

Forschungsbericht BWPLUS

**Hylix-B - Erprobung eines Brennstoffzellen-Lkw als  
Ausgangspunkt für die Innovationsdiffusion einer skalierbaren  
Wasserstoffverwendung in Baden-Württemberg**

von

Oliver Ehret, Ralf Wörner, Nico Gelhausen, Lorenz Bamler, Moritz Bippus, Hendrik  
Schneider, Frank Ulmer, Sebastian Wider

Hochschule Esslingen, Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität;  
Große Vehne Speditions GmbH; SWE-Mobility UG; EFA-S GmbH;  
Kommunikationsbüro Ulmer GmbH

Förderkennzeichen: BWT19001-3

Laufzeit: 15.11.2019 – 31.12.2021

Das Projekt wurde im Rahmen des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2021, Überarbeitung Juni 2022

**Kontakt:**

Prof. Dr. Ralf Wörner  
Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität, Hochschule Esslingen,  
Flandernstraße 101, 73732 Esslingen  
eMail: ralf.woerner@hs-esslingen.de

Dr. Oliver Ehret  
Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität, Hochschule Esslingen  
Kanalstraße 33, 73728 Esslingen  
eMail: Oliver-Marcus.Ehret@hs-esslingen.de

Jens Hildenbrand  
Große-Vehne Speditions GmbH  
Rudolf-Diesel-Straße 2, 70806 Kornwestheim  
eMail: jens.hildenbrand@gvsped.de

Sebastian Wider  
SWE-Mobility UG  
Gaußstraße 42 A, 70193 Stuttgart  
eMail: sebastian.wider@swe-mobility.com

Bastian Beutel  
EFA-S GmbH  
Daimlerstraße 14, 73119 Zell u.A.  
eMail: bastian.beutel@efa-s.de

Frank Ulmer  
Kommunikationsbüro Ulmer GmbH  
Teckstraße 56, 70190 Stuttgart  
eMail: post@kommunikationsbuero.com

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis .....                                   | 1  |
| Abbildungsverzeichnis .....                                | 2  |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                | 3  |
| Zusammenfassung .....                                      | 5  |
| 1. Das Projekt Hylix-B im Überblick.....                   | 6  |
| 2. Projektumfeld und Projektverlauf.....                   | 7  |
| 3. Projektziele und Transformationsprozesse .....          | 9  |
| 3.1. Praxisbezogene Projektziele (Fahrzeugaufbau).....     | 9  |
| 3.2. Forschungsbezogene Projektziele.....                  | 11 |
| 3.3. Gesellschaftliche Transformationsprozesse.....        | 11 |
| 4. Projektpartner und deren Zusammenarbeit .....           | 14 |
| 5. Arbeits- und Zeitplan .....                             | 18 |
| 6. Fahrzeugtechnik .....                                   | 20 |
| 6.1. Fahrzeugarchitektur .....                             | 20 |
| 6.2. Sicherheit, Zulassung und Testfahrten .....           | 26 |
| 6.3. Prototypenmontage und Kleinserienfertigung.....       | 27 |
| 6.4. Service und Wartung .....                             | 28 |
| 6.5. Benutzerhandbuch .....                                | 30 |
| 7. Ökologie, Marktnachfrage und Kostenentwicklung .....    | 33 |
| 7.1. Ökologische Bedeutung der Nutzfahrzeugklasse N3 ..... | 33 |
| 7.2. Kostenkalkulations-Tool und TCO-Methodik.....         | 34 |
| 7.3. Fahrzeugbedarfe der Industrie .....                   | 36 |
| 7.4. Ergebnis der TCO-Kalkulationen für Nutzfahrzeuge..... | 37 |
| 8. Verwertungsplan und Ausblick.....                       | 41 |
| Literaturverzeichnis .....                                 | 44 |

# Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Logos der Projektbeteiligten .....   | 14 |
| Abbildung 2: Organigramm des Projekts Hylix-B .....                                       | 15 |
| Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Projekts Hylix-B .....                             | 18 |
| Abbildung 4: Batterie und Elektromotor im Chassis während der Fahrzeugmontage .....       | 20 |
| Abbildung 5: Batterie und Elektromotor im Chassis während der Fahrzeugmontage .....       | 21 |
| Abbildung 6: Nicht montiertes Wasserstofftanksystem des Lkw Hylix-B .....                 | 22 |
| Abbildung 7: Lkw Hylix-B in der Werkstatt der BusWorld Esslingen zur Wasserstoffspülung.. | 23 |
| Abbildung 8: Montage der Brennstoffzelle .....  | 23 |
| Abbildung 9: Rechte Fahrzeugseite des Lkw Hylix-B ohne Tankverkleidung.....               | 24 |
| Abbildung 10: Leichtes Nutzfahrzeug vom Typ EFA-S E35 .....                               | 25 |
| Abbildung 11: Lkw Hylix-B auf der Messe „i-Mobility“, Stuttgart, April 2022.....          | 27 |
| Abbildung 12: Deckblatt Benutzerhandbuch Hylix-B .....                                    | 31 |
| Abbildung 13: Auszug aus der Rettungskarte des Fahrzeuges.....                            | 32 |
| Abbildung 14: Lkw-Klassen, Flottengrößen, Verkehrsleistungen und Emissionen 2019 .....    | 33 |
| Abbildung 15: Dashboard Tool zur Kostenkalkulation.....                                   | 35 |
| Abbildung 16: Kernelemente TCO-Methodik.....  | 35 |
| Abbildung 17: TCO Brennstoffzellen- vs. Diesel-Lkw im Zeitverlauf.....                    | 38 |
| Abbildung 18: Jährliches-TCO-Delta nach Kostenbestandteilen.....                          | 39 |
| Abbildung 19: TCO-Delta nach Kostenbestandteilen 2024-2028.....                           | 39 |

# Abkürzungsverzeichnis

|                 |  |
|-----------------|--|
| AFID            | Alternative Fuels Infrastructure Directive                                 |
| BWPLUS          | Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung       |
| CO <sub>2</sub> | Kohlendioxid   |
| CVD             | Clean Vehicles Directive   |
| DC              | Direct Current   |
| DGUV            | Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung                                    |
| EFA-S           | Elektro-Fahrzeuge Stuttgart GmbH   |
| FCEV            | Fuel Cell Electric Vehicle   |
| FMEA            | Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse                                 |
| H <sub>2</sub>  | Wasserstoff  |
| HV              | Hochvolt   |
| INEM            | Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität                      |
| LFP             | Lithium-Eisenphosphat  |
| Lkw             | Lastkraftwagen   |
| NFZ             | Nutzfahrzeuge  |
| Nm              | Newtonmeter  |
| NWS             | Nationale Wasserstoffstrategie   |
| OEM             | Original Equipment Manufacturer  |
| PTKA            | Projektträger Karlsruhe  |
| Kfz             | Kraftfahrzeug  |
| kg              | Kilogramm  |
| Klasse N1       | Fahrzeuge zur Güterbeförderung bis zu 3,5 Tonnen Gesamtgewicht             |
| Klasse N2       | Fahrzeuge zur Güterbeförderung über 3,5 und bis zu 12 Tonnen Gesamtgewicht |
| Klasse N3       | Fahrzeuge zur Güterbeförderung von mehr als 12 Tonnen Gesamtgewicht        |
| km/h            | Kilometer pro Stunde   |
| kW              | Kilowatt   |
| V               | Volt   |

|       |  |
|-------|--|
| ROI   | Return on Investment   |
| SIEET | Steinbeis-Innovationszentrum energieeffiziente und emissionsfreie Technologien |
| STEM  | Steinbeis-Transferzentrum Energie- und Mobilitätssysteme                       |
| TCM   | Total Cost of Mobilty  |
| TCO   | Total Cost of Ownership  |
| TPRD  | Thermal Pressure Relief Device   |
| TÜV   | Technischer Überwachungsverein   |
| U/min | Umdrehungen pro Minute   |

## Zusammenfassung

Das Projekt „Hylix-B“ hatte die Umrüstung eines dieselbetriebenen 26-Tonnners auf Brennstoffzellenantrieb, sowie dessen nachgelagerte Erprobung zum Gegenstand. Im weiteren Sinne zielte es auf die Stimulierung einer größeren Nachfrage nach grünem Wasserstoff und die Unterstützung der Transformation der baden-württembergischen Automobilindustrie. Der Bereich schwerer Nutzfahrzeuge trägt wesentlich zu den Emissionen des Gesamtverkehrs bei und eignet sich besonders gut für emissionsfreie Brennstoffzellenantriebe. Das Vorhaben lief Ende 2021 formal nach etwa zweijähriger Laufzeit aus und bietet sich aufgrund des weitgehenden Projekterfolgs für eine Fortführung in einem anderen, noch endgültig zu entscheidenden, Rahmen an.

Es gelang dem aus mittelständischen Unternehmen und einer Hochschule bestehenden Projektteam, die Ziele des Vorhabens trotz der widrigen Umstände der Corona-Pandemie weitgehend zu erreichen. Insbesondere wurden der mechanische Aufbau des Brennstoffzellenfahrzeugs vollendet, die Fahrfähigkeit des Lkw mit batterieelektrischem Antrieb erreicht, sowie die statischen Zulassungsverfahren zu weiten Teilen erfolgreich absolviert. Jenseits der Realisierung des Einzelfahrzeugs wurde wertvolles, prozessuales Wissen für die Entwicklung und Fertigung ähnlicher Lkw gewonnen. Das Projekt leistete auch wichtige Beiträge zur Qualifizierung regionaler Automobilunternehmen z.B. durch Nutzung in Baden-Württemberg hergestellter Komponenten, und zur Überwindung die gesamte Fachwelt betreffende Herausforderungen im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur. Allerdings beeinflusste die Corona-Pandemie den Projektverlauf negativ und führte zu substantiellen Verzögerungen beim Bezug zentraler Baugruppen und Komponenten. Unter normalen Umständen wäre eine vollständige Zielerreichung innerhalb des geplanten Projektrahmens möglich gewesen, erfordert nun aber zusätzliche Zeit und Ressourcen.

Wie die begleitend durchgeführten Kosten- und Marktanalysen ergaben, kann zukünftig eine Wettbewerbsfähigkeit von Brennstoffzellen-Lkw erreicht werden und besteht ein konkretes Interesse am Erwerb auf Basis von Hylix-B aufgebauter Fahrzeuge mit bis zu 40 Tonnen Gesamtgewicht. Darüber hinaus muss die baden-württembergische Automobilindustrie einen Strukturwandel hin zu sauberen Antrieben bewältigen, für den brennstoffzellenbetriebene Nutzfahrzeuge von großer Bedeutung sind. Angesichts dessen sind die an Hylix-B beteiligten Akteure gewillt, ihr Knowhow über die Hochschule für die Ausbildung künftiger Arbeitskräfte zur Verfügung zu stellen, und in Zusammenarbeit mit anderen regionalen Stakeholdern eine Kleinserienfertigung Hylix-B-basierter Lkw zu initiieren. Dafür ist es zunächst erforderlich, die letzten bis zur vollständigen Zielerreichung verbleibenden Arbeiten im Zuge eines Anschlussvorhabens abzuschließen, welches sich hinsichtlich von Akteuren und Finanzierung bereits konkret abzeichnet. Alle technischen und wissensbezogenen Voraussetzungen für den Erfolg des Fahrzeugkonzepts Hylix-B sind bereits heute gegeben und erlauben einen optimistischen Blick in die Zukunft

# 1. Das Projekt Hylix-B im Überblick

Das Projekt Hylix-B wurde im Jahr 2019 ins Leben gerufen und Ende 2021 abgeschlossen. Der Aufbau und Probetrieb eines brennstoffzellenbetriebenen Lastkraftwagens (Lkw) stand stets im Vordergrund, diente aber auch der Erreichung weiter gefasster Ziele: Entsprechend der Stoßrichtung des Förderprogramms *Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung* (BWPLUS), welches das Vorhaben dankenswerterweise finanzierte, wurde technisch-organisatorisches Transformationswissen zur Unterstützung der Energiewende und der Weiterentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie erarbeitet.

Grundgedanke des Forschungsansatzes Hylix-B war es, die Herstellung und Nutzung von grünem Wasserstoff über den Aufbau von Flotten emissionsfreier, brennstoffzellenbetriebener Lkw zu stimulieren und gezielt skalierbar zu entwickeln. Brennstoffzellen-Lkw bieten sich u.a. aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Wasserstoffverbräuche und betrieblichen Vorteile als Nachfrager an und der Erwerb entsprechender technologischen Kompetenzen ist von großer Bedeutung für das Automobilland Baden-Württemberg.

Da 2019 keine Lkw mit Wasserstoff und/oder Brennstoffzellentechnik zur Verfügung standen und somit eine Stimulierung der Wasserstoffnachfrage nicht möglich war, rückte der Gedanke des Aufbaus und der Erprobung des Brennstoffzellenfahrzeugs Hylix-B in den Vordergrund. Der Lkw sollte für die Belieferung, Zustellung und Entsorgung von Waren genutzt werden und das Projekt Transformationswissen zu den Aspekten Praxistauglichkeit, Wirtschaftlichkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz durch Erprobung, Messungen, Stakeholder-Gespräche und Befragungen liefern.

Jenseits dieser unmittelbaren Bestimmung zahlte Hylix-B auf die Zielsetzung ein, die Transformation der heimischen Automobilindustrie hin zu nachhaltigen Antriebssystemen zu unterstützen und trug zugleich durch den Aufbau und Einsatz eines Nullemissions-Lkw konkret zur Nutzung grünen Wasserstoffs und Emissionsreduzierung bei. Damit steht das Projekt im Einklang mit der Studie „Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg“, welche große Chancen in den Technologien sieht und deren Realisierung fordert [1].

Während des Projektverlaufs in den Jahren 2020 und 2021 entwickelte sich im Umfeld eine ursprünglich kaum vorstellbare Innovationsdynamik. Letztere führte dazu, dass sich der Projektinhalt signifikant weiterentwickelte und der Projektumfang deutlich wuchs. Die von Hylix-B angegangenen Fragestellungen und angestrebten Ziele blieben dabei im Kern unverändert und erscheinen heute wichtiger denn je. Der vorliegende Bericht stellt Ziele, Inhalte, Verlauf und Ergebnisse des Vorhabens detailliert vor.

## 2. Projektumfeld und Projektverlauf

Das Projekt Hylix-B wurde als Reallabor konzipiert und verfolgte damit verschiedene Ziele, welche allesamt zur Erfüllung des übergeordneten Auftrags Erprobung eines Brennstoffzellen-Lkw als Ausgangspunkt für die Innovationsdiffusion einer skalierbaren Wasserstoffverwendung in Baden-Württemberg beitrugen. Nachfolgend werden zunächst die projektübergreifenden Entwicklungen skizziert, die einzelnen Ziele werden später detailliert diskutiert.

Als technische Ziele standen die Entwicklung, der Aufbau und die geplante Erprobung des Brennstoffzellen-Lkw im Fokus. Parallel dazu kamen vielfältige benachbarte Fragestellungen, beispielsweise zur Wasserstoffherzeugung und -verteilung, oder zur Problematik des Tankens bzw. der Abgabe großer Mengen an Wasserstoff in kurzer Zeit auf. Auch der Frage, ob ein brennstoffzellenbasiertes Lkw-Konzept gegenüber anderen emissionsfreien Antriebssystemen wettbewerbsfähig sein kann, wurde nachgegangen.

Während die Frage der Wasserstoffproduktion von Anfang an bewusst nicht Gegenstand des Projekts war, musste sich das Projektteam mit vielerlei anderen Fragestellungen intensiv auseinandersetzen, da diese für den Betrieb des Lkw sowie für die Grundhaltung im Projekt und Projektbeirat von essentieller Bedeutung waren.

Wie eingangs erwähnt, vollzogen sich während des Projektverlaufs mehrere externe, hochdynamische Entwicklungen, welche auf die Ausgestaltung von Hylix-B wesentlichen Einfluss nahmen und die hohe Relevanz des Vorhabens klar bestätigten. So wurde im Juni 2020 die „Nationale Wasserstoffstrategie“ (NWS) [2] der deutschen Bundesregierung bekannt gegeben. In dieser Strategie wurden die folgenden wesentlichen Ziele festgeschrieben:

- Grüner Wasserstoff soll als wesentlicher Energieträger in Deutschland etabliert werden.
- Grüner Wasserstoff muss wettbewerbsfähig gemacht werden.
- Es soll ein ausreichend großer „Heimatmarkt“ für Wasserstoff geschaffen werden.
- Grüner Wasserstoff soll als Grundstoff für die Industrie implementiert werden.
- Transport- und Verteilernetze sollen geschaffen werden; zum ersten Mal wird von einer Verteilung des Wasserstoffs in Erdgasnetzen, d.h. gasförmig gesprochen.
- Wissenschaft zum Thema Wasserstoff soll gefördert und Fachleute ausgebildet werden.
- Wasserstoff soll (auch) importiert werden.

Wesentlich ist im vorliegenden Kontext, dass neben der industriellen Nutzung von Wasserstoff auch die Nutzung im Bereich des Straßenverkehrs als relevant benannt wird und dabei insbesondere Nutzfahrzeugen und Lkw u.a. im Bereich der Distribution eine wichtige Rolle zuerkannt wird, deren Markteintritt durch den Aufbau entsprechender Tankinfrastruktur zu flankieren ist.

Die Zielsetzungen der NWS werden auch durch diverse Regularien der EU unterstützt, die beispielsweise die „Clean Vehicles Directive“ (CVD) und die „Alternative Fuels Infrastructure Directive“ (AFID) umfassen. Während erstere EU-Mitgliedsstaaten und deren Verwaltungen zur Beschaffung emissionsfreier Fahrzeuge einschließlich von Brennstoffzellenfahrzeugen verpflichtet, unterstützt letztere den Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe einschließlich von Wasserstoffinfrastruktur [3]. Dabei tauschen sich die zuständigen Gremien auf Ebene der EU und

Deutschlands regelmäßig aus und treiben die Kommerzialisierung von Fahrzeugen und Infrastruktur voran.

Schwachstelle der NWS ist die offene Frage, bis wann Produktion, Logistik und Verbrauch signifikanter Mengen an Wasserstoff in Einklang gebracht werden können. Da die Strategie politisch und allgemein gehalten ist bzw. das Aufkommen großer Mengen nur grob antizipiert, bleibt der Entwicklungsplan diesbezüglich wenig konkret.

Hier ist die Zielstellung des Projektes Hylix-B, den Verbrauch und die Nutzung von Wasserstoff über Lkw-Flotten zu skalieren nach wie vor aktuell, vor allem unter dem Blickwinkel, dass die Dekarbonisierung des Verkehrsbereichs beschleunigt werden muss, die möglichen Energiepreise jedoch auch höher liegen als in der rein industriellen Nutzung von Wasserstoff.

Eine andere für den Projektverlauf wesentliche Entwicklung war die Aufnahme umfangreicher Entwicklungsarbeiten für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Lkw seitens der „Daimler AG“ (mittlerweile „Daimler Truck AG“) als größtem Lkw-Hersteller der Welt, welche auf die Kommerzialisierung entsprechender Fahrzeuge zielen. Da der Lkw Hylix-B auf einem von Daimler erworbenen konventionellen Fahrzeug basiert, hatte die Entwicklung einen unmittelbaren Einfluss auf das Projekt. Während Daimler für den Betrieb der Lkw auf die Nutzung von Flüssigwasserstoff setzt, entschied sich das Projekt Hylix-B aufgrund der besseren Technologieverfügbarkeit für gasförmigen Wasserstoff. Mit Blick auf die in der NWS angestrebte Verteilung von Wasserstoff könnte dieser Ansatz u.U. der einfacher Umsetzbare sein, weswegen diese Frage auch in der Zusammenarbeit mit Daimler von stetiger Bedeutung war und ist. Im Rahmen des Dialogs konnte jedoch Übereinkunft erzielt werden, dass prinzipiell jede Art der Wasserstoffnutzung dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft dienlich ist und dass somit das Projektkonsortium wie auch Daimler die gleiche übergeordnete Zielsetzung verfolgen.

## 3. Projektziele und Transformationsprozesse

Die meisten der ambitionierten Zielsetzungen des Projekts Hylix-B konnten erreicht werden und resultierten in einem mechanisch fertiggestellten Versuchsfahrzeug, welches für eine zukünftige, bereits heute konkret absehbare, vollständige Zielerreichung zur Verfügung steht. Die wichtigsten praxis- und forschungsbezogenen Projektziele werden nachfolgend vorgestellt und hinsichtlich des Grads der Zielerreichung diskutiert. Flankierend wurde das generischer gehaltene Projektziel der Beförderung gesamtgesellschaftlicher Transformationsprozesse verfolgt, welches gleichfalls hinsichtlich von Inhalten und Ergebnissen dargelegt wird.

### 3.1. Praxisbezogene Projektziele (Fahrzeugaufbau)

#### 1. *Umbau eines 26 t-Lkw zu einem Lkw mit wasserstoffbetriebener Brennstoffzelle*

Das Fahrzeug wurde innerhalb des mit Umweltministerium und PTKA vereinbarten Zeitraums erfolgreich umgebaut. Damit wurde der Beweis erbracht, dass der Umbau eines herkömmlichen Dieselfahrzeuges zu einem brennstoffzellenelektrischen Fahrzeug möglich ist. Aufgrund einer Vielzahl allgemeiner und technischer Herausforderungen, wie z.B. begrenzten zur Verfügung stehenden Bauräumen und der großen Anzahl zu verlegender Kabel, erforderte der mechanische Umbau einen hohen Aufwand, der aber letztendlich erfolgreich zu bewältigen war. Problematisch in Bezug auf den Umbau war die Verfügbarkeit von Bauteilen, welche sich im Laufe der ab März 2020 ausbreitenden Corona-Pandemie als kritischer Faktor erwies.

#### 2. *Nachweis der Fahrfähigkeit und Sicherheit des Lkw durch den Erhalt einer Straßenzulassung bis Projektmonat 18*

Die Straßenzulassung eines Prototyps mit Einzelzulassung erfolgt in zwei Stufen. Der erste Schritt ist eine statische Prüfung, bei welcher das unbewegte Fahrzeug begutachtet wird. Die Prüfung gilt den verbauten Komponenten, der funktionalen Sicherheit, der Wasserstoffdichtigkeit und dem Bremssystem, und beinhaltet eine ausführliche Durchsicht des elektrischen Systems. Zum 31.12.2021 konnte das Projektteam wesentliche Inhalte der statischen Zulassung erfüllen und damit wichtige Erfolge erzielen, insbesondere in den Bereichen des Wasserstoffsystems und der Hochvoltebene. Die dynamischen Testverfahren konnten allerdings noch nicht abgeschlossen werden. Da das Fahrzeug im batterieelektrischen Betrieb funktionsfähig ist und bewegt werden kann, wurde eine Reihe von Testfahrten auf dem Betriebsgelände von EFA-S erfolgreich absolviert.

#### 3. *Nachweis der technischen Funktionsfähigkeit des umgebauten Lkw im realen Einsatz auf ca. 300 km langen Routen der Spedition Große-Vehne bis Projektmonat 24*

Aufgrund der pandemiebedingten Verzögerungen konnte ein umfänglicher Praxisbetrieb bisher noch nicht absolviert werden, wenngleich die oben geschilderten Testfahrten wertvolle Erfahrungswerte lieferten. Im Zuge der absehbaren Fortsetzung des Vorhabens muss eine ausführliche Fahrzeugerprobung vergleichbar den ursprünglichen Planungen vollzogen werden, um praktische Erfahrungswerte zu sammeln, ‚Kinderkrankheiten‘ zu beseitigen und Notwendigkeiten der weiteren Optimierung zu definieren.

4. *Nachweis des Potentials einer Streckentauglichkeit mit Maximaldistanzen von bis zu 500 km bis Projektmonat 24*

Die technische Auslegung des Fahrzeuges und darauf basierende Betriebssimulationen lassen die Erreichung einer Reichweite bis zu 500 km mit hoher Wahrscheinlichkeit erwarten. Reichweiten dieser Größenordnung sind für die Erfüllung der betrieblichen Anforderungen von Fuhrunternehmen von zentraler Bedeutung und werden international nur von sehr wenigen Prototypen- oder Kleinserienfahrzeugen anderer Hersteller erreicht.

5. *Nachweis der Umsetzbarkeit in Hinsicht auf Montage, Wartung, Servicefreundlichkeit im Rahmen der Erprobung im realen Einsatz auf Routen der Spedition Große-Vehne bis Projektmonat 24*

Das Fahrzeug wurde erfolgreich endmontiert und somit die Zielsetzung Umsetzbarkeit der technischen Planung klar erfüllt. Der vorausgegangene Entwicklungsprozess des Lkw wurde in enger Abstimmung mit dem vorgesehenen Nutzer „Große-Vehne Spedition GmbH“ vollzogen und berücksichtigte von vornherein dessen Anforderungen auch hinsichtlich von Wartung und Servicefreundlichkeit. Daraus resultierten nutzerfreundliche Wartungs- und Servicekonzepte, die bereits in weit entwickelten Handbüchern festgehalten wurden. Das Wartungsprozedere wurde in einem Wartungshandbuch dokumentiert und ein Benutzerhandbuch gibt Fahrern praktische Hinweise zur Fahrzeugnutzung an die Hand. Beide Handbücher werden nach Vollzug der Erprobungsphase abschließend formuliert und den Weg in den Alltagseinsatz weisen.

6. *Beitrag zur Aufklärung über die Technologie durch monatliche Updates über das Projekt auf der projekteigenen Website, zwei Info-Workshops und acht Informationsstände auf Veranstaltungen bis Projektmonat 24*

Seit Februar 2020 wurde umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit durch das Kommunikationsbüro Ulmer geleistet. Die Website zum Reallabor Hylux-B ([hylux-b.de](http://hylux-b.de)) wurde und wird seither mit aktuellen Inhalten gefüllt und ihre Auffindbarkeit im Netz optimiert. Im Blog der Website wird aus dem Projektgeschehen, sowie der Wasserstoffwelt in Deutschland und weltweit Neues berichtet. Für den Projektbeirat von Hylux-B konnten Expert\*innen verschiedener Fachbereiche gewonnen werden. Diese unterstützten das Projekt tatkräftig in drei Beiratssitzungen und trugen Nachrichten über die Projektfortschritte in die jeweiligen Stakeholder-Communities hinaus. Spiegelbildlich wurden die Erkenntnisse des Beirats seitens der zentralen Projektbeteiligten berücksichtigt und flossen moderiert durch den transdisziplinären Austausch in das Vorhaben ein.

Seit März 2020 gab es jedoch auch im Bereich der Kommunikation pandemiebedingte Einschränkungen. Dennoch wurden mehrere Pressetermine erfolgreich durchgeführt. Insbesondere besuchte der damalige Umweltminister Franz Untersteller im Sommer 2020 das Projekt mit großem Interesse. Am 21.12.2021 fand einer der geplanten Info-Workshops zusammen mit „CBS e.V.“, einem studentischen Verein der Universität Stuttgart statt. CBS wurde von Studierenden der Fachrichtung erneuerbare Energien gegründet und fasst inzwischen Mitglieder verschiedener technischer Fachrichtungen, die sich für eine Transformation des Energiesystems interessieren. Mit den Studierenden wurde das Anliegen sowie die aktuellen Erkenntnisse und Herausforderungen des Reallabor Hylux-B diskutiert. Insgesamt kann die Zielsetzung dieses Projektteils als erfüllt gelten.

## 3.2. Forschungsbezogene Projektziele

7. *Erprobung und Nachweis der Effizienz durch Messungen (Route-Tracking, Verbrauch etc.) im Rahmen der Erprobung im realen Einsatz auf Routen der Spedition Große-Vehne bis Projektmonat 24*

Aussagen zur Energieeffizienz des Gesamtsystems Lkw konnten auf Basis von Simulationen getroffen werden. Aufgrund der hohen Effizienz der verbauten Teilsysteme zeigen sich hohe und konventionellen Dieselfahrzeugen überlegene Wirkungsgrade des Brennstoffzellenantriebs.

8. *Gewinn von Erkenntnissen zur wirtschaftlichen Skalierbarkeit durch die Erstellung einer Return-on-Investment- (ROI) und Total-Cost-of-Ownership- (TCO) Betrachtung bis Projektmonat 24*

Auf Basis teils vorläufiger Daten aus den projektinternen Beschaffungsvorgängen und damit verbundener Simulationen konnten TCO-Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen werden. Die TCO-Analysen werden im Verlauf des vorliegenden Berichts – zusammen mit zusätzlichen und im ursprünglichen Projektplan nicht vorgesehenen Konsultationen potenzieller zukünftiger Fahrzeugkunden – vorgestellt. Insgesamt kann das Ziel als weitgehend erreicht gelten.

9. *Erarbeitung von Erkenntnissen über die gesellschaftliche Akzeptanz und politische Unterstützung der Technologie durch eine zusammenfassende max. fünfseitige Aufbereitung, die aufzeigt, welche Hürden für die Verbreitung der Technologie bestehen*

Das Thema politische Unterstützung wurde regelmäßig in Beiratssitzungen und in bilateralen Gesprächen mit dem Projekt verbundenen Stakeholdern behandelt. Fragestellungen der gesellschaftlichen Akzeptanz wurden im Rahmen verschiedener anderer Untersuchungen der Projektbeteiligten abgedeckt. Wie zahlreiche bestehende Analysen zeigen, kann im Allgemeinen von einer hohen Akzeptanz gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen wie Hylix-B ausgegangen werden. Angesichts der in Beiratssitzungen und Stakeholder-Gesprächen durchaus festgestellten politischen Unterstützung des Projekts kann auf verschiedenen Regierungsebenen eine klare Befürwortung des Projekts bzw. entsprechender Fahrzeugkonzepte wahrgenommen werden. So wird die Notwendigkeit des verstärkten Einsatzes von Brennstoffzellen-Lkw z.B. in der „Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg“ [4] oder der „Wasserstoff- und Brennstoffzellenstrategie für die Region Stuttgart“ [5] sehr deutlich. Akzeptanz- und politikbedingte Hürden sind also nicht zu erwarten.

## 3.3. Gesellschaftliche Transformationsprozesse

Über die bereits aufgezeigte projektbezogene Kommunikationsarbeit hinaus leistete Hylix-B auch einen Beitrag zu gesamtgesellschaftlichen Transformationsprozessen für die Energie- und Verkehrswende in Baden-Württemberg. Im Sinne eines Reallabors wurde das Projekt einerseits einer großen Bandbreite gesellschaftlich wichtiger Akteure vorgestellt und deren Rückmeldungen zu Sinnhaftigkeit und zukünftigen Ausgestaltungsoptionen eingeholt. Andererseits wurden erfolgversprechende Transformationsansätze im Dialog entwickelt.

Mit der Energie- und Verkehrswende hat sich Baden-Württemberg das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung gesetzt, die weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral ist und auf erneuerbaren Energien beruht. Die dahingehende Umgestaltung des Verkehrssektors erfordert den Einsatz vieler Akteure und das Zusammenwirken einer Vielzahl von Bereichen, da letztendlich nur von einem weitgehenden gesellschaftlichen Konsens getragene Innovationen marktfähig sind.

Das Projekt Hylix-B betrachtete daher das aufzubauende Fahrzeug mit Blick auf die Energie- und Verkehrswende als Teil eines gesamtgesellschaftlichen Transformationsprozesses. Dafür wurde eine Vielzahl von für die Entwicklung und den Betrieb eines Brennstoffzellen-Lkw relevanten Akteuren in das Projekt einbezogen. Dies waren im Wesentlichen Akteure, die an Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen technologischen Entwicklungen, Geschäftsmodellen, Politikmaßnahmen, sowie Konsumenten- und Bürgerverhalten beteiligt sind.

Im Dialog mit gesellschaftlichen Akteuren (transdisziplinärer Diskurs) wurden wirksame Transformationsansätze – vor dem Hintergrund der Brennstoffzellentechnologie - diskutiert und entwickelt. Der kontinuierliche Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis war ein zentrales Anliegen und Kennzeichen von Hylix-B. Der bereits angesprochene und unten detaillierter behandelte Projektbeirat spielte dabei eine wesentliche Rolle. Aber auch darüber hinaus wurde stetig der Dialog zwischen Projektteam und externen Akteuren gesucht, um die vorliegenden Konzepte zu reflektieren und weiterzuentwickeln. Die Dialogveranstaltungen wurden vor Ort bei EFA-S durchgeführt und mit einer Vorstellung des im Aufbau befindlichen Lkw verbunden. Unter anderen fanden Dialoge mit den folgenden Akteuren statt:

- Umweltminister von Baden-Württemberg.
- Verkehrsminister von Baden-Württemberg.
- Jugendinitiative der Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Baden-Württemberg.
- Viele Lokalpolitiker und Vertreter der Zivilgesellschaft.
- Zulieferfirmen aus Baden-Württemberg.
- Nutzer und Abnehmer von Lkw unterschiedlicher Klassen.
- „Crossing boarders“.
- „Fridays for Future“.

Bei den Vor-Ort-Diskursen standen die folgenden, für die Generierung von robustem Transformationswissen besonders wichtigen Anliegen im Vordergrund:

- Erlangung eines tieferen Verständnisses des komplexen Energiesystems mit Blick auf Brennstoffzellen-Lkw und den damit verbundenen Bereichen wie Industrie, Mobilität und Konsum.
- Aufzeigen von Handlungsansätzen zur Integration der verschiedenen Komponenten des zukünftigen Wasserstoffverkehrssystems unter Berücksichtigung energiepolitischer Ziele und Randbedingungen.
- Abschätzung der Auswirkungen der Verkehrswendemaßnahmen im Bereich Brennstoffzellen-Lkw auf das Energiesystem und damit verbundene Bereiche.
- Intensivierung des Austauschs zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen, Projektbeteiligten und Wissenschaftler\*innen.
- Stärkung der Vernetzung von Beiratsmitgliedern und Projektbeteiligten (Unternehmen, Hochschule), sowie Erarbeitung von Optionen der wechselseitigen Unterstützung.

- Schaffung erster Impulse für ein mögliches Folgeprojekt.

Als Resultat wurde konkretes Feedback zur Weiterentwicklung des Fahrzeugs und des Projekts generiert, sowie Hylix-B im Kontext gesamtgesellschaftlicher Transformationsprozesse verortet. Über das Vorhaben hinaus wurden Erkenntnisse zum Einsatz von Brennstoffzellen-Lkw und Wasserstoffinfrastrukturen im größeren Maßstab in Baden-Württemberg gewonnen. Jenseits technologischer Aspekte wurden vielversprechende Dialogmuster und Transformationsansätze zur Flankierung der Energie- und Verkehrswende im Bereich Brennstoffzellen-Lkw geschaffen.

Aufgrund des großen Interesses einer Vielzahl an Akteuren gingen diverse Anfragen hinsichtlich der Präsentation des Fahrzeugs auf internationalen Messen und Konferenzen während und nach der offiziellen Projektlaufzeit ein. Im Ergebnis wurde der Lkw Hylix-B auf der Messe „i-Mobility“ in Stuttgart im April 2022 ausgestellt (siehe Abbildung 11) und dem Verkehrsminister des Landes Baden-Württemberg gegenüber erläutert. Zum Zeitpunkt der Einreichung des vorliegenden Berichts ist die Ausstellung auf der „Hannover Messe“ Ende Mai / Anfang Juni 2022, sowie auf zwei Veranstaltungen in Esslingen im Rahmen der „Woche des Wasserstoffs Süd 2022“ im Juni und Juli 2022 geplant. Bei diesen Anlässen und auf diversen davon unabhängigen Konferenzen wurde und wird das Projekt Hylix-B durch Vorträge präsentiert.

## 4. Projektpartner und deren Zusammenarbeit

Das Projekt Hylux-B wurde vom Land Baden-Württemberg, vertreten durch das „Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft“ gefördert. Der „Projektträger Karlsruhe“ (PTKA) betreute das Vorhaben im Auftrag des Ministeriums inhaltlich. Beide Stellen unterstützten das Projekt kontinuierlich mit Ratschlag und Rückmeldung zu strategischen wie auch operativen Fragen.

Das Vorhaben Hylux-B wurde vom Team des Projektkonsortiums durchgeführt und von externen Partnern begleitet, welche als assoziierte Partner oder Mitglieder eines Projektbeirates wirkten. Projektkonsortium und externe Partner werden nachfolgend vorgestellt.



Abbildung 1: Logos der Projektbeteiligten

Das Projektkonsortium war von mittelständischen Unternehmen geprägt, welche mit einer Hochschule zusammenarbeiteten.

Die Hochschule Esslingen verfügt über umfassende Kompetenzen in Forschung, Lehre und Projektdurchführung in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen und bündelt diese im „Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität“ (INEM). Die Hochschule bietet ein umfassendes diesbezügliches Lehrangebot in Form von Bachelor- und Masterstudiengängen und verfügt über ein eigenes Brennstoffzellenlabor. Zahlreiche Machbarkeitsstudien und Hardware-Projekte gerade im Bereich mobiler Anwendungen wurden in den letzten Jahren durchgeführt. Vertreten über INEM und unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Wörner trat die Hochschule als Hauptantragsteller und Gesamtprojektkoordinator auf.

Die „Elektro-Fahrzeuge Stuttgart GmbH“ (EFA-S) ist ein in Zell unter Aichelberg ansässiger Elektrofahrzeugbauer, welcher erfolgreich die Umrüstung und den Neubau batteriebetriebener Nutzfahrzeuge betreibt und sich für brennstoffzellenelektrische NFZ qualifiziert. EFA-S war hauptsächlich für den Aufbau bzw. die Integration des Fahrzeuges Hylux-B zuständig.

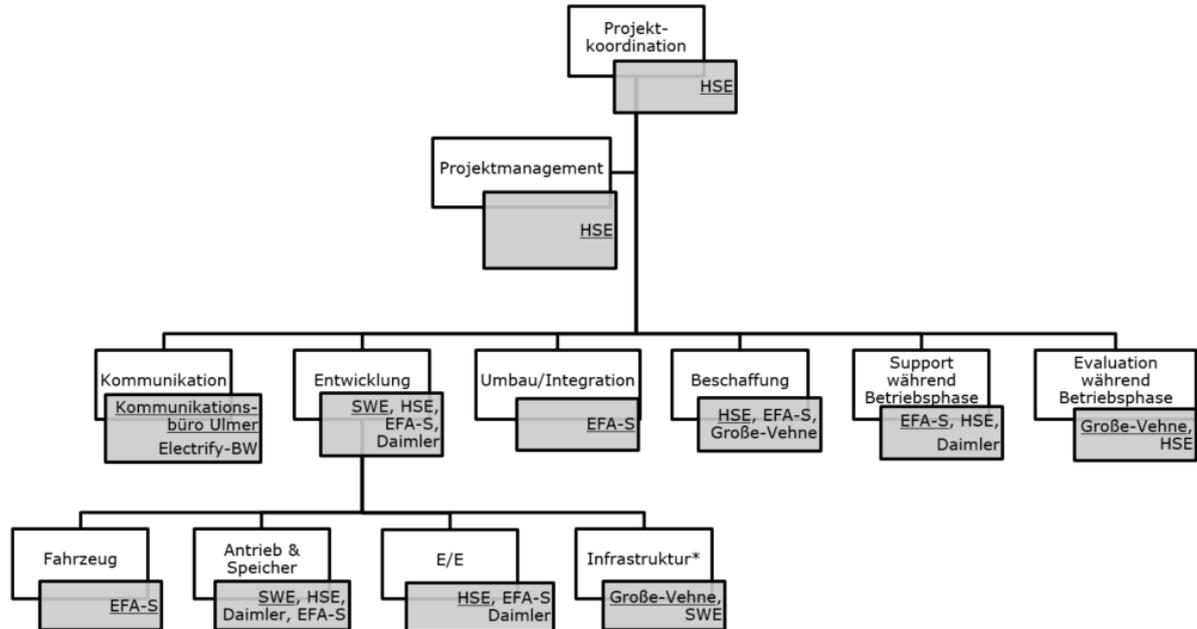
Die Stuttgarter Firma „SWE-Mobility UG“ verfügt über langjährige Expertise zu Brennstoffzellennutzfahrzeugen und wirkte maßgeblich bei der Fahrzeugentwicklung mit.

Die gleichfalls in Stuttgart angesiedelte „Kommunikationsbüro Ulmer GmbH“ war für die Gestaltung der Arbeiten im Rahmen des Reallabors zuständig, zu welchen u.a. die Steuerung des Projektbeirates, sowie die externe Projektkommunikation zählte.

Als größter südwestdeutscher Anwenderverein im Bereich der Elektromobilität unterstützte „Electrify-BW e.V.“ die Reallaborkommunikation.

Die auch im Großraum Stuttgart aktive „Große-Vehne Speditions GmbH“ war als Fahrzeugnutzer vorgesehen und im Projektverlauf eng in die Definition von Nutzungsanforderungen und Einsatzplanungen eingebunden.

Das nachfolgende Organigramm stellt das Zusammenwirken des engeren Kreises der Projektbeteiligten dar. Die projektinterne Kommunikation erfolgte über regelmäßige Projektsitzungen sowohl im Gesamtprojekt, als auch in den einzelnen Teilprojekten, sowie mit maßgeblichen Zulieferern bzw. Organisationen. Der Projektfortschritt wurde auch gegenüber dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und dem PTKA, sowie den bereits erwähnten externen Partnern, im Rahmen von Meilensteintreffen regelmäßig kommuniziert.



\*Ohne Budgetzuweisung des Projekts  
Unterstrichen ist Leitung des Teilpakets

Abbildung 2: Organigramm des Projekts Hylix-B

Als externe Partner sind zunächst einige assoziierte, oben per Logo vorgestellte Firmen zu nennen, die technischen Ratschlag beisteuerten bzw. als Lieferanten von Baugruppen zur erfolgreichen Entwicklung des Fahrzeugkonzepts beitrugen. Hier ist speziell die Firma „Daimler“ (bzw. heute „Daimler Truck“) zu nennen, auf deren Fahrzeug „Actros“ das Projekt aufbaute und die als wesentliche Schnittstelle ein Steuergerät (genannt „Gateway“) mitentwickelte und bereitstellte, welches hinsichtlich der Integration des Brennstoffzellensystems und des elektrischen Antriebsstrangs essentiell für das Projekt war. Das Gateway erlaubt die Anbindung des von EFA-S bereitgestellten Antriebs an die Systemarchitektur des Basisfahrzeuges.

Auch verschiedene Mercedes-Benz-Niederlassungen unterstützten Hylix-B engagiert: So versorgte das Autohaus „Lorinser GmbH & Co. KG“ das Projekt mit Originalteilen von Daimler. Die „BusWorld Esslingen Autohaus Karl Russ GmbH & Co. KG“ leistete wichtigen Ratschlag und Praxisunterstützung hinsichtlich der Handhabung von Wasserstoff im Fahrzeug. Die Mercedes-Benz-Niederlassung Stuttgart-Hallschlag trug bedeutsame Auskünfte zu speziellen Nutzfahrzeug-Themen bei. Auch bei Zulieferern und Entwicklungsdienstleistern war stets Interesse und Hilfsbereitschaft gegenüber Hylix-B zu erkennen, ohne welche das Projekt schwerlich hätte umgesetzt werden können. Die Einbindung auch dieser dem Vorhaben verbundenen Akteure erforderte eine regelmäßige Abstimmung mit allen Beteiligten.

Von großer Bedeutung war auch der im Abstand von etwa sechs Monaten tagende Projektbeirat, welcher sich aus Vertretern von Landespolitik und Wirtschaft sowie anderen wichtigen Stakeholder-Gruppen zusammensetzte. Dazu zählten sowohl Experten aus den Bereichen Fahrzeugbau und Elektrofahrzeugumrüstung wie auch OEM-Vertreter, Anbieter von Tankstelleninfrastruktur, Spediteure und Presse. Das Gremium diskutierte die Projektentwicklung ebenso kritisch wie konstruktiv und steuerte wertvollen Ratschlag bei. Vielerlei Hinweise z.B. zu Fahrzeugbau und Zulassung, Nutzergruppen und Öffentlichkeitsarbeit trugen zum Projekterfolg bei.

Der Beirat brachte sowohl technische Hinweise wie auch strategische Anmerkungen zur Bedeutung der Technologie für Baden-Württemberg ein. Die Kommentare galten beispielweise der Abgrenzung von Hylix-B gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen mittels Nutzung einer zusätzlichen Tankflasche und der resultierenden höheren Reichweite, bidirektionales Laden, intelligentes Schnittstellenmanagement, Total-Cost-of-Ownership-Analysen, Ausrichtung auf geringere Wartungskosten entsprechend der Lebenszyklen des Brennstoffzellensystems, sowie Berücksichtigung von Infrastrukturkosten in den TCO. Der Beirat äußerte, dass zukünftige Synergien zwischen der Gas-Wirtschaft und der Automobilwirtschaft absehbar seien, es aber noch einer intensiven Entwicklung der Wasserstoffversorgung und kontinuierlicher Abnahmeszenarien bedürfe.

Das letzte der drei abgehaltenen Beiratstreffen ergab folgenden Ausblick: Der Beirat sah die zukünftige Funktion des Hylix-B-Fahrzeugkonzepts vor allem in der Ergänzung der Fahrzeugangebote großer Hersteller, welche sich tendenziell auf Standardanwendungen konzentrieren. Gerade im Bereich von Sonderfahrzeugen könne das Hylix-B-Konzept punkten. Vor allem der Markt für die Umrüstung von Bestandsfahrzeugen könne gut bedient werden. Zusätzlich besteht ein Interesse von Logistikdienstleistern und Logistiknutzern, Erfahrungen auch mit Fahrzeugen des Konzepts Hylix-B zu sammeln. Der Markt fragt verstärkt lokal emissionsfreie Fahrzeuge nach und eröffnet wachsende Chancen für das Technologiekonzept Hylix-B. Dabei sollte ein Fokus auf der Harmonisierung von Standards liegen, so dass in der 40-Tonnen-Klasse zukünftig eine Kompatibilität

etablierter Standards wie z.B. „7,45m-Wechselbrücke“ oder „13,60m-Sattelaufliefer“ auch mit aus Hylix-B abgeleiteten Brennstoffzellenfahrzeugen gegeben ist.

Da das Projekt keinen Aufbau einer eigenen Betankungsinfrastruktur beinhaltete, war Hylix-B auf externe Tankanlagen angewiesen. Die verfügbare 350-bar-Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur ist jedoch rudimentär und beschränkt sich regional auf eine Anlage am Flughafen Stuttgart, welche zu Projektbeginn nur zum Betanken älterer Brennstoffzellenbusse geeignet war. Daher wurde seitens des Projektes eigens ein Dialogformat namens „Tankgipfel“ eingerichtet, unter welchem die in Deutschland wesentlichen Akteure im Bereich Wasserstoff-Tankinfrastruktur zusammengebracht wurden. Ziel war es, schnell eine Antwort auf die Frage zu finden, wie moderne Wasserstofftanks mit Kunststoff-Liner, sogenannte „Typ-IV“-Tanks, mit einem Fassungsvermögen von bis zu 50 kg Wasserstoff sicher und effektiv – möglichst auf Basis der bestehenden Tankstelleninfrastruktur - betankt werden können.

Im Austausch mit „H2 Mobility“ und anderen zentralen Akteuren wurde darauf hingewirkt, eine Kompatibilität von Projektfahrzeug und der Tankstelle am Flughafen Stuttgart zu erreichen und somit die Betankung des 26-Tonnners zu ermöglichen. Als Nebenprodukt ergaben sich auch für andere Stakeholder hochrelevante Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Fahrzeugen und Infrastruktur, die angesichts industrieweit fehlender Standards einen wichtigen Beitrag zur unerlässlichen Findung entsprechender Einigungen liefern können. Überdies wird die zwischenzeitlich gemäß den Verhandlungsergebnissen ertüchtigte Tankstelle auch für Testfahrten von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen der Firma Daimler genutzt und trägt somit positiv zur allgemeinen Technologieentwicklung bei. Hier leistete Hylix-B über die ursprünglichen Projektziele hinaus einen Beitrag zu politisch gewünschten Transformationsprozessen der heimischen Automobilindustrie.

## 5. Arbeits- und Zeitplan

Das Vorhaben Hylix-B wurde im Zeitraum November 2019 bis Dezember 2021 und mithin innerhalb des mit dem Fördermittelgeber vereinbarten Zeitrahmens umgesetzt. Wie der nachfolgende Arbeits- und Zeitplan zeigt, konnten die meisten der Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen und die entsprechenden Meilensteine passiert werden. Insbesondere konnte der mechanische Aufbau des Fahrzeugs vollendet und die statische Zulassung in weiten Teilen erfolgreich absolviert werden. Der Lkw ist mit batterieelektrischem Antrieb funktionsfähig und wurde bereits auf dem Werksgelände der Hersteller EFA-S gefahren und erprobt.

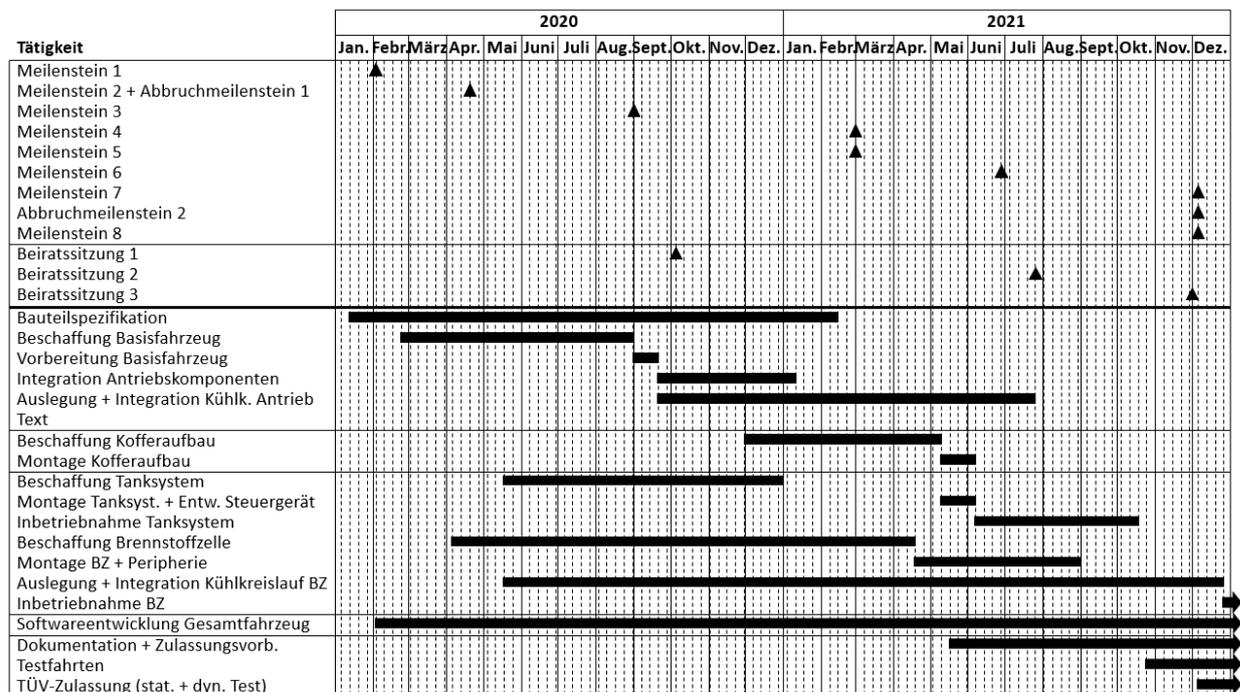


Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Projekts Hylix-B

Allerdings konnten nicht alle geplanten Arbeiten bis zum Projektende am 31.12.2021 abgeschlossen werden. Der zeitliche Verzug und eine daraus resultierende finanzielle Unterdeckung des von vornherein sehr ehrgeizig konzipierten Projekts ist im Wesentlichen auf die anhaltende Corona-Pandemie zurückzuführen, welche die gesamte Wirtschaft betraf und zu substantiellen Verzögerungen in internationalen und nationalen Lieferketten führte. Für den vollständigen Abschluss aller geplanter Arbeiten wäre zusätzliche Bearbeitungszeit, sowie die Bereitstellung weiterer finanzieller und personeller Ressourcen erforderlich.

Das Projektteam stellte sich entschlossen gegen die Umstände und konnte sich in vielerlei Hinsicht erfolgreich behaupten. Beispielsweise wurde früh im Projektverlauf festgestellt, dass Softwarepakete, welche Tankprotokoll und Fahrzeugsteuerung bedienen, am Markt nicht verfügbar sind. Als einzig gangbare Lösung erwies sich die Eigenentwicklung von Software durch die Hochschule,

welche unmittelbar aufgenommen wurde und bei Projektende einen weit fortgeschrittenen Entwicklungsstand erreichte. Zusätzlich wurde im Bereich der Software entgegen der Annahme eines reinen Gateways zum Fahrzeug auch die Implementierung logischer Funktionen in Richtung des Basisfahrzeuges notwendig. Erreicht hat das Hochschulteam einen skalierfähigen Softwarestand, der schon jetzt ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal des Projektfahrzeuges darstellt.

## 6. Fahrzeugtechnik

Die technischen Ziele, Arbeitsschritte und Ergebnisse des Projekts Hylix-B wurden ebenso wie die pandemiebedingten Verzögerungen bereits vorgestellt. Andere Herausforderungen ergaben sich durch die schiere technische Komplexität des ambitionierten Vorhabens. Nachfolgend werden exemplarisch vier zentrale technische Aspekte vertiefend diskutiert. (1) Die Darstellung der Fahrzeugarchitektur ermöglicht ein genaueres Verständnis von Aufbau sowie Funktionsweise des Lkw und wird einführend in der unten eingefügten Abbildung geleistet. Die darauffolgenden, detaillierten Ausführungen verdeutlichen, wie die Umrüstung eines konventionellen Lkw zu einem Brennstoffzellenfahrzeug gestaltet und damit die zentrale Zielsetzung des Projekts erfolgreich erreicht wurde. (2) Aspekte der Sicherheit, Zulassung und des Fahrbetriebs Hylix-B werden daraufhin erörtert und vertiefen die Einsicht in die Fortschritte der Arbeiten für das teilweise erreichte Projektziel Erhalt einer Straßenzulassung. (3) Mit Blick auf eine erstrebenswerte spätere kommerzielle Nutzung des Fahrzeugkonzepts Hylix-B werden Projekterfahrungen aus der Prototypenmontage reflektiert und Überlegungen zur Kleinserienfertigung angestellt. (4) Da jeglicher kommerzielle Fahrzeugeinsatz ein flankierendes Service- und Wartungsangebot verlangt, werden entsprechende Ergebnisse und Optionen vorgestellt. (5) Abschließend wird das Benutzerhandbuch präsentiert.

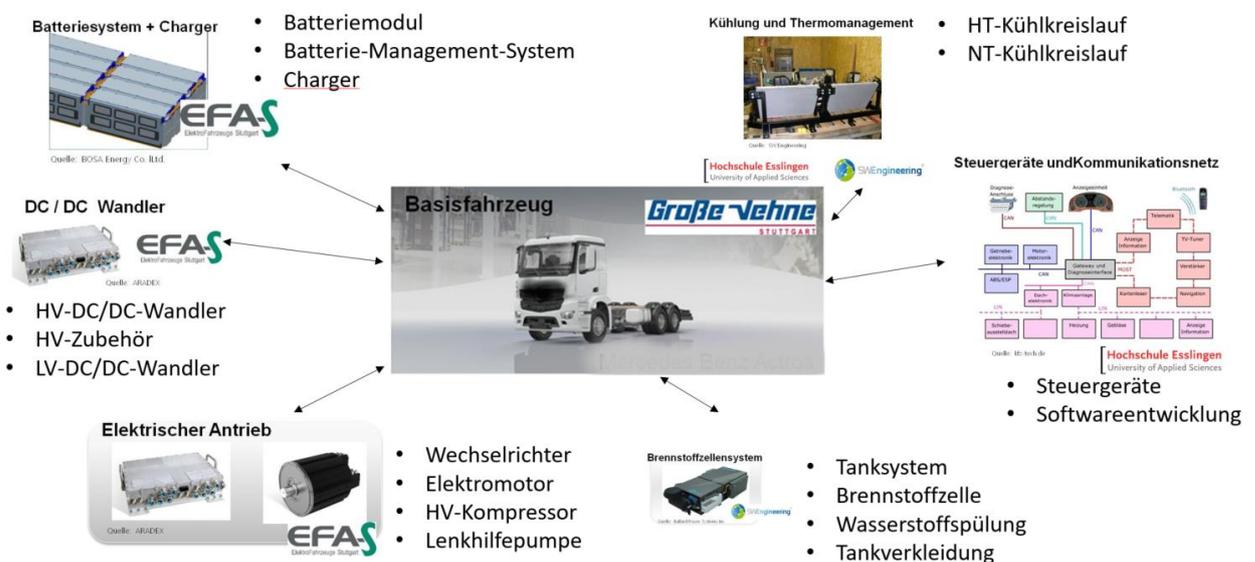


Abbildung 4: Batterie und Elektromotor im Chassis während der Fahrzeugmontage

### 6.1. Fahrzeugarchitektur

Als Basisfahrzeug für den Aufbau des brennstoffzellenelektrischen Lkw Hylix-B wurde ein dieselbetriebener "Mercedes Benz Actros" der neuesten Generation mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 26 Tonnen erworben. Der Diesel-Antriebsstrang wurde von EFA-S entfernt und durch

eine batterieelektrische Antriebsarchitektur ersetzt. Zur Umsetzung wurden Lithium-Eisenphosphat-Batteriezellen (LFP-Batterien) genutzt. Diese zeichnen sich durch eine besonders große Sicherheit hinsichtlich Beschädigung und Selbstentzündung aus. Die Batterie hat eine Kapazität von ungefähr 180 Kilowattstunden und eine nominelle Spannung von etwa 700 Volt. Geladen wird die Batterie im Zusammenspiel mit der Brennstoffzelle oder über einen sog. „Steckerport“, welcher mit einem im Fahrzeug integrierten Ladegerät verbunden ist.

Das Antriebssystem besteht aus einem Elektromotor, der eine maximale Drehzahl von 3500 U/min und bei Spitzenlast fast 4.000 Nm Drehmoment leistet. Der Motor wirkt direkt über die Kardanwelle auf das Differential. Hierzu wird eine, nicht serienmäßig im Basisfahrzeug verbaute Hinterachse mit spezieller Übersetzung aus dem Sonderfahrzeugbau genutzt. Die getriebelose Bauweise des Fahrzeuges stellt besondere Anforderungen an den Motor, welcher mit seiner Drehzahl und seinem Drehmoment sowohl den Anwendungsfall einer Autobahnfahrt mit 80 km/h als auch den Fall des Anfahrens aus dem Stillstand an einer Steigung von 12 % jeweils im voll beladenen Szenario mit 26 Tonnen Fahrzeuggewicht abdecken muss. Angesteuert wird die Elektromaschine von einem Wechselrichter. Im Falle einer Havarie kann der Antriebsstrang elektrisch entkoppelt werden, so dass ein Abschleppen ohne Demontage der Kardanwelle möglich wird.

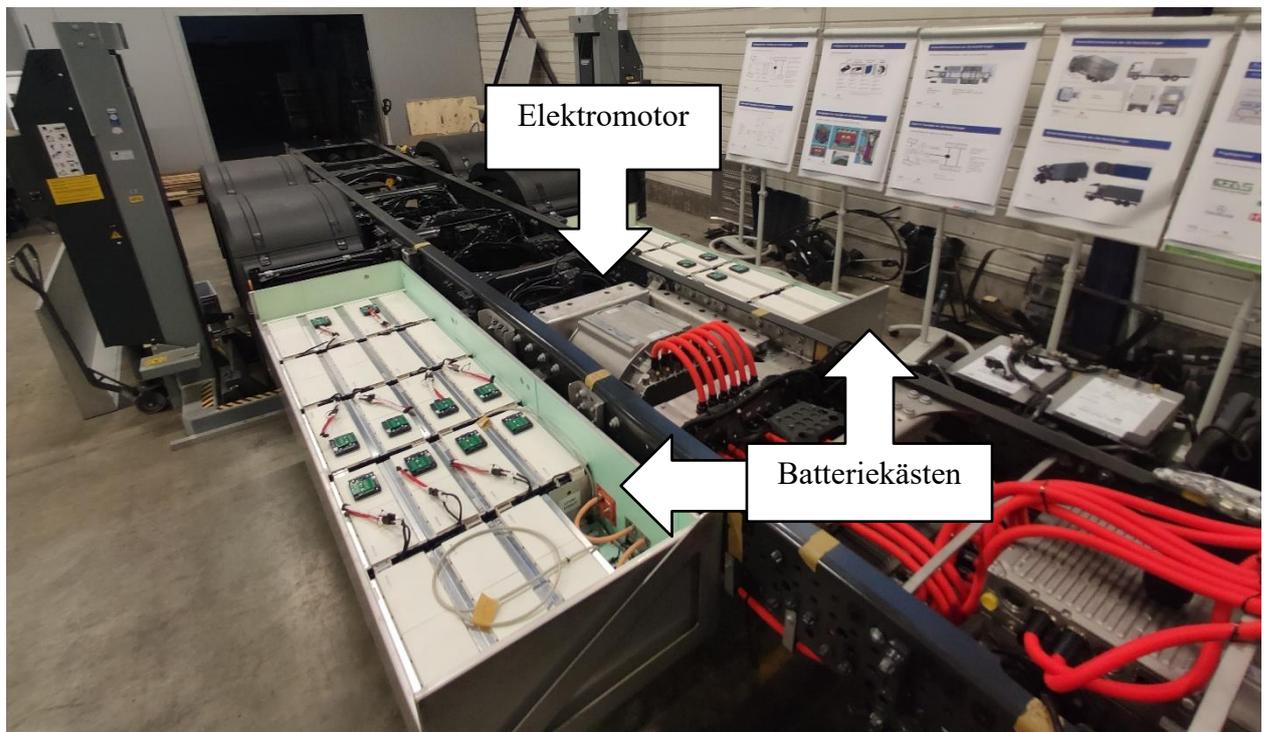


Abbildung 5: Batterie und Elektromotor im Chassis während der Fahrzeugmontage

Das Wasserstoffsystem wurde unter der Leitung von SWE-Mobility gemeinsam mit dem Druckgasflaschen-Experten „Wystrach“ entwickelt. Das Tanksystem besteht aus fünf Wasserstoffflaschen und fasst knapp 41 kg Wasserstoff. Bauraum für eine sechste Flasche wurde vorgehalten und kann bei Bedarf eine Erhöhung des Tankvolumens um acht Kilogramm und damit höhere



Abbildung 6: Nicht montiertes Wasserstofftanksystem des Lkw Hylux-B

Reichweiten ermöglichen. Das Druckniveau beträgt 350 bar und entspricht dem bei Brennstoffzellenbussen üblichen Standard, was die Kompatibilität des projektinternen Technologieansatzes mit benachbarten Entwicklungen und die Erschließung von Synergien erleichtert. Zur Sicherheit wurden Druckprüfungen auf etwa 430 bar vorgenommen. Als Wasserstofftanks werden Typ-IV-Behälter genutzt, welche als die technologisch fortschrittlichsten Behälter gelten und dementsprechend zukunftsweisend sind. Die Tanks zeichnen sich durch ein Kunststoff-Inlay aus, welches gewichtsreduzierend wirkt und eine höhere Fle-

xibilität bietet. Die Tanks dehnen sich bei Betankung um bis zu 1% der Länge aus, eine höhere Flexibilität des Materials erhöht damit die Lebensdauer. Ab Werk ist ein solches Tanksystem mit Helium-Stickstoff-Gemisch betankt, so dass vor der Inbetriebnahme eine Spülung mit reinem Wasserstoff notwendig ist. Dies wurde aufgrund der Notwendigkeit einer explosionsgeschützten Halle bei der Firma BusWorld Esslingen Autohaus Karl Russ mit freundlicher Unterstützung des dortigen Personals durchgeführt; nach etwa 5 Spülvorgängen erreicht die Konzentration an Fremdpartikeln im Wasserstofftank einen ausreichend geringen Wert.



Abbildung 7: Lkw Hylix-B in der Werkstatt der BusWorld Esslingen zur Wasserstoffspülung

Das Tanksystem speist eine von „Ballard Power Systems“ gefertigte Brennstoffzelle der neuesten Generation mit etwa 100 kW elektrischem Leistungsoutput. Die Brennstoffzelle wandelt den Wasserstoff zusammen mit Sauerstoff in elektrischen Strom. Der Sauerstoff wird aus der Umgebungsluft bezogen, welche durch einen speziellen und oben im Tanksystem verbauten Luftfilter gereinigt wird. Wasserstoff und Sauerstoff werden innerhalb des Herzstücks der Brennstoffzelle, dem sogenannten „Stack“, zusammengeführt. Der Stack besteht aus Graphitplatten, zwischen denen jeweils eine Membran zur Absorption der entstehenden elektrischen Ladung montiert ist. Zur Steuerung der Brennstoffzelle bedarf es peripherer Baugruppen der Mess- und Regeltechnik durch Steuergeräte, sowie Anbindungen an den Strom- und Kühlkreislauf. Die in diesem Wandlungsprozess entstehende Abwärme und Feuchtigkeit wird durch eine mit der Firma „Lauer+Weiss“ eigens entwickelte, unter dem Fahrzeug montierte, Abgasanlage abgeführt. Dabei ist ebenfalls die Schalldämpfung zu berücksichtigen, da die Kompressoren eines Brennstoffzellensystems eine hochfrequente Lärmemission entwickeln. Der von der Brennstoffzelle gelieferte Strom lädt die Traktionsbatterie über einen Hochvolt-DC-/DC-Wandler. Das Fahrzeug verfügt somit über eine Range-Extender-



Abbildung 8: Montage der Brennstoffzelle

Das Tanksystem speist eine von „Ballard Power Systems“ gefertigte Brennstoffzelle der neuesten Generation mit etwa 100 kW elektrischem Leistungsoutput. Die Brennstoffzelle wandelt den Wasserstoff zusammen mit Sauerstoff in elektrischen Strom. Der Sauerstoff wird aus der Umgebungsluft bezogen, welche durch einen speziellen und oben im Tanksystem verbauten Luftfilter gereinigt wird. Wasserstoff und Sauerstoff werden innerhalb des Herzstücks der Brennstoffzelle, dem sogenannten „Stack“, zusammengeführt. Der Stack besteht aus Graphitplatten, zwischen denen jeweils eine Membran zur Absorption der entstehenden elektrischen Ladung montiert ist. Zur Steuerung der Brennstoffzelle bedarf es peripherer Baugruppen der Mess- und Regeltechnik durch Steuergeräte, sowie Anbindungen an den Strom- und Kühlkreislauf. Die in diesem Wandlungsprozess entstehende Abwärme und Feuchtigkeit wird durch eine mit der Firma „Lauer+Weiss“ eigens entwickelte, unter dem Fahrzeug montierte, Abgasanlage abgeführt. Dabei ist ebenfalls die Schalldämpfung zu berücksichtigen, da die Kompressoren eines Brennstoffzellensystems eine hochfrequente Lärmemission entwickeln. Der von der Brennstoffzelle gelieferte Strom lädt die Traktionsbatterie über einen Hochvolt-DC-/DC-Wandler. Das Fahrzeug verfügt somit über eine Range-Extender-

Konfiguration, bei welcher die Brennstoffzelle eine möglichst konstante Leistung liefert und die Batterie lädt, welche ihrerseits die Spitzenlasten des Fahrbetriebs und den damit verbundenen Leistungsabruf des Elektromotors bedient. Über zwei Niedervolt-DC-/DC-Wandler werden die herkömmlichen 12-Volt-Batterien des Basisfahrzeugs geladen, deren Beibehaltung eine Pflichtanforderung der Zulassungsbehörde zur Sicherstellung der Grundfunktionen (wie z.B. Warnblinker) auch bei einem Ausfall der 700-Volt-Spannungsebene war.

Zu den wesentlichsten Peripherieelementen gehören die beiden Kühlkreisläufe des Fahrzeugs. Der erste Kreislauf bedient die Brennstoffzelle und greift auf zwei beim Tanksystem verbaute große, seitlich montierte Kühler zurück. Letztere kühlen die Brennstoffzelle mit einer speziellen, aus deionisiertem Wasser und nichtleitendem Brennstoffzellen-Glycol zusammengesetzten Kühlmittermischung. Der zweite Kreislauf reguliert die Temperatur der Antriebs- und Steuerungskomponenten und nutzt die originale Kühlermaske in der Fahrzeugfront in Verbindung mit herkömmlicher Kühlflüssigkeit.



Abbildung 9: Rechte Fahrzeugseite des Lkw Hylix-B ohne Tankverkleidung

Mit dem Entfall des Dieselmotors musste auch die mechanische, über einen Keilrippenriemen bereitgestellte Energie für Nebenaggregate kompensiert werden. Ein Austausch der Servopumpe und des Luftkompressors des Bremssystems gegen elektrische betriebene Komponenten wurde erforderlich und vollzogen. Die neuen Aggregate laufen über die 700-Volt-Spannungsebene und befähigen das originale Daimler Lenk- und Bremssystem.

Die elektronische Steuerung des Antriebssystems erfolgt mittels einer Eigenentwicklung der Firma EFA-S GmbH. Die Basisversion des Antriebsstrangs findet dabei Anwendung in den Fahrzeugen

vom Typ „EFA-S E35“ mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 4,6 Tonnen und dem Typ „P80“ mit einem Gesamtgewicht bis 7,5 Tonnen. EFA-S baut diese leichten und mittelschweren Nutzfahrzeuge bereits in Fließmontage als batterieelektrische Version und kann über zwölf Millionen mit den Fahrzeugen rein elektrisch zurückgelegte Kilometer nachweisen. Dabei ist der Antriebsstrang bereits intensiv und unter Berücksichtigung verschiedener Gewichts- und Einsatzklassen erprobt. Die Fahrzeuge lassen sich individuell und mit verschiedenen Kabinen- und Aufbau- längen und Aufbauarten konfigurieren.



Abbildung 10: Leichtes Nutzfahrzeug vom Typ EFA-S E35

Zur Ertüchtigung für das Hylux-B-Fahrzeug waren allerdings aufwändige Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Die Software für die Gesamtfahrzeugsteuerung wurde und wird von der Hochschule Esslingen entwickelt. Neben der Steuerung des Energiemanagements (Batterie und Brennstoffzelle), des Wasserstoff-Tanksystems und der Sicherheitssysteme war die Anbindung des Daimler-Originalfahrzeuges über ein von Daimler bereitgestelltes Gateway-Steuergerät Teil der Entwicklungseigenleistung.

Insgesamt hat sich die Entwicklung und der Aufbau der Fahrzeugarchitektur als hochgradig komplex und herausfordernd erwiesen. Eine Vielzahl sich gegenseitig bedingender Handlungs- und Entwicklungsfelder musste gleichzeitig bedient werden, deren erfolgreiches Zusammenwirken für einen verlässlichen und sicheren Fahrzeugbetrieb unerlässlich ist. Solcherlei Herausforderungen stellen selbst große Automobilhersteller vor Probleme und fallen angesichts der Pandemie noch stärker ins Gewicht. Daher sind die erzielten Ergebnisse als große Erfolge zu werten.

## 6.2. Sicherheit, Zulassung und Testfahrten

Wie bereits erörtert, konnte eine partielle statische Zulassung des mechanisch fertiggestellten Fahrzeugs erreicht, aber noch keine dynamische Prüfung vollzogen werden. Nachfolgend werden Arbeiten zur Gewährleistung der Sicherheit, zur Zulassung und zur Erprobung des Lkw geschildert.

Die Fahrzeugzulassung beschränkt sich nicht auf die TÜV-Prüfung, sondern beruht auf einer akribischen Sicherheitsprüfung und -dokumentation, welche vielfältige Sicherheitsaspekte abdeckt. So wurde eine Risikoanalyse in Form einer Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA) durchgeführt, welche detailliert und über alle Fahrzeugsysteme hinweg Fehlermöglichkeiten und deren Auswirkungen untersuchte. Im Ergebnis stand eine Einschätzung der jeweiligen Risikoprioritätszahl, welche dokumentiert, dass die entsprechenden Risiken untersucht und bewertet, sowie zur Risikobeherrschung geeignete Maßnahmen getroffen wurden. Dieses Vorgehen resultierte u.a. in einer achtstufigen Sicherheitssystemarchitektur des Wasserstoffsystems, welche gewährleistet, dass eventuelle Wasserstoffs-Leckagen schnellstmöglich und zuverlässig detektiert werden.

Auch wurde ein Notfallkonzept einschließlich eines sogenannten „E-Stops“ implementiert, welcher bei Betätigung die Ansteuerung des Motor-Wechselrichters deaktiviert. Dadurch werden der Vortrieb unterbrochen und die Fahrzeugsysteme geordnet heruntergefahren, mithin denkbare Not-situationen beendet und Gefahren abgewehrt. Zudem musste die elektromagnetische Verträglichkeit sämtlicher verbauter Komponenten nachgewiesen werden, um wechselseitige elektrische oder elektromagnetische Störungen der verschiedenen Fahrzeugsysteme auszuschließen. Daher wurden entsprechende Zertifizierungen im Zuge aller Beschaffungsvorgänge verlangt und gegenüber den konsultierten TÜV-Prüfern nachgewiesen.

Gemeinsam mit dem TÜV Süd wurden auch die Testprozeduren ausgearbeitet, auf Basis welcher die Zulassung erfolgen sollte bzw. teilweise bereits erreicht wurde. Dabei wurde eine Trennung in statische und dynamische Prüfungen vorgenommen. Die im Dezember 2021 durchlaufene statische Abnahme umfasste u.a. eine Sichtprüfung des Gesamtfahrzeuges, Prüfung der Innenraumheizung und Warnsysteme, Begutachtung des Bremssystems und der Fahrzeugelektronik, sowie eine Prüfung des Wasserstoffspeichersystems inklusive einer Dichtheitsprüfung. Da dynamische Tests nicht in den Wintermonaten durchgeführt werden können, wurde deren Verschiebung auf das Frühjahr 2022 beschlossen. Geplant wurden Fahrversuche, die sich auf das Brems- und Reku-perationssystem, das Lenksystem, die erzielbare Höchstgeschwindigkeit, sowie die Geräuscentwicklung beziehen. Aufgrund des Projektendes zum 31.12.2021 konnten diese Tests jedoch nicht mehr im Rahmen von Hylix-B absolviert werden.

Zusätzlich wurden ausschließlich von den Projektpartnern durchzuführende Tests im Vorfeld der dynamischen Abnahme geplant, dabei jedoch für die Zeit nach dem Jahreswechsel terminiert. Vorgesehen wurde die Ausweitung der bereits oben geschilderten Testfahrten vom Betriebsgelände der Firma EFA-S auf das benachbarte Industriegebiet im zunächst ausschließlich batterieelektrischen Betrieb. Nach einer weiteren Ausweitung der Testfahrten auf nahegelegene Orte und die Autobahn wären Fahrversuche auch im Brennstoffzellenbetrieb notwendig geworden. Insgesamt hat das Fahrzeug zum Projektende die statische Prüfung durchlaufen und in Teilen erfolgreich absolviert. Abschließende Fahrversuche und eine vollständige Zulassung konnten allerdings nicht mehr verwirklicht werden.



Abbildung 11: Lkw Hylix-B auf der Messe „i-Mobility“, Stuttgart, April 2022

### 6.3. Prototypenmontage und Kleinserienfertigung

Die Montage des Prototypen Hylix-B erfolgte in aufwändiger und unzulänglich planbarer Handarbeit, wie sie bei derartigen Projekten prinzipiell unumgänglich ist. Dies resultiert aus dem Umstand, dass eine umfangreiche Planung aller Konstruktionsdetails und Montageschritte aufgrund der wechselnden Prioritäten beim Fahrzeugaufbau nicht möglich ist. In der Praxis werden stattdessen die Umbauarbeiten auf Basis einer Grobplanung mit ständiger Anpassung der Terminschiene an den tatsächlichen Baustand vollzogen. Das bedeutet, dass erst nach Verbau der großen Komponenten die entsprechenden Stromlaufpläne, Verrohrungen, etc. geplant werden können.

Die Komplexität zeigte sich beispielsweise am Wasserstofftanksystem, welches ursprünglich direkt auf das Basisfahrzeug aufgesetzt werden sollte. Erst nach Abschluss von Berechnungen des Aufbauherstellers, welcher den Kofferaufbau konstruierte und dabei eine Verschraubung des Tanksystems vorsehen musste, stellte sich heraus, dass eine direkte Montage aus statischen Gründen nicht möglich war. Das ergab die Notwendigkeit der Installation eines Hilfsrahmens unter dem Kofferaufbau, auf dem das Tanksystem fixiert bzw. verschraubt wurde. Folglich war die Montage des Tanksystems von der letztendlichen Auslegung des Kofferaufbaus abhängig, ohne dass die Notwendigkeit eines Hilfsrahmens hätte vorausgesehen werden können.

Ähnliche Herausforderungen wurden seitens der Brennstoffzelle an das Projektteam gestellt, als nach Bestellung und Grobplanung des Fahrzeuges die Geometrie der Brennstoffzelle seitens des Herstellers Ballard substantiell verändert und somit eine Neuplanung des Vorderwagens notwendig wurde. Dies wirkte sich unmittelbar auf die Montierbarkeit der Anschlüsse und Schläuche aus,

die nun seitlich an der Brennstoffzelle lagen und eine Veränderung der Leitungshalterungen erforderlich machten. Grund war, dass auch die Brennstoffzelle in einem parallelen Strang speziell für die Integration in einen Lkw entwickelt wurde und daher mit konstruktiven Veränderungen jederzeit gerechnet werden musste. Neu war auch die erstmalige Inbetriebnahme des Wasserstoffsystems, bei welchem das ab Werk befüllte Helium-Stickstoff-Gemisch gegen reinen Wasserstoff gespült werden musste. Das Ziel war es, eine für die Brennstoffzelle ungefährliche Konzentration an Helium-Stickstoff zu erzielen, indem fünf Wasserstoff-Tankvorgänge hintereinander gemacht und die Tanks jeweils wieder entleert wurden.

Vor diesem Hintergrund ist es ratsam, einerseits die Erfahrungen der Prototypenmontage weiter zu dokumentieren und mit Blick auf eine mögliche Kleinserienfertigung des einmal vollständig erprobten und zugelassenen Fahrzeugs aufzubereiten. Ziel sollte es sein, ein Baukastensystem für die Umrüstung konventioneller Lkw auf Brennstoffzellenantrieb zu entwickeln, welches durch das Projektkonsortium ebenso wie ggf. lizenzierte andere Anwender genutzt werden kann. Das System sollte Baugruppen und Installationsanweisungen beinhalten und eine gewisse Automatisierbarkeit der Montageprozesse vorsehen.

Ausgehend von einer Kleinserienfertigung wären Wege zu einer Skalierung der Fahrzeugproduktion auf größere Stückzahlen aufzuzeigen, welche z.B. eine schrittweise Reduzierung sprungfixer Fertigungskosten berücksichtigen. Dies entspräche Lern- und Erfahrungskurveneffekten nach Henderson, gemäß welchen bereits bei einer Verdopplung der Stückzahl die Stückkosten um etwa 20 bis 30 Prozent gesenkt werden können. Bereits abgeschlossene Untersuchungen der Projektpartner mit Bezug auf die Skalierung der o.g. 4,6t.-Brennstoffzellennutzfahrzeuge sind vielversprechend und könnten mit Bezug auf Hylux-B-Fahrzeuge weiterentwickelt werden. Daher ist der Abschluss des hier behandelten Vorhabens in einem Folgeprojekt einschließlich der Entwicklungen eines Baukastensystems und Analysen zu Skalierungspfaden anzuraten.

## 6.4. Service und Wartung

Das Projektteam ist sich der Tatsache bewusst, dass jeglicher kommerzieller Einsatz des Hylux-B-Fahrzeugkonzepts unbedingt klarer Service- und Wartungsvorgaben sowie entsprechender Angebote bzw. Infrastrukturen bedarf. Während die technische Betreuung des Prototypen Hylux-B problemlos über die nahe zu den Erprobungsstrecken gelegene Firma EFA-S unter Einbeziehung der anderen Projektpartner erfolgen kann, erfordert bereits der Betrieb einer kleineren Fahrzeugflotte die Schulung von Service- und Wartungspersonal und ggf. die Einrichtung entsprechender Stützpunkte. Vor diesem Hintergrund wurden im Projektverlauf erste Gespräche mit möglichen Servicepartnern geführt, welche sich bereits durch die Wartung anderer Brennstoffzellenfahrzeuge technologisch qualifiziert hatten und ihr Interesse an einer Zusammenarbeit artikulierten. Insbesondere wurde Kontakt zur Firma BusWorld Esslingen Autohaus Karl Russ aufgenommen, welche sich als regionales Kompetenzzentrum für Brennstoffzellenbusse etabliert hat und, wie oben dargestellt, Hylux-B bei Arbeiten am Wasserstoffsystem tatkräftig unterstützte. Die Firma stünde prinzipiell zukünftig als Service- und Wartungspartner zur Verfügung.

Wie schon in der Diskussion von Projektzielen und Zielerreichung dargelegt, wurden vorläufige nutzerfreundliche Wartungs- und Servicekonzepte entwickelt und in Handbüchern dokumentiert, welche naturgemäß auf die besonderen Anforderungen eines Brennstoffzellenfahrzeugs fokussieren. Nachfolgend werden zunächst einige wichtige Wartungsinhalte und –intervalle aufgelistet und anschließend verschiedene Einzelaspekte beispielhaft diskutiert. Dabei beziehen sich die Angaben auf Betriebsstunden des Prototypenfahrzeugs und wären für angestrebte Folgefahrzeuge entsprechend der neuen technischen Auslegung zu überarbeiten.

- Alle 250 Stunden sollte eine Sichtprüfung des Gesamtfahrzeugs erfolgen.
- Alle 1.000 Stunden sollten die Servopumpe und der Bremskompressor gewartet werden.
- Alle 4.000 Stunden sollte eine Dichtheitsprüfung und eine Reinigung des Wasserstoffsystems durchgeführt werden.
- Alle 20.000 Stunden muss eine Revision des Bremskompressors erfolgen.

Eine Grobanalyse des Antriebssystems ergab, dass die Antriebskomponenten nur geringe Wartungserfordernisse stellen.

Gleiches ist jedoch nicht von den Batterien zu erwarten, da diese einer Degradation über den Lebenszyklus unterliegen. Allerdings könnte nur ein Realbetrieb zeigen, ob daraus im Laufe der Fahrzeugnutzungsdauer Probleme im Energiemanagement resultieren könnten, welche wiederum mit verstärkten Wartungserfordernissen einhergehen könnten.

Ebenfalls noch unklar ist das Langzeitverhalten der Brennstoffzelle. Das Projektteam wurde vom Beirat darauf hingewiesen, dass die Lebensdauern von Brennstoffzellen noch verbesserungsbedürftig sind. Hintergrund ist, dass die Brennstoffzelle als kostspieliges Bauteil während des Lebenszyklus eines Nutzfahrzeugs möglichst nicht ausgetauscht werden sollte, um die TCO-Kosten zu begrenzen. Es gilt daher im Praxiseinsatz herauszufinden, welche Lebensdauer die verbaute Brennstoffzelle bietet und welche Wartungs- oder Ersatzanforderungen damit einhergehen. Hieraus wären Schlussfolgerungen zu den TCO und der Technologieakzeptanz verschiedener Nutzergruppen zu generieren.

Zu beachten ist auch, dass Brennstoffzellenfahrzeuge neue Anforderungen an die Werkstätten gemäß der Vorschriften DGUV 209-072 und DGUV 200-005 stellen. Neben speziellen Anforderungen an die Wasserstoff- und Hochvoltssysteme handhabenden Arbeitskräfte sind hier auch umsetzungsbedürftige gebäudebauliche Maßnahmen zu nennen. Letztere schließen eine Gefährdungsbeurteilung von Werkstatt und Fahrzeugen ebenso wie eine Einteilung der Halle in explosionsgefährdete Zonen ein. Gleichzeitig müssen Fahrzeuge einen Schutz vor elektrischer Aufladung erhalten und die Werkstatt mit einem Schutzsystem für Problemlagen ausgestattet sein. Dazu zählen Wasserstoffsensoren, die bei Auslösung Dachluken oder Belüftungsanlagen aktivieren und die gesamte Elektrik des Gebäudes abschalten. Generell werden höchste Sicherheitsanforderungen gestellt, die den regelmäßigen Einsatz von Wasserstoffschnüfflern und die präventive Nutzung von Schutzgasatmosphären umfassen.

Im Falle einer Lackierung von Karosserieteilen, welche nicht demontiert werden können, müssen Fahrzeuge bei einigen Lackierverfahren in eine Trockenkabine gestellt werden, in welcher der Lkw mit einer erhöhten Temperatur beaufschlagt wird. Hierbei ist zu beachten, dass bei Brennstoffzellenfahrzeugen im Allgemeinen und dem Hylis-B-Fahrzeug im Speziellen Temperaturen

beim Lackieren bis maximal 85°C nicht überschritten werden dürfen. In einer Trocknungskabine sollten Temperaturen sogar auf 60°C begrenzt werden, um eine Aktivierung der temperaturgesteuerten Notfallablassleitung der Wasserstofftanks (TPRD) zu vermeiden. Die TPRD geht bei 110°C von einem Brandfall aus und veranlasst einen Notablass des Wasserstoffs, welcher einen reparaturbedürftigen Schaden am Fahrzeug und ggf. an der Warmluftkabine verursacht.

Mit der Dokumentation der Service- und Wartungsanforderungen wurden wichtige flankierende Voraussetzungen für den Markthochlauf und kommerziellen Einsatz von Hylix-B-Fahrzeugen geschaffen. Dies setzt allerdings den vollständigen Abschluss aller ursprünglich geplanten Projektarbeiten voraus, wie er tatsächlich bereits heute geplant wird.

## 6.5. Benutzerhandbuch

Neben dem vorläufigen Service- und Wartungskatalog wurde auch ein Benutzerhandbuch auf Basis der Bauteildokumentation erstellt, welches Fahrern praktische Hinweise zur Fahrzeugnutzung an die Hand gibt und nachfolgend vorgestellt wird.

Das Benutzerhandbuch macht den mit Brennstoffzellenantrieben unvertrauten Fahrer zunächst überblicksartig mit dem Aufbau des Gesamtfahrzeugs und dessen Hauptkomponenten bekannt. Dann werden Hinweise zu Sicherheitseinrichtungen, sowie zur Bergung und zum Abschleppen des Lkw im Falle eines Unfalls oder einer Panne gegeben (vgl. Abbildung 12). Zu den antriebs-spezifischen Hochvolt- und Wasserstoffsystemen werden vertiefende sicherheitsbezogene Informationen bereitgestellt. Ausgehend von einer Darstellung der technischen Daten werden die von konventionellen Fahrzeugen abweichenden Hauptelemente des Brennstoffzellenfahrzeugs detaillierter erläutert; gefolgt von Hinweisen zu Gefahren, Fahrzeugwartung und Inbetriebnahme. Abschließend werden Anleitungen zum Fahrbetrieb gegeben, einschließlich der Fahrzeugbetankung mit Wasserstoff, sowie der Beschreibung des antriebsspezifischen Fahrverhaltens in verschiedenen Situationen.



gefördert vom



## HYLIX-B Forschungsfahrzeug Benutzerhandbuch



**Vollelektrisches Nutzfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb für den Einsatz im Einzugsraum Stuttgart (Deutschland)**

### Verbundprojekt:

HYLIX-B - Erprobung eines Brennstoffzellen-LKW als Ausgangspunkt für die Innovationsdiffusion einer skalierbaren Wasserstoffverwendung in Baden-Württemberg

### Förderprogramm:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Trafo BW)



<https://hylix-b.de>



[deckert@hylix-b.de](mailto:deckert@hylix-b.de)  
[ulmer@hylix-b.de](mailto:ulmer@hylix-b.de)



+49 (0)711 259717-25  
+49 (0)711 259717-20

Stand: 03.11.2021

Ersteller: Hendrik Schneider in Anlehnung an Sebastian Enderle

Bei der Konstruktion des Fahrzeugs ebenso wie bei dessen Dokumentation hat Sicherheit oberste Priorität, was nachfolgend am Beispiel des Tanksystems und der Rettungskarte, einer eigenständigen Anlage zum Benutzerhandbuch, veranschaulicht wird.

Im Falle eines Unfalls ist das Tanksystem bis zu einem Crash in Längsrichtung von 10 g abgesichert, was erhebliche Anforderungen an die Konstruktion stellt. Um ein Durchstoßen von Gabelstapler-Gabeln durch die Vorderwand des Kofferaufbaus in die Wasserstofftanks zu vermeiden, ist diese mit 2,5 cm dicken Stahlplatten versehen. Sollte das Fahrzeug dennoch verunfallen, werden Hochvoltkomponenten und Kabel nicht berührt und davon ausgehende Gefahren vermieden.

Zur Information der Rettungskräfte wurde eine Rettungskarte angefertigt, welche umseitig auszugsweise dargestellt wird.

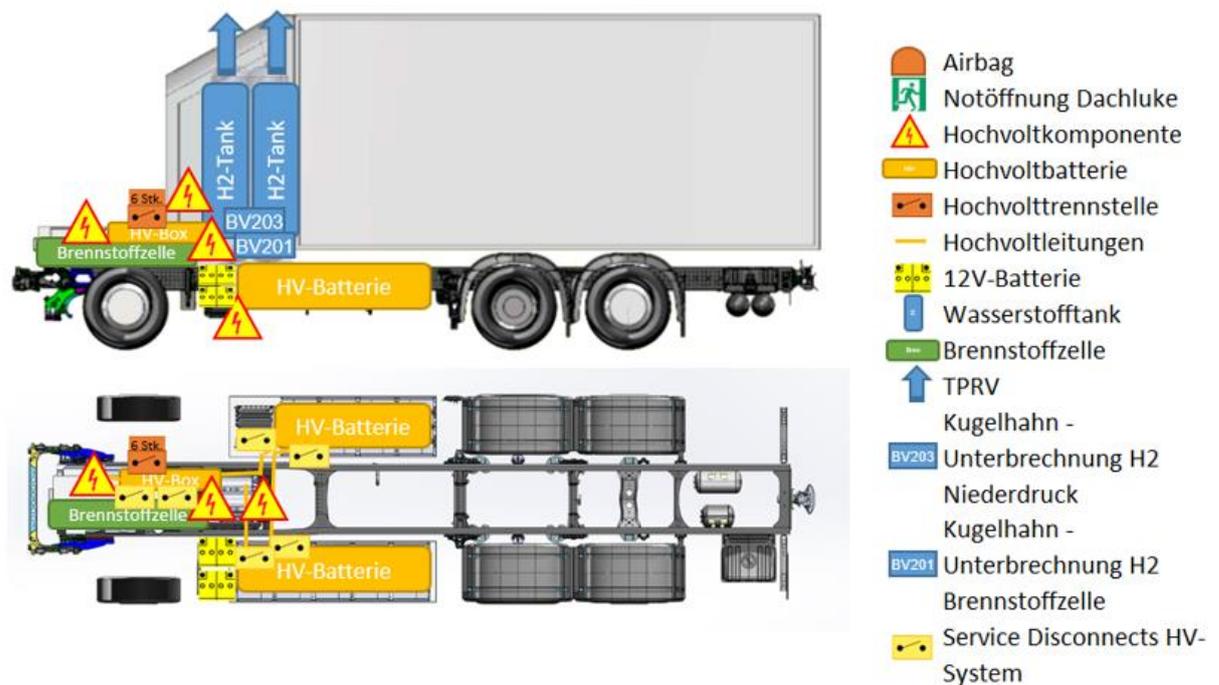


Abbildung 13: Auszug aus der Rettungskarte des Fahrzeuges

Bleibt das Fahrzeug einmal liegen, kann es mit Hilfe einer sogenannten „UVW-Box“, abgeschleppt werden, ohne dass die Kardanwelle gelöst werden muss. Dabei sind die Feststellbremse zu lösen und der Antriebsstrang zu deaktivieren. Das eigentliche Abschleppen verläuft dann, wie bei schweren Nutzfahrzeugen üblich, über eine Hubbrille auf der Vorderachse, während das Fahrzeug auf der Antriebsachse hinterherrollt. Die UVW-Box schließt dabei die Induktion von Spannung in die hinter dem Motor liegende Steuerungs- und Leistungselektronik aus.

## 7. Ökologie, Marktnachfrage und Kostenentwicklung

Nach dem Blick auf die Technik werden nun marktbezogene Faktoren betrachtet, welche wichtige Konditionen einer denkbaren Kommerzialisierung der Hylix-B-Technologie beinhalten. (1) Zunächst wird die ökologische Bedeutung des Fahrzeugsegments beleuchtet, welchem der 26-Tonner angehört. (2) Dann wird ein Excel-Tool präsentiert, welches potenziellen Nutzern einen raschen Überblick zu den Gesamtkostenentwicklungen emissionsfreier Lkw bieten kann. (3) Die Ergebnisse einer Nutzerbefragung erlauben ein vertieftes Verständnis der Fahrzeugbedarfe und tragen zur Kalibrierung von Tool und Methodik bei. (4) Darauf basierend werden ausgewählte Ergebnisse exemplarischer Gesamtkostenanalysen mit Fokus auf die Zeit ab 2024 vorgestellt.

### 7.1. Ökologische Bedeutung der Nutzfahrzeugklasse N3

Mit Blick auf die umweltpolitische Zielsetzung einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist es von besonderer Bedeutung, die Fahrzeugklasse N3 näher zu betrachten, welcher der 26-Tonner Hylix-B angehört. Obwohl der Anteil von N3-Fahrzeugen am Gesamtbestand der Lkw lediglich 14 Prozent beträgt, verursachen diese Fahrzeuge 66 Prozent aller Lkw-Emissionen. Damit können Emissionsreduktionen der N3-Klasse den mit Abstand größten Effekt auf die Gesamtemissionen im Lkw-Segment ausüben. Somit ist eine schnellstmögliche Umstellung auf emissionsfreie Antriebe in der N3-Klasse umweltpolitisch unbedingt geboten. Die nachfolgende Darstellung veranschaulicht diesen Sachverhalt und verdeutlicht das große Umweltschutzpotential von Nullemissionsfahrzeugen des Typs Hylix-B.

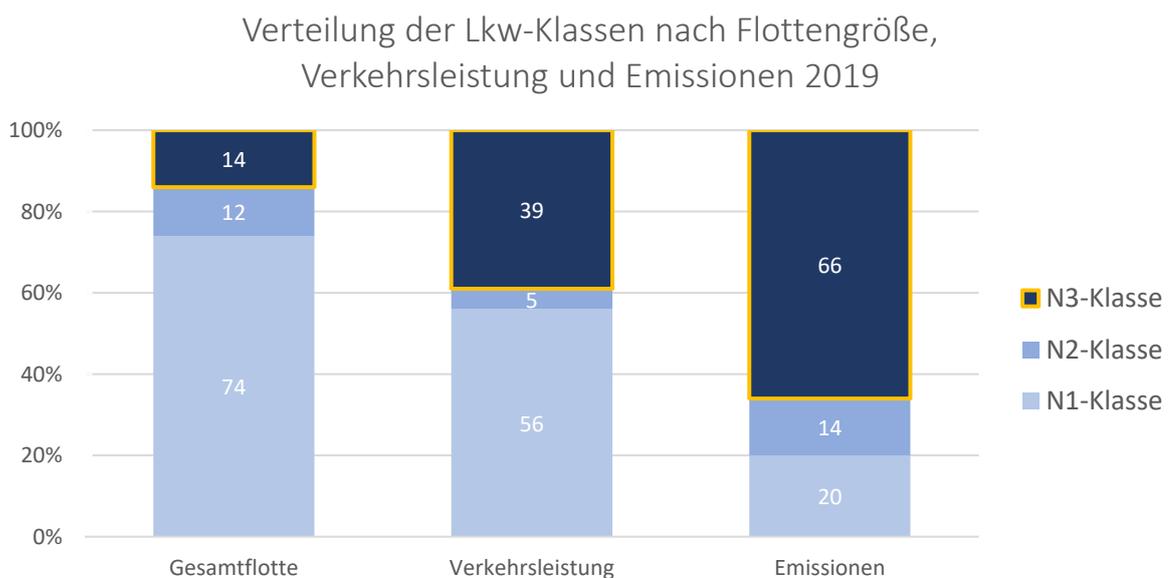


Abbildung 14: Lkw-Klassen, Flottengrößen, Verkehrsleistungen und Emissionen 2019

## 7.2. Kostenkalkulations-Tool und TCO-Methodik

Neben ökologischen Effekten sind auch ökonomische Kriterien von zentraler Bedeutung für die Zukunftsperspektiven und Marktfähigkeit von Fahrzeugen, da Fuhrunternehmer und andere Nutzer nur bei Antreffen wirtschaftlich tragbarer Konditionen zum Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen wie Hylix-B zu bewegen sind. Für Kaufentscheidungen spielen vergleichende Kostenbewertungen verschiedener Technologien eine zentrale Rolle und wurden im Projekt in Form von Total-Cost-of-Ownership-Analysen erhoben und – darüber weit hinausgehend – in ein anwenderfreundliches Tool überführt. Die von der Hochschule durchgeführten Arbeiten wurden nicht aus dem Projektbudget finanziert und zahlen als freiwillige Leistung auf die Zielerfüllung ein. Sie werden nachfolgend mit Fokus auf das Kostenkalkulations-Tool vorgestellt.

Grundlegend ist die Feststellung, dass die Herausforderung einer TCO- bzw. Gesamtkostenkalkulation eines emissionsfreien Lkw in der sehr großen Varianz der Eingangsparameter liegt. Zum einen können verschiedene Werte für die einzelnen Kostenparameter des Lkw in der Zukunft angesetzt werden, zum anderen sind unterschiedliche Szenarien je Industriepartner und deren Anwendungsfall darzustellen. Um diese Varianz der Möglichkeiten abbilden zu können, wurde im Rahmen des Projekts Hylix-B ein universell einstellbares Kalkulationstool entwickelt. Auf Basis einer Excel-Programmierung können nahezu alle Parameter bezüglich der Kosten und des Zeitraums in der Zukunft individuell eingestellt werden. Zum sofortigen Verständnis werden in einem Dashboard direkt die Ergebnisse in verschiedenen Graphen dargestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt das gesamte Dashboard im Überblick. Der obere Teil wurde als Schaltfläche konzipiert, in der die Parameter eingestellt und Eingaben getätigt werden können.

Das Excel-Tool erlaubt zum einen die Prognosevergleichsrechnung emissionsfreier Lkw für den Zeitraum 2020 bis 2050 und damit die Ermittlung der Break-Even-Points für die jeweilige Antriebstechnologie unter den gegebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen im Marktumfeld. Dabei lassen sich brennstoffzellenbetriebene und batterieelektrische Lkw mit konventionellen bzw. synthetisch betriebenen Diesel-Lkw vergleichen. Zum anderen ermöglicht das Excel-Tool einen TCO-Vergleich für Nutzungszeiträume zwischen fünf bis zehn Jahren in einem Anschaffungszeitraum von 2020 bis 2050. Damit lassen sich die TCO des Hylix-B mit den TCO eines Diesel-Lkw in konkreten Anschaffungsszenarien gegenüberstellen.



Abbildung 15: Dashboard Tool zur Kostenkalkulation

|             |                            |  |
|-------------|----------------------------|--|
| <b>FCEV</b> | <b>Ersthergungs-kosten</b> | Investitionskosten<br>Förderung<br><b>Σ Investitionskosten</b> |
|             | <b>Haltungs-kosten</b>     | <b>Σ Wasserstoffkosten</b>                                     |
|             |                            | <b>Versicherungskosten</b>                                     |
|             |                            | <b>Instandhaltungskosten</b>                                   |
|             |                            | <b>Personalkosten</b>  |
|             |                            | <b>Kfz-Steuer</b>  |
|             | <b>Regularien</b>          | <b>Kosten durch CVD</b>  |
|             |                            | <b>Mautkosten</b>  |
|             | <b>TCO/TCM</b>             |  |

Abbildung 16: Kernelemente TCO-Methodik

Die Total-Cost-of-Ownership-Methodik ermöglicht es, die gesamten Kosten eines Produktes über die Lebensdauer zu berechnen: „Bei der Betrachtung der TCO zählen nicht nur die Kosten des ursprünglichen Kaufs, sondern auch die Gesamtkosten des Produkts oder Service über den kompletten Nutzungszeitraum hinweg“ [6]. So ist es möglich, die jährlichen Kosten verschiedener Lkw miteinander zu vergleichen. Die TCO lässt sich in drei Bereiche untergliedern: Zum einen die Ersthergungskosten, die sich aus den Investitionskosten sowie, falls vorhanden der Förderung, zusammensetzen. Zum anderen fließen die Haltungskosten mit ein, die aus den Kraftstoff-, Versicherungs-, Instandhaltungs-, Personalkosten sowie der Kfz-Steuer bestehen. Je nach Antriebsform des Lkw sind zudem die regulatorischen Kosten zu berücksichtigen, hier bestehend aus den Kosten der Clean Vehicle Directive und den Mautkosten.

Die Abbildung oben zeigt einen Ausschnitt der TCO-Kalkulation des brennstoffzellenbetriebenen Hylux-B aus dem Kalkulationstool.

### 7.3. Fahrzeugbedarfe der Industrie

Im Projektverlauf von Hylix-B wurden zahlreiche Gespräche mit Industriefirmen geführt, um entsprechende Bedarfe und Anwendungen für Wasserstoffnutzfahrzeuge zu identifizieren und zusätzlich Lastprofile für die Auslegung des Fahrzeugs Hylix-B zu erstellen. Ziel der Gespräche war es insbesondere, den konkreten Bedarf potenzieller, lokaler Kunden für Hylix-B-Fahrzeuge und daraus abgeleitete Konzepte größerer Tonnage zu ermitteln. Zudem sollten die gewonnenen Informationen dazu beitragen, die im Hintergrund laufenden TCO-Analysen an wahrscheinliche Marktanforderungen und -entwicklungen anzupassen, um so eine wirklichkeitsnähere Modellierung zu ermöglichen. Zu den Gesprächspartnern gehörten die Speditionen „Große-Vehne Spedition GmbH“ und „Grieshaber Logistik GmbH“, das Bauunternehmen „Leonhard-Weiss GmbH & Co. KG“, sowie die Firma „E. Gfrörer & Sohn Schotterwerk GmbH & Co. KG“. Bei allen handelt es sich um familiengeführte, mittelständische Unternehmen aus oder mit großer Niederlassung in Baden-Württemberg.

#### *Große-Vehne Spedition GmbH*

Das mittelständische Familienunternehmen Große-Vehne Spedition GmbH ist ein vielseitiger Logistikdienstleister mit Firmensitz in Kornwestheim [7]. Das Unternehmen ist gleichzeitig Projektpartner von Hylix-B.

#### *Grieshaber Logistik GmbH*

Die Firma Grieshaber Logistik wurde im Jahr 1951 gegründet und bietet mit seinen 700 Mitarbeitern und 14 Logistikzentren ein großes Spektrum von Logistikdienstleistungen an, welches von innerdeutschen Landtransporten über multimodale und globale Projekttransporte bis hin zu Verpackungsdienstleistungen für Übersee-Verpackungen reicht. Neben der Energieversorgung der Lagerzentren ist für Grieshaber Logistik vor allen Dingen die Erneuerung ihrer Lastwagenflotte ein dringendes Anliegen mit Blick auf eine nachhaltige Wertschöpfungskette [8]. Daher haben die Geschäftsführer ihr Interesse an aus Hylix-B abgeleiteten Fahrzeugen größerer Tonnage in einer schriftlichen Absichtserklärung geäußert. Konkret wurden jeweils zwei Sattelzugmaschinen oder Fahrzeuge mit Wechselbrücken-Aufbau ab dem Jahr 2024 und zehn weitere Fahrzeuge ab 2025 angefordert. Die geforderten Tageslaufleistungen betragen 160 bis 400 Kilometer.

#### *E. Gfrörer & Sohn Schotterwerk GmbH & Co. KG*

Die Firma Gfrörer besteht seit dem Jahr 1962 und erwirtschaftet als mittelständisches Familienunternehmen mit 250 Mitarbeitern einen Jahresumsatz von 100 Mio. Euro. Zu den Geschäftsfeldern gehören neben dem Bau von Sport- und Tennisanlagen die Verarbeitung von Betonsplitten, Brechsänden und Gesteinmehlen im Transportbetonwerk, welche im eigenen Schotterwerk abgebaut werden [9]. Gfrörer verfügt über einen Fuhrpark mit ca. 120 schweren Nutzfahrzeugen, welche nahezu ausschließlich der Klasse N3 zuzuordnen sind. Die Fahrzeuge untergliedern sich in zwei Cluster, Sattelzugmaschinen und Kipper, mit jeweils 2-4 Achssystemen und einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 40 Tonnen, bzw. 55 Tonnen bei Sonderfahrzeugen. Dem Fuhrpark gehören zahlreiche Fahrzeuge an, welche durch wasserstoffbetriebene Lkw ersetzt werden könnten. Auch diese Firma muss Laufleistungen von bis zu 500 Kilometern pro Tag abdecken.

### *Leonhard-Weiss GmbH & Co. KG*

Das im Jahr 1900 gegründete Bauunternehmen beschäftigt momentan 5.800 Mitarbeiter [10]. Die drei operativen Geschäftsbereiche sind der Straßen- und Netzbau, der Gleisinfrastrukturbau sowie der Ingenieur- und Schlüsselfertigbau [11]. Neben einer großen Lkw-Flotte zählt eine Vielzahl an Baumaschinen zum Fahrzeugbestand. In mehreren Gesprächen wurde seitens Leonhard-Weiss das Interesse an einer partiellen Umstellung des konventionellen Lkw- und Baumaschinenbestandes auf emissionsfreie Substitute klar geäußert. Die vergleichsweise geringen Lärmemissionen wurden als großer Vorteil emissionsfreier Anwendungen genannt, da das Unternehmen v.a. in lärm-sensitiven städtischen Bereichen tätig ist. Die Problematik einer fehlenden Stromversorgung auf Baustellen schließt elektronisch betriebene Substitute aus. Daher erscheinen brennstoffzellenbetrie-bene Nutzfahrzeuge und Baumaschinen in Kombination mit mobilen Wasserstofftankstellen am besten geeignet, um insbesondere auf Baustellen Emissionen einzusparen. Zudem ist Leonhard-Weiss gewillt, einzelne Nutzfahrzeuge von 12 bis 40 Tonnen Gesamtgewicht durch Brennstoffzellenfahrzeuge zu ersetzen. Die zu erbringende Jahreslaufleistung beträgt ca. 40.000 Kilometer. Die Analyse der Nutzungsprofile wird im regelmäßigen Dialog fortgesetzt.

### *Zwischenfazit*

Die Gespräche mit den verschiedenen Firmen zeigten deutlich, dass ein Interesse an schweren, wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen schon heute besteht. Dies wird insbesondere durch schriftliche Interessensbekundungen einzelner Firmen belegt. Zudem machen die von den Unternehmen geforderten Tageslaufleistungen von Nullemissionsfahrzeugen von bis zu 500 Kilometern den Einsatz von Wasserstoff-Lkw alternativlos, da batteriebetriebene Fahrzeuge entsprechende Anforderungen nicht erfüllen können. Somit konnte das vom Projekt vermutete Marktinteresse an brennstoffzellenbetriebenen 26-Tonnern bestätigt und für Fahrzeuge höherer Tonnage erstmals konkret festgestellt werden. Zudem konnten die gewonnenen Erkenntnisse dazu beitragen, die im Hintergrund laufenden TCO-Analysen realitätsnäher auszugestalten und untermauern.

## 7.4. Ergebnis der TCO-Kalkulationen für Nutzfahrzeuge

Die Simulationsergebnisse der TCO-Analysen für Diesel-Lkw und Brennstoffzellennutzfahrzeuge, unten auch „Fuel Cell Electric Vehicles“ (FCEV) genannt, werden nachfolgend vorgestellt. Dabei werden einerseits TCO-Relationen mit Fokus auf das Jahr 2024 und andererseits kumulierte Kostenentwicklungen für die Jahre 2024 bis 2028 exemplarisch dargelegt.

### *TCO-Entwicklung bis 2040*

Die zukünftige TCO-Entwicklung hängt von verschiedenen, nachfolgend kurz vorgestellten, Parametern ab. Grundlegend für die TCO-Berechnung ist die Jahreslaufleistung der Lkw. Aus den Gesprächen mit den Logistikunternehmen Grieshaber Logistik sowie Große-Vehne Speditions GmbH ging eine typische Jahreslaufleistung von 100.000 Kilometern hervor. Zudem beträgt die Nutzungsdauer der Lkw in der Regel fünf Jahre. Der Anteil mautpflichtiger Straßen liegt im Fernverkehr bei ca. 90 Prozent. Unter Berücksichtigung gesetzlicher und politischer Rahmenbedingungen, des technologischen Fortschritts sowie des steigenden Angebots von grünem Wasserstoff über ein dichter werdendes Infrastrukturnetz, lässt sich ein Verlauf der TCO bis 2040 simulieren.

Die folgende Abbildung 17 stellt den Verlauf der TCO eines Brennstoffzellenfahrzeugs der Klasse N3 im Vergleich zu einem konventionellen Diesel-Lkw derselben Klasse dar. Zudem wird über den gesamten Zeitraum eine 80-prozentige Förderung der Investitionsmehrkosten gegenüber einem konventionellen Referenzfahrzeug angesetzt. Die Förderquoten gehen auf aktuell und mindestens bis 2024 gültige, in Förderangeboten des Bundes für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben hinterlegte, Sätze zurück [12]. Exemplarisch wird unten für das Jahr 2024 das TCO-Delta zwischen Brennstoffzellen- und Diesel-Lkw, dargestellt. Das Delta beträgt 22.462 Euro, absolut belaufen sich die TCO des Brennstoffzellenfahrzeugs auf 200.876 Euro, die des Diesels auf 178.414 Euro. Wie im weiteren Verlauf ersichtlich, sind die TCO des Brennstoffzellenfahrzeugs im Jahr 2027 erstmals niedriger als die des Diesel-Lkw.

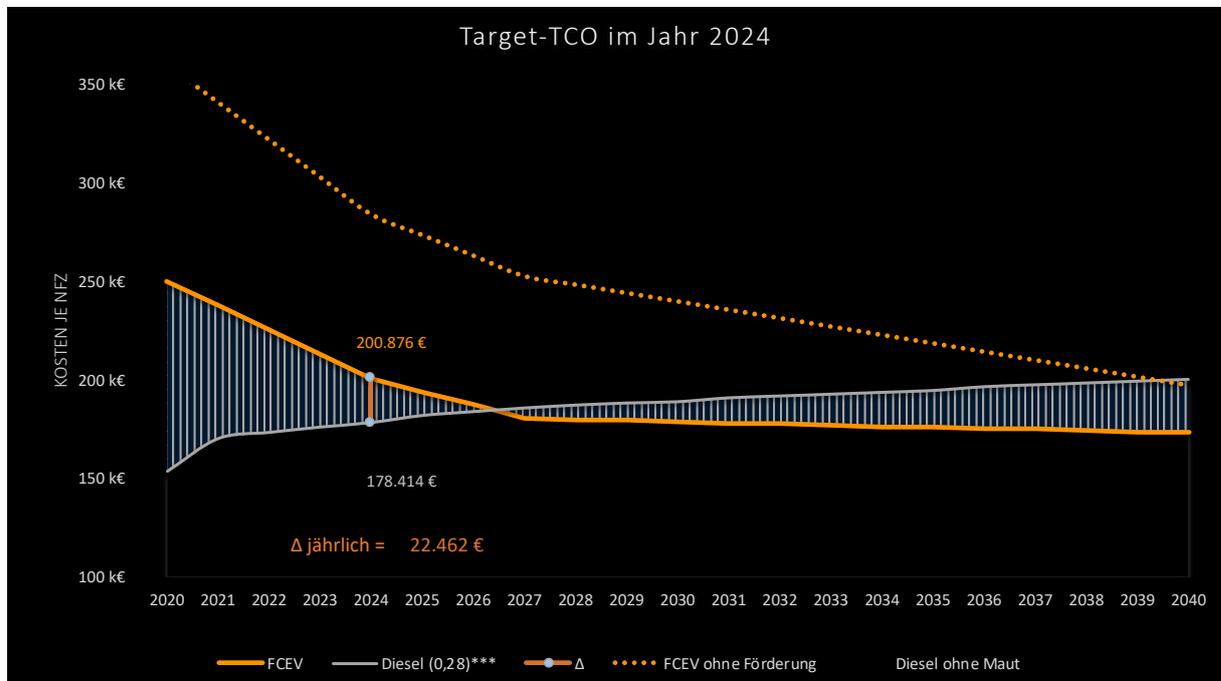
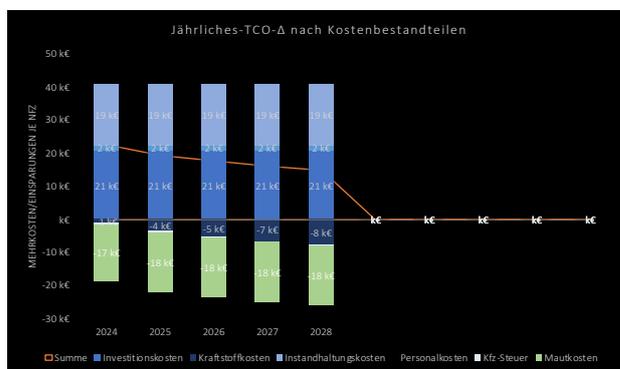


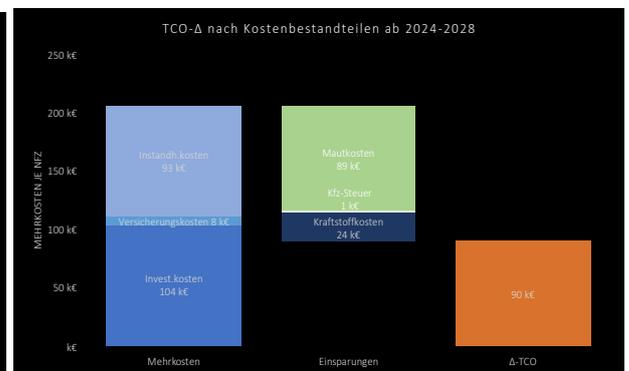
Abbildung 17: TCO Brennstoffzellen- vs. Diesel-Lkw im Zeitverlauf

### Vergleich TCO FCEV und Diesel

Wie zuvor gezeigt, lassen sich im Zuge einer vergleichenden Berechnung der TCO von Brennstoffzellen- und Dieselfahrzeugen sogenannte Delta-TCO-Kosten für einzelne Jahre kalkulieren. Darüber hinaus können TCO-Deltas über mehrere Jahre hinweg berechnet werden und so mehrjährige Vergleiche der Kostenrelationen verschiedener Fahrzeugkonzepte ermöglichen. Oftmals werden Nutzungszeiträume von fünf Jahren ab Anschaffung zugrunde gelegt. Nachfolgend werden die Ergebnisse einer Berechnung dargestellt, welche die Entwicklung des TCO-Deltas zwischen einem diesel- und einem brennstoffzellenbetriebenen 26-Tonner ermittelt, wobei von einer Fahrzeugbeschaffung im Jahr 2024 und einer fünfjährigen Nutzungsdauer ausgegangen wird.



**Abbildung 18:**  
Jährliches-TCO-Delta nach Kostenbestandteilen



**Abbildung 19:**  
TCO-Delta nach Kostenbestandteilen 2024-2028

In Abbildung 18 werden die im Zeitraum 2024 bis 2028 anfallenden TCO-Kosten eines FCEV gegenüber einem Dieselfahrzeug aufgezeigt. Mehrkosten werden oberhalb der x-Achse aufgeführt, Minderkosten unterhalb derselben. Der nach Abzug der Minderkosten verbleibende Mehrkostenbetrag wird anhand der orangenen Linie über der x-Achse ersichtlich.

Bemerkenswert ist dabei, dass die Investitionsmehrkosten über die gesamte Nutzungsdauer hinweg konstant bleiben, da die Investitionskosten linear über die Nutzungsdauer abgeschrieben werden. Infolgedessen bleiben auch die Instandhaltungskosten konstant, da sich diese an den Investitionskosten orientieren. Beide Kostenarten liegen bei FCEVs deutlich höher als bei Dieselfahrzeugen. Anders verhält es sich hingegen mit den Kraftstoff- und Mautkosten. Während die Kraftstoffkosten von Brennstoffzellen-Lkw angesichts sinkender Wasserstoffpreise fallen, verteuert sich Dieselmotorkraftstoff aufgrund der zunehmenden CO<sub>2</sub>-Besteuerung fossiler Energien. Von den Mautgebühren bleibt ein FCEV als emissionsfreies Nutzfahrzeug vorerst vollständig befreit, weshalb Mautkosten lediglich für Diesel-Lkw anfallen.

Summiert man die links aufzeigten TCO-Mehr- und Minderkosten über die gesamte Nutzungsdauer von fünf Jahren, resultieren die in Abbildung 19 dargestellten Kostenblöcke „Mehrkosten“, „Einsparungen“ und „Delta-TCO“. Wie erwähnt, weist ein FCEV deutlich höhere Investitions- und Instandhaltungskosten als ein konventionelles Fahrzeug auf. Dazu kommen im Vergleich zum Diesel-Lkw voraussichtlich höhere Versicherungskosten. Günstiger ist eine FCEV hingegen bei den Kraftstoff- und Mautkosten. Auch die Kfz-Steuer wird den Einsparungen zugeordnet, da emis-

sionsfreie Nutzfahrzeuge hier eine 50-prozentige Befreiung erfahren. Verrechnet man die Mehrkosten und Einsparungen miteinander, ergibt sich der Kostenblock Delta-TCO. In dem hier berechneten Szenario belaufen sich die TCO-Mehrkosten eines brennstoffzellenbetriebenen 26-Tonnern gegenüber einem konventionellen Diesel-Lkw auf 90.000 Euro. Dabei werden ein fünfjähriger Fahrzeugeinsatz ab 2024 und die anderen, oben genannten, Annahmen zugrunde gelegt.

## 8. Verwertungsplan und Ausblick

Das Vorhaben Hylix-B konnte die gesetzten Projektziele weitgehend erreichen und zeigte wertvolle Lernerfahrungen, welche die Basis für die nachfolgenden Ausführungen zu Verwertungsplan und Ausblick bilden. Der mechanisch aufgebaute und mit batterieelektrischem Antrieb fahrfähige Lkw kann sofort als Anschauungsstück für die Ausbildungstätigkeiten des Hauptantragstellers und Projektkoordinators Hochschule Esslingen dienen und steht für den vollständigen Abschluss aller ursprünglich geplanten Arbeiten in einem Anschlussvorhaben, zur Verfügung. Die weit fortgeschrittene Fahrzeugrealisierung stellt ein wertvolles „Asset“ dar, welches nur sehr wenige wissenschaftliche und wirtschaftliche Stakeholder vorweisen können.

Konkret ist geplant, das Fahrzeug Hylix-B in die weitere praxisorientierte Forschungs- und Lehrtätigkeit der Hochschule, vertreten über das Institut INEM und unter Einbeziehung der personell verflochtenen An-Institute „Steinbeis-Transferzentrum Energie- und Mobilitätssysteme“ (STEM) und „Steinbeis-Innovationszentrum energieeffiziente und emissionsfreie Technologien“ (SIEET) maßgeblich einzubinden. Der Lkw soll als Demonstrator einer modernen und zukunftsweisenden Antriebstechnik dienen, die den Studierenden den Aufbau und die Konzeption eines Brennstoffzellenfahrzeuges veranschaulicht. Die Hochschule bietet schon heute ein umfassendes Lehrangebot im Bereich von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien und verfügt über ein eigenes Brennstoffzellenlabor. Zahlreiche Machbarkeitsstudien und Hardware-Projekte insbesondere im Bereich mobiler Anwendungen wurden in den letzten Jahren durchgeführt. Die Arbeiten für Hylix-B wurden nicht nur durch Führungspersonal und Mitarbeiter der Hochschule maßgeblich gestaltet, sondern auch von studentischen Beiträgen und Abschlussarbeiten unterstützt.

Die Hochschule beabsichtigt, ihr sehr umfangreiches und exklusives, im Projektverlauf gewonnenes Wissen in die künftige Forschungs- und Lehrtätigkeit umfangreich einzubinden. Die Wissensvermittlung kann nun auf weit konkreteren Kenntnissen z.B. zur Fahrzeugkonstruktion und -integration, Verfügbarkeit und Kosten von Baugruppen, sowie personellen und zeitlichen Bedarfen als vor Projektbeginn basieren. Dies ist insofern von entscheidender Bedeutung, als dass die im Projektverlauf angetroffenen Herausforderungen großteils keineswegs vorhabensspezifisch waren, sondern prinzipiell alle vergleichbaren Projekte betreffen.

Die im Projekt Hylix-B gewonnenen Erfahrungen kommen Forschung und Lehre zugute, da nur auf Basis von Praxiserfahrung das beim tatsächlichen Aufbau von Brennstoffzellennutzfahrzeugen benötigte Knowhow erworben und an Studierende weitergegeben werden kann. Daher sind die in Hylix-B entwickelten Lösungsansätze von großem und teilweise exklusivem Wert für die von der Hochschule angebotene Ausbildung. Beispielsweise wurde erkannt, dass es einer engeren Verzahnung von Kenntnissen zu Fahrzeugkonstruktion und Softwareentwicklung bedarf, und daraufhin bereits erste Konzepte zur Ausgestaltung eines entsprechenden Studienangebots entwickelt. Generell stellt der klimapolitisch gebotene Strukturwandel der Automobilindustrie das Automobil- und Land Baden-Württemberg vor gewaltige Herausforderungen, denen auch durch die Ausbildung hochqualifizierter Arbeitskräfte im Bereich Brennstoffzellennutzfahrzeuge begegnet werden muss. Hierzu kann die Hochschule Esslingen auf Basis von Hylix-B einen wertvollen Beitrag erbringen, der durch Schaffung eines neuen Ausbildungsschwerpunkts künftige Arbeitskräfte für die erfolgreiche Bewältigung der Transformationsprozesse qualifiziert.

Der Lkw Hylix-B soll insbesondere dazu genutzt werden, die in Vorlesungen vermittelten theoretischen Inhalte, z.B. zu Themen der Wasserstoff-Sicherheit oder der Fahrzeugauslegung, um Erfahrungen im Umgang mit dem Realobjekt zu ergänzen. Beispielsweise kann die Stimmigkeit zuvor im Unterricht erarbeiteter Sicherheitskonzepte oder Fahrzeugauslegungen anhand des als Demonstrator genutzten Fahrzeugs überprüft und optimiert werden. Auch Schulungen und Einweisungen zur Betankung von Wasserstoff-Nutzfahrzeugen können an dem Projektfahrzeug Hylix-B in deutschlandweit einzigartiger Art und Weise erfolgen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die bisherigen Projektpartner, wie die Firma EFA-S, in die Forschungs- und Lehraktivitäten einzubinden und z.B. durch Absolvierung von Seminaren in den firmeneigenen Werkstätten den Praxisbezug weiter zu stärken.

Parallel dazu wird der Abschluss aller ursprünglich für Hylix-B geplanten Arbeiten in einem Folgeprojekt bereits konkret und mit positivem Vorzeichen verhandelt, um die volle Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs und dessen Erprobung im Alltagseinsatz, sowie die vollumfängliche Nutzung für Forschung und Lehre zu gewährleisten. Überdies erlaubt die Fertigstellung des Projektfahrzeugs dessen zeitweilige Überlassung an Dritte zur Praxiserprobung, welche potenziellen Fahrzeugbetreibern einen exklusiven Erfahrungsgewinn ermöglicht. Es hat sich während des Projektverlaufs durch vielfache Rückmeldung gezeigt, dass Spediteure und Bauunternehmer zwar die Beschaffung emissionsarmer bzw. -freier Nutzfahrzeuge anstreben, vor einer Entscheidung zugunsten bestimmter Technologien (batterie- oder brennstoffzellenelektrische Antriebe, Nutzung von LNG-/CNG, etc.) aber dringend der Sammlung von Erfahrungswerten bedürfen. Mithin kann eine zeitweilige Fahrzeugüberlassung den Marktakteuren den Erwerb von unbedingt benötigtem Orientierungswissen ermöglichen.

Auf Basis des Folgeprojekts und nachfolgender technischer Optimierung können weitere Schritte zur Erschließung der im vorliegenden Bericht dargestellten Marktpotenziale für schwere, brennstoffzellenbetriebene Nutzfahrzeuge durch Aufbau einer Kleinserienfertigung und eine ggf. im Anschluss mögliche Ausweitung der Produktion unternommen werden. Mit Hilfe der letztendlich aufzubauenden Flotten von Brennstoffzellen-Lkw könnte auch der Hylix-B ursprünglich zugrundeliegenden Zielsetzung entsprochen werden, die Herstellung und Nutzung von grünem Wasserstoff im großen Maßstab zu stimulieren.

Das Anschlussprojekt sollte die oben geschilderten und alle relevanten Stakeholder betreffenden Problemlagen aufgreifen und im Dialog mit anderen regionalen Akteuren Wege zur gemeinsamen Bewältigung erkunden. Beispielsweise könnten Ansätze zur Kostensenkung und weitere Technologiequalifizierung der Automobilregion in strategischen Partnerschaften entlang der Wertschöpfungskette für Brennstoffzellennutzfahrzeuge entwickelt werden und in konkreten Kooperationen und Lieferbeziehungen beim Aufbau einer Kleinserienfertigung münden. Da Hylix-B von regionalen Akteuren getragen wird und wichtige Baugruppen und Knowhow-Elemente von weiteren baden-württembergischen Akteuren bezieht, liegt eine belastbare Basis für weiterführende Kooperationen bereits vor. Die Zusammenarbeit könnte auch Themen wie verstärkte gemeinsame Nutzung von Betankungsinfrastrukturen und die Erschließung von Skaleneffekten durch Bezug größerer Mengen regional gefertigter Baugruppen wie Brennstoffzelle und Tanksystem beinhalten, und solchermaßen auf die übergeordneten Ziele Technologiequalifizierung und erfolgreiche Bewältigung des Strukturwandels einzahlen. Obgleich die Ambition von Hylix-B weitaus geringer

war, wurden auch in Form des Beirats schon Grundlagen für weiterführende strategische Dialoge und konkrete technologische Kooperationen geschaffen.

Schließlich erlaubt die Fertigstellung des Projektfahrzeuges die Nutzung durch Dritte im Rahmen von Praxiseinsätzen, die den Beteiligten exklusive Erfahrungen mit der Technologie im Betriebsumfeld gewähren. Es hat sich während des Projektverlaufs aufgrund vielfacher Rückmeldung interessierter Spediteure gezeigt, dass Nutzergruppen vor einer Massenentscheidung zwischen verschiedenen Zukunftstechnologien (batterieelektrische LKW, brennstoffzellenelektrische LKW, LNG-/CNG-LKW) stehen, deren Auswirkungen sie jetzt noch nicht umfassend überblicken können. Umso wichtiger ist es, den Marktakteuren Orientierung in einem anwendungsbezogenen Umfeld zu verschaffen. Die Möglichkeiten der Realisierung reichen dabei von der Ausstellung des Fahrzeuges bei unterschiedlichen Anlässen wie Stadtfesten in Esslingen und Göppingen bis hin zu hochschulbezogenen Events wie dem Tag der offenen Tür, Studieninfotagen oder Absolventenverabschiedungen mit Kandelmarsch oder gar der befristeten Überlassung (z.B. Vermietung) an zukunftsinteressierte Speditionen.

## Literaturverzeichnis

- [1] *Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg*. [Online]. Verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Ressourceneffizienz\\_und\\_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf)
- [2] *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile)
- [3] *Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven - Langfassung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201910-abschlussbericht-h2-mobilitaet.pdf>
- [4] *Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg*. [Online]. Verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2\\_Presse\\_und\\_Service/Publikationen/Wirtschaft/Wasserstoff-Roadmap-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Wirtschaft/Wasserstoff-Roadmap-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf)
- [5] *Wasserstoff- und Brennstoffzellenstrategie für die Region Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user\\_upload/PDFs/Aktuelles/2021/publikationen\\_Wasserstoffstrategie\\_Region\\_Stuttgart.pdf](https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2021/publikationen_Wasserstoffstrategie_Region_Stuttgart.pdf)
- [6] *AT Internet, TCO (Total Cost of Ownership) - Definition*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atinternet.com/de/glossar/tco-total-cost-of-ownership/>
- [7] *Große Vehne Speditions GmbH, Unternehmen* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grosse-vehne.de/>
- [8] *Grieshaber Logistik GmbH, Das Unternehmen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grieshaberlog.com/unternehmen/>
- [9] *Gfrörer, Unternehmen* [Online]. Verfügbar unter: <https://bauediezukunft.de/unternehmen.html>
- [10] *Leonhard-Weiss Bauunternehmung* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.leonhard-weiss.de/>
- [11] *Wikipedia, Leonhard Weiss* [online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Leonhard\\_Weiss](https://de.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Weiss)
- [12] *Erster Aufruf zur Antragseinreichung (Teil I) zur Förderung von klimaschonenden Nutzfahrzeugen und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur (8/2021). Richtlinie KsNI*, [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderprogramme/KsNI/1\\_Foerderaufruf\\_KsNI\\_Endfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderprogramme/KsNI/1_Foerderaufruf_KsNI_Endfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

