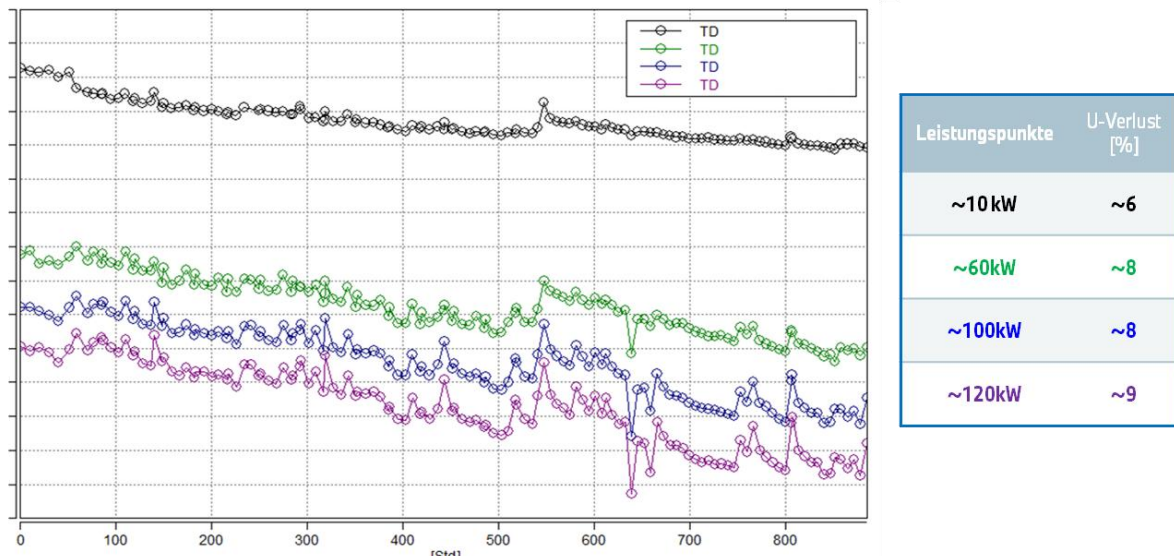


Abbildung 17: Stack Degradation im Brennstoffzellensystem

Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Zellspannungen während der Dauererprobung. Als Ziel für ein mögliches Serienprojekt wurde ein Spannungsverlust des Stacks von ca. 12 % nach 300.000 km oder ca. 15 % Leistungsdegradation auf Brennstoffzellen-System-Ebene festgelegt.

Im Rahmen vom FaeBS Projekt konnte ein Spannungsverlust von ca. 6 - 9 % des Stacks nach einer Laufzeit von ca. 885 h nachgewiesen werden. Darauf basierend wurde für einen Spannungsverlust auf Stack-Ebene von 12 % eine Laufzeit von 1000 – 1200 h extrapoliert.

Ein Vorgänger-Prototypen System hat 12 % Stack Degradation bereits nach einer Laufzeit ca. 750 h erreicht.

Somit kann man zusammenfassend sagen, dass das FaeBS Brennstoffzellensystem eine bessere Lebensdauer als das Vorgänger Prototypen-Brennstoffzellensystem aufweist. Es erreicht jedoch noch nicht die für ein kommerzielles Serienangebot erforderliche Lebensdauer.

KPI 1.3 sowie KPI 1.4 Systemeffizienz

Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Ergebnisse im Rahmen des FaeBS Projekt bezüglich der Systemeffizienz erzielt wurden.

Wie bereits zuvor mehrfach angedeutet, gab es auf Komponenten- und Systemebene verschiedene Sondereffekte, die auf den Systembetrieb Einfluss genommen und sich auch in der erreichbaren Systemeffizienz bemerkbar gemacht haben. Die Effekte können jedoch erklärt, verstanden und rechnerisch betrachtet werden. Folgende Sondereffekte haben wesentlichen Einfluss auf die Systemeffizienz:

- erhöhter Luftbedarf der Zellen im Stack (nicht Teil des FaeBS Projekts)
- erhöhter Druckabfall Befeuchter erfordert einen höheren Kompressor-Ausgangsdruck und schiebt somit die Betriebspunkte kompressorseitig näher an die Kompressor Betriebsgrenzen bzw. über die Kompressors Betriebsgrenzen hinaus
- Untypische Pumpgrenze des Kompressor mit „Knick“: schiebt die Bauteilgrenzen des Kompressors näher an die Betriebspunkte des Brennstoffzellensystems bzw. darüber hinaus.
- H₂-Subsystem mit konservativer Bedatung und erhöhten Purge-Raten zum Stack-Schutz aufgrund
 - schwacher einzelner Zellen (ähnlich Punkt zu erhöhtem Luftbedarf Stack)
 - nicht wie geplant funktionierender Sensorik im H₂-Subsystem

Die Effekte a/b/c in Kombination erfordern, dass eine ineffiziente Luftförderung über den Stack Bypass gewählt wird, um ausreichend Abstand zur Pumpgrenze zu halten mit negativer Auswirkung auf den Wirkungsgrad. Punkt d führt zu erhöhtem H₂ Verbrauch.

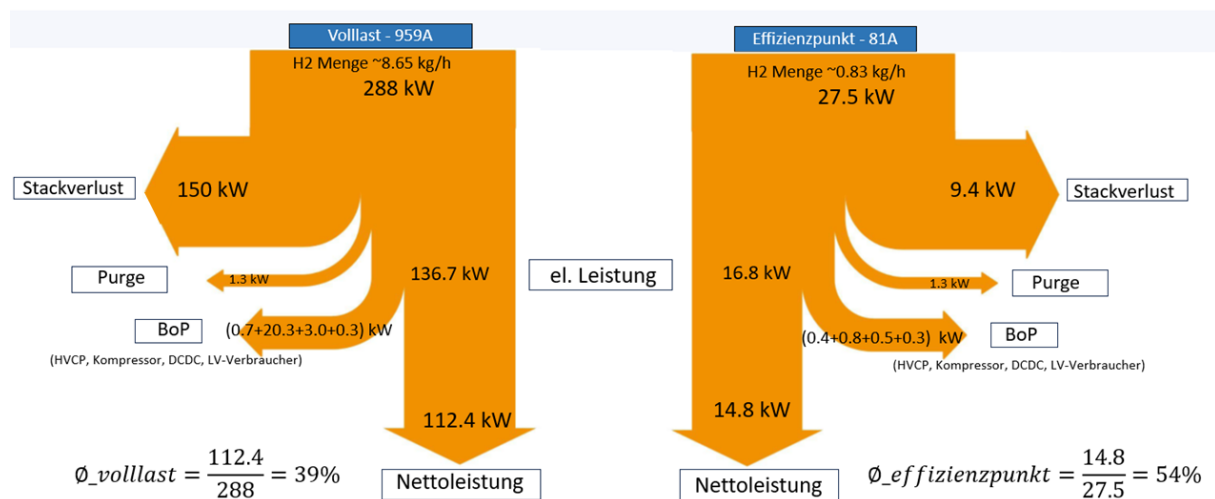


Abbildung 18: Abschätzung Einzelverluste und Systemeffizienz FCS.

Setzt man die zugeführte H₂-Menge ins Verhältnis zur Nettoleistung, so kann man die System-Effizienz bestimmen. So konnte für den erreichbaren Volllast-Punkt bei 959 A eine Effizienz von 39 % nachgewiesen werden. Im Effizienzpunkt wurde ein Wirkungsgrad von 54 % erzielt.

Um nachzuvollziehen, ob die Grundkonzepte das Potential haben, die Zielwerte zu erfüllen, wurden anhand der Brennstoffzellen-Systemsimulation die verschlechternden Effekte nachvollzogen und simulativ bestätigt. Darüber konnte ebenfalls gezeigt werden, dass wenn die aufeinandertreffenden einzelnen Effekte auf Komponenten- und Systemebene behoben und verbessert werden, die übergreifenden Systemziele erreichbar sind.

Froststart

Im KPI 1.5 wurde als Ziel festgelegt, dass ein Froststart von -30 °C in 60 Sekunden durchgeführt werden soll.

Die Entwicklung und Optimierung der Froststartvorbereitung sowie des Froststart hat sich als herausfordernd dargestellt. Die Tatsache, dass pro Tag ein bis maximal zwei Froststartversuche durchgeführt werden können (die Testkammer mit Brennstoffzellensystem muss vor einem erneuten Froststart auf die gewünschte Starttemperatur eingefroren werden), kam erschwerend hinzu.

Zu Beginn des Frost-Entwicklungsprogramms kam es aufgrund von Software-Fehlern im Kompressor und DC/DC zu Notabschaltungen. Nachdem die Ursache gefunden war, wurde von den Konsortialpartnern Zollner (DC/DC) und Bosch (Kompressor) eine neue Softwarevariante entwickelt und bereitgestellt, die das Verhalten verbesserten.

Nach Wiederaufnahme erneuter Froststartreihen traten Undichtigkeiten im Kühlsystem sowie im H_2 -System auf. Diese mussten aus Sicherheitsgründen behoben werden, was erneut zu deutlichen Verzögerungen geführt hat. Im Laufe der Entwicklung und Optimierung wurden Froststarts erfolgreich bis -25 °C durchgeführt.

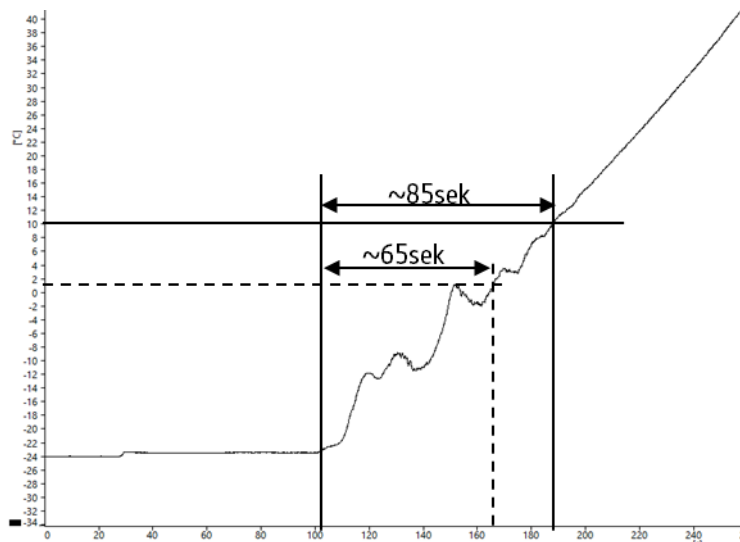


Abbildung 19: Froststart von -25 °C .

In Abbildung 19 ist der Verlauf der Kühlmittel-Austrittstemperatur dargestellt für einen Froststart von -25 °C . Zunächst stellt man fest, dass die Kühlmittel-Ausgangstemperatur nur -24 °C aufzeigt. Dies ist auf eine nicht komplett durchtemperiertes Brennstoffzellensystem zurückzuführen, ändert jedoch das Ergebnis nicht. Für den Froststart von -25 °C werden bis Überschreiten der 0 °C Grenze ca. 65 Sekunden benötigt. Bis Überschreiten der 10 °C Grenze werden 85 Sekunden benötigt. Mit mehr Entwicklungs- und Optimierungszeit für Froststarts wäre eine weitere Beschleunigung der Aufstartzeit möglich gewesen.

Um den Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik vor Projekt aufzuzeigen, ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** unter Anderem der Temperaturverlauf des Brennstoffzellensystems für einen Froststart von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gezeigt.

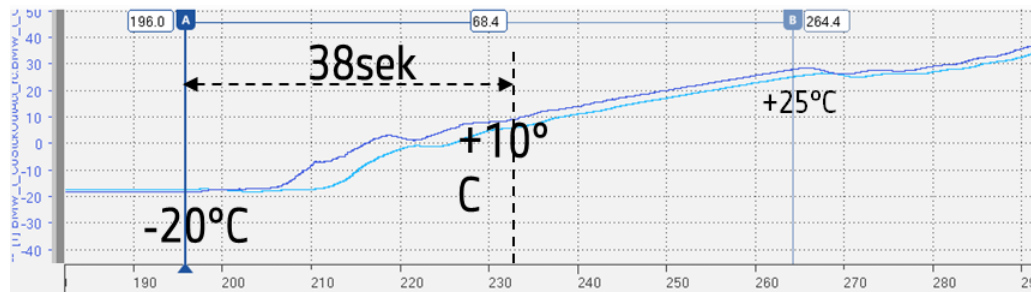


Abbildung 20: Froststart von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Der im KPI 1.5 referenzierte IST-Wert beträgt für einen Froststart von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 60 Sekunden. Im Rahmen des FaeBS Projekt konnte eine Verbesserung dieses Werte um 36 % auf 38 Sekunden erreicht werden. Ab einer Stack-Temperatur größer $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist ein Froststart unkritisch und ab einer Stack-Ausgangs-Temperatur von ca. $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann einem Leistungssignal mit geringfügigen Einschränkungen gefolgt werden, daher wird die Froststartzeit auf eine Temperatur von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ referenziert. Auch hier besteht Optimierungsmöglichkeit, um die Froststartzeit zu verbessern. Je früher einem Leistungssignal gefolgt werden kann, desto früher ist ein Froststart beendet und ein (ggf. eingeschränkter) Normalbetrieb kann stattfinden. So wäre es auch ein denkbare Entwicklungsziel, bereits während dem Froststart einen eingeschränkten Normalbetrieb durchzuführen, und so die Froststart-, und damit Wartezeit bis zum regulären Betrieb, zu reduzieren.

Hochtemperaturbetrieb

Mit der Betriebstemperatur des Brennstoffzellensystems ist die maximal mögliche Stack-Ausgangstemperatur gemeint. Andere relevante Temperaturbereiche für die System- und Komponentenauslegung sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Um bei hohen Umgebungstemperaturen noch gute Kühlleistungen darstellen zu können wird angestrebt die Betriebstemperatur des Brennstoffzellensystem im Systembetrieb auf $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ anzuheben. Dies war zwar kein in der Vorhabens-Beschreibung aufgeführtes KPI oder Ziel des AP 1, jedoch ein implizit wesentliches Entwicklungsziel im Rahmen des FaeBS Projekts und stellt eine wesentliche Weiterentwicklung gegenüber dem vorherigen Stand der Technik dar.

Tabelle 8: Relevante Temperaturbereiche im Fahrzeug und Brennstoffzellensystem sowie zur Komponentenauslegung

Außentemperaturen	-40 °C bis +50 °C
Minimale Außentemperatur für einen Froststart	-35 °C
Bauteil-Umgebungstemperaturen	-40 °C bis +105 °C
Temperatur Wasserstoff im Mitteldruck	40 °C bis +105 °C
Betriebstemperatur Brennstoffzellensystem	bis 105 °C

In Abbildung 21 wird der Unterschied zwischen Umgebungs-, Bauteilumgebungs- und Betriebstemperatur anschaulich verdeutlicht.

Das Ziel eines stabilen Betriebes des Brennstoffzellensystem bei 105°C Kühlmittel-Ausgangstemperatur konnte erreicht und nachgewiesen werden, nachdem dies im Vorfeld bereits auf Brennstoffzellenebene gezeigt wurde.

Als repräsentativer Betriebspunkt für den 105 °C Betrieb für diesen Bericht wurde angelehnt an eine Bergfahrt ein Betriebspunkt oberer Teillast mit ca. 80 kW ausgewählt.

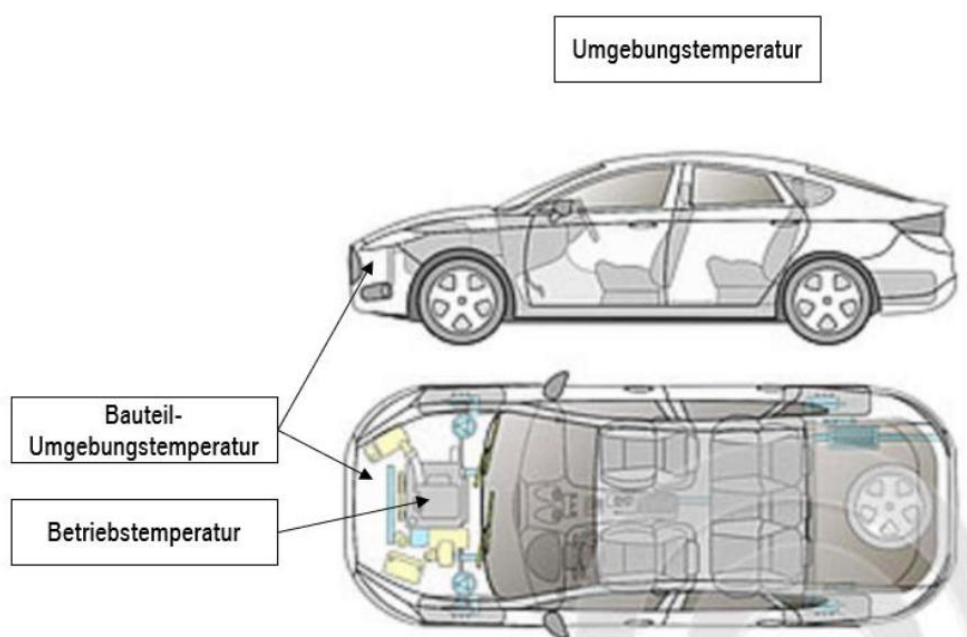


Abbildung 21: Definition Temperaturen im Fahrzeug.

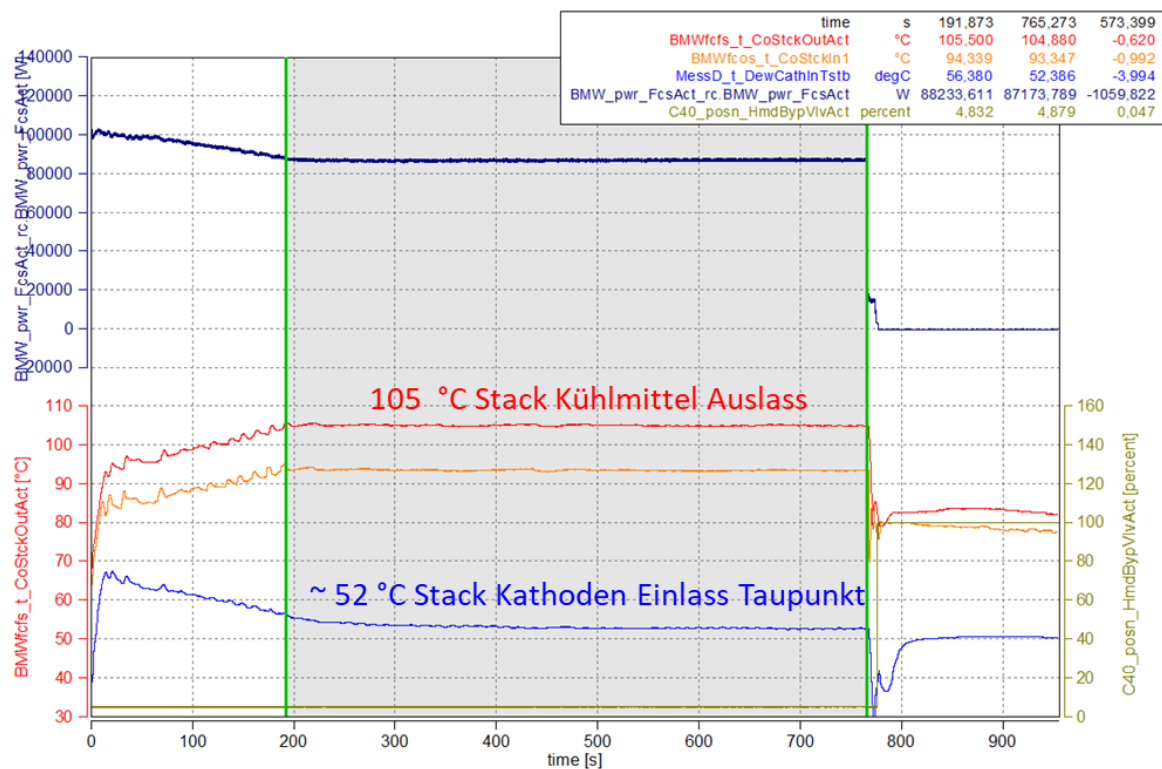


Abbildung 22: Betriebspunkt "Bergfahrt" mit Betriebstemperatur von 105 °C bei ca. 80kW

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, konnte der Betriebspunkt zuverlässig, d.h. mit stabiler Leistung bzw. Zellspannungen, für mindestens 10 Minuten gehalten werden. Somit kann von einem stabilen Stack- und Systembetrieb ausgegangen werden. In dem Betriebspunkt wurde ebenfalls die Wirksamkeit und Performance des Befeuchters bewertet, daher ist der Kathoden Einlass Taupunkt von Bedeutung. Es ist klar ersichtlich, dass der Befeuchter wirksam ist und für den Betriebspunkt den Kathoden-Einlass ausreichend befeuchtet.

Ex-Situ Befundungen an Komponenten

Nach dem Dauerlauf wurden den Konsortialpartnern die Bauteile für weitere Befundungen zurückgegeben.

Seitens BMW wurden keine Komponenten des FaeBS Projektes befundet, da dies in der Verantwortung und im Interesse der Konsortialpartner liegt. Die Komponenten wurden rechtzeitig bereitgestellt und die Messdaten und Historie zu den Bauteilen wurde, wie zuvor beschrieben, über die Dauerlauf-Testdaten übermittelt.

AP 1.3 Ergebnis

- Erprobung und Test der Brennstoffzellensystem-Prototypen.
- Bewertung der System- und Komponentenkonzepte durch Key-Requirement Reviews.
- Optimierung des Systemkonzepts sowie der System- und Komponentenanforderungen.
- Ex-Situ Befundungen an Komponenten, die Schäden oder übermäßige Alterung aufweisen.

Zu allen im Rahmen von AP 1.3 angestrebten Ergebnissen wurden zahlreiche Aktivitäten durchgeführt und beschrieben.

Trotz Verzögerungen und Herausforderungen konnte ein wesentlicher Entwicklungsschritt durch das FaeBS Projekt erzielt werden und alle Ergebnisse bestätigt werden.

Auf KPI 1.2 wurde bisher nicht explizit eingegangen, jedoch ist das Erreichen des Ziels implizit besprochen. Das Hochvolt-Spannungsniveau des Brennstoffzellensystems ist ~850 V, sodass der erfolgreiche Betrieb des Brennstoffzellensystem in dieser Spannungslage bedingt, dass die Komponenten mit den geforderten und angestrebten Eigenschaften vorliegen.

Somit wurde im vorliegenden Bericht auf alle in der Vorhabensbeschreibung aufgeführten KPIs eingegangen und dargelegt, welcher Status bzgl. des Zielwertes erreicht werden konnte.

IV BRENNSTOFFZELLEN STACK (AP 2)

AP Leiter: Bayerische Motoren Werke AG

Arbeitspaket 2 Gesamtziel

Das Gesamtziel im AP 2 ist die Entwicklung, Fertigung und Absicherung effizienter 160 KW-Brennstoffzellen-Stacks¹ mit hoher volumetrischer Leistungsdichte und geringer thermischer Masse für Betriebstemperaturen bis 105 °C sowie einem dynamischen Verspannsystem (Verspann-Einheit), das sowohl übliche Vibrations- und Crash-Lasten aus der Fahrzeugabsicherung kompensiert als auch eine ausreichende Restkompression für Froststarts bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen sicherstellt.

Das übergeordnete Projektziel bezogen auf die Stack-Entwicklung konnte erreicht werden.

- Es wurde ein Zusammenbau (ZB) Brennstoffzellen-Stack gemäß den Fahrzeug- und System- Anforderungen ausgelegt, Komponenten konstruiert und die mechanischen Eigenschaften simuliert. Die wesentlichen Unterkomponenten wurden bei BMW-Inhouse gefertigt, zusammengebaut und getestet.
- Die Zellen, Stromabnehmer und Dichtungen wurden als Zukaufteile (built-to – print) beschafft.
- Die Testergebnisse zeigen, dass die Leistungsziele im System zu 90 % erreicht werden konnten. Aus Einzelzellen-Tests konnte ein Betrieb bei 1000 A nachgewiesen und der Betrieb bei 105 °C Kühlmittel-Austrittstemperatur sichergestellt werden.
- Verbesserungsmaßnahmen für die nächste Stack-Generation wurden abgeleitet.

¹ Die Zellen des Brennstoffzellenstacks, bestehend aus Membran-Elektrodeneinheiten und Bipolarplatten, sind NICHT Bestandteil der Entwicklungsarbeiten im Förderprojekt FaeBS und werden extern beigestellt.

Arbeitspaket 2.1 Auslegung und Konstruktion eines Brennstoffzellen-Stacks

Die Auslegung und Konstruktion der Brennstoffzelle ist ein zentraler Aspekt des Projekts. Hierbei müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, um eine hocheffiziente und zuverlässige Brennstoffzelle zu entwickeln.

Zunächst muss die Zellgeometrie und Zellanordnung optimiert werden, um eine hohe volumetrische Leistungsdichte zu erreichen. Dabei spielen Faktoren wie Strömungsführung, Wärmemanagement und Materialauswahl eine wichtige Rolle.

AP 2.1 Ergebnis

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Spezifikationen des Brennstoffzellen-Stacks und umfangreiche Anforderungen bezüglich der geometrischen Schnittstellen und funktionalen Eigenschaften erstellt. Diese wurden im BMW-internen Anforderungsmanagement-System dokumentiert und an alle Schnittstellenpartner kommuniziert. In einem iterativen Prozess wurden letztlich alle geometrischen und funktionalen Schnittstellen mit den beteiligten Prozesspartnern festgelegt.

Durch die mehr als 12 Schnittstellen zu Peripheriekomponenten, Fahrzeug- und Medienschnittstellen, stellt dies eine besondere Herausforderung dar.

Als Ergebnis ist ein detailliertes Lastenheft entstanden, das als Basis für alle Subkomponenten und interne Bauteile im Stack verwendet wurde. Dieses gibt alle funktionalen Eigenschaften und geometrische Schnittstellen vor sowie Testbedingungen, die für den Nachweis der anforderungsgerechten Ausführung geeignet sind.

Die bestimmenden Anforderungen ergeben sich aus der Gesamtleistung und der Effizienz im verfügbaren Fahrzeug-Bauraum. Die Leistung von 160 kW ist notwendig, um die gewünschten Fahreigenschaften zu ermöglichen und eine Effizienz von > 60 % wird durch die geforderte Reichweite bei gegebenem H₂-Tankvolumen vorgegeben. Anhand von bekannten Zelleigenschaften wurden Leistungspunkte definiert (LP) und Betriebsbedingungen mit allen relevanten Parametern soweit möglich abgeschätzt. Die relevanten Einflussfaktoren auf die Leistung, Effizienz und Lebensdauer der Brennstoffzelle sind Temperatur, Druck, Feuchtegehalt, H₂/O₂-Konzentration, Temperaturdifferenz und Druckdifferenz zwischen der Anoden- und Kathodenseite.

Aus diesen Basisanforderungen ergeben sich erforderliche Gas-Volumenströme, maximal zulässige Druckverluste, Strom-Spannungs-Charakteristiken sowie Anforderungen an die homogene Medienführung über den Stack. Folgende Tabelle 9 listet beispielhaft die Grundanforderungen für die Stack-Auslegung auf.

Tabelle 9: Grundanforderungen für Brennstoffzellen-Stack

Eigenschaft	Anforderung/Wert	Einheit
Leistung	160	kW
Volumetrische Leistungsdichte	> 5,5	kW/l
Zellspannung bei P _{max}	0,66	V
Betriebstemperatur (Kühlmittelausgang)	≤ 105	°C
Druckdifferenz zwischen Anoden- und Kathodenseite	≤ 1	bar
Wasserstoff-Konzentration am Eintritt	> 70	%
Sauerstoff-Konzentration am Austritt	> 5	%
Feuchtgehalt Luft-Ein	30 - 70	%
Mediengleichverteilung	± 2	% vom Mittelwert
Anodendruck	268	kPa
Luftmassenstrom	130	g/s
Kathodendruckverlust	< 650	mbar
Beschleunigungslasten	500	m/s ²
Vibrations- und Schockbelastungen	Erfüllung BMW Standard GS 95024-3-1	-

Die Anforderungen im Lastenheft können nicht alle geometrischen Merkmale in Textform zusammenfassen. Dazu sind CAD-Modelle und Schnittstellendefinitionen notwendig, die nur iterativ und in Abstimmung mit allen Schnittstellepartnern erarbeitet werden können. Die wichtigste Voraussetzung für die Integration einer Brennstoffzelle im Fahrzeug ist die Bauraum-Kompatibilität im Vorderwagen unter Berücksichtigung aller Karoserie-Anbindungspunkte und Schnittstellen zu den Peripheriekomponenten. Dabei sind auch Aspekte zu berücksichtigen, die beispielsweise die Hochvoltsicherheit und Crash-Konformität betreffen. In einem iterativen Prozess ist ein Design-Modell erarbeitet worden, das alle Package-Randbedingungen sowohl geometrisch als auch funktional erfüllt.

Anschließend wurde das „grobe“ Design-Modell ausdetailliert und fertigungsgerecht konstruiert. Für alle Komponenten wurden entsprechende Zeichnungen erstellt und mit Merkmalen versehen, die für die Herstellung unerlässlich sind. Abbildung 23 zeigt eine Explosionsdarstellung des 3D-Modells für den ZB Stack.

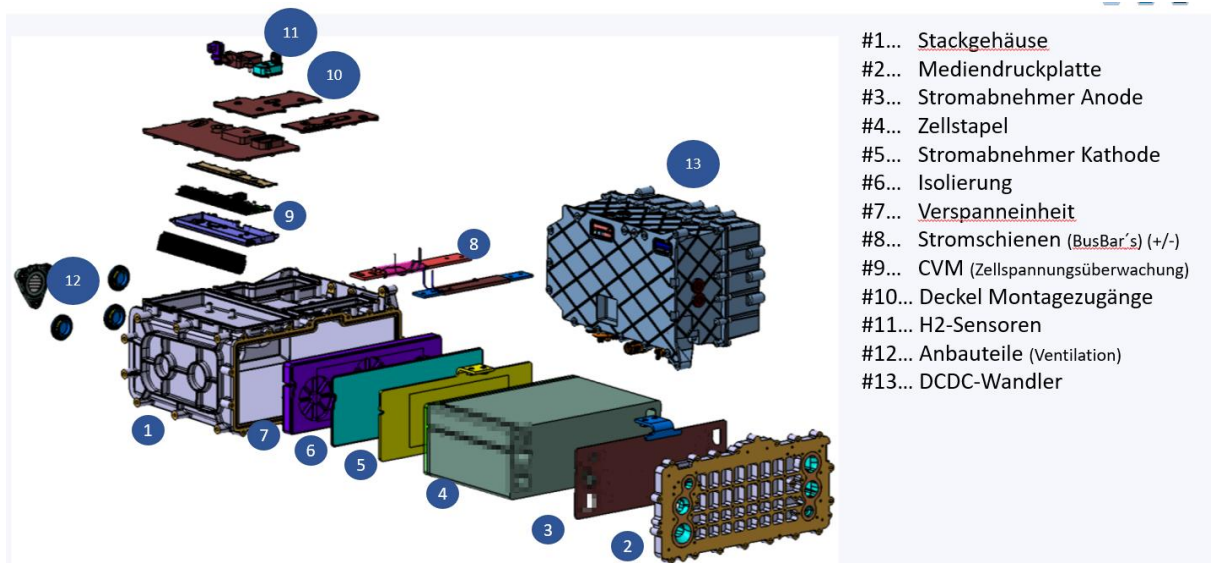


Abbildung 23: Screen-shot aus dem 3D-Modell des Brennstoffzellen-Stacks als Explosionsdarstellung. Dargestellt ist auch der DC/DC-Wandler zur Einordnung der Systemkonfiguration.

Die Anforderungen wurden im Lastenheft so definiert und die Konstruktion der Bauteile derart ausgeführt, dass der KPI 2.1 (volumetrische Leistungsdichte $> 5,5 \text{ kW/l}$) erreichbar ist. Mit einem Stack-Volumen von ca. 20 Liter bezogen auf das Zellpaket von Stromabnehmer (minus) bis Stromabnehmer (plus) und einer Nominalleistung von 160 kW, ergibt sich eine volumetrische Leistungsdichte von 8 kW/l . Selbst mit einer reduzierten Maximalleistung von 140 kW wird der Zielwert von $5,5 \text{ kW/l}$ deutlich übertroffen. Auf ZB Stack Niveau ergibt sich ein Gesamtvolumen von ca. 35 Liter, worin auch Verspann-Einheit und Gehäuseleervolumen enthalten sind. Daraus kann eine volumetrische Leistungsdichte von $4,6 \text{ kW/l}$ berechnet werden. Das zeigt deutlich, dass sich die Verspann-Einheit ungünstig auf die Stack-Leistungsdichte auswirkt. Für zukünftige Designs muss also auf eine kompaktere Bauweise der Federelemente geachtet werden. Unter bestimmten Umständen kann diese möglicherweise komplett entfallen, wenn durch andere Maßnahmen sichergestellt werden kann, dass die Kompressionskraft auf das Zellpaket unter allen Betriebsbedingungen ausreichend hoch ist. Also eine Mindestkompression für die H₂-Dichtheit auch bei -35°C aufrechterhalten werden kann.

Neben der geometrischen Stimmigkeit musste auch sichergestellt werden, dass die funktionalen Eigenschaften wie Mediengleichverteilung innerhalb der erforderlichen Grenzwerte liegen. Vor einer Freigabe für die Fertigung der Bauteile wurden zu diesem Zweck Simulationsrechnungen durchgeführt und die prinzipielle Erfüllung der mechanischen Anforderungen sowie der Mediengleichverteilung nachgewiesen. Dazu gehört z.B. die Finite-Elemente (FEM)-Berechnung für die MDP, deren Ergebnis in Abbildung 24 dargestellt ist.

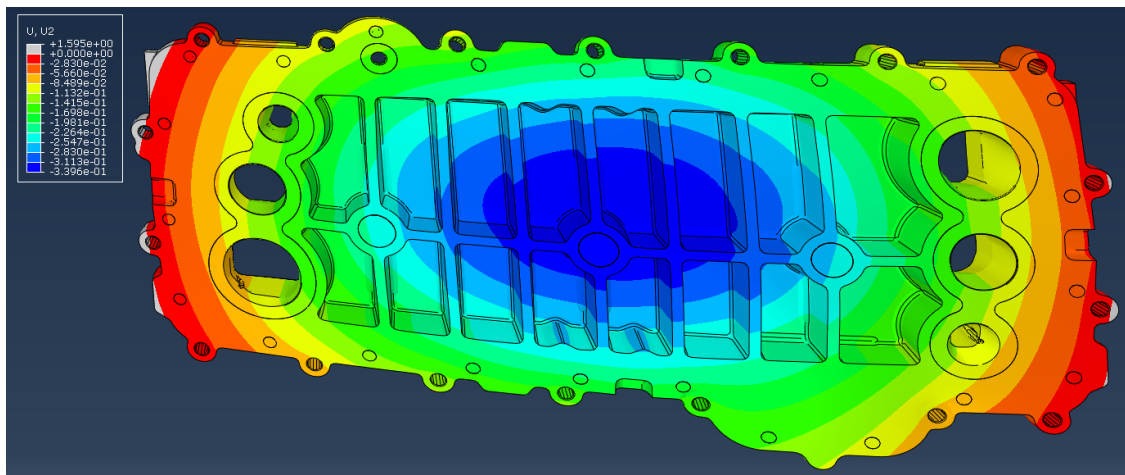


Abbildung 24: FEM-Berechnung der Mediendruckplatte. Eine maximale Verformung von 0.5 mm ist zulässig.

Eine Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb der Brennstoffzelle ist die homogene Medienverteilung, insbesondere auf der H₂-Seite. Abbildung 25 zeigt das Simulationsmodell für die Strömungssimulation als CFD-Berechnung unter Berücksichtigung der Ein- und Auslassrohre der Peripheriekomponenten zum Zellpaket. Das Ergebnis bestätigt die Einhaltung der Anforderung einer maximalen Spreizung von +/- 2 % vom Mittelwert der Medienversorgung entlang der Zellen.

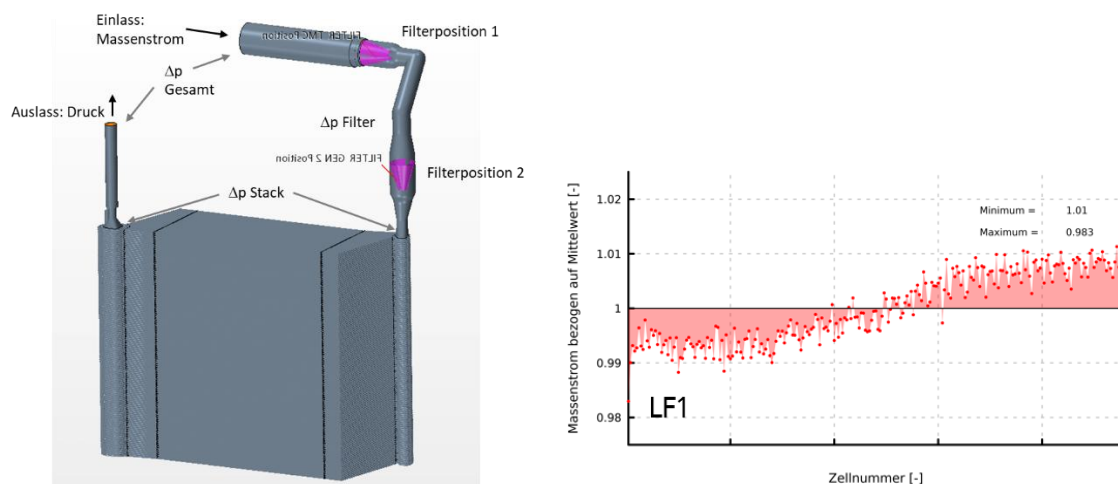


Abbildung 25: Simulationsergebnis der Zell- zu Zellvariation entlang des Brennstoffzellen-Stacks. Links ist das „vernetzte“ Simulationsmodell visualisiert. Rechts die Verteilung der Medien entlang der Zellen im Zellpaket als Abweichung vom Mittelwert.

Die Eigenschaften der Verspann-Einheit wurden vor der Fertigstellung bezüglich der Feder-Kennlinie berechnet und die Federelemente entsprechend den Ergebnissen ausgewählt. Abbildung 26 zeigt das Ergebnis der Auslegungskennlinie und der berechneten Feder-Kennlinie, welche anhand der Spezifikationsblätter einzelner Federelemente beschrieben wurde.

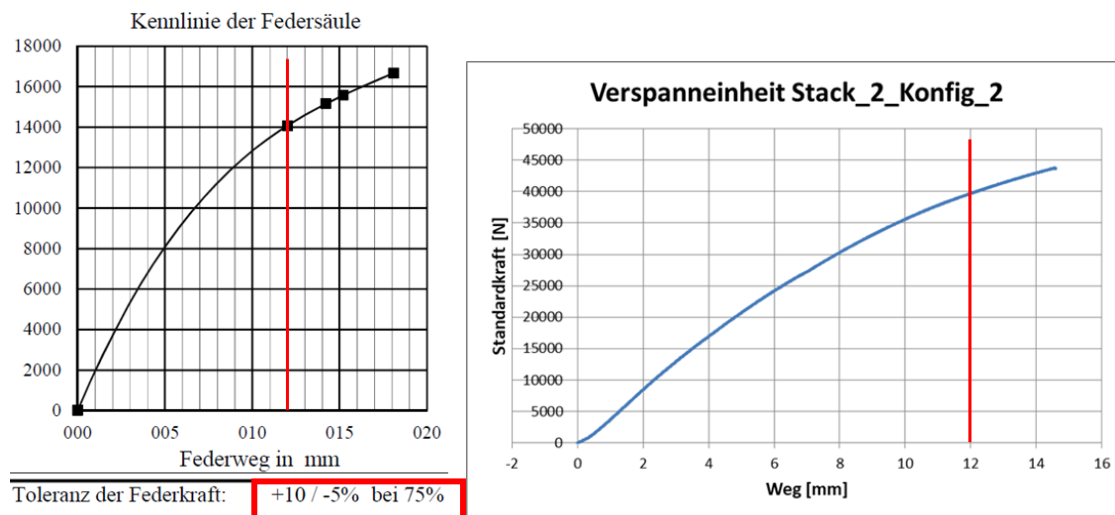


Abbildung 26: Berechnung der Federkennlinie für die Verspann-Einheit, aufgetragen als Kraft-Weg-Diagramm.

Aus der Kennlinie wurden eine konkrete Bauteilauslegung und Detailkonstruktion abgeleitet, wie z.B. die erforderliche Anzahl an Tellerfedern und die Form der Druckplatten. Abbildung 27 zeigt die Verspann-Einheit als Explosionsdarstellung, wie sie in der Montageanleitung beschrieben ist.

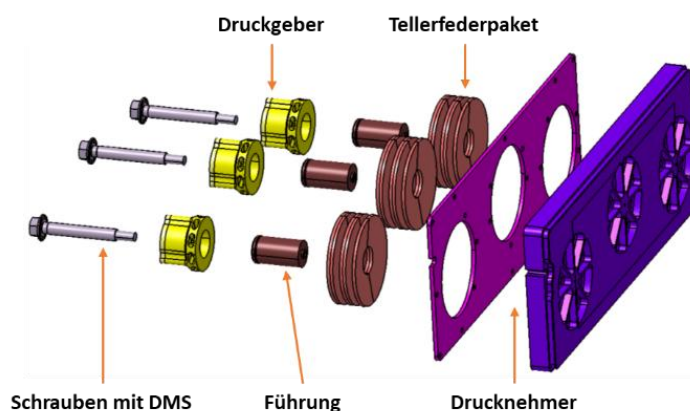


Abbildung 27: Explosionsdarstellung der Verspann-Einheit mit einzelnen Bauteilen.

Auch für die Busbars (Stromschienen) wurden verschiedene Konzepte bewertet und die geeignetste Variante für die Umsetzung entschieden. Die Hauptanforderungen bezüglich dieser Komponente sind

- Verlustarme Leistungsabgabe von Stack zu DCDC
- Flex-BusBar: dynamischer Längenausgleich (resultierend aus Alterung sowie Betriebszuständen)

Die Herausforderung dabei ist, dass ein Strom bis zu 1000 A kontinuierlich und ungekühlt durchgeleitet werden muss, ohne dabei zu viel Wärme abzugeben. Abbildung 28 zeigt das 3D-Modell der Ausführungsvariante für das Konzeptmuster.

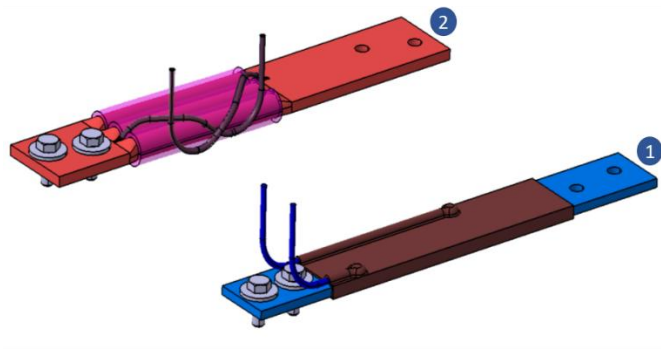


Abbildung 28: 3D-Modell der beiden Busbars (plus) und (minus) mit Messleitungen für den Prüfstand.
1. Starre Busbar, 2. Flexible Busbar für den Ausgleich der Längentoleranzen im Betrieb.

Eine weitere Herausforderung im Betrieb einer Brennstoffzelle ist die Temperaturbeständigkeit verschiedener Materialien wie Dichtungen, Membranen, Katalysatoren und Klebstoffen. Die mögliche Wärmeentwicklung an den Busbars unter den gegebenen Randbedingungen, wurde daher von der Partnerfirma Zollner über ein Simulationsmodell abgeschätzt, um die Grenzwerte für Strom, Kühlmitteltemperatur und den Dauerbetrieb zu ermitteln. Abbildung 29 zeigt ein Simulationsergebnis, für die Busbar in Verbindung mit dem DCDC-Wandler.

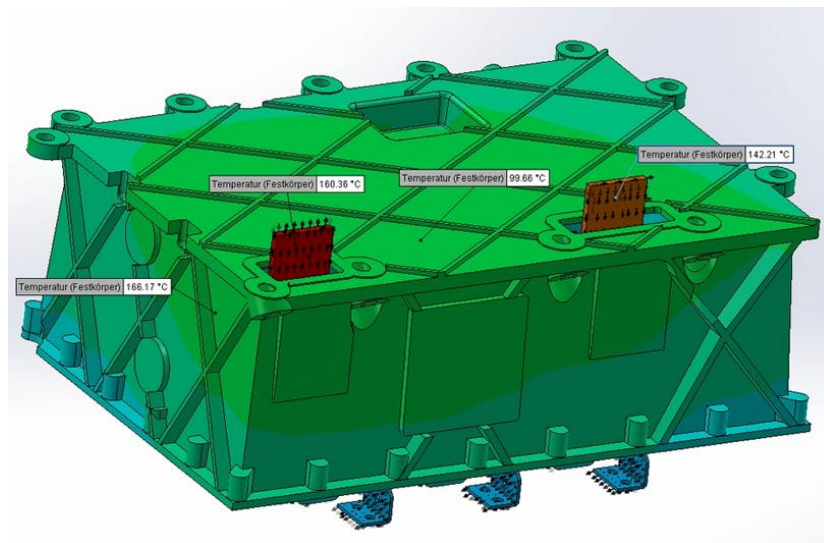


Abbildung 29: Simulationsergebnis der möglichen Wärmeentwicklung bei 1000 A und 105 °C Umgebungstemperatur über Busbar und DC/DC-Wandler.

Das Ergebnis der thermischen Simulation hat gezeigt, dass der Wärmeeintrag in den Stack maximal 2 bis 3 K beträgt, was als unkritisch eingeschätzt wird. Es besteht jedoch Optimierungspotenzial bezüglich der Querschnitte an den Kontaktflächen zum Stromabnehmer und der Anbindung an Kühlflächen, falls dies im eingeschränkten Bauraum untergebracht werden kann.

Nach erfolgreicher Konstruktion aller Bauteile wurde anhand einer virtuellen Baugruppe eine Montagereihenfolge festgelegt. Die Montageanleitung beinhaltet alle Sachnummern, die für den Zusammenbau benötigt werden in der richtigen Reihenfolge und Position. In der Stückliste werden beispielsweise auch die Schraubfälle aller Verbindungselemente beschrieben (Drehmoment, Drehwinkel, etc.). Die Reihenfolge der Prozess-Schritte ist wie folgt.

- Montagereihenfolge

1. Adapterplatte auf Presse legen (gleichzeitig für Leakage-Test)
2. Medienplatte einführen
3. Positionierung der Referenzschienen
4. Stromabnehmer Medienseite einlegen
5. Stapeln der Zellen entlang der Führungsschienen
6. Stromabnehmer medienabgewandte Seite einlegen
7. Isolationsfolien einbringen
8. Verspann Einheit auflegen
9. Kompression auf Zielkraft einstellen
10. Überstreifen des Gehäuses
11. Verschrauben Gehäuse an der Medienplatte
12. Lastübertrag von Presse zu Stack zulassen (Presse entlasten)

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse aus dem AP 2.1 erarbeitet worden.

- Spezifikationsblätter und Lastenhefte für alle Subkomponenten des Brennstoffzellen-Stacks.
- 3D-Modelle, Stücklisten und Zeichnungen des Stack und seiner Subkomponenten sind erstellt worden. Verschiedene Ausführungsvarianten einzelner Komponenten sind bewertet und jeweils ein Zieldesign entschieden worden.
- Montageanleitung und Liste für besondere (sicherheits- und gesetzesrelevanter) Merkmale wurden zur Durchführung verwendet.
- Simulationsergebnisse zur Medien- und Temperaturverteilung liegen vor.

Arbeitspaket 2.2 Fertigung und Stack-Montage

Aufbauend auf den Ergebnissen von AP 2.1 wurden die Hauptkomponenten Stack-Gehäuse und Mediendruckplatte (MDP) bei BMW im Hause gefertigt. Verspann-Einheit und Druckplatten wurden im Auftrag als „built-to-print“-Komponenten nach Zeichnung extern gefertigt. Die Stückliste enthält insgesamt 80 Sachnummern, sodass auch ein nicht unerheblicher logistischer Aufwand mit der Stack-Fertigung und Montage verbunden war.

Abbildung 30 zeigt beispielhaft das gedruckte Aluminium-Sandguss Werkzeug, das intern für die Gehäusefertigung verwendet wurde.

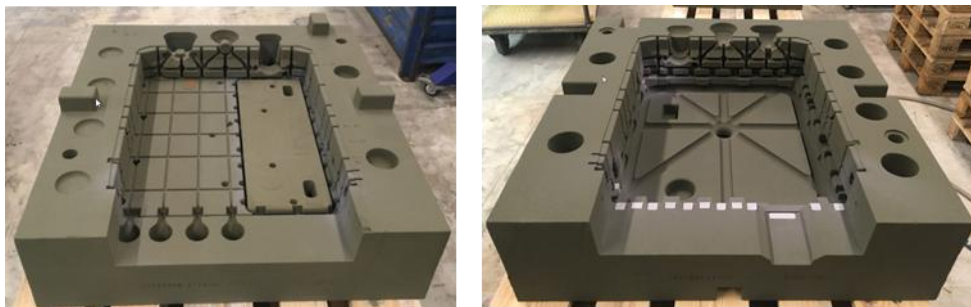


Abbildung 30: Darstellung eines 3D-Sandkerns zur Herstellung des Brennstoffzellen-Gehäuses.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt das Gehäuse, welches mithilfe dieser gedruckten Werkzeuge hergestellt wurde. Die MDP, die hier abgebildet ist, wurde angesichts der geringen Stückzahl der Prototypen aus Kostengründen als Frästeil ausgeführt.

Der Stack wurde BMW-Intern auf Basis einer ausführlichen Montageanleitung zusammengebaut und getestet. Die Montageanleitung beinhaltet alle Sachnummern mit Abbildungen und Schritt-für-Schritt Anleitung für den Zusammenbau.

Die eigentliche Montage aller Einzelteile zu einem Zusammenbau ZB Stack wird in einem Sauberraum unter Zuhilfenahme einer Presse durchgeführt. Die Presse ist notwendig, um die Zellen zu komprimieren und somit die Dichtigkeit aller Medienräume sicherzustellen und einen geringen elektrischen Übergangswiderstand von Zelle zu Zelle zu ermöglichen. Nach der Verpressung wird der Druck mit Hilfe der Verspann-Einheit aufrechterhalten (Abbildung 31). Abbildung 32 zeigt die gestapelten Zellen (Stack) im entspannten Zustand. Darüber wird nach dem Verpressen anschließend das Gehäuse geschoben und mit der MDP verschraubt (Abbildung 32).

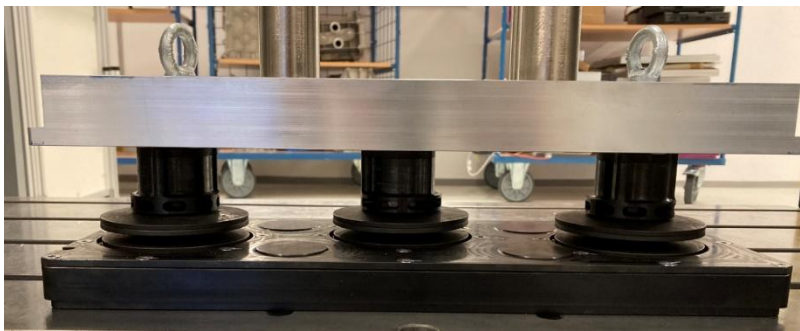


Abbildung 31: Foto-Dokumentation der Verspann-Einheit mit drei Zylindern, die jeweils vier Federelemente enthalten. Die Aluminium-Adapterplatte (Silberfarben) dient zur Kompression während der Montage.

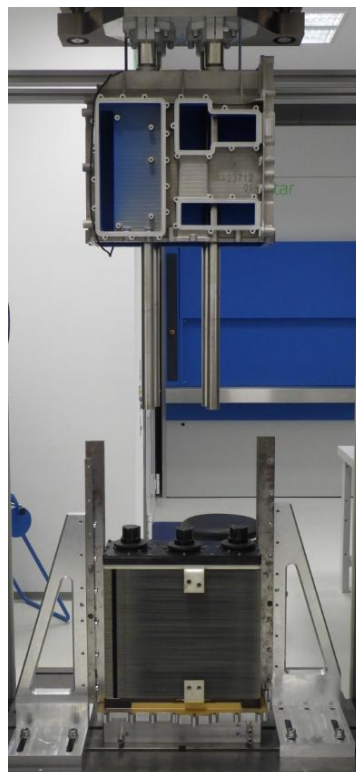


Abbildung 32: Zellstapel (unten mit Führungsschienen) mit hängendem Gehäuse bereit zum verpressen.

Nach erfolgter Dichtheitsprüfung kann der Stack aus dem Sauberraum entfernt und zu einem geschlossenem Prüfling komplettiert werden. *Abbildung 33* zeigt den Stack im komplettierten Zustand auf einem Prüfstands-Gestell, bereit für die Inbetriebnahme.

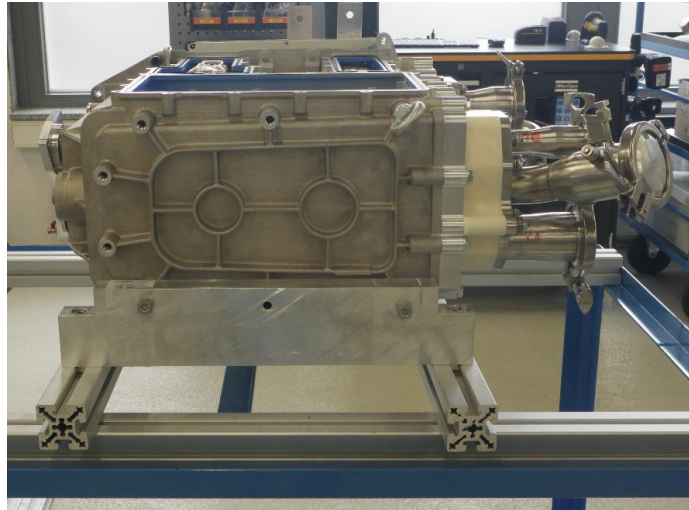


Abbildung 33: Brennstoffzellen-Stack im Prüfstands-Gestell mit Schnittstellen zur Medien-Anbindung.

Alle Bauteile sind mittels Herstellverfahren gefertigt worden, die eine Industrialisierung für die Produktion in großen Stückzahlen ermöglichen. Das Gehäuse wurde beispielsweise mittels eines Sandguss-Verfahrens hergestellt. Alternativ kann für große Stückzahlen auch ein Druckgussverfahren angewendet werden, da das Design beide Herstellverfahren erlaubt. Die MDP wurde aufgrund der geringen Stückzahl gefräst, das Design ist jedoch auch hier für Sandguss- oder Druckgussverfahren ausgelegt. Die Kunststoffummantelung in der MDP wurde im Spritzgussverfahren hergestellt. Die Zellen wurden extern beschafft und stammen aus einer seriennahen Pilotanlage. Daher ist die Einstufung der Stack-Bauteile auf TRL 6 gerechtfertigt.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse aus dem AP 2.2 erarbeitet worden.

In-House-Fertigung der Stack-Subkomponenten sowie die Stack-Montage ist abgeschlossen. Montageuntersuchung und Bewertung zur Automatisierung für zukünftige Serienfertigung ist erfolgt. Anweisungen zur Qualitätssicherung für einzelne Montageschritte sowie für die Qualitätskontrollen und Sicherheitsabnahmen (Hochvolt und Wasserstoff) liegen vor.

Arbeitspaket 2.3 Test und Absicherung zur Konzeptbestätigung

Nach erfolgreicher Montage wurden die Stacks auf Dichtigkeit geprüft und einem Hochvolt-Sicherheits-Test unterzogen. Im SAT (Site Acceptance Test) konnte die H₂- und HV-Sicherheit nachgewiesen werden und der Stack für die Leistungstests am Komponenten-Prüfstand freigegeben werden. Der elektrische Leistungstest wurde wie geplant bei der Firma Energietechnologie GmbH (ET) durchgeführt. Nach erfolgreicher Charakterisierung konnten die Stacks für die Weiterverwendung im System zur Verfügung gestellt werden.

Der Stack wurde am Komponenten-Prüfstand anhand von Leistungskurven unter verschiedenen Betriebsbedingungen charakterisiert. Insgesamt wurden alle aus dem Lastenheft vorgegebenen Lastpunkte 1 (LP1) bis LP12 angefahren, um die spezifizierte Effizienz anhand der Strom-Spannungs-Wertepaare in Verbindung mit dem H₂-Verbrauch nachzuweisen. Zu diesem Zeitpunkt war die elektrische Leistung des Prüfstands auf 800 A limitiert, sodass keine Maximalleistung eingestellt werden konnte, die bei einem Strom von 1000 A definiert ist. Der Nachweis der Stack-Maximalleistung war daher im Systemverbund geplant. Nach erfolgreicher Systemintegration und Inbetriebnahme wurde der Stack im FCS über das gesamte zulässige Betriebsfenster getestet. Die hierbei erreichte Stack-Leistung betrug 140 kW unter den durch das System vorgegebenen Randbedingungen der H₂- und Luftversorgung, Gesamtdruckverlust und Temperaturverteilung.

In *Abbildung 34* sind die Messsignale aus den Prüfstandsmessungen übersichtlich dargestellt. Die Messwerte an einem definierten Zeitpunkt mit der Bezeichnung 1 - 6 entsprechen dabei

- 1) Stromwert = 960 A,
- 2) Mittlere Zellspannung = 146 V,
- 3) Luftmassenstrom = 130 g/s,
- 4) Bypass-Stellung (Befeuchterdurchströmung) = 90 %,
- 5) Kühlmittel-Austrittstemperatur = 82 °C,
- 6) Anodendruck = 268 kPa.

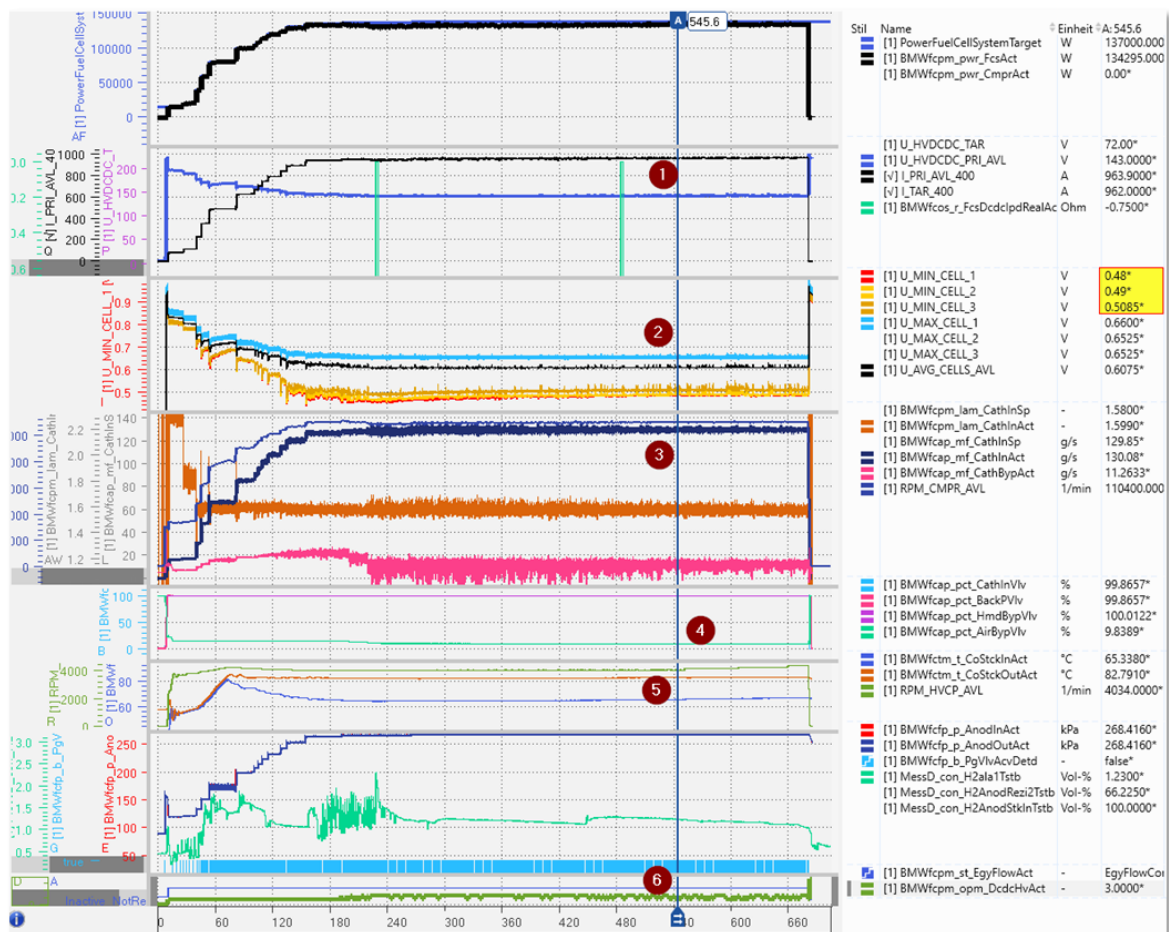


Abbildung 34: Messsignale des Stacks am Systemprüfstand, 1 Strom, 2 Spannung, 3 Luftmassenstrom, 4 Befeuchterdurchströmung, 5 Temperatur, 6 Anodenseitiger Arbeitsdruck.

Mit der hier gezeigten Stack-Maximalleistung von 140 kW am Systemprüfstand konnte das Leistungsziel von 160 kW zu 90 % nachgewiesen werden. Aus Short-Stack-Tests (4-Zeller), die an einem speziellen Prüfstand bei 1000 A betrieben werden konnten, konnte jedoch extrapoliert werden, dass in einem Stack in der vorliegenden Konfiguration durchaus 160 kW darstellbar sind, sofern Luft- und H₂-Versorgung bei Einhaltung vorgegebener Druckverluste wie spezifiziert zugeführt werden. Das Ziel **KPI 2.2** wird damit als erfüllbar eingeschätzt.

Die Hauptursache für die beobachtete Limitierung der Maximalleistung ist der unerwartet hohe Druckverlust auf Anoden- und Kathodenseite, wodurch beispielsweise keine ausreichende Luftversorgung eingestellt werden konnte, die einen Strom von 1000 A stabil aufrechterhalten kann. *Abbildung 35* zeigt das geforderte Betriebsfenster LP1 - LP12 bezogen auf elektrische Leistung bei gegebener Betriebstemperatur. Hervorgehoben ist der bestätigte Arbeitsbereich.

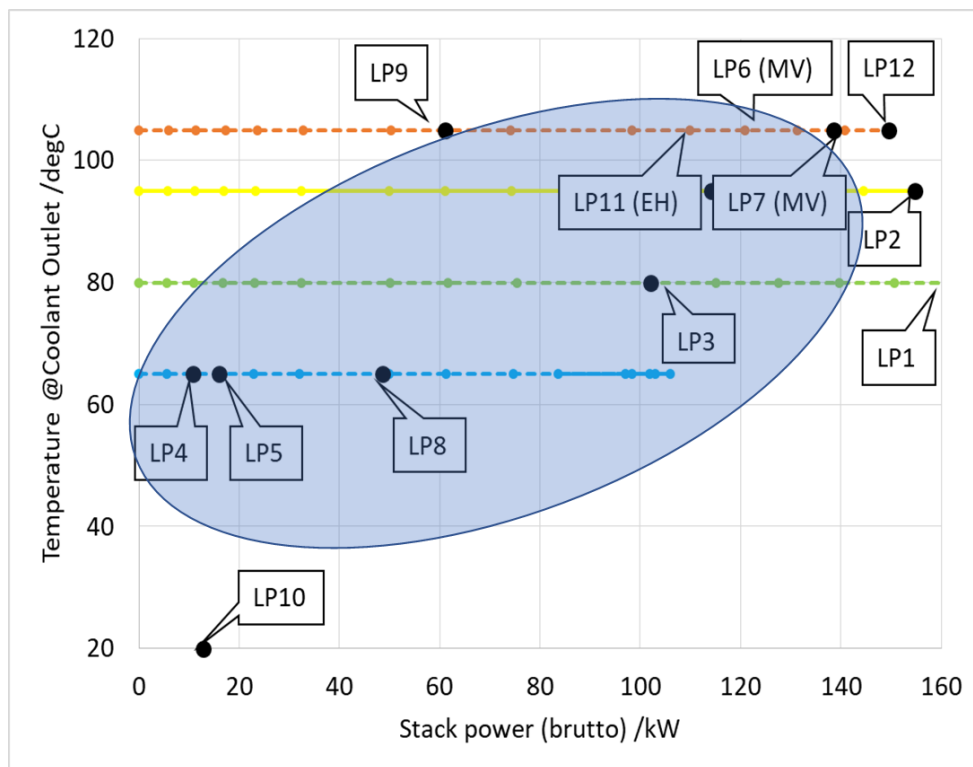


Abbildung 35: Geforderte Lastpunkte (LP) von LP1 – LP12. Das erreichte Betriebsfenster ist blau eingekreist.

Eines der wichtigsten Entwicklungsziele war der stabile Hochtemperaturbetrieb bis zu einer Kühlmittelaustrittstemperatur von 105 °C. Diese Anforderung ist dem Umstand geschuldet, dass die Wärmeabfuhr im Fahrzeug limitiert ist und die abgeführte Wärmemenge sehr stark vom Temperaturunterschied zwischen Betriebstemperatur und Umgebungstemperatur abhängt. Einige kundenrelevante Fahrprofile wie z.B. Bergfahrten können unter Umständen nicht erfüllt werden, wenn die Betriebstemperatur deutlich unter 100 °C beschränkt wird. Der Stack-Betrieb bei 105 °C konnte am Prüfstand mehrfach und stabil nachgewiesen werden. Damit ist auch **KPI 2.3** vollständig erfüllt.

Parallel zu den elektrischen Tests wurde die mechanische Absicherung durch Schock- / Vibrationstests durchgeführt. Die mechanischen Tests nach BMW Group Standard 95024-3 umfassten Breitbandrauschen, Resonanzsuchlauf, Vibrationsprüfung und mechanischen Schock. Die geplante Abfolge der Tests in X-, Y- und Z-Richtung musste aufgrund von Prüflingsschäden angepasst werden, wobei die Z-Richtung vorgezogen wurde. Die Erkenntnisse aus dem Shaker-Versuch zeigen die Notwendigkeit einer Abstützung des Zellstapels in sämtlichen Raumrichtungen und die Notwendigkeit konstruktiver Anpassungen an der Verspann-Einheit. *Abbildung 36* zeigt den Prüfling in der Prüfkammer mit entsprechender Haltevorrichtung und Beschleunigungssensoren.



Abbildung 36: Versuchsaufbau für Vibrations-Tests nach BMW Group Standard GS 95024-3-1. Stack mit Haltevorrichtung und Beschleunigungssensoren.

Abbildung 37 visualisiert die geforderten Testprofile, die standardmäßig abgeprüft werden.

- Breitbandrauschen:
 - Resonanzsuchlauf: 5-20 0Hz (relevanter Frequenzbereich)
 - Vibrationsprüfung: 8 h in jede Raumrichtung
 - Erneuter Resonanzsuchlauf nach jeder Raumrichtung als Abgleich
- Mechanischer Schock:
 - 50 g / 6 ms +/-10 mal je Raumrichtung

Tabelle 62: Prüfparameter M-05 Mechanischer Schock

Betriebsart des Prüflings	Falls die Komponente im Fahrbetrieb mit Betriebslast betrieben wird: II.c im Betriebsmode Fahrbetrieb Falls die Komponente im Fahrbetrieb nicht mit Betriebslast betrieben wird: II.a
Spitzenbeschleunigung	500 m/s ²
Schockdauer	6 ms
Schockform	Halbsinus
Anzahl Schocks je Richtung (±X, ±Y, ±Z)	10
Anzahl der Prüflinge	6

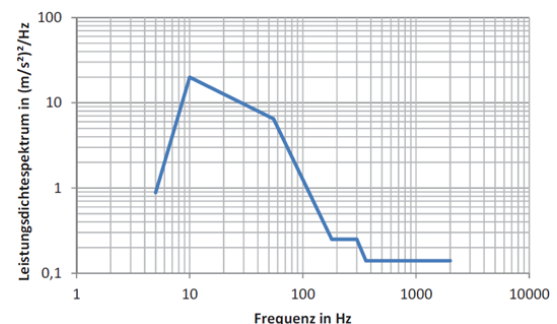


Abbildung 37: Testprofil nach BMW Group Standard GS 95024-3-1.

Das Versuchsergebnis hat gezeigt, dass sowohl Gehäuse als auch die gewählte Isolationsschicht robust gegenüber mechanischen Betriebslasten ausgeführt worden sind. Folgende Abbildung zeigt die intakte Isolationsschicht (blau), die auf der Gehäuseinnenseite für die Hochvolt-Isolation aufgebracht wurde. Selbst nach leichter mechanischer Beschädigung wird die Funktion mit einem Widerstandswert $> 100 \text{ M}\Omega$ bei einer Prüfspannung von 3000 V sichergestellt.

Es wurden jedoch auch Defizite in der Ausführung der Verspann-Einheit offengelegt. Es konnte eine Relativbewegung des Druckgebers in Richtung Gehäusewand beobachtet werden, die zu einer gebrochenen Stützschraube geführt haben. Diese stützt die Federelemente gegen das Gehäuse ab. *Abbildung 38* zeigt einen Teil der Federelemente mit der gut sichtbaren abgescherten Schraube. Auf der rechten Seite dieser Abbildung ist die noch intakte Isolationsschicht dargestellt.

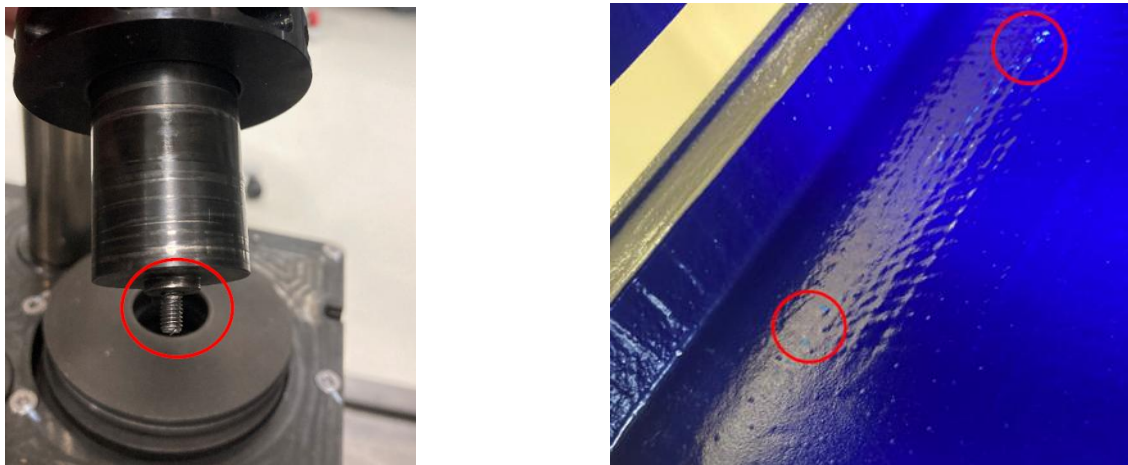


Abbildung 38: Links, gebrochene Schraube im Federpaket der Verspann-Einheit nach Vibrationstest (rot umkreist). Rechts, blauer Isolationslack mit nur leichten Kratzspuren nach dem Vibrationstest.

Die sehr anspruchsvolle Anforderung an die Stack-Verspann-Einheit folgt aus den im Fahrzeug erwarteten Beschleunigungslasten von 50 G in alle Raumrichtungen. Alle relevanten Komponenten wie Tellerfedern, Führungszylinder und Anpressflächen wurden auf diese Betriebslasten hin ausgelegt. Während des Schock-/Vibrationstests auf Stack-Komponentenebene ist, wie oben beschrieben, durch (untypische) Scherkräften die Fixierung der Tellerfedern an einer Stelle abgebrochen. Diese Schwachstelle kann leicht durch geeignete Kunststoffeinleger behoben werden, die die Kompressionsplatte gegen das Gehäuse abstützen. Diese Maßnahme ist bereits als „lessons learned“ in die nächste Entwicklungsgeneration eingeflossen. Aus Termingründen konnte die Maßnahme jedoch nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden. Der Wirksamkeitsnachweis und damit die Erfüllung **KPI 2.4** ist

aktuell nur auf Basis der Simulationsrechnungen als zielführend zu bewerten und mit geeigneten Abstützmaßnahmen als umsetzbar einzuschätzen.

Auf Basis der Arbeitsergebnisse aus diesem Arbeitspaket wurden Optimierungsmaßnahmen im Rahmen eines Lessons-Learned Workshops erarbeitet. Die wichtigsten sind:

Erhöhung der Leistung und Effizienz im System:

- Re-Design der Gasverteilung zur Erniedrigung des Druckverlusts im Zellpaket.
- Homogenere Verteilung der Reaktanten innerhalb der Zellen.
- Einsatz aktiverer Katalysatoren (z.B. Pt-Legierungen), abhängig von der Auswahl des Zell-Lieferanten.
- Optional, abhängig vom Kosten/Nutzen-Verhältnis: Erhöhung der Anzahl Zellen.

Optimierte mechanische Stabilität:

- Abstützung des Zellpakets, um Relativbewegungen entgegenzuwirken.
- Anpassung der Verschraubung der Federführung.
- Anpassung des Kontaktbereichs der Druckschraube zum Druckgeber.
- Gegebenenfalls Erhöhung der Anpresskraft.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse aus dem AP 2.3 erarbeitet worden.

- Konzeptbestätigung der Leistungsanforderungen und der Degradationsraten.
- Konzeptbestätigung der mechanischen Auslegung für Betriebslasten (Schock, Vibration).
- Lessons-Learned-Übertrag auf nächste Design-Schleife Richtung Serienreife.

V MEMBRANBEFEUCHTER (AP 3)

AP Leiter: Mann+Hummel GmbH

Fertigung Prototypen

Um der Brennstoffzelle genügend Luft zuführen zu können, wird die saubere Luft im Kompressor verdichtet und anschließend gekühlt. Für den optimalen Betrieb der Brennstoffzelle ist eine ausreichende relative Luftfeuchtigkeit erforderlich. Ist die Ansaugluft zu trocken, wirkt sich das negativ auf z.B. die Leitfähigkeit der Protonenaustauschmembran im Brennstoffzellen-Stack aus. Der Luftbefeuchter reichert deshalb, je nach Betriebszustand, die Kathodenzuluft mit Prozesswasser aus der Abluft der Brennstoffzelle an und erhöht so die Feuchtigkeit.

Generell ist der Aufbau des Befeuchters ähnlich dem einer Brennstoffzelle. Eine Vielzahl von Membranlagen werden so gestapelt, dass zwei Kreisläufe ausgebildet werden: die zu befeuchtende Frischluft und die feuchte Luft der Abgasseite.

Die semi-permeablen Membranen werden jeweils auf der einen Seite von der feuchten und auf der anderen Seite von der trockenen Luft angeströmt. Das Konzentrationsgefälle der relativen Feuchtigkeit sorgt, ohne Einsatz von zusätzlich benötigter Energie, für den Feuchteübertrag.

Die Anzahl der Lagen und somit die zu verbauende Membranfläche ergibt sich aus der Leistungsanforderung der zu befeuchtenden Brennstoffzelle. Hierbei sorgt das Flachmembrankonzept für einen geringen Druckverlust.

Für das FaeBS Projekt wurde ein gehäuseloses Konzept gewählt. Dabei werden metallische Wannen ausgeformt, in welche die mit Elastomer umspritzten Membranen eingelegt werden. Des Weiteren sind Abstützgitter zwischen den einzelnen Membranlagen zu positionieren. Mit Endplatten versehen, wird der gestapelte Befeuchter-Stack mittels Zugankern dichtend verklemmt. Die Anschlussplatten zur Verschlauchung und Befestigung am Systemaufbau werden mittels Dichtungen und Schrauben an die Endplatten angebracht. Zusätzlich ist in dieser Anwendung ein Wasserabscheider im Abgasstrang an der Anschlussplatten zu integrieren.

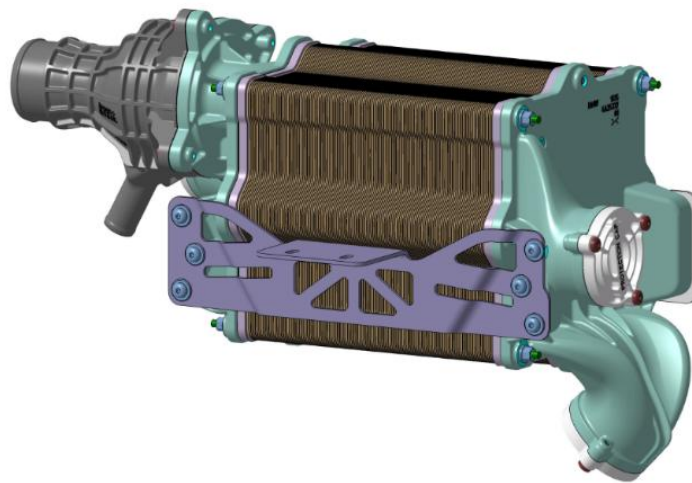


Abbildung 39: Befeuchter mit vorgeschaltetem Wasserabscheider.

Es ist bevorzugt eine quadratische Ausführung der Lagen zu wählen. Somit können je Lage Gleichteile verwendet werden, welche bei Aufbau durch eine 90° Drehung das Zweikammersystem ausbilden.

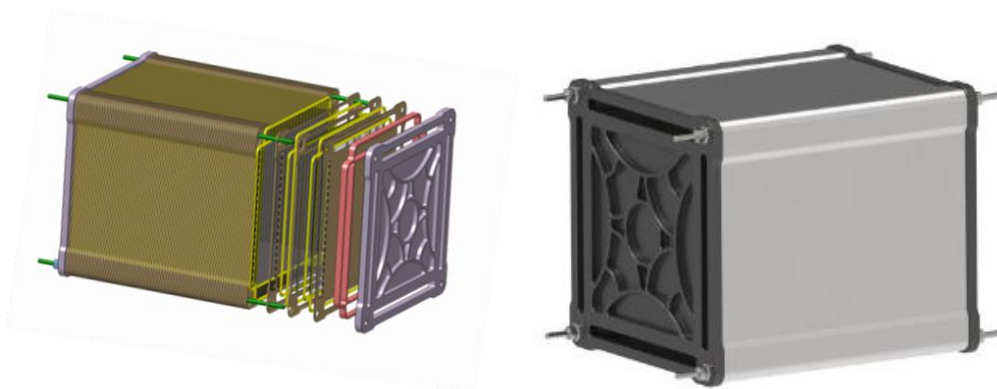


Abbildung 40: Aufbau eines Befeuchter-Stacks.

Die metallischen, tiefgezogenen Edelstahlwannen beinhalten Anschlagsnoppen, um zu gewährleisten, dass nach Anzug die Lagen konstante Abstände aufweisen. Des Weiteren beinhalten sie jeweils zwei federnden Laschen mit Durchbrüchen, welche nahezu toleranzunabhängig zwei Seiten einer Membran gegen die darauffolgende Wanne dichtend andrücken.

Durch die Durchbrüche strömt Luft in den Membranbereich ein und gegenüberliegend in den Sammelkanal wieder aus. In den benachbarten Lagen mündet die Luft unter 90° in den Membranbereich. Somit entsteht in dem Zweikammersystem ein Kreuzstrom, welcher zum effizienten Wasserübertrag beiträgt.

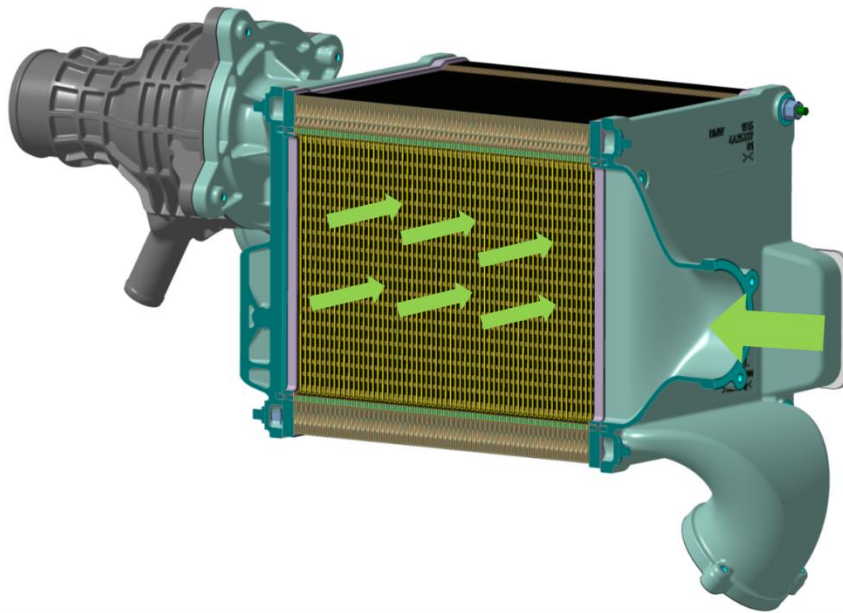


Abbildung 41: Durchströmung durch einen Befeuchter-Stack.

Durch die Stapelung der Lagen entstehen die vier Sammelkanäle für Lufteinlass (feucht und trocken) und Auslass.

Der Vorteil von Federstahl ist, dass unter Temperatureinfluss auf Dauer das Material formstabil und die Federlaschen konstant elastisch bleiben. Die chemischen Eigenschaften begünstigen den Einsatz dieses Materials.

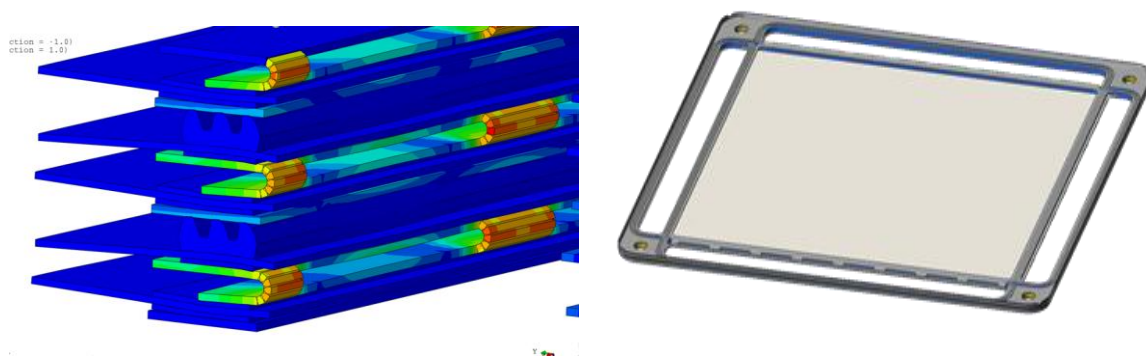


Abbildung 42: mechanische Belastung der Federlaschen (links); kompletter Edelstahlrahmen (rechts).

Nach Qualifizierung mehrerer Membranen, unter anderem bei dem Entwicklungspartner TU München, wurden mit einem provisorischen Werkzeug erste Versuche durchgeführt. Hierbei ging es darum herauszufinden, inwieweit bestimmte Elastomere sich auf die Membrane anspritzen, bzw. die Randbereiche umspritzen lassen. Es folgten Untersuchungen zur Festigkeit des Verbundes, möglicher Kontaminierung der

Membranen durch den Prozess sowie möglicher mechanischer Schädigung der Membranen durch die Abdichtgeometrien im Werkzeug.

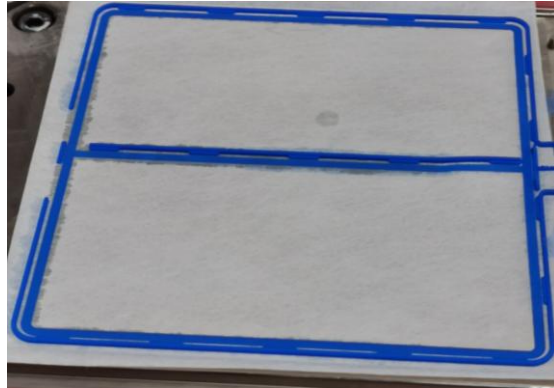


Abbildung 43: Membran mit angespritzter Silikondichtung.

Die Elastomere mussten, abgestimmt auf den späteren Einsatzfall, ausgesucht und auch hinsichtlich des chemischen Einflusses untersucht und werden. Es wurden mehrere Abdichtgeometrien konstruiert, rechnerisch untersucht und im Versuchswerkzeug umgesetzt. Dabei ist durch die Stapelung mit einem Versatz zu rechnen, welcher in Kombination mit dem anstehenden Innendruck zu einem Kippmoment führt. Somit besteht das Risiko der äußeren Undichtheit.

Letztendlich ist es gelungen ein Dichtungsprofil zu entwickeln, welches nach einem gewissen Verpressweg der mittigen Dichtlippe durch die dann angedrückten äußeren Stützstege selbststabilisierend ist. Die Kräfte werden von Lage zu Lage in Stapelrichtung weitergeleitet.

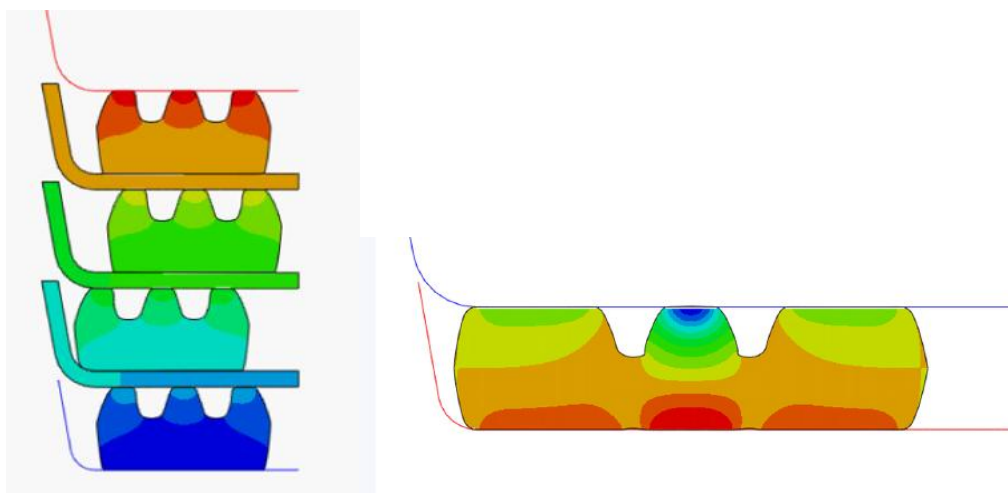


Abbildung 44: Simulation des Verpressvorgangs zur Optimierung der Dichtgeometrie.

Mit diesen neuen Erkenntnissen wurde das Werkzeug zur Erstellung der umspritzten Membranen hergestellt und eingesetzt. Die Dichtung dichtet einerseits zwischen den Blechwannen nach Außen und andererseits entlang der Membrane an zwei gegenüberliegenden Seiten. Die anderen beiden Seiten des (quadratischen) Zuschnittes sind beidseitig dünn mit Elastomer beschichtet. Entlang dieser beiden Bereiche stützen sich nach Montage die federnden Laschen der Wannen ab. Die Anschlagsnoppen entlang der tiefgezogenen Wannen, sorgen für eine definierte Verspannung jeder Dichtungslagen.



Abbildung 45: Aufbau des Befeuchter-Stacks mit Edelstahlrahmen, Silikon umspritzte Membran und Abstützgitter.

Um die Membranen flächig korrekt zu positionieren, werden Abstützgitter eingelegt. Das ist auch wichtig um bei unterschiedlichen Differenzdrücken zwischen der trockenen und feuchten Seite den Durchfluss in den Kanälen druckverlustoptimiert zu gewährleisten. Je nach Spezifikation sind Membranabstände bzw. Gitterhöhen aber auch Ausführung der Abstützgeometrie zu wählen.

In einer Versuchsreihe wurden im Kleinwerkzeug verschiedene Geometrien hinsichtlich des Druckverlustes ausgelegt, berechnet und getestet. Dabei wurde auch die Möglichkeit berücksichtigt in einer späteren Serienfertigung die Geometrien kostensparend aus den Metallwannen auszuformen.



Abbildung 46: Unterschiedliche Gitterformen zur Untersuchung der geeignetsten Geometrie.

Für die auszuführenden Musterteile wurden in einem Zweiplatten-Werkzeug gedruckte Gitter in verschiedenen Ausführungen strömungstechnisch untersucht. Die entsprechende Messvorrichtung ist in Abbildung 47 dargestellt.

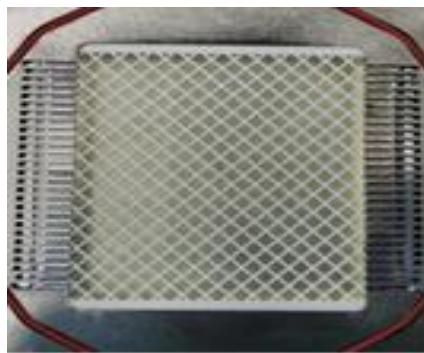


Abbildung 47: Ein gedrucktes Kreuzgitter in einer Messvorrichtung.

Die eingesetzte Ausführung wurde im Druckverfahren hergestellt. Zur leichteren Montage bzw. zum leichteren Einlegen in jede Lage, wurden die Gitter an zwei Seiten mit Stegen begrenzt, welche sich beim zusammenpressen des Stacks radial dichtend an die Formdichtung der Membrane anlegen. Das begünstigt die Effizienz der Befeuchtung durch eine gute innere Dichtheit. Die Stege haben auch den Vorteil etwaige Gitterenden einzufassen, welche beim späteren Betrieb, die Membrane gegen mechanische Schädigung schützen. Insbesondere bei Pulsation der Luft könnten die Membranen ansonsten perforiert werden.

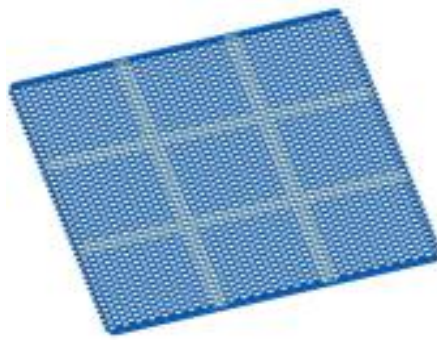


Abbildung 48: Gitterkompromiss bzgl. Wasserübertrag und Druckverlust.

Neben den vielen Detailuntersuchungen der einzelnen zu verbauenden Komponenten, wurden mehrere Klein-Stacks aufgebaut, um die Auswirkung verschiedener Optimierungen hinsichtlich Feuchteübertragungseffizienz und Druckverlust im Vorfeld zu testen. Einige der Aufbauten wurden zusätzlich gescannt, um die Auswirkung der Weiterentwicklung festzustellen.

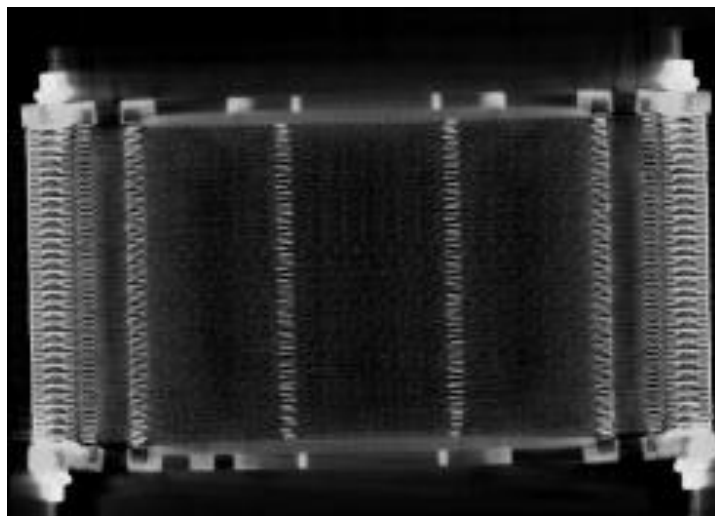


Abbildung 49: CT-Scan des Aufbaus mit korrekt positionierten Dichtlinien.

Die finale Ausführung wurde sowohl an Komponentenprüfständen als auch im Gesamtsystemaufbau ausgiebig geprüft.

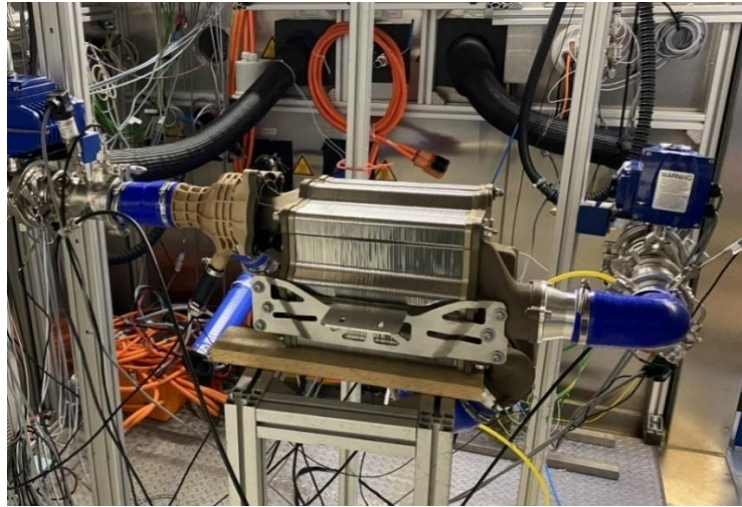


Abbildung 50: Befeuchter am Komponentenprüfstand für Performanceuntersuchungen.

Haupt Herausforderungen sind die Dichtheit des Befeuchters nach Außen sowie auch nach längerem Betrieb einen möglichst geringen, (nahezu) unveränderten Druckverlust vorzuweisen.

Test und Validierung

Dauerversuche

Im Zuge des Projekts wurden Dauerversuche durchgeführt. Diese bestanden aus vier Teilversuchen in angegebener Reihenfolge:

1. Basismessung
2. Degradationszyklen
3. Abschlussmessung
4. Hochtemperaturtest

Die Messbedingungen und Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt. Aufgrund der erhöhten Temperaturen wurden die Metallausführungen der C-Struktur und der Honigwabe verwendet. Für die Gitterstruktur wurde das SLS-Teil verwendet. Ein Vergleich zwischen Honigwabe/C-Struktur und Gitterstruktur ist für die vorgestellten Messwerte daher nur eingeschränkt möglich. Unterschiede konnten vor allem zwischen den Dicken des Materials festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich dies auf die Strömung im Modul und damit den Wasserübertrag auswirkt.

Die Messungen wurden mit der Membran Fumasep FHM-PS-1 durchgeführt.

Basismessungen & Abschlussmessungen

Die Basis- und Abschlussmessungen dienen dazu, den Zustand der Membran vor und nach den Degradationszyklen vergleichen zu können. Die Messbedingungen sind in Tabelle 10 zusammengefasst, die Ergebnisse zur Wasserflussdichte sind in Abbildung 51 dargestellt.

Tabelle 10: Messbedingungen der Basismessungen

	trocken	feucht
Druck	2.61 bar	1.88 bar
Temperatur	95 °C	
Relative Feuchte (Taupunkt)	0% (-40 °C)	64% (83.2 °C)
Volumenstrom	9.39 nL/min	7.81 nL/min

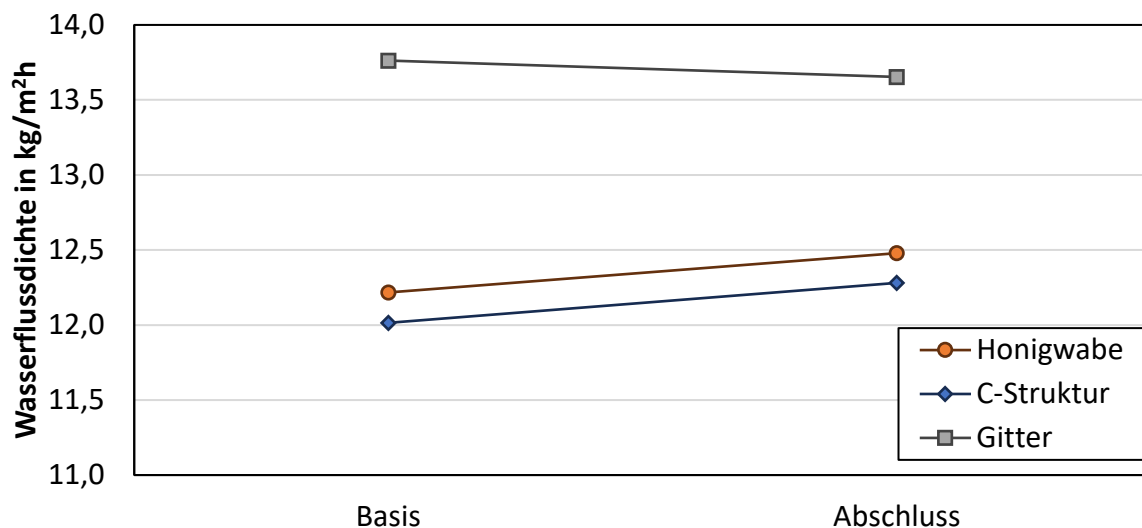


Abbildung 51: Ergebnisse der Basis- und Abschlussmessungen für Honigwabe, C-Struktur und Gitter.

Aus dem Vergleich zwischen Basis- und Abschlussmessung ist zu erkennen, dass die Honigwabe und die C-Struktur geringe Verbesserungen zeigen, während es bei der Gitterstruktur zu einer geringen Verschlechterung des Wasserflusses gekommen ist. Die Unterschiede zwischen den Basis- und Abschlussmessungen sind jeweils jedoch gering und liegen im Bereich der Messunsicherheiten. Eine signifikante Veränderung des Wasserübertragungsverhaltens der Membran im Laufe der Degradationszyklen kann damit nicht festgestellt werden.

Degradationszyklen

Bei den Degradationszyklen wird das Verhalten der Membran bei zyklisch wechselnden Bedingungen untersucht. Diese sind in Tabelle 11 zusammengefasst. In Abbildung 52 sind die Wasserflussdichten für die verschiedenen Turbulatorgeometrien

über den Zyklen aufgetragen. Dargestellt sind die Wasserflusssdichten in Phase 1 aus Tabelle 11.

Tabelle 11: Messbedingungen der Degradationszyklen

	trocken	feucht (Phase 1)	feucht (Phase 2)
Druck	2.61 bar	1.98 bar	1.98 bar
Temperatur	105 °C		
Relative Feuchte (Taupunkt)	0% (-40 °C)	49% (85.6 °C)	30% (73.5 °C)
Volumenstrom	9.39 nL/min	7.79 nL/min	8.65 nL/min
Dauer	-	4.5 min	0.5 min

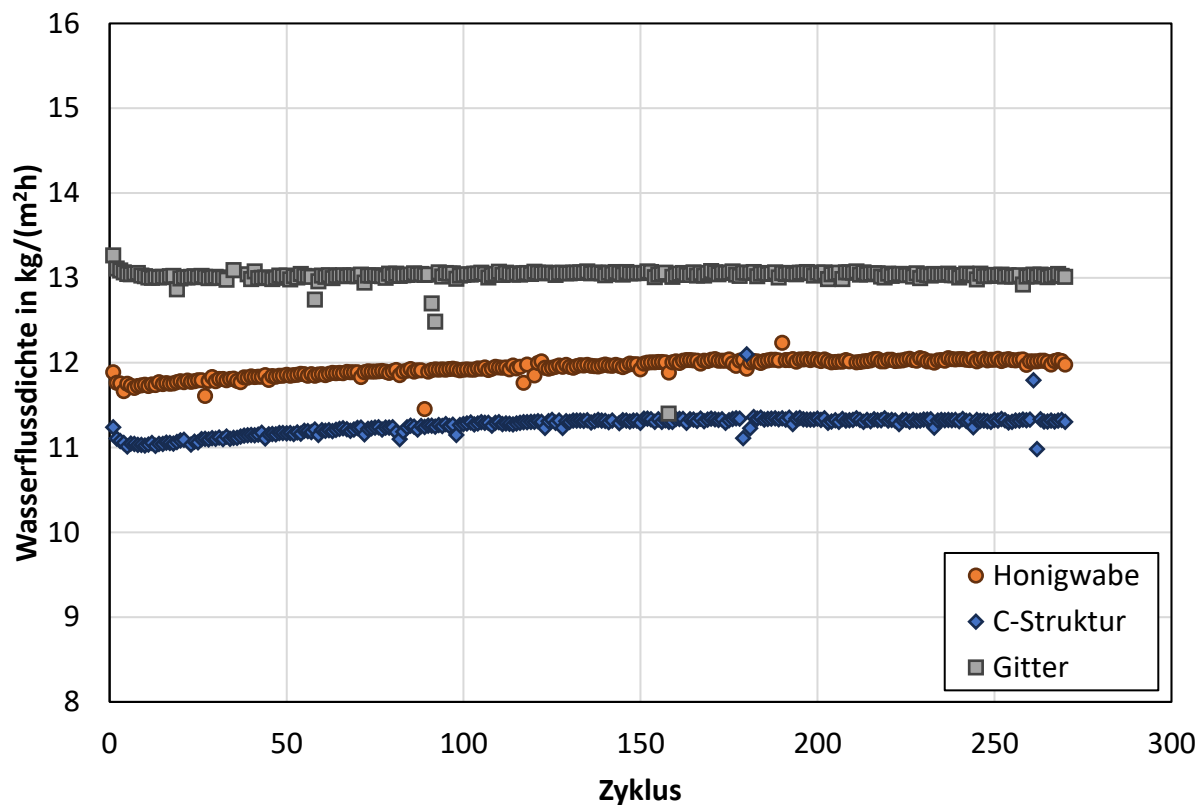


Abbildung 52: Ergebnisse der Degradationszyklen für Honigwabe, C-Struktur und Gitter.

In Abbildung 52 ist zu erkennen, dass die Wasserflusssdichte bei allen Turbulatorgeometrien über weite Bereiche der gefahrenen Zyklen nahezu konstant ist. Zu Beginn ist zunächst ein leichtes Sinken der Werte erkennbar. Bei der Honigwabe und der C-Struktur kommt es danach zu einem leichten Anstieg der Wasserflusssdichte, bevor ein Plateau erreicht wird. Bei der Gitterstruktur weist der Verlauf nach dem Absinken einen konstanten Wert auf. Wie bereits aus dem Vergleich von Basis- und

Abschlussmessung hervorgeht, zeigen sämtliche Membranproben bei allen Turbulatorgeometrien keine Verschlechterung hinsichtlich des Wasserübertrags aufgrund der Degradationszyklen.

Einzelne Werte in den Ergebnissen weichen vom Trend ab. Dies konnte auf Probleme bei der Wasserdosierung am Teststand zurückgeführt werden.

Hochtemperaturtests

Die Hochtemperaturtests werden über einen langen Zeitraum bei erhöhten Temperaturen durchgeführt. Damit kann das Langzeitverhalten der Membran untersucht werden. Die Bedingungen sind in Tabelle 12 aufgelistet. Abbildung 53 zeigt die gemessenen Wasserflusssichten über der Messdauer.

Tabelle 12: Messbedingungen der Hochtemperaturtests

	trocken	feucht
Druck	2.61 bar	1.88 bar
Temperatur	95 °C	
Relative Feuchte (Taupunkt)	0% (-40 °C)	64% (83.2 °C)
Volumenstrom	9.39 nL/min	7.81 nL/min
Dauer	160 h	

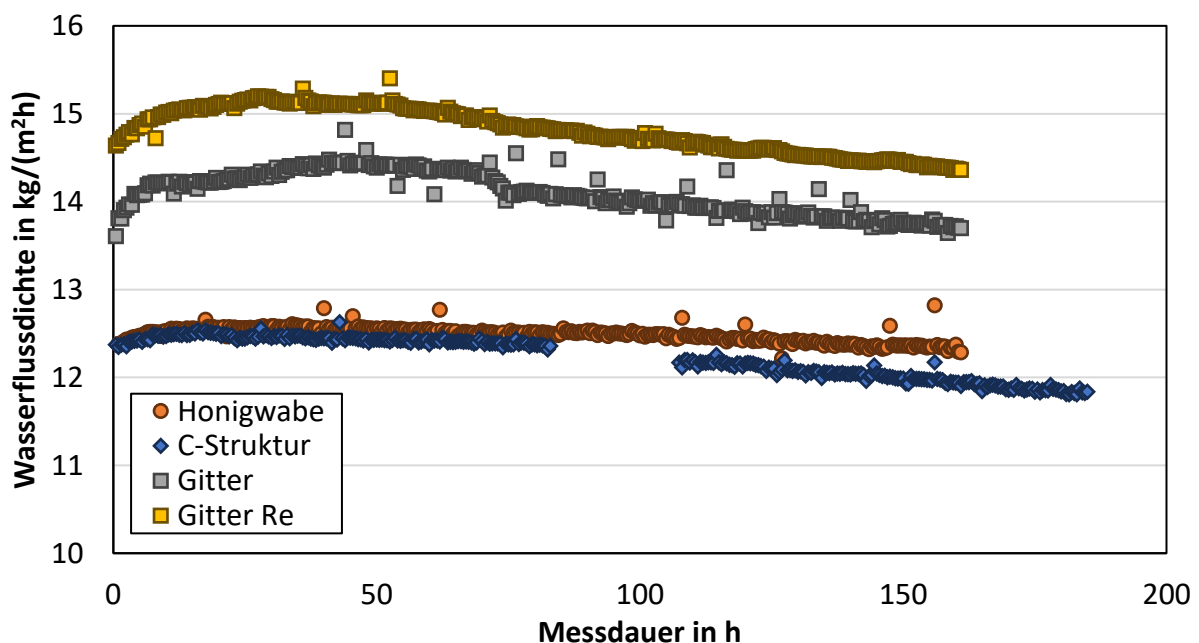


Abbildung 53: Ergebnisse der Hochtemperaturtests. Für das „Gitter Re“ (rework) wurde die Geometrie im Vergleich zu „Gitter“ überarbeitet bzw. optimiert.

Bei der Honigwabe sowie der C-Struktur ist zunächst ein leichtes Ansteigen der Wasserflussdichte zu erkennen. Im Anschluss daran ist ein Abfallen der Werte mit der Zeit erkennbar, welches bei der Honigwabe gering ist und bei der C-Struktur etwas stärker ausfällt. Bei der C-Struktur kam es zwischenzeitlich zu einem Abbruch der Kommunikation zwischen Teststand und Prozessleitsystem, sodass für diesen Zeitraum keine Messwerte vorliegen. Die Wasserflussdichten von Honigwabe und C-Struktur weisen einen ähnlichen Wertebereich auf. Wesentlich höhere Werte sind bei der Gitterstruktur zu erkennen, bei der der Verlauf qualitativ gleich zu Honigwabe und C-Struktur ist. Der Anstieg zu Beginn und der Abfall im Anschluss daran fallen stärker aus.

Kaltstarts

Um abschätzen zu können, wie sich ein Kaltstart von Brennstoffzellensystemen auf die Membran im Membranbefeuchter auswirkt, wurden zyklische Kaltstarts durchgeführt. Ein Zyklus besteht dabei aus

1. der Lagerung bei -20 °C in einem Temperaturschrank für mindestens 1,5 h und
2. der unmittelbar anschließenden Konditionierung und Messung für 1 h unter den in Tabelle 13 aufgeführten Bedingungen.

Vor der ersten Lagerung wird zu Referenzzwecken eine Konditionierung inklusive Messung durchgeführt. Die Versuche erfolgen im Kreuzstrom unter Verwendung der Membran Fumasep FHM-PS-1 und der Gitterstruktur als Turbulator.

Tabelle 13: Messbedingungen der Kaltstarts

	trocken	feucht
<i>Druck</i>	2.6 bar	1.9 bar
<i>Temperatur</i>	80 °C	
<i>Relative Feuchte (Taupunkt)</i>	0% (-40 °C)	70% (71.4 °C)
<i>Volumenstrom</i>	25 nL/min	20.4 nL/min

Abbildung 54 zeigt die gemessene Wasserflussdichte über der Zeit für die Referenzmessung und ausgewählte Zyklen. Die Referenzmessung zeigt eine konstante Wasserflussdichte, da das Membranmodul vor Messstart bereits ausreichend lange den Messbedingungen ausgesetzt war. Bei den Zyklen ist die Wasserflussdichte zu Beginn wesentlich geringer als bei der Referenzmessung, steigt dann über das Niveau der Referenzmessung und fällt anschließend langsam gegen einen annähernd konstanten Wert. Da das Modul mit einer Temperatur von -20 °C in den Teststand eingebracht wird, ist davon auszugehen, dass Wasserdampf zunächst

ausfriert und nicht am trockenen Ausgang als übergegangenes Wasser detektiert wird. Mit der Zeit wärmt sich das Modul an und das vorher ausgefrorene Wasser wird nach und nach ausgetragen, sodass sich Wasserflussdichten über dem Referenzwert ergeben. Mit der Zeit nähert sich das System aufgrund der konstanten Betriebsbedingungen einem stationären Zustand an, sodass die gemessene Wasserflussdichte sich dem Referenzwert nähert.

Ein Vergleich der dargestellten Zyklen untereinander zeigt, dass die Wasserflussdichte mit zunehmender Zykluszahl abnimmt. Während die Wasserflussdichte am Ende von Zyklus 10 noch über dem Referenzwert liegt, beträgt die Wasserflussdichte zu Ende des Zyklus 50 in etwa den Wert wie bei der Referenzmessung und nach Zyklus 100 liegt die Wasserflussdichte unterhalb der Referenzmessung. Zu erwähnen ist, dass am Ende der Zyklen noch ein leichter Abfall der Wasserflussdichte stattfindet, sodass die stationären Werte etwas tiefer liegen dürften. Der Abfall über sämtliche Zyklen hinweg befindet sich in dem Bereich, wie dies auch bei den Dauerversuchen festgestellt wurde. Ein stark negativer Einfluss von wiederholten Kaltstarts auf die Fähigkeit einer Membran, Wasser zu übertragen, ist damit nicht eindeutig feststellbar.

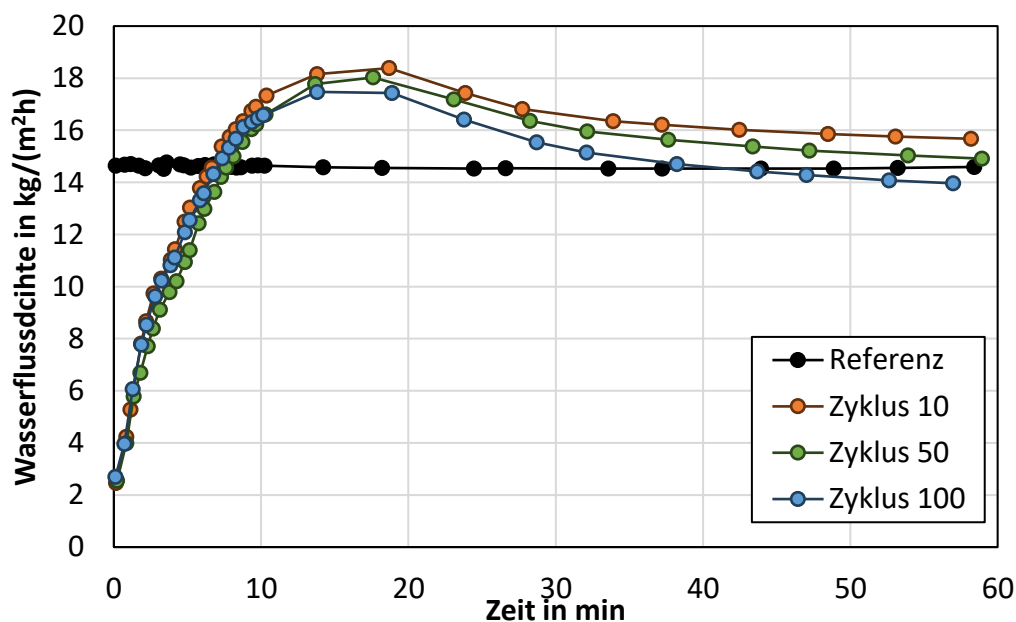


Abbildung 54: Verläufe der Wasserflussdichte bei verschiedenen Zyklen der Kaltstarts.

Abbildung 55 zeigt die zeitlichen Verläufe der Druckverluste in den feuchten und trockenen Kanälen des Moduls. Die Referenzwerte sind jeweils konstant, da zu Messbeginn bereits stationäre Bedingungen herrschen. Die Druckverluste in den feuchten Kanälen liegen stets über den Werten in den trockenen Kanälen. Aufgrund der Betriebsbedingungen ist der Volumenstrom in den feuchten Kanälen wesentlich höher, sodass es dort zu höheren Druckverlusten kommt.

Die Druckverluste in den trockenen Kanälen sind zunächst leicht erhöht und sinken dann auf einen konstanten Wert nahe der Referenzmessung. Auf der feuchten Seite verhält es sich ähnlich. Zudem kommt es am Anfang noch zu einer Erhöhung des Druckverlusts. Die Verläufe der Druckverluste passen zur Hypothese des ausfrierenden Wassers. Während der Lagerung des Moduls bei -20 °C kommt es vermutlich zur Bildung von Eis, was eine Einschnürung des Strömungsquerschnitts und damit eine Erhöhung des Druckverlusts hervorrufen könnte. Es ist davon auszugehen, dass dies auf der feuchten Seite ausgeprägter stattfindet. Dies spiegelt sich auch in den Messwerten wieder, da die anfängliche Erhöhung des Druckverlusts auf der feuchten Seite wesentlich stärker ausfällt als auf der trockenen Seite. Zudem dürfte zu Beginn der zugeführte Wasserdampf auf der feuchten Seite wegen der thermischen Trägheit des Edelstahlmembranmoduls kondensieren oder sogar ausfrieren. Dies könnte den anfänglichen Anstieg des Wasserübertrags erklären. Nach und nach erwärmt sich das Modul, sodass das Eis/Wasser ausgetragen wird und die Strömungskanäle wieder frei sind, sodass sich die Druckverluste den konstanten Referenzwerten annähern.

Bei den sich einstellenden konstanten Niveaus ist festzustellen, dass sich der Druckverlust mit der Anzahl der Zyklen erhöht. Eine Erklärung hierfür könnte in einer Oberflächenveränderung der SLS-gedruckten Gitters oder des Vlieses der Membran durch die wiederholten Einfrier- und Auftauvorgänge sein.

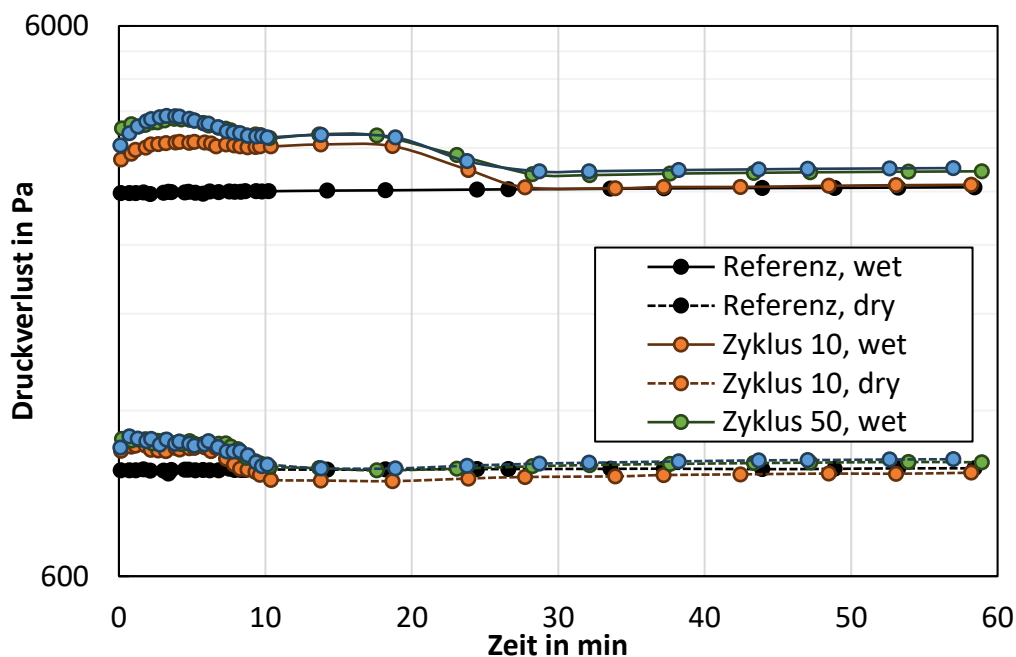


Abbildung 55: Verläufe des Druckverlusts bei verschiedenen Zyklen der Kaltstarts.

VI LUFTKOMPRESSOR (AP 4)

(EAC: ELECTRICAL AIR COMPRESSOR)

AP Leiter: Robert Bosch GmbH

Bei dem AP4 war das Ziel die Durchführung eines Konzeptnachweises eines Luftkompressors in einem besonders kompakten Brennstoffzellensystem für einen funktionalen PKW-Betrieb.

Besonderer Fokus lag hierbei auf erhöhten Anforderungen hinsichtlich Robustheit der Turbine (Frost Start, Thermische Beaufschlagung) sowie der Definition eines optimierten Aerodesigns.

Hierfür wurde aus dem vorhandenen BOSCH Portfolio ein entsprechender EAC gewählt und für dieses Projekt modifiziert. Die notwendigen Aktivitäten und Arbeitsschritte sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

Mechanische Schnittstellen

Zur geometrischen Integration des Bosch EAC in den BMW-Prüfstands Aufbau wurden ausgehend von einer bei Bosch vorhandenen Plattformkonstruktion folgende Anpassungen an der Konstruktion des A-Musters vorgenommen:

- Eine spezielle Ausrichtung der Radiallager des EAC für eine „hängende“ Montage des EAC
- Eine spezifische Ausrichtung der radialen Volutenabgänge von Verdichter und Turbine, um den Anschluss an die Verrohrung des Systemprüfstands zu gewährleisten.
- Realisierung spezifischer axialer Kupplungsanschlüsse hinsichtlich Durchmesser und Anschlussgeometrie („Henn“-Kupplung).

Um die im System vorgesehenen Untersuchungen bzw. Messungen durchführen zu können, wurden am EAC folgende zusätzliche Features realisiert:

- Drei radiale Zugänge am Turbinenrotor für eine Endoskopie im Rahmen der Kaltstartversuche.
- ein Anschluss für einen Drucksensor im Bereich des Turbineneintritts

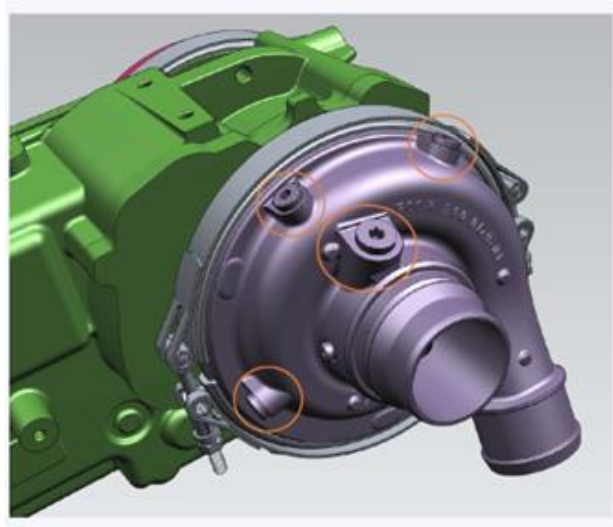


Abbildung 56: Turbinen-Volute mit Modifikation.

Für den Betrieb am Komponentenprüfstand wurde eine Modellvariante ohne radiale Zugänge konstruiert, um den zu erwartenden (negativen) Effekt der zusätzlichen Zugänge auf den Turbinenwirkungsgrad bewerten zu können.

a) Elektrische Schnittstellen:

Die elektrischen Schnittstellen für die Hoch- und Niederspannungsversorgung des EAC sowie für die CAN-Kommunikation wurden mit BMW abgestimmt. Bosch lieferte die für den Betrieb am BMW-System erforderlichen Hochspannungskabel und die entsprechenden Sicherungen. Die für den Anschluss notwendige Übergabebox wird von BMW gefertigt.

b) Auslegung Aero-Design

Bei der Entwicklung eines neuen Aero-Designs wurden die funktionalen Anforderungen der FaeBS an den EAC hinsichtlich Luftmasse und Druckverhältnis berücksichtigt. D.h. es wurden neue Geometrien für Verdichter und Impeller entwickelt. Zur Auslegung und Validierung wurden unter anderem CFD-Simulationen eingesetzt.

Aerodesigndarstellung für den Verdichter C80-2.6 und für die Turbine T51-4.9:

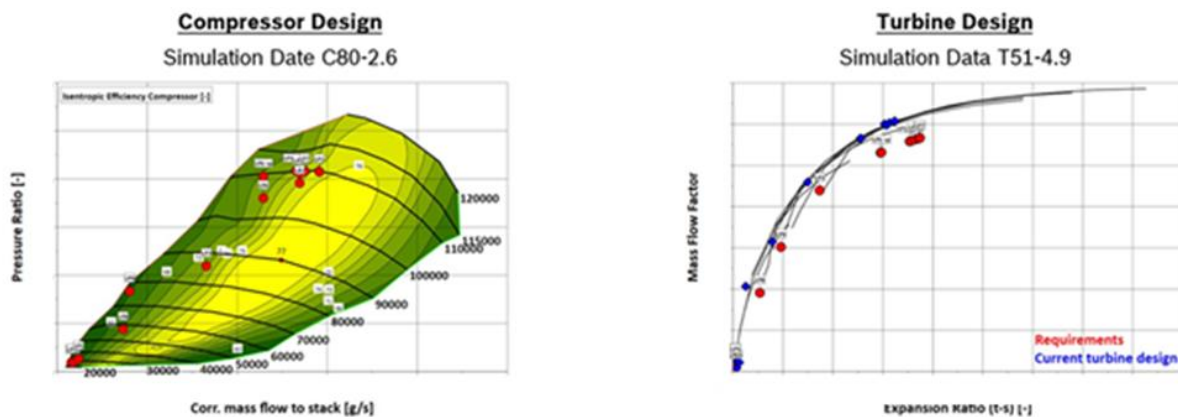


Abbildung 57: Aero Design CFD mit Lastpunkten.

c) A-Muster Design freeze

Die oben beschriebenen geometrischen und funktionalen Maßnahmen am EAC wurden in CAD umgesetzt. Eine Schnittstellenzeichnung für das A-Muster für den Systemaufbau wurde erstellt, mit BMW abgestimmt und für die Bestellung der A-Muster freigegeben.

d) Bauraumuntersuchung

Im Rahmen des AP4 Virtuelle Fahrzeugintegration wurden CAD-Modelle des EAC erstellt und BMW zur Verfügung gestellt.

In Abstimmung mit BMW wurden verschiedene Designvarianten und Konzepte erarbeitet.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Anordnungen von Inverter und Verdichtereinheit untersucht:

- Varianten mit integriertem Inverter in Längs- und Queranordnung
- Varianten mit externem Inverter.

Dabei erwies sich die integrierte Variante mit längs angeordnetem Inverter als vielversprechend und wurde daher zur weiteren Optimierung herangezogen.

In einem weiteren Schritt wurde aufgrund von Bauraumkonflikten am Fahrzeugrahmen und im HV-Steckerbereich eine Variante mit geänderter Drehrichtung des Verdichters untersucht. Dadurch konnte sowohl eine günstigere Situation für die Anschlüsse an den Verdichter- und Turbinenschaufeln erreicht als auch die oben genannten Konflikte vermieden werden.

In der aktuellen Auslegung sind jedoch noch weitere Überschneidungen mit angrenzenden Komponenten vorhanden, die eine weitere Optimierung des Gesamtpakets erforderlich machen.

e) Fertigung EAC Prototypen:

Im Anschluss an die Arbeiten zur Designdefinition wurden für die entsprechenden EAC-Varianten Stücklisten und Zeichnungen erstellt, auf deren Basis im Bosch-Musterbau insgesamt vier EAC-Muster aufgebaut wurden. Davon wurden im Berichtszeitraum 4 Stück an das Projekt ausgeliefert.

Alle Muster haben die vorgesehenen Abnahmetests bestanden:

- Funktionsprüfung durch Messung von Massenstrom und Druckverhältnis an Verdichter und Turbine an jeweils drei Lastpunkten bei drei verschiedenen Drehzahlen.
- Dichtheitsprüfung Kühlkreislauf
- Dichtheitsprüfung Luftkreislauf
- HV-Test (Isolations- und Durchschlagtest)
- Rotordynamik
- Sichtprüfung

Zwei dieser EACs wurden BMW für die Installation der FC-Systeme zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden Hochspannungskabel und Hochspannungssicherungen für die Installation der EACs an BMW geliefert.

Die beiden EAC-Varianten sind im Wesentlichen baugleich. Sie weisen geringfügige Unterschiede in den mechanischen Schnittstellen auf, die sich auf den jeweiligen Einsatzzweck im Rahmen der in AP4 definierten Tests und die Einbaulage beziehen und in der folgenden Tabelle dargestellt sind.

Tabelle 14: EAC Varianten FaeBS Projekt

Arbeitstitel	Vorzugslage/Verwendung	Zusatzfeatures	Volutenstellung ex. Musterbau
Ögp Variante BMW	Für senkrechten Dauer-Betrieb Fuel Cell System Prüfstand	• Zentrale Anschlüsse mit „Henn“-Kupplung • Turbine mit - Endoskop-Bohrungen für Kaltstartuntersuchung und zus. Anschluss im axialen Abgang für Druckmessung	Senkrecht zur EAC Längsachse 
Ögp Variante RB	Für waagrechten Dauer-Betrieb RB Komponentenprüfstand	Umbauten: • T-Messstelle für Axiallager Temperaturmessung (Pyrometer) • Modifizierte Volute für Kühlluftmessung	Waagrecht zur EAC Längsachse 

f) Inbetriebnahme Muster bei Bosch

Mit dem ersten gelieferten Muster wurde im Anschluss an die Lieferprüfung im Musterbau eine erweiterte Funktionsprüfung im Prüflabor der Bosch-Entwicklung durchgeführt.

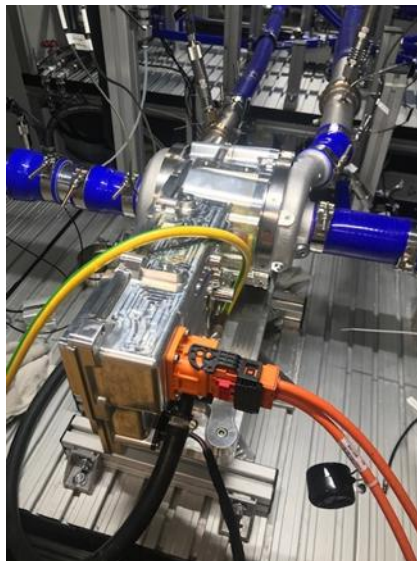


Abbildung 58: EAC bei Inbetriebnahme auf Bosch Prüfstand.

Ziel ist die detaillierte Vermessung des EAC-Kennfeldes und die experimentelle Bestimmung des Betriebsbereiches. Im Wesentlichen geht es dabei um die Bestimmung der Pumpgrenze des Verdichters und möglicher Einschränkungen durch auftretende Axiallagertemperaturen. Beides ist notwendig, um einen sicheren und möglichst dauerhaften Betrieb zu gewährleisten.

Durch die Messungen konnte die simulative Auslegung des Verdichters und der Turbine bestätigt werden. Alle BMW-Lastpunkte werden durch das gemessene Kennfeld abgedeckt. Der aus der Kennfeldmessung abgeleitete Betriebsbereich wurde an BMW übermittelt.

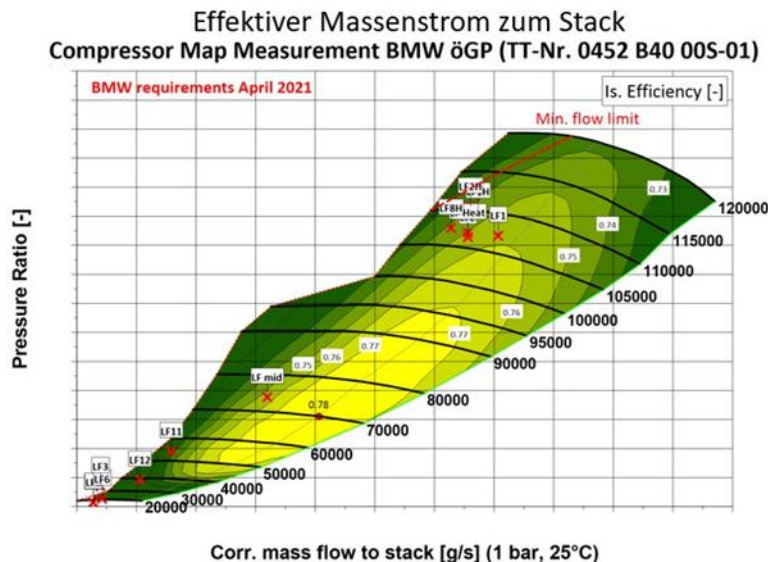


Abbildung 59: EAC-Kennfeld inklusive BMW-Lastpunkte.

Im weiteren Verlauf des FaeBS-Projektes wurden weitere, im Rahmen von AP 4 definierte Tests, wie z.B. die Validierung definierter KPIs durchgeführt.

g) Abstimmung der Kommunikationsschnittstelle (CAN)

Die Kommunikation des übergeordneten Systems mit dem EAC erfolgt über die im Automobilbereich etablierte CAN-Schnittstelle. Der grundsätzliche Aufbau und die Struktur, wie Botschaften zwischen den Geräten ausgetauscht werden, ist hier festgelegt.

In der weiteren Abstimmung stellte sich jedoch heraus, dass die in der Bosch Software verwendeten Botschaften zur Ansteuerung der jeweiligen Funktionen im z.B. Drehzahlvorgabe und Informationen z.B. Spannungswerte nicht mit der kundenseitig verwendeten Software kompatibel waren.

Da eine Änderung der Software aufwendig und relativ zeitintensiv ist, bietet sich in solchen Fällen der Einsatz von Netzwerkschnittstellen als effiziente Lösung an. Im speziellen Fall des FaeBS-Projektes, bei dem die Schnittstelle in die Prüfstandsstruktur integriert werden muss und ein einfaches Mapping aufgrund der Besonderheit der Nachrichten nicht möglich war, ist der Einsatz eines Stand-Alone-Gerätes erforderlich.

Auf einem solchen Gerät kann das benötigte CANoe-Skript autark - ohne Verwendung eines zusätzlichen Laptops - ausgeführt werden.

Im Rahmen der Inbetriebnahme des EAC bei BMW konnte dieses Konzept erfolgreich installiert und getestet werden.



Abbildung 60: Netzwerk Interface.

Im Rahmen der Integration und Inbetriebnahme des Kompressors am FaeBS-Systemprüfstand wurde festgestellt, dass die Ansteuerung des Kompressors ein zusätzliches Signal (das sogenannte „EAC-Strom“) erfordert. Das genannte Signal wurde von der Kompressor-Software auf dem Kommunikationsbus (CAN) bereitgestellt, um den Kompressor mittels BMW-Ansteuerungssoftware dynamisch betreiben zu können.

Da die Software-Lösung nicht verfügbar war, wurde sie in Zusammenarbeit mit BMW entwickelt und anschließend mithilfe von Resident-Ingenieuren in München (direkt an den Prüfständen von BMW) implementiert, um eine Verzögerung des Betriebs der FaeBS-Prüfstände zu vermeiden.

Die Ergebnisse der Tests weisen auf eine positive Wirkung hin, sodass die geplanten dynamischen und statischen Tests durchgeführt werden können.

Es wurde festgestellt, dass das berechnete EAC-Strom-Signal für die Regelung des dynamischen und statischen Betriebs eine Abweichung von 10 % aufweist. Da der Offset konstant ist, besteht die Möglichkeit, eine weitere SW-Maßnahme bei Bedarf einzuführen. Diese Einschätzung wurde von den Experten als nicht erforderlich bewertet.

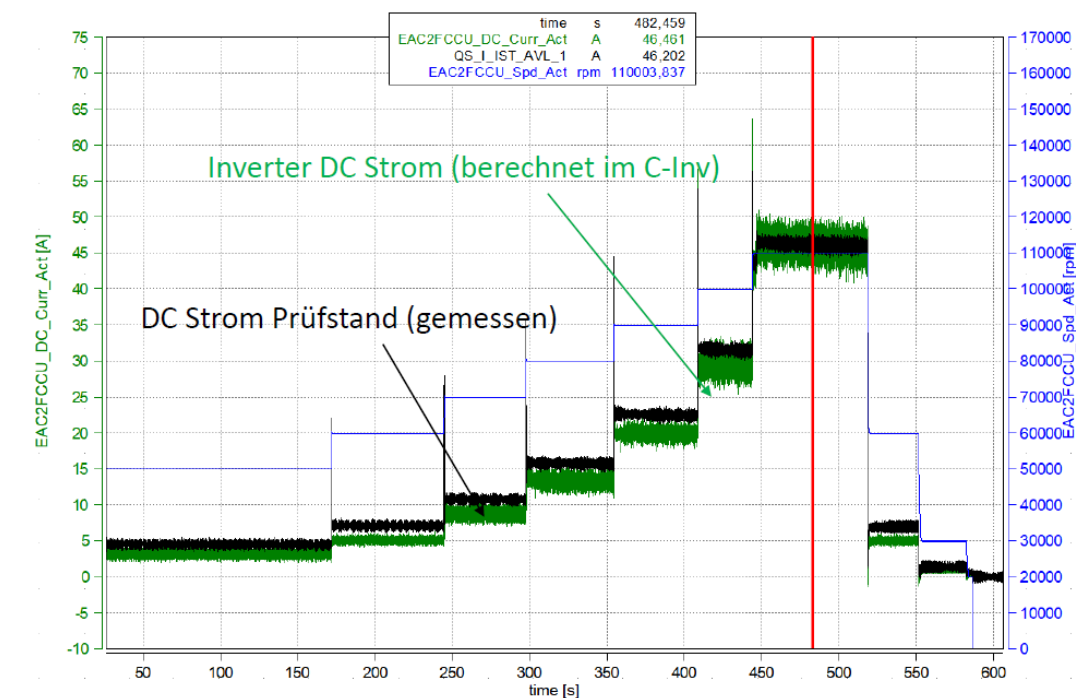


Abbildung 61: Messergebnis EAC-Stromwert (berechnet vs. Prüfstand).

h) Tests und Validierung

Die Absicherung im Systemverbund an BMW-System-Prüfständen diene der Identifikation der Auswirkungen des Systembetriebs auf die Komponenten, dem allgemeinen Nachweis der Funktion, der Prüfung auf Einhaltung der Komponenten-Grenzwerte (TKU) sowie der Ableitung der Anforderungen an zukünftige Entwicklungen.

Die durchgeführten Messungen und Auswertungen am Dauerlauf-Prüfstand haben keine Auffälligkeiten der Komponente EAC auf Systemebene gezeigt. Die Werte aus der TKU wurden eingehalten, sodass davon auszugehen ist, dass die Komponente wie spezifiziert funktioniert.

Des Weiteren wurden Froststart-Messungen bis zu einer Temperatur von -25 °C am Funktionsprüfstand erfolgreich durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass es zu keiner Vereisung der Turbinen kam, wodurch eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund einer unzureichenden Anzahl an Start- und Stopp-Phasen im Dauerlauf-Profil am System-Prüfstand wurden zusätzliche Versuche am Komponentenprüfstand durchgeführt, um den entsprechenden Funktionsnachweis dieser KPI zu bestätigen. Es konnten folgende Ergebnisse erzielt werden: Es konnten keine Auffälligkeiten bei der Absolvierung der insgesamt 250000 Start-/Stopp-Zyklen festgestellt werden. Siehe

Abbildung 62 als Beispiel für den Testblock Start-/Stopp Zyklen bei Raumtemperatur und einem Drehzahl Sollwert von 20000 1/min (1/min = rpm).

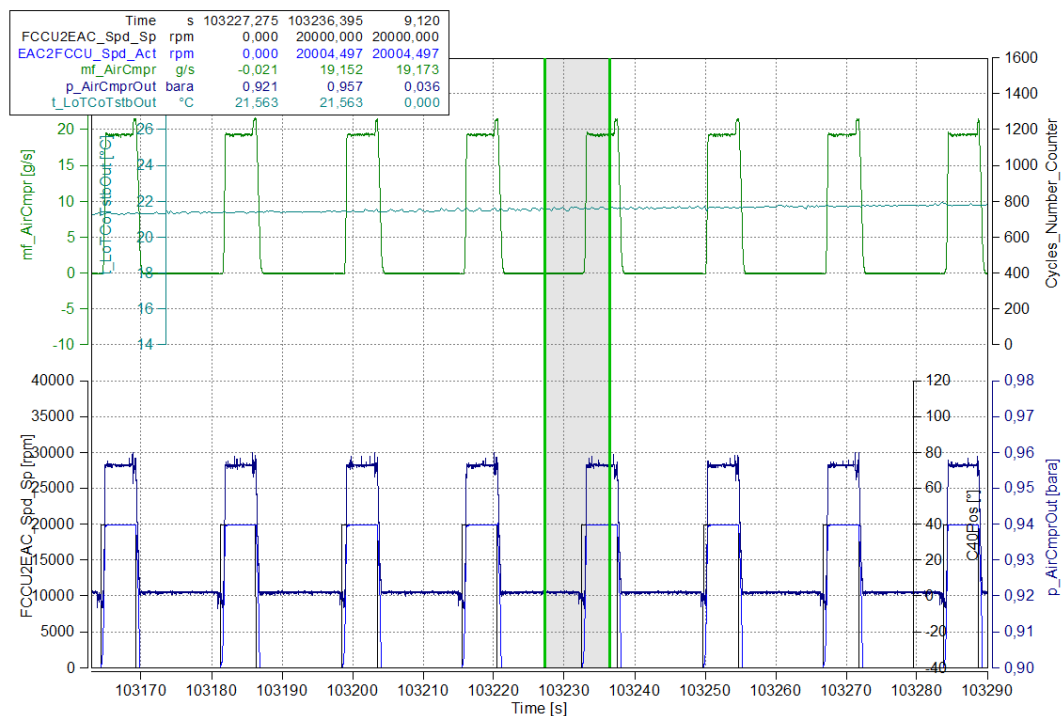


Abbildung 62: Absicherung Start-/Stopp Zyklen am Kompressor Komponenten Prüfstand im Testblock mit dem Sollwert 20000 rpm.

VII ANODEN-SUBSYSTEM (AP 5)

Arbeitspaket 5.1 – Wasserstoff-Druckregelventil

AP Leiter: Robert Bosch GmbH

Um die BMW-Anforderungen einer passiven Rezirkulation erfüllen zu können, wurden in Rücksprache mit BMW die Durchfluss- und Rezirkulationsdaten ausgetauscht und bewertet.

Hierzu wurde die Kombination aus 2 HGI's (Hydrogen Gas Injector) umgesetzt. Eines der HGI's betreibt eine „kleine“ Jetpump um die Anforderungen zur Rezirkulation in den unteren Lastpunkten zu erfüllen und ein weiteres HGI ist an einen Bypass angeschlossen um die Umsetzbarkeit von großen H₂ Durchflussmengen zu realisieren

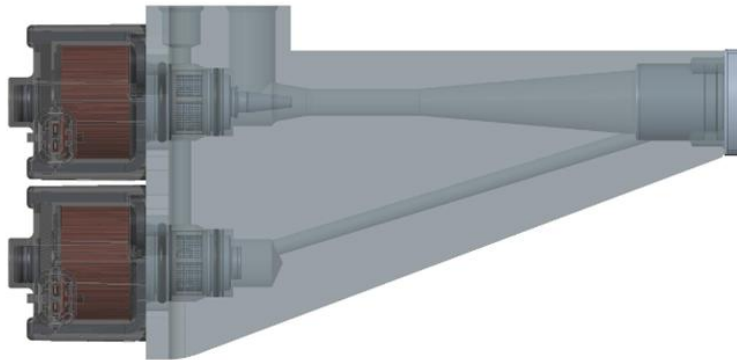


Abbildung 63: Konzeptidee PCV-Rezi Modul mit 2 HGI's.

Die Auslegung des PCV-Rezi Moduls der Jetpump und des Bypasses mit 2 HGI's ist mit Hilfe von CFD-Simulationen und Bosch-eigenen Optimierungstools erfolgt.

Ziel bei der Auslegung war es, die BMW Requirements V11 zur Rezirkulation bestmöglich zu erfüllen.

Dazu wurden unterschiedliche Betriebspunkte zueinander in Korrelation gesetzt und am Ende das Design mit dem besten Gesamtergebnis ausgewählt.

In folgender Darstellung wurden die BMW-Anforderungen ggü. der finalen Innengeometrie und HGI Variante gegenübergestellt.

Abschätzung des erreichbaren Druckanstieges der Jetpump bei den Lastpunkten gemäß BMW Requirements V11 (2021-11-25) bei dem vorgegebenen min. Arbeitsdruck am HGI-Eingang.

- Im VL-Punkt wird etwa die Hälfte der Menge über das Jetpump-HGI zudosiert, die andere Hälfte über das Bypass-HGI.
- Die abgeschätzte Performance reicht für alle geforderten Rezirkulations-Temperatur-Niveaus mit Ausnahme des untersten Lastniveaus.

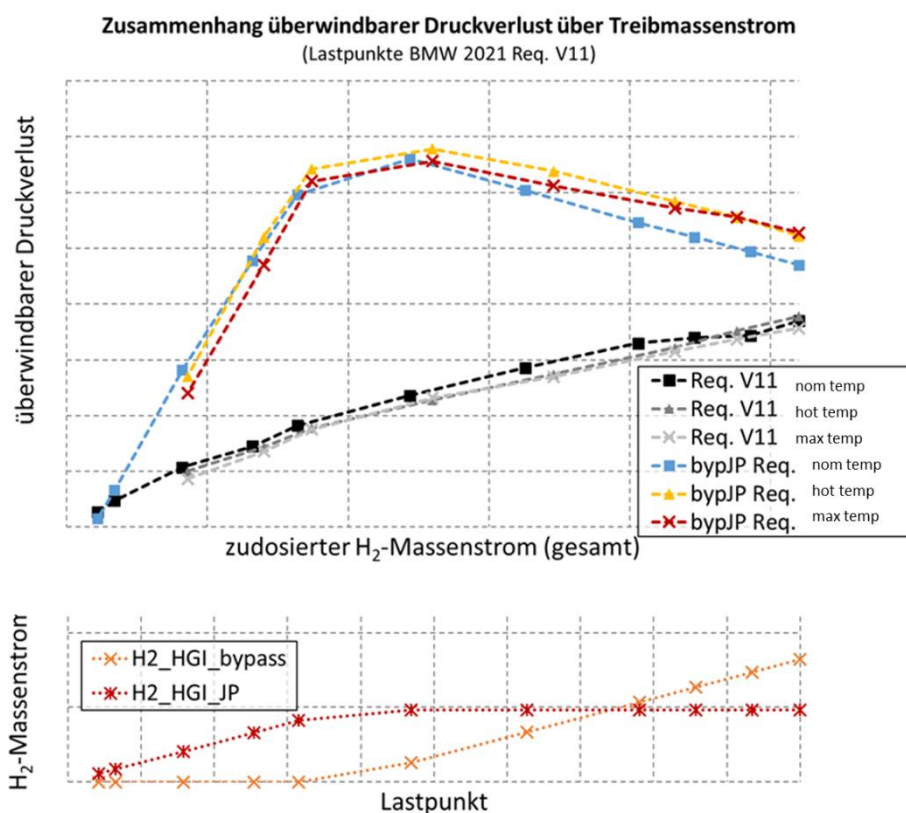


Abbildung 64: Rezirkulationsperformance bei min. Mitteldruck.

Die zuvor definierte Innengeometrie bildete die Grundlage für die Durchführung von BMW-Strömungssimulationen, deren Ziel es war, die ausreichende Durchmischung von Jetpump und Bypass durch den Filter in den Stackeingang zu bestätigen, wobei verschiedene Lastpunkte berücksichtigt wurden.

STRÖMUNGSLINIEN: LF02.

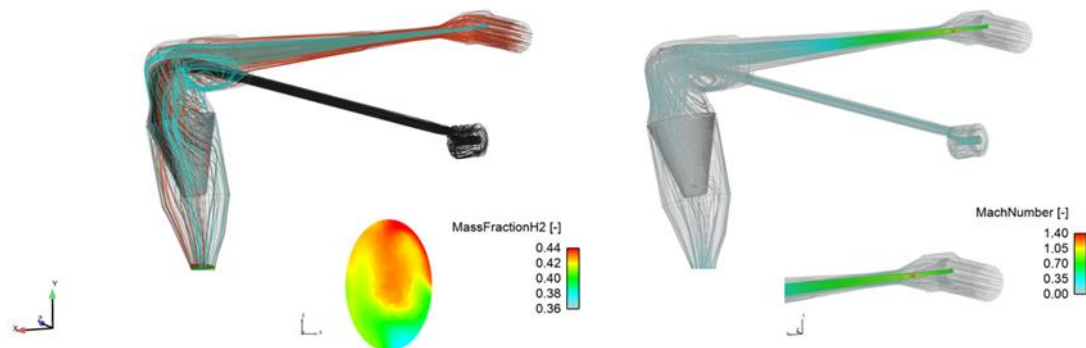


Abbildung 65: Strömungssimulation aus Jetpump und Bypass durch Filter in Stackeingang am LF02.

Im Rahmen der abschließenden Betrachtungen wurde der Fokus auf die Integration in den zur Verfügung gestellten Bauraum inkl. externer Schnittstellen gelegt. Ebenso wurde darauf geachtet, die Masse möglichst gering zu halten, da es sich im FaeBS-Projekt um ein massives Aluminium-Design handelt, welches unter Umständen bei kalten Temperaturen als „Kältespeicher“ wirkt.

In der Konsequenz konnte im letzten Designentwurf eine Reduktion der Masse um 32 % realisiert werden.

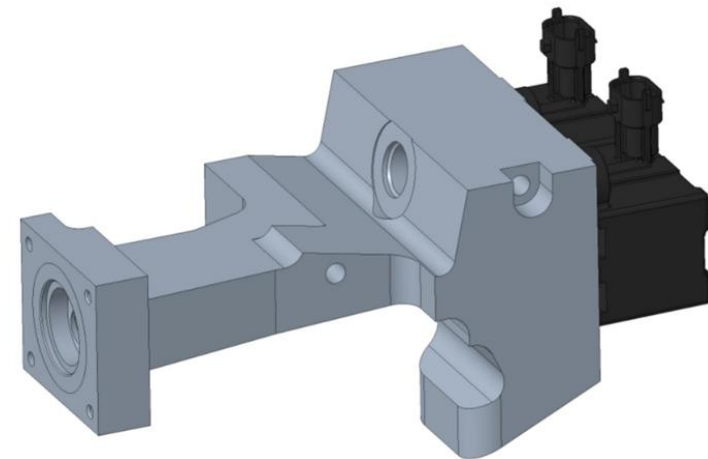


Abbildung 66: Finales Design PCV-Rezi Modul für FaeBS.

Auf dieser Basis erfolgte der Designfreeze und die Bestellung von Prototypen.

Im Rahmen der Auftragsabwicklung für neun PCV-Rezi-Module (Pressure Control Valve) wurde zunächst eine Stückliste im System angelegt, welche alle fertigungsrelevanten Informationen, wie beispielsweise Zeichnungen und Prüfvorschriften, beinhaltet.

Während der Projektlaufzeit konnten vier PCV-Rezi-Module an BMW ausgeliefert werden. Fünf weitere PCV-Rezi-Module verblieben in der Bosch-Entwicklung und werden für Funktionstests verwendet.

Im Rahmen der Auslieferungsprüfung wurden sämtliche Funktionsmuster einer eingehenden Evaluierung unterzogen, wobei folgende Aspekte Berücksichtigung fanden:

- Geometrievermessung des Aluminium-Rezi-Moduls
- Funktionsmessung der PCV gemäß technischer Kundendokumentation
- Dichtheitsmessung der PCV gemäß technischer Kundendokumentation
- Dichtheitsmessung der montierten PCV-Rezi-Module (PCV im Rezi-Modul)
- Abschließende Sichtkontrolle vor Verpackung und Versand

Im Anschluss an die Auslieferungsprüfung wurde eine erweiterte Funktionsprüfung der Muster im Prüflabor der Bosch-Entwicklung durchgeführt.

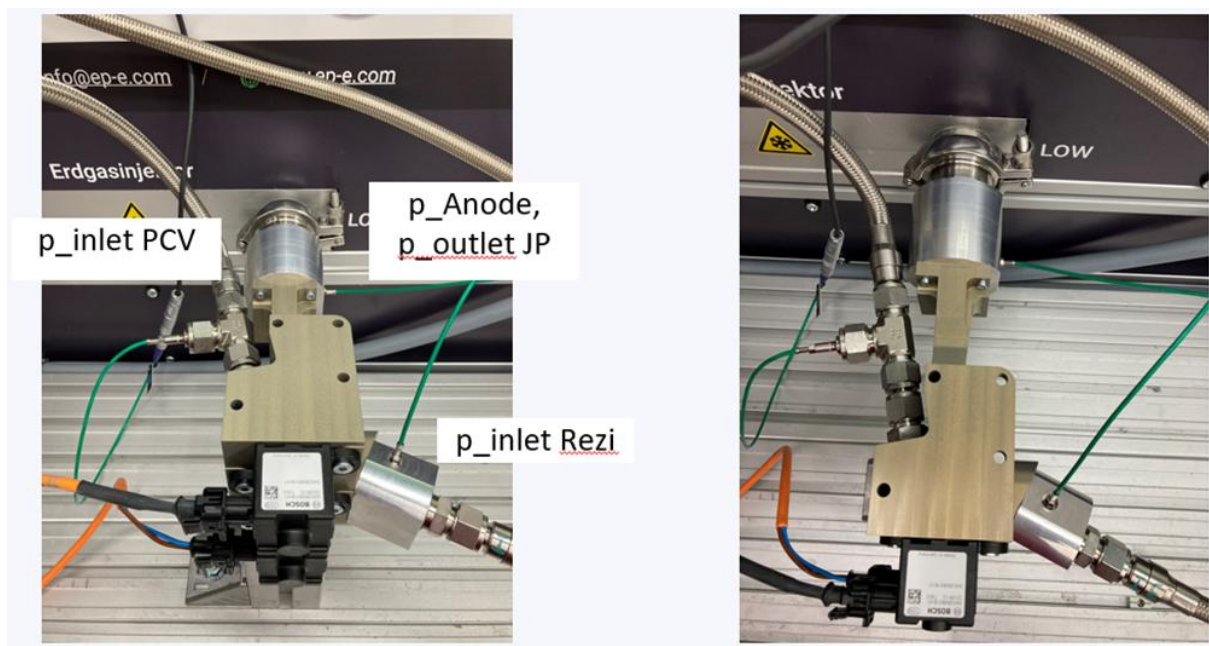


Abbildung 67: PCV-Rezi Modul bei Inbetriebnahme auf Bosch Prüfstand.

Ziel ist es durch eine detaillierte Vermessung des PCV-Rezi Moduls einen funktionalen Nachweis der Dosiermenge und Rezirkulationsperformance zu erbringen und damit die vorab durchgeführten Simulationen zu bestätigen.

Wie bereits dargelegt, lässt sich aus den Simulationen ableiten, dass die abgeschätzte Performance für alle geforderten Rezirkulations-Temperatur-Niveaus ab einem Lastbereich von 7 % als ausreichend erachtet werden kann.

Die Vermessung des PCV-Rezi-Moduls (Abbildung 68) zeigt eine gute Übereinstimmung des Druckanstiegs mit den Simulationsergebnissen. Folglich kann bestätigt werden, dass die vorhergesagte Rezirkulationsperformance erfüllt ist und Lastbereiche ab 7 % bedient werden können.

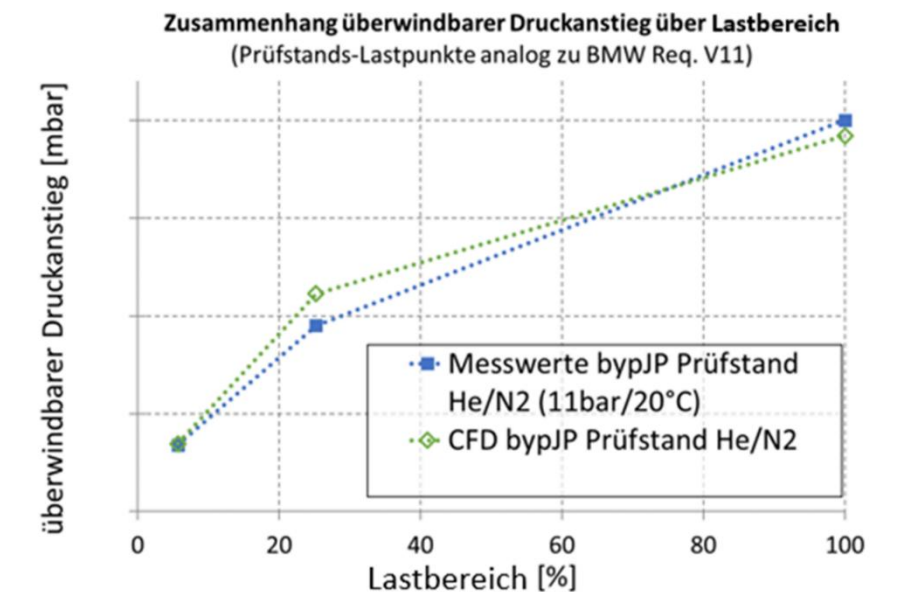


Abbildung 68: PCV-Rezi Modul Messwerte am Prüfstand ggü. Simulation von BMW-Lastbereich.

In einem nächsten Schritt wurde ein spezieller Fokus auf die Niedriglast (Lastpunkt 1 & 2) gelegt, wobei die zuvor dargestellten Messergebnisse zur Bestätigung der Rezirkulationsperformance herangezogen wurden.

Der Hintergrund ist der Nachweis mittels CFD-Simulation, dass alle Lastpunkte der BMW-Anforderungen erfüllt werden (Abbildung 69). Hinsichtlich des ersten Lastpunkts ist lediglich ein geringer Auslegungsvorhalt zu verzeichnen.

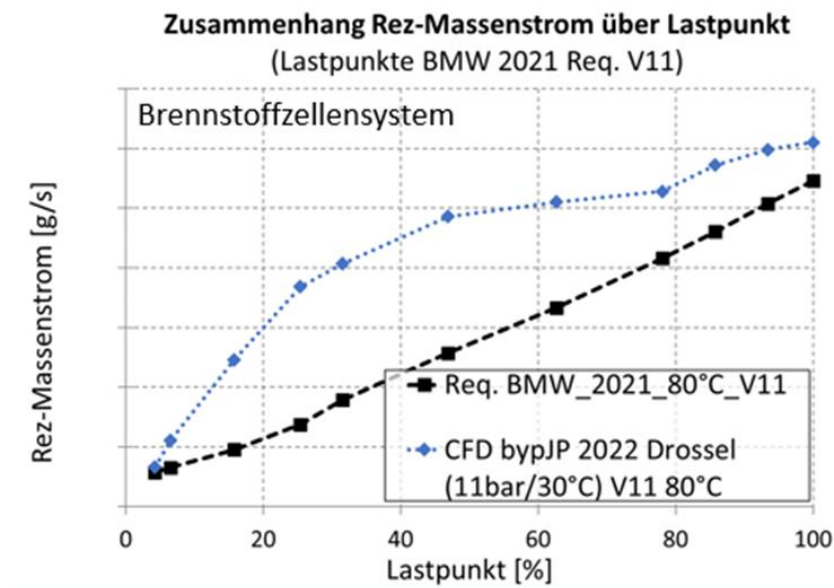


Abbildung 69: PCV-Rezi Modul Rezirkulationsperformance: CFD-Simulation ggü BMW-Anforderungen.

Des Weiteren wurden die Lastpunkte 1 und 2 mit variablem Massenstrom am Prüfstand betrieben und einer Betrachtung gegenüber der CFD-Simulation unterzogen. Dabei wurden Lastpunkte untersucht, die über die von BMW geforderten Lastpunkte hinausgehen. Es lässt sich konstatieren, dass das Verhalten in Abhängigkeit vom variierten Massenstrom sowohl im ersten als auch im zweiten Lastpunkt eine hohe qualitative Korrelation mit den Simulationsergebnissen aufweist.

Im zweiten Lastpunkt zeigt die Messung einen leicht geringeren Druckanstieg als in der Simulation (kleiner als 4 mbar; siehe Abbildung 70). Jedoch wurde in diesem Lastpunkt, wie bereits oben dargestellt, die BMW-Anforderung übererfüllt. Unter Berücksichtigung der aktuell vorliegenden Messwerte lässt sich somit ableiten, dass die Anforderung im zweiten Lastpunkt weiterhin erfüllt ist.

Im ersten Lastpunkt zeigt die Messung einen leicht höheren Druckanstieg im Vergleich zur Simulation (ca. 2 mbar; siehe Abbildung 71). In Bezug auf die vorliegenden Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese an der Grenze der Genauigkeit liegen. Für einen möglichen Serieneinsatz ist eine detailliertere Betrachtung erforderlich, insbesondere unter Berücksichtigung einer erhöhten Serienstreuung.

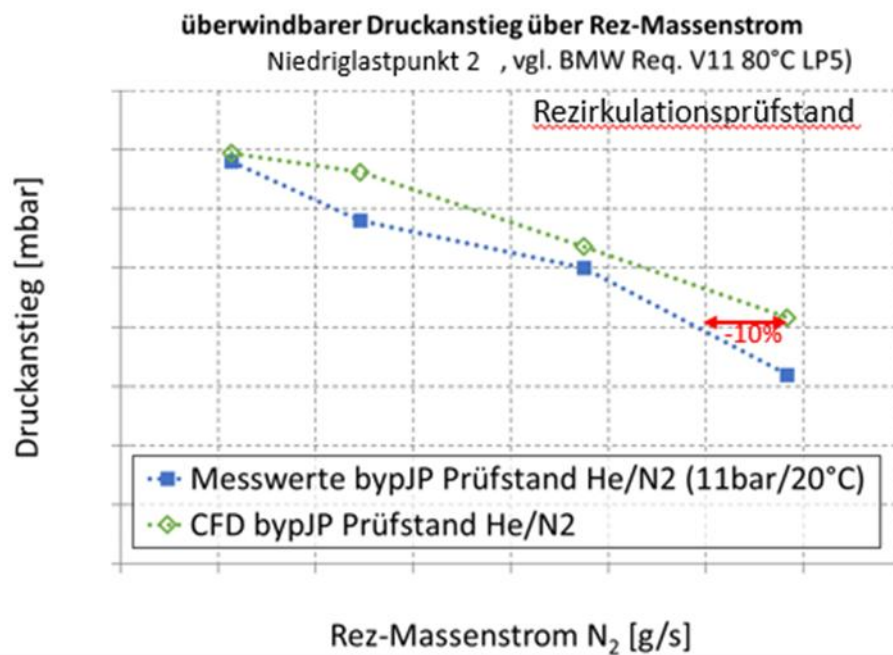


Abbildung 70: Vergleich Prüfstands-Messung vs. Prüfstands-Simulation – Sensitivität auf Variation m_{Rez} in Niedriglast 7 % (Lastpunkt 2).

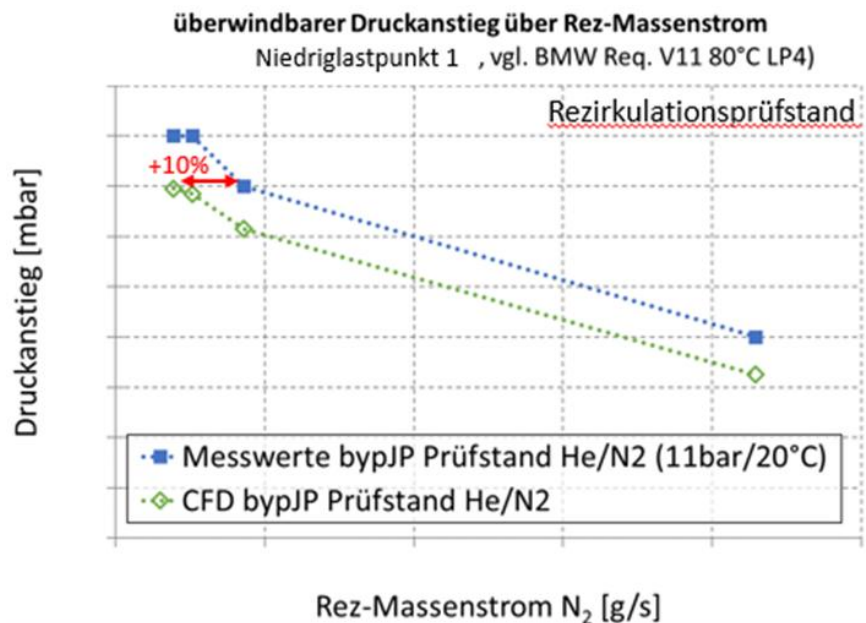


Abbildung 71: Vergleich Prüfstands-Messung vs. Prüfstands-Simulation – Sensitivität auf Variation m_{Rez} in Niedriglast 7 % (Lastpunkt 2).

Die durchgeführten Messungen lassen den Schluss zu, dass eine hohe Vergleichbarkeit zu den mittels der Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführten Simulationen gegeben ist.

Im Rahmen der Untersuchung wurde neben der Evaluierung der CFD-Simulationenwerte auch eine akustische Evaluierung des PCV-Rezi-Moduls durchgeführt. Da im Rahmen des FaeBS-Projekts kein aktives Rezirkulationsgebläse zum Einsatz kommt, ist sicherzustellen, dass durch den Überschall in der Jetpumpe keine Störfrequenzen entstehen, welche einen Einfluss auf den Komfort bilden.

Eine Untersuchung am Bosch-Prüfstand hat ergeben, dass bei Verwendung von Stickstoff keine nennenswerten Geräuscentwicklungen zu verzeichnen sind. Diese Aussage muss am Funktionsprüfstand im kompletten BMW-System mit H₂ verifiziert werden.

Nach der Lieferung der PCV-Rezi-Module an BMW konnten erste Messdaten am BMW-Prüfstand generiert werden. Im weiteren Verlauf wurde eine regelmäßige Austauschrunde zwischen BMW und Bosch etabliert, um eine zeitnahe Evaluierung der aktuellen Messdaten zu gewährleisten. In diesem Kontext wurden adäquate Messgrößen, -stellen und -mittel definiert, welche eine Überwachung der Komponente sowie des Systems gewährleisten.

Das beschriebene Vorgehen ermöglichte eine zeitnahe Kommunikation und Klärung von Unklarheiten oder unplausiblen Messergebnissen.

Unter Zuhilfenahme der vorliegenden Messdaten war Bosch in der Lage, eine erste, grobe Abschätzung der Rezirkulation anhand des Anodendrucks vorzunehmen. In Bezug auf die Erfüllung der Anforderungen kann seitens BMW ein positiver Befund festgestellt werden. Um die Auslegung des PCV-Rezi-Moduls final bestätigen zu können, wäre es erforderlich, am BMW-Prüfstand gezielt die Lastpunkte aus dem Lastenheft anzufahren, um diese mit der CFD-Simulation und den Messungen am Bosch-Komponentenprüfstand zu vergleichen. Im Rahmen des Abschlussgesprächs wurde seitens BMW eine positive Rezirkulationsperformance am BMW-System bestätigt.

Im Rahmen des FaeBS-Abschlussgesprächs wurden seitens BMW zudem die folgenden Projektziele bestätigt:

Tabelle 15: FaeBS Projektziele PCV-Rezi-Modul

Projektziele		
Ziel	Status am Projektende	
Ersatz der aktiven Rezirkulation (Pumpe, Gebläse) durch passiver Rezirkulation (Saugstrahlpumpe)	Das Ziel wurde erreicht, eine aktive Rezirkulation kann durch eine passive Rezirkulation ersetzt werden. Die Vorteile hinsichtlich Akustik, Bauraum und Gewicht können abgeschöpft werden	
KPI	Projekt-Zielwert:	Status am Projektende
KPI 5.1.1: Funktionalität passives Druckregelventil- <u>Rezirkulationsmodul</u> über den gesamten Betriebsbereich	erfüllt TRL6	erfüllt
KPI 5.1.2: Lebensdauernachweis	6000h **) bestanden TRL6 System,	Erste Indikation Systemdauerlauf: ca. 900 Stunden
KPI 5.1.3: Absicherung Temperaturerhöhung auf 85°C (Peak 105°C)	85°C / 105°C TRL5	85°C erfüllt 105°C erfüllt
KPI 5.1.4: Froststart Funktionalität unter Systembedingungen mit passivem <u>Rezirkulationsmodul</u>	erfüllt TRL5	erfüllt

Unter Berücksichtigung der bisherigen Entwicklungsschritte kann aus der Perspektive von Bosch ein positiver Rückblick auf den Entwicklungsstatus des PCV-Rezi-Moduls gewagt werden.

Arbeitspaket 5.2 – Wasserabscheider

AP Leiter: Woco Industrietechnik GmbH

AP 5.2.1.1 Abstimmung Anforderungsset

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Anforderungen an das Wasserabscheidemodul festzulegen.

Zum Stand der Projektplanung lag ein kurz gefasstes Anforderungsset vor. Anhand dessen wurde die grundsätzliche Konzeptionierung vorgenommen. Dieses Anforderungsset wurde im Laufe der Projektlaufzeit um weitere Informationen ergänzt, die aus den Anforderungen des Gesamtsystems abgeleitet wurden. Die Definition des Anforderungssets ging hierbei von BMW aus. Punkte, die für Woco kritisch erschienen, wurden diskutiert und falls notwendig angepasst.

Die Schnittstellenabstimmung und Definition erfolgten jeweils mit den betroffenen Partnern. Hier wurden die genauen Zuständigkeiten und bereits vorhandene Vorgaben besprochen und einvernehmlich umgesetzt.

Als Ergebnis von AP 5.2.1.1 liegt ein abgestimmtes Anforderungsset vor.

AP 5.2.1.2 Konzipierung und Auslegung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, ein Wasserabscheidemodul inklusive der Ventiltechnik für den Systemprüfstand zu konzipieren und auszulegen.

Die wesentliche Bauteilgeometrie wird durch Schnittstellen zum System und den gegebenen Bauraum definiert. In diesen Raum wird dementsprechend das Gehäuse integriert.

Die Innengeometrie des Wasserabscheidemoduls ist für dessen Performance ausschlaggebend. Dementsprechend wurde diese zuerst in mehreren CFD-Simulationsschleifen hinsichtlich Abscheidegrad und Druckverlust optimiert. Ein Augenmerk wurde auch auf das Abflussverhalten und das Schwappverhalten des abgeschiedenen Wassers gelegt.

Anschließend wurden Funktionsmuster gedruckt und am Komponentenprüfstand geprüft. Neben Abscheidegrad und Druckverlust wurde das Abflussverhalten des Wassers (Wassermitleißen) untersucht.

In mehreren Optimierungsschleifen wurde die Innengeometrie getestet. Im Anschluss wurden weitere Komponenten wie die Ventiltechnik und Schnittstellen für Sensoren integriert.

In Abbildung 72 ist das finalisierte CAD-Modell des Wasserabscheidemoduls zu sehen.

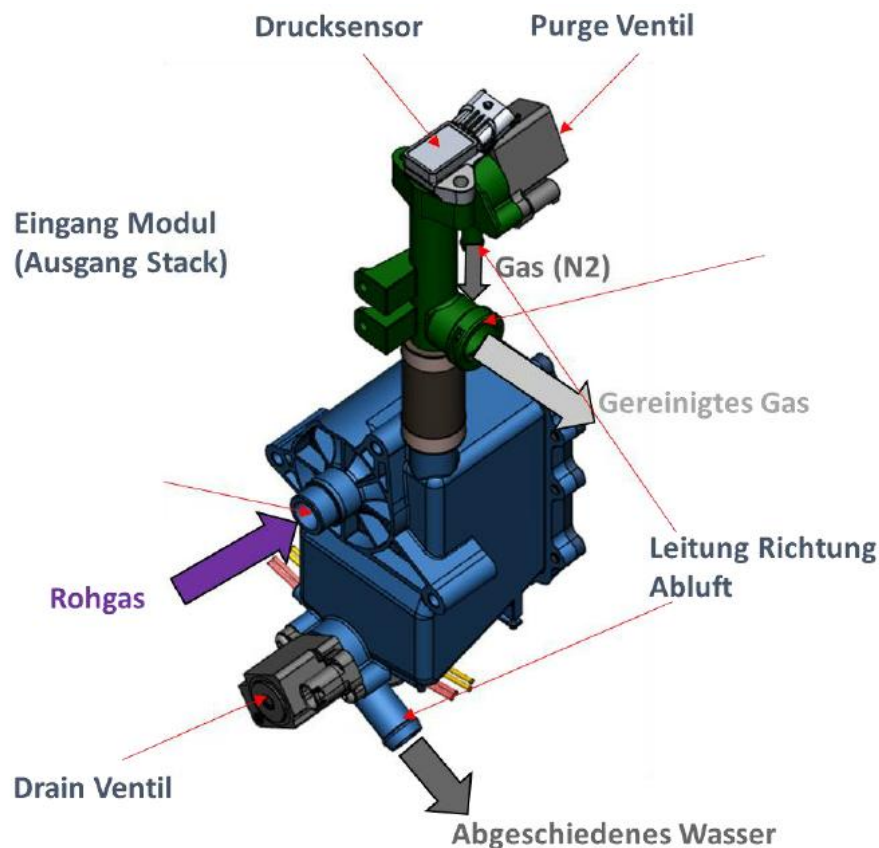


Abbildung 72: Finales CAD Modell Wasserabscheider.

In der Abbildung sind die Ein- und Ausgänge für Gas und Wasser zu sehen. Des Weiteren ist die Einbaulage der Ventile und des Drucksensors zu erkennen. Es ist anzumerken, dass in dem Modell Ventile eines Zulieferers verbaut sind.

Im Inneren des Abscheiders sind die funktionsrelevanten Bauteile. Zum einen ein Filtereinsatz für das abgeschiedene Wasser, der das Drain-Ventil vor Beschädigung schützen soll. Des Weiteren gibt es ein Schwallselement und einen Einsatz, welche als Schwallschutz bzw. Strömungsschutz eingesetzt werden und somit Wassermiteißen nach dem Abscheidvorgang verhindern. Außerdem kann man den „Swirl“ sehen, welcher die Abscheidefunktion sicherstellt und das Wasser von der Gasphase trennt. Der Levelsensor wird für eine effektive Steuerung der Ventile benötigt.

Der Konstruktionsstand ist als final zu sehen und wurde dementsprechend auch so als Funktionsmuster für den Systemprüfstand umgesetzt.

Ein weiterer Aspekt des Arbeitspaketes ist das Erarbeiten eines Konzepts für das passive Drain-Ventil. Die Grundsätzliche Funktion des Konzeptes wurde nachgewiesen. In Abbildung 73 ist ein Modell des Abscheidergehäuses zu sehen, in den ein passives Ventil integriert wurde.

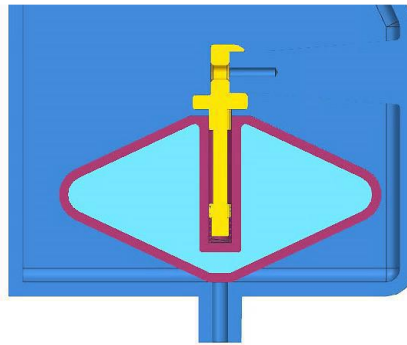


Abbildung 73: Ausschnitt des CAD-Modells des passiven Ventils.

Wesentliche anwendungsspezifische Einflussgrößen für die Auslegung waren hierbei die ermittelte Auftriebskraft, die Dimensionierung der Rückstellfeder und die Reibeigenschaften der Schwimmerführung. Es wurde darauf geachtet, dass die Feder möglichst keine Querbelastungen erfährt und die Führung reibungsoptimiert geführt ist. Die Schwimmerform zielt darauf ab, sich selbst zu stabilisieren.

Des Weiteren wurde ein Woco eigenes aktiv gesteuertes Ventil für den Purge- und Drainvorgang entwickelt. Neben einem Modell für die Umsetzung als Prototyp wurde ein Modell für die Umsetzung in der Serie erarbeitet. In Abbildung 74 sind beide Modelle zu sehen.

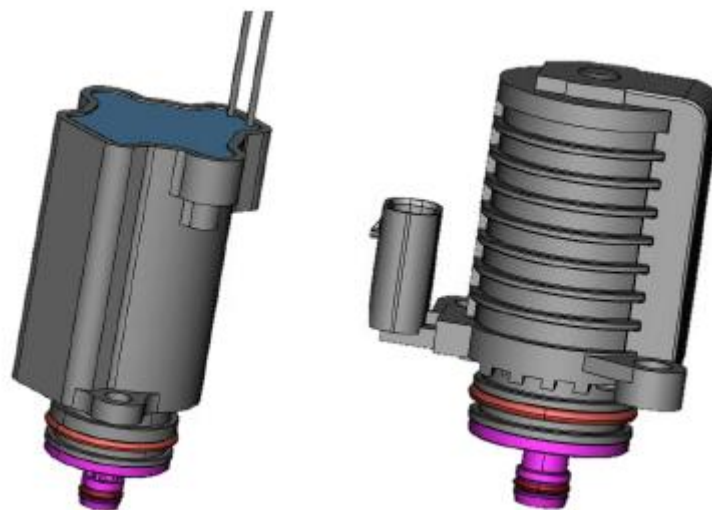


Abbildung 74: CAD-Modell des Magnetventils. Prototyp (l); Serie (r)

Wichtige Parameter für die Entwicklung der Ventile waren die Druckbelastung durch das System, die innere Dichtheit, die äußere Dichtheit, die Durchflussrate von Wasser, die Durchflussrate von Luft und die Temperaturbelastung durch die Umgebung und das durchströmende Medium.

Das Gehäuse im Modell für die Serienumsetzung soll mittels Spritzguss aus Kunststoff gefertigt werden. Erwähnenswert ist hierbei die Integration eines passenden Steckverbinders. Die sonstige Dimensionierung im Inneren entspricht der Auslegung für die Prototypen.

Als Ergebnis des Arbeitspakets 5.2.1.2. ist die Konzipierung und Auslegung des Wasserabscheidemoduls abgeschlossen.

Als Ergebnis des Arbeitspakets 5.2.1.2. ist die Konzipierung und Auslegung des passiven Ventils abgeschlossen.

Als Ergebnis des Arbeitspakets 5.2.1.2. ist die Konzipierung und Auslegung des Magnetventils abgeschlossen.

AP 5.2.1.3 Virtuelle Fahrzeugintegration

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, das entwickelte Wasserabscheidemodul für den Systemprüfstand auf einen virtuellen Fahrzeugbauraum zu übertragen. Dieser Fahrzeugbauraum wurde hierfür von BMW definiert und anschließend mit den Partnern diskutiert, sodass ein passender Kompromiss gefunden werden konnte.

In Abbildung 75 ist das Modell für die virtuelle Fahrzeugintegration zu sehen.

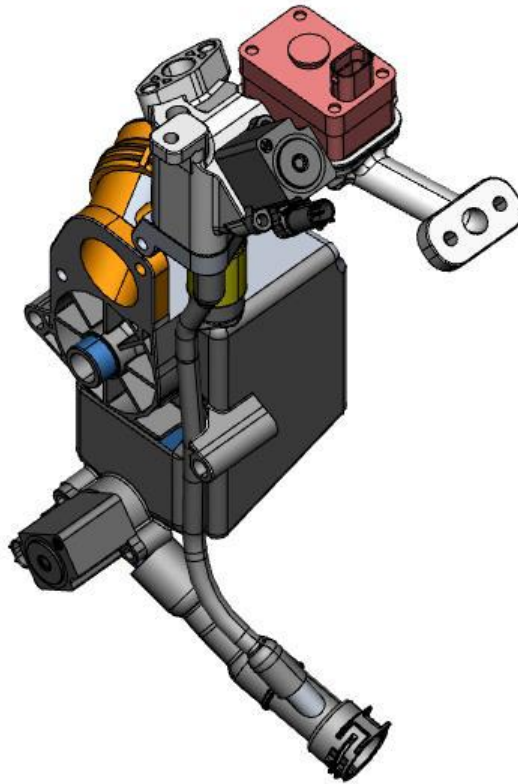


Abbildung 75: CAD Modell virtuelle Fahrzeugintegration.

Das zu sehende Modell ist im Gesamtfahrzeug integriert. Wesentliche Unterschiede zum Konstruktionsstand des Prototypen sind der geschweißte Deckel, die angepassten Wandstärken, der zusätzlich integrierte Kühlmittelstutzen und die Anpassung an die strengen Bauraumvorgaben aus der Fahrzeugumgebung. Im Inneren wurde ein vergrößertes Sensorkonzept integriert, welches genauere Ergebnisse liefert.

Es ist zu erwähnen, dass das hier zu sehende Wasserabscheidemodul so konstruiert wurde, dass es als Spritzgussbauteil realisierbar ist. In Abbildung 76 ist das Schieberkonzept für das Gehäuse des Wasserabscheiders zu sehen.

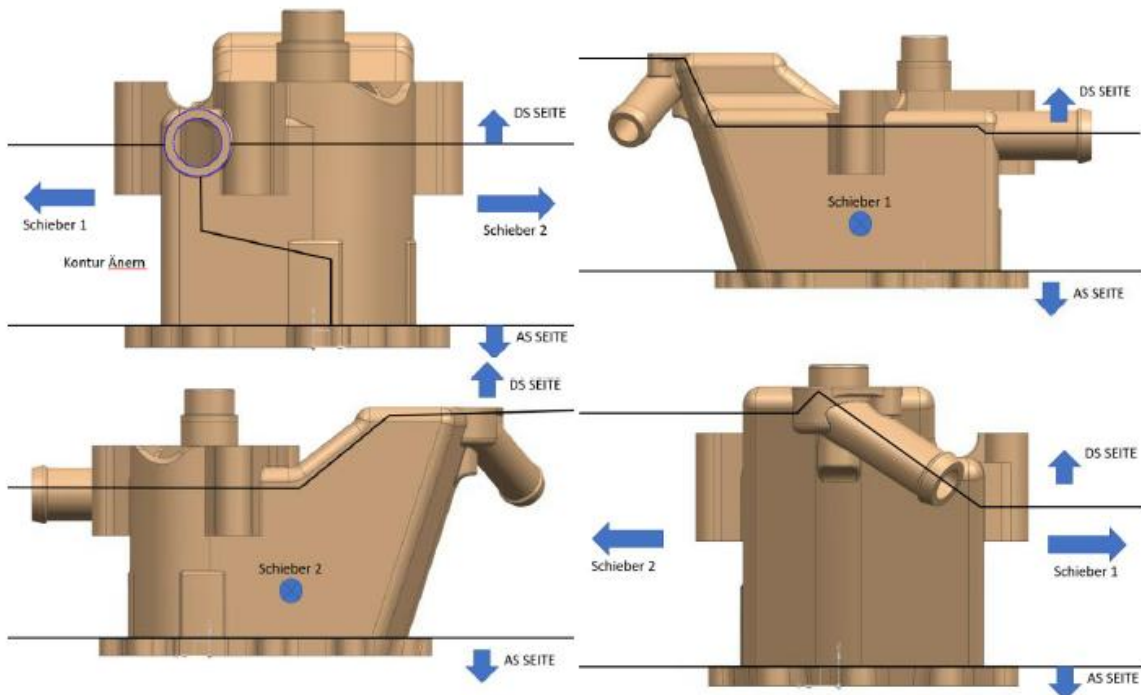


Abbildung 76: Schieberkonzept Wasserabscheidergehäuse.

Es wurde genau geprüft und bestätigt, dass eine Fertigbarkeit des Wasserabscheidemoduls gegeben ist. Ergänzend ist zu sagen, dass in AP 5.2. das Serienkonzept für das Woco eigene Magnetventil zu sehen ist.

Als Ergebnis des Arbeitspakets 5.2.1.3 liegt ein auskonstruiertes und im Serienprozess fertigbares 3D-Modell für die virtuelle Fahrzeugintegration vor.

AP 5.2.2 Fertigung und Auslieferung der Prototypen

Ziel des Arbeitspaketes ist die Fertigung und Auslieferung von Prototypen für den Systemprüfstand und die Erprobung an den Komponentenprüfständen.

Die Funktionsprototypen für den Systemprüfstand wurden aus einem Edelstahl mittels direktem Metall-Lasersintern hergestellt. Durch dieses Verfahren kann die komplexe Geometrie in einem Stück aus Metall gefertigt werden. Bereiche, die hohe Anforderungen an Maßhaltigkeit oder Oberflächenbeschaffenheit haben, werden spanend nachbearbeitet. Hierfür wurden Bearbeitungszeichnungen für alle Einzelteile

und für das Gesamtmodul erstellt. In Abbildung 77 ist das vollständig montierte Modul zu sehen.

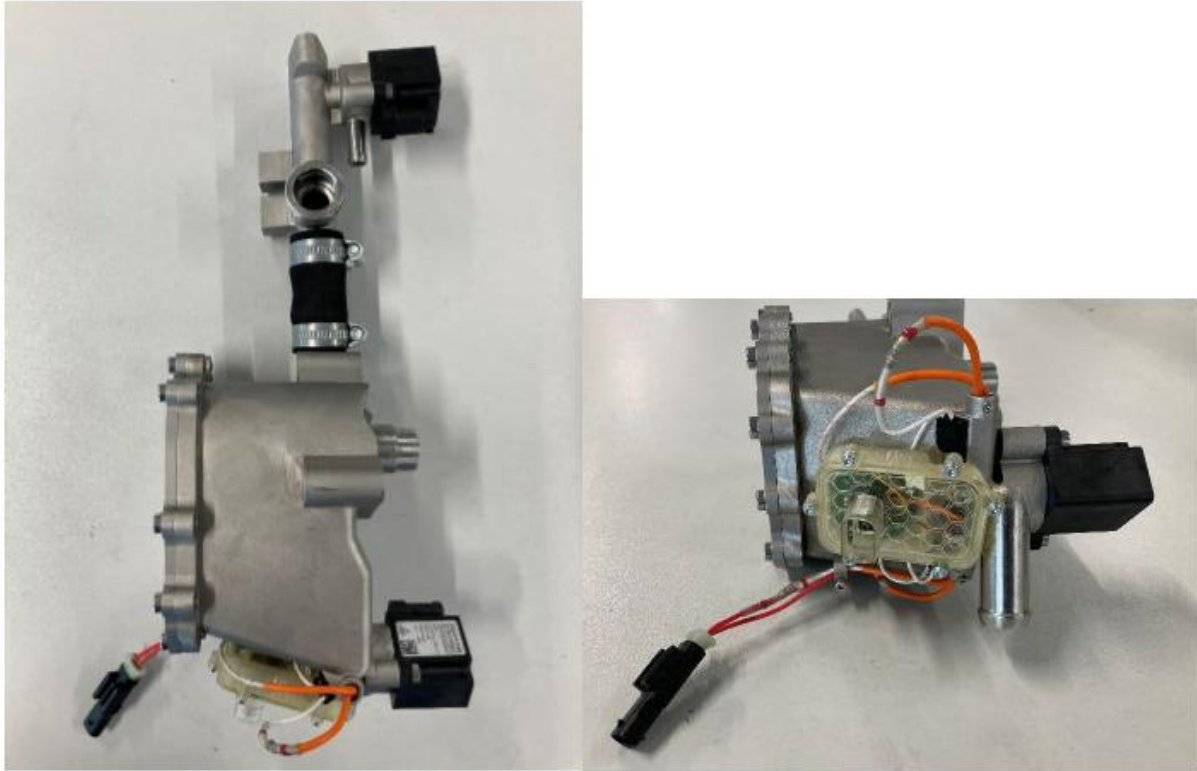


Abbildung 77: Prototyp des Wasserabscheidemoduls.

Die Herstellung erfolgte bei einem externen Lieferanten. Die Montage wurde im Woco internen Musterbau durchgeführt. Insgesamt wurden vier Prototypen hergestellt. Davon wurden drei Stück Anfang Oktober 2022 an BMW ausgeliefert und ein Prototyp verblieb bei Woco für Prüfungen an der Einzelkomponente. Zum Ende des Projektes wurden alle Prototypen wieder an Woco übergeben

Ein weiterer Teil des Arbeitspaketes bestand aus dem Funktionsnachweis des passiven Ventils. Die hierfür benötigten Bauteile wurden aus verschiedenen Materialien hergestellt. Der Schwimmer ist aus einem besonders leichten Material, das Gehäuse aus einem Material mit hoher Festigkeit und der Deckel ist für eine hohe Maßhaltigkeit aus Aluminium ausgelegt, um eine gute O-Ring Pressung sicherzustellen und um einen Anschluss an die Druckluft darstellen zu können. Der Aufbau ist in Abbildung 78 zu sehen.

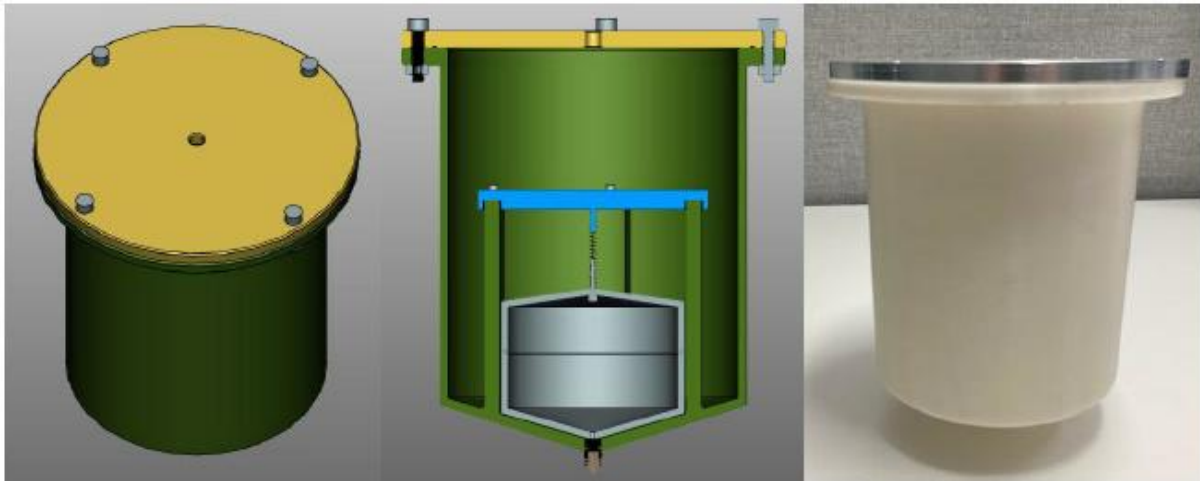


Abbildung 78: Prototypenaufbau passives Ventil.

Ein weiterer Aspekt des Arbeitspaketes war der Aufbau der Prototypen des Woco-Magnetventils. In Abbildung 79 ist ein Prototyp des Magnetventils zu sehen.

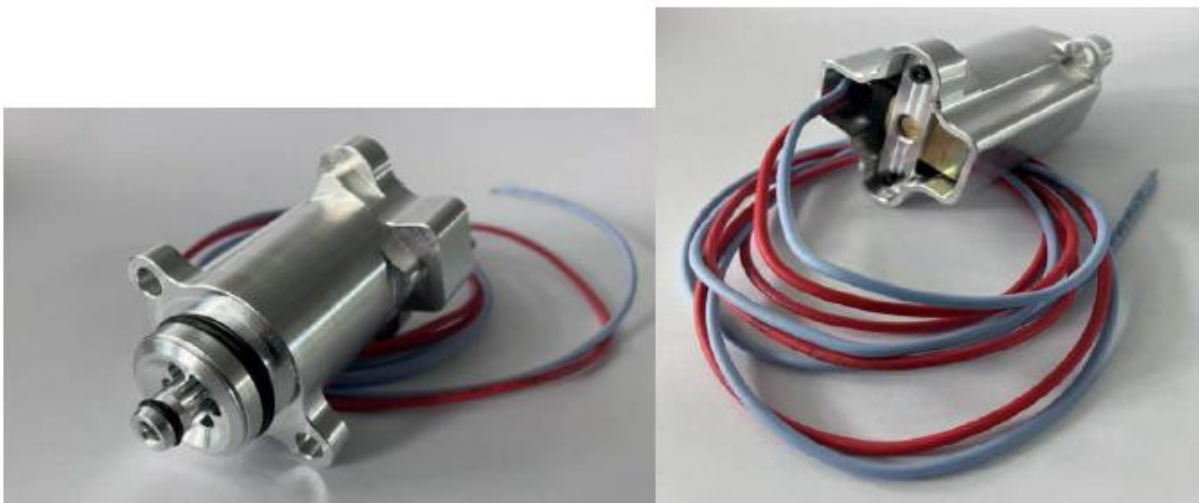


Abbildung 79: Prototyp Magnetventil.

Der Prototyp des Magnetventils hat ein Gehäuse aus Aluminium. Die Einzelteile, deren Material funktionsrelevant ist, wurden bereits in den für die Serie vorgesehenen Materialien ausgeführt. Dies betrifft beispielsweise die Dichtungen und die Feder.

Als Ergebnis von Arbeitspaket 5.2.2 liegen Funktionsprototypen für den Einsatz im Systemprüfstand vor.

Als Ergebnis von Arbeitspaket 5.2.2 liegen 3D-gedruckte Prototypen für den Funktionsnachweis des passiven Ventils vor.

Als Ergebnis von Arbeitspaket 5.2.2 liegen Prototypen für das aktive Woco-Magnetventil vor.

AP 5.2.3 Test und Validierung

Ziel des Arbeitspaketes ist die Erprobung des Wasserabscheidemoduls und seiner Einzelkomponenten am Komponentenprüfstand.

Die Erprobung der Funktion des Wasserabscheiders erfolgt an einem Strömungsprüfstand (Abbildung 80), der mit einer Wassereindüsungseinheit ausgestattet ist.



Abbildung 80: Grundaufbau Strömungsprüfstand.

Der Volumenstrom kann hierbei von 0 m³ bis 50 m³/min eingestellt werden. Die Einheit zur Wassereindüsung zerstäubt bis zu 3 l Wasser pro Minute in feinste Tröpfchen und die Messsensorik kann Differenzdrücke bis zu 150 mbar genauestens erfassen. Um immer gleiche Bedingungen zu gewährleisten, wird der Raum klimatisiert und gleichzeitig wird der Umgebungsdruck und die Luftfeuchte aufgezeichnet. Für das Förderprojekt wird der Prüfstand dafür verwendet den Druckverlust und den Abscheidegrad des Wasserabscheidemoduls zu ermitteln.

Mithilfe des Prüfstandes wurden alle von BMW vorgeschlagenen Lastpunkte bzgl. Druckverlust und Abscheidegrad geprüft. Die Ergebnisse zum Abscheidegrad sind in folgender Tabelle 16 zu sehen.

Tabelle 16: Versuchsergebnisse Abscheidegrad & Druckverlust

Lastpunkt Nr.	Vorgabe Abscheidegrad [%]	Vorgabe Druckverlust [mbar]	Status Abscheidegrad	Status Druckverlust
1	98%	35	i.O	n. Abst. i.O.
2	98%	35	i.O	n. Abst. i.O.
3	97%	35	i.O	i.O
4	60%	35	i.O	i.O
5	77%	35	i.O	i.O
6	97%	35	i.O	i.O
7	97%	35	i.O	i.O
8	95%	35	i.O	i.O
9	89%	35	i.O	i.O
10	87%	35	i.O	i.O
11	96%	35	i.O	i.O
12	97%	35	i.O	i.O
13	0%	35	i.O	i.O
14	60%	35	i.O	i.O

Es kann vermerkt werden, dass alle ermittelten Abscheidegrade über den Zielvorgaben liegen.

Es ist ein quadratischer Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckverlust zu erkennen. Die hier ermittelten Werte für den Druckverlust überschreiten in zwei

Lastpunkten die Vorgaben. Dies wurde mit BMW abgestimmt und wurde als unproblematisch für den Betrieb eingestuft.

Ein weiterer Aspekt war das Verhalten des Wasserabscheidemoduls beim sogenannten Froststart. In Abbildung 81 ist ein Bild des Abscheiders im Klimaschrank zu sehen.



Abbildung 81: Innenraum des Abscheiders mit definierter gefrorener Wassermenge (l); Wasserabscheidemodul im Klimaschrank bei -40°C (r).

Es wurde abgeprüft, unter welchen Bedingungen sich Wasser ansammeln und einfrieren kann, unter welchen Bedingungen Wasser bei Systemstart problematisch sein kann und was passiert, wenn trotz entsprechender Maßnahmen eine größere Menge Wasser im Tank verbleibt. Die wichtigsten Tests und Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

- ➔ **Betrieb & Einlagerung:** Es konnte keine Bildung von Eis beobachtet werden, die das System beeinträchtigt
- ➔ **Schlagartiges Wassereinfüllen nach Einlagerung:** Wenn das eingefüllte Wasser eine definierte Temperatur nicht unterschreitet, kommt es zu keinerlei Eisbildung. Wir gehen davon aus, dass das System kein Wasser emittiert, das eine kritische Temperatur aufweist.
- ➔ **Bewusstes einfrieren von Wasser im Abscheider:** Es bildet sich eine Eisschicht im Ventileinlassbereich. Allerdings ist das Ventil regulär schaltbar und nimmt keinen Schaden

Zusammengefasst kann das System im Regelbetrieb ohne Heizer betrieben werden.

Als Konstruktionsempfehlung wird abgeleitet, dass im Ventilbereich möglichst wenig Metall eingesetzt werden sollte, da dieses Eisbildung begünstigt.

Zusätzliche Prüfungen am Wasserabscheidemodul waren Dichtheitsprüfungen mit Luft und Helium an diversen Modulen und Einzelkomponenten, Prüfung des Ventildurchflusses bei Gas und bei Wasser und zahlreiche Zwischenmessungen der Abscheideperformance.

Weiterer Inhalt des Arbeitspaketes ist der Funktionsnachweis des passiven Ventils. In Abbildung 82 ist der Versuchsaufbau mit offenem Deckel zu sehen. Man erkennt von innen die schwarze Schwimмераufnahme.

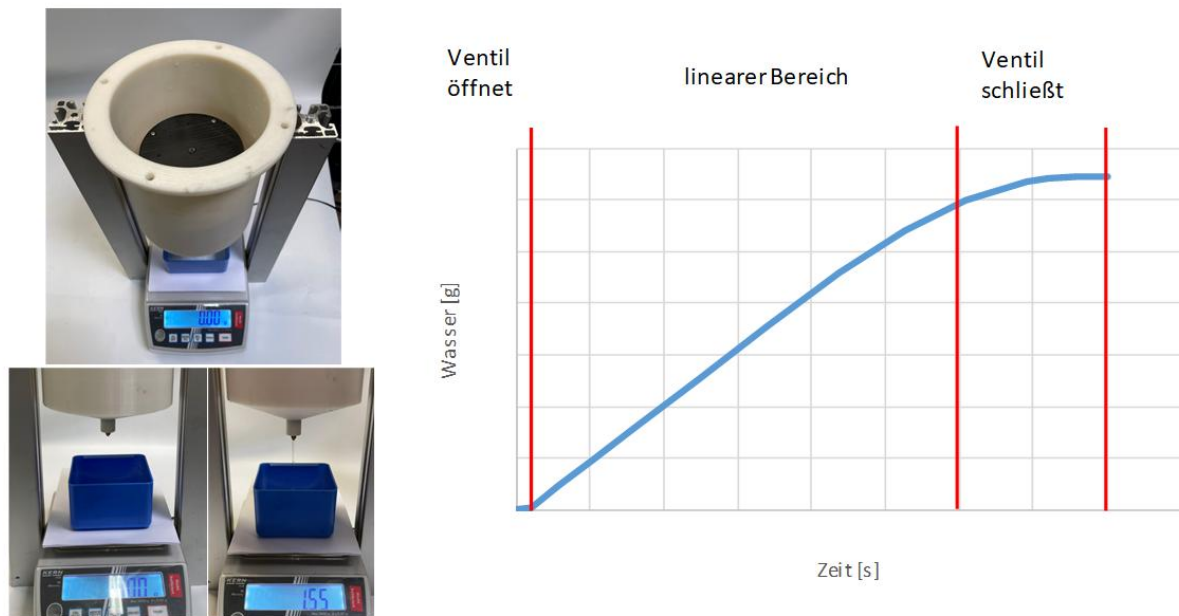


Abbildung 82: Versuchsaufbau passives Ventil (l); Schaltvorgang (r).

Es konnte nachgewiesen werden, dass das Ventil nach dem Einfüllen von Wasser selbstständig öffnet und nach dem Austragen einer definierten Wassermenge wieder selbstständig schließt.

Es ist zu sehen, dass das Ventil nach dem Eintrag des Wassers öffnet und anschließend einem linearen Verhalten folgend Wasser ablässt, es stellt sich ein konstanter Volumenstrom ein. Der Schließvorgang ist im Vergleich zum Einschaltvorgang verzögert. Das Verhalten ist abhängig vom Systemdruck. Das Funktionsprinzip konnte nachgewiesen werden, allerdings lässt sich feststellen, dass die in diesem Projekt angestrebte Dynamik nicht hiermit abgebildet werden kann. Ein Einsatz in anderen Systemen und Anwendungen ist möglich und wird angestrebt.

Ein weiterer Teil des Arbeitspaketes war die Erprobung des Woco-eigenen Magnetventils. Dieses wurde folgenden Prüfungen unterzogen: Spulenwiderstandsmessung, Messung der Schaltspannung, Messung der externen Dichtheit, Messung der internen Dichtheit, Messung der Durchflussrate und Verhalten bei Vibration und mechanischem Schock. Exemplarisch wird hier auf das Verhalten bei Vibration eingegangen.

In Abbildung 83 sind die Prüfaufbauten für die Test am Shakerprüfstand zu sehen.

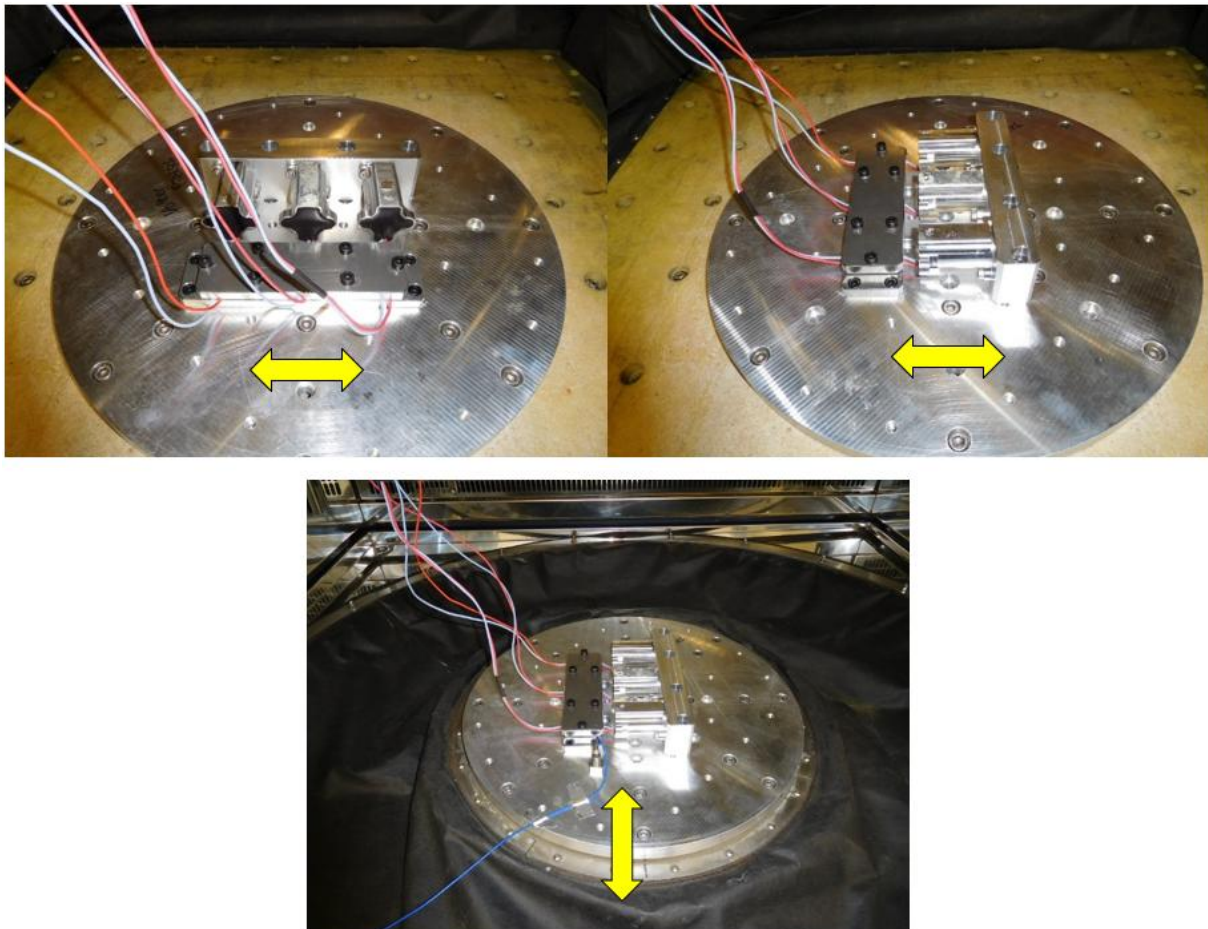


Abbildung 83: Versuchsaufbau am Shakerprüfstand.

Die erste Belastung der Ventile am Shakerprüfstand war ein Breitbandrauschen. Hierbei wurde in alle Raumrichtungen eine Belastung angelegt. Das ganze wird überlagert von einem Temperaturwechsel.

In Abbildung 84 ist eine exemplarische Abbildung der tatsächlichen Anregung zu sehen.

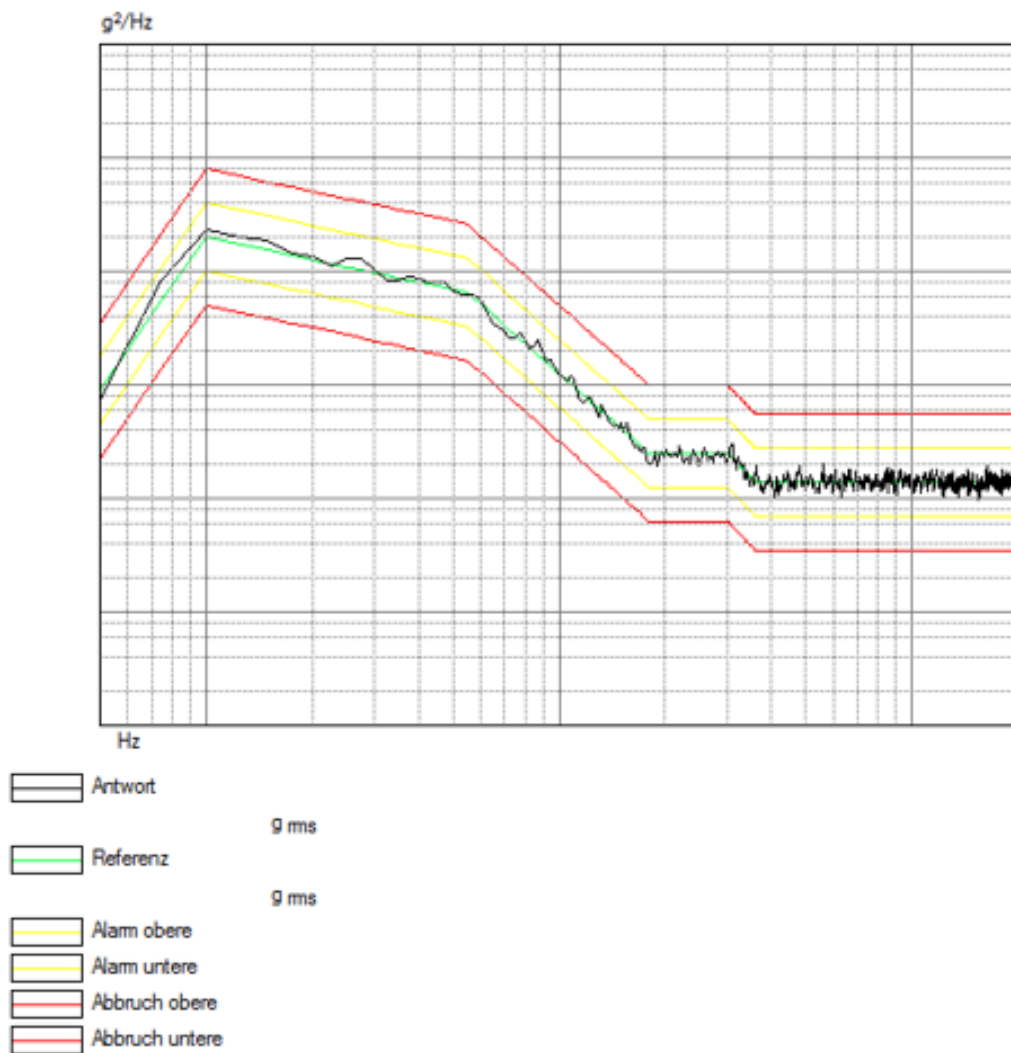


Abbildung 84: Belastung Breitbandrauschen.

Neben dem Breitbandrauschen wurde außerdem der mechanische Schock untersucht. Dieser ist vom Aufbau identisch, wobei die Belastung deutlich höher ist.

Ergebnis der Prüfungen am Shakerprüfstand ist, dass die Schaltfunktion der Bauteile unbeeinträchtigt bleibt, auch die Dichtheit ist weiterhin gewährleistet. Es sind keine visuellen Beschädigungen erkennbar.

Als Ergebnis von Arbeitspaket 5.2.3. wurde die Performance des finalen Prototyps hinsichtlich des Druckverlustes und des Abscheidegrads ermittelt. Zusätzlich wurde das Verhalten bei Grenzeffekten, wie dynamischen Schaltvorgängen oder Einfrierszenarien untersucht.

Als Ergebnis von Arbeitspaket 5.2.3. wurde die Performance des aktiven und des passiven Ventils ermittelt.

VIII H₂-SENSOREN (AP 6)

AP Leiter: Robert Bosch GmbH

Arbeitspaket 6.1 – H₂-Niederdrucksensoren

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde das Sensorverhalten im BMW-Brennstoffzellensystem bei unterschiedlichen, kritischen bzw. randlagigen Betriebsbedingungen erforscht. Dies umfasst sowohl die Einbaubedingungen im Anodenmodul als auch klimatische Einflussfaktoren, insbesondere eine Variation der Temperatur im Bereich unterhalb von null Grad Celsius.

Eine Analyse der verfügbaren Dokumente ergab, dass keine übereinstimmende Beschreibung der Anforderungen zwischen BMW und Bosch festgestellt werden konnte. Als Resultat der gemeinsamen Erörterung wurde ein detaillierter Vergleich der Anforderungen mit den technischen Spezifikationen erstellt.

Schwerpunkt wurde auf die systemspezifische Genauigkeit, die Einbauposition inklusive der mechanischen und elektrischen Anbindung an das System sowie die Sensorgenauigkeit gelegt. Des Weiteren konnte ein detailliertes gegenseitiges Verständnis hinsichtlich des Aufbaus und Zusammenwirkens von Sensor und Brennstoffzellensystem erarbeitet werden. Das erste Teilergebnis besteht somit in der Etablierung einer gemeinsamen Basis an technischen Definitionen.

Nach einer detaillierten Analyse der spezifischen Anforderungen von BMW, in Bezug auf Temperaturen, wurden die Temperaturspitzen von 105°C in das Temperaturlastkollektiv von Bosch integriert. Dies ermöglichte eine detaillierte Analyse der Lebensdauernanforderungen, die auf Basis der Arrhenius-Gleichung für Hochtemperaturlagerungen über Lebensdauer und der Coffin-Manson-Gleichung für Temperaturschockwechsel über Lebensdauer durchgeführt wurde. Im Anschluss wurden die errechneten Werte in die Genauigkeitsbetrachtung des Niederdrucksensors eingebunden.

Im Rahmen der Erprobung wurde darüber hinaus die Leakage-Rate des Sensors sowohl mit einem Flansch als auch mit zwei Flanschen evaluiert. Als Prüfmedium wurde Helium verwendet, welches auf Wasserstoff referenziert werden kann. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf dem Design mit einem Flansch, welches mit verschiedenen Montagepraktiken montiert wurde, um ein einseitiges Anpressen des O-Rings im Bohrloch zu erzeugen. Einflüsse auf die Leakage-Rate, die durch den Anschraubprozess und das damit verbundene einseitige Andrücken des O-Rings an die Bohrlochwand entstehen, konnten nicht festgestellt werden. Das Design mit zwei Flanschen hingegen gewährleistet eine erhebliche Montagesicherheit im Kundenwerk.

Im Rahmen der technischen Definition erfolgte zudem die Definition der Zuverlässigkeit des LPS-FCs gegen Einfrieren bei hoher Wasserbelastung als weitere Anforderung. Zu diesem Zweck wurde der Druckstutzen einer Eisbildung ausgesetzt, um potenzielle Schäden an der Druckmembran und den übrigen Komponenten zu identifizieren. Eine Schädigung des Druckstutzens durch Zufrieren konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Im Zuge der Designentwicklung wurde das geplante LPS-FC-Design gestoppt, da die Erprobungen innerhalb des FaeBS Projekts aufgezeigt haben, dass bei einem Sensordesign mit offenem Druckstutzen durch Wasserablagerungen und Kondensatbildung eine Vereisung der Druckmembran induziert werden kann. Die Vereisung des Wasserkondensats, welches sich über den geforderten Temperaturbereich der FC-Applikation abgelagert hatte, stellte dabei die Hauptursache dar.



Abbildung 85: Kameraaufnahme einer Vereisung am Druckstutzen.

Eine Vereisung im Bereich der ermittelten Tieftemperaturen konnte bei einem Sensor mit offenem Druckstutzen jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei einer Kondensatbildung direkt an der Druckmembran des Sensors bei Tieftemperaturen Eisbildung erfolgt. Dies könnte zu einer Verlängerung der Startzeit bei Kältestarts führen. Eine Schädigung des Sensors durch die zuvor beschriebene Vereisung konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde eine neue Ölmembran entwickelt, deren primäre Funktion darin besteht, eine Vereisung der Membran im sensitiven Bereich zu minimieren.

Eine Beeinträchtigung der Funktion durch Vereisung des Membranrandes konnte nicht festgestellt werden, da der für die Funktion relevante Bereich der Membran seine Funktion erfüllte. Die Druckmembran der Ölvorlage wurde derart modifiziert, dass sie die geforderte Genauigkeit erfüllt und somit auch die BMW spezifischen Anforderungen. Im Rahmen des Projekts konnte eine detaillierte Erprobung der Lebensdauer in einem zertifizierten Labor bedauerlicherweise nicht mehr durchgeführt werden. Daher wurden stattdessen Systemrückmeldungen von BMW zur Analyse herangezogen.

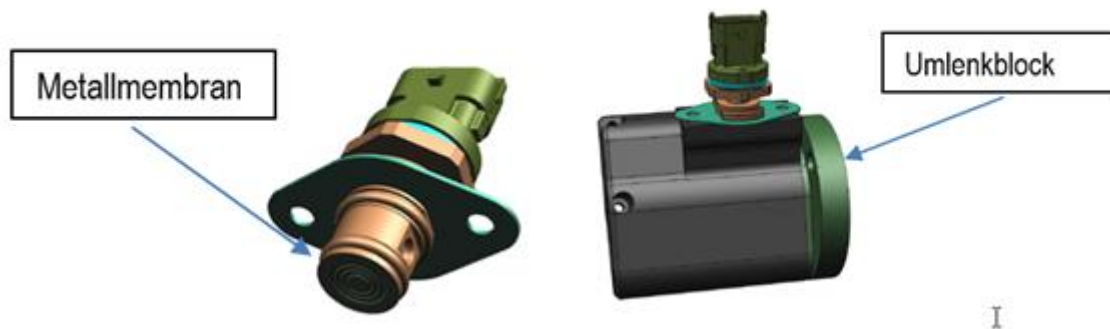


Abbildung 86: CAD- Niederdrucksensor mit Ölvorlage.

In enger Zusammenarbeit mit BMW wurde die Ölvorlage auf ihre Kompatibilität mit dem anstehenden Systemtest überprüft und in den hierfür vorgesehenen Bauraum integriert.

Musteraufbau:

Aus Basis des geplanten LPS-FCs mit offenem Druckstutzen wurde eine technische Dokumentation für den LPS-FC mit Ölvorlage erstellt, in der die Funktionen und die Unterschiede der Sensoren beschrieben werden.

Bisher unverändert bestehen die anfänglichen Forderungen zur Messgenauigkeit, hierzu wurden die zu liefernde Muster mit Ölvorlage auf ihre Genauigkeitstoleranz vermessen und bewertet.

Von Seiten des Unternehmens Bosch erfolgt die Bereitstellung der benötigten Muster in zwei verschiedenen Versionen bzw. Musterständen. In einem ersten Schritt wird das bereits geplante Design mit offenem Druckstutzen für die zügige Inbetriebnahme des Prüfstands bereitgestellt. Es handelt sich hierbei um voll funktionsfähige Muster, bei denen eine gewisse Lebensdauer erprobt und abgesichert ist. Das Risiko eines Ausfalls bzw. einer Unterbrechung der Erprobung ist als äußerst gering einzustufen.

Im weiteren Verlauf des Projekts erfolgt die Integration des LPS-FC mit Ölvorlage. Dieser wird mit dem Umlenkblock des BMW-Systems geliefert, um eine schnellere Integration ins System zu gewährleisten.

Als Sensorbasiseinheit findet eine bereits vorhandene Sensorplattform Anwendung, die mit einem Edelstahl-Druckstutzen mit Gewinde ausgestattet ist. Der Edelstahl-Druckstutzen, der verwendete Sensorplattform, wird in eine Edelstahl-Ölvorlage eingeschraubt. Die Abdichtung zwischen Ölvorlage und Druckstutzen erfolgt mittels eines Dichtkonus, um die geforderte Dichtheit zwischen Ölvorlage und Druckmembran zu gewährleisten. Um einer Korrosion vorzubeugen, wird das Gewinde mit einem für FC-Anwendungen zugelassenen Fett benetzt.

Während mit den LPS-FC Muster mit offenem Druckstutzen, die Inbetriebnahme sowie die ersten Funktionsversuche gefahren werden, wird der LPS-FC mit Ölvorlage gezielt einen geplanten Einsatz in den Kondensations- und Frostversuchen finden.

Bei der Konzeption der Muster wurde besonderer Wert auf die Auswahl wasserstoffresistenter Komponenten gelegt. Diesbezüglich wurde der O-Ring sowie wasserstoffresistente Stähle als wesentliche Elemente identifiziert, deren Eignung für den Einsatz im Kontext der angestrebten Dichtheitsanforderungen und Lebensdauer des Produkts sichergestellt werden muss. Es sei jedoch angemerkt, dass auch die als gleich benannten Komponenten von Lieferant zu Lieferant differieren. Daher wurden Wasserstofflagerungen speziell für die O-Ringe in Laboren durchgeführt. Im Rahmen der Systemerprobung erfolgte eine Analyse wasserstoffresistenter Stähle.

Im Anschluss an die Systemintegration und Inbetriebnahme des Systems erfolgt die Auswertung der Sensordaten sowie des Sensorverhaltens. Eine umfassende Evaluierung der Messwerte des Niederdrucksensors erfordert die Bereitstellung der Druck- und Temperatursignalwerte sowie weiterer Systeminformationen und -signale, um eine kontextbasierte Auswertung zu ermöglichen.

Die Analyse der umfassenden Daten aus dem Gesamtsystem zielt darauf ab, die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Sensoren sowie deren Lebensdauer zu quantifizieren, um auf dieser Grundlage Aussagen über die Zuverlässigkeit der Sensoren treffen zu können. Insbesondere bei grenzlagigen Einsatzbedingungen können die erweiterten Systemdaten dazu beitragen, Abweichungen bei Annahmen zu erkennen, zu plausibilisieren und zu erklären.

Effekte, welche die Lebensdauer des Sensors direkt beeinflussen, beispielsweise Drift durch Alterung, werden in diesem Kontext nur am Rande betrachtet, da die geplanten Versuche eine zu geringe Laufzeit aufweisen, um eine relevante Alterung der elektronischen oder mechanischen Elemente zu verursachen.

Die gegenwärtig geführten Diskussionen zum Konzept der Funktionalen Sicherheit (FuSi) sowie zu den neuen Anforderungen hinsichtlich des Steckerkonzepts des Sensors sind für die spätere Integration des Fahrzeugs von Belang, jedoch ohne Relevanz für das FaeBS-Projekt.

Ergebnisse: Es kann bestätigt werden, dass der Niederdrucksensor mit Ölvorlage innerhalb des Systems die ihm zugedachte Funktionalität erfüllt. Im Rahmen der Systemtests konnten keinerlei Ausfälle festgestellt werden. Eine Analyse mittels Referenzsensor ergab, dass „Druckmessabrisse“ durch Vereisungen/Kondensation nicht festgestellt werden konnten. Die erfassten Messdaten legen nahe, dass das erstellte Temperatur- und Druckkollektiv den gemessenen Temperaturen und Drücken entspricht. Allerdings konnte die maximale Leistung des Systems durch anliegende Systemfehler nicht validiert werden.

Arbeitspaket 6.2 – H₂-Konzentrationsensor

Zentraler Aspekt des Projekts war das Erforschen des Sensorverhaltens im BMW Brennstoffzellensystem bei unterschiedlichen, kritischen bzw. randlagigen Betriebsbedingungen. Das beinhaltet sowohl die Einbaubedingungen im Abgasstrang als auch klimatische Einflussfaktoren, insbesondere eine Variation der Temperatur im Bereich unterhalb von null Grad. Zu diesem Zweck wurden Sensormuster sowie Sondermuster aufgebaut als auch eine spezialisierte Messvorrichtung, mit der das Sensorverhalten während der Versuche beobachtet werden sollte.

Musteraufbau

Mit dem Ziel parallele Messungen zu ermöglichen, wurden Sensormuster mit unterschiedlichen CAN-IDs definiert, die gleichzeitig über denselben CAN-Bus mit dem Steuergerät kommunizieren können. Innerhalb des segmentiert aufgebauten Abgasstrangs des Brennstoffzellenprüfstands können somit drei HYS-basierte Sensoren gleichzeitig an unterschiedlichen Positionen betrieben werden. Diese Positionen der Sensoren sind variabel, z.B. um die Einflüsse von Gas-Einleitstellen (Purge-Einleitung) oder geometrische Besonderheiten des Abgasrohrs zu bewerten. In Summe wurden 18 Muster aufgebaut, eingeteilt in 3 Kategorien mit unterschiedlichen CAN-IDs.

Ein Teil der Sensoren wurde vorbereitet für Videoskop-Messungen. Ein Videoskop ist ein digitales, videobasiertes Endoskop. Die Messungen mit dem Videoskop haben das Ziel einen direkten Blick auf das Innere des Sensors während des Betriebs zu ermöglichen. Insbesondere die Strukturen unmittelbar vor dem Einlass zur Messkammer sind von Interesse, da diese besonders stark dem Risiko der Kondensation und Eisbildung ausgesetzt sind. Kondensation und Eisbildung sind reversible Effekte, die nicht durch eine manuelle Analyse nach Sensorausbau bewertet werden können; wegen der Gefahr einer Rückbildung ist eine direkte Messung bzw. Beobachtung während des Betriebs ist daher unabdingbar.

Da das BMW-Videoskop bei Bosch nicht zur Verfügung steht, ist die Vorbereitung der Sensoren für diese Untersuchungen etwas anspruchsvoller und flexibler zu gestalten. Die Position der benötigten Analysebohrung im Sensorgehäuse (durch die das Videoskop in den Sensor hineinschauen kann) wird über den Blickwinkeln definiert und über die Dimensionen des Videoskop-Kopfes. Analysebohrung und Videoskop müssen geometrisch gut aufeinander abgestimmt sein; zum Setzen der Analysebohrung ist die Verwendung einer speziellen Vorrichtung zwingend.

Weiterhin wird eine Vorrichtung zum Führen und Fixieren des Videoskops relativ zum Sensor benötigt; diese wird auf der Basis eines Rohrsegments des segmentierten Abgasstrangs aufgebaut und bietet mehrere Freiheitsgrade für die Ausrichtung des Videoskop-Kopfes. Das Beobachten der Außengeometrie des Sensors sowie der Blick

ins Innere während des Betriebs der Brennstoffzelle sind mit diesem Versuchsaufbau relativ komfortabel möglich.

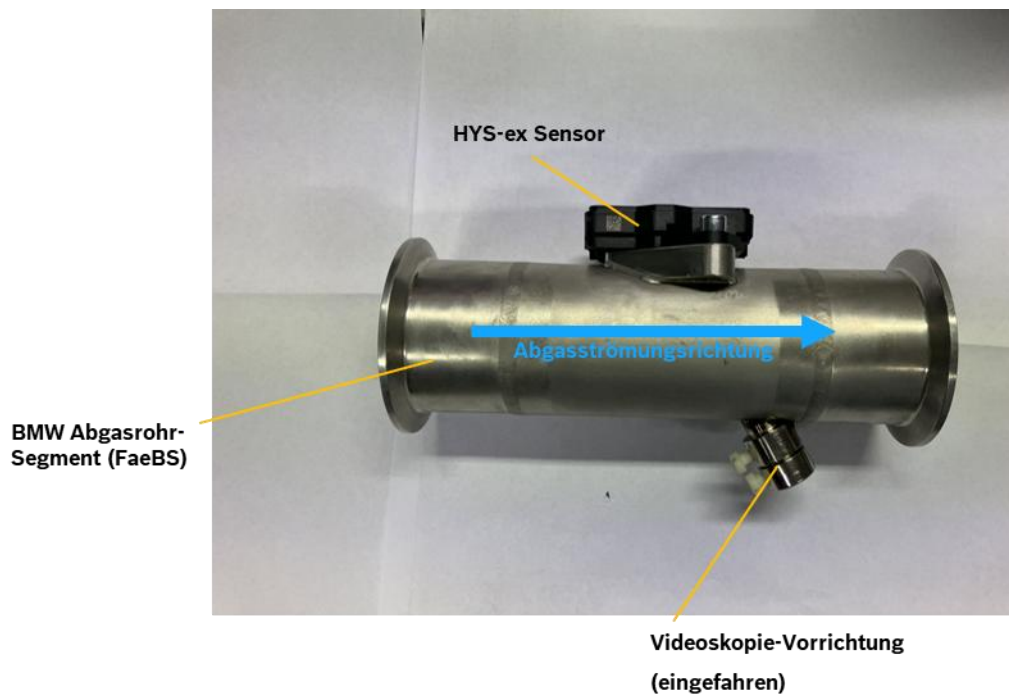


Abbildung 87: FaeBS Musteraufbau H_2 -Konzentrationsensor.

Neben den Videoskopmessungen besteht Interesse am thermischen Verhalten der Sensorstrukturen während des Betriebs. Im Fokus stehen hier Erwärmung und Abkühlung der gasführenden Komponenten zur Ableitung und Bewertung von Kondensations- und Eisbildungsrisiken sowie ein mögliches Auftauen im Froststartfall.

Zum Zwecke dieser Messungen werden Sensoren mit Thermoelementen ausgerüstet. Dabei sitzen die Thermoelemente auf der Außenseite des Venturirohrs; weiterhin ist eine Präparation der Sensoren notwendig, um eine Kabelführung zu gewährleisten, die die Dichtfunktion des O-Rings sowie die H_2 -Konzentrationsmessung nicht beeinträchtigt.

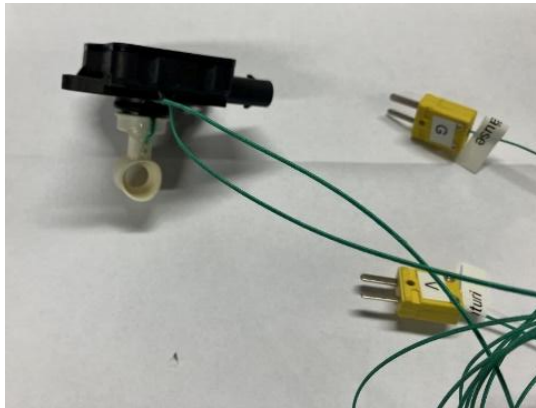


Abbildung 88: Sensor mit Thermoelementen.

Ergebnisse

Die oben beschriebenen Standard-Sensor-Muster als auch die Sondermuster wurden aufgebaut, in den Prüfständen in Betrieb genommen und in mehreren Testabläufen erfolgreich eingesetzt.

Standardmuster

Mit Standardmuster sind Wasserstoffkonzentrationssensoren zu verstehen, die dem damaligen einfachen Musterstand entsprachen, d.h. ohne zusätzliche Ausrüstung oder Anpassungen. Die verwendeten Muster saßen jeweils an einer fixen Position innerhalb des Abgasrohrs und liefen ausschließlich während des Betriebs des Prüfstands, d.h. ein Vor- oder Nachlauf wurde nicht realisiert.

Durch die Bereitstellung von Kontextmessdaten, d.h. Messgrößen anderer Sensoren sowie Stellersignalen, konnte eine umfangreiche Betrachtung und Bewertung der Grundfunktion des Sensors erstellt werden. Abhängigkeiten zu physikalischen Größen, wie z.B. Luftmasse und Temperatur, konnten mit einbezogen werden.

Gezeigt werden konnte die hohe dynamische Reaktion Veränderungen in der Wasserstoffkonzentration zu erkennen, insbesondere beim Purgen ist dies deutlich geworden. Dabei ist es zu keinen Aussetzern oder fehlenden Signalen gekommen; alle Purge-Impulse wurden in der Regel detektiert. Auch bei Kaltstartsituationen war in diesem Versuchsaufbau Kondensation und Eisbildung offensichtlich kein Problem. Weiterhin zeigt der Sensor keine Querempfindlichkeiten auf andere physikalische Größen bzw. konnte diese erfolgreich kompensieren. Insgesamt zeigt der Verlauf der Messkurven einen nachvollziehbaren bzw. erklärbaren Verlauf. In einigen Fällen kam es zu unplausiblen Peaks, die aber als Eigenschaften des Systems bewertet wurden.

Fehlende Purge-Pulse in Teilstrecken wurden ebenfalls als Betriebszustand-bedingt eingestuft, da in den bewerteten Fällen Drain-Pulse erkannt wurden und der Sensor somit nachweislich funktioniert hat. Fehlende Pulse (d.h. keine Detektion trotz erwarteter Wasserstoffkonzentrationen) wurden nicht festgestellt.

Videoskop-Untersuchungen

Test mit Beteiligung des Videoskops fanden nur in sehr geringem Umfang statt und verliefen relativ aussageelos. Zum einen wurden ausschließlich Aufnahmen des Sensors von außen durchgeführt, d.h. keine Innenbereiche, zum anderen sind Betriebspunkte beobachtet worden, in denen es nicht zu Kondensation oder Eisbildung gekommen ist. Eine Variation der Betriebsbedingungen oder Einbaupositionen des Sensors hat nicht stattgefunden.

TC-Sensoren

Temperaturuntersuchungen mit den Sensoren, die zusätzlich mit Thermoelementen (TC) ausgerüstet wurden, haben nur in geringem Umfang stattgefunden. Die Daten zeigen keine grenzlagigen Temperaturwerte, die auf eine innere Kondensation schließen lassen. Eine Korrelation mit Videoskopdaten oder parallelen Messungen mit Standardmustern ist mangels Daten nicht möglich.

Abschließend kann festgestellt werden, dass nicht alle BMW-Anforderungen an den Sensor erreichbar bzw. nur eingeschränkt erreichbar sind. Die singuläre Betrachtung einzelner Werte erfüllt die Forderungen nicht, jedoch wird die Gesamtheit der Eigenschaften so bewertet, dass der Sensor im Brennstoffzellensystem erfolgreich eingesetzt werden kann. Die definierte Messaufgabe im Abgasstrang zur Überwachung der Wasserstoffkonzentration über Zeit unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen wird als erfüllbar bewertet.

IX DC/DC SPANNUNGSWANDLER (AP 7)

AP Leiter: Zollner Elektronik AG

Innerhalb des Forschungsvorhabens FaeBs wurden zu Projektbeginn zunächst die Anforderungen an den DCDC-Wandler konkretisiert und festgelegt. Die zu Projektbeginn bereits bekannten KPIs wurden weiter konkretisiert und in einem gemeinsamen Lastenheft dokumentiert:

Wesentliche Eigenschaften / Funktionen FuelCell – DCDC (FCDC) Gen3

- › Kontinuierliche Leistung 160KW (@150V Input)
- › Eingangs- / Ausgangsstrom 1040A /220A
- › Eingangsspannung 40V-300V
(240-270 Brennstoffzellen zu je 0,6...1,0V)
- › Ausgangsspannung 500V – 850V
- › Funktionale Sicherheit bis ASIL C
- › Gehäuse IP6K9K / IP6K7 (485 x 416 x 123 mm³)
- › Wasserkühlung
- › Umgebungstemperaturbereich Betrieb -40°C bis 105°C

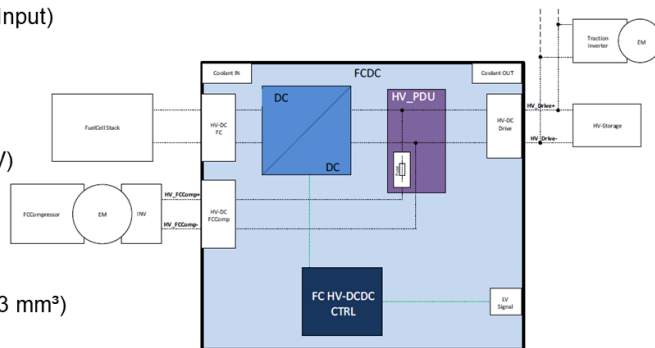
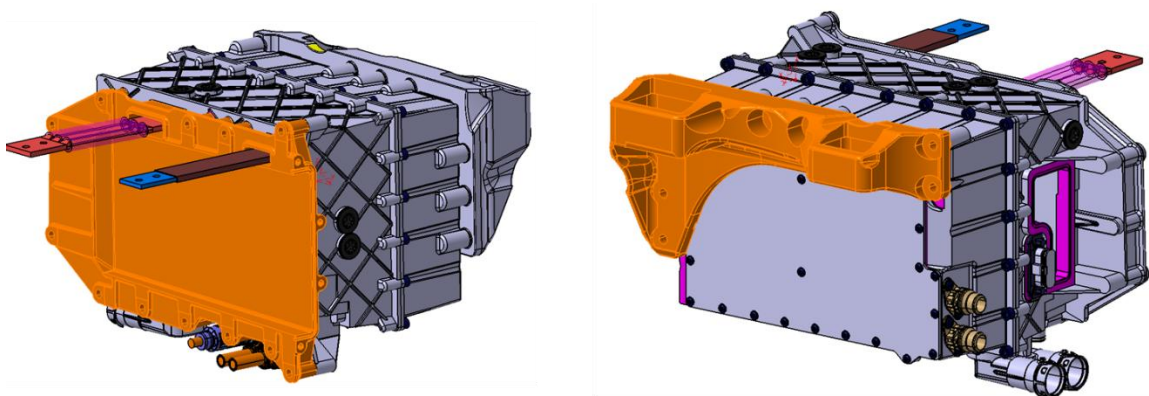


Abbildung 89: Auszug Anforderungen DCDC-Wandler.

Ebenso wurde die mechanische Schnittstelle des DCDC-Wandlers zum Gesamtsystem und das Bauraummodell festgelegt:



Schnittstellen für A-Muster final mit BMW abgestimmt

Abbildung 90: Bauraummodell / mechanische Schnittstellen.

Auf Basis dieser Festlegungen wurde die Komponentenentwicklung durchgeführt.

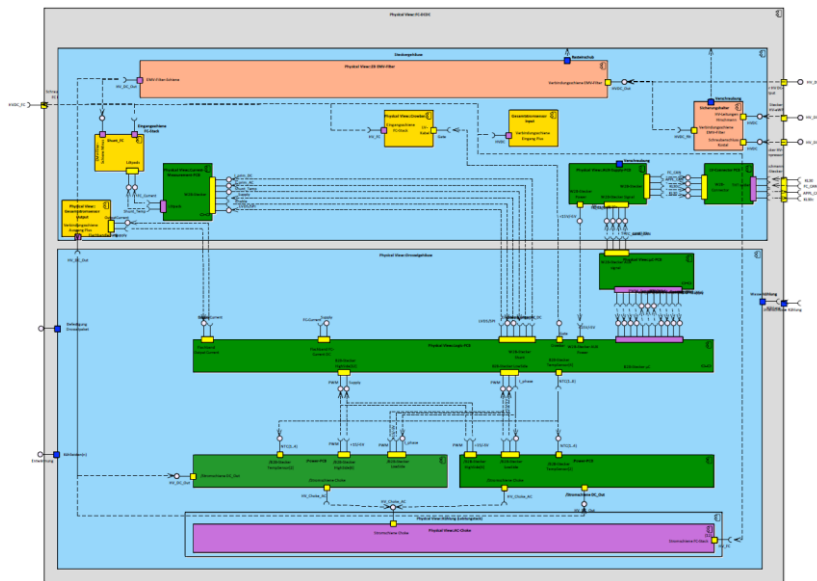


Abbildung 91: Systemarchitektur DCDC-Wandler.

Im Systemschaubild ist die Architektur der Komponente dargestellt. Im Wesentlichen kann unterschieden werden in einen Leistungsteil, der im „unteren Bereich“ dargestellt ist. Hier wird die Energie gewandelt. Im „oberen Teil“ des Systemschaubilds sind weitere Funktionen des DCDC-Wandlers dargestellt (EMV-Filter, Sicherungen, Strommessung, Impedanzmessung). Gehäusetechnisch sind beide Bereiche EMV-technisch voneinander getrennt, um sicherzustellen, dass die Störungen, die in der Leistungselektronik zwangsweise entstehen nicht an die Ausgänge des DCDC-Wandlers überkoppeln können.

Durch Simulationen wurde die Schaltungstopologie des Wandlers ermittelt. Der Wandler wird als Multi-Phasen-Boost-Wandler unter Verwendung von 1200 V SIC-Halbleitern aufgebaut. Im konkreten Design sind 12 Phasen parallelgeschaltet.

Schaltungssimulation / Schaltungsauslegung (LTSPICE)

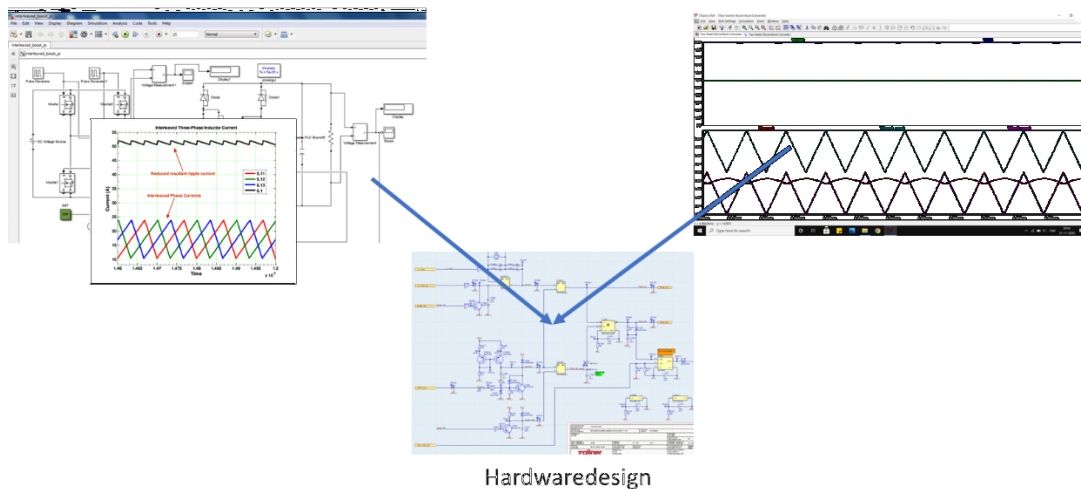


Abbildung 92: Hardwaredesign-Prozess.

Die Elektronik ist modular skalierbar aufgebaut und kann auch nur teilweise betrieben werden. Durch Abschaltung einzelner Phasen erzielt die Baugruppen auch im Teillastbereich eine hohe Effizienz.

Die Entwärmung der Baugruppe wird durch ein eigens entwickeltes Leistungsmodul sichergestellt, das in das Gehäuse optimal kühltechnisch integriert ist. Neben der aktiven Kühlung dieses Moduls ist auch eine aktive Kühlung der Drosseln im DCDC-Wandler vorgesehen, nur so lassen sich die sehr hohen Anforderungen an die Leistungsdichte des Wandlers erreichen.

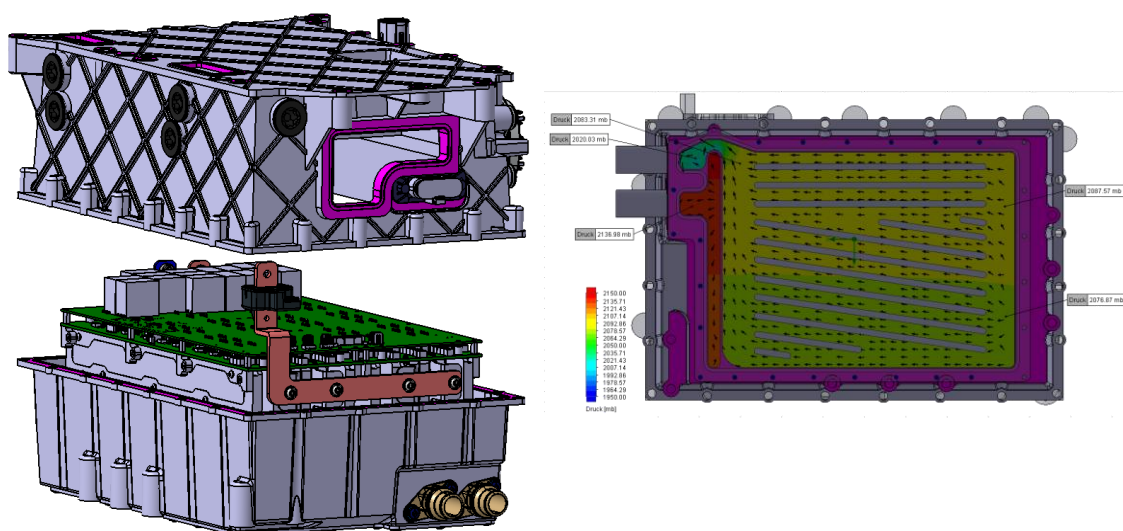


Abbildung 93: Mechanikmodell mit integriertem Leistungsmodul, Auszug Thermosimulation.

Zur Verifizierung des Schaltungs- und Mechanikkonzepts wurde zunächst ein Prototyp einer Leistungsstufe aufgebaut. Ziel des Prototyps war neben der Bestätigung der Kühlperformance auch die Verifizierung des Schaltverhaltens von einzelnen Phasen und die Erstellung einer Entwicklungsplattform für die Software, so dass parallel zum Produktdesign bereits die Softwareabläufe des Funktionsmusters implementiert werden konnten.

Innerhalb des Prototyps konnten folgende Punkte bereits umgesetzt / bestätigt werden: Thermisches Verhalten der Drossel, Kühlkonzept der Leistungshalbleiter, die Implementierung des Regelungskonzept und die Verifizierung des Schaltungsdesign (z.V. Stromsymmetrierung der Halbleiter, Schaltverhalten, Nennleistung einer Phase, Ausgangsspannung 850 V, $U_{ds\ max}$ 968 V, Störfreie U_{gs} -Signale)

Die Erkenntnisse aus dem Prototyp wurden ins Design des Gesamtgerätes übernommen. Nach Fertigstellung der Produktionsunterlagen und abgeschlossener Materialbeschaffung erfolgte der Aufbau der Geräte.

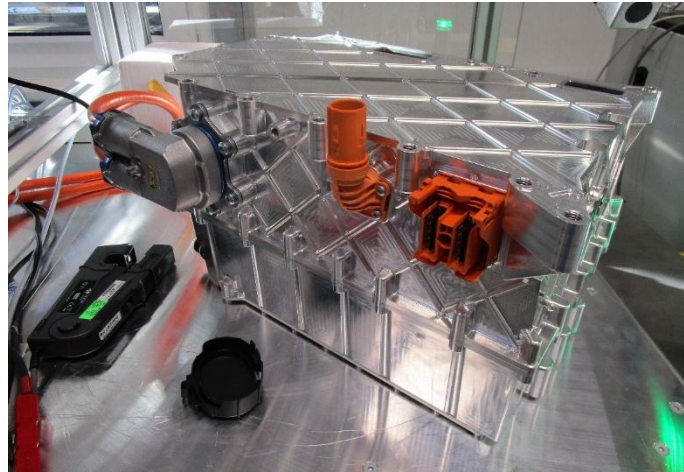


Abbildung 95: Gesamtgerät vor Inbetriebnahme am Prüfstand.

Der Zusammenbau selbst funktionierte wie geplant, größere Probleme z.B. mit mechanischer Robustheit oder mit nicht korrekt funktionierenden Schnittstellen konnten nicht beobachtet werden.

Bei der Inbetriebnahme der Elektronik wurde zunächst unter niedrigen Spannungen die SW-Ansteuerung der Hardware getestet, im Anschluss erfolgte die Hochvolt-Inbetriebnahme. Bei der Leistungselektronik lag der Fokus auf einer intensiven Erprobung der Schaltzelle und des Schaltverhaltens. Hier konnte gezeigt werden, dass sowohl die parallele Ansteuerung von mehreren Halbleitern je Phase, als auch die Regelung robust funktioniert.

Im Laufe der Inbetriebnahmephase wurde an verschiedenen Stellen im Design Anpassungen erforderlich, um die Funktionalität des Wandlers sicherzustellen. (z.B. Schaltzelleninduktivität, Anbindung Zwischenkreis, Anpassung Eingangsstrommessung für die Funktion Impedanzmessung, Verstärkung der Isolation der Speicherdrosseln)

Dadurch konnte im Laufe des Projekts die volle Systemleistung erreicht werden. Gemeinsam mit BMW wurde der DCDC-Wandler am Prüfstand mit 960A Eingangsstrom betrieben (Limitierung auf das Projektziel 1000A nicht durch den Prüfling sondern den Prüfstand bedingt). Durch einzelne Ausfälle bei der Inbetriebnahme wurde für die Systemerprobung die Ausgangsspannung auf 600V begrenzt, der Nachweis der Funktionalität bei Ausgangsspannung 850V ist im Rahmen der Inbetriebnahme der Leistungselektronik erfolgt.

Das Reglerverhalten des Wandlers wurde intensiv getestet und zeigt sich stabil in allen Arbeitspunkten, die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Reglermodi funktionieren ebenfalls stabil.

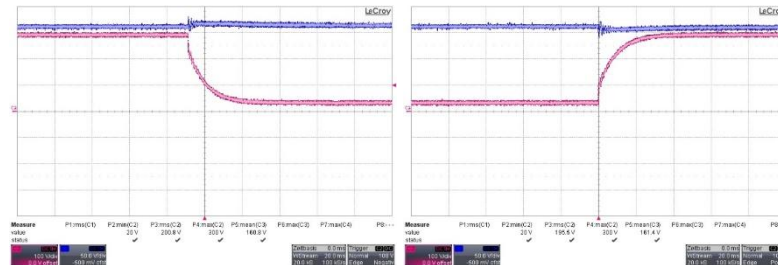


Abbildung 96: Reglerverhalten bei Sollsprüngen.

Für die zweite Hauptfunktion, die Impedanzmessung des Brennstoffzellenstacks wurden zunächst die dafür notwendigen Schaltungen aufgebaut und unter Niedervolt-Bedingungen getestet. Auch die Tests unter Leistung zeigen gute Ergebnisse.

Die Messungen an einem realen Brennstoffzellen-Stack zeigen, dass die Funktion prinzipiell gegeben ist. Das gewählte Messprinzip funktioniert und die Genauigkeit ist nach erster Beurteilung ausreichend um die Stack-Gesundheit zu überwachen.

Für die Komponententests wurde durch Zollner ein Absicherungskonzept erarbeitet. Aufgrund der hohen Leistung von bis zu 160 kW mit den enormen Strömen von bis zu 1000 A stand zu Projektbeginn kein Testsystem zur Verfügung. Daher wurde durch Zollner ein Prüfkonzept entwickelt, das neben dem DUT (Device under Test) einen zweiten Wandler als Buck-Converter vorsieht. Ziel war es die Energie so im Kreis zirkulieren zu lassen und nur die Verluste nachzuspeisen. Zu diesem Zweck wurde der DCDC-Wandler auch als Buck-Boost-Converter konzipiert um im Testbetrieb die Spannung bis zu 850 V wieder auf die Eingangsspannung heruntersetzen zu können.

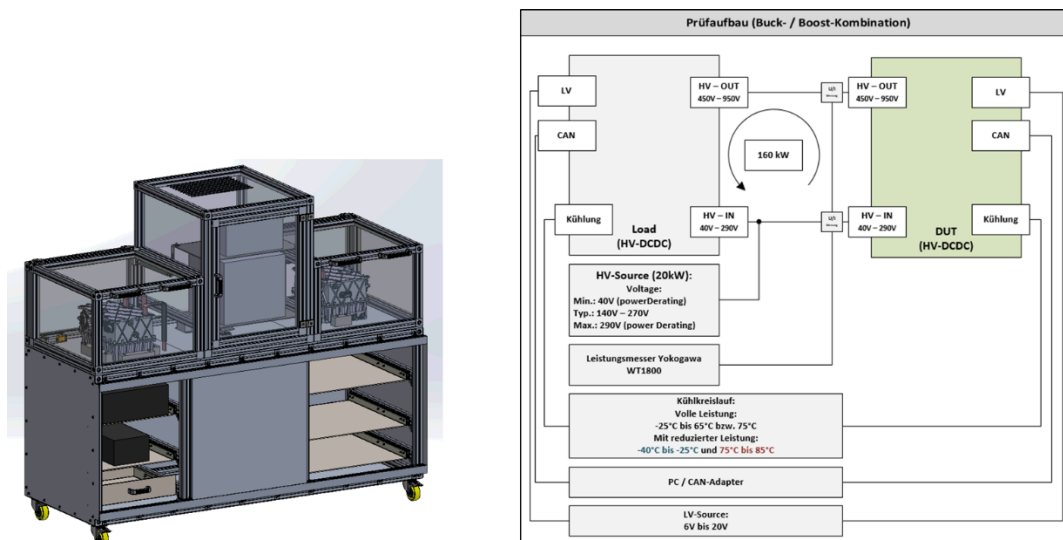


Abbildung 97: Testkonzept Zollner.

Neben diesem Testsystem wird auch ein Prüfstand, der beim Konsortialpartner BMW vorhanden ist in die Testdurchführung mit einbezogen. Folgende Testumfänge waren zu Projektbeginn geplant und wurden größtenteils durchgeführt.

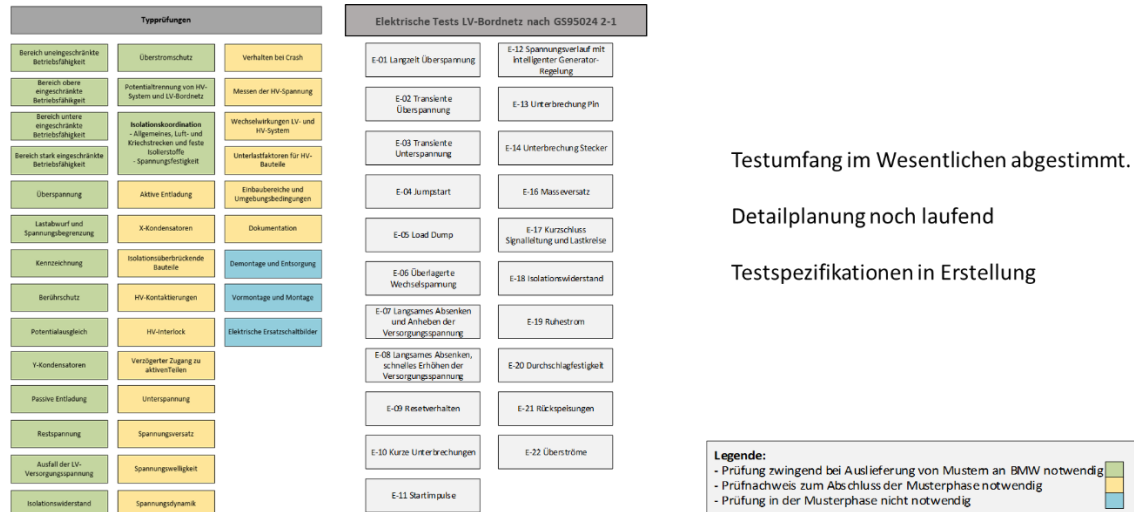


Abbildung 98: Testplanung AP7 (Stand 06/22).

Im Laufe des Projektes wurde das Testsystem wie geplant aufgebaut. Bei der Inbetriebnahme der DCDC-Wandler im Buck-Betrieb kam es jedoch zu Auffälligkeiten, so dass im Buck-Betrieb die volle Leistung nicht erreicht werden konnte, wodurch die Leistung des Prüfstand am Ende auf max. ca. 800A beschränkt werden musste.

Ein signifikanter Teil der Systemtests wurde jedoch gemeinsam mit BMW am Leistungselektronik-Teststand von BMW durchgeführt. Dieser erprobte Prüfstand kann ebenfalls bis zu 800A Eingangsstrom zur Verfügung stellen.



Abbildung 99: Prüfsystem aufgebaut.

Im Anschluss an die Inbetriebnahmephase erfolgten dann die Komponententests.

Die Tests unter Leistung konnten prüfstandsbedingt zunächst nur bis 800 A Eingangsstrom durchgeführt werden.

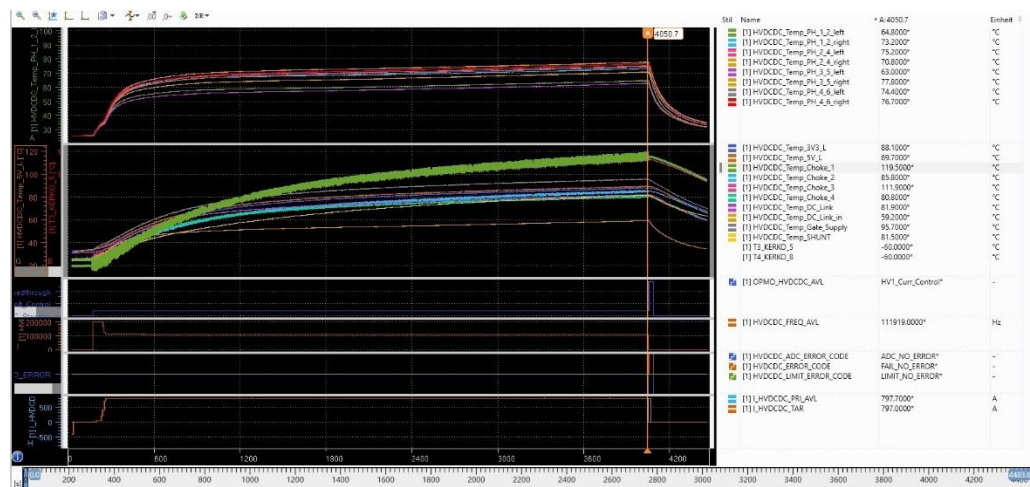


Abbildung 100: Temperaturverläufe im DCDC-Wandler bei 800 A / 130 kW, Testdauer ca. 1 h.

Es zeigt sich, dass die Kühlung, bzw. die Erwärmung einzelner Komponenten im DCDC-Wandlers begrenzend für die Dauerleistung sind. Insbesondere die Boost-Drosseln erwärmen sich stärker als simulativ angenommen, dennoch ist ein Betrieb bei 800 A über einen langen Zeitraum stabil darstellbar. Bei Tests durch BMW am Stack-Prüfstand konnte der Wandler auch über einen Zeitraum von 10 Minuten mit fast 1000 A betrieben werden.

Der Wirkungsgrad des Wandlers entspricht den Erwartungen aus den Simulationen und liegt im Vollastbereich bei ca. 98 %.

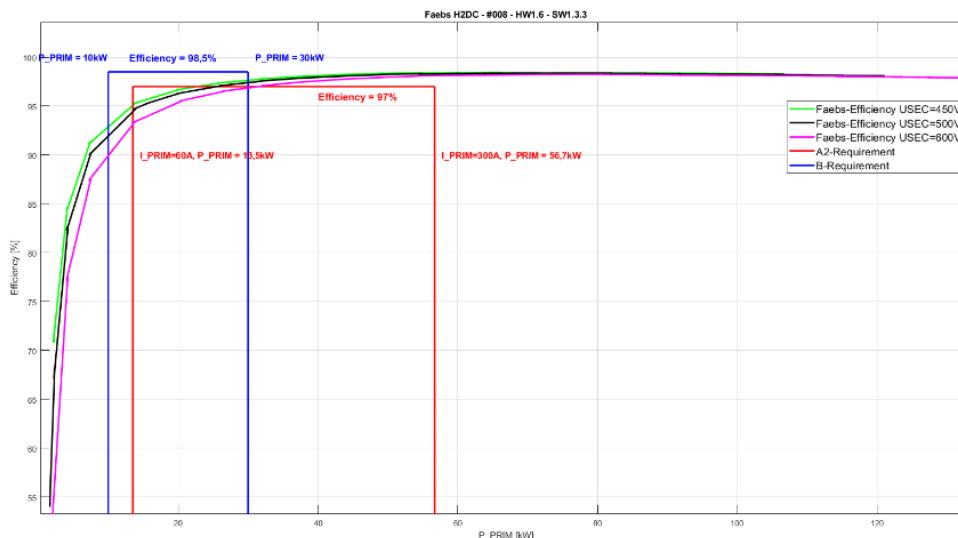


Abbildung 101: Verschiedene Wirkungsgradkurven des DCDC-Wandlers bei 12-phasigem Betrieb

Aktuell ist SW-seitig kein aktives Phasenmanagement umgesetzt. Bei Teillast wäre eine Reduzierung der aktiv betriebenen Phasen notwendig um optimale Wirkungsgrade zu erreichen.

				Wirkungsgrad	
U_{in} [V]	U_{out} [V]	I_{in} [A]	P_{in} [kW]	12 Phasen	6 Phasen
160	500	100	16	96,12%	97,93%
160	500	200	32	97,91%	98,51%
160	500	295	47	98,33%	98,53%
200	500	100	20	96,34%	98,05%
200	500	200	40	98,02%	98,69%
200	500	295	59	98,53%	98,74%
200	580	100	20	95,64%	97,69%
200	580	200	40	97,69%	98,56%
200	580	295	59	98,29%	98,61%

Abbildung 102: Wirkungsgradunterschiede Teillast bei 12- bzw. 6-phasigem Betrieb.

Die EMV-Tests, die im Projekt durchgeführt wurden, konnten aufgrund eines Defekts des Geräts beim Test BCE nicht abgeschlossen werden. Die Erkenntnisse der durchgeführten Messungen zeigen ein noch nicht optimales EMV-Verhalten. Signifikante Grenzwertüberschreitungen deuten darauf hin, dass das Schirmkonzept innerhalb des DCDC-Wandlers noch nicht optimal ist und für künftige Weiterentwicklungen überarbeitet werden muss.

Die Absicherung und Bewertung der Funktion Impedanzmessung ist durch Zollner allein nicht möglich, da keine exakte Simulation der Impedanz eines Brennstoffzellen-Stacks möglich ist. Die Grundfunktion selbst konnte nachgewiesen werden.



Abbildung 103: Ergebnisse der Analysen Impedanzmessung.

Die Messungen zeigen, dass die Amplitude des Anregungssignals wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung hat. Der Frequenzbereich von 10 – 500 Hz wurde untersucht. Bei Frequenzen < 200 Hz zeigt das Gerät eine gute Genauigkeit. Die Abweichungen steigen mit der Frequenz kontinuierlich an. Es wurden auch verschiedene Signalformen (Singletone / Multitone) getestet & verglichen, beide Verfahren sind potenziell zur Impedanzmessung geeignet.

Bei der Beurteilung der Funktionalität am realen Brennstoffzellen-Stack konnte Funktion prinzipiell bestätigt werden, so dass wertvolle Erkenntnisse für künftige Projekte / Anwendungen gewonnen werden konnten. Optimierungspotential durch verlängerte Messzeiten bei niedrigen Anregungsfrequenzen und Anpassungen in der Auswertung in SW wurde im Projekt identifiziert, jedoch nicht mehr umgesetzt.

Im Rahmen einer Nachbetrachtung wurden die Projektziele mit den erreichten Werten verglichen. Abbildung 104 gibt einen Überblick über die erreichten Ergebnisse.

Lfd. Nr.	KPI	Ziel-Wert	IST-Wert	
		K-Wert		
KPI 7.1	Stromdichte	40 A / l	36,1 A/l	<u>Abmessungen DCDC-Wandler</u> (entsprechend BMW Bauraummodell ohne Stecker) 406 x 273 x 250mm <u>Volumen:</u> 27,7 l <u>Eingangsstrom getestet:</u> 960A (am Stack-Prüfstand bei BMW) <u>Eingangsspannung:</u> gemäß Anforderungen getestet <u>Ausgangsspannung:</u> Design des Wandlers auf 850V ausgelegt. Einzelbetriebnahme bis 850V erfolgt. Aufgrund nicht vollständig geklärter Ausfälle bei der Inbetriebnahme (vor allem bei Betrieb im Buck-Mode): Risikominimierende Maßnahme: Einschränkung der Ausgangsspannung im Betrieb von max. 650V Test der 850V theoretisch nach Abschluss des Projektes noch möglich.
KPI 7.2	Volumetrische Leistungsdichte	6 kW / l	5,77 kW/l	
KPI 7.3	Ausgangsleistung DCDC-Wandler	160kW / 850V	160kW / 850V*	
KPI 7.4	Spannungspreisung Eingang / Ausgang	5-6	Abhängig von Arbeitspunkt:	

Abbildung 104: Vergleich KPI Projektziele vs. IST-Stand.

Die Zielwerte wurden in allen Bereichen im Wesentlichen erreicht, wobei vor allem die Stromdichte und die Volumetrische Leistungsdichte auch stark vom durch BMW definierten Bauraum abhängen, den Zollner nur bedingt beeinflussen konnte.

Die Projektziele von Zollner wurden innerhalb von FaeBS nahezu vollständig erreicht. Die Erkenntnisse aus dem Projekt bilden eine solide Grundlage für eine mögliche Weiterentwicklung eines DCDC-Wandlers für Brennstoffzellenapplikationen.

X WERKSTOFFQUALIFIKATION (AP 8)

AP Leiter: Bayerische Motoren Werke AG

Arbeitspaket 8 Gesamtziele

Im Einzelnen sind mit dem Arbeitspaket die folgenden Teilziele verbunden:

- Entwicklung einer Prüfmethode für den Einsatz von Materialien im gesamten Brennstoffzellensystem unter realen Bedingungen und Berücksichtigung des wirtschaftlichen Nutzens.
- Ermittlung und Unterscheidung der Wirkung von ionischen und organischen Verunreinigungen auf die Degradationsrate, um die Schadensmechanismen besser zu verstehen.
- Quantifizierung der Emissionsgrenzwerte für mindestens sieben organische Verunreinigungen.
- Quantifizierung der Emissionsgrenzwerte für fünf kationische und drei anionische Verunreinigungen
- Entwicklung schneller ex-situ- und in-situ-Methoden für die Materialauswahl.
- Entwicklung von in-situ-Testhardware einschließlich Prüfkammer für eine schnelle, reproduzierbare und sichere Handhabung.
- Untersuchung der mutmaßlichen Korrelation und Übertragbarkeit von ex- und in-situ- Verfahren.

Arbeitspaket 8.1 – Definition der Qualitätsmerkmale

Die Qualitätsmerkmale einer Brennstoffzelle wurden in-situ mit folgenden Tests untersucht und für die Entwicklung einer Prüfmethode für den Einsatz von Materialien im gesamten Brennstoffzellensystem (siehe AP 8 Gesamtziele) verwendet.

- DCR (Messung des elektrischen Widerstands)
- Leak check (Leckage-Test)
- OCV-Fall Off (Abnahme der Leerlaufspannung / open circuit voltage)
- H₂ crossover

1. DCR:

Der erste Test ist die Messung des Gleichstrom-Widerstands (Direct Current Resistance, DCR) und wird durch eine CV-Messung bei Umgebungstemperatur und ohne Gase auf der Zelle durchgeführt. Der gemessene Widerstand dient qualitativ als Überprüfung der Kontaktierung der Zelle zum Prüfstand.

Hat die Zelle die DCR-Messung bestanden, wurde mit dem Leak Check fortgesetzt. Diese erfolgte ohne Gase bei einer Zelltemperatur von 40 °C und bestand aus zwei Teilen, extern und intern. Dabei wurden die beiden Elektroden auf 2 bar bedrückt, die Ventile am Zelleingang und Zellausgang geschlossen und 10 Minuten relaxiert, sodass die Drücke konstant eingeregelt werden konnten. Im nächsten Schritt wurden die Drücke gemessen, eine Haltezeit von 10 Minuten abgewartet und die Drücke erneut abgelesen. Beide Messwerte wurden verglichen und der Druckverlust berechnet. Bei Bestehen des externen Leakage Tests wurde mit dem internen Leak Check fortgeführt. Dafür wird die Anode mit 2,1 bar und die Kathode mit 1,5 bar bedrückt. Gefolgt von einer Kompensationszeit von 10 Minuten und einer 10 minütigen Relaxationszeit wurde der interne Druckverlust analog zu dem externen berechnet.

Nach dem bestandenen Leak-Check wurde der OCV-Fall Off getestet, ebenso bei 40 °C Zelltemperatur mit trockenen Gasen. Erstmal wurde der Anode Wasserstoff (H_2) sowie der Kathode Luft zugeführt bis die Leerlaufspannung (OCV) erreicht wurde. Nach kurzer Zeit wurde der kathodenseitige Gasstrom zu Stickstoff (N_2) gewechselt und der Spannungsverlauf beobachtet. Der Test galt als bestanden, wenn die Spannung langsam und nicht abrupt fällt.

2. Zykelvoltammetrie (CV):

Die Zykelvoltammetrie (CV) wurde bei zwei unterschiedlichen Zelltemperaturen gemessen, 60 °C und 80 °C. Der Anode wurde Wasserstoff (H_2) zugeführt, während die Kathode mit Stickstoff (N_2) versorgt wurde; beide Gase wurden bei Temperaturen oberhalb der Zelltemperatur den Flussfeldern, zuständig für die Gasverteilung, zugeführt.

Bei den jeweiligen Temperaturen wurden zwei Messungen durchgeführt. Die Messung mit geringerer Vorschubgeschwindigkeit diente der Bestimmung der beiden Störeffekte eines in-situ Zyclovoltammogramms (i.e. der Oxidationsstrom des Wasserstoffs, resultierend aus dem H_2 -crossover von der Pseudoreferenzelektrode, durch die Membran, auf die Arbeitselektrode, an der er umgesetzt wird, sowie die sehr geringe, aber vorhandene elektrische Leitfähigkeit der Membran). Die elektrochemisch aktive Fläche (Electrochemical Active Surface Area, ECSA) wurde aus der Differenz beider Spektren berechnet.

3. U-I Kennlinie FaeBS:

In diesem Test wurde der Strom-Spannungs-Verlauf, auch als U-I Kennlinie bezeichnet, analog zu dem Protokoll, dass das Zentrum für Brennstoffzellen-Technik (ZBT) verwendet hat, vermessen. Dies wurde bei einer Zelltemperatur von 80 °C Grad, in H_2 /Luft-Betrieb mit einem Taupunkt von 64 °C in beiden Elektroden, bei einem Druck von 2 bar durchgeführt. Die Stöchiometrie betrug 1,5 anodenseitig und 2 für die Kathode. Ziel war es, die vom ZBT gemessenen U-I Kennlinien mit der BMW-Kennlinie zu vergleichen.

4. H₂ crossover:

Der Test erfolgte bei 80 °C Zelltemperatur und mit gesättigten Gasen, Wasserstoff in der Anode und Stickstoff in der Kathode. Ziel ist es, die H₂-Permeabilität der Membran zu bestimmen, um mögliche Löcher (Pinholes) zu detektieren.

5. U-I Kennlinien BMW:

Der Strom-Spannungs-Verlauf wurde auch bei anderen Betriebsbedingungen vermessen, um die Auswirkung der Werkstoffe zu untersuchen.

Es wurden drei unterschiedliche Betriebsbedingungen untersucht, die Details sind aus der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 17: Übersicht über die Parameter für die Aufnahme der U-I Kennlinien im in-situ Prüfprotokoll

U-I Kennlinien BMW			
Zelltemperatur in °C	60	80	90
Taupunkt A/K in °C	46	53	62
Gas A/K	H ₂ / Luft		
Druck A/K in bar	2 / 2		
Stöchiometrie A/K	1,5 / 2		

6. Betriebspunkte und Elektrochemische Impedanz Spektroskopie (EIS):

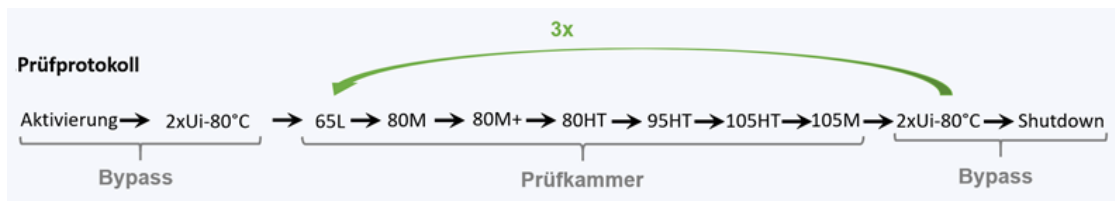
Analog zu den BMW U-I Kennlinien wurden die BMW-Betriebspunkte für das BMW Zellformat mit 50 cm² aktiver Fläche (TP-50) übernommen. Die Details sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 18: Übersicht der BMW-Betriebspunkte für das in-situ Prüfprotokoll (A = Anode; K = Kathode)

Betriebspunkte BMW					
Betriebspunkt	5	3	4	1	2
Zelltemperatur in °C		90		62	56
Taupunkt A/K in °C		65		45	
Gas A/K			H ₂ / Luft		
Druck A/K in bar	2 / 1,85	2 / 1,75		1,9 / 1,55	1,48 / 1
Stöchiometrie A/K		1,25 / 1,4		1,38 / 1,6	1,33 / 1,6
Strom in A/cm ²	0,55	2	2,5	2	0,1

Nach der Einstellung jedes Betriebspunkts wurde die dementsprechende Spannung für 30 Sekunden gemessen. Danach wurden potentiostatische EIS-Messungen durchgeführt.

Zur Korrelation der Prüfstands-Bedingungen (in-situ) mit den Auslagerungsversuchen bzw. der Emissionsanalytik wurde das Prüfprotokoll (TP-50 Format) weiterentwickelt. Die dazugehörigen Details sind in *Abbildung 105* dargestellt. Neben der Einführung eines konstanten Betriebspunktes (Korrelation zu GC-MS Messungen, MS 8.6) wurde ein Regenerationszyklus definiert (Differenzierung von reversiblen und irreversiblen Degradationsanteilen). Ergänzend fand eine Integration des adaptierten Befeuchtungskonzepts gemäß VHB in den Prüfablauf statt. Die Resultate des weiterentwickelten Prüfprotokolls sind für Identifikation der Degradationsmechanismen (MS 8.8) essenziell. Spezifizierungen



		Ui	65L	80M	80M+	80HT	95HT	105HT	105M
		T80 RH50							
	J (A/cm²)	0-2.5	0.13	0.30	0.80	2.0	2.0	2.0	1.0
	T _{out} (°C)	80	65	80	80	80	95	105	105
		TP285	4-Cell			75	90	100	105
Anode	λ H ₂ (-)	1.50	1.25	1.25	2.0*	2.0*	1.5	1.5	1.3
	T _{dew} (°C)	64	45	61	52	57	72	85	85
	RH (%)	50	38	44	29	37	40	48	48
	P _{out} (bar)	2	1.75	1.7	2.0	2.8	2.8	2.8	2.7
	TH ₂ -in	90	85	90	90	90	105	115	115
	N ₂ (V%)	-	12	11	10	9	9	9	10
Cathode	λ Air (-)	2.0	1.5	1.5	2.0*	2.0	2.0	2.0	1.6
	T _{dew} (°C)	64	38	71	64	53	64	75	90*
	RH (%)	50	26	69	50	30	28	32	58
	P _{out} (bar)	2	1	1.3	1.6	2.4	2.4	2.4	2.3
	TAir-in	90	85	90	90	90	105	115	115

Abbildung 105: Weiterentwickeltes Prüfprotokoll mit konstantem Betriebspunkt und Regenerationszyklus für die Einzelzelle im TP-50 Format.

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem TP-50 Format wurden die Prüfprotokolle für die Short Stacks (4-Zeller) konzipiert. Neben der gezielten Werkstoffauswahl (PPS vs. PA6-GF30; GF30 = Glasfaseranteil von 30 %) erfolgt eine Differenzierung der Test-Spezifikationen in stationär und dynamisch (Kundenbelastungsprofil).

In weiterer Folge wurde ein beschleunigter Stress- bzw. Auslagerungstest mit den fünf definierten Werkstoffen durchgeführt, wobei dieser Auslagerungstest Parametervariationen (Temperatur, pH-Wert, Konzentration) und eine Charakterisierung der Werkstoffe gemäß Probenplan erfolgte (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Versuchsmatrix für die Auslagerungstests in wässrigen Medien.

		80°C						95°C	105°C
Medium		1	2	3	4	5	6	7	8
pH	3.0		X						
	4.1	X			X	X	X	X	X
	5.0			X					
NaF (ppm)	3					X			
	10				X				
	30	X	X	X			X	X	X
NaCl (ppm)	3						X		
	10	X	X	X	X	X		X	X

AP 8.1 Ergebnis

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden die Betriebsparameter und drei spezielle Prüfprotokolle für die Materialuntersuchung definiert.

Aufbauend auf den Erfahrungswerten von BMW durch reale Kundenbelastungsprofile wurden sieben unterschiedliche Betriebspunkte festgelegt. Diese unterscheiden sich in den Parametern Betriebstemperatur, Stromdichte, relativer Feuchte, Eintrittsdrücke und Stöchiometrie. Auf Basis vorangegangener Projekte konnte das ZBT gewonnene Erfahrungswerte im Umgang mit der Prüfkammer für in-situ Materialqualifizierungen übertragen. Hierzu zählen unter anderem die Umschaltvorgänge zwischen dem Prüfkammer- und Bypassbetrieb oder der Probeneinbau und -wechsel. Nach der Festlegung der Betriebsparameter der Betriebspunkte und der U-I Kennlinie wurden diese an dem neu aufgebauten Prüfstand am ZBT erprobt. Dabei wurde vereinzelt ein instabiles Spannungssignal der Brennstoffzelle gemessen. Durch eine Überprüfung an den Prüfständen der BMW AG konnte das Spannungsverhalten bestätigt werden. Nach Anpassung vereinzelter Parameter wurden die Betriebsparameter final für die in-situ Untersuchung definiert. Im Anschluss wurde das Prüfprotokoll für die Single-Cell (Einzelzelle) Untersuchung erstellt und im Versuchsstand implementiert. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde darüber hinaus ein zusätzliches zweites Prüfprotokoll für die Single-Cell Untersuchung erarbeitet und umgesetzt. Es basiert auf dem ersten Prüfprotokoll aber besitzt statt sieben nur noch einen einzelnen Betriebspunkt. Dies sollte dazu führen, dass der Abgleich zwischen den ex-situ und in-situ Untersuchungen vereinfacht wird. Zusätzlich wurde noch ein Regenerierungsschritt integriert, um Aussagen über die Reversibilität der Schädigung durch Kunststoffmaterialien tätigen zu können. Ein weiteres, drittes Prüfprotokoll fand Anwendung bei der Materialuntersuchung mit Short-Stacks. Zunächst wurden Untersuchungen mit dem ersten Prüfprotokoll durchgeführt, um einen Abgleich zu den Single-Cell Untersuchungen herzustellen. Im Anschluss daran kam das dritte Prüfprotokoll im Short-Stack Prüfstand zum Einsatz. Es bildete ein deutlich dynamischeres Anwendungsprofil ab und es hatte eine deutlich verlängerte Versuchszeit von etwa 500 Stunden. Weiterhin wurde auch in diesem Prüfprotokoll eine Regeneration in Form eines Abkühlvorgangs auf Umgebungstemperatur integriert.

Zusammenfassend wurden in diesem Arbeitspaket drei Prüfprotokolle entwickelt und definiert, welche die Eigenschaft einer realitätsnahen und schnellen in-situ Materialqualifizierung an Brennstoffzellen aufweist.

Die Testbedingungen für die in-situ Brennstoffzellentests wurden eindeutig definiert und die ex-situ Auslagerungstestbedingungen wurde in Form einer Matrix den Projektpartnern in AP 8.2 bis AP 8.5 zur Verfügung gestellt.

GC-MS (Gaschromatograph mit Massenspektrometer) Testbedingungen wurden von KIMW festgelegt und über die weitere Projektlaufzeit nicht geändert.

Die Betriebsbedingungen der Prüfkammer, die parallel zu den Teststandversuchen der Ermittlung emittierter Substanzen dienen sollten, wurden in Kooperation mit ZBT und BMW festgelegt. Hierbei wurden insbesondere diejenigen Parameter diskutiert, die zwar im Sinne einer möglichst realistischen Simulation realer Belastungsfälle einerseits, im Sinne maximaler Nachweisfähigkeit des analytischen Systems andererseits ausgelegt werden müssen. Während beispielsweise im Teststand Flussraten von über 1000 sccm die Regel sind, wird bei der Beladung von Thermodesorptionsröhrchen in der Regel im Bereich zweistelliger sccm-Werte gearbeitet, um Substanzdurchbrüche zu vermeiden. Je nach Substanz wird bei einigen hundert sccm nicht mehr quantitativ adsorbiert, des Weiteren ist bei höheren Flussraten mit einer Druckerhöhung im System zu rechnen, der die Prüfbedingungen ebenfalls verändert. Final wurde die Beladung mit einer Gasflussrate von 80 sccm durchgeführt.

Von einer geregelten Zuführung von Luftfeuchte wurde abgesehen, da diese für die gaschromatographischen Untersuchungen kontraproduktiv ist. Feuchtigkeitsspuren belasten die Trennsäule und beeinträchtigen das erreichbare Trennvermögen.

Da das primäre Ziel der begleitenden Analysen die Identifizierung potenzieller Katalysatorgifte darstellt und hierzu eher die Nachweisfähigkeit Priorität vor der möglichst exakten Nachstellung hat, wurde daher ein Konzept entworfen, welches ohne die Zudosierung von Wasser auskommt. Des Weiteren sollten die in der Prüfkammer zur Anwendung kommenden Flussraten eher dazu ausgelegt sein, eine möglichst quantitative Erfassung der emittierten Stoffe zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden die Bedingungen in der Prüfkammer nicht 1:1 an die Versuchsparameter aus dem in-situ-Prüfstand am ZBT angepasst, sondern so gewählt, dass eine optimale Anreicherung und Identifizierung der freigesetzten Kontaminanten möglich ist. Um eine zeitaufgelöste Quantifizierung der Stoffabgabe zu realisieren, wurde beim Setup der Prüfkammer die Möglichkeit eines fliegenden Wechsels von Desorptionsröhrchen berücksichtigt. Hierbei wird über einen Dreiwegehahn jeweils eines von zwei Desorptionsröhrchen bedient. Ein Seitenausgang mit einem Schwebekörper-Durchflussmesser verhindert den Aufbau

eines Überdrucks im System und erlaubt zudem eine indirekte Bestimmung des Gasflusses durch das Röhrchen (Abbildung 106).

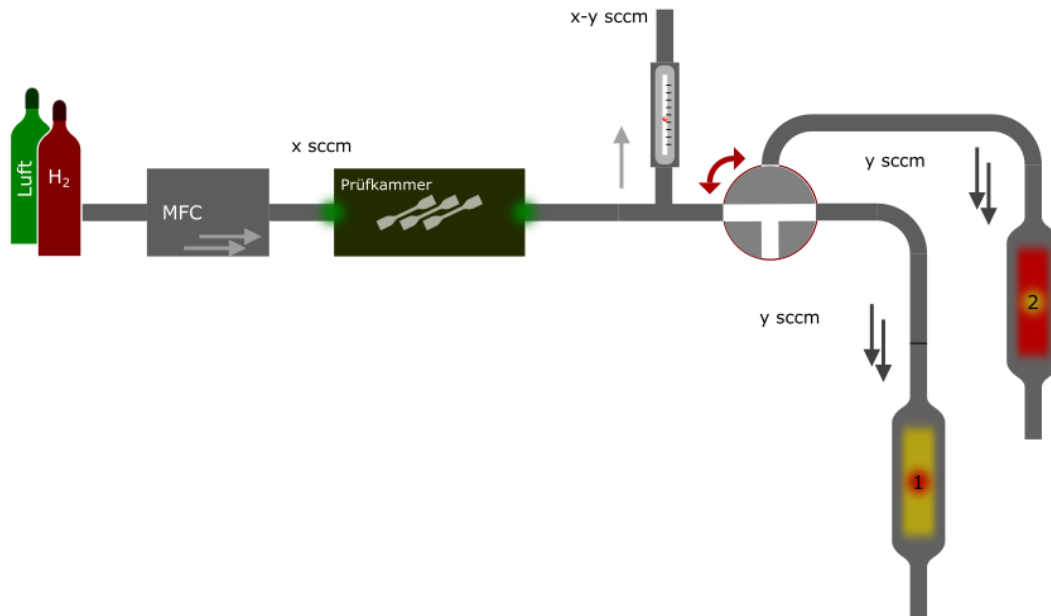


Abbildung 106: Schematische Darstellung der Probennahme mit Thermodesorptionsröhrchen (1,2), die im laufenden Betrieb gewechselt und im Wechsel angesteuert werden können.

Auch die GC-MS Analyse wurde für die optimale Detektion der Kontaminanten angepasst. Die Bestimmung der Emissionszeit von Kontaminanten aus den Temperaturdesorptionsröhrchen wurde in der GC-MS mit dem Ziel eine standardisierte Methode für die nachfolgenden Messungen der Probekörper-begasten Temperaturdesorptionsröhrchen festzulegen, untersucht. Dabei wurden Zeiten von 0 - 240 Minuten bei einer Temperatur von 120 °C mit dem Material PPS untersucht.

Tabelle 20: Bestimmung der Desorptionszeiten mit PPS und Anteil am max. TIC (Total Inorganic-Carbon) -Wert

Desorptionszeit (min)	Anteil max. TIC
0	0%
30	58%
60	68%
120	81%
180	89%
240	95%

Es konnte gezeigt werden, dass zu Beginn die Desorption schnell erfolgt und dass mit steigender Desorptionszeit die Geschwindigkeit der Desorption abnimmt. Darüber hinaus wird deutlich, dass bereits nach 30 Minuten Desorptionszeit 58 % der Desorption erfolgt ist, sodass entschieden wurde, die Desorptionszeit für die Nachfolgeversuche bei 30 Minuten zu belassen. Mit dieser Einstellung kann eine akzeptable Zeitausbeute im Vergleich zum Informationsgewinn bei höheren Desorptionszeiten erzielt werden.

Für die ex-situ Auslagerungstest wurden ebenfalls die Prüfbedingungen und die zu verwendenden Prüfkörper, Probenbehälter und die Untersuchung auf die Kontaminanten festgelegt. Dabei wurde sich an der Vorschrift von BMW (AA 0795-2) orientiert. Es wurden PTFE-Druckbehälter mit einem Volumen von 100 ml verwendet (Abbildung 107). Es kamen Normprobekörper von Typ 5A für die Tests der Polymertypen zum Einsatz.



Abbildung 107: PTFE-Druckbehälter zur Auslagerung der Normprobekörper in spezifischen Einlagerungsmedien

Die Versuche sahen vor, dass die zu qualifizierenden Materialien in neun verschiedenen Kombinationen von wässrigen Medien und Lagerbedingungen (Tabelle 19) gelagert und das Eluat im Anschluss mit geeigneten Methoden auf extrahierte Stoffe hin analysiert wird. Die damit verbundenen Analysen wurden im Unterauftrag bei einem geeignet ausgestatteten Partnerlabor (Chem. Laboratorium Dr. Rainer Fülling, Remscheid) mittels u. a. ICP-OES (Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) und Ionenchromatographie vorgenommen. Dabei mussten die Auslagerungen in enger zeitlicher Absprache mit dem externen Labor erfolgen, um die Prüfbedingungen hinsichtlich Lagerdauer, Abkühlzeiten und Probekörperentnahme einzuhalten. Die Autoklaven wurden zwecks eindeutiger

Zuordnung mittels Schlagzahlen dreistellig nummeriert und jeweils strikt einem bestimmten Prüfmedium gewidmet.

Zur Kontrolle der verwendeten Prüfmedien vor der Einlagerung kam ein pH-Meter zum Einsatz. In der BMW-Vorschrift AA-0795 sind für die Oberfläche eines solchen Probekörpers von 32,24 cm² angegeben; das Verhältnis von Probekörperoberfläche zum eingegebenen Volumen des Prüfmediums sollte 0,4 cm²/ml betragen. Hieraus ergibt sich ein Volumen des Prüfmediums von 80,6 ml für zwei Probekörper.

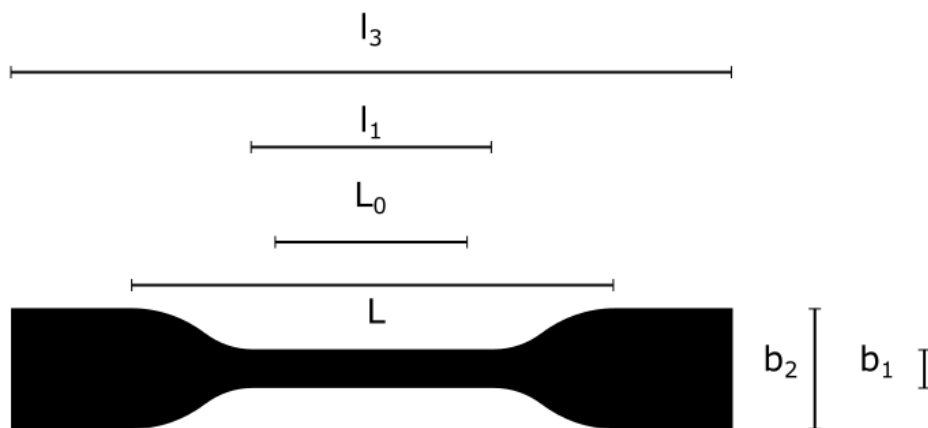


Abbildung 108: Form des verwendeten Probekörpers Typ 5A; $l_3=75$ mm, $b_2=12,5$ mm, die Dicke beträgt 2 mm.

Um Verwechslungen zu vermeiden und dem externen Labor auch ohne Detailkenntnisse des kompletten Prüfplans zu erlauben, die Analyseergebnisse eindeutig zuzuordnen, wurden die jeweiligen Proben auf eindeutige Weise kodiert. Der Code beinhaltet Informationen über das jeweilige Prüfmedium (1-9), das Material der Probekörper und die Autoklaven-ID, die aus der dreistelligen Nummerierung besteht.

Der Extrakt wurde nach der Lagerung hinsichtlich der nachfolgenden Parameter zweistufig untersucht:

Stufe 1:

- Bestimmung der Leitfähigkeit und des pH-Werts.
- Bestimmung von Summenparameter für Stickstoffverbindungen (Total Nitrogen bound / TNb), Kohlenstoffverbindungen (Total Organic Carbon, TOC).
- Bestimmung diverser Elemente (Cl-, Br-, I-, Al, Sb, Ba, B, Ca, Fe, Cr, K, Co, Cu, Mg, Mn, Mo, Ni, Pges., Si, Sr, Ti, V, Zn, Sn, Zr).

Stufe 2, sofern der entsprechende Summenparameter oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegt:

- Detailuntersuchung stickstoffhaltiger Verbindungen (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-).
- Quantifizierung organischer Säurereste (Formiat, Acetat, Propionat).

- Bestimmung adsorbierbarer organisch gebundener Halogene (AOX).

Grundlage der Prozedur ist die Versuchsvorschrift bzw. Arbeitsanweisung AA 0795:2020 06 der BMW Group. Im Rahmen des Projektes FaeBS werden die in nachfolgender Übersicht gelisteten Auslagerungen geplant. Dabei werden die in Tabelle 21 angegebenen Materialtypen berücksichtigt, von denen zunächst nur PPS und PA-66GF30 allen Bedingungen ausgesetzt werden und die übrigen drei Materialien in einem zweiten Untersuchungsschritt mit den drei Versuchsbedingungen vorgenommen werden, die in der ersten Runde die aufschlussreichsten Ergebnisse erbracht haben (im Sinne einer maximalen Extraktion). In Tabelle 22 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Kombinationen aus Prüfmedien und -bedingungen angegeben, die bei den 16-stündigen Auslagerungen zum Einsatz kamen. Nach den ersten grundlegenden Versuchen wurden dann noch Langzeitauslagerungen mit den extremen Prüfbedingungen durchgeführt.

Tabelle 21: Übersicht der verwendeten Prüfmaterialien

Grundmaterial (Sorte)	Handelsbezeichnung (Typ)	Hersteller
Polyphenylensulfid Kodierung: PPS	Torelina A900 B1	Toray
Polyphenylensulfid, 40% Glasfasern Kodierung: PPSGF40	Torelina A604CX1B	Toray
Polypropylen, 30% Glasfasern Kodierung: PPGF30	Fibremod GB311U	Borealis
Polyamid 6, 30% Glasfasern Kodierung: PA6GF30	Durethan BKV30H3.0	Lanxess
Polyamid 6.6, 30% Glasfasern Kodierung: PA66GF30	Ultramid A3EG6EQ	BASF

Tabelle 22: Übersicht der Prüfmedien zur Auslagerung

PM	Temp. [°C]	pH-Wert (soll)	[NaF] [mg/l]	[NaCl] [mg/l]
1	80	4,1	30	10
2	80	3,0	30	10
3	80	5,0	30	10
4	80	4,1	10	10
5	80	4,1	3	10
6	80	4,1	30	3
7	95	4,1	30	10
8	105	4,1	30	10
9 (nur für PP-GF30 verwendet)	105	3,0	30	0

Die Proben werden jeweils direkt nach den Lagerungen persönlich überbracht. Dazu wurde zwischen den Partnern festgelegt, dass die Lagerperiode mit Entnahme der Probekörper endet. Da die AA-0795 keine Aussagen über Abkühlzeiten macht, wurde vereinbart, dass die Proben während des Transfers zum externen Labor (ca. 45 min) in den Autoklaven verbleiben, während diese allmählich abkühlen und beim Eintreffen annähernd Raumtemperatur erreicht haben. Im externen Labor werden einige ml der Probeflüssigkeit für Teilanalysen abgegossen und die oberen Enden der Probekörper auf diese Weise für die Entnahme mit einer Pinzette zugänglich gemacht. Auf diese Weise wird das Risiko einer Einschleppung von Kontaminationen minimiert.

Um zu gewährleisten, dass die Einlagerungsbehälter frei von Kontaminationen sind und nur die Kontaminationen die aus dem Probekörpern in die Elektrolytlösungen gelangen, detektiert werden, wurden die Behälter vor jeder Einlagerung einer definierten Reinigungsprozedur unterzogen und vor den Versuchen durch das Prüflabor freigesetzt.

Die Testbedingungen für die Emissions- und Auslagerungsversuche wurden festgelegt und durch erste Auslagerungstest die geprüften Materialien verglichen. Der Meilenstein MS 8.3 wurde erfüllt.

Arbeitspaket 8.2 – Materialauswahl Ex-situ Charakterisierung

Über alle Versuche gesehen konnte ein signifikanter Anstieg des pH-Wertes in der Elektrolytlösung festgestellt werden (siehe hierzu Auslagerungsversuche Abbildung 109, Abbildung 110 und Abbildung 111). Nur beim Referenzmaterial PPS (unverstärkt) blieb die pH-Wert-Änderung aus und es wurden auch insgesamt nur sehr wenig Kontaminanten bei der Auslagerung dieses Materials detektiert. Der Anstieg des pH-Wertes ist auf die Glasfaserverstärkung der Materialien zurückzuführen. Durch die Glasfasern und die zur Einbettung dieser in das Polymer benötigten Schlichte, werden vor allem die Elemente Silizium (Si), Bor (B) und Phosphor (P) in das Material eingebracht. Diese Elemente werden in der Auslagerung dann herausgelöst und sorgen für einen signifikanten Anstieg des pH-Wertes – teilweise schon nach einem Tag, teilweise erst nach 3 oder 11 Tagen. Es konnte eine Korrelation zwischen dem Austrag an Bor-Ionen und dem Anstieg des pH-Wertes festgestellt werden. Der Austrag an Bor-Ionen war auch beim PPS-GF40 deutlich zu beobachten.

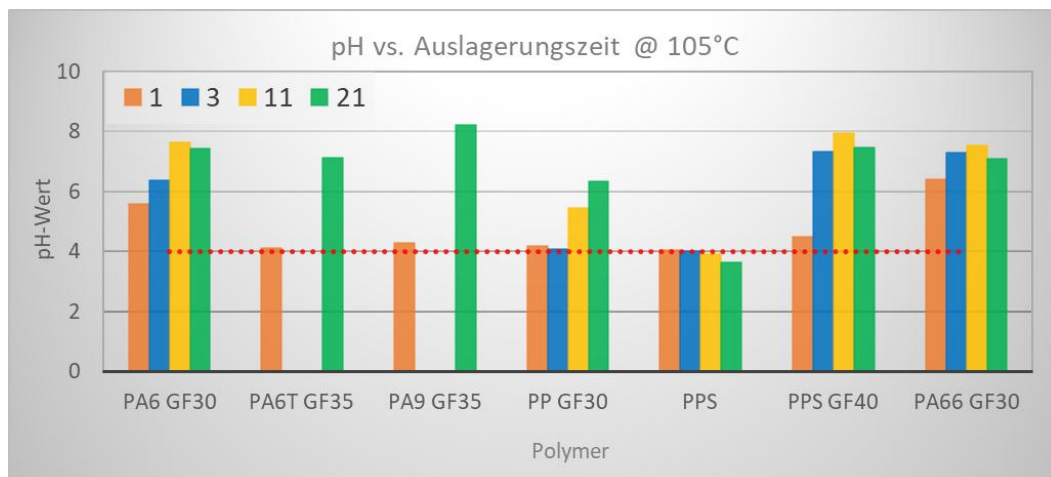


Abbildung 109: Darstellung des pH-Wertes nach unterschiedlicher langer Auslagerungszeit bei 105 °C.

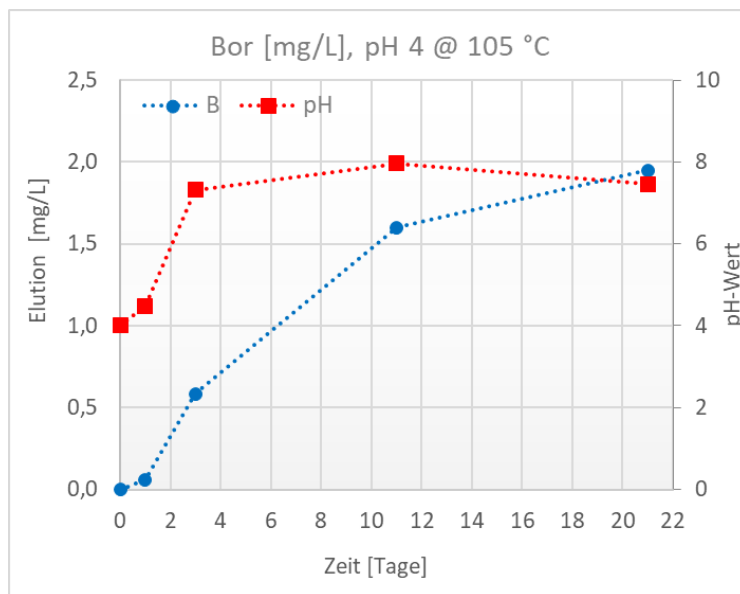


Abbildung 110: Darstellung der Elution von Bor Ionen und pH-Werte in Abhängigkeit von der Zeit bei PPS- GF40.

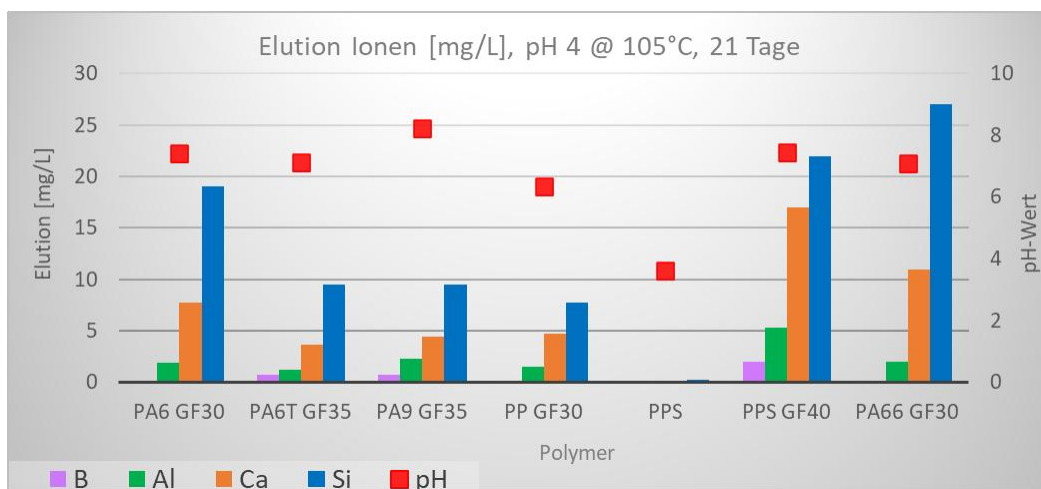


Abbildung 111: Vergleich der eluierten Ionen und der Veränderung des pH-Wertes zwischen PA6-GF30 mit den hydrolysestabilisierten Typen PA6T-GF35 und PA9-GF35 nach einer Auslagerungszeit von 21 Tagen bei 105 °C.

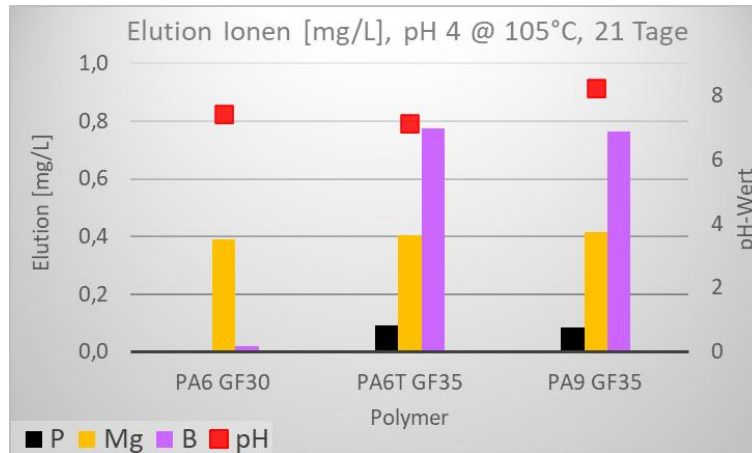


Abbildung 112: Zusammenfassung der Langzeit Auslagerungsversuche; detektierte Ionen und Anstieg des pH-Wertes nach 21 Tagen bei 105 °C und einem Start pH-Wert 4.

Durch die Hydrolysestabilisierung bei den Materialien PA6T-GF35 und PA9-GF35 (siehe Abbildung 112) konnte zwar eine Reduktion der ausgetragenen Ionen erzielt werden. Es konnte jedoch ein erheblicher Anteil an Bor-Ionen nachgewiesen werden, im Zusammenspiel mit dem ausgewaschenen Silizium zum Anstieg des pH-Wertes führt.

Beim Nachweis der TOC- und TNb-Werte zeigten sich ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Polymeren (siehe Abbildung 113 und Abbildung 114). Die PA6 und PA66 Type zeigten einen deutlichen Anstieg sowohl beim TOC als auch beim TNb über die Zeit, wobei auch schon nach einem Tag ein deutlich angestiegener Wert gemessen werden konnte. Diese Typen zeigten auch bei den in-situ Tests am ZBT den größten Einfluss auf die Performance der Brennstoffzelle, was auf den Austrag von organischem Material zurückzuführen ist. Durch eine Hydrolysestabilisierung konnte der Austrag von TOC und TNb deutlich reduziert werden (siehe Materialien PA6T-GF35 und PA9-GF5). PPS-GF40, das unverstärkte PPS und PP-GF30 zeigen im Vergleich nur geringe Auswaschungen aus dem Material. Auch bei der detektierten Menge TNb konnte der Austrag durch eine Hydrolysestabilisierung des Materials deutlich gesenkt werden (Abbildung 114). PP und PPS weisen keine Stickstoffverbindungen auf, weshalb kein TNb nachgewiesen werden kann.

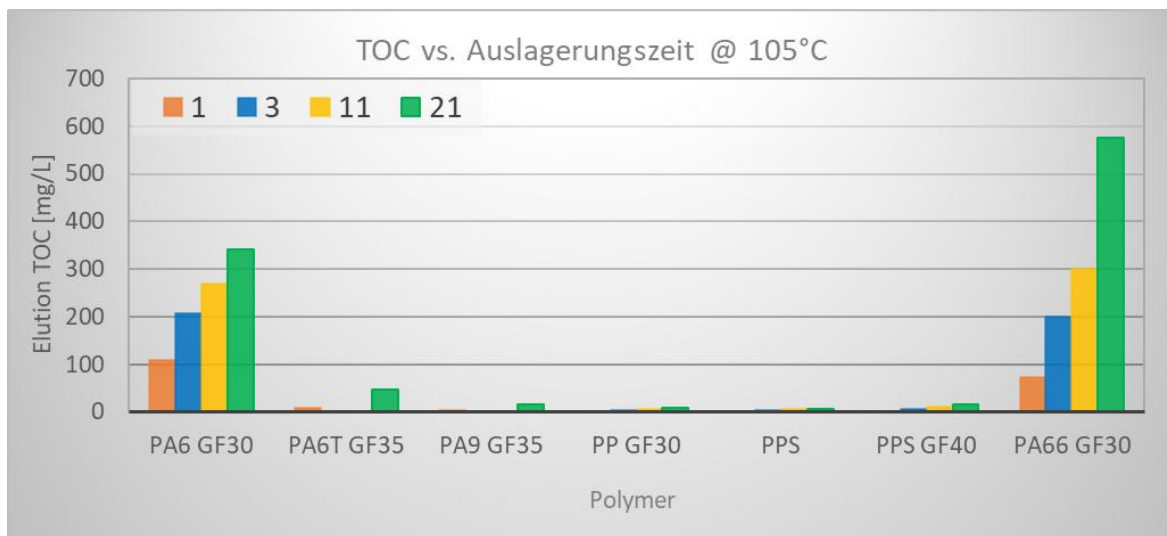


Abbildung 113: Darstellung der TOC-Elution in Abhängigkeit von der Zeit (in Tagen) bei den analysierten Materialien.

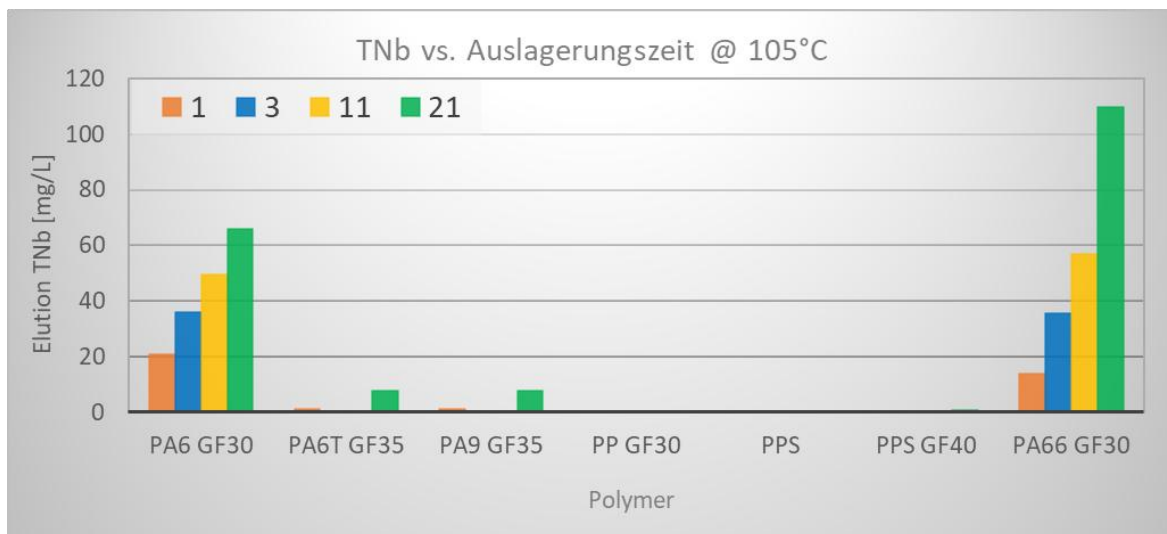


Abbildung 114: Darstellung der TNb-Elution in Abhängigkeit von der Zeit (in Tagen) bei den analysierten Materialien.

Zusammenfassend lässt sich zu den Auslagerungsversuchen folgendes sagen:

- Zu Beginn der Auslagerung findet ein stärkerer Austrag von Kontaminanten in den Elektrolyten statt, der im Laufe der Zeit geringer wird.
- Die Kontamination/der Austrag ist abhängig von Temperatur und pH-Wert.
- Die im Projekt verwendeten PA6-GF30 und PA66-GF30 sind in Bezug auf Elution von TOC und TNb-Eluenten am wenigsten für den Einsatz in der Brennstoffzelle geeignet.
- PA 6T/6I-GF35 und PA9-GF35 zeigen weniger Kontaminationen (vor allem TOC und TNb) in der Elution als das PA-GF30, sind also besser geeignet.

- Nur PPS weist bei Langzeittests einen konstanten pH-Wert auf.
- Sind Glasfaseranteile im Kunststoff vorhanden, so steigt der pH-Wert mit der Lagerungszeit an (vergl. PPS und PPS-GF40).
- Die Konzentration von Kontaminanten in PPS ist deutlich niedriger als in PPS-GF40.
- In dem im Projekt verwendeten PP-GF30 lassen sich auch nach thermischer Belastung nur wenig Eluenten nachweisen – pH-Wert steigt jedoch ebenfalls an, jedoch langsamer.

Die Emissionsversuche wurden im Projektverlauf ebenfalls standardisiert und die Prüfkammer sowie die Peripherie und die Prozessführung für die Analyse der Kontaminanten angepasst. In der Prüfkammer wurden kleine Normprüfkörper 5A verwendet und einem kontinuierlichen Gasstrom in der beheizten Prüfkammer ausgesetzt. Der Kammerausgang sowie die Verbindungsrohre zwischen der Prüfkammer und den Thermodesorptionröhrchen zum Auffangen der Kontaminanten wurden beheizt, um ein frühzeitiges Auskondensieren der Kontaminationen an den kalten Rohren zu vermeiden.



Abbildung 115: Prüfkörper positioniert in der Prüfkammer.

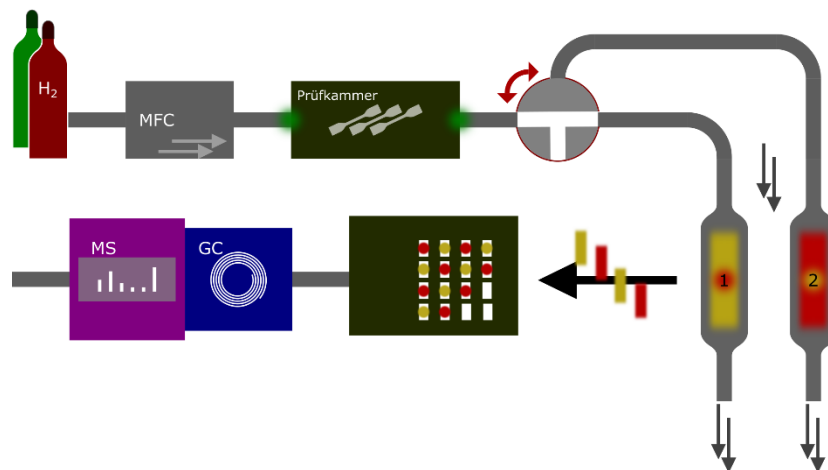


Abbildung 116: Schematische Darstellung der Emissionsanalyse und nachgeschalteter GC-MS Detektion der freigesetzten Kontaminationen.

Die Thermodesorptionsröhrchen/Tenaxröhrchen können wechselnd durchströmt, während des Prüfprozesses getauscht und damit zeitabhängige Messungen realisiert werden. Die Kontaminationen wurden in den Röhrchen über einen Zeitraum von 4 – 4 – 16 – 4 – 4 Stunden gesammelt und dann mittels GC-MS analysiert. Die detektierten Emissionen wurden dann – zur besseren Vergleichbarkeit – jeweils auf eine Stunde normiert.

Es konnten vor allem cyclische Methylsiloxane (siehe Beispiel in Abbildung 117), die in verschiedenen industriellen Prozessen Anwendung finden, nachgewiesen werden. Diese stammen aus den Tenaxröhrchen und aus den untersuchten Polymerproben mit Glasfaseranteilen. Die Menge an Methylsiloxanen ist bei Vorhandensein von Glasfasern signifikant höher und kann auf diese zurückgeführt werden. Zudem konnten mehrere Stoffe, die zur Wärmealterungstabilisierung der Kunststoffe beitragen detektiert werden:

- sterisch gehinderte Phenolderivate stammen aus dem Additiv Irganox 1076 (siehe Abbildung 120).
- sterisch gehindert Benzochinon wurde nachgewiesen (siehe Strukturbeispiel in Abbildung 118 sowie Messung Abbildung 121 links).

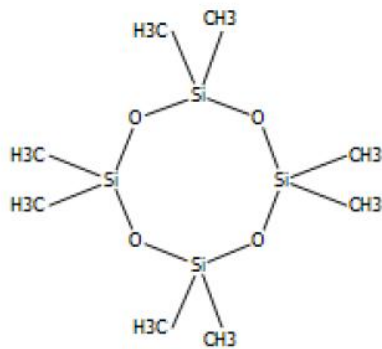


Abbildung 117: Octamethyl-cyclotetrasiloxan.

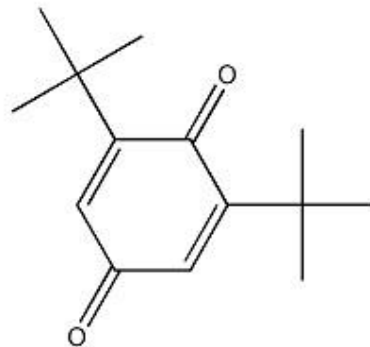


Abbildung 118: 2,6-Di-tert-Butylbenzo-1,4-quinon.

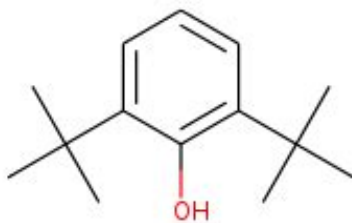


Abbildung 119: Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl).

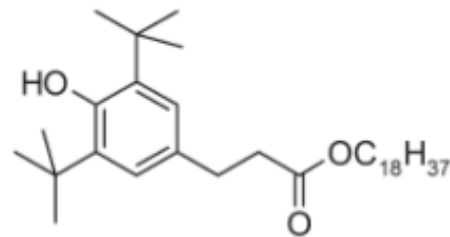


Abbildung 120: Irganox 1076.

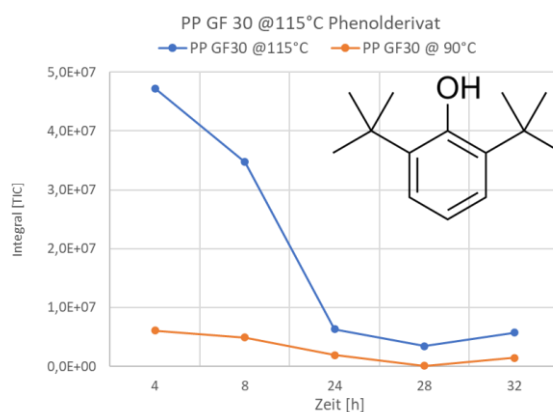
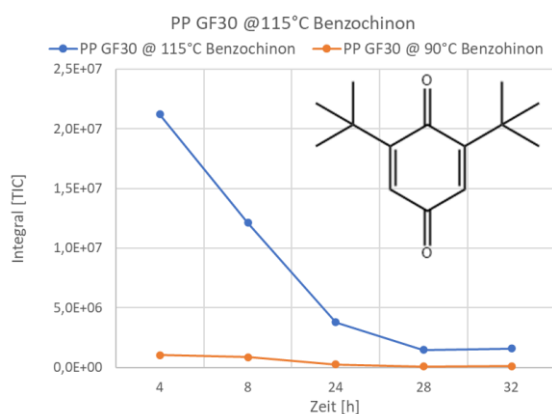


Abbildung 121: Normierte Emission von Benzochinonderivaten (links) sowie Phenolderivaten (rechts) aus PP GF30 über die Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur (90 °C und 115 °C) in der Prüfkammer.

Zudem konnten Stoffe, die den Polymeren als Additive beigemischt werden, detektiert werden (siehe Abbildung 121 und Abbildung 122):

- γ -Butyrolacton (GBL) dient der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften.
- Benzaldehyde werden als Katalysator bei der PPS-Herstellung verwendet.
- Triphenylphosphate.
- Zudem wurden Phenole (siehe Strukturbeispiel in Abbildung 119 und Messung in Abbildung 121 rechts), die als Flammschutz, Stabilisator und Antioxidationsmittel dienen, nachgewiesen.
- sowie Siloxane aus den Glasfasern.

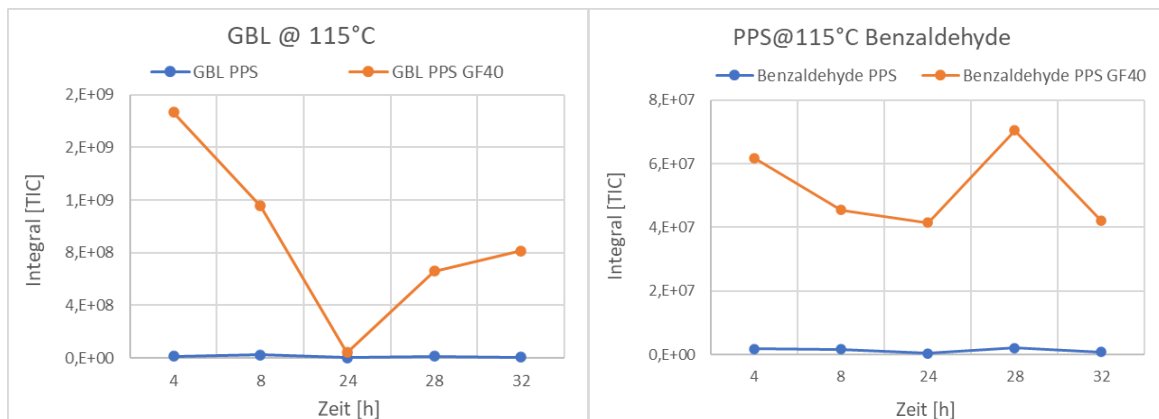


Abbildung 122: Normierte Emission von γ -Butyrolacton (GBL; links) und Benzaldehyden (rechts) aus PPS und PPS-GF40 bei 115 °C in der Prüfkammer.

Auch Monomerbestandteile als Zersetzungsprodukte der verschiedener Polymere, wie beispielsweise Kohlenwasserstoffe als Bruchstücke von PP und ϵ -Caprolactam (als Monomerbaustein von PA6; siehe Abbildung 123), wurden detektiert.

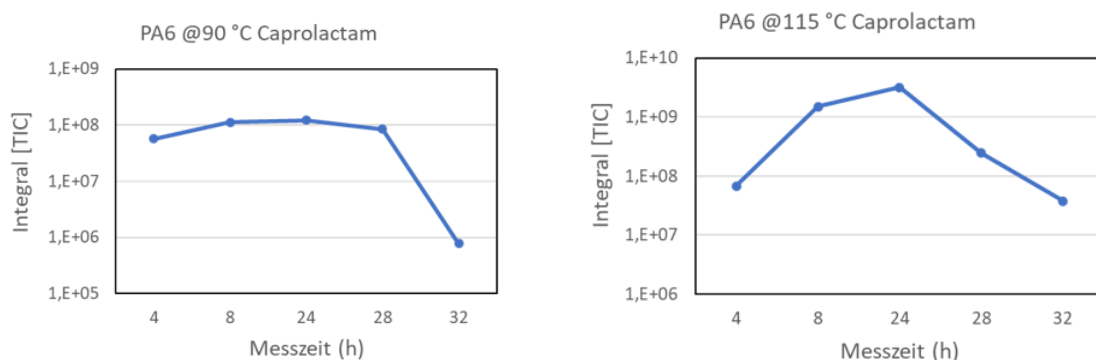


Abbildung 123: Emission von ϵ -Caprolactam, auf eine Stunde normierte, aus PA6 in Abhängigkeit von der Temperatur in der Prüfkammer (90 °C links, 115 °C rechts).

In der folgenden Tabelle 23 sind die Kontaminanten noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 23: Übersicht der in der Emissionsanalyse detektierten Kontaminationen aus den untersuchten Polymeren

Material	Hauptkontamination (größte Peaks)	Weitere Kontaminanten
PA6-GF30	ϵ -Caprolactam, Reihe homologer cyclischer Siloxane	Sterisch gehinderte Phenolderivate
PA66-GF30	Reihe homologer cyclischer Siloxane	Cyclopentanon, sterisch gehinderte Phenolderivate, Phenol
PP-GF30	Diverse KW als Bruchstücke von PP, Reihe homologer cyclischer Siloxane 7,9-Di-tert.-butyl-1-oxaspiro[4,5]deca-6,9-dien-2,8-dion	Sterisch gehinderte Phenolderivate, sterisch gehindertes Benzochinon
PPS-GF40	Reihe homologer cyclischer Siloxane γ -Butyrolacton Triphenylphosphat	Phenolderivate, Phenol, Benzaldehyde
PA9-GF35	Benzol, Benzolderivate, Pyrole,	Siloxane, Phenole
PA6T/6I-GF35	Benzol, Benzolderivate,	Siloxane, Phenole, Benzaldehyde
PPS Referenz	Reihe homologer cyclischer Siloxane γ -Butyrolacton Triphenylphosphat	Phenolderivate, Phenol, Benzaldehyde

Die Beobachtungen aus der Emissionsanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zu Beginn der Emissionsanalyse findet ein stärkerer Austrag von Kontaminanten statt, der im Laufe der Zeit geringer wird.
- Die Emission der Kontaminanten ist temperaturabhängig.
- Es werden Stoffe, die zur Wärmealterungsbeständigkeit beitragen, emittiert und Bausteine der Polymere nachgewiesen (PP und PA6), wodurch eine Abnahme der mechanischen Eigenschaften möglich ist.
- durch Hydrostabilisatoren bei PA6T/6I GF35 und PA9 GF35 wurden die Emissionen reduziert.

Die Tests wurden standardisiert und eine Korrelation zwischen den GC-MS Analysen und den Auslagerungsversuchen ist im Ansatz erkennbar: Höhere TOC-Werte in der Auslagerung stimmen mit höheren Emissionsraten in der GC-MS überein und haben den gleichen Ursprung. Eine direkte Korrelation ist jedoch schwierig. Meilenstein MS 8.6 konnte größtenteils erfüllt werden.

Es konnten dabei mehr als 7 organische Verunreinigungen identifiziert und auch mittels GC-MS quantifiziert werden. Allerdings konnten in Korrelation mit den in-situ Messungen noch keine Emissionsgrenzwerte für die Kontaminationen festgelegt werden. Hierzu wären weitere Detailanalysen sowie ein besseres Verständnis für die Auswirkungen der Kontaminationen in der Brennstoffzelle notwendig. (KPI 8.1)

Es wurden 5 Kationen und 3 Anionen in der Elution der Auslagerungsversuche nachgewiesen und quantifiziert (KPI 8.2), allerdings ist auch hier noch nicht 100%ig klar, wie hoch die Werte sein dürfen, damit keine Beeinträchtigung der Brennstoffzelle erfolgt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Brennstoffzelle in einem bestimmten Zyklus, teilweise mit Regeneration, betrieben wird, passen die Testbedingungen der ex-situ Tests (längere Auslagerungsdauer im gleichen Elektrolyt, längere Messzeit zur Aufkonzentration der Kontaminanten aus der Prüfkammer) nicht zu 100% zu den Bedingungen in der Realität. Ein Abgleich ist dadurch erschwert.

Die entwickelten ex-situ-Tests lassen eine sehr schnelle Bewertung von Materialien zu und sind geeignet, um Kontaminationen in Elution und Emission zu identifizieren und zu quantifizieren. KPI 8.3 wurde vollkommen erfüllt.

Arbeitspaket 8. 3 – MEA-Herstellung und Anforderungsprofil Analytik

Die Identifikation der Schädigungsmechanismen sollte in-situ mittels elektrochemischer Messmethoden (beim ZBT) und ex-situ als Post Mortem Analyse (bei BMW) erfolgen. Elektrochemische Messmethoden dienen zur exakteren Beschreibung von Materialeigenschaften sowie chemischen und physikalischen bzw. kinetischen Vorgängen innerhalb der Brennstoffzelle. Zu nennen sind dabei insbesondere die Zyklovoltammetrie (CV) und die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS).

Die Emission von Kontaminanten aus Werkstoffen – welche in die katalytisch aktive Schicht des Brennstoffzellen-Stacks gelangen können, kann zur Verringerung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Brennstoffzelle führen. Demnach müssen Werkstoffe eingesetzt werden, welche möglichst wenig schädliche Kontaminanten über deren Lebenszeit abgeben.

Der große Vorteil der EIS besteht darin, dass durch Messungen über ein breites Frequenzspektrum unterschiedlich schnell ablaufende Prozesse, wie z.B. Ladungsdurchtritt, Oxygen Reduction Reaction (ORR), Diffusion oder Protonentransport innerhalb der Brennstoffzelle theoretisch weitgehend getrennt voneinander darstellbar sind und somit eine Charakterisierung der PEMBZ bei laufendem Betrieb möglich ist. Somit sind Änderungen der MEA-Charakteristik

während der Kontaminierung durch Emissionen aus den Materialproben messbar und örtlich auflösbar. Dementsprechend wurde die Messtechnik sowohl im Single-Cell Prüfstand als auch als 4-Kanal Messung im Short-Stack-Prüfstand eingesetzt. Mit der 4-Kanal Messung im Short-Stack Prüfstand konnte jede einzelne Zelle des 4-Zellen Stack separat vermessen und analysiert werden.

AP 8.3 Ergebnis

Während bei den Single-Cell Messungen auch Referenzmessungen zur Überprüfung und Trennung der Effekte Teststand- vs. Materialeinfluss vorgenommen werden konnten, wurden die Stacks von BMW bereits fertig konditioniert geliefert und als Referenz lediglich das hochwertige PPS als Material verwendet.

Die Ergebnisse der Impedanzmessungen sowohl bei den Versuchen mit Single Cell Messungen als auch im Stack deckten sich mit den jeweiligen leichten Spannungsverlusten und somit Materialeinflüssen. Es konnte gezeigt werden, dass bei keinem Materialeinsatz die Membran signifikant kontaminiert wurde. Die elektrochemischen Effekte, die allgemein sehr geringfügig waren, zeigen sich durch einen leichten Anstieg der Impedanzen im mittelfrequenten Bereich. Dieser repräsentiert den Aktivierungsbereich und somit die Katalysatoraktivität. Eine minimale Belegung aktiver Zentren am Katalysator sorgte für den Leistungsverlust. Die Impedanzmessungen bei den Short Stack Messungen zeigten keine Kontaminierung im Aktivierungsbereich. Zudem gab es beim Vergleich unter den jeweiligen einzelnen Zellen im Stack keine Abweichungen, sodass eine stärkere Kontaminierung der Randzellen ausgeschlossen werden konnte.

Aufgrund des eng getakteten Versuchsplan und der Messung gegen Projektende konnten hier jedoch nicht alle Messungen mit ausreichender elektrochemischer Bewertung vorgenommen werden. Hier Bedarf es zukünftig weiteren Messungen am Short Stack und Erweiterung der Prüfprotokolle, um auch längerfristige Lebensdauer- und Degradationsbewertungen vornehmen zu können.

Zur Beurteilung des Werkstoffes in Bezug auf die Auswaschung von Kontaminanten durch flüssiges Produktwasser, wird der Werkstoff in „synthetischen Produktwässern“ (= Medium) – welche den worst-case Fall (z. B. bei Break In) abbilden – bei einer bestimmten Temperatur und pH-Wert über eine bestimmte Zeit eingelagert.

Die Emissionen von Kontaminanten in das Produktwasser wurden durch analytische Methoden erfasst. Da es im Vorfeld nicht klar ist, welche Substanzen in das Produktwasser übergehen, wird eine stufenweise Analytik mit zunehmender Differenzierung von Einzelverbindungen durchgeführt.

Die in diesem Unterkapitel durchgeführten Arbeiten zur Identifizierung des Abbaumechanismus (MS. 8.8) trugen dazu bei, die wichtigsten organischen und ionischen Kontaminationen zu identifizieren. Indem der Ursprung des Abbaumechanismus entschlüsselt wird, können die verantwortlichen ionischen und

organischen Verunreinigungen identifiziert werden. Dies liefert wertvolle Informationen für AP8.2 zur Definition der Kontaminationsgrenzwerte aller Kontaminanten (KPI 8.1 und KPI 8.2).

Die für das Arbeitspaket 8.5 benötigten MEAs im TP-285 Format (Aufbau von vier 4-Zeller Short-Stacks) wurden seitens BMW gefertigt, assembliert sowie einer definierten Qualitätskontrolle unterzogen. In weiterer Folge wurden diese als Short-Stacks für die elektrochemischen Versuche am ZBT zur Verfügung gestellt. Gemäß dem definierten Prüfprotokoll wird eine differenzierende MEA für die stationären (sensitive MEA) sowie für die dynamischen Bedingungen (lebensdauerstabile MEA) eingesetzt.

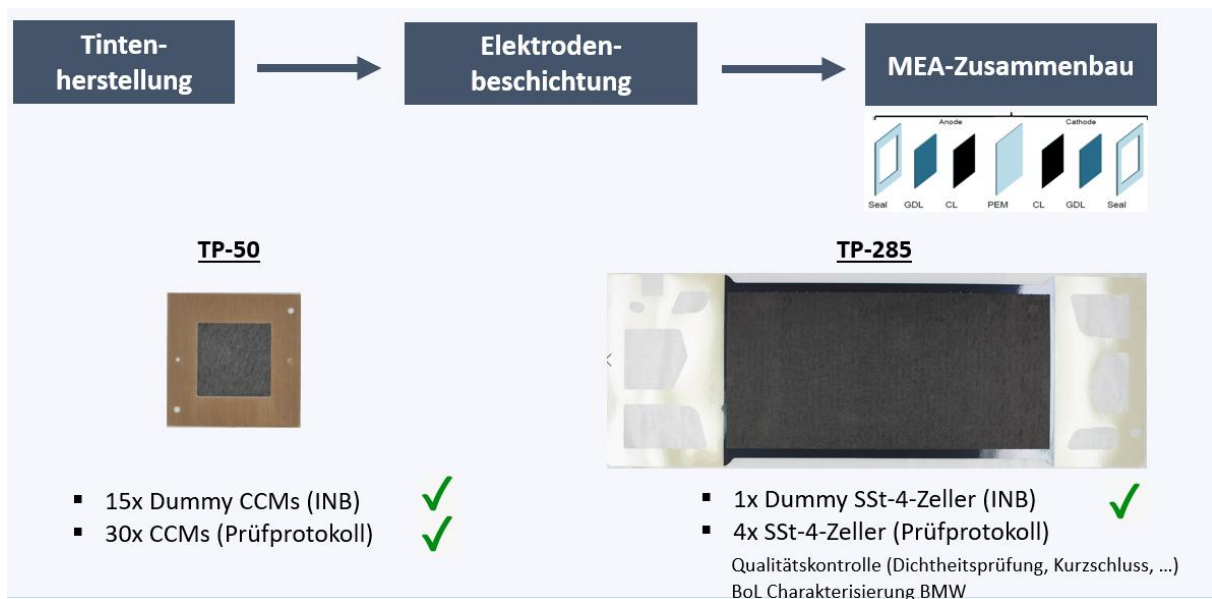


Abbildung 124: schematisches Vorgehen zur MEA-Herstellung, die bei BMW durchgeführt wurde. (TP-x = Zell-Format mit x cm² aktiver Fläche)

Die Aufgabe des ZBT in diesem Unterkapitel liegt in der optimalen Auslegung der elektrochemischen Untersuchungen (Impedanz, CV) während der in-situ-Messungen. Der Fokus wird dabei auf Übertragung der Single-Cell-Messungen auf Anwendung im Short Stack gesetzt. Im Berichtszeitraum wurden auf Basis des Testprotokolls die Betriebsbedingungen für die elektrochemischen Messungen definiert und nachfolgend im automatisierten Testset bzw. in die LabView Softwareumgebung des Teststandes integriert.

Arbeitspaket 8.4 – Einzelzellen und Abgleich zu ex-situ Materialemission

In diesem Arbeitspaket lag der Hauptfokus auf der Entwicklung und dem Bau der Prüfkammer, dem Neubau des Single-Cell Prüfstandes und der Messkampagne auf Single-Cell Ebene.

AP 8.4 Ergebnis

Für die Untersuchung von Kunststoffmaterialien wurde am ZBT eine Prüfkammer entwickelt, die in einem Gasstrom beziehungsweise in das dafür vorgesehene Rohrsystem integriert werden kann. Aufbauend auf dieser Version wurde die Prüfkammer mit den Zielen einer kompakten Bauweise und eines schnellen und einfachen Probenwechsels in der Projektlaufzeit weiterentwickelt und ergänzt. In der Abbildung 77 werden die beiden Varianten gegenübergestellt. Beispielsweise führte die Integration eines Scharniers zu einem deutlich vereinfachten Probenwechsels. Zudem musste auch das Innengestell der Prüfkammer angepasst werden, da in

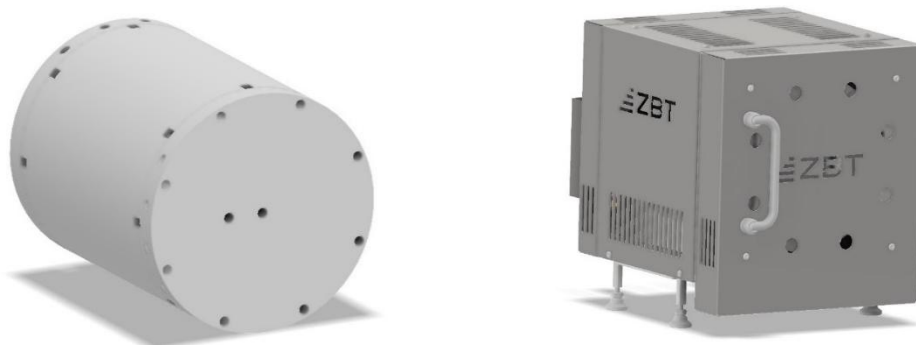


Abbildung 125: Erstversion der Prüfkammer (links) und überarbeitete Version der Prüfkammer (rechts).

vorherigen Projekten mit dem Probenkörper Typ 1A und in diesem Projekt mit dem Probekörper Typ 5A gearbeitet wurde. Dazu wurden drei Konzepte erstellt und nach Gegenüberstellung das dritte Konzept für den weiteren Verlauf des Projekts umgesetzt. Insgesamt wurden in diesem Projekt drei Prüfkammer inklusive des Innengestells aufgebaut. Zwei Prüfkammern wurde in die Prüfstände am ZBT integriert. Eine weitere Prüfkammer wurde als prüfstandautarke Variante an die KIMW-F ausgeliefert.

Für die Materialuntersuchung auf Single-Cell Ebene war es zunächst angedacht einen bestehenden Prüfstand auf die neuen Anforderungen umzubauen. Aufgrund der zahlreichen notwendigen Änderungen wurde jedoch ein kompletter Neuaufbau priorisiert. Ein erster Schritt stellt die Erarbeitung eines neuen R&I-Fließbildes dar. Im Anschluss daran wurde eine CAD-basierte Konstruktion erstellt. Die Auslegungsgrundlagen bezogen sich auf die in AP8.1 festgelegten Betriebspunkte und Prüfprotokolle. Nach dem Aufbau und der erfolgreichen Inbetriebnahme des Single-Cell Prüfstandes konnte die erste Messkampagne durchgeführt werden. In Abbildung 78 werden sowohl die Konstruktion in der CAD-Umgebung als auch der betriebsbereite Prüfstand im Labor dargestellt (MS 8.2 und KPI 8.5).

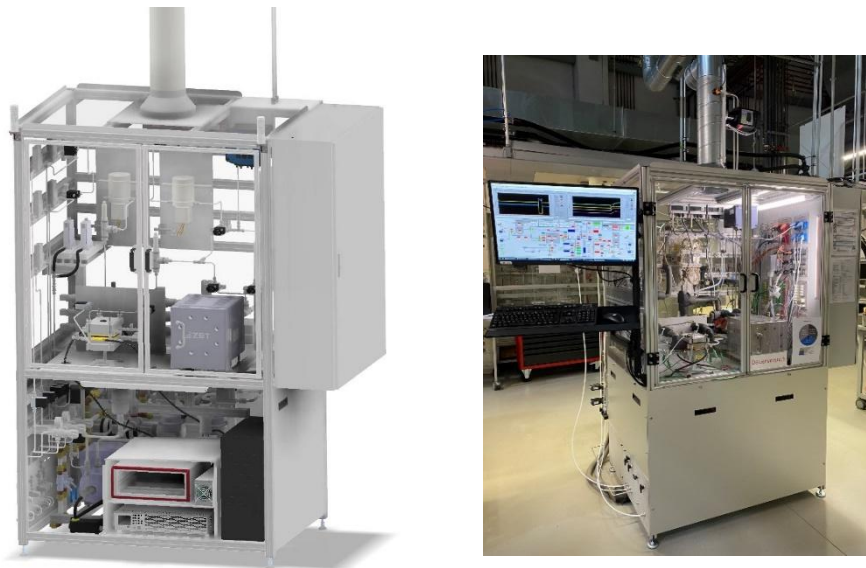


Abbildung 126: Single-Cell Prüfstand in CAD Umgebung (links); betriebsbereiter Prüfstand im Labor (rechts).

In der ersten Messkampagne wurde eine in-situ Qualifizierung von 5 Kunststoffmaterialien inklusive des Referenzmaterials durchgeführt. Dabei dienten Untersuchungen ohne Probenkörper und mit PPS-Probenkörper als Referenzuntersuchung. Die vier weiteren Kunststoffmaterialien bildeten PP-GF30, PPS-GF40, PA6-GF30 und PA66-GF30. Als Prüfprotokoll wurde das erste Protokoll mit 7 unterschiedlichen Betriebspunkten und zahlreichen U-I Kennlinien verwendet. Abgesehen von den Referenzuntersuchungen ohne Probenkörper wurden stets 3 Probekörper des jeweiligen Werkstoffes in die Prüfkammer eingelegt. Die Abbildung 79 stellt den Vergleich einer ausgewählten Kennlinie aller Untersuchungen nach

Beaufschlagung durch die Kontaminanten, welche in der Prüfkammer aus den Kunststoffmaterialien in die Gasphase übergehen, dar.

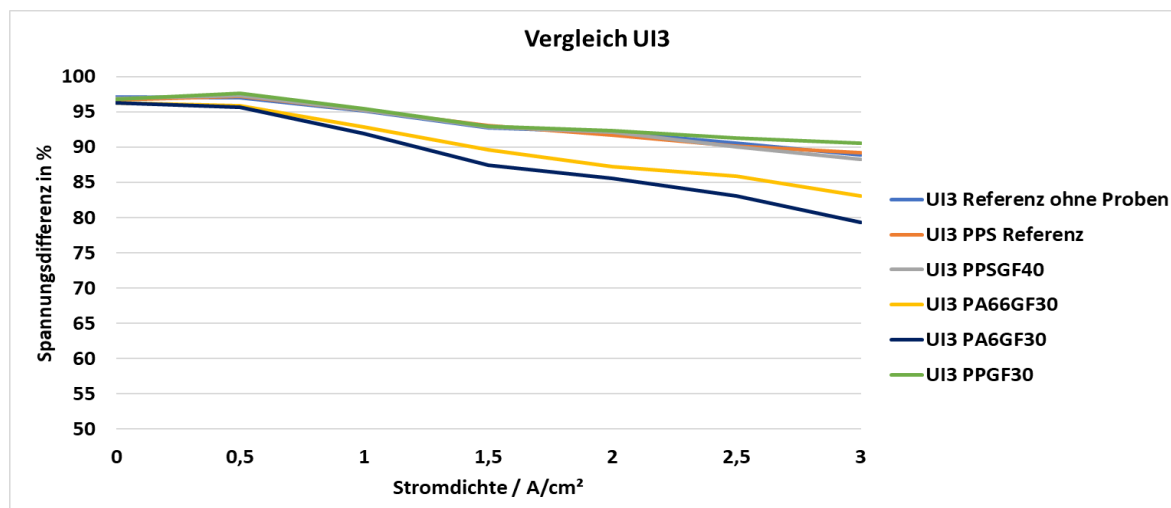


Abbildung 127: Vergleich der gemittelten und normierten Auswertung der 3. UI-Kennlinie aller Untersuchungen.

Dabei wurde festgestellt, dass die Untersuchungen mit den Materialien PPS-GF40, PP-GF30 und PPS auf einem ähnlichen Niveau liegen wie die Untersuchung ohne Probenkörper. Dementsprechend konnte diesen Materialien keine wesentlich schädigende Wirkung auf den Brennstoffzellenbetrieb nachgewiesen werden. Hingegen zeigen die Probenmaterialien PA6-GF30 und PA66-GF30 einen negativen Einfluss auf die Brennstoffzellenleistung. Dabei ist der Spannungsabfall, der durch die PA6-GF30 Proben hervorgerufen wurde, größer als der durch die PA66-GF30 Proben. Des Weiteren ist bei den Untersuchungen festgestellt worden, dass es reversible Effekte bei der Schädigung durch Kunststoffmaterialien gibt. Unter anderem wurde daher eine zweite Messkampagne durchgeführt.

Durch einen geänderten Versuchsaufbau konnte zusätzlich zu der Analyse der reversiblen Effekte eine Unterscheidung zwischen organisch und ionisch basierter Schädigung in der zweiten Messkampagne untersucht werden. Dazu wurde der Single-Cell Prüfstand bzw. die Betriebsweise der Prüfkammer angepasst. Durch die Integration eines weiteren Luftmassen-Durchflussreglers wurde der trockene Betrieb der Prüfkammer ermöglicht. In der vorherigen Messkampagne wurde die Prüfkammer mit vorkonditionierten Gasen mit definierter relativer Feuchte betrieben. Im neuen Konzept wurde die Prüfkammer zunächst mit trockenem Gas durchströmt und im Anschluss durch Hinzugabe eines feuchten Luftstroms für einen stabilen Brennstoffzellenbetrieb vermischt. Neben dem zweiten Prüfprotokoll wurde das Referenzmaterial PPS und das Probenmaterial PA6-GF30 verwendet. Das Ergebnis der zweiten Messkampagne war, dass die unterschiedliche Betriebsweise der Prüfkammer kaum Einfluss auf das Spannungsverhalten der Brennstoffzelle besaß

und die schädigenden Auswirkungen der Kunststoffmaterialien ebenfalls in ähnlicher Größenordnung festgestellt werden konnte. Gründe dafür liegen unter anderem in dem fehlenden flüssigen Pfad zwischen den Probekörpern und der Membran-Elektroden-Einheit. Demzufolge entfällt der größte Anteil der Schädigung durch Kunststoffmaterialien auf eine organisch basierte Degradation. Außerdem konnte mit Hilfe des Regenerationsschrittes im zweiten Prüfprotokoll festgestellt werden, dass ein großer Teil, der durch die Probekörper PA6-GF30 hervorgerufenen Schädigung reversibel ist.

Zusammenfassend wurde in diesem Arbeitspaket drei neue Prüfkammern und ein neuer Single-Cell Prüfstand entwickelt und aufgebaut. Anschließend wurden 5 Probenmaterialien hinsichtlich ihrer Qualifikation für einen Brennstoffzellenbetrieb untersucht. Dabei verhalf die neu entwickelte in-situ Testhardware dazu den zeitlichen Aufwand für die Materialqualifizierung deutlich zu reduzieren (KPI 8.5).

Arbeitspaket 8.5 – In-/Ex-situ Analytik

Ein neuer Short-Stack-Prüfstand wird von M13 an (MS 8.4) konstruiert und gebaut. In diesen Prüfstand kann die neu gestaltete Prüfkammer (in AP 8.4 entworfen) integriert werden. Durch die Verwendung dieses Prüfstands mit der neuen Prüfkammer wird eine In-situ-Prüfmethode entwickelt, mit der unter kurzer Dauer eine Materialauswahl, die auf realen Protokollen für dynamische beschleunigte Spannungszyklen im Automobil basiert, in-situ erfolgen kann. Das Ergebnis dieser Tests in Kombination mit der Post Mortem-Analyse liefert AP8.3 wertvolle Informationen zur Definition und Neubewertung der Kontaminationsgrenzwerte (organisch und ionisch) unter realen Fahrzeugbedingungen. Diese Prüfmethode für die Materialauswahl wird anschließend zur Validierung an BMW übertragen (MS 8.7).

Im Arbeitspaket 8.5 wurde ein neuer Prüfstand für Short-Stack Untersuchungen entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Zudem wurden Materialuntersuchungen mit Short-Stacks und der neuen Prüfkammer und eine Post-Mortem Analyse der Membran-Elektroden-Einheiten durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde ein R&I-Fließschema, welches sich nicht grundlegend vom Single-Cell Fließbild unterscheidet, erstellt. Das R&I-Fließschema bildet die Grundlage für die Auswahl funktionsrelevanter Komponenten wie beispielsweise Massendurchfluss- und Druckregler sowie einer elektronischen Last. Die CAD-Konstruktion des Prüfstandes wurde im Anschluss daran mit der Software Autodesk Inventor erstellt. Als Grundgerüst für den Short-Stack Prüfstand werden Aluminiumkonstruktionsprofilen eingesetzt. Die beschafften Komponenten wurden in den Aufbau integriert, miteinander verbunden und an die Steuerungs- und Schalteinheit angeschlossen. Durch die Bereitstellung eines Short-Stacks zur

Inbetriebnahme des Prüfstandes konnten die Funktion der Teststandskomponenten, die anvisierten Betriebspunkte und die Prüfprotokolle erprobt und getestet werden. In der Abbildung 80 werden sowohl die Konstruktion in der CAD-Umgebung und der betriebsbereite Prüfstand im Labor dargestellt.

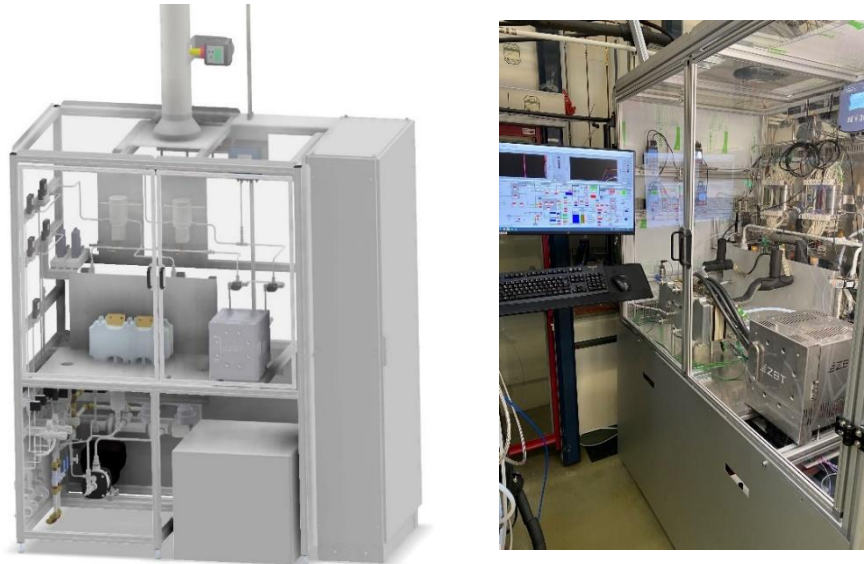


Abbildung 128: Short-Stack Prüfstand in CAD-Umgebung (links); betriebsbereiter Prüfstand im Labor (rechts).

AP 8.5 Ergebnis

In der ersten Hälfte der dritten Messkampagne mit Short-Stacks wurde ein Vergleich zu den Ergebnissen der Single-Cell Untersuchungen erstellt. Dazu wurde das erste Prüfprotokoll aus der ersten Messkampagne verwendet. Dabei wurden zwei Messungen mit dem Referenzmaterial PPS und dem Probenmaterial PA6-GF30 durchgeführt und die Ergebnisse, mit denen aus der ersten Messkampagne verglichen. Es stellte sich heraus, dass auch auf der Short-Stack Leistungsebene das Probenmaterial PA6-GF30 einen negativen Einfluss auf die Brennstoffzellenleistung besitzt.

Die Abbildung 81 stellt vergleichend die Auswertung der U-I Kennlinien zwischen dem Referenzversuch mit PPS und dem Probenversuch mit PA6-GF30 im Short-Stack Prüfstand dar. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Auswirkungen des Probenmaterials PA6-GF30 auf der Short-Stack Ebene weniger starke Auswirkungen auf die Brennstoffzellenleistung als auf die Single-Cell Ebene aufweisen. Die Gründe dafür liegen unter anderem in dem geänderten Oberflächenverhältnis zwischen aktiver Fläche der Brennstoffzelle und der Probenoberfläche.

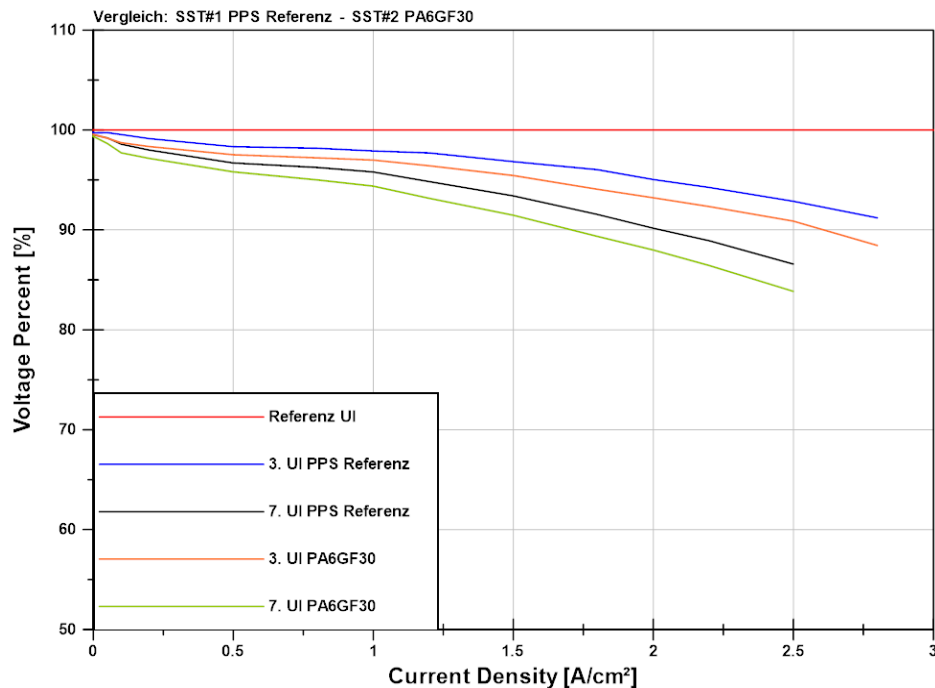


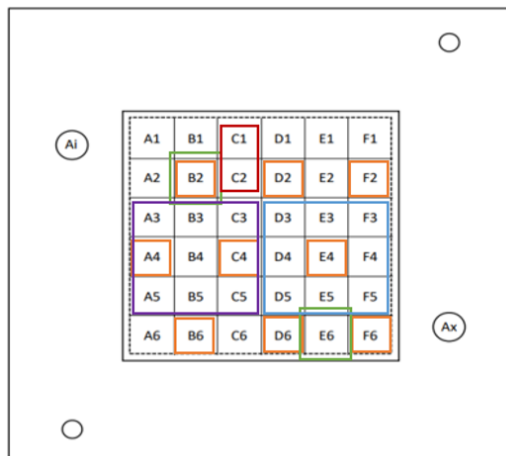
Abbildung 129: Vergleich der Short-Stack Auswertung zwischen PPS und PA6-GF30.

Die Probenanzahl und somit auch die Probenoberfläche blieb zwischen den Untersuchungen bei drei Probekörpern unverändert. Die aktive Fläche der Brennstoffzelle erhöhte sich jedoch um einen Faktor von etwa 26. Ein weiterer Grund ist die Verringerung der Konzentration der Schadkomponenten im Gasfluss aufgrund der gleichbleibenden Probenanzahl bei gleichzeitig deutlich gestiegenem Gasfluss. Im Anschluss wurden zwei weitere Langzeituntersuchungen mit dem Referenzmaterial PPS und dem Probenmaterial PA6-GF30 unter geänderten Versuchsbedingungen durchgeführt. Zum einen wurde das dritte Prüfprotokoll, das eine Laufzeit von etwa 500 Stunden hat, verwendet und zum anderen wurden die Short-Stacks statt mit einer sensitiven MEA (membrane electrode assembly), wie in allen bisherigen Untersuchungen, mit einer auf Lebensdauer fokussierten MEA ausgestattet.

Das Resultat aus den Versuchen war, dass die Änderung der MEA und das eingesetzte Prüfprotokoll mit Abkühlphasen dazu führten, dass eine negative Auswirkung des PA6-GF30 Probenmaterials kaum feststellbar war.

Zudem wurde seitens der BMW AG eine Pos-Mortem Charakterisierung der Membran-Elektroden-Einheit durchgeführt. Dazu wurden vier MEAs aus der ersten Messkampagne ausgewählt, die bereits gezielt mit den Ausgasungen aus den Probenmaterialien (PP, PPS, PA6-GF30 und PA66-GF30) beaufschlagt wurden. Um einen Aufschluss über die Gasphase übertragenen Kontaminanten und eine mögliche Schädigung der MEA zu erlangen, wurden sowohl chemische als auch physikalische Charakterisierungsmethoden eingesetzt.

In der Abbildung 82 ist der ex-situ Analyseplan anhand einer schematischen Darstellung der segmentierten MEA dargestellt. Zu den durchgeführten Messmethoden zählten Pinhole Prüfung, Mikroskopie, REM/EDX Aufnahmen, CCP-Schnitte, ICP-OES Analysen sowie Analysen mittels HPLC-Orbitrap.



- Pinhole Prüfung → Detektion / Lokalisierung von Löchern in PEM
- ICP-OES Analyse → Elementzusammensetzung
- Mikroskopie → Untersuchung auf Degradationen
- HPLC-MS → Kontaminationsanalytik
- CCP-Schnitt → Degradation der Katalysatorschichten/Membran
- REM/EDX → Hochauflösende Degradationsanalyse

Abbildung 130: Ex-situ Analyseplan einschließlich der Messmethoden.

In der Abbildung 83 wird beispielhaft die EDX-Flächenanalyse der Kathoden Katalysatoroberfläche an Position C1 dargestellt. Das Ziel war es, eine Übersicht über die elementare Zusammensetzung der Katalysatoroberfläche zu erhalten und mögliche Kontaminanten nachzuweisen. Dabei wurden die Elemente Kohlenstoff C, Fluor F, Platin Pt und Schwefel S festgestellt.

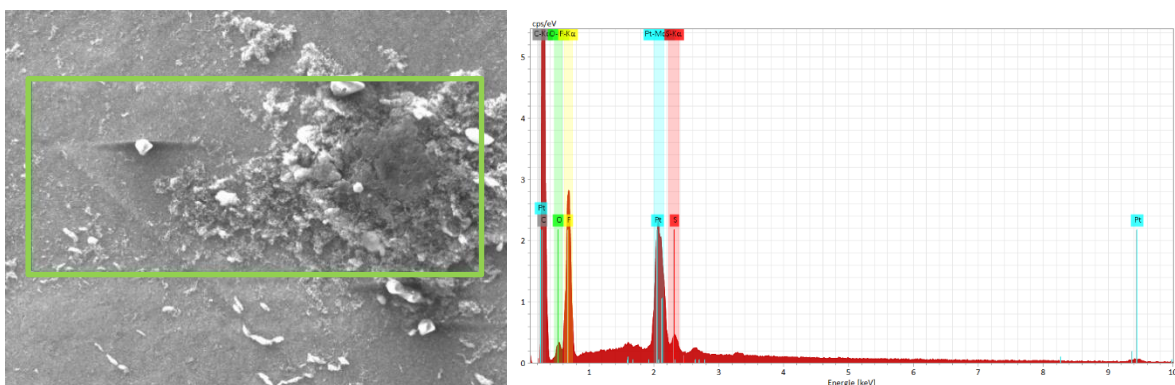


Abbildung 131: EDX-Flächenanalyse von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.

Durch die umfassende ex-situ Analyse konnten zahlreiche organische Verbindungen und Verunreinigungen auf den Zellen nachgewiesen werden, die auf die gezielte Kontamination mit den verschiedenen Probenmaterialien in der Prüfkammer zurückzuführen sind. Die detaillierten Untersuchungen lieferten wertvolle Erkenntnisse

über die Auswirkungen der Gasphasenemission auf die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Membran-Elektroden-Einheit.

Weiterhin wurde die Materialqualifizierungsmethode an den Prüfständen der BMW AG validiert. Dazu wurde ein Prüfstand bei der BMW AG mit einer identischen Prüfkammer ausgestattet und mit Hilfe der Prüfmethode und den identischen Probenmaterialien betrieben. Die in diesem Projekt festgestellten Trends der Werkstoffe konnten an den Prüfständen der BMW AG bestätigt werden. Den größten negativen Einfluss bildeten sich durch den Einsatz der PA6-GF30 Proben in der Prüfkammer. Einen geringeren Einfluss zeigten die PA66-GF30 Proben. Die Auswirkungen der weiteren Proben- und Referenzmaterialien lagen auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie bei den Untersuchungen am ZBT.

Zusammenfassend wurde in diesem Arbeitspaket ein neuer Prüfstand auf Short-Stack Ebene entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Für einen Abgleich der Single-Cell Messungen mit Short-Stacks wurden zwei Werkstoffe, PPS und PA6-GF30, mit Hilfe des ersten Prüfprotokolls am neuen Prüfstand untersucht. Dabei wurden weniger starke negative Auswirkungen der PA6-GF30 Proben auf den Short Stack als auf die Single-Cell festgestellt. Des Weiteren wurden zwei Langzeituntersuchungen mit geänderter MEA-Konfiguration durchgeführt. Ein signifikanter Einfluss der PA6-GF30 Proben konnte nicht festgestellt werden. Zudem wurden zahlreiche ex-situ Analysen mit Hilfe der eingesetzten MEAs aus der ersten Messkampagne umgesetzt. Ein weiterer Bestandteil dieses Arbeitspaketes war die in-situ Validierung der Testmethode an den Prüfständen der BMW AG.

Innerhalb der Ex-Situ-Analyse wurden vier Membran-Elektroden-Einheiten (membrane electrode assembly, MEA) untersucht, die gezielt mit den Ausgasungen aus verschiedenen Werkstoffen kontaminiert wurden. Die Werkstoffe umfassten Polypropylen (PP), Polyphenylensulfid (PPS), Polyamid-6 (PA) und PA-6,6. Die Untersuchungen erfolgten mithilfe chemischer und physikalischer Charakterisierungsmethoden, um Aufschluss über die durch die Gasphase übertragenen Kontaminanten (KPI 8.1, 8.2) und eine mögliche Schädigung der MEA zu erlangen.

Für die Ex-Situ-Analyse wurde ein auf die Kontamination abgestimmter Analyseplan entwickelt. Die chemisch-physikalischen Methoden beinhalteten:

- Optische und mikroskopische Charakterisierung der Anoden- und Kathoden-Katalysatorschicht (catalyst coated membrane, CCM), der mikroporösen Schicht (micro porous layer, MPL) und der Gasdiffusionsschicht (gas diffusion layer, GDL)
- Pinhole-Prüfung der MEA
- HPLC- (high performance liquid chromatography) und ICP- (inductively coupled plasma) Analyse der Anoden- und Kathoden-CCM, -MPL und -GDL

- Schnitte und rasterelektronenmikroskopische (scanning electron microscope, REM/SEM) sowie EDX- (energy dispersive X-ray spectroscopy) Aufnahmen der CCM

Durch die umfassende Ex-Situ-Analyse konnten zahlreiche organische Verbindungen und Verunreinigungen auf den Zellen nachgewiesen werden, die auf die gezielte Kontamination mit den verschiedenen Werkstoffausgasungen zurückzuführen sind. Die detaillierten Untersuchungen lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Auswirkungen der Gasphasenemissionen auf die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Membran-Elektroden-Einheiten.

Ex-situ Untersuchungen kontaminierten MEAs

Vor der Zell-Separation fand eine Detektion sowie Lokalisierung möglicher Membrandefekte innerhalb der MEA statt. In Abbildung 132 wird ersichtlich, dass innerhalb dieses Prüfverfahrens keine Pinholes detektiert wurden.

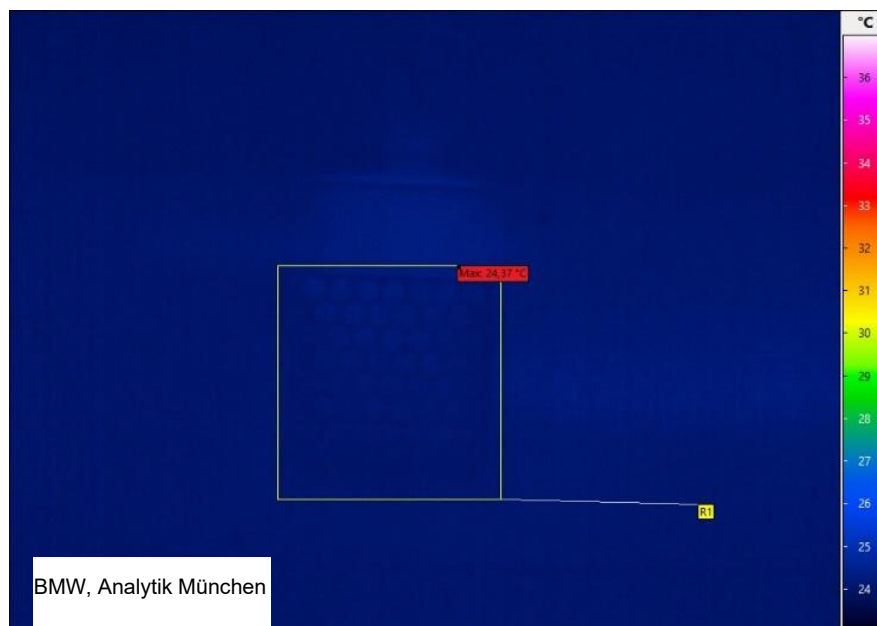


Abbildung 132: IR-Aufnahme der Pinholeprüfung mit Formiergas.

In Abbildung 85 sind die fotografischen Übersichtsaufnahmen der MEA von der Anoden- und Kathodenseite gezeigt.



Abbildung 133: Fotografische Übersichtsaufnahmen der MEA von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.

Die weiterführende Charakterisierung der MEA fand in Anlehnung an den definierten Ex-Situ Analyseplan statt. Die fotografischen Übersichtsaufnahmen der CCM nach Ablösung der Anoden- und Kathoden-GDL sind in Abbildung 134 enthalten, sowie die jeweiligen Aufnahmen der Anoden- und Kathoden-MPL (mikroporöse Schicht) in Abbildung 87. Die Auftrennung der MEA war anodenseitig aufgrund starker Haftung zwischen mikroporöser Schicht und Katalysatoroberfläche nur erschwert möglich. Kathodenseitig war die Haftung deutlich geringer.

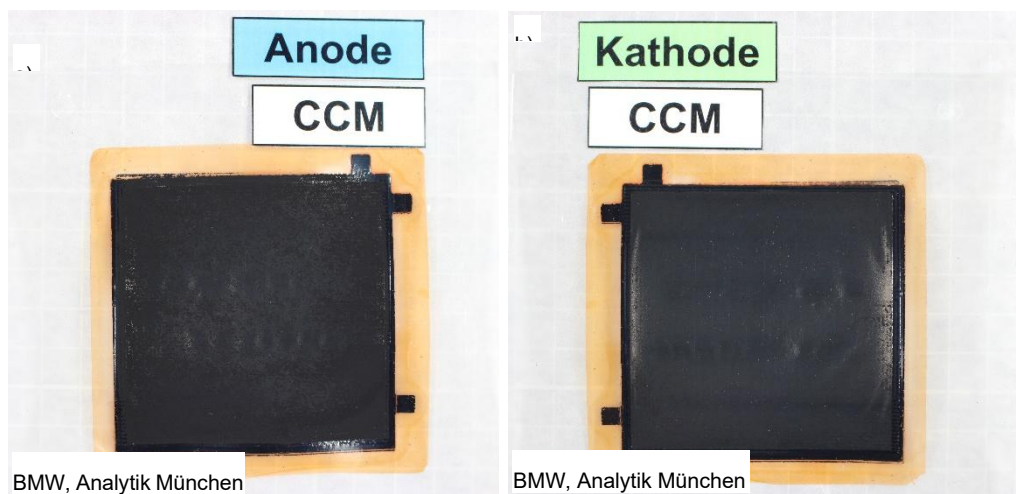


Abbildung 134: Fotografische Aufnahmen der CCM von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.

Die Auffälligkeiten der Anoden- und Kathoden GDL sowie CCM sind in Tabelle 24 zusammenfassend aufgeführt.

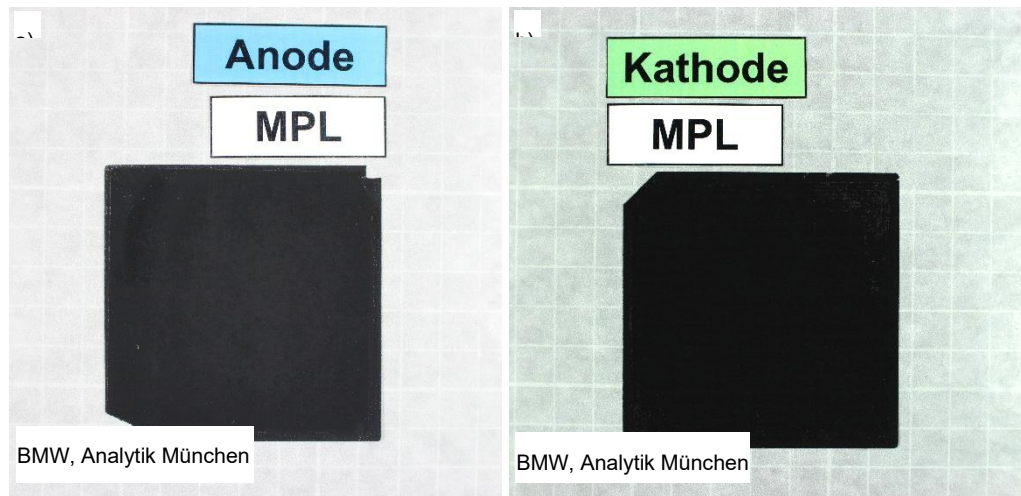


Abbildung 135: Fotografische Aufnahmen der MPL von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.

Zur weiterführenden optischen Charakterisierung der diversen MEA-Komponenten wurden mikroskopische Aufnahmen mittels des 3D-Digitalmikroskops VHX-6000 (Hersteller Keyence) vollzogen. Die Ergebnisse sind in

Tabelle 25 beschrieben.

Zur weitergehenden Analyse der Anoden- und Kathoden-Katalysatoroberfläche wurden diese mittels Rasterelektronenmikroskop charakterisiert. In Abbildung 88 sind Rasterelektronenmikroskopische-Bilder (REM) der Anoden-Katalysatoroberfläche und in Abbildung 137 der Kathoden-Katalysatoroberfläche bei zwei verschiedenen Vergrößerungen visualisiert.

Um eine Übersicht über die elementare Zusammensetzung der Katalysatoroberfläche zu erhalten und mögliche Kontaminationen nachzuweisen, wurde zusätzlich eine EDX-Flächenanalyse durchgeführt. Es wurden die Elemente Kohlenstoff C, Fluor F, Platin Pt und Schwefel S bestimmt. Die bildliche Darstellung der Anoden-Katalysatoroberfläche ist in Abbildung 138 und der Kathoden-Katalysatoroberfläche in Abbildung 139 gegeben.

Tabelle 24: Optische Auffälligkeiten der MEA-Komponenten nach der Auftrennung

Komponente	Auffälligkeiten / Bemerkungen
Anode	<i>GDL:</i> - mäßiges Abzeichnen der Flow-Field-Geometrie innerhalb der GDL-Faserstruktur, insbesondere an den seitlichen Zellbereichen <i>Katalysatoroberfläche:</i> - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche - flächige MPL-Anhaftungen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - feine Kratzer auf der gesamten Oberfläche verteilt <i>MPL:</i> - starke Haftung der MPL an der Katalysatoroberfläche (abgebrochene GDL/MPL) - großflächig ausgerissene MPL-Zonen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche
Kathode	<i>GDL:</i> - mäßiges Abzeichnen der Flow-Field-Geometrie innerhalb der GDL-Faserstruktur <i>Katalysatoroberfläche:</i> - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche - MPL-Anhaftungen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - feine Kratzer auf der gesamten Oberfläche verteilt <i>MPL:</i> - mäßige Haftung der MPL an der Katalysatoroberfläche - geringfügig ausgerissene MPL-Zonen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche

Tabelle 25: Mikroskopische Auffälligkeiten der Anoden-GDL, -MPL und -Katalysatoroberfläche

Komponente	Mikroskopische Auffälligkeiten / Bemerkungen
Anoden-GDL	- keine Auffälligkeiten
Anoden-MPL	- großflächig ausgerissene MPL-Zonen insbesondere in den Randbereichen (gemäß der Flow-Field-Geometrie) mit teils vereinzelt durchscheinenden GDL-Fasern - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche
Anoden-Katalysatoroberfläche	- hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche - flächige MPL-Anhaftungen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - feine Kratzer auf der gesamten Oberfläche verteilt - teils faserartige, hell wirkende Kontaminationen auf der gesamten Oberfläche

Tabelle 26: Mikroskopische Auffälligkeiten der Kathoden-GDL, -MPL und -Katalysatoroberfläche.

Komponente	Mikroskopische Auffälligkeiten / Bemerkungen
Kathoden-GDL	- keine Auffälligkeiten
Kathoden-MPL	- geringfügig ausgerissene MPL-Zonen insbesondere in den Randbereichen (gemäß der Flow-Field-Geometrie) mit durchscheinenden GDL-Fasern (B6) - hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der Oberfläche
Kathoden-Katalysatoroberfläche	- hell wirkende Partikel/Kontaminationen auf der gesamten Oberfläche - faserartige, hell wirkende Kontaminationen auf der gesamten Oberfläche - MPL-Anhaftungen insbesondere in den Randbereichen gemäß der Flow-Field-Geometrie - feine Kratzer auf der gesamten Oberfläche verteilt

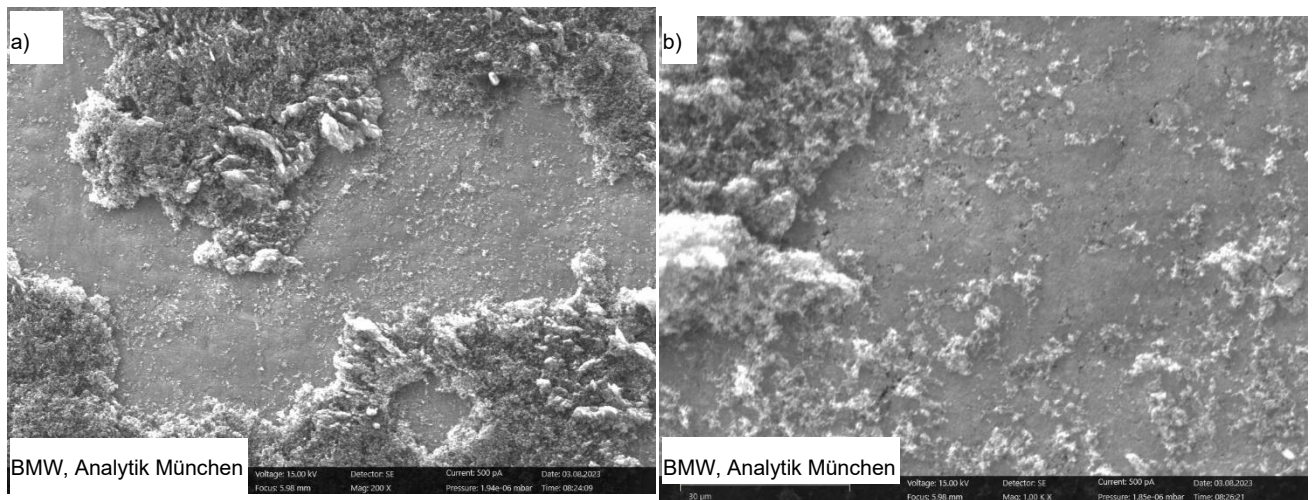


Abbildung 136: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der Anoden-Katalysatoroberfläche an Position C2 bei verschiedenen Vergrößerungen a) Vergrößerung x200 und b) Vergrößerung x1000.

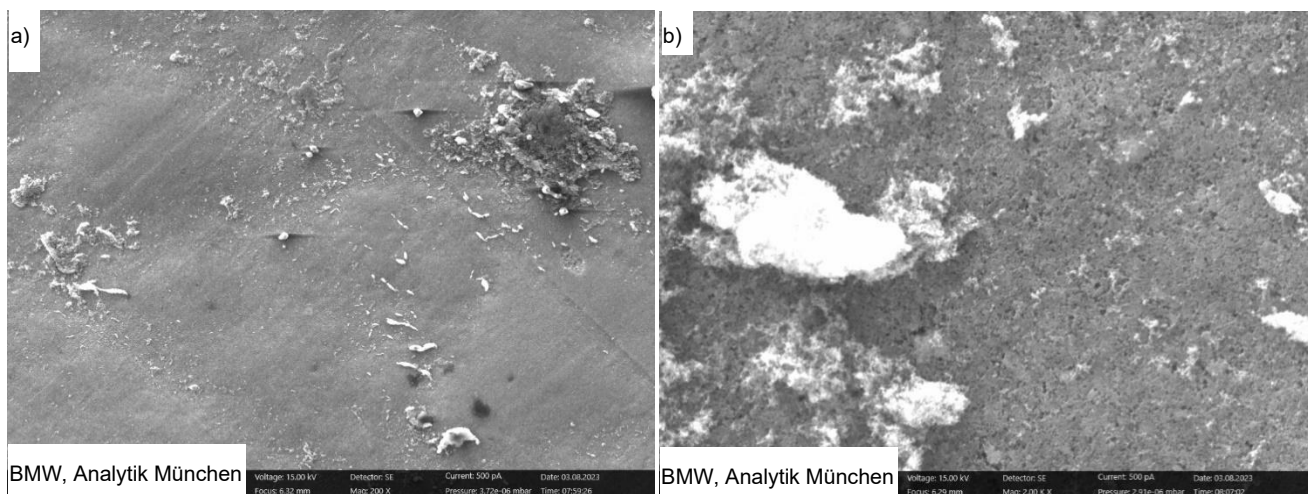


Abbildung 137: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C2 bei verschiedenen Vergrößerungen a) Vergrößerung x200 und b) Vergrößerung x1000.

BMW, Analytik München

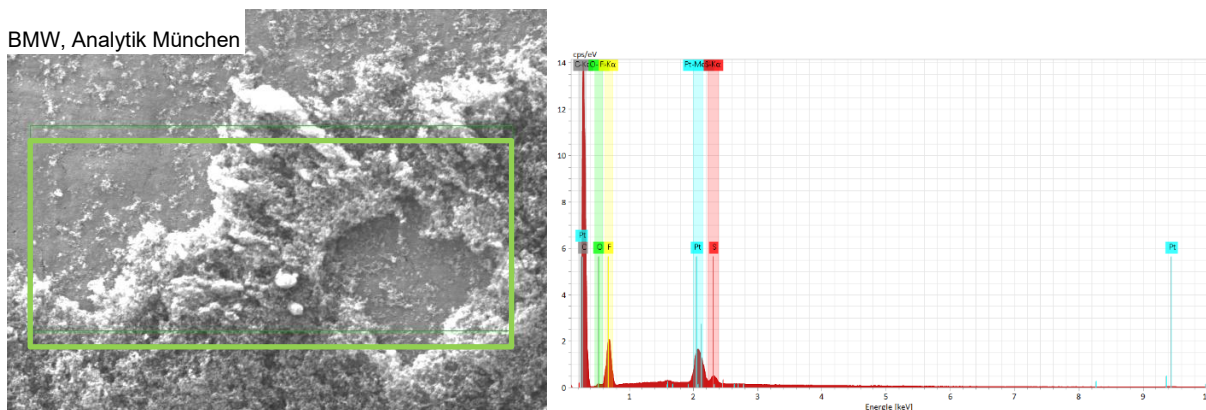


Abbildung 138: EDX-Flächenanalyse von der Anoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.

BMW, Analytik München

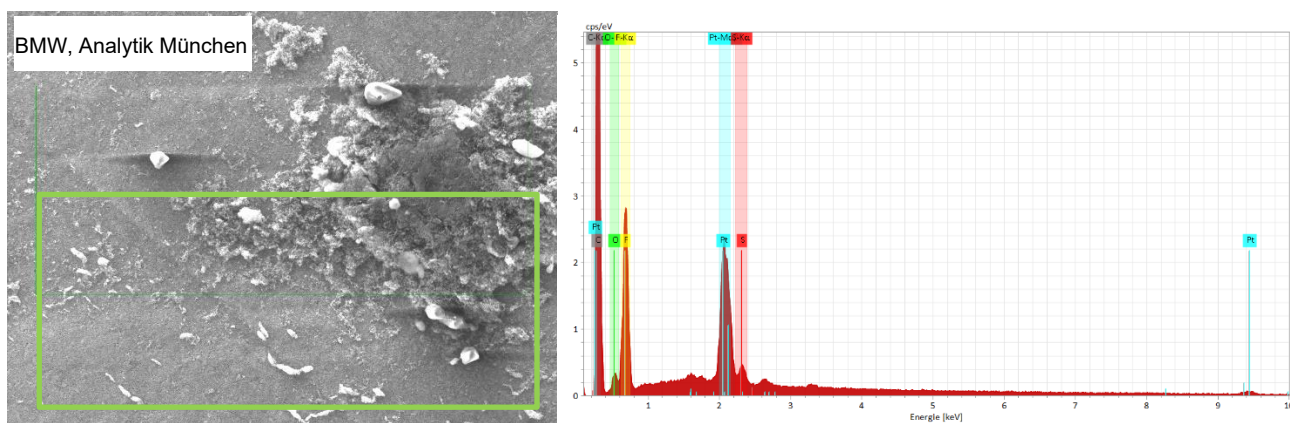


Abbildung 139: EDX-Flächenanalyse von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.

In-situ post mortem Ergebnisse

a) U-I Kennlinie bei 80 °C – Vergleichbarkeit mit ZBT:

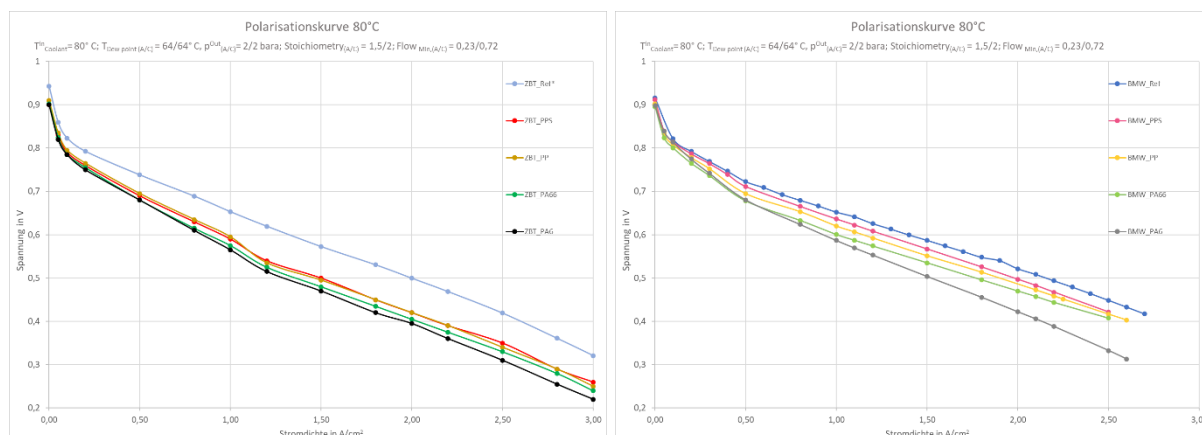


Abbildung 140: U-I Kennlinien (Polarisationskurven) ZBT (links) und BMW (rechts) bei jeweils gleichen Betriebsbedingungen.

Wie in Abbildung 140 im direkten Vergleich der ZBT und BMW U-I Kennlinien zu erkennen ist, hat sich der bei ZBT beobachtete Trend der Werkstoffe bei BMW bestätigt. Er betrug in leistungsabnehmender Reihenfolge: PPS – PP – PA66 – PA6. Allerdings zeigten die Zellen eine höhere Leerlaufspannung beim ZBT als bei BMW.

b) ECSA:

Die Bestimmung der kathodenseitigen ECSA ist von Bedeutung, wenn davon ausgegangen wird, dass die Werkstoffe sich an der aktiven Fläche lagern und somit sie verringern, was zu Leistungsverlusten führt. Die Werte sind der folgenden Tabelle 27 zu entnehmen:

Tabelle 27: Übersicht über die ECSA Ergebnisse der einzelnen MEAs

ECSA in m ² / gPt	60 °C	80 °C
Referenz 1	49,06	44,29
Referenz 2	47,49	39,37
PPS	40,92	35,22
PP	36,00	32,14
PA66	33,69	29,12
PA6	33,96	29,42

Dabei bestätigte sich annähernd die leistungsabnehmende Reihenfolge, die bei den U-I Kennlinie beobachtet wurde. Somit kann hier ein Wirkmechanismus, der zu einer Verringerung oder Belegung der Katalysatoroberfläche führt, als sehr wahrscheinlich angenommen werden.

c) Übertrag der Kontaminationskammer zu BMW und Validierung der Methode:

Im Rahmen der VHB in Punkt 8.5.4 wurde die am ZBT entwickelte Kontaminationskammer zu den BMW Shorts-Stack Prüfständen übertragen und in Betrieb genommen. In *Abbildung 141* ist die vom ZBT zur Verfügung gestellte Kontaminationskammer, eingebaut in einen BMW-Prüfstand, dargestellt. Dabei wurde auf eine konsequente thermische Isolation der gasführenden Bauteile geachtet, um eine Auskondensation von Wasserdampf bzw. eine mögliche Auskondensation von potentiellen Kontaminanten aus dem Werkstoff zu verhindern.

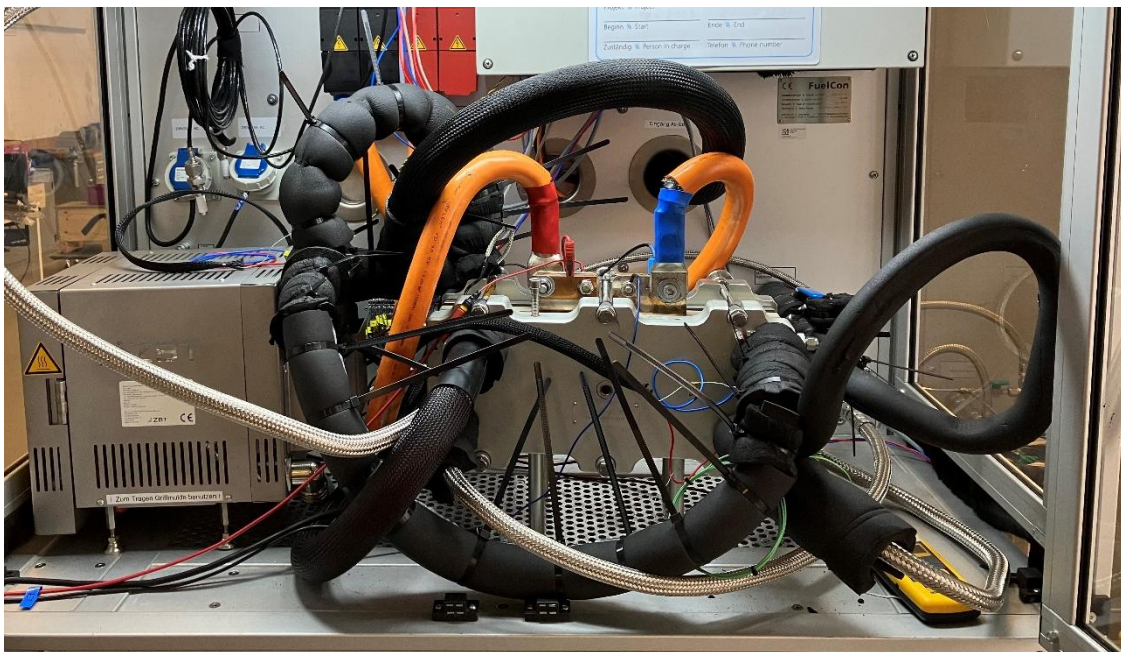


Abbildung 141: Shortstack aus dem FAEBS Projekt (rechts) mit Kontaminationskammer (Links) in BMW-Prüfstand eingebaut.

In *Abbildung 142* ist die offene Kontaminationskammer mit eingebauten Typ5 A Vielzweckprüfkörpern dargestellt. Dabei wurde auf eine saubere Arbeitsweise beim Einbau bzw. Umbau der Kontaminationskammer geachtet und die Anleitung des ZBT befolgt.

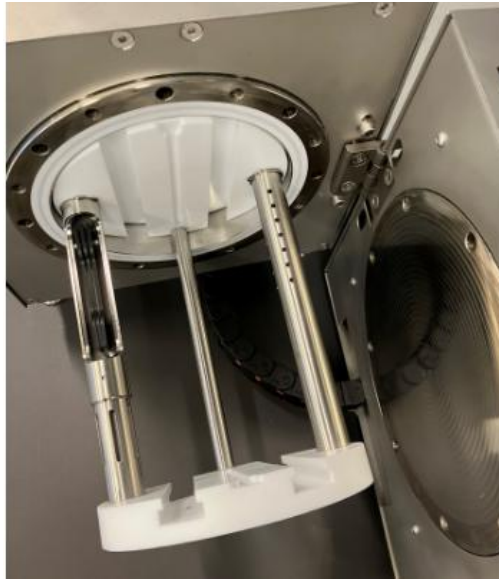


Abbildung 142: Innengestell der Kontaminationskammer mit Adapter für Typ 5A Vielzweckprüfkörper mit eingebauten Vielzweckprüfkörpern.

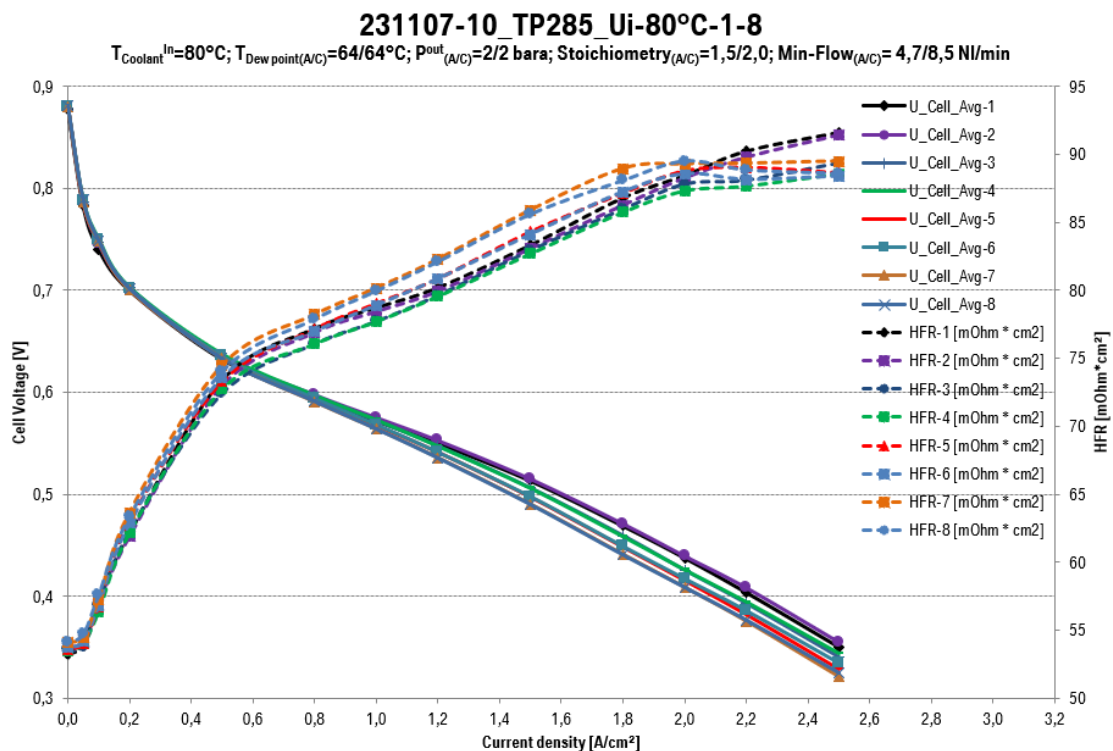


Abbildung 143: U-I Kennlinien / Polarisationskurven unter FaeBS Bedingungen, aufgenommen bei BMW mit eingebauter Kontaminationskammer.

In Abbildung 143 sind die Polarisationskurven eines FaeBS Short-Stacks, aufgenommen bei BMW mit Kontaminationskammer dargestellt. Die Polarisationskurven sind in guter Übereinstimmung mit den beim ZBT gemessenen Werten und somit konnte die Kontaminationskammer für weiterführende Messungen bei BMW freigegeben werden.

Zusammenfassend sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die KPIs des Arbeitspaketes Werkstoffqualifikation dargestellt, sowie relevante Abkürzungen in *Tabelle 28*.

Tabelle 28: Abkürzungsverzeichnis AP 8

A	Anode
BPP	Bipolarplatte (engl. bipolar plate)
BoL	Begin of Life
BoT	Begin of Test
BZ	Brennstoffzelle
CCM	Katalysator-beschichtete Membran (engl. catalyst coated membrane)
CCP	Cryo Cross-section Polisher
DCR	Gleichstromwiderstand (engl. direct current resistance)
DLC	Dynamic load cycle
EDX	Energie Dispersive Röntgenspektroskopie (engl. energy dispersive X-ray spectroscopy)
EoL	End of Life
EoT	End of Test
FSS	Full size stack
GAIA	Next Generation Automotive Membrane Electrode Assemblies
GDL	Gasdiffusionsschicht (engl. gas diffusion layer)
IR	Infrarot
K	Kathode
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (engl. membrane electrode assembly)
MPL	Mikro poröse Schicht (engl. micro porosity layer)
MSS	Mid size stack
OCV	Leerlaufspannung (engl. open circuit voltage)
PBI	Polybenzimidazole
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen
REM	Rasterelektronenmikroskop
SSS	Small size stack
TR	Test request
TWA	Technologie Werkstoff- und Verfahrensanalytik

XI FAZIT UND AUSBLICK

1. Technologiebewertung

Im **Arbeitspaket 1** verantwortete BMW die Neuentwicklung des Brennstoffzellen-Gesamtsystems, die Realisierung von zwei Prototypen-Systemen mit TRL 5-6 welche u.a. auf Komponenten der Konsortialpartner basierten sowie der intensive Test dieser beider Systeme.

Ferner Betrieb BMW umfangreiche virtuelle Simulationen zur geometrischen Integration des Systemmodells in den Vorderwagen eines potenziellen zukünftigen FCEV. Die dazu notwendige Verkleinerung des Systems ggü dem Antriebssystem des BMX iX5hydrogen konnte erfolgreich demonstriert werden. Mit ihr ging auch eine deutliche Reduzierung des Systemgewichts einher.

Neben der geometrischen Integration des Brennstoffzellensystems in zukünftige Fahrzeug-Architekturen war es auch das Ziel des Projektes die Integrierbarkeit in die Hochvolt-Infrastruktur solcher Fahrzeuge nachzuweisen. Zur Mitte der 20er Jahre kann von einer Verdoppelung der Hochvolt-Busspannung bei elektrischen Antriebssystemen von 400V auf 800V DC ausgegangen werden. Auch diese Umstellung, von der insbesondere der AC/DC Inverter des Luftkompressors (AP 4) und der DC/DC Wandler des Brennstoffzellen-Stacks (AP 7) betroffen waren, konnte mit den beiden Prototypen erfolgreich demonstriert werden.

Ferner war ein Hauptziel im Arbeitspaket 1, den Einsatz der Systeme auch unter extremen Temperaturen zu testen. Dazu wurden in Klimakammern Kaltstarts bei Temperaturen von bis zu -25°C durchgeführt und die Betriebsbereitschaft robust und zügig demonstriert. Für das erfolgreiche Gelingen waren u.a. Weiterentwicklungen beim Luft-Befeuchter (AP 3), dem Luft-Kompressor (AP 4) sowie der Sensorik (AP 6) wegbereitend.

Auch am anderen Ende des Einsatzbereiches wurde der stabile Betrieb der Brennstoffzellensysteme mit Kühlmittel-Temperaturen von bis zu 105°C demonstriert.

Im **Arbeitspaket 2** verantwortete BMW die Entwicklung des Brennstoffzellen-Stacks. Die Brennstoffzellen selbst waren jedoch nicht Teil des Entwicklungsumfangs. Fokus bei der Stackentwicklung lag zum einen auf dem mechanisch robusten Gehäuse, das zugleich den Zellstapel gasdicht verspannen musste. Das Gehäuse bildete eine konstruktive Einheit mit dem des DC/DC Wandlers (AP 7), diente als Tragstruktur für die anderen Komponenten des Systems sowie zur Befestigung an der Fahrzeugkarosserie und wurde von BMW vollumfänglich mechanisch berechnet und ausgelegt.

Ein weiterer Fokus der Stackentwicklung lag im Design und der Abstimmung der Medien- Schnittstellen zum Luftbefeuchter (AP 3), zum Wasserstoff-Subsystem (AP 5) sowie die elektrische Anbindung des DCDC-Wandlers, die in der Lage sein musste Ströme bis 1000A zu tragen.

Der im **Arbeitspaket 3** von MANN+HUMMEL entwickelte gehäuselose Membran-befeuchter wurde umfangreichen konzeptionellen Bestätigungstests unterworfen. Hierzu gehörten Degradations- und Hochtemperatur-Dauerläufe sowie Kaltstarttests. Durch Optimierung der Gitterstruktur der Membranträger, welche gemeinsam mit der TU München entwickelt wurden, konnten die spezifizierten hohen Wasserübertragungsraten erreicht werden. Als unerwartete Herausforderung beim Design stellte sich vor allem die mechanische Abstützung der Luftführungen und Dichtungskonturen der einzelnen Befeuchter-Lagen dar.

Die Robert Bosch GmbH entwickelte im **Arbeitspaket 4** erfolgreich einen sehr leistungsstarken, effizienten und kompakten Luft-Kompressor mit Turbine, integrierter Antriebsmaschine und Leistungsinverter. Vier dieser Prototypen in zwei Varianten wurden ans Projekt ausgeliefert und erfolgreich in Brennstoffzellensysteme oder Teilsystem-Prüfstände integriert. Neben einer detaillierten Vermessung des Kompressor-Kennfelds zum Nachweis der geforderten Luft-Massenströme und -Drücke konnten 250.000 Start/Stopp Zyklen absolviert werden. Ebenso waren Froststarts des FCS möglich, bei denen zuvor für die Kompressor-Turbine besonders widrige Situationen bewusst herbeigeführt wurden.

Des Weiteren trug Bosch mit der Realisierung eines effizienten zweistufigen Wasserstoff Druckregel- und Rezirkulationssystem im **Arbeitspaket 5.1** wesentlich zu Projekterfolg bei. Insbesondere die passive Rezirkulation unverbrauchter Gase aus dem Brennstoffzellen-Stack mittels Injektordüse lag fast im gesamten Betriebsbereich über den Erwartungen und konnte im FCS einen stabilen Betrieb des Brennstoffzelle-Stacks auch bei kleinen Leistungen und H₂-Massenströmen beweisen.

Das Wasserabscheidemodul der Firma Woco wurde im **Arbeitspaket 5.2** als Prototyp in vollem Umfang am Systemprüfstand und somit in der Einsatzumgebung getestet. Die entwickelten Ventile sind den Spezifikationen entsprechend voll funktionsfähig. Der Abscheidegrad übererfüllt die ursprünglich angesetzten Ziele. Damit wurde die Funktionsfähigkeit nachgewiesen und der TRL 6 konnte für alle Teilaspekte erfolgreich erreicht werden.

Auch die im **Arbeitspaket 6.1** realisierten Wasserstoff-Drucksensoren der Bosch GmbH stellten eine wesentliche Weiterentwicklung ggü dem Stand der Technik dar, da sie in feuchten Wasserstoff zuverlässig funktionierten und sich auch robust ggü Vereisung zeigten. Es kann bestätigt werden, dass der Niederdrucksensor mit Ölvorlage innerhalb des Systems die ihm zugedachte Funktionalität erfüllt. Im Rahmen der Systemtests konnten keinerlei Ausfälle festgestellt werden. Eine Analyse mittels

Referenzsensor ergab, dass „Druckmessabrisse“ durch Vereisungen/Kondensation nicht festgestellt werden konnten.

Für die im **Arbeitspaket 6.2** bewerteten Wasserstoff-Konzentrationssensoren kann festgestellt werden, dass nicht alle BMW-Anforderungen an den Sensor erreichbar bzw. nur eingeschränkt erreichbar waren. Die singuläre Betrachtung einzelner Werte erfüllte die Forderungen nicht, jedoch wird die Gesamtheit der Eigenschaften so bewertet, dass die definierte Messaufgabe des Sensors im Abluftstrang des Brennstoffzellensystems zur Überwachung der Wasserstoffkonzentration über Zeit unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen wird als erfüllbar bewertet.

Fa Zollner realisierte und optimierte im **Arbeitspaket 7** einen sehr kompakten, effizienten Hochleistungs-DCDC-Wandler. Die anvisierte Stromdichte und volumetrische Leistungsdichte konnten mit geringer Verfehlung an FCS oder Komponenten-Prüfständen nachgewiesen werden.

Im **Arbeitspaket 8** verantwortete BMW die Entwicklung einer Methode zur Qualifizierung von Werkstoffen für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen. Dies war notwendig, da die heute für Komponenten des Brennstoffzellensystems verwendeten Polymer-Werkstoffe zum Großteil noch nicht für die benötigte Dauerhaltbarkeit und die zuvor bereits erwähnten besonders hohen Betriebstemperaturen $>100^{\circ}\text{C}$ qualifiziert sind. Weder sind heute kostengünstige Werkstoffe mit der „Freigabe zum Einsatz in Brennstoffzellenantrieben“ verfügbar, noch gibt es Standards zur Erprobung und Freigabe derselben.

Nach Vorgaben von BMW entwickelten die Forschungspartner KIMW und ZBT neue Methoden und Versuchsvorrichtungen und validierte diese mit von BMW vorgeschlagenen Polymeren sowie einer größeren Anzahl von Brennstoffzellen aus BMW -eigener Fertigung. Die Methode als auch die Versuchsvorrichtungen konnten zum Projektende zu BMW verlegt und in den BMW Laboren erfolgreich in Betrieb genommen werden. Sie dienen in Zukunft der Werkstoffqualifizierung bei der Weiterentwicklung von Brennstoffzellensystemen.

2. Zusammenfassung

Gesamtziel des Projektes FaeBS, Prototypen eines leistungsfähigen, kompakten und bauraumoptimierten Brennstoffzellensystems für PKW-Antriebe aus technologisch neuartigen Komponenten zu entwickeln, zu integrieren und zu erproben, wurde vollumfänglich erreicht. Der Anspruch des Projekts und der Partner war es, ein robustes Antriebskonzept aus neu- oder weiterentwickelten, serienfähigen Komponenten darzustellen. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Brennstoffzellensysteme konnten im Temperaturbereiche von -25°C bis $+105^{\circ}\text{C}$ betrieben werden. Trotz einzelner

kleinerer Zielverfehlungen, die Hinweise auf zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf geben, konnte das Förderprojekt umfassend erfolgreich mit nur geringer Verzögerung abgeschlossen werden.

3. Weiterer Forschungsbedarf

Aus den Ergebnissen des Projektes FaeBS lassen sich eine ganze Reihe von wertvollen Impulsen für die zukünftige Weiterentwicklung von Brennstoffzellensystemen, ihrer Komponenten und deren Zusammenspiel sowie für die Betriebssoftware und -funktionen als auch den Betrieb und die Auslegung von Versuchseinrichtungen ableiten. In diesem Ausblick zu weiterem Forschungsbedarf soll nur auf die wesentlichen offenen Themen eingegangen werden, die sich aus dem Projekt ergeben hatten.

Hier sei z.B. der robuste Kaltstart der Systeme genannt, der im Projekt bei Temperaturen bis zu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelungen ist. Für die internationale Vermarktung von FCEV z.B. in Nordamerika, Nordeuropa aber auch China ist dieser Einsatzbereich aber bis $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ abzusichern. Dies stellt eine weitere Herausforderung an die Regelfunktionen des Systems, vor allem aber auch an die Frostbeständigkeit in feuchten Medien der einzelnen Komponenten der Luft- und Wasserstoff-Versorgung dar, wie z.B. die H_2 -Dosierventile, die Wasserabscheider-Ventile, den Luftkompressor mit Turbine und im Besonderen auch die verbaute Sensorik.

Für den effizienten Betrieb des Brennstoffzellen-Stacks sowie für dessen Aufstartgeschwindigkeit bedarf es weiterer Entwicklung an einer intelligenten Kühlmittel-Temperatur- und Massenstromregelung. Neue in-situ Analysemethoden wie schnelle Impedanzmessverfahren, die im DC/DC-Leistungswandler integriert werden können, als auch orts aufgelöste Impedanzmessungen an Einzelnen Zellen oder Stacks können dabei zukünftig unterstützen.

Generell lässt sich sagen, dass im Rahmen des Projektes nicht genug Zeit zur Verfügung stand, um alle Bauteile im Systemverbund für eine vollumfängliche PKW-Lebensdauer von üblicherweise 8000 Betriebsstunden abzusichern. Im Rahmen des Projektes wurde eine Methodik zur Verkürzung der Testdauer mitentwickelt, die Validierung derselben kann jedoch erst in der nächsten Entwicklungsphase mit gereiften Systemen erfolgen.

Das FaeBS Arbeitspaket 8 hat Methoden und Einrichtungen zur Qualifizierung von Polymerwerkstoffen für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen bereitgestellt. Im Anschluss an das Projekt gilt es nun, diese Methoden gezielt für die Validierung und Freigabe verschiedenster Werkstoffe einzusetzen.

ANHANG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beteiligte wissenschaftliche Institutionen und deutsche Unternehmen..	6
Abbildung 2: Daten-, Informations- und Hardwareflüsse aller Arbeitspakete untereinander.	7
Abbildung 3: Zeit- und Meilensteinplan Gesamtprojekt.	13
Abbildung 4: Systemkonzept und Komponentenvarianten im Luftsystem (grün).....	18
Abbildung 5: Systemkonzept und Komponentenvarianten im Wasserstoffsystem (orange) mit unterschiedlichen Komponenten-Konzepten des Rezirkulationssystems mit a) Hochvolt H2-Umwälzpumpe, b) passiver Rezirkulation und 12 V Gebläse, sowie c) rein passiver Rezirkulation.....	20
Abbildung 6: Systemschaltbild des gewählten Zielkonzepts mit rein passiver Rezirkulation.....	21
Abbildung 7: Kennfelder aus Systemsimulation unter Berücksichtigung aller FCS-Komponenten.	22
Abbildung 8: Antriebsstrang des aktuellen BMW iX5 Hydrogen mit Hinterradantrieb. Der rot markierte Bereich wird nun für einen E-Motor benötigt.	23
Abbildung 9: Virtueller Nachweis Konformität Fahrzeug-Package im Konsortium über den Umfang des FaeBS Projektes hinaus. Konstruktionsstand 05.09.2022.....	24
Abbildung 10: Checkliste und Status zum DCDC im Rahmen des Meilensteins "Designfreeze".....	27
Abbildung 11: CAD-Konstruktion des Prototypen Brennstoffzellensystems zum Meilenstein "Designfreeze" am 06.05.2022.....	28
Abbildung 12: Prototypen-Brennstoffzellensystem auf Prüfstandswagen.....	30
Abbildung 13: Entwicklungs- und Testplan Stand 12/2022.....	34
Abbildung 14: Konzeptbewertung Position Luftventile mit richtungsweisendem Ergebnis.	35
Abbildung 15: Ablauf einer Dauerlauf-Sequenz.....	37
Abbildung 16: Ablauf Performance Check (Dauer ca. 50 min.).	37
Abbildung 17: Stack Degradation im Brennstoffzellensystem.....	39
Abbildung 18: Abschätzung Einzelverluste und Systemeffizienz FCS.....	40

Abbildung 19: Froststart von -25 °C.....	41
Abbildung 20: Froststart von -20 °C.....	42
Abbildung 21: Definition Temperaturen im Fahrzeug.	43
Abbildung 22: Betriebspunkt "Bergfahrt" mit Betriebstemperatur von 105 °C bei ca. 80kW	44
Abbildung 23: Screen-shot aus dem 3D-Modell des Brennstoffzellen-Stacks als Explosionsdarstellung. Dargestellt ist auch der DC/DC-Wandler zur Einordnung der Systemkonfiguration.	49
Abbildung 24: FEM-Berechnung der Mediendruckplatte. Eine maximale Verformung von 0.5 mm ist zulässig.	50
Abbildung 25: Simulationsergebnis der Zell- zu Zellvariation entlang des Brennstoffzellen-Stacks. Links ist das „vernetzte“ Simulationsmodell visualisiert. Rechts die Verteilung der Medien entlang der Zellen im Zellpaket als Abweichung vom Mittelwert.	50
Abbildung 26: Berechnung der Federkennlinie für die Verspann-Einheit, aufgetragen als Kraft-Weg-Diagramm.	51
Abbildung 27: Explosionsdarstellung der Verspann-Einheit mit einzelnen Bauteilen.	51
Abbildung 28: 3D-Modell der beiden Busbars (plus) und (minus) mit Messleitungen für den Prüfstand. 1. Starre Busbar, 2. Flexible Busbar für den Ausgleich der Längentoleranzen im Betrieb.....	52
Abbildung 29: Simulationsergebnis der möglichen Wärmeentwicklung bei 1000 A und 105 °C Umgebungstemperatur über Busbar und DC/DC-Wandler.....	53
<i>Abbildung 30: Darstellung eines 3D-Sandkerns zur Herstellung des Brennstoffzellen-Gehäuses.</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 31: Foto-Dokumentation der Verspann-Einheit mit drei Zylindern, die jeweils vier Federelemente enthalten. Die Aluminium-Adapterplatte (Silberfarben) dient zur Kompression während der Montage.</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 32: Zellstapel (unten mit Führungsschienen) mit hängendem Gehäuse bereit zum verpressen.</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 33: Brennstoffzellen-Stack im Prüfstands-Gestell mit Schnittstellen zur Medien-Anbindung.</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 35: Messsignale des Stacks am Systemprüfstand, 1 Strom, 2 Spannung, 3 Luftmassenstrom, 4 Befeuchterdurchströmung, 5 Temperatur, 6 Anodenseitiger Arbeitsdruck.....</i>	<i>58</i>

<i>Abbildung 36: Geforderte Lastpunkte (LP) von LP1 – LP12. Das erreichte Betriebsfenster ist blau eingekreist.</i>	59
<i>Abbildung 37: Versuchsaufbau für Vibrations-Tests nach BMW Group Standard GS 95024-3-1. Stack mit Haltevorrichtung und Beschleunigungssensoren.</i>	60
<i>Abbildung 38: Testprofil nach BMW Group Standard GS 95024-3-1.</i>	60
<i>Abbildung 39: Links, gebrochene Schraube im Federpaket der Verspann-Einheit nach Vibrationstest (rot umkreist). Rechts, blauer Isolationslack mit nur leichten Kratzspuren nach dem Vibrationstest.</i>	61
<i>Abbildung 39: Befeuchter mit vorgeschaltetem Wasserabscheider.</i>	64
<i>Abbildung 40: Aufbau eines Befeuchter-Stacks.</i>	64
<i>Abbildung 41: Durchströmung durch einen Befeuchter-Stack.</i>	65
<i>Abbildung 42: mechanische Belastung der Federlaschen (links); kompletter Edelstahlrahmen (rechts).</i>	65
<i>Abbildung 43: Membran mit angespritzter Silikondichtung.</i>	66
<i>Abbildung 9: Simulation des Verpressvorgangs zur Optimierung der Dichtgeometrie.</i>	66
<i>Abbildung 10: Aufbau des Befeuchter-Stacks mit Edelstahlrahmen, Silikon umspritzte Membran und Abstützgitter.</i>	67
<i>Abbildung 11: Unterschiedliche Gitterformen zur Untersuchung der geeignetsten Geometrie.</i>	68
<i>Abbildung 12: Ein gedrucktes Kreuzgitter in einer Messvorrichtung.</i>	68
<i>Abbildung 13: Gitterkompromiss bzgl. Wasserübertrag und Druckverlust.</i>	69
<i>Abbildung 14: CT-Scan des Aufbaus mit korrekt positionierten Dichtlinien.</i>	69
<i>Abbildung 15: Befeuchter am Komponentenprüfstand für Performanceuntersuchungen.</i>	70
<i>Abbildung 16: Ergebnisse der Basis- und Abschlussmessungen für Honigwabe, C-Struktur und Gitter.</i>	71
<i>Abbildung 17: Ergebnisse der Degradationszyklen für Honigwabe, C-Struktur und Gitter.</i>	72
<i>Abbildung 18: Ergebnisse der Hochtemperaturtests. Für das „Gitter Re“ (rework) wurde die Geometrie im Vergleich zu „Gitter“ überarbeitet bzw. optimiert.</i>	73
<i>Abbildung 19: Verläufe der Wasserflussdichte bei verschiedenen Zyklen der Kaltstarts.</i>	75
<i>Abbildung 20: Verläufe des Druckverlusts bei verschiedenen Zyklen der Kaltstarts.</i>	76

Abbildung 21: Turbinen-Volute mit Modifikation.	78
Abbildung 22: Aero Design CFD mit Lastpunkten.	79
Abbildung 23: EAC bei Inbetriebnahme auf Bosch Prüfstand.....	81
Abbildung 24: EAC-Kennfeld inklusive BMW-Lastpunkte.....	82
Abbildung 25: Netzwerk Interface.....	83
Abbildung 26: Messergebnis EAC-Stromwert (berechnet vs. Prüfstand).	84
Abbildung 27: Absicherung Start-/Stopp Zyklen am Kompressor Komponenten Prüfstand im Testblock mit dem Sollwert 20000 rpm.....	85
Abbildung 28: Konzeptidee PCV-Rezi Modul mit 2 HGI's.....	86
Abbildung 29: Rezirkulationsperformance bei min. Mitteldruck.	87
Abbildung 30: Strömungssimulation aus Jetpump und Bypass durch Filter in Stackeingang am LF02.....	88
Abbildung 31: Finales Design PCV-Rezi Modul für FaeBS.	88
Abbildung 32: PCV-Rezi Modul bei Inbetriebnahme auf Bosch Prüfstand.	89
Abbildung 33: PCV-Rezi Modul Messwerte am Prüfstand ggü. Simulation von BMW- Lastbereich.....	90
Abbildung 34: PCV-Rezi Modul Rezirkulationsperformance: CFD-Simulation ggü BMW-Anforderungen.....	91
Abbildung 35: Vergleich Prüfstands-Messung vs. Prüfstands-Simulation – Sensitivität auf Variation mRez in Niedriglast 7 % (Lastpunkt 2).	92
Abbildung 36: Vergleich Prüfstands-Messung vs. Prüfstands-Simulation – Sensitivität auf Variation mRez in Niedriglast 7 % (Lastpunkt 2).	92
<i>Abbildung 37: Finales CAD Modell Wasserabscheider.</i>	<i>96</i>
<i>Abbildung 38: Ausschnitt des CAD-Modells des passiven Ventils.....</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 39: CAD-Modell des Magnetventils. Prototyp (l); Serie (r)</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 40: CAD Modell virtuelle Fahrzeugintegration.</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung 41: Schieberkonzept Wasserabscheidergehäuse.....</i>	<i>100</i>
<i>Abbildung 42: Prototyp des Wasserabscheidemoduls.....</i>	<i>101</i>
Abbildung 43: Prototypenaufbau passives Ventil.....	102
<i>Abbildung 44: Prototyp Magnetventil.</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 45: Grundaufbau Strömungsprüfstand.....</i>	<i>103</i>

<i>Abbildung 46: Innenraum des Abscheiders mit definierter gefrorener Wassermenge (l); Wasserabscheidemodul im Klimaschrank bei -40°C (r).</i>	105
<i>Abbildung 47: Versuchsaufbau passives Ventil (l); Schaltvorgang (r).</i>	106
<i>Abbildung 48: Versuchsaufbau am Shakerprüfstand.</i>	107
<i>Abbildung 49: Belastung Breitbandrauschen.</i>	108
Abbildung 50: Kameraaufnahme einer Vereisung am Druckstutzen.	110
Abbildung 51: CAD- Niederdrucksensor mit Ölvorlage.	111
Abbildung 52: FaeBS Musteraufbau H ₂ -Konzentrationsensor.	114
Abbildung 53: Sensor mit Thermoelementen.	115
Abbildung 54: Auszug Anforderungen DCDC-Wandler.	117
Abbildung 55: Bauraummodell / mechanische Schnittstellen.	117
Abbildung 56: Systemarchitektur DCDC-Wandler.	118
Abbildung 57: Hardwaredesign-Prozess.	119
Abbildung 58: Mechanikmodell mit integriertem Leistungsmodul, Auszug Thermosimulation.	119
Abbildung 59: Software-Architektur.	120
Abbildung 60: Gesamtgerät vor Inbetriebnahme am Prüfstand.	121
Abbildung 61: Reglerverhalten bei Sollsprüngen.	122
Abbildung 62: Testkonzept Zollner.	123
Abbildung 63: Testplanung AP7 (Stand 06/22).	123
Abbildung 64: Prüfsystem aufgebaut.	124
Abbildung 65: Temperaturverläufe im DCDC-Wandler bei 800 A / 130 kW, Testdauer ca. 1 h.	124
Abbildung 66: Verschiedene Wirkungsgradkurven des DCDC-Wandlers bei 12-phasigem Betrieb.	125
Abbildung 67: Wirkungsgradunterschiede Teillast bei 12- bzw. 6-phasigem Betrieb.	125
Abbildung 68: Ergebnisse der Analysen Impedanzmessung.	126
Abbildung 69: Vergleich KPI Projektziele vs. IST-Stand.	126
<i>Abbildung 57: Weiterentwickeltes Prüfprotokoll mit konstantem Betriebspunkt und Regenerationszyklus für die Einzelzelle im TP-50 Format.</i>	132

Abbildung 58: Schematische Darstellung der Probennahme mit Thermodesorptionsröhrchen (1,2), die im laufenden Betrieb gewechselt und im Wechsel angesteuert werden können.	135
Abbildung 59: PTFE-Druckbehälter zur Auslagerung der Normprobekörper in spezifischen Einlagerungsmedien	136
Abbildung 60: Form des verwendeten Probekörpers Typ 5A; l3=75 mm, b2=12,5 mm, die Dicke beträgt 2 mm.....	137
Abbildung 61: Darstellung des pH-Wertes nach unterschiedlicher langer Auslagerungszeit bei 105 °C.	140
Abbildung 62: Darstellung der Elution von Bor Ionen und pH-Werte in Abhängigkeit von der Zeit bei PPS- GF40.....	141
Abbildung 63: Vergleich der eluierten Ionen und der Veränderung des pH-Wertes zwischen PA6- GF30 mit den hydrolysestabilisierten Typen PA6T-GF35 und PA9-GF35 nach einer Auslagerungszeit von 21 Tagen bei 105 °C.....	141
Abbildung 64: Zusammenfassung der Langzeit Auslagerungsversuche; detektierte Ionen und Anstieg des pH-Wertes nach 21 Tagen bei 105 °C und einem Start pH-Wert 4.	142
Abbildung 65: Darstellung der TOC-Elution in Abhängigkeit von der Zeit (in Tagen) bei den analysierten Materialien.....	143
Abbildung 66: Darstellung der TNb-Elution in Abhängigkeit von der Zeit (in Tagen) bei den analysierten Materialien.....	143
Abbildung 67: Prüfkörper positioniert in der Prüfkammer.	144
Abbildung 68: Schematische Darstellung der Emissionsanalyse und nachgeschalteter GC-MS Detektion der freigesetzten Kontaminationen.	145
Abbildung 69: Octamethyl-cyclotetrasiloxan.....	146
Abbildung 70: 2,6-Ditert-Butylbenzo-1,4-chinon.....	146
Abbildung 71: Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl).	146
Abbildung 72: Irganox 1076.....	146
Abbildung 73: Normierte Emission von Benzochinonderivaten (links) sowie Phenolderivaten (recht) aus PP GF30 über die Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur (90 °C und 115 °C) in der Prüfkammer.	146
Abbildung 74: Normierte Emission von γ -Butyrolacton (GBL; links) und Benzaldehyden (rechts) aus PPS und PPS-GF40 bei 115 °C in der Prüfkammer.	147
Abbildung 75: Emission von ϵ -Caprolactam, auf eine Stunde normierte, aus PA6 in Abhängigkeit von der Temperatur in der Prüfkammer (90 °C links, 115 °C rechts).	147

<i>Abbildung 76: schematisches Vorgehen zur MEA-Herstellung, die bei BMW durchgeführt wurde. (TP-x = Zell-Format mit x cm² aktiver Fläche).....</i>	151
Abbildung 77: Erstversion der Prüfkammer (links) und überarbeitete Version der Prüfkammer (rechts).....	152
Abbildung 78: Single-Cell Prüfstand in CAD Umgebung (links); betriebsbereiter Prüfstand im Labor (rechts).	153
Abbildung 79: Vergleich der gemittelten und normierten Auswertung der 3. UI-Kennlinie aller Untersuchungen.....	154
Abbildung 80: Short-Stack Prüfstand in CAD-Umgebung (links); betriebsbereiter Prüfstand im Labor (rechts).	156
Abbildung 81: Vergleich der Short-Stack Auswertung zwischen PPS und PA6-GF30.	157
Abbildung 82: Ex-situ Analyseplan einschließlich der Messmethoden.	158
Abbildung 83: EDX-Flächenanalyse von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.	158
<i>Abbildung 84: IR-Aufnahme der Pinholeprüfung mit Formiergas.....</i>	160
Abbildung 85: Fotografische Übersichtsaufnahmen der MEA von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.	161
<i>Abbildung 86: Fotografische Aufnahmen der CCM von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.....</i>	161
Abbildung 87: Fotografische Aufnahmen der MPL von der a) Anoden- und b) Kathodenseite.....	162
Abbildung 88: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der Anoden-Katalysatoroberfläche an Position C2 bei verschiedenen Vergrößerungen a) Vergrößerung x200 und b) Vergrößerung x1000.....	165
<i>Abbildung 89: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C2 bei verschiedenen Vergrößerungen a) Vergrößerung x200 und b) Vergrößerung x1000.....</i>	165
<i>Abbildung 90: EDX-Flächenanalyse von der Anoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.</i>	166
<i>Abbildung 91: EDX-Flächenanalyse von der Kathoden-Katalysatoroberfläche an Position C1.</i>	166
<i>Abbildung 92: U-I Kennlinien (Polarisationskurven) ZBT (links) und BMW (rechts) bei jeweils gleichen Betriebsbedingungen.....</i>	167

<i>Abbildung 93: Shortstack aus dem FAEBS Projekt (rechts) mit Kontaminationskammer (Links) in BMW-Prüfstand eingebaut.</i>	168
<i>Abbildung 94: Innengestell der Kontaminationskammer mit Adapter für Typ 5A Vielzweckprüfkörper mit eingebauten Vielzweckprüfkörpern.....</i>	169
<i>Abbildung 95: U-I Kennlinien / Polarisationskurven unter FaeBS Bedingungen, aufgenommen bei BMW mit eingebauter Kontaminationskammer.</i>	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung der beteiligten Firmen und Institute zu den Arbeitspaketen von FaeBS	7
Tabelle 2: Leistungskennzahlen (KPI) der Arbeitspakete	11
Tabelle 3: Kernanforderungen Brennstoffzellensystem	15
Tabelle 4: Beispielhafte Komponentenvarianten eines Brennstoffzellensystems	17
Tabelle 5: Auslegungs-Lastfall 1 für das Design von Kompressor und Turbine sowie zur Auslegung von Kompressor-Motor und -Inverter	22
Tabelle 6: Bauteilübersicht FaeBS Brennstoffzellensystem	26
Tabelle 7: Inhalt Meilenstein Design-Freeze.....	27
Tabelle 8: Relevante Temperaturbereiche im Fahrzeug und Brennstoffzellensystem sowie zur Komponentenauslegung.....	43
<i>Tabelle 9: Grundanforderungen für Brennstoffzellen-Stack.....</i>	48
<i>Tabelle 10: Messbedingungen der Basismessungen</i>	71
<i>Tabelle 11: Messbedingungen der Degradationszyklen</i>	72
<i>Tabelle 12: Messbedingungen der Hochtemperaturtests</i>	73
<i>Tabelle 13: Messbedingungen der Kaltstarts.....</i>	74
Tabelle 14: EAC Varianten FaeBS Projekt	81
Tabelle 15: FaeBS Projektziele PCV-Rezi-Modul.....	94
<i>Tabelle 16: Versuchsergebnisse Abscheidegrad & Druckverlust</i>	104
<i>Tabelle 17: Übersicht über die Parameter für die Aufnahme der U-I Kennlinien im in-situ Prüfprotokoll.....</i>	130
<i>Tabelle 18: Übersicht der BMW-Betriebspunkte für das in-situ Prüfprotokoll (A = Anode; K = Kathode)</i>	131

<i>Tabelle 19: Versuchsmatrix für die Auslagerungstests in wässrigen Medien.</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 20: Bestimmung der Desorptionszeiten mit PPS und Anteil am max. TIC (Total Inorganic-Carbon) -Wert</i>	<i>135</i>
<i>Tabelle 21: Übersicht der verwendeten Prüfmaterialien</i>	<i>138</i>
<i>Tabelle 22: Übersicht der Prüfmedien zur Auslagerung</i>	<i>139</i>
<i>Tabelle 23: Übersicht der in der Emissionsanalyse detektierten Kontaminationen aus den untersuchten Polymeren</i>	<i>148</i>
<i>Tabelle 24: Optische Auffälligkeiten der MEA-Komponenten nach der Auftrennung</i>	<i>163</i>
<i>Tabelle 25: Mikroskopische Auffälligkeiten der Anoden-GDL, -MPL und -Katalysatoroberfläche</i>	<i>164</i>
<i>Tabelle 26: Mikroskopische Auffälligkeiten der Kathoden-GDL, -MPL und -Katalysatoroberfläche</i>	<i>164</i>
<i>Tabelle 27: Übersicht über die ECSA Ergebnisse der einzelnen MEAs</i>	<i>167</i>
<i>Tabelle 28: Abkürzungsverzeichnis AP 8</i>	<i>170</i>