



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 4.4.2023

Erster Einsatz eines Brennstoffzellen- Lastwagen im 34 Tonnen Anhängerzug- Betrieb



Quelle: © ESO 2017



Datum: 4.4.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Firma Coop Genossenschaft
Thiersteinstrasse 12, CH-4002 Basel
www.coop.ch

ESORO AG

Tämperlistrasse 10, CH-8117 Fällanden
www.esoro.ch

Swiss Hydrogen SA

Passage du Cardinal 1
1700 Fribourg
www.swisshydrogen.ch

Autor/in:

Beat Hirschi, Coop Genossenschaft, Beat.Hirschi@coop.ch
Alexandre Closset, Swiss Hydrogen SA, Alexandre.Closset@plasticomnium.com
Stefan Camenzind, ESORO AG, Stefan.Camenzind@esoro.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, Men.Wirz@bfe.admin.ch
Stefan Oberholzer, Stefan.Oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501440-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Ziel des Projektes war es, einen 34t-Anhängerzug als Prototyp darzustellen und im realen Betrieb bei Coop einzusetzen. Die Anhängertauglichkeit stellte dabei ein wesentliches Kriterium beim Design des Fahrzeuges dar, da der Betrieb mit Anhänger zu deutlich höherem Energiebedarf führt und batterieelektrische Fahrzeuge deshalb nur eingeschränkt so eingesetzt werden können. Mit dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten und aufgebauten Fahrzeug konnte gezeigt werden, dass mit einem Brennstoffzellen-Antrieb ein herkömmlicher Diesel-Anhängerzug ersetzt werden kann. Das Fahrzeug war das erste in dieser Art und stellt deshalb einen Leuchtturm für die Anwendung der Brennstoffzellen-Technologie im schweren Güterverkehr dar.

Das Fahrzeug wurde innerhalb sehr kurzer Frist konzipiert und realisiert. Das Brennstoffzellen-System (100kW) wurde dabei als Range-Extender zum batterieelektrischen Antriebsstrang ausgelegt. Damit kommt die Dynamik aus der Batterie, während das Brennstoffzellen-System die Energie nachliefert. Auf Grund der eher kleinen und nicht sehr leistungsstarken Batterie des Basisfahrzeugs, musste das Brennstoffzellen-System jedoch weit dynamischer gefahren werden, als ursprünglich geplant wurde.

Nach erfolgreicher Zulassung konnte das Fahrzeug im realen Lieferbetrieb getestet werden. Bis Ende November 2018 über 20'000 km zurückgelegt. Dabei konnten auch Reichweiten von 375 km mit einer Tankfüllung und Anhängerbetrieb und einigen topographischen Hindernissen aufgezeigt werden. Der Verbrauch ist stark von der Beladung und der Strecke abhängig. Im Mittel beträgt er 8.5 kgH₂/100km.

Nach dieser Zeit wies der prototypische Brennstoffzellen-Stack jedoch eine grosse Schädigung auf, die auf eine zu rasche Alterung zurück zu führen sind. In einem weiteren Projektschritt wurde der Brennstoffzellenstapel ausgetauscht und das Brennstoffzellen-System optimiert. Dabei wurde insbesondere das transiente Verhalten des Brennstoffzellen-Systems stark verbessert. Wesentlicher Betrag dazu leisten die Optimierung der Anoden-Versorgung durch eine Wasserstoff-Rezirkulationspumpe, eine erweiterte Sensorik und ein schnelleres Kühlungsventil. Ebenfalls wurden die Start- und Stopp-Prozeduren verbessert und zusätzliche Diagnostik implementiert. All diese Massnahmen führen dazu, dass der Brennstoffzellenstapel deutlich genauer im optimalen Betriebsfenster betrieben werden kann und somit eine höhere Zuverlässigkeit und eine geringere Alterung erzielt werden kann.

Hinsichtlich zukünftiger Anwendungen der Technologie wurde begleitend aufgezeigt, welche Rahmenbedingungen ein Brennstoffzellen- und Wasserstoff-System erfüllen müssen, um auch in anderen LKW-Anwendungen eingesetzt werden zu können. Der Fokus lag dabei auf der Implementierung in einer Sattelzug-Maschine. Es konnte aufgezeigt werden, dass sich die Komponenten auch in einer Sattelzugmaschine integrieren lassen.

Obwohl das entwickelte Fahrzeug durch die teilweise eingeschränkte Verfügbarkeit die gewünschte Arbeitsleistung nicht immer erfüllen konnte, hat das Projekt insgesamt jedoch eine sehr positive Bilanz. Durch das Projekt wurden mehrere rein privatwirtschaftliche Initiativen ausgelöst. Durch das ausgelöste Bedürfnis nach Brennstoffzellen-LKWs konnte Hyundai dazu motiviert werden, ein entsprechendes Fahrzeug in Serie zu bringen und davon über 1000 Stück für die Schweiz zu planen. Mittlerweile sind nun knapp 50 Fahrzeug in die Schweiz geliefert und das Fahrzeug geht nun in die zweite Generation. Parallel dazu wurde – ebenfalls auf privatwirtschaftlicher Basis – das Tankstellennetz und die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff in der Schweiz deutlich ausgebaut. Aktuell sind 13 Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb und 6 weitere in Planung. Der Wasserstoff stammt dabei aktuell aus zwei Produktionsanlagen, drei weitere sind in Bau, bzw. in Planung.

Auch für die Entwicklungspartner hatte das Projekt positive Konsequenzen: Swiss Hydrogen konnte das gewonnene Knowhow in seine neue Muttergesellschaft Plastic Omnium und das Joint-Venture zwischen ElringKlinger und Plastic Omnium einbringen. Die ESORO AG konnte mehrere Entwicklungsprojekte mit OEMs durchführen, inkl. dem Aufbau von weiteren Prototypen-Fahrzeugen für industrielle Kunden.



Résumé

L'objectif du projet était de concevoir un prototype d'un camion de 34 tonnes avec remorque et de l'utiliser dans les conditions réelles chez Coop. L'aptitude à tracter une remorque a constitué un critère essentiel lors de la conception du véhicule, car l'utilisation d'une remorque entraîne des besoins énergétiques nettement plus élevés et les véhicules électriques à batterie ne peuvent être utilisés que de manière limitée. Le véhicule développé et construit dans le cadre de ce projet a permis de démontrer qu'il était possible de remplacer le système de propulsion diesel traditionnel par un système de propulsion à pile à combustible. Ce véhicule était le premier de ce type et représente donc un phare pour l'application de la technologie des piles à combustible dans le transport lourd de marchandises.

Le véhicule a été conçu et réalisé dans un délai très court. Le système de pile à combustible (100 kW) a été conçu comme un prolongateur d'autonomie de la chaîne de propulsion électrique à batterie. Ainsi, la dynamique provient de la batterie, tandis que le système de piles à combustible fournit l'énergie. En raison de la batterie plutôt petite et peu puissante du véhicule de base, le système de pile à combustible a dû être opéré de manière beaucoup plus dynamique que prévu.

Une fois l'homologation obtenue, le véhicule a pu être testé en conditions réelles de livraison. Jusqu'à fin novembre 2018, plus de 20 000 km ont été parcourus. À cette occasion, il a également été possible de démontrer des autonomies de 375 km avec un plein de carburant et l'utilisation d'une remorque avec certaines obstacles topographiques. La consommation dépend fortement du chargement et du trajet. En moyenne, elle est de 8,5 kg H₂/100 km.

Cependant, après cette période, la pile à combustible prototype présentait des dommages importants, dus à un vieillissement trop rapide. Dans une autre étape du projet, la pile à combustible a été remplacée et le système de piles à combustible était optimisé. Le comportement transitoire du système de piles à combustible a été fortement amélioré. L'optimisation de l'alimentation de l'anode par une pompe de recirculation de l'hydrogène, une technique de capteurs étendue et une vanne de refroidissement plus rapide y ont largement contribué. Les procédures de démarrage et d'arrêt ont également été améliorées et des diagnostics supplémentaires ont été mis en place. Grâce à toutes ces mesures, la pile à combustible peut fonctionner de manière beaucoup plus précise dans sa fenêtre de fonctionnement optimale, ce qui permet d'obtenir une plus grande fiabilité et un vieillissement moins élevé.

En ce qui concerne les applications futures de la technologie, il a été démontré quelles conditions générales un système de piles à combustible et d'hydrogène doit remplir pour pouvoir être utilisé dans d'autres applications de camions. L'accent a été mis sur la mise en œuvre dans un tracteur routier. Il a pu être démontré que les composants pouvaient également être intégrés dans un tracteur routier.

Bien que le véhicule développé n'ait pas toujours été en mesure de fournir la prestation de travail souhaitée en raison d'une disponibilité parfois limitée, le projet présente toutefois un bilan globalement très positif. Le projet a déclenché plusieurs initiatives privées. Le besoin de camions à pile à combustible déclenché par ce projet a permis de motiver Hyundai à produire en série un véhicule adaptée et à en planifier à livrer plus de 1000 pour la Suisse. Entre-temps, près de 50 véhicules ont été livrés en Suisse et le véhicule est maintenant à sa deuxième génération. Parallèlement, le réseau de stations-service et la production d'hydrogène renouvelable ont été considérablement développés en Suisse, également sur une base privée. Actuellement, 13 stations-service à hydrogène sont en service et 6 autres sont en cours de planification. L'hydrogène provient actuellement de deux installations de production, trois autres sont en cours de construction ou de planification.

Le projet a également eu des conséquences positives pour les partenaires de développement : Swiss Hydrogen a pu intégrer le savoir-faire acquis dans sa nouvelle société mère Plastic Omnium et dans la joint-venture entre ElringKlinger et Plastic Omnium EKPO. ESORO AG a pu exécuter plusieurs projets de développement avec des OEM, y compris la construction d'autres véhicules prototypes pour des clients industriels.



Summary

The goal of the project was to create a prototype lorry-trailer combination in the 35t-class and its regular use in the delivery of Coop stores. The capability to pull a trailer was an important specification for the design of the truck. The operation of the vehicle with a trailer causes an energy consumption, which is significantly higher. This limits the use of pure battery powered vehicles. The vehicle developed and realized during this project could demonstrate that a fuel cell drive train can replace a conventional Diesel drive train. The vehicle was the first of its kind and therefore represents a flagship project for the application of fuel cell technology in heavy cargo transportation.

The vehicle was designed and realized in a very short time. The fuel cell system (100 kW) was designed as a range-extender of the battery-electric drive train. The dynamic is provided by the battery, whereas the fuel cell system delivers the energy. Since the battery of the base vehicle is rather small and not so powerful, the fuel cell system needed to be operated much more dynamic than initially designed.

After the successful certification and registration, the truck has been tested in real delivery operation. Until the end of November 2018, the truck has been operated over 20'000. During this time, a range of 375 km without refueling could be demonstrated in operation with trailer and including topographic obstacles. The consumption is strongly depending on load and track. The average consumption is 8.5 kgH₂/100km.

After this period, the prototypic fuel cell stacks showed severe damage, which are related to a much faster aging than expected. In a further project step, the fuel cell stack was exchanged and the balance of plant was optimized. Particularly, the transient operation capabilities of the fuel cell system were improved significantly. The improvements have been realized by the optimization of the anode supply by a hydrogen recirculation pump, an improved sensor system and a faster cooling regulation valve. As well, the start and stop procedures have been improved and additional diagnostics have been implemented. All these measures make it possible to operate the fuel cell stack more accurate in the desired operation window and enable a higher reliability and a slower aging of the stack.

With regards to future application of the technology in other truck applications, the frame conditions for a fuel cell system for fuel cell and hydrogen system have been elaborated. The activities have been focused on a truck tractor application. It could be demonstrated that the components could also be integrated in a truck tractor.

Even if the developed vehicle partly was limited in its availability and not always could be used in daily operation, the project as a whole can be assessed very positively. Due to this project, several purely private financed initiatives have been launched. The project has triggered a demand for fuel cell trucks. Due to this, Hyundai could be motivated to develop a fuel cell truck to serial status and to plan a delivery of more than 1000 vehicles to Switzerland. Meanwhile, about 50 vehicles are operated in Switzerland and the vehicle is developed to the second generation. In parallel and also purely on privately financed, the network of hydrogen refueling stations the production of renewable hydrogen has been enlarged significantly. At the moment, 13 hydrogen refueling station are operating and additional 6 are in planning phase. The hydrogen is produced currently in two facilities, additional 3 are in construction or in project phase.

The project had also positive effects for the involved developing partners. Swiss Hydrogen could introduce the acquired knowhow to its new holding company Plastic Omnium and the joint venture of ElringKlinger and Plastic Omnium. ESORO executed several engineering projects for OEMs in this field, incl. the realization for additional prototype vehicles for industrial customers.



Take-home messages

- Der Brennstoffzellen-LKW von Coop war 2016 eine Weltneuheit mit einer Zulassung über 35t.
- Ein LKW mit Brennstoffzellen-Technologie ermöglicht den kompletten Ersatz eines Diesel-LKWs. Auch anspruchsvolle Routen über 375km und mehrere Mittelland-Pässe können durchgeführt werden. Der Verbrauch beträgt ca. 8.5kgH₂/100km.
- Der Betrieb auch Range-Extender erfordert vom Brennstoffzellen-System auf Grund der hohen Lastwechsel und der wechselnden Kühlleistungen (Fahrtwind) eine hohe Dynamik.
- Das Projekt hat sehr grosse nationale und internationale Resonanz ausgelöst. Das grosse Interesse hat dazu geführt, dass Hyundai in den nächsten Jahren 1000 und mehr Brennstoffzellen-LKWs in die Schweiz und nach Europa liefern wird.
- Als Folge von dieser Ankündigung wurde in der Schweiz nun auf privater Basis ein Tankstellen-Netz aufgebaut und die Infrastruktur mittelfristig sichergestellt.
- Als Folge des Projektes konnten die Projektpartner ESORO und Swiss Hydrogen ihre Positionierung im Bereich Wasserstoff/Brennstoffzelle festigen. Swiss Hydrogen konnte das Knowhow in seine neue Muttergesellschaft Plastic Omnium und das Joint-Venture zwischen ElringKlinger und Plastic Omnium einbringen. Die ESORO AG konnte mehrere Entwicklungsprojekte mit OEMs durchführen, inkl. dem Aufbau von weiteren Prototypen-Fahrzeugen für industrielle Kunden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	9
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Projektziele	10
2 Anlagenbeschreibung	11
2.1 Basis LKW	11
2.1.1 Technische Daten Basis-LKW	11
2.1.2 Beschreibung des Aufbaus	12
2.2 Auslegung des Brennstoffzellen-Systems	14
2.2.1 Zielspezifikationen	14
2.2.2 Dimensionierung von Brennstoffzelle und Speicher	16
2.3 Brennstoffzellen-System	17
2.3.1 Systemspezifikation	17
2.3.2 Systemlayout	21
2.3.3 Mechanischer Aufbau	23
2.4 Tanksystem	25
2.4.1 Beschreibung des Aufbaus	25
2.4.2 Schema	27
2.5 Hochvolt-System	28
2.6 Einbindung der Steuerung	28
2.7 Technische Daten Brennstoffzellen-LKW	30
3 Vorgehen und Methode	31
3.1 Aufbau	31
3.2 Test und Zulassung	34
3.2.1 Stack-Tests	34
3.2.2 Systemtests beim ZSW in Ulm	37
3.2.3 EMV-Tests	39
3.2.4 Abnahme TÜV	40
3.2.5 Zulassung Strassenverkehrsamt	41
3.3 Erprobung	42
3.4 Testeinsatz	44
3.5 Fahrerschulung	45
3.6 Wartung und Unterhalt	45



4	Ergebnisse und Diskussion	46
4.1	Einsatz im Verteilbetrieb	46
4.2	Verbräuche	48
4.3	Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit	48
4.4	Erfahrungen Brennstoffzellen-System.....	50
4.4.1	Systemleistung / Systemwirkungsgrad.....	50
4.4.2	Feuchte-Regelung	51
4.4.3	Temperaturregelung	51
4.4.4	Verfügbarkeit und Stacklebensdauer	52
4.4.5	Optimierungspotential am Brennstoffzellen-System	54
4.5	Erfahrungen batterie-elektrischer Basis-LKW	56
4.5.1	Anpassungen am Fahrzeug	56
4.6	Auswirkung auf Technologieakzeptanz und Markt.....	57
5	Umsetzung der Optimierungen	59
5.1	Optimierung des Brennstoffzellen-Systems	59
5.1.1	Anodenrezirkulation	59
5.1.2	Kühlmitteltemperatur-Regelung.....	60
5.1.3	Steuerung	60
5.1.4	Werkstests	60
5.2	Integration des Brennstoffzellen-Systems in das Fahrzeug.....	60
5.3	Inbetriebnahme und Testing	62
5.4	Situation H2-Tankstellen	64
6	Weiterentwicklung zu Nachrüst-Produkt	64
6.1	Hintergrund	64
6.2	Rahmenbedingungen	65
6.3	Packaging-Optionen	66
6.4	Wasserstoff-Speicherung	68
6.5	Brennstoffzellen-System.....	70
6.6	Zusammenfassung Umrüstkpaket.....	72
7	Schlussfolgerungen und Fazit	72
8	Ausblick und zukünftige Umsetzung	73
9	Nationale und internationale Zusammenarbeit	74
9.1	Nationale Zusammenarbeit	74
9.2	Internationale Zusammenarbeit.....	74
10	Kommunikation und Präsentation	74
11	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	76
11.1	Abbildungsverzeichnis	76
11.2	Tabellenverzeichnis	78



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Coop führt die Belieferung ihrer Supermärkte mit Lastwagen im Solo-Betrieb und im Anhängerzug-Betrieb sowie mit Sattelschleppern durch.

Coop hat sich 2008 zum Ziel gesetzt, bis 2023 CO₂-neutral zu sein.

Seit Januar 2014 setzt Coop einen 18-Tonnen-Elektro-Lastwagen der Firma E-Force One im täglichen Einsatz für die Belieferung von Supermärkten ein. Die bisherigen Erfahrungen mit dem Lastwagen sind sehr positiv. Unter anderem konnte demonstriert werden, dass der Elektro-Lastwagen einen herkömmlichen Diesel-Lastwagen im Solo-Betrieb ohne Einschränkungen ersetzen kann.

Aufgrund des nicht möglichen Betriebs im Anhängerzug sowie der beschränkten Tagesreichweite von 240 km (ohne neuerlichem Aufladen über 6 Stunden bzw. Wechsel der Batterien) stellt der 18-Tonnen Elektro-Lastwagen nur eine Alternative zu herkömmlichen Diesel-Lastwagen im Solo-Betrieb dar, nicht aber im Anhängerzug-Betrieb.

Aus Sicht Coop bietet die Brennstoffzellen-Technologie eine vielversprechende und umweltfreundliche zukünftige Antriebstechnologie für Fahrzeuge. So haben bedeutende Automobilhersteller wie Toyota, Hyundai, Honda und Daimler ihre ersten serienmässigen Brennstoffzellen-Autos vorgestellt. Aufgrund der Tatsache, dass für deren Verbreitung der vorhergehende Aufbau einer entsprechenden Tankstellen-Infrastruktur notwendig ist, hat sich Coop entschieden, mit ihrem Tochterunternehmen Coop Mineralöl AG eine Pionierrolle in der Schweiz einzunehmen. So wurde im Herbst 2016 die erste öffentliche Wasserstoff-Tanksäule in der Schweiz bei der Coop-Tankstelle in Hunzenschwil in Betrieb genommen (<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36922>). Der Wasserstoff stammt dabei erneuerbar aus dem Laufwasser-Kraftwerk in Aarau (<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38263>).

Der weitere Ausbau des Tankstellennetzes soll, entsprechend der Nachfrage, in Etappen erfolgen.

Neben der Pionierrolle bei den Wasserstoff-Tankstellen will Coop eine solche auch durch den Einsatz von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in ihrer eigenen Geschäftswagen- und Lastwagen-Flotte einnehmen. So wurden im 2016 12 Hyundai ix35 Fuel Cell als Geschäftswagen beschafft.

Zu Projektbeginn waren keine Brennstoffzellen-LKWs erhältlich. Es gab einige Prototypen im 3.5t-Segment und einige E-LKWs. Trotz diversen Kontakten und Gesprächen mit grossen europäischen Herstellern (u.a. Mercedes, Volvo, Iveco) konnte keine Aussicht auf baldige Erhältlichkeit von wasserstoff-betriebenen LKWs erzielt werden. Heute, nach dem Projekt, sind mit dem XCIENT von Hyundai und dem Nikola Tre FCEV erste Fahrzeuge erhältlich und auch bei Daimler Truck ist ein Fahrzeug in Erprobung.

1.2 Motivation des Projektes

Ein Brennstoffzellen-LKW kann die Diesel-LKWs auch im Anhängerzug-Betrieb ersetzen, da insbesondere eine höhere Reichweite und eine kürzere Betankungszeit möglich sind. Es gab bei Projektstart jedoch keine Firma, die einen geeigneten Lastwagen mit Elektro-Antriebstechnologie anbieten konnte, weder für den 18-Tonnen Solo- noch für den 34-Tonnen-Anhängerzug-Betrieb.

Das Einsatzpotential in der Schweiz für Lastwagen mit Brennstoffzellen-Antriebstechnologie ist entsprechend der grossen Anzahl von Lastwagen gross (gemäss Bundesamt für Statistik hatte es in 2015 rund 42'000 Lastwagen wobei rund 3'200 davon neu in Verkehr gesetzt wurden).

Dementsprechend gross ist auch das damit verbundene Potential zur Reduktion von CO₂-Emissionen und weiterer Schadstoffe (Feinstaub, NO_x, etc.) und Lärm des Warentransportes.



1.3 Projektziele

Coop beliefert seine Supermärkte u.a. mit Lastwagen im Anhängerzug-Betrieb. Coop sieht die Brennstoffzellen-Technologie für den Anhängerzug-Betrieb von Lastwagen als vielversprechende und umweltfreundliche Alternative zu Diesel-Lastwagen.

Projektziele:

- Demonstration, dass ein Brennstoffzellen-Lastwagen im 34-Tonnen-Anhängerzug-Betrieb eingesetzt werden kann
- Demonstration, dass ein herkömmlicher Diesel-Lastwagen im 34-Tonnen Anhängerzug-Betrieb durch einen Brennstoffzellen-Lastwagen ersetzt werden kann
- Ermittlung der Potentiale zur technischen Optimierung und Weiterentwicklung für zukünftige Brennstoffzellen-Lastwagen
- Ermittlung und Evaluation der Notwendigkeiten und Herausforderungen für eine Multiplikation
- Steigerung der Bekanntheit und Akzeptanz der Brennstoffzellen-Technologie
- Optimierung des aktuellen Brennstoffzellen-Systems für eine höhere Verfügbarkeit und längere Lebensdauer
- Untersuchung der Anforderungen, welche das entwickelte System zu einem universell einsetzbaren Nachrüstpaket für Elektro-LKWs machen kann und damit neue Vermarktungsmöglichkeiten eröffnet, sowie eine virtuelle Darstellung des Produktes.



2 Anlagenbeschreibung

2.1 Basis LKW

Die Projektdauer für die Entwicklung und den Aufbau des Brennstoffzellen-LKWs war sehr kurz bemessen. Deshalb wurde ein bereits elektrifizierter LKW als Basisfahrzeug für das Projekt verwendet. Die einzige Firma, welche zum Startzeitpunkt des Projektes eine anhängerbefähige Elektrifizierung anbieten konnte, war die Fa. Emoss aus den Niederlanden. Emoss hatte Referenzen von vielen elektrifizierten LKWs, aber ein 34t-Anhängerzug stellte auch für Emoss eine Neuheit dar.

2.1.1 Technische Daten Basis-LKW

Basisfahrzeug	
Hersteller	MAN
Chassis	TGS 18.320 4x2 LL
Fahrzeugart	Pritschenwagen und Fahrgestelle
Fahrerhaus	M mittellanges Fahrerhaus
Radstand	5500 mm
Überhang	3200 mm
Lenkungsanordnung	Links
Fahrgestellnummer MAN	WMA1OSZZ7GM703439
Zulässiges Gesamtgewicht	18'000 kg
Zulässiges Zuggewicht	44'000 kg
Zulässige Vorderachslast	8'000 kg
Zulässige Hinterachslast	11'500 kg
Elektrifizierung	
Hersteller	Emoss B.V. (Niederlande)
Importeur	Ceecon AG (Schweiz)
Motorleistung	250 kW
Batterie	120 kWh, 500 – 750 VDC
Gesamtzuggewicht	34'000 kg
Zulassung	Einzelzulassung CH
Aufbauten	
Kühlkoffer	Frech-Hoch (Schweiz)
Unterfahrschutz	Frech-Hoch (Schweiz)
Kühlgerät	Thermoking

Tabelle 1: Technischen Daten des Basis-LKW's



2.1.2 Beschreibung des Aufbaus

Nach der Elektrifizierung des Basisfahrzeugs wurde der Kühlaufbau und ein schwenkbarer zweiteiliger Unterfahrschutz von der Firma Frech-Hoch montiert. (siehe: Abbildung 1)

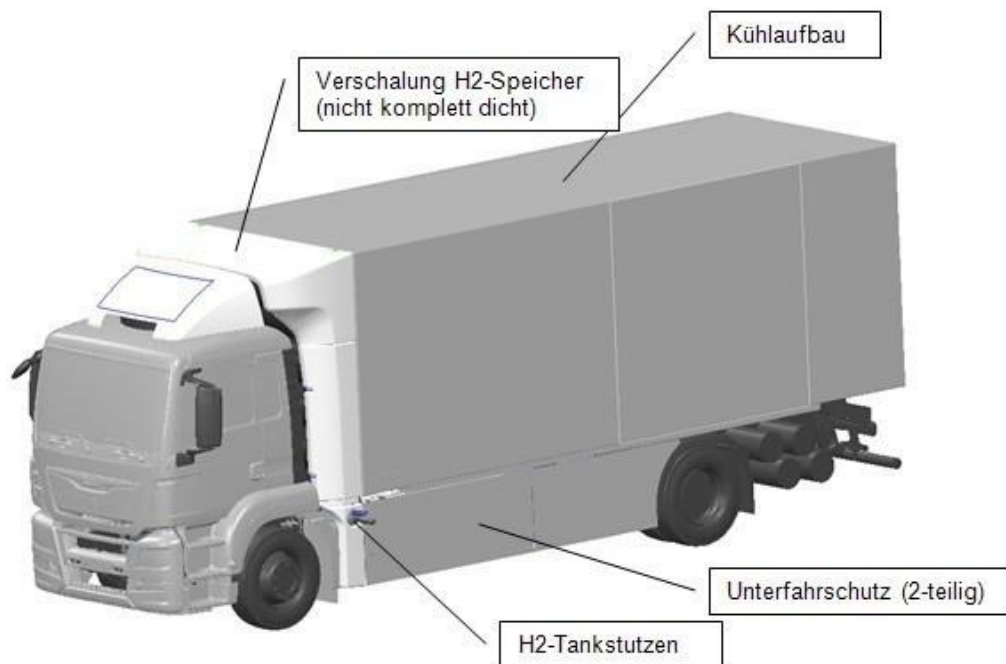


Abbildung 1: Darstellung des LKW-Aufbaus (I)

Das H2-Rack (Druckspeichersystem) ist direkt am Kühlaufbau befestigt. Der Notauslass für den Wasserstoff (Venting) und der Auspuff gehen oben über die Verschaltung des H2-Speichers weg.

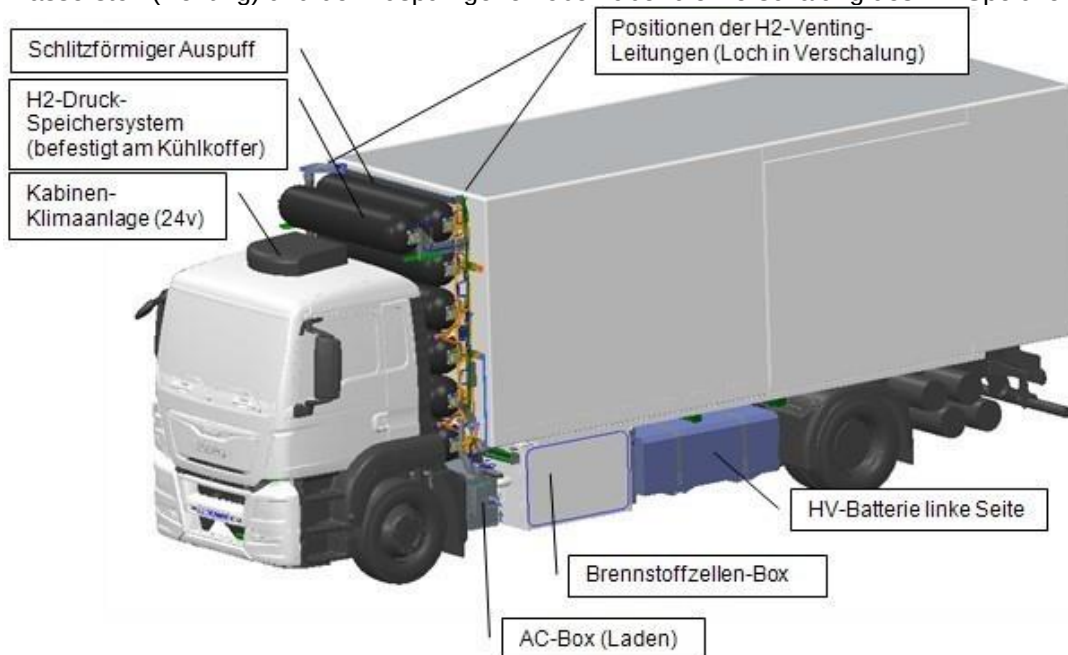


Abbildung 2: Darstellung des LKW-Aufbaus (II)



Sowohl die Brennstoffzellenbox, wie auch das Kühlaggregat für den Kühlkoffer sind über Träger fix an das Chassis angebunden. Die Brennstoffzellen-Box wird über ein Dämpfersystem vom Chassis entkoppelt. In der Hochvolt (HV)-Box 2 hinter der Brennstoffzellenbox wird das Brennstoffzellen-System an das Hochvolt-System des E-LKW's angeschlossen.

Der Platz, an dem sich ursprünglich das Diesel-Aggregat befand, wird durch E-Motor und Getriebe, sowie die Antriebskomponenten (Inverter, 12V und 24V DCDC, Ladegeräte) eingenommen.

Das von ESORO entwickelte Frontkühler-Paket umfasst neben dem Niedertemperatur-Kühler (NT-Kühler) des Antriebes auch einen NT-Kühler für die Brennstoffzellen-Peripherie und einen Hochtemperatur-Kühler (HT-Kühler) für die Brennstoffzelle mit speziellem, ethylenglycolbasiertem Brennstoffzellenkühlmittel. Aufgrund der beachtlichen Wärmeleistung von über 80kW ist das Kühlerpaket an der Front des Fahrzeuges angebracht und wird mittels 6 saugenden Fans belüftet. Ausgleichsbehälter für die NT-Kreise und für den HT-Kreis sind hinter dem Kühlaggregat angeordnet.

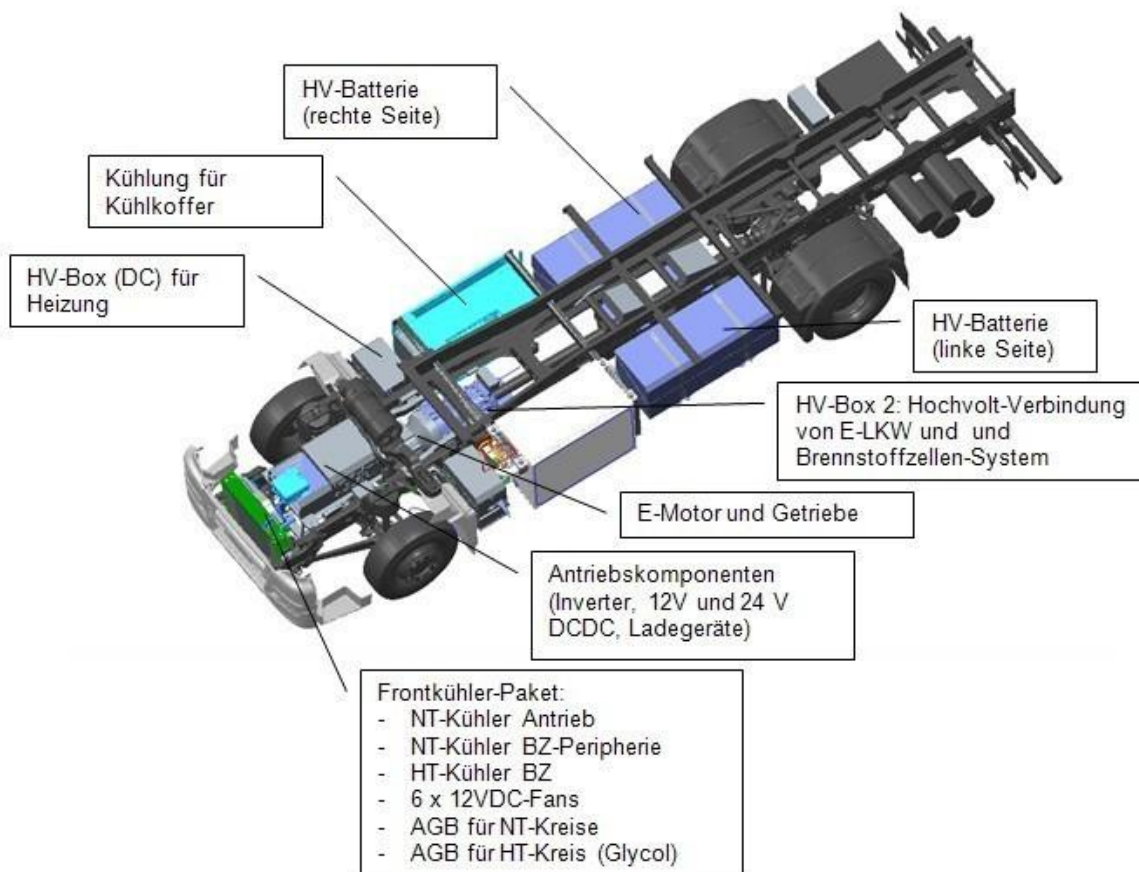


Abbildung 3: Darstellung des LKW-Aufbaus (III)



2.2 Auslegung des Brennstoffzellen-Systems

2.2.1 Zielspezifikationen

Als Vergleichsfahrzeug diene das „Standard-Fahrzeug“ von Coop, der Scania P360. Dieses Fahrzeug wird bei Coop im Anhängerbetrieb eingesetzt und kann alle geforderten Touren absolvieren. Es verfügt über die Spezifikationen aus Tabelle 2.

Vergleichsfahrzeug (Diesel)	
Chassis	MAN
Motor	TGS 18.320 4x2 LL
Max. Leistung	Pritschenwagen und Fahrgestelle
Getriebe	M mittellanges Fahrerhaus
Retarder	5500 mm
Getriebeuntersetzung	3200 mm
Radstand	Links
Reifen	WMA1OSZZ7GM703439
Fahrerhaus	18'000 kg
Max. Gesamtgewicht	44'000 kg
Aufbau	8'000 kg

Tabelle 2: Technischen Vergleichsfahrzeug



Abbildung 4: Standard-Fahrzeug von Coop



Das neue Brennstoffzellen-Fahrzeug soll möglichst universell eingesetzt werden können, um bestehende Fahrzeuge ersetzen zu können.

Die Fahrzeuge von Coop werden von einem zentralen Standort – im aktuellen Fall vom Verteilzentrum in Schafisheim – eingesetzt. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Routenlängen ab dem Standort des Fahrzeugs. Die Dieseltankstelle befindet sich dabei auf dem Werksgelände von Coop, die Wasserstofftankstelle in Hunzenschwil liegt unmittelbar daneben. Die Touren haben Längen zwischen 20 – 250 km, wobei die meisten Touren zwischen 80 – 200 km liegen.

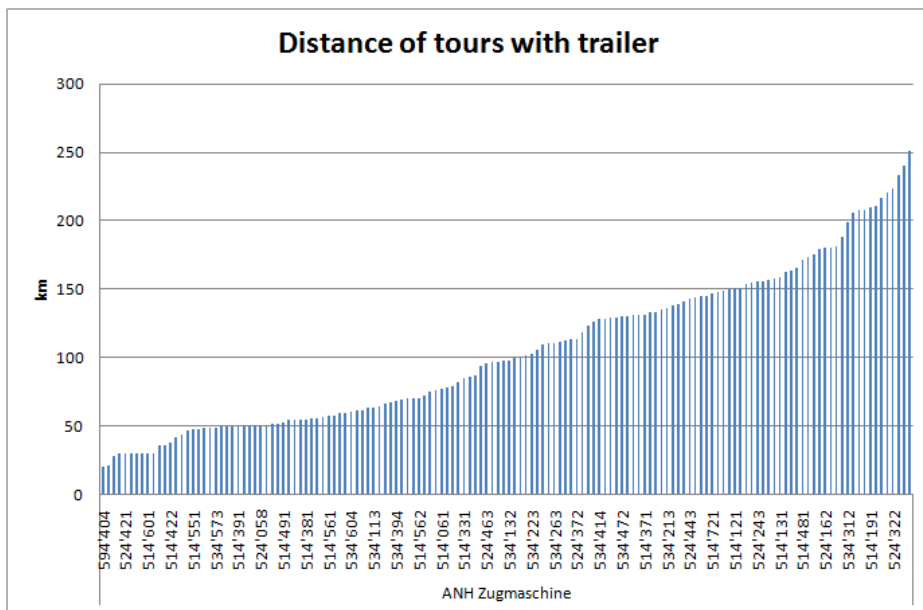


Abbildung 5: Routenlänge im Anhängerbetrieb

Die Fahrzeuge fahren pro Tag 2 – 3 Touren. Daraus ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Tageskilometer pro Fahrzeug. Diese bewegen sich zwischen 50 und knapp 500 km, wobei die meisten Fahrzeuge pro Tag zwischen 200 und 450 km zurücklegen.

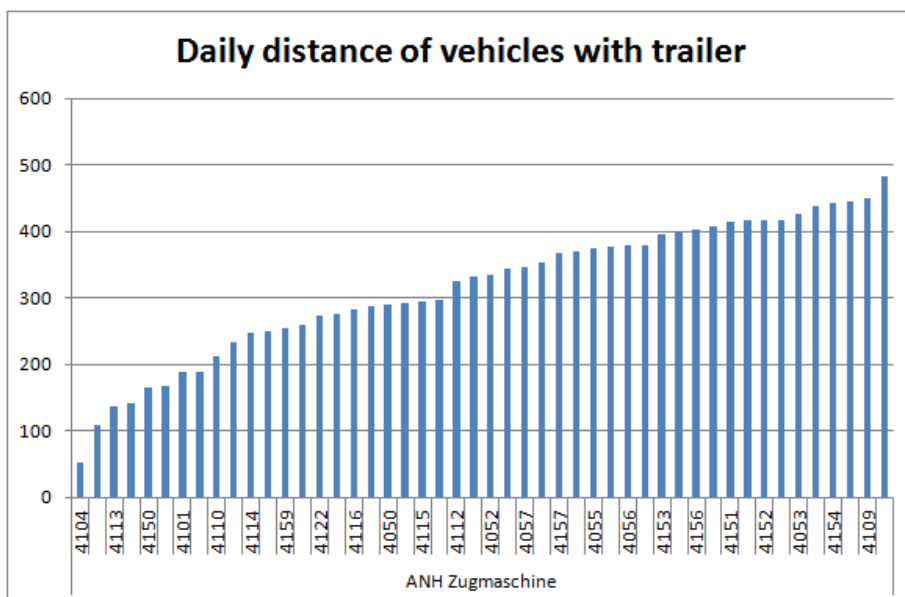


Abbildung 6: Tageskilometer im Anhängerbetrieb



2.2.2 Dimensionierung von Brennstoffzelle und Speicher

Die Dimensionierung von Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellen-System wurde von zwei Seiten her gemacht. Einerseits wurden die zu erwartenden Verbräuche abgeschätzt und daraus die notwendigen Leistungen und Energiemengen bestimmt. Andererseits mussten die vorhandenen Bauräume und auch die kommerziellen Angebote als Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Während die einzelnen Touren und die daraus resultierenden Strecken gut dokumentiert sind, bestand keine klare Datengrundlage über den Energie- und Leistungsbedarf der Fahrzeuge. Die Bestimmung dieser Werte ist jedoch die eigentliche Basis für die Auslegung des Brennstoffzellen-Systems und des Wasserstoffspeichers.

Die Bestimmung des Energieverbrauchs gestaltet sich aus folgenden Gründen schwierig:

- Der Dieserverbrauch der Fahrzeuge kann nicht den einzelnen Touren zugewiesen werden, d.h. eine direkte Analogie kann nicht hergestellt werden.
- Der Energieverbrauch hängt massgeblich von der Topografie der Route und der Beladung ab. Die Beladung ist abhängig vom Tagesgeschäft (Beispiel: Aktion Mineralwasser vs. Aktion WC-Papier). Die Zuweisung der Verbräuche zu Beladungssituationen ist aus den Daten nicht möglich.
- Die Beladung wechselt während der Tour stetig. Mit der Länge der Tour nimmt die zu liefernde Ware ab, allenfalls kommt zum Schluss wieder Leergut dazu.
- Der Mehrverbrauch mit Anhänger ist noch viel stärker von der Topografie abhängig. Während auf der Autobahn der Anhänger für wenig Mehrverbrauch sorgt, schlägt das Zusatzgewicht bei Steigungen umso mehr auf den Verbrauch.
- Die Routen, welche als „Anhängerrouten“ ausgewiesen sind, werden nicht komplett mit Anhänger gefahren. Oft wird der Anhänger bei einem Zwischenziel stehen gelassen und dann beim Rückweg wieder abgeholt.
- Mit dem E-Force One standen zwar Erfahrungswerte zum Verbrauch eines elektrischen LKWs bei Coop zur Verfügung und diese wurden auch verarbeitet. Allerdings wird das Fahrzeug nur auf einigen spezifischen Routen und ohne Anhänger eingesetzt.

Der Energieverbrauch musste deshalb abgeschätzt werden. Basis für die Abschätzung waren der Verbrauch des E-Force One von 1.13 kWh/km gem. Messungen von Coop. Für den Zusatzverbrauch im Anhängerbetrieb sind wir von 13% ausgegangen. Diese Angabe versuchten wir aus den Verbräuchen von Fahrzeugen zu bestimmen, welche mehrheitlich im Anhängerbetrieb eingesetzt werden. Die Zahl ist jedoch sehr mit Vorsicht zu geniessen. Damit kommt man auf einen Fahrverbrauch von ca. 1.3 kWh/km.

Neben den Verbräuchen für das Fahren ist auch Energie für die Kühlung der Kabine und der Ladeguträume von Fahrzeug und Anhänger notwendig. Die eingebaute Leistung für die Ladegutkühlung beträgt je ca. 8.5kW, wobei die Geräte ja nicht permanent laufen. Die Laufzeit hängt selbstredend von der Beladung (Thermische Masse, Kühlbedarf), der Anzahl Öffnungen, der Aussentemperatur und – analog zu oben – von der Dauer des Anhängerbetriebs ab. Für die grobe Auslegung sind wir von ca. 20% ausgegangen. Bei einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit über die Tour von 40 km/h kommt man damit auf einen Verbrauch von ca. 138.5 kWh/100km. Der Verbrauch ab Wasserstofftank beträgt unter Berücksichtigung der geschätzten Wirkungsgrade des Brennstoffzellen-Systems (50%) und des Inverters (98%) geschätzte 8.5 kgH₂/100km. Bei einer gewünschten Reichweite von 350 – 400 km werden dafür demnach ca. 30kg Wasserstoff benötigt.

Die beste Position für die Tanks liegt an der Vorderseite des Aufbaus hinter dem Fahrerhaus. Mögliche Bauräume unter dem Aufbau wurden geprüft, waren aber bei der vorliegenden Fahrzeugarchitektur nicht möglich, weil die möglichen Bauräume bereits durch die Antriebe und die



Batterien belegt waren. Weil die Länge des Fahrzeugs beschränkt ist, wird der Laderaum durch den Platzbedarf der Tanks kleiner. Mit Coop wurde vereinbart, dass ein 500mm kürzerer Laderaum im regulären Betrieb akzeptabel wäre. Damit reduziert sich die Kapazität von 33 auf 30 Ladungseinheiten.

Bauraum für einen zusätzlichen Tank konnte oberhalb der Kabine geschaffen werden, indem das Kühlaggregat auf die rechte Seite unter den Laderaum positioniert wurde. Damit konnte das Packaging realisiert werden, wie es in Kapitel 2.4 beschrieben wird. Das System umfasst 7 Tanks mit je 4.93 kg Brutto-Inhalt. Abzüglich dem notwendigen Restinhalt sind somit rund 30 kg Wasserstoff nutzbar.

Die Durchschnittsleistung der Brennstoffzelle beträgt unter den oben skizzierten Rahmenbedingungen (40km/h) nur 55kW. Dies wird jedoch als wenig praktikabel beurteilt. Wird die Abschätzung auf der Autobahn gemacht (80km/h), ist die durchschnittliche Leistung bei ca. 110kW. Mit einer kleinen Brennstoffzelle würde die Batterie stark geleert und müsste dann bei den Zwischenstopps wieder über die Brennstoffzelle aufgeladen werden. Dies hätte die Betriebsflexibilität stark eingeschränkt. Es wurde deshalb nach einem Brennstoffzellensystem von mindestens 100kW gesucht.

2.3 Brennstoffzellen-System

2.3.1 Systemspezifikation

Das hier verwendete Brennstoffzellensystem wurde speziell für den im FCHJU-Projekt „Autostack CORE“ entwickelten Brennstoffzellenstack konzipiert und entwickelt. Swiss Hydrogen und Powercell, beides Projektpartner des Autostack CORE Projekts, hatten in Zuge dieser gemeinsamen Aktivität im April 2016 ein Memorandum of Understanding unterzeichnet, das eine enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Brennstoffzellensysteme und eine Nutzung der oben genannten Brennstoffzellen-Stapel (von Powercell S3 genannt) vorsah.

Zum Zeitpunkt der Auftragserteilung war der Stapel zunächst nur in seiner ersten Entwicklungsstufe (Evo1) verfügbar. Die für das Projekt vorgesehene Entwicklungsstufe war gerade für erste Tests mit 20-Zellen-Stapeln auf dem Prüfstand fertiggestellt. Aus den verfügbaren Messungen wurden folgende Leistungskurven für einen 330-Zellen-Stapel abgeleitet:

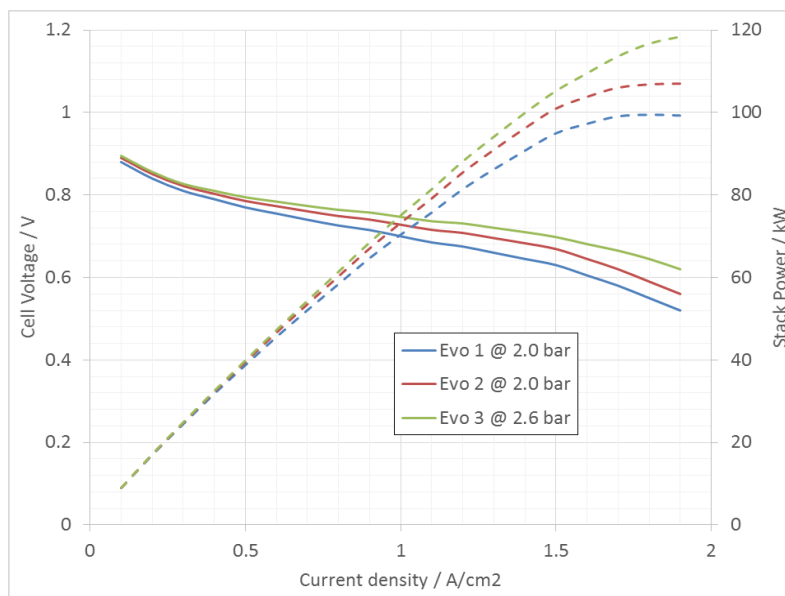


Abbildung 7: Abgeleitete Leistungskurven aus dem Autostack-Projekt.



Mit diesen Daten wäre eine Systemleistung von 100 kW (und die dafür notwendige Stapelleistung von ca. 112 kW) auch bei der maximal im Dauerbetrieb erlaubten Stromdichte von 1.5 A/cm² nicht möglich gewesen. Da ausserdem kein DC/DC Wandler für solche Ströme auf dem Markt vorhanden war, hat man sich entschieden, die Zellzahl auf 455 Zellen zu erhöhen.

Damit ergab sich dann folgende Spezifikation für den Brennstoffzellenstapel:

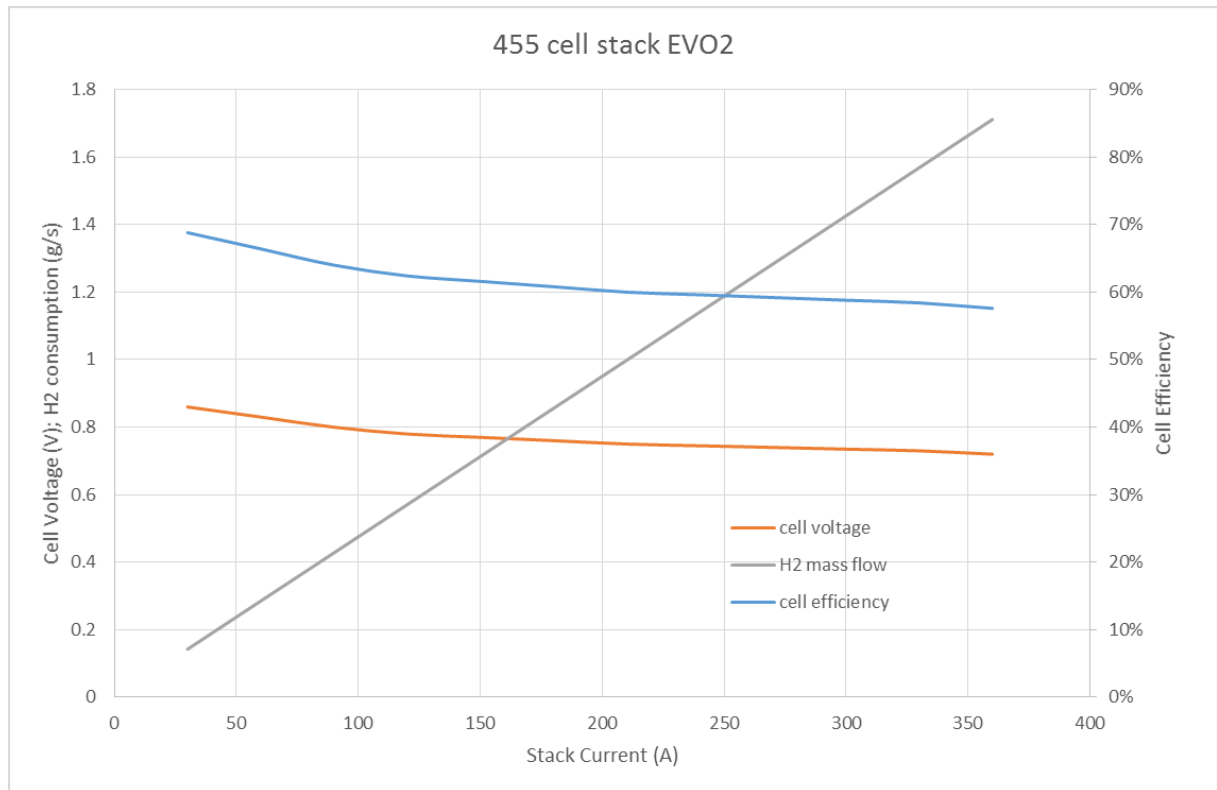


Abbildung 8: Spezifikation für den Brennstoffzellen-Stapel

Der Stapel besitzt in seinem für die Systemauslegung verwendeten Nennbetriebspunkt von 0.73 V bei 335 A eine gravimetrische Leistungsdichte von ca. 2.6 kW/kg und eine volumetrische Leistungsdichte von ca. 2.9 kW/ltr.

Um einen möglichst hohen Systemwirkungsgrad zu realisieren, als Kompressor/Expander für das Brennstoffzellensystem ein Produkt der Firma Fischer Engineering aus Herzogenbuchsee zu verwenden, das im Vergleich zu anderen Verdichtern eine deutlich reduzierte Verlustleistung versprach. Aus den Datenblättern von Fischer konnte auf den erzielbaren Systemdruck und die dafür benötigte elektrische Antriebsleistung des Verdichters geschlossen werden.

Für die Befeuchtung der Kathodenluft wurde ein Gas/Gas Befeuchter der Firma Fumatech ausgewählt, der die für den Stapel spezifizierte Feuchtebedingungen bis zu einer Leistung von 100 kW erfüllen kann.

Die Rezirkulation des Anodengas wurde passiv ausgelegt, das heisst ohne Rezirkulationspumpe. Bereits in anderen Projekten erfolgreich eingesetzte Ejektoren von Swiss Hydrogen wurden ausgewählt um ein möglichst effizientes und wenig störungsanfälliges System zu realisieren.

Die Systemeffizienz wurde wie folgt berechnet:

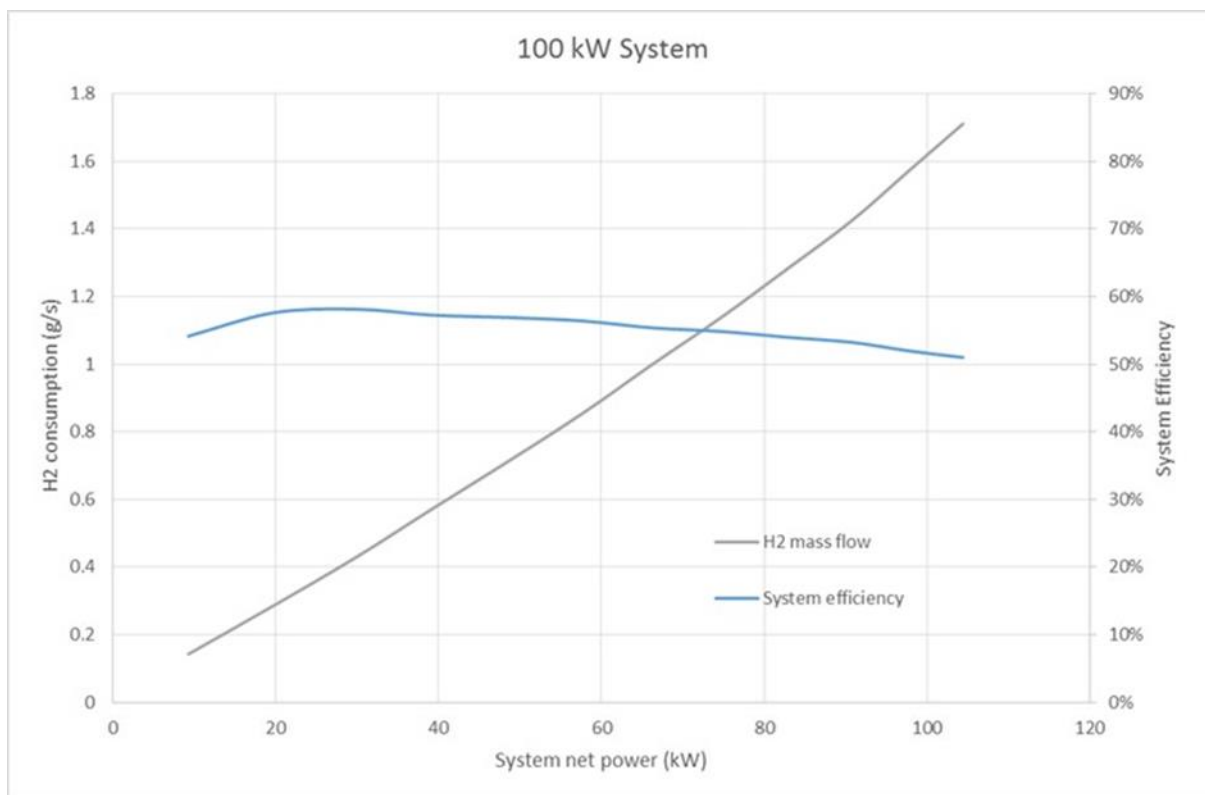


Abbildung 9: Berechnete Systemeffizienz

Aus obigen Daten wurden dann für die Angebotserstellung folgende Systemspezifikationsdaten abgeleitet:

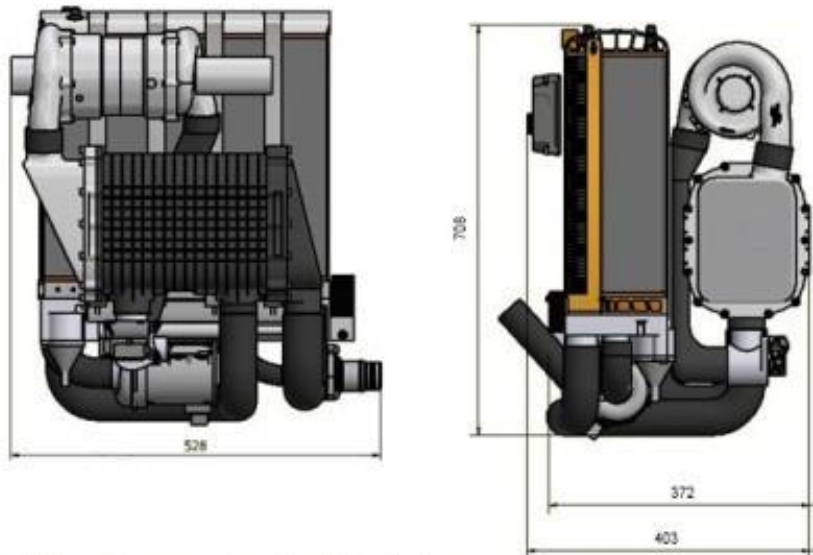
FC system technical data	SHA-100-E
Number of cells	455
Max. continuous net power	100 kW
DC net out at max. cont. power	332 V; 300 A
System pressure (at full load)	2.6 bar _{abs}
Voltage range (Peak Power EOL .. OCV BOL)	250 .. 500 V
Coolant flow (pump integrated)	150 l/min
Coolant outlet temperature	80 °C
Waste Heat	82 kW
System Efficiency (LHV H2 in to DC stack out)	52 %

Anmerkung : Eine Abweichung von bis 5% kann im Rahmen von Produktionsstreuungen der Subkomponenten nicht ausgeschlossen werden.

Abbildung 10: Systemspezifikation zur Angebotserstellung



Der Bauraum des Rumpfsystems wurde wie folgt angegeben:



Die übrigen Komponenten wie Luftfilter, Luftmassenstrommesser, Kompressor-Umrichter, Kühlwasserausgleichsgefäß sowie Halter und Gehäuse Teile können im vorhandenen Fahrzeugbauraum entsprechend den Gegebenheiten verteilt werden beziehungsweise dem Bauraum angepasst werden.

Abbildung 11: Abmessungen des Brennstoffzellen-Systems

Und das Gewicht des Systems wurde auf Basis der High-Level-Bill of Material (BOM) wie folgt geschätzt:

Das Gesamtgewicht des gelieferten Systems inklusive der Flüssigkeiten beträgt ca. 98 kg und teilt sich wie folgt auf:

Mass (kg)	SHA-100-C	SHA-100-E
Fuel Cell Stack		
Fuel Cell Stack	33.4	42.7
Cathode subsystem		
Air filter	1.5	1.5
Mass flow meter	0.1	0.1
Compressor	11.0	11.0
Compressor inverter	5.0	5.0
Humidifier	5.0	5.0
Charge Air cooler	1.0	1.0
Humidifier Bypass	1.0	1.0
Anode subsystem		
Anode Module	2.0	2.0
Coolant Subsystem		
Coolant Pump	2.5	2.5
Bypass Valve	0.3	0.3
Coolant reservoir	1.0	1.0
Coolant	7.0	7.0
Integration		
Stack interface components	1.0	1.0
Brackets	8.0	8.0
Covers, heat shields	2.0	2.0
Wiring Harness	3.0	3.0
Hoses	2.0	2.0
Controller	0.8	0.8
Other Parts	1.0	1.0
Sum	88.6	97.9

Abbildung 12: Gewichtsabschätzung des Brennstoffzellen-Systems

Somit ergab sich **auf Systemebene** eine gravimetrische Leistungsdichte von ca. 1 kW/kg und eine volumetrische Leistungsdichte von ca. 0.7kW/ltr. Diese Werte übertrafen damals andere kommerziell erhältliche Brennstoffzellensysteme um ein Vielfaches.



2.3.2 Systemlayout

Abbildung 13 zeigt die Medienflüsse im Brennstoffzellen-System schematisch auf. Im Zentrum steht das eigentliche Brennstoffzellen-System mit dem Stapel (Stack) und seinen Endplatten (gelb), der Luftaufbereitungs-Einheit (Filter, Kompressor, Befeuchter) und das Wasserstoff-System mit den verschiedenen Ventilen.

Versorgt wird das System aus dem 350 bar-Wasserstoff-Tank, wobei der Druck für das Brennstoffzellen-System auf 11 bar reduziert wird.

Zwei Kühlsysteme führen die entstehende Abwärme ab: Die Brennstoffzelle selber wird über das Hochtemperatur-System auf eine maximale Temperatur von ca. 80°C gekühlt, während insbesondere die elektrischen Komponenten über das Niedertemperatur-System gekühlt werden.

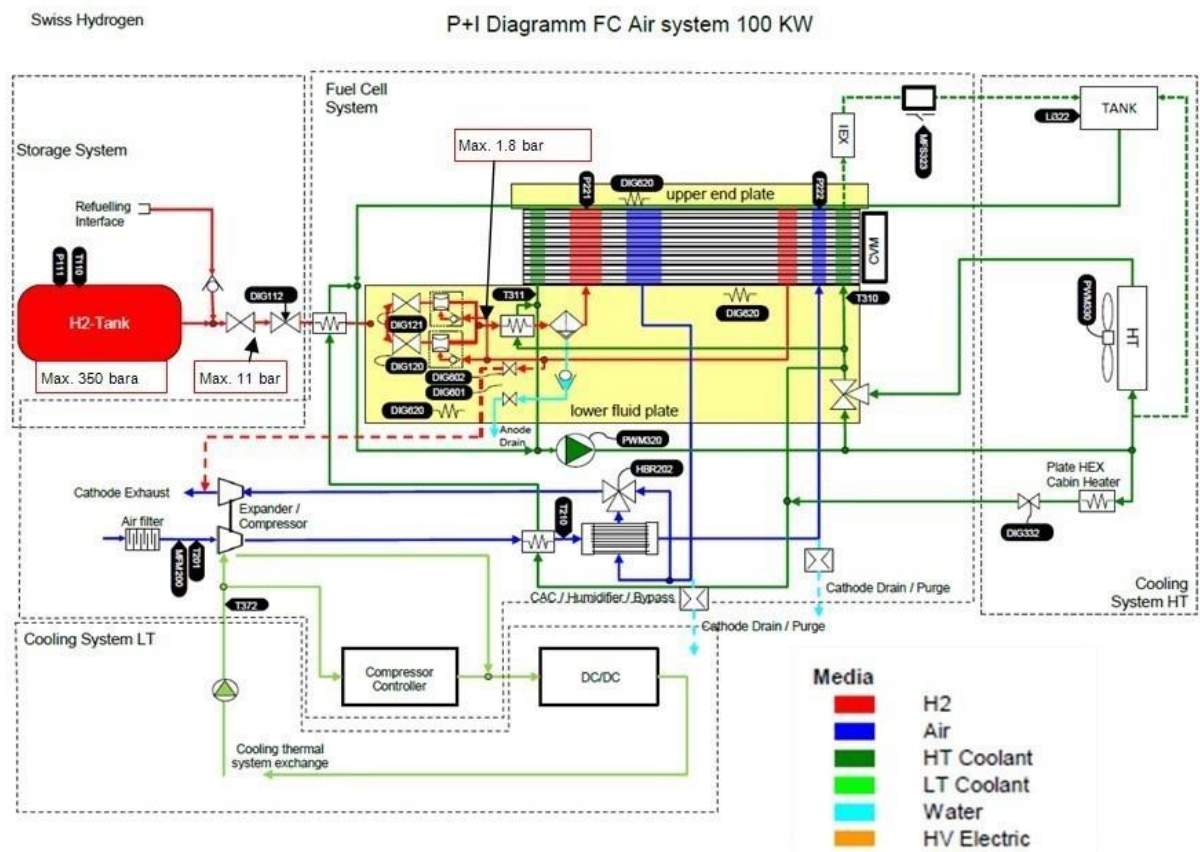


Abbildung 13: Schema des Brennstoffzellensystems

Die technische Umsetzung im Aufbau des Brennstoffzellen-Systems wird in Abbildung 14 dargestellt. Der Stack von Powercell stellt das Zentrum dar. Um den Stack herum werden der Kompressor (inkl. seiner Steuerung), der Befeuchter, sowie die Wasserstoff-Aufbereitung angebaut. Durch den kompakten Stapel mit seinen metallischen Bipolarplatten und den optimierten Aufbau wird eine hohe volumetrische Energiedichte erreicht.

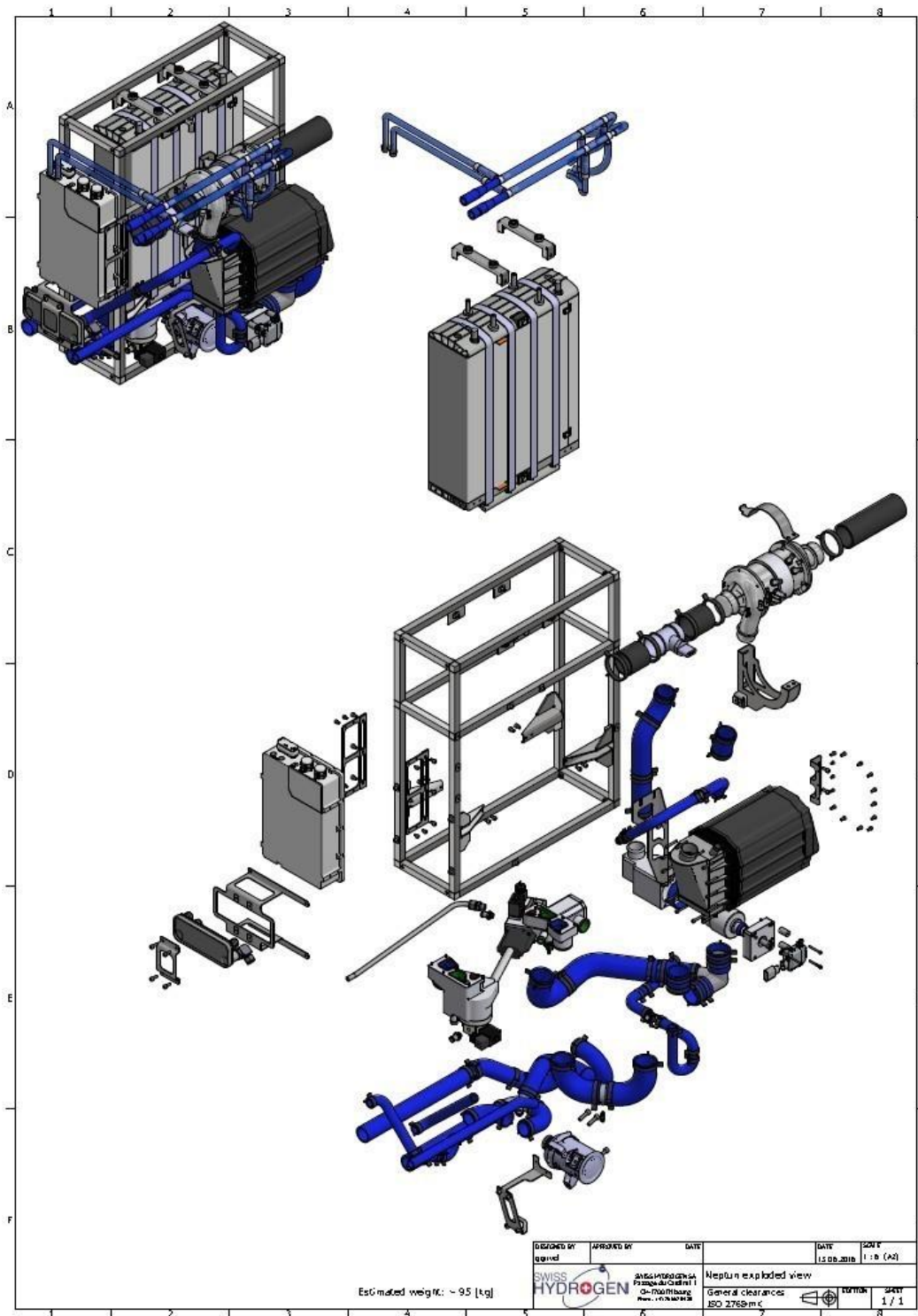


Abbildung 14: Explosionszeichnung der Hauptelemente des Brennstoffzellensystems



2.3.3 Mechanischer Aufbau

Die Brennstoffzellenbox ist über vier Dämpferelemente an zwei Chassis-Trägern aufgehängt.

Um eine optimale Zugänglichkeit bei knappen Platzverhältnissen zu erreichen, wurde eine innere Schwenktüre mit integrierten Komponenten konstruiert. Sowohl DC/DC-Wandler, wie auch Nieterspannungs (NV)-Box und verschiedene Controller befinden sich auf, resp. in der Türe. Die Kabel- und Kühlleitungen dieser Komponenten verlaufen über die Scharnierachse (Abbildung 15, links). Die Schwenktüre dient gleichzeitig auch als Absperrung resp. Berührungsschutz der Hochvolt-Komponenten im Innern der Box.

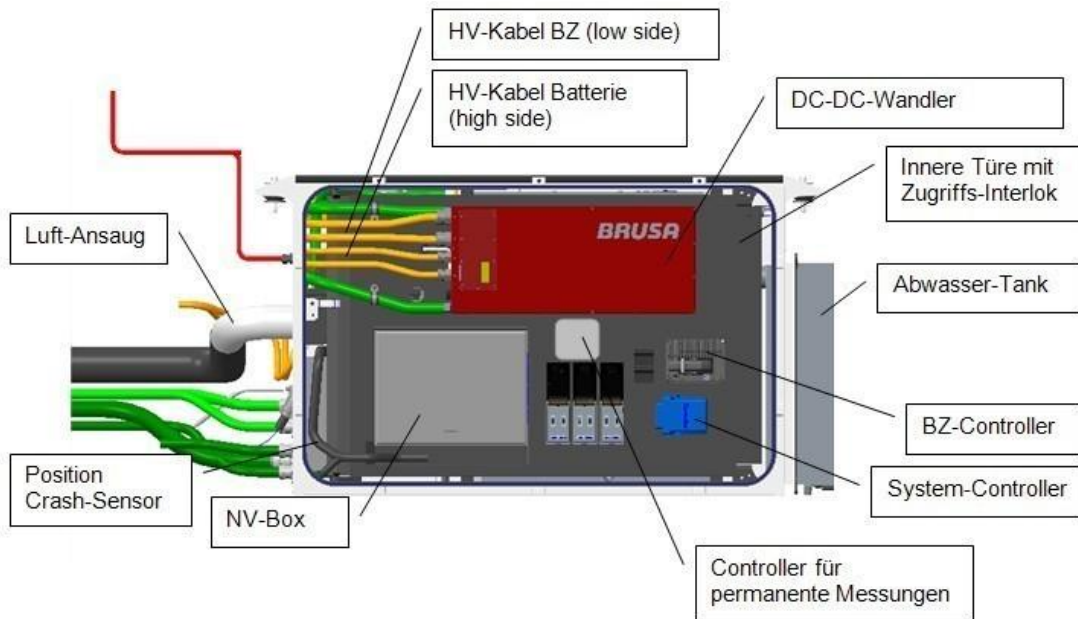


Abbildung 15: CAD-Seitenansicht der Brennstoffzellenbox mit geschlossener Schwenktüre

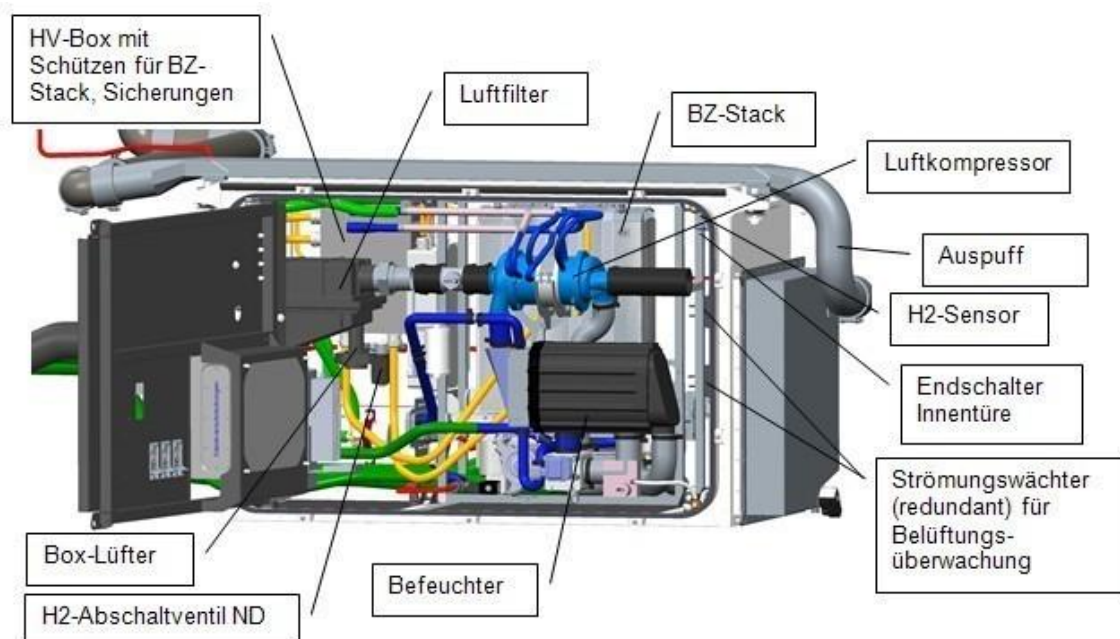


Abbildung 16: CAD-Seitenansicht der Brennstoffzellenbox mit offener Schwenktüre



Die Frischluftzufuhr erfolgt über den Original-Filter des Dieselaggregates. Zusätzlich wird die Luft nochmals über einen speziellen Brennstoffzellenfilter gereinigt (siehe Abbildung 16). Mittels Kompressor wird die Luft vor der Brennstoffzelle verdichtet und danach wieder expandiert. Allfällig anfallendes flüssiges Wasser wird in einem dem Brennstoffzellensystem nachgeschalteten Tank zurückgehalten, und bei fahrendem Fahrzeug langsam entleert. Heisse Luft und Wasserdampf werden über den Auspuff nach oben ins Freie geleitet.

Die Brennstoffzellenbox wird über einen separaten Luftstrom belüftet, damit Wasserstoff im Falle einer leichten Leckage, der sogenannten betrieblichen Leckage, in die Umgebungsluft befördert wird. Die Innenluft wird zusätzlich über einen H₂-Sensor überwacht, um im Falle einer aussergewöhnlichen Leckage einen Notstopp mit Wasserstoffabschaltung veranlassen zu können.

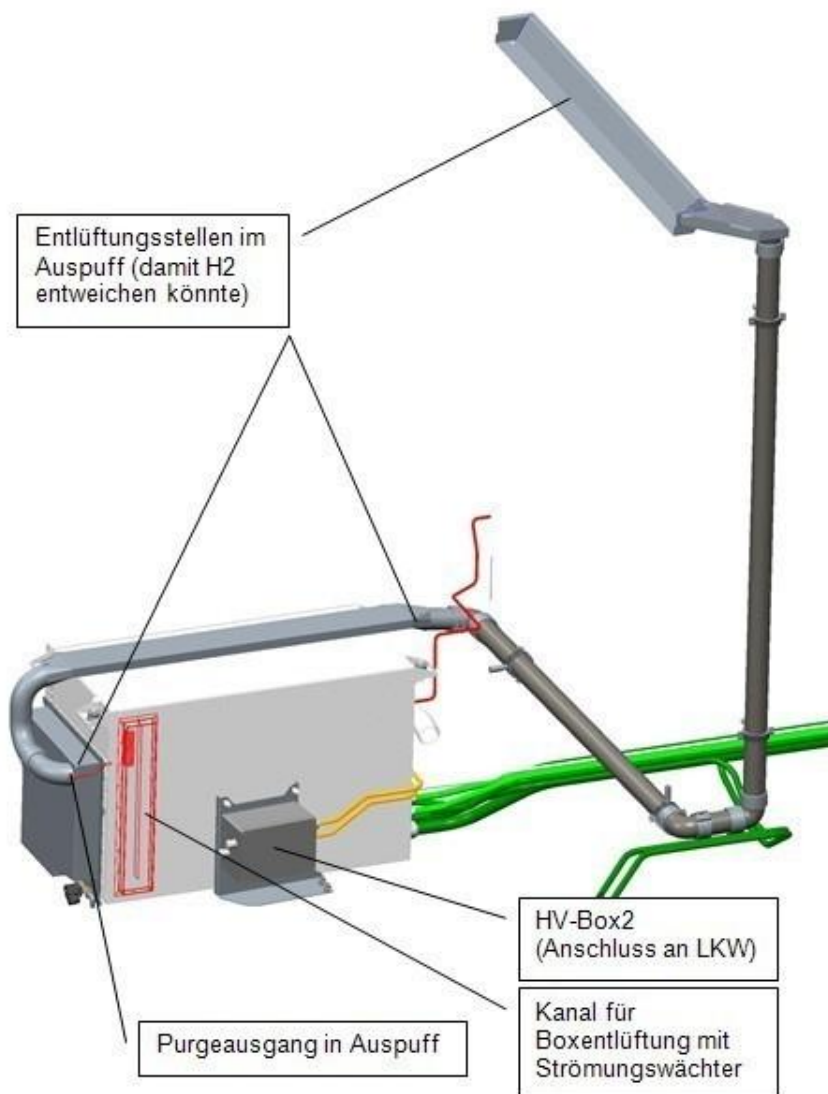


Abbildung 17: CAD: Rückseite der Brennstoffzellen-Box mit Auspuffanlage und HV-Box 2



2.4 Tanksystem

2.4.1 Beschreibung des Aufbaus

Das Tanksystem besteht aus 7 Druckbehältern für 350 bar. Die Behälter sind vom Typ 3, d.h. sie bestehen aus einem dünnen, metallischen Innenbehälter, welcher mit Kohlefasern umwickelt wird. Das Metall sorgt dabei dafür, dass der Behälter dicht ist und der Wasserstoff nicht hinausdiffundieren kann, die Kohlefasern sorgen für die Festigkeit des Tanks.

Die Tanks sind – wie alle Hochdruckkomponenten am LKW – nach der EN79/2009 (Norm für die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen) zertifiziert.

Das Tanksystem ist als komplettes, eigenständiges Modul aufgebaut. Es beinhaltet alles vom Tankstutzen bis zum Druckminderer auf den Brennstoffzellen-Druck. Es verfügt auch über einen eigenen Controller, der die Temperaturen und Drücke im System misst, die Tankventile steuert und mit der übergeordneten Steuerung des Fahrzeugs kommuniziert.

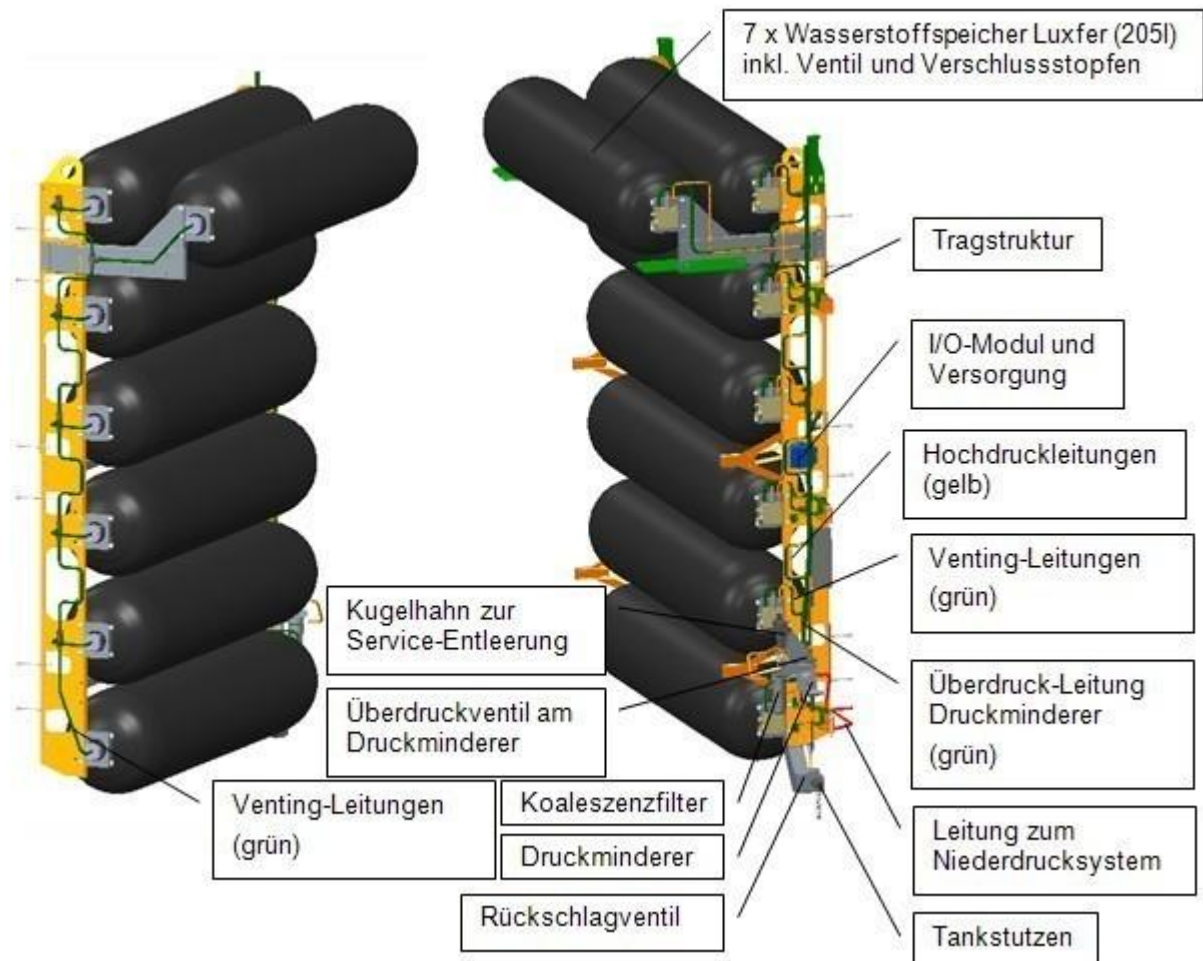


Abbildung 18: CAD Ansicht des Tanksystems von rechts und von links in Fahrtrichtung



Die Zylinder sind auf der Hochdruckseite miteinander verbunden, wobei jeder Zylinder über ein eigenes Ventil mit den notwendigen Sicherheitsfunktionen verfügt. Rohre, Fittinge und Verbinder verfügen ebenfalls über ein EN79/2009-Zertifikat.

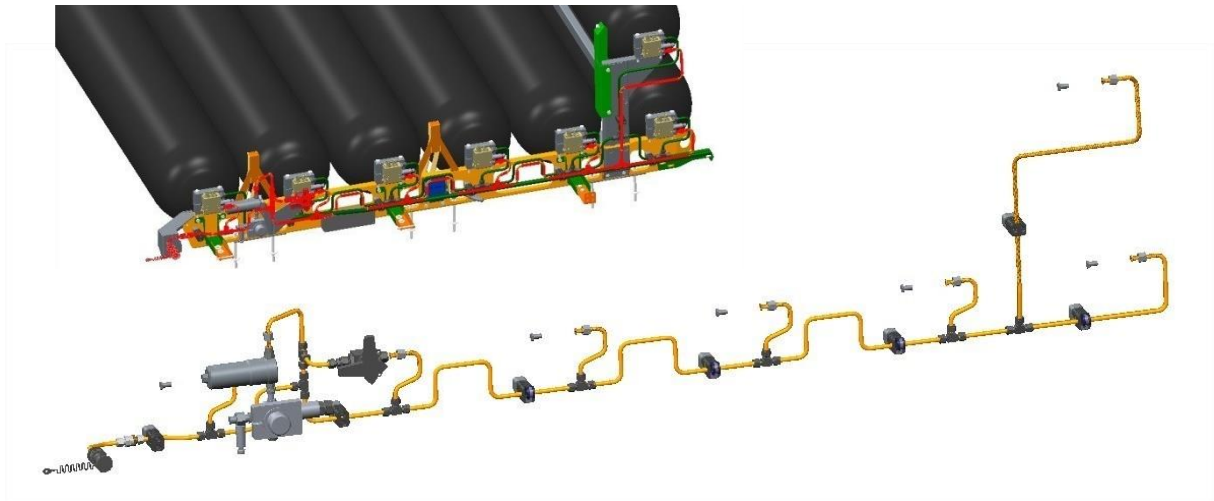


Abbildung 19: H2-Armaturen Hochdrucksystem 350bar

Im Falle eines Feuers verfügen die Tankventile über eine Sicherung, welche den Wasserstoff aus dem Tank entweichen lässt. Damit wird verhindert, dass der Druck im Tank so hoch wird, dass der Tank unkontrolliert zerrissen wird. Diese Sicherungen sind beidseitig an den Tanks angebracht und führen den Wasserstoff in die Venting-Leitungen. Über diese Leitungen wird der Wasserstoff nach oben geführt und über dem LKW abgeblasen. Dadurch kann gewährleistet werden, dass kein Wasserstoff gefangen bleibt und sich Ansammlungen von Gas bilden.

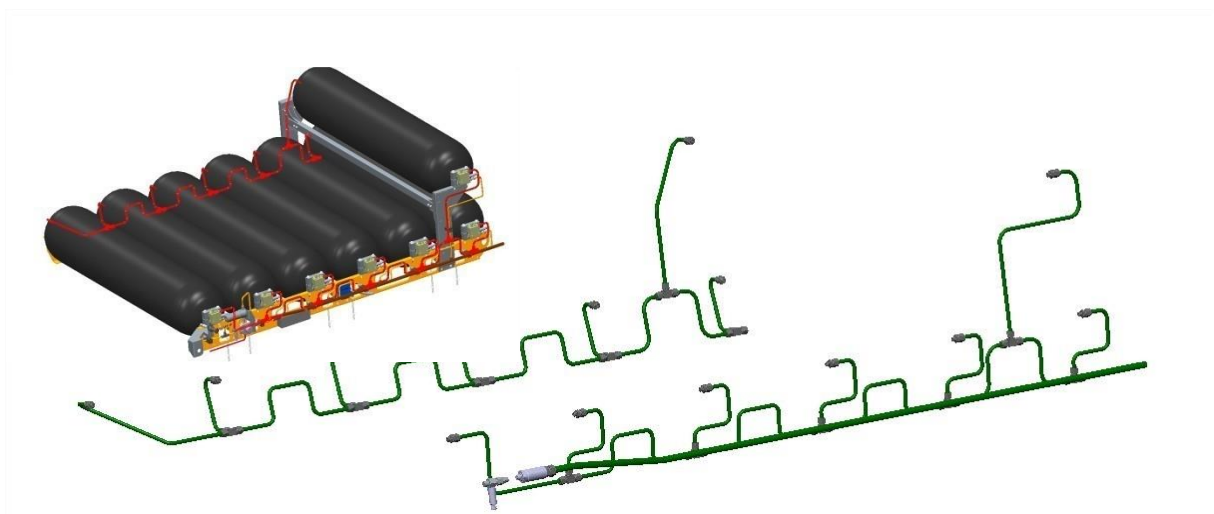


Abbildung 20: H2-Armaturen Venting (Niederdruck)



2.4.2 Schema

Abbildung 21 zeigt das Schema des Speichersystems. Dabei werden insbesondere die Sicherheitsfunktionen der Ventile ersichtlich. Neben der oben erwähnten Temperatursicherung (TPRD) enthalten die Ventile u.a. auch einen Schutz, dass bei einer abgerissenen Leitung der Ausfluss begrenzt wird (EFV) und ein manuelles Ventil zum Verschluss eines Tanks.

Die Ventile werden für den Fluss aus dem Tank elektrisch geöffnet. Betankt werden die Behälter über ein Rückschlagventil bei geschlossenen Tankventilen.

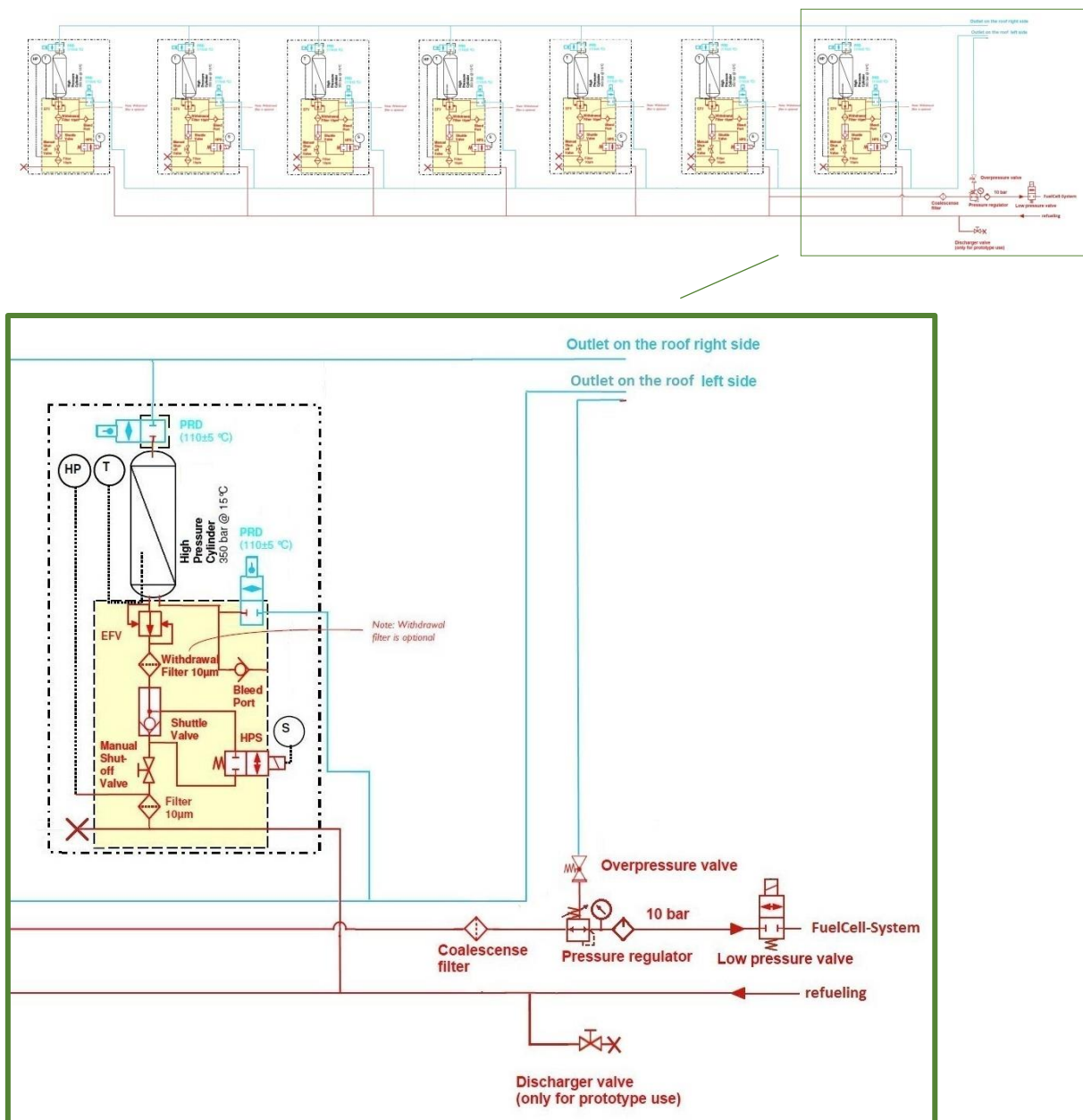


Abbildung 21: Schematische Darstellung des H2-Tanksystems



2.5 Hochvolt-System

Das Brennstoffzellen-System wurde in das zugelassene Elektrofahrzeug integriert. Folgendes Schema zeigt das brennstoffzellenseitige HV-System, das in das bestehende Hochvolt-System (HV-System) des Elektrofahrzeuges integriert wurde.

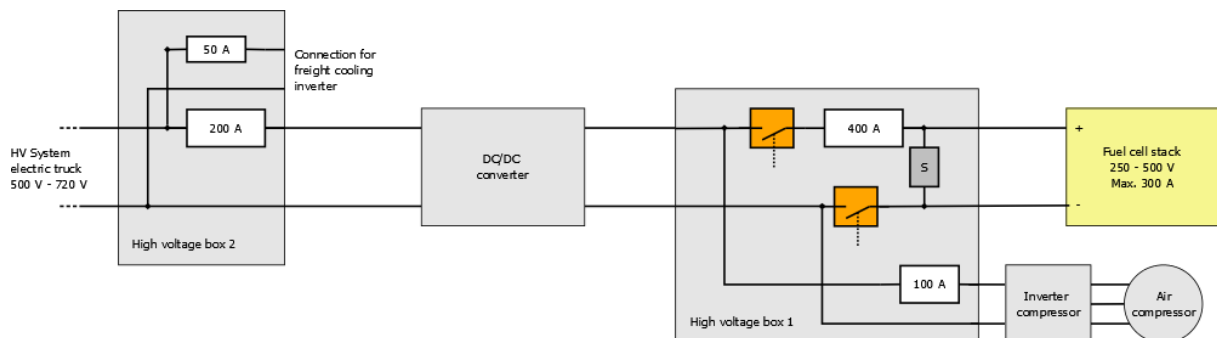


Abbildung 22: Elektroschema des Brennstoffzellen - HV-Systems

Der DCDC-Wandler überträgt die Leistung der Brennstoffzelle auf das HV-System des LKWs. Im Wesentlichen lädt das Brennstoffzellen-System kontinuierlich die Batterie des LKWs nach, es handelt sich daher um eine Serien-Hybrid-Applikation.

Weil die Leistung des Antriebs jedoch stark schwankt und im Falle des Rekuperierens ja auch negativ werden kann, muss das Brennstoffzellen-System trotzdem dynamisch auf die Fahrzustände reagieren können.

2.6 Einbindung der Steuerung

Die Steuerung des Brennstoffzellen-Systems muss mit der Steuerung des LKWs verbunden werden. Die Kommunikation erfolgt dabei über CAN. Das Fahrzeug teilt dem Brennstoffzellen-System über den CAN-Bus im Wesentlichen mit, in welchem Zustand sich die Batterie befindet und wie hoch der aktuelle Leistungsbedarf des Fahrzeugs ist. Wichtig sind dabei insbesondere der aktuelle Ladezustand und der aktuell maximal mögliche Ladestrom. Daraus errechnet der Brennstoffzellen-Controller anhand der Betriebsstrategie die notwendige Leistung der Brennstoffzelle und steuert das System dementsprechend an.

Der Antrieb bezieht seine Energie über das HV-Netz, an welchem die Batterie und die Brennstoffzelle parallel angeschlossen sind. Über die Betriebsstrategie wird bestimmt, wieviel Leistung die Brennstoffzelle in dieses Netz einspeisen soll. Braucht der Antrieb mehr Leistung, als die Brennstoffzelle liefert, kommt die Differenz aus der Batterie und der Ladezustand der Batterie (SOC) sinkt. Braucht der Antrieb weniger, wird über die Brennstoffzelle die Batterie geladen und der SOC steigt. Mit der Betriebsstrategie wird versucht, den SOC bei ca. 80% zu halten. Hintergrund dafür ist, dass die maximale Leistung des Antriebs ja höher als die maximale Leistung der Brennstoffzelle ist und man durch einen hohen SOC die Reserven für einen längeren Betrieb mit hoher Leistung bereithalten kann. Zudem versucht man, die Leistung der Batterie klein zu halten, um die Erwärmung der Batterie zu verhindern.

Die Betriebsstrategie gibt vor, dass das Brennstoffzellen-System ab einem SOC von 90% anläuft und berechnet abhängig von einem gemittelten, aktuellen Leistungsbedarf und dem SOC eine Zielleistung. Die Regelung der Brennstoffzelle versucht dann, dieser Zielleistung zu folgen, muss jedoch auf die aktuellen, dynamischen Randbedingungen Rücksicht nehmen. Diese sind beispielsweise die maximalen Ladeströme der Batterie, der aktuelle Leistungsbedarf des Fahrzeugs, die Rekuperation oder die internen Grenzwerte (z.B. Dynamik) des Brennstoffzellen-Systems. Dies führt dazu, dass die



Steuerung der Brennstoffzelle sehr dynamisch sein muss, obwohl das Fahrzeug als Serien-Hybrid mit einer recht grossen Batterie aufgebaut ist. Insbesondere bei einer hohen Batterietemperatur, welche in den Sommermonaten oft auftritt, wird der Ladestrom stark reduziert. Wenn also das Fahrzeug z.B. auf Grund eines abfallenden Streckenprofils plötzlich weniger Leistung benötigt, muss auch die Leistung der Brennstoffzelle rasch reduziert werden, damit die Fahrzeugbatterie nicht über ihren maximalen Ladestrom belastet wird und schlimmstenfalls ausschaltet.

Das Fahrzeug kann mit oder ohne Brennstoffzelle betrieben werden. Insbesondere beim Beladen des Fahrzeugs und bei Rangiervorgängen mit sehr kurzen Strecken, macht es wenig Sinn, die Brennstoffzelle schon in Betrieb zu setzen. Ebenfalls, wenn das Fahrzeug in der Tiefgarage rangiert werden muss, soll die Brennstoffzelle nicht angeschaltet werden. Der Fahrer ist dabei für die Wahl des Betriebsmodus zuständig. Er bedient die Brennstoffzelle über ein Display (s. Abbildung 23) in der Fahrkabine und wählt einen Betrieb mit oder ohne Brennstoffzelle.



Abbildung 23: Display in der Fahrerkabine zur Bedienung des Brennstoffzellen-Systems

Das Display versorgt den Fahrer auch mit den wichtigsten Informationen des Fahrzeugs. So werden der Ladzustand der Batterie und der Füllstand der Wasserstofftanks angezeigt. Ebenfalls werden die Energieflüsse dargestellt. Weil es sich beim Testen als nützlich erwiesen hat, die Temperaturen von Batterie und Kühlwasser im Auge zu behalten, werden diese ebenfalls im Display angezeigt. Selbstredend werden auch Fehlermeldungen dargestellt.

Weil der LKW ein umgebautes Diesel-Fahrzeug ist und die Anzeigeeinstrumente nicht komplett für die Brennstoffzellenanwendung adaptiert wurden, werden auch einige Informationen des Fahrzeugs im selben Display angezeigt, so z.B. die Position des Gangwahlhebels und die Einstellung des Tempomates.

Über das Display öffnet der Fahrer beim Tanken auch die Tankklappe.



2.7 Technische Daten Brennstoffzellen-LKW

In der Übersicht stellen sich die Daten des Fahrzeugs wie in Tabelle 3 dar.



Abbildung 24: Brennstoffzellen-LKW auf Testfahrt

Spezifikation Brennstoffzellen-LKW	
Reichweite	375 – 400 km
Verbrauch	7.5 – 8 kgH ₂ /100km
Betankungszeit	Ca. 10 min
Ladekapazität	60 Rollcontainer inkl. Anhänger
Max. Gewicht	35 Tonnen (34 t + 1 t wegen alternativem Antrieb)
Motor, Getriebe und Batterie	
Motorleistung	250 kW
Batterie	120 kWh, 500 – 750 VDC
Brennstoffzellen-System	
Dauerleistung	100 kW
Spannung	250 – 500 VDC
Tanksystem und Speicher	
Kapazität	34.5 kg brutto / 31.0 kg netto
Druck	350 bar
Tankstutzen	350 bar HighFlow

Tabelle 3: Übersicht über die technischen Daten des BZ-LKWs



3 Vorgehen und Methode

3.1 Aufbau

Im ersten Projektjahr wurde der ESORO-Lastwagen mit einem emissionsfreien Antrieb für den Betrieb eines 34t Nutzfahrzeugs realisiert.

Als Basis wurde ein MAN-Chassis verwendet, das mit Elektroantrieb und einem Getriebeautomaten von Allison durch Ceekon/Eboss elektrifiziert wurde.



Abbildung 25: Basisfahrzeug: MAN TGS 18.320 4x2 LL

Der Kühlkoffer (inkl. der Hebebühne) und der Unterfahrschutz wurden von der Firma Frech-Hoch aufgebaut und montiert. Der Unterfahrschutz kann für eine gute Zugänglichkeit des Brennstoffzellen-Systems hochgeklappt werden.



Abbildung 26: Montage von Kühlkoffer und Unterfahrschutz bei Frech-Hoch

Die Integration der Wasserstofftechnik erfolgte durch ESORO. Das Brennstoffzellen-System wurde von Swiss Hydrogen entwickelt und aufgebaut. Die Integration des Wasserstofftanks, bestehend aus



sieben Drucktanks, der gesamten Peripherie für die Brennstoffzelle (Gehäuse und Aufhängung, Zuluft und Abgasführung, elektrische Anbindung und Kühlung) erfolgte durch ESORO.

Abbildung 27 zeigt die leere Box, welche das Gehäuse für das Brennstoffzellen-System darstellt. Die gesamte Montage des Systems kann somit ausserhalb des Fahrzeuges erfolgen und es kann von einem universellem Brennstoffzellen-Modul gesprochen werden. Die Box bietet einerseits die Anbindungspunkte gegenüber dem Chassis und anderseits alle Montagepunkte für das Brennstoffzellen-System. Sie isoliert das Brennstoffzellen-System von den äusseren Einflüssen (Schmutz, Feuchtigkeit, Temperatur etc.) und stellt alle Interfaces (elektrische Stecker, Anschlüsse für Kühlkreise, Luft- und Wasserstoff-Verbindungen und „Auspuff“) zum Fahrzeug dar.



Abbildung 27: Brennstoffzellenbox unverbaut

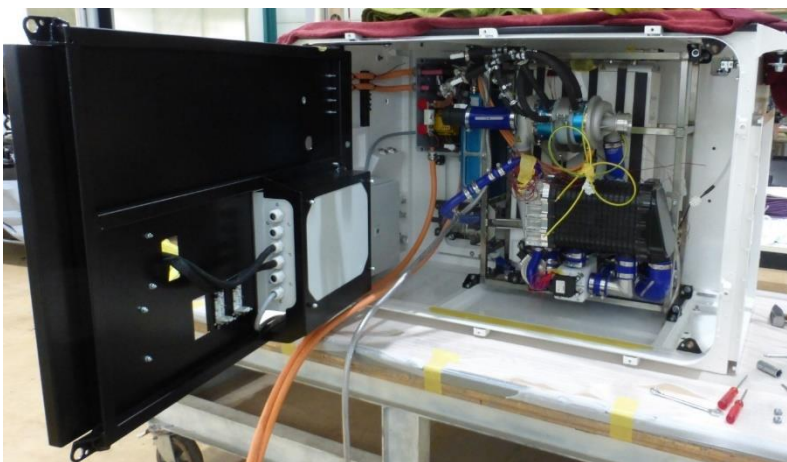


Abbildung 28: Testeinbau des Brennstoffzellensystems

In Abbildung 28 ist der Zustand während dem Einbau ersichtlich. Zu diesem Zeitpunkt sieht es noch nach viel Bauraum aus. Wenn das System voll verbaut ist, wird dann auch ersichtlich, weswegen die Box die entsprechende Grösse haben muss (s. Abbildung 29)



Abbildung 29: Komplett eingebautes System im Gehäuse

Das Tanksystem wurde von ESORO entwickelt, konstruiert und aufgebaut. Basis bildet ein Stahlrahmen, auf welchen die Tanks verschraubt werden. Das Rack wird dann direkt an der Vorderwand des Kühlkoffers des LKWs verschraubt. Hier macht man sich das Layout des Fahrzeuges zu Nutze – bei einer Sattelzugmaschine wäre dieses Design so nicht möglich, sondern das Rack müsste auf dem Chassis stehen. Durch die gewählte Position fallen 50 cm Laderaum weg. Abbildung 30 zeigt das Speichersystem beim Verbau und dann in finaler Ausführung inkl. der aerodynamischen Verschalung.



Abbildung 30: Montage des Tankracks am Koffer und komplett verbautes Tanksystem



3.2 Test und Zulassung

3.2.1 Stack-Tests

Der Stapel wurde nach dem Zusammenbau durch den Hersteller Powercell getestet, allerdings nur bis zu einer Stromstärke von 135A und nicht bis zur vorgesehenen Stromstärke von 350 A, da bei Powercell kein entsprechender Prüfstand vorhanden war. Neben Dichtheitsprüfung und Isolationsprüfung wurde eine Strom-Spannungskurve mit Doppelzellmessung aufgenommen. Dabei zeigt sich bereits eine Zunahme der Zellspannungsspreizung und der Standardabweichung bei 135 A im Vergleich zu niedrigeren Strömen, die Werte lagen aber innerhalb der Spezifikation. Ob dies für den maximalen Strom auch der Fall war, ist fraglich.

Ausserdem wurde der Stapel mit verschiedenen Anoden- und Kathodenstöchiometrien getestet. In diesen Tests zeigt sich, dass der Stapel bei moderat niedriger Anodenstöchiometrie zu Instabilitäten neigt.



Abbildung 31: Der Brennstoffzellenstapel auf dem Prüfstand bei Powercell

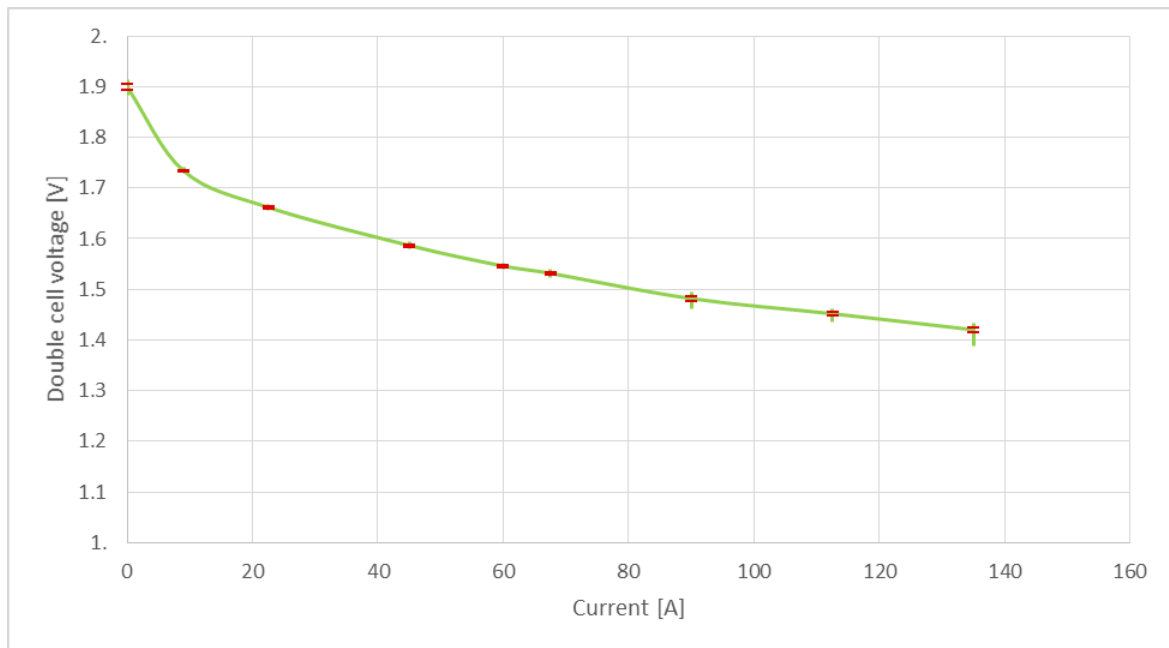


Abbildung 32: Mittlere Strom-Spannungskurve (mit Standardabweichung als rote Linien und min/max Zellspannungen als vertikale grüne Linie). Messung prüfstandsbedingt nur bis 135 A statt 350 A nominaler Stromstärke

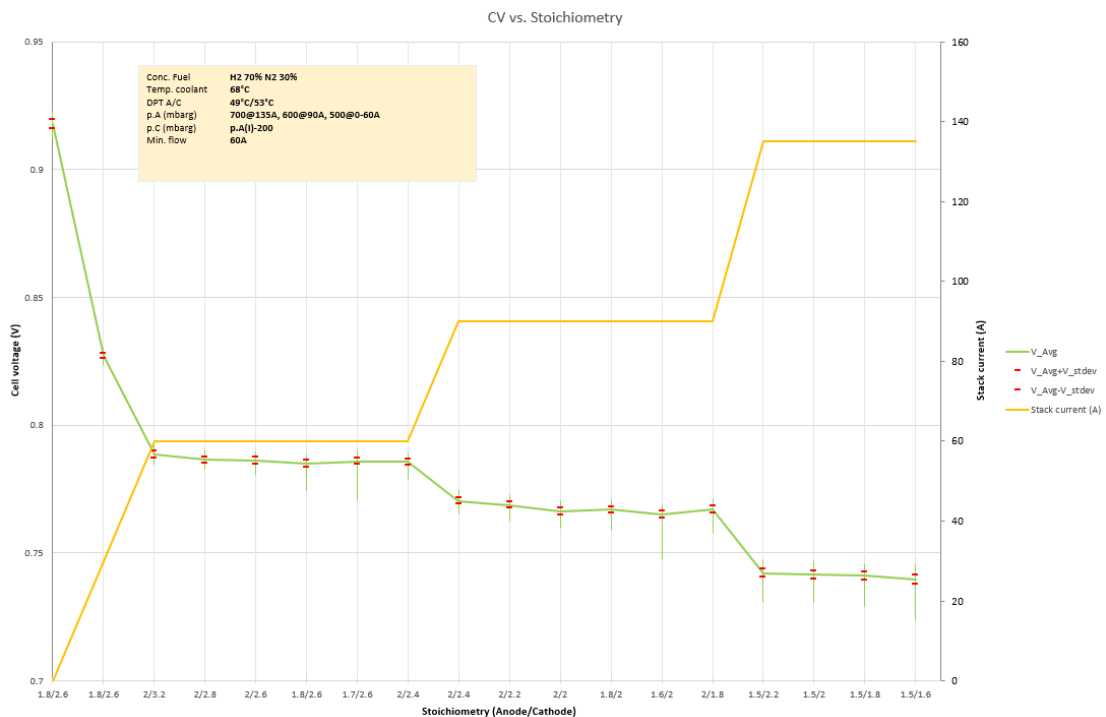


Abbildung 33: Einfluss der Anoden- und Kathodenstöchiometrie auf die Betriebsstabilität. Um eine deutliche Abweichung der minimalen Spannung von der mittleren Spannung zu vermeiden ist eine relativ hohe Anodenstöchiometrie nötig (zum Vergleich: Der eigene, kleinere, Stapel von Swiss Hydrogen kann bei einer Stromdichte von 0.3 A/cm² mit einer Stöchiometrie von 1.3 mit reinem Wasserstoff stabil betrieben werden. Beim Stapel von Powercell, der in diesem Projekt eingesetzt wurde, ist bei 90 A eine Stöchiometrie von 1.8 und zusätzlich ein Stickstoffanteil von 30% nötig)



Um die Unsicherheiten aufgrund der fehlenden Messdaten im Stromstärkebereich von 135 bis 350 A zu beseitigen hat Swiss Hydrogen auf eigene Kosten Stapel-Messungen am ZSW in Ulm beauftragt.

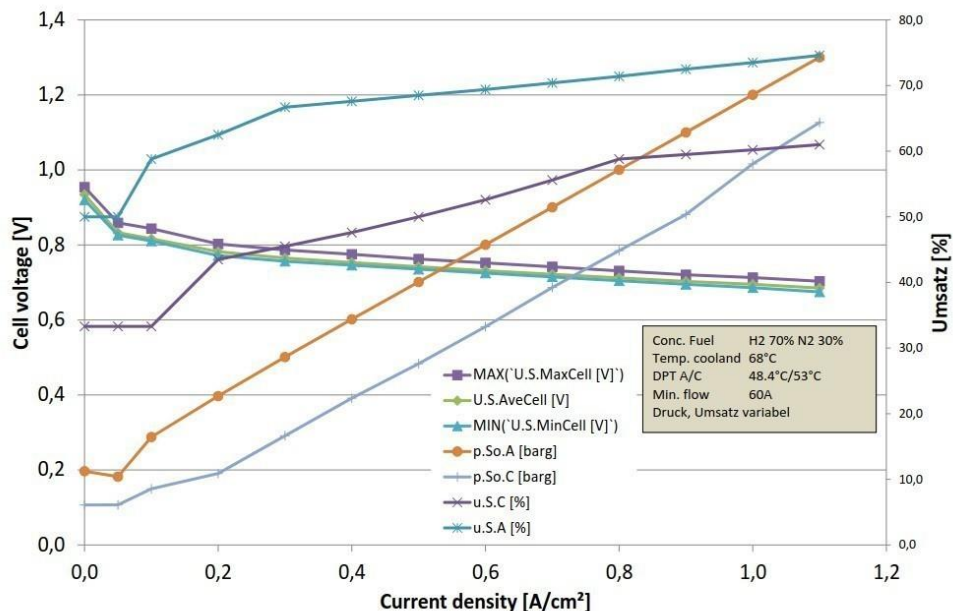


Abbildung 34: Vollständige Strom-Spannungskurve gemessen am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-forschung (ZSW) in Ulm mit bis zu 330 A. Bei einem Betrieb mit hoher Stöchiometrie (hier „Umsatz“ in % der verbrauchten Gase bei 1.1 A/cm²) und einem Betrieb mit 30% N₂ und 70% H₂ liegen die Zellspannungen in einem recht engen Fenster

Die Messungen mit Variation der Stöchiometrie zeigen erneut, dass bei 90 und 135 A eine relativ hohe Anodenstöchiometrie nötig ist, bei hohen Strömen sind 1.4 oder 1.5 ausreichend.

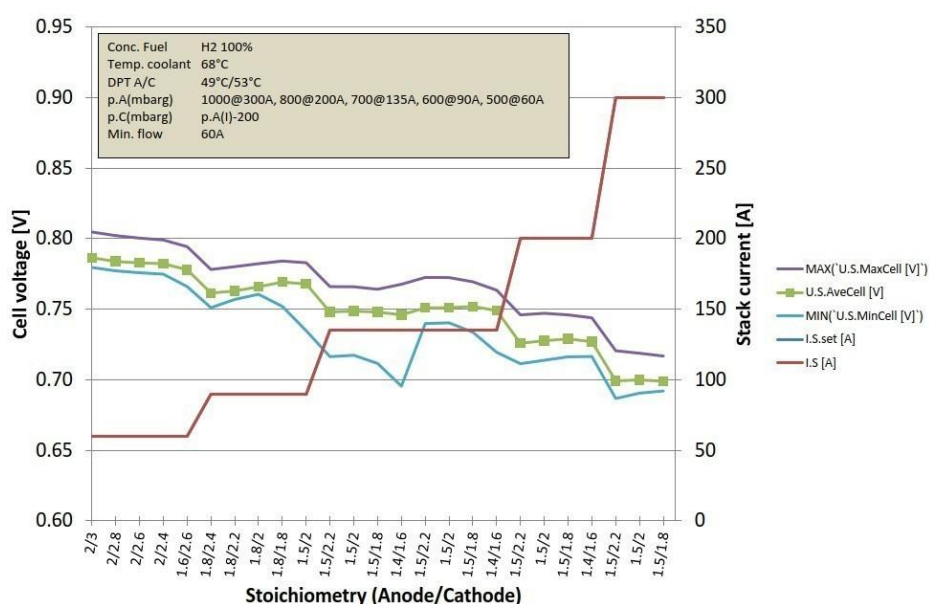


Abbildung 35: Einfluss der Anoden- und Kathodenstöchiometrie auf die Betriebsstabilität, diesmal gemessen bis zu einer Stromstärke von 300 A.



Zusätzlich wurde ein einstündiger Dauerlauf bei Volllast vorgenommen, der erfolgreich absolviert wurde.

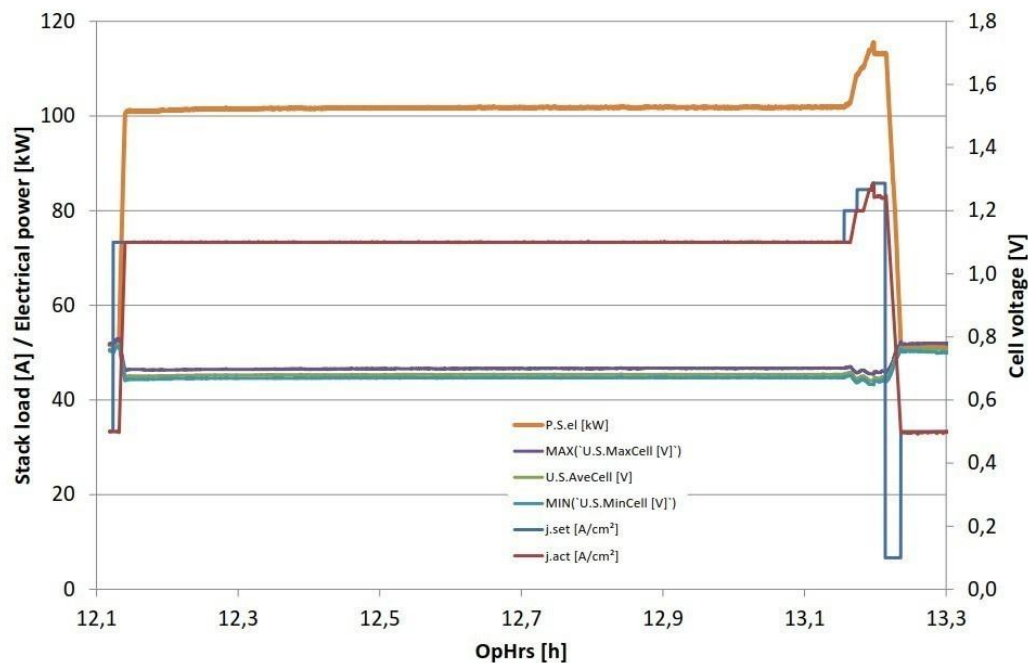


Abbildung 36: Dauerlauf bei Volllast. Der Prüfstand war in seiner Leistung thermisch limitiert, so dass der Test bei 102 kW **Stapelleistung** durchgeführt wurde. Die für 100 kW **Systemleistung** nötige Stapelleistung von ca. 112 kW konnte nur kurzzeitig angefahren werden und führte zu einem Abschalten des Prüfstands

3.2.2 Systemtests beim ZSW in Ulm

Weil bei Swisshydrogen kein Prüfstand für 100kW zur Verfügung stand, wurde die Erstinbetriebnahme des Systems am ZSW in Ulm durchgeführt. Dort wurden im Rahmen des europäischen Autostack-Projektes schon Versuche mit ähnlichen Stacks durchgeführt und es war entsprechende Erfahrung vorhanden.

Die Tests wurden noch ohne das Brennstoffzellen-Gehäuse und mit einem Brennstoffzellenstapel der ersten Generation (Autostack Evo1) mit 331 Zellen durchgeführt. Mit erheblicher Verspätung wurde dann der für das Projekt vorgesehene Stapel der Generation Evo2 mit 455 Zellen geliefert. Neben der eigentlichen Inbetriebnahme konnte insbesondere die Kommunikation zwischen dem übergeordneten Controller und dem Brennstoffzellen-System getestet werden. Ein wichtiger Punkt waren ebenfalls die Aufstart- und Abschaltevorgänge des Systems.

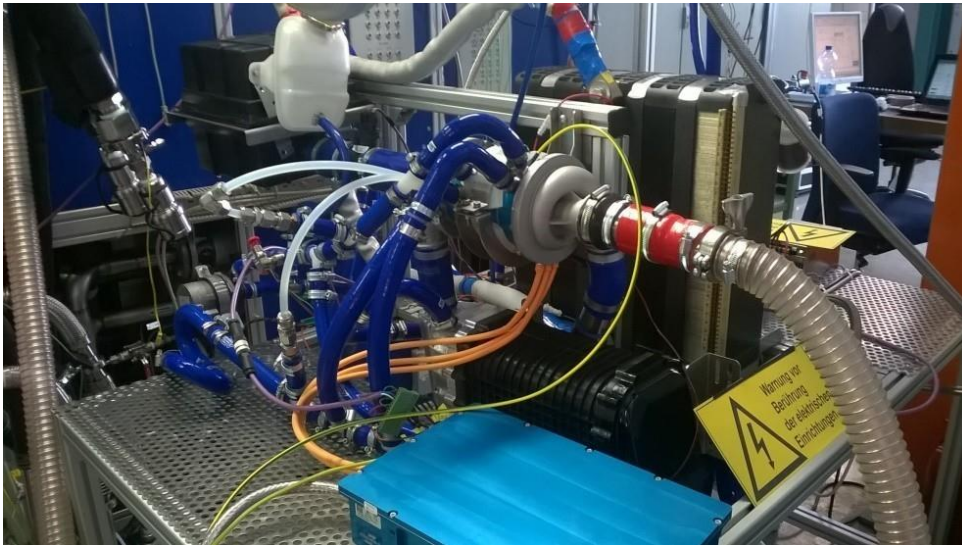


Abbildung 37: Systeminbetriebnahme am ZSW in Ulm mit 331-Zellenstapel der Evo1



Abbildung 38: Inbetriebnahme des im Gehäuse eingebauten Systems am ZSW in Ulm

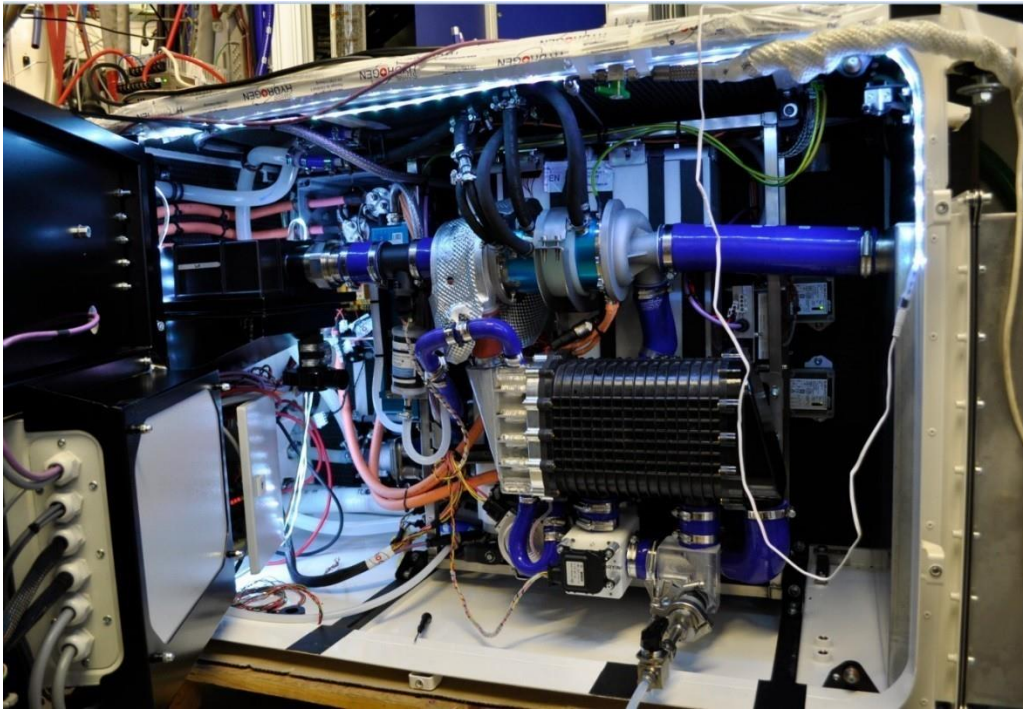


Abbildung 39: Das im Gehäuse eingebaute System, jetzt mit einem Stapel der Evo 2 mit 455 Zellen.

3.2.3 EMV-Tests

Damit das Brennstoffzellen-System in einem zugelassenen Fahrzeug verbaut werden kann, muss es auf Komponentenebene die ECE R10 (Norm für die Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV) erfüllen, welche die Emissionen und die Immisions-Verträglichkeit von elektrischen Komponenten beschreibt.

Der Test würde bei SGS in München durchgeführt. Dazu musste das System ausgebaut werden und im Labor im Prüfaufbau integriert werden. Der Test wurde im ersten Anlauf bestanden.

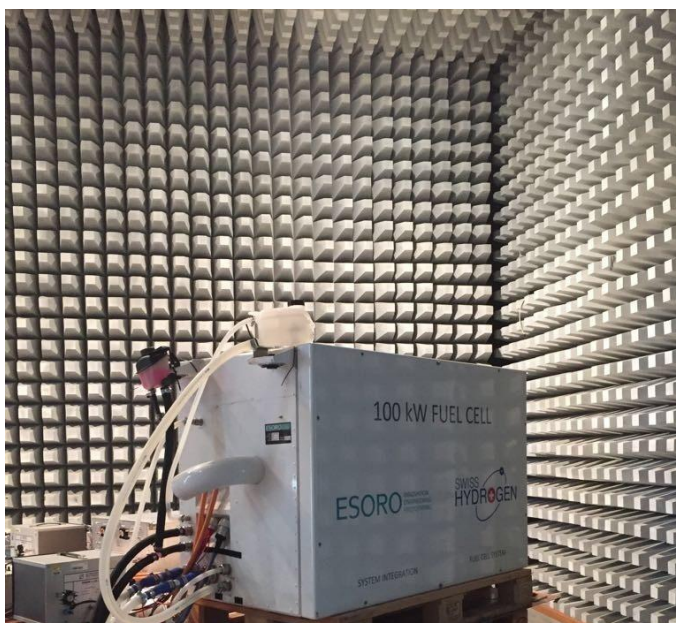


Abbildung 40: Brennstoffzellen-System im EMV-Testlabor



3.2.4 Abnahme TÜV

Für eine Zulassung musste der gesamte Brennstoffzellen-Teil gemäss der EG 79/2009 geprüft sein. Dies umfasst einerseits den ausschliesslichen Einsatz von zertifizierten Komponenten im Wasserstoff-Hochdruck-Teil. Andererseits müssen auch viele andere Anforderungen der Norm erfüllt werden.

Dazu gehören u.a. auch eine FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), ein Sicherheitskonzept, die exakte Dokumentation aller verwendeten Komponenten und die Dimensionierung der Halterung der Tanks. Alle Dokumente sowie die tatsächliche Umsetzung wurden von SGS überprüft und in einem Bericht z.Hd. des Strassenverkehrsamtes bestätigt.



Abbildung 41: Nachweis der Festigkeit der Tankanbindung nach EG 79/2009

Der Einbau einer Brennstoffzelle stellt einen Eingriff in das Hochvoltsystem des schon zugelassenen Elektro-LKWs dar. Das Hochvoltsystem muss für die Zulassung der ECE R100 genügen. Durch den Eingriff musste das HV-System neu zertifiziert werden. Auch diese Zertifizierung wurde mit SGS-Saar durchgeführt.

Eine Besonderheit stellt die Überwachung des Isolationswertes dar. Eine Brennstoffzelle hat systembedingt eine schlechtere Isolation gegenüber der Umgebung. Dies kommt daher, dass die spannungsführenden Teile mit Prozessmedien und Kühlflüssigkeit versorgt werden müssen, wodurch eine komplette Isolation ausgeschlossen ist. Deswegen gelten für Brennstoffzellen andere Werte für die Isolation und der Wert muss konstant überwacht werden. Dies hat zu teilweise schwierigen Diskussionen mit Emoss, dem Hersteller der Elektro-LKWs geführt, weil das deren Sicherheitskonzept beeinflusst hat. Schliesslich konnte man sich aber auf folgende Werte einigen, welche einerseits den Normen genügen und sich andererseits auch im Betrieb als tauglich herausstellten.



Isolationswert	Reaktion Fahrzeug	Massnahme / Folge
< 100 kOhm ¹⁾ für länger als 1min	Warnung (Software)	Kühlwasser sollte gewechselt werden (wahrscheinlichster Fall von Isolationswertverlust)
< 75 kOhm ²⁾	Fehler, Abschaltung und Trennen von BZ-System (Software)	Isolationswert steigt, wenn der Fehler vom BZ-System kommt.
< 75 kOhm für mehr als 5 sek.	Öffnen der Batterieschütze (Hardware)	Notabschaltung, falls der Isolationsverlust sehr gross ist und nicht vom BZ-System kommt.

1) entspricht ca. 135 Ohm/Volt

2) entspricht ca. 100 Ohm/Volt

Tabelle 4: Isolationsgrenzwerte des Brennstoffzellen-LKWs

3.2.5 Zulassung Strassenverkehrsamt

Die Berichte von SGS zur EG79/2009, der ECE R10 und der ECE R100 wurden zusammen mit allen notwendigen Dokumenten des Fahrzeugs beim Strassenverkehrsamt Zürich eingereicht. Die Zulassung des Fahrzeuges erfolgte Ende Mai 2017 (

Abbildung 42).



Abbildung 42: Übergabe des Fahrzeugschildes nach der Zulassung des LKW.

Seit Anfang Mai 2017 konnte das Fahrzeug von der nun gültigen Richtlinie Gebrauch machen, die für alternativ angetriebene LKW ein erhöhtes Gesamtgewicht des Zugfahrzeugs von maximal 18 auf 19 t erlaubt. Der Fahrzeugausweis wurde entsprechend angepasst.



01-06		00.013.686.416	
Name, Vorname Wohnort Nom, prénom Domicile Cognome, nom Domicilio Nume, prenum Domiciliu		Esoro AG Tämperlistrasse 10 8117 Fällanden	
07	Rebutatidatum Date de naissance Data de naşterii	**	06
09		AXA Versicherungen	
13		Kantonale Vermerke Verfügungen der Behörde Disposizioni cantonali Decisioni dell'autorità Dispozițiuni de fautoritate	
14		Steuer-PS 172.5 KOFAMU / 11.07.2017 10:35 / WM3AL	
138 Schutzvorkehrungen / Markierung für folgende Fahrzeugteile erforderlich: Hebebühne			
183 Motorkennzeichen-identifikation: LSM 280			
191 Geschwindigkeitsbegrenzungseinrichtung Marke: Continental DTM 5 Typ: 61256057139			
236 Anhängelast Zentralachsanhänger: 19360 kg unter Berücksichtigung des Gesamtzuggewichtes. Stützlast: 1000 kg V-Wert: 36 kN			
243 Zulässige Achslast unter Einhaltung des Gesamt- gewichtes 1. Achse: 8000 kg 2. Achse: 11500 kg			
328 Sicherheits- und Wartungshinweise der Wasser- stoffanlage müssen im Fahrzeug mitgeführt werden.			
500 Dynamischer Reifenradius: 492 mm			
991 Prüfzettel / Dokument-Nr. / Änderung DTC Nr.: aSL-16-1225-TK001-01 muss mitgeführt werden. *** Ende der Verfügungen ***			
A 15		ZH 777 201 weiss	
17		17	
19		Lastwagen	
21		EMOSS 4412	
23		XL9 GM7 034 3953 5012	
25		Kühlkasten mit Hebebühne	
26		weiss	
27		2	
28		313 697 575	
29		X	
30		**	
31		230	
32		**	
33		18.05.2017 ZH	
34		Zürich, 11.07.2017	
35		08.12.2016 / ZH	

Abbildung 43: Fahrzeugausweis mit der Gewichtserhöhung auf 35 t

3.3 Erprobung

Die maximale Steigfähigkeit des vollgeladenen Anhängerzuges wurde auf 30% spezifiziert. Eine entsprechende Rampe wurde auf einem Militärgelände gefunden. Der Test wurde dort durchgeführt und konnte ohne weiteres erfüllt werden.



Abbildung 44: Erfolgreicher Anfahrversuch, Steigung: 30%, Fahrzeuggewicht: 35t.

Der Basis-LKW verfügt über die Assistenzsysteme, welche bei neuen Fahrzeugen üblich sind. Dazu gehören u.a. das ABS und das ESP. Um sicherzustellen, dass diese Systeme auch nach dem Eingriff



ins Fahrzeug noch funktionieren, wurden diese auf einem Testgelände des TCS nochmals abgeprüft. Dazu gehörte z.B. eine Vollbremsung aus 80km/h und Kurvenfahrten auf einem rutschigen Untergrund. Alle Tests erfüllte das Fahrzeug.



Abbildung 45: Testen des ASB-Systems



Abbildung 46: Testen des ESP-Systems



3.4 Testeinsatz

Für die diversen Inbetriebnahme- und Testfahrten wurde neben den beiden ESORO-Mitarbeitern, die über einen LKW-Fahrausweis verfügen, seitens Coop ein Testfahrer nominiert. Dabei handelte es sich um Max Senn, der über viel Fahrerfahrung verfügt und auch den Ersten von Coop in Dienst gestellten Elektro-LKW im Lieferbetrieb gefahren ist. Diese Erfahrung war für das Projekt sehr wertvoll. Max Senn war sich den Umgang mit eher knappen Energiereserven schon gewohnt und hatte auch schon ein Gefühl dafür, wie sich ein elektrisch angetriebener LKW verhält, bzw. verhalten muss. Ausserdem hat er auch den Mut, das Fahrzeug bis ans Limit zu bewegen, insbesondere was die Leistungsfähigkeit des Systems bei langen Steigungen und die Gesamtreichweite betrifft.

Anfangs musste das Fahrzeug mit dem Hersteller Emoss und dem Getriebe- und Retarder-Lieferanten Allison für die Schweiz abgestimmt werden. Da Emoss die Inbetriebnahme in den Niederlanden gemacht hat, waren die Steigungen und Gefälle auch schon im Schweizer Mittelland eine ziemliche Herausforderung.

Danach wurden viele Testfahrten mit der Brennstoffzelle gemacht. Die Ergebnisse dazu werden im Kapitel 4 beschrieben und diskutiert. Weil nicht jede Testfahrt reibungslos funktionierte und wir teilweise auch mit Teilausfällen von Systemen konfrontiert waren, war die Erfahrung von Max Senn auch bei diesen Fahrten sehr hilfreich. Herzlichen Dank an dieser Stelle.



Abbildung 47: Insbesondere bei feuchtem Wetter ist der Dampf deutlich zu sehen.

Eine noch witzige Erfahrung stellte das Dampfen der Brennstoffzelle dar. Je nach Aussentemperatur und Luftfeuchtigkeit ist der Dampf in der Abluft sehr deutlich zu sehen (s. Abbildung 47). Der Auspuff ist als schlitzförmige Öffnung an der Vorderkante des Kühlkoffers ausgeführt. Die Idee dahinter war es, die Luft auf der ganzen Breite austreten zu lassen und so eine möglichst rasche Vermischung mit der Umgebungsluft zu erreichen. Dadurch sollte die Dampffahne möglichst klein gehalten werden. Bei hohen Geschwindigkeiten funktioniert dies eigentlich recht gut, aber gerade im Stau fließt die Luft oft



nur an einer Ecke raus und der Dampf wird gut sichtbar. Weil normale LKWs an dieser Stelle typischerweise nicht dampfen oder rauchen, wurde der Dampf von anderen Verkehrsteilnehmern ab und zu als Rauch interpretiert und wir wurden über die Scheinwerfer und entsprechende Gesten darauf aufmerksam gemacht, dass unser LKW offenbar brenne. Das Design der Abluftaustritts ist also noch verbesserungswürdig.

3.5 Fahrerschulung

Obwohl Coop schon längere Erfahrung mit Elektro-LKWs hat, stellt das Brennstoffzellen-Fahrzeug sowohl für die Fahrer, wie auch die Werkstatt eine Neuheit dar. ESORO führte deshalb bei Coop eine Schulung durch. Dabei konnten 4 Fahrer, einige Personen aus der Werkstatt und interessierte aus der Logistik teilnehmen.

Die Lernziele der Schulung waren folgende:

- Sichere Bedienung des Wasserstoff-LKWs
- Die Eigenheiten des Fahrzeugs kennen
- Wissen, wie man sich Notfällen verhalten muss
- Den Wasserstoff-LKW fahren

Inhalt der Schulung war die Erklärung der Technologie und der Betrieb des Fahrzeugs. Einen wichtigen Teil nahm selbstredend die Sicherheitsschulung ein, wo die Verhaltensregeln instruiert wurden.

Ende der Ausbildung bildete eine Lernkontrolle, welche von ESORO korrigiert wurde.



Abbildung 48: Schulungsunterlagen der Fahrerschulung bei Coop

3.6 Wartung und Unterhalt

Der Brennstoffzellen-LKW ist für die Werkstatt von Coop ein spezielles Fahrzeug, zudem handelt es sich um einen Prototyp, der besondere Anforderungen an die Wartung stellt. Für den LKW wurde deshalb ein Wartungskonzept erstellt.

Für die konventionellen LKW-Teile, wie Bremsen, Leuchten, Scheibenwischer etc. ist die Coop-Werkstatt selber verantwortlich. Weil Coop auch Elektro-LKWs betreibt, ist das Werkstatt-Team grundsätzlich schon mit spezifischen Elektro-Fahrzeug-Themen vertraut.



Die Wartung der Elektro- und Brennstoffzellen-Systemen wird durch ESORO organisiert und dann von ESORO selber oder den Lieferanten der Komponenten durchgeführt. Die Wartungen des Brennstoffzellen-Systems erfolgen vierteljährlich, wovon drei kleinere Wartungen sind. Zur Wartung gibt es ein vorgegebenes Protokoll.

Für Störfälle gibt es ebenfalls ein Konzept, welches bei der Fahrerschulung unterrichtet wurde. ESORO fungiert dabei als Ansprechpartner für alle Störungen und involviert dann je nach Bewertung der Störung die dafür zuständigen Partner.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einsatz im Verteilbetrieb

Ab Juni 2017 fanden Fahrten mit dem LKW statt, bei denen die Verkaufsstellen von Coop mit Waren aus dem Verteilzentrum beliefert wurden.

Während der ersten Phase des Betriebes wurden zu verbessernde Leistungseigenschaften sichtbar. Dabei handelt es sich um folgende Punkte:

- Nennleistung der Brennstoffzelle
- Temperaturmanagement der Batterie (zu hohes Temperaturniveau bei Fahrt)
- Isolationswiderstände im Fahrzeug
- Anpassung von Informations-Botschaften im Fahrzeugsystem, die durch den Elektroantrieb nicht mit dem Originalfahrzeug übereinstimmen.

Die ersten Fahrten zeigten, dass das Leistungsniveau des Elektroantriebes den Bedürfnissen der Logistik entspricht. Die Betankung des Fahrzeuges kann einfach und intuitiv durchgeführt werden. Der LKW kann in ca. 10 Min getankt werden.

Die Ausfälle der Brennstoffzelle und die Limitierung der Leistung der Batterie bei hohen Temperaturen führte dazu, dass eine Überarbeitung des Fahrzeuges in Erwägung gezogen wurde und im September 2017 eingeleitet worden ist. Dies betrifft insbesondere die Nachrüstung einer Kühlung für die Batterie (s. Kapitel 4.5.1)

Der Brennstoffzellen LKW wurde Ende März 2018 an Coop Schafisheim übergeben und dort auf die Nummer AG 504 480 zugelassen. Seither kann der LKW scharfe Einsätze für Coop Schafisheim realisieren. Eingesetzt wurde er aus erprobungstechnischen und organisatorischen Gründen zu Beginn auf verschiedensten Routen um erste Erfahrungen zu sammeln. Später wurde dem BZ-LKW eine fixe Route zugeteilt.

Der LKW war im Laufe des Frühlings auf verschiedenen Routen im Einsatz. In Abbildung 49 ist einerseits ersichtlich, wie die Distanz der Tageseinsätze variieren und andererseits, dass Tagesleistungen bis 350 km keine Einschränkung des logistischen Betriebes bedeuteten.

Die Abbildung 49 zeigt auch, wie unterschiedlich die Verbräuche auf den verschiedenen Routen sind. Die widerspiegelt auch die in der Auslegung dargestellten Schwierigkeiten der genauen Dimensionierung des Wasserstoffspeichers (s. Kapitel 2.2). Je nach Beladung, Topografie und nicht zuletzt auch dem Fahrstil schwanken die Verbräuche sehr stark. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass ein Verbrauch von 8.5 kgH₂/100km, der bei der Dimensionierung angenommen wurde, mit den Messwerten recht gut übereinstimmt (s. dazu auch Kapitel 4.2).

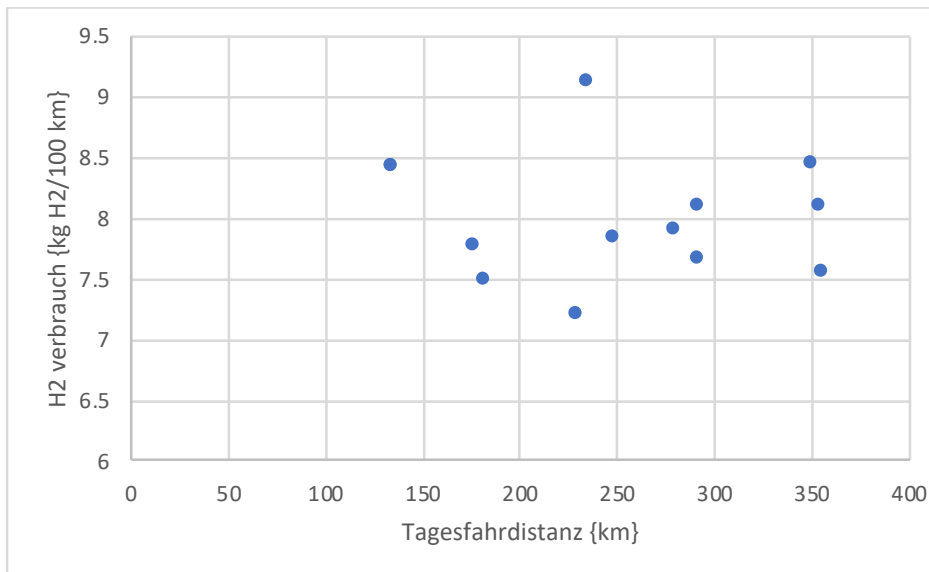


Abbildung 49: Wasserstoffverbrauch und Tagesfahrleistung des ESORO-LKWs.

In KW16/2018 wurde mit einer Tankfüllung Wasserstoff eine Tagesroutenreichweite von 375 km (Abbildung 50) erzielt. Damit konnte das Reichweitenziel von 375-400 km im scharfen Einsatz und unter Alltagsbedingungen mit Höhenunterschieden von 535 m nachgewiesen werden.

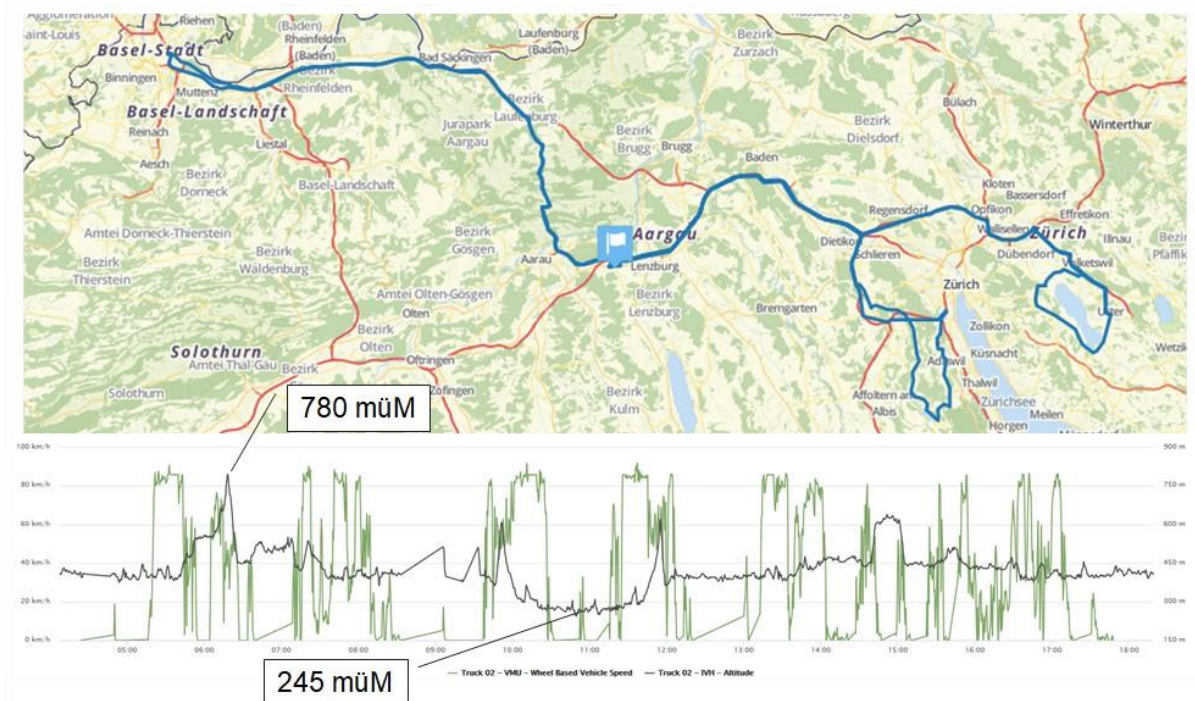


Abbildung 50: Fahrprofil mit 375 km Reichweite mit einer Tankfüllung über die Staffelegg und den Albispass.

In KW17, nach über insgesamt 10'000 km wurden in 4 Tagen über 1'235 scharfe Einsatzkilometer realisiert (Abbildung 51). Je nach Touren und Einsatz waren dies zwischen 280 km und 351 km pro Tag. Im Schnitt ergab dies über 300 km/Tag. Dies entspricht ziemlich exakt der Kilometerleistung, die ein Diesel LKW im Jahresschnitt realisiert. Hiermit konnte das Zielpotential des Brennstoffzellen-LKW



– den durchschnittlichen Diesel LKW-Einsatz zu substituieren – betreffend Tagesfahrleistung nachgewiesen werden.

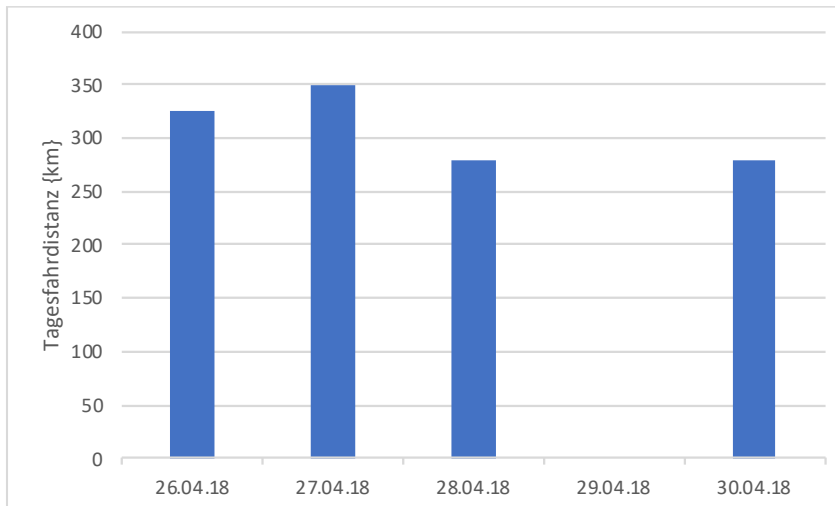


Abbildung 51: Tagesfahrleistungen innerhalb einer Woche KW17/KW18 im April 2018

Die Frischware wurde – wie auch vorher und danach immer – jedes Mal ordentlich und CO₂ frei gekühlt und in time am Zielort abgeliefert.

Mit dem LKW wurden insgesamt bis Ende November 2018 über 20'000 km zurückgelegt.

Ende 2018 musste der LKW für längere Zeit ausser Betrieb genommen werden, da in einer der Zellen im Brennstoffzellenstapel ein sogenanntes Pinhole aufgetreten war (s. 4.4.4). Aufgrund der Alterung der Brennstoffzelle stand das Fahrzeug seit Mitte 2019 nur noch für Events und Filmaufnahmen zur Verfügung, bis die Brennstoffzelle getauscht wurde.

4.2 Verbräuche

Im Zeitraum vom 26.4.2018-28.5.2018 wurde über eine Distanz von 3267 km im vorwiegend Autobahn- und Überlandstassenbetrieb mit dem Lastwagen ein durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch von 7.93 kgH₂/100km erzielt.

Bei hügeliger Fahrt über 1087 km erzielte der Anhängerzug einen Verbrauchswert von 9.22 kgH₂/100km.

Nach einem erneuten Austausch des Brennstoffzellenstacks, mit einem Exemplar mit tieferer Nennleistung, wurde im September 2018 ein Durchschnittsverbrauch von 9.17 kg/100 km erzielt. Dieser Mehrverbrauch wird über den aktuellen Brennstoffzellenstack sowie teilweise geänderte Standardrouten zu erklärt.

Da die Brennstoffzelle nicht ganz die Zielleistung erreichte, wurde die Batterie jeweils über Nacht vollständig geladen. Dadurch lieferte die Brennstoffzelle gesamthaft im Schnitt 80.1% der Antriebsenergie.

4.3 Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit

Auf Grund der ersten Erfahrungen bzgl. der Verbräuche konnte eine erste Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines Brennstoffzellen-LKWs gemacht werden. Neben dem Treibstoffverbrauch stellen natürlich auch die Investitionskosten einen massgeblichen Kostenblock dar. Diese Kosten können natürlich nicht direkt aus den Projektkosten abgeleitet werden, da es sich beim vorliegenden Fahrzeug um den ersten Prototypen handelt, in welchem zudem auch prototypische Komponenten



verbaut wurden. Die Anschaffungskosten mussten deshalb abgeschätzt werden und sind mit 500'000 CHF angenommen worden. Ebenfalls mussten Wartungskosten abgeschätzt werden. Der Preis für den Wasserstoff wurde mit 10 CHF/kg angenommen.

Daraus ergibt sich eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung gem. Tabelle 5.

Wirtschaftlichkeitsvergleich H2 vs. Diesel		H2 LKW	Diesel-LKW
FSL, 21.04.2020			
Anschaffung			
Fahrzeug (LKW-Chassis)		500'000	115'000
Aufbau		85'000	90'000
Kühlung		25'000	25'000
Anhänger		90'000	90'000
Anhänger Kühlung		25'000	25'000
Lastwagen inkl. Aufbau und Kühlgerät	CHF	610'000	230'000
Anhänger inkl. Aufbau und Kühlgerät	CHF	115'000	115'000
Ersatzinvestition	CHF		
Investitionskosten Total	CHF	725'000	345'000
Mehrkosten ggü. Diesel-Lastwagen	CHF	380'000	
Kalk. Kosten			
Zinssatz	Prozent	4	4
kalk. Zinsen	CHF/Jahr	14'500	6'900
Betrieb			
Fahrleistung	km/Jahr	70'000	70'000
Treibstoffverbrauch pro 100 km	Liter/100km, kWh/100km, kg/100km	8.00	33.0
Treibstoffpreis	CHF/Liter, CHF/kWh, CHF/kg	0.80	1.70
Wartungskosten	CHF/Jahr	13'000	23'000
LSVA	CHF/Jahr		54'264
CO2-Ziel Coop / Effekt 2023	CHF/km		-0.020
Geplante CO2 Abgabe Parlament	CHF/km		-0.120
Betriebskosten pro km	CHF/km	0.99	1.80
Betriebskosten pro Jahr	CHF/Jahr	69'000	126'334
Kostenzusammenstellung			
Einsatzjahre	Jahre	8	8
Gesamtkosten über Einsatzjahre	CHF	1'393'000	1'410'872
Gesamtkosten p.a. in CHF		174'125	176'359
CHF pro Kilometer		2.488	2.519

Tabelle 5: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines BZ-LKWs zu einem konventionellen Fahrzeug

Die Abschätzung zeigt, dass der BZ-LKW mit den getroffenen Annahmen über die gesamte Einsatzzeit günstiger ist, als der Diesel-LKW. Diese Zahlen sind natürlich erst eine erste Abschätzung und können im weiteren Verlauf des Projektes noch verifiziert werden.



4.4 Erfahrungen Brennstoffzellen-System

4.4.1 Systemleistung / Systemwirkungsgrad

Die Systemleistung ab DC/DC-Ausgang beträgt maximal 92 kW (auf 400-500 müdM), das Entwicklungsziel war 100 kW (auf Höhe des Meeresspiegels). Der Hauptgrund für die Abweichung liegt darin, dass der Turbokompressor der Luftverdichter/Expander-Einheit, der die Kathodenseite der Brennstoffzelle mit Luft versorgt, deutlich weniger Gegendruck aufbaut, als vorgesehen. Dadurch liegt der Systemdruck in der Brennstoffzelle statt bei 2.3 bar nur bei 1.9 bar und die Strom-Spannungskennlinie liegt entsprechend tiefer. Dies reduziert einerseits die verfügbare Leistung sowie den Systemwirkungsgrad um 1-2 Prozentpunkte.

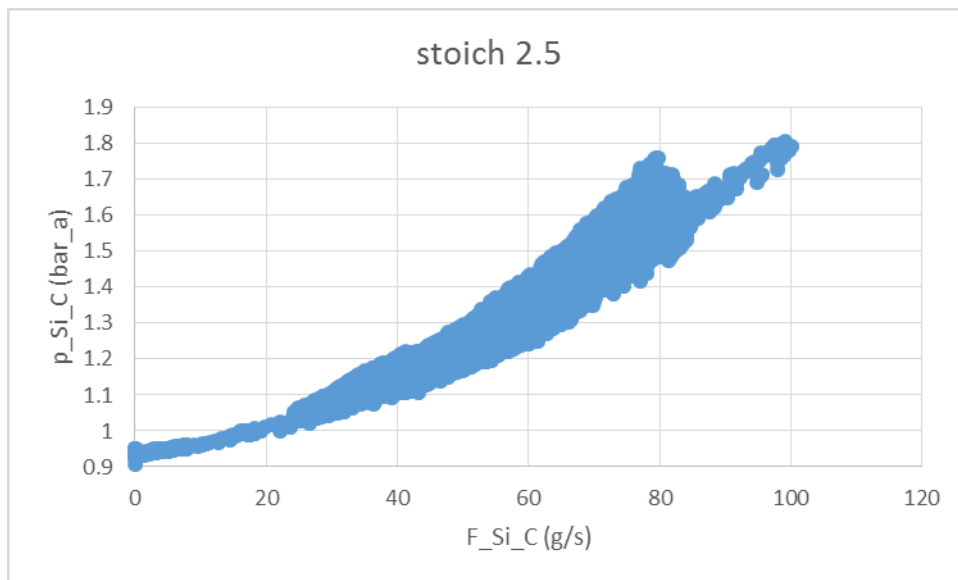


Abbildung 52: Messung des erreichten Drucks am Kathodeneingang in Anhängigkeit des Kathodenmassenstroms. Zunächst wurden nur 1.8 bar erreicht, später konnte dies noch auf 1.9 bar verbessert werden

Eine Weiterentwicklung der Turbine durch den Lieferanten (Fischer in Herzogenbuchsee) wäre zwar grundsätzlich möglich, ist aber mit erheblichem Aufwand verbunden.

Eine weitere Verbesserung des Systemwirkungsgrades, insbesondere im Teillastbereich, ist noch durch eine Verbesserung der Purge-Strategie zu erzielen. Dabei handelt es sich um das Vorgehen, wie durch kurze Gasstöße von H₂ die sich angesammelten Wasseranteile und Stickstoffanteile aus dem Stack entfernen lassen.





das System mit seiner geringen thermischen Masse bereits sehr stark abgekühlt. Dies führt dann dazu, dass die Feuchteregelung, die wiederum aufgrund der im Befeuchter und Stapel befindlichen Wassermenge relativ träge ist, kurzfristig stark gestört ist. Um dies zu verbessern wurde kurzfristig ein elektromotorisch betätigtes Prozesssteuerventil aus der Haustechnik (Firma Belimo) eingebaut. Obwohl die Verstellzeit des Ventils mit 35 Sekunden recht lang ist konnte mit einer vorausschauenden Regelungsstrategie eine wesentlich verbesserte Regelgenauigkeit der Temperatur erzielt werden.

4.4.4 Verfügbarkeit und Stacklebensdauer

Die Inbetriebnahme und der stabile Betrieb des Brennstoffzellen-Systems war sehr herausfordernd. Das System musste mehrere Male komplett demontiert werden und der Stack zu Powercell nach Schweden zur Reparatur geschickt werden. Insgesamt wurden zwei Stacks verwendet, wovon beim ersten bereits vor Inbetriebnahme bekannt wurde, dass er die Spezifikationen (insb. die maximale Leistung) nicht erreichen konnte.

Hauptgründe für die diversen Stillstände und Reparaturen des Systems waren einzelne Zellen mit schlechterer Performance in den Stacks, defekte Cell Voltage Monitoring (CVM)-Systeme (Lieferumfang von Powercell), Isolationsprobleme des BZ-Systems und in einem Fall ein Kurzschluss bei der Inbetriebnahme. Die Reparaturen des Stapels wurden jeweils bei Powercell durchgeführt. Weil dort kein Prüfstand bis zur max. Leistung zur Verfügung stand, konnten die Stacks nicht bis zur maximalen Leistung getestet werden. In mehreren Fällen konnte dann erst im Fahrzeug festgestellt werden, dass der Stack bei höheren Leistungen ein weiteres Problem an einer oder mehrerer Zellen aufweist.

Auch mit anderen Hauptkomponenten des Brennstoffzellensystems traten Probleme auf. Der von der Firma Fumatech gelieferte Befeuchter musste zweimal getauscht werden. Die zunächst gelieferte Einheit war noch mit einem Gehäusedeckel eines Prototyps versehen. Dieser Deckel ist im Betrieb bei Vollast aufgeplatzt, obwohl die Betriebsparameter mit ca. 2 bar und 80 °C deutlich unter den Spezifikationswerten von 3 bar und 90°C lagen. Dieser Defekt hat dazu geführt, dass der Stapel für eine gewisse Zeit auf der Kathodenseite nicht mit Luft versorgt wurde, was vermutlich eine zusätzliche Degradation mit sich gebracht hat.

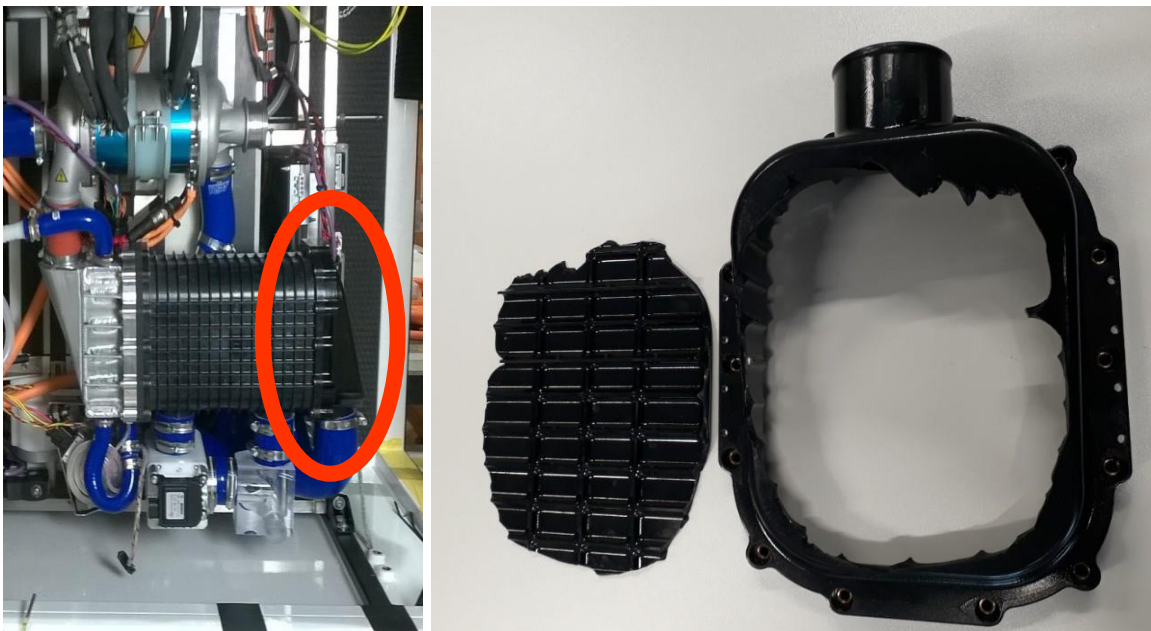


Abbildung 54: Geborstener Gehäusedeckel des Befeuchters



Ein weiteres Mal musste der Befeuchter getauscht werden, da sich die Anschlussstutzen im Bereich der Federbandschelle des Schlauches mit der Zeit stark verformt hatten. Als Abhilfemassnahme wurden beim Austausch der Komponente durch Swiss Hydrogen Edelstahlhülsen innen eingepresst.

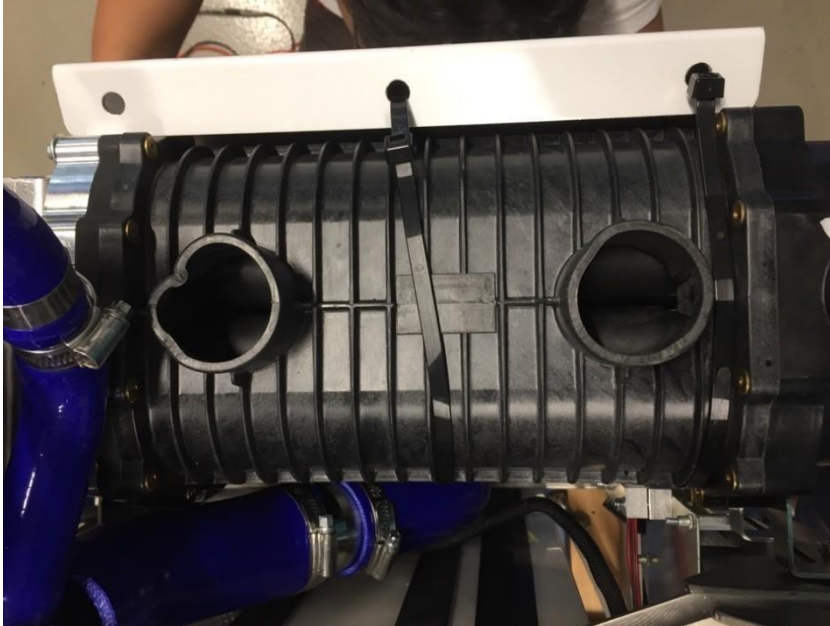


Abbildung 55: Verformte Anschlussstutzen des Befeuchters

Der LKW musste Ende 2018 ausser Betrieb genommen werden, weil ein sogenanntes Pinhole im Brennstoffzellenstack aufgetreten ist. Ein Pinhole ist ein kleines Loch in der Membran zwischen der Luft und der Wasserstoffseite. Dies stellt ein Sicherheitsrisiko dar, weil so ein Wasserstoff-Luft-Gemisch entstehen kann. Zudem reagiert der Wasserstoff am Katalysator mit Luft ab und vergrössert das Loch wegen den hohen Temperaturen, die dort entstehen. Dieser Vorgang kann den Stack dann bis zur vollständigen Zerstörung schädigen, wesswegen der Stack ausser Betrieb genommen werden musste.

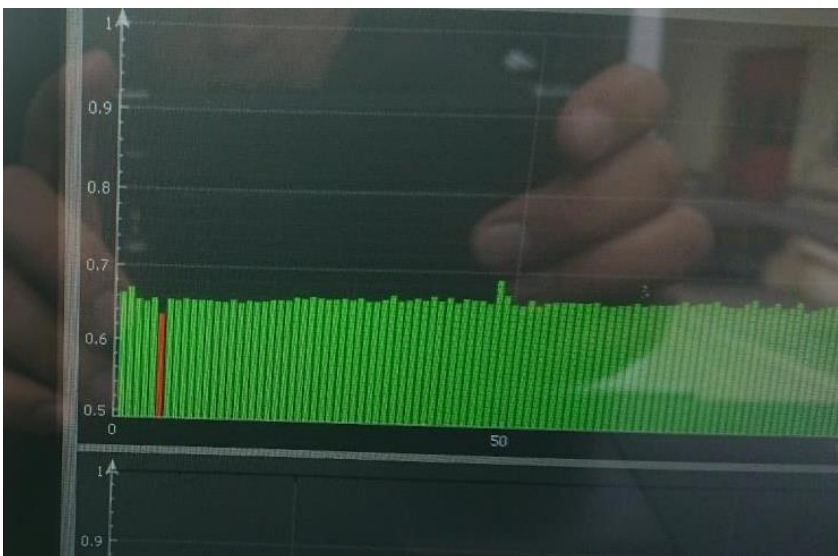


Abbildung 56: Messungen der Zellspannungen bei ca. 50 kW wobei die Zelle mit dem Pinhole sichtbar wird.



Zur Reparatur wurde der Stack ausgebaut und zum Hersteller Powercell nach Schweden geschickt. Die Reparatur dauerte ausserordentlich lange, weil offenbar die Kapazitäten bei Powercell nicht vorhanden waren. Diese Verzögerungen führten dazu, dass die vorgesehenen und im Jahresbericht 2018 beschriebenen Anpassungen nicht zum geplanten Zeitpunkt auf dem Prüfstand von Swiss Hydrogen durchgeführt werden konnten. Als der Stack wieder verfügbar war, war der Prüfstand durch schon länger geplante Projekte gebucht und das LKW-System musste mehrere Wochen auf die Kapazität warten.



Abbildung 57: Bei der Wiederinbetriebnahme wird deutlich, wie gross die Differenz zwischen den neuen und den alten Zellen ist.

Bei der Wiederinbetriebnahme des Stacks stellte sich zudem heraus, dass sich die Leistung von den reparierten Zellen und den noch im Stack verbliebenen Zellen sehr stark unterscheidet. Im Vergleich zu den neuen Zellen hat der Betrieb beim restlichen Stack schon deutliche Spuren hinterlassen. Gründe dafür sind bisher nicht restlos geklärt. Ein wichtiger Punkt ist mit Sicherheit das nicht optimale Temperatur- und Feuchtemanagement (s. 4.4.2 und 4.4.3). Insbesondere im transienten Betrieb eines Stapels, wie er in einem LKW-Betrieb alltäglich vorkommt, ist die Regelung von Feuchte und Temperatur zu ungenau und die Parameter waren deshalb zu oft ausserhalb des definierten Betriebsfensters des Stacks. Es ist auch wahrscheinlich, dass der prototypische Stack selbst sehr empfindlich auf diese Bedingungen reagiert und schneller altert, als dies zu erwarten war.

Weil alle Zellen durch die serielle Anordnung immer den gleichen Strom liefern müssen, werden die schwachen, schon gealterten Zellen stärker belastet als die neuen Zellen. Dadurch wird die Temperaturverteilung im Stack weiter inhomogen, was zu einer beschleunigten Alterung führt. Das reparierte System kann deshalb nur noch mit höchstens 50kW betrieben werden. Diese Leistung ist für einen Kundeneinsatz nicht genügend.

4.4.5 Optimierungspotential am Brennstoffzellen-System

Die von Powercell bereitgestellte statische Regelung der Endzellenheizung (diese erwärmt die erste und letzte Zelle des Stapels) mit festem Sollwert sollte durch eine dynamische Regelung mit variablem Sollwert ersetzt werden. Dies führt zu weniger starker Austrocknung der Endzellen im Kaltstart.

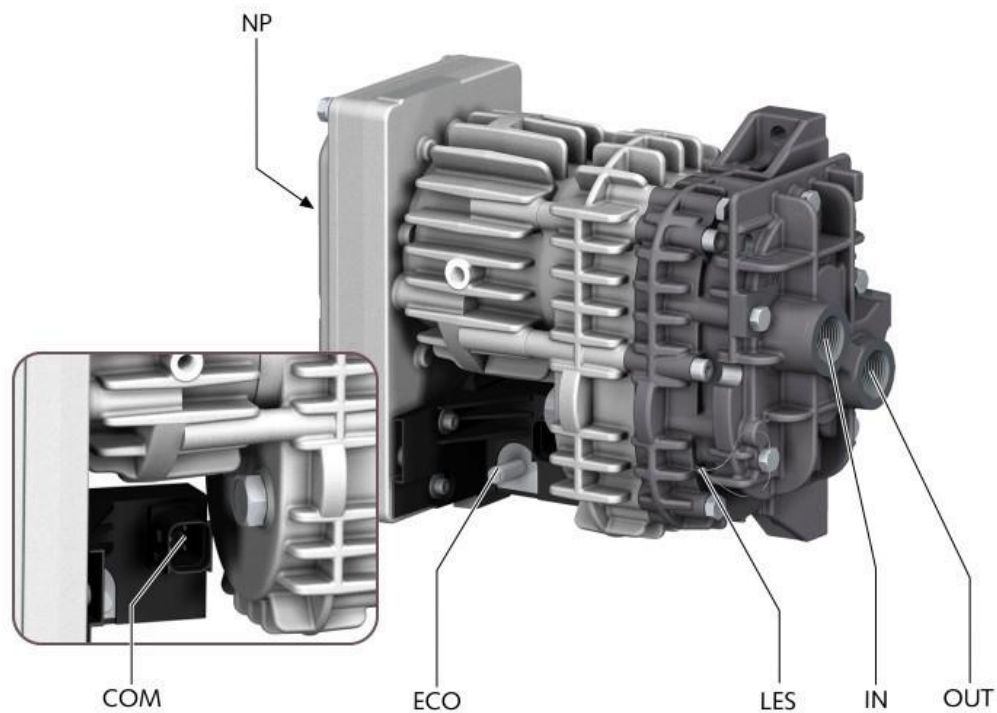
Eine weitere Verbesserung sollte bei der Überwachung der Kühlwasserpumpe vorgenommen werden. Bisher wurde die Pumpe über ein PWM Signal angesteuert und die sich einstellende Drehzahl wurde nicht überwacht. Es wurde allerdings festgestellt, dass die 12 V Versorgungsspannung, die von Emoss bereitgestellt wird, bei bestimmten Betriebsbedingungen wesentlich zu tief war (bis 9V) und somit die Kühlwasserversorgung des Stapels nicht ausreichend war. In Zukunft soll die Pumpe über



ihre LIN-Schnittstelle angesteuert und überwacht werden, so dass eine unzureichende Drehzahl erkannt werden kann.

Die Temperaturregelung kann weiter verbessert werden, indem der Aktuator des elektromotorisch betätigtes Prozesssteuerventils durch einen schnelleren Aktuator ersetzt wird (4s Stellzeit statt 35s) und die Temperatursensoren, die eine thermische Zeitkonstante von 15s haben, durch schnellere Sensoren mit einer Zeitkonstante von 2s ersetzt werden. Die Regelstrategie soll komplett überarbeitet und an die neuen Komponenten angepasst werden.

Die Rezirkulation des Wasserstoffs kann durch zwei Massnahmen verbessert werden: Zum einen durch den Einsatz verbesserter Ejektoren, die in der Zwischenzeit von Swiss Hydrogen entwickelt und umfangreich validiert wurden, zum anderen durch Hinzufügen einer aktiven Rezirkulationspumpe, die mit den Ejektoren parallel geschaltet wird. Die Rezirkulationspumpe wird von der Firma Busch Clean Air in Porrentruy entwickelt und hergestellt und wurde von Powercell bereits in anderen Projekten zusammen mit dem gleichen Stapel erfolgreich eingesetzt.



IN	Inlet connection	ECO	Electrical connection (+V _{Batt})
OUT	Pressure connection	COM	6-pole HDSCS connector (CAN)
LES	Lead seal	NP	Nameplate

Abbildung 58: Wasserstoff-Rezirkulationspumpe der Firma Busch Clean Air aus Porrentruy

Der neu einzusetzende Brennstoffzellenstapel hat in der Zwischenzeit ebenfalls einige Verbesserungen erhalten. Die Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) wurden verändert um eine bessere Lebensdauer zu erzielen. Die Herstellungsprozesse wurden verbessert, was man insbesondere an einer deutlich besseren Ausrichtung der einzelnen Zellelemente (Bipolarplatten, MEA) untereinander erkennen kann und mittlerweile können die Stapel bei Powercell auch mit der vollen Leistung getestet und charakterisiert werden. Somit stehen bessere Daten für die Einstellung der Regelparmeter zur Verfügung.



All diese Optimierungen sind notwendig, um eine höhere Zuverlässigkeit und Einsatzbereitschaft des Systems gewährleisten zu können. Durch die beschriebenen Massnahmen soll das optimale Betriebsfenster des Brennstoffzellen-Stapels besser eingehalten werden und es soll vermieden werden, dass eine vorschnelle Degradation stattfindet.

Für die Implementierung dieser Optimierungen sind Simulationen der Subsysteme Kühlung und Anodenrezirkulation sowie des Gesamtsystems notwendig. Das komplette Anoden-Rezirkulationssystem inklusive der Rezirkulationspumpe wird auf einem angepassten Prüfstand getestet und in allen relevanten Betriebsbereichen charakterisiert. Durch zusätzliche Feuchte- und Gaskonzentrationsensoren kann die Rezirkulationsrate auch (indirekt) gemessen werden. Die Ergebnisse werden dann auf das Gesamtsystem übertragen. Auf dem bei Swiss Hydrogen vorhandenen Gesamtsystemprüfstand können die Simulationsergebnisse auch im Versuch verifiziert werden und die Regelparameter können auch im realen System unter kontrollierten Bedingungen eingestellt und optimiert werden. Dies dient auch der Vorbereitung der Fahrzeugimplementierung.

4.5 Erfahrungen batterie-elektrischer Basis-LKW

4.5.1 Anpassungen am Fahrzeug

Das Fahrzeug wurde nach ersten Testfahrten und Analysen von ESORO beim Hersteller Emiss in den Niederlanden überarbeitet. Die Verkabelung wurde überprüft und angepasst, um Isolationsschwachstellen zu beheben. Dies umfasste Arbeiten am elektrischen Aufbau des Grundfahrzeuges und insbesondere der Batterie und der Heizung.

Nach Analyse von ESORO verbesserte Thermoking die Versorgung und Anlaufstrategie der Kühlaggregate, um bei möglichen Spitzenbelastungen keine Systemabschaltungen zu erzielen.

Mit einer angepassten Software in der Fahrzeugsteuerung konnten die meisten Systemmeldungen des originalen Fahrzeugaufbaus abgefangen werden, die durch im Umbau, teilweise ausgebauten Umfänge (z.B. Dieselmotor) verursacht werden.

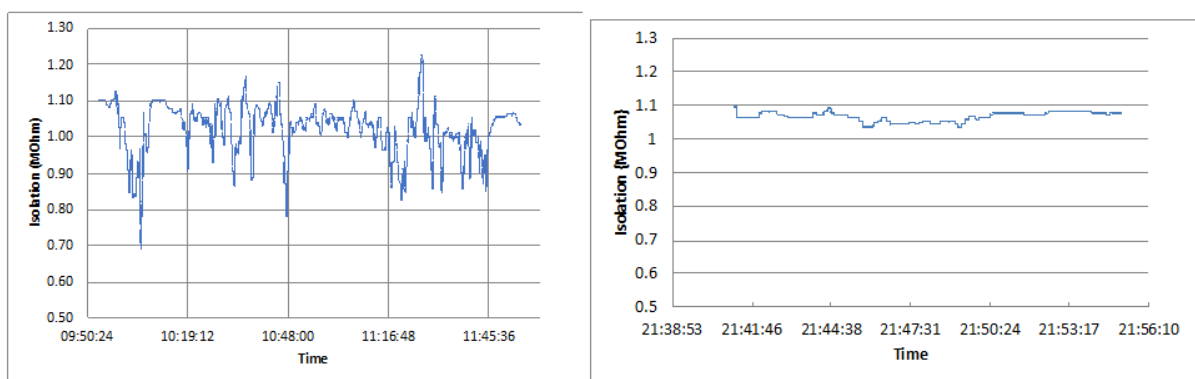


Abbildung 59: Isolationswertschwankungen im Hochvolt-Netz des Lastwagens (links vor den Verbesserungsmassnahmen und rechts nach der Verbesserung der Verkabelung).

Eine wesentliche Anpassung erfolgte im Einbau und der Nachoptimierung einer Luftkühlung für die beiden 60 kWh-Batterien (Abbildung 60). Diese entspannte unter normalen Temperaturverhältnissen den Betrieb, wobei im langanhaltenden Sommer 2018 die Grenzen durchaus wieder zu spüren waren.



Abbildung 60: Einbau einer Luftkühlung für die beiden 60 kWh Batteriemodule im Fahrzeug

Als weitere Fehlerquelle hat sich die Hochvoltheizung des LKWs herausgestellt. Diese ist für die Kabinenheizung zuständig, solange die Brennstoffzelle nicht genügend Abwärme produziert. Sie wird vom 800 V-Bordnetz versorgt. Die Heizung musste mehrere Male ausgetauscht werden, weil sie den Isolationsgrenzwert nicht mehr eingehalten hat.

Daneben hatte das Fahrzeug einen Schaden am Getriebe, weil ein Sensor offenbar zu warm wurde. Ebenfalls hatten wir vor allem zu Beginn der Erprobung diverse Abschaltungen des Fahrzeugs, z.T. mitten im Betrieb. Diese sollten mittlerweile durch Nacharbeiten von Emoss/Ceecon behoben worden sein.

4.6 Auswirkung auf Technologieakzeptanz und Markt

In 2018 ist es der Firma H2 Energy gelungen, mit Hyundai ein Memorandum of Understanding zu unterzeichnen und 2019 ein Joint Venture zu gründen, das vorsieht bis 2023 1000 Brennstoffzellen-LKW in die Schweiz zu bringen. Dazu hat die funktionierende Kette von H2-Produktion über die H2-Tankstelle zum ESORO-LKW stark beigetragen, weil die Machbarkeit der Technik veranschaulicht werden konnte. Damit wird auch vieles, was in diesem Versuch in Pionierarbeit aufgezeigt wurde, aufgenommen und in eine andere Grössenordnung hochskaliert.

Am Markt konnte das Projekt sehr viel bewegen. Basierend auf den positiven Erkenntnissen, dem "proof of concept" hat Hyundai entschieden bis 2030 über 7 Mrd. USD in die Technologie zu investieren und hatte bereits nach 18 Monaten, im Laufe 2020, die ersten H2-LKW's mit Brennstoffzelle in der Schweiz ausgeliefert. Einmalig ist die Höhe der Summe, aber auch die Geschwindigkeit in welcher Hyundai dies umsetzt. Einmal mehr ein Beweis, dass die 10 Jahres-Entwicklungs-Zyklen der grossen Europäischen Lieferanten (OEM) nicht mehr angebracht sind. Hyundai plant 1'000 H2 LKW's primär in die Schweiz zu liefern, aber auch in die EU. Somit kann das



Projekt hier trotz seiner technischen Herausforderungen, denen wir im Moment begegnen, als Erfolg eingestuft werden.

Der Verkehr verursacht rund ein Drittel der CO₂-Äquivalente in der Schweiz. Vor dem Hintergrund der anvisierten Klimaziele haben in der Schweiz und in den übrigen Ländern die Gesetzgeber diverse Auflagen und Grenzwerte definiert. Diese führen dazu, dass neue Technologien und Antriebsformen im Markt Einzug halten. In der Schweiz haben 17 Unternehmen den Förderverein H₂ Mobilität gegründet. Sein Ziel ist, die Wasserstoffmobilität aktiv, koordiniert und zeitnah einzuführen. Der Aufbau dieses neuen Mobilitätssystems soll mit den eigenen Fahrzeugflotten bis im Jahre 2023 erfolgen.

Sowohl Betreiber von Fahrzeugflotten als auch von Tankstellen stehen vor der Frage der ökologischen Ausrichtung ihrer Betriebsmittel, um mit alternativen Technologien weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Der Elektromotor als Antriebsform kann die konsequente Dekarbonisierung des motorisierten Individualverkehrs sicherstellen – vorausgesetzt, der Strom stammt aus erneuerbaren Quellen. Dabei können zwei Energieträger zum Einsatz kommen. Einerseits die Batterie, andererseits Wasserstoff. Der benötigte Strom für den Betrieb eines Wasserstoffautos wird im Auto durch eine Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen. Der Strom treibt den Elektromotor an. Die einzige Emission des Fahrzeugs ist Wasserdampf.

Coop hat während vier Jahren am Aufbau der Wasserstoffmobilität im geschlossenen Wasserkreislauf als Pilotprojekt gearbeitet und den Kreislauf seit 2016 erprobt. Die technischen und betriebswirtschaftlichen Erfahrungen mit dieser Form der Elektromobilität waren grundlegend positiv und zeigten das Potenzial für eine wirtschaftliche Umsetzung. Insbesondere wurde der Einsatz von Elektromotoren im Schwerlastbereich untersucht und bewertet. Die Anforderungen an Reichweite und Nutzlast haben Wasserstoff als Energieträger favorisiert.

Ab Mai 2018 haben sich innerhalb eines Jahres 17 bedeutende Unternehmen des Transportgewerbes und Tankstellenbetreiber zu einem Förderverein zusammengeschlossen, um diesen Kreislauf auszurollen. Sie vereinen insgesamt über 4000 schwere Nutzfahrzeuge und über 2000 Tankstellen. Die Kombination von schweren Fahrzeugen und Tankstellen ermöglicht es, das bekannte Henne-Ei-Problem zu lösen. Bereits mit 10 Wasserstoff-Lastwagen lässt sich eine Wasserstofftankstelle betriebswirtschaftlich abbilden. Durch den Wegfall der LSVA für Elektromotoren ist ein Wasserstoff-LKW, der mit nachhaltigem Wasserstoff betrieben wird, auf Stufe der Gesamtkosten je Kilometer kompetitiv zu einem vergleichbaren Diesel-LKW. Somit sind die Mitglieder des Fördervereins aus eigener Kraft in der Lage, ein nachhaltiges Mobilitätssystem in der Schweiz ergebnisneutral zu realisieren. Die Vereinsmitglieder haben folgende Grundsätze formuliert:

- Aufbau eines flächendeckenden Wasserstofftankstellennetzes in der Schweiz bis 2023
- Ausschliesslicher Einsatz von grünem Wasserstoff
- Kreisläufe schliessen
- Privatwirtschaftliche Initiative
- Positive Wirtschaftlichkeit für alle Beteiligten ab Beginn ausweisen
- Investitionsentscheide trifft jedes Mitglied selbst
- Mitglieder sind bis 2023 in der Lage, die Initiative eigenständig weiterzuführen und der Förderverein wird nach dieser Initialphase aufgelöst

Knackpunkt für eine Hochskalierung des Systems war die Verfügbarkeit von wasserstoffbetriebenen Lastwagen. Die gesamte europäische Nutzfahrzeugindustrie hatte sich anders ausgerichtet und war nicht in der Lage, der Initiative zeitnah wasserstoffangetriebene Elektro-LKW anzubieten. Mit Hyundai konnte ein Partner gefunden werden, der heute schon über erstklassige Erfahrung im Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen besitzt und diese Technik auch zukünftig stark fördert. Über das Joint



Venture «Hyundai Hydrogen Mobility» wird Hyundai in Partnerschaft mit H2 Energy AG bis 2023 1000 Brennstoffzellen-LKW mit Gesamtgewichten von 34 bis 40 t in die Schweiz bringen.

H2 Energy AG ist ein Start-up, das vor 6 Jahren gegründet wurde und heute weltweit zu den angesehensten Spezialisten in Fragen der Wasserstoffwirtschaft zählt. Im Auftrag des Fördervereins koordiniert H2 Energy mit verschiedenen Partnern den Aufbau des Ökosystems, das für die Vision einer Wasserstoffmobilität notwendig ist. Dabei geht es um vier Hauptaspekte:

1. Die Herstellung von Wasserstoff, basierend auf 100% erneuerbarer Energie, mit der notwendigen Produktspezifikation für Strassenfahrzeuge obliegt der Firma Hydrospider AG. Diese Firma sichert auch die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff der gewünschten Qualität.
2. Der Aufbau und Betrieb von Wasserstofftankstellen obliegen den Mitgliedern des Fördervereins (Tankstellenbetreibern). Mit dem Aufbau der Infrastruktur für die Versorgung der LKW kann gleichzeitig die Voraussetzung für die Versorgung der Wasserstoff-Personenwagen kostengünstig integriert werden.
3. Mit Hyundai-Hydrogen-Mobility wird die Versorgung des Marktes mit emissionsfreien, nachhaltig betriebenen Brennstoffzellen-LKWs sowie deren Unterhalt sichergestellt.
4. Die Logistikunternehmen letztendlich betreiben die LKWs und schliessen dadurch den Kreis. Dabei kommt ein Pay-per-Use-Modell zum Einsatz, bei dem der Transporteur den LKW über einen Kilometer-Beitrag entschädigt. Neben den Kosten für die Anschaffung des Fahrzeugs sind unter anderem auch die Kosten für den Treibstoff (Wasserstoff) inbegriffen. Dadurch trägt der Nutzer kein Technologierisiko.

5 Umsetzung der Optimierungen

5.1 Optimierung des Brennstoffzellen-Systems

5.1.1 Anodenrezirkulation

Um die während der ersten Testphase auftretenden Instabilitäten der Einzelzellspannungen zu beheben, wurde beschlossen, die Anodenrezirkulation zu verbessern. Eine höhere Rezirkulationsrate des Wasserstoff-Stickstoff-Wasserdampfgemischs, das sich anodenseitig einstellt, verbessert den Wasseraustrag und vermeidet somit lokale Unterversorgung der Membran mit Wasserstoff. Durch Messungen auf einem eigens dafür entwickelten Subsystemprüfstand wurde zunächst das Design der Ejektoren verbessert und die Leistung der Ejektoren validiert. Die verbesserten Ejektoren wurden im System eingebaut. Zusätzlich wurde die in Kapitel 4.4.5 erwähnte Rezirkulationspumpe parallel zu den Ejektoren eingebaut. Dadurch kann auch im Leerlauf und Niederlastbetrieb eine ausreichend hohe Rezirkulationsrate sichergestellt werden. Das Zusammenspiel der beiden Einzelsysteme wurde in Subsystemtests validiert und die Komponenten wurden dann im BZ-System verbaut.

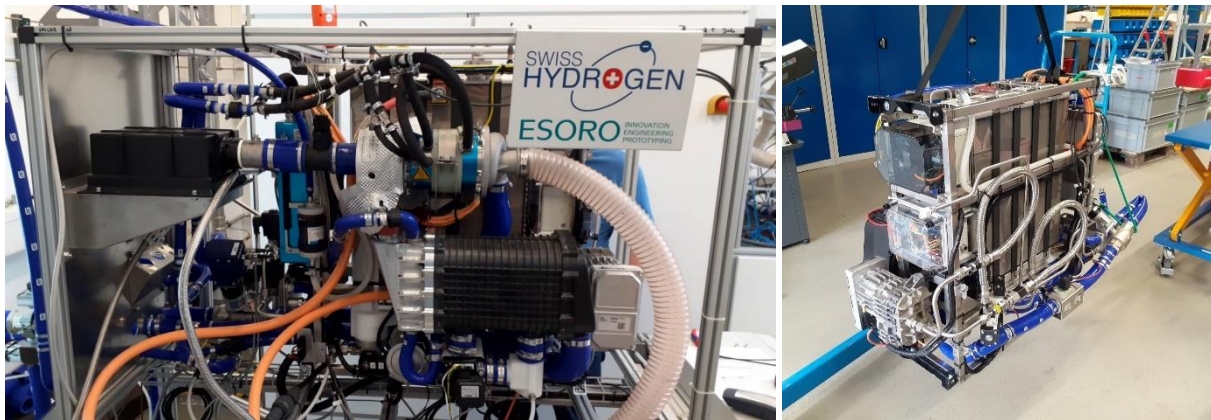


Abbildung 61: Zusammenbau des Systems in der Werkstatt von Swiss Hydrogen

5.1.2 Kühlmitteltemperatur-Regelung

Um die Regelgüte der Kühlmitteltemperaturregelung zu verbessern, wurde der Aktuator für das Kühlmittelbypassventil durch einen Aktuator mit höherer Stellgeschwindigkeit ersetzt, und die Standard-Kühlmitteltemperatursensoren wurden durch neue Temperatursensoren mit reduzierter Ansprechzeit ausgetauscht.

5.1.3 Steuerung

Die Regelparameter der Temperaturführung wurden an die neuen Komponenten angepasst und auch die Parameter der Feuchtigkeitsregelung wurden so modifiziert, dass die verbesserte Regelgenauigkeit der Temperaturführung zu einer deutlich besseren Feuchtigkeitsregelung genutzt werden konnten.

Weiterhin wurden Anpassungen an der Trocknungsprozedur vorgenommen, um bei normalen Starts eine möglichst geringe Degradation durch verminderte Austrocknung der Membran garantieren zu können, bei Kaltstarts hingegen einem Vereisen einzelner Zellbereiche vorbeugen zu können. Zusätzlich wurde eine dynamische Regelung der Endzellen-Heizung eingeführt und die Überwachung der Kühlwasserpumpe verbessert.

5.1.4 Werkstests

Nach Anpassung des Kabelbaums und einiger weiterer Komponenten wurde das System auf dem Prüfstand bei Swiss Hydrogen in Fribourg in Betrieb genommen. Der Prüfstand war zuvor an die neue Systemkonfiguration angepasst worden, so dass ein Betrieb in möglichst fahrzeug-realistischer Umgebung abgeprüft werden konnte. Alle wesentlichen Prüfpunkte wurden erfolgreich absolviert und das System wurde für den Einbau in das Fahrzeug vorbereitet.

5.2 Integration des Brennstoffzellen-Systems in das Fahrzeug

Die oben beschriebenen Anpassungen am Brennstoffzellen-System beinhalten einige grössere Komponenten, welche in den ohnehin knappen Platzverhältnissen im zur Verfügung stehenden Bauraum nicht ohne weiteres unterzubringen waren. Die Aussenhülle der BZ-Box stellt im Fahrzeug in alle Richtungen den maximalen Bauraum dar und konnte nicht mehr vergrössert werden. Zudem müssen für die Montierbarkeit alle Schrauben, Stecker und Komponenten von Öffnungsseite der Box zugänglich sein.

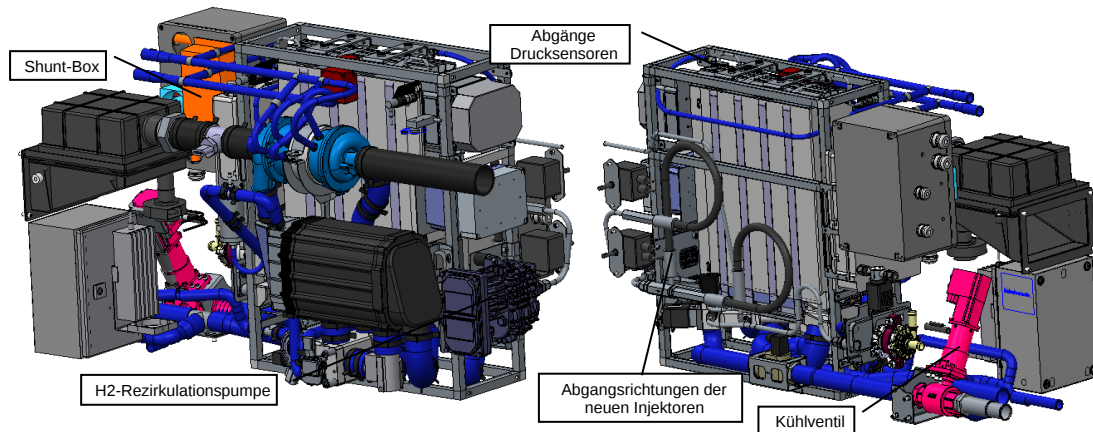


Abbildung 62: 3D-Modell des Brennstoffzellen-Systems mit den zusätzlichen Komponenten

In enger Abstimmung zwischen Swiss Hydrogen und ESORO konnten Lösungen gefunden werden, alle Komponenten an den physikalisch korrekten Positionen und trotzdem montierbar unterzubringen. Dazu mussten etliche Halter angepasst und neu entwickelt werden. Ebenfalls wurde die Verrohrung und Verschlauchung adaptiert und insbesondere wurde der Montageprozess umgestellt.



Abbildung 63: Illustration der nicht immer sehr ergonomischen Platzverhältnissen und der Millimeterarbeit zwischen Rezirkulationspumpe und der Brennstoffzellen-Box.

Für die Einbindung der neuen Komponenten mussten Teile der elektrischen Architektur überarbeitet werden. Eine Herausforderung stellte dabei beispielsweise der deutlich höhere Verbrauch der Rezirkulationspumpe dar, der in der Verkabelung und Niedervolt-Versorgung so nicht vorgesehen war.

Ein wichtiges Arbeitspaket stellte schliesslich die Entwicklung, Implementierung und das Testing der Steuerungsintegration in das Fahrzeug dar. Die neuen Prozeduren bedingten neue Routinen auch auf Fahrzeugseite und teilweise auch neue Datenstrukturen.

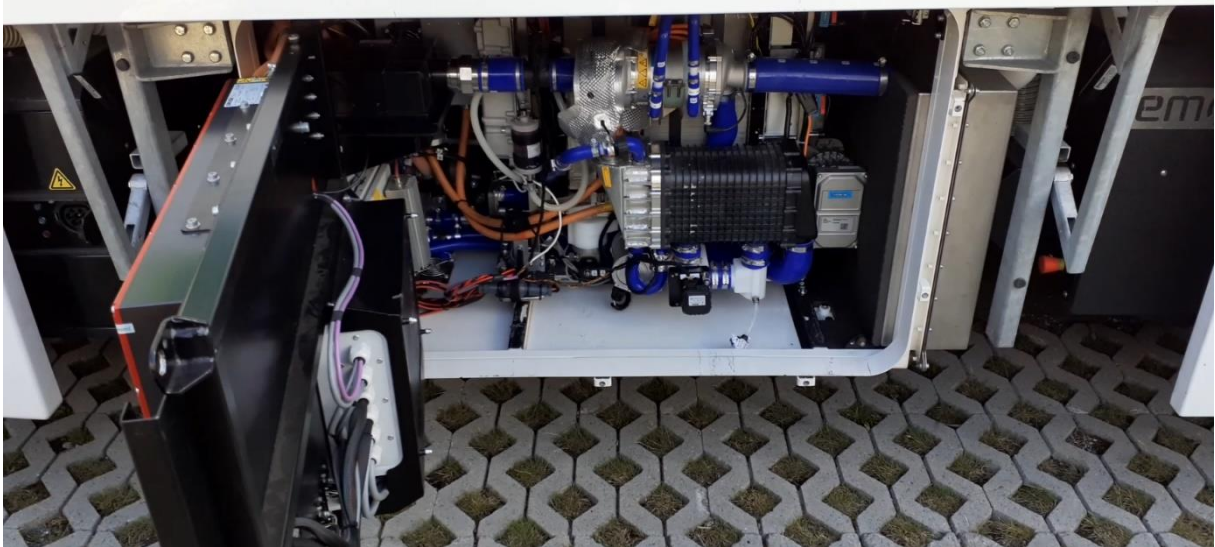


Abbildung 64: Fertig verbautes System im LKW

5.3 Inbetriebnahme und Testing

Das neue Brennstoffzellen-System wurde schrittweise in Betrieb genommen und produzierte schliesslich zuerst im Stand und dann auch bei Fahrt stabil Strom. Das System konnte dabei kontinuierlich bei über 90kW betrieben werden, was ein deutlicher Fortschritt im Vergleich zum alten System darstellt.



Abbildung 65: Dampfaustritt oben bei ersten Versuchen im Stand.

In ersten Testfahrten zeigte sich dann auch, dass das Brennstoffzellen-System mit der gewählten Betriebsstrategie den Energiebedarf des Fahrzeugs decken kann und darüber hinaus die Batterie auch laden kann. Abbildung 66 zeigt eine Testfahrt über rund 120 km, die sowohl auf Überlandstrassen, Autobahnen und den abendlichen Stau führte. Der SOC der Batterie wurde dabei auf die geplanten 90% erhöht. Die Leistung der Brennstoffzelle betrug dabei, wie die Betriebsstrategie vorgab, maximal 85 kW. Über die gesamte Testfahrt zeigte die Brennstoffzelle das erwartete Verhalten und es traten keine Fehler auf.

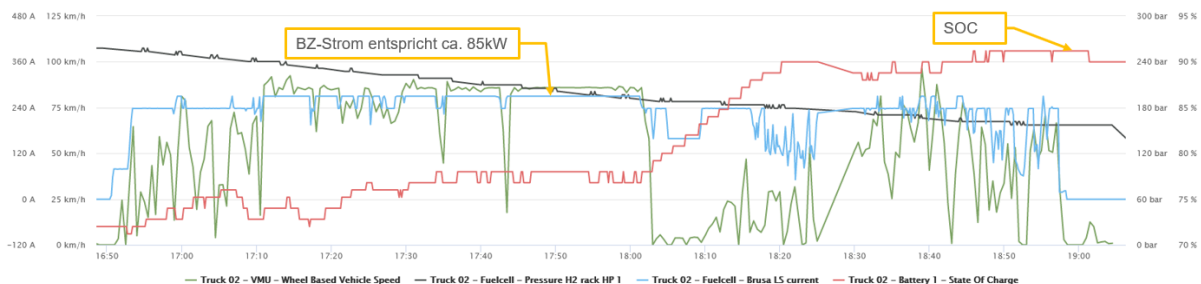


Abbildung 66: Testfahrt vom 4.5.2021 über 120km und verschiedene Verkehrssituationen

Bei einer nächsten Testfahrt trat dann allerdings eine Störung auf. Das neue Kühlventil bewegte sich in eine falsche Position, was die Kühlung des Stacks stark verminderte. Das System schaltete sich ordnungsgemäss ab, jedoch entstanden während der Abschaltung negative Spannungen zwischen einzelnen Zellen, was die Elektronik der Zellspannungsüberwachung (CVM) zerstörte.

Das Brennstoffzellen-System musste darauf aus dem Fahrzeug ausgebaut werden und der Stack zu Powercell nach Schweden zur Reparatur geschickt werden.

Der Brennstoffzellenstapel wurde nach einigen Diskussionen und längeren Verhandlungen durch Powercell repariert. Einige Zellen mussten getauscht werden, da der Berührschutz offenbar vom Hersteller falsch montiert war und dadurch die Bipolarplatten einiger Zellen am Rand eingedrückt waren und die Gefahr von Kurzschlüssen bestand. Obwohl hier eindeutig ein Herstellungsfehler vorlag, sind die Kosten dafür nicht vom Hersteller Powercell übernommen worden, da die Garantie von 12 Monaten (die bei den eingesetzten Prototypen ohnehin nur für fehlerfreie Montage und nicht für vorzeitige Alterung gültig ist) bereits abgelaufen war.

Nach Erhalt des Stapels wurde er durch Swiss Hydrogen geprüft und es wurde festgestellt, dass die Isolierplatte nicht (wie vorgesehen) bündig mit der Andruckplatte ist. Der vorhandene Spalt hätte zu einem Leck zwischen dem Stapel und der Anoden-Subsystemplatte von Swiss-Hydrogen geführt. Auch hier war Powercell nicht bereit, eine kostenfreie Reparatur vorzunehmen. Es wurde schliesslich von Swiss Hydrogen eine Anpassung an der Dichtungsschnittstelle vorgenommen und der Lecktest konnte schliesslich erfolgreich durchgeführt werden.

Daraufhin wurde der Stapel in das Brennstoffzellensystem eingebaut. Zusätzlich wurden Änderungen an der Betriebssoftware vorgenommen. Die Abschaltprozedur beim «Key-Off» wurde angepasst und es wurden zusätzliche Diagnosefunktionen implementiert.

Nach einiger Betriebszeit wurde Swiss Hydrogen seitens ESORO auf ein mögliches Leck im Brennstoffzellenbauraum hingewiesen. Eine Untersuchung vor Ort ergab, dass eine Verbindung der Purge/Drain Line nicht korrekt angezogen war und dadurch kleine Mengen von Wasserstoff entweichen, wenn der Spülvorgang bzw. der Entwässerungsvorgang aktiv sind. Das Leck konnte problemlos behoben werden und ein erneuter Lecktest zeigte, dass kein weiterer Wasserstoffaustritt vorhanden war und die Betriebssicherheit somit vorhanden war.

Ausserdem wurden noch weitere Verbesserungen an der Software laut der vorgenommen. Die automatische Fehlerbehebung wurde verbessert, so dass einfache Fehler durch entsprechende Abhilfen automatisch behoben werden und komplexere Fehler durch einen Neustart zurückgesetzt werden können.

Weitere Systemtests konnten im Fahrbetrieb durchgeführt werden. Die Betriebsparameter waren in allen Betriebssituationen stabil und entsprechend der Spezifikation (Temperaturen, Drücke, Feuchte Strom, Zellspannungen, ...)

Auch die Fahrzeugbatterien zeigten jetzt ein stabileres Betriebsverhalten hinsichtlich der Kühlwassertemperatur.



In diesem Zustand war das Fahrzeug im Mai 2022 in Betrieb genommen und für intensivere und regelmässige Testfahrten bereit.

5.4 Situation H2-Tankstellen

Für die ersten Testfahrten konnte das Fahrzeug noch an der EMPA aufgetankt werden. Ab Mitte Mai 2022 war dann allerdings die EMPA-Tankstelle auf Grund von Problemen bei Systemlieferanten ausser Betrieb. Die EMPA probierte das Problem zu lösen, stellte den Betrieb dann aber im Oktober vorerst ein.

Eine Betankung an den anderen Tankstellen gestaltete sich ebenfalls nicht ganz einfach. Alle Tankstellen sind auf die Hyundai XCIENT Fuel Cell-LKWs eingestellt und diese verfügen zudem über eine Kommunikationsschnittstelle. Um einen anderen, kommunikationslosen LKW betanken zu können, muss zuerst eine Testbetankung mit Messprotokoll (Temperaturen, Drücke) durchgeführt werden. Technisch stellt das grundsätzlich kein Problem dar, weil die Speichersysteme der beiden LKWs sehr ähnlich sind. Allerdings ist die Mitarbeit der Hersteller der Tankstellen notwendig. Von den aktuellen Tankstellen beruht die Tankstelle in Hunzenschwil auf der Technologie von Linde, während alle übrigen Tankstellen von Maximator aufgebaut wurden. Nach Absprache mit Coop soll der LKW zukünftig vorwiegend um Hunzenschwil eingesetzt werden. Deshalb sollte er in erster Linie für die Linde-Tankstelle freigemessen werden. Die Zusammenarbeit mit Linde gestaltet sich aber nach Rücksprache mit Coop Mineralöl, dem Betreiber der Tankstelle in Hunzenschwil, sehr schwierig. Zudem war auch diese Tankstelle im Sommer 2022 immer wieder ausser Betrieb.

In Absprache mit Coop wurde schliesslich entschieden, das Fahrzeug für die Maximator-Tankstellen freizumessen. Die Kontakte dazu sind nun vorhanden, aber die Messungen konnten aus Kapazitätsgründen noch nicht durchgeführt werden.

6 Weiterentwicklung zu Nachrüst-Produkt

6.1 Hintergrund

Dank des Erfolgs des Projektes und der grossen internationalen Visibilität haben sowohl ESORO als auch Swiss Hydrogen viele Anfragen erhalten, weitere Brennstoffzellen-LKWs aufzubauen. Die gesamte Realisierung ist grundsätzlich sehr modular gehalten, weshalb sich das System auch als Nachrüstsatz für Elektro-LKWs durchaus anbieten würde. Insbesondere sind der Wasserstoffspeicher und die Brennstoffzellen-Box nur über Kabel und Leitungen verbunden und können grundsätzlich beliebig positioniert werden. Die Brennstoffzellen-Box wurde zudem einzeln auf die EMV-Norm ECE R-10 getestet und kann so an ein beliebiges Fahrzeug montiert werden.

Hintergrund vieler Anfragen ist auch, dass aktuell neben den Hyundai-LKWs keine grossen Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb im Angebot sind und die Hyundai-Fahrzeuge auch momentan auch nicht für alle Kunden erhältlich sind. Ebenfalls gibt es den LKW bisher nur in einer Ausführung. Die Anfragen von Kunden zielten aber auch auf andere Anwendungen, wie z.B. Müllfahrzeuge oder Sattelzugmaschinen. Die grössten Stückzahlen der LKWs werden bei Sattelzugmaschinen abgesetzt. Diese werden international vor allem auf der Langstrecke eingesetzt – also genau dort, wo am meisten Energie benötigt wird. Sattelzugmaschinen bieten andererseits auf Grund ihres kurzen Radstandes jedoch am wenigsten Bauraum. Der Radstand kann insbesondere in Europa auf Grund der begrenzten Gesamtlänge eines Sattelzuges nicht beliebig erhöht werden.

ESORO und Swiss Hydrogen mussten solche Projektanfragen bisher leider ablehnen. Einerseits erachten es die Partner für zwingend notwendig, die oben beschriebenen Optimierungen durchzuführen und im realen Betrieb zu testen. Andererseits ist auch das aktuelle Packaging auf eine Fahrzeugarchitektur mit Pritschenaufbau und Kühlkoffer ausgerichtet. Um das bestehende System als



modulares Nachrüst-Paket anbieten zu können, müssten also Untersuchungen angestellt werden, welche insbesondere folgende Fragen klären sollten:

- Welche Bauräume stehen bei anderen Fahrzeugarchitekturen, insbesondere bei Sattelzugmaschinen oder Fahrzeugen mit kürzeren Radständen, für das Brennstoffzellen-System zur Verfügung?
- Welche Dimensionen dürfte das Brennstoffzellen-System haben, um möglichst universell einsetzbar zu sein?
- Wo und wie können die Tanks an einem Fahrzeug befestigt werden, wenn kein Kühlkoffer zur Verfügung steht? Welche Energiemengen könnten dann überhaupt dargestellt werden?
- Welche elektrischen Randbedingungen, insb. Spannungslage des Antriebstranges, müsste das Nachrüstpaket abdecken, um möglichst universell einsetzbar zu sein?

6.2 Rahmenbedingungen

Um die Rahmenbedingungen für die Realisierung eines Nachrüstpaketes evaluieren zu können, lohnt sich ein Blick auf die aktuell erhältlichen elektrischen Fahrzeuge.

Erhältlich ist beispielsweise der Volvo FH electric als Sattelzugmaschine. Das Fahrzeug gibt es ab einem Radstand von 3.8 m und verfügt über zwei Batterien, jeweils links und rechts zwischen den Achsen. Der Motor befindet sich zentral an konventioneller Position und treibt die Achse über eine Kardanwelle an. Die Dauerleistung beträgt 330 – 490 kW.



Abbildung 67: Volvo FH electric: Batterien zwischen den Achsen, zentraler Motor mit Kardanwelle (Bilder Volvo)

Bereits ab 3.7 m gibt es beim Schweizer Hersteller Designwerk eine elektrische Sattelzug-Maschine. Wie bei Volvo erfolgt der Antrieb auf die Hinterachse über ein zentrales Motorpaket und eine Kardanwelle.

Aus dem Mercedes-Konzern gibt es ab 2023 den eActros 300 als Sattelzugmaschine. Er hat einen Radstand von 4 m und der Antrieb erfolgt über eine Kardanwelle. Die Dauerleistung des Antriebs beträgt 330 kW.



Abbildung 68: Mercedes eActros 300 als Sattelzugmaschine (Bilde Mercedes)

6.3 Packaging-Optionen

Die Sattelzugmaschine offeriert wie oben bereits angetönt sehr wenig Bauraum für die Speicherung von Wasserstoff und das Brennstoffzellen-System. Für die folgenden Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass man die Hälfte der Batterien der rein elektrischen Fahrzeuge einsparen kann und den freiwerdenden Bauraum für die Positionierung des Brennstoffzellen-Systems und der Wasserstoffspeicher nutzen kann.

Es wird ebenfalls davon ausgegangen, dass die erhöhten Kühlanforderungen durch das Brennstoffzellen-System im Kühlerbauraum in der Front erledigt werden können.

Abbildung 69 zeigt das Basis-Package der erhältlichen Fahrzeuge. Die Batterien sind seitlich zwischen den Achsen und der Antrieb (Motor, Kardanwelle) braucht im Wesentlichen den ganzen Raum in der Mitte

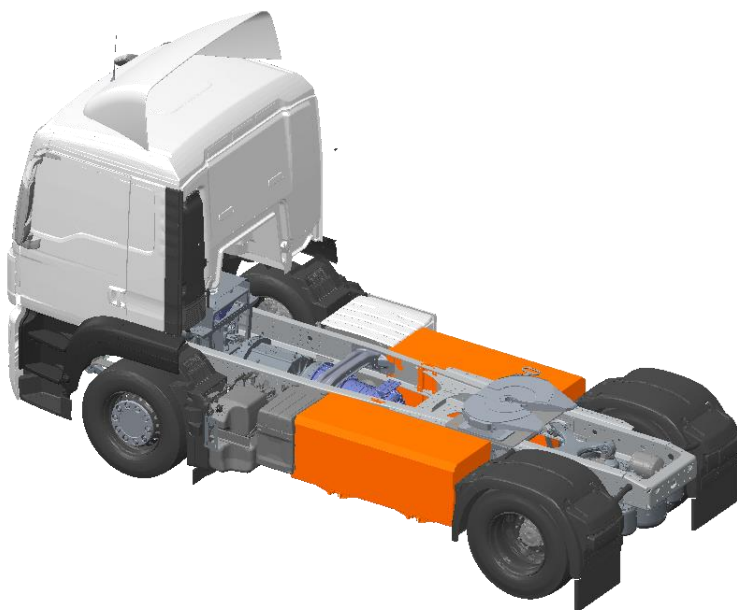


Abbildung 69: Basis-Package von aktuell erhältlichen batterieelektrischen Sattelzugmaschinen mit zentralem Antrieb und zwei Batterien (orange) jeweils links und rechts.



Daraus ergeben sich im Wesentlichen folgende beide Varianten:

- Variante 1:
 - Eine Batterie wird durch das Brennstoffzellen-System ersetzt.
 - Die Wasserstoffspeicher werden in einem selbsttragenden Aufbau hinter der Kabine untergebracht.
- Variante 2:
 - Der Antrieb wird durch eine elektrische Achse ersetzt.
 - Der freigewordene Raum in der Mitte wird durch die Batterie genutzt.
 - Die Tanks werden zwischen den Rädern positioniert.
 - Das Brennstoffzellen-System kommt unter die Kabine in den Bauraum des Diesel-Motors.



Abbildung 70: Variante 1 und 2 als Prinzipdarstellung

Variante 2 stellt sicher die elegantere Lösung dar, wobei sie für einen Umbau den viel grösseren Eingriff bedeutet. Der Umbau der gesamten schon homologierten Achse und die Neuintegration einer elektrischen Achse bedeutet einen hohen Aufwand, insbesondere da auch sicherheitsrelevante System betroffen sind. Die Variante ist auch erst möglich, seit verschiedene Hersteller genügend leistungs- und traglastfähige elektrische Achsen anbieten oder zumindest angekündigt haben. Die Technologie ist zwar insbesondere bei Bussen schon lange in Betrieb, aber die Leistungsanforderungen bei Sattelzugmaschinen sind beträchtlich höher. Abbildung 71 zeigt zwei Beispiele von elektrischen Achsen für schwere LKWs.



Abbildung 71: Angebotene Achsen von Allison (links) und Dana (rechts) für schwere LKWs (Bilder Allison / Dana)

Da die vorliegende Untersuchung in erster Linie für ein Nachrüstpaket gelten soll, beschränken sich die nachfolgenden Überlegungen auf die Variante 1. Auch die Realisierung von Variante 1 ist nicht



ganz einfach, aber der Eingriff belässt zumindest den Antriebstrang unangetastet und betrifft somit die sicherheitsrelevanten Systeme wie Bremse, ESP etc. nicht oder nur sehr begrenzt.

Das Basis-Konzept wäre somit, dass man steuerungsseitig dem elektrischen LKW eine grössere Batterie vorspielt, die technisch eine Batterie mit einem Brennstoffzellen-System ist.

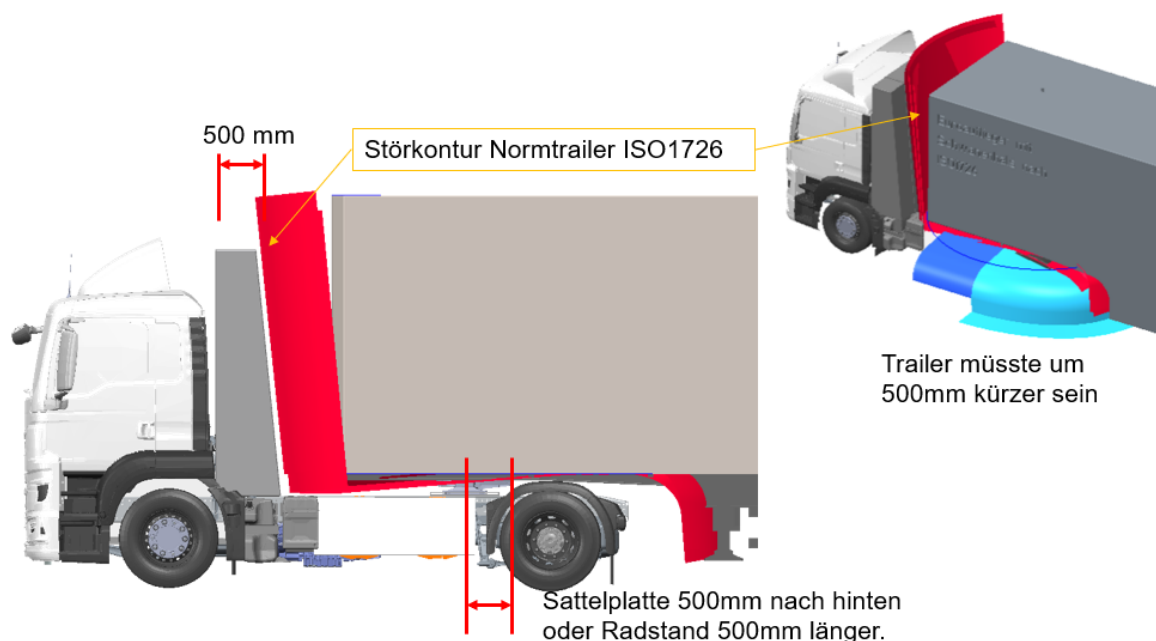
6.4 Wasserstoff-Speicherung

Eine wesentliche Schwierigkeit bei Variante 1 ist die Befestigung der Wasserstofftanks. In der Konfiguration des aktuellen LKWs mit einem Kühlkoffer konnten die Flaschen an diesem Befestigt werden. Bei einer Sattelzugmaschine fehlt diese Anbindungsmöglichkeit. Ebenfalls können die Tanks nicht an der Kabine befestigt werden, da diese kippbar bleiben muss und für diese zusätzlichen Gewichte nicht ausgelegt ist. Die Tanks müssen dementsprechend unten an den Längsträgern des Fahrzeugchassis befestigt werden. Erschwerend kommt dazu, dass die Kabine federnd gelagert ist und es deshalb einen bestimmten Abstand zwischen Kabine und dem Tankaufbau haben muss, damit Kollisionen ausgeschlossen werden können.

Der Bauraum hinter der Kabine ist grundsätzlich durch den Schwenkraum des Anhängers besetzt, d.h. er kann nicht ohne Konsequenzen für die Gesamtlänge des Sattelzuges oder den Anhänger genutzt werden.

Grundsätzlich ist die Maximallänge eines Sattelzuges beschränkt. In gewissen Regionen, z.B. in Skandinavien, können jedoch auch längere Züge gefahren werden oder es können Ausnahmen für Lastwagen mit alternativen Antriebssystemen beantragt werden, so z.B. auch in der Schweiz. Unter diesen Umständen muss die zusätzliche Länge demnach kein Nachteil sein. Es gibt auch viele Anwendungen, bei welchen die maximale Länge nicht ausgenutzt wird. Beispielsweise beim Transport von Flüssigkeiten oder Stückgut ist das Gewicht des Sattelzuges das begrenzende Element und die Auflieger sind entsprechend kürzer.

Je unkritischer die Länge ist, desto mehr Wasserstoff kann hinter der Kabine transportiert werden. Für die vorliegende Untersuchung sind wir als Beispiel davon ausgegangen, dass eine Verkürzung des Trailers um 500mm noch akzeptabel wäre. Das entspricht auch in etwa der Verkürzung des Laderaums beim vorliegenden LKW. Abbildung 72 zeigt die Bauraumverhältnisse mit der Störkontur des Normtrailers und die Konsequenzen für die Gesamtzuglänge.





Unter diesen Annahmen könnten z.B. 5 Tanks der Grösse D420x2500mm verbaut werden. Dies entspricht dem gleichen Durchmesser der aktuell verbauten Tanks, allerdings können sie rund 500mm länger gebaut werden. Damit können etwa 30kgH₂ bei 350 bar transportiert werden. Bei 700bar könnten damit sogar 54kg mitgeführt werden. 700 bar sind zwar im Nutzfahrzeugbereich noch nicht Standard und ist energetisch durch die notwendige Kühlung des Wasserstoffs auch aufwändig. International sind jedoch durchaus Tendenzen zu höheren Speicherdrücken sichtbar.

Für die Befestigung der Tanks gilt wie in Kapitel 3.2.4 die EG79/2009. Das bedeutet, dass das Tanksystem auf folgende Beschleunigungen ausgelegt sein muss:

- x-Richtung (längs): 6.6 g
- y-Richtung (quer): 5 g
- z-Richtung (vertikal): 5 g

Das Haltesystem wurde als Biege-Schweiss-Konstruktion in Stahl ausgeführt. Basismaterial waren 5mm dicke Stahlbleche. Das Gewicht kann jedoch sicher noch optimiert werden.

Die Befestigung des Systems erfolgt an den Längsträgern. Abbildung 73 zeigt die Konstruktion

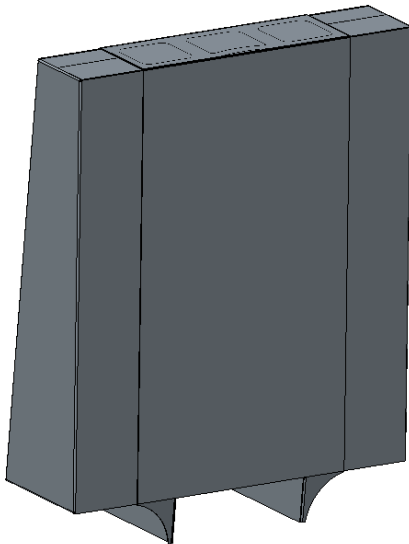


Abbildung 73: Konstruktion des Tankhalters

Die Konstruktion wurde mit FEM vernetzt und mit den statischen Lastfällen der EG79/2009 beaufschlagt. Dabei wurde von den Zylindern nur die Masse, nicht aber die Steifigkeit berücksichtigt. Die Konstruktion wurde an den Anbindungsstellen unten festgehalten und dann mit den entsprechenden Beschleunigungen versehen.

Der kritische Lastfall ist die Beschleunigung in X, also der Längscrash. Dies ist auch intuitiv klar, weil die Beschleunigung über die schmale Halterung gehalten werden muss und der Betrag der Beschleunigung auch am höchsten ist.

Die Deformationen sind an den oberen Ecken am grössten, sind jedoch mit knapp 5mm recht überschaubar. Auch die Spannungen sind moderat und überall unterhalb der 355 N/mm². In einigen Optimierungsloops könnte die Wandstärke und damit das Gewicht der Halterung also noch deutlich reduziert werden.



Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass eine eigenständige Halterung der Tanks hinter der Kabine einer Sattelzugmaschine realisierbar ist. Falls die Länge des Sattelzugs noch weiter vergrößert werden könnte oder die Länge der benutzten Auflieger kürzer ist, könnte noch deutlich mehr Wasserstoff mitgeführt werden. Eine Verlängerung der Anschraubbasis ist für den Halter auch bei Mehrgewicht der Tanks unkritisch.

6.5 Brennstoffzellen-System

Für das Brennstoffzellen-System bleibt gemäss der Variante 1 der Bauraum einer seitlichen Batterie. Abbildung 74 zeigt die Auswirkungen, wenn die aktuelle Brennstoffzellen-Box (rot markiert) in die Batterieposition (orange) gesetzt wird. Dargestellt ist dabei die im aktuellen LKW verbaute Batterie. Diese ist im Vergleich zu in den batterieelektrischen LKWs von Emoss verkürzt und stellt – obwohl noch mit alter Technologie bestückt – eher ein Minium dar. Aus den Ausführungen in Kapitel 6.2 ist bekannt, dass die Batterien in Sattelzugmaschinen jeweils fast den ganzen Bauraum zwischen den Rädern ausfüllen. In der Abbildung ist ein Radstand von 3900mm dargestellt.

Der Kühlaufbau des aktuellen LKWs steht nicht direkt auf den Chassis-Trägern sondern auf einem Distanzrahmen von ca. 250mm. Hintergrund dafür ist, dass die Kühlbox-Unterkante auf der gleichen Höhe wie die verschiedenen Entladerampen sein muss. Dies gibt dem Brennstoffzellen-System in vertikaler Richtung mehr Bauraum.

Bei einer Sattelzugmaschine wird der Raum oberhalb der Längsträger durch den Bewegungsraum des Aufliegers besetzt, d.h. das Brennstoffzellen-Gehäuse darf nicht über die Höhe der Längsträger hinausragen. Wenn – wie in Abbildung 74 dargestellt – die Box entsprechend nach unten geschoben wird, wird die Bodenfreiheit des LKWs eingeschränkt.

Dies ist sicher nicht in allen Fällen zulässig. Um die minimale Bodenfreiheit des Standard-LKWs einhalten zu können, muss das Brennstoffzellen-System um ca. 120 mm flacher gebaut werden können. Die maximale Höhe des Brennstoffzellen-Systems darf damit ca. 720 mm betragen.



Abbildung 74: Aktuelles Brennstoffzellen-System im Bauraum einer seitlichen Batterie

Andererseits steht in Längsrichtung deutlich mehr Bauraum zur Verfügung, als aktuell vom Brennstoffzellen-System in Anspruch genommen wird. Nur schon um die Länge der Emoss-Batterie



auszunützen, könnte das System um ca. 200 mm verlängert werden. Bis zum Vorderen Schmutzfänger sind sogar über 800 mm mehr Bauraum möglich.

Abbildung 75 zeigt einen Schnitt durch das Brennstoffzellen-System. Dabei wird deutlich, dass der Bauraum in vertikaler Richtung bei den aktuellen Abmessungen von 840 mm schon ziemlich ausgereizt wird. Davon noch 120 mm einzusparen ist nicht unmöglich, bedarf aber der Umkonstruktion des Brennstoffzellen-Systems.

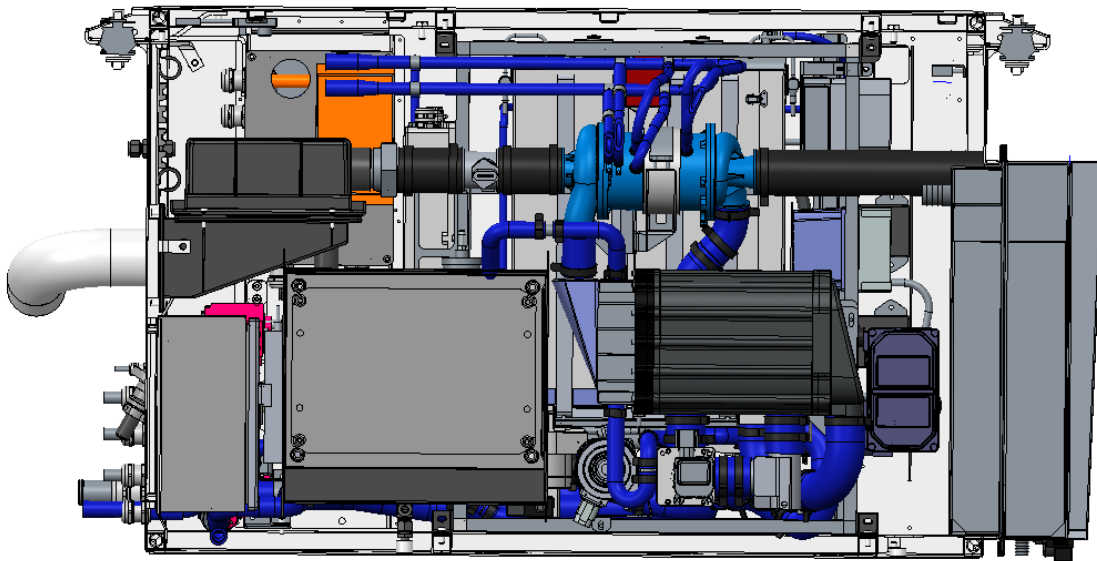


Abbildung 75: Schnitt durch das BZ-System

Aus elektrischer Sicht lässt sich sagen, dass die Leistung des Brennstoffzellen-Systems mit knapp 100 kW sicher eher an der unteren Grenze für eine Langstrecken-Sattelzugmaschine. Muss das Nachrüstpaket dafür ausgelegt sein, müsste gerade für längere Steigungen bei voller Beladung die Leistung wohl im Dauerleistungsbereich des Antriebs liegen oder zumindest im Bereich von 190 kW wie beim Hyundai XCIENT Fuel Cell.

Für diese Anforderung müssten aber mehrere Stacks in die Box eingebaut werden. Dies wird nur mit mehr als einem Brennstoffzellen-System pro Box möglich sein. Ob sich das mit dem vorgegebenen Bauraum mit den aktuell für Swiss Hydrogen zugänglichen Brennstoffzellen-System möglich ist, müsste genauer untersucht werden. Bei steigender Leistung steigt natürlich auch der Kühlbedarf. Mehr Kühlleistung ist allerdings auch schwieriger zu integrieren, da der Bauraumbedarf auf Grund der tieferen Betriebstemperaturen rasch grösser ist, als er für die grossen Dieselantriebe vorgesehen ist. Es kann also auch sinnvoll sein, das Brennstoffzellen-System explizit als Range-Extender auszubilden und deshalb einer Leistung um die 100 kW zu belassen.

Der Spannungsbereich von 500 – 800 VDC, welche durch den DCDC-Wandler vorgegeben ist, erscheint vernünftig. Allerdings steigen die Betriebsspannungen immer mehr, sodass eine Erweiterung auf 900 V sicher sinnvoll wäre.



6.6 Zusammenfassung Umrüstpaket

Zusammenfassend können die Anforderungen an das Umrüstpaket wie folgt skizziert werden:

Brennstoffzellen-System:

Mechanisch		
	Höhe	max. 720 mm
	Breite	max. 740 mm
	Länge	ca. 1700 mm
Elektrisch		
	Betriebsspannung	500 – 900 VDC
Leistung		
	Als Range-Extender	100 kW
	Als Voll-BZ-Fahrzeug	200 kW

H₂-Speichersystem:

Mechanisch		
	Höhe	max. 2550 mm ab Höhe Längsträger
	Breite	max. 2450 mm
	Länge	Gem. akzeptabler Verkürzung Träger
Inhalt		
	Kapazität	Mind. 30 kgH ₂
	Druck	350 bar oder 700 bar

7 Schlussfolgerungen und Fazit

Das Potenzial des Fahreinsatzes des LKW-Anhängerzuges für den Betrieb mit einem Gesamtgewicht von 35 t konnte nachgewiesen werden. Ebenfalls konnte das ursprüngliche Verbrauchsziel von 8.5 kgH₂/100km trotz den erwähnten technischen Herausforderungen erreicht werden.

Der Einsatz im Versorgungsberieb der Verkaufsläden konnte in allen Fällen zeitgerecht erledigt werden. Mit der eingesetzten Speicherkapazität an H₂ konnte die anvisierte Reichweite von 375 - 400 km erreicht werden.

Die Rückmeldungen der Fahrer betreffend Einsatz sind positiv betreffend Lärmniveau und Vibrationen in der Kabine, Anzugsmoment des Fahrzeugs und des Handlings.

Die Verfügbarkeit war insbesondere in 2019 nicht mehr gegeben, was an der Schädigung des Stacks gelegen hat. Mit den beschriebenen Optimierungen und dem Einsatz eines neuen Stacks konnten jedoch ein deutlich stabilerer Betrieb erreicht werden. Insbesondere die Verbesserte Anodenzirkulation, die schnellere Kühlungsregelung, die optimierte Steuerung und die erhöhte Diagnostik ermöglichen eine deutlich genauere Regelung des Brennstoffzellen-Systems und eine genauere Einhaltung der optimalen Betriebsfenster. Dies führt zu einer deutlich reduzierten erwarteten Alterung des Brennstoffzellen-Stapels. Das damit gewonnene Knowhow stellt insbesondere für Swiss Hydrogen auch in neuen Projekten einen Knowhow-Gewinn dar.

Das Fahrzeug selber konnte – auch abgesehen vom Brennstoffzellen-System – durch mehrere Optimierungsschritte soweit verbessert werden, dass ein zuverlässiger Betrieb möglich sein sollte. Die Limitierung durch die Batteriekühlung kann wohl nicht vollends gelöst werden, aber mit verbesserter Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle wird auch die Batterie entlastet.

Der Praxistest über einen längeren zusammenhängenden Zeitraum konnte wegen der schlechten Verfügbarkeit von Wasserstoff noch nicht erbracht werden, ist aber in Planung.



Unabhängig von den technischen Herausforderungen, kann das Projekt insgesamt als grossen Erfolg gewertet werden. Die Ausstrahlung war sehr gross und durch den proof-of-concept wurde auf dem Markt so viel Interesse geweckt, dass sich 17 bedeutende Unternehmen des Transportgewerbes und Tankstellenbetreiber zu einem Förderverein zusammengeschlossen haben. Weil dadurch Hyundai überzeugt werden konnte, einen Brennstoffzellen-LKW zu entwickeln und 1000 Stück davon in die Schweiz zu liefern, wird in der Schweiz privatwirtschaftlich ein Netz von Wasserstoff-Tankstellen aufgestellt, wobei der Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen stammt.

Gerade gegen Ende des Projektes wurden sowohl von Umrüstern, wie auch von OEMs verschiedene grosse LKWs mit Brennstoffzellen-Antrieb vorgestellt. Dies zeigt, dass auch von industrieller Seite an eine Zukunft des Wasserstoffs gerade auf der Langstrecke geglaubt wird. Offensichtlich geht man davon aus – und da dürfte Hyundai mit seiner Erfahrung im PKW-Bereich sicher über fundiertes Wissen verfügen – dass Brennstoffzellen-LKWs auch preislich marktkonform hergestellt können.

Die Preisverwerfungen auf dem Strommarkt gerade in 2022, welche sich direkt auf die Kosten des Wasserstoffs ausgewirkt haben, zeigen jedoch auch, wie wichtig die Kosten im Nutzfahrzeug-Markt sind. So sah sich Hyundai gezwungen, temporär keine Fahrzeuge mehr in das Pay-Per-Use-Modell aufzunehmen, da die Preise an die Diesel-Preise gekoppelt waren. Diese schwankten jedoch nicht im gleichen Masse wie die Strompreise. Ebenfalls zeigte sich, dass die Verfügbarkeit von Wasserstoff an den Tankstellen noch im Aufbau ist und nicht immer ganz zuverlässig erhältlich ist. Eine nachhaltige und günstige Produktion von Wasserstoff ist also für eine höhere Marktdurchdringung zwingend.

Gleichzeitig zeigt sich, dass mittlerweile fast alle OEMs schon batterieelektrische Fahrzeuge anbieten oder angekündigt haben. Diese werden in der Tendenz ebenfalls für den grösseren Lasten und höhere Reichweiten entwickelt. Es ist abzusehen, dass der Wasserstoff vorwiegend im Schwerlastbereich auf der Langstrecke seine Vorteile entfalten kann.

Für die beteiligten Unternehmen ESORO und Swiss Hydrogen hatte das Projekt durchaus positive Auswirkungen. ESORO konnte einige namhafte Projekte für kleinere und grössere OEMs im Nutzfahrzeug-Bereich durchführen, deren Inhalt auf Grund von Vertraulichkeits-Vereinbarungen an dieser Stelle leider nicht publiziert werden darf. Swiss Hydrogen konnte ihre Technologie weiterentwickeln und diese in ihre neue Muttergesellschaft PlaticOmnium einbringen.

8 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Wie beschrieben fehlt noch der Nachweis, dass ein stabiler Betrieb über längere Zeit mit den umgesetzten Optimierungen möglich ist. Dies ist im Projektteam und in Absprache mit Coop RailCare geplant. RailCare betreibt nach internen Umstellungen bei Coop alle LKWs mit alternativen Antrieben und ist deshalb nun zuständig für das Fahrzeug. Realistischerweise muss jedoch angemerkt werden, dass das Fahrzeug, insbesondere die Batterie, schon etwas in die Jahre gekommen ist und auf Grund des Konkurses von Ceekon, dem ehemaligen Generalimporteur von E-moss-LKWs, und der schwierigen Zusammenarbeit mit E-moss, der Support des Basis-LKWs nicht mehr richtig gewährleistet ist. Deshalb ist der Betrieb mit (Ausfall-)Risiken verbunden und die RailCare wird den LKW in etwas unkritischen Diensten einsetzen.

Coop konnte als einer der ersten grossen Logistik-Anwender und Tankstellen-Betreiber reale Erfahrungen mit Wasserstoff sammeln. Coop fährt eine diversifizierte Strategie bezüglich zukünftiger Energieträger im Transport und Wasserstoff ist nach wie vor ein Teil davon.

Die Ausgangslage für zukünftige Projekte ist heute massiv besser als sie zu Beginn dieses Projektes war. Einerseits ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff besser und auch viele normative und gesetzliche Rahmenbedingungen sind geklärt. Die Auswahl an erhältlichen Komponenten (Brennstoffzellen-Systemen, Tanks, Batterien, Antrieben, etc.) hat sich stark vergrössert, die Komponenten sind auch auf einem besseren technologischen Niveau und die Preise sind teilweise tiefer geworden. Dies wird (und muss) in den nächsten Jahren natürlich noch weitergehen.



Insbesondere hat sich in den letzten Jahren in der eher konservativen Logistikbranche das Mindset stark geändert. Man ist sich bewusst, dass Veränderungen kommen werden. Als Indikator kann da die Nutzfahrzeug-IAA 2022 in Hannover gesehen werden: Die Elektrifizierung (mit und ohne Brennstoffzelle) war das grosse Thema und beispielsweise am Stand von Volvo war kein einziges dieselbetriebenes Fahrzeug zu sehen.

Der Eintritt von Hyundai auf den europäischen Nutzfahrzeug-Markt zeigt auch einen Trend, der bei der Lancierung von neuen Produkten richtungsweisend sein könnte: Hyundai verkauft die Fahrzeuge nicht, sondern der Kunde bezahlt nur die Nutzung. Das bedeutet, dass der Kunde fast kein Risiko trägt, sondern dass dieses beim Hersteller, bzw. Leasinggesellschaft ist. Das bedeutet, dass die gesamte Kosten/Nutzen-Rechnung ebenfalls auf der Verkäuferseite liegt. Für die Entwicklung und das Produkt bedeutet das, dass die Zuverlässigkeit und die laufenden Kosten (v.a. der Verbrauch) noch wichtiger als bis anhin sind, weil die daraus entstehenden Kosten beim Hersteller und nicht beim Kunden hängen bleiben.

9 Nationale und internationale Zusammenarbeit

9.1 Nationale Zusammenarbeit

Durch die enge Zusammenarbeit mit der Empa Dübendorf konnten Fragen bei der Betankung geklärt werden. Dadurch profitierte dieses Projekt vom parallellaufenden P&D-Projekt zur Klärung von Fragen der Voraussetzungen für öffentliche H2-Tankstellen.

Der LKW wurde mit Wasserstoff betrieben, der nachhaltig erzeugt worden ist. Die Tankstelle Hunzenschwil wird versorgt mit Wasserstoff aus der H2-Erzeugung in Aarau, die direkt mit dem Laufwasserkraftwerk der IB Aarau verbunden ist. Die Tankstelle an der Empa bezieht Wasserstoff, der aus zertifiziertem Strom aus Wasserkraft an der Empa produziert wird.

Das P&D Projekt hat dazu beigetragen, dass die H2-Nutzfahrzeuge als Lösungsansatz auch im SCCER Mobility mitberücksichtigt worden sind und ins erste White Paper (Auf dem Weg zu einem energieeffizienten und klimafreundlichen Schweizer Mobilitätssystem) eingeflossen sind.

9.2 Internationale Zusammenarbeit

Der LKW wurde in verschiedenen Präsentationen an internationalen Veranstaltungen präsentiert.

In Deutschland wird seit kurzen in der Vereinigung H2 Mobility Deutschland bei der Ausrollung der Tankstellen über kombinierte Zapfsäulen mit 350 bar und 700 bar Dispensern hingearbeitet. Damit wird das ursprüngliche Konzept für reine PkV-Tankstellen um die Komponente Nutzverkehr erweitert.

10 Kommunikation und Präsentation

Der LKW wurde an verschiedenen Veranstaltungen gezeigt und konnte auch teilweise gefahren werden.

- Eröffnung der H2-Tankstelle in Hunzenschwil 4.11.2016
Der LKW wurde im Rahmen der Vorstellung des gesamten Wasserstoffkreislaufes von Coop zum ersten Mal öffentlich gezeigt. Neben dem LKW wurde die Tankstelle in Hunzenschwil eingeweiht und die H2-Produktionsanlage in Aarau offiziell eröffnet.
- Swiss Green Economy Symposium in Winterthur, 14.11.2016
Anlässlich des Nachhaltigkeits-Kongresses wurde der LKW in der Begleitausstellung vor dem Kongressgebäude als emissionsfreie Option in der Logistik präsentiert.



- Family-Truck Festival, Les Routiers Suisse, Alpnach 27.-28.5.2017
An der Jubiläumsveranstaltung von Routiers Suisse wurde der LKW zusammen mit einem Brennstoffzellenpersonenwagen ausgestellt. Da die Veranstaltung auf dem Flugplatz Alpnach durchgeführt wurde, konnte vielen LKW-Fahrern die Gelegenheit geboten werden, den BZ-LKW auch selber zu fahren
- Vorführung bei den Mitgliedern bei Logistikvereinigungen wie GS1
- Besichtigung mit Interessenten und Mitgliedern aus dem H2 Förderverein
- Mehrere Delegationen von Hyundai Motors konnten den LKW bei ESORO besichtigen und Probefahren.
- Der NDR hat Coop um eine Filmsequenz in einer Reportage um die Wasserstofftechnologie gebeten und einen sehenswerten Beitrag produziert:
<https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/panorama3/Wasserstofftechnologie-zu-Unrecht-in-der-Nische,wasserstoff158.html>



Abbildung 76: LKW auf Probefahrt am Family-Truck Festival



11 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des LKW-Aufbaus (I).....	12
Abbildung 2: Darstellung des LKW-Aufbaus (II).....	12
Abbildung 3: Darstellung des LKW-Aufbaus (III).....	13
Abbildung 4: Standard-Fahrzeug von Coop	14
Abbildung 5: Routenlänge im Anhängerbetrieb	15
Abbildung 6: Tageskilometer im Anhängerbetrieb	15
Abbildung 7: Abgeleitete Leistungskurven aus dem Autostack-Projekt.....	17
Abbildung 8: Spezifikation für den Brennstoffzellen-Stapel	18
Abbildung 9: Berechnete Systemeffizienz.....	19
Abbildung 10: Systemspezifikation zur Angebotserstellung	19
Abbildung 11: Abmessungen des Brennstoffzellen-Systems	20
Abbildung 12: Gewichtsabschätzung des Brennstoffzellen-Systems	20
Abbildung 13: Schema des Brennstoffzellensystems	21
Abbildung 14: Explosionszeichnung der Hauptelemente des Brennstoffzellensystems.....	22
Abbildung 15: CAD-Seitenansicht der Brennstoffzellenbox mit geschlossener Schwenktüre.....	23
Abbildung 16: CAD-Seitenansicht der Brennstoffzellenbox mit offener Schwenktüre.....	23
Abbildung 17: CAD: Rückseite der Brennstoffzellen-Box mit Auspuffanlage und HV-Box 2.....	24
Abbildung 18: CAD Ansicht des Tanksystems von rechts und von links in Fahrtrichtung	25
Abbildung 19: H2-Armaturen Hochdrucksystem 350bar.....	26
Abbildung 20: H2-Armaturen Venting (Niederdruck).....	26
Abbildung 21: Schematische Darstellung des H2-Tanksystems	27
Abbildung 22: Elektroschema des Brennstoffzellen - HV-Systems	28
Abbildung 23: Display in der Fahrerkabine zur Bedienung des Brennstoffzellen-Systems.....	29
Abbildung 24: Brennstoffzellen-LKW auf Testfahrt	30
Abbildung 25: Basisfahrzeug: MAN TGS 18.320 4x2 LL	31
Abbildung 26: Montage von Kühlkoffer und Unterfahrschutz bei Frech-Hoch.....	31
Abbildung 27: Brennstoffzellenbox unverbaut.....	32
Abbildung 28: Testeinbau des Brennstoffzellensystems	32
Abbildung 29: Komplett eingebautes System im Gehäuse	33
Abbildung 30: Montage des Tankracks am Koffer und komplett verbautes Tanksystem	33
Abbildung 31: Der Brennstoffzellenstapel auf dem Prüfstand bei Powercell.....	34
Abbildung 32: Mittlere Strom-Spannungskurve (mit Standardabweichung als rote Linien und min/max Zellspannungen als vertikale grüne Linie). Messung prüfstandsbedingt nur bis 135 A statt 350 A nominaler Stromstärke	35
Abbildung 33: Einfluss der Anoden- und Kathodenstöchiometrie auf die Betriebsstabilität. Um eine deutliche Abweichung der minimalen Spannung von der mittleren Spannung zu vermeiden ist eine relativ hohe Anodenstöchiometrie nötig (zum Vergleich: Der eigene, kleinere, Stapel von Swiss Hydrogen kann bei einer Stromdichte von 0.3 A/cm ² mit einer Stöchiometrie von 1.3 mit reinem Wasserstoff stabil betrieben werden. Beim Stapel von Powercell, der in diesem Projekt eingesetzt wurde, ist bei 90 A eine Stöchiometrie von 1.8 und zusätzlich ein Stickstoffanteil von 30% nötig).....	35
Abbildung 34: Vollständige Strom-Spannungskurve gemessen am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-forschung (ZSW) in Ulm mit bis zu 330 A. Bei einem Betrieb mit hoher Stöchiometrie (hier „Umsatz“ in % der verbrauchten Gase bei 1.1 A/cm ²) und einem Betrieb mit 30% N ₂ und 70% H ₂ liegen die Zellspannungen in einem recht engen Fenster	36



Abbildung 35: Einfluss der Anoden- und Kathodenstöchiometrie auf die Betriebsstabilität, diesmal gemessen bis zu einer Stromstärke von 300 A.....	36
Abbildung 36: Dauerlauf bei Volllast. Der Prüfstand war in seiner Leistung thermisch limitiert, so dass der Test bei 102 kW Stapelleistung durchgeführt wurde. Die für 100 kW Systemleistung nötige Stapelleistung von ca. 112 kW konnte nur kurzzeitig angefahren werden und führte zu einem Abschalten des Prüfstands.....	37
Abbildung 37: Systeminbetriebnahme am ZSW in Ulm mit 331-Zellenstapel der Evo1	38
Abbildung 38: Inbetriebnahme des im Gehäuse eingebauten Systems am ZSW in Ulm	38
Abbildung 39: Das im Gehäuse eingebaute System, jetzt mit einem Stapel der Evo 2 mit 455 Zellen.....	39
Abbildung 40: Brennstoffzellen-System im EMV-Testlabor	39
Abbildung 41: Nachweis der Festigkeit der Tankanbindung nach EG 79/2009.....	40
Abbildung 42: Übergabe des Fahrzeugschildes nach der Zulassung des LKW.	41
Abbildung 43: Fahrzeugausweis mit der Gewichtserhöhung auf 35 t.....	42
Abbildung 44: Erfolgreicher Anfahrversuch, Steigung: 30%, Fahrzeuggewicht: 35t.	42
Abbildung 45: Testen des ASB-Systems	43
Abbildung 46: Testen des ESP-Systems	43
Abbildung 47: Insbesondere bei feuchtem Wetter ist der Dampf deutlich zu sehen.	44
Abbildung 48: Schulungsunterlagen der Fahrerschulung bei Coop.....	45
Abbildung 49: Wasserstoffverbrauch und Tagesfahrleistung des ESORO-LKWs.....	47
Abbildung 50: Fahrprofil mit 375 km Reichweite mit einer Tankfüllung über die Staffelegg und den Albispass.	47
Abbildung 51: Tagesfahrleistungen innerhalb einer Woche KW17/KW18 im April 2018.....	48
Abbildung 52: Messung des erreichten Drucks am Kathodeneingang in Anhängigkeit des Kathodenmassenstroms. Zunächst wurden nur 1.8 bar erreicht, später konnte dies noch auf 1.9 bar verbessert werden	50
Abbildung 53: Theoretisches Kennfeld der Kompressorstufe der Kompressor/Expander-Einheit. Bei korrekter Auslegung der Expanderstufe hätte ein Kathodenbetriebsdruck von ca. 2.3 bis 2.4 bar möglich sein können.....	51
Abbildung 54: Geborstener Gehäusedeckel des Befeuchters	52
Abbildung 55: Verformte Anschlussstutzen des Befeuchters	53
Abbildung 56: Messungen der Zellspannungen bei ca. 50 kW wobei die Zelle mit dem Pinhole sichtbar wird.	53
Abbildung 57: Bei der Wiederinbetriebnahme wird deutlich, wie gross die Differenz zwischen den neuen und den alten Zellen ist.	54
Abbildung 58: Wasserstoff-Rezirkulationspumpe der Frima Busch Clean Air aus Porrentruy	55
Abbildung 59: Isolationswertschwankungen im Hochvoltnetz des Lastwagens (links vor den Verbesserungsmassnahmen und rechts nach der Verbesserung der Verkabelung).	56
Abbildung 60: Einbau einer Luftkühlung für die beiden 60 kWh Batteriemodule im Fahrzeug	57
Abbildung 61: Zusammenbau des Systems in der Werkstatt von Swiss Hydrogen	60
Abbildung 62: 3D-Modell des Brennstoffzellen-Systems mit den zusätzlichen Komponenten.....	61
Abbildung 63: Illustration der nicht immer sehr ergonomischen Platzverhältnissen und der Millimeterarbeit zwischen Rezirkulationspumpe und der Brennstoffzellen-Box.....	61
Abbildung 64: Fertig verbautes System im LKW.....	62
Abbildung 65: Dampfaustritt oben bei ersten Versuchen im Stand.	62
Abbildung 66: Testfahrt vom 4.5.2021 über 120km und verschiedene Verkehrssituationen	63
Abbildung 67: Volvo FH electric: Batterien zwischen den Achsen, zentraler Motor mit Kardanwelle (Bilder Volvo)	65
Abbildung 68: Mercedes eActros 300 als Sattelzugmaschine (Bilde Mercedes).....	66



Abbildung 69: Basis-Package von aktuell erhältlichen batterieelektrischen Sattelzugmaschinen mit zentralem Antrieb und zwei Batterien (orange) jeweils links und rechts.....	66
Abbildung 70: Variante 1 und 2 als Prinzipdarstellung.....	67
Abbildung 71: Angebotene Achsen von Allison (links) und Dana (rechts) für schwere LKWs (Bilder Allsion / Dana)	67
Abbildung 72: Konsequenzen durch den Einbau von Wasserstoffspeicher hinter der Kabine.....	68
Abbildung 73: Konstruktion des Tankhalters.....	69
Abbildung 74: Aktuelles Brennstoffzellen-System im Bauraum einer seitlichen Batterie	70
Abbildung 75: Schnitt durch das BZ-System.....	71
Abbildung 76: LKW auf Probefahrt am Family-Truck Festival	75

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technischen Daten des Basis-LKW's	11
Tabelle 2: Technischen Vergleichsfahrzeug	14
Tabelle 3: Übersicht über die technischen Daten des BZ-LKWs	30
Tabelle 4: Isolationsgrenzwerte des Brennstoffzellen-LKWs.....	41
Tabelle 5: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines BZ-LKWs zu einem konventionellen Fahrzeug ..	49