

Schlussbericht zum Vorhaben:

***Verbundprojekt: Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf
RoRo-Fährrschiffen (ALBERO)***

***Teilvorhaben: Transport und Ladevorgang von Fahrzeugen mit
alternativen Kraftstoffen bzw. Elektroantrieb auf
Fährrschiffen***

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuwendungsempfänger: Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren
Stuttgart (FKFS)

Fördergeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH

Förderkennzeichen: 13N14687

Projektlaufzeit: 01.08.2018 - 31.12.2021

Kurzbericht zu den Ergebnissen des FuE-Vorhabens „Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fährrschiffen“ – ALBERO

Teilvorhaben: Transport und Ladevorgang von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen bzw. Elektroantrieb auf Fährrschiffen

(FKZ: 13N14687)

Aufgabenstellung:

Durch die steigenden Anteile von alternativ betriebenen Fahrzeugen (abF) in den europäischen Fahrzeugbeständen steigt auch der Anteil solcher Fahrzeuge die mit RoRo-Schiffen transportiert werden. Hierdurch ergeben sich neue Risiken für den Fährrverkehr, welche durch das Verbundprojekt ALBERO untersucht und angepasste Maßnahmen, zur Sicherstellung eines sicheren Transportes von alternativ betriebenen Fahrzeugen, entwickelt wurden. Neben dem reinen Transport steigen die Kundenanfragen nach Lademöglichkeiten während der Überfahrt. Um diesen Kundenwunsch sicher erfüllen zu können wurden ebenfalls die Risiken durch den Ladevorgang sowie entsprechende Maßnahmen zur Absicherung untersucht.

Das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) hat im Rahmen verschiedenen Arbeitspaketen mit den Projektpartnern zusammengearbeitet, deren Ergebnisse im Folgenden kurz Zusammengefasst sind.

Darstellung der bestehenden alternativen Antriebe, Abschätzung deren zukünftige Marktanteile sowie Risiken

Zur Entwicklung geeigneter Maßnahmen wurden die wichtigsten Eigenschaften der unterschiedlichen abF (LPG¹, CNG², LNG³, FCEV⁴, HEV⁵, PHEV⁶, BEV⁷) zusammengefasst und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Hierbei wurden auch die wichtigsten Sicherheitseinrichtungen dieser Fahrzeuge sowie die Eigenschaften der Kraftstoffe beschrieben da diese vor allem bei der Detektion von Schäden sowie deren Bekämpfung eine wichtige Rolle spielen. Unterschiedliche Studien zeigen, dass der Anteil an alternativ betriebenen Fahrzeugen in Zukunft deutlich steigen wird.

Risiken durch den Transport von abF

Durch die speziellen Bedingungen an Bord eines RoRo-Schiffes ergeben sich besondere Gefahren beim Transport von abF. So besitzen Gasfahrzeuge Sicherheitseinrichtungen die den Tankinhalt im Schadensfall ablassen, dies kann durch die zum Teil geschlossenen Räume auf einem Fährrdeck zu einer Ansammlung eines zündfähigen Gemisches kommen. Betrachtet man batterieelektrische Fahrzeuge lässt sich erkennen, dass von diesen andere Gefahren als die von konventionellen Fahrzeugen gewohnt ausgehen. So haben die im Rahmen des Projektes durchgeführten Brandversuche sowie Literaturrecherchen gezeigt, dass die Gefahr einer Brandausbreitung durch den Brand eines BEV größer ist. Dies ist auf den schwerer zu

¹ Liquefied Petroleum Gas, in Deutschland als Autogas bekannt, Butan / Propan Gemisch unter Druck verflüssigt

² Compressed Natural Gas, Erdgas das mit ca. 200 bar in Gastanks gelagert wird

³ Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas das bei Temperaturen von unter -163°C gelagert wird

⁴ Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellen Fahrzeug, Kraftstoff typischerweise Wasserstoff

⁵ Hybrid Electric Vehicle, Vollhybrid, rein elektrisches fahren sehr kurzer Strecken möglich

⁶ Plug-In Hybrid Electric Vehicle, Plug-In-Hybrid, elektrisches fahren sowie nachladen der Energie via Ladekabel

⁷ Battery Electric Vehicle, Batterieelektrisches Fahrzeug, gesamte Antriebsenergie ist in Batterie gespeichert

löschen Brand, umherfliegender Batterieteile sowie dem hohen Risiko eines Rückzündens zurückzuführen. Für die Brandbekämpfung ist es besonders wichtig die Antriebs- und Kraftstoffart des betroffenen Fahrzeuges zu kennen um entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, dies gilt auf Grund der Jet Flammen Bildung beim Ablassen von Gas über die Sicherheitseinrichtungen besonders bei Gasfahrzeugen sowie für Batteriefahrzeuge durch die plötzliche Zündung der Batterie.

Maßnahmen zum sicheren Transport

Im Rahmen des Projektes erfolgte die Entwicklung einiger technischer, baulicher und organisatorischer Maßnahmen um den Transport von abF sicherer zu gestalten. Hierzu erfolgte die Erarbeitung und Empfehlung besonderer Stellplätze für abf die im Idealfall entsprechend der Antriebsart mit Sensorik ausgerüstet sind. So wird für Gasfahrzeuge ein Stellplatz auf einem offenen oder halboffenen Deck empfohlen, da hier durch den natürlichen Luftwechsel die Konzentration des Gas-Luft-Gemisches soweit abgesenkt werden kann, dass es nicht zu einer Verbrennung bzw. einer Explosion kommt. Diese schnelle und hohe Verdünnung macht die Detektion eines Gasaustrittes auf offenen oder teiloffenen Decks sehr schwierig. Batterieelektrische Fahrzeuge hingegen sollten innerhalb geschlossener Decks transportiert werden um große Temperaturschwankungen zu vermeiden.

Maßnahmen zum sicheren Aufladen

Um ein sicheres Laden von Elektrofahrzeugen an Bord eines RoRo-Schiffes zu ermöglichen ist es notwendig die dort herrschenden Bedingungen zu berücksichtigen. So entspricht das Bordnetz nicht dem an Land typischen TN oder TT-System bei einer Spannung von 400 V und 50 Hz, sondern ist als IT-System mit 440 V und 60 Hz ausgeführt. Zusätzlich werden besondere Anforderungen hinsichtlich EMV-Verträglichkeit, Explosionsschutz, IP-Klassifizierung, Salznebelbeständigkeit sowie Vibrationen gestellt. Bisher erfüllt keine auf dem Markt erhältliche Ladesäule diese Anforderungen. Neben den schiffspezifischen Anforderungen an die Ladesäule müssen auch allgemeine Anforderungen berücksichtigt werden. Abhängig vom zu erwartenden Aufkommen an Ladebedarf und der Dauer der Überfahrt muss die Auswahl der Anzahl der Ladesäulen, des Ladesäulentyps (AC / DC) sowie deren Leistung definiert werden. Einer der wichtigsten Aspekte der Sicherheitsbetrachtung der Ladeeinrichtungen ist der ausschließliche Gebrauch von schiffseigenen Ladekabeln, da diese in regelmäßigen Abständen geprüft und gewartet werden. Beim Einsatz von kundenseitig bereitgestellten Ladekabeln kann deren Zustand nicht überwacht werden.

Untersuchungen zu Kühlkonzepten von Traktionsbatterien

Zur Verhinderung und Minimierung der Auswirkungen eines batterieelektrischen Fahrzeugbrandes erfolgten Untersuchungen zum Brandverhalten von Li-Ionen Akkus mithilfe von Brandversuche in denen Batteriemodule eines BEV entzündet wurden. Zusätzlich erfolgte der prototypische Aufbau eines Kühlgerätes („Boundary Cooling Device“) welches aus einer Idee des Projektpartners Lloyd's Register entstand. Dieses besteht aus zwei identischen Rohren an dem horizontal und vertikal Düsen angebracht sind. Diese sollen neben einem beschädigtem (brennenden) bzw. einem zu schützenden Fahrzeug positioniert werden. Die horizontalen Düsen sollen den Unterboden des Fahrzeuges besprühen um diesen Bereich, an dem sich typischerweise die Traktionsbatterie oder Gastanks befinden, zu kühlen. Durch die vertikalen Düsen wird eine Wasserwand zu benachbarten Fahrzeugen erzeugt die verhindern soll das sich der Brand ausbreitet. Zur Untersuchung der Wirksamkeit des Kühleffektes der Benetzung der Batterie mit Wasser auf die Zellen erfolgte ein Versuchsaufbau in welchem festgestellt wurde, dass die Kühlwirkung sehr stark vom Aufbau der Batterie abhängt. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass ein deutlicher Kühleffekt für Gastanks mit dieser Lösung erreicht werden kann.

Abschnitt I – Ziele, Voraussetzungen und Herangehensweise.....	6
1 Aufgabenstellung	6
1.1 Hintergründe	6
1.2 Zusammenfassung des Projektes und Projektziele	7
1.3 Gesamtziel des Teilvorhabens	7
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand bezogen auf die im Teilprojekt bearbeiteten Themen zu Projektbeginn	8
3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	10
4 Planung und Ablauf des Vorhabens, sowie Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
4.1 Projektplanung und Projektablauf - organisatorisch.....	13
4.2 Projektplanung und Projektablauf - inhaltlich.....	14
4.3 Zusammenarbeit	18
Abschnitt II – Eingehende Darstellung der Ergebnisse	19
5 AP 1 Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften	19
5.1 AP 1.1 Aufstellung der derzeit existenten verschiedenen abF	19
5.2 AP 1.3 / 1.5 Darstellung des Verhalten verschiedener Fahrzeuge in Havariesituationen	27
5.3 AP 1.6 - Prognose der Entwicklung alternativ betriebener Fahrzeuge	35
6 AP 2 Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fährschiffen	41
6.1 AP 2.2 - Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für Gefahren unter bestimmten Bedingungen an Bord	41
6.2 AP 2.5 Ableitung eines Schutzkonzeptes nach strukturierten Prioritäten.....	47
7 AP 3 Boarding-Konzept.....	49
7.1 AP 3.3 Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord	49
8 AP 4 Der sichere Transport.....	52
8.1 AP 4.7 Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheits-Konzeptes für abF-Stellplätze an Bord und Umsetzung als Demonstrator an Bord	52
9 AP 5 Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge	54
9.1 AP 5.1 - Untersuchung zu möglichen Gefahren beim Laden infolge der besonderen Bedingungen an Bord.....	54
9.2 AP 5.2 Ermittlung geeigneter Ladeorte an Bord	56
9.3 AP 5.5 Erarbeitung eines abgestimmten Sicherheitskonzeptes für den Lade Standort – Wie sichert man den Ladeplatz ab?	59
9.4 AP 5.6 Simulation eines Ladevorganges für Elektrofahrzeuge an Bord.....	61
10 AP 7 Gesamtkonzept	88
11 Zusammenfassung und Ausblick	90

12 Quellenverzeichnis.....	91
13 Abbildungsverzeichnis	93
14 Tabellenverzeichnis	95
15 Abkürzungsverzeichnis	96

Abschnitt I – Ziele, Voraussetzungen und Herangehensweise

1 Aufgabenstellung

1.1 Hintergründe

Die Klimaveränderung, auch hervorgerufen durch den Ausstoß von Treibhausgasen aus Kraftfahrzeugen, hat die Autoindustrie veranlasst, Fahrzeuge mit alternativen Antrieben oder alternativen Kraftstoffen zu entwickeln. Es ist politisches Ziel, den Anteil an elektrisch betriebenen Fahrzeugen in Deutschland in den nächsten Jahren deutlich zu erhöhen [1]. Der zunächst stagnierende Absatz von Elektroautos hat durch die sich weiter verbesserte Ladetechnik und die dazugehörige Infrastruktur in den letzten 3 Jahren deutlich zugenommen, eine Fortsetzung dieses Trends ist absehbar [2]. Parallel wird die Nutzung von Erdgas, Autogas oder Wasserstoff als umweltfreundlichere Kraftstoffe vorangetrieben. Die Zahl der in Deutschland zugelassenen Erdgasfahrzeuge lag 2016 bei ca. 98.000 [3]. Auch bei dem für den Fährverkehr besonders relevanten Bereichen des LKW-Transportes gilt Erdgas als Kraftstoff der Zukunft [4].

Entsprechend diesem Trend werden in Zukunft auch zunehmend alternativ betriebene Fahrzeuge (abF) auf RoRo-Fährschiffen befördert werden. Der Transport erfolgt dabei in der Regel auf einem geschlossenen Fahrzeugdeck, woraus Bedingungen resultieren, die mit denen im Straßenverkehr nicht vergleichbar sind. Es ergeben sich neue Gefahrenpotentiale, wie bereits verschiedene Unfälle zeigen: Im November 2010 kam es zu einem Brand eines elektrisch betriebenen Nissan auf dem Fahrzeugdeck der Fähre „Pearl of Scandinavia“ [5]. Gemäß dem Stand der Untersuchungen brach das Feuer während des Aufladeprozesses aus. Die Reederei untersagte daraufhin das Laden während der Überfahrt.

Auch die am Projekt als assoziierte Partner beteiligten Reedereien TT-Line und Scandlines gestatten zum Zeitpunkt des Projektstarts keine Aufladung von Autos während der Überfahrt, da die Sicherheitsbedenken zu groß sind. Gleichzeitig gibt es aber vermehrt Kundenanfragen nach dieser Möglichkeit und es ist absehbar, dass eine zukunftsorientierte Fährreederei diesen Service anbieten muss, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Entsprechend müssen sich die Reedereien mit geeigneten Maßnahmen auf die Anforderungen, die sich durch den Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen ergeben, vorbereiten. Schiffsbesatzungen sind zudem entsprechend zu schulen, welche Sicherheitsmaßnahmen präventiv bzw. im akuten Gefahrfall eindämmend zu ergreifen sind.

Der Einsatz alternativer umweltschonender Energien ist ein wichtiger Baustein für den Erhalt unserer Umwelt und unseres Klimas. Die sich daraus ergebenden veränderten Transportsysteme müssen und können durch gemeinsame Forschung ein sicherer Bestandteil der Zukunft werden.

1.2 Zusammenfassung des Projektes und Projektziele

Das Ziel von ALBERO sind Konzept- und Technologieentwicklungen für die sichere Integration von alternativ betriebenen Fahrzeugen in den RoRo-Fährverkehr. Dabei sollen sowohl alternative Antriebssysteme wie Elektrofahrzeuge und batteriebetriebene Autos als auch alternative Kraftstoffe wie Erdgas oder Wasserstoff betrachtet werden. Im Rahmen des Projekts sollen technische, strukturelle und organisatorische Maßnahmen entwickelt werden, die den sicheren Transport und (für Elektrofahrzeuge) eine sichere Aufladung während der Fahrt ermöglichen. Neben geeigneten Vorsortierungskonzepten während des Boardings sollen spezielle Stell- und Ladeplätze mit innovativen Gefahrendetektions- und Sicherheitssystemen entwickelt und in ersten Labor- und Feldtests umgesetzt und erprobt werden. Darüber hinaus sollen Empfehlungen für wirksame Bekämpfungsmaßnahmen in einer akuten Gefahrensituation erarbeitet werden. Zudem sollen Schulungskonzepte und Lehrmaterialien für RoRo-Schiffsbesatzungen erarbeitet werden.

1.3 Gesamtziel des Teilvorhabens

Hauptziel des Teilvorhabens ist die Bereitstellung von Informationen über die technischen Eigenschaften von mit alternativen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen (abF), die Ermittlung der daraus resultierenden Gefährdungspotentiale speziell beim Transport auf RoRo-Fährenschiffen und die Definition von Anforderungen an Stellplätze und Sicherheitssysteme. Im zweiten Teil soll das Stellplatzkonzept um Lademöglichkeiten für batteriebetriebene Fahrzeuge erweitert werden.

- Situation und Motivation: Die Nutzung von alternativ betriebenen Fahrzeugen insgesamt nimmt weltweit zu. Entsprechend wird sich auch die Anzahl solcher Fahrzeuge, die mit Fährenschiffen transportiert werden, erhöhen. Die Unsicherheit der Branche im Umgang mit abF ist groß – dies beginnt damit, dass man ein solches Fahrzeug nicht ohne Weiteres erkennen kann und dass die möglicherweise von diesen Fahrzeugen ausgehende Gefährdungen nicht im Detail bekannt sind.

- Zielstellung und Inhalt: Im Teilprojekt sollen deshalb diese Gefährdungspotentiale beschrieben und ein Stellplatz- und Ladekonzept einschließlich der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen entwickelt und erprobt werden. Dies betrifft u.a. brandschutztechnische, bauliche und operative Maßnahmen sowie die Untersuchung und ggf. Anpassung des elektrischen Bordnetzes an den Ladebetrieb.
- Anwendung und Umsetzung der Ergebnisse: Das Teilprojekt liefert für verschiedene Zielgruppen (z.B. Konstrukteure, Reedereien, Schiffsbesatzungen, Klassifikationsgesellschaften, ...) Informationen über die von abF ausgehenden Gefahren sowie über Maßnahmen zu deren Reduzierung bzw. Bekämpfung

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand bezogen auf die im Teilprojekt bearbeiteten Themen zu Projektbeginn

Laut Kraftfahrtbundesamt waren am 01.01.2018 421.283 LPG-Fahrzeuge und 75.459 Erdgas-Fahrzeuge (entsprechend 0,9 bzw. 0,1% des Gesamtfahrzeugbestands) in Deutschland zugelassen. Während der Bestand von LPG-Pkw (die häufig auch als Nachrüstlösungen angeboten werden) seit 2013 um nahezu 20% gesunken ist, strebte die Europäische Union an, bis 2030 den Anteil von Erdgasfahrzeugen am Gesamtverkehr auf 9% und bis 2050 auf 20% zu erhöhen und das Erdgas-Tankstellennetz in Europa deutlich auszubauen. Seit Juni 2018 wurden vom BMVI energieeffiziente Lkw mit 8000€ (CNG) bzw. 12000€ (LNG) gefördert [6]. Diese Förderung endete im Jahr 2020. Ebenso stieg der Anteil der neu zugelassenen elektrisch angetriebenen Fahrzeuge in Deutschland vom Jahr 2017 auf das Jahr 2018 um 43,9 % sowie 53,8 % bei Hybridantrieben [7]. So ließ sich erkennen, dass der Anteil an alternativ betriebenen Fahrzeugen in Zukunft weiter steigen wird.

Hinsichtlich der Regelungen zum Transport von Fahrzeugen an Bord eines Schiffes zeigten sich unterschiedliche Gesetzgebungen für den unbemannten Transport eines Fahrzeuges als Ladung, zum Beispiel auf einem Autotransporter oder in einem Container und dem Transport mit einem Fahrer der am Seetransport teilnimmt. Für den Transport als Ladung gelten die Regelungen nach dem International Maritime Dangerous Goods-Code (IMDG-Code) [8], wodurch diese als Gefahrgut gekennzeichnet werden müssten. Die Sondervorschrift SP 961 des IMDG-Code regelt hingegen das dieses, nicht realistisch einhaltbare, Vorgehen nicht für Fahrzeuge die auf RoRo-Schiffen transportiert werden gilt.

Die Anforderungen an die baulichen Sicherheitseinrichtungen werden durch die international geltende SOLAS-Convention [9] definiert. Darin sind unter anderem auch die Anforderungen hinsichtlich Brandschutz und Ventilationssysteme für verschiedene Schiffstypen beschrieben.

In Kapitel II-2, Regel 20 werden die für RoRo-Schiffe geltenden Regeln festgelegt. Diese Regel hebt hervor, dass die auf Passagierschiffen übliche und geforderte Unterteilung des Decks in senkrechte Brandabschnitte aufgrund der sich über das gesamte Deck erstreckenden Fahrzeugdecks nicht anwenden lässt. Daher wird ein „...gleichwertiger Schutz unter Zugrundelegung einer Unterteilung in waagerechte Brandabschnitte und durch die Bereitstellung eines leistungsfähigen fest eingebauten Feuerlöschsystems“ gefordert, ohne, dass eine derartige Umsetzung konkreter beschrieben wird. Durch die spezielle Bauart von RoRo- und ROPAX-Schiffen, ohne Unterteilung des Fahrzeugdecks, entstehen weitere Gefahren, so kann ein Wassereintrich verheerende Folgen haben wie die im Jahr 1994 gesunkene „Estonia“ zeigte. Bisher geht die Regel 20 nicht auf die neuen, vom Transport von abF ausgehenden Gefahren ein. So sollte das Vorhaben ALBERO eine wichtige Vorreiterrolle einnehmen.

Das Laden von Fahrzeugen erfolgte, wenn während der Überfahrt überhaupt möglich, an für Kühllastwagen gedachten CCE-Steckdosen. Dieses Vorgehen führt neben meist geringen Ladeleistungen auch zu Sicherheitsrisiken. Durch die Verwendung von Kunden Ladekabeln ist der fehlerfreie Zustand des Kabels nicht sichergestellt, zudem müssen teilweise die in das Ladekabel integrierten Sicherheitseinrichtungen aufgrund des IT-Netzes an Bord deaktiviert werden um einen Ladevorgang starten zu können. Aus diesen Gründen war es notwendig im Vorhaben ALBERO auch den Ladevorgang zu betrachten um zukünftig sicheres und schnelles Laden auf RoRo-Fährschiffen zu ermöglichen.

3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das FKFS bearbeitet in Kooperation mit dem Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS), ehemals Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik und der Fahrzeugantriebe. Neben Fahrzeugen mit konventionellen Otto- bzw. Dieselmotoren wurde bereits im Jahr 1978 der erste Pkw auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet. Dies war der Startpunkt für eine Reihe von Forschungsprojekten an wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren. Hierzu gehörten auch Untersuchungen zur Wasserstoffspeicherung in Fahrzeugen und der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zur Versorgung und für den Betrieb von Motorenprüfständen einschließlich aller dafür erforderlichen Sicherheitseinrichtungen. Ab dem Jahr 2000 verlagerten sich die Aktivitäten hin zu Antriebsaggregaten, die mit Erdgas (CNG) betrieben werden [8, 9, 10, 11, 12, 13]. In Zusammenarbeit mit den Firmen Opel und Bosch wurde ein Erdgas-Hybrid-Fahrzeug entwickelt, dessen CO₂-Emission in einem Pkw der unteren Mittelklasse unter 90 g/km beträgt [14, 15, 16, 17]

Aufgrund seiner Expertise stehen am FKFS seit einigen Jahren Forschungsarbeiten zum Betriebsverhalten von Elektro- und Hybridfahrzeugen im Vordergrund, u.a.

- Aufbau und Betrieb einer E-Fahrzeugflotte zur Beschreibung der Eigenschaften und des Verhaltens im realen Fahrbetrieb [18]

⁸ Berner, H.-J.; Bargende, M.: Erdgas als alternativer Kraftstoff - ein Überblick. Tagung „Innovative Fahrzeugantriebe“ Dresden, 2000

⁹ Friedrich, C.; Quarg, J.; Berner, H.-J.; Bargende, M.: Leistungs- und Emissionspotential eines aufgeladenen 1-Liter-Erdgas-Motors. „4. Internationales Stuttgarter Symposium“, 2001

¹⁰ Quarg, J.; Kraft, D.; Bargende, M.; Reuss, H.-C. et al.: Erdgas-Hybrid – Antriebskonzept mit Erdgas-Hybrid-Technologie. DGES-Fachtagung: Nachhaltige Mobilität - Hybrid- und Brennstoffzellenantriebe, 28. - 29. Juni 2007, Berlin

¹¹ Berner, H.-J.; Bohatsch, S.; Hofmann, B.; Bargende, M.: Strahlgeführte Erdgas-Direkteinblasung zur Erzielung höchster Prozesswirkungsgrade. Tagungsband Gasfahrzeuge III – Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb, 2008

¹² Berner, H.-J.; Bargende, M.: CNG im Umfeld künftiger Fahrzeug-Antriebskonzepte. 6. Tagung Gasfahrzeuge, TAE Esslingen, Esslingen – Germany, 2011

¹³ Bargende, M.; Berner, H.-J. Natural Gas as a Fuel – The European Perspective SAE International Natural Gas Symposium, Greenville - South Carolina, USA, 2013

¹⁴ Riemer, T.; Böhm, M.: 2010 Konzeption und Realisierung eines Hybridfahrzeuges mit Turbo-Erdgasmotor. 16. Esslinger Forum für Kfz-Mechatronik, 10.11.2010

¹⁵ Boland, D.; Berner, H.-J.; Bargende, M.: Optimierung eines aufgeladenen CNG-Ottomotors für den Betrieb in einem Parallelhybrid-Antriebsstrang, 4. Tagung Gasfahrzeuge: Minimale CO₂-Emission zur Erfüllung kommender Grenzwerte, Stuttgart 2009

¹⁶ Bargende, M., Berner, H.-J., Boland, D.: Entwicklung eines hybriden Antriebsstranges mit einem aufgeladenen CNG-Motor, Tagung Concept, Dresden, 01./02. Februar 2011.

¹⁷ Böhm, M.: Steuerung und Regelung des Antriebsstrangs eines Erdgashybridfahrzeugs. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.

¹⁸ FLUKS: **F**lotten-Untersuchung im **K**undenrelevanten **S**tuttgart-Zyklus, gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg, 2014

- Betrieb einer Ladestation („Elektrotankstelle“) zu Forschungszwecken [19]
- Untersuchungen zum berührungslosen, bidirektionalem und positionstolerantem Laden von Elektrofahrzeugen [20]
- Aufbau und Betrieb eines Antriebsstrangprüfstands mit Batterie-Klimakammer [21]
- Untersuchungen zur Direkteinblasung von Erdgas [22,23]
- Gesamtsimulation von batterieelektrischen und Hybrid-Fahrzeugen [24, 25, 26]
- Simulation der thermischen Belastung der Fahrzeugbatterie von Elektrofahrzeugen [27]
- Erkennen und Ersetzen von defekten Zellen von Li-Ion-Batterien [28]

¹⁹ELITE: Energieeffiziente, Leistungsoptimierte und Intelligente Tankstelle für Elektrofahrzeuge, gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg, 2011

²⁰Martinovic, D.; Binz, C.; Reuss H.-C.: Positioning of Electric Vehicles for Inductive Charging Systems - Magnetic Field based Localization of the Charging Coil using Trilateration. VDI Berichte 2233 - AUTOREG 2015, Tagungsband KFZ-Mechatronik und Software

²¹Böhm, M.; Stegmaier, N.; Baumann, G.; Reuss, H.-C.: Der neue Antriebsstrang- und Hybrid-Prüfstand der Universität Stuttgart. MTZ 09/2011, S. 698-701

²²Herzenjak, F.: Entwicklung eines lagegeregelten Injektors für die Direkteinblasung von Erdgas zur Darstellung eines strahl-geführten Brennverfahrens. Universität Stuttgart, Dissertation, 2016

²³Birkefeld, A.; Friedrich, W.; Grzeszik, R.; Rößler, K.: Direct4 - Gas Direkteinblasung für monovalente Fahrzeuge mit effizienten Erdgasmotoren, Bericht zum Meilenstein 2, 2016

²⁴Winke, F.; Bargende, M.: Hybridization of Passenger Cars. In: van Basshuysen, R. (Ed.): Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains, S. 425-435. Springer, 2016, ISBN 978-3-319-23224-9.

²⁵Winke, F.; Berner, H.-J.; Bargende, M.: Dynamic Simulation of Hybrid Powertrains using Different Combustion Engine Models. SAE 2015-24-2545

²⁶Karras, N.; Kuthada, T.; Wiedemann, J.: Simulation of a Complete Battery Electric Vehicle. International KULI User Meeting, 2013

²⁷Hopp, H.: Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle, Dissertation Universität Stuttgart, 2015

²⁸Huynh, P.-L.; Abu Mohareb, O.; Grimm, M.; Reuss, H.-C.; Mäurer, H.-J.; Richter, A.: Impact of Cell Replacement on the State-of-Health for Parallel Li-Ion Battery Pack. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 27.-30. Oktober 2014, Coimbra, Portugal.

Themenbezogene Projektbeteiligungen einschließlich des kooperierenden IFS / IVK:

Förder- einrichtung	Geschäfts- zeichen	Titel	Zeit- raum
Audi HIN	AK08053852/00 und /01	Entwicklung einer Simulationsumgebung für Hybridfahrzeuge mit Dieselmotor II (Dieselhybrid II)	2008 bis 2011
Audi HIN	AK12093859/00	Audi-HIN: Simulation eines Brennstoffzellensystems im Fahrzeug (Simulation Fuel Cell)	2012 bis 2015
Audi HIN	AK12091772/00	Emissionsoptimale Betriebsstrategie für Plug-In-Dieselhybride mit Fokus RDE (Dieselhybrid III)	2012 bis 2015
BMW i	19U6017C	Verbundprojekt Erdgas-Hybrid: Simulation des Erdgasmotors und Entwicklung einer adaptiven Fahrstrategie	2006 bis 2009
Boysen- Stiftung	BOY07-Nr.43	Entwicklung eines lagegeregelten Injektors für Pkw-Erdgasmotoren mit innerer Gemischbildung	2007 bis 2008
Boysen- Stiftung	BOY07-Nr.68	Entwicklung eines lagegeregelten Injektors für Pkw-Erdgasmotoren mit innerer Gemischbildung	2008 bis 2009
Daimler	1059220963	Kooperatives Promotionskolleg Hybrid Teilprojekt "Hybridantrieb für Kfz-Betriebsstrategien"	2011 bis 2015
Daimler	1059218392	Kooperatives Promotionskolleg Hybrid Teilprojekt "Hybrid Powertrain" (VMOT2)	2012 bis 2016
FVV	6010550	Untersuchung der Dynamikanforderungen an Längsdynamiksimulationen von hybridisierten Antriebssträngen am Beispiel von Hybrid-Stadtfahrzeugen	2011
FVV	6011132	Vorstudie zum aktuellen Stand des NVH-Verhaltens bei künftigen Antriebskonzepten mit kleinen Verbrennungsmotoren und/oder Hybridisierung mit elektrischen Antrieben	2012 bis 2013
AiF-IGF	17573 N/1	Methankraftstoffe: Potenzialstudie und Kennzahlen	2012 bis 2014
AiF-ZIM	KF256256800R U	Entwicklung eines effektiven Range Extender Antriebssystem zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit elektrisch angetriebener Kommunalfahrzeuge mit kleinen Verbrauchsleistungen	2013 bis 2015
MFW	D/413/67104165	Studie zur Eignung von Hubkolben- und Wankelmotoren als Range Extender in batterieelektrischen Fahrzeugen (REXEL)	2010 bis 2011
MWK BW	PK Hybrid	Kooperatives Promotionskolleg Hybrid	2011 bis 2016

4 Planung und Ablauf des Vorhabens, sowie Zusammenarbeit mit anderen Stellen

4.1 Projektplanung und Projektablauf - organisatorisch

Koordiniert wurde das Verbundprojekt ALBERO vom Projektpartner Institut für Sicherheitstechnik / Schiffsicherheit e.V.

Projektpartner:

- Institut für Sicherheitstechnik / Schiffsicherheit e.V. (ISV), Friedrich-Barnewitz-Str. 4c, 18119 Rostock
- Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE), Fraunhofer Str. 20, 53343 Wachtberg
- Hochschule Bonn-Rein-Sieg (HBRS), Von-Liebig-Straße 20, 53359 Rheinbach
- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart
- GTE Industrieelektronik GmbH, Helmholtzstraße 21, 41747 Viersen
- Lloyd's Register, Am Sandtorkai 41, 20457 Hamburg

Assoziierte Partner:

- TT-Line GmbH & Co. KG, Zum Hafenplatz 1, 23570 Lübeck-Travemünde
- Scandlines Deutschland GmbH, Zum Fährterminal 1, 18147 Rostock
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), WS 23, Robert-Schuman-Platz 1, 53175 Bonn
- Verband Deutscher Reeder, Esplanade 6, 20354 Hamburg
- Hafen- und Seemannsamt Rostock, Ost-West-Straße 8, 18147 Rostock
- Stena Line GmbH & Co.KG, Fährhafen 20c, 18456 Sassnitz

Projektträger:

- VDI Technologiezentrum GmbH, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf

4.2 Projektplanung und Projektablauf - inhaltlich

Die Aufgaben des Gesamtprojektes wurden in 7 Arbeitspakete aufgeteilt.

Aufgelistet werden nur die Arbeitspakete (AP) / Teilarbeitspakete des FKFS innerhalb der Gesamtprojektes, welche zum Teil auch in Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern bearbeitet wurden.

AP 1	Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften	FKFS
1.1	<i>Aufstellung der derzeit existenten verschiedenen abF</i>	
1.3	<i>Darstellung des Verhaltens von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen in Havariesituationen</i>	
1.5	<i>Darstellung des Verhaltens batteriebetriebener Fahrzeuge in Havariesituationen</i>	
1.6	<i>Prognose der Entwicklung alternativ betriebener Fahrzeuge</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 1

Im Rahmen des Teilarbeitspakets werden durch Auswertung von Informationen (Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Herstellerinformationen, ...) das Gefährdungspotential und die dafür verantwortlichen technischen Grundlagen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (abF). AP 1.1 enthält eine Aufstellung der Bauarten und relevanten Parameter von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb unter besonderer Berücksichtigung der Energieträger und -speicher. Im Hinblick auf das Gesamtvorhaben liegt der Schwerpunkt auf Teilsystemen, die im Fährtransport zu einer Gefährdung führen können. Primär sind das die im Fahrzeug befindlichen Energieträger bzw. die dazu verwendeten Speicher. Stichworte für konkrete Beispiele sind:

- Verflüssigtes oder komprimiertes Erdgas (LNG, CNG)
- Autogas (LPG), Flüssiggas aus Propan und Butan
- Wasserstoff
- Elektrischer Strom
- Tanks für drucklose flüssige Kraftstoffe
- Druckbehälter für gasförmige oder verflüssigte Kraftstoffe
- Batterie

Das Teilarbeitspaket 1.3 beschreibt das - aufgrund der Verwendung von alternativen Kraftstoffen - spezifische Verhalten dieser Fahrzeuge in Havariesituationen. Im Hinblick auf das Gesamtvorhaben liegt der Schwerpunkt auf Situationen, die im Fährtransport auftreten können und dann zu einer Gefährdung führen. Primär sind auch hier die im Fahrzeug befindlichen Energieträger bzw. die dazu verwendeten Speicher betroffen, wobei Gefahrensituationen und Schädigungen durch innere (z. B. Undichtigkeit eines Drucktanks durch zu hohen Druck) und äußere Einflüsse (z. B. Kollision mit anderen Fahrzeugen oder Schiffseinrichtungen, Übergreifen von Feuer) ausgelöst werden können. Weiterhin wird untersucht, welche spezifischen Sicherheitssysteme diese Fahrzeuge zusätzlich besitzen, welche Vorschriften für diese Fahrzeuge an Land gelten (z. B. bei der Benutzung von Tunneln und Parkhäusern/Tiefgaragen) und welche Maßnahmen bei Unfällen und Schäden an Land ergriffen werden (z. B. Vorschriften für Rettungskräfte) und ob bzw. wie diese auf den Fährbetrieb übertragen werden können.

In Analogie hierzu behandelt AP 1.5 das spezifische Verhalten von batteriebetriebenen Fahrzeugen in Havariesituationen. Im Hinblick auf das Gesamtvorhaben liegt der Schwerpunkt auf Situationen, die im Fährtransport auftreten können und dann zu einer Gefährdung führen. Primär sind die im Fahrzeug befindlichen Batterien und die Ladeelektronik betroffen, wobei Gefahrensituationen und Schädigungen durch innere (Überhitzung der Batterie / Ladeelektronik durch zu hohe Lade- bzw. Entladeströme oder Kurzschlussströme in der Batterie) und äußere Einflüsse (z. B. Beschädigung der Batterie / Elektronik / Kabel durch Kollision mit anderen Fahrzeugen oder Schiffseinrichtungen, Übergreifen von Feuer) ausgelöst werden können. Weiterhin wird untersucht, welche spezifischen Sicherheitssysteme diese Fahrzeuge zusätzlich besitzen, welche Vorschriften für diese Fahrzeuge an Land gelten (z. B. Benutzung von Tunneln und Parkhäusern/Tiefgaragen, Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen) und welche Maßnahmen bei Unfällen und Schäden an Land ergriffen werden (z. B. Vorschriften für Rettungskräfte) und ob bzw. wie diese auf den Fährbetrieb übertragen werden können.

Im Rahmen des Teilarbeitspakets 1.6 wird die technische und ökonomische Weiterentwicklung von alternativ betriebenen Fahrzeugen untersucht. Dabei stehen die Aspekte im Vordergrund, die für den Fährtransport von Bedeutung sind und dort ggf. entsprechende Maßnahmen sowie Anpassungen und Erweiterungen der Infrastruktur erfordern. Dazu gehören neue Kraftstoffe mit den zugehörigen Speicher- und Sicherheitssystemen sowie bei Fahrzeugen mit elektrischen Antriebskomponenten die Batterie- und Ladetechnik. Eng damit verknüpft und letztendlich ein Kreislauf sind das Nutzungsverhalten, die Ansprüche an die Tank- / Ladeinfrastruktur, die Realisierung einer weitgehenden Alltagstauglichkeit mit entsprechenden Reichweiten und Ladezeiten und resultierend daraus steigende Stückzahlen

von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Aus der Untersuchung dieser Zusammenhänge werden Anforderungen für den Fährverkehr der Zukunft abgeleitet.

AP 2	Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fährschiffen	ISV
2.2	<i>Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für Gefahren unter bestimmten Bedingungen an Bord</i>	
2.5	<i>Ableitung eines Schutzkonzeptes nach strukturierten Prioritäten</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 2

In AP 2.2 wird untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit bestimmte Gefahren wie Gasaustritt, Brand bzw. Explosion beim Fährtransport auftreten können. Basis hierfür sind entsprechende Daten von geparkten Fahrzeugen an Land, wobei aus der Ursachenanalyse Gewichtungsfaktoren zwischen den Verhältnissen an Land und beim Fährbetrieb abgeschätzt werden. In Kombination mit den aus AP 1 bekannten Gefährdungsmechanismen werden in AP 2.5 Anforderungen für die bordseitigen Sicherheitssysteme (unter Berücksichtigung der bereits im Fahrzeug implementierten Systeme) erarbeitet.

AP 3	Boarding-Konzept	FKIE
3.3	<i>Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 3

In AP 3.3 wird basierend auf einer Zusammenstellung der Vorschriften bzw. Sicherheitsmaßnahmen für Stellplätze von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (z.B. Einschränkungen / Verbote für Gasfahrzeuge in Tiefgaragen) eine Bewertung der Übertragbarkeit auf die Verhältnisse an Bord von Fährschiffen erarbeitet. Falls aufgrund dieser Bewertung Änderungen bzw. Erweiterungen erforderlich sind, werden diese definiert, um letztendlich unter den an Bord herrschenden Randbedingungen besonders geeignete Stellplätze für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben festlegen zu können.

AP 4	Der sichere Transport	HBRS
4.7	<i>Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheits-Konzeptes für abF-Stellplätze an Bord und Umsetzung als Demonstrator an Bord</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 4

Für die Entwicklung der Gas- und Brandmeldesysteme der Projektpartner werden Testfahrzeuge sowie weiteres Testzubehör bereitgestellt.

AP 5	Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge	ISV
5.1	<i>Experimentelle Untersuchung zu möglichen Gefahren beim Laden infolge der besonderen Bedingungen an Bord</i>	
5.2	<i>Ermittlung geeigneter Ladeorte an Bord</i>	
5.5	<i>Erarbeitung eines abgestimmten Sicherheitskonzeptes für den Lade-Standort – Wie sichert man den Ladeplatz ab?</i>	
5.6	<i>Testweise Umsetzung einer On-Board- Ladestation für Elektrofahrzeuge</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 5

Das AP 5 beschäftigt sich mit dem Laden von Elektro- bzw. Plug-in-Hybridfahrzeugen an Bord von Fährschiffen. In AP 5.1 werden hierzu die Eigenschaften des Bordnetzes von Fähren im Vergleich zur stationären Stromversorgung an Land untersucht und geprüft, ob durch ggf. auftretende Spannungs- bzw. Frequenzschwankungen oder Ausfälle der Ladevorgang mit gefährlichen Folgen gestört werden könnte. Aus den Ergebnissen werden die für das Laden relevanten Anforderungen an das Bordnetz definiert.

In den AP 5.2.und 5.5 werden die Anforderungen an Ladeorte einschließlich der Integration in die vorhandene bzw. zusätzlich zu schaffende Infrastruktur erarbeitet. Dies betrifft primär Systeme zur Gefahrendetektion (Gas- / Brandmelder) und Maßnahmen im Gefahrenfall (Feuerlöschsysteme, elektrische Notabschaltung). Teilaufgabe des FKFS ist die strukturierte Zusammenfassung der Ergebnisse der anderen Projektpartner in einem Ladeplatz- und Sicherheitskonzept.

In AP 5.6 wird eine Ladestation mit den erarbeiteten Sicherheits- und Schutzsystemen aufgebaut. Das FKFS übernimmt für den Testbetrieb die Bereitstellung von Testfahrzeugen, Versuchsaufbauten und die Auswertung von Testergebnissen, die während des Ladebetriebs auch bei der Simulation von Gefahrensituationen / Havarien ermittelt werden.

AP 7	Gesamtkonzept	LR
7.1	<i>Evaluation und Erstellung eines Gesamtkonzeptes / Maßnahmenkataloges zur Gefahrenminimierung</i>	

Erläuterung des Ressourcenaufwandes für AP 7

AP 7 beinhaltet die Erstellung und Evaluation eines Gesamtkonzepts aus den Ergebnissen der AP 1 bis 6. Teilaufgabe des FKFS ist die strukturierte Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich der technischen Sicherheitsmaßnahmen für den Transport und das Laden von abF in Form einer Handlungsempfehlung für Fährreedereien und Hafengebiete.

4.3 Zusammenarbeit

Zum Erreichen der Projektziele war es zwingend notwendig sich in regelmäßigen Abständen mit allen Projektpartnern auszutauschen und abzustimmen um gemeinsame Problemstellungen und Aufgaben zu bearbeiten. Hierzu erfolgten regelmäßige Telefonkonferenzen, Webmeetings sowie Projekttreffen.

Abschnitt II – Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse in Bezug auf die im Antrag festgelegten Arbeitspakete und Teilarbeitspakete dargestellt.

5 AP 1 Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen aus Arbeitspaket 1, der Darstellung der verschiedenen Antriebsarten und deren Eigenschaften.

5.1 AP 1.1 Aufstellung der derzeit existenten verschiedenen abF

Die unterschiedlichen alternativen Kraftstoffe sowie Antriebsarten werden in die, in Tabelle 1 zu sehenden Gruppen aufgeteilt.

Tabelle 1: Überblick und Aufteilung Alternativ angetriebener Fahrzeuge

Antriebsart	Kategorie Energiequelle	Kategorie Antrieb
Konventionell Benzin	Konventionell	-
Konventionell Diesel		
Ethanol (E85 / E100)	Flüssig	Alternativer Kraftstoff
Methanol		
LPG	Gas	
CNG		
LNG		
H ₂ (Brennstoffzelle)	Gas (Batterie Zwischenspeicher)	
BEV (Battery Electric Vehicle)	Batterie	
PHEV (Plug In Hybrid Electric Vehicle)	Batterie / Konventionell	
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Konventionell	

Hierbei erfolgt die Aufteilung in die zwei Antriebskategorien alternative Kraftstoffe sowie alternative Antriebe. Im Folgenden soll auf die Eigenschaften der verschiedenen Antriebsarten eingegangen werden.

5.1.1 Gasfahrzeuge

Bei gasbetriebenen Fahrzeugen wird im Wesentlichen zwischen Erdgas (Natural Gas) und Autogas (LPG = Liquefied Petroleum Gas) unterschieden. Während natürliches oder synthetisches Erdgas überwiegend aus Methan (CH₄) besteht, ist Autogas eine Mischung aus Propan und Butan (im Sommer 60:40, im Winter 40:60). Dieses LPG wird durch Komprimierung verflüssigt und bei einem temperaturabhängigen Druck von ca. 5 bis 10 bar in

Drucktanks gespeichert. Hierdurch reduziert sich das Volumen gegenüber dem drucklosen, gasförmigen Zustand, um den Faktor 250. Bei Erdgas wird zwischen Druckspeicherung (gasförmig) und kryogener Speicherung unterschieden. Die Speicherung unter Druck erfolgt bei Drücken um 200 bar, in dieser Form wird das Erdgas auch CNG (CNG = Compressed Natural Gas) genannt. Zur kryogenen Speicherung erfolgt die Abkühlung des Erdgases auf unter -163°C sowie einer anschließenden Speicherung in Vakuum isolierten Tanks. In dieser Speicherform wird das Erdgas auch LNG (LNG = Liquefied Natural Gas) genannt. Abhängig vom Wärmeeintrages sowie dem Füllstand des Tanks erfolgt das gezielte Abblasen von verdampftem Erdgas bei Überschreitung eines bestimmten Drucks (Boil-off-Gas). So existieren Systeme die innerhalb von 72 Stunden ca. 10% Kraftstoff bei nichtbenutzen ablassen jedoch auch solche die bis zu 14 Tage ungenutzt ohne ablassen von Gas stehen gelassen werden können bevor das erste Mal Erdgas abgeblasen werden muss.

Laut Kraftfahrtbundesamt waren am 01.01.2018 421.283 LPG-Fahrzeuge und 75.459 Erdgas-Fahrzeuge (entsprechend 0,9 bzw. 0,1% des Gesamtfahrzeugbestands) in Deutschland zugelassen. Während der Bestand von LPG-Pkw (die häufig auch als Nachrüstlösungen angeboten werden) seit 2013 um nahezu 20% gesunken ist, könnten LNG betriebene LKW in Zukunft einen zunehmenden Anteil der Fahrzeugflotte ausmachen.

Tanks und Armaturen werden grundsätzlich durch entsprechende Vorschriften und Tests betriebssicher ausgelegt. Hierbei gelten bei Serienfahrzeugen vor allem die Anforderungen aus der ECR R110 (CNG) sowie ECR R 67-01 (LPG) während für Nachrüstlösungen die ECE R 115 (CNG und LPG) gilt. Zur Speicherung des Kraftstoffes haben sich für CNG verschiedene Bauformen aus Stahl oder faserverstärktem Kunststoffen bzw. Kompositbauformen bewährt, während für LNG der Tank lt. ECR R110 aus rostfreiem, austenitischen Stahl hergestellt werden müssen. Für die verflüssigten Kraftstoffe LNG und LPG gilt zudem eine Befüllungsgrenze von 80%, was durch ein Füllstoppventil sichergestellt wird. Durch diese Füllgrenze wird sichergestellt, dass ein ausreichend großer Raum mit Gasphase im Tank erhalten bleibt um ein Ausdehnen der Flüssigphase bei Temperaturschwankungen zu erlauben. Nach ISO 11439 muss sichergestellt sein, dass ein Erdgastank das in ihm enthaltene Erdgas freigibt, bevor er birst. Hierfür werden Druckentlastungseinrichtungen (PRD = Pressure Relief Devices) verbaut, die bei Überschreitung eines maximalen Drucks (P-PRD) oder einer maximalen Temperatur (T-PRD) Gas aus dem Tank ablassen. Hierbei ist die Verwendung eines druckaktivierten Druckentlastungsventils durch die ECR R 110 vorgeschrieben während der Einsatz von thermisch aktivierten Druckentlastungsventilen optional und abhängig vom verwendeten Tanksystem ist. So erfolgt die Speicherung von CNG typischerweise in Verbundfasertanks. Hierbei besteht die Gefahr, dass der Druck im inneren des Tanks bei einem Brand, durch die gute Isolierwirkung des Materials, nicht den

Öffnungsdruck des P-PRD erreicht bevor der Tank durch die Materialschwächung versagt. Aus diesem Grund wird für diese Tanksysteme in den meisten Fällen ein zusätzliches T-PRD verwendet um die vorher erwähnte ISO 11439 zu erfüllen. Diese PRD werden häufig im Tankventil integriert, welches zusätzlich einen Durchflussmengenbegrenzer (welcher im Falle einer Leckage im Leitungssystem den ausströmenden Massenstrom begrenzt), ein elektrisches Absperrventil sowie ein manuelles Absperrventil enthält. Letzteres dient der Verschließung des Tanks im Notfall, sofern es dann noch gefahrlos zugänglich ist. Die P-PRD Systeme die in LPG und CNG Fahrzeugen eingesetzt werden unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise deutlich voneinander. Nach dem Auslösen eines P-PRD eines CNG Tanks wird der gesamte Tankinhalt abgelassen, während beim LPG Tank nur so lange Gas ausströmt wie ein bestimmter Überdruck anliegt und so auch nur Teilmengen des Tanks abgelassen werden können.

Besonders in geschlossenen Räumen muss auf das Verhalten der Kraftstoffe bei Austritt geachtet werden. LPG kann sowohl flüssig wie gasförmig austreten, wobei es bei Umgebungsdruck und Temperatur verdampft, in beiden Fällen aber schwerer als Luft ist und sich somit in Vertiefungen ansammeln kann. Da CNG bereits gasförmig im Tank vorliegt kann nur Gas austreten, welches leichter als Luft ist und somit nach oben steigt. In beiden Fällen besteht durch das austretende Gas neben der Brand- und Explosionsgefahr auch die Gefahr der Verdrängung der Luft wodurch ein Ersticken droht. Beide diese Gase sind jedoch gut für Menschen erkennbar da diese mit einem Odoriermittel versetzt sind und so auch schon in geringsten Mengen am typischen Gasgeruch erkannt werden können.

Für die bisher selten eingesetzten gasförmigen Kraftstoffe Wasserstoff (H_2) und LNG lassen sich viele der für CNG und LPG beschriebenen Eigenschaften übertragen. Da LNG, wie CNG eine Speicherform für Erdgas beschreibt entspricht verdampftes LNG ausgetretenem (drucklosem) CNG. Im flüssigen Zustand jedoch ist LNG schwerer als Luft und kann sich so in Vertiefungen ansammeln bevor es verdampft und in dieser Form (nach dem Angleichen der Temperatur) wieder leichter als Luft wird. Zusätzlich zur Erstickungsgefahr besteht die Gefahr von Erfrierungen durch die niedrigen Temperaturen. Für die Speicherung von Wasserstoff werden Tanksysteme zur gasförmigen Speicherung unter Druck mit bis zu 700 bar eingesetzt. Hierbei gelten dieselben Anforderungen an das Tanksystem wie für CNG Tanks. Derzeit erfolgt der Betrieb von Fahrzeugen mit Wasserstoff hauptsächlich in Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle). Der Antriebsstrang dieser Fahrzeuge besteht aus der Kombination der Erzeugung von Strom, aus dem unter Druck gespeicherten Wasserstoff, über eine Brennstoffzelle, der Zwischenspeicherung dieser elektrischen Energie in einer kleinen Traktionsbatterie und dem Antrieb des Fahrzeuges über Elektromotoren. LNG sowie Wasserstoff können nicht wie LPG und CNG mit einem

Odoriermittel versetzt werden was sie für Menschen schwierig zu erkennen macht. Zusätzlich ist die Flamme abbrennenden Wasserstoffes bei normalem Tageslicht nicht sichtbar. Durch die geringe notwendige Zündenergie von Wasserstoff ist ein Zünden und somit das Entstehen einer Jet Flamme beim Auslösen der PRD sehr wahrscheinlich.

Die Explosionsgrenzen der einzelnen Gaskraftstoffe sowie eine Zusammenfassung deren Eigenschaften kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht der Eigenschaften verschiedener Gasfahrzeuge

Fahrzeugtyp	Speichertechnik	Odoriert	Explosionsgrenzen
LPG	Verflüssigtes Gas (~10 bar)	Ja	1,5 – 11 Vol. %
CNG	Gasförmig unter Druck (~200 bar)	Ja	4,4 – 17 Vol. %
LNG	Verflüssigtes Gas (~-163°C)	Nein	4,4 – 17 Vol. %
H ₂	Gasförmig unter Druck (bis 700 bar)	Nein	4,0 – 77 Vol. %

Die möglichen Gefahren und deren Wahrscheinlichkeiten sind in Kapitel 5.2 zu finden. Tabelle 3 zeigt die Spanner der in PKW vorkommenden Tankgrößen und die darin gespeicherte chemische Energie bezogen auf den Heizwert.

Tabelle 3: Übersicht der typischen Tankgrößen und deren Energieinhalt

Kraftstoff	Typische PKW Tank Größe	Gespeicherte Energie
Benzin	25 – 100 l	218 - 875 kWh
LPG	35 – 120 l	268 – 920 kWh
CNG	12 – 30 kg	156 – 391 kWh
H ₂	4 – 7 kg	133 – 233 kWh

5.1.2 Alternative flüssige Kraftstoffe (Ethanol, Methanol, Bio Kraftstoffe)

Die alternativen Kraftstoffe Ethanol, Methanol sowie Bio Kraftstoffe werden in angepassten Verbrennungsmotoren eingesetzt. Diese können wie konventionelle Kraftstoffe in Tanks gespeichert werden. Diese unterscheiden sich von konventionellen Kraftstoffen hauptsächlich durch die in Tabelle 4 aufgeführten Eigenschaften.

Tabelle 4: Übersicht technischer Daten alternativer flüssiger Kraftstoffe

Kraftstoff	Dichte [g/l] bei 25°C	Heizwert [kWh/kg]	Selbstentzündungstemperatur [°C]
Benzin	720 - 775	11,1 – 11,6	240 - 500
Ethanol	789,4	7,4	400
Methanol	786,9	5,5	470
Diesel	820 - 845	11,8	220
Bio Diesel	860 - 900	10,2	250

5.1.3 Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten

Tabelle 5 zeigt die unterschiedlichen Ausbaustufen der Antriebsstrang Elektrifizierung mit den zwei Hauptkategorien Hybrid und Batterie Elektrische Fahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicle). Anhand dieser sowie den Unterkategorien erfolgt die Darstellung der typischen Eigenschaften.

Micro Hybrid Fahrzeuge zeichnen sich durch eine Ladestrategie, bei der die Batterie besonders im Schubbetrieb geladen wird, sowie einer Start-Stopp Funktion aus. Durch die geringen notwendigen elektrischen Leistungen werden Bleiakkumulatoren verwendet. Die nächste Ausbaustufe der Elektrifizierung eines konventionellen Antriebsstranges ist der Mild Hybrid. Dieser bietet neben den Funktionen des Micro Hybrid, die Möglichkeit einer Lastpunktverschiebung, dem gezielten Anheben / Senken des Lastmomentes des Verbrennungsmotors zur Wirkungsgradsteigerung, sowie dem Boosten bei dem die Leistung des Verbrennungsmotors mit der des Elektromotors kombiniert wird um eine höhere Systemleistung zu erreichen. Abhängig von der Systemauslegung finden hier Blei, Ni-MH sowie Li-Ionen Batterien Verwendung. Bei Voll Hybriden ist die benötigte Leistung für den elektrischen Antrieb durch das rein elektrische Fahren höher, weshalb hier nur Ni-MH sowie Li-Ionen Batterien als elektrische Speicher für den Antrieb genutzt werden. Eine Möglichkeit des Aufladens der Traktionsbatterie ist erst bei der Kategorie Plug-in Hybrid (PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle) gegeben. Da für die erhöhte Reichweite auch mehr Batteriekapazität benötigt wird finden hier fast ausschließlich Li-Ion Batterien Verwendung.

Tabelle 5: Übersicht über Elektrifizierte Antriebsstränge

Fahrzeugkategorie	Kategorie	Typischer Batterietyp	Typische Batteriekapazität/ Batterie Spannung	Besonderheit
Micro Hybrid	Hybrid	Bleiakku	Bis 1,2 kWh / 12V	Ladestrategie + Start/Stop
Mild Hybrid		Bleiakku / Ni-MH / Li-Ionen	Bis 1,2 kWh / 12 bis 48 V	Zusätzlich zu Micro Hybrid: Lastpunktverschiebung + Boosten
Voll Hybrid		Ni-MH / Li-Ionen	0,5 bis 3 kWh / 48 bis 480 V	Zusätzlich zu Mild Hybrid: Rein elektrisches Fahren möglich
Plug-in Hybrid		Li-Ionen	8 bis 15 kWh / 48 bis 480 V	Zusätzlich zu Voll Hybrid: Größere elektrische Reichweite + Laden über externe Stromquelle

Vollelektrisches Fahrzeug	Batterie- elektrisch	Li-Ionen	14 bis 100 kWh	Reiner elektrischer Betrieb
Range Extender Fahrzeug		Li-Ionen	Bis 20 kWh	Reiner elektrischer Antrieb, zusätzlicher Energiewandler zur Erzeugung von Strom
Brennstoffzellen Fahrzeug		Ni-NH / Li-Ionen	Bis 2 kWh	Elektrischer Antriebsstrang, Strom für Betrieb wird durch Brennstoffzelle erzeugt

In der Kategorie batterieelektrischer Fahrzeuge ist das vollelektrische Fahrzeug (BEV = Battery Electric Vehicle) das mit Abstand verbreitetste. Hier wird die gesamte Antriebsenergie in der Traktionsbatterie gespeichert. Range Extender Fahrzeuge (REX = Range Extender) besitzen wie BEV einen rein elektrischen Antriebsstrang. Zur Erhöhung der Reichweite ist jedoch ein zusätzlicher Energiewandler im Fahrzeug verbaut er beispielsweise mit Benzin betrieben wird und Strom für den Antrieb bereitstellt. Dieser rein elektrische Antrieb ist das Merkmal welches REX und PHEV unterscheidet. Brennstoffzellenfahrzeuge stellen ebenso eine Sonderform dar, da diese auch über einen rein elektrischen Antriebsstrang verfügen, die Energie für den Antrieb stammt jedoch immer aus der Brennstoffzelle. Die, im Vergleich zu den anderen elektrischen Fahrzeugen, kleine Batterie dient nur zur Pufferung der Energie, welche von der Brennstoffzelle bereitgestellt und vom Antrieb verbraucht wird.

Lithium-Ionen-Batterien stellen im Bereich der meisten Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeuge den Stand der Technik dar. Diese Batterien bestehen aus einzelnen Batteriemodulen welche wiederum aus einzelnen Zellen bestehen. Diese Zellen können in die Kategorien zylindrische, prismatische sowie Pouch Zellen aufgeteilt werden. Zur Überwachung der gesamten Batterie wird ein Batteriemanagementsystem (BMS) verwendet. Dieses überwacht die Spannungen der einzelnen parallel geschalteten Zellen, Temperaturen, Lade- und Entladeströme um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Zusätzlich sind in der Batterie neben einer Sicherung auch zwei Schütze integriert, die nur im Betrieb und bei Freigabe durch das BMS den Plus sowie den Minuspol nach außen durchschalten. Erkennt das BMS einen Fehler werden die Schütze nicht geschlossen und somit die Batterie vom restlichen Hochvoltsystem getrennt. Zum Laden von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bestehen verschiedene Ladestecker sowie die Unterscheidung zwischen Wechselstrom (AC = Alternating Current) und Gleichstrom (DC = Direct Current) Ladung. Bei der AC Ladung erfolgt die Wandlung der Energie aus dem Stromnetz, auf die zum Laden der Batterie benötigten Gleichspannung, durch das im Fahrzeug integrierte Ladegerät. So erfolgt die

Regelung der Ladeleistung innerhalb des Fahrzeuges in dem das BMS mit dem Ladegerät kommuniziert. Beim DC Ladevorgang wird die stromnetzseitige Wechselspannung in der Ladesäule auf die von der Batterie benötigte Spannung gewandelt und die Batterie ohne zwischengeschalteten Wandler geladen. Hierzu ist es notwendig, dass das Fahrzeug mit der Ladesäule eine Kommunikation aufbaut um Grenzwerte wie Spannung und Strom zu kommunizieren. Sollte es zu einem Fehler während der DC Ladung kommen kann das BMS die internen bzw. Ladeschütze öffnen und so die Batterie von der Ladesäule trennen. In Europa kommt bei der AC-Ladung typischerweise der Ladestecker des Typs 2 zum Einsatz während für die DC-Ladung ein CCS (CCS = Combined Charging System) Stecker verwendet wird. Die Ladeleistung über AC beträgt maximal 43 kW wobei die meisten Fahrzeuge aufgrund von kleineren Onboard Ladegeräten mit maximal 11 kW laden. Bei DC Ladevorgängen können bis zu 350 kW von der Ladesäule bereitgestellt werden wobei an diesen Ladesäulen in den meisten Fällen die Ladeleitung der Batterie der begrenzende Faktor ist.

Für den Fall eines BMS-Versagens gibt es eine Reihe von mechanischen, teilweise redundanten Rückfalllösungen auf Zellebene:

- Kaltleiter; engl: Positive Temperature Coefficient (PTC), der seinen Widerstand mit steigender Temperatur erhöht und damit die fließenden Ströme reduziert
- Elektrischen Sicherungen um die beiden Elektroden einzeln vom Stromkreis zu trennen
- Separator, schmilzt bei 130 bis 150°C und verschließt seine Poren, so dass der Elektronenfluss zwischen den Elektroden unterbunden wird, dadurch sinkt der Strom. Allerdings schmilzt dieser bei Temperaturen über 150°C, wodurch ein interner Zellkurzschluss entstehen kann.
- Stromunterbrechungs-System; engl: Current Interruption Device (CID) zur irreversible Trennung der Zelle vom Ladekreis bei unzulässigem Druckanstieg innerhalb der Zelle
- Sicherheitsentlüftung (druckabhängige Sollbruchstelle zur Verhinderung eines Berstens des Batteriegehäuses)

Durch all diese Sicherheitseinrichtungen werden neben normalem Bauteilversagen auch Missbrauchsfälle abgesichert. Diese lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Mechanischer Missbrauch:
z.B. Unfall, durch welchen ein interner oder externer Kurzschluss entsteht
- Elektrischer Missbrauch:
z.B. Überladen, Tiefentladen, Kurzschließen

- Thermischer Missbrauch:
z.B. Zu hohe Umgebungstemperatur, Aussetzen von Flammen

Diverse UN-Regelungen definieren Tests gegen die oben beschriebenen Missbrauchsfälle, welche für die Erteilung der Typgenehmigung eines Fahrzeugs zwingend erfüllt werden müssen. Im Folgenden wird kurz auf die Tests nach ECE R100 eingegangen:

- Vibrationstest:
Batterie wird 12 Testzyklen mit jeweils 15 Minuten Testdauer Vibrationen mit einer sich ändernden Frequenz zwischen 7 bis 50 Hz sowie Beschleunigungen zwischen 2 bis 10 m/s² ausgesetzt.
- Temperaturschockprüfung:
Es erfolgt eine Lagerung der Batterie bei einer Temperatur von 60°C für mindestens 6 Stunden. Nach Ablauf dieser Zeit erfolgt der Temperatursprung auf -40°C. Dieser Temperatursprung muss nach spätestens 30 Minuten abgeschlossen sein und die Temperatur muss mindestens weitere 6 Stunden gehalten werden. Dieser Temperaturwechsel wird fünfmal wiederholt.
- Mechanische Schock Prüfung:
Hierbei wird die Batterie unterschiedlichen Beschleunigungsprofilen ausgesetzt in denen bis zu 28g erreicht werden.
- Mechanische Integrität:
Zur Prüfung der Mechanischen Integrität der Batterie wird diese in Fahrzeuglängsrichtung mit einem Prüfkörper mit 100 bis 105 kN belastet. Diese Last wird über einen Zeitraum von 3 Minuten aufgebaut und zwischen 100 ms und 10 Sekunden gehalten.
- Feuerbeständigkeit:
Dieser Test soll sicherstellen das den Passagieren im Falle eines Kraftstoffbrandes genügend Zeit zur Verfügung steht um das Fahrzeug zu verlassen. Hierbei wird eine mit Benzin gefüllte Feuerschale entzündet, welche nach 60 Sekunden Vorheizdauer unter die Batterie geschoben wird. Nach 70 Sekunden der direkten Flammenaussetzung wird eine Metallplatte zwischen Feuer und Batterie geschoben und so die Batterie indirekt für weitere 60 Sekunden weiterbeheizt bevor die Feuerschale unter der Batterie entfernt wird.
- Externer Kurzschlussstest:
Es werden die Lade- bzw. die Entladeschütze geschlossen welche über den gesamten

Test geschlossen bleiben. Der positive und negative Kontakt der Batterie wird mit einem Widerstand unter $5\text{m}\Omega$ gebrückt. Dieser Kurzschluss wird bis zum Auslösen einer Sicherheitseinrichtung aufrechterhalten. Alternativ wird ein Temperaturgradient von kleiner als $4^\circ\text{C}/\text{h}$ als stabiler Zustand gewertet.

- **Überladen:**
Eine Batterie wird mit mindestens $1/3\text{ C}$ jedoch maximal mit dem vom Hersteller vorgegebenen Ladestrom geladen, bis das Laden durch eine Schutzeinrichtung begrenzt oder unterbrochen wird. Wird der Ladevorgang nicht von der Batterie abgebrochen erfolgt der Abbruch beim Erreichen der doppelten Nennladekapazität.
- **Tiefentladen:**
Eine Batterie wird mit mindestens $1/3\text{ C}$ jedoch mit maximal dem vom Hersteller vorgegebenen Entladestrom entladen, bis der Entladevorgang durch eine Schutzeinrichtung begrenzt oder unterbrochen wird. Wird der Entladevorgang nicht von der Batterie abgebrochen erfolgt ein Abbruch beim Erreichen von einer Restkapazität von 25% .
- **Übertemperatur:**
Die Batterie wird ohne Kühlsystem in einer Klimakammer platziert und mit konstantem Strom be- und entladen um diese möglichst schnell aufzuheizen, während die Umgebungstemperatur kontinuierlich auf die maximale von Hersteller freigegebene Temperatur erhöht wird. Der Test wird unterbrochen sobald die Batterie den Lade- / Entladestrom begrenzt oder der Temperaturgradient unter $4^\circ\text{C}/2\text{h}$ fällt.

5.2 AP 1.3 / 1.5 Darstellung des Verhaltens verschiedener Fahrzeuge in Havariesituationen

Um das Verhalten der verschiedenen Kraftstoffe und Antriebsarten in Havariesituationen auf einem RoRo Schiff abschätzen zu können, wurden Ablaufpläne sowie weitere Abschätzungen aus einer Studie [10] zu Vorfällen in Tunneln verwendet. Diese berücksichtigen die Umgebung in der der Schaden auftritt, welcher mit den Bedingungen an Bord vergleichbar sind.

Um eine Vergleichbarkeit mit konventionellen Fahrzeugen zu erhalten werden diese ebenfalls dargestellt. So zeigt Abbildung 1 die verschiedenen möglichen Eskalationsstufen für Benzin bzw. Diesel Fahrzeuge, sowie die Bedingungen unter welchen diese eintreten.

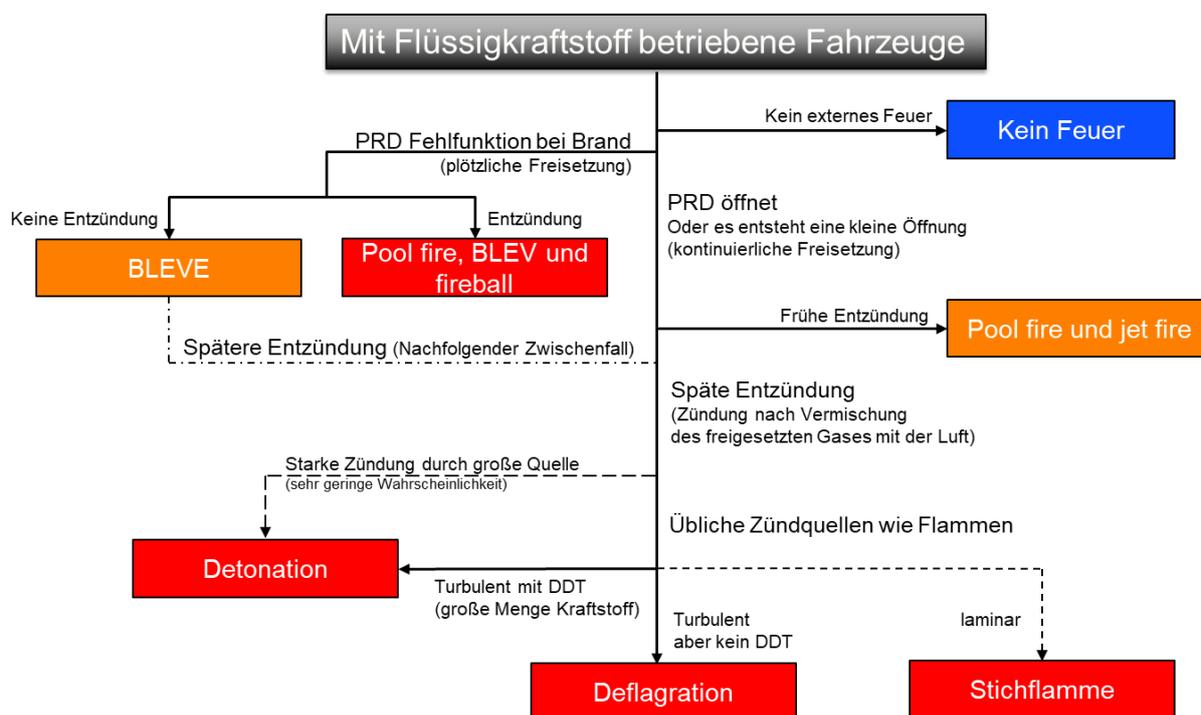


Abbildung 1: Havarieablauf Flüssigkraftstoff (z.B. Diesel / Benzin) [10]

So führen die meisten Schäden die zu einer Undichtigkeit des Tanks oder zum Öffnen einer Schutzeinrichtung führen zu einem pool fire (Lachenbrand). Wurde der Kraftstoff jedoch bereits durch Wärmezufuhr überhitzt kann bereits verdampfter Kraftstoff unter Druck ausströmen und bei direkter Entzündung zu einem jet fire (gezündeter Freistrah) führen. Wird der austretende Kraftstoffdampf jedoch nicht entzündet kann sich dieser mit der Umgebungsluft vermischen und somit, bei einer verzögerten Zündung, zu einer Deflagration (Verpuffung), Stichflamme oder Detonation führen. Versagt die Druckentlastungseinrichtung (PRD) des Tanks kann der Tankinhalt so weit überhitzt werden, dass es bei einem plötzlichen Tank versagen zu einem BLEVE (boiling liquid expanding vapour explosion) kommt.

Vergleicht man diesen Ablaufplan mit dem für Fahrzeuge die mit verflüssigten Kraftstoffen betrieben werden (Abbildung 2) fällt auf, dass sich diese sehr ähneln. Die Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Szenarien unterscheiden sich jedoch wie in Abschnitt 6 dargestellt deutlich voneinander aufgrund von unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich Speicherdruck/-Temperatur und den daraus folgenden technischen Sicherungseinrichtungen.

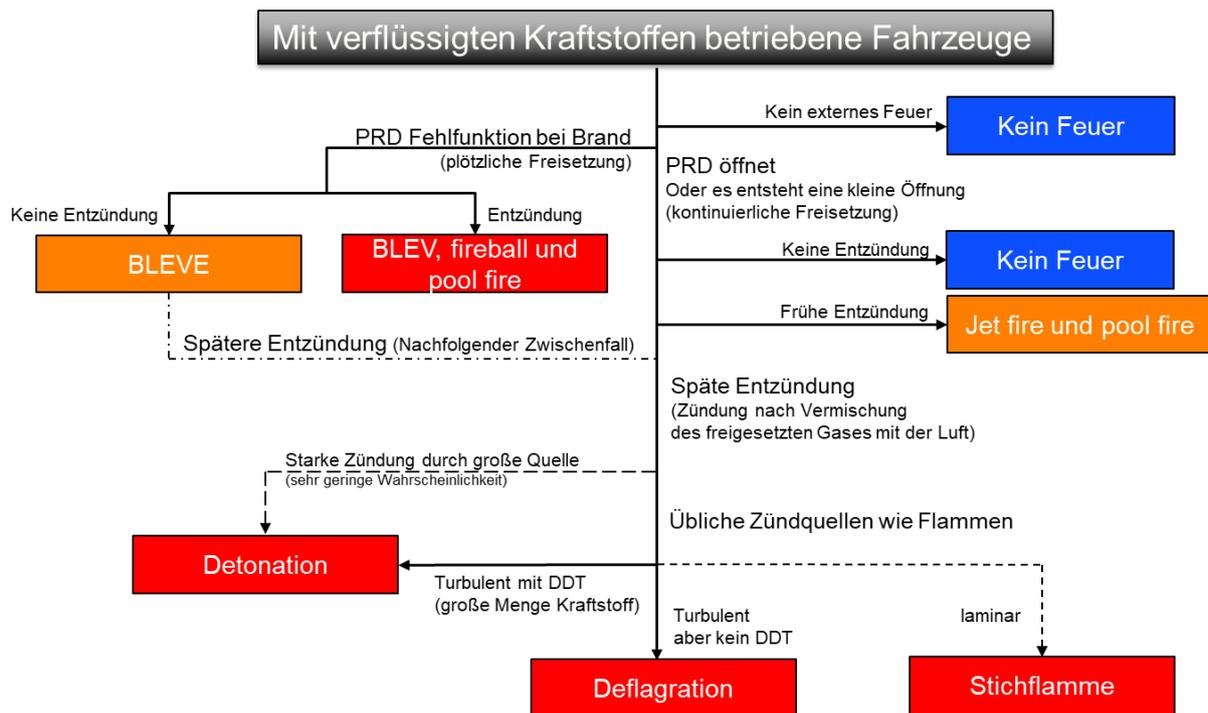


Abbildung 2: Havarieablauf verflüssigte Kraftstoffe (z.B. LPG / LNG) [10]

So Resultieren die meisten Schäden eines Tanks für verflüssigte Kraftstoffe in einer Stichflamme. Die Gefahr für schwerere Unfälle ist durch die geringere Verdampfungstemperatur und die einhergehende größere verdampfende Menge an Kraftstoff höher als bei Flüssigkraftstoffen.

Auch der in Abbildung 3 zu sehende Ablaufplan für druckgasbetriebene Fahrzeuge wie CNG zeigt Ähnlichkeit mit verflüssigten und Flüssigkraftstoff. Durch die Speicherung in gasförmiger Form kann es hier jedoch nicht zu pool fire oder BLEVE kommen. Wodurch weniger mögliche Havarievariationen entstehen.

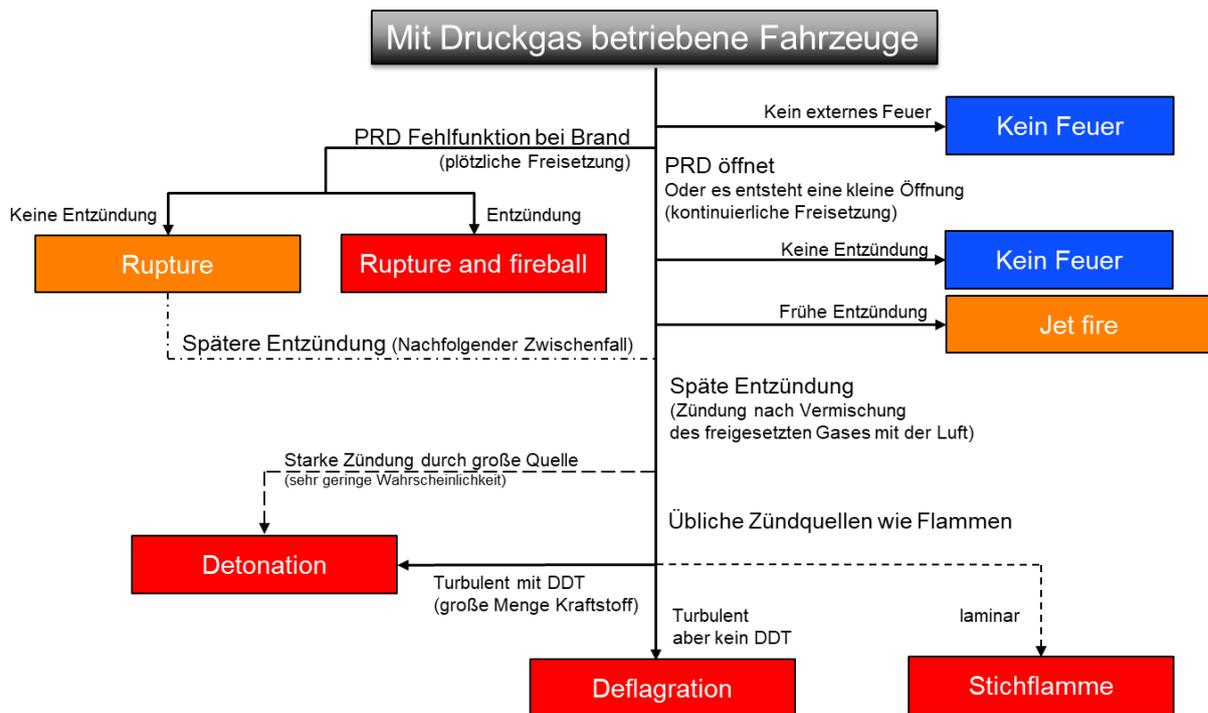


Abbildung 3: Havarieablauf Druckgas Kraftstoffe (z.B. CNG) [10]

Abbildung 4 zeigt das Ablaufdiagramm der Eskalationsstufen für Fahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben wie PHEV und BEV.

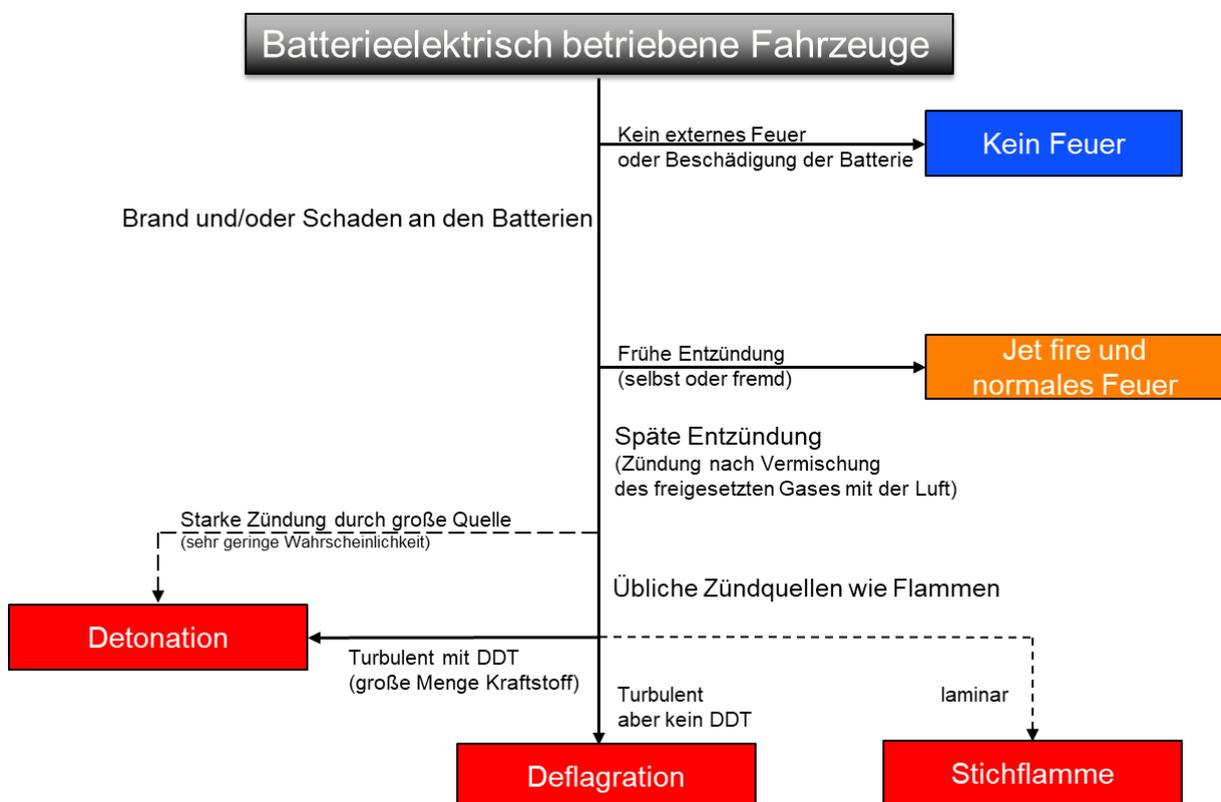


Abbildung 4: Havarieablauf batterieelektrische Antriebe (z.B. PHEV / BEV) [10]

Dies zeigt deutliche Unterschiede zu den Antrieben mit Verbrennungsmotoren. So kommt es bei einem Schaden typischerweise zu einem jet fire, gefolgt von einem normalen Brand wenn das austretende Gas von einer externen Quelle oder von der Batterie selbst nach kurzer Zeit gezündet wird. Nur wenn das austretende Gas nicht zeitnah entzündet wird, sich dadurch mit der Umgebungsluft mischen und ansammeln kann, besteht die Möglichkeit einer Detonation in Abhängigkeit der Randbedingungen.

Um die freigesetzte Energie unterschiedlicher Energieträger vergleichen zu können wird Tabelle 6 verwendet. Hier wird für alle Kraftstoffbehälter eine Beschädigung / Öffnung mit 10mm Durchmesser angenommen.

Tabelle 6: Vergleich Wärmefreisetzung unterschiedlicher Kraftstoffe bei gleicher Schadensgröße [10]

Typ	Austrittsrate (l/s)	benetzte Fläche (m ²)		max. HRR (MW)	
		2% Steigung	10% Steigung	2% Steigung	10% Steigung
Ethanol	0.11	15	65	2	10
Methanol	0.11	15	65	2	11
Diesel	0.11	15	65	8	37
Benzin	0.11	15	65	13	58
LPG	1.6	-	-	43	43
LNG	2.3	-	-	49	49
LH ₂	4.5	-	-	45	45

Bei 1% Gefälle quer zum Fahrzeug
Werte für ein Loch mit 10mm Durchmesser

Durch die geringe Datenlage zum Verhalten verflüssigter Kraftstoffe bei einem Flüssigkeitsbrand wird von einer sofortigen Umsetzung ausgegangen, weshalb keine benetzten Flächen angegeben werden und auch die Fahrbahnneigung keinen Einfluss auf die Wärmefreisetzung hat. Aus den angegebenen Wärmefreisetzungsraten (HHR = Heat Release Rate) für die verschiedenen Kraftstoffe und Fahrbahnneigungen kann abgeschätzt werden wie viel Wärme beim betrachteten Schaden freigesetzt wird. So lässt sich erkennen, dass die alternativen Flüssigkraftstoffe Methanol und Ethanol im Vergleich zu Diesel oder Benzin weniger Energie freisetzen. Durch die Abhängigkeit von der benetzten Oberfläche fällt auf, dass bei den Flüssigkraftstoffen die äußeren Bedingungen einen großen Einfluss haben. Verglichen mit den verflüssigten bzw. gasförmigen Kraftstoffen lässt sich feststellen, dass die Gaskraftstoffe vor allem bei der geringen Steigung von 2% zu einer höheren Energiefreisetzung im Vergleich zu den Flüssigkraftstoffen führen.

Zur Betrachtung der möglicherweise auftretenden Flammenlängen beim Öffnen der Sicherheitseinrichtungen (PRD) wird Tabelle 7 verwendet.

Tabelle 7: Theoretische Flammenlänge nach Kraftstoff und PRD Durchmesser [10]

Kraftstoff	Durchmesser PRD/Bohrung [mm]	Freisetzungsrate [kg/s]	Wärmefreisetzungsrate [MW]	Flammenlänge nach		
				Heskestad [m]	Delichatsios [m]	Lowesmith [m]
CNG(200bar)	2.5	0.13	7	5.6	7.3	6
	5	0.62	34	13.6	17.9	10.8
	10	2.49	137	27.2	35.7	18.1
LPG(32bar) Gasseitig	2.5	0.041	1.9	4	5.4	3.7
	5	0.165	7.6	7.9	10.8	6.2
	10	0.661	30	15.9	21.7	10.3
LPG(32bar) Flüssigkeitsseitig	2.5	0.1	4.5	-	-	5.1
	5	0.4	18.2	-	-	8.5
	10	1.58	72.8	-	-	14.3

Diese zeigt die Flammenlänge für CNG, LPG gasseitig sowie LPG flüssigkeitsseitig für die Durchmesser 2,5 / 5 / 10 mm für verschiedene Ansätze der Berechnung. Hier lässt sich erkennen, dass selbst die kleinste untersuchte Öffnung mit 2,5 mm bereits zu Flammenlängen über 3 m führt. Typischerweise werden PRD mit einem Innendurchmesser von ca. 5 mm verwendet. Hier beträgt die kürzeste theoretische Flammenlänge 6,2 m, welche bei räumlicher Begrenzung zusätzlich umgelenkt werden kann und so zum Beispiel auch von Decken und Wänden in andere Bereiche gelenkt werden könnten. Neben der Flammenlänge kann auch die freigesetzte Kraftstoffmasse sowie die Wärmefreisetzungsraten abgelesen werden. Tritt eine Beschädigung eines LPG Tanks im Bereich der Flüssigphase auf sind die Wärmefreisetzungsraten höher und es kann ebenfalls zu einem pool fire kommen.

Ebenfalls relevant für die Betrachtung möglicher Schadensauswirkungen ist die Betrachtung eines Tankversagen bei 200 bar CNG Tanksystemen in geschlossenen Räumen. Der entstehende Überdruck durch das Bersten eines 10 kg 200 bar CNG Tanks ist in Abbildung 5 dargestellt. Betrachtet man die gestrichelte Linie, welche den Druck auf einer freien Fläche repräsentiert, ist zu erkennen das der Druck sehr schnell abnimmt, während die Volllinie (im Tunnel) über eine weite Entfernung Drücke über 20 kPa zeigt. Zwischen 10-20 kPa besteht für Personen in diesem Bereich die Gefahr von Trommelfellschädigungen sowie ein umstoßen durch den Druckstoß. Hieraus lässt sich ableiten das in geschlossenen Bereichen einer Fähre das Risiko eines Personenschadens aufgrund eines Tankversagen steigt.

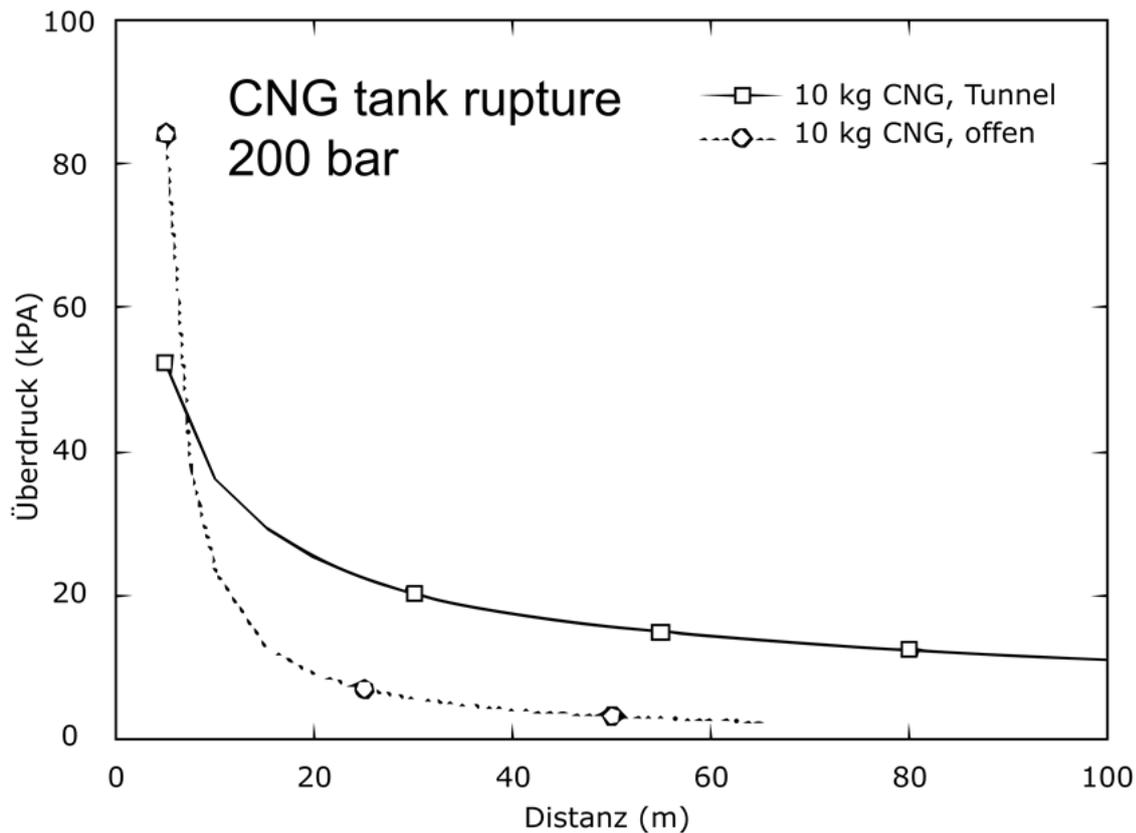


Abbildung 5: Überdruck über die Distanz von einem 10 kg 200 bar CNG Tank für freie Fläche und in einem Tunnel [11]

Soll die Auswirkung einer Explosion eines abF unterschiedlicher Klassen untersucht werden kann Tabelle 8 genutzt werden. Diese Tabelle geht von der zum Vortrieb des Fahrzeuges notwendigen Energie aus und teilt diese in PKW, Bus und LKW mit jeweils geringer und hoher Reichweite ein. Am Beispiel des PKW mit einem Batteriegewicht von 200 kg und einer Radenergie von 54 MJ wird der Vergleich der verschiedenen Antriebe verdeutlicht. Durch den Wirkungsgrad des Antriebes kann aus der Radenergie die notwendige gespeicherte Energie bestimmt werden. Hier zeigt sich der gute Wirkungsgrad des Elektroantriebes (90 MJ), da die notwendige gespeicherte Energie des Verbrennungsmotors (270 MJ) (ICE: Internal Combustion Engine) dreimal so hoch ausfällt. Betrachtet man jedoch die Explosionsenergie bei der Umsetzung des gesamten Tanks / Energiespeichers lässt sich erkennen, dass hier das Batteriesystem eine höhere Energie (384 MJ) aufweist. Um eine Einordnung der verschiedenen Kraftstoffe für den Verbrennungsmotor zu erlauben ist die der gespeicherten Energie (270 MJ) entsprechende Kraftstoffmasse (CNG: ~8 kg / H₂: ~3 kg / Benzin: ~6 kg) angegeben.

Tabelle 8: Übersicht über die Gespeicherte / potentielle Explosionsenergie verschiedener Fahrzeugklassen bezogen auf die Radenergie (Reichweite) [10]

Typ	Batterie Masse	Energie am Rad (MJ)	Gespeicherte Energie (MJ)		Explosions-Energie(MJ)		Äquivalente Masse(kg)		
	(kg)		Batterie	ICE	Batterie	ICE	CNG	H ₂	Benzin
PKW	200	54	90	270	384	270	8	3	6
	600	162	270	810	1152	810	23	9	17
BUS	1200	324	540	1620	2304	1620	46	18	35
	2500	675	1125	3375	4800	3375	96	38	72
LKW	600	162	270	810	1152	810	23	9	17
	4600	1242	2070	6210	8832	6210	177	71	133

Zur Verringerung der Auswirkungen einer Havarie erfolgt die Aufteilung des Tankinhalts von CNG und H₂ Speichersystemen typischerweise auf mehrere kleiner Tankeinheiten um damit nur kleinere Mengen Energie pro beschädigtem System freisetzen zu müssen.

5.3 AP 1.6 - Prognose der Entwicklung alternativ betriebener Fahrzeuge

Um die Entwicklung und den derzeitigen Bestand an alternativ betriebenen Fahrzeugen einordnen zu können erfolgt die Darstellung der Entwicklung der relevanten Fahrzeugbestände der Ostseeanrainerstaaten. Als Datenquelle der folgenden Abbildungen dienten Eurostat [12] und das European Alternative Fuels Observatory (EAFO) [13]. Abbildung 6 zeigt den Bestand an Batterieelektrischen sowie Plug-In-Hybrid Fahrzeugen in den Jahren 2008 bis 2018. Hier ist der deutliche Anstieg dieser Antriebsart deutlich zu erkennen.

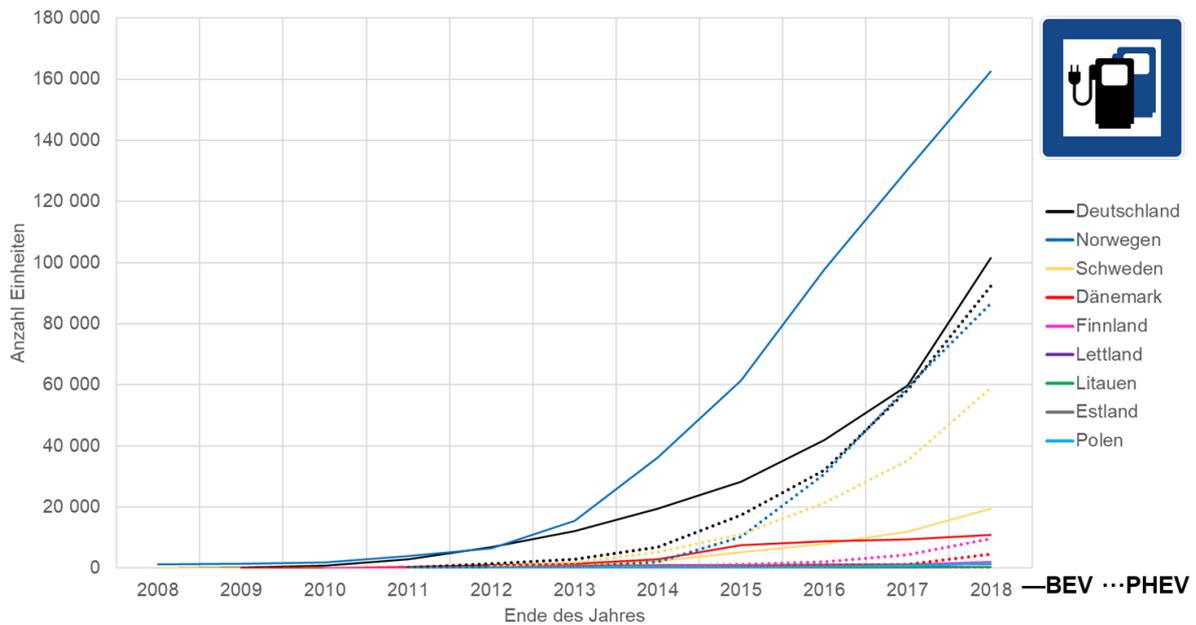


Abbildung 6: BEV und PHEV Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Vergleicht man nun jedoch den Anteil am Gesamtfahrzeugbestand dieser Länder untereinander (siehe Abbildung 7) ist zu erkennen, dass mit Ausnahme von Norwegen und Schweden, der Anteil am Fahrzeugbestand im Jahr 2018 noch unter 0,5% lag.

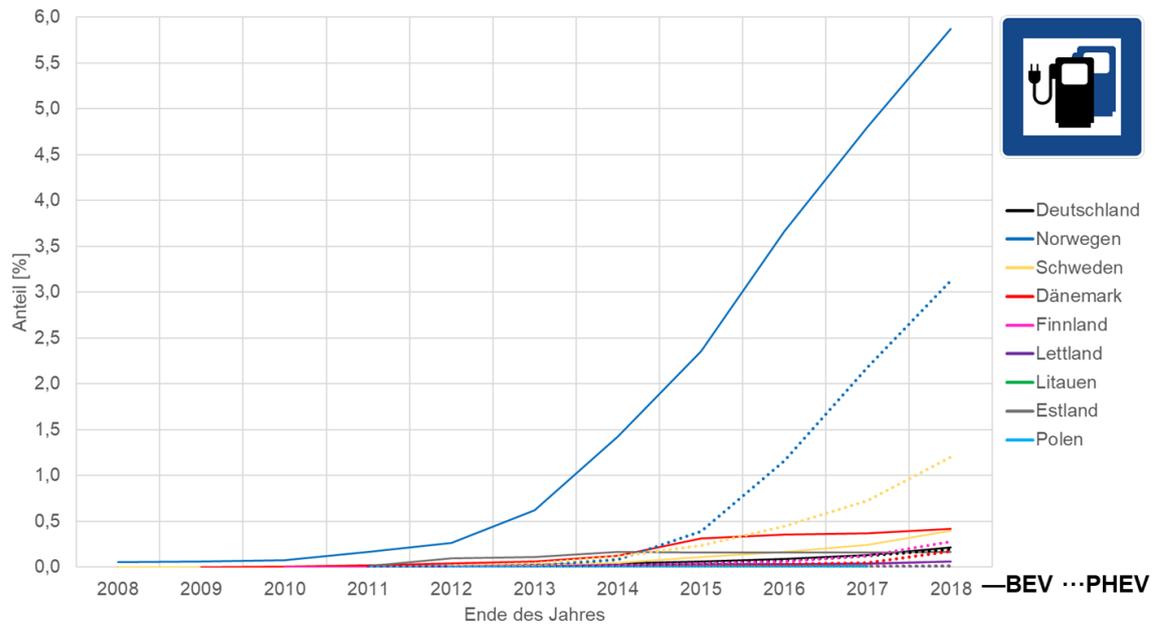


Abbildung 7: Prozentualer Anteil von BEV und PHEV am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Der Bestand an Fahrzeugen welche mit CNG angetrieben werden sind in Abbildung 8 zu sehen. Dieses Diagramm verdeutlicht den mit Ausnahme von Schweden eher stagnierenden Anteil an CNG Fahrzeugen. Und es lässt sich erkennen, dass in Deutschland die Batterieelektrischen Fahrzeuge die CNG betriebenen im Jahr 2018 im Bestand überholt haben.

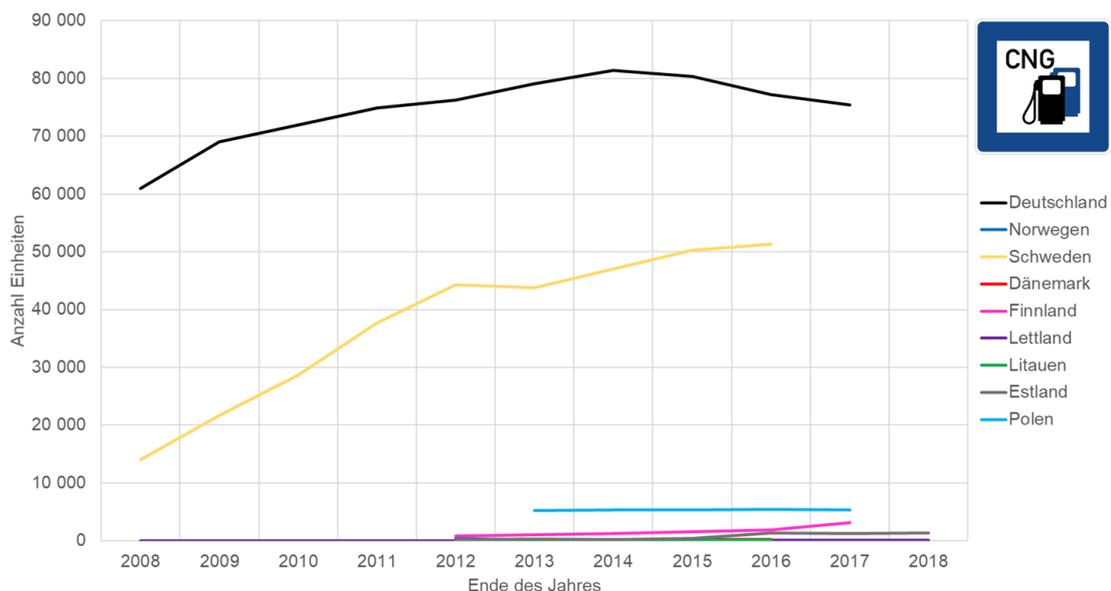


Abbildung 8: CNG Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Der prozentuale Anteil an CNG Fahrzeugen im Fahrzeugbestand liegt in allen Ostseeanrainerstaaten mit Ausnahme von Schweden bei unter 0,2% (siehe Abbildung 9).

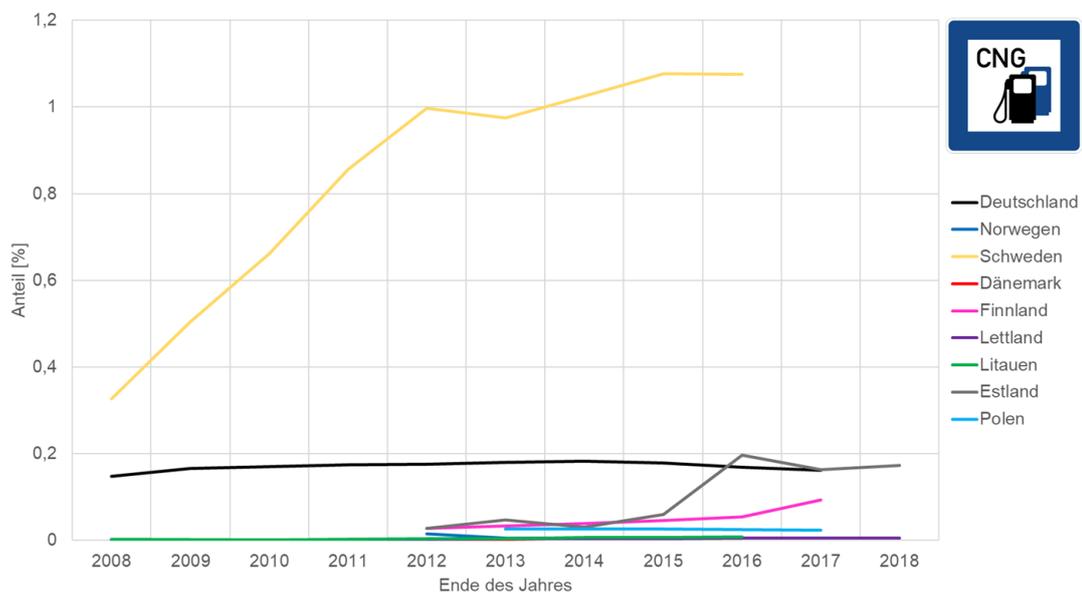


Abbildung 9: Prozentualer Anteil von CNG-Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Der alternative Kraftstoff LPG verliert in den meisten Ländern an Bedeutung mit der Ausnahme von Polen, hier steigt der Bestand während der prozentuale Anteil nahezu konstant bleibt. Der Bestand an Fahrzeugen die mit LPG betrieben werden können ist in Abbildung 10 dargestellt.

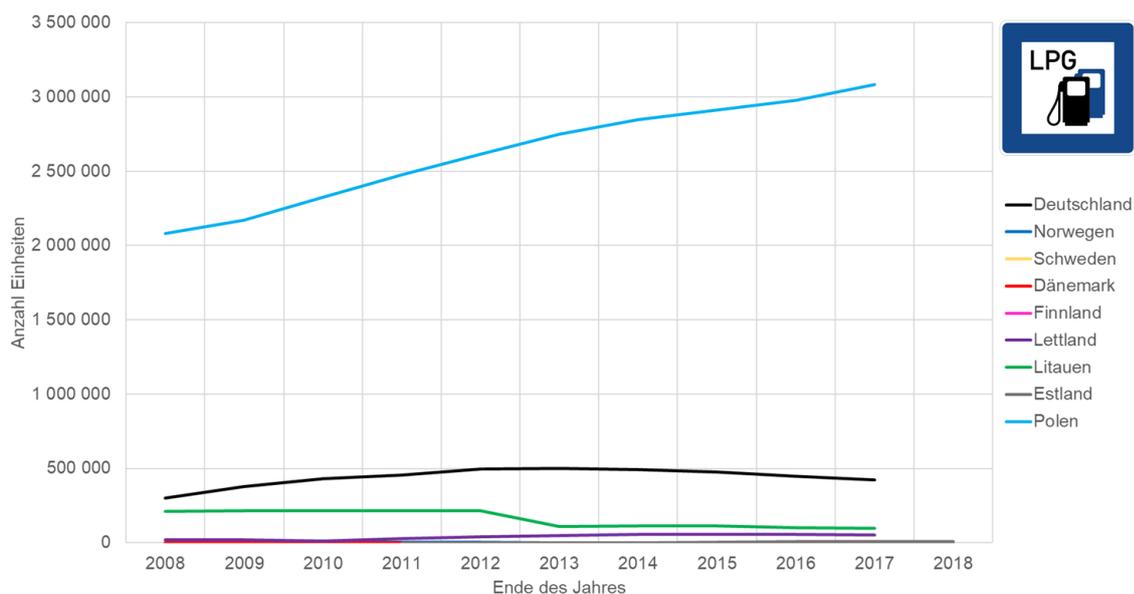


Abbildung 10: LPG-Fahrzeug Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Jedoch hat LPG bereits in einigen Ländern einen nennenswerten Anteil am Gesamtbestand der zugelassenen Fahrzeuge. Dies ist besonders in Abbildung 11 zu erkennen in der im Jahr 2018 in Litauen 7% in Lettland 8% und in Polen 14% des Fahrzeugbestandes mit LPG betrieben wurden.

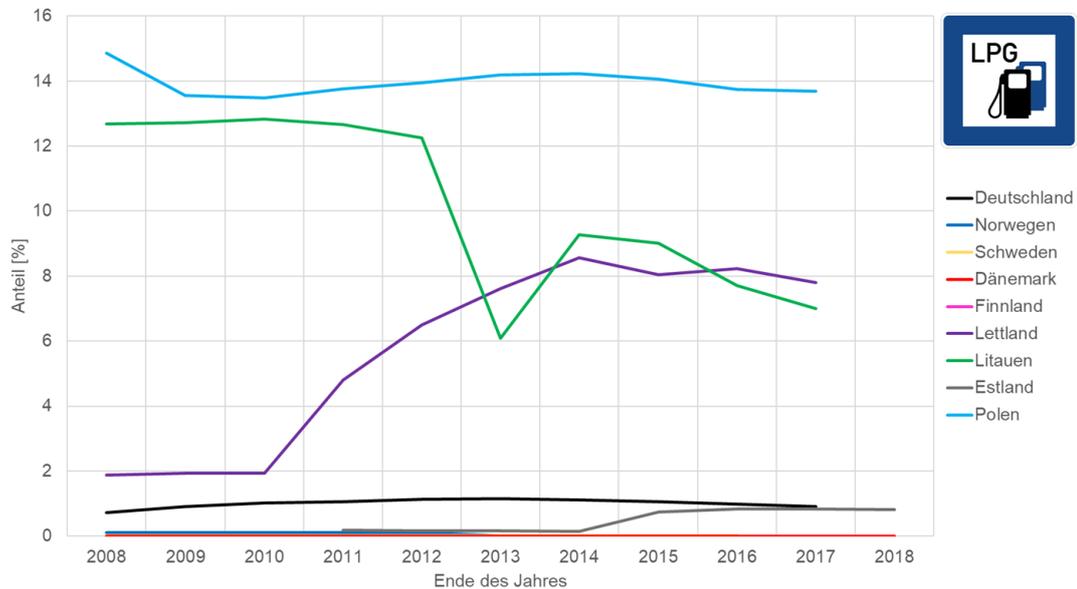


Abbildung 11: Prozentualer Anteil von LPG-Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018

Betrachtet man die Entwicklung der Anzahl an zugelassenen Fahrzeugen wird deutlich, dass Deutschland den größten Bestand an Fahrzeugen besitzt, gefolgt von Polen wobei dieser weiterhin in allen Ländern tendenziell steigt (Abbildung 12).

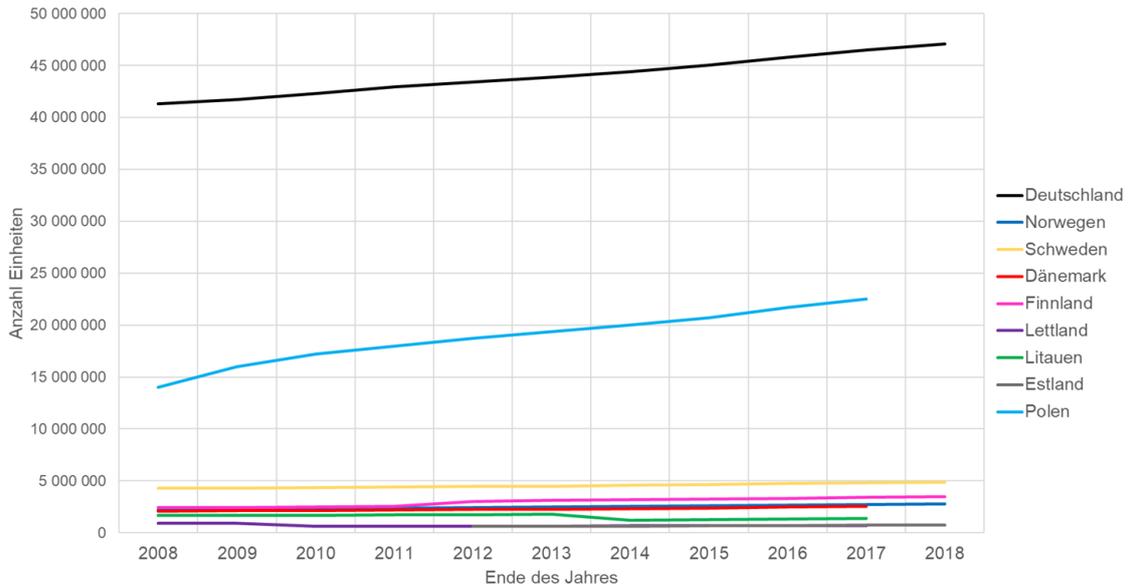


Abbildung 12: Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainerstaaten in den Jahren 2008 bis 2018

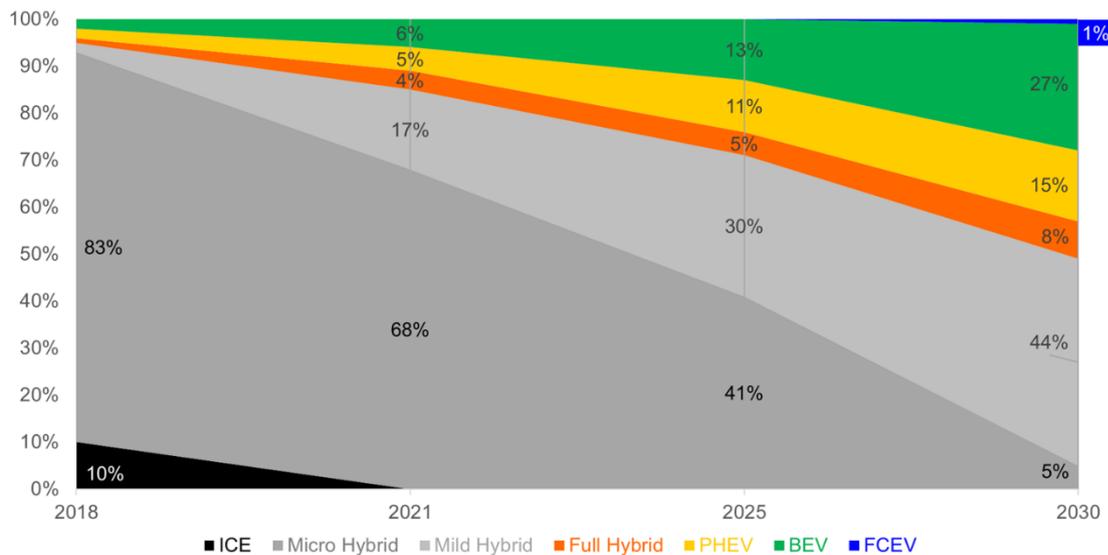


Abbildung 13: mögliche Entwicklung der Neuzulassungen in der EU [14] 29

Abbildung 13 zeigt eine mögliche Entwicklung der Neuzulassungen in Europa. Die Fahrzeugtypen Mild Hybrid, Voll Hybrid, PHEV, BEV und FCEV verfügen alle über eine Traktionsbatterie die zur Speicherung und Bereitstellung eines Anteiles beziehungsweise der gesamten Antriebsenergie dienen. Hierbei ist zu erkennen das sich der Anteil der Fahrzeuge die über eine Traktionsbatterie verfügen deutlich erhöhen wird. Wasserstoffbetriebene

²⁹ Datenquelle: FEV

Brennstoffzellenfahrzeuge spielen nach dieser Studie jedoch auch 2030 mit 1% Anteil an den Neuzulassungen keine bedeutende Rolle. Um den Anteil der alternativen Antriebe am Gesamtbestand prognostizieren zu können ist es notwendig die jährlichen Neuzulassungen sowie Außerbetriebsetzungen abzuschätzen.

Pkw-Bestand andere Antriebe bis 2040

Tsd. am 31.12.

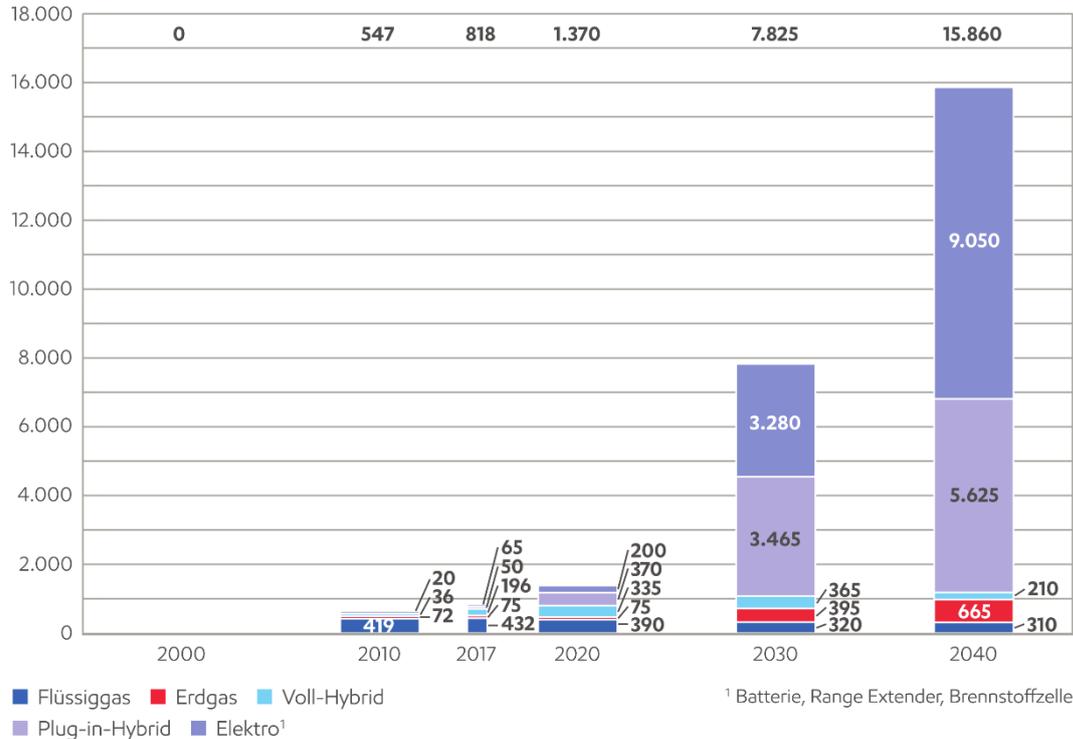


Abbildung 14 Prognose des Fahrzeugbestands in Deutschland bis 2040 [15]

Betrachtet man die Entwicklung des Fahrzeugbestandes wie in Abbildung 14 dargestellt, ist zu erkennen, dass sich die Anzahl alternativ betriebener Fahrzeuge erhöhen wird. Im Jahr 2017 machen die mit Flüssiggas betriebenen Fahrzeuge mit ca. 0,43 Millionen Fahrzeugen den größten Anteil am alternativ betriebenen Fahrzeugbestand aus. Dies wird sich in Zukunft ändern denn der Anteil an Hybriden und BEV wird deutlich zunehmen und somit auch den Anteil der alternativ betriebenen Fahrzeuge am Gesamtbestand bestimmen. Der Bestand an BEV und PHEV zum 1. Januar 2022 betrug 618.460 BEV sowie 1.669.051 PHEV [16]. Dies bestätigt den prognostizierten Trend hin zu alternativen Antrieben.

6 AP 2 Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fährrschiffen

Zur Erfassung der möglichen Gefahren und deren Häufigkeit erfolgte die Bearbeitung des Arbeitspaketes 2, welches diese Fragestellungen behandelt.

6.1 AP 2.2 - Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für Gefahren unter bestimmten Bedingungen an Bord

Zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeiten unter bestimmten Bedingungen an Bord müssen zuerst allgemeine Fragestellungen beantwortet werden. Es stellen sich Fragen wie:

- Wie häufig brennen Fahrzeuge generell?
- Bestehen Abhängigkeiten von bestimmten Parametern?
 - Entwicklung der Brandhäufigkeit in verschiedenen Ländern
 - Brand nach Unfall über Fahrzeugalter
 - Brand bei geparkten Fahrzeugen über Fahrzeugalter
 - Rückrufaktionen über das Fahrzeugalter und deren Auswirkung auf die Brandwahrscheinlichkeit

Zur Klärung dieser Fragen erfolgte eine Literaturrecherche die diese Fragestellungen beantworten soll.

Angaben zur Brandhäufigkeit sind schwer zu vergleichen da ein Brand durch unterschiedliche Quellen unterschiedlich definiert und erfasst werden. So weichen die Angaben von Versicherungen und Feuerwehren deutlich voneinander ab. Versicherungen erfassen typischerweise die Schäden die der Versicherung gemeldet werden, worunter auch kleinste Schäden an Vollkasko versicherten Fahrzeugen erfasst werden, während Schäden an Haftpflicht versicherten Fahrzeugen selten erfasst werden. Feuerwehren hingegen erfassen die Fahrzeugbrände zu denen sie gerufen werden, dementsprechend ist hier die Zahl geringer da hauptsächlich größere Schäden erfasst werden. Aus diesem Grund erfolgt der Vergleich einzelner Parameter aus gleichen Quellen.

Abbildung 15 zeigt die Entwicklung der Brandhäufigkeit in Frankreich, England und den Vereinigten Staaten pro 100.000 Einwohner.

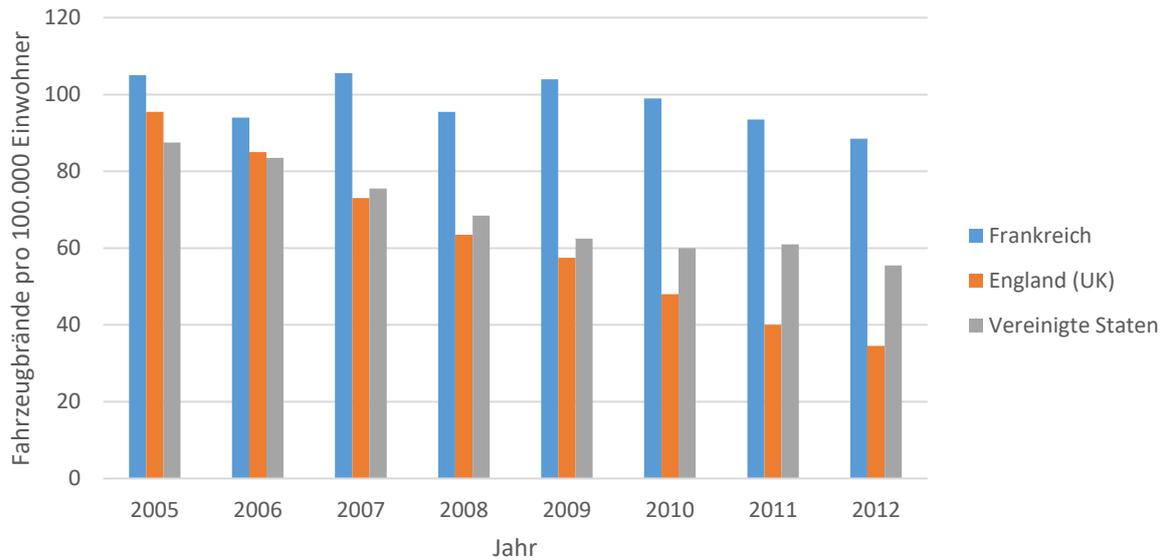


Abbildung 15: Entwicklung der Brandhäufigkeit in unterschiedlichen Staaten in den Jahren 2005 bis 2012 [17]

Hier sind Unterschiedliche Trends zu erkennen. So änderte sich die Brandhäufigkeit in Frankreich im betrachteten Zeitraum nur gering während die Vorfälle in England sowie den Vereinigten Staaten deutlich gesunken sind. Dies macht eine allgemein gültige Aussage wie häufig Fahrzeuge brennen schwierig.

Da der Bestand an alternativ betriebenen Fahrzeugen derzeit noch jung ist erfolgt eine Betrachtung des Einflusses des Fahrzeuges auf die Brandwahrscheinlichkeit.

Betrachtet man die Brandwahrscheinlichkeit eines Fahrzeuges nach einem Unfall in Abhängigkeit des Fahrzeugalters, welche in Abbildung 16 dargestellt ist, ist zu erkennen, dass sich das Brandrisiko von einem Neuwagen zu einem über 8 Jahre alten Fahrzeug verdoppelt.

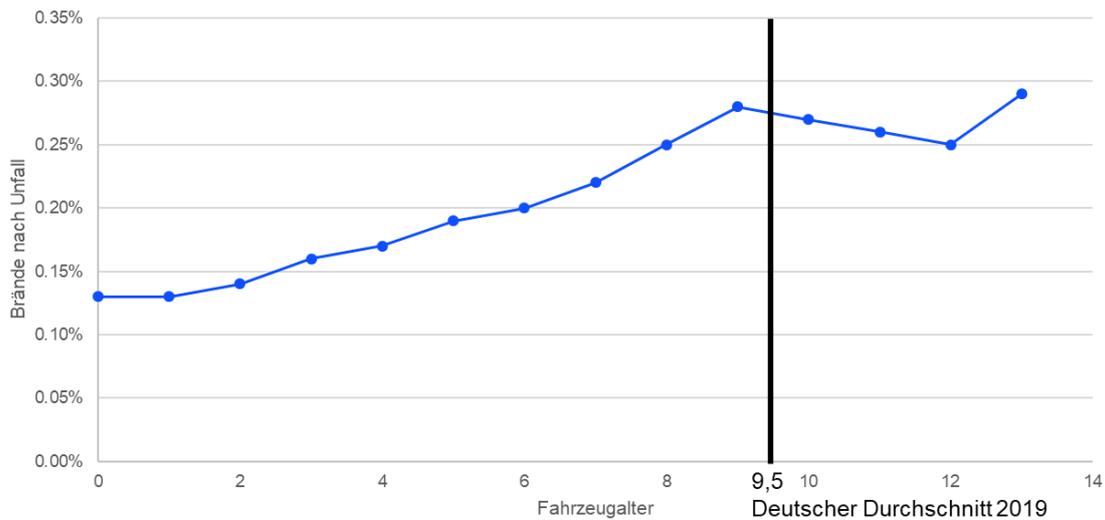


Abbildung 16: Brandwahrscheinlichkeit nach Unfall in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [18]

Interessant ist diese Angabe auch in Bezug auf das durchschnittliche Fahrzeugalter in Deutschland im Jahr 2019, welches bei 9,5 Jahren lag.

Da sich die Fahrzeuge auf der Fähre nur während dem be- und entladen bewegen lässt sich die Brandwahrscheinlichkeit besser mit dem in einem Parkhaus vergleichen. Hierzu gab es eine Studie zu Bränden in Neuseeländischen Parkhäusern. Abbildung 17 zeigt die Gegenüberstellung der Anteile am Fahrzeugbestand (Neuseeland) und deren Anteil an Bränden in Parkhäusern über das Fahrzeugalter.

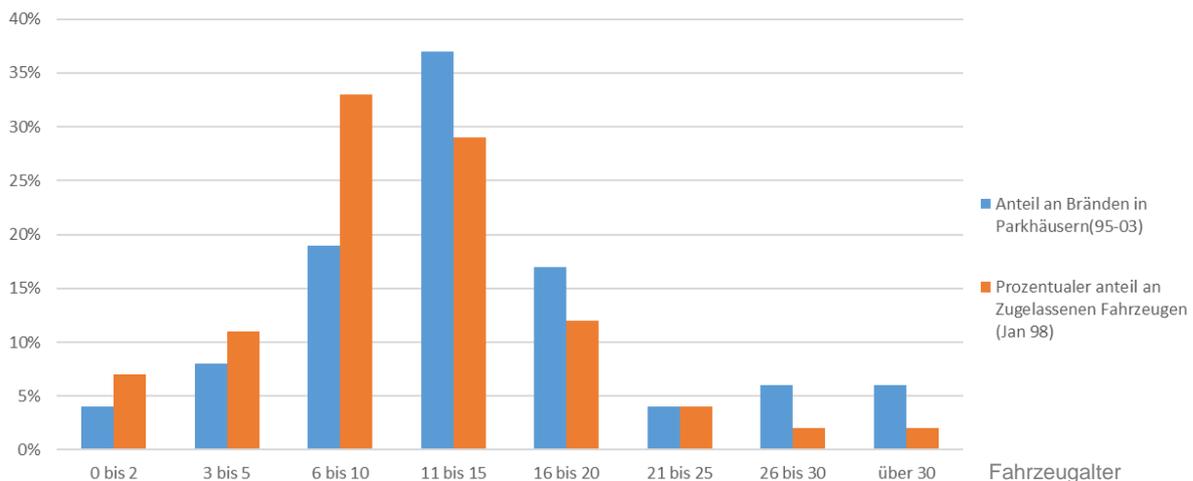


Abbildung 17: Gegenüberstellung Fahrzeugalter und Anteil an Bränden in Parkhäusern [19] [20]

Hier ist ebenfalls zu sehen das die Fahrzeuge mit einem Alter über 11 Jahren überproportional zum Anteil am Bestand an Bränden beteiligt waren.

Anhand dieser Studien [19] / [20] zur Brandhäufigkeit in Parkhäusern kann zuerst die Häufigkeit eines Brandes konventioneller Fahrzeuge abgeschätzt werden. Hieraus geht hervor das bei einem Fahrzeugbestand von 2,6 Mio. Fahrzeugen durchschnittlich 12,6 Fahrzeuge pro Jahr in Parkhäusern brennen. Dies würde eine Wahrscheinlichkeit von $4,8E-6$ pro Fahrzeug bedeuten, wobei nur 0,37% aller Fahrzeugbrände in Parkhäusern stattfanden. Nutzt man die Anzahl an Parkbesuchen (~70 Millionen) als Bezug erhält man eine Wahrscheinlichkeit von $1,7E-7$ pro Einfahrt für Brände von konventionellen Fahrzeugen was bedeutet, dass es statistisch jede 5,5 Millionen Parkhausbesuche zu einem Brand kommt.

Betrachtet man nun als Beispiel für AbF ein mit Erdgas (CNG) betriebenes Fahrzeug können die in Abbildung 18 dargestellten Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Schadensszenarien abgeschätzt werden.

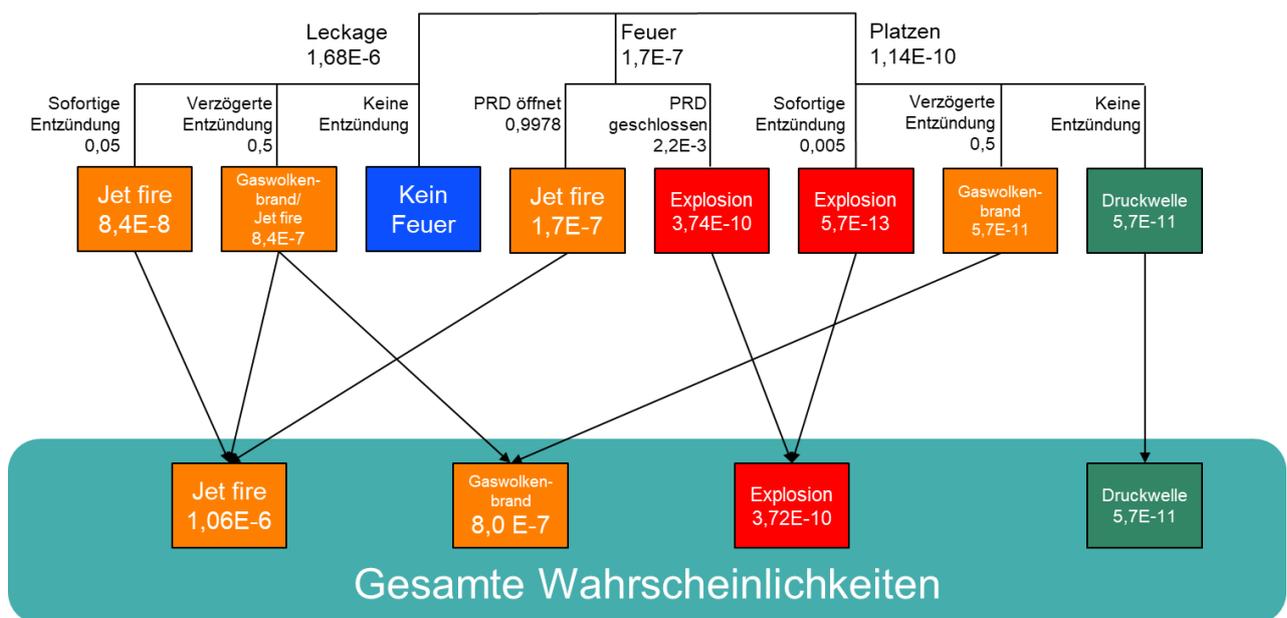


Abbildung 18 Eintrittswahrscheinlichkeiten CNG Fahrzeug (Datenquelle: [21])

Als Quelle für diese Daten dient die Studie „2014 International Symposium on Safety Science and Technology; Safety aspects of CNG cars“ [21]. Nach dieser lassen sich auch die in Tabelle 9 dargestellten Schadenswahrscheinlichkeiten ableiten.

	CNG	LPG	Benzin
Jet fire	1.06E-06	6.60E-05	0
Flüssigkeitsbrand	0	9.70E-07	1.10E-06
Gaswolkenbrand	8.00E-07	6.40E-05	8.00E-07
Gasexplosion	3.72E-10	2.20E-06	0
Druckwelle	5.70E-11	0	0
Feuerball	0	1.40E-08	1.70E-07
BLEVE	0	1.40E-06	0

Tabelle 9: Schadenswahrscheinlichkeiten von CNG, LPG und Benzin (Datenquelle: [21])

Diese Aufstellung zeigt das sich Benzin und CNG Fahrzeuge hinsichtlich der Schadenswahrscheinlichkeit ähnlich verhalten und somit die CNG Fahrzeuge zu keiner Erhöhung der Schadenswahrscheinlichkeit führen. Für LPG Fahrzeuge existieren mehr Schadensverläufe die teilweise auch mit höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten verbunden sind wodurch durch diese Fahrzeuge die Wahrscheinlichkeit eines Schadens steigt. Erwähnenswert ist jedoch, dass diese Studie von einer hohen Wahrscheinlichkeit für das Versagen des 80% Füllstopps ausgeht wodurch sich die Wahrscheinlichkeiten für Brände erhöht. Aus [20] geht auch hervor das die ersten 15 Minuten bei konventionellen Fahrzeugen entscheidend für die Wahrscheinlichkeit eines Brandes sind, da nach dieser Zeit die heißen Fahrzeugkomponenten abgekühlt sind und sich die Wahrscheinlichkeit eines Brandes verringert. Dieses Verhalten ist nicht auf rein Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) direkt übertragbar, da hier weniger / keine Teile mit hohen Temperaturen nach dem Abstellen zu erwarten sind.

Um auch andere Einflüsse wie konstruktive Probleme und deren Auswirkungen über das Fahrzeugalter zu bewerten erfolgt die Darstellung (Abbildung 19) einer Studie [22] zu diesem Verhalten. Diese Abbildung zeigt, dass mit steigendem Fahrzeugalter sowie mit Vorhandensein einer brandbezogenen Rückrufaktion ein höheres Schadensaufkommen eintritt. Hierbei wird das Fahrzeugalter auf das Modelljahr und das aktuelle Jahr bezogen. Da neue Modelljahre teilweise bereits im Vorjahr eingeführt werden (Beispiel: Modelljahr 2019 wird Q3 2018 eingeführt), ist es möglich das in dieser Darstellung Schäden bei einem Alter von -1Jahr auftreten können.

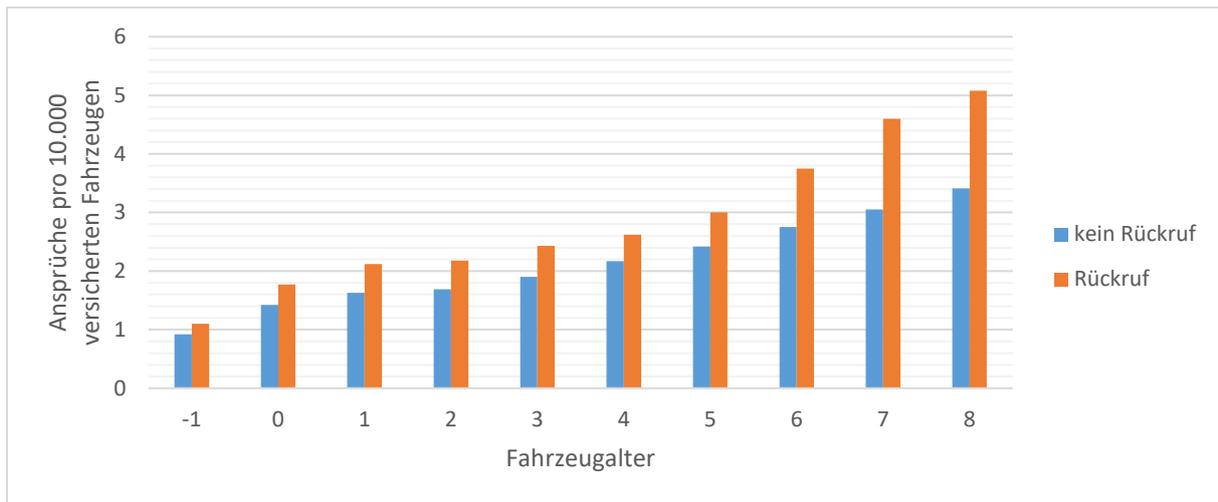


Abbildung 19: Brandschäden über Fahrzeugalter mit und ohne brandbezogenen Rückruf [22]

So lässt sich zusammenfassen, dass das Brandverhalten von Fahrzeugen zwar erfasst, die Umfänge sowie Auslöser jedoch nur bedingt vergleichbar sind. Ebenso lässt sich ein deutlicher Einfluss des Fahrzeugalter auf die Brandwahrscheinlichkeit feststellen, wodurch die derzeit bestehenden Daten zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auch aufgrund des noch jungen Fahrzeugbestandes geringe Brandwahrscheinlichkeiten aufweisen.

6.2 AP 2.5 Ableitung eines Schutzkonzeptes nach strukturierten Prioritäten

Durch die von Benzin abweichenden Eigenschaften alternativer Kraftstoffe entstehen abweichende Anforderungen an die Sicherheitssysteme an Bord.

Hierbei erfolgt die Betrachtung von Ethanol, LPG, CNG, LNG und H₂.

6.2.1 Ethanol:

Ethanol ist wie Benzin bei Raumtemperatur flüssig und kann daher auch so getankt und gespeichert werden. Ethanol besitzt eine leicht geringere Verdampfungstemperatur (78,5°C) gegenüber Benzin (35 - 250°C) jedoch auch einen geringeren Heizwert. Durch diesen geringeren Heizwert ist die freigesetzte Energie bei gleicher Schadensgröße geringer als bei Benzin wodurch davon ausgegangen werden kann, dass die schiffseitige Löschanlage eine Ausbreitung des Feuers vermeiden kann.

6.2.2 LPG:

LPG ist schwerer als Luft und sinkt somit zu Boden. Hier kann es sich wie Benzin in Vertiefungen ansammeln. Durch die Zumischung eines Duftstoffes können selbst geringe Mengen austretenden Gases auch von Laien am typischen Gasgeruch erkannt werden. Für die Erfassung mittels Sensoren sollten diese am Boden angebracht sein da das Gas absinkt.

6.2.3 CNG:

Da CNG leichter als Luft ist steigt diese bei entweichen aus dem Tank nach oben. Daher sollten Sensoren die ausweichendes CNG detektieren sollten an der Decke angebracht werden. Auch dieses Gas ist mit einem Duftstoff versetzt der dem Gas den typischen Gasgeruch verleiht. So kann auch austretendes CNG von Passagieren und Besatzung ohne Hilfsmittel erkannt werden.

6.2.4 LNG:

Bei LNG handelt es sich um flüssiges Erdgas. Hierzu wird das Erdgas auf eine Temperatur zwischen -161 und -167°C abgekühlt. Abhängig vom Füllstand und der Tankisolierung steigt der Druck im Tank während der Stillstandszeit. Um den Druck innerhalb des Tanks zu reduzieren muss das verdampfte Gas abgelassen werden. Dieses Boil-off-Gas wird somit immer in gasförmiger Form abgelassen und entspricht damit einer kurzzeitigen CNG-Leckage. Treten große Mengen LNG in flüssiger Form aus bestehen die Gefahren von Erfrierungen und Erstickten durch Sauerstoffverdrängung. Ein Teil des austretenden LNG verdampft bei typischen Umgebungstemperaturen sofort weshalb eine Sensorpositionierung an der Decke, wie bei CNG, ausreichend ist.

6.2.5 H₂:

Wasserstoff ist ebenfalls leichter als Luft und steigt somit wie CNG nach oben. Die Sensorik zur Erfassung von Wasserstoff sollte daher ebenfalls oben angebracht werden. Da Wasserstoff geruchslos ist und auch kein Duftstoff beigemischt werden kann, ist dieses Gas für den Menschen nicht ohne Hilfsmittel erkennbar. Im Falle eines Wasserstoffbrandes besteht eine zusätzliche Gefahr in der bei Tageslicht kaum sichtbaren Flamme, weshalb eine Wärmebildkamera zur Verfügung stehen sollte um das Vorhandensein von Flammen zu überprüfen. Bei vorhandenen Flammen sollten diese, wenn möglich nicht gelöscht werden. Durch kühlen der Umgebung sollte eine Ausbreitung jedoch vermieden werden.

7 AP 3 Boarding-Konzept

AP 3 beschäftigt sich mit einem erweiterten Boarding-Konzept in dem bereits die Antriebsart eines Fahrzeuges erfasst und diese entsprechend in ein Planungstool übertragen wird. So wird die Arbeit der Ladeoffiziere an Bord erleichtert und es kann auf spezielle Anforderungen unterschiedlicher Antriebsarten eingegangen werden.

7.1 AP 3.3 Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord

Zur Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord wird auf die Fragestellung der Übertragbarkeit bereits bestehender Anforderungen an Land eingegangen. Bei der Betrachtung von AbF an Land und deren Stellplätze wird erkennbar, dass unbeschädigte AbF meist wie konventionelle Fahrzeuge behandelt werden.

Ausnahmen sind:

- Parkhäuser / Tiefgaragen: Hier kann der Eigentümer regeln welche Fahrzeuge zugelassen sind. Bis Mitte der 1990er waren Gasfahrzeuge in verschiedenen Bundesländern des Typs CNG und / oder LPG durch die jeweilige Garagenverordnung in Tiefgaragen und Parkhäusern verboten.
- Beschädigte AbF: Sind Gasfahrzeuge verunfallt oder verlieren durch einen technischen Defekt Gas, so dürfen diese nichtmehr in geschlossenen Räumen abgestellt werden. Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge gilt ebenfalls, dass diese nach einem Unfall nicht in geschlossenen Räumen abgestellt werden dürfen.

Um möglichst ideale Stellplätze für die verschiedenen AbF zu ermitteln, werden die Anforderungen der einzelnen Antriebsarten dargestellt und daraus geeignete Stellplätze definiert.

Elektro Fahrzeuge:

Bei Elektrofahrzeugen muss zwischen dem einfachen Transport und einem Transport mit laden der Traktionsbatterie unterschieden werden. Wird das Elektrofahrzeug nur transportiert sind die Hauptanforderungen des Fahrzeugs eine möglichst konstante Umgebungstemperatur (ideal 25°C). Deshalb wird vorgeschlagen Elektrofahrzeuge innerhalb geschlossener Decks zu transportieren um diese vor Witterungseinflüssen zu schützen. Sollte es zu einem Brand eines Elektrofahrzeuges kommen muss davon ausgegangen werden, dass der Brand nicht vollständig gelöscht werden kann und immer wieder neu ausbricht. Aus diesem Grund sollte sich zwischen den Fahrzeugen genügend Platz befinden um Raum für Löscharbeiten zu

haben und durch die größere Distanz eine Ausbreitung zu verhindern. Elektrofahrzeuge die geladen werden sollten benötigen spezielle Stellplätze die über einen Stromanschluss verfügen. Zudem muss am Stellplatz der für das Fahrzeug passende Ladestecker bereitgestellt werden. Das Kabel, das zur Ladung verwendet wird, und damit auch der Abstand zwischen Fahrzeug und Ladepunkt bestimmt, sollte möglichst kurz und über einen speziellen Fahrzeugladestecker (Keine Haushaltssteckdose bzw. CEE) fest am Schiff angeschlossen sein. Hiermit kann eine Zweckentfremdung vermieden werden und die Gefahr von Schäden sinkt. Die Steuerung der Ladesäule sollte mit dem Schiffsinformationsnetz verbunden sein um mögliche Störungen melden zu können. Die Position des Stellplatzes mit Ladesäule sollte so gewählt sein das durch die Ladekabel keine Wege versperrt werden und die Ladesäulen vor Beschädigung möglichst geschützt werden (nicht in Bereichen an denen Fahrzeuge beim Rangieren leicht anstoßen). Zusätzlich können diese Ladeplätze mit erweiterter Überwachung wie Wärmebildkameras sowie verstärkter Löscheinrichtung ausgerüstet werden.

LPG Fahrzeuge:

Da LPG schwerer als Luft ist sinkt dieses zu Boden und kann sich ansammeln. Um die Bildung eines zündfähigen Gemisches (1,5 bis 11 Vol.%) zu vermeiden wird eine hohe Lüftungsrate vorgeschlagen. Aus diesem Grund würden sich offene bzw. teiloffene Decks für LPG Fahrzeuge besonders eignen. Da hier der natürliche Luftwechsel die Konzentration des Gas-Luft-Gemisches soweit absenken kann das es nicht zu einer Verbrennung bzw. einer Explosion kommt. Diese schnelle und hohe Verdünnung macht die Detektion eines Gasaustrittes auf offenen oder teiloffenen Decks sehr schwierig. Sollten Gasfahrzeuge in geschlossenen Decks transportiert werden, könnte eine Gasdetektion bei minimaler Luftwechselrate genutzt werden. Erkennt diese Detektion einen Anstieg der Gaskonzentration kann eine Warnung ausgelöst und die Lüftung des betroffenen Decks auf maximalen Lüftungsdurchsatz hochgefahren werden um eine hohe Verdünnung des zu erreichen. Hierdurch könnte auch im geschlossenen Deck die Gefahren durch austretendes LPG verringert werden.

CNG Fahrzeuge:

Durch die Eigenschaft des CNG in der Luft nach oben zu steigen ist bei CNG Fahrzeugen der Deckenbereich der Gefahrenbereich in dem sich ein zündfähiges Gemisch (4,4 bis 17 Vol.%) ansammeln kann. Aus diesem Grund wird auch für CNG Fahrzeuge vorgeschlagen diese auf dem offenen Deck zu transportieren. Hier verdünnt sich das austretende Gas schnell mit der Luft, steigt nach oben auf und kann sich so nicht zu großen, zündfähigen Gemisch Wolken ansammeln. Auch hier kann die wie bereits bei den LPG Fahrzeugen beschriebene Strategie

aus Detektion und Lüftung verwendet werden um CNG Fahrzeuge sicherer auf geschlossenen Decks zu transportieren.

Wasserstofffahrzeuge:

Auch Wasserstoff ist leichter als Luft und steigt deshalb nach oben an. Wie bei den, in den vorigen Abschnitten beschriebenen, Gasfahrzeugen LPG und CNG wird auch hier eine möglichst schnelle Vermischung mit der Umgebungsluft und dadurch die Absenkung der Konzentration unter die Explosionsgrenzen (4 bis 77 Vol.%) angestrebt. Spricht eine Druckentlastung eines Wasserstofftanks an entsteht fast immer umgehend eine Jetflamme da die zur Entzündung des Gemisches notwendige Energie sehr gering ist und bereits die statische Aufladung durch das Ausströmen ausreichen kann um das Gemisch zu zünden. Sollte sich das Gemisch nicht entzünden besteht die Gefahr einer Explosion, weshalb auch diese Fahrzeuge auf dem offenen Deck abgestellt werden sollten um die Ansammlung großer explosionsfähiger Gemische zu vermeiden.

So lässt sich zusammenfassen das alle Gasfahrzeuge bevorzugt auf ein offenes bzw. teiloffenes Deck gestellt werden sollten. Müssen Gasfahrzeuge auf ein geschlossenes Deck gestellt werden sind LPG und CNG dort vor Wasserstoff Fahrzeugen unterzubringen.

Batterie elektrische Fahrzeuge sollten geschützt auf geschlossenen Decks untergebracht werden. Wird beabsichtigt das Fahrzeug zu laden muss dies an speziellen Positionen erfolgen

8 AP 4 Der sichere Transport

Das Arbeitspaket 4 beschäftigt sich mit dem sicheren Transport von AbF an Bord von RoRo-Fährschiffen. Hierzu wurden die bestehenden gesetzlichen Vorschriften analysiert und die derzeit auf den Ostseefähren vorhandenen Sicherheitseinrichtungen erfasst. Zur Verbesserung der Detektion neuer möglicher Gefahren erfolgte die Entwicklung effizienter Detektionsverfahren sowie die Anpassung der Brandmeldetechnik. Um bei ausgelöstem Alarm auch entsprechend der Situation reagieren zu können erfolgte ebenfalls die Konzeption einer angepassten Brandschutztechnik sowie eines Sicherheits- und Evakuierungssystems. Die Aufgabe des FKFS in diesem Arbeitspaket war die Bereitstellung von Fahrzeugen für die Prüfung der Konzepte.

8.1 AP 4.7 Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheits-Konzeptes für abF-Stellplätze an Bord und Umsetzung als Demonstrator an Bord

Zur Überprüfung des Überwachungskonzeptes des Projektpartner GTE, welches in Abschnitt 9.3 beschrieben wird, wurden 3 unterschiedliche elektrisch angetriebene Fahrzeuge untersucht. Überwacht wurde die Oberflächentemperatur der Traktionsbatterie mittels Wärmebildkamera sowie eine mögliche Wasserstoff Emission während des Ladevorgangs. Die untersuchten Fahrzeuge und eine Auswahl deren technischer Daten sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Fahrzeugübersicht Ladeversuche

Fahrzeug	Batteriekapazität	Reichweite	Motorleistung	Ladeanschlüsse
Mercedes B250e	28 kWh	155 km	132 kW	Typ 2
Citroen C-Zero	14,5 kWh	100 km	49 kW	Typ 1 / CHAdeMO
Nissan Leaf e+	62 kWh	385 km	160 kW	Typ 2 / CHAdeMO

Beim Ladevorgang des Citroen C-Zero wurde ein Haushaltssteckdosen Ladekabel (ICCB – In-Cable Control Box) verwendet. Hierdurch wurde mit einer maximalen Leistung von 2,3 kW (230 V 10 A 1P) geladen. Über eine 1,5 Stündige Ladephase war ein Anstieg der Oberflächentemperatur von ca. 7 K feststellbar. Die Messung der Wasserstoffkonzentration erfolgte in der Nähe des rechten Vorderrades im Kotflügel. Hier schwankte die Messung um ca. 0,1 ppm was als nicht signifikant einzustufen ist.

Der Ladevorgang des Mercedes B250e erfolgte ebenfalls über das fahrzeugseitige On-Board Ladegerät. Dieses Fahrzeug ermöglichte jedoch eine maximale Ladeleistung von 11 kW (400 V 16 A 3P) wobei sich die Oberflächentemperatur der Batterie über den 2 stündigen Ladevorgang um ca. 3 K erhöhte. Hier erfolgte die Messung der Wasserstoffkonzentration im

rechten Radlauf des Hinterrades, wobei auch hier nur eine Schwankung um 0,1 ppm gemessen wurde die ebenfalls als nicht signifikant einzustufen ist.

Das dritte Fahrzeug, ein Nissan Leaf e+, wurde mittels einer DC-Schnellladesäule geladen. Abbildung 20 zeigt den Verlauf des Ladevorganges aus elektrischer Sicht (Spannung, Strom, Leistung und Energie), so lässt sich erkennen, dass in der Anfangsphase mit einer Ladeleistung von ca. 50 kW geladen wurde und die Ladeleistung ab einem bestimmten Ladezustand abnimmt. Der Ladevorgang wurde bei 26% SoC (State of Charge) gestartet und bei einer Abnahme der Ladeleistung auf unter 20 KW, bei ca. 86% SoC abgebrochen.

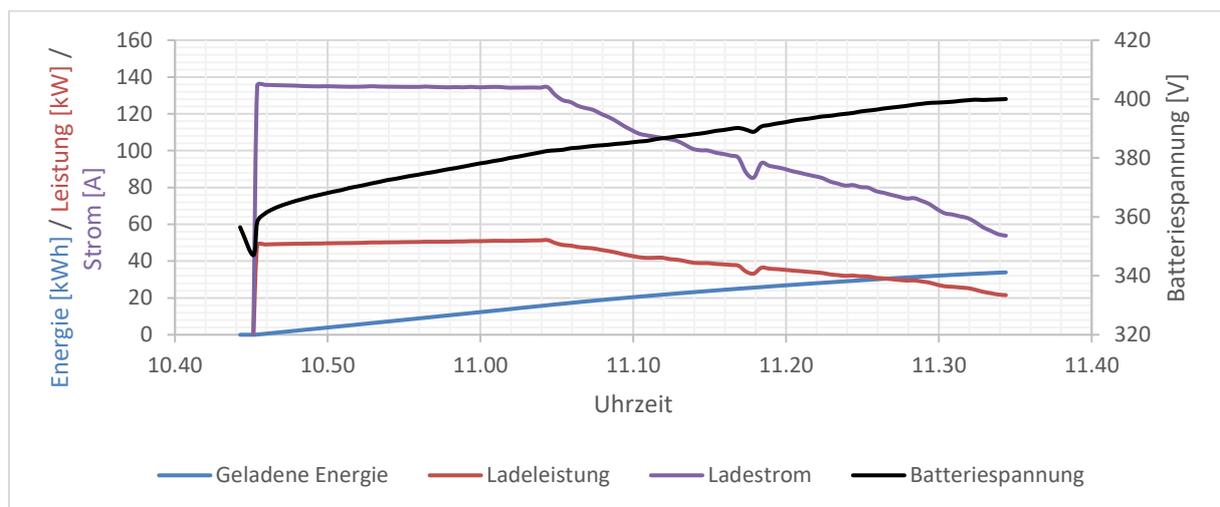


Abbildung 20: Ladeversuch Nissan Leaf e+ Temperaturüberwachung mittels IR-Kamera

Während diesem Ladevorgang wurde die wärmste Fahrzeugkomponente mit 5 K über Umgebungstemperatur gemessen. Im Vergleich dazu erreichte die Abluftseite der Ladesäule eine Temperatur von 30 K über Umgebungstemperatur.

Diese Versuche haben ebenfalls gezeigt, dass die Messung über die Reflexion der Wärmestrahlung über eine Stahlplatte möglich ist. Jedoch wiesen alle Fahrzeuge eine Kunststoffverkleidung des Unterbodens auf, welche zur Durchführung der Versuche demontiert waren, da sonst keine Erfassung der Oberflächentemperatur mittels Wärmebildkamera möglich gewesen wäre. Diese Verkleidungen stellen für alle Messverfahren eine Herausforderung dar. Bei der AC Ladung ist erkennbar dass sich die Leistungselektronik (Ladegerät) merklich erwärmt. Unabhängig ob der Ladevorgang über AC oder DC erfolgt ist eine Erhöhung der Temperatur des Ladekabels feststellbar. Hieraus lässt sich ableiten dass für die untersuchten Fahrzeuge eine Überwachung der Temperatur prinzipiell möglich ist. Ein Informationsabgriff aus dem BMS jedoch schneller und genauere Daten liefern könnte.

Zusätzlich wurde festgestellt, dass während des Ladevorganges der Ladestecker verriegelt wird und somit das Fahrzeug im Notfall nicht immer einfach getrennt und weggefahren werden kann.

9 AP 5 Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge

Das Arbeitspaket 5 beschäftigt sich mit den Anforderungen, Gefahren und notwendigen Abläufen um ein Laden von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen (z.B. BEV und PHEV) zu ermöglichen.

9.1 AP 5.1 - Untersuchung zu möglichen Gefahren beim Laden infolge der besonderen Bedingungen an Bord

Durch die Trennung von Batterie und Versorgungsnetz durch die Ladeeinrichtung besteht bei einer geeigneten Ladeeinrichtung kein höheres Risiko wie bei Ladevorgängen an Land. So haben Spannung und Frequenz des Bordnetzes keinen Einfluss auf die Spannung und den Ladestrom des Akkus, solange sich diese innerhalb der Vorgaben des Ladegeräteherstellers bewegen. Zudem wird der Ladevorgang über das Batteriemanagement überwacht, welches im Falle einer Funktionsstörung der Ladeeinrichtung, die eine zu hohe Ladespannung zur Folge hätte, einen Abbruch des Ladevorganges anfordert oder die Batterie vom restlichen Fahrzeugnetz trennt. Bei einer genaueren Untersuchung welche Einflüsse wo verhindert werden, müssen AC und DC Ladevorgänge getrennt betrachtet werden.

Bei der AC-Ladung erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie innerhalb des Fahrzeuges. Weshalb hier eine Abschaltung bei einer Abweichung von den Fahrzeugherstellervorgaben erfolgen kann.

Im Falle einer DC-Ladung erfolgt die Umwandlung der Wechselspannung des Bordnetzes in Gleichspannung außerhalb des Fahrzeuges. Hierbei besteht eine Verbindung von der Batterie nach draußen zum Ladegerät. Das Fahrzeug kommuniziert vor und während des Ladevorganges seine Ladeanforderungen an das Ladegerät, welches die erforderliche Spannung und Strom bereitstellt. Weichen die angeforderten und die fahrzeugseitig gemessenen Werte zu weit voneinander ab, bricht das Fahrzeug den Ladevorgang ab um die Batterie und das Hochvoltsystem zu schützen.

Betrachtet man die mechanischen Anforderungen durch den Transport und den Ladevorgang eines batterieelektrischen Fahrzeuges an Bord könnten Beeinflussungen durch die auftretenden Vibrationen, Bewegung des Fahrzeuges bei starkem Wellengang (Schiffsbewegung) und die Feuchte bzw. salzhaltige Luft auftreten.

Vibrationen treten auch im normalen Fahrbetrieb eines Fahrzeuges auf, weshalb die Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen nach ECE-R100 einem Vibrationstest unterzogen werden müssen. Gegen das Laden eines Fahrzeugs während es Vibrationen ausgesetzt ist,

konnten keine Einwände gefunden werden, da Fahrzeuge zum Beispiel bei einer Bergabfahrt mit hohen Leistungen rekuperieren und so ihren Akku ebenfalls laden. Deshalb muss dieser Vorgang auch durch den Hersteller abgesichert sein. Die einzige Komponente, die beim normalen Ladevorgang / Betrieb keinen Vibrationen ausgesetzt ist, ist die Steckverbindung zwischen Fahrzeug und Ladesäule. Diese Steckverbindung ist jedoch nach den „Testanforderungen der deutschen Fahrzeughersteller“ (LV124 / LV214) einem Vibrationstest zu unterziehen. Dieser Vibrationstest erfolgt im gesteckten Zustand in 3 Richtungen mit unterschiedlichen Frequenzen. Es ist davon auszugehen, dass alle Fahrzeughersteller ähnliche Anforderungen an diese Steckverbindung stellen und damit auch diese für den Einsatz auf dem Schiff geeignet sind.

Das Laden bei starkem Wellengang birgt die Gefahr, dass sich das Fahrzeug relativ zur Ladesäule bewegt, wodurch das Kabel beschädigt werden kann. Abgesichert wird dieses Risiko durch Sollbruchstellen in der Verkabelung zwischen Ladesäule und Fahrzeug, sowie einer Überwachung des Kabels, welche bei Beschädigung des Kabels den Ladevorgang unterbricht und das Kabel spannungslos schaltet. Zusätzlich werden die Fahrzeuge bei schlechtem Wetter gesichert (verzurt), wodurch eine Relativbewegung zwischen Ladesäule und Fahrzeug verhindert wird. Es wird jedoch empfohlen, bei schlechten Bedingungen auf einen Ladevorgang zu verzichten, um diese Problematik komplett auszuschließen, da trotz der Abschaltung des Ladevorganges für kurze Zeit ein Lichtbogen auftreten kann.

Durch den Betrieb der Fahrzeuge im Winter, bei gesalzene Straßen kann auch hier angenommen werden, dass alle Serienfahrzeuge geeignet sind, auch auf einem Schiff, bei feuchter, salzhaltiger Luft geladen zu werden. Sollte sich während des Ladevorganges durch die feuchte, salzhaltige Luft ein leitfähiges Medium zwischen den Kontakten der Steckverbindung bilden, wird dieses durch den optionalen Isolationswächter des Fahrzeuges (nicht verpflichtend und deshalb in Sonderumbauten selten verbaut) oder durch den Fehlerstromschutzschalter der Ladeeinrichtung erkannt und der Ladevorgang abgebrochen.

Notwendige Änderungen am Bordnetz des Schiffes:

Das Bordnetz der betrachteten Fähren unterscheidet sich von dem an Land üblichen 230 / 400 V 50 Hz TN- oder TT-Netz. So beträgt die Netzspannung 440 V / 60 Hz bei einer Netzausführung in IT-Schaltung (Kein Nullleiter / Keine Schutzerdung des Transformators). Diese Randbedingungen machen es notwendig, einen Trenntransformator zu verwenden, der es erlaubt ein separates Netz mit 230 V 50 Hz inklusive Nullleiter und Schutzerdung bereitzustellen. Dies ist notwendig, um Elektrofahrzeuge zuverlässig laden zu können. Denn bei der Verwendung der internen Ladeeinrichtung oder der Überprüfung des

Isolationswiderstandes vor dem Beginn der DC-Ladung mittels externem Ladegerät ist die Verbindung mittels Schutz- und Nullleiter notwendig. Die Auswahl eines geeigneten Trenntransformators erfolgt durch den Schiffselektriker in Rücksprache mit dem Ladesäulenhersteller.

Sonderumbauten oder manipulierte Fahrzeuge können sich anders als erwartet verhalten, weshalb diesen Fahrzeugen das Laden nicht gestattet werden sollte.

9.2 AP 5.2 Ermittlung geeigneter Ladeorte an Bord

Die Aufgabe des FKFS in diesem Teil Arbeitspaket war es die Ergebnisse dieses Teilarbeitspaketes zu einem Strukturierten Ladeplatzkonzept zusammenzufassen.

So lassen sich die Ergebnisse aus AP 5.2 in folgende drei Hauptkategorien (mit den entsprechenden Untergruppen) aufteilen:

1. Absicherung des Ladeplatzes:
 - Sensorik / Überwachung
 - Umgebungsbedingungen für Sensorik
 - Umgebungsbedingungen für Ansaugsystem
 - Mechanische Belastung (nicht in Hauptfahrwegen, nicht an Engstellen)
 - Nicht in sicherheitskritischen Bereichen (Fluchtwege, Treppenhäusern und sonstige sicherheitskritischen Einrichtungen)
2. Versorgung mit notwendiger Infrastruktur (Strom, Schiff-Informationsnetzwerk)
 - Nähe zu Versorgungsknoten (Strom, Netzwerk)
 - Platz zur Unterbringung des notwendigen Trenntrafo
3. Akzeptanz von Reederei und Kunden
 - Klare Kennzeichnung / Flexibilität
 - Special needs Kunden
 - VIP Kunden
 - Late Check-in / Early Check-out

Diese einzelnen Anforderungen sollen kurz erläutert werden und der erarbeitete Vorschlag aufgezeigt werden. Die möglichen Ladeorte lassen sich grob in folgende Kategorien einteilen:

- Wetter-Deck (Deck an dem kein Schutz gegen Umwelteinflüsse besteht)
- Offenes Deck (Deck welches einen gewissen Schutz vor Umwelteinflüssen bietet; überdachte, jedoch seitlich offene Flächen)
- Geschlossenes Deck (geschützt vor Umwelteinflüssen, alle Richtungen durch Schiff von der Umgebung abgetrennt)

Da die Absicherung des Ladeplatzes einen sehr hohen Stellenwert in der Wahl des Ladeortes hat, wird dieser zuerst betrachtet. Aus der Sicht der Sicherheit des Fahrzeuges während des Ladevorganges wird ein Stellplatz in einem geschlossenen Deck empfohlen, um das Fahrzeug vor Temperaturschwankungen zu schützen. Für die Detektion bietet die Einrichtung des Ladeplatzes auf einem geschlossenen Deck auch Vorteile. So werden bei der Überwachung mittels Wärmebildkamera störende Reflektionen der Sonne vermieden und Gaskonzentrationen, die auf eine Havarie hindeuten, werden nicht durch die natürliche Ventilation zu weit verdünnt, um sie erfassen zu können.

Aus diesen Gründen erfolgt die Empfehlung der Einrichtung des Ladeortes auf einem geschlossenen Deck.

Die genauere Auswahl des Ladeortes auf diesem Deck sollte anhand der folgenden Überlegungen erfolgen:

- Der Ladeplatz muss in einem Bereich untergebracht werden, an dem es Montagemöglichkeiten für ein Gas-Ansaugsystem gibt.
- Die Luftströmung am Ladeplatz sollte vom Fahrzeug in Richtung Ansaugrichtung der Sensorik führen, somit soll die Detektion verbessert werden. Führt die Luftströmung am Ladeplatz dazu, dass das austretende Gas nicht die Sensorik erreicht, kann eine mögliche Havarie nicht erkannt werden.
- Der Ladeplatz sollte in einem Bereich untergebracht werden, den nur wenige Passagiere passieren müssen. Dies soll die Stolpergefahr durch die Ladekabel zu den Fahrzeugen verringern.

- Der Ladeplatz sollte in einem Bereich eingerichtet werden, in dem es zu möglichst wenig Verkehr kommt. So soll das Risiko einer Beschädigung der Ladeeinrichtung, des Fahrzeugs und der Verkabelung verringert werden.
- Der Ladeplatz sollte nicht in direkter Umgebung zu sicherheitskritischen Einrichtungen wie Fluchtwegen, Treppenhäusern und sonstigen zu schützenden Bereichen (Farblager, Treibstofflager, wichtige Infrastruktur) eingerichtet werden.
- Der Ladeplatz sollte möglichst nahe an einem Versorgungsknoten eingerichtet werden, um die notwendige Länge der Zuleitungen, und damit das Risiko einer Beschädigung, zu minimieren.
- Der Ladeplatz sollte einen geeigneten Ort zur Unterbringung eines Trenntransformators bieten, der benötigt wird um die Energieversorgung durch das Schiff zu ermöglichen.
- Der Ladeplatz sollte für Kunden durch farbliche Markierung (auch flexible Kennzeichnung mittels LED-Beleuchtung denkbar) als solcher einfach zu identifizieren sein.
- Der Ladeplatz sollte möglichst flexibel nutzbar sein. Zum Beispiel für den Transport von anderen Fahrzeugen bei nicht Benutzung durch ladende Elektrofahrzeuge.
- Der Ladeplatz sollte auch für spät eintreffende Kunden nutzbar sein. Erreichen des Ladeortes auch wenn bereits Fahrzeuge geladen sind (Late Check-in).
- Der Ladeplatz sollte auch die Möglichkeit bieten, das Schiff möglichst früh nach dem Anlegen zu verlassen (Early Check-out).
- Der Ladeplatz muss ausreichend Platz bieten, um auch Personen mit besonderen Bedürfnissen das Ein- und Aussteigen zu ermöglichen (passengers with special needs).
- Der Ladeplatz muss ausreichend Platz bieten, um Fahrzeuge mit der Ladesäule verbinden zu können.
- Der Ladeplatz muss ausreichend Platz bieten, um Löscharbeiten durchführen zu können (zum Beispiel aufstellen des Boundary Cooling Device).

9.3 AP 5.5 Erarbeitung eines abgestimmten Sicherheitskonzeptes für den Lade Standort – Wie sichert man den Ladeplatz ab?

Im Teil-Arbeitspaket 5.5 bestand die Aufgabe des FKFS darin, die zum Thema Sicherheitskonzept für Lade Standorte erarbeiteten Erkenntnisse in einem strukturierten Sicherheitskonzept zusammen zu fassen.

Das erarbeitete Sicherheitskonzept besteht aus den folgenden Teilkomponenten:

- Aktive Sicherung des Ladeplatzes
 - Abschalten der Ladeeinrichtung
 - Löscheinrichtung
 - Dranger / Sprinkler
 - Boundary Cooling Device
 - Löschdecke
- Detektion
 - Gasetektion
 - Temperaturdetektion
- Passive Sicherung des Ladeplatzes
 - Verhinderung der Ausbreitung eines Feuers durch bauliche Maßnahmen

Die Detektion ist notwendig, um auf eintretende Ereignisse entsprechend reagieren zu können. Deshalb wird dieses Thema vorrangig behandelt. Aus vorhergegangenen Versuchen wurde die Erkenntnis gewonnen, dass vor dem thermischen Durchgehen der Zellen einer Antriebsbatterie Wasserstoff freigesetzt wird. Somit kann ein Anstieg der Wasserstoffkonzentration in der Umgebung eines ladenden Elektrofahrzeuges auf eine bevorstehende Havarie hinweisen. Zudem bietet die Temperaturüberwachung des Fahrzeugunterbodens eine weitere Möglichkeit der Früherkennung von möglichen Batterieproblemen. Durch den metallischen Boden des Fahrzeugdecks spiegelt sich die IR-Strahlung des Unterbodens des Fahrzeuges auf dem Fahrzeugdeck. So kann die Temperatur des Unterbodens, an dem typischerweise die Batterie untergebracht ist, von der Seite des Fahrzeuges ermittelt werden.

Diese zwei Detektionsverfahren wurden von GTE und HBRS in einen Demonstrator zusammengefasst (siehe Abbildung 21).

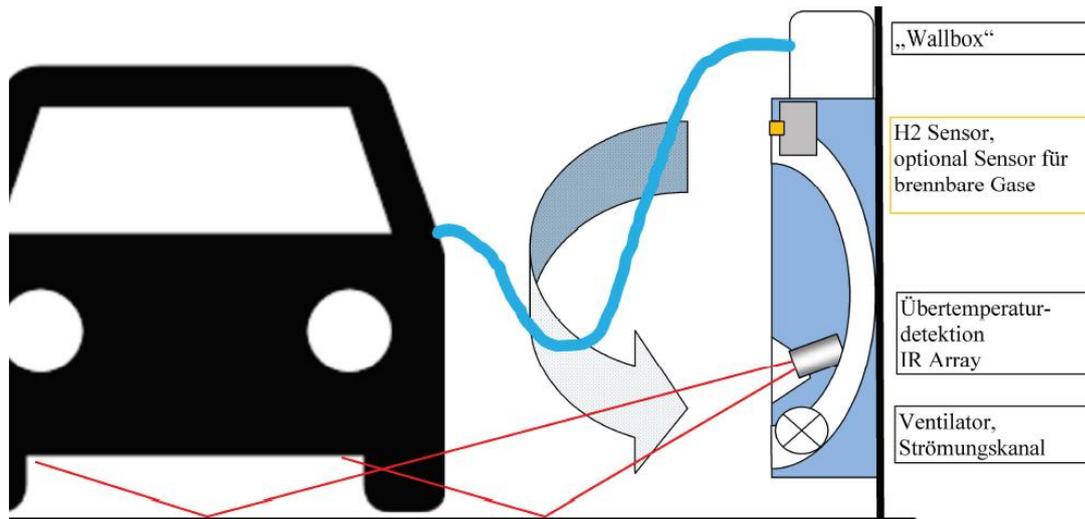


Abbildung 21 Demonstrator Ladepplatzüberwachung

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Überwachungseinheit neben dem Fahrzeug positioniert werden soll. Durch die Spiegelung der IR Strahlung wird die Unterbodentemperatur des Fahrzeuges überwacht, während die Wasserstoffkonzentration um das Fahrzeug ermittelt wird. Zur früheren Detektion von Wasserstoff im Havariefall und zur Montage des Wasserstoffsensors außerhalb des Ex-Schutzbereichs (endet 45cm über dem Boden), wird eine Luftführung mit aktiver Umwälzung verwendet.

Erkennt diese Überwachung eine mögliche Havarie kann der Ladevorgang abgebrochen werden und zusätzlich die aktiven Sicherheitseinrichtungen aktiviert werden.

Diese aktiven Sicherungseinrichtungen sollen aus der bereits vorhandenen Drencher-Anlage (Sprinklersystem an der Decke), dem von Lloyd's Register vorgeschlagenen Boundary Cooling Device (siehe Abschnitt 9.4.1) und einer Löschdecke bestehen. Über den Einsatz der verschiedenen Möglichkeiten muss abhängig von jeweiligem Vorfall entschieden werden.

Unabhängig von der Detektion und den daraus folgenden Gegenmaßnahmen sollte durch einen erhöhten Abstand der Fahrzeuge zueinander das Risiko einer Ausbreitung des Feuers verringert werden.

9.4 AP 5.6 Simulation eines Ladevorganges für Elektrofahrzeuge an Bord

Ziel dieses Teil-Arbeitspaketes war es, die Umsetzbarkeit und Sicherheit einer Ladesäule an Bord eines RoRo-Fährschiffes auszuwerten. Durch die bereits in Abschnitt 8.1 dargestellten Ladeversuche mit dem Projektpartner GTE konnten bereits Erfahrungen hinsichtlich eines Ladevorganges an Bord und dessen Überwachung gesammelt werden. Da im Projektzeitraum keine Ladesäule auf einem Schiff installiert werden konnte, erfolgte eine theoretische Betrachtung der notwendigen Anforderungen sowie experimentelle Untersuchungen der möglichen Gefahren sowie deren Bekämpfung.

Hierzu erfolgte die Definierung wichtiger Anforderungen an die Ladestation. Die Auswahl der Ladestation (AC, DC, Ladeleistung) sollte anhand der folgenden Punkte erfolgen:

- Anzahl der erwarteten elektrischen Fahrzeuge, sowie der Anteil mit Ladebedarf
- Dauer der Überfahrt
- Verfügbare elektrische Leistungsreserve an Bord
- Festlegung der Stellplätze zur Definition der Kabellänge und einhergehende Anforderungen an diese (Querschnitt, Leistungsgrenzen, Verlegung / Führung zur Verhinderung von Schäden am Kabel sowie der Vermeidung von Stolpergefahren)
- Stecker des Ladeanschlusses. Hierbei sollte auf jeden Fall ein Typ 2 Stecker zur Verfügung stehen da dieser der Europäische Standard ist. Es besteht aber die Möglichkeit Ladesäulen zu installieren die mehrere Verschiedene Anschlüsse zur Verfügung stellen können.
- Derzeit ist der Austausch von Daten zwischen dem fahrzeugseitigen BMS und der Ladesäule bei konventionelle AC Ladeanschlüssen meistens nicht möglich. Bei einer DC Ladung wird durch die IEC 61851-23 und -24 ein Mindestmaß an Kommunikation sichergestellt.

Anforderungen durch äußere Einflüsse:

Ladesäulen an Land sind häufig nach dem Industriestandart IP 54 gegen Wasser geschützt. Für den Einsatz an Bord eines Schiffes werden jedoch IP 55 für geschlossene Decks sowie IP 56 für Wetterdecks benötigt. Zusätzlich muss eine Widerstandsfähigkeit gegenüber salzhaltiger Atmosphäre über entsprechende standardisierte Tests nachgewiesen werden.

Explosionsschutz:

Ladesäulen an Land sind nicht dazu konzipiert Explosionsschutz Anforderungen zu erfüllen. An Bord eines Schiffes bzw. einer RoRo Fähre wird jedoch die Einhaltung bestimmter Ex-Schutz Zonen gefordert. Unterhalb des Schottendecks muss die gesamte elektrische Einrichtung der Ex-Schutz Zone 1 entsprechen während oberhalb des Schottendecks in den Ex-Geschützten Bereichen die Anforderungen der Zone 2 gelten wobei hier in allen Bereichen mindestens IP 55 gefordert wird. Auf vielen Decks ist der Raum bis zu einer Höhe von 45 cm als Ex-Schutz Zone definiert bzw. wenn Gefahrstoffe transportiert werden gilt für das gesamte Deck Ex-Schutz. Da die Umsetzung eines Ex-Schutzes sehr aufwendig und kostenintensiv ist sollte für die Positionierung der Ladesäule an Bord ein Bereich ohne diese Ex-Schutz Anforderungen gewählt werden. Zusätzlich sollte beachtet werden, dass auch vom Ladekabel eine Explosionsgefahr (Zündquelle) ausgeht, weshalb dieses mit einem metallischen Kabelmantel versehen sein sollte. Durch die Wartung dieser Kabel durch den Schiffsbetreiber sollten diese keine große Gefahr hinsichtlich Explosionsschutz darstellen, dies ist jedoch auch der Grund warum nur schiffseigene Kabel zum Laden der Fahrzeuge verwendet werden sollten.

Vibrationen:

Die Ladesäulen an Bord des Schiffes sollten dieselben Anforderungen hinsichtlich Vibrationsbeständigkeit wie die restliche elektrische Ausrüstung erfüllen. Die Anforderungen der Klassifikationsgesellschaft Lloyd's Register fordern hier einen Frequenzbereich von 2 bis 100 Hz mit einer Beschleunigung von 0,7g.

Winkeländerung:

Durch die Änderung der Winkellage der Ladesäule darf keine Fehlfunktion hervorgerufen werden. Hierzu wird eine Winkeländerung von 22,5° in alle Richtungen überprüft.

Elektromagnetische Verträglichkeit:

Für Geräte an Bord gelten hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit besondere Anforderungen die erfüllt werden müssen. Beim Laden von Elektroautos stellt besonders die Steckverbindung zwischen Ladesäule und Fahrzeug eine Herausforderung dar. In diesem Zusammenhang sollte der Gleichrichter (Konverter) besonders im Fokus stehen, dass dieser mit getakteten Strömen arbeitet. An Bord installierte elektrische Geräte, die nicht als wesentlich, sicherheitsrelevant und/oder bewohnbar definiert sind, müssen mindestens die EMV-Anforderungen für abgestrahlte und leitungsgebundene Emissionen erfüllen (siehe IEC 60092-504, IACS E10 oder LR Type Approval Test Specification No. 1)

Spannungs- und Frequenzschwankungen:

Jegliche elektrische Ausrüstung an Bord muss mit den unter Normalbedingungen auftretenden Spannungs- und Frequenzschwankungen zurechtkommen. Hierfür sind die in Tabelle 11 zu sehenden Grenzwerte definiert welche die Ladesäule erfüllen muss.

Tabelle 11: Zulässige Spannungs- und Frequenzänderungen an Bord

	Dauer	Kurzzeit
Spannung	+6% / -10%	+20% / -20%
Frequenz	+5% / -5%	+10% / -10%

An Land werden lediglich $\pm 10\%$ für Spannung und Frequenz gefordert.

Netzeigenschaften:

Während an Land typischerweise 400 V bei 50 Hz Netze verwendet werden, werden auf Schiffen meistens 440 V bei 60 Hz verwendet. Aus diesem Grund müssen Ladestationen in der Lage sein unter diesen Bedingungen zu funktionieren.

Stromnetz:

Ladestationen an Land sind für TT- oder TN-Netze ausgelegt, die beide die Erdung der angeschlossenen Verbraucher über das Verteilernetz gewährleisten. An Bord von Schiffen wird jedoch häufig ein IT-Netz verwendet, bei dem der Sternpunkt des Netzes nicht mit der Erde verbunden ist. Stattdessen werden die Geräte einzeln und separat direkt an die Erde angeschlossen. Aus Sicherheitsgründen und um sicherzustellen, dass die Ladeelektronik einen Schutzleiter erkennt, muss ein geerdetes Netz mit Hilfe eines Trenntransformators geschaffen werden. Der Transformator muss auf die Leistungsparameter der Ladestation abgestimmt sein.

Ladekabel:

Die Ladekabel sollten fest an der Ladesäule angeschlossen sein damit kein Fahrer sein eigenes, nicht gewartetes, Ladekabel verwenden kann. Bei der Gefahr von Schiffsbewegungen sollten die Fahrzeuge gesichert werden und bereits bei erwartetem schweren Wetter das Laden nicht gestattet werden. Es ist anzumerken, dass es bisher keine einheitliche Notentriegelung des Ladesteckers gibt und das Trennen des Fahrzeugs von der Ladestation nicht immer erfolgen kann.

Integration in das bordseitige Energiemanagement System:

Die Ladestation sollte in das Energiemanagementsystem des Schiffes integriert werden. Für Anwendungen, bei denen die Kommunikation zwischen Schiff-Ladegerät-Fahrzeug hergestellt

werden kann und detaillierte Fahrzeugdaten Daten übertragen werden können (z. B. SOH-Zustand, Batterietemperatur, Zellspannung usw.), sollte in Zukunft ein automatischer / ferngesteuerter Stopp des Energieflusses vom Ladegerät zum Auto möglich sein, wobei sichergestellt wird, dass die Kommunikation weiterhin funktioniert. So kann das Verhalten der Batterie weiter überwacht werden. Das Gleiche gilt auch für andere Szenarien, in denen Brände das Fahrzeug bzw. die Batterie gefährden könnten. Die Abschaltung der gesamten Ladesäule und somit auch der Kommunikation wird nur dann erforderlich sein, wenn das Fahrzeug bereits brennt oder die Situation so kritisch ist, dass selbst die detaillierteren Daten aus der Batterie keinen Nutzen mehr haben.

Manuelle Abschaltung:

Es sollte möglich sein, die gesamte Ladestation einfach vom Netz zu trennen, um die weitere Nutzung zu unterbinden. Dies sollte zum Beispiel durch eine manuelle Abschaltung (Zugang nur für das Personal) oder durch die Integration in das Powermanagement des Schiffes erfolgen. Dies kann z.B. notwendig werden, wenn auf nahegelegenen Parkplätzen Gefahrenstoffe transportiert werden oder wenn schweres Wetter zu erwarten ist und die Nutzung der Ladesäulen untersagt wird. Die Abschaltvorrichtung (zum Trennen der Ladestation von der Stromversorgung) sollte sich immer in einem nicht explosionsgefährdeten Bereich / Raum befinden.

Integrierte Sicherheitsfunktionen:

Die Ladestation muss, neben den schiffsspezifischen auch alle an Land erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen erfüllen. Beispiele hierfür sind:

- Kommunikation bei DC Ladung
- Innenkühlung der Ladesäule und Kabel entsprechend der Leistung
- Temperaturüberwachung der Ladestation, der Kabel und des Steckers
- Abschaltung bei Gefahrenmeldung des Batterie Management Systems

Zusätzlich hierzu sollten bestimmte schiffsspezifische Schutzfunktionen umgesetzt werden, wie zum Beispiel eine Abschaltung bei starken Neigungswinkeln (Schwere See) oder nach dem einwirken starker äußere Kräfte (Kollision).

Integration in das Alarm- und Überwachungssystem des Schiffes:

Alarmmeldungen der Ladesäule sowie des angeschlossenen Fahrzeuges sollten an das Alarm System der Brücke oder einen dauerhaft besetzten Kontrollraum weitergeleitet werden um entsprechende Maßnahmen einleiten zu können.

Externe Notabschaltung:

Zur Absicherung von Unfällen sollte es möglich sein die Ladesäule auch von der Ferne abzuschalten. Dies kann zum Beispiel notwendig werden, wenn ein Brand ausbricht oder die Säule nicht direkt zugänglich ist.

Alarm:

Da die Fährdecks während Überwachungsrundgängen sowie über Kameras zusätzlich überwacht werden, wäre es sinnvoll die Ladesäule mit einem Alarm System auszustatten, welches bei Gefahrensituationen (interner Fehler der Ladesäule sowie Warnmeldung des Fahrzeuges) einen akustischen sowie visuelles Signal ausgibt.

Früherkennung:

Zur Früherkennung von Gefahrensituationen können verschiedene Systeme zusätzlichen Schutz bieten. So bietet sich eine Kameraüberwachung, eine Festinstallation von Wasserstoffsensoren sowie IR-Sensoren an der Ladestation sowie der Überwachung mittels Wärmebildkamera an. Die Auswahl eines geeigneten Systems ist von der Platzierung der Ladesäule und den einhergehenden Umgebungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Luftzirkulation...) abhängig. Wird von einem solchen System eine Überschreitung von Grenzwerten festgestellt, sollte wie bei den Alarmen von der Ladesäule selbst ein Alarm auf der Brücke gemeldet werden.

Brandschutz:

Der Ladeplatz sollte mit geeigneten und ggf. zusätzlichen Brandmeldern ausgestattet sein. Ein möglichst naher Wasseranschluss (Hydrant) kann im Falle eines Fahrzeugbrandes hilfreich sein. Vor dem Beginn der Brandbekämpfung muss der Ladevorgang gestoppt und die Ladestation vom Stromnetz getrennt werden. Vor dem Einsatz des Drencher Systems (Sprinkler) sollten die Ladesäulen ebenfalls abgeschaltet und vom Stromnetz getrennt werden um keine zusätzliche Gefahrenquelle für Feuerwehrleute zu schaffen.

Zur Untersuchung der Möglichkeit der Kühlung eines havarierten Fahrzeuges erfolgte der Aufbau des im folgenden beschriebenen Boundary Cooling Devices.

9.4.1 Boundary Cooling Device

Die Grundidee für das Boundary Cooling Device stammte vom Projektpartner Lloyd's Register. Es soll ein Gerät aufgebaut werden, das havarierte Fahrzeug und seine Umgebung kühlen sowie die Ausbreitung eines Brandes unterbinden kann. Hierzu soll der Fahrzeugunterboden, an dem sich typischerweise die Fahrzeugbatterie befindet, mit Wasser besprüht werden um diese zu kühlen. Zusätzlich soll eine Wasserwand zwischen dem betroffenen Fahrzeug und den Umgebenden erzeugt werden, um eine mögliche Ausbreitung eines Feuers zu verhindern. Abbildung 22 zeigt die angedachte Verwendung des Boundary Cooling Devices (BCD), es soll aus zwei mit Wasserdüsen bestückten Rohren bestehen, welche über Feuerwehrschräuche und einem Y-Stück an einem Hydranten oder ähnlichem angeschlossen werden können.

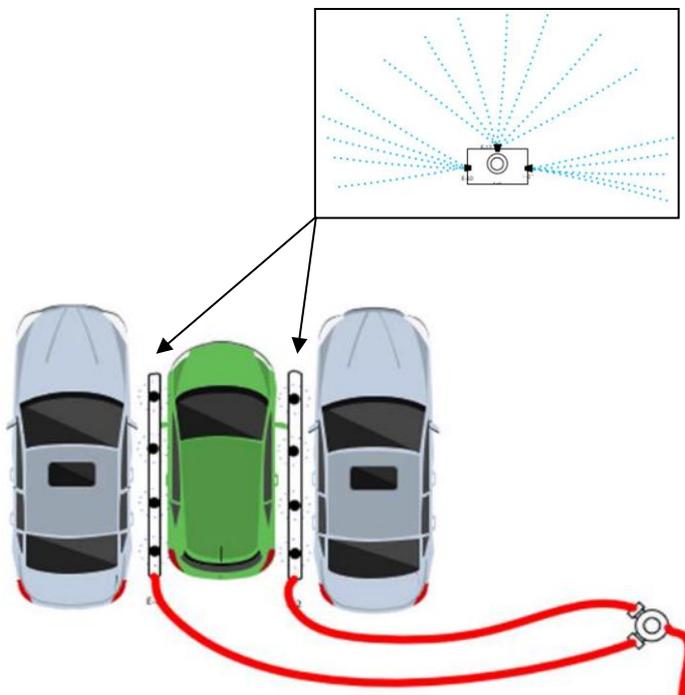


Abbildung 22: Grundidee des Boundary Cooling Devices

Die mit Düsen bestückten „Rohre“ werden neben dem Fahrzeug positioniert wo sie mittels vertikaler und horizontaler Düsen den Unterboden benetzen bzw. eine Wasserwand erzeugen.

Abbildung 23 zeigt die beiden, für Versuchszwecke, vom FKFS aufgebauten Prototypen des BDC. Der Grundaufbau besteht aus jeweils einem 1,5 Zoll Stahlrohr, das an beiden Enden mit einer Storz-Kupplung (Feuerwehrrkupplung) ausgestattet ist. Dadurch kann die Wasserversorgung von beiden Seiten erfolgen. Zur Vereinfachung der Handhabung und zur Vermeidung von Bedienungsfehlern sollten die Rohre identisch und symmetrisch aufgebaut sein. Für die Durchführung von Versuchen erfolgte jedoch der Aufbau von zwei unterschiedlichen Varianten des BDC.

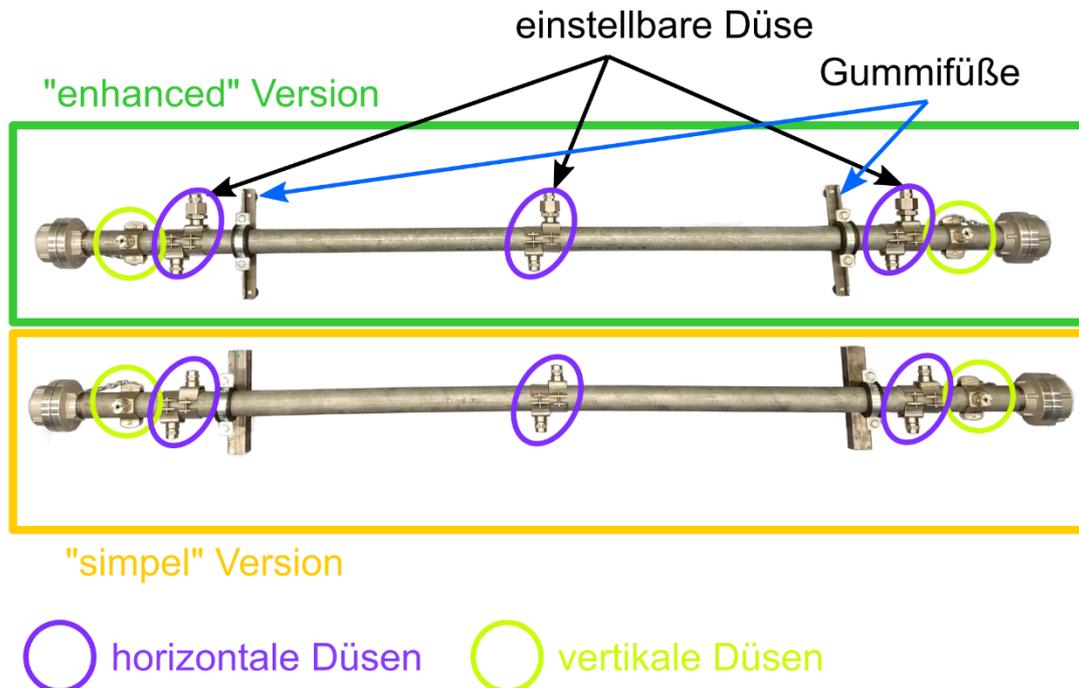


Abbildung 23: Prototypen des Boundary Cooling Device

Diese Varianten unterscheiden sich durch die Standfüße, die bei der „enhanced“ Version flacher und mit einer Gummiauflage ausgeführt sind, sowie den drei horizontalen Düsen, die in dieser Ausführung einstellbar sind. Beide Ausführungen verfügen über 6 vertikale Düsen mit einem Sprühwinkel von 60° zur Benetzung des Fahrzeugunterbodens mit Wasser sowie 2 horizontalen Düsen die mit einem Sprühwinkel von 90° um eine schützende Wasserwand zu umgebenden Fahrzeugen zu erzeugen.

Nach dem Aufbau dieser Prototypen erfolgte ein kurzer Funktionstest (siehe Abbildung 24). Dieser zeigte, dass das Gerät wie erwartet funktioniert.



Abbildung 24 Funktionstest Boundary Cooling Device

Durch die Zusammenarbeit mit dem Projekt LASHFIRE ergab sich die Möglichkeit, das BCD im Rahmen einer Handling-Untersuchung von Feuerwehrleuten testen zu lassen. Hierfür erfolgte der Versand der zwei Rohre nach Schweden, wo entsprechende Tests stattfanden. Abbildung 25 zeigt die beiden aufgebauten Teile des BCD während dieser Tests. Aus diesen Tests wurde zurückgemeldet, dass das Gerät zu schwer ist, aber scheinbar eine gute Wasserverteilung bietet.



Abbildung 25 Handlings-Test des Bondary Cooling Device in Schweden

Zur Überprüfung der Kühlwirkung auf eine Fahrzeugbatterie erfolgten Versuche während den mit den Projektpartnern durchgeführten Brandversuchen in Trauen. Um konstante Testbedingungen hierbei sicherzustellen erfolgte der Aufbau eines Batterie- / Gastank-Dummys, welcher im folgenden Abschnitt kurz erläutert wird.

9.4.2 Batterie- / Gastank-Dummy

Da der Versuchsaufbau wiederholbar genutzt werden sollte und mit der vorhandenen Energieversorgung auf dem Versuchsgelände betrieben werden muss, wurde der in Abbildung 26 zu sehende Aufbau entworfen.



Abbildung 26: Blick in den geöffneten Batterie- / Gastank-Dummy

Dieser besteht aus einem Aluminium Block (ca. 20 Kg), welcher als Wärmespeicher dient und eine ähnliche Wärmekapazität wie typische Lithium-Ionen Zellen besitzt, zwei Heizplatten mit je 2600 Watt Leistung um das System aufzuheizen, sowie einer Umhausung, die das typische Batteriegehäuse nachbildet. Durch einen Luftspalt zwischen dem Gehäuse und dem Aluminiumblock ist dieser isoliert. An nur 6 Verschraubungspunkten besteht direkter Kontakt zwischen dem Aluminium Block und dem Gehäuse wodurch eine gute Isolierung erreicht wird.

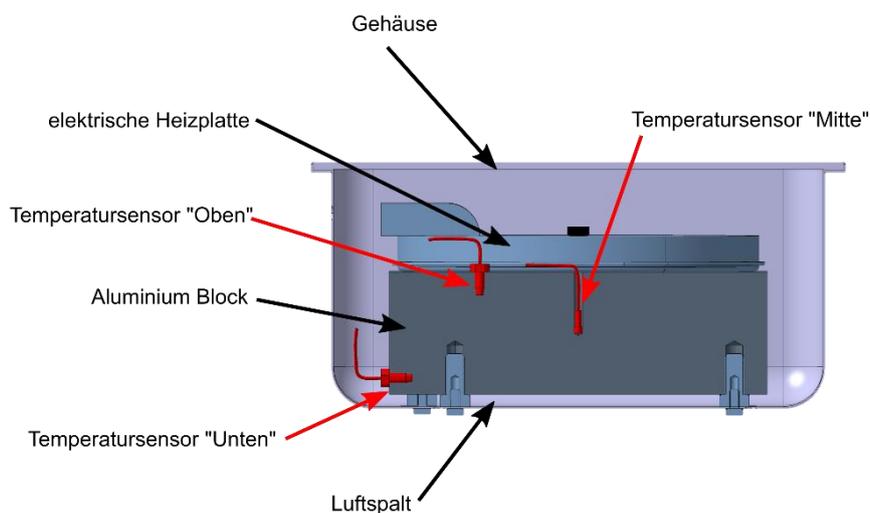


Abbildung 27: Schnittansicht des Batterie-/Gastank-Dummys

Zur Ermittlung der Temperaturen im Inneren dieses Aufbaus werden 3 Thermoelemente in den Aluminium Block verbaut. Die Positionen dieser Sensoren können Abbildung 27 entnommen werden, die eine Schnittdarstellung des aufgebauten Batterie- / Gastank-Dummys zeigt.

9.4.3 Gründe für die Durchführung der Versuchsreihe 1 und deren Aufbau

Durch die steigende Anzahl an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und Kraftstoffen wird es notwendig, sich auch mit den damit verbundenen Gefahren auseinander zu setzen und Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Da hierbei der Schutz der Traktionsbatterie bei batterieelektrischen beziehungsweise der Schutz des Gastanks bei gasbetriebenen Fahrzeugen eine wichtige Rolle spielt, wurde die Wirksamkeit verschiedener Kühl- / Löscheinrichtungen experimentell untersucht. Neben dem Schutz der Batterie / des Gastanks vor externer Erwärmung dienen diese Versuche auch der Bewertung der Wirksamkeit der Kühlung im Falle einer Fehlfunktion der Traktionsbatterie.

Der Aufbau des Versuches erfolgt mithilfe des, in Abschnitt 9.4.2 vorgestellten, Batterie- / Gastank Dummys, der es ermöglichte, reproduzierbare Ausgangstemperaturen herzustellen, sowie Temperaturen an unterschiedlichen Positionen zu erfassen. Zur Kühlung wurde ein, in einer Höhe von ca. 2 Metern über dem Fahrzeugdeck angebrachter (siehe auch untersuchte Anordnungen in Abschnitt 9.4.4), Sprinkler sowie das, ebenfalls im Projekt ALBERO entworfene Boundary Cooling Device (siehe auch Abschnitt 9.4.1) untersucht.

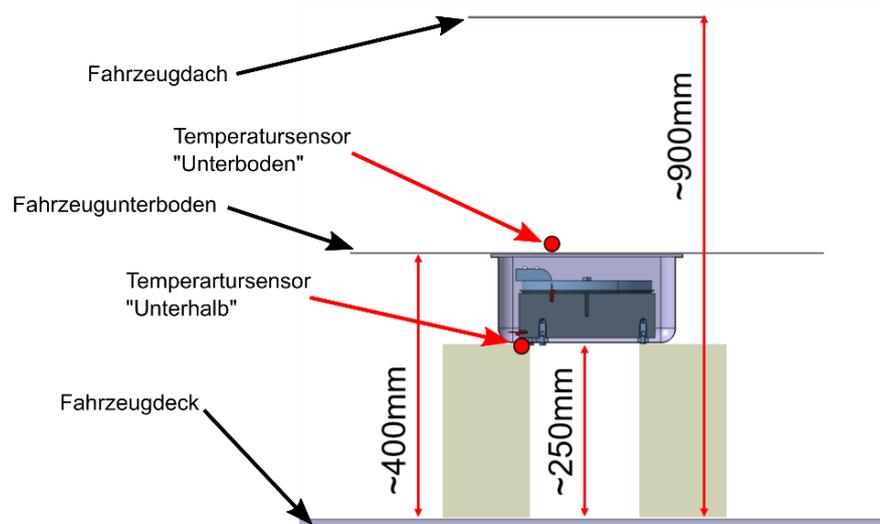


Abbildung 28: Aufbau der Fahrzeugnachbildung

Der Aufbau der Fahrzeugnachbildung ist in Abbildung 28 zu sehen. Diese besteht aus dem Batterie- / Gastank-Dummy sowie mehreren Stahlplatten, die verschiedene relevante Bereiche (Dach und Unterboden) eines Fahrzeuges sowie das Fahrzeugdeck des Schiffes nachbilden. Die Erfassung der Temperaturen außerhalb dieses Dummys erfolgte mittels Thermoelementen an den zwei, in Rot eingezeichneten, Positionen.

9.4.4 Untersuchte Anordnungen der Versuchsreihe 1

In Versuchsreihe 1 wurden insgesamt fünf unterschiedliche Versuchsanordnungen untersucht. Die Anordnung der einzelnen Komponenten der unterschiedlichen Aufbauten werden im Folgenden kurz beschrieben. Hierbei wurden die folgenden Varianten unterschieden:

- Ohne zusätzliche Kühlung (Konvektion)
- Sprinkler
- Boundary Cooling Device von der Seite
- Boundary Cooling Device von Unten
- Boundary Cooling Device von Unten + Sprinkler

Ohne zusätzliche Kühlung:

Als Referenz für die Versuche in denen aktiv gekühlt wird, wird der Aufbau auch ohne zusätzliche Kühlung untersucht. Hierfür wird der in Abbildung 29 zu sehende Versuchsaufbau verwendet.

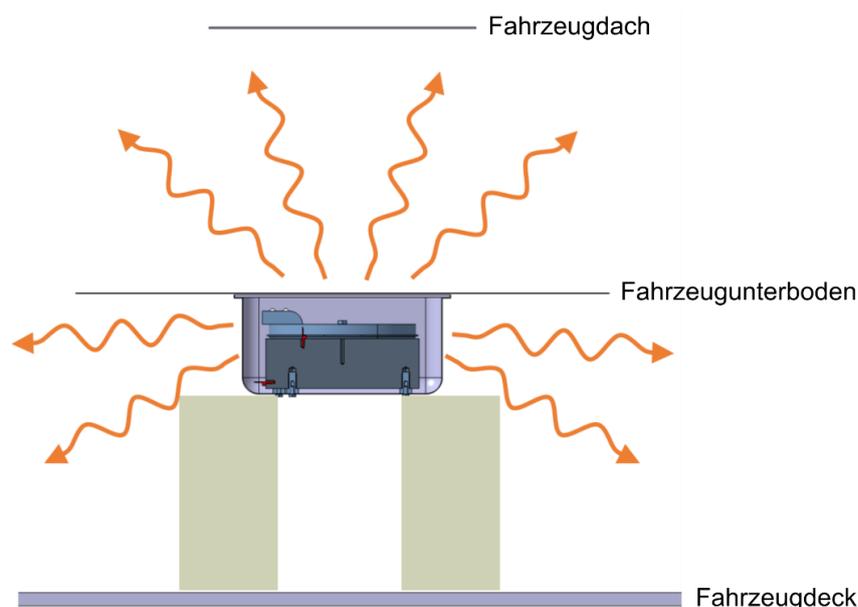


Abbildung 29: Versuchsaufbau „Ohne zusätzliche Kühlung“

Dieser besteht aus dem zuvor beschriebenen Batterie- / Gastank-Dummy, welcher auf Abstandshaltern auf dem „Fahrzeugdeck der Fähre“ steht sowie den Metallplatten die den Fahrzeugunterboden und das Fahrzeugdach simulieren.

Sprinkler:

Beim Versuchsaufbau mit Sprinkler wird der in Abbildung 30 zu sehende Aufbau verwendet.

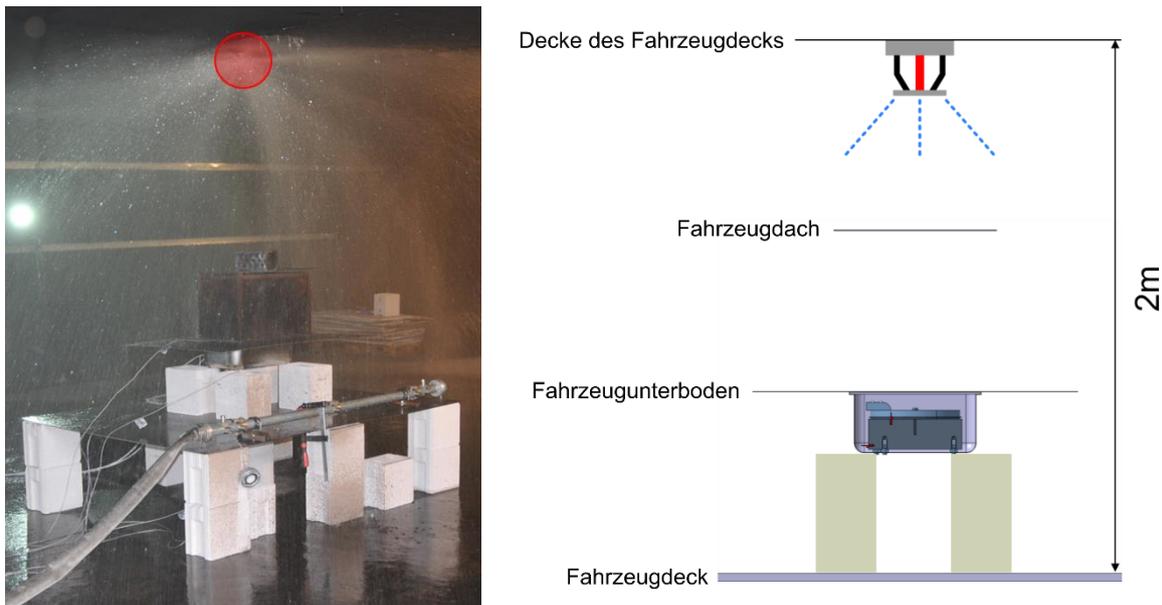


Abbildung 30: Versuchsaufbau "Sprinkler"

Dieser baut auf dem Aufbau der Versuche ohne zusätzliche Kühlung auf, es ist jedoch zusätzlich ein Sprinkler in einer Höhe von 2 Metern mittig über dem Versuchsaufbau angebracht.

BDC von der Seite:

Der Aufbau des Versuches mit dem Boundary Cooling Device von der Seite ist in Abbildung 31 dargestellt.

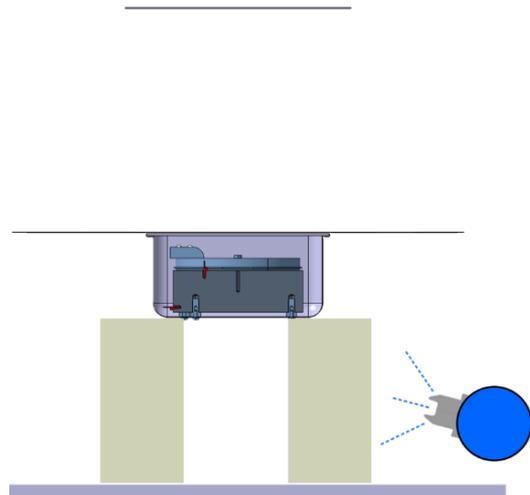
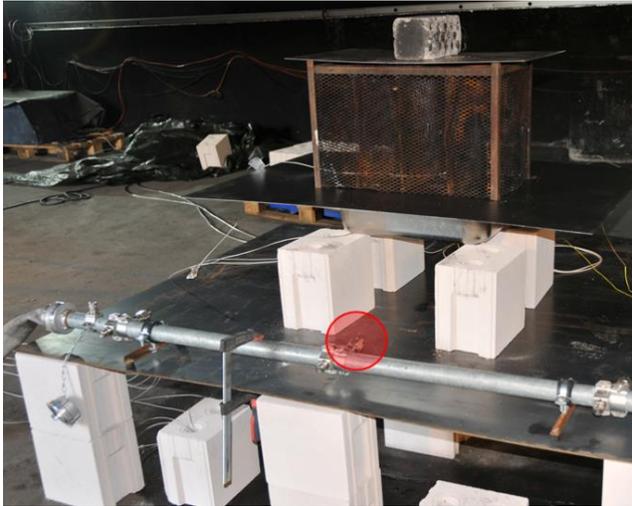


Abbildung 31: Versuchsaufbau "BDC von der Seite"

Hierbei wird die mittlere Düse des Boundary Cooling Devices verwendet, welche einen Sprühwinkel von 60° besitzt. In diesem Versuchsaufbau wurden die nicht benötigten Düsen trotzdem mit Wasser versorgt.

BDC von Unten:

Abbildung 32 zeigt den Aufbau des Versuches mit dem Boundary Cooling Device unter dem Batterie- / Gastank-Dummy.

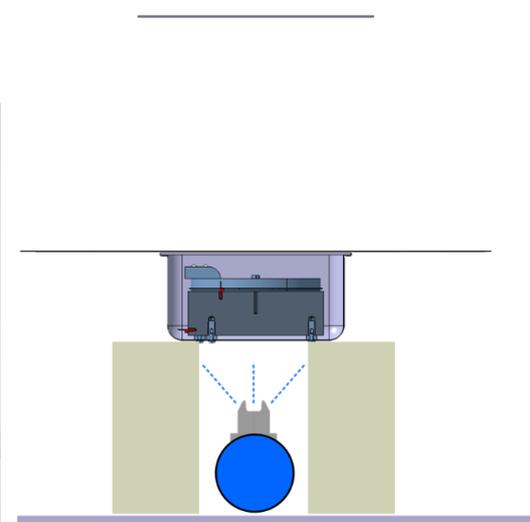
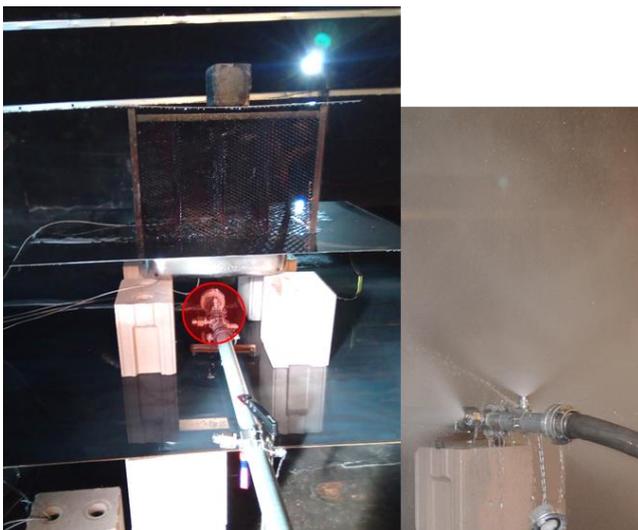


Abbildung 32: Versuchsaufbau "BDC von Unten"

Auch hierbei wurden alle Düsen eines Rohres des BCD mit Wasser versorgt. Zur Beaufschlagung des Batterie- / Gastank-Dummys wurde die vordere, senkrechte Düse des BDC verwendet. Diese besitzt einen Sprühwinkel von 90°.

Sprinkler und BDC von Unten:

Für die Untersuchung des kombinierten Einsatzes des BDC und eines Sprinklers wurde der in Abbildung 33 zu sehende Aufbau verwendet.



Abbildung 33: Versuchsaufbau „BDC von Unten + Sprinkler“

Die Positionierungen der einzelnen Komponenten (BCD und Sprinkler) sind identisch zu den Einzelversuchen.

9.4.5 Versuchsablauf und Messergebnisse der Versuchsreihe 1

Nach der Positionierung aller notwendigen Komponenten für den zu betrachtenden Versuchsaufbau erfolgte der Start der Heizphase. Diese startete mit der vollen Heizleistung der beiden elektrischen Herdplatten (ca. 5200 W Gesamtleistung), verringerte sich jedoch nach dem Erreichen einer Temperatur von 450°C oberhalb der Herdplatten auf eine Leistung von ca. 3000 W. Diese Heizphase wurde beim Überschreiten einer Temperatur von 373°C an der mittleren Temperaturmessstelle des Batterie- / Gastank-Dummys durch die Unterbrechung der Stromzufuhr gestoppt. Um immer vergleichbare Ausgangsbedingungen für alle Versuche zu erreichen, erfolgte eine Abkühlphase ohne zusätzliche Kühlung bis zum Erreichen der Versuchs-Starttemperatur, welche auf 371°C festgelegt wurde. Nach dem Erreichen dieser Temperatur wurde die zu untersuchende Kühleinrichtung aktiviert und die Messzeit gestartet. Gemessen wurde für 15 bzw. 30 Minuten, nach deren Ablauf wurde die Kühleinrichtung abgestellt und zur Durchführung weiterer Versuche wieder mit der Heizphase durch das Einschalten der Heizung begonnen. Für jeden Versuchsaufbau wurden zwei Messungen durchgeführt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt anhand der Temperaturverläufe an den unterschiedlichen Messpositionen. Hierzu werden die Messdaten der jeweils zweiten Messungen als Volllinie dargestellt, zur besseren Vergleichbarkeit ist zusätzlich für die jeweiligen Aufbauten eine Ausgleichsgerade als gestrichelt Linie eingezeichnet. Abbildung 34 zeigt die Temperaturverläufe für die Messstelle in der Mitte des Aluminiumblocks.

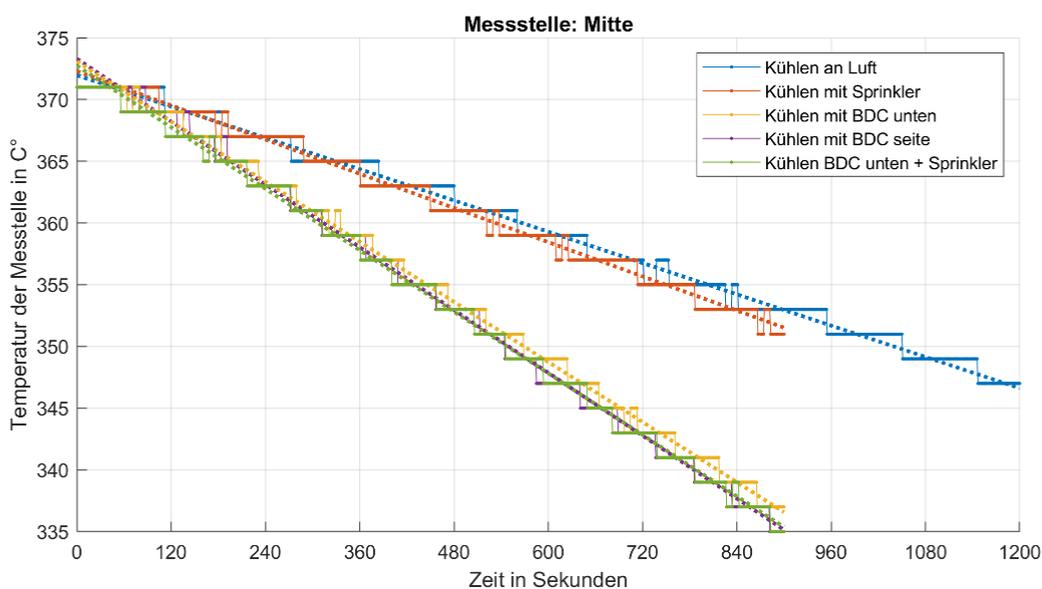


Abbildung 34: Temperaturverläufe der Messposition "Mitte" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass der Einsatz des Sprinklers im Vergleich zur Referenz Abkühlkurve (Keine zusätzliche Kühlung / Nur Konvektion) keine deutliche Beschleunigung der Abkühlung bewirkt. Dies lässt sich damit begründen, dass nur sehr geringe Mengen an Wasser durch ein zurückprallen von der unteren Platte auf das Gehäuse treffen und sich eine Änderung der Abkühlkurve hauptsächlich durch die Verringerung der Umgebungstemperatur einstellt. Weiter lässt sich feststellen, dass die Versuchsaufbauten BDC von Unten, BDC von der Seite sowie BDC von Unten + Sprinkler zu einer beschleunigten Abkühlung des Aluminiumblocks führen. Diese drei Versuchsaufbauten führen zu sehr ähnlichen Abkühlkurven.

Zur Bewertung der abgeführten Leistung wird mithilfe der Temperaturänderung dieser Messstelle über den Versuchszeitraum eine mittlere abgeführte Leistung berechnet. Diese ist für die fünf Aufbauten in Tabelle 12 zu sehen.

Tabelle 12: Abgeführte Leistung der einzelnen Versuchsaufbauten

Versuchsaufbau	Abgeführte Leistung	Änderung im Bezug zur Referenz
Keine zusätzliche Kühlung (Referenz)	374 W	-
Sprinkler	418 W	+ 12%
BDC von der Seite	792 W	+ 112%
BDC von Unten	748 W	+ 100%
BDC + Sprinkler	792 W	+ 112%

Werden die abgeführten Leistungen genauer betrachtet, fallen die insgesamt niedrigen Leistungen auf. So kann durch die zusätzlichen Maßnahmen zwar eine prozentuale Steigerung der abgeführten Leistung von bis zu 112% erreicht werden, trotzdem fällt die gesamte Kühlleistung geringer aus als erwartet.

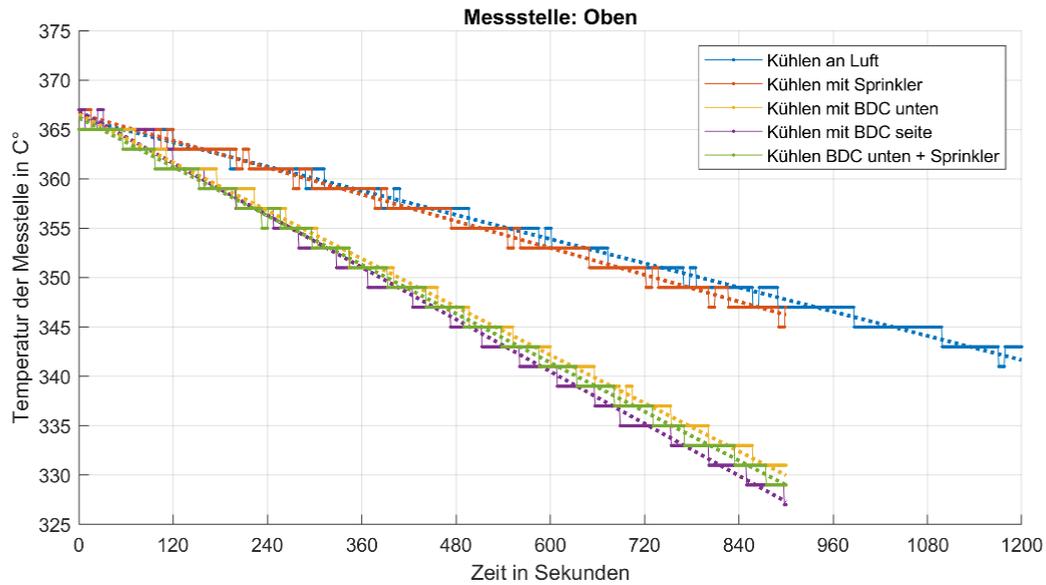


Abbildung 35: Temperaturverläufe der Messstelle "Oben" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Abbildung 35 zeigt die Temperaturverläufe der Messstelle „Oben“. Auch hier lässt sich erkennen, dass der Einsatz eines Sprinklersystems keine oder nur sehr geringe Änderungen der Temperatur an dieser Messposition zur Folge hat. Die Temperaturverläufe sind denen der Messstelle „Mitte“ ähnlich.

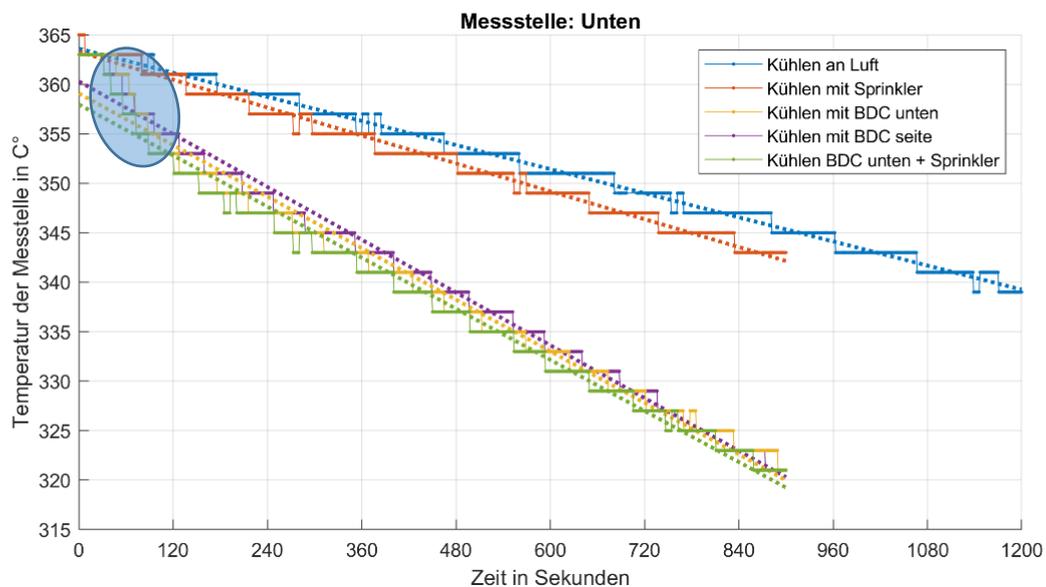


Abbildung 36: Temperaturverläufe der Messstelle "Unten" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Durch die Positionierung der Messstelle „Unten“ in der Nähe eines Befestigungspunktes zwischen dem Aluminiumblock und dem Gehäuse ist in Abbildung 36 bei den Versuchen mit direkter Benetzung des Gehäuses, neben der schnelleren Abkühlung, auch ein Temperatursprung zu erkennen (in blau eingekreist).

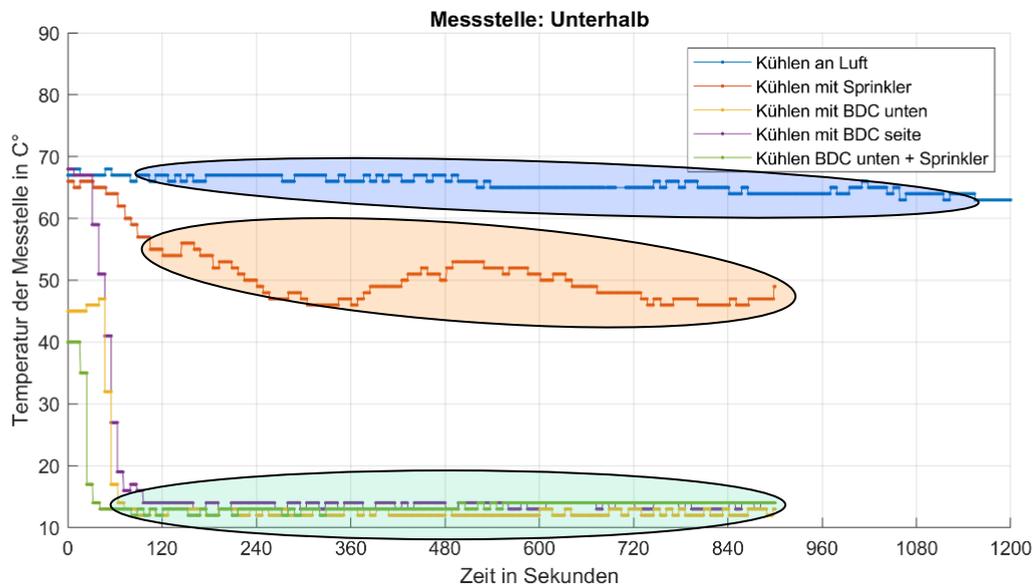


Abbildung 37: Temperaturverläufe der Messstelle "Unterhalb" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Werden die Daten aus Abbildung 37 betrachtet, welche die Temperaturen der Messstelle „Unterhalb“ darstellen, kann der Einfluss der Benetzung der Gehäuseoberfläche mit Wasser erkannt werden. Da diese Temperatur der Oberflächentemperatur des Versuchsaufbaus in Näherung entspricht, kann die Messstelle genutzt werden, um die Wirksamkeit für einen Gastank zu untersuchen. So lässt sich erkennen, dass die Temperaturen ohne zusätzliche Kühlmaßnahme nur sehr langsam sinken, die Aktivierung des Sprinklers führt zu einer geringen Senkung der Temperatur des Gehäuses. Die Versuchsaufbauten mit dem BDC unterhalb, dem BDC seitlich sowie dem BDC unterhalb mit aktiviertem Sprinkler führen zu einer deutlichen Reduzierung der Temperatur dieser Messstelle. Daraus lässt sich schließen, dass mithilfe der direkt benetzenden Maßnahmen (BDC unterhalb / BDC seitlich / BDC unterhalb + Sprinkler) ein Gastank schnell und effektiv gekühlt werden könnte.

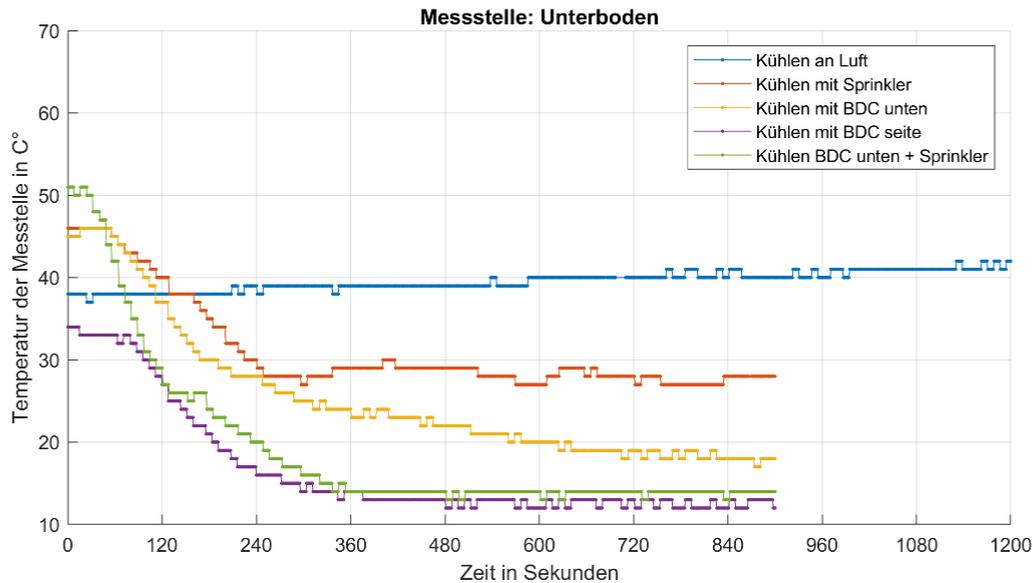


Abbildung 38: Temperaturverläufe der Messstelle "Unterboden" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Die in Abbildung 38 zu sehenden Temperaturverläufe zeigen die erreichten Temperaturen über dem Gehäuse des Batterie- / Gastank-Dummys. Durch die unterschiedlichen Bedingungen vor den Versuchen (Wasser auf der Unterbodenplatte, Haltezeit der Temperatur) starten die Versuche mit verschiedenen Temperaturen, es kann anhand der Verläufe jedoch erkannt werden wie viel Wasser in den jeweiligen Aufbauten an die Oberseite der Fahrzeugunterbodenplatte gelangt. So steigt diese sogar über die Messdauer während sie bei allen aktiven Kühlmethoden sinkt.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass durch den Einsatz geeigneter Kühleinrichtungen die Wärmeabfuhr eines Batterie Systems bzw. eines Gastanks verbessert werden kann. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass der Einsatz eines Sprinkler-Systems nur sehr geringe Auswirkungen auf ein, unter dem Fahrzeug montiertes, Energiespeichersystem hat. Trotz dieser geringen Kühlwirkung sollte ein vorhandenes Sprinkler-System dennoch aktiviert werden, um die Ausbreitung eines möglicherweise im Verlauf eines Schadens auftretenden Brandes zu verhindern. Betrachtet man die Temperaturverläufe des Temperatursensors unterhalb des Versuchsaufbaus, welcher vergleichbaren Bedingungen wie ein Gastank ausgesetzt ist, lässt sich daraus schließen, dass sich die Temperatur eines Gastanks durch den Einsatz des BCD deutlich verringern lässt, da dieser typischerweise nicht isoliert verbaut wird. Wird jedoch der Temperaturverlauf der Messstelle im Inneren des Aluminiumklotzes, sowie die daraus berechnete abgeführte Wärmeenergie betrachtet, wird klar, dass die Wärmeabfuhr verbessert werden kann, da diese durch die Luftspaltisolierung im Verhältnis zur gespeicherten Energie immer noch sehr gering

ist. Durch die starke Abhängigkeit der abgeführten Wärme von der thermischen Anbindung des Aluminiumklotzes (Batterien) an das Gehäuse, welche im verwendeten Versuchsaufbau sehr gering ist, erfolgte die Durchführung einer zweiten Messreihe mit einer höheren thermischen Anbindung. Derzeit werden Traktionsbatterien mit unterschiedlichsten Kühl- und Isolierungskonzepten produziert, wodurch auch die thermische Anbindung beeinflusst wird und somit auch eine bessere thermische Anbindung möglich ist.

9.4.6 Versuchsaufbau der Versuchsreihe 2

Der verwendete Batterie-Dummy entspricht dem der Versuche 1. Es wurde jedoch für die Versuche mit höherer thermischer Anbindung eine Aluminiumplatte zwischen den Aluminiumklotz und das Gehäuse auf der Unterseite geklemmt. Abbildung 39 zeigt diesen abgeänderten Aufbau, der für die Versuche mit besserer thermischer Anbindung verwendet wurde.

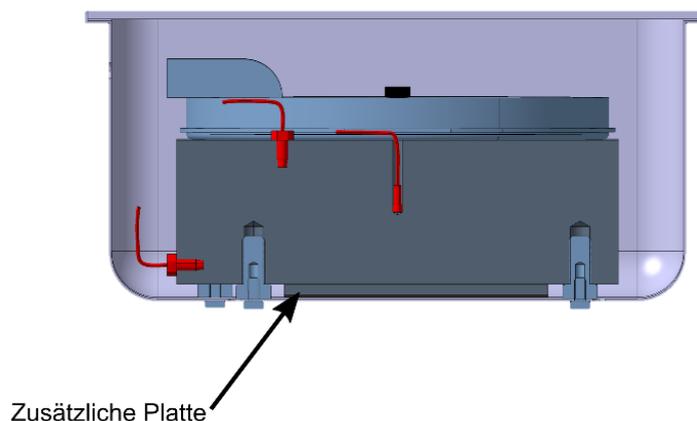


Abbildung 39: Schnittansicht des Batterie-Dummy mit verbesserter thermischer Anbindung

Die Abmessungen der zusätzlichen Platte betragen 185 x 142 x 10mm. Um die Wärmeleitung zwischen der zusätzlichen Platte und dem Gehäuse zu verbessern wurde Kessel-Kitt verwendet um die Kontaktflächen zu verkleben.

Da in diesen Versuchen nur der Einfluss der thermischen Anbindung untersucht werden soll wird ein vereinfachter Gesamtversuchsaufbau verwendet. Dieser verzichtet auf die Verwendung der zusätzlichen Komponenten, die das Fahrzeug repräsentierten.

Der verwendete Aufbau ist in Abbildung 40 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass nur der Batterie-Dummy mit Abstandshaltern über dem Boden gehalten wird. Außerdem wird auf die

Messstelle über dem Aufbau verzichtet und nur eine externe Messstelle zwischen einer Befestigungsschraube den Aluminiumblocks und den Abstandshaltern montiert.

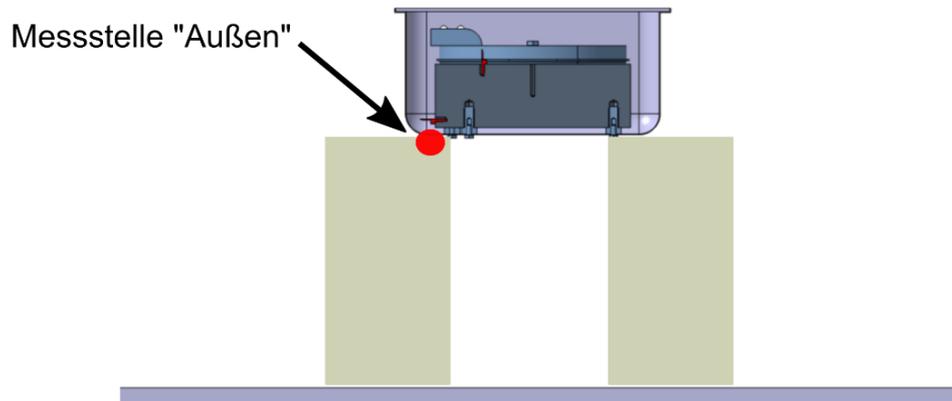


Abbildung 40: Versuchsaufbau

Dieser Aufbau wurde für alle Messungen der Versuchsreihe 2 verwendet.

9.4.7 Untersuchte Varianten der Versuchsreihe 2

Es kann zwischen folgenden 3 verschiedenen Aufbauten unterschieden werden:

- Aufbau angelehnt an Versuchsreihe 1 (ohne Platte)
- Erhöhte thermische Anbindung (mit Platte)
- Erhöhte thermische Anbindung (mit Platte) + geöffnetem Deckel

Die beiden Aufbauten „ohne Platte“ und „mit Platte“ werden jeweils zweimal ohne zusätzliche Kühlung sowie mit Wasser von unten untersucht. Der Aufbau „mit Platte und geöffnetem Deckel“ wird jeweils nur einmal ohne zusätzliche Kühlung sowie mit Füllung des Gehäuses bis zur Position des unteren Sensors mit Wasser untersucht.

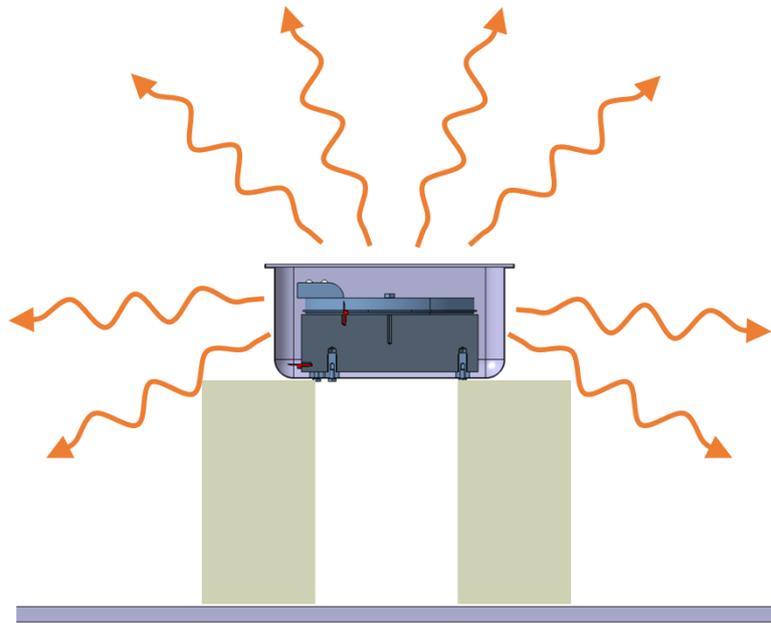


Abbildung 41: Versuchsaufbau "Luft"

Die Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen jeweils den prinzipiellen Aufbau der verschiedenen untersuchten Varianten der Aufbauten. So erfolgt bei den Versuchen „Luft“ keine zusätzliche Kühlung des Versuchsaufbaus und die Wärmeabfuhr erfolgt rein über Konvektion.

Die Versuche „Wasser“ erfolgten mit einer Benetzung des Bodens des Gehäuses. Die während diesen Versuchen verwendete Wassermenge wurde im Vergleich zur Versuchsreihe 1 deutlich verringert, wodurch diese Ergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden können.

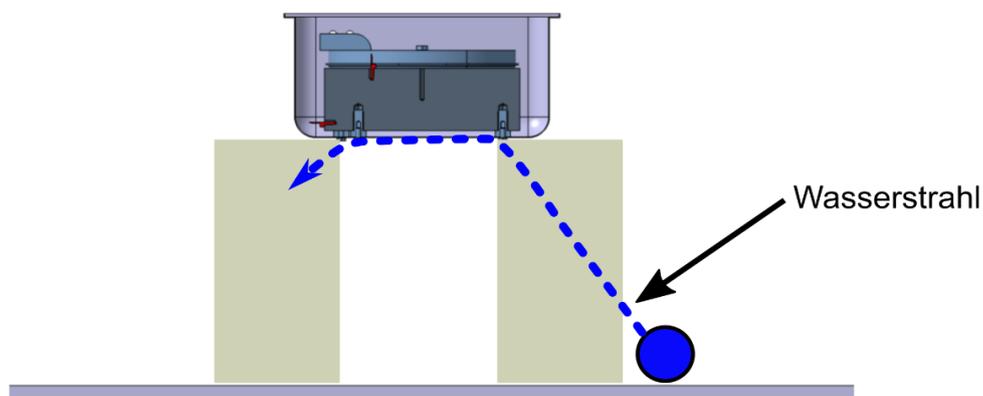


Abbildung 42: Versuchsaufbau "Wasser"

Abbildung 43 zeigt den Aufbau des letzten Versuches, in dem das geöffnete Gehäuse des Batterie-Dummys bis zum unteren Temperatursensor mit Wasser gefüllt wurde.

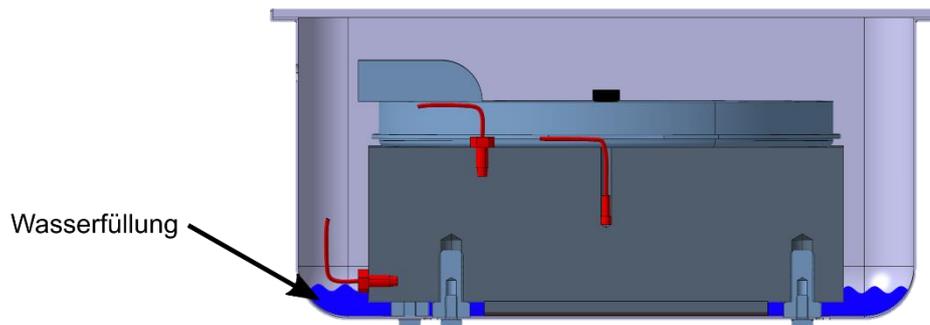


Abbildung 43: Versuchsaufbau "Wasserfüllung"

Dieser Füllstand wurde über die Messdauer konstant gehalten.

9.4.8 Versuchsaufbau und Messergebnisse der Versuchsreihe 2

Der Versuchsaufbau entspricht dem der Versuchsreihe 1. Die Messdauer, für die Versuche in denen Wasser zur Kühlung eingesetzt wird, wurde jedoch auf 10 Minuten reduziert.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt, analog zu den in Abschnitt 9.4.5 dargestellten Ergebnissen der Versuchsreihe 1, anhand der Temperaturverläufe an den unterschiedlichen Messpositionen. Es werden die Temperaturverläufe aller durchgeführten Messungen für eine Messstelle aufgetragen. Hierbei entspricht die Volllinie der ersten Messung, während die zweite als gestrichelte Linie dargestellt wird. Abbildung 44 zeigt die Temperaturverläufe für die Messstelle in der Mitte des Aluminiumblocks.

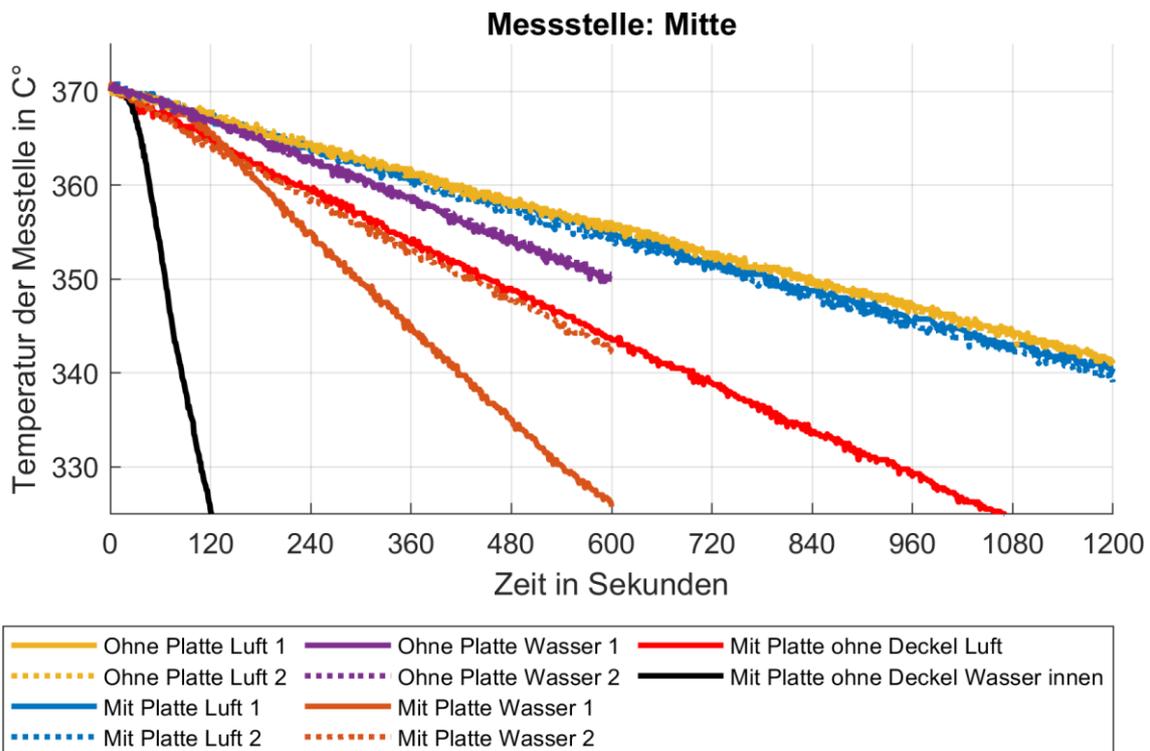


Abbildung 44: Temperaturverläufe der Messposition "Mitte" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Hier ist zu erkennen, dass die Messungen „Ohne Platte Luft“, „Mit Platte Luft“ und „Ohne Platte Wasser“ nur geringe Abweichungen zwischen der ersten und der zweiten Messung aufweisen. Die Differenz zwischen den Messungen „Mit Platte Wasser 1“ und „Mit Platte Wasser 2“ entstand durch ein Ausbeulen des Gehäuses während des zweiten Aufheizvorganges und einer daraus folgenden verringerten thermischen Anbindung zwischen Aluminiumblock und Gehäuse. Werden die sechs gemessenen Varianten verglichen, kann festgestellt werden, dass der Einbau der zusätzlichen Platte nur einen sehr geringen Einfluss auf die Versuche ohne zusätzliche Kühlung (Luft) hat. Betrachtet man die Versuche bei denen die Unterseite des Gehäuses mit Wasser besprüht wurde, wird deutlich, dass durch den Wassereinsatz die Temperatur schneller sinkt als bei den Versuchen ohne Eingriff. Zudem sinkt die Temperatur bei den Versuchen mit Platte (besonders bei intakter Verbindung zwischen Platte und Gehäuse) deutlich schneller als bei den Versuchen ohne Platte. Der Temperaturverlauf des Aufbaus mit geöffnetem Deckel zeigt, dass bereits durch bessere Konvektion mehr Wärme abgeführt werden kann als bei den Versuchen mit Luftspaltisolierung und Benetzung des Gehäuses mit Wasser. Aus dem Versuch mit Füllung des Gehäuses mit Wasser kann die maximal mögliche Abkühlung über die untere Fläche des Aluminiumblocks abgeschätzt werden.

Zur Bewertung der abgeführten Leistung wird mithilfe der Temperaturänderung dieser Messstelle über den Versuchszeitraum eine mittlere abgeführte Leistung berechnet. Diese ist für die sechs Aufbauten in Tabelle 13 zu sehen. Um die Änderung der abgeführten Leistung zwischen den Versuchen zu verdeutlichen wird die prozentuale Änderung im Bezug zur Messung mit Luftspaltisolierung (ohne Platte) ohne zusätzliche Kühlung (Luft) bestimmt.

Tabelle 13: Abgeführte Leistung der einzelnen Versuche

Versuchsaufbau	Abgeführte Leistung	Änderung im Bezug zur Referenz
Ohne Platte + Luft (Mittelwert)	504 W	-
Ohne Platte + Wasser (Mittelwert)	697 W	+ 38%
Mit Platte + Luft (Mittelwert)	530 W	+ 5%
Mit Platte + Wasser (Einzelmessung)	1598 W	+ 217%
Mit Platte + Deckel offen	885 W	+ 76%
Mit Platte + Deckel offen + Wasserfüllung	6566 W	+ 1203%

Die hierbei ermittelten abgeführten Leistungen entsprechen den Erwartungen. Durch den Verzicht auf die zusätzlichen Metallplatten (Fahrzeug-Dummy) welche in der Versuchsreihe 1 verwendet wurden, wird bei den Versuchen ohne zusätzliche Kühlung (Luft) mehr Leistung abgeführt. Zusätzlich wird durch die Verringerung der eingesetzten Wassermenge auch eine geringere Leistung bei den Versuchen mit Wassereinsatz erreicht. Für die Auswertung der abgeführten Leistung des Aufbaus mit Platte und Wasser wird nur die Messung mit intakter Verbindung zwischen Aluminiumblock und Gehäuse verwendet. Bei einer Füllung des Gehäuses bis zur unteren Temperaturmessstelle konnten im Schnitt 6,5 kW abgeführt werden. Zusätzlich zu den Daten aus der mittleren Temperaturmessstelle können in Abbildung 45 auch die Temperaturverläufe der Oberen Messstelle abgelesen werden.

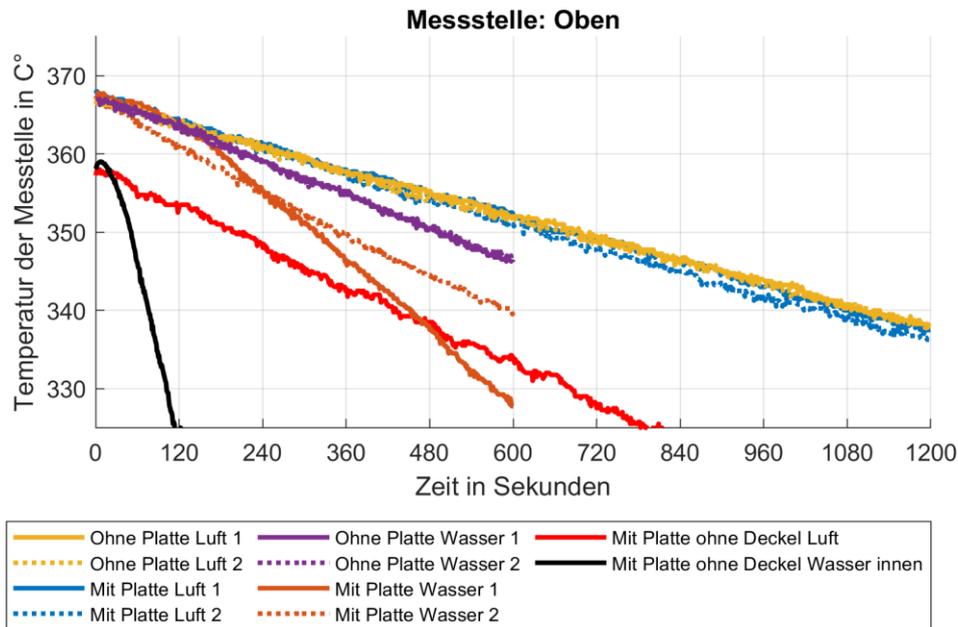


Abbildung 45: Temperaturverläufe der Messstelle "Oben" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

Diese Temperaturverläufe entsprechen den Erwartungen und folgen den Temperaturen der mittleren Messstelle. Auffällig ist die geringere Starttemperatur bei den beiden Aufbauten mit geöffnetem Deckel, welche auf die geringere thermische Isolation bei geöffnetem Deckel zurückzuführen ist.

Abbildung 46 zeigt die Temperaturen welche an der unteren Messstelle ermittelt wurden. Auch diese entsprechen den Erwartungen und zeigen ähnliche Verläufe wie die der Messstelle „Oben“.

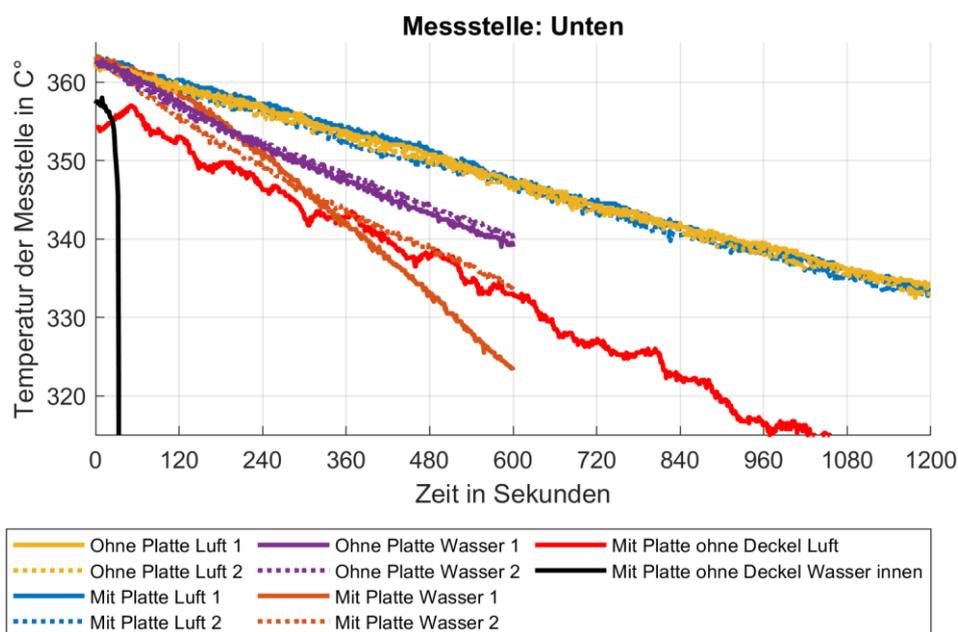


Abbildung 46: Temperaturverläufe der Messstelle "Unten" für die untersuchten Versuchskonfigurationen

9.4.9 Zusammenfassung der Versuchsreihe 2

Die zusätzlichen Abkühlversuche der Versuchsreihe 2 zeigen das die abgeführte Leistung über ein besprühen der Unterseite eines Batterie-Dummys stark von der thermischen Anbindung des aufgeheizten Aluminiumblocks und des Gehäuses abhängt. Durch unterschiedlichen Bauformen von Traktionsbatterien und die dadurch sehr unterschiedlichen thermischen Anbindungen der Zellen mit dem Gehäuse kann keine generelle Aussage über die Effektivität einer zusätzlichen Kühlung getroffen werden. Es lässt sich aber festhalten, dass die abgeführte Leistung durch den Wassereinsatz erhöht wird. Durch eine direkte Befüllung des Batteriegehäuses mit Kühlmedium könnte eine deutlich größere Leistung abgeführt werden. Diese würde jedoch eine konstruktive Anpassung der Traktionsbatterie benötigen, welche zusätzliche Herausforderungen wie Abdichtung gegen Feuchtigkeitseintritt und Zugänglichkeit für Rettungskräfte mit sich bringt.

10 AP 7 Gesamtkonzept

In der Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern entstand ein Maßnahmenkatalog in dem die erarbeiteten Konzepte, Sicherheitsmaßnahmen und Empfehlungen zusammengefasst wurden. In diesem wird neben dem sicheren Transport auch das Thema des sicheren Ladens von Fahrzeugen an Bord adressiert. Zur Verbreitung dieser Informationen wurde dieser Maßnahmenkatalog an die national relevante Stelle, das BMVI, die international relevante Stelle, European Maritime Safety Agency (EMSA), sowie dem Europäischen Forschungsprojektes LASHFIRE weitergegeben. Zudem bildet dieser eine wichtige Grundlage für das vom Projektpartner Lloyd's Register begonnenen Formal Safety Assessment (FSA). Die wichtigsten Themen dieses Maßnahmenkataloges beinhaltet die Berücksichtigung der Antriebsart spezifischen Gefahren und Möglichkeiten deren Reduktion sowie die möglichen Maßnahmen zur Bekämpfung von Havarien. Neben diesen auf die Problemstellungen zugeschnittenen Maßnahmen wird auch auf allgemeingültige Verbesserungsmaßnahmen hingewiesen. Diese, in allen Einsatzbereichen von alternativ betriebenen Fahrzeugen anwendbaren, Maßnahmen würden zu einer Erhöhung der Sicherheit und / oder gezielteren Reaktion auf Gefahren führen. Diese sind:

- Eine einfache Identifizierung der Antriebsart zur besseren Einschätzung von Gefahren und zur Anwendung der richtigen Maßnahmen. Zum Beispiel über Farbe oder Kennzeichnung auf den Kennzeichen
- Alarmierung / Warnung der Umgebung bei der Detektion von kritischen Zuständen der Fahrzeugbatterie durch das Batterie Management System durch einfache audiovisuelle Warnmeldung (z.B. definierter Blink / Hup-Code) die auch durch Kameraüberwachung ausgewertet werden kann. Durch ein Funksignal könnte ebenfalls diese Alarmmeldung ausgeführt werden, welche durch die Überwachungssysteme bestimmter Infrastruktur (Tunnel, Parkhaus usw.) empfangen werden könnten.
- Einführung einer technischen Lösung zum zerstörungsfreien Lösen der Steckverbindung zwischen Ladesäule und Fahrzeug im Falle eines Ausfalls der fahrzeugseitigen Entriegelung
- Einführung eines einheitlichen technischen Konzepts das das fluten der Batterie mit Kühlmedium erlaubt. Zum Beispiel durch einen Bereich in dem eine Löschlanze gefahrlos eingesetzt werden kann oder feste Anschlüsse die ins Innere der Batterie führen. Hierdurch könnten havarierte Batterien schneller abgekühlt werden und die Wahrscheinlichkeit eines Wiederentzündens verringert werden.

- Entwicklung von Konzepten zur sicheren Entladung gegebenenfalls vorhandener Zellen mit Restenergie zur Reduktion der Gefahren durch Wiederentzündung und Lichtbogen.
- Anpassung der Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen beim Aufkommen neuer technischer Lösungen

11 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) übernahm im Verbundprojekt ALBERO die Bearbeitung des Teilprojektes „Transport und Ladevorgang von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen bzw. Elektroantrieb auf Fährschiffen“. Die vielen technisch unterschiedlichen Aufbauten von alternativ betriebenen Fahrzeugen (abF) machten eine Darstellung der typischer Varianten notwendig. So wurde es möglich für die jeweilige Antriebsart, gemeinsam mit den Projektpartnern, ein Sicherheitskonzept für den Transport von abF zu erarbeiten. Neben dem sicheren Transport von abF steigt auch die Nachfrage nach Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge an Bord von RoRo-Fährrschiffen. Hierzu erfolgte die Erstellung eines Anforderungskataloges für die Umsetzung einer Ladesäule an Bord. Dieser beinhaltet neben den sicherheitstechnischen Anforderungen auch Hinweise zur Auswahl der, zur geplanten Route und Schiff passenden, Ladetechnik. Um speziell auf Brände von Gas- und Elektrofahrzeugen besser reagieren zu können erfolgte der Aufbau eines Lösch- / Kühlgerätes, welches es ermöglicht den Unterboden (Gastank / Batterie) zu kühlen sowie eine Wasserwand, zur Verhinderung der Brandausbreitung, zwischen den Fahrzeugen zu erzeugen.

Die erarbeiteten Konzepte sind grundlegende Ansätze, die durch weitere Projekte weiter ausgearbeitet oder an andere Randbedingungen angepasst werden können. So sind besonders die erkannten Schwachstellen hinsichtlich der Informationsverbreitung von erkannten Gefahren durch das Batterie Management System (BMS), sowie die nicht erforderliche Kennzeichnung verschiedener Antriebsarten Ansatzpunkte über die die Wirksamkeit der Konzepte verbessert werden kann.

Zudem stellt die geringe Datenlage hinsichtlich brandverhalten und Schadensstatistiken der abF eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Bewertung und Vorhersage der Schadenshäufigkeiten und deren Verläufe dar.

Durch das noch vergleichsweise neue Antriebskonzept der modernen Elektromobilität finden hier noch große technologische Veränderungen in kurzen Zeiträumen statt. So erfolgte während der Projektlaufzeit die Einführung von Batterie elektrischen Fahrzeugen die statt auf ein 400 V Traktionssystem ein mit 800V betriebenes verwenden. So müssen die vorgeschlagenen Sicherheitskonzepte zum Transport und Laden von abF auf RoRo-Schiffen auch zukünftig an diese sich ändernde Technologie angepasst werden. Zusätzlich sollten auch die für an Land geltenden Anforderungen laufend überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

12 Quellenverzeichnis

- [1] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. 2009
- [2] Martin Kords: Zugelassene E-Autos in Deutschland bis 2022. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>
- [3] <http://www.gibgas.de/Fahrzeuge/Historie/Statistik>
- [4] Robert Donnenbauer: Erdgas bewegt die Nutzfahrzeugbranche. 2015. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/mobilitaet/erdgas-bewegt-die-nutzfahrzeugbranche/>
- [5] Danish Maritime Accident Investigation Board: Marine Accident Report "Pearl of Scandinavia Fire" (2011)
- [6] Zeitung für kommunale Wirtschaft: CO2-arme LKW werden bis 2020 gefördert. LKW produzieren um ein vielfaches mehr Schadstoffe als PKW. Ein spezielles Förderprogramm des BMVI für saubere Luft in den Städten stößt daher auf große Resonanz., 2018. <https://www.zfk.de/politik/deutschlan/co2-arme-lkw-werden-bis-2020-gefoerdert>, abgerufen am: 27.06.2022
- [7] Krafftahrt-Bundesamt: Jahresbilanz 2018, 2018. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassung/jahresbilanz_node.html, abgerufen am: 27.06.2022
- [8] Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland: IMDG-Code 2020, 2020. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/Gefahrgut/imdg-code-de-2020.pdf?__blob=publicationFile
- [9] International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
- [10] Ying Zhen Li: Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels BRANDFORSK 2018:1
- [11] Ying Zhen Li: FIRE AND EXPLOSION HAZARDS OF NEW ENERGY CARRIERS IN ROAD TUNNELS. 2019
- [12] eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/>
- [13] European Alternative Fuels Observatory. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>
- [14] Liebl, J.: Experten-Forum Powertrain: Reibung in Antrieb und Fahrzeug 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2020
- [15] Exxon Mobil: Energieprognose Deutschland 2018 - 2040. 2018
- [16] Krafftahrt-Bundesamt: Jahresbilanz 2022, 2022. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html, abgerufen am: 28.06.2022
- [17] Célia Rich (Hrsg.): Vehicle Fire Investigation Statistical Study. Fires in Vehicles - FIVE 2014. 2014
- [18] U.S. Department of Transportation: An Analysis of Fires in Passenger Cars, Light Trucks, and Vans. NHTSA Technical Report (1994)
- [19] Yuguang Li: Analysis of vehicle fire statistics in New Zealand parking buildings
- [20] Yuguang Li: Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Buildings (2004)

- [21] Berghmans, J. u. Vanierschot, M.: Safety Aspects of CNG Cars. 2014 ISSST. Procedia Engineering 84 (2014), S. 33–46
- [22] Highway Loss Data Institute: Bulletin Vol.30 No.33 - Noncrash fire safety recall losses (2013)

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Havarieablauf Flüssigkraftstoff (z.B. Diesel / Benzin) [10].....	28
Abbildung 2: Havarieablauf verflüssigte Kraftstoffe (z.B. LPG / LNG) [10]	29
Abbildung 3: Havarieablauf Druckgas Kraftstoffe (z.B. CNG) [10]	30
Abbildung 4: Havarieablauf batterieelektrische Antriebe (z.B. PHEV / BEV) [10]	30
Abbildung 5: Überdruck über die Distanz von einem 10 kg 200 bar CNG Tank für freie Fläche und in einem Tunnel [11].....	33
Abbildung 6: BEV und PHEV Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018	35
Abbildung 7: Prozentualer Anteil von BEV und PHEV am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018	36
Abbildung 8: CNG Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018.....	36
Abbildung 9: Prozentualer Anteil von CNG-Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018	37
Abbildung 10: LPG-Fahrzeug Bestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018.....	37
Abbildung 11: Prozentualer Anteil von LPG-Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainer in den Jahren 2008 bis 2018	38
Abbildung 12: Gesamtfahrzeugbestand der Ostseeanrainerstaaten in den Jahren 2008 bis 2018	39
Abbildung 13: mögliche Entwicklung der Neuzulassungen in der EU [14]	39
Abbildung 14 Prognose des Fahrzeugbestands in Deutschland bis 2040 [15].....	40
Abbildung 15: Entwicklung der Brandhäufigkeit in unterschiedlichen Staaten in den Jahren 2005 bis 2012 [17].....	42
Abbildung 16: Brandwahrscheinlichkeit nach Unfall in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [18]	43
Abbildung 17: Gegenüberstellung Fahrzeugalter und Anteil an Bränden in Parkhäusern [19] [20].....	43
Abbildung 18 Eintrittswahrscheinlichkeiten CNG Fahrzeug (Datenquelle: [21])	44
Abbildung 19: Brandschäden über Fahrzeugalter mit und ohne brandbezogenen Rückruf [22]	46
Abbildung 20: Ladeversuch Nissan Leaf e+ Temperaturüberwachung mittels IR-Kamera	53
Abbildung 21 Demonstrator Ladeplatzüberwachung	60
Abbildung 22: Grundidee des Boundary Cooling Devices.....	66
Abbildung 23: Prototypen des Boundary Cooling Device	67
Abbildung 24 Funktionstest Boundary Cooling Device.....	68
Abbildung 25 Handlings-Test des Bondary Cooling Device in Schweden	68
Abbildung 26: Blick in den geöffneten Batterie- / Gastank-Dummy	69
Abbildung 27: Schnittansicht des Batterie-/Gastank-Dummys	69
Abbildung 28: Aufbau der Fahrzeugnachbildung	70

Abbildung 29: Versuchsaufbau „Ohne zusätzliche Kühlung“	71
Abbildung 30: Versuchsaufbau "Sprinkler"	72
Abbildung 31: Versuchsaufbau "BDC von der Seite"	73
Abbildung 32: Versuchsaufbau "BDC von Unten"	73
Abbildung 33: Versuchsaufbau „BDC von Unten + Sprinkler“	74
Abbildung 34: Temperaturverläufe der Messposition "Mitte" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	75
Abbildung 35: Temperaturverläufe der Messstelle "Oben" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	77
Abbildung 36: Temperaturverläufe der Messstelle "Unten" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	77
Abbildung 37: Temperaturverläufe der Messstelle "Unterhalb" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	78
Abbildung 38: Temperaturverläufe der Messstelle "Unterboden" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	79
Abbildung 39: Schnittansicht des Batterie-Dummy mit verbesserter thermischer Anbindung	80
Abbildung 40: Versuchsaufbau	81
Abbildung 41: Versuchsaufbau "Luft"	82
Abbildung 42: Versuchsaufbau "Wasser"	82
Abbildung 43: Versuchsaufbau "Wasserfüllung"	83
Abbildung 44: Temperaturverläufe der Messposition "Mitte" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	84
Abbildung 45: Temperaturverläufe der Messstelle "Oben" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	86
Abbildung 46: Temperaturverläufe der Messstelle "Unten" für die untersuchten Versuchskonfigurationen	86

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick und Aufteilung Alternativ angetriebener Fahrzeuge.....	19
Tabelle 2: Übersicht der Eigenschaften verschiedener Gasfahrzeuge.....	22
Tabelle 3: Übersicht der typischen Tankgrößen und deren Energieinhalt	22
Tabelle 4: Übersicht technischer Daten alternativer flüssiger Kraftstoffe	22
Tabelle 5: Übersicht über Elektrifizierte Antriebsstränge.....	23
Tabelle 6: Vergleich Wärmefreisetzung unterschiedlicher Kraftstoffe bei gleicher Schadensgröße [10]	31
Tabelle 7: Theoretische Flammenlänge nach Kraftstoff und PRD Durchmesser [10].....	32
Tabelle 8: Übersicht über die Gespeicherte / potentielle Explosionsenergie verschiedener Fahrzeugklassen bezogen auf die Radenergie (Reichweite) [10]	34
Tabelle 9: Schadenswahrscheinlichkeiten von CNG, LPG und Benzin (Datenquelle: [21]) ...	45
Tabelle 10: Fahrzeugübersicht Ladeversuche	52
Tabelle 11: Zulässige Spannungs- und Frequenzänderungen an Bord	63
Tabelle 12: Abgeführte Leistung der einzelnen Versuchsaufbauten	76
Tabelle 13: Abgeführte Leistung der einzelnen Versuche.....	85

15 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
abF	alternativ betriebene Fahrzeuge
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ALBERO	Transport <u>a</u> lternativ <u>b</u> etriebener Fahrzeuge auf <u>R</u> o <u>R</u> o-Fährschiffen
AP	Arbeitspaket
BCD	Boundary Cooling Device
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterie elektrisches Fahrzeug)
BLEVE	boiling liquid expanding vapour explosion
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Battery Management System (Batteriemanagementsystem)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CCS	Combined Charging System
CID	Current Interruption Device
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DDT	Deflagration to Detonation Transition (Übergang von Deflagration zur Detonation)
EAFO	European Alternative Fuels Observatory
EMSA	European Maritime Safety Agency
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FKIE	Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie
FSA	Formal Safety Assessment
HBRS	Hochschule Bonn-Rein-Sieg
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Voll-Hybrid)
HHR	Heat Release Rate (Wärmefreisetzungsrate)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
IFS	Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
IMDG-Code	International Maritime Dangerous Goods-Code
ISV	Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
LNG	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (Plug-In Hybrid)
PRD	Pressure Release Device (Druckentlastungseinrichtung)
PTC	Positive Temperature Coefficient
REX	Range Extender
RoRo	Roll on Roll off
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SOLAS	Safety of Life at Sea