Skalierbares **T**hermomanagement und **A**ntriebsstrang für **B**renn**s**toffzellen-Nutzfahrzeuge

Partnerspezifischer Schlussbericht

Verbundkoordinator	Dr.-Ing. Uwe Kehn GreenIng GmbH & Co. KG - KMU Bahnhofstraße 109 71397 Leutenbach Telefon: 07195 904 33 11 E-Mail: uwe.kehn@greening.de

Förderkennzeichen	19I21037A
Vorhabenbezeichnung	SkalTABs – Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge; Teilvorhaben: Erforschung eines skalierbaren Brennstoffzellensystems Umsetzung auf Demonstratorprüfstand
Laufzeit des Vorhabens	01.08.2021 – 31.10.2024

Autoren	Christoph Konkol, Dr. Uwe Kehn

Datum	06.03.2025

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung 3

1.1 Aufgabenstellung 4

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 7

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 10

2 Eingehende Darstellung 12

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 12

2.1.1 Übersicht der Arbeitspakete und deren zeitliche Einordnung 12

2.1.2 Ergebnisdarstellung der Arbeitspakete 12

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 49

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 49

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Verwertungsplan) 50

2.5 Dem ZF bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens 51

2.6 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse 51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Arbeitspakete 6
Abbildung 1.2: Partnerzuordnung Blockschaltbild 7
Abbildung 2.1: Zeitplan 12
Abbildung 2.2: Vorfeldfahrzeug Leerfahrt 30 km/h 15
Abbildung 2.3: Vorfeldfahrzeug Transportfahrt 5% Steigung 12 t Anhängelast 10 km/h 15
Abbildung 2.4: Vorfeldfahrzeug Transportfahrt max. Zugkraft 7,5% Steigung 14 t Anhängelast 2,5 km/h 16
Abbildung 2.5: Mittlere Kommunalmaschine Transportfahrt 1% Steigung 60 km/h 16
Abbildung 2.6: Mittlere Kommunalmaschine Transportfahrt 9% Steigung 43 km/h 17
Abbildung 2.7: Mittlere Kommunalmaschine Arbeitsmodus ohne Steigung 15 km/h 17
Abbildung 2.8: Mittlere Kommunalmaschine Arbeitsmodus 20% Steigung 15 km/h 18
Abbildung 2.9: Löschfahrzeug volle Beschleunigung 18
Abbildung 2.10: Löschfahrzeug Löschbetrieb im Stand 19
Abbildung 2.11: P&ID HT-Kühlkreis (Brennstoffzellenstapel) 23
Abbildung 2.12: P&ID NT-Kühlkreis (Leistungselektronik und BoP) 24
Abbildung 2.13: Steuerungsarchitektur V1 25
Abbildung 2.14: Prinzipbild Bipolarplatte 27
Abbildung 2.15: Wärmemengen Brennstoffzelle / Diesel Verbrennungsmotor 28
Abbildung 2.16: Brennstoffzellen-Gesamtsystem (aktive und passive Rezirkulierung) 30
Abbildung 2.17: aktive Rezirkulation 31
Abbildung 2.18: Aufbau Strahlpumpe 32
Abbildung 2.19: Einzelbetrieb Rezirkulation 34
Abbildung 2.20: Energiedichte H2-Speicher 39
Abbildung 2.21: P&ID Kathodenpfad 40
Abbildung 2.22: Steuerungsarchitektur V2 42
Abbildung 2.23: Energiesenke von Prüfstand 44
Abbildung 2.24: Skalierbares Kathodensubsystem Prüfstand 45
Abbildung 2.25: Erstes Konzept Verteilerstruktur Kathode 45
Abbildung 2.26: Ergebnis Verteilerstruktur Kathode 46
Abbildung 2.27: P&ID skalierbares Anodensubsystem Prüfstand 46
Abbildung 2.28: Skalierbares Anodensubsystem Prüfstand 47
Abbildung 2.29: CAD Prüfcontainer 48

1 Kurzdarstellung

Das Projektvorhaben SkalTABs adressiert skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie zugehörige Hardware-Komponenten für zukünftige Antriebsstränge von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen. Durch eine ganzheitliche Betrachtung der Fahrzeug-Energieflüsse und deren Optimierung sollen Systemarchitekturen mit einer hohen Gesamtenergieeffizienz erreicht und damit die Reichweite der Fahrzeuge erhöht werden.

Ein besonderer Fokus wird hierbei auf eine skalierbare Gestaltung des Brennstoffzellen-Systems gelegt, um mit einem Komponenten-Baukasten ein möglichst breites Spektrum von Fahrzeugen abdecken zu können. Basierend auf dem Dialog mit repräsentativen Fahrzeugherstellern werden hier relevante Use Cases und Einsatzprofile für Nutz- und Sonderfahrzeuganwendungen als Basis für die Arbeiten herangezogen.

Durch diesen skalierbaren Architekturansatz sollen die Projektergebnisse einen Beitrag leisten, um zukünftige Brennstoffzellen-Antriebsstränge kosteneffizient zu gestalten. Damit werden diese insbesondere auch zugänglich für kleinere Fahrzeughersteller, wie beispielsweise aus dem Bereich kommunaler Sonderfahrzeuge oder der internen Logistik.

1.1 Aufgabenstellung

Im Projekt SkalTABs werden skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie die zugehörigen Hardware-Komponenten für zukünftige Antriebsstränge von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen erforscht und demonstriert. Ziel ist Erhöhung der Reichweite und der Effizienz sowie die Senkung der TCOs von Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. Im Bereich des Powertrains sind hier gesamtenergetisch optimale Systemkonfigurationen zu vergleichen und zu bewerten und die Anforderungen an die skalierbaren Komponenten abzuleiten. Dies beispielsweise für die Brennstoffzelle selbst, den Antriebsstrang bestehend aus Motor und Umrichter, etwaige Stützbatterien sowie für alle Nebenaggregate. Für das Thermomanagement werden ganzheitliche VTMS-Architekturen konzipiert, methodisch untersucht und bewertet und hieraus Kühlkonzepte und Komponentenspezifikationen abgeleitet. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf das Thermomanagement der Brennstoffzelle selbst sowie auf die Nutzbarmachung der erzeugten Abwärme, beispielsweise für die Klimatisierung weiterer Komponenten oder der Fahrerkabine, gelegt.

Ein zentrales Alleinstellungsmerkmal des Projektes ist hierbei, dass eine flexible und skalierbare Gestaltung des Brennstoffzellen-Antriebs sowie der zugehörigen Powertrain- und Thermomanagement-Komponenten adressiert wird. Die erarbeiteten Lösungen sollen somit ein möglichst breites Spektrum an Fahrzeugklassen abdecken wie beispielsweise (kommunale) Sonderfahrzeuge, Fahrzeuge für die innerbetriebliche Logistik oder den Transportverkehr. Zu Projektbeginn werden Use Cases und Einsatzprofile von repräsentativen Fahrzeugklassen und Fahrzeugherstellern gesammelt, geclustert und übergreifende Spezifikationen abgeleitet. Hierzu wird ein herstellerübergreifender Beraterkreis von Fahrzeugherstellern eingerichtet (LOI von Aebi-Schmidt und von MAFI bereits vorliegend).

Durch diesen skalierbaren Architekturansatz sollen die Projektergebnisse einen Beitrag leisten um Brennstoffzellen-Antriebsstränge kosteneffizient für größere OEMs zu gestalten aber diese insbesondere auch zugänglich für kleinere Fahrzeughersteller zu machen. Somit sollen die Projektergebnisse dazu beitragen die Einstiegshürden für umweltschonende Antriebssysteme gerade für kleinere OEMs zu senken, da die initialen Entwicklungskosten für einen spezifischen Antriebsstrang für solche Firmen ansonsten finanziell kaum zu tragen sind.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen sowie steigendes Umweltbewusstsein erfordern auch für den Nutzfahrzeugbereich innovative, effiziente und umweltschonende Antriebskonzepte. Die aus den Use Cases abgeleiteten technischen Anforderungen an die Fahrzeuge unterscheiden sich grundlegend von klassischen Pkw-Anwendungen. Insbesondere die hohe täglich benötigte Reichweite oder Einsatzdauer, die hohe notwendige Verfügbarkeit, längere Fahrzeug- und damit Komponenten-Lebensdauern sind hier zu nennen. Gleichzeitig sind für eine Marktakzeptanz wettbewerbsfähige Total-Costs-of-Ownership (TCO) erforderlich.

Diese geänderten Randbedingungen führen dazu, dass das Thema der alternativen Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge aktuell technologieoffener diskutiert und erforscht wird als bei Pkw, bei denen mittelfristig ein klarer Trend zu batterieelektrischen Lösungen absehbar ist. Die Anwendung von Batterien als Energiespeicher für Nutzfahrzeuge, wie beispielsweise beim Tesla Semi vorgestellt, weist den Nachteil einer hohen benötigten Batteriekapazität auf, um die benötigten Reichweiten mit dem der erforderlichen Nutzlast zu erreichen. Dies führt zu hohen initialen Kosten sowie einem hohen Fahrzeuggewicht. Das Laden führt selbst bei den diskutierten Schnellladekonzepten zu langen unproduktiven Stillstandzeiten des Fahrzeugs und erfordert entsprechende Ladeinfrastrukturen mit sehr hohen Anschlussleistungen, gerade entlang der Autobahnen.

Große Chancen insbesondere für den Langstrecken-Schwerlastverkehr aber auch im Bereich der Sonderfahrzeuge werden Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen eingeräumt. Sie vereinen die Vorteile der hohen Energiedichte des Energieträgers Wasserstoff mit einer lokalen Emissionsfreiheit der Fahrzeuge. Der Tankvorgang kann bei entsprechender Gestaltung der Speichersysteme sowie der Infrastruktur zügig durchgeführt werden. Neben den Forschungsgebieten der Wasserstofferzeugung, des -transports und der -bereitstellung erfordern wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge grundlegend neue Systemarchitekturen und Komponenten im Vergleich zu dieselbetriebenen Fahrzeugen nach dem Stand der Technik.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Durchführung der Arbeiten ist das Projekt SkalTABs in insgesamt fünf Arbeitspakete untergliedert wie in Abbildung 1.1 dargestellt ist.

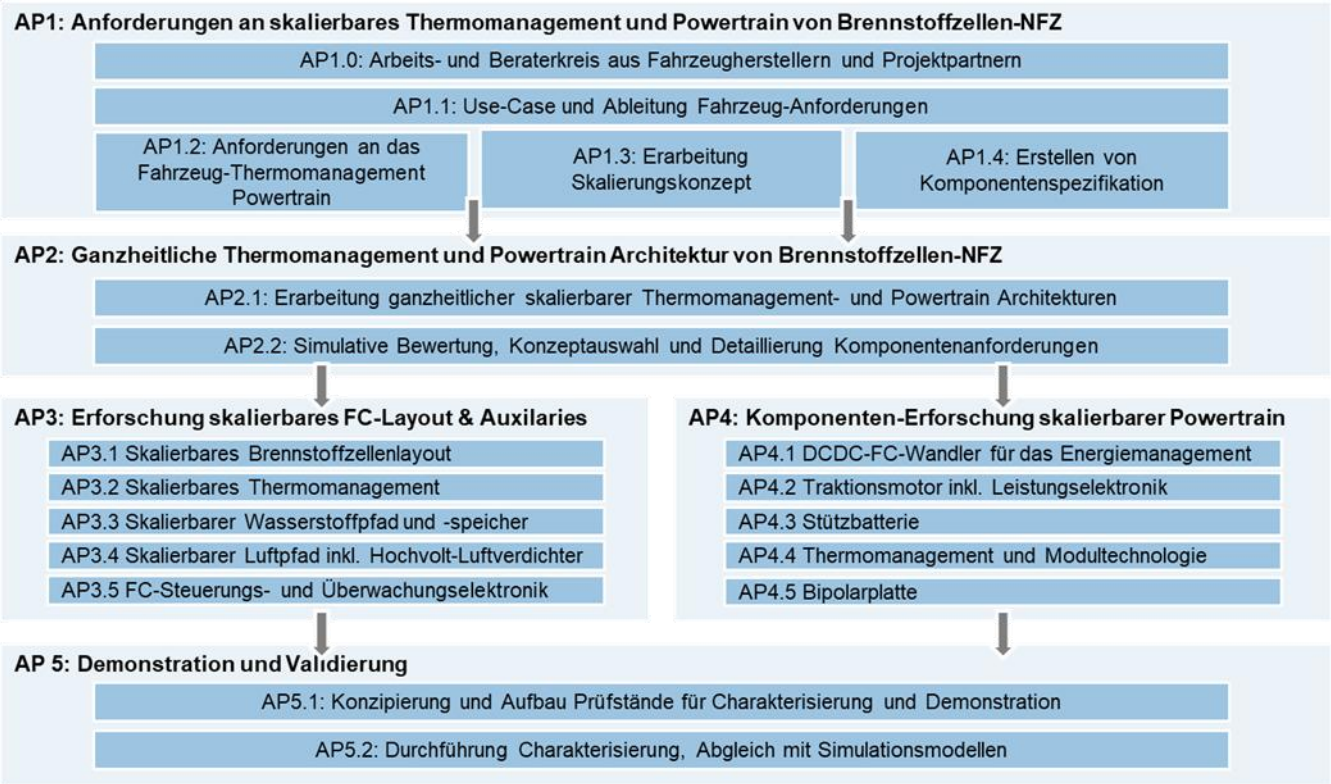


Abbildung 1.1: Arbeitspakete

In Arbeitspaket 1 werden die Use Cases und Mission Profiles verschiedener Nutzfahrzeugklassen mit Unterstützung des Beraterkreises der Fahrzeughersteller gesammelt. Eine Clusterung in sinnvolle Untergruppen wird vorgenommen und hieraus die spezifischen Anforderungen an den Powertrain und an das Thermomanagement abgleitet, mit dem Ziel einer möglichst breiten Einsetzbarkeit durch einen skalierbaren Ansatz. Auf dieser Basis erfolgen in Arbeitspaket 2 die Erarbeitung und Ausdetaillierung von ganzheitlichen Architekturkonzepten unter Berücksichtigung von definierten Zielsetzungen wie ganzheitliches Effizienzmaximum für repräsentative Mission Profiles, Skalierbarkeit und eine Reduzierung des Komponentenaufwands.

Die Erarbeitung von skalierbaren und optimierten Komponenten für den Nutzfahrzeug Powertrain findet in Arbeitspaket 3 und 4 statt. Arbeitspaket 3 bündelt hierbei die Aktivitäten um das Brennstoffzellensystem selbst unter Einbeziehung der adressierten Nebenaggregate, wie beispielsweise dem Luftverdichter und der Brennstoffzellen-Überwachungselektronik. Arbeitspaket 4 adressiert die weiteren Komponenten des elektrischen Nutzfahrzeug-Antriebsstrangs wie DC/DC-Wandler, Traktionsmotor inkl. Umrichterelektronik sowie das Batteriesystem. Auch Maßnahmen zur Erreichung der nutzfahrzeugspezifischen Lebensdauern, wie ein verbessertes Komponenten-Thermomanagement und optimierte Elektronik-Subkomponenten, werden in diesem Arbeitspaket erforscht.

Test und Demonstration der Hardware-Komponenten sowie der Abgleich mit den Auslegungsdaten erfolgen in Arbeitspaket 5. Ziel bei der Demonstration im Rahmen des Projektes ist zunächst eine Einzelprüfung der erarbeiteten Prototypen auf Komponentenprüfständen. Im Anschluss erfolgt ein kombinierter Test von mehreren Komponenten auf (System-)Prüfständen, um das Verhalten im

Verbund zu charakterisieren. Sollte aufgrund der räumlichen oder zeitlichen Verfügbarkeit von Prüfständen nur ein Test eines Teils der Komponenten gleichzeitig im Systemverbund möglich sein, so soll der Austausch von im Projekt generierten Last- und Betriebskollektiven eine Verknüpfung von verteilten Tests sicherstellen.

Die Abbildung 1.2 zeigt dabei anhand von einem vereinfachten Blockschaltbild eines Brennstoffzellensystems die Zuordnung der Teilsysteme und Komponenten zu den Verbundprojektpartnern.

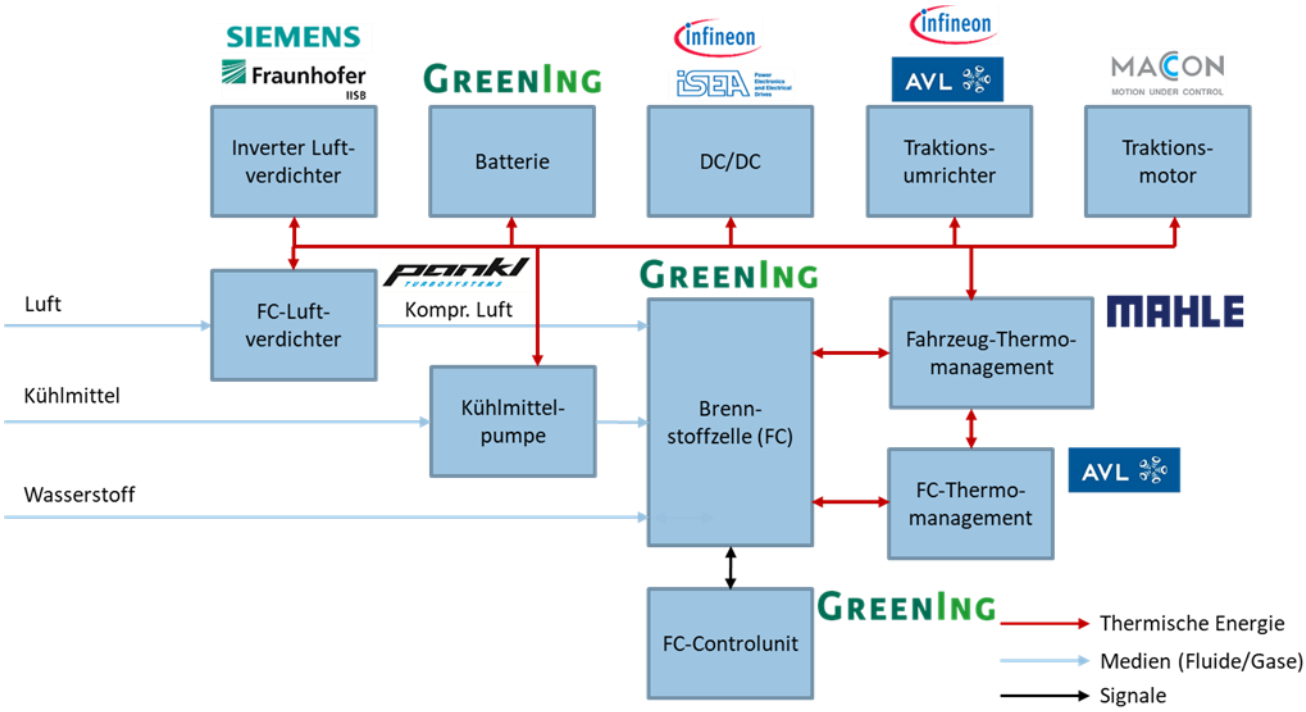


Abbildung 1.2: Partnerzuordnung Blockschaltbild

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Nachfolgend werden die in SkalTABs geplanten Aktivitäten gegenüber laufenden oder beendeten Forschungsvorhaben abgegrenzt beziehungsweise aufgezeigt, an welchen Stellen gezielt Synergien genutzt werden können.

<u>FEN P2: Elektrische Komponenten und Netztechnologien (ISEA, abgeschlossen)</u>

In dem BMBF-geförderten Projekt FEN P2 wurde ein galvanisch getrennter Multiport-DC-DC-Wandler zur Kopplung von DC-Netzen erforscht. Für SkalTABs wird ein Multiport-Wandler für mobile Anwendungen erforscht, wodurch sich vollständig andere Anforderungen und Topologien ergeben. Die Ansteuerungs- und Regelungsverfahren müssen zudem auf die spezifischen Eigenschaften der Brennstoffzelle ausgerichtet werden.

<u>FEN ScaLE: Systematischer und applikationsweiter Vergleich leistungselektronischer Wandler und Komponenten für DC-Netze (ISEA, IAEW, AixControl, EATON, Kiepe Electric, Schaffner, laufend)</u>

Bei dem BMBF-geförderten Projekt ScaLE wird ein Algorithmus zur initialen, anwendungsbezogenen Auslegung und dem Vergleich von Wandlern erforscht. Zur Parametrierung

des Algorithmus werden skalierbare und modulare Multiport-DC-DC-Labormuster entwickelt. Im Gegensatz zu der Skalierung auf Systemebene bei SkalTABs wird bei ScaLE ein modularer Ansatz auf Komponentenebene verfolgt, der nicht zu den geforderten Leistungsdichten bei mobilen Anwendungen führt. Weiterhin werden in SkalTABs Wechselwirkungen mit anderen Komponenten auf Systemebene berücksichtigt.

1000kmPLUS: Scalable European Powertrain Technology Platform for Cost-Efficient Electric Vehicles to Connect Europe (Infineon, AVL List, Brno Universität of Technology, Daimler AG, FhG IISB, OTH, Saft Batteries, TU Dresden, Valeo-Siemens, Hutchinson, Ionity, laufend)

In dem ECSEL geförderten Projekt 1000kmPLUS wird die erste demonstratorbasierte Realisierung von SiC basierten Leistungsmodulen für die 1.200 V Klasse im hochpreisigen Pkw Segment von Hochleistungsfahrzeugen erforscht. Als Vergleich von 1.200 V SiC- und Si-Schaltern wurden hierbei jedoch Industrie Leistungsmodule parallel eingesetzt. Die ersten Erkenntnisse zur zukünftigen, kostenoptimierten Verwendung von 1.200 V Halbleitern fließen in die Erarbeitung der neuartigen Lösung der 1.200 V Module für die Anwendung im Bereich Nutzfahrzeug in diesem Projekt ein.

HiBord (BMW, Bosch, Siemens, Kroschu, smartCable, Fraunhofer IISB et al.):

Im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes HiBord wird an ausfallsicheren Energiebordnetzen für das hoch- und vollautomatisierte Fahren geforscht. Durch die Steuerung von Energieflüssen innerhalb einer Spannungsebene und die bedarfsgerechte Verknüpfung von unterschiedlichen Spannungsebenen soll das notwendige Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit bei reduziertem Komponentenaufwand erreicht werden („intelligente Redundanz“). Dies wird im Projekt am Beispiel eines ausfallsicheren elektrischen 12V Lenk- und Bremssystems erforscht und demonstriert.

HiBord adressierte primär funktionale Aspekte des Energiebordnetzes vor dem Hintergrund des automatisierten und autonomen Fahrens für Pkw-Anwendungen. SkalTABs fokussiert Architekturen für Brennstoffzellen-betriebene Nutzfahrzeuge mit ganzheitlich optimierten Thermomanagement und Antriebsstrangarchitekturen. Dennoch können grundsätzliche Aspekte – wie eine ausfallsichere Gestaltung der Fahrzeugarchitektur sowie daraus abgeleitete Komponentenanforderungen – aus HiBord in das aktuelle Vorhaben einfließen. Projektzeitraum: 2016 – 2020.

UmSiChT (VW, Lenze, Infineon, Fraunhofer IISB et al.):

Im BMBF-geförderten Projekt UmSiChT werden hocheffiziente Traktionsinverter auf Basis von Siliziumkarbid-Halbleitern (SiC) für Pkw-Anwendungen erforscht. Hierfür passende Elektronik-Architekturen, Systemaufbauten sowie elektrische Maschinen mit ausreichender Robustheit gegen hohe Spannungssteilheiten (dU/dt) werden erforscht. Ziel ist es die (Teillast-)Effizienz des Antriebsstrangs zu steigern und damit die Fahrzeug-Reichweite zu erhöhen.

SkalTABs adressiert mit Nutzfahrzeugen ein Anwendungsfeld mit sich unterscheidenden Anforderungen an den Antriebsstrang beispielsweise in Bezug auf Leistungsklasse, Lebensdaueranforderungen und Bordnetzspannung. Die im Rahmen von UmSiChT gewonnen Erkenntnisse zur Steigerung der Komponenten- und Fahrzeugeffizienz durch verlustminimierte SiC-Halbleiter und zugehörige Komponentenaufbauten können Einzug in die Arbeiten von SkalTABs finden. Projektzeitraum: 2018 - 2021.

eHighway (VW, Siemens et al.):

Im Rahmen des BMU-geförderten Projekts eHighway werden elektrisch betriebene Langstrecken-LKWs erforscht die mittels eines Pantographen aus einer Oberleitung gespeist werden. VW übernimmt gemeinsam mit der Konzerntochter Scania die Entwicklung und Realisierung der Nutzfahrzeuge, Siemens die Umsetzung des Pantographen. Auf speziellen Versuchsstrecken entlang von Autobahnen und Bundesstraßen sollen in einem Feldversuch Daten aus dem Realbetrieb der LKWs gewonnen werden.

Durch die Art der Energiebereitstellung grenzen die im Rahmen des eHighway geförderten Aktivitäten sich klar von den in SkalTABs angedachten Arbeiten ab obwohl beide Projekte elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge adressieren. Eine grundsätzliche Bewertung der Vor- und Nachteile der beiden Energieversorgungskonzepte für die in SkalTABs adressierten Nutzfahrzeugklassen kann zum Projektende vorgenommen werden. Projektzeitraum: 2018 - 2021.

Entwicklung eines Langstrecken-Lkw mit Brennstoffzellenantrieb (MAN Truck & Bus SE, TU Braunschweig, Anleg GmbH, Shell Oil Deutschland):

Das von MAN koordinierte Forschungsprojekt wird vom BMVI gefördert und adressiert den Aufbau eines Fernverkehr-LKWs mit Brennstoffzellentechnologie. Fokus bei dem Projekt liegt auf dem Aufbau des Fahrzeuges mit Pkw-Brennstoffzellen und die Umsetzung einer zugehörigen Wasserstoff-Infrastruktur zur Betankung des Fahrzeugs. Hierdurch grenzt sich das Projekt auch klar von SkalTABs ab in dem die Entwicklung eines Nutzfahrzeug-spezifischen Komponenten-Baukastens für NFZ-Brennstoffzellen und den elektrischen Antriebsstrang das Ziel ist. Auch sollen in SkalTABs neben Langstrecken LKWs auch kommunale Sonderfahrzeuge mit niedrigerer Leistung adressiert und durch den skalierbaren Ansatz der Komponentenerarbeitung abgedeckt sein. Durch die angedachte Einbindung von MAN in den Industriekreis könnten Erfahrungen aus dem Feldversuch auch in die Anforderungen und Spezifikationen für das vorliegende Projekt SkalTABs einfließen. Projektzeitraum: 2019 - 2022.

H2Haul (Iveco, Bosch et al.):

Im EU-geförderten Projekt H2Haul forschen 15 Partner aus sieben europäischen Ländern an Brennstoffzellen Nutzfahrzeugen und Wasserstofftankstellen. Insgesamt sollen 16 Fahrzeuge mit drei unterschiedlichen Architekturen im Rahmen des Projektes realisiert werden und auf über 1 Millionen km im normalen kommerziellen Einsatz getestet werden. Primär adressierter Projektoutput ist die Gewinnung von Erkenntnissen für LKW-Betreiber, die Politik und die Wasserstoffindustrie.

Ähnlich wie beim vorherig beschriebenen Projekt grenzt sich SkalTABs von H2Haul dadurch ab, dass primär die Erforschung und Realisierung von spezifischen Komponenten für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge im vorliegenden Vorhaben im Fokus stehen und nicht die Realisierung einer Fahrzeugflotte und die Gewinnung von Flottendaten. Veröffentliche Erkenntnisse aus H2Haul, beispielsweise Nutzungsprofile, können Einzug in die Arbeiten von SkalTABs finden. Projektzeitraum: 2019 – 2024.

FCC (Pankl Turbosystems, Fraunhofer IISB, ZSW-BW):

Das von Pankl koordinierte Projekt FCC verfolgt das Ziel, einen elektrischen Verdichter inklusive Leistungselektronik für Brennstoffzellen-Antriebssysteme im Automotive Bereich zu entwickeln.

Dabei soll das System auch umfassend validiert werden und bei der Entwicklung auf eine seriengerechte Konstruktion geachtet werden.

Die Abgrenzung liegt in der Art der Anwendung: im Projekt FCC wird ein System für den Automobil-Bereich entwickelt, mit geringeren Leistungen als für den Nutzfahrzeug-Bereich, wie es im Projekt SkalTabs der Fall ist. Darüber hinaus unterscheidet sich das Anforderungsprofil hinsichtlich der Betriebsart, mit einem Fokus auf ein vorteilhaftes transientes Ansprechverhalten im ersten Projekt, gegenüber einem Fokus auf Erreichung der maximalen Leistung über lange Zeiträume im zweiten Projekt. Zusätzlich unterscheiden sich die Projekte in ihrer generellen Ausrichtung: im Projekt FCC wird eine seriengerechte Konstruktion im Detail betrachtet, um für spätere große Stückzahlen im Automotive Bereich gewappnet zu sein. Im Projekt SkalTabs wird im Gegenzug mehr Arbeit hinsichtlich einer Skalierbarkeit investiert, um den breiteren Leistungsbereich der Nutzfahrzeugbranche abbilden zu können. Projektzeitraum: 2020-2021

Zusammenfassend grenzen sich die in SkalTABs geplanten Arbeiten wie folgt zum Stand der Technik ab und bieten einen klaren technischen Neuheitsgrad zu bisherigen Forschungsvorhaben:

- Skalierbares Brennstoffzellen- und Antriebssystem optimiert für ein breites Spektrum an Nutzfahrzeugen, Fokus hierbei von kommunalen Sonderfahrzeugen bis hin zum Transportverkehr
- Sammlung von Use Cases und Einsatzprofile von repräsentativen Brennstoffzellen-basierten Nutzfahrzeug-Fahrzeugklassen. Clusterung und Ableitung übergreifender Spezifikationen als Basis für das Skalierungskonzept
- Ganzheitlich systemische Architekturoptimierung des elektrischen Bordnetzes und des Thermomanagementkonzepts für Brennstoffzellen-basierte Nutzfahrzeuge. Ziel höchste Energieeffizienz und Komponentenaufwand
- Ableitung praxisrelevanter Komponenten-Spezifikationen für den zukünftigen Anwendungsfall Brennstoffzellen Nutzfahrzeug
- Erforschung und prototypische Realisierung von Nutzfahrzeug-spezifischen Komponenten für das Brennstoffzellensystem und teilweise für den Antriebsstrang
- Experimentelle Charakterisierung und Demonstration von skalierbaren NFZ-Antriebsstrangkomponenten am Prüfstand

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In diesem Kapitel wird auf die Zusammenarbeit von unterbeauftragten und assoziierten Partnerfirmen eingegangen.

IISB, Siemens, GreenIng und ISEA planen die Unterbeauftragung von IQ evolution. In enger Zusammenarbeit wird IQ evolution mit den Partnern maßgeschneiderte 3D-gedruckte Kühlkörper entwickeln, die sich durch eine optimale Leistungsdichte auszeichnen. IQ evolution wird neben der Entwicklung und dem Aufbau der Kühlkörper in AP4 auch bereits bei der Konzepterarbeitung in AP2 eingebunden, damit die Umsetzbarkeit der zu erarbeitenden Lösungen gewährleistet wird.

Das ISEA wird mit IQ evolution gemeinsam Möglichkeiten zur Herstellung kompakter Kühlkörper für einen Multiport-DCDC-Wandler erarbeiten. Dazu wird IQ evolution das ISEA in AP2 in der

Konzeptphase durch eine Untersuchung unterschiedlicher Kühlkörpergeometrien und Entwärmungskonzepte unterstützen. Die Umsetzung in AP4 erfolgt ebenfalls in enger Zusammenarbeit, damit der Kühlkörper und Leistungshalbleiter bzw. –Module optimal aufeinander abgestimmt werden können, um damit ein möglichst kompaktes und effizientes Gesamtsystem zu erhalten.

MAHLE wird als assoziierter Partner die Kompetenz im Thermomanagement im Bereich der Wärmetauscher für das Vorhaben einsetzen und die Erforschung und Entwicklung begleiten.

GreenIng hat für die Fertigung bestimmter Komponenten aus der Medienführung Zulieferer beauftragt um zum Beispiel Adapter für Sensorik in Kühlmittel, Wasserstoff- und Luftpfad herzustellen.

Um die Anforderungen der Fahrzeughersteller und deren Fahrzeuge zu ermitteln, haben Abstimmungsrunden mit mittelständischen OEM stattgefunden. Diese Hersteller waren AL-KO GmbH, Magirus GmbH, Mulag Fahrzeugwerk Heinz Wössner GmbH u. Co. KG und Kärcher Municipal GmbH.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Übersicht der Arbeitspakete und deren zeitliche Einordnung

In der Abbildung 2.1 ist der Zeitplan des Projekts, unterteilt in Arbeitspakete, zu sehen.

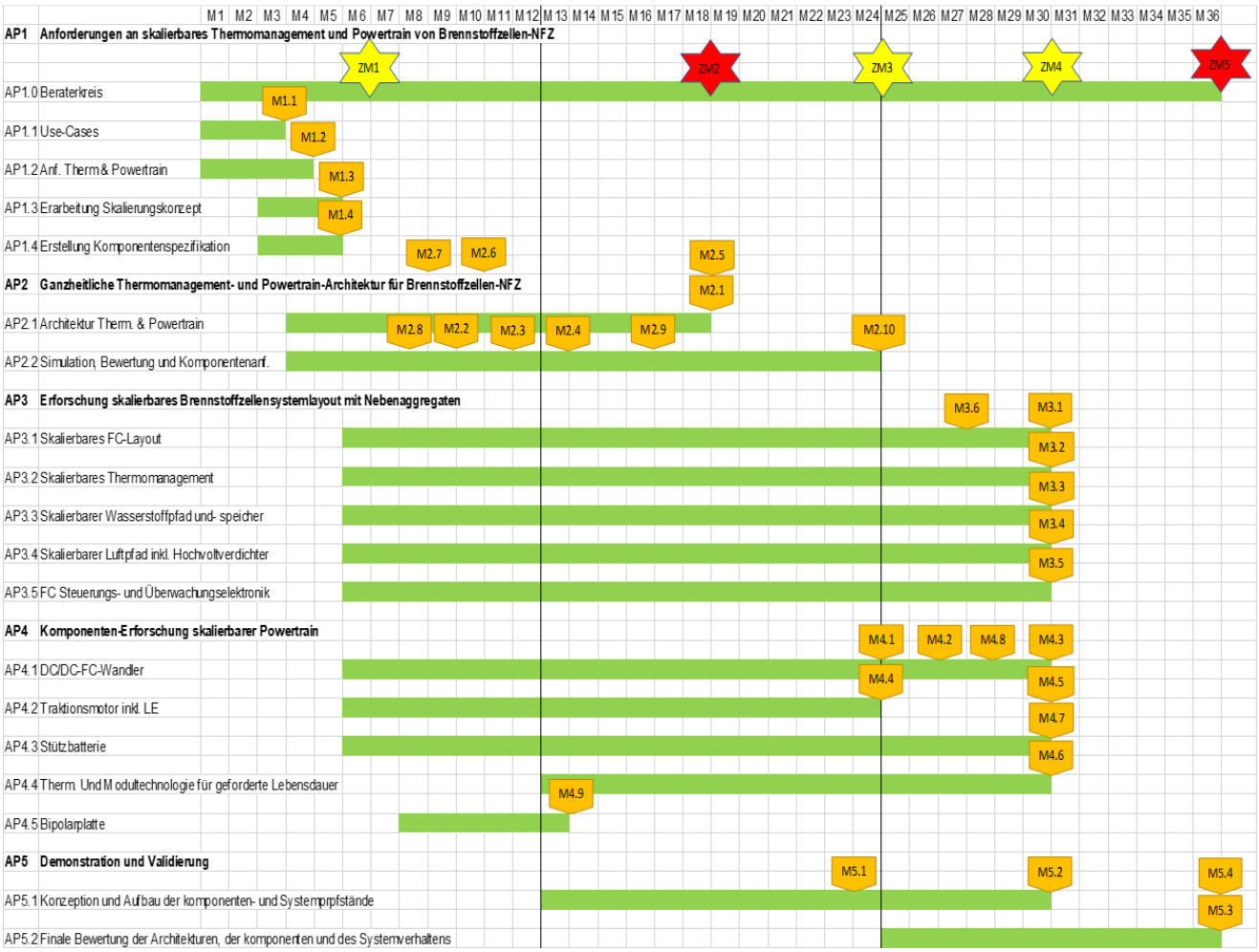


Abbildung 2.1: Zeitplan

2.1.2 Ergebnisdarstellung der Arbeitspakete

2.1.2.1 AP1: Anforderungen an skalierbares Thermomanagement und Powertrain von Brennstoffzellen-NFZ

Im ersten Arbeitspaket sind die Anforderungen an die betrachteten Nutzfahrzeugklassen mit Unterstützung des Beraterkreises der Fahrzeughersteller ermittelt worden. Hieraus sind die systemseitigen Anforderungen für die Untersuchung der skalierbaren Architektur in AP2 abgeleitet worden.

Das Arbeitspaket ist in vier Teilarbeitspakete untergliedert die folgend aufgelistet und näher beschrieben sind.

<u>AP1.0: Arbeits- und Beraterkreis aus Fahrzeugherstellern und Projektpartnern</u>

Im Rahmen dieses Teilarbeitspakets haben Abstimmungsrunden mit den am Projekt interessierten OEM mit GreenIng stattgefunden. Dabei sind mittels vorbereiteten Abfrageformularen und im gemeinsamen Gespräch die Anforderungen der einzelnen spezifischen Fahrzeuge erfragt worden. Die Kategorien der abgefragten Informationen sind dabei Bauräume, Reichweiten / Betriebsdauern

und Leistungsanforderungen der typischen Einsatzszenarien. Zusätzlich zu den Fahrzeuganforderungen sind auch die Umgebungsbedingungen der Einsatzszenarien abgefragt worden, da diese einen Einfluss auf die Wahl der Komponenten und deren Anordnung im Bauraum haben. Befragt wurden die Firmen mit den ausgewählten Fahrzeugen AL-KO GmbH, Magirus GmbH, Mulag Fahrzeugwerk Heinz Wössner GmbH u. Co. KG, Kärcher Municipal GmbH, Aebi Schmidt Deutschland GmbH und MAFI Transport-Systeme GmbH.
Ebenfalls sind im Rahmen dieses Teilarbeitspakets die Ergebnisse der Systemauslegungen an die OEM zurückgespielt worden.

AP1.1: Use Cases und Ableitung Fahrzeuganforderungen

Aus den Gesprächen und den Abfragen der OEM haben sich folgende Fahrzeugklassen mit deren Anforderungen ergeben, die als Grundlage für die weitere Untersuchungen dienen. Diese dienen ebenfalls als erstes Skalierungskonzept für die Systemauslegung:

- **Fahrzeugklasse 1:**
  Kleine Kommunalfahrzeuge für den Einsatz beim Rasenschnitt, zur Reinigung von Gehwegen und dem Transport von geringen Lasten zum Beispiel das Leeren von städtischen Mülleimern mit 30 kW nutzbarer Brennstoffzellen-Leistung.
  Ein denkbarer Powertrain für diese Fahrzeuge kann ein Hybridantrieb aus Traktionsbatterie mit Brennstoffzellen-Rangeextender sein oder ein Alleinantrieb mittels Brennstoffzelle und minimaler Pufferbatterie.
  Die Betriebsdauern sind für diese Klasse bis zu 10 Stunden pro Tag.
  Die Energie kann durch eine Brennstoffzelle (Ein-Stack-Variante) bereitgestellt werden.
  Durch die geringen Lasten kann hier auf ein Hochvoltsystem verzichtet werden und eine System mit kleiner 60 VDC eingesetzt werden.
- **Fahrzeugklasse 2:**
  Mittlere Kommunalfahrzeuge zum Reinigen von Straßen und für den Transport von größeren Lasten mit 90 kW nutzbarer Brennstoffzellen-Leistung.
  Auch hier sind zwei Varianten des grundsätzlichen Powertrains möglich und es kann ein Hybridsystem aus Traktionsbatterie mit Brennstoffzellen-Rangeextender oder ein Alleinantrieb mittels Brennstoffzelle und minimaler Pufferbatterie eingesetzt werden.
  Die Betriebsdauern dieser Fahrzeugklasse sind bis zu 10 Stunden pro Tag.
  Die Energie kann mittels einer Brennstoffzelle bereitgestellt werden.
  Hier sind aufgrund von Lastspitzen Spannungslagen zwischen 96 – 400 VDC denkbar.
- **Fahrzeugklasse 3:**
  Große Kommunalfahrzeuge und Spezialaufbauten auf Nutzfahrzeuge für die Reinigung von Baustellenzufahrten und Autobahnen sowie Löschaufbauten für Feuerwehrfahrzeuge mit 180 kW nutzbarer Brennstoffzellen-Leistung.
  Für diese Fahrzeugklasse bzw. Fahrzeugaufbauten wird ein Alleinantrieb mittels Brennstoffzelle als denkbar vorgesehen.
  Die betriebsdauern können dabei 10 Stunden pro Tag bis hin zu größer als 24 Stunden bei Großeinsätzen reichen und müssen Dauereinsatzbereit sein können.
  Zum Zeitpunkt der Untersuchung sind Leistungen über 120 kW nicht aus einer serienverfügbaren PEM-Brennstoffzelle für den mobilen Einsatz verfügbar. Daher wird diese Variante mit einem Zwei-Stack-System entwickelt.
  Durch die hohen Leistungen werden Systemspannungen von 400 – 650 VDC für die Auslegung zugrunde gelegt.

- **Fahrzeugklasse 4:**
  Sonderfahrzeuge mit sehr hohen Leistungsanforderungen wie Pistenraupen, Flughafenschlepper oder Rollfeld-Löschfahrzeuge.
  Die nutzbare Brennstoffzellenleistung liegt bei 270 kW und wird als Alleinantrieb ausgelegt. Die Einsatzdauern reichen für diese Klasse ebenfalls von 10 Stunden pro Tag bis zu mehr als 24 Stunden am Stück mit einer Dauereinsatzbereitschaft.
  Diese hohen Leistungen können mit den aktuell am Markt verfügbaren Brennstoffzellen nur bei einem System aus mindestens drei Brennstoffzellen-Stapeln dargestellt werden.
  Die Systemspannung wird hier, wie bei der Fahrzeugklasse 3 mit 400 – 650 VDC angesetzt.

Zur Leistungsauslegung des Powertrains sind die Einsatzszenarien anhand von Lastprofilen der OEM eingesetzt worden. Diese geben Auskunft über die Leistungsanforderung des Fahrantriebs und der Nebenantriebe der Nutz- und Sonderfahrzeuge für den Arbeitseinsatz.
Im Konsortium sind die Spannungslagen der einzelnen Use-Cases diskutiert und abgestimmt worden. Das Ergebnis ist, dass für die mittlere Kommunalmaschine und das Vorfeld Löschfahrzeug eine 800 VDC Zwischenkreisspannung und HV-Batteriespannung ausgelegt wird. Dies hat den Vorteil, dass die Stützbatterie zusammen mit den Nebenaggregaten ohne eigenen DCDC-Wandler in einen Port des Multiport-Wandlers gesetzt werden kann und damit die Leistungsbedarfe der Nebenaggregate nicht über den Multiport-Wandler geschleust werden müssen. Zellzahl, Größe und Gewicht der HV-Stützbatterie wird dadurch nicht verändert, da die Zellzahl zwischen 400 VDC und 800 VDC gleich ist. Nur die Parallel- und Reihenschaltung der Zellen ändert sich.
Folgend sind für die drei einzelnen untersuchten Fahrzeuge der OEM-Gesamtenergiemanagement dargestellt. Aus diesen gehen die Leistungsanforderungen und Energieflüsse der Verbraucher und Quellen hervor.

Vorfeldfahrzeug (Fahrzeugklasse 1)

Hier sind drei Einsatzszenarien untersucht und dargestellt worden (Abbildung 2.2, Abbildung 2.3, Abbildung 2.4).

1. Leerfahrt ohne Steigung ohne Anhängelast bei 30 km/h:

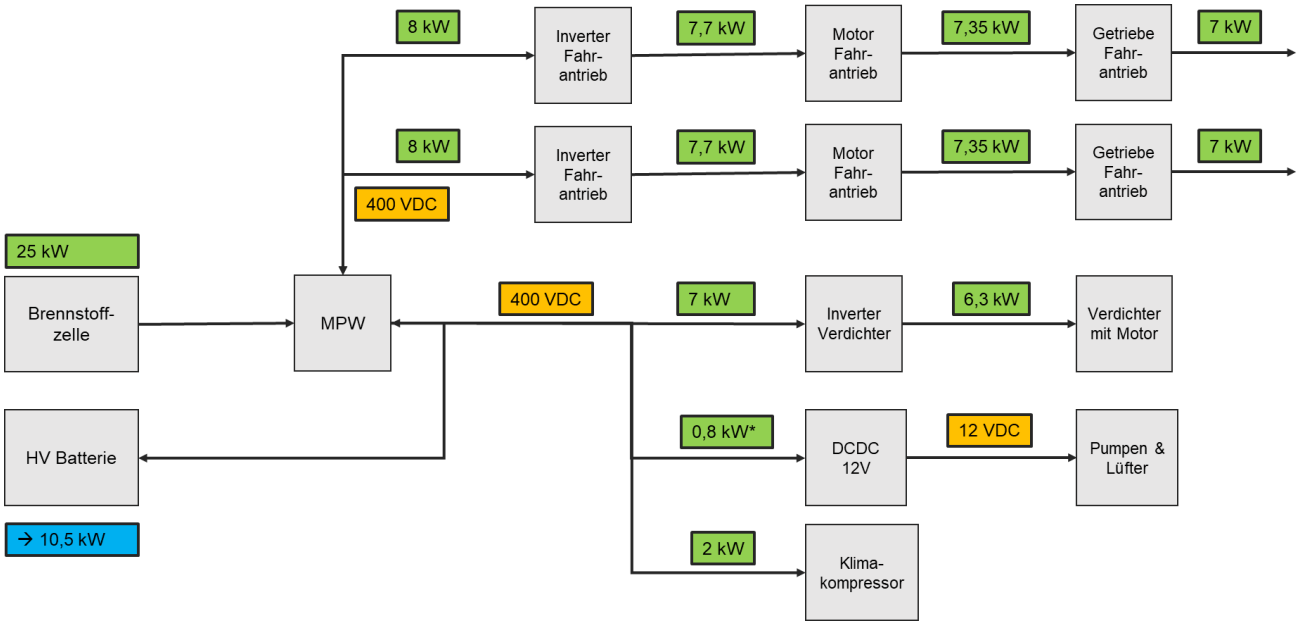


Abbildung 2.2: Vorfeldfahrzeug Leerfahrt 30 km/h

2. Transportfahrt bei 5% Steigung mit 12 t Anhängelast und 10 km/h:

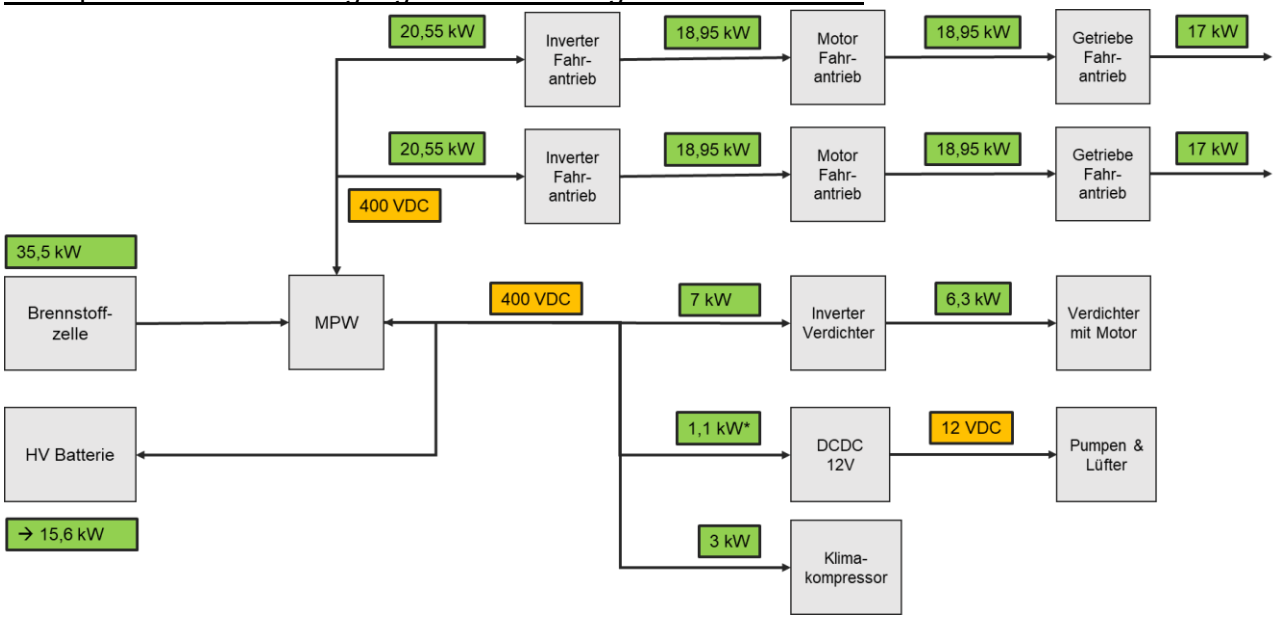


Abbildung 2.3: Vorfeldfahrzeug Transportfahrt 5% Steigung 12 t Anhängelast 10 km/h

3. <u>Transportfahrt mit maximaler Zugkraft bei 7,5% Steigung einer Anhängelast von 14 t und bei 2,5 km/h:</u>

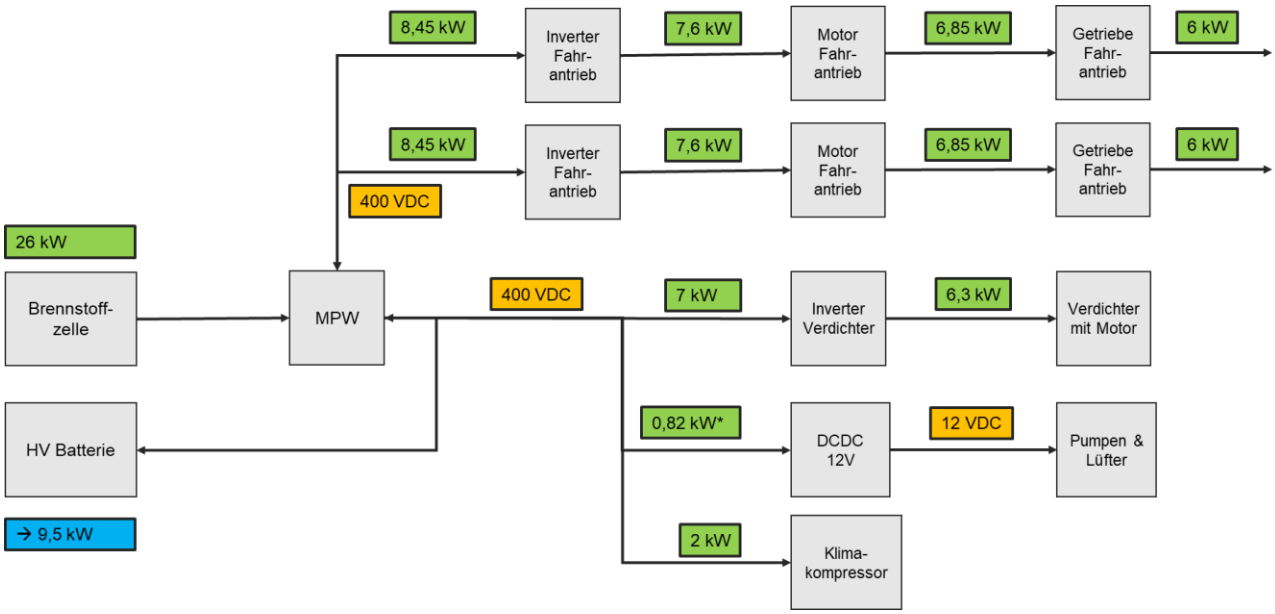


Abbildung 2.4: Vorfeldfahrzeug Transportfahrt max. Zugkraft 7,5% Steigung 14 t Anhängelast 2,5 km/h

Mittlere Kommunalmaschine (Fahrzeugklasse 2)

Für dieses Fahrzeug sind insgesamt vier Einsatzszenarien aufgestellt und untersucht worden (Abbildung 2.5, Abbildung 2.6, Abbildung 2.7, Abbildung 2.8):

1. <u>Transportfahrt bei 1% Steigung und 60 km/h</u>

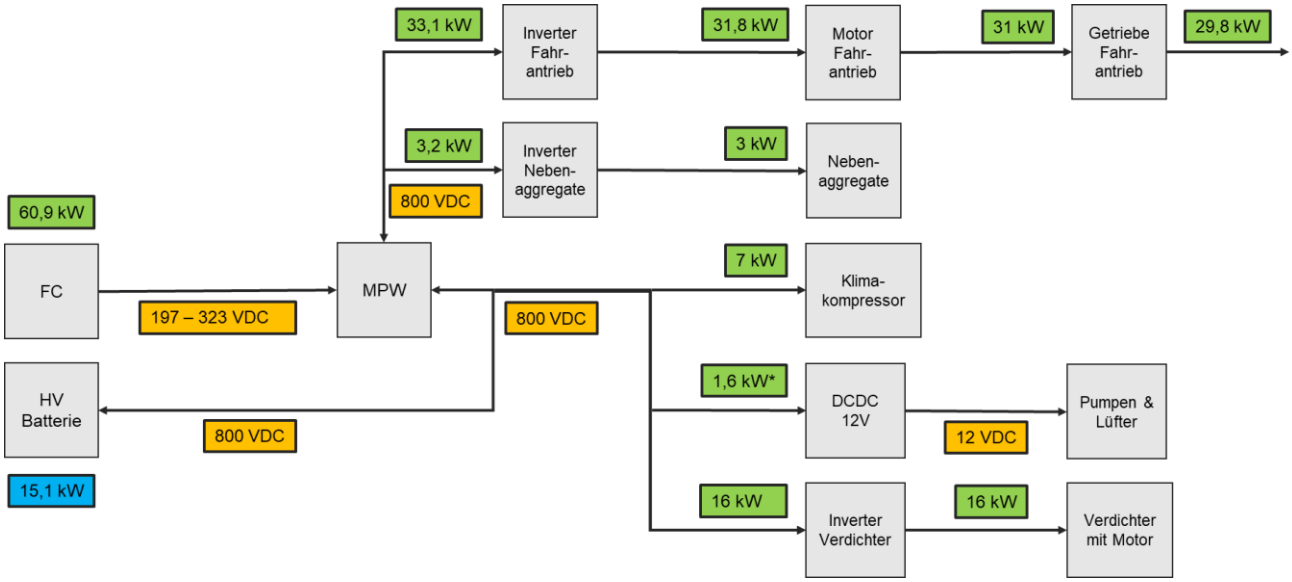


Abbildung 2.5: Mittlere Kommunalmaschine Transportfahrt 1% Steigung 60 km/h

2. Transportfahrt mit 9% Steigung und 43 km/h

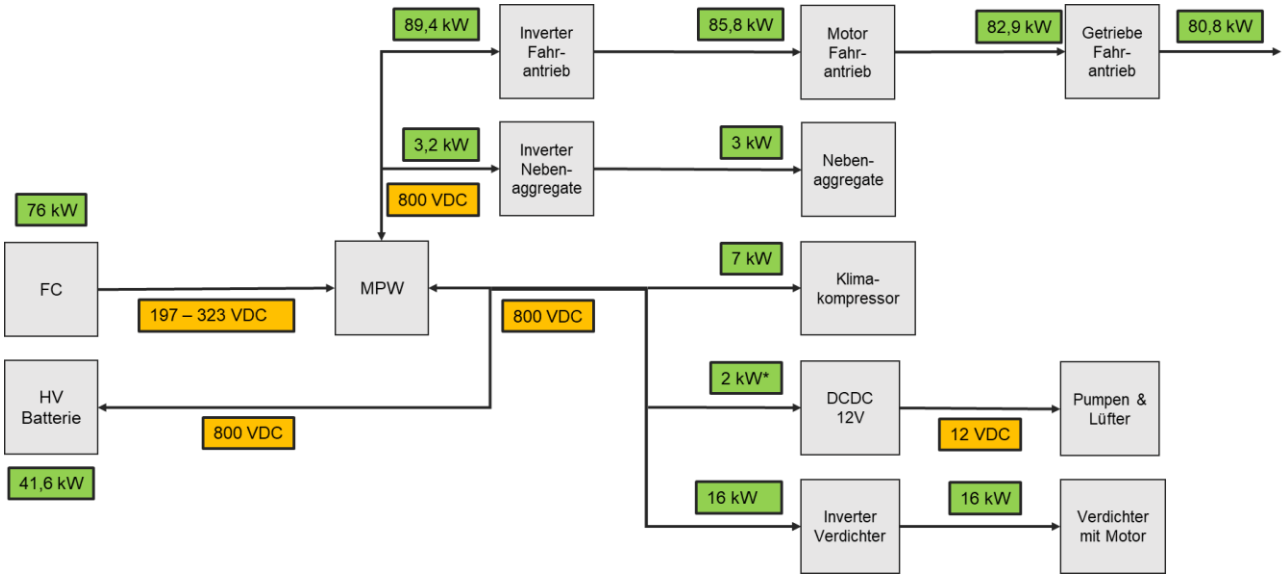


Abbildung 2.6: Mittlere Kommunalmaschine Transportfahrt 9% Steigung 43 km/h

3. Arbeitsmodus ohne Steigung bei 15 km/h

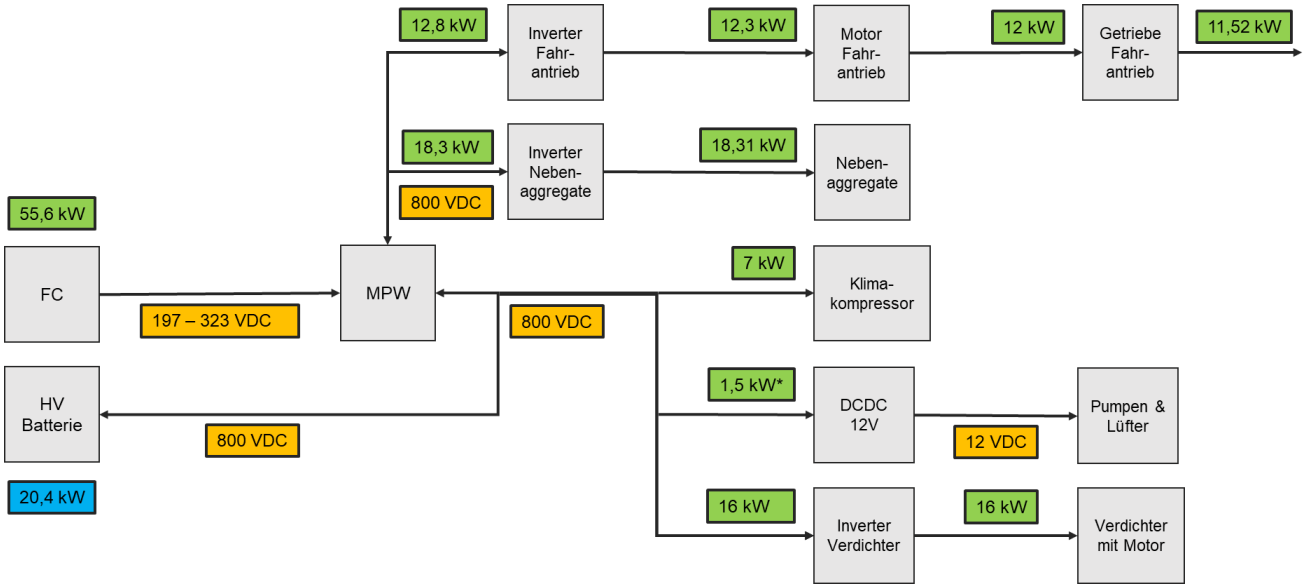


Abbildung 2.7: Mittlere Kommunalmaschine Arbeitsmodus ohne Steigung 15 km/h

4. Arbeitsmodus mit 20% Steigung und 15 km/h

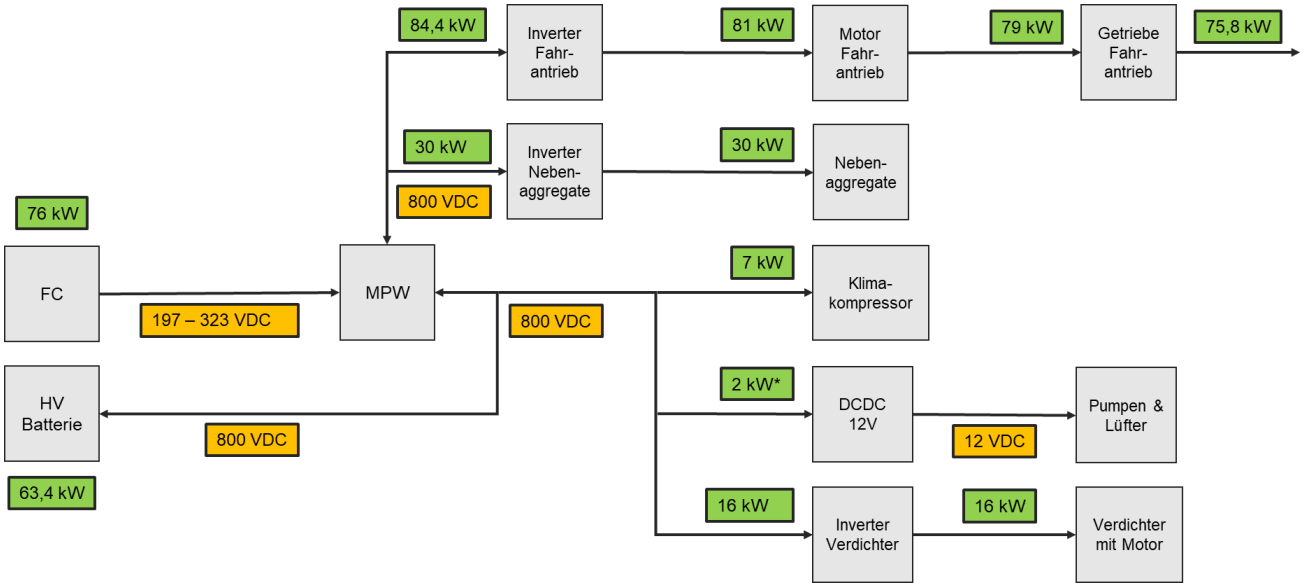


Abbildung 2.8: Mittlere Kommunalmaschine Arbeitsmodus 20% Steigung 15 km/h

Vorfeld-Löschfahrzeug (Fahrzeugklasse 4)

Für dieses Fahrzeug sind zwei Szenarien (Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10) relevant.

1. Volle Beschleunigung bis 125 km/h zum Einsatzort

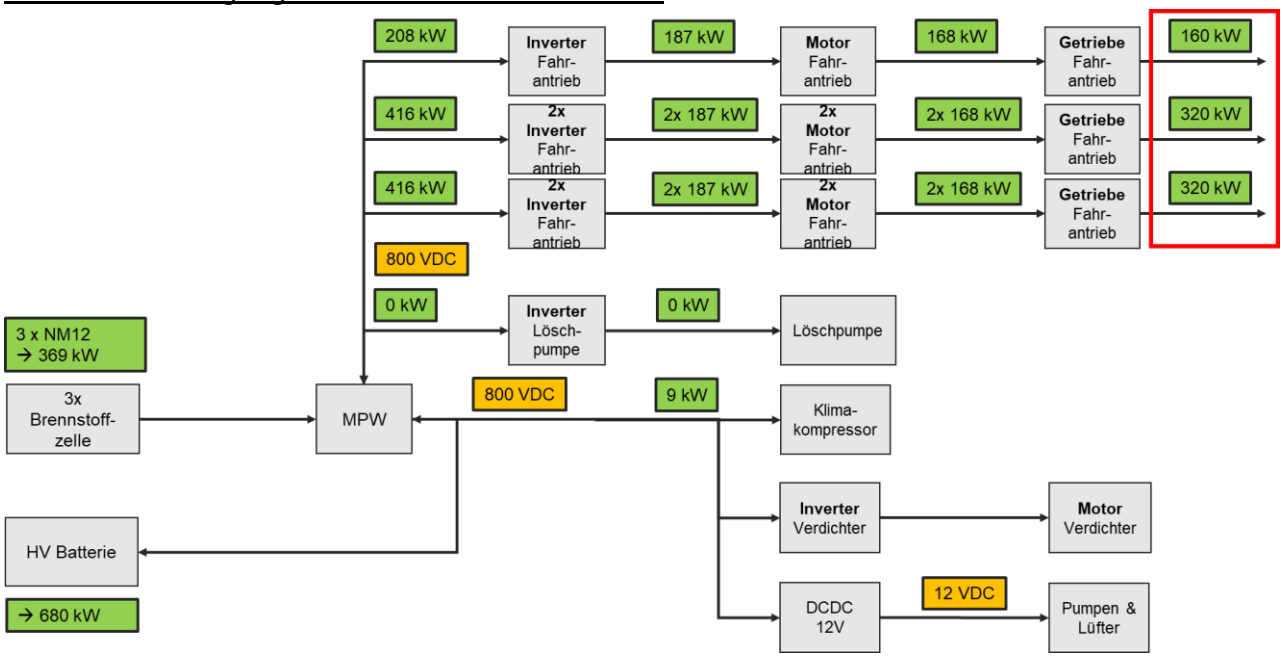


Abbildung 2.9: Löschfahrzeug volle Beschleunigung

2. Löschbetrieb im Stand

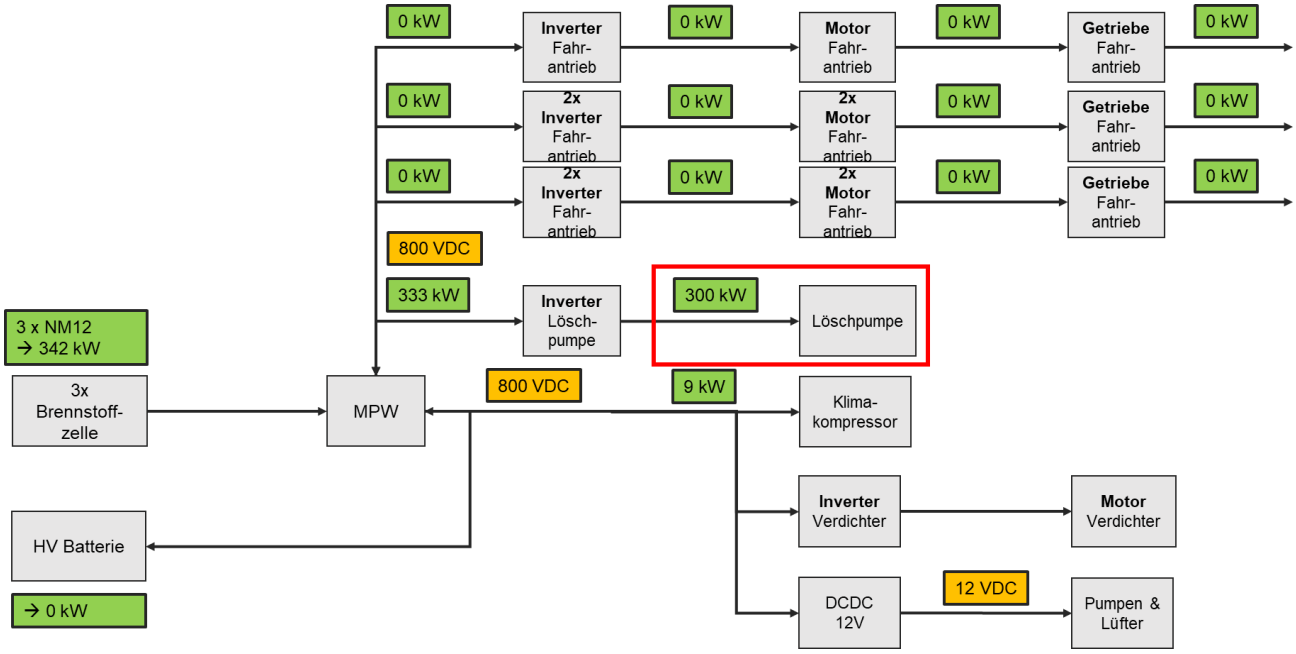


Abbildung 2.10: Löschfahrzeug Löschbetrieb im Stand

AP1.2: Anforderungen an das Fahrzeug-Thermomanagement und den Powertrain

Die aus den Einsatzszenarien ermittelten Leistungen sind als Grundlage der Auslegung des Powertrains an die Partner AVL SFR, MACCON und ISEA und die überschlägig ermittelten Verlustleistungen zur Auslegung des Thermomanagements an AVL DE übermittelt worden. Weiter hat GreenIng die genannten Partner in regelmäßigen Abstimmungsrunden bei der Auslegung mit Informationen unterstützt.
Im AP1.2 sind für die drei ausgewählten Use-Cases die Stütz- bzw. Hybridantriebsbatterien ausgelegt worden. Hierzu ist die Spitzenzleistung der Use-Cases herangezogen worden und zusammen mit den Ergebnissen des AP1.3, in welchem das Skalierungskonzept des Brennstoffzellensystems und damit auch den marktverfügbaren möglichen Einsatz von PEM-Brennstoffzellenstapeln erarbeitet worden ist.
Grundlegend wird die Spitzenleistung der Fahrzeuge mit der Kombination von Batterieleistung und nutzbarer Brennstoffzellensystemleistung bereitgestellt. Mit dieser Vorgehensweise konnte jeweils die Stützbatterie für die betrachteten Fahrzeuge in ihrer Leistungsfähigkeit ermittelt werden und mit Hilfe einer von GreenIng erarbeiteten Auswahlmethodik der recherchierten Li-Ion-Zellen dafür ausgewählt werden.

Die Auswahlmethodik betrachtet die Faktoren:

- Zellchemie
- Bauform
- Kontaktierung
- Leistungseigenschaften
- Verfügbarkeit
- Kosten
- Alterung

Die Bewertung der Bauform ist in folgender Tabelle dargestellt:

	Gewichtung	Rundzelle	Prismatische Zelle	Pouch-Zelle
Produktionskosten*	1	2	1	3
Mechanische Stabilität	2	3	2	1
Thermische Anbindung	2	2	1	3
Modulbildung	1	2	3	1
Sicherheit	4	3	2	1
Summe		26	18	16
Technischer Übereinstimmungsgrad	30	**87%**	**60%**	**53%**

Die Bewertung der Zellchemie ist in der folgenden Tabelle zu sehen:

	Gewichtung	NMC	LFP	LTO
Verfügbarkeit	3	3	2	1
Preis / kWh*	1	3	2	1
Energiedichte	6	3	2	1
Leistungsdichte	4	2	2	3
Temperaturverhalten	6	1	3	3
Lebensdauer	6	1	2	3
Alterungsverhalten	3	1	3	3
Ökologie	4	1	2	2
Spannungslage	3	3	2	1
Summe		66	81	78
Technischer Übereinstimmungsgrad	99	**67%**	**82%**	**79%**

Die Schlussfolgerungen aus den oben gezeigten Bewertungen sind:

Eine Rundzelle ist für den Aufbau eines Pufferspeichers für ein Brennstoffzellensystem ideal

- Geringe Einzelzellkapazität → Speicher kann auch bei hoher Spannung geometrisch klein gestaltet werden
- Hohe mechanische Stabilität → Aufwand für Modulbildung ist vergleichsweise gering
- Standardisierte Größen bieten Freiheit bei der Lieferantenauswahl

Lithium-Eisenphosphat ausgelegt auf Leistung bietet den besten Kompromiss der Zellchemien

- Gute Energie- und Leistungsdichte (gravimetrisch und volumetrisch)
- Thermische Stabilität als Sicherheitsfaktor
- Gute Spannungslage um kompakte Speicher bei hoher Spannung zu realisieren
- Gute Umweltverträglichkeit bei vertretbaren Kosten und guter Verfügbarkeit

Für den Use-Case Vorfeldfahrzeug ergibt sich eine Stützbatterie mit folgenden Eigenschaften:

Vorfeldfahrzeug	
Anzahl Zellen Seriell min.	**125**
Anzahl Zellen Seriell max.	**128**
Gewählte Serienschaltung	108
Entladeleistung String [kW]	**41,5**
Anzahl Zellen parallel min.	**1**
Res. Verschaltung	108S1P
Energieinhalt nom. [kWh]	**0,86**
Zellvolumen [L]	**3,7**
Zellgewicht [kg]	**8,2**
Innenwiderstand String [Ohm]	**1,1**
Innenwiderstand Batterie [Ohm]	**0,9259**
Heizleistung bei Nennleistung [kW]	**10,73**
Erwärmung [K]	**14,52**
Heizleistung bei Dauerleistung [kW]	**0,63**
Erwärmung [K]	**51,00**

Für den Use-Case mittlere Kommunalmaschine ergibt sich eine Stützbatterie mit folgenden Eigenschaften:

Kommunalfahrzeug	
Gewählte Serienschaltung	214
Entladeleistung String [kW]	**82,2**
Anzahl Zellen parallel min.	**1**
Res. Verschaltung	214S1P
Energieinhalt [kWh]	**1,71**
Zellvolumen [L]	**7,4**
Zellgewicht [kg]	**16,3**
Innenwiderstand String [Ohm]	**2,1**
Innenwiderstand Batterie [Ohm]	**0,4673**
Heizleistung bei Nennleistung [kW]	**1,36**
Erwärmung [K]	**0,93**

Für den Use-Case mittlere Vorfeld-Löschfahrzeug ergibt sich eine Stützbatterie mit folgenden Eigenschaften:

Vorfeld-Löschfahrzeug	
Anzahl Zellen Seriell min.	**260**
Anzahl Zellen Seriell max.	**214**
Gewählte Serienschaltung	214
Entladeleistung String [kW]	**82,2**
Anzahl Zellen parallel min.	**6**
Res. Verschaltung	214S6P
Energieinhalt nom. [kWh]	**10,27**
Zellvolumen [L]	**44,3**
Zellgewicht [kg]	**97,6**
Innenwiderstand String [Ohm]	**2,1**
Innenwiderstand Batterie [Ohm]	**0,0779**
Heizleistung bei Nennleistung [kW]	**38,74**
Erwärmung [K]	**4,41**

AP1.3: Erarbeitung Skalierungskonzept

Aus den gewonnenen Ergebnissen der Leistungsanforderung der Use-Cases aus AP1.1 ist im AP1.3 parallel zur Auslegung der Stützbatterie eine erste Auslegung und Skalierung des Brennstoffzellensystems und damit auch des PEM Brennstoffzellenstapels erfolgt.
Die Vorgehensweise ist dabei, dass verfügbare PEM-Stapel mit den jeweiligen Betriebsparametern recherchiert worden sind. Die Anforderungen dieser Stapel und deren Betriebsparameter zusammen mit der jeweiligen Leistungsfähigkeit haben zu der Spreizung zwischen 35 kW und 369 kW nutzbarer Leistung geführt.

Diese Ergebnisse und die Anforderungen an die Luftversorgung sind an die Partner Pankl und AVL SFR weitergeleitet worden, um die ersten Konzepte und Randbedingungen für den Kompressor und dessen LE erarbeiten zu können.

AP1.4: Erstellung von Komponentenspezifikationen

Als Hauptergebnis der vorausgegangenen AP ist eine Parameterliste für die Use-Cases und deren Einsatzszenarien erstellt und befüllt worden. In dieser Liste sind alle notwendigen Anforderungen an jedes Teilsystem eingetragen. Diese Liste ist online für jeden Partner zugänglich.

Ein Fokus von GreenIng im AP1.4 ist die Erarbeitung eines skalierbaren Batteriemanagementsystemkonzepts. Dies ist mittels einer Recherche und der Abstimmung mit Herstellern von verfügbaren automotive Batteriemanagementsystemen (BMS) ist ein für die gewählten Use Cases geeignetes BMS ausgewählt.

2.1.2.2 AP2: Ganzheitliche Thermomanagement- und Powertrain-Architektur für Brennstoffzellen-NFZ

AP2.1 Erarbeitung ganzheitlicher skalierbarer Thermomanagement- und Powertrain-Architekturen

GreenIng hat im Rahmen des AP2.1 in Zusammenarbeit mit AVL DE die für das Thermomanagement notwendigen Komponenten ermittelt und detailliert. Daraus sind erste Architekturkonzepte entstanden, welche als Piping&Instrumentation-Diagramm (P&ID) dargestellt worden sind.

Bei einem Brennstoffzellensystem wird aufgrund der Anforderung des Brennstoffzellenstapels, dass das Kühlmittel nicht elektrisch leitend sein darf und ein hoher Massenstrom gefordert ist, oft auf zwei getrennte Kühlkreise ausgelegt. Ein Kühlkreis ist speziell für den Stapel mit allen notwendigen Komponenten zur Bewahrung der Deionisierung (Ionenfreiheit bedeutet keine elektrische Leitfähigkeit) ausgelegt, während andere Kühlkreise für die Leistungselektronik und die BoP-Komponenten keine Anforderung an die Leitfähigkeit richten und deutlich geringere Massenströme benötigen.

In Abbildung 2.11 ist das P&ID des Kühlkreises für den Stapel und in Abbildung 2.12 der Kühlkreis für die Leistungselektronik und die BoP-Komponenten dargestellt:

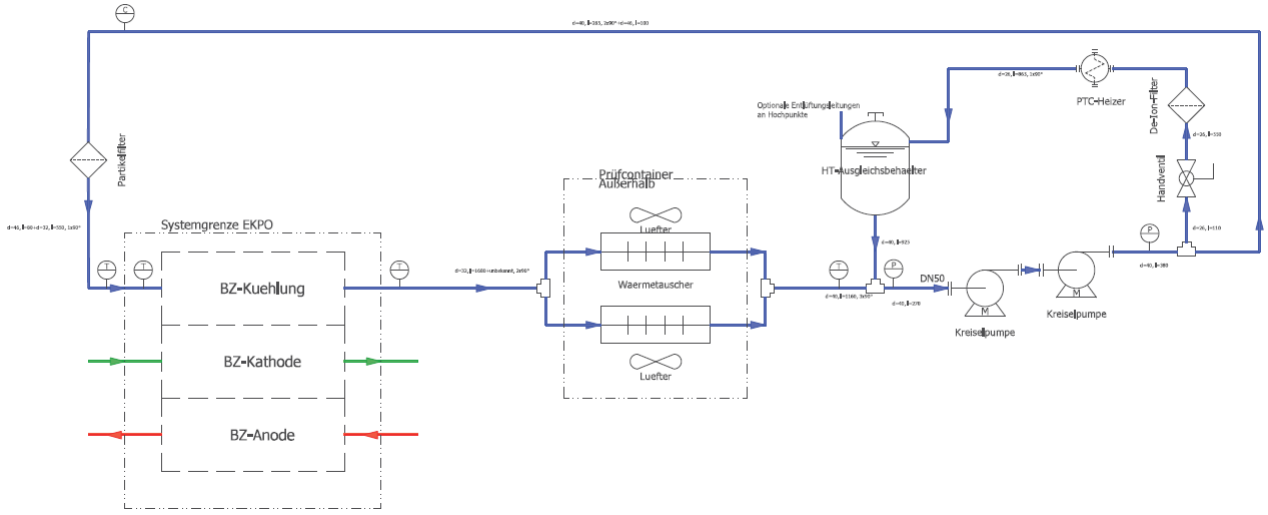


Abbildung 2.11: P&ID HT-Kühlkreis (Brennstoffzellenstapel)

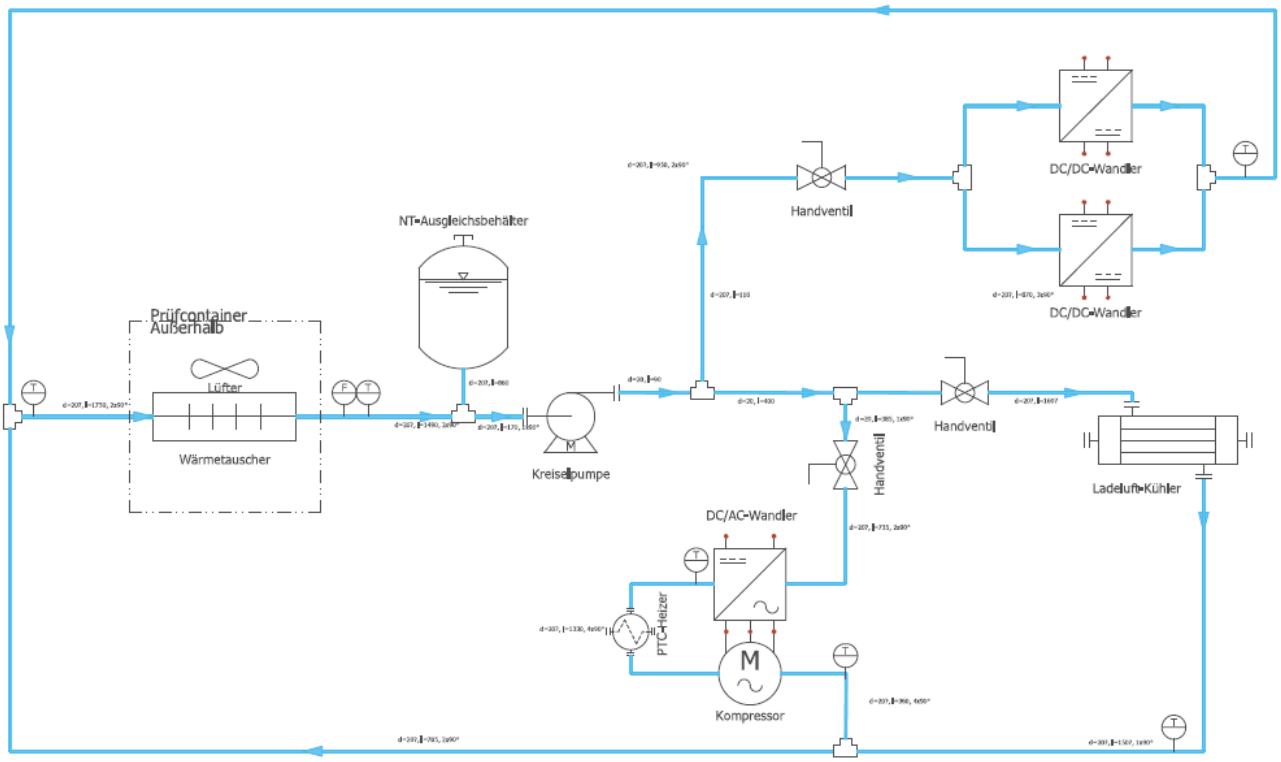


Abbildung 2.12: P&ID NT-Kühlkreis (Leistungselektronik und BoP)

Aus diesen Architekturen sind marktverfügbare Komponenten recherchiert und mit den Anforderungen der unterschiedlichen Kühlkreise abgeglichen worden.

Zusammen mit AVL DE sind die in den P&ID festgelegten Sensorpositionen und -arten hinsichtlich der Schnittstellen zur Steuerung identifiziert worden. In Abbildung 2.13 ist eine erste Übersicht der Steuerungsarchitektur zu sehen. Dort sind links die Eingangsdaten (Sensordaten) der unterschiedlichen Subsysteme und rechts die Ausgänge dargestellt. Dabei unterscheiden sich die Ausgänge in der Art der Kommunikation bzw. der Ansteuerung. Dabei werden drei unterschiedliche Arten der Ansteuerung eingesetzt: CAN, LIN und direkt über einen Verstärker (RapidPro).

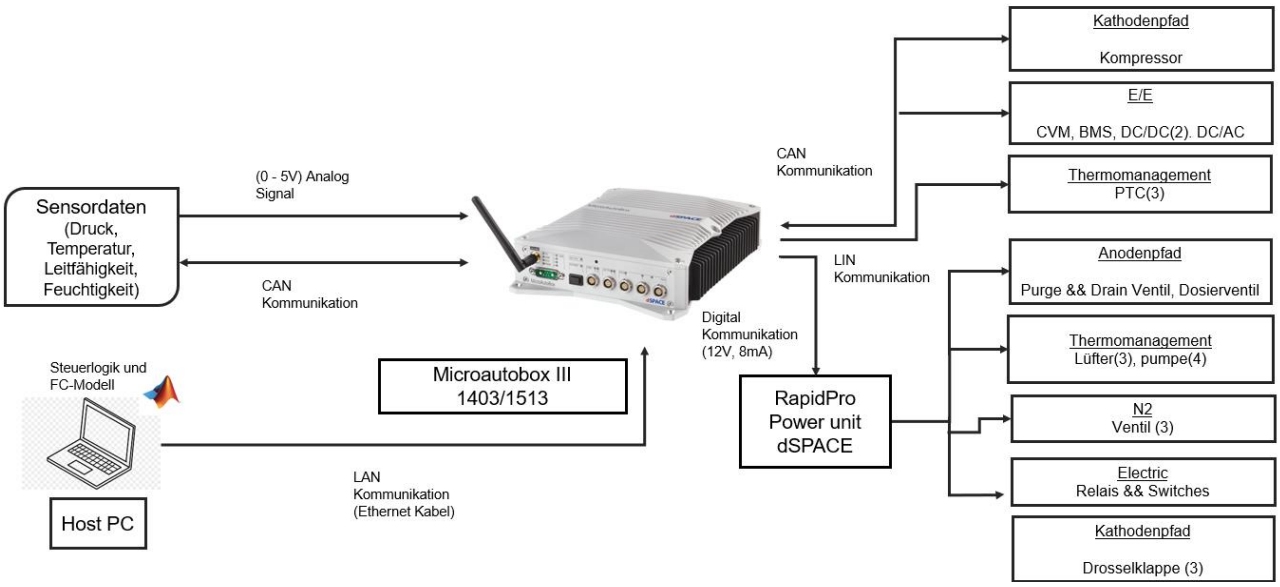


Abbildung 2.13: Steuerungsarchitektur V1

Für die Überwachung und Steuerung des Thermomanagements werden Temperatursensoren, Drucksensoren und Volumenstromsensoren eingesetzt. Diese werden an Messmodule angeschlossen, die per CAN mit dem Steuergerät kommunizieren.

Aktoren im Thermomanagement sind Kühlmittelpumpen, Lüfter und elektrische Zuheizer. Diese Komponenten werden per PWM-Signalen über den Verstärker (RapidPro) angesteuert.

Gegenüber einem Serien-Brennstoffzellensystem werden im Projekt deutlich mehr Sensoren eingesetzt, als für den reinen Betrieb notwendig sind. Dies ist notwendig, um die Modellierung und Simulation zu verifizieren und um das neu entwickelte System bestmöglich zu verstehen.

AP2.2: Simulative Bewertung, Konzeptauswahl und Detaillierung Komponentenanforderungen

Aus den Simulationen und Konzepten von AVL DE ist ein Thermomanagementkonzept ausgewählt worden. Von diesem ist das Systemkonzept des Demonstratorsystems abgeleitet.

Aus den Erkenntnissen des AP1.2 ist das Konzept einer skalierbaren Stützbatterie ausgewählt worden. Da die Erarbeitung der skalierbaren Stützbatterie aufgrund des Ausstiegs von STABIL ohne geplante und budgetierte Aufwände von GreenIng übernommen wurde, ist das skalierbare GreenIng-Standard-Batteriemodul als Grundlage des Konzepts ausgewählt worden. Für das Batterie-Management-System sind unterschiedliche marktverfügbare Systeme recherchiert und bewertet worden. Auf dieser Grundlage ist ein passendes und für die Use-Cases skalierbares Batterie-Management-System ausgewählt worden.

GreenIng hat den Einsatz von 3D-gedruckten Mikrokühlern im skalierbaren Stützbatteriekonzept untersucht. Das Ergebnis ist, dass keine Anwendung identifiziert werden konnte.

Der Einsatz in anderen Teilen des Projekts und bei den entsprechenden Projektpartnern ist in mehreren Abstimmungen zusammen mit dem Hersteller der Mikrokühler diskutiert worden und entsprechende Modelle sind ausgetauscht worden. Das Ergebnis dieser Abstimmungen ist den Berichten der Projektpartner zu entnehmen.

2.1.2.3 AP3: Erforschung skalierbares Brennstoffzellensystemlayout mit Nebenaggregaten

AP3.1: Skalierbares Brennstoffzellenlayout

Die Spreizung der Leistungsskalierung des Brennstoffzellensystems ergibt sich aus den Einsatzszenarien der betrachteten Fahrzeugklassen. Damit ergibt sich eine Spreizung zwischen 35 kW und 370 kW Brennstoffzellenleistung. Auf dieser Grundlage sind Brennstoffzellenstapel recherchiert und bezüglich der Leistungsfähigkeit, der Verfügbarkeit, des Gewichts und des Bauvolumens bewertet worden. Daraus sind Brennstoffzellenstapel von drei Herstellern ausgewählt worden und der Kontakt mit diesen Herstellern zur Abfrage der Betriebsdaten aufgenommen worden.

Die elektrische Leistung eines Brennstoffzellenstapels ergibt sich durch die Summe der Einzelspannungen der in Reihe geschalteten Einzelzellen multipliziert mit der Gesamtstromabgabe. Um für die Use-Cases passende Brennstoffzellenstapel zu generieren ist aus den Rückmeldungen der Stapel-Hersteller ein Tool für die Auslegung erarbeitet worden. Dieses Tool wird mit der Spannung und der Stromabgabe pro Zelle befüllt und kann zusammen mit dem gewünschten Gesamtspannungsniveau und der Zielleistung die entsprechende Stapelhöhe (Zellzahl in Reihe) und die parallele und serielle Verschaltung mehrerer Stapel berechnen.

Eine Skalierung der elektrischen Leistung eines Brennstoffzellenstapels kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

1. Variation der Gesamtspannung im Stapel durch die Anzahl der in Reihe geschalteten Einzelzellen. Die Spannung pro Zelle wird durch die Elektrochemie bestimmt und verändert sich über den abgegebenen Strom / die abgegebene Leistung. Hohe Stromabgabe führt zu mehr Verlusten, was die höchste Spannung bei keiner Stromabgabe ergibt.
2. Variation des abgebbaren Stroms durch die Variation der Aktivfläche der Einzelzellen. Abbildung 2.14 zeigt ein Beispiel einer Seite einer Bipolarplatte. Diese ist in unterschiedliche Flächen unterteilt. Je größer die aktive Fläche im Verhältnis zu den Querschnitten der Hauptkanäle, der Verteilerstruktur und der Dichtfläche ist, desto mehr Strom kann bei gleichbleibender Gesamtfläche abgegeben werden. Und desto effizienter wird die Grundfläche der Bipolarplatte genutzt.
3. Variation der Zellleistung durch die Betriebsparameter. Höherer Betriebsdruck in Kathode und Anode führt zu mehr Teilchen pro Fläche und damit auch zu mehr Reaktionen (= Strom) pro Fläche.

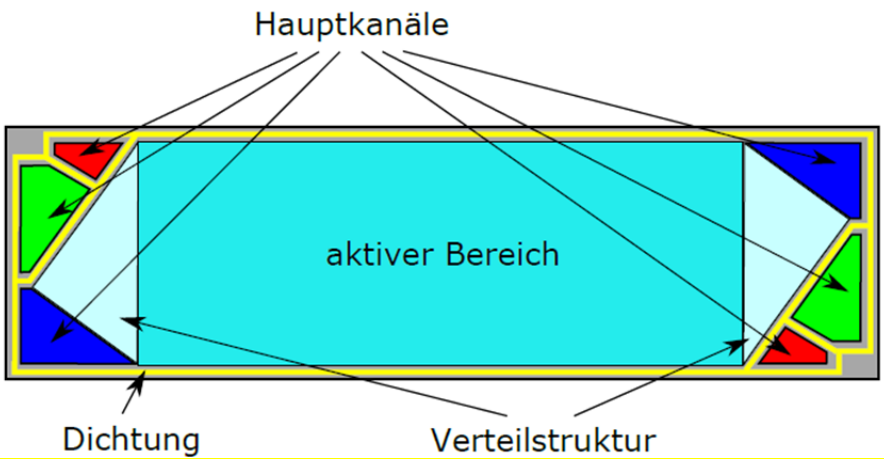


Abbildung 2.14: Prinzipbild Bipolarplatte

Die ermittelten Werte für die UseCases, sowie die grundlegenden Parameter zur Kühlung der Brennstoffzellenstapel sind AVL DE zur Verfügung gestellt worden.
Die Werte der Verlustleitungen in verschiedenen Operationspunkten in den aufgestellten Systemen sind an den Partner ISEA weitergegeben worden.

Durch die Auslegung der Brennstoffzellenstapel für die einzelnen UseCases konnten nun die Peripheriekomponenten für den Betrieb der Stapel ermittelt werden. Damit und mit der Recherche verfügbarer BoP-Komponenten können im Folgenden die Systeme zusammengestellt werden.

Nach Gesprächen mit Herstellern von Brennstoffzellen und Herstellern von Einzelkomponenten wie der Bipolarplatte oder der MEA wird die Untersuchung der Skalierung der Bipolarplattenfläche beendet. Die Rückmeldungen zu diesem Zeitpunkt sind, dass eine deutlich größere Bipolarplatte nicht im Fokus steht, da diese, wie weiter oben beschrieben ist, lediglich die Stromstärke des Stapels erhöht und weitere Probleme mit sich bringt, wie die homogene Verteilung der Medien auf der Aktivfläche. Die homogene Verteilung der Medien ist essentiell für die Lebensdauer eines Stapels, da Inhomogenitäten in der Verteilung zu schneller Alterung und Zerstörung der Platten und der Membran führen.
Das Ergebnis aus dieser Untersuchung ist, dass wenn eine höhere Leistung notwendig ist, als von einem Stapel bereitgestellt werden kann, eine elektrische Verschaltung mehrerer Stapel sinnvoll ist. Die kann elektrisch parallel oder in Reihe ausgeführt werden – je nachdem, ob höhere Spannung oder Stromstärke sinnvoll für den Anwendungsfall zusammen mit den Systemkomponenten, vor allem der Leistungselektronik, ist.

AP3.2: Skalierbares Thermomanagement

Das Thermomanagement eines Brennstoffzellenstapels unterscheidet sich zu dem einer Verbrennungskraftmaschine. Die zugeführte Energie in Form von Wasserstoff wird in der Brennstoffzelle in etwa 50% elektrische Arbeit umgewandelt. Diese wird anschließend an die Energiesenke übertragen. Die anderen 50% der zugeführten chemischen Energie werden in Wärme umgewandelt, die abzuführen ist. Davon müssen 40-45% an das Kühlsystem abgegeben werden und nur ca. 5-10% geht in die Umgebung über. Im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor wird ein Großteil der Verlustleistung über das Abgas abgeführt, da die Arbeitstemperatur im Vergleich zu

Brennstoffzelle deutlich höher ist. In Abbildung 2.15 sind die Wärmemengen, die beim Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle anfallen schematisch dargestellt und gegenüber den Wärmemengen eines Dieselmotors gestellt.

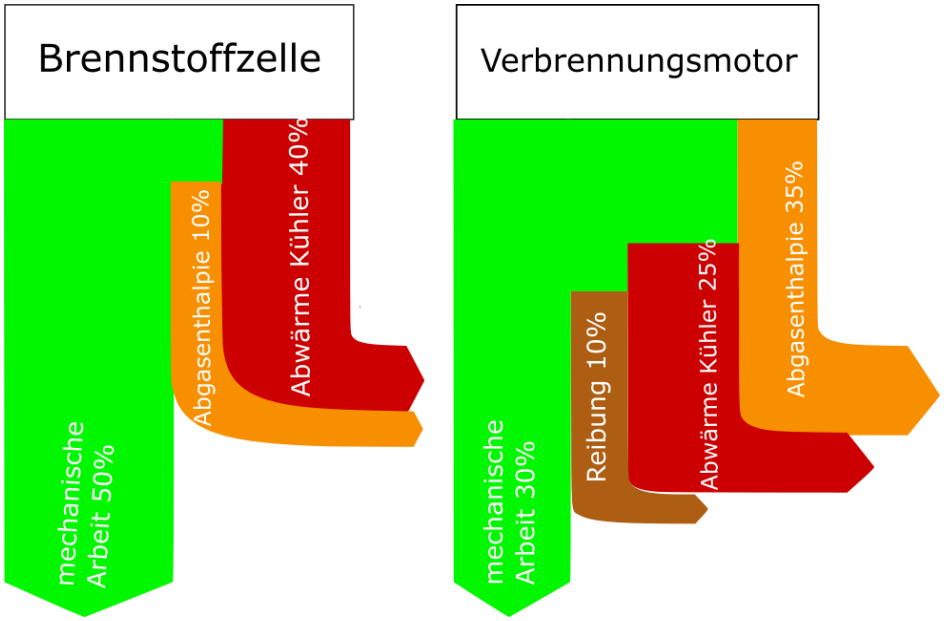


Abbildung 2.15: Wärmemengen Brennstoffzelle / Diesel Verbrennungsmotor

Wie aus den Abbildungen Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12 hervor geht, besteht das Thermomanagement eines Brennstoffzellensystems nicht nur aus dem Kühlsystem des Brennstoffzellenstapels, auch wenn dort die größten Wärmemengen anfallen und abgeführt werden müssen. Zusätzlich zum Hochtemperaturkreis (HT-Kreis), der bei PEM-Brennstoffzellen etwa 85°C seine maximal zugelassene Temperatur hat und für die homogene Kühlverteilung über die Bipolarplatten und den gesamten Stapel einen hohen Massenstrom von über 130 l/min benötigt, müssen manche BoP Komponenten und Leistungselektronik, sowie die komprimierte Luft des Kathodenpfades gekühlt werden. Wenn der UseCase zusammen mit der Batterieauslegung eine aktive Kühlung der Batterie benötigt, kommt dieses Kühlsystem ebenfalls hinzu.
Damit werden wenigstens zwei weitere Kühlkreise benötigt. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Temperaturniveaus der Kühlkreise sowie in den unterschiedlichen Anforderungen bezüglich des Massenstroms in den jeweiligen Kreisen. Die Leistungselektronik und die elektrisch betriebenen BoP Komponenten haben eine maximal zulässige Temperatur von ungefähr 60°C, wogegen eine Batterie maximal 40°C zulässt. Auch die spezielle Anforderung der Brennstoffzelle, wie im Kapitel 2.1.2.2 beschrieben, dass das Kühlmittel welches den Stapel kühlt, nicht elektrisch leitfähig sein darf, schränkt die Kombinationsmöglichkeiten und Modularisierung stark ein.

Die Anforderungen bezüglich der verschiedenen Kühlkreise sind ermittelt worden und zusammen mit der Recherche von marktverfügbaren Komponenten, wie Kühlmittelleitungen und automotive Kreiselpumpen für Kühlmittel abgeglichen.
Diese Informationen sind in Simulationsmodellen eingesetzt worden, um damit die notwendige Anzahl und Kombination der einzelnen Komponenten ermittelt.

AP3.3: Skalierbarer Wasserstoffpfad und -speicher

Das Anodensubsystem sorgt für die Wasserstoffversorgung und -konditionierung der Brennstoffzelle. Die Komponenten des Anodensubsystems bereiten den Wasserstoff in der geeigneten Konzentration, Temperatur und dem entsprechenden Druck auf. Wird eine Rezirkulation eingesetzt, befindet sich diese im Anodensubsystem. Der Wasserstoff ist mit bis zu 700 bar Hochdruck im Tank gespeichert und muss vor Eintritt in den Wasserstoffkreislauf mit einem Dosierventil auf den geforderten Anodeneingangsdruck herabgeregelt werden. Das elektrische Dosierventil wird dabei über das Signal eines Drucksensor gesteuert. Die Regelung des richtigen Druckniveaus erfolgt durch das Öffnen und Schließen des Ventils im 20-ms-Takt oder über eine verstellbare Drosselöffnung. Um eine Schädigung der Membran zu verhindern, dürfen keine hohen Druckunterschiede zwischen Anode und Kathode auftreten. Vor Eintritt in den Brennstoffzellenstapel wird die Gastemperatur des Wasserstoffs angepasst. Ein Wärmetauscher bringt das Brenngas auf eine optimale Betriebstemperatur. Um die Anode mit genügend Wasserstoff zu versorgen, wird mehr Wasserstoff zugeführt als bei der Reaktion verbraucht wird. Damit wird eine Unterversorgung mit Wasserstoff verhindert, was die Alterung der Zellen begünstigt und führt zu einem besseren Austrag von Flüssigwasser. Die Anodenstöchiometrie beschreibt dabei das Verhältnis von zugeführtem und verbrauchtem Wasserstoff und muss immer über dem Wert 1 liegen. Hierbei wird von einer Überstöchiometrie gesprochen.
Der Massenstrom des verbrauchten Wasserstoffs ist abhängig von der Stromstärke I und der Anzahl der Zellen n. Bei der HOR (Hydrogen Oxidation Reaction) an der Anode werden dabei 2 Elektronen ausgetauscht.
Der überschüssige Wasserstoff, der nicht in der Reaktion umgesetzt wird, verbleibt im Anodensystem. Der Wasserstoff wird aktiv mit einem Rezirkulationsgebläse oder passiv mit einer Strahlpumpe zum Anodeneigang befördert und erneut in die Brennstoffzelle eingeleitet. Die Rezirkulation ermöglicht eine Durchmischung der Gase mit dem frischen Speisewasserstoff und führt zu einer Verringerung der Wasserstoffverluste, im Vergleich zu einem Betrieb ohne Rezirkulation. Mit zunehmender Zeit reichert sich Stickstoff und Wasserdampf aus dem Tank und von der Kathodenseite im Anodenkreis an, die den Wasserstoffpartialdruck verringern und zu einer Reaktionshemmung führen. Um die unerwünschten Gase in regelmäßigen Abständen aus dem Andensubsystem zu entfernen, wird ein sogenanntes Purge-Ventil eingesetzt. Über das elektrisch ansteuerbare Purge-Ventil werden die Fremdgase und über ein Drain-Ventil Flüssigwasser ausgeleitet. Die dabei entstehenden Spülverluste des Wasserstoffs liegen üblicherweise zwischen 1 - 2%. Um das Gas von Flüssigwasser zu trennen wird zusätzlich ein Wasserabscheider am Andenausgang integriert.

In der Abbildung 2.16 ist ein schematisches Gesamtsystem eines Brennstoffzellensystems mitsamt aller notwendigen BoP Komponenten dargestellt. Dieses verfügt über eine Mischung aus aktiver und passiver Rezirkulierung. Die Wasserabscheidung findet direkt im Brennstoffzellestapel statt und ist nicht gesondert in der Abbildung zu sehen.

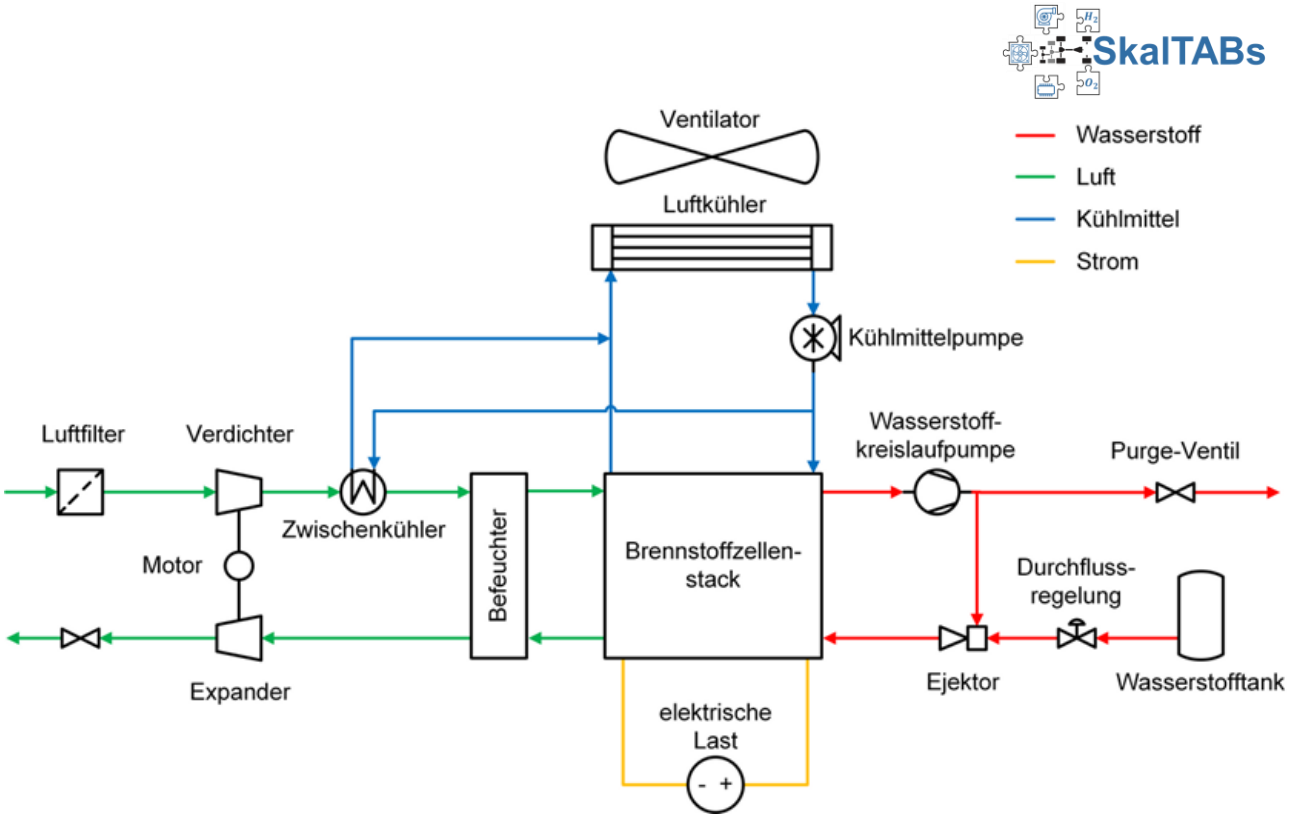


Abbildung 2.16: Brennstoffzellen-Gesamtsystem (aktive und passive Rezirkulierung)

Die Förderung des Gasgemischs im Anodenkreis erfolgt aktiv, elektro-mechanisch oder passiv mittels einer Strahlpumpe. Die unterschiedlichen Konzepte werden im Folgenden erläutert und zusammen mit der Recherche der Hardware die Systeme für die UseCases abgeleitet.
Mechanische Verdichter nutzen elektrische bzw. mechanische Energie, um ein Gas zu fördern und zu verdichten. Für die Konstruktion des Rückführungssystems kommen mehrere Konzepte infrage, die jeweils unterschiedliche Technologien verwenden. Die Wahl des Verdichters hat Einfluss auf das Verhalten des Rückführungssystems und muss für den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegt werden. Das Druckverhältnis π teilt die Verdichter in unterschiedliche Kategorien ein und berechnet sich aus dem Quotienten des Austrittsdrucks p_2 und dem Eintrittsdruck p_1.

Die mechanischen Verdichter lassen sich anhand des Druckverhältnisses in folgende Kategorien einteilen:

Bezeichnung	Druckverhältnis π	Wirkungsweise	Anwendung
Ventilatoren	<1,1	Druckerhöhung durch schnell drehendes Laufrad	bei hohen Förderströmen
Gebläse	1,1…3		
Kompressor	3…50	Druckerhöhung durch Verringerung des Arbeitsraumes	bei hohen Drücken
Hochdruckkompressor	>50		

Die mechanische Verdichtung ist eine ausgereifte Technologie und wird für die Erzeugung von hohen Drücken und hohen Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen verwendet. Dabei kann es durch die bewegten Komponenten zu Geräuschen und Vibrationen sowie Verunreinigungen durch Schmieröl kommen. Grundsätzlich können Verdichter in Verdrängungsverdichter und dynamische Verdichter eingeteilt werden. Zu den verdrängenden Verdichtern gehören Kolbenkompressoren, Scroll-Kompressoren und Schraubenverdichter. Dabei wird das Gas in eine Kammer angesaugt und

verschlossen. Durch eine Verringerung des Volumens wird das Gas verdichtet, bis der erwünschte Druck erreicht ist. Im Vergleich dazu arbeiten dynamische Verdichter mit rotierenden Laufrädern, die das Gas auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigen. Ein Diffusor wandelt die kinetische Energie anschließend in statischen Druck um.

Die aktive Rezirkulation bietet Vorteile in der Regelbarkeit und ist gleichzeitig unabhängig vom Betriebspunkt der Brennstoffzelle. Die elektrische Leistung für das Gebläse muss jedoch von der Brennstoffzelle bereitgestellt werden und erfordert einen höheren Bauraumbedarf. Die Systemkomplexität erhöht zusätzlich die Kosten des Gesamtsystems. In der Regel verbraucht ein Rezirkulationsgebläse zwischen 0,5 - 2 kW bzw. rund 1% der Brennstoffzellenleistung. Die Ansammlung von Wasser an der Anode durch Permeation führt zu einer Befeuchtung des Rezirkualtionsgases. Dies hat positive Auswirkungen auf den Betrieb der Brennstoffzelle, führt bei zu hohen Feuchten jedoch zu einem erhöhten Verschleiß des Rezirkulationsgebläses. Die hohen Anforderungen an die Strömungsmaschinen und das Medium Wasserstoff sorgen dafür, dass nur wenige Rezirkulationsgebläse am Markt zur Verfügung stehen. Durch die geringe Dichte von Wasserstoff müssen die Gebläse ein breites Kennfeld abdecken können. Die parasitäre Energie muss dabei möglichst gering sein, damit der Verbraucher einen hohen Anteil der elektrischen Energie der Brennstoffzelle erhält. Es müssen wasserstoffresistente Materialien verwendet werden, die keine Schadkomponenten enthalten dürfen, da die Brennstoffzelle sensibel auf Verunreinigungen reagiert. Der zuvor geschaltete Wasserabscheider entfernt das entstehende flüssige Produktwasser aus dem Anodenraum, um ein Fluten der Gasverteilungskanäle zu verhindern. Das Gas-Flüssigkeitsgemisch trifft im Einlass auf eine Wand, wodurch sich Tröpfchen bilden. Durch die Schwerkraft sammelt sich das Wasser am Boden des Abscheiders. Ein Sensor misst die Stickstoffkonzentration im Anodenraum und leitet das Gas und das angesammelte Wasser über entsprechende Ventile aus. An der tiefsten Stelle des Wasserabscheiders ist ein Wasserreservoir mit einer Ablassleitung und einem Ablassventil angebracht. Über das Druckregelventil wird der Wasserstoffdruck des Tanks von 700 bar auf einen Systemdruck von 1 - 3 bar reduziert und überstöchiometrisch in die Anode geleitet. Abbildung 2.17 zeigt den schematischen Aufbau einer aktiven Rezirkulation.

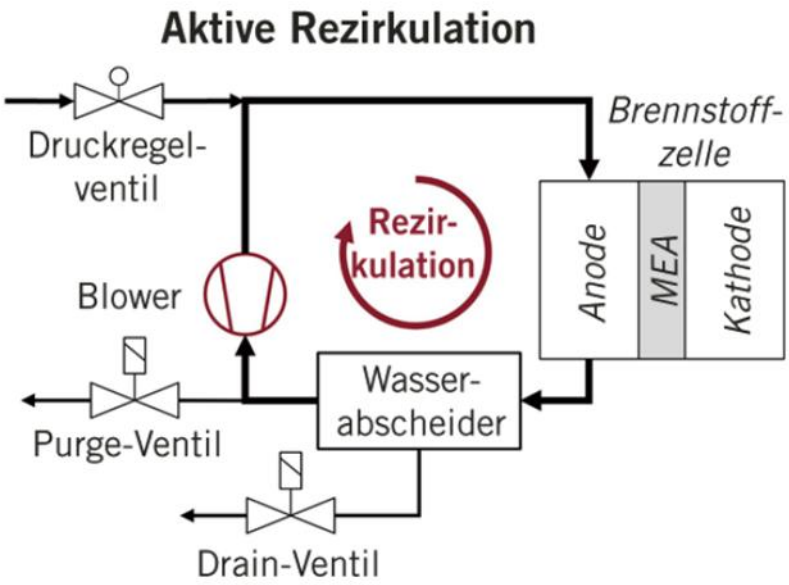


Abbildung 2.17: aktive Rezirkulation

Die passive Rezirkulation nutzt eine sogenannte Strahlpumpe anstelle eines Gebläses, die mit dem Druck aus dem Wasserstofftank eine Sekundärströmung erzeugt und damit den Anodenkreis antreibt. In Abbildung 2.18 ist zu erkennen, wie der Wasserstoff mit hohem Druck über eine Treibdüse eingeleitet wird, sich mit dem angesaugten Medium vermischt und mit hoher Geschwindigkeit ausgeblasen wird. Der Volumenstrom des rezirkulierten Wasserstoffs ist dabei abhängig vom einlassseitigen Treibstrahl. Bei niedrigen Leistungsanforderungen kann eine Strahlpumpe im Niederlastbereich deshalb nur geringe Volumenströme rezirkulieren. Der Vorteil gegenüber mechanischen Verdichtern ist die Verringerung der Komplexität und des Bauraumbedarfs, niedrigere Kosten und die Strahlpumpe benötigt keine parasitäre Energie

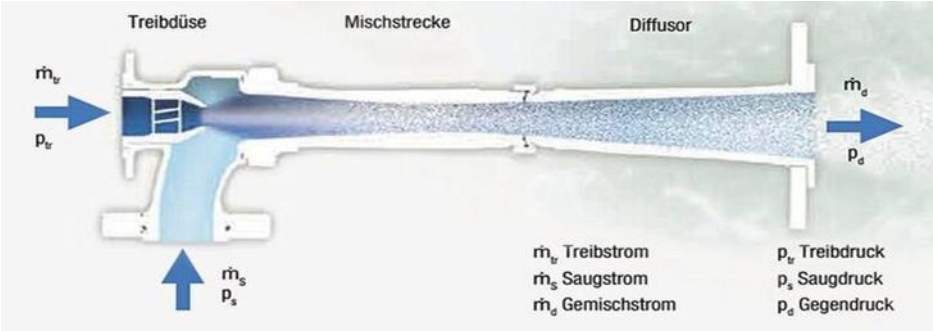


Abbildung 2.18: Aufbau Strahlpumpe

Mittlerweile wurden Änderungen am Injektor eingeführt, die einen guten Betrieb im Niederlastbereich ermöglichen. In einer üblichen Strahlpumpe bleibt das Eingangsventil kontinuierlich offen und stellt den Druck und den Massenstrom über einen variablen Öffnungshub ein. Die Steuerung ist sehr einfach und die Bauteilbelastung gering. Mit diesem Proportionalinjektor wird jedoch ein zu geringer Wasserstoffstrom erzeugt, der keine ausreichende Rezirkulierungsrate bei niedrigen Lasten erreicht. Durch ein elektronisches Injektormanagement, kann das Ventil alternativ auch pulsweitenmodelliert geöffnet und geschlossen werden. So kann die Rezirkulationsrate flexibel eingestellt werden und erreicht dadurch auch in niedrigen Lastpunkten ausreichende Ströme. Die höhere Förderleistung wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle und ein verbessertes Wassermanagement aus. Die Mehrbelastung durch die Taktung anstelle eines variablen Öffnungshubs muss durch konstruktive Maßnahmen ausgeglichen werden. Eine Alternative ist eine Strahlpumpe mit variablem Innendurchmesser, welche jedoch konstruktiv und regelungstechnisch aufwendig umzusetzen ist. Ein pulsweitenmodellierter Injektor erreicht ähnlich hohe Volumenströme und kann beliebige Betriebspunkte einstellen.

Da die Membran nicht vollkommen gasdicht ist - und aufgrund von Partialdruckdifferenzen - gelangt ein Anteil von Stickstoff und Wasser aufgrund von Diffusion von der Kathode zur Anode. Dieser Vorgang wird auch Permeation genannt. Die Betriebsstrategie des Anodensubsystems beinhaltet deshalb regelmäßige Spülvorgänge, um Stickstoff und angesammeltes Wasser abzulassen. Eine Stickstoffanreicherung führt zu einem Brennstoffmangel und hat einen Spannungsabfall des Stacks zu Folge. Um die Zellspannung aufrecht zu erhalten, muss das Spülventil in regelmäßigen Abständen geöffnet werden, wodurch immer etwas Wasserstoff verloren geht. Die Auswirkung von Stickstoff auf den Spannungsabfall hängt dabei von der Temperatur und dem vorliegenden Betriebsdruck ab. Die Permeationsströme von Sauerstoff, Stickstoff und Wasser sind dabei abhängig vom Gasverhältnis λ_{kat} bei niedrigen Stromstärken und dem steigenden Kathodendruck bei höheren Stromstärken. Diffundierter Sauerstoff reagiert an der Anode mit Wasserstoff zu Wasser, was zu einer zusätzlichen Wasseransammlung führt. Das Anodenabgas besteht deshalb aus Wasserstoff, Stickstoff und Wasserdampf. Ab einer Stickstoffkonzentration von über 25% sinkt

die Zellspannung und damit der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Entscheidend für die Spülstrategie ist der Anteil an Stickstoff, der üblicherweise bei Konzentrationen zwischen 10 Vol.% und 30 Vol.% ausgeleitet und mit frischem Wasserstoff gespült werden muss. Dafür wird das Purge Ventil für eine festgelegte Zeit geöffnet. Je höher die Stromstärke und die Anzahl der Zellen, desto öfter wird das Ventil geöffnet. Es gibt auch die Möglichkeit, den Wasserstoff über einen Wasserstoffsensor zu messen, der das Spülventil bei einer Unterschreitung der Wasserstoffgrenze steuert. Die verschiedenen Spülstrategien werden in eine diskontinuierliche und eine kontinuierliche Spülstrategie eingeteilt.

Spülstrategie	Diskontinuierlich			Kontinuierlich
Kriterium zur Ventilöffnung	Spannung	Stromstärke	Wasserstoffgehalt	Durchgehend
Art	Intervall	Intervall	Intervall	Durchgehend
Beschreibung	• Auslösung des Spülvorgangs in Abhängigkeit der Zellspannung	• Stickstoff- und Wasserübergang ist an Stapelstrom gekoppelt • Fest definierte Intervalle	• Wasserstoffgehalt wird am Stapeleingang und Ausgang mit Sensoren gemessen	• Kontinuierlicher Spülstrom in Abhängigkeit des Wasserstoffgehalts am Stapelausgang • Ventilöffnung ist einstellbar
Vorteil	• Einfache Strategie • Keine zusätzlichen Bauteile nötig	• Einfache Strategie • Keine zusätzlichen Bauteile nötig	• Zuverlässige Vermeidung einer Stickstoffanreicherung • Abweichung < 0,4 Vol.%	• Anreicherung von Stickstoff kann zuverlässig vermieden werden • Benötigt nur Wasserstoffsensor und Spülventil • Einfache Implementation
Nachteil	• Spannungsgesteuerte Spülung nicht kontrollierbar → hoher Aufwand • Zellspannung kann auch durch Temperatur, Feuchtigkeit sinken	• Stickstoff kann sich trotzdem über einen kritischen Wert ansammeln	• Zusätzliche Bauteile • Kosten	• Spüldurchsatz kann nicht genau bestimmt werden • Gasdurchflussmessung ist aufwendig und kostenintensiv

Für die drei Use Cases sind unterschiedliche Brennstoffzellenleistungen erforderlich. Die zu erwartenden Massenströme und Volumenströme am Anodenausgang sind abhängig von der Brennstoffzellenleistung und damit von der Anzahl der verwendeten Zellen. Das Vorfeldfahrzeug erreicht die Leistung von 35 kW bereits mit 110 Zellen, die Kehrmaschine mit 80 kW benötigt 245 Zellen. Für das Löschfahrzeug werden drei 80 kW-Brennstoffzellen mit jeweils 245 Zellen verwendet, um die erforderliche Leistung bereitzustellen. Eine Übersicht über die 3 Brennstoffzellen bietet die folgende Tabelle.

	Vorfeldfahrzeug	Kehrmaschine	Löschfahrzeug
Leistung	35 kW	80 kW	3*80 kW = 240 kW
Anzahl der Brennstoffzellen	1	1	3
Anzahl der Zellen pro Brennstoffzelle	110	245	245
Aktive Zellfläche einer Einzelzelle	260 cm²	260 cm²	260 cm²

Nach der EU-Verordnung EG 79/2009 müssen Grenzwerte für eine Leckage bei wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen eingehalten werden. Wasserstoffführende Bauteile müssen ordnungsgemäß und sicher funktionieren und den im Betrieb auftretenden elektrischen, mechanischen, thermischen und chemischen Einflüssen sicher standhalten, ohne undicht zu werden oder sich sichtbar zu verformen. Des Weiteren muss die Strömungsrichtung des Wasserstoffs auf den führenden Bauteilen gekennzeichnet werden. Bauteile wie das Rezirkulationsgebläse, Druckventile und Verbindungen zum Wasserstoffspeicher, die komprimierten Wasserstoff führen, müssen sich einer festgelegten Prüfung unterziehen. Dazu gehören Werkstoffprüfungen, Dauerprüfungen, Druckzyklusprüfungen sowie Prüfung zur Korrosionsbeständigkeit und innerer als auch äußerer Dichtheit. Zur Überprüfung der Leckagesicherheit sind Wasserstoffsensoren geeignet, um austretenden Wasserstoff frühzeitig zu erkennen.

Für den Anodenpfad einer einzelnen Brennstoffzelle ist ein Rezirkulationsgebläse, ein Wasserabscheider sowie ein Purge und ein Drain-Ventil nötig. Das Rezirkulationsgebläse muss dabei auf die zu erwartenden Volumenströme und Druckverluste abgestimmt werden. Flüssigwasser wird über das Drain-Ventil aus dem Wasserabscheider entfernt und Stickstoff und andere Inertgase über das Purge-Ventil abgelassen. Frisch zugeführter Wasserstoff aus dem Drucktank muss über ein Druckminderungsventil auf den Betriebsdruck an der Anode reduziert werden. Das rezirkulierte Gasgemisch wird anschließend mit dem frisch zugeführten Wasserstoff in die Brennstoffzelle geleitet. Der Aufbau der Rezirkulation im Einzelbetrieb ist schematisch in Abbildung 2.19 dargestellt.

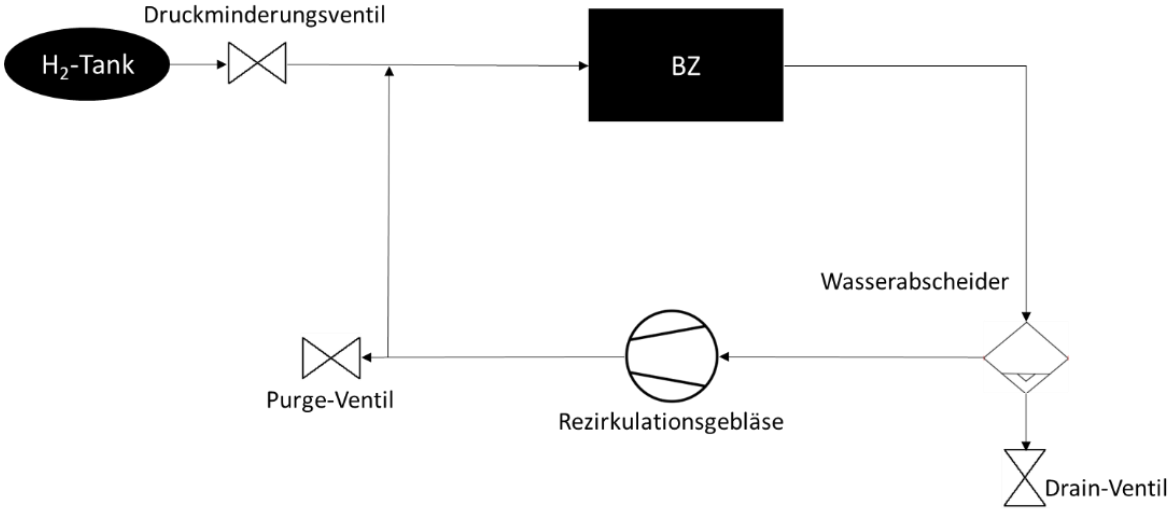


Abbildung 2.19: Einzelbetrieb Rezirkulation

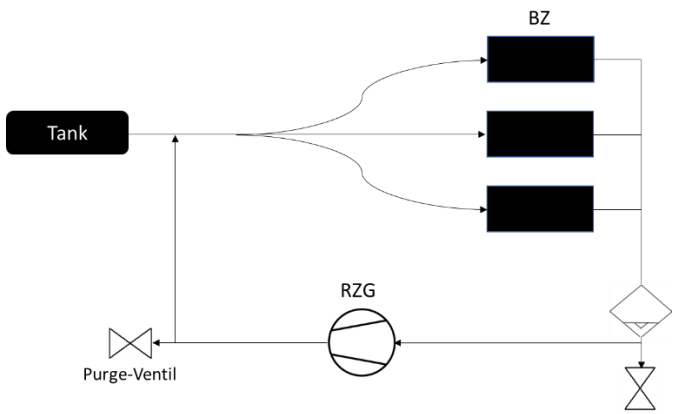
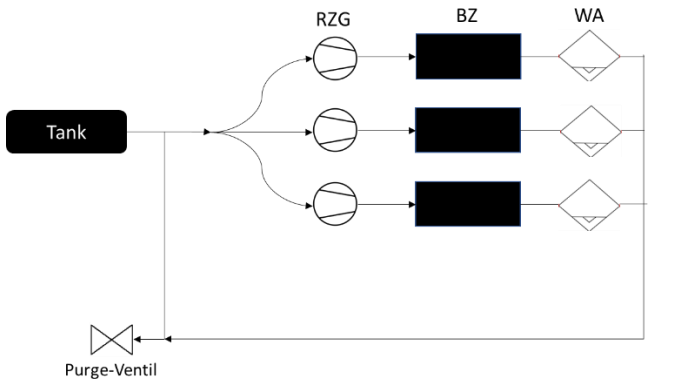
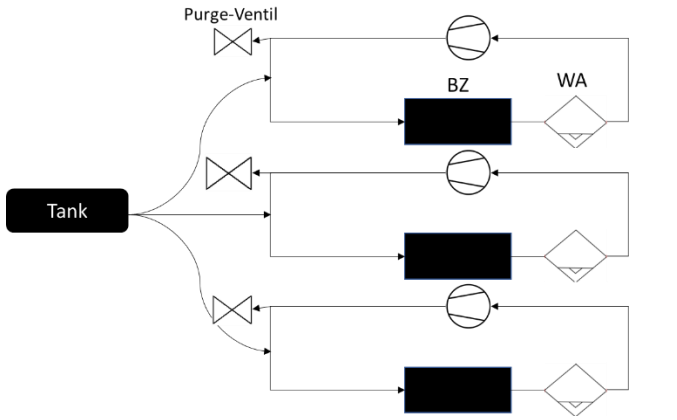
Die Rezirkulation skalierbar auszulegen ist sinnvoll, um Brennstoffzellen unterschiedlicher Größe damit betrieben zu können. In wie weit die Komponenten skalierbar sind, wird im Folgenden

erläutert. Durch die Skalierung können unterschiedliche Brennstoffzellen mit derselben Rezirkulation betrieben werden. Dies wird beispielsweise für einen Prüfstand benötigt. Der eingesetzte Wasserabscheider ist bis 80 kW ohne hohe Druckverluste einsetzbar. Für Brennstoffzellen mit weniger Leistung sinkt der Massenstrom und damit die Druckverluste im Wasserabscheider noch weiter. Roots-Gebläse und Seitenkanalverdichter verfügen im Gegensatz zu radialen und axialen Turboverdichtern stabile Betriebskennlinien im gesamten Betriebsbereich. Es gibt keine Pumpgrenze, die einen Seitenkanalverdichter im unteren Lastbereich begrenzt. Dadurch ist es möglich mit größeren Gebläsen auch kleinere Brennstoffzellen zu versorgen.

Bauteil	Stückzahl	Skalierfähigkeit
Wasserabscheider	1	• Der verwendete Wasserabscheider ist sowohl für 35 kW als auch für 80 kW einsetzbar • Ab einem Massenstrom von 31 g/s wird der Druckverlust zu hoch und es empfiehlt sich einen zweiten Wasserabscheider zu verwenden
Gebläse	1	• Ein Seitenkanalgebläse kann den gesamten Betriebsbereich von sehr geringen bis zum maximalen Volumenstrom abdecken • Pierburg HRB 2500 für Volumenströme von 0- 66 m^3/h anwendbar
Ventile	2	• kürzere Purge- und Drain-Zyklen bei großen Brennstoffzellen • aber keine zusätzlichen Ventile erforderlich
Leitung	1	• höhere Druckanforderung und Strömungsgeschwindigkeiten bei größeren Brennstoffzellen • Beständigkeit gegen deionisiertes Wasser und Wasserstoff erforderlich

Es werden 3 Möglichkeiten untersucht, die aktive Rezirkulation für den zeitgleichen Betrieb von zwei bzw. drei 80 kW- Brennstoffzellen auszulegen. Für Leistungen über 80 kW muss das System dabei skalierbar auf unterschiedliche Brennstoffzellenleistungen anwendbar sein. Der entscheidende Faktor ist das verwendete Rezirkulationsgebläse und die Anzahl an Wasserabscheidern. Die Gebläseleistung halbiert sich, wenn an jedem Anodenausgang einer Brennstoffzelle ein Wasserabscheider angebracht wird, statt einen Wasserabscheider für alle Brennstoffzellen zu verwenden.

Welche Systemkonfiguration sich optimal für unterschiedliche Brennstoffzellenleistungsklassen eignet, wird im folgenden Abschnitt erläutert. Die drei zu untersuchenden Ansätze sind schematisch in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Methode	Erklärung	Schema
1	1 Rezirkulationsgebläse mit Einzelstrang	
2	3 Rezirkulationsgebläse mit Einzelstrang	
3	3 Rezirkulationsgebläse mit Mehrfachstrang	

Nach Methode 1 muss ein einzelnes Rezirkulationsgebläse die Anforderungen von zwei oder drei Brennstoffzellen erfüllen. Des Weiteren steigen die Druckverluste im Wasserabscheider exponentiell mit höherem Massenstrom.
Nach Methode 2 können drei kleinere Rezirkulationsgebläse eingesetzt werden, die jeweils nur den Volumenstrom von einer Brennstoffzelle bereitstellen müssen. Jedoch ist zu beachten, dass sich der Volumenstrom in der Rückführungsleitung verdreifacht und damit die Strömungsgeschwindigkeit deutlich erhöht. Diese geht quadratisch in die Berechnungsformel mit ein, wodurch sich der Druckverlust in der Rohrleitung im Volllastbetrieb nicht nur verdreifacht, sondern mehr als versechsfacht. Die Druckverluste in der Leitung liegen bei drei Brennstoffzellen dennoch unter dem Druckverlust, der durch die Wasserabscheider verursacht wird. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass sich die Volumenströme gleichmäßig auf alle 3 Brennstoffzellen verteilen. Dafür müssen zusätzliche Dosierventile angebracht werden oder eine konstruktive Lösung erarbeitet werden.
In Methode 3 wird jede Brennstoffzelle mit einem separaten Anoden-Rezirkulationssystem versorgt.

Dadurch ist eine ausreichende und gleichmäßige Medienversorgung gewährleistet. Über ein Dosierventil kann der Wasserstoff auf die drei Brennstoffzellen verteilt werden. Mit dieser Methode müssen so viele Rezirkulationsgebläse und Wasserabscheider eingebaut werden, wie die Anzahl an Brennstoffzellen. Es gibt keine Möglichkeit Komponenten und damit Kosten zu sparen. Aufgrund der zusätzlichen Rohleitungen - die jedes System benötigt -, ist bei dieser Methode ein hoher Platzbedarf erforderlich. Bei Anwendungen in einem Nutzfahrzeug sind die Bauraumkapazitäten meist gering. Da jede Brennstoffzelle durch ein Rezirkulationsgebläse und einen Wasserabscheider versorgt wird, können dieselben Komponenten wie in einem Einzelstrang verwendet werden.

Wasserstoffspeicher

Es gibt unterschiedliche Anforderungen an Wasserstoffspeicher, die sich weltweit an den Vorgaben des US Department of Energy orientieren. Die wichtigsten technischen Ziele für die Wasserstoffspeicherung in mobilen Anwendungen lauten:

- Begrenzung der H2-Verluste, die z. B. durch Permeation von H2 durch die Speicherwand entstehen.
- Hohe gravimetrische und volumetrische Speicherdichte, d. h. gespeicherte H2- Masse bezogen auf das Gewicht bzw. das Volumen des Speichers.
- Fahrstrecke größer als 500 km zwischen zwei Tankstopps. Dafür ergibt sich eine notwendige H2-Speichermenge von mindestens 5 kg.
- Vollständige Betankung innerhalb weniger Minuten.
- Sicherheit im Betrieb und bei Unfällen (z. B. bei Freisetzung von H2 hinsichtlich der Brennbarkeit und Toxizität des Speichermaterials.)

Druckgasspeicher

Wasserstoff wird bei hohem Druck und Umgebungstemperatur gasförmig in Tanks gespeichert. In mobilen Anwendungen wie in Kraftfahrzeugen das Gewicht und der Platzbedarf eine wichtige Rolle. Druckgasspeicher sind die am häufigsten verwendeten Wasserstoffspeicher im Automobilbereich. Mit einem Druck von 700bar in den Wasserstofftanks, können Brennstoffzellenfahrzeuge mehrere hundert Kilometer weit fahren. Die Reichweite ist auf demselben Niveau wie die eines herkömmlichen Verbrennerfahrzeugs. Druckgasspeicher bestehen meist aus einem dünnen Innenbehälter aus Aluminium oder Polyethylen und einem Kohle- oder Glasfaserverstärktem Außenmantel. Dadurch reduziert sich das Gewicht deutlich im Vergleich zu Drucktanks aus Stahl.

Flüssiggasspeicher

Neben gasförmigen Speichertechnologien kann Wasserstoff bei geringem Überdruck und sehr niedrigen Temperaturen auch flüssig in Tanks gespeichert werden. Wasserstoff verflüssigt sich bei einer Temperatur von -253°C und besitzt in diesem Zustand die höchste Speicherdichte. Flüssiger Wasserstoff besitzt eine Energiedichte von 2,4 kWh/l. Um den Wasserstoff auf dieser Temperatur halten zu können werden spezielle Kryotanks benötigt. Durch die sehr hohen Isolationseigenschaften werden geringe Verluste durch Erwärmung erzielt. Dennoch lassen sich die Abdampfverluste nicht vermeiden. Der Wasserstofftank muss zusätzlich isoliert werden, was wiederum einen höheren Platzbedarf zur Folge hat. Verdampfter Wasserstoff muss aus dem Druckbehälter ausgeleitet werden um ein Überdruck zu verhindern. Der tägliche Abdampfungsverlust liegt dabei im einstelligen Prozentbereich.

Adsorptionsspeicherung

Die Adsorptionsspeicherung gehört zu den chemischen Wasserstoffspeicherarten. Der Wasserstoff wird hierbei in Materialien mit großer innerer Fläche wie z.B. poröser Kohlenstoff oder Zeolithe eingelagert. Durch die gezielte Kombination verschiedener Bausteine, kann die Speicherkapazität aufgrund vergrößerter innerer Fläche erweitert werden. Allerdings muss dem System bei Entnahme Wärme zugeführt und beim betanken Wärme abgeführt werden, da bei Raumtemperatur nur relativ wenig Wasserstoff angelagert werden kann. Das erfordert ein spezifisches Speichermanagement. Der Nachteil bei diesem System liegt darin, dass die Entladung verhältnismäßig langsam geschieht und dass dieses System aufgrund seines Aufbaus zu schwer für den mobilen Einsatz ist.

Chemischer Metallhydridspeicher (Form eines Adsorptionsspeichers)

In einem Metallhydridspeicher diffundiert Wasserstoff in metallischen Legierungen. Die Wasserstoffatome werden dabei in den Zwischengitterplätzen der Metalle eingelagert. Dabei können Metallhydride zwischen 2 bis 5 Gewichtsprozent Wasserstoff aufnehmen. Die gravimetrische Energiedichte ist aufgrund des Eigengewichts der Metalllegierung sehr gering die volumetrische hingegen hoch. Aufgrund des hohen Gewichts werden Metallhydridspeicher nur in Spezialfällen wie beispielsweise in U-Booten verwendet. Während der Einlagerung kommt es zu einer Erwärmung des Speichers durch Energiefreisetzung, die bei der Entladung wieder zugeführt werden muss.

Liquid Organic Hydrogen Carrier (Chemisch-Katalysatorischer Speicher)

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) ist eine Speichertechnologie, die den Wasserstoff in einem flüssigen, organischen Wasserstoffträger anlagert. Dies kann zum Beispiel ein Öl sein, in dem der Wasserstoff langfristig gespeichert und per Schiff, Zug oder LKW in großen Mengen transportiert werden kann. Das Öl bindet Wasserstoff chemisch durch eine katalytische Reaktion. Der gespeicherte Wasserstoff kann dann ähnlich wie Dieseltreibstoff gehandhabt werden. Diese Technologie eignet sich besonders für die Speicherung und den Transport von großen Wasserstoffmengen. Der Wasserstoff kann nach Bedarf anschließend wieder vom Trägermedium getrennt und in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie und Wärme umgewandelt werden.

In Abbildung 2.20 ist der Vergleich der volumetrischen und gravimetrischen Speicherdichte von Wasserstoffspeichern gegenüber Benzin und Erdgas dargestellt.

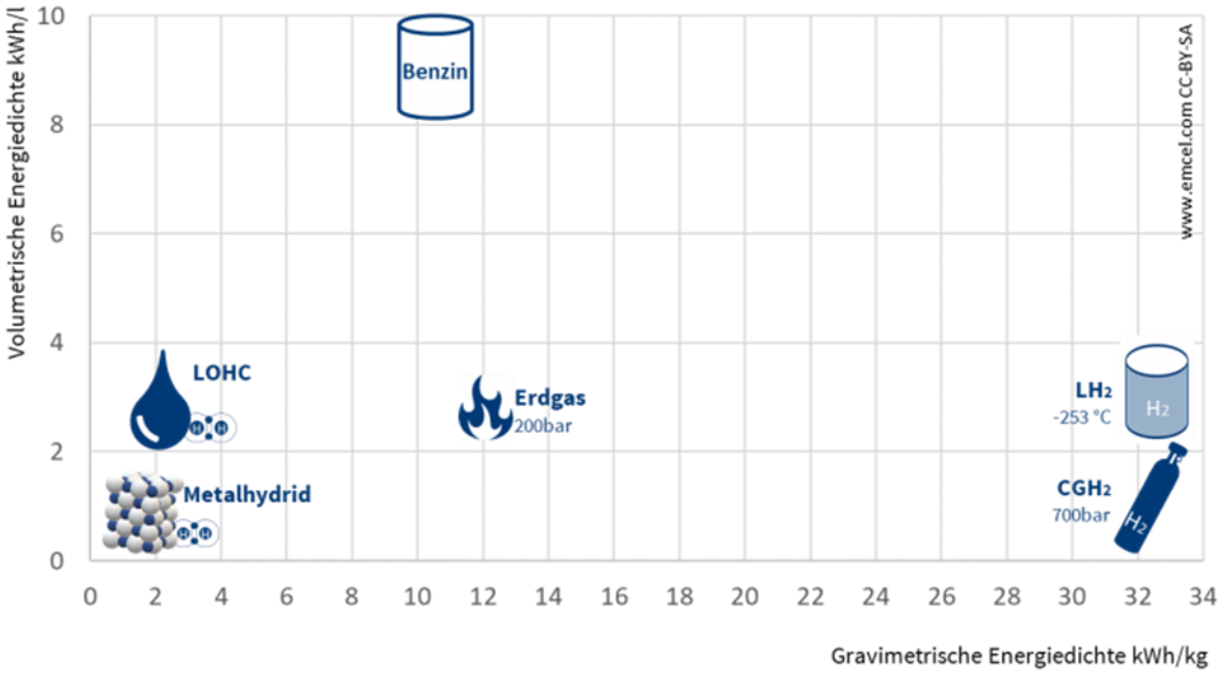


Abbildung 2.20: Energiedichte H2-Speicher

AP3.4: Skalierbarer Luftpfad inkl. Hochvolt-Luftverdichter

Das Kathoden-Subsystem einer Brennstoffzelle umfasst alle luftseitigen Komponenten, Stellglieder, Sensoren und die zugehörigen Medienführungen. Zu den Komponenten der Eingangsseite eines Stacks zählen der Luftfilter, Schalldämpfer, Luftmassenmesser, Verdichter, ein Ladeluftkühler und eine Befeuchtungseinheit. Im Luft-Pfad befinden sich diverse Stellglieder, wie Bypass und Rückschlagventile und eine Einspeisung des Purge-Vorgangs. Alternativ kann zur Verbesserung des Wirkungsgrads ein Verdichter mit einer Abgasturbine verwendet werden. In Abbildung 2.21 ist das Blockschaltbild des Kathodenpfads des Brennstoffzellensystemprüfstands zu sehen.

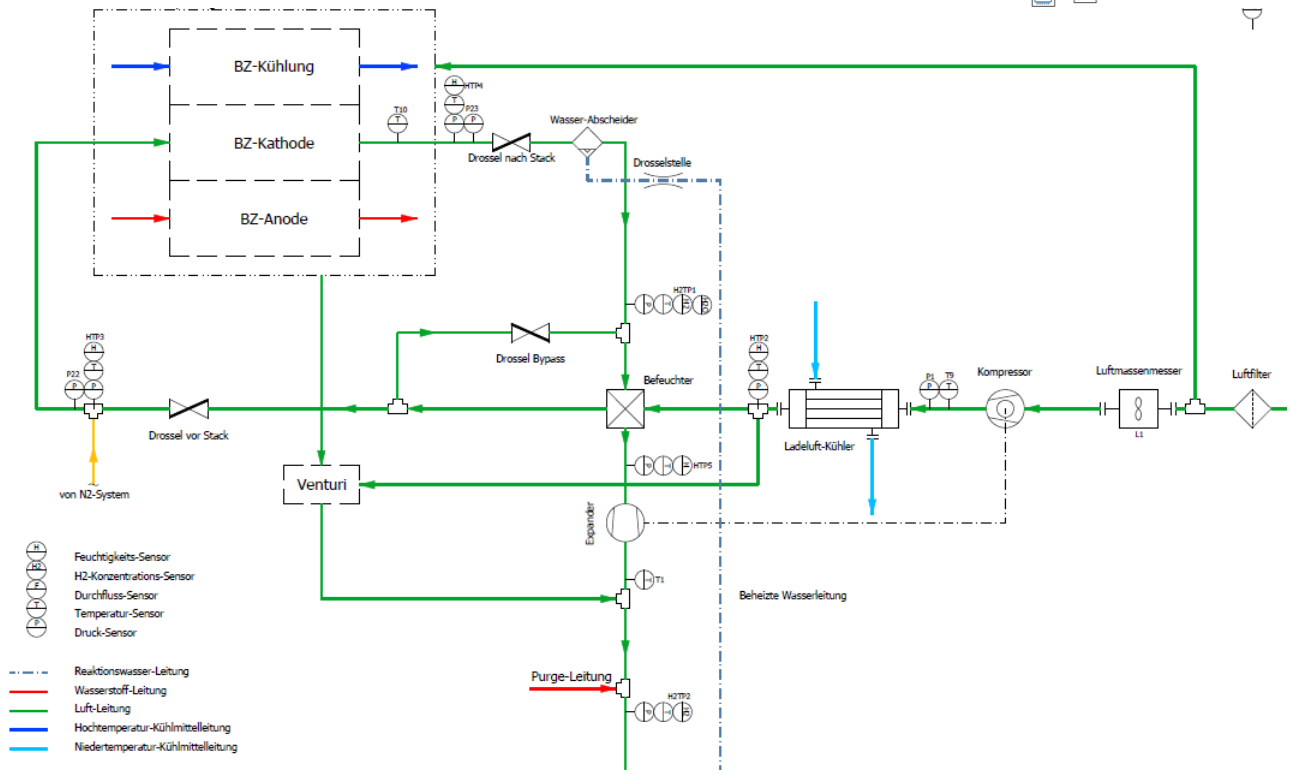


Abbildung 2.21: P&ID Kathodenpfad

Die durch den Verdichter angesaugte Luft gelangt über einen Luftfilter, einen LMM und einen Schalldämpfer in den Kathoden-Pfad. Die verdichtete Luft wird durch einen Wärmetauscher abgekühlt und gelangt zu der nachfolgenden Befeuchtungseinheit. Da der Feuchtehaushalt in der Brennstoffzelle äußerst wichtig ist und sich maßgeblich auf Performance und Lebensdauer der Brennstoffzelle auswirkt, ist eine zusätzliche Befeuchtung bei trockener und warmer Umgebungsluft von großer Wichtigkeit. Nach der Reaktion in der Zelle gelangt die feuchte warme Luft in den Abgastrakt. Dort kann bei Bedarf das entstandene Wasser durch verschiedene Verfahren wieder dem Frischgas zugeführt werden. Es bietet sich zudem der Einsatz einer Turbine an, die dem Abgas ein Teil der Enthalpie entnimmt und somit den absoluten Wirkungsgrad des Systems verbessert. Dabei ist darauf zu achten, das auskondensierte Wasser durch einen Wasserabscheider abzuführen, um die Turbinenschaufeln von Wasserschlag zu schützen. Es wird eine relative Feuchtigkeit von <90% empfohlen. Um den Druckaufbau des Verdichters zu gewährleisten oder alternativ mehrere Brennstoffzellen parallel anzuordnen, müssen Drosselventile verbaut werden. Schließlich wird die feuchte Abgasluft über einen erneuten Schalldämpfer an die Umgebung abgegeben.

Aus der Leistung des Brennstoffzellenstapels der UseCases ist die benötigte Menge an Brenngas ermittelt worden. Daraus erfolgt die Berechnung des Luftbedarfs bzw. des Sauerstoffbedarfs um diese Menge Brenngas umzusetzen. Diese Werte sind an den Partner Pankl weitergegeben worden, um die Entwicklung des elektrischen Luftverdichters für die UseCases beginnen zu können.
Zusammen mit Pankl und aus der berechneten Medienversorgung der Kathode sind marktverfügbare Komponenten für die Kathodensysteme ausgewählt worden.

Um Brennstoffzellensysteme mit skalierbarer Leistung betreiben zu können sind grundlegend zwei Varianten möglich:

1. Je ein unabhängiges Kathodensubsystem für jeden Brennstoffzellenstapel
2. Ein gemeinsames zentrales Kathodensubsystem für mehrere Brennstoffzellenstapel

In den folgenden zwei Tabellen werden die Vor- und Nachteile dieser Varianten aufgelistet.
Variante 1:

Vorteile	Nachteile
Kleinere Komponenten	Viele Komponenten
Keine Verteilung und Sammlung der Medien notwendig	Mehr Kosten
Unabhängiger Betrieb möglich	Mehr Verbraucher
Verschiedene Brennstoffzellen möglich	Package-Probleme durch mehr Leitungen und Komponenten
Ausfall von einem Strang unterbricht nicht gesamte Energieversorgung	Höhere Strömungsverluste durch mehr Rohrleitungen

Variante 2:

Vorteile	Nachteile
Weniger Komponenten durch gemeinsame Nutzung	Höhere Leistungsanforderungen an Komponenten
Package günstiger	Entwicklung einer gleichmäßigen Luftstromaufteilung notwendig

AP3.5: Brennstoffzellen-Steuerungs- und Überwachungselektronik

Ein Antriebsstrang, der mit einem Brennstoffzellenmodul betrieben wird, muss so gesteuert werden, dass Druck und Durchfluss des Brennstoffs (Wasserstoff) auf der Anodenseite, des Oxidationsmittels Sauerstoff (in der Regel Luft) auf der Kathodenseite sowie der Kühlflüssigkeit (Glykol-Wasser-Gemisch) für die Regelung der erforderlichen Leistung geeignet sind. Dazu muss eine Steuerungshardware verwendet werden, die alle Sensordaten ausliest, sie mit einer Regelungsstrategie verarbeitet und die verarbeitete Leistung auf alle Aktoren überträgt, um alle wichtigen Parameter im System präzise zu steuern. Bei der Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff wird es aufgrund seiner hohen Entflammbarkeit selbst in kleinen Mengen noch kritischer, das Brennstoffzellenmodul auf eine sehr sichere Weise zu betreiben, was eine robuste Regelungssoftware erforderlich macht.
Da die Bedeutung der Steuerungshardware erkannt wurde, muss eine für den Brennstoffzellenprüfstand geeignete Steuerungshardware ausgewählt werden. Daher wurde das Layout der Steuerungsarchitektur mit allen notwendigen Sensoren und Aktoren entwickelt, um den Brennstoffzellenprüfstand sicher und zuverlässig zu betreiben. Das Layout der Steuerungsarchitektur der von GreenIng entwickelten Brennstoffzellen- Prüfstand ist in Abbildung 2.22 unten zu sehen. Alle Sensoren und Aktoren mit ihren Kommunikationsschnittstellen wurden beschrieben, um die Komplexität des Systems zu verstehen. Als Regelungshardware wurde die dSPACE-Regelungshardware (Microautobox III) zusammen mit der dSPACE RapidPro Power Unit für die Regelung der Aktoren mit hohem Stromverbrauch eingesetzt.

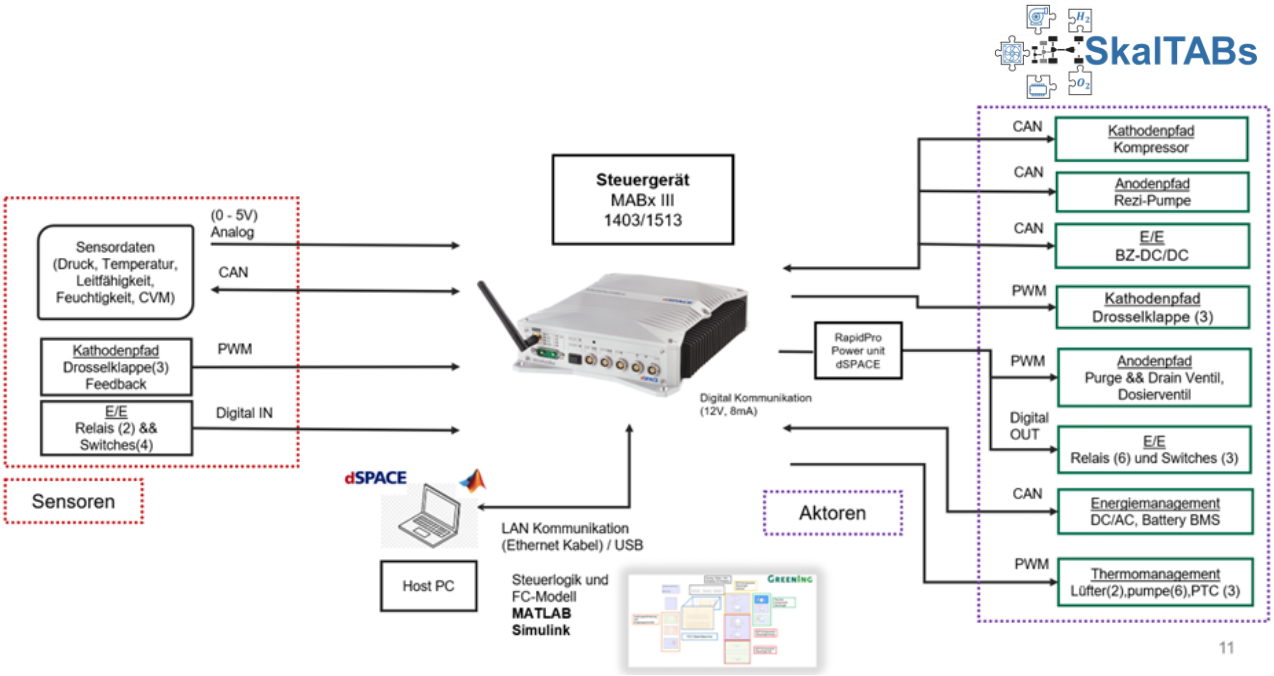


Abbildung 2.22: Steuerungsarchitektur V2

Im Hinblick auf die Skalierbarkeit der Regelungshardware bietet die Microautobox III von dSPACE Platz für weitere Schnittstellen zur Anpassung an die höhere Komplexität und die benötigte Rechenleistung. Darüber hinaus hat dSPACE die Möglichkeit, ein weiteres Regelungshardware-Modul hinzuzufügen, um den höheren Verarbeitungsbedarf sowie weitere I/O-Schnittstellen anzupassen.

Nach der Festlegung des Regelungslayouts und der erforderlichen Regelungshardware-Komponenten wurde im nächsten Schritt die Strategie für die Entwicklung der Regelungssoftware festgelegt. Für den Brennstoffzellenprüfstand wurde die Steuerungssoftware in der MATLAB/Simulink Software von MathWorks entwickelt. Die Software wurde in modularen Softwarekomponenten entwickelt, um alle funktionalen Anforderungen an den Wasserstoffffluss und die Sicherheit, den Luftfluss, das Wärmemanagement, die Sicherheitsüberwachung und das Energiemanagement des Systems zu erfüllen. Größter Wert wurde auf die Überwachung aller Schwellenwerte aller wichtigen Parameter für die Funktions- und Betriebssicherheit gelegt. Die implementierte Kontrollstrategie wurde zunächst mit einem physikalischen Modell der Brennstoffzelle validiert, das mit der Simscape Toolbox in Simulink entwickelt wurde.

Nach der Validierung des Teilsystems wurde die validierte Software in die Steuerungshardware für das Rapid Control Prototyping (RCP) mit allen physikalischen Komponenten eingespielt. Die Validierung der Software erfolgte schrittweise, beginnend mit der Prüfung der Sensoren und Aktoren. Nach der manuellen Validierung der Funktionalität aller Nieder- und Hochspannungskomponenten sowie der Gasdichtigkeit des Systems wurde schließlich die automatische Steuerung implementiert. Die Software wurde für das Anfahren, den Normalbetrieb und das Abschalten des Brennstoffzellensystems über eine angemessene Anzahl von Zyklen auf ihre Robustheit und ihre Fähigkeit zur Fehlerbehandlung getestet. Das Brennstoffzellensystem wurde für verschiedene Betriebspunkte (15, 30, 45 kW) getestet und die Ergebnisse wurden dokumentiert.

2.1.2.4 AP4: Komponenten-Erforschung skalierbarer Powertrain

In den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 hat GreenIng die Partner mit Informationen zum Betrieb von Brennstoffzellensystemen versorgt und an den regelmäßigen Besprechungen teilgenommen. Es sind von Seiten GreenIng keine präsentierbaren Ergebnisse erzielt worden.

AP4.3: Stützbatterie

Brennstoffzellensysteme benötigen in der Regel für den Betrieb zusätzlich eine Batterie um den Hochfahrprozess, sowie den Prozess des Herunterfahrens mit Energie versorgen zu können, die zu diesen Zeitpunkten nicht vom Brennstoffzellensystem bereitgestellt werden kann. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb, da diese nicht stationär, sondern äußerst dynamisch betrieben werden. Die elektrische Energie, die durch den chemischen Prozess im Brennstoffzellenstapel erzeugt wird, muss auch vom dahinter liegenden System abgenommen werden. Da Fahrzeuge die Energiebereitstellung nach dem Verkehr bzw. dem Einsatzzweck anpassen können müssen, ist es nachvollziehbar, dass von der maximalen Leistungsabnahme abrupt auf den Minimalbetreib herabgeregelt werden muss. Die chemischen Prozesse können aber nur so schnell geregelt werden, wie der Abbau des Drucks oder Abreicherung der Brenngaskonzentration geregelt werden kann. Ebenso wird beim Anfahren mit hoher Leistung das gegenteilige Szenario abgerufen – plötzliche hohe Energieanfrage bei noch nicht ausreichender Medienversorgung. In beiden Fällen muss die Batterie als Puffer oder als Stützbatterie einspringen und die überschüssige Energie aufnehmen oder den Mehrbedarf speisen.

GreenIng hat hier die Entwicklung der Stützbatterie im Projekt ohne zusätzliches Budget übernommen, da der ehemalige Partner STABIL nach Bewilligung des Projekts abgesprungen ist. Somit ist die Erstellung der Skalierungsmatrix und die Ableitung der Anforderungen an die Stützbatterie abhängig der UseCases zusammen mit den Ergebnissen aus AP1.2 erfolgt. Aus diesen Ergebnissen sind die Anforderungen an das Thermomanagement der Stützbatterien für die UseCases abgeleitet worden und AVL zur Verfügung gestellt worden.

Für den Prüfstand ist eine Stützbatterie mit einem Spannungsniveaus von 400 VDC aus GreenIng-Standard-Batteriemodulen entwickelt worden. Die Wahl des Spannungsniveaus kommt aus den Anforderungen der BoP Komponenten, da diese damit betrieben werden müssen. Die Kapazität der Stützbatterie für den Prüfstand wurde derart gewählt, dass eine Leistung von 80 kW bis zu einer Stunde lang aufgenommen werden kann. Wie auf der Abbildung 2.23 zu sehen ist, ist die Stützbatterie für den Prüfstand so ausgelegt worden, dass auch die doppelte Kapazität aufgebaut werden kann. Die Nutzung der der GreenIng-Standard-Batteriemodule erfüllt bereits die Anforderung der Skalierbarkeit und kann allen Raumrichtungen skaliert werden. Zusätzlich sind innerhalb eines Moduls jegliche Verschaltung möglich. Somit kann in nahezu jedem Bauraum jede Anforderung bezüglich Spannungslage und Leistung realisiert werden.

Abbildung 2.23: Energiesenke von Prüfstand

AP4.4: Thermomanagement und Modultechnologie zur Erzielung der geforderten NFZ-Lebensdauer

Im Arbeitspaket 4.4 hat GreenIng die Entwicklung des Thermomanagements und der Modulstrategie hinsichtlich Lebensdauer begleitet. Von Seiten GreenIng sind keine präsentierbaren Ergebnisse erzielt worden.

AP4.5: Bipolarplatte

Wie bereits im AP3.1 beschrieben ist die Rückmeldung der Hersteller zum Thema großformatige Bipolarplatten nicht positiv, da die Vorteile der Skalierung der Bipolarplattenfläche hinsichtlich der Bauraumausnutzung der Erhöhung der Stromstärke je Stack bei Beibehaltung oder Reduzierung der Spannungslage durch die schwierige Aufrechterhaltung der homogenen Verteilung der Medien H_2, Luft und Kühlmittel (Temperaturverteilung über Platte) der sicheren Funktion der Brennstoffzelle entgegensteht.

Diese Untersuchung ist nach den Rückmeldungen der Hersteller und den beschriebenen Erkenntnissen abgebrochen worden.

2.1.2.5 AP5: Demonstration und Validierung

AP5.1: Konzeption und Aufbau der Komponenten- und Systemprüfstände

Aus den gewonnenen Ergebnissen des Arbeitspakets 3 sind für die Medienversorgung skalierbare Systeme entwickelt worden. Im Folgenden werden diese Systeme vorgestellt.

Die Abbildung 2.24 zeigt die Variante eines Kathodensubsystems, welches eine zentrale Luftversorgung für mehrere Brennstoffzellenstapel realisiert. Hierbei wird ein Verteilerrohr eingesetzt, welches die aufbereitete Prozessluft gleichmäßig verteilen soll, um eine gleiche Verteilung in alle angeschlossenen Stapel zu gewährleisten.

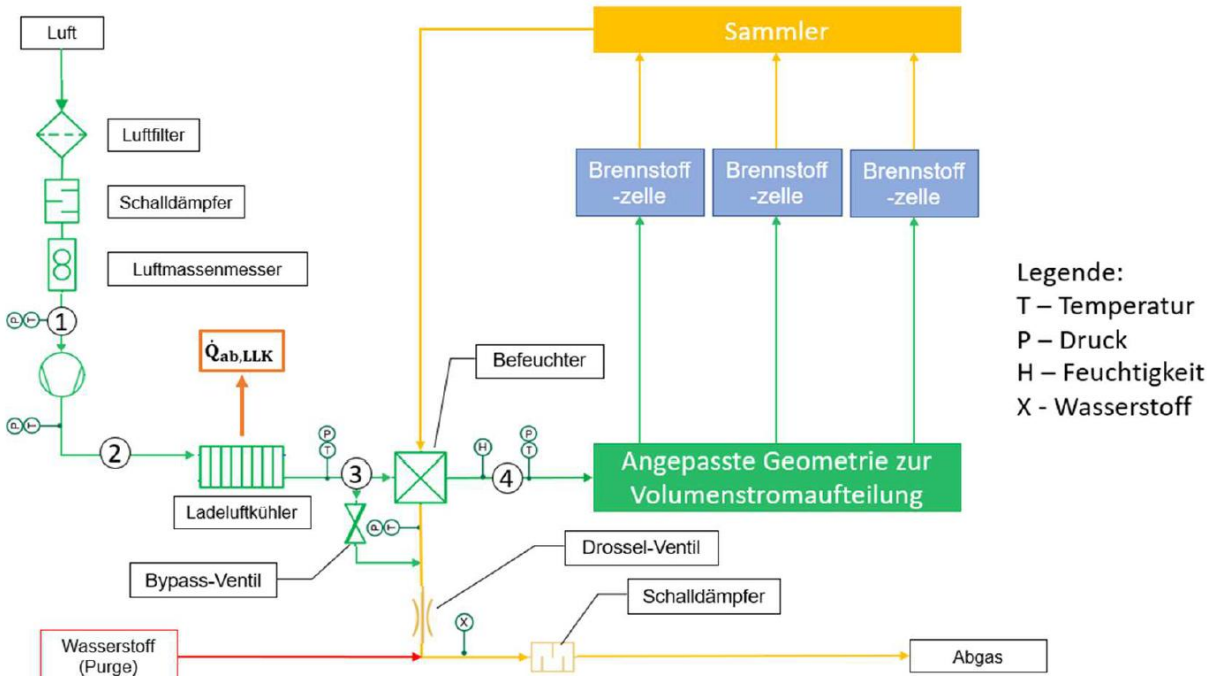


Abbildung 2.24: Skalierbares Kathodensubsystem Prüfstand

Die in der Abbildung 2.24 grün dargestellte Verteilerstruktur ist als CAD-Modell dargestellt und mittels CFD-Simulation für eine gleiche Verteilung hin optimiert worden. Die Abbildung 2.25 und Abbildung 2.26 zeigen das erste Konzept und das Ergebnis nach Simulation und Optimierung.

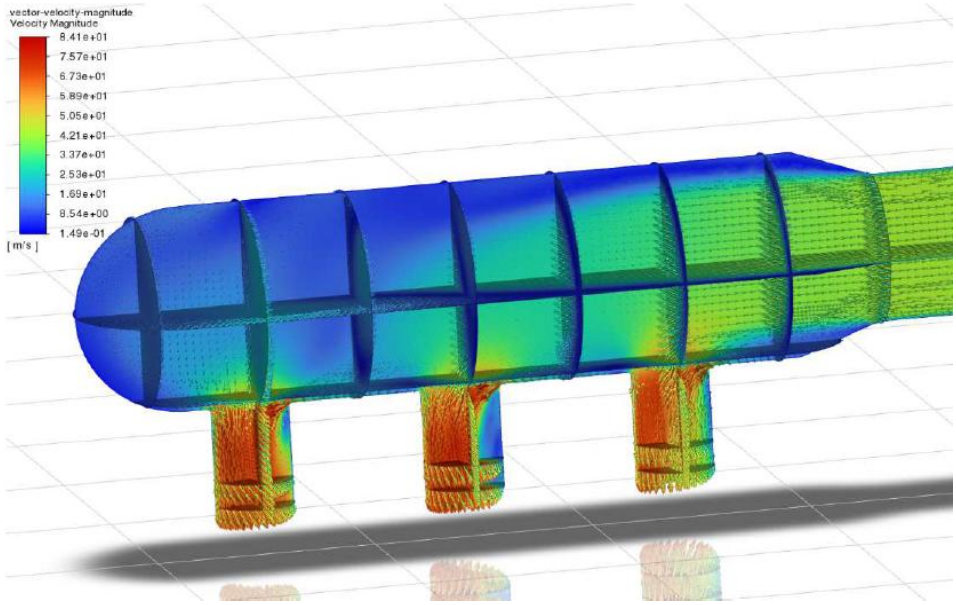


Abbildung 2.25: Erstes Konzept Verteilerstruktur Kathode

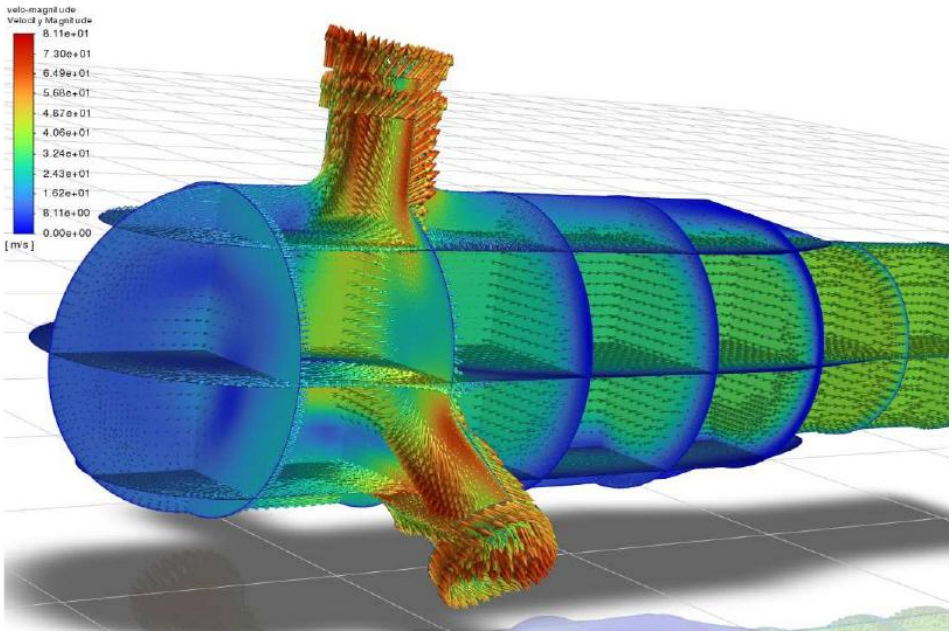


Abbildung 2.26: Ergebnis Verteilerstruktur Kathode

Die Abbildung 2.27 zeigt den P&ID-Verschaltungsplan und ist das Ergebnis aus der Komponentenauswahl und Anforderungsanalyse und wird entsprechend der Bezeichnungen der Komponenten erklärt. Die nicht benannten Ventile entsprechen Absperrventilen, um den Betrieb mit verschiedenen Anzahlen von Stacks und verschiedenen Peripheriekonstellationen zu ermöglichen. Der Druck aus dem Wasserstofftank wird dabei vom Druckminderer auf das mittlere der drei Druckniveaus (15-30 bar) verringert, bevor das Dosierventil den Betriebsdruck für die Brennstoffzelle von 2,5 bar sowie den der Leistung entsprechenden Durchfluss einstellt. Um bei sehr niedrigen Temperaturen die Bildung von Eis zu verhindern sowie eine Temperatur zur effizienten Protonenleitung der Membran zu erreichen durchläuft der Wasserstoff vorher einen Vorwärmer.

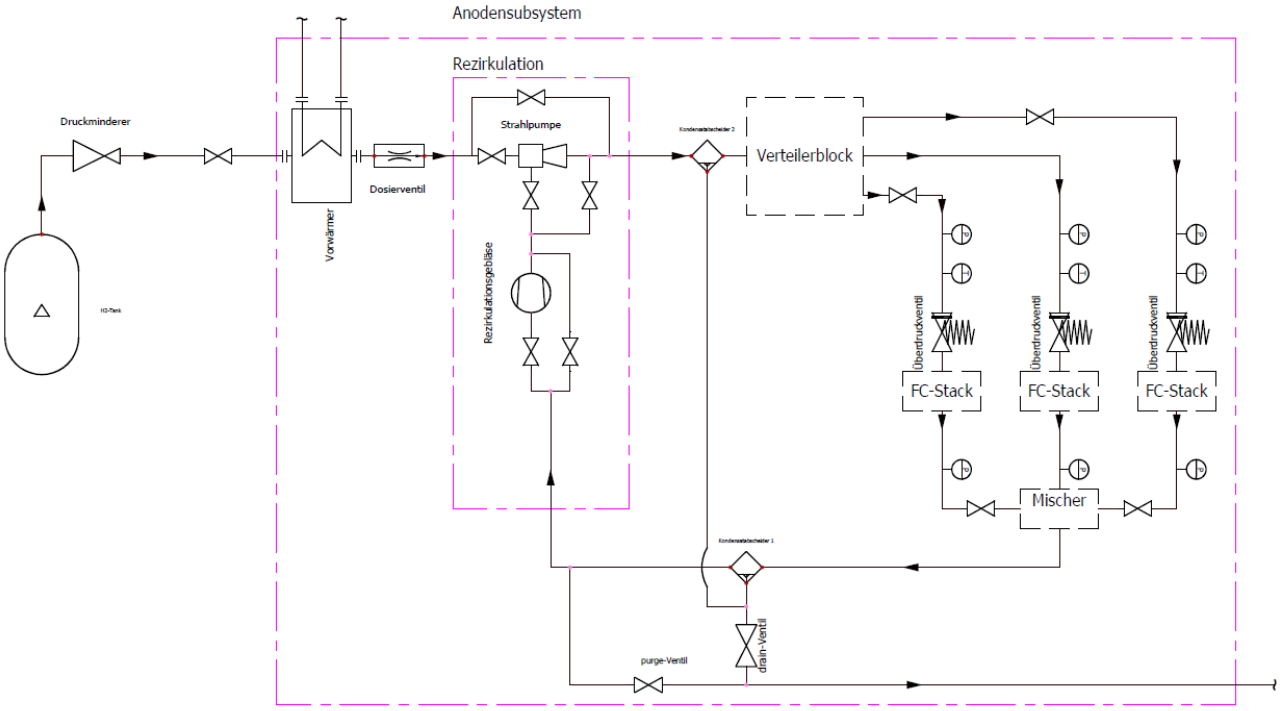


Abbildung 2.27: P&ID skalierbares Anodensubsystem Prüfstand

Der heiße und feuchte rezirkulierte Wasserstoff kühlt bei der Mischung mit frischem Wasserstoff ab, da dieser noch nicht durch die Stacks, sondern nur den Vorwärmer erwärmt wurde. Dadurch kann es zum Ausfall von Kondensat beim Mischen kommen. Flüssiges Wasser trägt zur schnelleren Alterung der FC bei, weswegen ein Kondensatabscheider vor dem Eintritt in den Stack nötig ist. Um die Brennstoffzelle vor zu hohem Druck zu schützen, ist ein Überdruckventil vorgesehen. Zusätzlich wird der Druck, auch um den Wasserstoffdurchfluss zu ermitteln, mittels Drucksensoren vor und nach dem Stack überwacht.

Der nicht verbrauchte, sehr feuchte Wasserstoff wird nach dem Stack rezirkuliert und mit dem frischen Wasserstoff gemischt. Um keine Wassertropfen zu rezirkulieren ist auch nach dem Stack ein Kondensatabscheider vorgesehen. Um den durch die Membran diffundierenden Stickstoff zu entsorgen kann das purge-Ventil geöffnet und so der mit Stickstoff und Wasser angereicherte Wasserstoff mittels des Überdrucks des Systems gegenüber der Umgebung abgeblasen werden. Neben den Kondensatabscheidern für flüssiges Wasser übernimmt der purge-Prozess einen Teil des drain-Prozesses und entledigt sich des überschüssigen gasförmigen Wassers.

In den ineffektiven Bereichen der Strahlpumpe wird das Rezirkulationsgebläse zugeschalten und der Wasserstoff so rezirkuliert. So können einerseits eine effektive Rezirkulation gewährleistet sowie die parasitären Verluste geringgehalten werden.

Die Abbildung 2.28 zeigt das CAD-Modell dieses Systems.

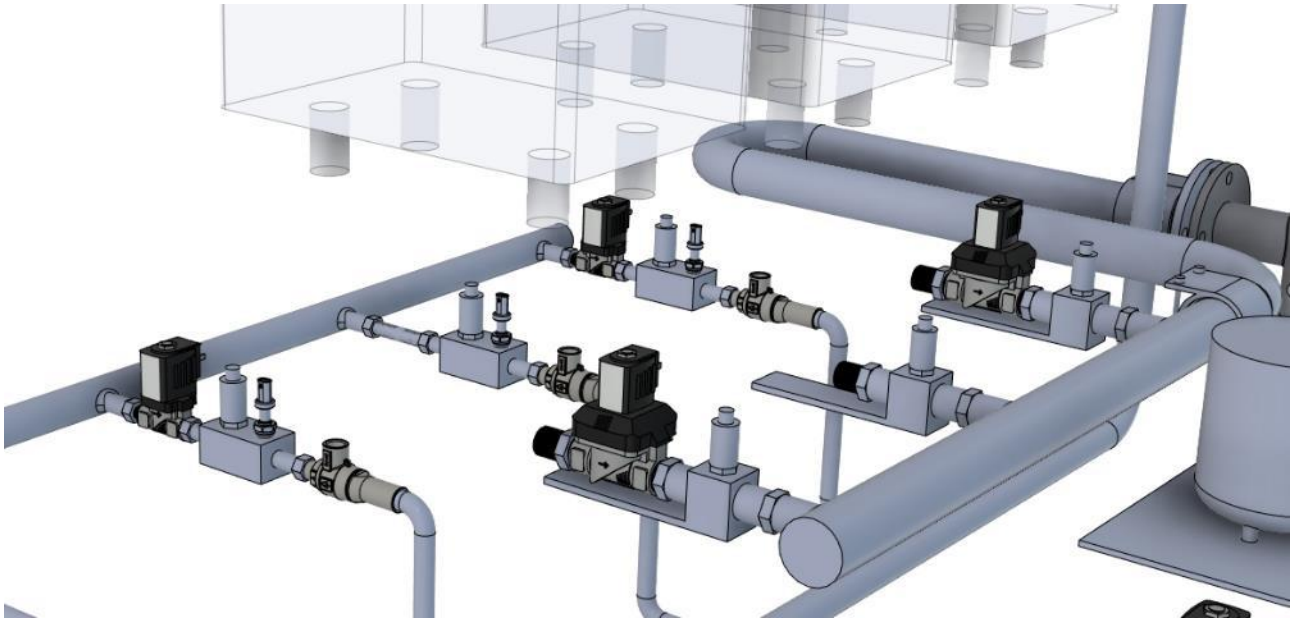


Abbildung 2.28: Skalierbares Anodensubsystem Prüfstand

Als Prüfraum wird ein 40 Fuß Überseecontainer mit isolierten Wänden und einer Heiz- und Kühleinrichtung genutzt und für den Betrieb eines Wasserstoffsystems befähigt. Dies beinhält die Öffnung der Wände und Decke für Türen zum leichten Zugang bei Umbaumaßnahmen oder den Betrieb, als auch Durchgänge für die außen angebrachte Kühleinrichtung für die Kühlkreise. Ebenfalls müssen die elektrischen Leitungen für die Leistungsabnahme zur nicht im Prüfraum aufgebauten Stützbatterie und die Kommunikationsleitungen und Versorgungsleitungen durch geeignete Öffnungen verlegt werden.

Zum sicheren Betrieb innerhalb des Prüfcontainers werden Sensoren zur Überwachung der Wasserstoffkonzentration oberhalb des Prüflings in der Nähe der Wasserstoffversorgung an der Decke angebracht. Da zur Inertisierung des Systems ebenfalls eine Stickstoffversorgung im Container aufgebaut wird, muss diese Konzentration ebenfalls überwacht werden. Dieser Sensor ist

auf Brusthöhe in der Nähe der Zutrittstüre verbaut, um die von unten ansteigende Konzentration von Stickstoff zu detektieren.

Wenn ein Gasalarm eintritt werden alle Geräte, die nicht Explosionsschutz zertifiziert sindn automatisch abgeschalten und eine automatische Absaugung der Luft im Container durch ein ex-Schutz-Gebläse abgesaugt. Zusätzlich ertönt ein lauter Warnton und ein optisches Signallicht zeigt den Alarmfall an.

AVL DE stellt die notwendige Sensorik für den Betrieb und für die Testergebnisse bereit. Dafür haben regelmäßige Abstimmungen stattgefunden. Aus den Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12 gehen die Positionen der eingesetzten Sensoren in den Kühlkreisen hervor.

AP5.2: Durchführung Charakterisierung der Komponenten

Für den Demonstratoraufbau im Prüfcontainer ist der UseCase der mittleren Kommunalmaschine gewählt worden. Das bedeutet, dass ein Stack mit ca. 80 kW abgebbarer elektrischer Leistung beschafft wurde und dazu aus den recherchierten Komponenten die BoP beschafft und zusammengestellt worden sind.

In Abbildung 2.29 ist das im CAD umgesetzte Systempackage zusammen mit dem Container, der Zutrittstüre und der Bestückungstüre, der außen angebrachten Kühler und Lüfter zu sehen.

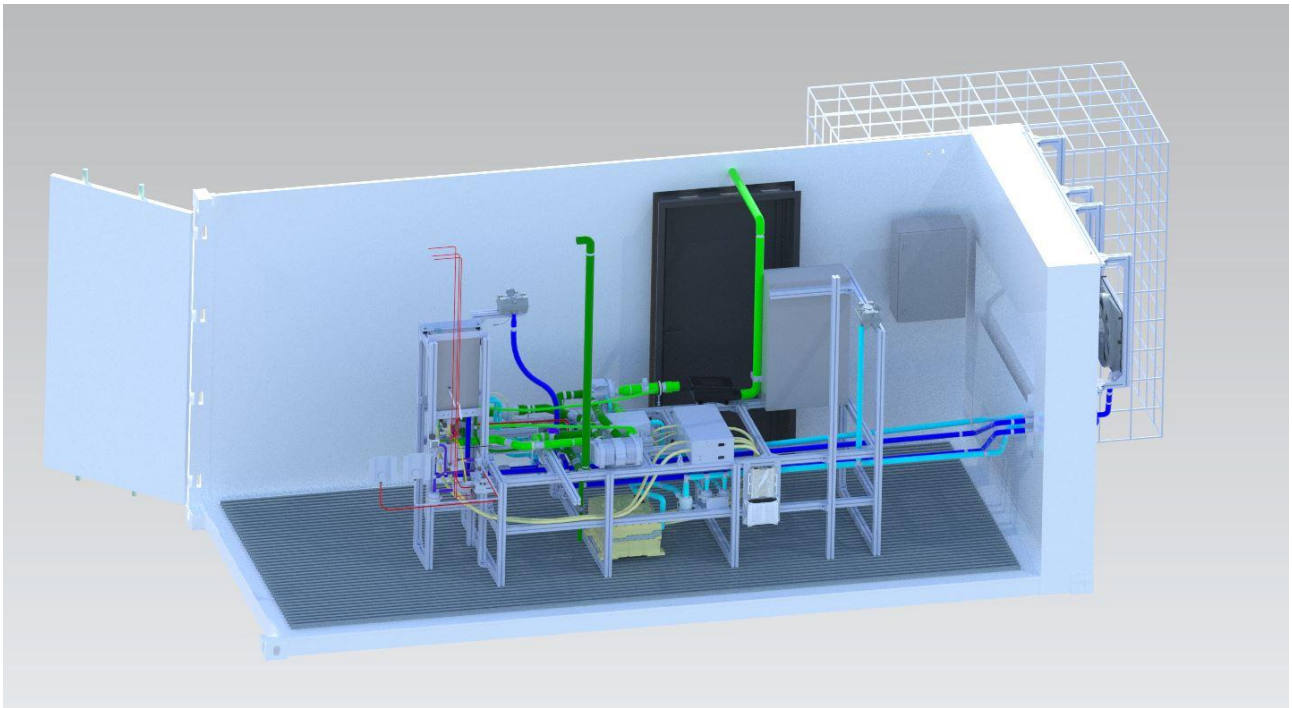


Abbildung 2.29: CAD Prüfcontainer

Die Frischluft wird von Außerhalb angesaugt und die verbrauchte Prozessluft wird ebenfalls nach Außen abgeführt. Dies ist notwendig, da die verbaute Kühl- und Heizanlage zur Einstellung der Prüf-Umgebungstemperatur den starken Luftaustausch durch den Betrieb nicht kompensieren kann.

Die Inbetriebnahme ist in mehreren Schritten durchgeführt worden. Beim ersten Test im finalen Aufbau sind alle Kommunikationskanäle geprüft worden und die Plausibilität der Sensorrückmeldungen getestet worden. Die Anode sowie die Kathode sind durch Überbrückungen der Schnittstellen vor dem Brennstoffzellenstapel aufgebaut worden. Danach sind unkritische Systeme, wie die Kühlpumpen und Lüfter getestet worden. Bevor die Brennstoffzelle mit Wasserstoff

betrieben wird, wird die Druckregelung der Anode mit Stickstoff geprüft und validiert. Die Funktion der Kathodendruckregelung wird mit Frischluft getestet, während die Brennstoffzelle noch nicht angeschlossen ist.

Erst nachdem alle Regelfunktionen geprüft worden sind und die wasserstoffführenden Leitungen auf Leckagefreiheit überprüft worden sind, sind auch die Schnittstellen der Brennstoffzelle zur Kathode und Anode final montiert worden.

Die Inbetriebnahme konnte in wenigen Tagen erfolgreich abgeschlossen werden und die Tests für die Validierung starten.

GreenIng hat die Aufzeichnungen der Tests an AVL DE weitergeleitet. Leider sind bei der Aufzeichnung der Druckverluste bei unterschiedlichen Leistungsrampen der Pumpen die aufgezeichneten Daten fehlerhaft gewesen, sodass AVL DE diese Daten nicht auswerten konnte.

Zusammen mit IISB und Pankl ist die Kombination des Verdichters mit dem Inverter auf dem Systemprüfstand in Betrieb genommen worden. GreenIng hat hier die Montage sowie den Betrieb des Systems unterstützt.

Aufbau und Material der Prüfinfrastruktur (Brennstoffzellensystemprüfstand) wurden nicht aus Projektmitteln finanziert. Die Finanzierung erfolgte aus Mitteln der GreenIng GmbH & Co. KG.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Materialkosten	Plan: 140.933,35 €	Ist: 110.689,09 €
Personalkosten	Plan: 937.712,91 €	Ist: 964.134,49 €

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt SkalTABs ist die Erarbeitung und prototypische Realisierung eines skalierbaren Brennstoffzellensystems zusammen mit den Thermomanagement- und Antriebsstrang-Architekturen für Nutzfahrzeuge und den hierfür notwendigen Komponenten umgesetzt worden. Hierbei steht ein ganzheitlicher und Domänen-übergreifender Ansatz im Fokus, welcher Expertenwissen aus unterschiedlichsten technischen Bereichen und Stufen der industriellen Wertschöpfungskette erforderlich gemacht hat. Dies beispielsweise aus den technisch/technologischen Bereichen der Brennstoffzellen-Systeme und -Nebenaggregate, des Fahrzeug- und Komponenten-Thermomanagements und des elektrifizierten Antriebsstrangs. Aus diesem Grund hat sich das adressierte Vorhaben SkalTABs aus Sicht der Konsortialpartner im Besonderen für ein gemeinsames Verbundprojekt geeignet. Im Nachgang des Projektes werden die Partner von den adressierten technischen Lösungen aber auch von den gemeinsam erarbeiteten System- und Komponentendefinitionen des skalierbaren Ansatzes für ihre eigenen Entwicklungstätigkeiten profitieren.

Ein einzelner Partner könnte die angestrebten Arbeiten sowohl technisch-inhaltlich als auch aufgrund des daraus resultierenden Entwicklungsrisikos kaum alleine durchführen. Dies insbesondere auch nicht in dem im Förderprojekt angestrebten Zeitraum von nur drei Jahren. Das Risiko für den Einzelnen resultiert auch daher, dass wir uns aktuell in einer sehr frühen Markteintrittsphase für brennstoffzellenbasierte Nutzfahrzeuge befinden. Dies eröffnet einerseits die Möglichkeit die in dem Förderprojekt gewonnenen Erkenntnisse frühzeitig in international wettbewerbsfähige Lösungen einfließen zu lassen, andererseits ist der Return of Invest für die Firmen noch in der Zukunft zu sehen.

Das vorliegende Förderprojekt SkalTABs bündelt hier benötigtes Technologie- und Systemwissen führender deutscher Industriepartner und Forschungsinstitute aus den Bereichen Brennstoffzellensysteme, Thermomanagement und Powertrain. Die Förderung schafft den Rahmen für die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit und mindert das Risiko für die beteiligten Projektpartner auf ein akzeptables Maß. Gleichzeitig ermöglicht die Förderung auch die gezielte Allokation von Personalressourcen bei den Partnern, insbesondere auch bei den eingebundenen KMUs. Der gemeinsam adressierte skalierbare Ansatz bedingt einen zunächst höheren Initialaufwand bietet aber gerade auch in der Phase des anstehenden Markthochlaufs Chancen universell einsehbare Lösungen für ein breites Fahrzeugspektrum anbieten zu können.

Zudem erhöht die in dem Förderprojekt gebündelte Zusammenarbeit und der Auftritt als gemeinsames Konsortium bereits in der Skizzen- und Antragsphase die Bereitschaft von deutschen OEMs sich an dem Vorhaben zu beteiligen und beispielsweise benötigten Input in Form von Spezifikationen und Betriebskollektiven in das Verbundvorhaben einzubringen. Für die beteiligten wissenschaftlichen Partner, die RWTH-Aachen und das Fraunhofer IISB, ermöglicht die enge Kooperation mit den industriellen Partnern, deren Arbeiten am Bedarf der Firmen auszurichten und damit die industrielle Relevanz der Ergebnisse zu sichern.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Verwertungsplan)

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die GreenIng GmbH & Co. KG plant das im Projekt gewonnene Wissen in zukünftigen Kundenprojekten anzubieten und einzusetzen. Es soll damit der Grundstein für kundenspezifische Brennstoffzellensysteme aus einem skalierbaren Baukasten gelegt werden. Somit werden die Ergebnisse des Projekts und die Beratungs- und Entwicklungsleistung von GreenIng im Bereich der Brennstoffzellentechnologie weit über die Konsortialpartner hinaus Anwendung finden und das Portfolio von GreenIng deutlich erweitern und vertiefen. Dies ist bereits parallel zum Verbundprojekt durch die Bearbeitung eines Entwicklungsauftrags für einen deutschen OEM geschehen. Ebenfalls fließen die gewonnen Erkenntnisse in ein weiteres Verbundprojekt „DigiTain“ ein.

Analog zu der bestehenden Batteriemanufaktur bei der Firma GreenIng für den Aufbau von kundenspezifischen Speicherlösungen in Kleinserienanwendungen und dem im Aufbau befindlichen Prüfaufbau für Einzelzellen, Modulen und Gesamtbatterien, werden zukünftig mit den Ergebnissen dieses Projekts der Aufbau von kundenspezifischen Brennstoffzellensystemen (und Teilsystemen), sowie deren Inbetriebnahme und Testing bei GreenIng angeboten werden.

GreenIng konnte durch das Projekt selbst und durch das daraus aufgebaute Wissen mindestens einen Mitarbeiter aufzubauen und eine dauerhafte Stelle zu schaffen. Ebenso sollen zukünftige Ingenieure*innen durch thematisch angrenzende Praktika und Abschlussarbeiten an diese Zukunftstechnologie herangeführt werden

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Es hat einen Wissensaufbau speziell im Bereich der Peripheriekomponenten und deren Skalierung, der Auslegung von Brennstoffzellen Gesamtsystemen, der Erprobung von Gesamt- und Teilsystemen, Package- und Konstruktionsgrundlagen von Brennstoffzellensystemen sowie dem Aufbau, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von Wasserstoffanlagen stattgefunden.

Wirtschaftliche und technische Anschlussfähigkeit

Durch den Kontakt und die Zusammenarbeit mit Pankl, IISB, ISEA konnten weitere zwei Verbundprojekte in Skizzenphase gebracht werden.

Durch das aufgebaute Wissen kann die GreenIng GmbH & Co. KG darüber hinaus in zukünftigen Forschungsprojekten tiefergreifende Aufgaben übernehmen und dadurch einen Mehrwert dieser Förderung erreichen. Dies wird unter anderem auch zu einem Mehrwert im Cluster-Brennstoffzelle BW führen, in welchem die GreenIng Mitglied ist.

2.5 Dem ZF bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Dem ZF sind keine bekanntgewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

2.6 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

Ergebnisse aus dem Verbundprojekt SkalTABS von der Firma GreenIng sind auf Veranstaltungen und online über das LinkedIn-Profil und die GreenIng-Homepage veröffentlicht worden:

Online Veröffentlichungen über LinkedIn und die Homepage:

- 04.03.2025, LinkedIn & Homepage, Skalierbare Brennstoffzellensysteme für Sonderfahrzeuge – GreenIng präsentiert Forschungsergebnisse
- 30.10.2024, LinkedIn & Homepage, Forschungsprojekt im Bereich der Brennstoffzellentechnologie erfolgreich abgeschlossen
- 17.09.2024, LinkedIn & Homepage, GreenIng Brennstoffzellenprüfstand
- März 2023, LinkedIn & Homepage, Wir validieren Brennstoffzellensysteme – Leistung, Skalierbarkeit und Haltbarkeit
- Mai 2022, LinkedIn & Homepage, Cluster-Seminar: „Brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge – Gesamtsystem und Leistungselektronik“
- August 2021, LinkedIn & Homepage, Skalierbares Brennstoffzellensystem für Sonder- und Nutzfahrzeuge

Veranstaltungen:

- 24.05.2022
  Veranstaltung: Cluster-Seminar „Brennstoffzellen-basierte Fahrzeuge: Gesamtsystem und Leistungselektronik“ in Erding
  Titel: SkalTABs
  Autoren: C. Konkol, M. Stuckmann, A. Raab
- 28.02.2023
  Veranstaltung: 9. Fachtagung „Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen“ KIT
  Titel: Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstränge
  Autoren: Dr.-Ing. Uwe Kehn, Dipl.-Ing. Christoph Konkol
- 12.03.2024
  Veranstaltung: VDMA Workshop
  Titel: SkalTABs – Herausforderung und Chancen skalierbarer Brennstoffzellensystem
  Autoren: Dr.-Ing. Uwe Kehn, Dipl.-Ing. Christoph Konkol

- 19.02.2025
  Veranstaltung: 10. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen KIT
  Titel: SkalTABs – Forschung an skalierbaren BZ-Systemen für Sonderfahrzeuge und mobile Arbeitsmaschinen
  Autoren: Dr.-Ing. Uwe Kehn, Dipl.-Ing. Christoph Konkol
- 15.05.2025
  Veranstaltung: IISB-Jahrestagung Leistungselektronik Erlangen
  Titel: Modulare Batteriesysteme und skalierbare Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen
  Autoren: Dr.-Ing. Uwe Kehn, Dipl.-Ing. Christoph Konkol