



Schlussbericht zum Verbundprojekt

„Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen“

ALBERO

Teilvorhaben: Qualifikation von maritimem Personal für den sicheren
Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen im Fährverkehr

(FKZ: 13N14682)

Fördergeber:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektträger:

VDI Technologiezentrum

Projektlaufzeit:

01.08. 2018 – 31.12. 2021

Zuwendungsempfänger:

Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V.
Friedrich Barnewitz- Str. 4c
18119 Rostock Warnemünde
[www. schiffssicherheit.de](http://www.schiffssicherheit.de)

Inhalt

Abschnitt I – Ziele, Voraussetzungen und Herangehensweise	4
1. Hintergrund und Aufgabenstellung.....	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit.....	6
3.1. Projektplanung und Projektablauf – organisatorisch.....	6
3.2. Projektplanung und Projektablauf - inhaltlich	7
3.3. Zusammenarbeit – Partner- und Arbeitstreffen, Workshops, Veranstaltungen.....	9
3.4. Öffentlichkeitsarbeit.....	12
4. Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn.....	13
Abschnitt II – Eingehende Darstellung der Projektarbeiten und -ergebnisse	15
1. Fragenkatalog.....	15
2. AP 1 - Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften	17
2.1 Real-Brandversuche zum thermal runaway	17
2.2 Thermal runaway - charakteristische Temperaturen.....	21
2.3 Thermal runaway- Gasfreisetzung	26
2.4 Brandverhalten von Li-Ionen-Batterien.....	29
2.5 Löschwasserkontamination nach Bränden von Li-Ionen-Batterien	32
3. AP 2 - Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen.....	34
3.1 Unfallstatistiken von Elektrofahrzeugen in Bezug auf die Unfallursache	34
3.2 Wärmefreisetzungsrate bei Bränden von Elektrofahrzeugen.....	35
3.3 Besondere Transportbedingungen an Bord – Schiffsbewegungen.....	36
3.4. Besondere Transportbedingungen an Bord - Salzgehalt und Luftfeuchtigkeit	40
3.5. Besondere Transportbedingungen an Bord - Vibrationen durch Antriebssysteme.....	41
3.6 Gefahrguttransporte auf RORO-Fährschiffen	41
3.7 Gewichtsunterschiede zwischen konventionellen Fahrzeugen und Elektroautos.....	45
3.8 Transportaufkommen von alternativ betriebenen Fahrzeugen auf Fährschiffen.....	48
3.9 Havarien fahrzeugtransportierender Schiffe – statistische Untersuchung.....	49
3.10 Mögliche Auswirkungen von Unfällen mit alternativ betriebenen Fahrzeugen auf Passagiere, Crew und Schiff	53
4. AP 3 - Boarding-Konzept.....	57
5. AP 4 – Der sichere Transport.....	61
5.1 Analyse derzeitiger gesetzlicher Vorschriften für RORO-Fahrzeugdecks.....	61
5.2 Analyse von Löschmitteln und Löschsystemen für Brände von Li-Ionen-Batterien.....	61

5.3 Anpassung von Brandschutztechnik - Realversuche zur Wirkung von Brandbegrenzungsdecken in Kombination mit Wassersprühflutssystemen.....	67
5.4 Anpassung von Sicherheitstechnik - Ventilation	81
6. AP 5 - Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge	89
7. AP 6 - Qualifizierung des Personals	92
7.1 Erarbeitung von Lehrmaterialien	95
8. AP 7 – Gesamtkonzept	104
9. Zusammenfassung und Ausblick	105
10. Veröffentlichungen.....	106
11. Literatur.....	107
12. Anlagen.....	111

Abschnitt I – Ziele, Voraussetzungen und Herangehensweise

1. Hintergrund und Aufgabenstellung

Die Klimaveränderung, auch hervorgerufen durch den Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid aus Kraftfahrzeugen, hat die Autoindustrie veranlasst, Fahrzeuge mit alternativen Antrieben oder alternativen Kraftstoffen zu entwickeln. Es ist politisches Ziel, den Anteil an Elektrofahrzeugen in Deutschland in den nächsten Jahren deutlich zu erhöhen. Der zunächst stagnierende Absatz von Elektroautos hat durch die sich weiter verbesserte Ladetechnik und die dazugehörige Infrastruktur in den letzten Jahren deutlich zugenommen, eine Fortsetzung dieses Trends ist absehbar (Abbildung 1).

Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2011 bis 2021

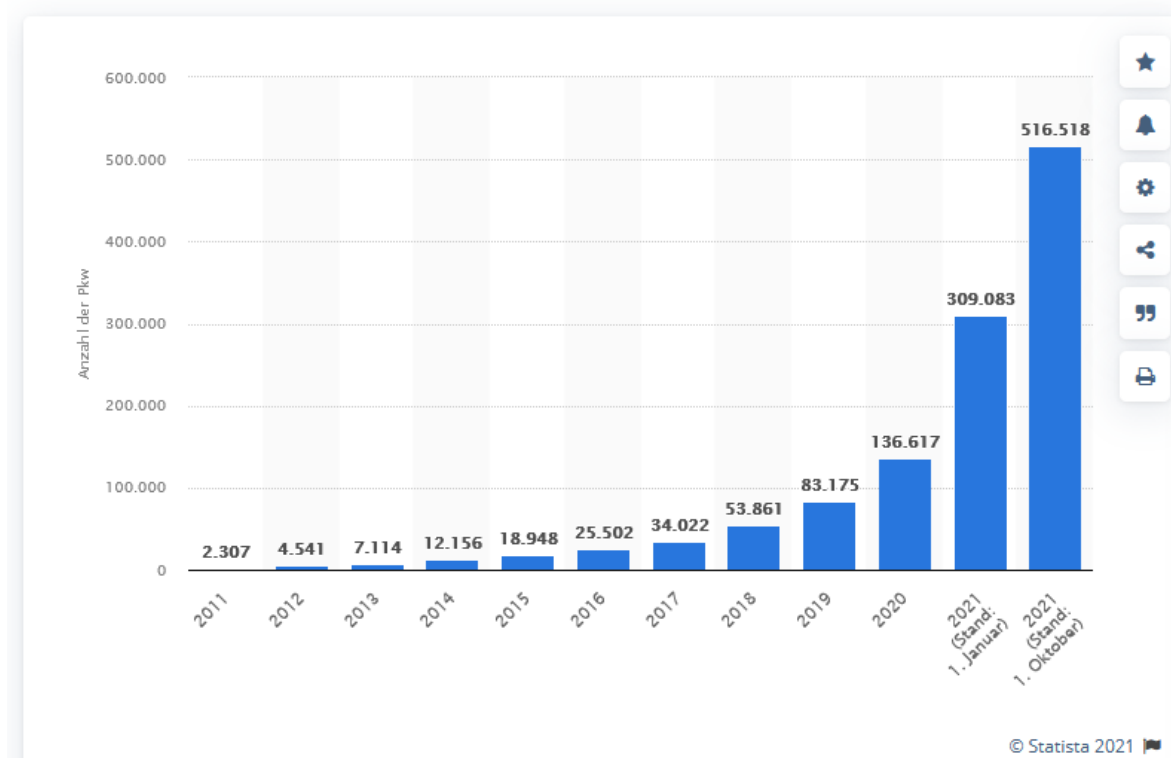


Abbildung 1: Entwicklung des Bestandes von Elektrofahrzeugen in Deutschland [1]

Parallel wird die Nutzung von Erdgas, Autogas oder Wasserstoff als umweltfreundlichere Kraftstoffe vorangetrieben. Die Zahl der in Deutschland zugelassenen Erdgasfahrzeuge lag zum 01. 01. 2021 bei ca. 100.800 [2]. Auch bei dem für den Fährverkehr besonders relevanten Bereichen des LKW-Transportes gilt Erdgas als Kraftstoff der Zukunft. Entsprechend werden zunehmend alternativ betriebene Fahrzeuge (ABF) auf RORO-Fährschiffen befördert.

Im Zusammenhang mit der zunehmenden Elektromobilität gibt es zudem vermehrt Kundenanfragen nach der Möglichkeit des Aufladens des Fahrzeuges während der Überfahrt 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 bzw. das Aufladen von Elektroautos während der Reise ergeben, vorbereiten.

Das Ziel des Verbundprojektes ALBERO war die Konzept- und Technologieentwicklung für die sichere Integration von alternativ betriebenen Fahrzeugen in den RORO-Fährverkehr. Dabei sollten sowohl alternative Antriebssysteme wie Elektrofahrzeuge und batteriebetriebene Autos als auch alternative Kraftstoffe wie Erdgas und Wasserstoff betrachtet werden. Im Projekt sollten technische, strukturelle und organisatorische Maßnahmen entwickelt werden, die den sicheren Transport und (für Elektrofahrzeuge) eine sichere Aufladung während der Fahrt ermöglichen. Speziell zur Gefahrenfrüherkennung lag ein Schwerpunkt auf der Entwicklung und Erprobung innovativer Gefahrendetektions- und Sicherheitssysteme. Darüber hinaus waren Empfehlungen für wirksame Bekämpfungsmaßnahmen in einer akuten Gefahrensituation zu erarbeiten. Zudem sollten Schulungskonzepte und Lehrmaterialien für RORO-Schiffsbesatzungen erstellt werden.

Im Teilprojekt sollten die folgenden Arbeitsziele erreicht werden:

- Ziel 1: Ermittlung und Analyse der relevanten Besonderheiten des Fährtransportes und deren Bewertung hinsichtlich des Transportes von ABF

Lösungsansatz:

Darstellung der generellen Bedingungen an Bord (Umgebungsbedingungen, Arbeitsprozesse,...) sowie der derzeit an Bord vorhandenen Sicherheitssysteme (Brandmeldesysteme, Löschanlagen, Ventilationssysteme usw., ihrer Standorte und Leistungsparameter) und deren Bewertung hinsichtlich des Transportes von ABF

- Ziel 2: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Havarien mit ABF und deren Auswirkungen

Lösungsansatz:

Kombination von seespezifischen Gefahrensituation (z.B. schweres Wetter) mit ermittelten Wahrscheinlichkeiten für ABF-Unfälle an Land, Übertragung der Auswirkungen vergleichbarer Unfälle der Vergangenheit (Explosionen, Brände an Bord) auf mögliche Havarien durch ABF

- Ziel 3: Anpassung der Sicherheitssysteme an Bord an die Anforderungen für einen sicheren Transport von ABF

Lösungsansatz:

Auswahl von geeigneten Sicherheitssystemen oder darin enthaltenen Komponenten, Erarbeitung von Konzepten für deren Einsatz an Bord, Testversuche, Optimierungsvorschläge

- Ziel 4: Qualifikation von maritimem Personal

Lösungsansatz:

Ermittlung der verschiedenen Personalgruppen, die in den Transport von ABF auf Fährschiffen involviert sind, Recherche zum Umgang mit der Thematik in den Ostseeanrainerstaaten, Erarbeitung von Kurskonzepten, Erstellung anschaulicher Lehrmaterialien auf der Basis der zuvor erhaltenen Arbeitsergebnisse

- Ziel 5: Erstellung eines Maßnahmenkataloges zur Gefahrenminimierung

Lösungsansatz:

Aufarbeitung der Projektergebnisse als Handlungsanleitung für Reedereien, Strukturierung nach baulichen, technischen, organisatorischen und personellen Maßnahmen, Vorlage des Maßnahmenkatalogs bei den zuständigen gesetzgebenden Gremien

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V. (ISV) ist ein gemeinnütziger Verein mit dem Satzungszweck der Verbesserung der Schiffssicherheit. Mit diesem Ziel betreibt das ISV Forschung zu den verschiedensten Aspekten der Sicherheit an Bord und auf See. Die ca. 10 fest angestellten Mitarbeiter des Institutes sind Spezialisten aus den Bereichen Nautik, Schiffsbetriebstechnik, Seerecht, Naturwissenschaften und Elektrotechnik. Seit 1992 wurden mehr als 47 Forschungsprojekte bearbeitet. Zudem führt das Institut Weiterbildungskurse als berufliche Qualifizierungsmaßnahmen für maritimes Personal durch. Diese Lehrgänge dienen im Wesentlichen dem Arbeits- und Gesundheitsschutz auf Seeschiffen sowie dem Notfallmanagement in Havariesituationen. Sie sind durch staatliche Behörden zertifiziert. Um einen hohen Standard der Lehrgänge zu gewährleisten, hat das Institut ein breites Netzwerk von ca. 40 Experten, die als Honorarkräfte je nach gefordertem Fachgebiet angefragt werden können. Mehr als 600 Lehrgangsteilnehmer im Jahr sorgen für einen stetigen Kontakt zur Praxis und die Kenntnis der Herausforderungen in der maritimen Branche. Durch die parallelaufenden Tätigkeitsfelder Forschung und Weiterbildung ist das ISV in der besonderen Lage, einerseits früh sicherheitstechnische Probleme in der Seefahrt zu erkennen und andererseits neue Forschungsergebnisse schnell an die Schiffsbesatzungen weiterzugeben.

Der Standort Warnemünde bietet zudem auch räumlich einen direkten Bezug zur maritimen Branche und ermöglicht eine enge Zusammenarbeit mit seefahrtsspezifischen Behörden und Institutionen, wie z.B. Wasserschutzpolizei, Seenotrettung und Verkehrsleitzentrale. Speziell innerhalb des Projektes ALBERO wurde dadurch eine intensive Zusammenarbeit mit den ortsansässigen Fährreedereien STENA Line, Scandlines und TT-Line erleichtert.

Das ISV ist in einer Vielzahl maritimer Gremien vertreten, so z.B. im Maritimen Cluster Norddeutschland MCN, im Nautischen Verein oder in der Vereinigung Deutscher Schiffingenieure. Zudem arbeitet das ISV in nationalen und internationalen gesetzgebenden Gremien mit, genannt sei hier die nationale Arbeitsgruppe für den Unterausschuss „Ship Systems and Equipment“ der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO).

3. Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit

3.1. Projektplanung und Projektablauf – organisatorisch

Das Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V. hat das Verbundprojekt ALBERO koordiniert.

Projektpartner:

- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, Stuttgart
- Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie, Bonn
- GTE Industrieelektronik GmbH, Viersen
- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach
- Lloyd's Register, Hamburg

Assoziierte Partner:

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI
- Scandlines Deutschland GmbH
- Stena Line GmbH & Co.KG
- TT-Line GmbH & Co. KG

- Verband Deutscher Reeder

Projektträger

VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

3.2 Projektplanung und Projektablauf - inhaltlich

Die Aufgabenplanung des Verbundvorhabens war in insgesamt 7 Arbeitspaketen festgelegt.

Darin hat das ISV in seinem Teilprojekt folgende Teilaufgaben bearbeitet:

Arbeitspaket 1

AP 1	Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften
1.4	Darstellung des Verhaltens von Lithium-Ionen-Batterien in Havariesituationen

Arbeitspaket 2

AP 2	Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährrschiffen
2.1	Analyse der besonderen Transportbedingungen an Bord
2.2	Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für Gefahren unter bestimmten Bedingungen an Bord
2.3	Einschätzung der möglichen Auswirkungen für Passagiere und Schiff im Falle eines Unfalls mit einem ABF (basierend auf den Ergebnissen aus 2.2)
2.4	Einschätzung der möglichen Auswirkungen für Personal
2.5	Ableitung eines Schutzkonzeptes nach strukturierten Prioritäten

Arbeitspaket 3

AP 3	Boarding-Konzept
3.3	Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord

Arbeitspaket 4

AP 4	Der sichere Transport
4.1	Analyse derzeitiger gesetzlicher Vorschriften für die Absicherung von RORO-Fahrzeugdecks
4.2	Erfassung der derzeit auf den Ostseefähren vorhandenen Sicherheitstechnik

4.5	Anpassung von Brandschutztechnik
4.6	Anpassung von Sicherheits- und Evakuierungssystemen
4.7	Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheits-Konzeptes für ABF-Stellplätze an Bord und Umsetzung als Demonstrator an Bord

Arbeitspaket 5

AP 5	Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge
5.1	Untersuchung zu möglichen Gefahren beim Laden infolge der besonderen Bedingungen an Bord
5.2	Ermittlung geeigneter Ladeorte an Bord
5.4	Erstellung eines Anforderungskataloges für die Auslegung von Ladesäulen für einen sicheren Betrieb an Bord
5.5	Erarbeitung eines abgestimmten Sicherheitskonzeptes für den Lade-Standort – Wie sichert man den Ladeplatz ab?
5.6	Simulation eines Ladevorgangs für Elektrofahrzeuge an Bord

Arbeitspaket 6

AP 6	Qualifizierung des Personals
6.1	Aufstellung aller am Transportprozess beteiligten Personen und deren Qualifikationen
6.2	Konzept für zielgruppenspezifische Qualifizierungskurse zum Umgang mit alternativen angetriebenen Fahrzeugen
6.3	Erstellen von Lehrmaterialien

Arbeitspaket 7

AP 7	Gesamtkonzept
7.1	Evaluation und Erstellung eines Gesamtkonzeptes / Maßnahmenkataloges zur Gefahrenminimierung
7.2	Erarbeitung von experts notes an die IMO für Sicherheitskonzepte auf Fährschiffen, FSA

3.3 Zusammenarbeit – Partner- und Arbeitstreffen, Workshops, Veranstaltungen

Bei der Projektarbeit war über den gesamten Projektverlauf eine enge Zusammenarbeit zwischen Projektpartnern, assoziierten Partnern, Unterauftragnehmern, externen Fachleuten sowie dem Projektträger notwendig. In Tabelle 1 sind die Termine aufgeführt, die unter Beteiligung des ISV stattfanden.

Datum	Veranstaltung/Termin
22.08.2018	Treffen am Fährterminal der Reederei Scandlines im Rostocker Überseehafen
01.10.2018 - 02.10.2018	Kick-Off-Meeting zum Projekt ALBERO in Warnemünde
08.10.2018 - 09.10.2018	Auftaktveranstaltung „Zivile Sicherheit - Verkehrs-Infrastrukturen“ in Frankfurt/Main
18.10.2018	Telefonkonferenz mit allen Partnern
23.11.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
04.12.2018	Mitfahrt auf der Hybrid- Fähre „Berlin“ der Reederei Scandlines
14.12.2018	Telefonkonferenz mit allen Partnern
10.01.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
15.01.2019	Gemeinsamer Workshop mit SUVEREN in Berlin
31.01.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
06.02.2019	Besichtigung und Interviews mit verschiedenen Autoherstellern und Besichtigung H ₂ -Tankstelle in Rostock
13.02.2019	Interview R. Lehmann/T. Specht Technische Überwachung Rostock GmbH
18.02.2019	Interview M. Warkentin FNS Rostock StreetScooter
19.02.2019	Interview J. Rehberg Nissan Autohaus Bad Doberan
20.02.2019	Gespräch Energieministerium Schwerin Frau Ziebarth
21.02.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
12.03.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
19.03.2019	Interview H. Mahnke Eichdirektion Nord Rostock
26.03.2019 - 27.03.2019	Besichtigungs- und Versuchsfahrt FS "Peter Pan" der Reederei TT-Line
08.04.2019	Interview Mennekes Kirchhundem
09.04.2019 - 10.04.2019	Projekttreffen in Rheinbach
24.04.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
06.05.2019 - 10.05.2019	Brandversuche in Trauen
15.05.2019	2. e-Mobilitätsmesse Nord Rostock, Vortrag D. Meißner zu ALBERO
22.05.2019	Treffen Projektpartner Hamburg AP 3 Boarding-Konzept
13.06.2019	Besichtigung Ellermann GmbH Delmenhorst
13.08.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
14.08.2019	Treffen mit Stena Line in Warnemünde
04.09.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
11.09.2019	Gespräch ÖPNV Schwerin Herr Kühnel in Schwerin

22.10.2019 - 24. 10 2019	Maritime Sicherheitskonferenz Bremerhaven / Interview Hafenbetreibergesellschaft Lübeck
07.10.2019 - 08.10.2019	Projekttreffen in Hamburg
29.10.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
21.11.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
26.11.2019	Treffen Gesamtverband der deutschen Versicherer Berlin
26.11.2019 - 27.11.2019	Besichtigungs- und Versuchsfahrt FS "Stena Hollandica" der Reederei Stena Line
12.12.2019	Telefonkonferenz mit allen Partnern
12.12.2019	47. Technologieabend „Zukunftstechnologie Wasserstoff-eine Chance für die Region“ Stralsund
16.01.2020	Telefonkonferenz mit allen Partnern
06.02.2020	Telefonkonferenz mit allen Partnern
14.02.2020	Treffen Hafenkaptän Rostock Herr Zachau
25.02.2020 - 26.02.2020	Meilensteintreffen bei FKFS in Stuttgart
06.03.2020	Gespräch Feuerwehr Hamburg Herr Krause
19.03.2020	Telefonkonferenz mit allen Partnern
23.03.2020	Skype-Meeting mit Lloyds Register, Start FSA
16.04.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
29.04.2020	Videokonferenz Workshop FSA
14.05.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
04.06.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
05.06.2020	Arbeitstreffen mit Fa ANOVA, (Unterauftragnehmer für Lehrprogramm) Rostock
01.07.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
01.07.2020	Arbeitstreffen mit Fa ANOVA, (Unterauftragnehmer für Lehrprogramm) Rostock
08.07.2020	Videokonferenz mit Lloyds Register: Further process of participation in the ALBERO FSA,
09.07.2020	Mitfahrt auf der Hybrid- Fähre „Berlin“ der Reederei Scandlines - ABB und Ladestation an Bord
15.07.2020	Arbeitstreffen mit Fa ANOVA, (Unterauftragnehmer für Lehrprogramm), Layout- Abstimmung, online
18.08.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
20.08.2020	Zusammenarbeit LASH FIRE - Videokonferenz: Discussion on cooling test coordination
21.08.2020	Arbeitstreffen mit Fa ANOVA, (Unterauftragnehmer für Lehrprogramm) Rostock
31.08.2020	Zusammenarbeit LASH FIRE - Videokonferenz: Discussion on cooling test coordination - continued
10.09.2020	Abstimmung Brandversuche /Strukturierung ALBERO
11.09.2020	Arbeitstreffen mit Fa ANOVA, (Unterauftragnehmer für Lehrprogramm) Rostock
15.09.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
16.09.2020	Vorbesichtigung FS "Mecklenburg-Vorpommern" - Bildaufnahmen für Schulungsprogramm ALBERO
17.09.2020	Videokonferenz mit GTE und FKFS zu Sensortests in Stuttgart
21.09.2020	Zusammenarbeit LASH FIRE - Videokonferenz: Fire detection closed RoRo spaces, especially thermal runaway batteries

22.09.2020	Videokonferenz mit Kölner Assekuranz, Herr Kempka und Kollegen
27.09.2020	Haupttermin FS "Mecklenburg-Vorpommern" - Bildaufnahmen für Schulungsprogramm ALBERO
30.09.2020 - 01.10.2020	Projekttreffen Rostock & über Webkonferenz (hybrid)
13.10.2020	Konferenz Baltisches Verkehrsforum, Rostock
14.10.2020	GoToWebinar - Fires in Alternately Powered Vehicles onboard Ships, LASHFIRE, Vortrag D. Meißner über ALBERO
27.10.2020 - 28.10.2020	HAZID Workshop Hamburg
05.11.2020	Videokonferenz mit Per Soholt und GTE
09.11.2020	Zusammenarbeit LASH FIRE - Videokonferenz: Vehicle Management, Hazards and risk analysis
17.11.2020	ALBERO HAZID Study follow up, online
19.11.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
19.11.2020	GoToWebinar - The Journey of EV Charging
10.12.2020	Videokonferenz mit allen Partnern
15.12.2020 - 16.12.2020	FIVE 2020 Digital Conference, Vortrag D. Meißner Über ALBERO
15.01.2021	ALBERO onboard charging demo, online meeting mit STENA
20.01.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
25.01.2021	Videokonferenz Verband Deutsche Automobilindustrie
26.01.2021 - 28.01.2021	Digitale Fachkonferenz Lithium-Ionen-Batterien, Vortrag D. Meißner über ALBERO
02.02.2021	Videokonferenz Verband Deutsche Automobilindustrie
10.02.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
10.02.2021	Videokonferenz mit F. Schwender, Löschdeckenvertrieb
19.02.2021	Videokonferenz mit Opel, Vorbereitung Brandversuche Trauen
25.02.2021	online-Fachveranstaltung des Maritimen Clusters Norddeutschland, Vortrag D. Meißner zu ALBERO
03.03.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
22.03.2021 - 26.03.2021	Brandversuche in Trauen
13.04.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
20.04.2021	Projekttreffen Onlineveranstaltung
11.05.2021	online: vfdb Tagung, Teilnahme
19.05.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
08.06.2021	Videokonferenz mit Opel und Stellantis, Kooperation mit LASHFIRE
10.06.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
24.06.2021	Videokonferenz mit Fa. Rosenbauer und Opel, LASHFIRE
30.06.2021	VDI-EE 3819 Blatt 5 - Brandschutz auf Parkflächen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben - Empfehlungen für Bestands- und Neubauten // 1. Sitzung online
01.07.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
06.07.2021	Videokonferenz VDA Arbeitskreis "Lithiumbasierte Sekundär-Energiespeicher"
12.08.2021	Videokonferenz mit Lloyds Register, Alex Pedgrift, Stand FSA

18.08.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
08.09.2021	Elektromobilitätsforum Neubrandenburg, Vortrag D. Meißner über ALBERO
15.09.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
21. - 23.09. 2021	internationale Konferenz AUBE in Duisburg, Vortrag D. Meißner über ALBERO
30.09.2021	VDI-EE 3819-5 Brandschutz auf Parkflächen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben: 2. Sitzung, online
05.10.2021	Videokonferenz VDA Arbeitskreis "Bergen und Retten"
06.10.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
12.10.2021	online-Fachveranstaltung zum Brandschutz bei Lithium Ionen Großspeichersystemen und Vorstellung des BVES-Leitfadens
14. - 15. 10. 2021	ALBERO- Abschlusskonferenz, Präsenzveranstaltung in Rostock
16.11.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
22.11.2021	VDI-EE 3819-5 Brandschutz auf Parkflächen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben: 3. Sitzung, online
25.11.2021	Videokonferenz Opel, GdV
14.12.2021	internationale Konferenz CFIS, Vortrag D. Meißner über ALBERO, online
16.12.2021	Videokonferenz mit allen Partnern
17.12.2021	Videokonferenz mit Lloyds Register, BMVI, Strategie Einreichung Guideline für Ladesäulen an Bord

Tabelle 1: Veranstaltungen mit ISV-Beteiligung während der Projektlaufzeit

Zu den Telefon- bzw. Videokonferenzen mit Beteiligung aller Projektpartner sowie zu den halbjährlichen Partnertreffen wurden durch das ISV in der Koordinatorrolle Protokolle angefertigt und allen Beteiligten zur Verfügung gestellt.

3.4 Öffentlichkeitsarbeit

- Für die Verbreitung und Diskussion der Projektergebnisse wurde eine **Webseite** angelegt: www.alberoprojekt.de
Diese Webseite stellt u.a. die Förderbedingungen, das Konsortium sowie die Zielstellungen des Projektes dar. Aktuelle Aktivitäten wurden in kurzen Zusammenfassungen beschrieben. Vor allem wurde jedoch darauf Wert gelegt, die durch die Partner erarbeiteten Ergebnisse allen Interessierten zeitnah öffentlich zugänglich zu machen. Entsprechend wurden thematische Arbeitsdokumente oder Versuchsergebnisse auf der Webseite veröffentlicht, die meisten davon sowohl in Deutsch als auch in Englisch. Auf diese Weise konnte eine große Reichweite für das Projekt geschaffen werden. Zahlreiche Kontaktaufnahmen von Behörden, Industrievertretern oder anderen Forschungsgruppen ergaben sich aufgrund der Webseite.
- Es wurde auch ein **Flyer** für das Projekt entwickelt, gedruckt und auf geeigneten Veranstaltungen ausgelegt.
- Die Projektergebnisse wurden auf **zahlreichen Veranstaltungen** in Präsenz oder online in Vorträgen dargestellt. (siehe Tabelle 1).
- Zudem gab es mehrere **Veröffentlichungen** in Fachjournalen und online-Zeitschriften (siehe Kapitel 10).

- Aufgrund der Ergebnisse des Projektes wurde das Institut auch zur **Mitarbeit an Richtlinien und Empfehlungen in verschiedenen Arbeitskreisen** eingeladen, so z.B. für die Empfehlung VDI-EE 3819-5 „Brandschutz auf Parkflächen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben“ des Vereins Deutscher Ingenieure oder für das Dokument „Standards für Quarantäneflächen für havarierte Elektrofahrzeuge“ des Arbeitskreises Bergen und retten innerhalb des Verbands der Automobilindustrie VDA.

4. Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

In Bezug auf das Thema des Vorhabens ergab sich zu Projektbeginn eine erste Schwierigkeit aus der Vielzahl von ABF und einer damit verbundenen korrekten Definition. Zudem unterschied die Gesetzgebung zwischen Fahrzeugen, die unbemannt als Ladung auf einem Schiff transportiert werden (Versand), also z.B. auf einem Autotransporter oder in einem Container, und Fahrzeugen, die mit individuellem Fahrer am Seetransport teilnehmen. Für erstere gibt es seit 2012 neue Regelungen im International Maritime Dangerous Goods -Code (IMDG-Code) [3]. Demnach müssen solche Fahrzeuge als Gefahrgut gekennzeichnet werden, es sein denn, sie erfüllen besondere Bedingungen [4]. Diese Regelungen gelten nach wie vor.

Dementsprechend ergaben sich Widersprüche, denn diese Forderungen sind für Fahrzeuge, die sich mit Fahrer auf einer Fähr-Überfahrt befinden, nicht einzuhalten. Sie müssten also als Gefahrgut gekennzeichnet werden. Da dies nicht realistisch durchsetzbar ist, gilt die Sondervorschrift SP 961 des IMDG-Codes, die besagt, dass Fahrzeuge, die auf RORO-Schiffen transportiert werden, von dieser Regelung ausgenommen sind.

Die International Maritime Organization (IMO) begann zum Zeitpunkt des Projektbeginns eine intensivere Beschäftigung mit der Problematik. So wurde eine Studie des Bundesverkehrsministeriums [5] durch die IMO in die internationale Diskussion eingebracht [6]. Darin wird z.B. auf eine besondere Gefahr durch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge hingewiesen und bemerkt, dass die auf RORO-Schiffen verwendeten Gassensoren für eine Wasserstoff-Detektion nicht ausgelegt sind. Weitere Untersuchungen zum Thema des Transportes von Elektrofahrzeugen auf RORO-Schiffen wurden als äußerst notwendig erachtet.

Bauliche Anforderungen an Schiffe werden durch die international geltende SOLAS-Convention [7] festgelegt. Darin sind u.a. die Anforderungen für Brandschutzanlagen oder Ventilationssysteme für verschiedenen Schiffstypen verankert. Kapitel II-2, Regel 20 bezieht sich auf RORO-Schiffe („Protection of vehicle, special category and roro-spaces“). Diese Regel hebt zunächst eine Besonderheit auf RORO-Fährschiffen hervor, nämlich, dass die üblicherweise auf Passagierschiffen streng geforderte Unterteilung in senkrechte Brandabschnitte in den über das ganze Schiff durchgehenden Fahrzeugdecks nicht angewandt werden kann. 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. Das durch das ganze Schiff verlaufende, nicht unterteilte Fahrzeugdeck ist in vielerlei Hinsicht eine besondere Gefahrenquelle auf RORO- oder ROPAX-Schiffen. So kann auch ein Wassereintrich sehr schnell zu drastischen Folgen führen, wie das verheerende Unglück der „Estonia“ zeigte. Die Regel 20 geht in keiner Weise auf die besonderen Gefahren ein, die sich durch den Transport von ABF ergeben. Daher forderte das

deutsche Verkehrsministerium bereits auf dem „Workshop on fires on ro-ro decks“ der European Maritime Safety Agency (EMSA) im September 2015 in Lissabon die Berücksichtigung des ABF-Transportes in dieser SOLAS-Regel, z.B. durch Anpassung der Luftwechselraten oder durch Installation spezieller Löschtechnik [8]. Konkrete Vorgaben, welche Technik genau zu verwenden sein sollte, gab es jedoch noch nicht. Die Branche stand hier in jeder Hinsicht (bauliche Strukturen, Brandschutz, Organisation) noch sehr am Anfang. Das Vorhaben ALBERO sollte hier eine wichtige Vorreiterrolle einnehmen.

Für die Gefahrenbekämpfung bei Havarien mit ABF an Land lag bereits eine Reihe von Studien und auch Versuchsreihen, z.B. für die Auswahl von geeigneten Löschmitteln für Li-Ionen -Brände [9], [10] vor. Inwieweit diese Maßnahmen und Technologien auf den Einsatz an Bord übertragbar sind, war noch nicht untersucht.

Welche Kompetenzen und Qualifizierung Seeleute haben müssen, wird international durch die STCW-Convention [11] geregelt. Neben den für alle Schiffstypen vorgeschriebenen Qualifizierungen sind in Regel V/2 und V/3 für Besatzungen auf RORO-Fahrgastschiffen nur zusätzliche Kompetenzen im Zusammenhang mit der Betreuung und Evakuierung von Passagieren vorgesehen. Der regelmäßige Besuch von entsprechenden Kursen muss durch die Seeleute nachgewiesen werden. Es waren keinerlei Weiterbildungs-Vorschriften für den Umgang mit Fahrzeugen überhaupt und daher auch nicht für den speziellen Umgang mit alternativ betriebenen Fahrzeugen vorgeschrieben. Auch hierin lag für das Projekt ALBERO ein hohes innovatives Potential.

Abschnitt II – Eingehende Darstellung der Projektarbeiten und - ergebnisse

1. Fragenkatalog

In der Anfangsphase des Projektes wurde gemeinsam mit allen Partnern ein strukturierter Fragenkatalog zu verschiedenen Aspekten der Thematik des Verbundprojektes erstellt. Ziel war es, Fragestellungen zum Umgang mit alternativ betriebenen Fahrzeugen aus der jeweiligen Sicht der unterschiedlichen Beteiligten zu erfassen, um generell ein Gesamtverständnis der Projektziele und der gemeinsamen Arbeitsweise zu ermöglichen. So war es auch möglich, einen Eindruck von der Komplexität des Themas zu bekommen. Dabei erfasst der Fragenkatalog vor allem solche Fragen, die sich erst während der Bearbeitung ergeben haben und nicht sowieso schon Bestandteil der festgelegten Arbeitspakete waren. Soweit die verschiedenen Partner die Fragen beantworten konnten, wurde die Antwort entsprechend zur Frage vermerkt und so allen Partnern zugänglich gemacht. Diese Arbeit wurde durch unser Institut in der Rolle des Koordinators übernommen. Es zeigte sich auch, dass es wichtig sein kann, erst einmal bestimmte Fragestellung überhaupt deutlich zu formulieren, auch, wenn absehbar ist, dass sie in der nächsten Zeit noch nicht beantwortet werden können. Es wird so jedoch ein Denkprozess über ausgewählte Details angestoßen, die bis dato vielleicht gar nicht bedacht worden sind. Der Fragenkatalog enthält mehrere hundert Fragen. Die folgende Tabelle 2 enthält daher nur einen Auszug. Der gesamte Katalog ist dem Bericht als digitaler Anhang beigefügt.

Elektrofahrzeuge	Antwort
Wie groß ist durchschnittlich der Abstand zwischen dem Boden und dem Unterboden eines Elektrofahrzeuges?	Es gibt keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen herkömmlichen und abF (wegen Anforderungen z.B. Rampen in Parkhäusern). Größere Unterschiede sind in der Bauart (Sportwagen, Pkw, SUV) bedingt. Als Mindestmaß gelten ca. 15 cm.
Welche Fahrzeuge verfügen über eine Fernüberwachung der Batterie?	Der ADAC hat 2016 verschiedene Fahrzeuge untersucht, wobei es nicht nur um Batterieüberwachung, sondern allgemein um die Übertragung von Daten vom Fahrzeug zum Hersteller ging: Mercedes B-Klasse, Renault Zoe, BMW 320d und i3.
Wie funktioniert die Fernüberwachung einer Batterie?	Daten, die vom Batteriemangement- und anderen Steuergeräten erzeugt werden, werden per Mobilfunk übertragen.
Wer erhält die Daten bei der Fernüberwachung einer Batterie?	Der Fahrzeughersteller. Der Besitzer kann bestimmte Daten wieder über eine App abfragen, bei VW z.B. auch Batterieladezustand, Reichweite, Status des Ladesteckers. Bei allen Systemen können bestimmte Funktionen ausgelöst werden, wie z.B. Türen verriegeln / Scheiben schließen, Standheizung einschalten, Optimierung des Ladevorgangs im Hinblick auf den Ladezustand zum Abfahrtszeitpunkt.
Was passiert, wenn eine fernüberwachte Batterie eine Störung meldet?	In den Beschreibungen der Hersteller für Ihre Vernetzungssysteme finden sich keine Informationen über direkte Benachrichtigungen bei Schäden / Störungen, aber bei Unfall / Diebstahl / Parkbeschädigungen / Wartungsbedarf etc. Technisch ist also vieles möglich... Beim Renault Zoe wird die Batterie geleast. Z.B. kann das Aufladen gesperrt werden, wenn der Fahrzeugbesitzer mit den Leasingraten im Rückstand ist.

Welche Unterscheidung der E-Fahrzeuge gibt es?	Elektrofahrzeuge im Sinne des § 2 des Elektromobilitätsgesetzes (EmoG) sind elektrisch betriebene Fahrzeuge, wobei das EmoG zwischen drei Typen des Elektrofahrzeugs differenziert: reine Batteriefahrzeuge, Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge. Reine Batteriefahrzeuge verfügen ausschließlich über einen Elektromotor. Die Batterie im Fahrzeug wird über das Stromnetz aufgeladen. Die aus dem Englischen stammende Abkürzung BEV (Battery Electric Vehicle) ist mittlerweile gängig für reine Batteriefahrzeuge. Hybridelektrofahrzeuge sind mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor ausgestattet. Ist die Batterie von außen aufladbar, spricht man von einem Plug-In-Hybrid Electric Vehicle, kurz PHEV. Nur dann liegt ein Elektrofahrzeug im Sinne des EmoG vor. Brennstoffzellenfahrzeuge erzeugen elektrische Energie aus den Energieträgern Wasserstoff durch eine Brennstoffzelle. Die erzeugte elektrische Energie wird dabei entweder direkt mithilfe des Elektrobetriebs umgewandelt oder in einer Batterie zwischengespeichert. Betankt wird das Fahrzeug an Wasserstofftankstellen.
Wo genau befinden sich die Batterien bei abF?	Es gibt verschiedene Lösungen z.B. abhängig davon, ob die Plattform eines konventionellen Fahrzeugs "nachträglich" auch für ein E-Fahrzeug verwendet wird oder ob es sich um eine spezielle, neu entwickelte E-Fahrzeug-Plattform handelt. Grundsätzlich gilt so tief wie möglich im Fahrzeug und nicht in den crashgefährdeten Zonen. Deshalb sind in den neueren Konzepten flache Batteriepacks (>)1,8x1,5x0,15m im Unterboden zwischen den Achsen angeordnet bzw. auch als tragendes Element in die Fahrzeugstruktur integriert.
Wie sind die Batterien bei abF eingebaut?	Immer häufiger als tragendes Element an der Fahrzeugunterseite fest mit der Fahrzeugstruktur verschraubt.
Welche Kunststoffe werden für die Ummantelung/die Dämmung von Akku-Packs verwendet?	Batteriegehäuse sind typischerweise aus Metall wegen Crash- und Brandsicherheit (z.B. nach einigen Bränden bei Tesla-Modellen eingeführte Titanhülle). Es sind aber auch Gehäuse auf Silikonbasis in Entwicklung, die die derzeit weltweit strengsten chinesischen Vorschriften erfüllen. Sie sollen benachbarte Komponenten vor Temperaturen über 1000°C schützen und für 15min. verhindern, dass sich ein von der Batterie ausgehender Brand im Fahrzeug ausbreitet. https://www.automobil-produktion.de/zulieferer/batteriegehaeuse-freudenberg-zeigt-material-auf-silikonbasis-261.html In der Batterie werden z.B. in größeren Mengen (5 bis 10 kg) thermisch leitende GapFiller zur Verbindung der Komponenten bzw. zum Auffüllen von Hohlräumen verwendet, die aus Silikon mit wärmeleitenden Zusätzen (z.B. Zink- bzw. Aluminiumoxid) bestehen.
Ist die Airbag-Auslösung generell mit der Abschaltung der Hochvolt-Anlage gekoppelt?	Ist Stand der Technik (siehe auch Absperrventil bei Gastanks), wurde allerdings nicht für jedes auf dem Markt befindliche Modell nachgeprüft.
Ist jedes Elektrofahrzeug mit Airbags ausgerüstet?	Ja, wenn man im Rahmen der Zielsetzung von ALBERO unter E-Fzg. Pkw, SUV und Nutzfahrzeuge und nicht Zweiräder und irgendwelche Billig- und Experimentierlösungen versteht.
Gasbetriebene Fahrzeuge	Antwort
Wo befinden sich die Sicherheitsventile bei gasbetriebenen Fahrzeugen? (H2, LPG, CNG, LNG)	Laut UN ECE R110 dürfen Öffnungen in Gastanks nur an den Stirnseiten angebracht sein, dort sitzt auch das Tankventil, eine Kombination aus manuellem und elektrischen Absperrventil, Durchflussbegrenzer und Thermosicherung. Das elektrische Absperrventil wird u.a. vom Airbag-Steuergerät geschlossen. Da die Tanks meist quer im Fahrzeug eingebaut sind, sitzt dieses Ventil auf der rechten oder linken Fahrzeugseite.
In welche Richtung blasen die Sicherheitsventile bei gasbetriebenen Fahrzeugen ab?	Nach unten und so, dass keine entflammaren Komponenten beaufschlagt werden. Ggf. können auch Abschirmbleche eingebaut werden.
Laden von Elektrofahrzeugen	Antwort
Batterien	Antwort
Wenn bei Kälte eine Entladung der Batterie auftritt: kann es passieren, dass bei längerer Überfahrt im Winter das Fahrzeug am Ankunftsort leer ist und gar nicht mehr von Bord fahren kann?	Kann in der Kombination tiefe Temperaturen und Fahrzeug fährt mit ziemlich leerer Batterie auf die Fährde prinzipiell passieren. Hängt stark von der Strategie des Batteriemanagementsystems und der Dauer der Fahrt ab, aber wenn keine Energie mehr zur Heizung der Batterie zur Verfügung steht, sinkt die Batterietemperatur unter die zulässige Betriebstemperatur, für die in der Literatur unterschiedliche Temperaturen ab 0°C angegeben werden. Ab ca. - 25°C kann die Batterie auch nicht mehr geladen werden, da dann u.U. der Elektrolyt gefriert. Unterschiedliche Temperaturangaben in der Literatur.

Wie warm wird eine Batterie bzw. ein Elektromotor im normalen Betrieb?	Optimaler Temperaturbereich für Li-Ion Batterien 20 bis 40°C, > 60 bis 70°C können die ersten Reaktionen beginnen, die letztendlich zum Thermal-Runaway führen. Die meisten der Fahrzeug-Elektromotoren werden wassergekühlt, Temperaturen ca. 100°C oder etwas darüber, vergleichbar zum Verbrennungsmotor. Einzelne Bauteile im Innern können Temperaturen bis 160°C, ggf. (kurzfristig) auch darüber erreichen.
Gibt es Erfahrungen mit dem Aufladen von Batterien bei Vibrationen oder Bewegungen?	Die UN-Regelung 100 "Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb" sieht eine Vibrationsprüfung während des Ladens vor: Die Schwingungsrichtung entspricht der Hochrichtung (bezogen auf den Einbaustand) und die Schwingungen wirken direkt auf das Batteriemodul, so dass die dämpfende Wirkung von Reifen und Batteriegehäuse entfällt. Es werden innerhalb von 15 Minuten Frequenzen zwischen 7 und 50 Hz und zurück durchfahren. Zwischen 7 und 18Hz beträgt die Amplitude 10m/s**2, zwischen 18 und 30Hz wird sie schrittweise von 10 auf 2m/s**2 reduziert und zwischen 30 und 50Hz beträgt sie 2m/s**2. Dieser Zyklus wird 12 mal wiederholt, das Fahrzeug danach im Standardfahrzyklus bewegt und 1h lang beobachtet. Zum Vergleich: Am Arbeitsplatz dürfen Menschen einer Beschleunigung von höchstens 1,15m/s**2 ausgesetzt sein.
Aus einer HV-Batterie können bei einer Havarie Kühlmittel oder Elektrolyt als Flüssigkeiten austreten. Was sind typische Kühlmittel, was sind typische Elektrolytflüssigkeiten?	Neben der aktiven oder passiven Luftkühlung gibt es verschiedene Formen der Flüssigkeitskühlung. Entweder wird vergleichbar zur Kühlung von Verbrennungsmotoren ein Kühlkreislauf, der mit einer Mischung aus Wasser und Ethandiol=Ethylenglykol (Handelsname Glysantin) befüllt ist, betrieben oder es wird direkt Kühlmittel aus der Fahrzeugklimaanlage durch die Batterie gepumpt. Für den ersten Fall erfolgt die Wärmeabfuhr über einen Wärmetauscher entweder zur Luft, die aus dem klimatisierten Innenraum abgesaugt werden kann oder in den Kreislauf der Klimaanlage. Seit Januar 2017 ist das Kältemittel R134a in allen neuen Pkw verboten, seither wird überwiegend R1234yf verwendet, obwohl dieses brennbar ist und im Brandfall auch Flusssäure entstehen kann. Typische Elektrolytflüssigkeiten sind Salze, wie LiPF6 (Lithium-Hexafluorophosphat) oder LiBF4 (selten) in wasserfreien aprotischen Lösungsmitteln (z.B. Ethylencarbonat, Diethylencarbonat etc.).
Unfälle mit abF	Antwort
Um die Spannungsfreiheit festzustellen: kommt hier ein spezieller Spannungsprüfer zum Einsatz oder kann dieser auch in einem Baumarkt gekauft werden?	Für die in Fzg.-Batterien anzutreffenden Spannungen kommt nur ein sog. zweipoliger Spannungsprüfer mit VDE/GS-Zulassung in Frage, also 2 Prüfspitzen mit Verbindungskabel. Für diese gilt die Norm DIN EN 61243-3. Manche Fahrzeuge haben auch einen integrierten Spannungsprüfer und eine Anzeige (am Armaturenbrett).

Tabelle 2: Fragenkatalog für das Verbundprojekt (Auszug)

2. AP 1 - Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften

In Arbeitspaket 1 ging es insbesondere um die Ursachen eines thermal runaway bei Li-Ionen-Batterien und die zu erwartenden Auswirkungen. Dazu wurden umfangreiche Literaturrecherchen sowie real-Brandversuche durchgeführt.

2.1 Real-Brandversuche zum thermal runaway

Innerhalb des Forschungsprojektes ALBERO wurden vom 06. 05. – 10. 05. 2019 Versuche mit Li-Ionen-Akkus auf dem Brandversuchsgelände in Trauen (Lüneburger Heide) durchgeführt. Die Versuche wurden durch den Unterauftragnehmer IFAB (Ingenieurbüro für angewandten Brandschutz) begleitet. Dabei handelte es sich um zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zielstellungen.

Versuchsreihe A: Bestimmung von Temperaturentwicklungen und Messung der freigesetzten Gase und Stoffe aus Akkumulatoren während eines thermal runaway

Für diese Versuche wurde ein Fahrradakku so präpariert, dass er ferngesteuert durch ein integriertes Heizelement (10V, 10A) lokal überhitzt werden konnte. Er wurde in einem 1 m³ Messvolumen aufgehängt, welches über eine Absaugung mit verschiedenen Messgeräten (u.a. mobiles Massenspektrometer) verbunden war.

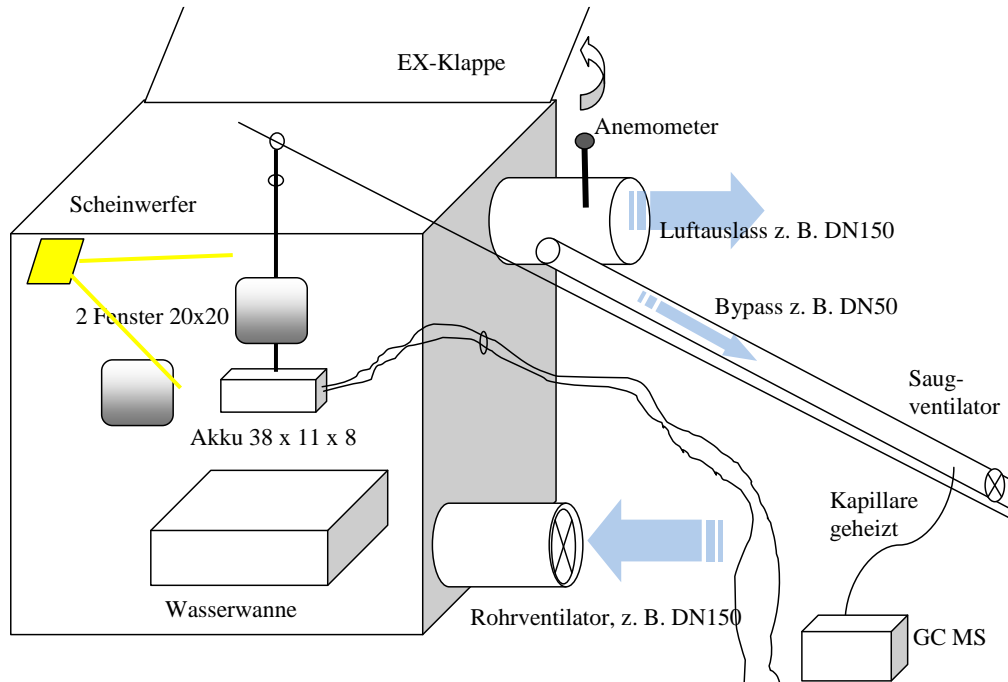


Abbildung 2: Schema Versuchsaufbau für die Versuchsreihe A

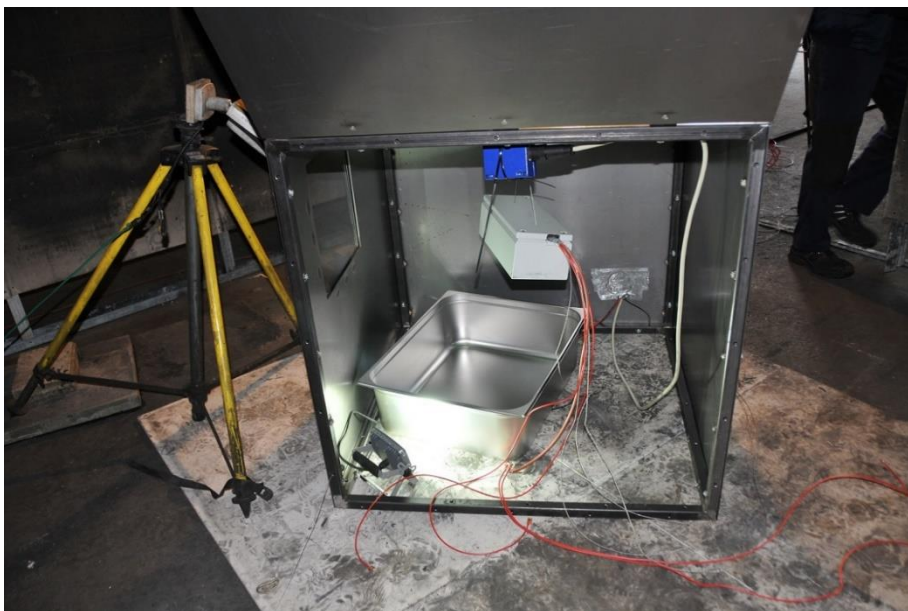


Abbildung 3: umgesetzter Versuchsaufbau, Versuchsreihe A

Nach Starten des Heizelements wurde die Gas- und Temperaturentwicklung an verschiedenen Stellen des Akkumulators sowie im umgebenden Messvolumen bestimmt. Die Versuche wurden alle durch ein Fallenlassen des Prüflings in einen Wasserbehälter beendet. Aus allen Wasserbehältern wurden ca. 10 – 20 min nach Beenden des Versuches Wasserproben genommen.

Ergebnisse

Hallentemperatur bei allen Versuchen: 16°C

Versuch	Zelltyp	Max. T innen	Max. ΔT außen	Max. H ₂ -Konz ppm	Beobachtungen
A1	Prisma	600	7	40	Austritt von H ₂ bei ca. 92°C, TR bei ca. 150°C
A2	Rund	150	10	1	Explosion – Stichflamme bei Innentemperatur von 60°C
A3	Pouch	650	6	12	TR bei ca. 120°C, Freisetzung von H ₂
A4	Pouch	300	4	20	TR bei ca. 120 °C, Freisetzung von H ₂

Tabelle 3: Ergebnisse der Real-Brandversuche, Versuchsreihe A

Bei allen Versuchen erfolgte nach der initialen thermischen Störung ein thermal runaway und Gase wurden freigesetzt, in einem Fall verbunden mit einer Stichflamme. Das erste gemessene Gas war immer Wasserstoff. Die Akkus reagierten, je nach Bauform, verschieden. Die jeweilige Zellchemie war nicht bekannt.

Versuchsreihe B: Löschversuche zur Bewertung der derzeit an Bord von Fährschiffen auf Fahrzeugdecks vorhandenen Löschtechnik

Diese Versuche hatten zum Ziel zu überprüfen, ob mit den gegenwärtig auf einem Fahrzeugdeck vorgeschriebenen Löschanlagen ein Akkubrand gelöscht bzw. eingedämmt werden kann.

Für diese Versuche wurden jeweils 4 Fahrradakkus „autoakkuähnlich“ in einem Alugehäuse zusammengepackt. Darüber wurde eine größere Blechplatte gelegt, um die Abdeckung durch das Auto zu simulieren. Die Störung erfolge durch eine ebenfalls in das Alugehäuse integrierte Heizplatte (Abbildung 4). Die Anordnung stand auf einem einfachen Gestell so über dem Boden wie etwa der Abstand Autoakku zum Boden bei einem parkenden Auto wäre (Abbildung 5).



Abbildung 4: Versuchsaufbau, Versuchsreihe B: Fahrradakkus in Alukiste mit Heizplatte

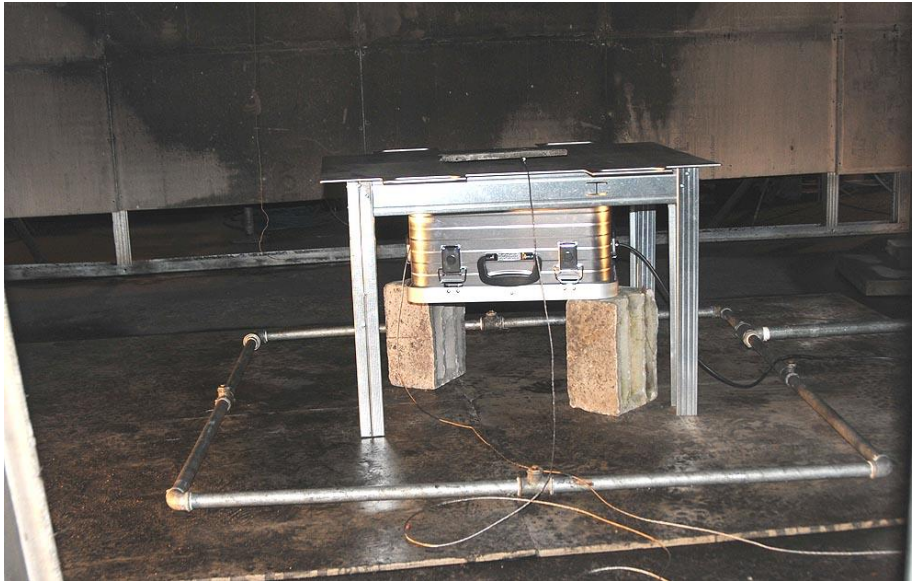


Abbildung 5: Versuchsaufbau, Versuchsreihe B

Ergebnisse

Versuch B1 - Referenzversuch (ohne Absicht zu löschen)

- nach 27 min 212 °C in Kiste, 51 ° oben auf der abdeckenden Stahlplatte
- nach 31 min starke Aerosolfreisetzung und gleichzeitige Zündung,
- nach 50 min letzte sichtbare Flamme,
- während des gesamten Versuches nur geringe Ventilation (0,2 m³/s)
- nach 70 min Abbruch Heizung aus, Kiste zunächst von außen mit Vollstrahl besprüht, dann Blechplatte entfernt, Kiste geöffnet, Kiste geflutet, geflutete Kiste aus Halle getragen

Versuch B2 – Einsatz Sprühflutlöschanlage

- nach 29 min starke Aerosolfreisetzung,
- nach 44 min Zündung des Behälters,
- nach 45 min Beginn Sprühflut nur von oben (80l/min),
- nach 60 min letzte sichtbare Flamme
- nach 64 min Wasser aus (360°C in der Kiste)
- während des gesamten Versuches Ventilation (1,2 m³/s)
- nach 71 min Abbruch (320°C in der Kiste)

Versuch B3 – Wiederholung Versuch 2 (jedenfalls so geplant)

- nach 13 min Ventilation eingeschaltet auf 1,2 m³/s
- nach 22 min wenig Gasaustritt, 154 °C in der Kiste
- nach 37 min Ventilation ausgefallen
- nach 42 min starke Aerosolfreisetzung, keine Zündung, 260°C in der Kiste
- nach 45 min Ventilation wieder an, 330°C in der Kiste
- nach 70 min Abbruch, 223 °C in der Kiste
- kein Einsatz von Wasser (Sprühflut) während des Versuches, da keine Zündung

Versuch B4, Lüftung auf 1,2m³/s

- zu Beginn des Versuches Ventilation (1,2 m³/s)
- nach 6 min Unterbrechung wegen Computerabsturz (auch Heizen unterbrochen!)
- nach 9 min weiter heizen (73°C in der Kiste)
- nach 30 min starke Aerosolfreisetzung, keine Zündung, 138° C in der Kiste
- nach 50 min 245°C in der Kiste
- nach 62 min Lüftung reduziert auf 0,6 m³/s
- nach 75 min Abbruch
- kein Einsatz von Wasser (Sprühflut) während des Versuches, da keine Zündung

Bei allen gefluteten Kisten konnte noch lange (Stunden) nach Versuchsabbruch Gasentwicklung beobachtet werden. Bei Versuch B1 oder Versuch B2 war die äußere Alu-Kiste deutlich sichtbar von Rundzellen durchschossen worden (Abbildung 6). Bei den Versuchen B1, B2 und B3 war der Deckel der Alu-Kiste stark verrußt, bei Versuch B4 nicht.



Abbildung 6:

Durchtritt von Rundzellen durch die Alukiste

Obwohl die Prüflinge vergleichbar aufgebaut und angeordnet waren und auch die Erwärmung mit der Heizplatte nach einem einheitlichen Muster erfolgte, stellte sich das Ausgasungs- bzw. Brandverhalten bei jedem Versuch sehr unterschiedlich dar, teilweise kam es zwar zu extremer Gas- und Aerosolfreisetzung, aber nicht zu einer Zündung. Für wirklich vergleichbare Aussagen hinsichtlich des Löschverhaltens von Löschanlagen sind daher noch deutlich mehr Versuche notwendig.

2.2 Thermal runaway - charakteristische Temperaturen

Fahrzeugbatterien können durch innere (elektrische Fehlfunktionen, Überladung, unkontrollierte chemische Reaktionen) und äußere (Sonneneinstrahlung, Brand in der Umgebung, heiße Oberflächen in der Nähe) Prozesse überhitzen. Dann kann es zum thermal runaway kommen. Dieser Begriff bezeichnet die Überhitzung einer exothermen chemischen Reaktion oder einer technischen Apparatur aufgrund eines sich selbst verstärkenden Wärme produzierenden Prozesses [12].

In den letzten Jahren wurden in vielen Arbeitsgruppen der Welt kalorimetrische Untersuchungen zum Verhalten von Li-Ionen -Batterien unter thermischer Belastung durchgeführt. Dabei wurden in der

Regel 18650-Einzelzellen in einem aufheizbaren Kalorimeter analysiert. Mit den Jahren wurden die Untersuchungen immer detaillierter, man machte Unterscheidungen zur Zellchemie, zum Ladezustand bis hin zum Alterungszustand usw. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich auch mit dem thermal runaway während des Aufladens/Entladens. Der klassische Kurvenverlauf eines solchen Experiments ist in Abbildung 7 dargestellt.

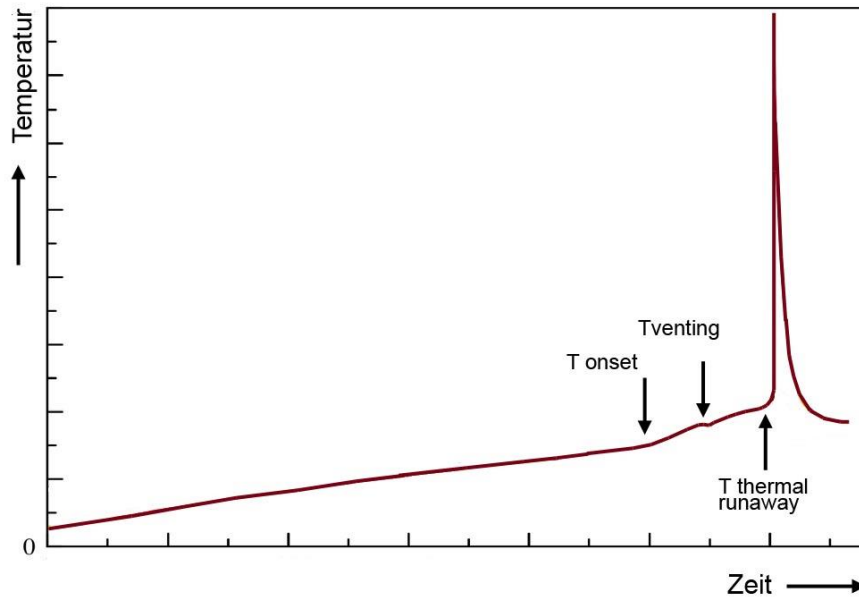


Abbildung 7: Typischer Verlauf eines thermal runaway einer Li-Ionen-Batterie

Dabei unterscheidet man die onset-Temperatur, also den Ansatz, bei dem die Wärmeentwicklung von der konstanten Aufheizrate abweicht und die thermal runaway-Temperatur, bei der die chemischen Reaktionen in der Zelle sich selbst immer weiter beschleunigen und daher ein sehr plötzlicher sehr starker Temperaturanstieg zu verzeichnen ist. Die Definition, ab welcher Temperatur vom thermal runaway gesprochen wird, ist unterschiedlich. Manche legen z.B. eine Temperaturänderung von mind. 4°C/s fest [13], andere 100°C/min [14]. Gelegentlich wird auch die Temperatur explizit angegeben, bei der die Zelle aufplatzt und Gase freigesetzt werden (T venting). Diese befindet sich in der Regel zwischen der onset- und der runaway-Temperatur.

Es wurde eine umfassende Literaturrecherche zu wissenschaftlichen Arbeiten durchgeführt, die sich mit der Bestimmung der Thermal-Runaway -Temperatur beschäftigen. Tabelle 4 zeigt einen Ausschnitt daraus. Die getesteten Zellen und grob die Versuchsbedingungen sowie die gefundenen Ergebnisse auf. Die Übersicht erfasst nur einen Ausschnitt der durchgeführten Forschungen, gibt aber einen repräsentativen Eindruck hinsichtlich der Ergebnisse.

Angaben zur Batterie	Wie erhitzt?	Thermal runaway ab [°C]	Quelle
Sony (US18650) 4.06V open circuit voltage (OCV)	Erwärmt in Kalorimeter	104	Al Hallaj, S.; Maleki, H.; Hong, J.; Selman, J. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion
Sony (US18650) 3.0V, open circuit voltage (OCV)		109	

Sony (US18650) 2.8 V open circuit voltage (OCV)		144	batteries. <i>J. Power Sources</i> 1999 , 83, 1–8.
18650 Li-NMC (Li(Ni _{0.45} Mn _{0.45} Co _{0.10})O ₂)	Beheizbarer Reaktor mit Thermoelementen	TR bei 220, Aufbruch der Zelle bei 160	Andrey W. Golubkov et. al : Thermal runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivon-type cathodes, <i>RSC Adv.</i> , 2014 (4), 3633 - 3642
18650 LCO/NMC LiCoO ₂ and Li(Ni _{0.50} Mn _{0.25} Co _{0.25})O ₂ .		TR bei 208	
Li(NiCoAl)O ₂ nominal capacity of 3350 mAh at a nominal voltage of 3.60 V	Beheizbarer Stahlreaktor mit Thermoelementen	TR bei 173, Aufbruch der Zelle bei 130	Alexander Königseder: Investigation of the Thermal Runaway in Lithium Ion batteries, <i>Masterarbeit</i> , Technische Universität Graz, März 2017
Li(NiMnCo)O ₂ , 3200 mAh at a nominal voltage of 3.75 V		TR bei 166, venting 129	
Li(NiMnCo)O ₂ , 3500 mAh and a nominal voltage of 3.64 V		TR bei 150, venting 122	
Li(Ni _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05})O ₂ 3500 mAh and a nominal voltage of 3.60 V		TR bei 166, venting 129	
Li(NiCoAl)O ₂ , 3300 mAh at a nominal voltage of 3.60 V		TR bei 156	
Li(NiMnCo)O ₂ , 2500 mAh and a nominal voltage of 3.60 V		TR bei 196, venting 117	
Li(NiMnCo)O ₂ , 2600 mAh at a nominal voltage of 3.7 V		TR bei 153, venting 147	
18650-zylindrische bzw. prismatische LiCoO ₂ -batterien, Spiralwicklung, Unterschiede in der Verknüpfung der Einzelzellen (S-Typ oder M-Typ)	Störung der Mittelzelle in einem 9-er Pack mit Heizelement, Überwachung der Temp. direkt an der Triggerzelle und an umgebenden Zellen	TR der Triggerzelle bei verschiedenen Versuchen: 204, 186, 119, 200, 157, 151	Carlos F. Lopez, Judith A. Jeevarajan, Partha P. Mukherjee: Experimental Analysis of Thermal Runaway and Propagation in Lithium-Ion Battery Modules, <i>Journal of The Electrochemical Society</i> , 162(9) A1905-A1915, 2015
18650 LiFePO ₄	Erhitzen im Kalorimeter	T onset bei 200	Wen, CY., Jhu, CY., Wang, YW. et al.: Thermal runaway features of 18650 lithium-ion batteries for LiFePO ₄ cathode material by DSC and VSP2 <i>J Therm Anal Calorim</i> (2012) 109: 1297. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2573-2
Li-ionen, 2200 mAh, 3,7 V	Keine Angaben	To bei 92 TR bei ca. 150	https://www.netzsch-thermal-analysis.com/de/materialien-applikationen/batterien/lithium-ion-cells-thermal-runaway/
LiFePO ₄ , 1200 mAh, 3,3 V		To bei 80 TR bei ca. 170	
LiFePO ₄ , 1100 mAh, 3,2 V		To bei 116 TR bei ca. 165	
18650 LCO, 2600 mAh	Erhitzen im Kalorimeter	To bei 131	Jhu, C.Y.; Wang, Y.W.; Wen, C.Y.; Shu, C.M. Thermal runaway potential of LiCoO ₂ and Li(Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3})O ₂
18650 NMC, 2000 mAh		To bei 175	

			batteries determined with adiabatic calorimetry methodology. Appl. Energy 2012 , 100, 127–131.
18650 LCO / Graphit, 2600 mAh, 30% geladen	Erhitzen im Kalorimeter	To bei 175	Chen, W.C.; Wang, Y.W.; Shu, C.M. Adiabatic calorimetry test of the reaction kinetics and self-heating model for 18650 Li-ion cells in various states of charge. J. Power Sources 2016 , 318, 200–209.
50% geladen		To bei 174	
80% geladen		To bei 140	
100 % geladen		To bei 122	
18650 LCO / Graphit, 800mAh 0% geladen	Erhitzen im Kalorimeter bei verschiedenen Ladezuständen	To bei 165	Mendoza-Hernandez, O.; Ishikawa, H.; Nishikawa, Y.; Maruyama, Y.; Umeda, M. Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge. J. Power Sources 2015 , 280, 499–504.
25% geladen		To bei 160	
50% geladen		To bei 155	
75% geladen		To bei 140	
100% geladen		To bei 125	
120 % geladen		To bei 116	
Fahrradakku, Hersteller Phylion, 100% geladen, aber typisch ca. 50% Kapazität aufgrund von Zellenalterung	Elektrisches Erhitzen, Einseitig, 150 W		Versuchsergebnisse ALBERO Mai 2019, Trauen
Prismatische Zellen (Versuch A1)		TR bei > 150°C 45min	Hinweis: Die Temperaturmessung erfolgt außerhalb der Zelle, der Heizquelle abgewandt. Daher ist die Zelltemperatur höher als die Temperatur der Messstelle.
Rundzellen (Versuch A2)		TR bei > 60°C 17 min, Stichflamme	
Pouchzellen (Versuch A3)		TR bei ca. >120°C, 22 min	
Pouchzellen (Versuch A4)		TR bei ca. >120°C, 17 min	

Tabelle 4: Literaturrecherche zu Untersuchungsergebnissen zum thermal runaway von Li-Ionen-Batterien (Auszug)

Je nach Aufheizbedingungen traten die gemessenen Ereignisse nach frühestens ca. 40 min nach Beginn des Aufheizens von Raumtemperatur beginnend auf, Ausnahme: Versuch A2 und die Pouchzellen bei den ALBERO-Versuchen.

Die in Tabelle 4 aufgeführten Messwerte wurden in Abbildung 8 zusammengefasst. Dabei wurde nicht nach Zellchemie, Ladezustand usw. unterschieden. Lediglich die Unterscheidung nach thermal-runaway-Temperatur, onset-Temperatur oder Venting-Temperatur oder Temperatur des runaways während des Ladens wurde durch verschiedene Farben illustriert. Wie bereits erwähnt, sind die Definitionen für die Ereignisse „onset“ und „thermal runaway“ nicht einheitlich. In den ersten Publikationen zu dem Thema um das Jahr 2000 herum wurde diese Unterscheidung noch gar nicht getroffen. Messungen des beginnenden (onset) thermal runaway bei überladenen Akkus sind grau dargestellt. Da davon ausgegangen wird, dass alle Fahrzeugbatterien über einen funktionierenden Überladeschutz verfügen, werden diese Werte jedoch mit einer geringeren Priorität betrachtet.

In Bezug auf das Projekt ALBERO verdeutlicht die Grafik folgende Grundaussage:

Ab ca. 80 °C muss mit gefährlichen Prozessen (beginnender thermal runaway, Aufplatzen der Zelle, Freisetzen von Gasen, thermal runaway) gerechnet werden! Im Falle einer Gefahrendetektion durch Temperaturüberwachung müssen die Alarmschwellen entsprechend festgesetzt werden. Im Falle eines Brandes oder von heißen Oberflächen in der Umgebung ist abzuschätzen, ob über längere Zeit (mind. 30 min) Temperaturen von mehr als 80° an der Fahrzeugbatterie eintreten können.

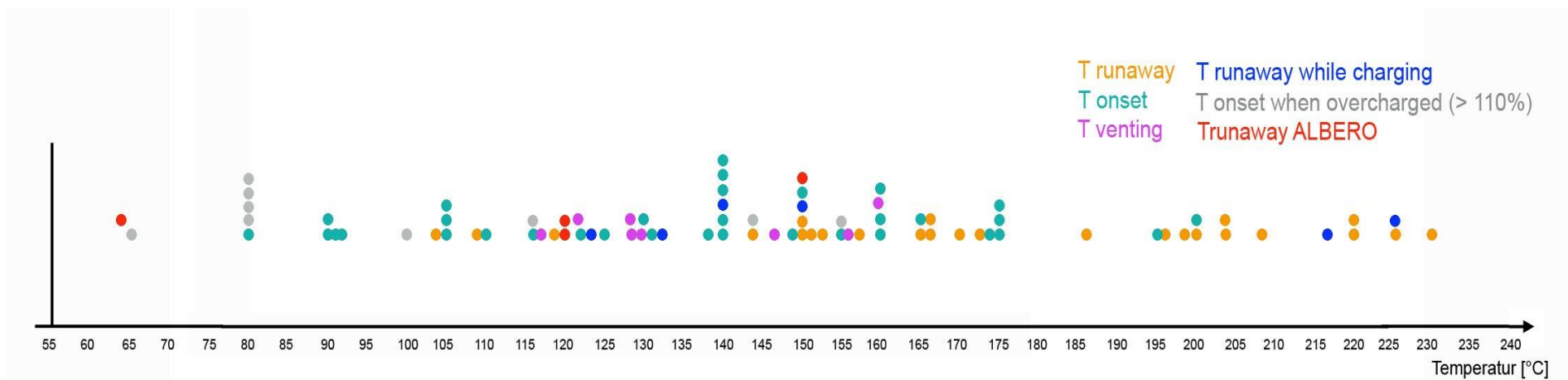


Abbildung 8: Zusammenfassung der Messergebnisse aus Tabelle 4- Ereignistemperaturen bei der Erwärmung von Li-Ionen-Batterien, Ereignisse: beginnender thermal runaway (T onset), Aufplatzen der Zelle und Freisetzen von Gasen (T venting), Thermal runaway (T runaway)

2.3 Thermal runaway- Gasfreisetzung

Die Gasfreisetzung aus Li-Ionen -Akkus wurde zeitgleich zum ALBERO-Projekt weltweit von verschiedenen Arbeitsgruppen untersucht. Dabei wurden sowohl brennbare, toxische als auch krebserregende Stoffe gefunden:

→ Überladeversuch Samsung 60 Ah-Zelle mit blockiertem OSD (Overcharge Safety Device)



Results of gas analyses

	unit	Overcharge autoclave 60Ah SAMSUNG BMZ1307a_60Ah_GAS_02 thermal runaway, venting, fire	thermal stability autoclave 60Ah SAMSUNG BMZ1307a_60Ah_GAS_04 cell opening, electrolyte evaporation, venting, no fire
kind of event		fire	
volume of autoclave	l	45	45
p peak event	mbar	23700	13000
calculated total volume at normal pressure	l	1066.5	585
p final after event	mbar	8000	5390
volume of emitted gas	l	360	242.55
Fluorine concentration in the air of the autoclave	µg/l	353.3	90.2
O2	vol %	1.3	1.0
N2	vol %	13.7	19.1
H2	vol %	14.2	14.9
CO2	vol %	22.4	26.0
CO	vol %	15.2	16.9
Ar	vol %	0.1	0.2
Phosphin	mg/m3	0.1	0.07
Formaldehyde:	µg/m3	<2	<2
Acetaldehyde:	µg/m3	1720	1960
Propionaldehyde:	µg/m3	214	174
Butyraldehyde:	µg/m3	112	256
Valeraldehyd:	µg/m3	<2	<2
Methane:	vol%	8.70	7.4
Ethan:	vol%	4.5	1.8
Ethen:	ppm (vol)	34000	48000
Propane:	ppm (vol)	4900	2200
Propene:	ppm (vol)	17000	23000

→ riesige Gasvolumina (360 L und 242 L)
→ brennbare (Bsp: Propan), erstickende (N₂, CO₂), toxische (Phosphin, HF, CO) und krebserregende (Aldehyde) Reaktionsprodukte

calculation total amount = concentration * (volume autoclave + volume emitted gas)

Abbildung 9: Gasfreisetzung nach einem thermal-Runaway [15]

Zudem hat man festgestellt, dass die Freisetzung von Gasen von der ganz konkreten Zellchemie abhängt. Wenn sich die Masseanteile verschiedener Komponenten der Batterien unterscheiden, dann ergeben sich auch unterschiedliche Mengen der freigesetzten Gase.

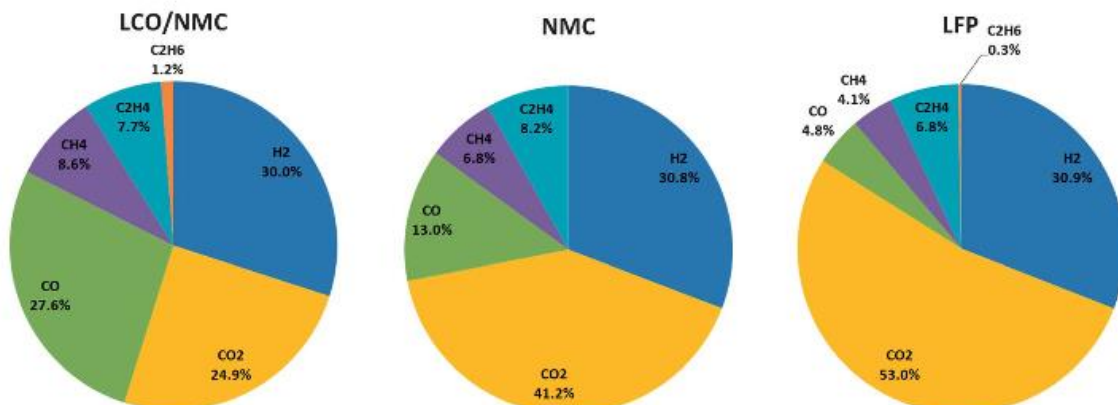


Abbildung 10: Anteile der freigesetzten Gase nach einem thermal runaway verschiedener 18650-Li-Ionen-Zellen [16] Dabei bedeutet LCO LiCoO₂, NMC Li-NiCoMn, LFP LiFePO₄.

Andere Publikationen [17] nennen folgende Inhaltsstoffe und Zersetzungsprodukte im Brandfall:

- Freisetzung von Wasserstoff, insbesondere bei Kontakt mit Luftfeuchtigkeit oder Löschwasser nach Aufplatzen des Akku-gehäuses
 - Besonders bei großen Batterien teilweise beträchtliche Freisetzung von Graphit (bis hin zur Gefahr von Graphit-Staub-Explosionen)
 - Je nach Elektrolyt Freisetzung von HF bzw. Phosphorsäure sowie Phosphin
 - Je nach verwendeten Kunststoffen auch Chlorwasserstoff und Kohlendioxid/Kohlenmonoxid
- In [18] hat man zudem festgestellt, dass die Menge der freigesetzten Gase offensichtlich vom Ladezustand abhängt. Auch die Gaszusammensetzung war teilweise abhängig vom Ladezustand.

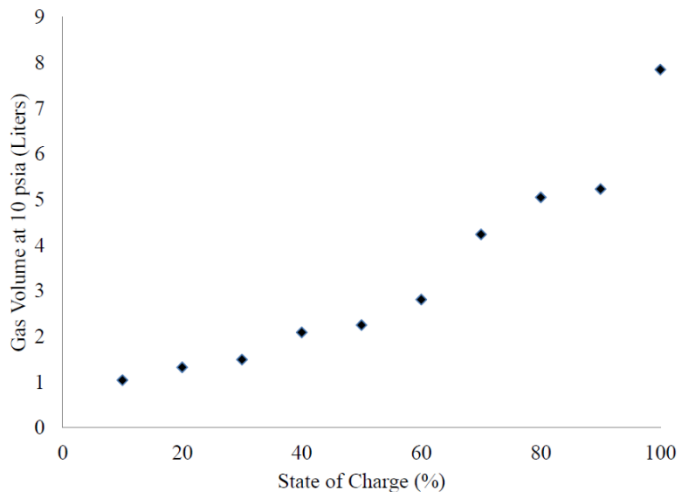


Abbildung 11: insgesamt freigesetztes Gas-Volumen einer 18650 LiCoO₂-Zelle [18] in Abhängigkeit vom Ladezustand

Eine andere Arbeit [19] betrachtet die Gasfreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit während eines Aufheizvorganges. In einem Ofen wurde eine Zelle von 80 bis ca. 150 ° langsam aufgeheizt. Thermoelemente direkt an der Zelle maßen die Temperaturen infolge des thermal runaway.

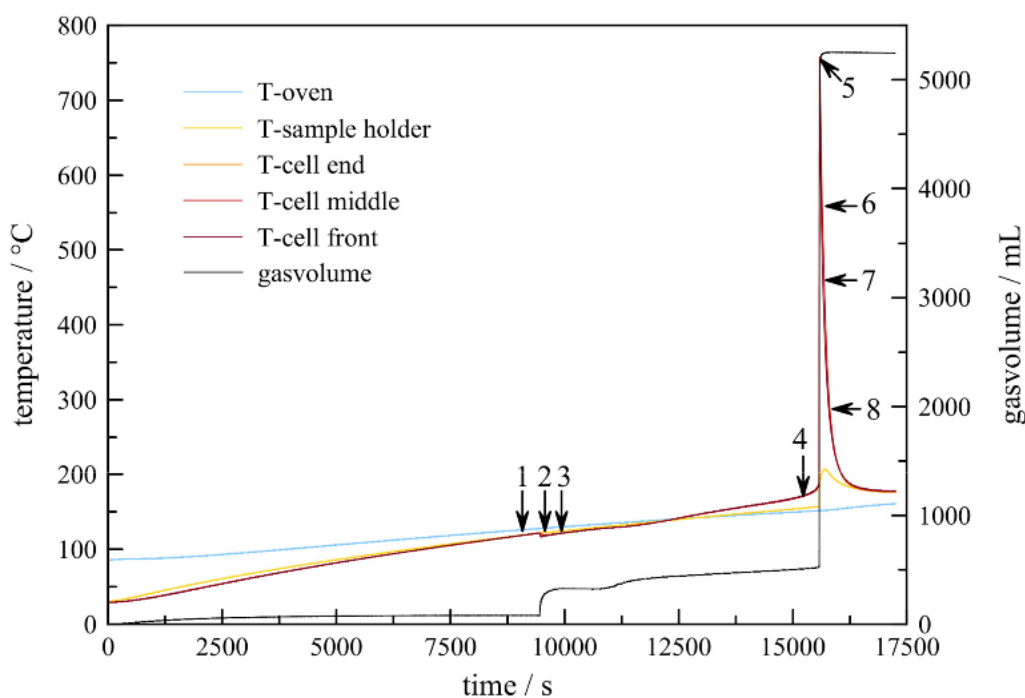


Abbildung 12: Aufheizen einer Li-Ionen-Zelle (Li(NiCoAl)O₂), die Pfeile zeigen an, zu welchen Zeitpunkten Gasproben genommen wurden [19]

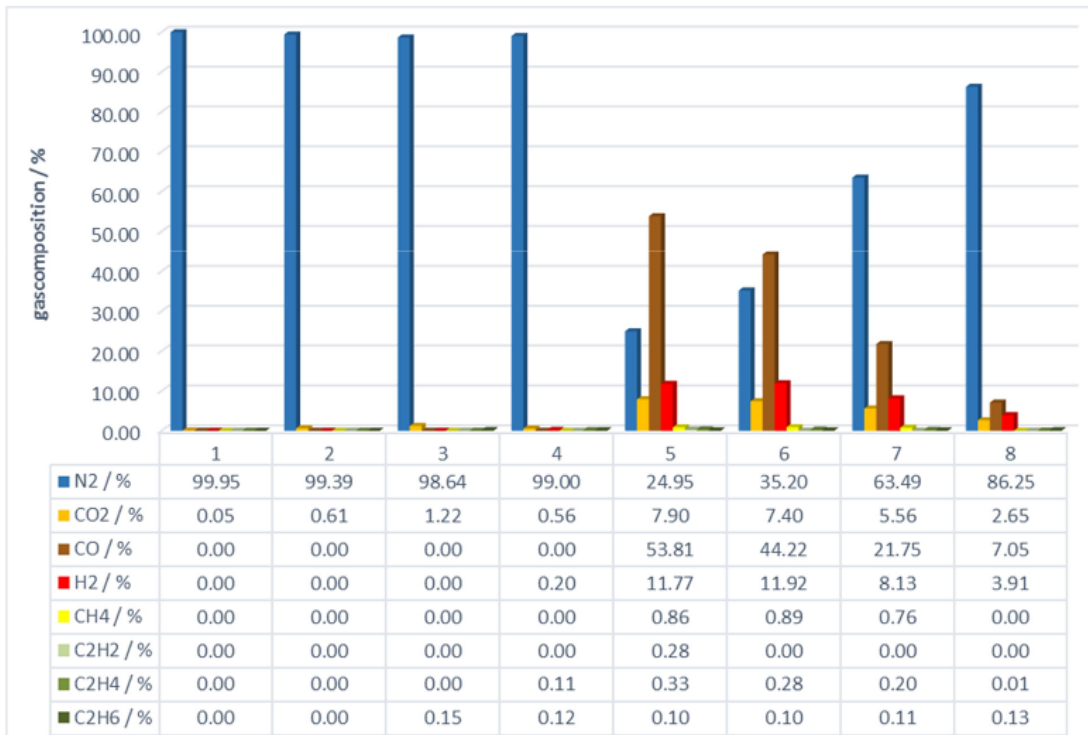


Abbildung 13: Gaskonzentrationen an den in Abbildung 15 durchgeführten Messpunkten [19]

Eine weitere Untersuchung, bei der auch die Freisetzung von HF beachtet wurde, kam zu folgenden Ergebnissen [20]. Hier wurde der Fokus speziell auf die Detektion giftiger Gase gesetzt.

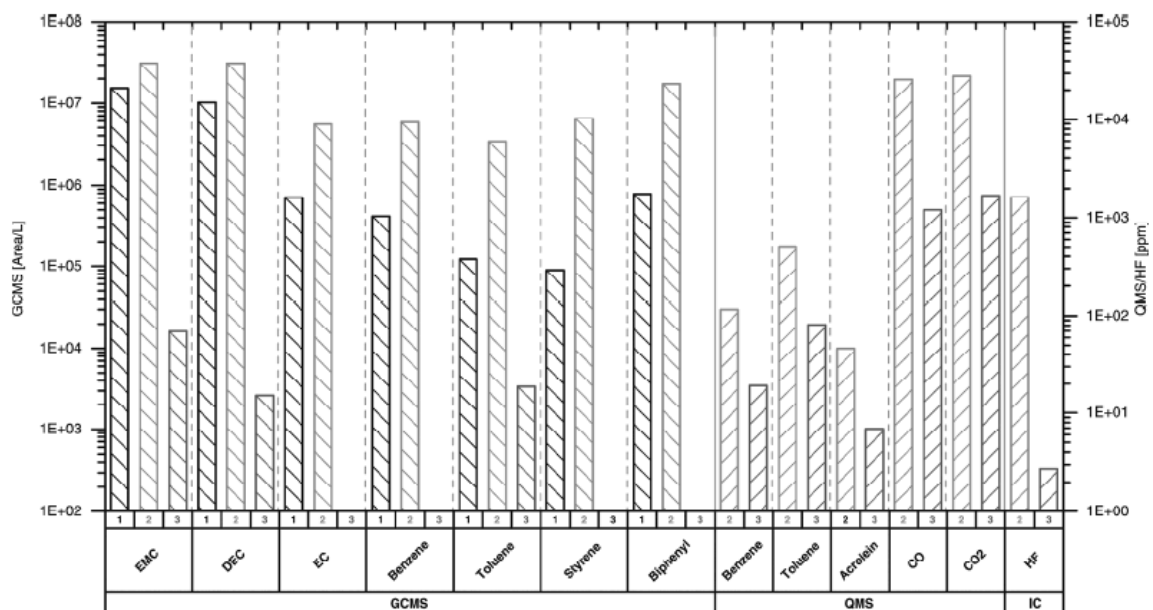


Abbildung 14: Gasfreisetzung aus Li-NMC (Li-Nickel-Mangan-Cobalt)-Zelle, EMC: ethyl methyl carbonate; DEC: diethyl carbonate; EC: ethylene carbonate; CO: carbon monoxide; COS: carbonyl sulfide. [20]

Speziell mit der Freisetzung von HF beschäftigt sich auch die Untersuchung [21]. Für verschiedene Zellchemien und Ladezustände wurde die Entwicklung von HF und (wenn zu erwarten) POF_3 bestimmt. Mit den brennenden Li-Ionen-Batterien wurden signifikante HF-Mengen zwischen 20 und 200 mg / Wh der nominalen Batterieenergiekapazität nachgewiesen.

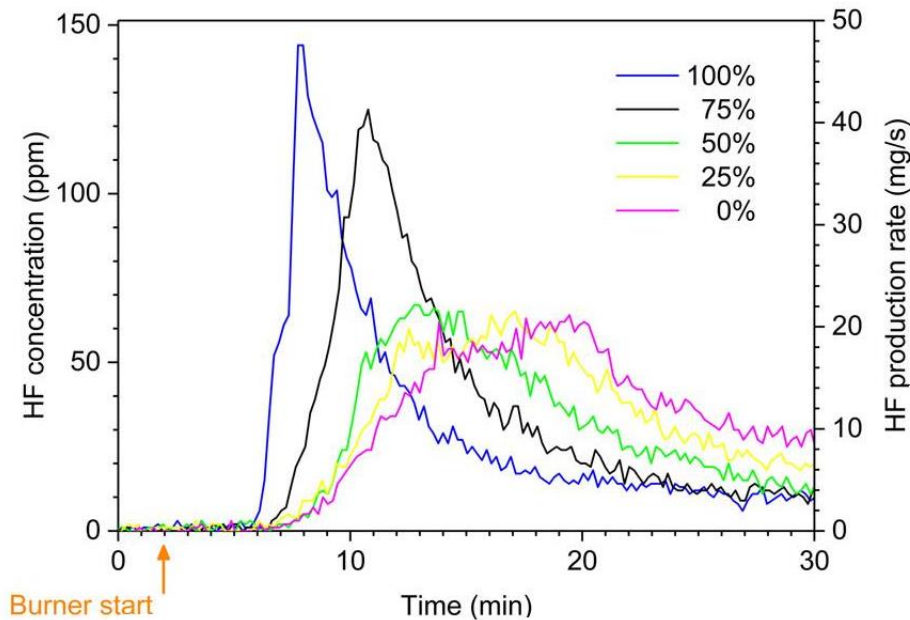


Abbildung 15: HF -Gasfreisetzung von LiFePO_4 -Zellen.. Diese Zellen wurden von außen beflammt. [21]

Eine Anzahl toxischer (Fluor)verbindungen wurde auch in [22] nachgewiesen.

Fazit

Es gibt inzwischen eine größere Anzahl von Untersuchungen der bei einem Thermal runaway von Li-Ionen-Batterien freigesetzten Gase. Dabei zeigt sich:

- Die Zusammensetzung der Gase ist von der konkreten Zellchemie abhängig, Hauptbestandteil sind jedoch Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserstoff und kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Hinzu kommen in geringeren, aber durchaus nicht ungefährlichen, Mengen verschiedenste organische und fluororganische Verbindungen sowie anorganische Phosphor- und Fluor-Verbindungen.
- Die Menge der freigesetzten Gase und auch die Zusammensetzung des Gasgemisches hängt vom Ladezustand der Batterien ab. Bei einem höheren Ladezustand nimmt das freigesetzte Gasvolumen zu.

2.4 Brandverhalten von Li-Ionen-Batterien

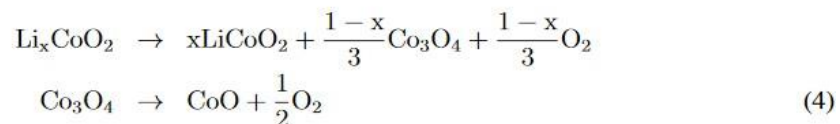
Li-Ionen-Batterien zeigen ein besonderes Brandverhalten, insbesondere sind sie schwer zu löschen. Die Beobachtung, dass die Batterien dabei scheinbar auch in sauerstoffreduzierter Atmosphäre noch relativ gut und lange brennen, führte zu der verbreiteten Aussage, dass die Batterien aufgrund von chemischen Prozessen während des Brandes selbst Sauerstoff freisetzen, der das Feuer nährt.

Wissenschaftliche Versuchsreihen haben bestätigt, dass eine Sauerstoffreduktion das Brandverhalten zwar tendenziell verringert [10], aber nicht in dem sicheren Maße, dass Gaslöschanlagen als gute Methode zur Brandbekämpfung von Li-Ionen-Batterien empfohlen werden. Viel Wasser gilt daher immer noch als Mittel der Wahl [23].

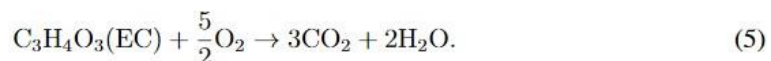
Die häufig als Kathodenmaterial verwendeten Lithium-Mischoxide Lithium-Cobalt-Oxid (LCO), Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA) können durch interne strukturelle Umlagerungen Sauerstoff freisetzen. Dieser reagiert sofort mit den anderen Komponenten der Batterie, insbesondere dem Elektrolyten, was mit der Zeit zu Leistungsverlusten führt, da der Elektrolyt z.B. lokal fest wird. Dieser Prozess läuft auch bei üblichem Batteriebetrieb immer auf einem niedrigen Level ab und ist ein Grund für die Alterung von Batterien [24].

Bei Erhöhung der Temperatur wird die Sauerstofffreisetzung beschleunigt. Bei Versuchen mit verschiedenen Li-Ionen-Mischoxid-Pulvern hat man einen sauerstoffbasierten Gewichtsverlust von 9- 11 Massenprozent ermittelt [25]. Der entstehende Sauerstoff reagiert aber auch in diesem Fall sofort (mit dem Elektrolyten) ab und es kommt zu einer deutlichen Produktion von Kohlendioxid bzw. Kohlenmonoxid.

Prior to addressing the oxidation of the electrolyte and vapors in air we address reactions between the cathode and the electrolyte. As temperatures rise, the metal oxide can undergo phase transformations that release oxygen,



and this oxygen can react with the electrolyte at the particle surface.



These reactions are strongly exothermic, being typical combustion oxidation. However, the amount of oxygen released by the cathode is only sufficient to oxidize a small fraction of the electrolyte, so that the direct electrolyte flammability is a significant issue.

Auszug aus [26] – man beachte den letzten Satz.

Es wird also tatsächlich Sauerstoff freigesetzt, der jedoch immer sofort durch chemische Reaktionen mit anderen Zellmaterialien verbraucht wird. Diese Reaktionen sind von der Chemie her Verbrennungsreaktionen, können in einer Li-Ionen-Zelle aber als katalytische Verbrennung ohne offenes Feuer ablaufen, da die anwesenden Stoffe (Metalle) katalytisch wirken können. Die Reaktion ist deutlich exotherm, so dass der thermal runaway selbst damit gut erklärt werden kann, also die andauernde Nachlieferung von Wärme bei jedem Übergriff auf eine neue Zelle. (Parallel laufen auch andere exotherme Reaktionen ab):

The third group of the exothermic reactions proceeds in the temperature range from beginning of oxygen release from a cathode, approximately at $T_{ox} \approx 200-250^\circ\text{C}$ till the end of the thermal run-away process. In this temperature range, a cathode thermal decomposition is accompanied with release of oxygen, which reacts afterwards with electrolyte. The exothermic reactions of electrolyte burning on a cathode are dominant in the course of the thermal runaway of lithium-ion cells. (Auszug aus [27])

Kühlende Löschmittel sind daher generell sehr sinnvoll.

Im Gegensatz zu den Oxiden zeigt das Kathodenmaterial Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) bis 300°C kaum thermische Effekte und ist daher sicherheitstechnisch außer Konkurrenz. [28]

Diese Überlegungen werden dadurch gestützt, dass man bei, inzwischen recht zahlreichen, Gasuntersuchungen von Zellen im thermal runaway keinen oder nur sehr wenig frei gesetzten Sauerstoff gemessen hat, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid aber immer deutlich nachweisbar ist [15], [16], unabhängig vom verwendeten Kathodenmaterial. Bei neueren Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass parallel zum (kurzen) Auftreten von Sauerstoff in der Zelle ein Anstieg der CO- bzw. CO₂-Konzentration erfolgte:

The simultaneous occurrence of ¹O₂ and CO₂ supports the hypothesis that the formation of the latter gas is mainly caused by a chemical oxidation of the electrolyte by the ¹O₂ released from the layered oxide materials, rather than by a simple electrochemical electrolyte oxidation. (Auszug aus [29])

Mit höherem Ladezustand wächst die Instabilität der Kathodenschicht. Die Freisetzung von Sauerstoff erfolgt dann bei niedrigeren Temperaturen und in größerem Ausmaß. Letztendlich wird eine größere elektrische Energie in eine größere chemische Energie (Wärmefreisetzung) umgesetzt.

Bei Gasmessungen während eines thermal runaway wurden in der Regel deutliche Mengen freigesetzten Wasserstoffs gemessen [18], [19], [28], auch bei den ALBERO-Real-Versuchen. Inzwischen gibt es auch Theorien und Experimente, woher dieser Wasserstoff stammt - durch in der Zelle ablaufende Elektrolyseprozesse entsteht mit der Zeit mehr und mehr atomarer Wasserstoff, der sich im Graphit der Anode einlagern kann. Bei erhöhten Temperaturen kommt es zu einer Rekombination dieses atomaren zu molekularem Wasserstoffs ($H + H \rightarrow H_2$), wobei Wärme freigesetzt wird.

The conducted experiments in ARC-calorimeter show that during cycling of lithium-ion cells in anode graphite, there is accumulated hydrogen, which exists inside of graphite in atomic form. Upon cell heating up to the temperature, at which mass release starts of atomic hydrogen from graphite, the powerful exothermic reaction of recombination of atomic hydrogen with heat release 436 kJ/mole starts. Thus, the first exothermic reaction at a thermal runaway in aged cells is the exothermic reaction of recombination of atomic hydrogen accumulated in anode graphite. It increases considerably a heat release in a beginning of a thermal runaway. (Auszug aus [27])

Diese Reaktion läuft offenbar in einem frühen Stadium eines thermal runaway ab, was sehr gut erklären könnte, warum man in der Regel sehr früh Wasserstoff messen kann, wenn ein thermal runaway startet. Die Abhängigkeit des freigesetzten Wasserstoffes von der Lebensdauer der Batterie muss noch detaillierter untersucht werden. Die Tatsache, dass man größere Mengen freien Wasserstoff nach einem thermal runaway gut messtechnisch erfassen kann, unterstützt die Feststellung, dass nicht gleichzeitig Sauerstoff freigesetzt wird. Ein fortgeschrittener thermal runaway hätte in jedem Fall ausreichend Energie, um eine Knallgasreaktion zu initiieren.

Wasserstoff ist ein Gas, das bis zu einer Sauerstoffkonzentration von etwa 5 Vol % brennen kann – ein außergewöhnliches Verhalten im Vergleich zu den meisten anderen Stoffen, die mindestens 12 – 14% Sauerstoff für eine Verbrennung benötigen [30].

Das besondere Brandverhalten von Li-Ionenbatterien liegt also nicht daran, dass Sauerstoff aus den Batterien freigesetzt wird, sondern ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der bei Erwärmung emittierte Wasserstoff auch in sauerstoffarmer Umgebung noch lange brennen kann.

Fazit:

- Bei einem thermal runaway wird intern Sauerstoff aus dem Kathodenmaterial freigesetzt, welcher jedoch nicht die Zelle verlässt, sondern sofort mit dem Elektrolyt chemisch abreagiert und vor

allem CO und CO₂ erzeugt. Diese erzeugten Gase führen zum Aufplatzen der Zelle. Die dann abgeblasenen Gase enthalten kaum oder keinen Sauerstoff. Dies erklärt möglicherweise auch die oft schwierige Entzündlichkeit von Batterien im thermal runaway – insbesondere, wenn die frei werdenden Gase sehr viel Kohlendioxid enthalten. Lokale Selbst- Inertisierungseffekte könnten die Ursache sein.

- Die interne exotherme Reaktion des Sauerstoffs unterhält aber die permanente Wärmefreisetzung und damit das Fortschreiten des thermal runaways.
- Zu Beginn des thermal runaway jeder Zelle wird Wasserstoff freigesetzt, später vor allem unverbrannter Elektrolyt. Beides verlässt die Zelle. Der thermal runaway setzt also nicht das Oxidationsmittel frei, sondern permanent neuen Brennstoff. Da Wasserstoff auch bei sehr niedrigen Sauerstoffkonzentrationen noch brennbar ist, müssen inertisierende Maßnahmen sehr konsequent durchgeführt werden, um eine offene Verbrennung tatsächlich zu unterbinden.
- Gas-Detektionsmaßnahmen zur Früherkennung sollten sich daher auf Wasserstoff konzentrieren. Da der Wasserstoff, im Gegensatz zum freiwerdenden Sauerstoff, nicht sofort in der Zelle wieder verbraucht wird, stellt sich die Frage, ob eine Wasserstoffdetektion nicht gleich in der Zelle erfolgen sollte.
- Die Kombination von intensiver Kühlung und Inertisierung (Sauerstoffgehalt < 5 Vol%) scheint entsprechend erfolgversprechend bei der Bekämpfung von Li-Ionen- Batteriebränden.
- Gefahrensituationen bzgl. Brand und Explosion treten vor allem bei Zufuhr von frischem Sauerstoff von außen auf.
- Die Entwicklung neuer Materialien, die die genannten Reaktionen nicht zeigen, ist ein wichtiger Schritt hin zu einer sicheren Batterietechnik.

2.5 Löschwasserkontamination nach Bränden von Li-Ionen-Batterien

Obwohl es inzwischen sehr viele Publikationen [31], [32] und auch Handlungsanweisungen für Feuerwehren und Einsatzkräfte [33], [34] gibt, in denen auf die „Kontamination des Löschwassers“ bei Brandbekämpfungsmaßnahmen von Elektrofahrzeugen hingewiesen wird, gibt es bisher erstaunlich wenige gründliche wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Thema.

Im Jahr 2013 veröffentlichte die National Fire Protection Association [35] die Ergebnisse umfangreicher Real-Brandversuche. Dabei wurden komplette Li-Ionen-Batterien von Fahrzeugen verwendet, ohne deren Zellchemie näher zu beschreiben. Die veröffentlichten Analysen lassen jedoch den Schluss zu, dass es sich um Zellen mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Kathoden handelte (NMC-Zellen). Das Löschwasser von zwei unabhängigen Versuchen wurde chemisch untersucht. Man fand in jedem Fall deutliche Mengen Chlorid- und Fluorid-Ionen, was auf das Auswaschen von HCl bzw. HF aus den Brandgasen zurückgeführt wurde. Das Löschwasser war bei beiden Versuchen etwas saurer (pH = 6,2 bzw. 7,3) als vor dem Löscheinsatz (das verwendete Löschwasser hatte einen pH- Wert von 7,8).

Auch Egelhaaf et. al [36] fand deutliche erhöhte Konzentrationen von Chlorid- und Fluorid-Ionen in Löschwasserproben. Diese Konzentrationen nahmen zu bei Lagerung der havarierten Batterie in Kühlwasser über Nacht.

DNV-GL beschreibt Untersuchungen mit NMC- und Lithium-Eisen-Phosphat- (LFP) Zellen [37]. Der Thermal Runaway wurde durch Überhitzen ausgelöst. Während des Aufplatzens wurden auch HCl- und HF-Gase in deutlichen Konzentrationen gemessen. Zum Lösch- bzw. Kühlwasser wurde folgende Aussage gemacht: *Most notably, when submerged or extinguished batteries can produce a severely*

alkaline solution in the water used, climbing to pH 10-11. Other solutions gradually became slightly acidic (pH 6), where the most severely burned batteries produce the most basic solution.

In [38] wurden umfangreiche Real-Brandversuche mit NMC-Batterien durchgeführt. Der thermal runaway wurde durch mechanische Beschädigung herbeigeführt. Es wurde einerseits das Löschwasser untersucht, welches direkt beim Löschvorgang aufgefangen wurde und andererseits auch das Kühlwasser, welches verwendet wurde, um die abgelöschte Batterie später noch aus Sicherheitsgründen zu tauchen. Man fand folgende Ergebnisse:

Löschwasser

- pH-Wert 8
- moderate elektrische Leitfähigkeit von knapp 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- geringe Gehalte an wasserlöslichen Sulfaten (34 mg/l), Fluoriden (8 mg/l), Chloriden und Nitraten (je 2 mg/l) sowie Lithium-Ionen (4 mg/l)
- gelöste organische Brandfolgesubstanzen (PAK, PCB, PCDD/F) in sehr geringen Konzentrationen
- Co, Ni und Mn in sehr hohen säurelöslichen Konzentrationen von je 36 mg/l

Kühlwasser

pH-Wert 12

- sehr hohe elektrische Leitfähigkeit von rund 35.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- geringe Gehalte an wasserlöslichen Sulfaten (98 mg/l), Chloriden (2 mg/l) und Nitraten (<1 mg/l)
- sehr hohe Konzentrationen an wasserlöslichen Fluoriden (330 mg/l)
- sehr hohe Konzentrationen an Lithium-Ionen (1.600 mg/l)
- organische Brandfolgesubstanzen (PAK, PCB, PCDD/F) nur in sehr geringen Konzentrationen
- Co, Ni und Mn in sehr hohen säurelöslichen Konzentrationen von je 50 bis 55 mg/l

Fazit:

Trotz der wenigen Daten zeichnen sich relativ deutlich folgende Aussagen ab:

Löschwasser, welches nur mit den aus einer Lithium-Ionen-Batterie austretenden Gasen in Kontakt kommt, löst Teile der entstehenden sauren Gase (HCl, HF, HCN). Die ablaufende Lösung enthält entsprechend Chlorid- und Fluorid-Ionen und reagiert leicht sauer. Wie deutlich dieser Effekt ist, hängt einerseits von der ganz konkreten Zellchemie (Leitsalz z.B. LiPF_6 oder LiClO_4), vom Ladezustand der Batterie (wirkt sich auf die Menge der entweichenden Gase aus) und vom eingesetzten Wasserlöschsystem ab. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass Wassernebel-Systeme Brandgase besser niederschlagen können als Sprinkler. Auch durch Elektrolyseprozesse an noch intakten Li-Ionen-Zellen innerhalb eines havarierten Batteriemoduls können leicht sauer reagierende wasserlösliche Produkte entstehen. Wie auch immer - tatsächlich stark saure Lösungen sind nicht zu erwarten.

Löschwasser, welches in Kontakt mit den „inneren Bestandteilen“ einer Batterie kommen kann, also u.a. auch mit metallischem Lithium, reagiert mit diesem (und ggf. anderen Metallen) zu Hydroxiden, welche sehr stark alkalisch reagieren. Dies kann vorkommen, wenn bereits während der Havarie die Batterie so stark zerstört wurde, dass ein Eindringen des Wassers in diese Bereiche möglich ist (dieser Unterschied ist auch bei Versuchen beachten, d.h. ob der Thermal Runaway durch Überhitzung, Überladung oder mechanische Zerstörung ausgelöst wurde). Bei kompletter Tauchung der Batterie in ein wassergefülltes Behältnis wird es bald zu einem direkten Kontakt mit ihrem Inneren kommen. Diese Lösungen enthalten dann auch entsprechend hohe Konzentrationen an Schwermetallen.

3. AP 2 - Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährrschiffen

Das Arbeitspaket 2 beschäftigte sich zunächst allgemein mit der Wahrscheinlichkeit von Bränden bei Elektrofahrzeugen. Zudem sollte untersucht werden, welche besonderen Bedingungen auf Fährrschiffen vorliegen und ob diese die möglichen, von alternativ betriebenen Fahrzeugen ausgehenden Gefahren im Vergleich zur Situation an Land beeinflussen.

3.1 Unfallstatistiken von Elektrofahrzeugen in Bezug auf die Unfallursache

Innerhalb des AP 2.2 wurden Unfälle mit Elektrofahrzeugen von 2014 – Dezember 2021 untersucht. Dafür wurde eine umfangreiche Internetrecherche durchgeführt. Es wurden im genannten Zeitraum 113 Unfälle mit Elektrofahrzeugen ermittelt und mit Quellen belegt (siehe Tabelle, digitaler Anhang). In ALLEN 113 erfassten Fällen entstand ein Brand. Schaut man auf die Situation der untersuchten Brände ergibt sich folgendes Bild:

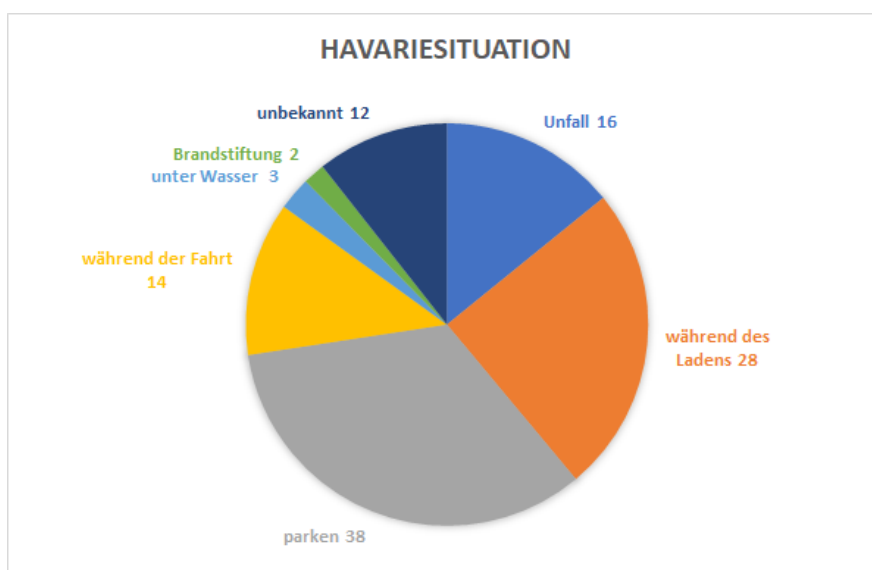


Abbildung 16: Situationen bei Brände von Elektrofahrzeugen, konkrete Fallzahlen (eigene Analyse)

Die Darstellung zeigt, dass in ca. 14 % der Fälle (16 Mal) sicher ein Unfall der Auslöser für den Brand war. Am häufigsten (33%, 38 Mal) entstand das Feuer „einfach so“ beim Parken in einer Garage oder auf einem Parkplatz. Bei zwei dieser Fälle war der Akkupack jedoch nicht vom Brand betroffen. Unter diesen Fällen sind auch einige, bei denen nicht eindeutig klar ist, ob das Auto geladen wurde oder nicht. Einige Publikationen legen jedoch nahe, dass bei Nachuntersuchungen von „einfach-so“-Bränden sich doch häufig herausstellte, dass die Fahrzeuge zuvor in einen Unfall verwickelt waren oder anderweitig beschädigt worden sein könnten. Eine mechanische Beschädigung der Batterie ist somit eine sehr häufige Ursache für Brände von Elektrofahrzeugen. Während des Ladens kam es bei 28 der 113 untersuchten Fälle (24%) zu Bränden. In mindestens drei Fällen wurde das Auto dabei entgegen den Empfehlungen an einer normalen Haushaltssteckdose bzw. über ein einfaches Verlängerungskabel geladen, in zwei weiteren Fällen wurde ein Auto geladen, das nachträglich zum Elektroauto umfunktioniert worden war. Ungeeignete elektrische Systeme sind entsprechend als wichtige Unfallursache zu werten.

Ein Fall ist dokumentiert, in dem das Auto versehentlich in ein Salzwassergewässer fuhr. Es entzündete sich unmittelbar nach dem Herausziehen aus dem Wasser. In zwei weiteren Fällen wurden Autos bei Hochwasser überschwemmt und entzündeten sich später.

Somit muss festgestellt werden, dass von den 113 dokumentierten Bränden allein 22 (16 x Unfall, 5x falsches Laden, 1 x Fahrt ins Wasser) durch Fehler der Inhaber / Fahrer entstanden sind und nicht durch das Auto selbst.

Auch wenn die Datenlage aufgrund der noch wenigen fahrenden Elektroautos weltweit nach wie vor gering ist, so hat sie doch inzwischen einen Stand erreicht, der folgende Aussage zulässt [39], [40], [41], [42]:

Die Gefahr eines Brandes eines Elektrofahrzeuges ist nicht größer als die Gefahr eines Brandes eines Benziners oder Dieselfahrzeuges. Sie scheint sogar geringer zu sein.

In Deutschland werden laut Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) jährlich rund 35.000 - 40.000 Fahrzeugbrände registriert, davon sind ca. 15.000 Fälle tatsächliche Brände, der Rest sind Schmor Schäden durch Kurzschluss [40], [43]. Demgegenüber stehen die in der Analyse gefundenen 39 (von 113) in Deutschland gefundenen Brände für Elektroautos innerhalb von 5 Jahren.

Für Norwegen wurde folgende Aussage gefunden: *Fakt ist jedoch, dass Elektroautos viel seltener brennen. Von 2013 bis 2015 stieg der Anteil des Elektroautos am Pkw-Portfolio von weniger als einem Prozent auf rund drei Prozent, während er im selben Zeitraum nur 0,4 Prozent aller Pkw-Brände ausmachte.* [44]

In Amerika wurden in den letzten 5 Jahren durchschnittlich 180.000 Fahrzeugbrände jährlich festgestellt [45], [46]. Die Anzahl der in diesem Zeitraum registrierten Brände von Elektrofahrzeugen (in unserer Recherche 13) ist im Vergleich verschwindend gering!

Elektrofahrzeuge brennen also nicht häufiger als konventionelle Autos und ein Großteil der Havarien ist durch den Menschen selbst verschuldet.

In ca. der Hälfte aller Fälle wurde in den Quellen deutlich darauf verwiesen, dass die Löscharbeiten sehr lange dauerten, da der Brand schwer zu löschen war, in 6 Fällen davon wurde deutlich vermerkt, dass es immer wieder zu Rückzündungen kam, in einem Fall sogar erst 2 Monate nach einem Unfall! In 16 Fällen konnte das Fahrzeug erst gelöscht werden, indem es komplett in einen mit Wasser gefüllten Container getaucht wurde, dabei gibt es nur in einem Fall eine Überlappung mit den „Rückzündungsfällen“:

3.2 Wärmefreisetzungsrates bei Bränden von Elektrofahrzeugen

Obwohl man verschiedentlich Aussagen lesen kann, dass Li-Ionen-Batterien heißer brennen als Benzin oder Diesel, konnte keine Publikation gefunden werden, die dies wissenschaftlich belegte. Die adiabatische Verbrennungstemperatur in Luft von Mineralöl-Kraftstoffen wird mit ca. 2100 °C angegeben, die für reines Lithium mit 2438°C, allerdings in reinem Sauerstoff [47]. Für Li-Ionen-Batterien wurde kein Wert gefunden. In Abbrandversuchen mit Li-Ionen-Batterien wurden maximale Flammentemperaturen von 900 °C gemessen [48]. In anderen Brandversuchen [42] wurde die Wärmefreisetzungsrates bei Li-Ionen-Batteriebränden bestimmt und man fand für die Verbrennung

von 5 Einzelzellen den Wert von 112Wh. Diese Publikation enthält in der Diskussion folgende Aussage: *Der nominelle Energiegehalt des Fünf-Zellen-Packs beträgt 112 Wh. Elektrifizierte Fahrzeuge haben in der Regel 10 bis 30 kWh Batterien, und eine Extrapolation unserer Werte auf die für diese Größe von Batteriepacks freigesetzte Energie ergibt eine total heat rate von 700 bis 2100 MJ, was einem Feuer von etwa 20 bis 50 l Benzin entspricht.*

Die freigesetzte Energie hängt vom Ladezustand ab. In einer anderen Publikation [32] wurde die Wärmefreisetzungsrate einer 100 kWh-Batterie, je nach Ladezustand, zwischen 17 und 75 kJ/ Wh ermittelt – laut Publikation vergleichbar mit dem Brand von 70 – 300 l Benzin.

Die Vergleichbarkeit der Werte ist schwierig, auch infolge verschieden verwendeter Einheiten. Manche beziehen sich auf die Fläche verteilten Materials, manche auf die Masse verbrannten Materials. In [49] wird z.B. in einem Kalorimeter eine freigesetzte Wärme von 800 kWh für 58 l Benzin ermittelt.

Neue (full scale) Tests zeigen, dass die Wärmefreisetzungsrate für Dieselfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und Elektrofahrzeuge vergleichbar sind [50]. [51].

Eine erhöhte Gefahr durch höhere Temperaturen oder eine verstärkte Wärmefreisetzung durch brennende Elektrofahrzeuge ist demnach nicht zu erwarten.

3.3 Besondere Transportbedingungen an Bord – Schiffsbewegungen

Die Schiffsbewegungen ergeben sich im Wesentlichen aus dem Wind und dem Seegang. Dabei kann sich das Schiff um alle drei Achsen bewegen [52].

Es gibt langjährige Untersuchungen zu den Windverhältnissen in der Ostsee [53]. Dabei wurde auch die so genannte relative Sturmhäufigkeit rSH ermittelt (Tabelle 5) bezogen auf den Zeitraum 1950 – 2005. Dabei wird als Sturm eine Windstärke größer/gleich 8 Bft. definiert. Der rSH-Wert bezeichnet also, wieviel Prozent eines Jahres Windstärken über 8 Bft. geherrscht haben. Dabei wird die Gesamtzeit des Jahres als Basis genommen.

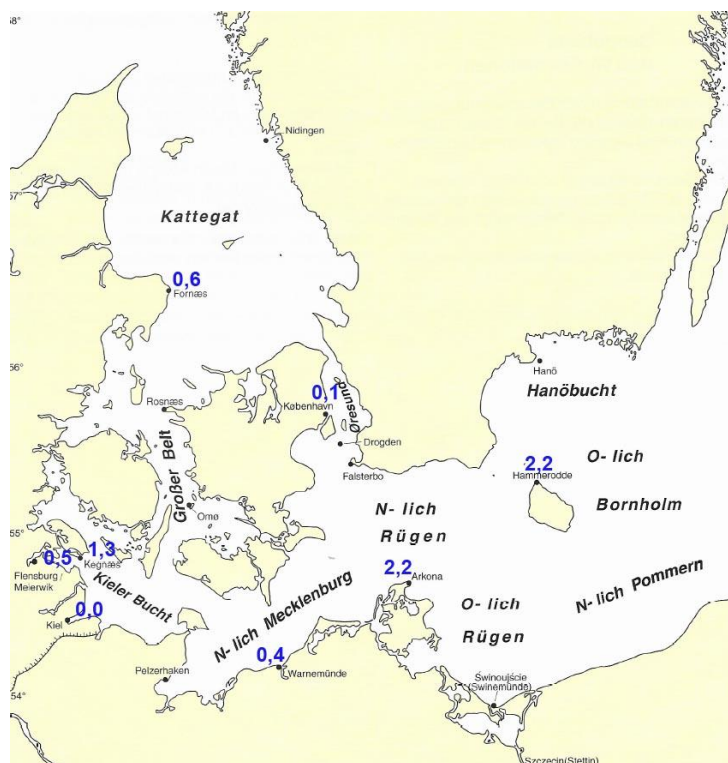


Abbildung 17: relative Sturmhäufigkeit in der westlichen Ostsee rSH % [53]

Gebiet	Fornaes	Kopen- hagen	Kegnaes	Flens- burg	Kiel	Warne- münde	Arkona	Hamme- rode
rSH [%]	0,6	0,1	1,3	0,5	0,0	0,4	2,2	2,2
Tage/Jahr	2,19	0,36	4,75	1,82	0	1,46	8,03	8,03

Gebiet	Klaipeda	Norra Udde	Lands- ort	Svenska Högarna	Kallbada- grund	St.Peters- burg	Market	Hapa- randa
rSH [%]	0,3	2,0	1,8	1,9	1,3	0,0	1,9	0,1
Tage/Jahr	1,09	7,3	6,57	6,93	4,74	0	6,93	0,36

Tabelle 5: relative Sturmhäufigkeit in der Ostsee rSH % [53], Umrechnung in Tage

Die dargestellte Analyse zeigt, wieviel Zeit des Jahres tatsächlich durchgängig Windstärken über 8 Bft herrschten. Andere Statistiken definieren einen Sturmtag als Sturmtag, wenn IRGENDWANN an diesem Tag eine Windstärke von mehr als 8 Bft geherrscht hat [54]. Das heißt, auch wenn nur für 1 Stunde am Tag diese Windstärke erreicht oder überschritten wurde, zählt der Tag als Sturmtag. Hier finden sich für die Ostsee folgende Werte (gemittelt 1981 – 2010):

Ort	Sturmtage
Boltenhagen	57
Warnemünde	52
Schleswig	45
Kap Arkona	120
Durchschnitt gesamte Ostsee	32

Tabelle 6: Sturmtage auf der Ostsee [55], Stand 21.01. 2022

Verknüpft man beide Statistiken, so kann man folgern, dass Arkona und Hammerode die stürmischsten Regionen in der Ostsee sind. Es wird jedoch auch klar, dass das Sturmrisiko stark von der Fährverbindung abhängt. Die Linie Sassnitz-Trelleborg oder die Linien Kiel-Klaipeda durchqueren die stürmischsten Gebiete, die Linie Rostock-Gedser dagegen verläuft in sehr geschütztem Gebiet.

Die Wellenhöhe korreliert nicht 1:1 mit der Sturmstatistik, denn eine Welle benötigt auch freie Strecken, um sich aufzubauen. Für den Fährverkehr auf der Ostsee gilt u.a. das *Memorandum of Understanding for the Transport of Packaged Dangerous Goods on Ro-Ro Ships in the Baltic Sea (MoU)* [55]. Darin werden Gebiete von geringer Wellenhöhe definiert: Ein Gebiet mit geringer Wellenhöhe (Low Wave Height Area – LWHA) ist ein Seegebiet, in dem die signifikante Wellenhöhe von 2,3 m in nicht mehr als 10 % des Jahres überschritten wird. Abbildung 16 zeigt die Verhältnisse in der Ostsee. Die im Projekt betrachteten Fährlinien nach Gedser bzw. Trelleborg befinden sich demnach alle in Gebieten mit geringer Wellenhöhe.

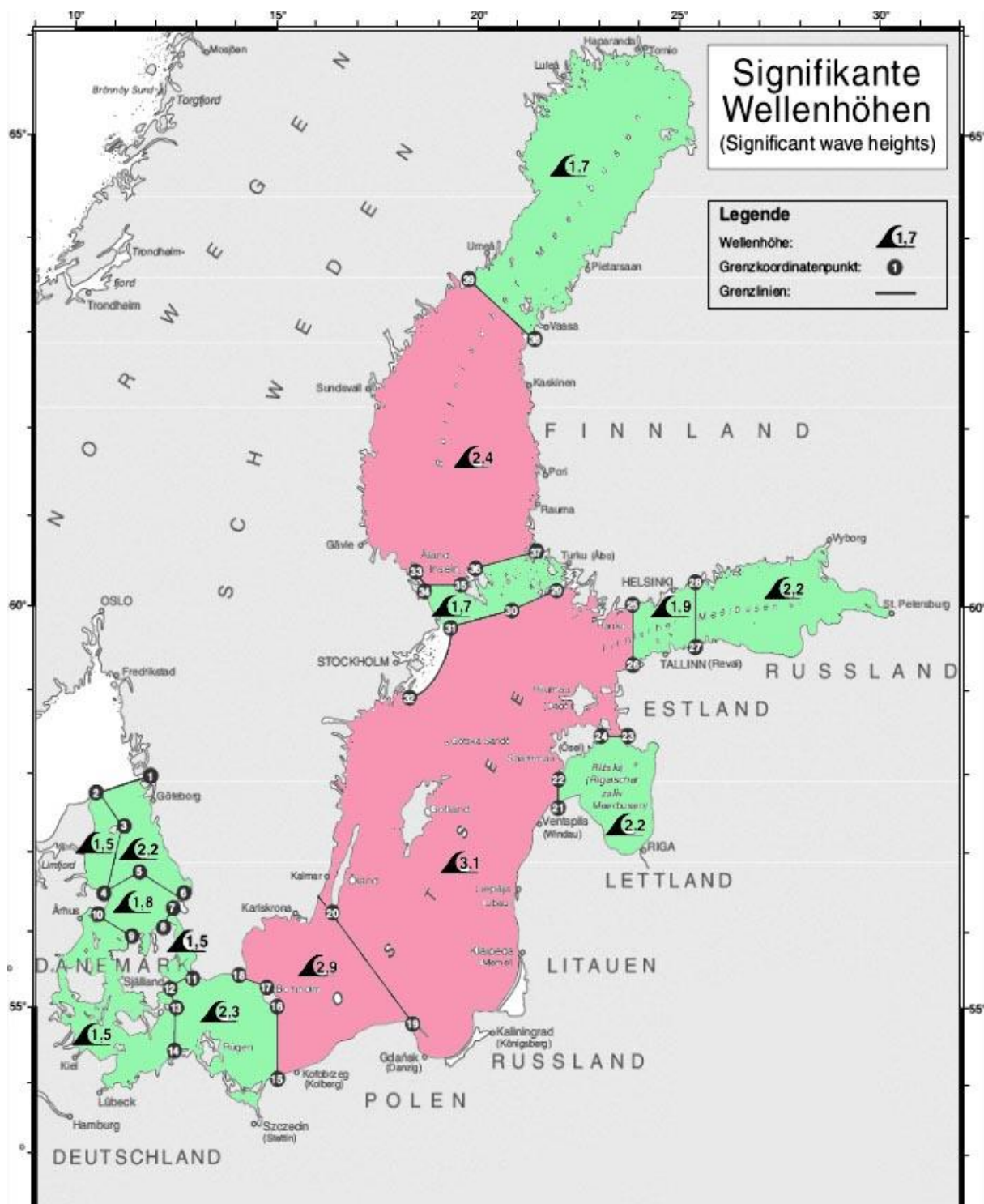


Abbildung 18: Low Wave height areas (grün) gemäß Definition im MoU [55]

Die zu erwartenden Rollwinkel hängen von vielen Faktoren ab: der Schiffsform, der Wellenhöhe, der Wellenfrequenz, der Wellenrichtung, dem Schwerpunkt des Schiffes u.a. Für ROPAX-Fähren gibt es Modellrechnungen zum Rollwinkel in Abhängigkeit von der Stauung der Fahrzeuge und damit vom Schwerpunkt [56]. Darin wurde ermittelt, dass für signifikante Wellenhöhen von 3m maximale Rollwinkel von 15° zu erwarten sind (Abbildung 17). Dies stellt jedoch einen absoluten Extremwert dar für einen sehr ungünstigen Beladungszustand (sehr großer Abstand zwischen Schwerpunkt und Rollachse $GM = 1,4$ m). Für einen typischen Beladungszustand ($GM = 0,6 - 1,0$ m) wurden für eine Wellenhöhe von 3 m maximale Rollwinkel von 10,5- 12,5° berechnet. Laut [53] sind in küstennahen

Gebieten der Ostsee auch bei Windstärke 8 maximale Wellenhöhen von 3m zu erwarten (in offenen Seegebieten der Ostsee bis zu 5,5 m). Die Im Projekt betrachteten Fährlinien verkehren küstennah. Somit decken sich die Berechnungen mit den Aussagen der befragten Schiffsbesatzungen, wonach bei starkem Wind (also 3m Wellenhöhe) Rollwinkel von ca. 10° vorkommen können. Übertragen auf eine signifikante Wellenhöhe von 2,3 m, gemäß der Low wave height definition des MoU [55], ergeben sich 8 – 9,5°.

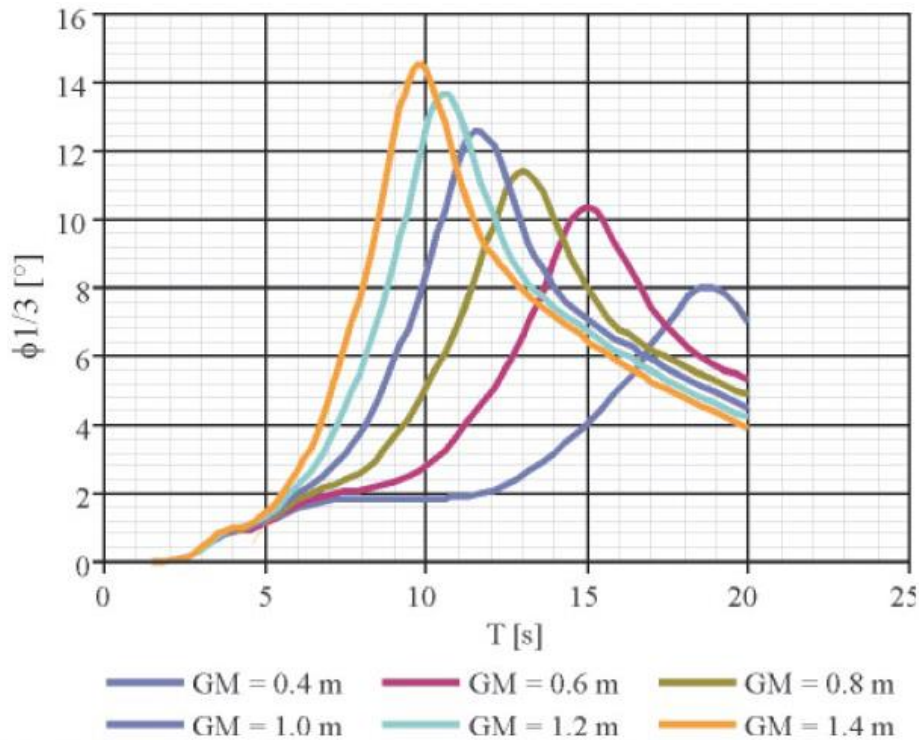


Fig. 3. Significant ship roll amplitudes in function of the characteristic wave frequency T , and: $GM = \text{var}$, $H_s = 3 \text{ m}$, $\beta = 60^\circ$ (where: 0° – head wave, 180° – aft wave), $v = 0 \text{ m/s}$

Abbildung 19: Rollwinkel in Abhängigkeit vom Beladungszustand für eine sign. Wellenhöhe von 3 m [56]

Abweichend vom Memorandum of Understanding geben die langjährigen Wetterstatistiken des BSH [53] für die westliche Ostsee durchschnittliche Wellenhöhen über das Jahr gerechnet von ca. 1,0 m an, in den Wintermonaten werden Monatsdurchschnitte von 1,5m erreicht. Für solche Wellenhöhen ergeben sich Rollwinkel von 3,5 – 6°. Ausgehend von den Aussagen der Besatzungen, dass NUR bei starkem Seegang Rollwinkel von ca. 10° zu erwarten sind, scheint der Ansatz eines für den durchschnittlichen Normalbetrieb anzuwendenden Rollwinkels von 5° sinnvoll.

Der Rollwinkel ist verbunden mit der Rollzeit, dies ist die Zeit für eine vollständige Bewegung von der Mittellage des Schiffes bis zur Krängung auf die eine Seite, zurück zur maximalen Auslegung auf der anderen Seite und wieder zurück in die Mittellage. Aus Abbildung 17 lässt sich für ein GM von 0,6 eine Zeit von 15 sec für die Bewegung von 0° bis zur maximalen einseitigen Krängung (ca. 10,5°) entnehmen. Für den gesamten Zyklus ergäben sich somit 60 sec. Für kleine Rollwinkel (kleiner 10°) ist die Rollzeit unabhängig von der Auslenkung [57], [58]. Bei gleichem GM wäre entsprechend auch für einen Rollwinkel von 5° mit einer ungefähren Rollzeit von 60 sec zu rechnen.

3.4. Besondere Transportbedingungen an Bord - Salzgehalt und Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit über der Ostsee ist über das gesamte Jahr relativ konstant. Der Durchschnittswert liegt bei 83%.

Der Salzgehalt der Ostsee setzt sich aus dem einströmenden Salzwasser der Nordsee und dem Süßwasser der Flüsse und des Regenwassers zusammen. Je weiter man sich nach Osten bewegt, desto geringer wird der Salzgehalt der Ostsee. So beträgt der Salzgehalt an der Küste Schleswig-Holsteins rund 1,5 bis 1,8 Prozent, während zwischen Schweden und Finnland nur noch 0,3 bis 0,5 Prozent gemessen werden, siehe Abbildung 18 [59]. Zum Vergleich: Die Nordsee hat einen Salzgehalt von 3,5 Prozent.

Abbildung 18 zeigt Durchschnittswerte. Genauer betrachtet ändert sich der Salzgehalt auch deutlich mit der Wassertiefe, wobei er für tiefere Schichten zunimmt. Für das im Projekt betrachtete Seegebiet beträgt der Salzgehalt an der Oberfläche (Wassertiefe 0 – 20 m) ca. 1,0 % [53], [60].

Für den Salzgehalt in der Brandungsluft wurden Angaben von 1mg Salz pro Kubikmeter Luft gefunden. Dabei bezogen sich alle gefundenen Literaturstellen auf eine Bestimmung aus dem Jahr 1955 [61]. Da bereits der Salzgehalt des Wassers jedoch gering ist, ist davon auszugehen, dass auch der Salzgehalt der Luft sehr klein ist.

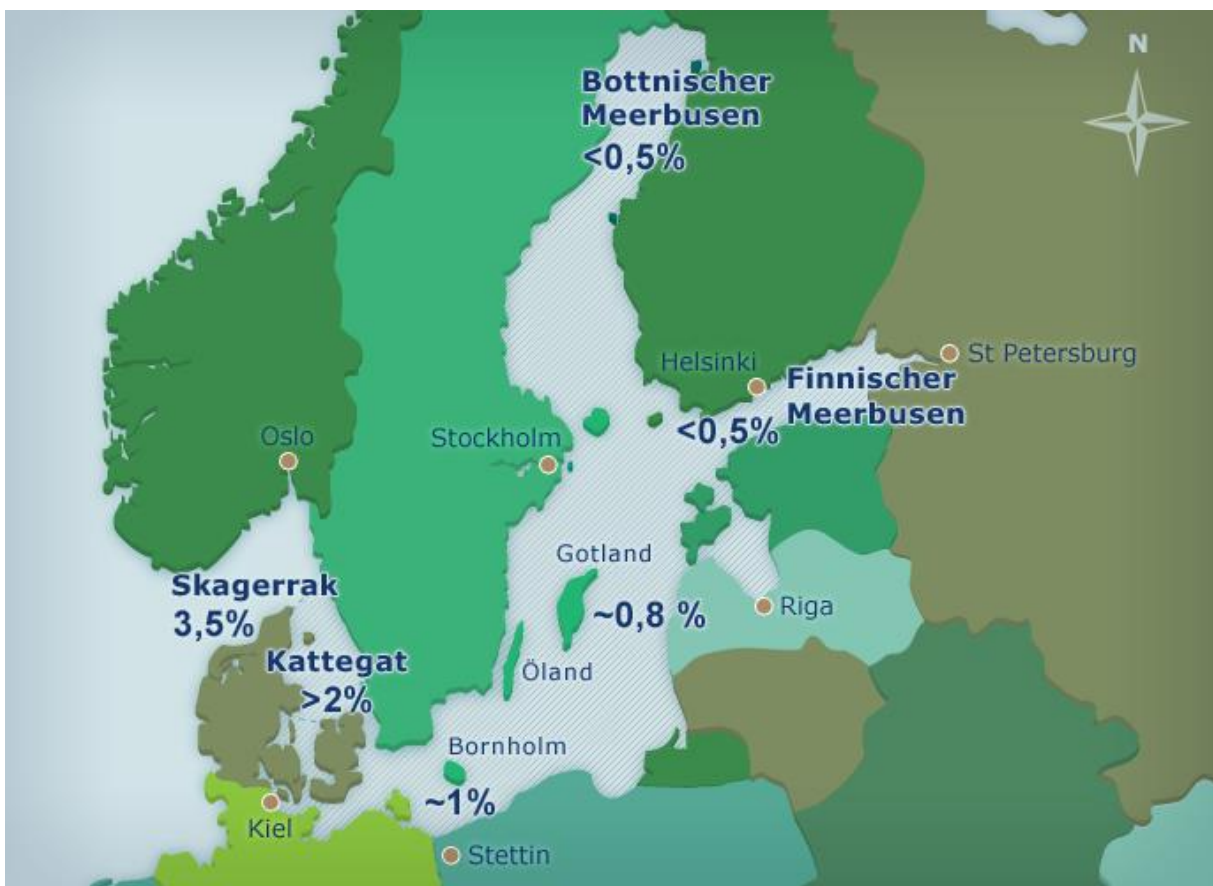


Abbildung 20: Salzgehalt der Ostsee [59]

3.5. Besondere Transportbedingungen an Bord - Vibrationen durch Antriebssysteme

Die Antriebssysteme an Bord (Propeller, Motoren und Hilfsmaschinen) erzeugen während ihres Betriebes Vibrationen. Die Grundfrequenz der Propeller liegt bei Festflügelpropellern mit einem Durchmesser zwischen 5 und 6 Metern um 20 Hz und bei Propellern zwischen 8 und 10 Metern Durchmesser bei 10 Hz. [62] Die Motorvibration wird durch die periodische Kolben- / Kurbelwellenbewegung verursacht. Anregungen, die durch freie Kräfte und Momente im Motor verursacht werden, können sich auf die Schiffsstruktur übertragen, insbesondere bei mittelgroßen Schiffen mit 2-Takt-Motoren. Schiffsmotoren schwingen, in Abhängigkeit von der Motorlast, hauptsächlich zwischen 3 und 100 Hz [62], [63] haben aber auch geringe Anteile in höheren Frequenzbereichen bis zu 300 Hz oder mehr.

Fazit:

Bedingungen an Bord

	WORST Case gesamte Ostsee	Normal Case ALBERO-Szenario
Wellenhöhe	5,5 m	1,0 m
Rollwinkel	27°	5°
Rollzeit (GM = 0,6)	Keine lineare Abhängigkeit	Ca. 60 sec
Sturmtage	117	39
Luftfeuchtigkeit	88%	83%
Salzgehalt Wasser	Ca. 2 %	Ca. 1 %
Salzgehalt Luft	1mg/m ³	1 mg/m ³
Vibrationen	3 – 100 Hz	3 – 100 Hz

Tabelle 7: Übersicht über die zu erwartenden Bedingungen an Bord von Fährschiffen auf der Ostsee

3.6 Gefahrguttransporte auf RORO-Fährrschiffen

Der Transport von verpacktem Gefahrgut mit Schiffen ist grundsätzlich durch den IMDG-Code (International Dangerous Goods Code) geregelt. Für den Transport von verpacktem Gefahrgut über die Ostsee gilt das *Memorandum of Understanding for the Transport of Packaged Dangerous Goods on Ro-Ro Ships in the Baltic Sea (MoU)* [55], welches bestimmte Regelungen aus dem IMDG-Code auf die Besonderheiten des RORO-Fährverkehrs anpasst.

Das MoU ist keine bindende Vereinbarung. Die Reedereien können nach eigenem Ermessen entscheiden, ob sie das MoU anwenden oder nach IMDG-Code fahren wollen [64].

- Für jede Beförderungseinheit (CTU) mit gefährlichen Gütern muss ein Container-/ Fahrzeug-Packzertifikat (CTU-Packzertifikat) ausgestellt werden.
- Generell gelten auch auf RORO-Schiffen die Regelungen des IMDG-Codes. Dies betrifft insbesondere die Kennzeichnung von Gefahrguttransporten.
- Bestimmte Verpackungsarten (Feinstblechverpackungen) sind abweichend vom IMDG-Code nur in LWHA-Gebieten zulässig. Entgegen dem IMDG-Code sind innerhalb von LWHA-Gebieten bestimmte Zusammenstauungen von Gefahrgütern gestattet. Für Gefahrgut der Klasse 1 (Explosive Stoffe) gilt hinsichtlich Stauung und Trennung jedoch zwingend der IMDG-Code.
- Die Beförderung von Tanks mit offenen Lüftungseinrichtungen ist auf Ro/Ro-Schiffen nicht zulässig.

- Tiefgekühlt verflüssigte Gase des ADR oder der Staukategorie D des IMDG-Codes sind verboten!

Die folgende Tabelle zeigt die für den Transport von Gefahrgut geltenden grundlegenden Regelungen laut MoU. Die rechte Spalte zeigt die im Projekt VESPER plus (2011 – 2014) aus Realdaten ermittelten Häufigkeiten (nicht Mengen!!!) von Gefahrguttransporten für ALLE Fährlinien der Reedereien Scandlines und TT-Line innerhalb des 2. Halbjahres von 2011. Nach Nachfragen bei den Reedereien haben sich diese Verhältnisse kaum verändert. Die Schattierungen zeigen, welche Gefahrgutklassen dabei für das Projekt ALBERO vernachlässigbar sind (grau schattiert), weil die transportierten Mengen zu gering sind oder weil der Transport dieser GG-Klassen nur auf Frachtfähren, nicht jedoch auf Fährschiffen mit mehr als 25 Passagieren zugelassen ist. Die blaue Schattierung zeigt an, dass diese GG-Klasse für das Projekt ALBERO keine Relevanz hat, da von ihr keine entsprechende Gefährdung ausgeht.

Stoff	GG-Klasse	An Deck	Unter Deck	Transporthäufigkeit (inkl. Frachtfähren*) %
Explosivstoffe	1	Strenge Regelungen zur Stauung und Verpackung, im Prinzip verboten		0,0001
Entzündbare Gase	2.1	verboten	verboten	6,7
Nicht entzündbare, nicht giftige Gase	2.2	erlaubt	erlaubt	3,4
Giftige Gase	2.3	verboten	verboten	0,2
Entzündbare Flüssigkeiten, VG I , II	3	erlaubt	verboten	35,9
Entzündbare Flüssigkeiten, VG III	3	erlaubt	erlaubt	
Entzündbare feste Stoffe UN 1944, 1945, 2254, 2623 (verschiedene Arten von Zündhölzern)	4.1	erlaubt	verboten	2,1
Entzündbare feste Stoffe Sonstige UN-Nummern	4.1	erlaubt	erlaubt	
Selbstentzündliche Stoffe	4.2	erlaubt	verboten	0,3
Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase bilden	4.3	erlaubt	verboten	0,2
Entzündend wirkende Stoffe	5.1	erlaubt	verboten	6,5
Organische Peroxide	5.2	verboten	verboten	1,2
Giftige Stoffe, VG I , II	6.1	erlaubt	verboten	
Giftige Stoffe, VG III	6.1	erlaubt	erlaubt	2,5
Infektiöse Stoffe	6.2	verboten	verboten	0,005

Radioaktive Stoffe	7	erlaubt	erlaubt	0,05
Ätzende Stoffe, VG I oder II	8	verboten	verboten	23,9
Flüssige Ätzende Stoffe, VG III	8	erlaubt	verboten	
Feste Ätzende Stoffe VG III	8	erlaubt	erlaubt	
Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	9	erlaubt	erlaubt	16,5

Tabelle 8: Gefahrguttransporte auf Fahrgastschiffen mit mehr als 25 Passagieren an Bord,

VG = Verpackungsgruppe, Verpackungsgruppe I: Stoffe mit hoher Gefahr; Verpackungsgruppe II: Stoffe mit mittlerer Gefahr, Verpackungsgruppe III: Stoffe mit geringer Gefahr.

***Auf Frachtfähren (nicht mehr als 25 Passagiere an Bord) ist der Transport aller Gefahrgutklassen ab Klasse 2 zumindest an Deck gestattet.**

Auch im Straßenverkehr zeigt sich die überwiegende Mehrzahl der Transporte im Bereich der entzündlichen Flüssigkeiten, aber auch deutliche Mengen ätzender Stoffe und anderer gefährlicher Stoffe (Klasse 9) [65].

Insgesamt ergeben sich für das Projekt ALBERO folgende Relevanzen geordnet nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens:

AN Deck:

Gefahrgutklasse	Zu erwartende Wahrscheinl.keit	Was kann das sein? (AUSWAHL!!!)
Gefahrgut Klasse 3	Ca. 50 %	insbesondere Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, Alkohole und Lösungsmittel wie Aceton
Gefahrgut der Klasse 8 mit VG III	Ca. 20%	Phosphorsäurelösung oder Flüssigdünger
Gefahrgut der Klasse 9	Ca. 17%	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeug mit Antrieb durch entzündbares Gas oder Fahrzeug mit Antrieb durch entzündbare Flüssigkeit oder Brennstoffzellen-Fahrzeug • Batteriebetriebenes Fahrzeug / Gerät • Li-Metall-Batterien, Ni-Batterien, • Aufblasbare Rettungsmittel • Begaste Güterbeförderungseinrichtung • Asbest • Magnete • Meeresschadstoffe (größte Gruppe in 9)
Gefahrgut der Klasse 5.1	Ca. 5 %	Chlorate, Peroxide, Nitrate (Düngemittel)
Gefahrgut der Klasse 6.1	Ca. 5%	Pestizide

Gefahrgut Klasse 4	<u>Ca. 3%</u>	Aluminiumpulver, Phosphor, Schwefel, Kohle, Baumwolle, Fischmehl, Carbid, Metallhydride, Lithiummetall
--------------------	---------------	--

Tabelle 9: Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Gefahrgut mit An-Deck-Stauung

UNTER Deck:

Gefahrgutklasse	Zu erwartende Wahrscheinl.keit	Was kann das sein (AUSWAHL!!!)
Gefahrgut Klasse 3 VG III	<u>Ca. 55 %</u>	Unter Deck sind brennbare Flüssigkeiten mit geringerer Gefahr zu erwarten. Dabei darf auch Dieselkraftstoff und Kerosin unter Deck transportiert werden, Benzin jedoch nicht. Weitere typische Ladungen dieser Kategorie sind spezielle Alkohole und Öle sowie Farben.
Gefahrgut der Klasse 9	<u>Ca. 30%</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeug mit Antrieb durch entzündbares Gas oder Fahrzeug mit Antrieb durch entzündbare Flüssigkeit oder Brennstoffzellen-Fahrzeug • Batteriebetriebenes Fahrzeug / Gerät • Li-Metall-Batterien, Ni-Batterien, • Aufblasbare Rettungsmittel • Asbest • Fischmehl • Magnete • Meeresschadstoffe (größte Gruppe in 9)
<u>Festes</u> Gefahrgut der Klasse 8 mit VG III	<u>Ca. 10 %</u>	Es gibt nicht so viele <u>feste</u> ätzende Stoffe mit geringer Gefährdung, die in größeren Mengen verarbeitet werden. (z.B. Natronkalk, Anhydride verschiedener Säuren, Eisenchlorid). Daher sind unter Deck geringere Häufigkeiten dieser Gefahrgutklasse zu erwarten.
Gefahrgut der Klasse 6.1, VG III	<u>Ca. 5%</u>	Ausgewählte Pestizide
Gefahrgut Klasse 4.1	<u>Ca. 3%</u>	Aluminiumpulver, Phosphor, Schwefel

Tabelle 10: Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Gefahrgut mit Unter-Deck-Stauung

Der Transport von entzündlichen Gasen (GG-Klasse 2.1), also auch von LNG, LPG ist auf ROPAX-Schiffen verboten, wenn diese Gase die transportierte Ladung darstellen. Ein Gastankcluster mit flüssigem LNG darf also nicht mitgenommen werden. Ein Fahrzeug, welches Gas zum eigenen Antrieb nutzt, zählt zur GG-Klasse 9. Der Transport ist sowohl über als auch unter Deck gestattet. Auch ein batteriebetriebenes Fahrzeug gehört zur GG-Klasse 9.

3.7 Gewichtsunterschiede zwischen konventionellen Fahrzeugen und Elektroautos

Für Schiffe spielen Fragen der Stabilität und der Tragfähigkeit eine entscheidende Rolle. Daher wurde untersucht, ob sich die Fahrzeuggewichte der alternativ betriebenen Fahrzeuge von denen gleicher Bauart mit konventionellem Antrieb unterscheiden. Dazu wurden Modelle verschiedener Fahrzeugklassen gewählt, die gleichzeitig in verschiedenen Antriebsarten angeboten werden, damit eine Vergleichbarkeit desselben Typs nur mit dem Unterschied der Antriebsart gegeben ist.

Wenn man die Fahrzeuggewichte (jeweils Leergewicht) vergleicht, fällt auf, dass die meisten batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge signifikant schwerer sind als konventionell mit Benzin oder Diesel angetriebene Fahrzeuge vergleichbarer Motorisierung.

Gem. § 42 Abs.3 StVZO ist das Leergewicht das Gewicht eines betriebsfertigen Fahrzeugs ohne austauschbare Ladungsträger (Behälter, die dazu bestimmt und geeignet sind, Ladungen aufzunehmen z.B. Container), aber mit zu 90 Prozent gefüllten eingebauten Kraftstoffbehältern und zu 100 Prozent gefüllten Systemen für andere Flüssigkeiten (ausgenommen Systeme für gebrauchtes Wasser) einschließlich des Gewichts aller im Betrieb mitgeführten Ausrüstungsteile (zum Beispiel Ersatzräder und -bereifung, Ersatzteile, Werkzeug, Wagenheber, Feuerlöscher) zuzüglich 75 kg als Fahrergewicht.

Die Gewichtsangaben beruhen auf Informationen der Hersteller (die detaillierten Literaturangaben dazu: siehe Datei im digitalen Anhang)

Abbildung 21 enthält die Leergewichte der Kfz im Vergleich nach der Antriebsart graphisch dargestellt. Jeweils das schwerste Fahrzeug ist mit einem roten Balken und die leichteste Variante des Modells mit einem blauen Balken versehen. Bei den jeweils schwersten Modellvarianten handelte es sich stets um vollelektrisch betriebene Kfz oder Hybride, die leichtesten Modelle waren jeweils Benzin- oder Diesel, also PKW mit konventionellem Antrieb. Das schwerste Auto im Vergleich wiegt 2635 kg (Mercedes V-Klasse BEV) und das leichteste 929 kg (VW up! Benzin). Im Vergleich wiegt die V-Klasse als herkömmliche Dieselvariante 2150 kg. Der VW up als BEV-Variante z.B. hat ein Leergewicht in Höhe von 1235 kg.

In Abbildung 22 sind die Netto-Gewichtsunterschiede in kg für das leichteste (Benzin/Diesel) und schwerste (batterieelektrisch/Hybrid) Fahrzeug jeweils dargestellt. Hier fällt auf, dass der Unterschied, also die geringste Spanne bei 125 kg (BMW 7er Reihe: 730 d und 745 e) und die höchste bei 690 kg (Mercedes Geländewagen GLC Benzin- und EQC BEV) ein und desselben Modells, jeweils nur in der Antriebsart verschieden, beträgt.

Fazit:

Je nach Fahrzeugmodell können die Gewichtsunterschiede zwischen konventionellem und elektrisch betriebenen Auto bis zu 30 % betragen. Es wurden mit den assoziierten Fährereien Gespräche geführt, inwieweit dieser Fakt für die Transportkapazität oder den Beladungsvorgang der RORO-Fährschiffe zukünftig eine Rolle spielen könnte, wenn mehr Elektrofahrzeuge an Bord zu erwarten sind. Die Reedereivertreter sahen darin für die großen Ostseefahren keine Probleme. Für kleinere Fährschiffe im Küsten- oder Binnenverkehr kann dies aber ein unbedingt zu bedenkender Faktor sein.

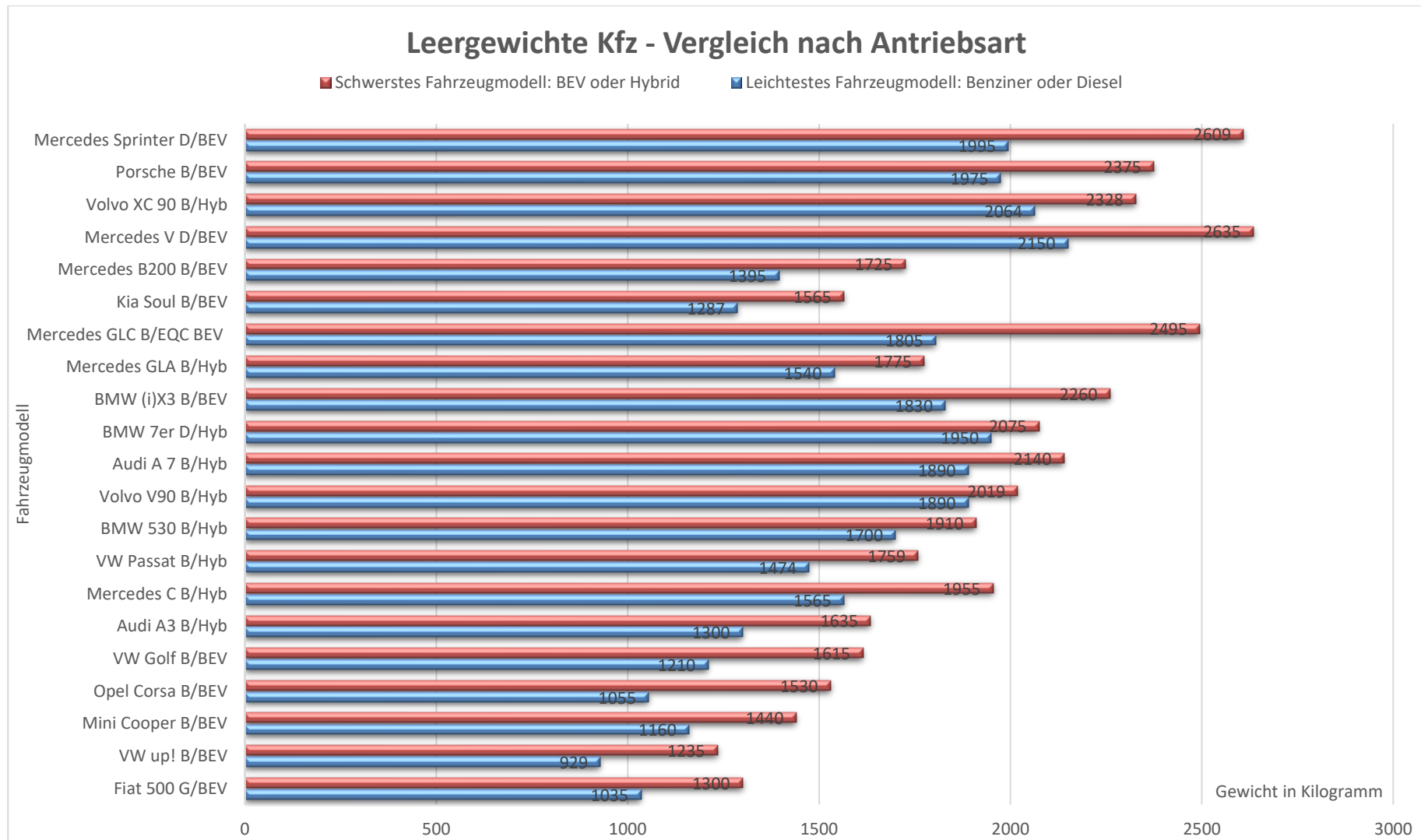


Abbildung 21: Leergewichte Kfz, Vergleich nach Antriebsart

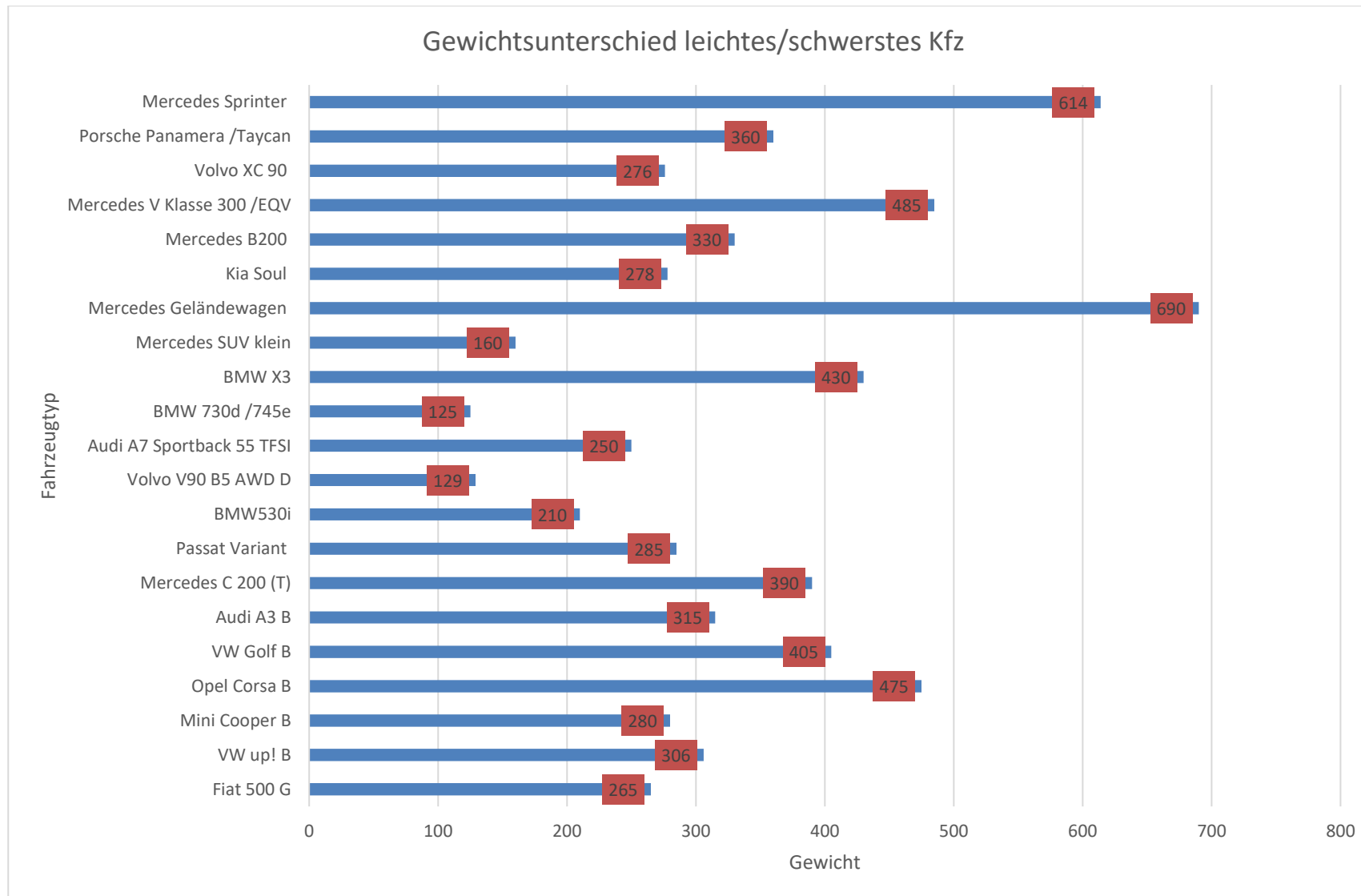


Abbildung 22: Gewichtsunterschiede in kg für das leichteste (Benzin/Diesel) und schwerste (batterieelektrisch/Hybrid)

3.8 Transportaufkommen von alternativ betriebenen Fahrzeugen auf Fährschiffen

Es wurde eine ausführliche Analyse zu den derzeit tatsächlich auf Fährschiffen transportierten alternativ betriebenen Fahrzeugen durchgeführt, um in einem Stellplatzkonzept die notwendigen Kapazitäten planen zu können. Die Untersuchung erfolgte auf Basis vertraulicher Daten einer der assoziierten Reedereien. Nachfolgend werden nur allgemeine Zusammenfassungen dargestellt. Die gesamte Untersuchung befindet sich im digitalen Anhang zum Bericht.

Die Analyse ergab, dass bezogen auf die jeweils insgesamt transportierten Fahrzeuge an Bord im Jahr 2019 etwa 3 % gasbetriebene Fahrzeuge und ca. 1 % Elektrofahrzeuge transportiert wurden.

Nach den bisherigen Prognosen für den Verkauf von abF ist davon auszugehen, dass sich diese Zahl in den nächsten zwei Jahren verdreifacht und in den nächsten 5 Jahren (für Elektrofahrzeuge) etwa verzehnfacht.

Die Analyse zeigte aber auch, dass bei 32 % aller betrachteten Abfahrten KEIN gasbetriebenes Fahrzeug transportiert wurde, und sogar bei 63% aller Abfahrten KEIN Elektrofahrzeug an Bord war (Abbildungen 23 und 24). Aus ökonomischen Gründen ist davon auszugehen, dass entsprechend ausgewiesenen Stellplätze dann mit konventionellen Fahrzeugen belegt werden, anstatt sie leer zu lassen. Auf der anderen Seite gab es auch Abfahrten mit ungewöhnlich hohen Anteilen von abf (jeweils mehr als 20). In diesem Fall würden die speziell eingerichteten Stellplätze nicht ausreichen.

Zudem ist damit zu rechnen, dass sich häufig sowohl gasbetriebene als auch Elektrofahrzeuge gleichzeitig an Bord befinden.

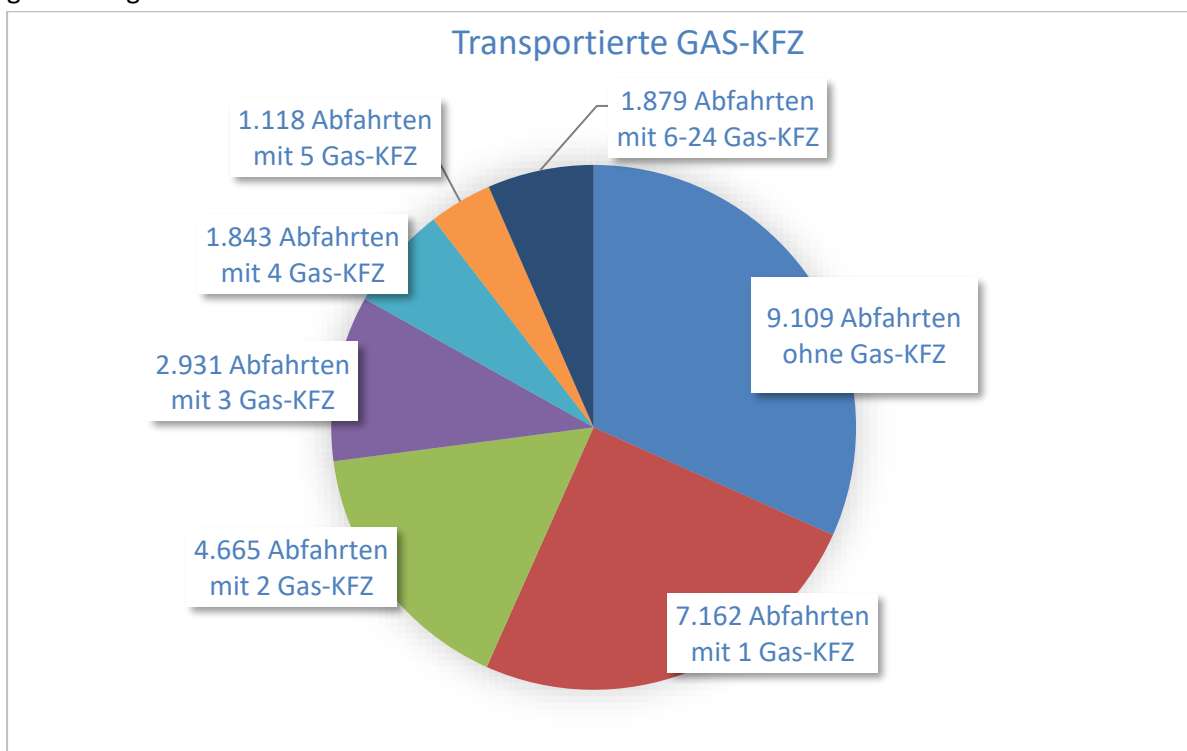


Abbildung 23: Transport gasbetriebener Fahrzeuge. Es wurden 28707 Abfahrten analysiert.

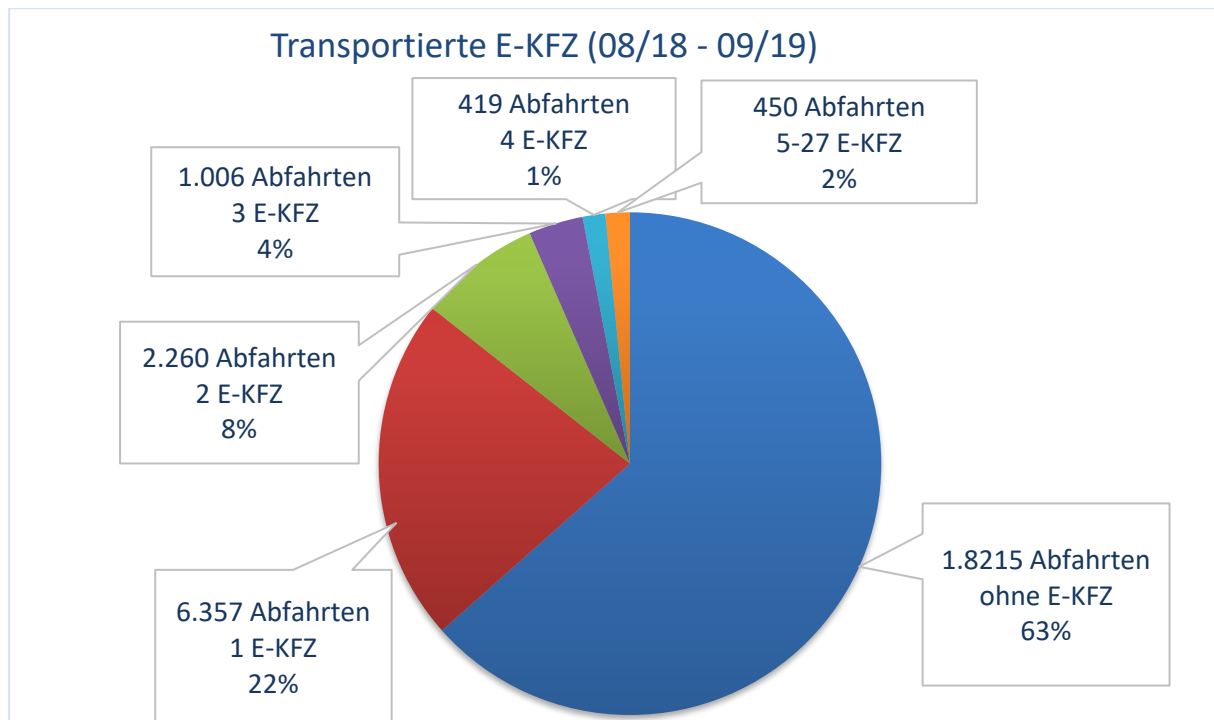


Abbildung 24: Transport von Elektro-Fahrzeugen. Es wurden 28707 Abfahrten analysiert.

3.9 Havarien fahrzeugtransportierender Schiffe – statistische Untersuchung

Bei der Untersuchung zu möglichen Brandursachen bei Elektrofahrzeugen ergaben sich die folgenden Hauptgefahren für die Auslösung eines thermal runaway des Fahrzeugakkus mit nachfolgendem Brand:

- mechanische Beschädigung des Fahrzeugakkus (durch Unfall, Fahren über Unebenheiten,...)
- ungeeignete oder defekte elektrische Systeme zum Aufladen
- Überhitzung

Ob eine Beschädigung oder Überhitzung des Fahrzeuges vor der Auffahrt auf ein ROPAX- oder RORO-Schiff stattgefunden hat, ist (bisher) nicht ermittelbar. Die verbleibende Fragestellung ist demnach, inwieweit auch während der Überfahrt selbst solche Gefahren für ein Fahrzeug bestehen und wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist.

Ausgangspunkt für die Untersuchung war die Annahme, dass eine mechanische, thermische oder elektrische Schädigung von Fahrzeugen an Bord nur dann auftreten kann, wenn entweder während des Be- und Entladens (Auffahrt)unfälle an Deck passieren oder wenn das Schiff selbst in eine Havariesituation gerät, in deren Folge die transportierten Fahrzeuge beschädigt werden. Dementsprechend wurden generell Havarien von fahrzeugtransportierenden Schiffen untersucht.

Als fahrzeugtransportierende Schiffe wurden dabei verstanden:

- RORO – Fährschiffe – Schiffe, die rollende Ladung transportieren, wobei die Ladung durch die Fahrzeugfahrer selbst auf das Schiff und wieder herunter gefahren wird, hauptsächlich LKW-Verkehr, Trailer

- ROPAX-Schiffe - Schiffe, die rollende Ladung transportieren, wobei die Ladung durch die Fahrzeugfahrer selbst auf das Schiff und wieder herunter gefahren wird, PKW- und LKW-Verkehr, deutlich höhere Anzahl an Passagieren als auf reinen RORO-Schiffen
- Autotransporter – Frachtschiff, das Autos als Ladung transportiert, ohne eigenen Fahrer
- Inlandfähren – kleinere Fähren mit Fahrzeiten von mehr als 15 Minuten, die Gewässer innerhalb eines Landes oder zwischen zwei eng nebeneinander liegenden Ländern überqueren und dabei auch Fahrzeuge transportieren. Je nach Fahrstrecke variiert die Größe dieser Schiffe deutlich.

Die Analyse beschränkt sich auf europäische Gewässer. Für den Untersuchungszeitraum 2010 - 2019 wurden ca. 734 Schiffe ermittelt, die zu den oben genannten Gruppen gehören (genaue Aufteilung auf einzelne Reedereien siehe Datei im digitalen Anhang).

Es wurde eine umfangreiche Internetrecherche zu Vorfällen mit den betrachteten Schiffen in den Jahren 2010 -2019 durchgeführt. Dabei wurden 915 Vorfälle ermittelt und detailliert sowie mit entsprechender Quellenangabe erfasst. Nach Art der Havarie ergab sich dabei folgende Aufteilung (siehe Abbildung 25).

(Auffahr)Unfall	3
Blackout	28
Brand	37
Brand Fahrzeugdeck	36
Gefahstoffaustritt	5
Grundberührung	125
Kollision	323
Manövrierunfähig	55
Maschinenraumbrand	54
Maschinenschaden	121
Rampenschaden	29
Rauchentwicklung	14
Riss im Rumpf	2
Schlagseite	3
Technische Probleme	48
Verrutschte Ladung	16
Wassereinbruch	16

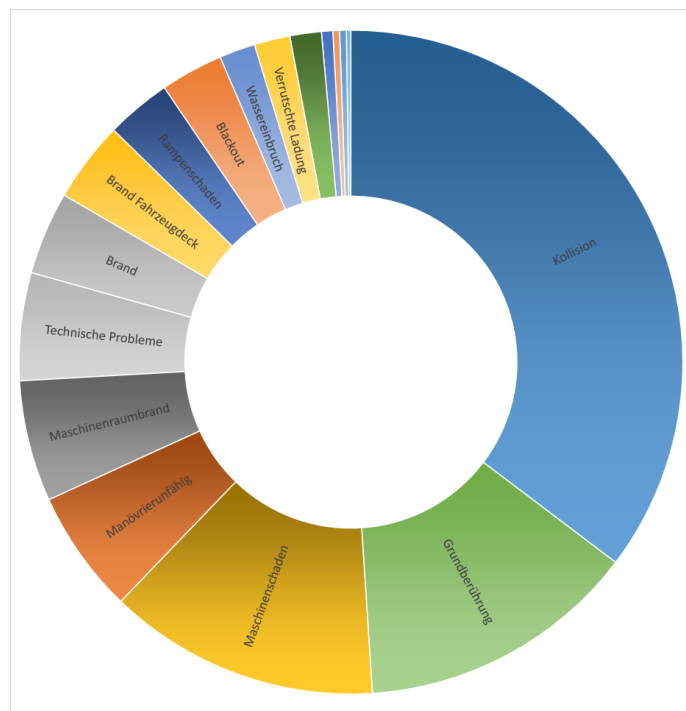


Abbildung 25: Verteilung der Unfallursachen (insgesamt 915 Vorfälle) von fahrzeugtransportierenden Schiffen in Europa, 2010 – 2019

Betrachtet nach Schiffstyp ergibt sich folgende Statistik für die erfassten Unfälle:

Schiffstyp	Anzahl Unfälle gesamt	davon Kollisionen
RoRo / RoPax	281	103
Inlandfähre	589	205
Autotransporter	45	15
gesamt	915	323

Tabelle 11: Verteilung nach Schiffstyp, Anteil der Kollisionen

Die Untersuchung zeigt, dass besonders Kollisionen ein häufiger Grund für Schiffshavarien sind und dass besonders Inlandfähren häufig verunglücken. Kollisionen finden vor allem im Hafen statt, wie die folgende Darstellung zeigt:

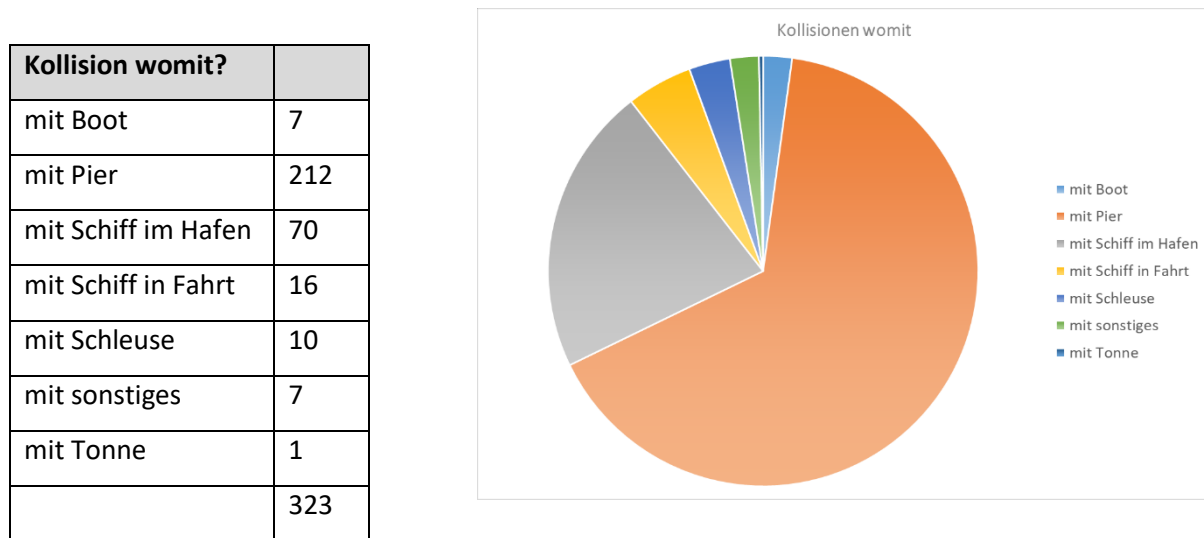


Abbildung 26: Darstellung der Kollisionspartner

Auf Grundlage der Untersuchungen ergibt sich rein statistisch ein Wert von ca. 0,13 Havarien pro Schiff und Jahr.

Für das ALBERO-Projekt von besonderer Relevanz war die Ermittlung der Unfälle, bei denen es zu Fahrzeugschäden kam. Dabei konnten in der Untersuchung 83 Fälle festgestellt werden, bei denen der gefundene Medienbericht explizit auf die Beschädigung von Fahrzeugen hinwies. Tabelle 12 zeigt, dass vor allem Kollisionen, schweres Wetter und Rampenschäden zu mechanischen Schäden an Fahrzeugen führten. Zudem ist natürlich eine Beschädigung von Fahrzeugen zu erwarten, wenn es zu einem Brand auf dem Fahrzeugdeck kommt.

Art der Havarie	Havarieart gesamt	dabei Fahrzeuge beschädigt (83)
(Auffahr)Unfall	3	2
Brand Schiff	37	1
Brand Fahrzeugdeck	36	36
Kollision	323	20
Rampenschaden	29	4
Rauchentwicklung	14	3
Verrutschte Ladung	16	16
Wassereinbruch	16	1

Tabelle 12: Havarien mit Fahrzeugschaden (laut Medienbericht), es wurden in der Tabelle nur die Havarien erfasst, bei denen Fahrzeugschäden ausgewiesen wurden, bei den verbleibenden, in Abbildung 25 bzw. Tabelle 11 aufgeführten Havarien, wurde kein Fahrzeugschaden angegeben.

Es muss jedoch von einer deutlich höheren Anzahl von Vorfällen mit Fahrzeugschaden ausgegangen werden, da oft nur allgemeine Aussagen wie „Es entstand hoher Sachschaden“ zu finden waren.

Wie stark Fahrzeuge bei Schiffshavarien beschädigt werden können, zeigen folgende Bilder:



Abbildung 27: Havarie der „European Causeway“ durch schweres Wetter (Dezember 2018)

Bildquelle: <https://www.irishexaminer.com/breakingnews/ireland/cars-crushed-after-lorries-overturn-on-ferry-sailing-from-the-north-to-scotland-892854.html>



Abbildung 28: Havarie der „Epsilon“ durch schweres Wetter (Februar 2016)

Bildquelle: <https://www.thejournal.ie/irish-ferry-damage-storm-imogen-2596991-Feb2016/#slide-slideshow2>

Bei solch schweren Beschädigungen von Fahrzeugen ist davon auszugehen, dass auch die Fahrzeugbatterie eines Elektroautos beschädigt werden kann und es in der Folge zu Bränden kommen kann. Gleichzeitig ist jedoch die Gefahr einer Beschädigung bei einer solchen Havarie für alle Fahrzeugtypen gleich, d.h. auch Dieselfahrzeuge oder Benziner können entsprechend beschädigt werden und Folgeschäden auftreten. Die Gefahr einer Beschädigung durch Schiffshavarien während der Überfahrt ist also durchaus gegeben, sie ist aber für alternativ betriebene Fahrzeuge nicht höher oder niedriger als für andere Fahrzeuge.

3.10 Mögliche Auswirkungen von Unfällen mit alternativ betriebenen Fahrzeugen auf Passagiere, Crew und Schiff

Schiffshavarien als Unfall-Ursache für die Beschädigung eines abF

Die Arbeiten in AP 2.2 ergaben als Schiffshavarien, bei den auch Fahrzeuge beschädigt werden können, vor allem Kollisionen, Brände auf dem Fahrzeugdeck und Verrutschen von Ladung bei schwerem Wetter. Die Untersuchungen aus AP 1.4 über äußere Einflüsse, die zu Schäden an Batterien von Elektroautos führen können, ergaben mechanische Beschädigungen und Überhitzung als Hauptursachen.

In Kombination dieser beiden Analysen erkennt man, dass in jedem der genannten Schiffsunfälle die Batterie eines Elektrofahrzeuges so geschädigt werden kann, dass es zu einem thermal runaway mit einem nachfolgenden Brand kommen kann. Auch für gasbetriebene Fahrzeuge wären diese Art von Havarien ein Ausgangspunkt für weitere Gefahrensituationen. Auch konventionelle Fahrzeuge könnten so beschädigt werden, dass es zu Folgegefahren kommt.

	Kollision	Brand auf dem Fahrzeugdeck	Verrutschen von Ladung
Mechanische Beschädigung	Ja	-	ja
Überhitzung	-	Ja	
Zu erwartende Folge-Havarie für ein Elektrofahrzeug	Brand sehr wahrscheinlich	Brand sehr wahrscheinlich	Brand sehr wahrscheinlich
Zu erwartende Folge-Havarie für ein gasbetriebenes Fahrzeug	Freisetzen von Gasen, Brand möglich	Brand bzw. Explosion sehr wahrscheinlich	Freisetzen von Gasen, Brand möglich
Zu erwartende Folge-Havarie für ein konventionelles Fahrzeug	Freisetzen von Kraftstoff, Brand nicht auszuschließen	Brand bzw. Explosion wahrscheinlich	Freisetzen von Kraftstoff, Brand nicht auszuschließen

Tabelle 13: mögliche Folgen bei der Beschädigung von abF infolge einer Schiffshavarie

Fahrzeugspezifische Ursachen für einen Unfall an Bord

Mögliche Ursachen, die vom Fahrzeug selbst ausgehen, sind vor allem

- mechanische Beschädigung durch Unfall vor Auffahrt auf das Schiff
- Technische Defekte (z.B. in der Elektronik), nachfolgend Kurzschlüsse oder lokale Überhitzung
- Unkorrektes Aufladen von Elektrofahrzeugen (Nutzung von ungeeigneten Kabeln oder ungeeigneten Steckverbindungen)
- Unkorrektes Verhalten des Fahrers (Rauchen im Fahrzeug, ungesicherter Transport von Gefahrstoffen)

	Mechanische Beschädigung durch vorherigen Unfall	Technische Defekte, interner Kurzschluss	Unkorrektes Aufladen	Unkorrektes Verhalten des Fahrers
Zu erwartende Havarie für ein Elektrofahrzeug	Freisetzung von Gasen möglich, Brand möglich	Freisetzung von Gasen möglich, Brand möglich	Freisetzung von Gasen möglich, Brand möglich	Brand möglich
Zu erwartende Havarie für ein gasbetriebenes Fahrzeug	Freisetzen von Gasen bzw. Brand nicht auszuschließen	Freisetzen von Gasen bzw. Brand nicht auszuschließen	-	Brand möglich
Zu erwartende Havarie für ein konventionelles Fahrzeug	Freisetzen von Kraftstoff, Brand nicht auszuschließen	Freisetzen von Kraftstoff, Brand nicht auszuschließen	-	Brand möglich

Tabelle 14: mögliche Folgen bei der Beschädigung von abF infolge fahrzeuginterner Ursachen

Bewertung Havarien von abF

Die statistischen Untersuchungen in AP 2.2 haben gezeigt, dass Elektrofahrzeuge nicht häufiger brennen als konventionelle Autos und ein Großteil der Havarien ist durch den Menschen selbst verschuldet. Was macht Brände von Elektrofahrzeugen bzw. abF dennoch zu einem besonderen Risiko?

a) Brandverlauf

In der Analyse von Brandfällen mit Elektrofahrzeugen (siehe Abschnitt 3.1) wurde in den Quellen deutlich darauf verwiesen, dass die Löscharbeiten am Elektrofahrzeug häufig sehr lange dauerten, da der Brand schwer zu löschen war und dass es immer wieder zu Rückzündungen kam.

Elektrofahrzeuge bzw. generell Systeme mit (großen) Li-Ionen -Batterien brennen also besonders lange. Das kommt u.a. daher, dass die in der Batterie verbauten Einzelzellen – oft Hunderte oder gar Tausende - bei einem Brand erst nach und nach aufplatzen und durch den jeweils frei werdenden Elektrolyt bzw. Gase dem Feuer immer wieder neue Nahrung geben. **Die Gefahr des Übertritts des Brandes auf benachbarte Materialien ist daher als höher einzuschätzen als bei konventionellen Fahrzeugen. Dies gilt insbesondere für die Transportsituation auf einem Fährschiff.**

Gemäß der Untersuchungen in Abschnitt 3.2 ergibt sich, dass für Brände von Li-Ionen-Batterien keine höheren Wärmefreisetzungsraten und auch keine höheren Temperaturen als bei Bränden von konventionellen Fahrzeugen zu erwarten sind.

b) (noch) unzureichende Löschmittel

Derzeit gilt Wasser als das beste Löschmittel für Elektrofahrzeuge – die bessere Bezeichnung wäre in diesem Fall wohl Kühlmittel. Andere Löschmittel werden derzeit untersucht. An Bord von Schiffen ist das Löschmittel Wasser aber anders zu bewerten als an Land: ein zu massiver oder falscher Eintrag von Löschwasser kann die Schiffsstabilität negativ beeinflussen. Zudem wird an Bord in der Regel Seewasser als Löschwasser verwendet. Je nach Salzgehalt kann hier eine hohe Leitfähigkeit erwartet werden, welche die gefährlichen Prozesse in einer beschädigten Autobatterie zusätzlich beschleunigen kann. Für den betrachteten Raum des Projektes ALBERO (Ostsee) sollte dieser Effekt gegenüber dem zu erzielenden Kühleffekt jedoch vernachlässigbar sein. Die derzeit auf Fahrzeugdecks von RORO-Fähren installierten Wassersprühlöschanlagen sind auch für konventionelle Fahrzeuge nur darauf ausgelegt, einen Brand so einzudämmen, dass er sich nicht auf andere Fahrzeuge ausweiten kann, und nicht darauf, den Brand zu löschen. Nach allem, was bisher über Brände von Elektrofahrzeugen bekannt ist, ist davon auszugehen, dass diese Auslegung nicht reicht, um die Brandausbreitung eines Elektrofahrzeuges einzudämmen. Zumal der für die Sprinklertests vorgeschriebene Abstand von 60 cm bis zu einem benachbarten Objekt an Bord unter Realbedingungen nicht eingehalten wird.

An Land lässt man gasbetriebene Fahrzeuge in der Regel ausbrennen, sofern es nicht möglich ist, das austretende Gas zu stoppen. Die Möglichkeit des Eindämmens eines Gasbrandes mit einer derzeit an Bord installierten Wassersprühflutanlage ist geringer einzuschätzen als für konventionelle Fahrzeuge. Im Prinzip muss davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug zumindest so lange brennt, wie noch Gas freigesetzt wird. Für ein einmal brennendes Gasfahrzeug ist die Gefahr der Brandausbreitung daher als hoch einzuschätzen, auch, weil Fahrzeuge in der Nähe nicht schnell entfernt werden können. Bei einem bereits brennenden Gas besteht jedoch keine Explosionsgefahr mehr.

c) Freisetzung von Gasen

Zur Freisetzung von Gasen aus Li-Ionen-Akkus gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen (siehe Abschnitt 2.3). Die hier zu erwartenden Gase können auch in niedrigen Konzentrationen sehr ätzend oder hochgiftig sein. Bei einem Brand sind weitere hochgiftige Gase (Fluorwasserstoff HF) zu erwarten, die mit Löschwasser zu ätzenden Verbindungen reagieren können. Dies sind Gase, die nicht in sonst üblichen Brandgasen auftreten. Entsprechend können Atemschutzmasken oder normale Feuerwehrbekleidung angegriffen werden. Crew-Mitglieder, die in den Brandbekämpfungstrupp eingesetzt werden, müssen für einen solchen Brandfall ggf. mit spezieller Schutzausrüstung ausgestattet werden. Welche Art von Schutzkleidung hier tatsächlich praktikabel ist, ist derzeit noch nicht abschließend erforscht und festgelegt.

Die Freisetzung von Gasen aus gasbetriebenen Autos bedeutet auf einem geschlossenen oder halbgeschlossenen Fahrzeugdeck vor allem eine deutliche Brand- und Explosionsgefahr, dies gilt insbesondere für LPG-Fahrzeuge, da die untere Explosionsgrenze für Propan mit 1,7 Vol % relativ niedrig ist, d.h. bereits bei Freisetzen kleiner Mengen entsteht ein explosives Gas-Gemisch. Eine Gesundheitsgefahr durch akute Vergiftung ist dagegen als gering einzuschätzen, da Propan bzw. Methan keine sehr giftigen Gase sind. Die hauptsächliche Gesundheitsgefahr besteht hier in der lokalen Verdrängung des Sauerstoffes durch das freiwerdende Gas.

d) Freisetzung von Schadstoffen

Brandversuche mit Fahrzeugakkus in einem Tunnel [38] zeigten, dass bei einem Brand von Batterien größere Mengen von Schwermetallen mit den Brandaerosolen freigesetzt werden und sich in der näheren Umgebung ablagern. Insbesondere für Kobalt, Lithium und Mangan wurden dabei Werte gemessen, die deutlich über dem IGHL-Wert liegen (immediately dangerous to life or health, IDLH). Für Mangan fand man einen 2,2 mal höheren Wert, für Cobalt 55-mal höher und für Li sogar 600 fach höher. Auch andere Publikationen weisen auf die Freisetzung von Schwermetallen bei einem Brand von Elektrofahrzeugen hin [66]. Dies ist ein deutlicher Unterschied im Vergleich zu konventionellen Bränden und Gasbränden!

Fazit:

In Beachtung der oben aufgeführten Aspekte lassen sich die Auswirkungen von Unfällen von abf wie folgt zusammenfassen:

	Auswirkungen auf das Schiff im Vergleich zu Bränden konventioneller Fahrzeuge	Auswirkungen auf Passagiere / Personal	Auswirkungen auf Personal (Einsatzkräfte)
Brand eines Elektrofahrzeuges	Brandgefahr insgesamt nicht höher, Gefahr der Brandausbreitung jedoch höher, da Brand schwieriger zu löschen Herausschleudern von einzelnen Zellen möglich Sprühflutanlagen für eine Eindämmung nicht ausreichend Erreichte maximale Temperaturen nicht höher, aber gesamte Wärmefreisetzung höher, da längerer Brand, massiver Einsatz von Löschwasser notwendig Daher: Größere zu erwartende Schäden, schnellere Brandausbreitung, Probleme mit Stabilität durch Löschwasser möglich, Löschwasser kann korrosiv auf Schiffskonstruktion wirken	Höhere Gefahr für Leib und Leben, da schnellere Brandausbreitung, Kontamination durch freigesetzte Schwermetalle, giftige organische und anorganische Verbindungen	Annäherung für Löscharbeiten schwieriger, da Herausschleudern von einzelnen Zellen möglich Freisetzung ätzender, sehr giftiger Gase (Fluor- und Phosphorverbindungen) Freisetzung giftiger Aerosole (Schwermetalle) Übliche Schutzkleidung möglicherweise nicht ausreichend! Kontamination von Schutzkleidung mit Schwermetallverbindungen
Brand eines gasbetriebenen Fahrzeuges	Brandgefahr insgesamt nicht höher, Gefahr der Brandausbreitung ist jedoch höher, da Brand kaum zu löschen, Lange Stichflammen möglich Sprühflutanlagen für eine Eindämmung nicht ausreichend Erreichte maximale Temperaturen nicht höher Daher: Größere zu erwartende Schäden, schnellere Brandausbreitung	Höhere Gefahr für Leib und Leben, da schnellere Brandausbreitung	Annäherung für Löscharbeiten schwieriger, da lange Stichflammen möglich

Freisetzen von Gasen aus einer defekten Traktionsbatterie	Mengen gleichzeitig freigesetzter Gase relativ gering, da Zellen nacheinander aufplatzen Explosions- und Brandgefahr, falls Zündquellen in der Nähe	Zu erwartende Gase teilweise so toxisch, dass in unmittelbarer Nähe Gesundheitsgefahr bestehen kann! Explosionsgefahr
Freisetzen von Gasen aus LPG-Fahrzeug	Relativ große Mengen werden schnell freigesetzt, Explosions- und Brandgefahr, falls Zündquellen in der Nähe	Propan/Butan-Gasgemisch wirkt in sehr hohen Konzentrationen narkotisierend bis erstickend, das Einatmen solcher hohen Konzentrationen ist relativ unwahrscheinlich, auch bei einem Abblasen des Tankes. Hauptgefahr für Personen: plötzliche Entzündung oder Explosion
Freisetzen von Gasen aus LNG-Fahrzeug	Gasmengen werden über längeren Zeitraum freigesetzt, da LNG erst nach und nach verdampft Explosions- und Brandgefahr, falls Zündquellen in der Nähe	Methan wirkt in sehr hohen Konzentrationen erstickend, das Einatmen solcher hohen Konzentrationen ist relativ unwahrscheinlich, auch bei einem Abblasen des Tankes. Hauptgefahr für Personen: plötzliche Entzündung oder Explosion

Tabelle 15: Auswirkungen eines abF- Brandes auf das Schiff bzw. die Passagiere bzw. die Einsatzkräfte

4. AP 3 - Boarding-Konzept

Im Verlauf der Bearbeitung des Projektes zeigten sich drei Möglichkeiten für ein Stellplatzkonzept.

Variante 1 - Festlegung definierter Stellplätze

Bei diesem Konzept werden auf jedem Schiff die für die einzelnen Antriebsarten am besten geeigneten Stellplätze ganz genau ausgewiesen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Festlegung solcher konkreten Stellplätze von mehreren Faktoren abhängt, u.a.:

- konkreter Schiffsaufbau (Anzahl geschlossene, halboffene Decks, Umfang offener Decksbereiche)
- jeweils konkretes Verkehrsaufkommen, z.B. Gefahrguttransporte,
- Größe der abF und damit der beanspruchte Platz (PKW, LKW, Reisebus,...).

Die Formulierung **allgemeiner** Anforderungen an Stellplätze, die generell gelten, ist daher nur sehr grob möglich, da die Schiffe sehr verschieden sind und die Fahrzeugsituation sich mit jeder Abfahrt verändert. So sollten

- Elektrofahrzeuge möglichst auf einem Deck oberhalb der Wasserlinie stehen, um im Falle eines Brandes den Ablauf des vielen Löschwassers zu ermöglichen und die Schiffsstabilität nicht zu gefährden
- Elektrofahrzeuge möglichst einen größeren Abstand zu anderen Fahrzeugen haben (min. 60 cm, basierend auf den Testvorschriften für Sprinkleranlagen) und in solchen Bereichen stehen, wo sie möglichst nicht von allen Seiten von anderen Fahrzeugen umgeben sind
- Gasbetriebene Fahrzeuge möglichst auf einem offenen Decksbereich oder auf einem halboffenen Deck stehen. Hier können allerdings Konkurrenz- oder Gefahrensituationen durch Gefahrguttransporte auftreten, die ebenfalls nur auf solchen Bereichen transportiert werden dürfen.

Ein daraus abgeleitetes Stellplatzkonzept ist in Abbildung 30 dargestellt.

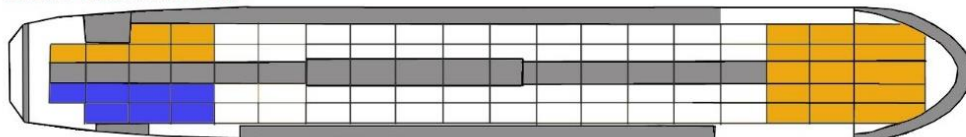
Vorteile:

- Die konkret ausgewiesenen Stellplätze können spezifisch mit Detektions-, Sicherheits- und Löschtechnik für die jeweiligen Antriebsarten ausgerüstet werden. Durch die Festlegung auf kleine Bereiche sind die Kosten dafür überschaubar. Die Wahrscheinlichkeit einer frühzeitigen Detektion einer Gefahrensituation und der Einsatz der geeignetsten Maßnahmen ist relativ hoch.
- Mit der gegenwärtig verfügbaren Technik am schnellsten umsetzbar.

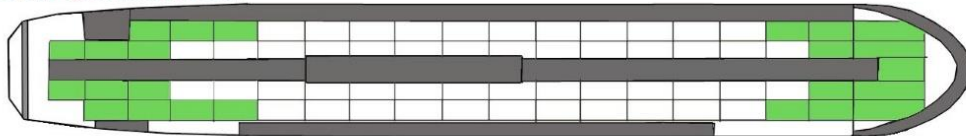
Nachteile:

- Es ist eine Vorsortierung oder Kennzeichnung im Hafensbereich notwendig, um die Fahrzeuge bei der Auffahrt auf die Fähre auf die jeweiligen Stellplätze zu leiten.
- Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der vorhandenen ausgewiesenen Stellplätze nur in den seltensten Fällen genau mit dem Fahrzeugaufkommen der jeweiligen Antriebsart übereinstimmt. So hat man z.B. drei Stellplätze für Elektrofahrzeuge festgelegt, es wollen aber 6 mitfahren. Oder es kommt kein Elektrofahrzeug, dann würde man diese drei Stellplätze dennoch nicht leer lassen wollen und andere Fahrzeuge dort platzieren. Die Schiffsführung kann also nicht grundsätzlich davon ausgehen, dass die ausgezeichneten Stellplätze tatsächlich mit den richtigen Autos belegt sind und sie kann auch nicht davon ausgehen, dass außerhalb dieser Stellplätze keine Autos der jeweiligen Antriebsart transportiert werden.

DECK 3 - halboffenes Deck



DECK 2 geschlossenes Deck



DECK 1 - unter der Wasserlinie

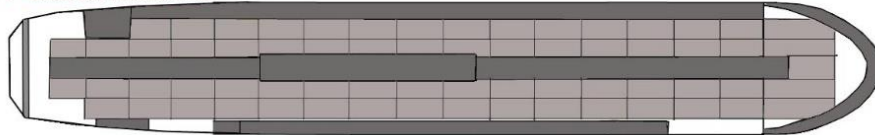


Abbildung 29: Stellplatzkonzept gemäß den genannten Grundprämissen, gelb – gasbetriebene Fahrzeuge, blau Wasserstofffahrzeuge, grün: Elektrofahrzeuge, grau: konventionelle Fahrzeuge

Variante 2 - Festlegung definierter Bereiche

Bei diesem Konzept werden nur grobe Bereiche festgelegt, wo welche Antriebsarten transportiert werden. Auch diese Bereiche sind schiffsspezifisch zu ermitteln. So wird z.B. festgelegt, dass gasbetriebene Autos alle auf das halboffene Deck fahren, ohne konkretere Festlegungen zum Standort auf diesem Deck zu treffen. Ansonsten sollten die unter bereits definierten allgemeinen Anforderungen berücksichtigt werden.

Vorteile:

- Die ausgezeichneten Bereiche können mit angepasster Detektions-, Sicherheits- und Brandbekämpfungstechnik ausgerüstet werden.

- Mit der gegenwärtig verfügbaren Technik umsetzbar.
- Die Schiffsführung wüsste bei einer Havarie genau, dass z.B. bei einem Brand auf dem halboffenen Deck auch mit gasbetriebenen Fahrzeugen zu rechnen ist, bei einem Brand auf dem geschlossenen Fahrzeugdeck aber garantiert keine Gasfahrzeuge dabei sind, da alle Gasfahrzeuge immer auf das halboffene Deck geleitet werden.

Nachteile:

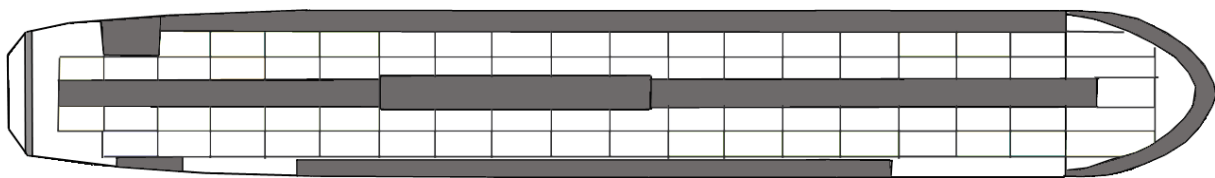
- Es ist eine Vorsortierung bzw. Kennzeichnung im Hafbereich notwendig, um die Fahrzeuge bei der Auffahrt auf die Fähre in die jeweiligen Bereiche zu leiten.
- Die Entwicklung und Installation einer funktionierenden Detektions- und Brandbekämpfungstechnik ist schwieriger, da neben den Fahrzeugen der jeweiligen Antriebsart auch andere (konventionelle) Fahrzeuge vorhanden sein können. Die Detektions- und Brandbekämpfungstechnik muss zudem einen größeren Bereich abdecken, dies kann einerseits bedeuten, dass mehr Sensorik eingebaut werden muss (erhöhter Kostenfaktor) und andererseits, dass die Genauigkeit der Alarmierung bzw. Gefahrenbekämpfung nachlässt, da zu viele Störgrößen auftreten.

Variante 3 - Flexibler Stellplatz mit Echtzeit-Standortanzeige

Dieses Konzept geht davon aus, dass erst bei der Auffahrt oder beim Positionieren an Bord festgestellt wird, welche Antriebsart das Fahrzeug hat. Dies kann erfolgen durch:

- eine schnelle Erkennung durch den Einweiser, wenn man sich z.B. in naher Zukunft auf eine deutliche und schnell erkennbare Kennzeichnung von abF einigt (z.B. farbige Nummernschilder)
- ein Scannen von Nummernschildern und zeitnahe Kennzeichenabfrage beim Kraftfahrtbundesamt
- ein Scannen des Fahrzeuges mit verschiedener Sensorik und Kamertechnik – eine intelligente (Bildauswertungs)software erkennt den Fahrzeugtyp und damit auch die Antriebsart

Mit Hilfe einer Software wird abfahrtsaktuell die Verteilung der Autos auf den Fahrzeugdecks (z.B. durch verschiedene Farben für die verschiedenen Antriebsarten) schnell in Nahe-Echtzeit dargestellt (siehe Abbildung 30).



DECK 3

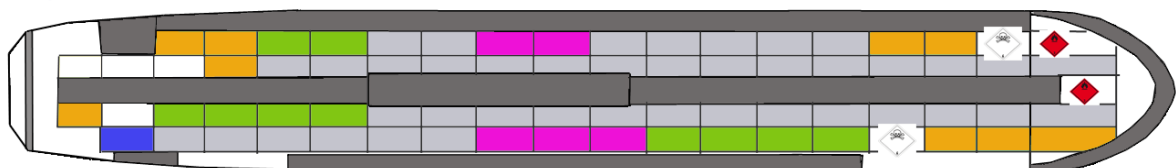


Abbildung 30: Darstellung des abfahrtsaktuellen Beladungsstatus beispielhaft für ein Deck, Oben: Tablet-Bild (und Brückenanzeige) vor dem Beladen, Unten: Tablet-Bild (und Brückenanzeige) nach dem Beladen (grau: konventionell, gelb Gas, grün Elektro, blau Wasserstoff, pink Kühllaster sowie Gefahrgut)

Je nach oben beschriebener Erkennungsvariante wird dieses Beladungsbild durch den / die Einweiser während der Beladung erstellt (z.B. durch „Farbauskippen per Fingertip“ auf einem Tablet) oder das Bild erstellt sich selbst durch eine Schnittstelle mit der Scantechnik / Erkennungssensorik).

Bei dieser Stellplatzvariante müssen die Detektionssysteme entweder überall installiert sein oder mobil sein und sich ggf. je nach Beladungsbild, selbstständig zum jeweiligen Fahrzeugtyp hinbewegen:

- Alle Stellplätze werden durch (viele) fest installierte Gas/Temperatur/.../sensoren überwacht, ggf. kennen die Sensoren das Beladungsbild und reagieren entsprechend spezifisch darauf.
- Es gibt verschiedene Sensorarrays an Bord, die für jeweils einen Autotyp besonders geeignet sind. Je nach Beladungsbild bringen sich diese Sensoren an die geeignetste Position (fahren z.B. entlang einer Schiene).
- Eine fahrbare Drohne fährt die Autospuren ab. Sie kennt ggf. das Beladungsbild und weiß daher, welche Zustände für den jeweiligen Autotyp auf dem Stellplatz normal oder unnormale sind (z.B. Unterboden-Thermografiebilder). Dies würde eventuell Fehlalarme minimieren.

In jedem Fall können die Sensoren ortsauflösend Alarm geben. Durch die Kopplung mit dem Beladungsbild ist jeder Alarm sofort spezifiziert als Gasalarm, Gefahrgutalarm, Elektroautoalarm. Es muss entsprechend eine Schnittstelle zwischen Sensorik und Stellplatzverteilung vorhanden sein. Auch die Gefahrenabwehrsysteme / Brandlöschsysteme sind bei diesem Konzept mobil, z.B. Einsatz mobiler Trennwände oder nichtbrennbare Planen auf den Fahrzeugdecks, mit denen (Elektro)autos abgetrennt / abgedeckt werden können.

Einsatz mobiler Wassersprüh-Vorrichtungen an Bord, die unter (Elektro)autos geschoben werden können, so dass das Fahrzeug auch von unten mit Wasser besprüht wird.

Vorteile:

keine Vorsortierung notwendig

Beladung schnell und nach Bedarf. Alle Autos können hingestellt werden, wo es gerade am besten passt. Man weiß trotzdem bei jeder Abfahrt genau, wo gerade welcher Autotyp steht. Auch bei einer Alarmierung besteht sofort Übersicht über die Gesamtsituation.

Es werden alle Autos überwacht, idealerweise spezifisch hinsichtlich der jeweils von ihnen ausgehenden Gefahren.

Nachteile:

- Schnelle Erkennung des ungekennzeichneten Fahrzeugtyps bisher technisch noch nicht umgesetzt
- EU-weite Einigung auf schnell sichtbare Kennzeichnung nicht so schnell zu erwarten
- Kennzeichenabfrage: ggf. Probleme mit dem Datenschutz
- Mobile Sensorik ist anfällig für Ausfälle
- Mobile Sensorik müsste ggf. selbst einen Li-Ionen-Akku enthalten (z.B. fahrbare Drohne) und birgt damit eine Eigengefahr

In Abwägung der dargestellten Vor- und Nachteile scheint die Umsetzung von Variante 2 am sinnvollsten.

5. AP 4 – Der sichere Transport

5.1 Analyse derzeitiger gesetzlicher Vorschriften für RORO-Fahrzeugdecks

Es wurde eine umfangreiche Untersuchung zu den derzeit an Bord von RORO-Fährschiffen geltenden Vorschriften hinsichtlich der zu treffenden Brandschutz- und Sicherheitseinrichtungen durchgeführt. Die Analyse enthält eine genaue Aufstellung der Forderungen hinsichtlich des baulichen Brandschutzes (Brandabschnitte, Fluchtwege) sowie des abwehrenden Brandschutzes (Brandmeldeanlagen, Löschsysteme, Ventilationssysteme, Entrauchung,...) mit den dazu gehörigen Zitierstellen aus den jeweiligen Gesetzeskapiteln des SOLAS-Übereinkommens. Das vollständige Dokument ist im digitalen Anhang zu diesem Bericht zu finden.

5.2 Analyse von Löschmitteln und Löschsystemen für Brände von Li-Ionen-Batterien

Es wurde eine umfassende Recherche zu derzeitigen Empfehlungen und Entwicklungen für die Bekämpfung von Li-Ionen-Batterie-Bränden durchgeführt. Die Analyse bezog sich dabei einerseits auf Löschmittel und andererseits auf Löschsysteme, also technische Anlagen, die für den Einsatz von Löschmitteln zum Einsatz kommen können.

Allgemeine Löschmittel

Unter allgemeinen Löschmitteln werden Löschmittel verstanden, die für die verschiedensten Brandlasten zum Einsatz kommen können, also nicht nur für Li-Ionen Brände. In Verbindung mit ihrem jeweiligen Löscheffekt kann man dabei unterscheiden:

Löschmittel	Löscheffekt
Wasser (in verschiedenen Sprühstufen, d.h. als Vollstrahl, Sprühstrahl)	Kühlung
Hochdruckwassernebel	Kühlung, Inertisierung
Wasser mit Zusätzen (z.B. F500)	Kühlung, Trennung durch Einkapseln
Schaum (Schwerschaum, Leichtschaum)	Trennung durch Abdecken
Inerte Löschgase (Kohlendioxid, Stickstoff, ARGONIT,...)	Inertisierung
Fluorierte Löschgase (NOVEC 1230, FM 200)	Chemische Unterbrechung der Verbrennungsreaktion
Aerosol (Kaliumhydrogencarbonat)	Chemische Unterbrechung der Verbrennungsreaktion
Sand	Trennung durch Abdecken

Tabelle 17: allgemeine Löschmittel und ihre Löscheffekte

Inzwischen wurden all diese Löschmittel hinsichtlich Ihrer Eignung für die Löschung von Li-Ionen-Batterien getestet [10], [23]; [67], [68]. Im Allgemeinen gilt der Konsens, dass einmal in den thermal runaway gegangene Zellen nicht mehr aufzuhalten sind. Es kann jedoch verhindert werden, dass die Reaktion auf weitere Zellen übergreift, indem man die offenen Flammen der Ausgangszellen löscht. Dazu scheint Wasser mit dem Kühleffekt gut geeignet. Zudem ist es relativ einfach und in großen Mengen beschaffbar. Daher gilt es bis jetzt als „Mittel der Wahl“. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass auch die anderen Löschmittel einen Li-Ionen-Batterie-Brand gut eindämmen können, immer mit Vor- und Nachteilen für die jeweilige Umgebungssituation [69]. Das Löschen mit Wasser wird z.B. in geschlossenen Räumen teilweise als ausdrücklich kritisch angesehen, weil sich bei der Reaktion von

Batteriebestandteilen mit Wasser Wasserstoff bilden kann und dadurch eine Explosionsgefahr besteht [70]. Löschen mit Wasser birgt zudem das Problem des Auffangens und der Entsorgung des kontaminierten Löschwassers [71].

Löschmittel speziell für Li-Ionen-Brände

Aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Li-Metall- und Li-Ionen-Batterien und des speziellen Brandverlaufes solcher Batterien wurde in den letzten Jahren versucht, möglichst spezifisch auf diese Brandlast ausgerichtete Löschmittel zu entwickeln.

Blähglasgranulat

Einige Hersteller bieten ein Löschmittel an, das aus kleinen Glasschaumkügelchen besteht. Sie werden z.B. unter dem Namen Pyrobubbles oder Extover vertrieben [72], [73]. Die Löschwirkung beruht auf einem Trenneffekt, der sich ergibt, wenn die Glaskügelchen auf die brennende Batterie auftreffen und dann dort aufschmelzen und so eine Isolationsschicht bilden. Hauptnachteil an diesem System ist die schwierige Anwendung in einem Löschesystem. Für die Absicherung größerer Bereiche müsste eine große Menge (Volumen, Gewicht!) entsprechend vorgehalten werden. Weiterer Nachteil ist, dass ein nicht unerheblicher Teil des Granulates bei Aufbringen in nicht eingegrenzten Bereichen einfach wegrollt und daher nicht am Brandherd wirken kann. Ein Vorteil ist, dass kaum Schäden durch das Löschmittel entstehen. Gute Ergebnisse erzielt man mit diesen Stoffen jedoch im baulichen Brandschutz – Wände können gleich mit diesem Stoff ausgefüllt werden - und für Transportsysteme von Li-Ionen-Batterien. Im Falle eines Brandes von Li-Ionen-batterien bietet eine solche Verpackung einen guten Schutz vor Brandausbreitung.

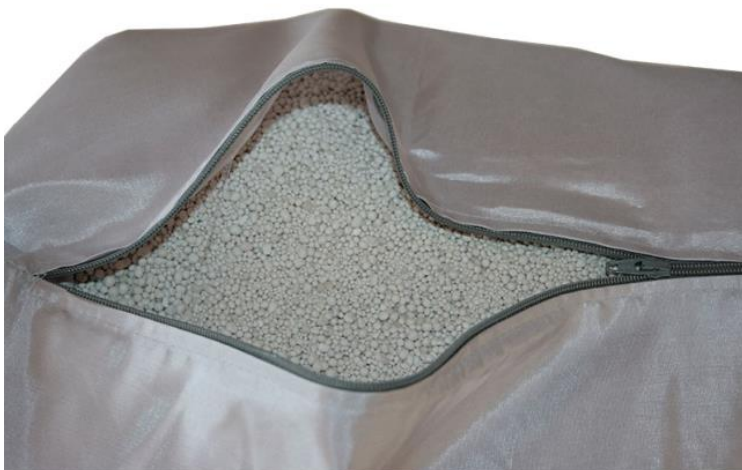


Abbildung 32: „Lithium-Brandschutzkissen“ gefüllt mit Blähglaskügelchen

Quelle: <https://brandschutzcenter.expert/shop/product/lithium-brandschutzkissen-2-kg/>

AVD - Dispergiertes Vermiculit

Diese Löschmittel werden unter dem Namen Aqua Vermiculit Disperion (AVD) zusammengefasst. Vermiculit ist ein in der Natur vorkommendes Schichtsilikat. Durch den hohen Anteil an Siliziumoxiden ist es chemisch gesehen relativ ähnlich wie Glas. Das Mineral wird in feinste Teilchen zerteilt und in möglichst geringen Mengen in Wasser dispergiert. So kann es als Fluid mit Hilfe eines Feuerlöschers auf die brennende Li-Ionen-Batterie aufgebracht werden. Dort verdampft das Wasser und die

verbleibende Vermiculit-Kruste sorgt für einen Trenneffekt zwischen der beschädigten Batterie und der Umgebung. Die Vor- und Nachteile sowie die Einsatzbereiche ähneln denen von Glasgranulat. Ein hinzukommender Nachteil ist das relativ seltene Vorkommen von Vermiculit [74].

Löschgel

Auf die Bildung einer möglichst dicht schließenden luftundurchlässigen Trennschicht auf der brennenden Li-Ionen-Batterie setzen auch Löschgele, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Sie haben gegenüber dem Granulat den Vorteil, dass ein schnelles Anhaften des Löschmittels auf dem Brandherd besser gegeben ist. Löschgele gibt es entweder fertig zubereitet in Feuerlöschern [75] oder als Zumischung für den Wasserstrahl, ähnlich einem Schaummittel [76]. Die Nutzung in Löschsystemen zur Absicherung von größeren Räumen scheint derzeit noch nicht umgesetzt worden zu sein. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Einsatz auf Schiffen muss jedoch angemerkt werden, dass die Gelbildung bei Einsatz der Zumischung unter Verwendung von salzhaltigem Meerwasser eingeschränkt ist [77].

Löschsysteme, (Angriff von außen)

Mit Löschsystemen sind technische Anlagen oder Vorrichtungen gemeint, die genutzt werden, um das Löschmittel anzuwenden. Innerhalb des Projektes ALBERO wurden nur solche betrachtet, die speziell für das Löschen von Elektrofahrzeugen entwickelt wurden.

Unterbodenkühlung

Wassersprühsysteme z.B. Sprinkler auf Fahrzeugdecks oder auch in Parkhäusern, bringen das Wasser nur von oben auf ein brennendes Fahrzeug. Bei Elektrofahrzeugen mit den im Unterboden verbauten Batterien, wäre eine Kühlung von unten jedoch vermutlich effektiver. Zu diesem Zweck wurden in der letzten Zeit verschiedenste Hilfsmittel entwickelt, um Wasser möglichst von unten an das Fahrzeug heranzubringen. Auch im Projekt ALBERO wurde durch den Partner FKFS ein solches „Boundary Cooling Device“ als Prototyp umgesetzt und in ersten Versuchen getestet [78].

Löschcontainer

Eine besondere Gefahr bei Bränden von Elektrofahrzeugen ist die Rückzündung, oft noch Stunden nach der scheinbaren Löschung des Brandes. Ein mögliches Mittel für eine umfassende Kühlung und die Verhinderung des Rückzündens ist die Aufnahme des gesamten Fahrzeuges in einem Container und dessen anschließende Flutung mit Wasser. Auch außerhalb von Deutschland hat sich dieses Verfahren bereits etabliert [79]. Die Firma Ellermann hat eigens zu diesem Zweck einen speziellen Abrollcontainer, die so genannte Red Boxx [80], entwickelt. Mit Hilfe einer Winde wird das havarierte Fahrzeug in den Container gezogen, dann verschlossen und geflutet.



Abbildung 33: Red-Boxx

Quelle:

https://www.empl.at/fileadmin/user_upload/Website/PDF_Downloads/FW/Werkfeuerwehren/Abrollbehälter-Red-Boxx.pdf

Das System ist nur für Unfälle im offenen Gelände geeignet, da ein Umgang mit dem großen Rollcontainer auf dem Fahrzeugdeck oder in einem Parkhaus nicht praktikabel ist. Ein großer Nachteil ist auch die Notwendigkeit des nahen Herantretens an das havarierte Fahrzeug, um die Seilwinde oder einen Kranhaken zu befestigen, um das Auto in den Container zu ziehen oder zu heben. Aus diesem Grund wurde im Projekt ALBERO die Idee entwickelt, nicht das Auto in den Container zu bringen, sondern den Container über das Fahrzeug zu fahren:

Beweglicher Kasten ohne Boden und Stirnseiten (können ggf. aber klappbar dran sein) aus feuerfestem Material, aber möglichst leicht, kann z.B. auf eingelassenen Rollspuren bewegt werden

Bei Rauchentwicklung oder Brand wird Kasten über havariertes Fahrzeug gefahren, ist außen mit Anschluss für Schlauch versehen, innen drin rundum mit Sprühdüsen ausgerüstet, nach Wasseranschluss intensives Besprühen von oben und den Seiten möglich, idealerweise nun auch Möglichkeit des Schließens der Stirnseiten

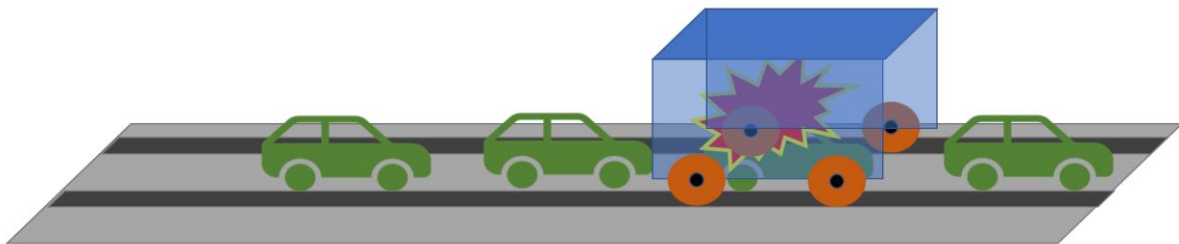


Abbildung 34: ALBERO-Idee: fahrbarer Rollcontainer zur Abtrennung und Kühlung von brennenden Elektrofahrzeugen

E-Löschlanze

Fahrzeugbatterien sind aus mehreren Modulen aufgebaut, die wiederum in ein stabiles Gehäuse integriert sind, damit die Batterie nicht beschädigt werden kann. Kühl- oder Löschmittel können daher nicht direkt an den Batteriezellen angreifen, was den Kühl- bzw. Löscheffekt verringert. Wissenschaftliche Experimente haben gezeigt, dass ein Wasserangriff direkt in der Batterieumhausung zu deutlich schnelleren Erfolgen führt [81]. Es ist daher grundsätzlich ein guter Ansatz, mit Hilfe eines Löschsystems das Kühlwasser direkt in das Innere einer Fahrzeugbatterie einzubringen. Zu diesem Zweck wurden spezielle Löschlanzen entwickelt [82]. Die Düsen Spitze soll mit Hilfe eines Schlagwerkzeuges in die Batterie eingeschlagen werden, um dort direkt Wasser einzutragen.



Abbildung 35: E-Löschlanze

Quelle: <https://www.murer-feuerschutz.de/e-loeschlanze/>

Bei einigen Handlingsversuchen wurde jedoch festgestellt, dass durch dieses Einschlagen die Batterie erst recht beschädigt werden kann und so erst eine Zündung provoziert wird [34]. Von der Nutzung solcher Systeme mit direkter Annäherung von Personal an das Fahrzeug wird daher abgeraten [71]:

Ende 2021 brachte die Firma Rosenbauer ein System auf den Markt, das ein ferngesteuertes Einschlagen des Wassersprühkopfes in die Fahrzeugbatterie ermöglichen soll [83] und so Einsatzkräfte nicht gefährdet. Seither fanden in Deutschland erste Versuche mit dem System statt.

Brandbegrenzungsdecken

Für den Einsatz von Decken als Löschsystem im Zusammenhang mit Li-Ionen-Bränden kann derzeit nur von Brandbegrenzungsdecken und nicht von Löschdecken gesprochen werden, da zu erwarten ist, dass eine solche Decke den Brand ggf. eingrenzen, aber nicht löschen kann. Diese Decken haben den Vorteil, sehr flexibel und mobil einsetzbar zu sein. Zudem ist der niedrige Preis im Vergleich zu fest installierten Löschanlagen für viele Anwender sehr attraktiv. Bisher gibt es jedoch nur wenige Tests zur Effektivität von Brandbegrenzungsdecken bei der Bekämpfung von Elektrofahrzeugbränden. Erste Versuche zeigen, dass der Brand anscheinend gut eingegrenzt werden kann, bei Entfernung der Decke aber sofort eine Rückzündung eintritt [84], [85]. Brandbegrenzungsdecken haben den Nachteil, dass Einsatzkräfte relativ nah an das havarierte Fahrzeug herantreten müssen, um die Abdeckung vorzunehmen. Es gibt daher erste Ansätze, das Auto von vornherein in einer Art „Zelt“ zu parken und dieses Zelt im Havariefall zu schließen [86].



Abbildung 36: „Löschzelt“ für Elektroautos [86]

Es gibt auch Entwicklungen von Spezial-Decken, die bei Erhitzung inertisierende Gase freisetzen und so noch schneller einen Löscheffekt erzielen sollen. Das Problem ist hierbei jedoch, dass die Gase nur wirken können, wenn das Auto möglichst komplett und dicht eingepackt ist. Auch hier müssten Personen nah zur Abdeckung herantreten. Dieses System [87] wird daher vor allem zur Verhinderung von Rückzündungen empfohlen, also nach der Löschung des Erstbrandes.



Abbildung 37: Einhüllung für havarierte Elektrofahrzeuge

Quelle:

<https://www.gelkoh.de/2020/06/16/libarescue-das-innovative-bergesystem-fuer-e-fahrzeuge/>

Für den Einsatzfall „Fahrzeugdeck auf einer RORO-Fähre“ sind weitere Besonderheiten zu beachten: In der Regel ist die Parksituation auf dem Fährschiff sehr eng. Es muss untersucht werden, ob ein schnelles Aufbringen der Brandbegrenzungsdecke auch unter diesen Bedingungen möglich ist und ob sie auch dann eine Brandausbreitung verhindern kann. Zudem stellt sich die Frage, ob auf einem Stahl-Boden unter einer Löschdecke ggf. so hohe Temperaturen entstehen, dass die Festigkeit des Metalls beeinträchtigt wird bzw. ob der Effekt der Wärmeleitung durch das Metall in andere Bereiche an Bord durch die Decke verstärkt wird. Zur Klärung dieser Fragen wurden auch innerhalb des ALBERO-Projektes Real-Brandversuche mit Brandbegrenzungsdecken durchgeführt (siehe Abschnitt 5.3).

Löschsysteme (Angriff von innen)

Wie bereits aufgeführt, ist die Wirkung eines Kühl- bzw. Löschmittels dann besonders effektiv, wenn es direkt an den Batteriezellen angreifen kann. Vor diesem Hintergrund gibt es inzwischen

Entwicklungen, im Batteriegehäuse Kapseln mit Löschmittel (Gas, Pulver) zu installieren und diese im Falle einer Überhitzung im Batteriegehäuse auszulösen [88].

Ein anderer Ansatz ist ein von vornherein konstruktiv eingebauter „Einfüllstutzen“ für Wasser direkt in die Batterie [89] – ein Konzept, das von Autoherstellern bisher nicht ausreichend aufgegriffen wird.

5.3 Anpassung von Brandschutztechnik - Realversuche zur Wirkung von Brandbegrenzungsdecken in Kombination mit Wassersprühflutsystemen

Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden im März 2021 auf dem Gelände des DLR in Trauen mit Unterstützung des Institutes für angewandte Brandschutzforschung IFAB (Unterauftragnehmer) durchgeführt.

Für die Bewertung der Einsatzbarkeit von Brandbegrenzungsdecken für Brände von Elektrofahrzeugen in der speziellen Umgebung „Fahrzeugdeck“ ergaben sich im Projektverlauf folgende Fragestellungen:

1. Ist die Brandbegrenzungsdecke grundsätzlich in der Lage, den Brand eines Elektrofahrzeuges einzudämmen? Wird also die Schädigung auf benachbarte Fahrzeuge verringert?
2. Wie verhält sich die Brandbegrenzungsdecke in Kombination mit einer Wassersprühflutanlage?
3. Welche Temperaturen entstehen unter der Brandbegrenzungsdecke, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz auf einem Stahldeck?
4. Beeinflusst die Brandbegrenzungsdecke die Gefahr einer lokalen Explosion oder Durchzündung durch verstärkte Ansammlung unverbrannter Gase (unter der Decke)?
5. Beeinflusst die Brandbegrenzungsdecke die toxischen Gefahren für Personen und Einsatzkräfte durch Beförderung der Bildung von (unverbrannten) toxischen Gasen und Aerosolen?
6. (Wie lange) hält die Brandbegrenzungsdecke dicht?
7. Wie lange muss die Decke auf dem havarierten Fahrzeug bleiben, um eine Rückzündung mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen?
8. Welche besonderen Gefahren entstehen ggf. für Einsatzkräfte bei der Anwendung einer Brandbegrenzungsdecke?

Zudem Messungen von Wasserstoff während eines beginnenden thermal runaway durchgeführt werden, um zu klären, ob dies für eine möglichst frühzeitige Gefahrendetektion geeignet ist.

Versuchsaufbau / verwendete Materialien

Es wurde ein Messaufbau verwendet, der in verkleinertem Maßstab ein parkendes Elektrofahrzeug auf einem Fahrzeugdeck nachstellt (Abbildung 38). Als Brandlast wurde ein einzelnes **Batteriemodul** verwendet, bestehend aus 12 prismatischen Li-Ionen Zellen (Abbildung 39). Die Module wurden in guter Zusammenarbeit mit Opel und Stellantis zur Verfügung gestellt. Die Einzelzellen bestehen aus einer Graphit-Anode, einer Lithium-Nickel-Cobalt-Manganoxid-Kathode, organischen Elektrolytlösungsmitteln und LiPF₆ als Leitsalz. Jedes Modul war zu Versuchsbeginn mit ca. 25 V zu 100 % geladen. In einem Opel e-Corsa sind 18 solcher Module verbaut.

Da eine wichtige Fragestellung war, inwieweit unverbrannte oder toxische Gase unter der Decke entstehen, wurde über der Autobatterie, abgetrennt durch ein Stahlblech, das den Fahrzeugboden darstellen soll, eine Aluminiumwanne platziert, die einen für den Autobau typischen Kunststoff-**Materialmix** enthielt (Abbildung 40).

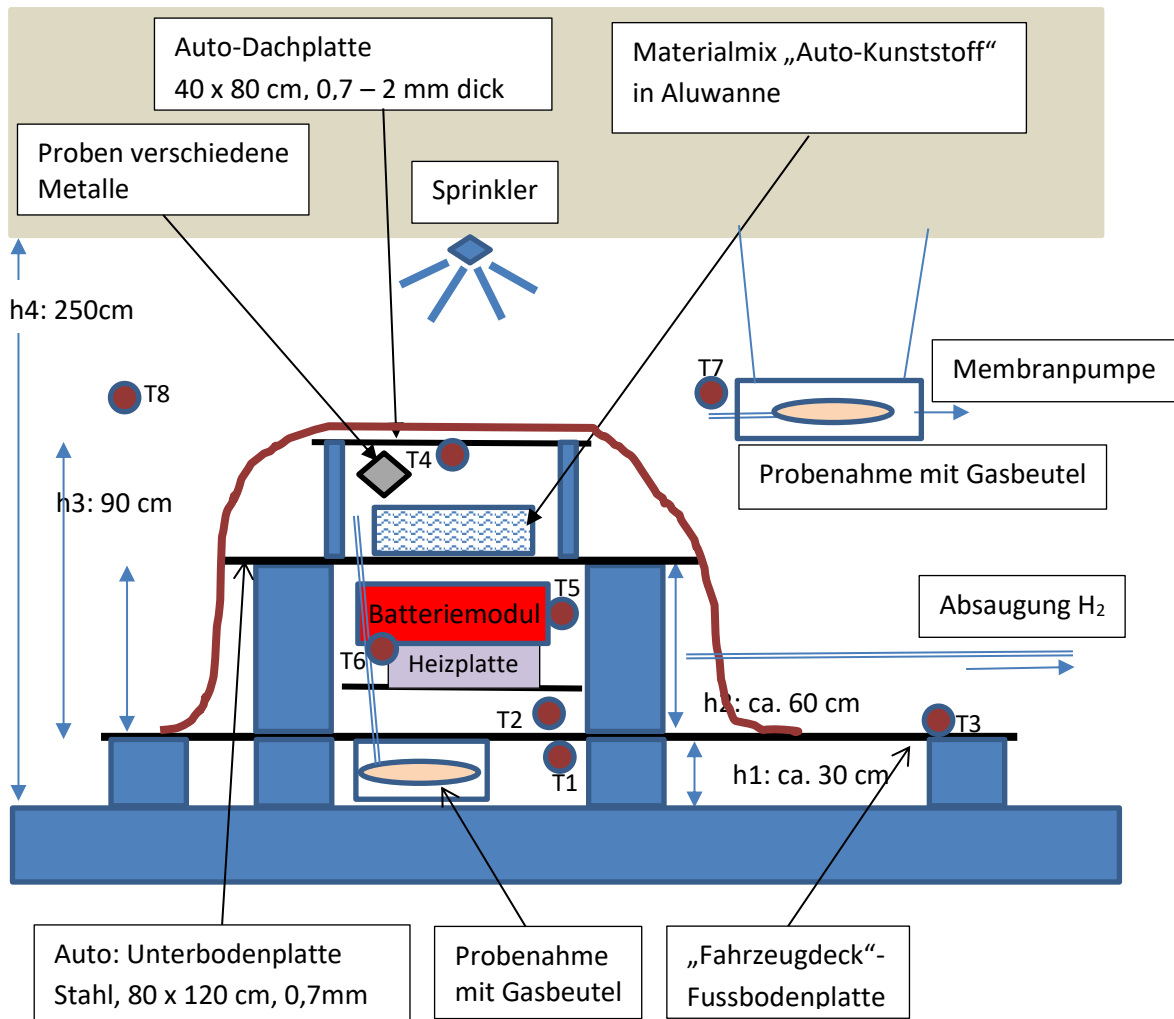


Abbildung 38: schematischer Versuchsaufbau, T- Temperaturmessstellen



Abbildung 39: Batteriemodul, bestehend aus 12 prismatischen Li-Ionen-Zellen



Abbildung 40: Aluminiumwanne mit Kunststoff-Materialmix

Für die Versuche wurden **Brandbegrenzungsdecken** zweier verschiedener Hersteller verwendet:

Typ A – Brandbegrenzungsdecke (Abbildung 41)

Typ B - Brandbegrenzungsdecke (Abbildung 42)



Abbildung 41: Typ A- Brandbegrenzungsdecke, vor dem Zerschneiden



Abbildung 42: Typ B- Brandbegrenzungsdecke

Die Brandbegrenzungsdecken haben original eine Größe von 6 x 8 m. Für die Versuche wurde eine Decke in jeweils 4 Teile zerschnitten, a 3 x 4 m. Pro Versuch wurde ein solches Teilstück eingesetzt. Die Initiierung eines thermal runaways wurde durch lokale Überhitzung des Batteriemoduls realisiert. Dafür wurde das Modul auf eine Heizplatte (1500W, 145 mm Durchmesser) gestellt. Die Heizplatte war mit einem Bimetall-Temperaturbegrenzer ausgerüstet (max. 450°C).

Die Temperaturmessungen wurden mit Thermoelementen Typ K an folgenden acht Messtellen durchgeführt:

- T1 – unter „Fahrzeugdeck“-Fussbodenplatte,
- T2 – über „Fahrzeugdeck“-Fussbodenplatte, unter Löschdecke
- T3 - über „Fahrzeugdeck“-Fussbodenplatte, außerhalb Löschdecke
- T4 – unter „Autodachplatte“
- T5 – außen an Batteriemodul
- T6 – an Heizplatte
- T7 – an Gasentnahmestelle im Raum
- T8 – Raumtemperatur in ca. 3 m Entfernung zum Versuchsaufbau (Versuche 1 – 4), über „Fahrzeugdeck“-Fussbodenplatte, unter Brandbegrenzungsdecke (Versuche 5 – 7)

Die **Probennahme für Gase, Aerosole und Partikel** (Konzept und Durchführung: Projektpartner GTE) erfolgte etwa auf Höhe der Aluwanne mit dem Fahrzeug-Materialmix. Bei Versuchen, bei denen die Löschdecke zum Einsatz kam, war diese Probeentnahmestelle unter der Brandbegrenzungsdecke. Eine weitere Probenahmestelle befand sich etwa 2 Meter entfernt vom Versuchsaufbau. Diese Probenahmestelle war bei Einsatz der Brandbegrenzungsdecke außerhalb der Abdeckung. Für die Gasentnahme wurden Gasprobenbeutel a 2,5l (Abbildung 43) mit einem Ansaugschlauch nach außen in ein Elektronik-Kleingehäuse aus Kunststoff platziert. Zum gewünschten Zeitpunkt der Probennahme wurde dieses Gehäuse mit Hilfe einer Mini-Membranpumpe unter Unterdruck gesetzt, wodurch sich der Beutel auseinanderzog und dabei Gase und Aerosole aus der Umgebung einsog (Abbildung 44).



Abbildung 43: Rechts- Gasprobenbeutel mit Sauganschluss, nach Befüllen kann der Beutel durch Umknicken des oberen „Zipfels“ dicht verschlossen werden, links- verwendete Heizplatten



Abbildung 44: Gasprobenbeutel im Kunststoffgehäuse, Bildmitte: Mini-Membranpumpe

Zur Bewertung der Auswirkung von korrosiven Gasen auf verschiedene Metalle bzw. zum Auffangen von Kondensaten und Ruß, wurden verschiedene **Metallproben** (ca. 10 x 10 cm) von Kupfer, Aluminium, Stahl und lackiertem Stahlblech an der oberen Stahlplatte des Versuchsaufbaus angebracht. Bei Versuchen, bei denen eine Löschdecke zum Einsatz kam, waren diese Proben unterhalb der Löschdecke.

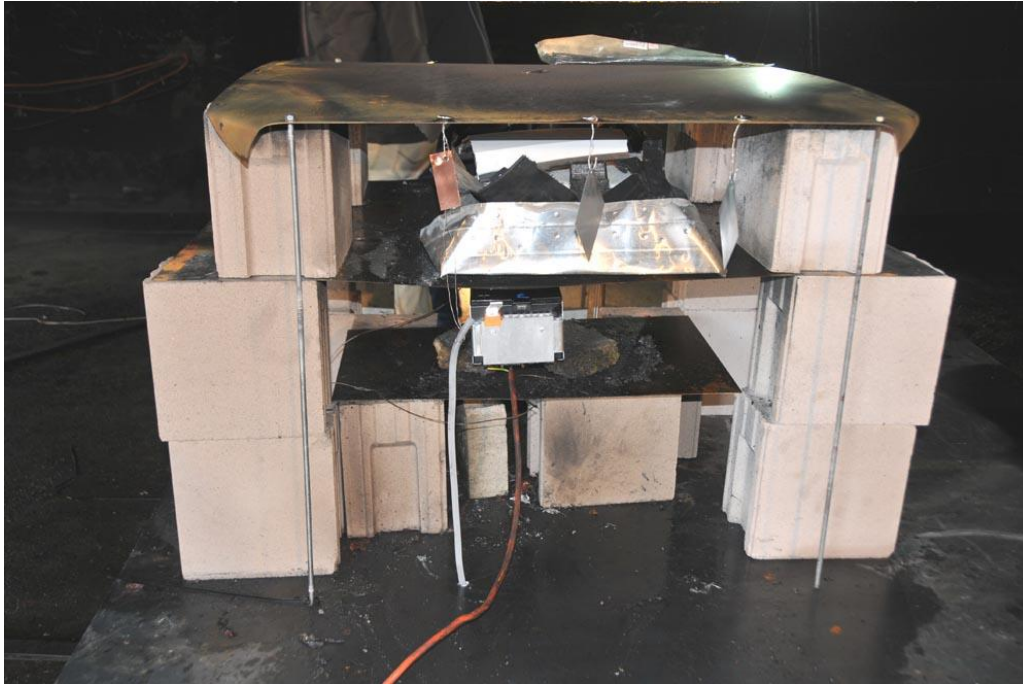


Abbildung 45: Versuchsaufbau Vorderansicht, Metallproben an oberer Stahlplatte angehängt, weißer Schlauch mittig: Ansaugstelle für Wasserstoffmessung

Der Einsatz einer **Sprinkleranlage** wurde durch eine Sprinklerdüse simuliert, die genau mittig über dem Versuchsaufbau angebracht war. Die Durchflussmenge betrug ca. 140 l / min.

Die Absaugung für die **Wasserstoffmessung** (Konzept und Durchführung: Projektpartner HBRS) erfolgte über ein Wagner Rauchansaugsystem. Die Verrohrung bestand im Inneren der Brandhalle aus Edelstahlrohr und außerhalb aus PVC-Rohr. Sie war ca. 10 m lang. Der Luftstrom wurde über einen Sensorknoten geleitet. Das war zum einen ein Metalloxid-Halbleiter Gassensor und zum anderen eine elektrochemische Zelle. Alle Komponenten waren in den für die On-board Installation vorgesehenen Alugehäusen verbaut (Abbildung 46).



Abbildung 46: Absaugung für die Wasserstoffmessung, Messaufbau

Versuchsdurchführung

Der prinzipielle Ablauf der Versuche wurde nach folgendem Schema durchgeführt:

- Nach Fertigstellung des Aufbaus wurde die Brandhalle verschlossen. Alle weiteren Beobachtungen des Brandversuches erfolgten von außerhalb mit Hilfe von Kamera- und Videotechnik.
- Die Heizplatte wurde von außerhalb an- und ausgeschaltet.
- Beim ersten Durchzünden ausgetretener Gase wurde die Heizplatte ausgeschaltet.
- Nach dem erkennbaren Aufplatzen / Explodieren zweier weiterer Zellen wurden die jeweiligen Aktionen durchgeführt (Einschalten Sprinkleranlage und / oder Auflegen Decke)
- Bei Versuchen mit Einsatz der Brandbegrenzungsdecke wurde die Decke an einer Seite des Versuchsaufbaus mit Schraubzwingen befestigt, um ein sicheres und reproduzierbares Auflegen zu ermöglichen. Die Decke wurde aufgefaltet auf einer Seite des Aufbaus zurechtgelegt (Bild 47).
- Zu sinnvoll erscheinenden Zeitpunkten wurden die Gasproben gezogen.
- Nach anscheinend vollständigem Abreagieren des Batteriemoduls wurde die Brandhalle unter Atemschutz betreten und das Modul mit einem Wasserstrahl abgelöscht und später in ein Wasserbad gelegt.
- Die Brandhalle wurde gründlich ventiliert.



Abbildung 47:
Vorbereitung der
Brandbegrenzungsdecke

Ergebnisse

Die detaillierten Versuchsprotokolle und weitere Fotos sowie Videos befinden sich im digitalen Anhang.

Versuch 1: offener Brand, ohne Sprinkler und ohne Brandbegrenzungsdecke

Beobachtungen:

- bei Aufplatzen der ersten Zelle Bildung einer „Dampflache“ auf der Stahlplatte unter dem Batteriemodul (Abbildung 48)
- starkes Wegsprühen von kleinen / größeren Teilchen während der Zellexplosionen (Abbildung 49)
- maximale Temperatur am „Autodach“: 855°C
- nach Ablöschen am Ende min. 2 Zellen scheinbar noch intakt/geschlossen
- Batterie-Modul in zwei Hälften zerfallen → in Folgeversuchen mit Draht umwickelt
- Materialmix-Auto fast vollständig verbrannt (Abbildung 50)



Abbildung 48:
„Dampflache“ nach
Aufplatzen der ersten
Zellen



Abbildung 49: Wegsprühen von Teilchen während der Zellexplosionen



Abbildung 50:

Versuch 1- Materialmix vollständig verbrannt, Aluwanne geschmolzen

Versuch 2: nur mit Sprinkler

Beobachtungen:

- Maximale Temperatur am „Autodach“: 311°C
- 3...4 Zellen scheinbar noch intakt/geschlossen
- Materialmix-Auto vollständig verbrannt / geschmolzen, Aluwanne aber noch relativ intakt (Abbildung 51)
- Batterie-Modul / Alurahmen durch Draht verstärkt → in einem Stück geblieben



Abbildung 51: Materialmix geschmolzen

Versuch 3: nur mit Brandbegrenzungsdecke (Typ A)

Beobachtungen:

- Nach Aufplatzen der ersten Zellen wieder „Gaslachenbildung“, auch direkt am Hallenboden
- 5 Minuten zwischen Beginn Gasfreisetzung und Durchzündung → starke Explosion
- immer wieder Explosionen unter der Decke → Halteschienen weggeschleudert (Abbildung 52)
- Gelegentlich brechen Rauchwolken unter Decke hervor, zünden meistens durch (Abbildung 53)
- Maximale Temperatur am „Autodach“: 217°C
- scheinbar alle Zellen durchgezündet
- kein Feuer mehr zu sehen nach Entfernen der Decke, keine Rückzündung
- Materialmix-Auto nur etwas angeschmolzen (Abbildung 54)
- Batterie-Modul / Alurahmen durch Draht verstärkt → in einem Stück geblieben
- Decke nach Versuch scheinbar unversehrt, Probe zur Analyse herausgeschnitten



Abbildung 52: Durchzündungen unter der Decke, Wegschleudern der Halteschienen



Abbildung 53: Entweichen von Rauchgasen mit Durchzündung



Abbildung 54: Materialmix nach Versuch 3

Versuch 4: erst Sprinkler an, Decke (Typ A) folgend

Beobachtungen:

- nach Abdeckung immer wieder Ausbrechen von Gaswolken an ungesicherten Stellen, jedoch ohne Durchzündung, Halteschienen bleiben bis zum Schluss liegen
- sehr starke Verrauchung des gesamten Raumes, starke Sichtbehinderung
- Maximale Temperatur am „Autodach“: 315°C
- nach Abnahme der Decke noch kleines Feuer im Batteriemodul erkennbar, aber keine stärkere Neuentzündung
- scheinbar 10 Zellen durchgezündet
- Materialmix-Auto nur etwas angeschmolzen
- Batterie-Modul / Alurahmen durch Draht verstärkt → in einem Stück geblieben
- Brandbegrenzungsdecke nach Versuch augenscheinlich unversehrt

Versuch 5: erst Abdeckung mit Decke (Typ A) und Sprinkler folgend

Beobachtungen:

- vor Auflegen der Decke bei ersten Zellexplosionen Wegfliegen von Teilchen gut zu beobachten (Abbildung 57)
- nach Auflegen Explosion unter der Decke → eine Halteschiene wird weggeschleudert, (ganz kurz VOR Einschalten des Sprinklers)
- auch noch mehrere Minuten nach Einschalten des Sprinklers entweichen von Gasen unter der Decke mit Durchzündung
- sehr starke Verrauchung des gesamten Raumes, starke Sichtbehinderung
- maximale Temperatur am „Autodach“: 237°C
- starke Flammenbildung und Durchgehen weiterer Zellen nach Entfernen der Decke
- scheinbar alle Zellen durchgezündet
- Materialmix-Auto nur etwas angeschmolzen
- Batterie-Modul / Alurahmen durch Draht verstärkt → in einem Stück geblieben

- Brandbegrenzungsdecke nach Versuch augenscheinlich unversehrt



Abbildung 55: Durchzündung von Zellen, Wegfliegen von Teilchen, vor Auflegen der Brandbegrenzungsdecke

Versuch 6: nur mit Brandbegrenzungsdecke (Typ B)

Beobachtungen:

- Nach Aufplatzen der ersten Zelle deutliche „Gaslachenbildung“
- Zu diesem Versuch gibt es ein Video mit Tonspur. Man hört deutlich das Aufplatzen der ersten Zelle, bis zur Zündung hört man keine weiteren Knallgeräusche
- 3 Minuten zwischen Beginn Gasfreisetzung und Durchzündung → starke Explosion, vorbereitend hingelegte Brandbegrenzungsdecke fliegt weg, Decke manuell wieder aufgelegt
- immer wieder unvermittelt stärkere Explosionen unter der Decke → Halteschienen werden weggeschleudert,
- gelegentlich brechen Rauchwolken unter Decke hervor, zünden dabei durch, deutliches Auffliegen der Decke, auch nach oben (Abbildung 56)
- maximale Temperatur am „Autodach“: 217°C
- nach Abnehmen der Decke noch ganz kleine Flammen im Batteriemodul, werden nicht größer
- scheinbar alle Zellen durchgezündet
- Materialmix-Auto nur etwas angeschmolzen
- Batterie-Modul / Alurahmen durch Draht verstärkt → in einem Stück geblieben
- Brandbegrenzungsdecke nach Versuch augenscheinlich unversehrt



Abbildung 56: Durchzündn entweichender Gase, dabei Aufliegen der Decke

Versuch 7: erst Sprinkler an, Decke (Typ B) folgend

Beobachtungen:

- Zu diesem Versuch gibt es ein Video mit Tonspur. Man hört deutlich das Aufplatzen von zwei Zellen innerhalb der ersten Minuten vor der Zündung
- „Durchglüh-Stellen“ beim ersten Durchzündn, VOR Anschalten des Sprinklers und VOR vollständigem Abdecken des Batteriemoduls mit der Decke! (Abbildung 57),
- auch nach Abdecken und nach Anschalten Sprinkler Entstehung solcher „Durchglüh-Stellen“, bei nachfolgender Explosion unter der Decke dann dort größeres Loch (Abbildung 58)
- sehr starke Verrauchung des gesamten Raumes, starke Sichtbehinderung
- maximale Temperatur am „Autodach“: 115°C
- kein Feuer mehr nach Entfernen der Decke
- nicht alle Zellen durchgezündet
- Materialmix-Auto nur etwas angeschmolzen
- Brandbegrenzungsdecke hat größere Löcher (Abbildung 59)

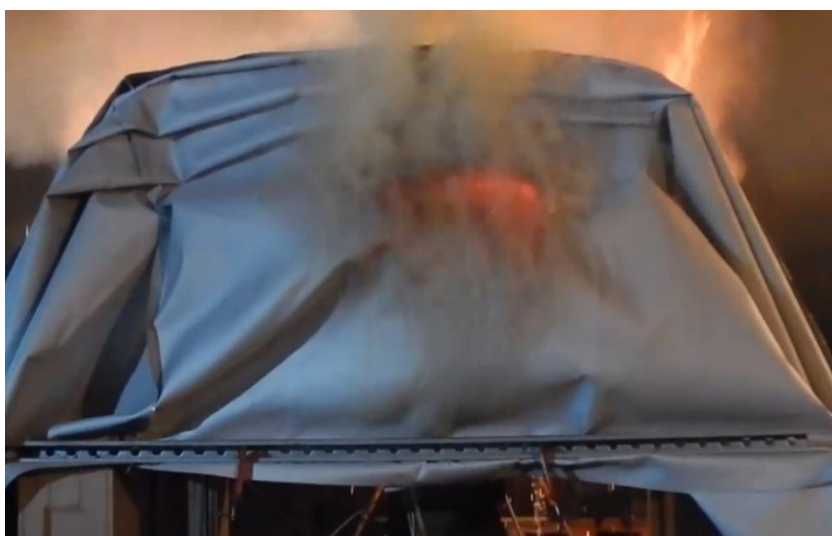


Abbildung 57: Durchglühstellen an Decke, vor Einschalten des Sprinklers und vor vollständiger Abdeckung



Abbildung 58: Durchglüh-Stellen an der Decke (Nach Einschalten des Sprinklers und nach kompletter Abdeckung), Loch an dieser Stelle nach späterer Explosion



Abbildung 59: beschädigte Brandbegrenzungsdecke nach Versuch 7

Fazit:

In einer Versuchsreihe wurden Real-Versuche zum Verhalten von Brandbegrenzungsdecken und / oder Sprinkleranlagen bei der Bekämpfung von Li-Ionen-Batteriebränden durchgeführt. Dabei ergaben sich folgende Beobachtungen und Erkenntnisse:

- Die Batteriemodule wurden mit einer Heizplatte überhitzt. Die ersten Reaktionen (Gasfreisetzung bzw. Zündung) der Batteriemodule traten relativ gut reproduzierbar nach 22 – 27 min auf.
- Auch prismatische Zellen zeigen bei der Explosion ein deutliches Wegschleudern von kleinen und größeren Teilchen (Video: Wegfliegen_Funken, siehe digitaler Anhang).
- Beim Aufplatzen der Zellen tritt ein weißes Fluid aus – vermutlich handelt es sich dabei um schwere Dämpfe des Elektrolyten (Video: Dampflichten, siehe digitaler Anhang).
- Brandbegrenzungsdecken können das Weiterlaufen des thermal runaways im Batteriemodul nicht aufhalten. Sie können aber das Wegfliegen von Teilchen stark begrenzen und somit die Ausbreitung des Feuers verhindern bzw. verlangsamen.

- Brandbegrenzungsdecken können das Übergreifen des Batteriebrandes auf andere Bereiche des Fahrzeuges stark reduzieren. Bei allen Versuchen, bei denen eine Brandbegrenzungsdecke eingesetzt wurde, war der unter der Decke platzierte Materialmix kaum angebrannt. Wurde keine Decke verwendet, war dieses Material komplett verbrannt. Durch Nutzung einer Brandbegrenzungsdecke kann der Brand demnach relativ gut auf den Ort der Batterie begrenzt werden. Dies ist auch an den gemessenen Temperaturen erkennbar.
- Eine Brandbegrenzungsdecke hält nicht dicht. Immer wieder kommt es – ohne Vorwarnung - zu zum Teil heftigen Gasausbrüchen unter der Decker hervor, oft mit Durchzündung dieser Gase. Einsatzkräfte in der Nähe müssen dies wissen – es gibt keinen „ungefährdeter Aufenthalt“ in der Nähe eines abgedeckten Elektrofahrzeuges! (Video: Auffliegen_Decke, siehe digitaler Anhang)
- Auch mit Einsatz einer Brandbegrenzungsdecke kommt es zu starker Rauchgasansammlung außerhalb der Decke. Dieser Effekt ist noch stärker bei zusätzlichem Einsatz einer Sprinkleranlage – es kommt zu einer nahezu vollständigen Verrauchung.
- Bei einer direkten Beaufschlagung mit einer austretenden Stichflamme aus einem Batteriemodul kann, je nach Art der Löschdecke, Material der Decke durchglühen und es können Löcher entstehen. (Video: Glueheffekt_Loch, siehe digitaler Anhang)
- Nach Entfernen der Brandbegrenzungsdecke kann die Reaktion im Batteriemodul noch weiter gehen. Das hängt vor allem davon ab, ob noch nicht abreagierte Zellen vorhanden sind.

Die Gasmessungen bzw. die chemischen Untersuchungen der Ablagerungen auf den Brandbegrenzungsdecken und Metallprobenplättchen wurden durch den Projektpartner HBRS durchgeführt.

5.4 Anpassung von Sicherheitstechnik - Ventilation

Wenn über gasbetriebene Fahrzeuge gesprochen wird, dann werden derzeit drei Arten von Gasen als Kraftstoffe eingesetzt:

1. Autogas
2. Erdgas (CNG, LNG)
3. Wasserstoff

wobei die Anteile an den gasbetriebenen Fahrzeugen momentan dieser Reihenfolge entsprechen.

Autogas

Unter Autogas versteht man ein Gasgemisch aus Propan und Butan. Die Zusammensetzung variiert, in der Regel wird als „Sommermischung“ ein Verhältnis von 40 : 60 und als „Wintermischung“ von 60 : 40 (Propan : Butan) angeboten. Für Autogas ist auch die Bezeichnung LPG (Liquefied petrol gas) gebräuchlich. Bei einem Druck von ca. 8 - 10 bar ist dieses Gemisch bei Raumtemperatur flüssig. Es kann an Tankstellen flüssig unter Druck getankt werden, wobei die meisten Zapfsäulen in Deutschland einen Betankungsdruck zwischen 12 und 14 bar anbieten.

Da Autogas geruchsneutral ist, wird ein Geruchsstoff zugesetzt, um Leckagen frühzeitig zu bemerken. Typische Odorierungsmittel sind Tetrahydrothiophen (THT, Mindestkonzentration 10 mg/m³ Gas), 2-Methyl-2-propanthiol (TBM, Mindestkonzentration 3 mg/m³ Gas) sowie zunehmend schwefelfreie Stoffe wie Gasodor S-free. Letzteres wird in einer Mindestkonzentration von 8 mg/m³ Gas zugesetzt [90], [91]. Eine Gasdetektion könnte ggf. hier ansetzen.

Serienmäßig angebotene PKWs haben ein Tankvolumen zwischen 27 und 60 Liter netto [92]. Viele gasbetriebene Fahrzeuge sind jedoch Nachrüstungen bzw. Umrüstungen. Dafür werden u.a. folgende Tanks angeboten:

Radmuldentank: 33 – 100 Liter

Zylindertank: 70 – 200 Liter

Unterflurtank: 41 – 103 Liter

bei Bussen ca. 650 Liter (Zylindertanks), Tanks befinden sich auf dem Dach

Die angegebenen Volumina sind Bruttoangaben. Aus Sicherheitsgründen (Ausdehnung) kann ein Tank jedoch nur bis zu 80% gefüllt werden, das ist tankintern durch eine technische Sicherung gelöst [93].

Die meisten Tanks sind bis zu einem Überdruck von (30...40) bar geprüft (Berstdruck ca. 60...90 bar). Je nach Tankart sind Sicherheitsventile verbaut, die bei einem Druck von ca. (25...28) bar öffnen [94], wodurch sichergestellt ist, dass das Gas bei Überhitzung kontrolliert abgelassen wird und der Tank nicht bersten kann. Dies heißt aber auch, dass das Gas in der Regel nicht auf einmal abgelassen wird, sondern schubweise, da nach einem Öffnen des Ventils der Überdruck zunächst abgebaut wird. Bei einem Brand können dadurch immer wieder Stichflammen entstehen, bzw. bei einer Überhitzung wird nicht das ganze Gas auf einmal abgeblasen. Bei direkter Beflammung (ca. 7 Minuten) reicht das Sicherheitsventil nicht aus, dann ist mit einem Bersten zu rechnen.

1.3. Gasfreisetzung und Explosionsgefahr

Die folgende Rechnung ist stark vereinfacht und verwendet Mittelwerte. Sie geht zudem davon aus, dass das freigesetzte Gas sich gleichmäßig rund um die Freisetzungsstelle im zur Verfügung stehenden Raum verteilt, was in der Realität oft nicht der Fall ist. Dennoch bietet sie eine erste Grundlage für weiterführende Überlegungen und eine Einordnung der tatsächlichen Gefahren.

Die Dichte des flüssigen Autogasgemisches wird bei 15°C mit etwa 0,55 kg / l angegeben. [95], [96]. Eine umfangreiche Recherche ergab, dass für PKW die übliche Tankgrößen bei 60 l oder darunter liegt. Für die Berechnung wurde daher von einem Tank von 60 l (z.B. Opel Zafira Tourer [97]) ausgegangen. Gemäß Sicherheitsbestimmungen kann dieser mit 80%, also mit 48 l Flüssiggas befüllt werden. Diese 48 l wiegen unter Nutzung der oben angegebenen Dichte 26,4 kg. Ein Propan / Butan-Gemisch hat eine mittlere molare Masse von 51,1 g/mol. 26400 g entsprechen also 516,6 mol.

Das molare Volumen bei 0°C und Normaldruck (1013 mbar) beträgt $22,41 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{mol}$. Mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung kann man für 15°C ein molares Gasvolumen von $23,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{mol}$ ermitteln. Würden die gesamten 516,6 mol Flüssiggas bei 15°C Außentemperatur aus dem Tank freigesetzt werden, entstünden demnach $12,2 \text{ m}^3$ Gas.

Die untere Explosionsgrenze von Propan in Luft beträgt 1,7 und die für Butan 1,4 Vol%. Da bei Gasgemischen für die Sicherheit immer die niedrigere untere Explosionsgrenze verwendet wird, wird mit der UEG von Butan weiter gerechnet. Das bedeutet, dass die $12,2 \text{ m}^3$ Gas bei völliger Gleichverteilung ein Volumen von 871 m^3 so anreichern können, dass die untere Explosionsgrenze von Butan erreicht wäre. In einem größeren Raumvolumen wäre die UEG unterschritten und keine Explosion mehr möglich – immer die Gleichverteilung im gesamten Raum vorausgesetzt.

Fähre	Länge Schiff	Höhe Fahrzeugdeck	Breite Fahrzeugdeck	Längenabschnitt, der 871 m^3 entspricht (leeres Deck)
Berlin			Ca. 20 m über gesamte Breite	9,46 m

	169 m	Deck 3: 4,60 m (geschlossen)	Ca. 10 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	18,9 m
		Deck 5: 4,20 m (halboffen)	Ca. 20 m über gesamte Breite	10,3 m
Peter Pan	220 m	4,60 m	Ca. 10 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	20,6 m
			Ca. 22 m über gesamte Breite	8,6 m
		absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	17,2 m
Stena Hollandica	240 m	4,80 m	Ca. 22 m über gesamte Breite	14,6 m
			Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	29,3 m
		absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 25 m über gesamte Breite	7,25 m
			Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	15,12 m
			Ca. 25 m über gesamte Breite	12,9 m
			Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	26,8 m

Tabelle 18: Längenabschnitte mit explosiver Atmosphäre (1,4Vol% LPG) auf Fahrzeugdecks, wenn ein 60l-LPG-Auto seinen gesamten Tankinhalt abblasen würde, Gleichverteilung rund um das Auto vorausgesetzt

Tabelle 1 und Abbildung 62 zeigen, wie ein LPG-Gasaustritt auf den innerhalb des Projektes besichtigten Fährschiffen zu bewerten wäre: Je nach Höhe und Breite des Fahrzeugdecks ergäben sich verschieden lange Abschnitte, die bei einer Freisetzung von LPG aus einem PKW mit einer explosiven Atmosphäre gefüllt sein können. Entsprechend sollte der Abstand von Gassensoren oder von Ansaugstellen geplant werden. Für das Fährschiff „Berlin“ hieße das z.B., dass in Bereichen, wo das Fahrzeugdeck nicht geteilt ist, also eine Breite von ca. 20 m hat, mindestens ca. alle 9,5 m ein Gassensor oder eine Ansaugstelle installiert werden müsste. Für die Stena Hollandica (25 m Breite) im Bereich des ungeteilten Fahrzeugdecks ca. alle 7,25 m.

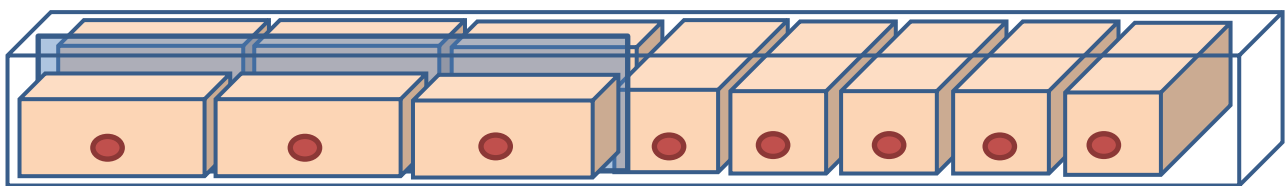


Abbildung 60: Fahrzeugdeck mit abgeteilten Gasvolumina. Jeder Quader entspricht einem Volumen von 871m³, je nach Breite und Höhe des Fahrzeugdecks ergeben sich verschiedene Quaderlängen und verschiedene Anzahlen von Quadern. Abstände von Sensoren oder Ansaugstellen (rote Punkte) sollten mindestens entsprechend dieser Längen geplant werden.

Die Berechnung zeigt auch, dass in keinem Fall bei Abblasen nur eines Pkws auf einem geschlossenen Fahrzeugdeck der betrachteten Fährschiffe und Gleichverteilung eine explosive Atmosphäre entstehen kann, die das gesamte Fahrzeugdeck ausfüllen könnte. Dafür müsste auf der „Berlin“ auf einem ungeteilten Fahrzeugdeck (150 m x 20m x 4,6m = 13.800 m³) z.B. ca. 193 m³ LPG-Gas freigesetzt werden, das würde dann einem Anteil von 1,4 Vol% entsprechen, das wären also ca. 16 Pkw, die abblasen müssten. Auf einem geteilten Deck wäre es entsprechend die Hälfte. Diese Überlegung gilt allerdings für ein leeres Fahrzeugdeck.

In normaler Schiffsoperation wird das Volumen, das das Gas einnehmen kann, durch die transportierten Fahrzeuge verringert. Für die „Berlin“ wird angegeben, dass entweder 230 Pkw oder 48 LKW auf jedem Deck transportiert werden können [98]. Für einen durchschnittlichen Pkw kann ein Volumen von 12,3 m³ (4,40 m x 1,80 m x 1,55 m) [99] und für einen durchschnittlichen LKW ein Volumen von 164,5 m³ (15,94 m x 2,58 m x 4,00 m) angenommen werden. Ein durchschnittlicher Zustand wäre sicher eine halbe/halbe Belegung, also 115 Pkw und 24 LKW, ergibt eine Volumenverringerng von ca. 5360 m³. Auch mit diesem Beladungszustand müssten noch 10 Beispiel-LPG-Fahrzeuge abblasen, um das gesamte freie Volumen in eine explosive Atmosphäre zu verwandeln.

Da sich das Gas nicht gleichverteilt und Konzentrationsansammlungen entstehen können, ist in der Realität natürlich auch bei Abblasen nur eines Pkw eine lokale Explosionsgefahr gegeben. Dabei gilt für LPG, dass es schwerer ist als Luft und sich bevorzugt am Boden ansammelt.

Erdgas - CNG

Erdgas kann als komprimiertes Gas (Compressed Natural Gas - CNG) oder als tiefkaltes verflüssigtes Gas (Liquefied Natural Gas – LNG) als Kraftstoff in Fahrzeugen eingesetzt werden, wobei derzeit die CNG-Technik (noch) wesentlich verbreiteter ist. LNG wird derzeit vor allem für LKWs erprobt. Serienmäßige LNG Pkws gibt es derzeit noch nicht, deshalb gibt es keine bekannten Zahlen zu Tankgrößen usw. und die weitere Betrachtung fokussiert sich auf CNG.

Zusammensetzung

Erdgas ist ein Gasgemisch, dessen Hauptbestandteil Methan ist (in der Regel 75 - 98 Prozent). Je nach Herkunft des Erdgases sind jedoch auch weitere Gase wie Ethan, Propan, Butan, Ethen und Pentan, Stickstoff- und Kohlenstoffdioxid enthalten [100].

In Deutschland wird H-Gas und L-Gas angeboten, welches sich durch den Methangehalt und den Heizwert unterscheidet. Bei L-Gas ist der Methangehalt kleiner als 87%, bei H- Gas größer [101].

CNG als Kraftstoff für Pkw muss gemäß der Norm DIN 51624 einen Methananteil von mindestens 80 % haben. Auch CNG wird odoriert, es kommen die gleichen Odorierungsmittel wie bei LPG zum Einsatz.

Tanks

CNG wird gasförmig bei etwa 200 bar gespeichert und durch einen Hochdruckregler auf 7 bar verringert [92]. Der Tank muss im Sicherheitstest allerdings einem Berstdruck von 600 bar standhalten [102]. Während CNG-Tanks zunächst lange aus Stahl gefertigt wurden, setzen Hersteller wie Audi heute für ihre CNG-Fahrzeuge bei den Tanks aus Gewichtsgründen auf Faser-Verbundwerkstoffe, wie z.B. Kohlefasern [103]. Die Tanks sind mit einer Schmelzsicherung ausgerüstet, die bei einer Erwärmung auf ca. 110 °C schmilzt und das Gas freisetzt. Zudem wird bei sehr starkem Überdruck eine Berstscheibe aktiviert, die nach Bruch ebenfalls das Gas freisetzt. In jedem Fall erfolgt also – anders als bei LPG - bei Auslösen dieser Sicherheitseinrichtungen ein vollständiges Abblasen des gesamten Tankinhaltes [104], [105]!

Gasfreisetzung und Explosionsgefahr

Nach dem Eichgesetz darf Erdgas nicht nach Volumen (Liter) oder Kilowattstunde, sondern nur nach Masse (Kilogramm) verkauft werden. Die meisten CNG-Pkw-Fahrzeugmodelle können zwischen 12 kg und 37 kg tanken [105]. CNG-betriebene LKWs haben Tanks mit 70 – 90 kg Fassungsvermögen [106].

Der Vergleichbarkeit wegen wird wieder der Opel Zafira Tourer herangezogen [Abbildung 61], der sowohl als LPG als auch als CNG - Ausführung gebaut wird und der als CNG-Version einen Tank mit 25 kg Fassungsvermögen hat [107].



Abbildung 61: Opel Zafira Tourer CNG. Die LPG-Ausführung sieht äußerlich genauso aus.

Bildquelle: <https://www.autogazette.de/fahrbericht/opel/zafira/opel-zafira-tourer-cng-sparen-beim-gasgeben-370217.html>

Für Erdgas kann mit einer durchschnittlichen molaren Masse von 18 g/mol gerechnet werden. Ein Tank mit 25 kg Fassungsvermögen enthält entsprechend 1389 mol komprimiertes Erdgas, welches freigesetzt ein Volumen von 32,8 m³ einnehmen würde. Die meisten Erdgas-Anbieter geben für Erdgas eine untere Explosionsgrenze von 4 Vol% an [108], [109]. Diese Konzentration erhält man, wenn die 32,8 m³ Erdgas in ein Volumen von 820 m³ freigelassen werden würden.

Fähre	Länge Schiff	Höhe Fahrzeugdeck	Breite Fahrzeugdeck	Längenabschnitt, der 820 m ³ entspricht (leeres Deck)
Berlin	169 m	Deck 3: 4,60 m	Ca. 20 m über gesamte Breite	8,9 m
			Ca. 10 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	17,8 m
		Deck 5: 4,20 m	Ca. 20 m über gesamte Breite	9,8 m
			Ca. 10 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	19,5 m
Peter Pan	220 m	4,60 m	Ca. 22 m über gesamte Breite	8,1 m
			Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	16,2 m
		absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 22 m über gesamte Breite	13,8 m
			Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	27,6 m
Stena Hollandica	240 m	4,80 m	Ca. 25 m über gesamte Breite	6,8 m
			Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	14,2 m
			Ca. 25 m über gesamte Breite	12,1 m

		absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	25,3 m
--	--	---	---	--------

Tabelle 19: Längenabschnitte mit explosiver Atmosphäre (4Vol% Erdgas) auf Fahrzeugdecks, wenn ein 25kg-CNG-Auto seinen gesamten Tankinhalt abblasen würde, Gleichverteilung rund um das Auto vorausgesetzt

Die Größenordnung der entstehenden explosiven Raumvolumina ist also für das gleiche Fahrzeug für LPG- bzw. CNG-Antrieb etwa gleich. Für Erdgas gilt jedoch, dass es leichter ist als Luft und daher aufsteigt.

Wasserstoff

Wasserstoff kann als Brennstoff direkt verbrannt werden oder mittels einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt werden, so dass der Fahrzeug-Antrieb selbst letztendlich elektrisch ist. Während ersteres über sehr wenige Prototypen nicht hinausgeht, gibt es schon einige wenige serienmäßige Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pkws auf dem Markt. Nach Angaben des Herstellers ist der Toyota Mirai derzeit das erste in Großserie produzierte Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeug. Bis September 2019 wurden davon knapp 1000 in ganz Europa verkauft. Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 54 Fahrzeuge neu zugelassen [110]. In Deutschland gibt es mit dem Mercedes GLC F-Cell seit 2019 eine Kleinserie, auch Hyundai hat mit dem Modell Nexo einen Anfang gemacht.

Zusammensetzung

Da keine konkreten Angaben gefunden wurden, wird davon ausgegangen, dass relativ reiner Wasserstoff, ggf. mit einigen Additiven als Kraftstoff verwendet wird. Je nach Herstellung sind ggf. gewisse Verunreinigungen (z.B. in geringen Spuren CO, CO₂ und CH₄ bei der Erzeugung durch Dampfreformierung) zu erwarten.

Tanks

Die Tanks sind aus Verbundwerkstoffen hergestellt und speichern den Wasserstoff als komprimiertes Gas. Dabei hat man sich weltweit auf einen Tankdruck von 700 bar für Pkw und 350 bar für Nutzfahrzeuge geeinigt [111]. Mit diesen Drucken erfolgt auch jeweils die Betankung. Die Tanks sind mit Sicherheitsventilen ausgerüstet, die bei einer Temperatur von 110°C öffnen und den Wasserstoff komplett ablassen, im Falle des Hyundai Nexo in Richtung Boden. Die Tanks haben ein Fassungsvermögen von 5,6 kg ((Toyota Mirai), 4,4 kg (Mercedes CFL) bzw. 6,3 kg (Hyundai Nexo). Der Hersteller Hyundai hat auch bereits einen Lkw mit Brennstoffzellenantrieb entwickelt, dessen sieben Tanks insgesamt 35 Kilogramm Wasserstoff fassen [112].

Gasfreisetzung und Explosionsgefahr

Für die weitere Berechnung wird vom Hyundai Nexo (Abbildung 64) ausgegangen, da er mit 163 PS genau die gleiche Motorleistung hat wie der für die vorherigen Rechnungen verwendete Opel Zafira Tourer. Er ist auch vergleichbar schwer.



Abbildung 62: Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeug Hyundai Nexo

Bildquelle: Alexander Migl bei

https://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzellenfahrzeug#/media/Datei:Hyundai_Nexo_Genf_2018.jpg

Der Tank des Hyundai Nexo enthält 6,3 kg Wasserstoffgas. Bei einer molaren Masse von 2 g/mol sind das 3150 Mol, entsprechend 74,34 m³ Gas bei kompletter Freisetzung. Die untere Explosionsgrenze für Wasserstoff wird mit 4 Vol% angegeben [113]. Würde der gesamte Tank abblasen, würde entsprechend ein Volumen von 1858 m³ explosiver Atmosphäre mit der Mindestkonzentration von 4 Vol% Wasserstoff entstehen.

Fähre	Länge Schiff	Höhe Fahrzeugdeck	Breite Fahrzeugdeck	Längenabschnitt, der 1858 m ³ entspricht (leeres Deck)
Berlin	169 m	Deck 3: 4,60 m	Ca. 20 m über gesamte Breite	20,2 m
			Ca. 10 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	40,4 m
		Deck 5: 4,20 m	Ca. 20 m über gesamte Breite	22,0 m
			Ca. 10 m bei (teilweiser Teilung in der Mitte	11,0 m
Peter Pan	220 m	4,60 m	Ca. 22 m über gesamte Breite	18,3 m
			Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	36,7 m
		absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 22 m über gesamte Breite	31,2 m
			Ca. 11 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	62,5 m
Stena Hollandica	240 m	4,80 m	Ca. 25 m über gesamte Breite	15,5 m
			Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	32,2 m
			Ca. 25 m über gesamte Breite	27,5 m

	absenkbares Zwischendeck auf 2,70 m	Ca. 12 m bei (teilweiser) Teilung in der Mitte	57,3 m
--	---	---	--------

Tabelle 20: Längenabschnitte mit explosiver Atmosphäre (4Vol% H₂) auf Fahrzeugdecks, wenn ein 6,3kg-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Auto seinen gesamten Tankinhalt abblasen würde, Gleichverteilung rund um das Auto vorausgesetzt

Im Vergleich zu LPG und CNG würde beim Abblasen eines Wasserstofftanks eines Brennstoffzellen-Pkws also ein deutlich größeres Raumvolumen mit explosiver Atmosphäre gefüllt. Wasserstoff ist ein extrem leichtes Gas. Es würde bei Freisetzung schnell aufsteigen und in die Atmosphäre entweichen (offenes Deck) bzw. sich unter der Decke ansammeln (geschlossenes Deck).

Ventilation / Luftwechsel

Auf RORO-Schiffen ist laut SOLAS ein 10-facher Luftwechsel pro Stunde vorgeschrieben. Die Lüftung muss ständig an sein, wenn sich Fahrzeuge an Bord befinden [114]. Das Gesamtvolumen der „Berlin“ von 13.800 m³ wird also in einer Stunde 10 Mal komplett einmal ausgetauscht. Entsprechend kann man ins Verhältnis setzen, wie lange diese Anlage brauchen würde, um die jeweils entstehenden explosiven Volumina zu ersetzen. Auch wenn dieser Ansatz recht theoretisch ist, schafft er eine grobe Grundlage zur Bewertung der Gefahren und der Effektivität der Ventilation. Für die jeweiligen Volumina (LPG – 871m³, CNG – 820 m³ und Wasserstoff – 1858 m³) würde das Lüftungssystem mit der derzeit vorgeschriebenen Leistung 0,4 min, 0,35 min bzw. 0,8 min brauchen.

Eine Änderung des Lüftungsregimes im Zusammenhang mit gasbetriebenen Fahrzeugen scheint vor diesem Hintergrund nicht notwendig. Es stellt sich jedoch zugleich die Frage nach der Sinnhaftigkeit einer präventiven Gasetektion.

Fazit:

Freigesetztes Gas	LPG	Erdgas	Wasserstoff
Zusammensetzung	Propan, Butan, odoriert	Methan, Ethan, Propan, Butan, N ₂ , CO ₂ , odoriert	Wasserstoff
Speicherdruck im Tank	8 – 10 bar	200 bar	700 bar
Gespeichert als	Flüssigkeit	komprimiertes Gas	komprimiertes Gas
Masse Gas im Tank für Beispiel-Pkw mit 163 PS (Opel Zafira Tourer, bzw. Hyundai Nexa)	26,4 kg	25 kg	6,3 kg
entspricht freigesetztem Volumen	12,2 m ³	32,8 m ³	74,3 m ³
Untere Explosionsgrenze	1,4 Vol% (Butan)	4 Vol%	4 Vol%
Entstehendes explosives Volumen bei vollständiger Tankentleerung eines vollen Tanks (im Vgl.: Volumen gesamtes Fahrzeugdeck leer/voll: Berlin – 13.800 m ³ / 9.500 m ³ Peter Pan – 20.240 m ³ / 11.308 m ³ Stena Hollandica 26.400 m ³ /	871 m ³	820 m ³	1858 m ³

Dichte Gas	viel schwerer als Luft	leichter als Luft	Viel leichter als Luft
Bemerkungen	bei Überdruck stoßweises Abblasen	bei Überdruck / Überhitzung komplettes Abblasen	bei Überdruck / Überhitzung komplettes Abblasen

Tabelle 21: Zusammenfassungen der Berechnungen zur Gasfreisetzung und Gasausbreitung von gasbetriebenen Fahrzeugen im Zusammenhang mit einer möglichen Explosionsgefahr auf Fahrzeugdecks von RORO-Schiffen. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass trotz der mathematisch exakt anmutenden Zahlen nur einfache Überschlagsrechnungen mit Durchschnittswerten durchgeführt wurden, um einen groben Überblick über die Situation zu bekommen.

Die Berechnungen ergaben keine Notwendigkeit für eine Änderung der bisher vorgeschriebenen Ventilationsbedingungen.

6. AP 5 - Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge

Dieses Arbeitspaket wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Lloyds Register bearbeitet. Es wurden verschiedene Fährten besichtigt und die Schiffselektriker interviewt, um mögliche geeignete Standorte für Ladepunkte an Bord zu evaluieren. An Bord bestehen andere Umgebungsbedingungen als an Land. Entsprechend sollten an Bord zu installierende Ladesäulen besondere Anforderungen erfüllen, die im nachfolgenden Anforderungskatalog zusammengefasst sind.

Nachfrage und Angebot

Die Auswahl einer geeigneten Ladesäule sollte u.a. nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

- **Anteil von Elektrofahrzeugen** im Transportaufkommen, Kundennachfragen: Wie viele Kunden fragen ein Aufladen nach? Welche Auslastung ist zu erwarten? Welche Anzahl von Ladesäulen erscheint entsprechend sinnvoll? Dies kann sich, je nach Fahrtgebiet, unterscheiden. Generell ist jedoch für die nächsten Jahre von einer deutlichen Zunahme von Elektrofahrzeugen auszugehen.
- **Fahrzeit:** Bei Fahrzeiten unter 2 Stunden empfehlen sich Schnellladesäulen, da ansonsten kein befriedigendes Ladeergebnis erzielt werden kann. Schnellladesäulen empfehlen sich auch dann, wenn die Fahrzeit zwar länger ist, an einer Ladesäule aber mehrere Fahrzeuge nacheinander während der Überfahrt aufgeladen werden sollen. Allerdings verbrauchen diese mehr Leistung, die das Schiff ggf. nicht ausreichend zur Verfügung hat.
- **Verfügbare Leistung:** Die Anzahl und die Leistung der Ladesäule(n) müssen entsprechend der an Bord „überschüssig“ verfügbaren Leistung kalkuliert werden. Die Sicherheit des Schiffsbetriebs geht in jedem Fall vor und muss primär immer gewährleistet sein.
- **Maximal mögliche Länge des Ladekabels:** Je nach Leistung ist die maximal mögliche Länge des Ladekabels eingeschränkt. Ein längeres Ladekabel ermöglicht eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Positionierung der Fahrzeuge und ermöglicht auch das Laden mehrere Fahrzeuge in der Umgebung der Ladesäule. Andererseits erhöht sich durch ein längeres Kabel ggf. die Gefahr von Stolper- und Sturzunfällen oder der Beschädigung des Kabels durch Überfahren. Ggf. sollte eine Kabelführung z.B. von oben überdacht werden.

- **Typ des Ladesteckers:** Es gibt mehrere Steckertypen für Elektrofahrzeuge. Die Ladesäule sollte auf jeden Fall den Typ 2-Stecker anbieten, der als europäische Norm festgelegt wurde. Manche Ladesäulen bieten auch (zwei) Kabelausgänge mit unterschiedlichen Steckertypen an.

Technische Anforderungen

- **Schutzklasse:** Landladesäulen verfügen gemäß Industriestandard über die Schutzklasse IP 54. Für den Bordbetrieb wird für elektrische Installationen eine Schutzklasse von IP55 (geschlossene Decks) bzw. IP56 (Wetterdecks) gefordert, um ausreichend Schutz gegen Spritzwasser zu bieten. Zudem sollte Beständigkeit gegen salzhaltige Atmosphäre bestehen, was durch einen separaten genormten Test nachgewiesen werden sollte.
- **Explosionsschutz:** Unterhalb des Schottendecks muss elektrisches Equipment für den Ex-Bereich Zone 1 zugelassen sein. Eine entsprechende Schutzklasse für den Einsatz im Ex-Bereich Zone 2 oder aber mindestens IP55 für Decks wird oberhalb des Schottendecks gefordert. Landladesäulen sind nicht explosionsgeschützt ausgeführt, da man ihren Standort so auswählen kann, dass sie nicht in explosionsgefährdeten Bereichen stehen. An Bord ist dies nur bedingt möglich. Viele Decks oder Decksbereiche sind bis zu einer Höhe von 45 cm oder komplett (bei vorgesehenem Gefahrguttransport oder unterhalb des Schottendecks) als explosionsgefährdete Zonen ausgewiesen. Alle elektrischen Installationen in diesen Bereichen müssen über einen entsprechenden Explosionsschutz verfügen. Da die Umsetzung dieser Anforderung sehr kostenintensiv ist, sollte als Alternative ggf. dennoch ein Standort an Bord gesucht werden, der diesen Forderungen nicht unterliegt. Zu beachten ist, dass auch das Ladekabel eine Explosions-Gefährdung darstellen kann, eine Installation der Ladesäule in einer Höhe über 45 cm also nur dann sinnvoll wäre, wenn auch das Ladekabel in einer entsprechenden Höhe angebracht werden könnte.
- **Vibrationen:** Landladesäulen sind fest installiert, es gibt derzeit keine Anforderungen für Vibrationstests. An Bord installierte Ladesäulen sollten mindestens die Vibrationsbeständigkeit haben, die auch von anderen elektrischen Installationen an Bord gefordert werden. Elektrische Maschinen und Geräte, die an Bord von Schiffen eingesetzt werden, müssen entsprechend der meisten Klassifikationsvorschriften mindestens für eine Schwingbelastung von 0,7 g ausgelegt sein. Dabei werden Schwingungen in einem definierten Frequenzbereich (z.B. von 2 - 100 Hz gemäß der Klassifikationsvorschriften von Lloyds Register) zugrunde gelegt.
- **Schräglagen:** In elektrischen oder elektronischen Geräten an Bord dürfen bis zu einem Neigungswinkel von 22,5° zu jeder Seite keine ungewollten Schaltvorgänge oder Funktionsänderungen auftreten.
- **Elektromagnetische Verträglichkeit:** Die EMV ist die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung und andere Einrichtung unzulässig zu beeinflussen. Umgekehrt darf die elektrische Installation nicht durch elektrische Geräte in der Umgebung gestört werden. An Bord gelten entsprechende Regelungen für elektrische Geräte, die diese erfüllen müssen. Beim Laden von Elektrofahrzeugen ist dabei die Steckverbindung zwischen Ladesäule und Fahrzeug eine Herausforderung. In diesem Zusammenhang sollte der Focus auch auf den Gleichrichter (Umrichter) der Ladesäule gelegt werden, da dieser getaktet ist und mit Leistungselektronik arbeitet.
- **Spannungs- und Frequenzabweichungen:** Alle elektrischen Betriebsmittel an Bord müssen so beschaffen sein, dass sie bei den im normalen Betrieb auftretenden Spannungs- und

Frequenzabweichungen störungsfrei arbeiten. Diese Abweichungen sind für Bordanlagen wie folgt definiert:

Spannung: +6/-10% (dauerhaft) +20/-20% (vorübergehend)

Frequenz: +5/-5% (dauerhaft) +10/-10% (vorübergehend)

Der Land- Industriestandard fordert eine Toleranz von +10/-10% für Spannung bzw. Frequenz.

- **Netzparameter:** Während an Land die Übertragungsspannung üblicherweise 400 V und 50 Hz beträgt, ist diese auf vielen Schiffen 440 V und 60 Hz. Eine Ladesäule muss entsprechend mit diesen Eingangswerten funktionsfähig sein, dies gilt insbesondere dann, wenn die Umrichtung in der Ladesäule und nicht im Fahrzeug erfolgt.
- **Stromnetz, Erdung, Verteilung:** Landladesäulen sind für TT bzw. TN- Netze ausgelegt, welche beide eine Erdung der angeschlossenen Verbraucher über das Verteilernetz gewährleisten. In beiden Netzen erfolgt eine Nullung des Stromkreises (Nullleiter). Im TN-Netz ist der Sternpunkt der Quelle direkt geerdet. Die angeschlossenen Geräte sind über einen Schutzleiter mit dem Sternpunkt des Netzes verbunden. Im TT-Netz sind der Sternpunkt des Netzes und die angeschlossenen Geräte separat direkt mit der Erde verbunden. Vor Beginn des Ladevorganges prüft die Kommunikationselektronik zwischen Ladesäule und Fahrzeug, ob eine solche Erdung vorhanden ist. Falls nicht, kann der Ladevorgang nicht beginnen.
Auf Schiffen kommt jedoch häufig ein IT-Netz zum Einsatz. Im IT-Netz ist der Sternpunkt des Netzes nicht mit der Erde verbunden. Stattdessen sind die Körper der angeschlossenen Geräte einzeln separat direkt mit der Erde verbunden. Aus Sicherheitsgründen und damit die Ladeelektronik einen Schutzleiter erkennt, muss daher ein geerdetes Netz durch den Einsatz eines Trenntransformators erzeugt werden. Der Trafo muss an die Leistungsparameter der Ladesäule angepasst sein.
- **Kabel:** Das Kabel sollte fest mit der Ladesäule verbunden sein, so dass keine Fahrer-eigenen Kabel verwendet werden können. Wenn das Kabel unter Zug kommt (z.B. Bewegung von Fahrzeugen bei schwerem Wetter), sollte die Verbindung gelöst werden (Notentkopplung).
- **Integration in das Power-Management-System an Bord:** Die Ladesäule sollte in das Power-Managementsystem des Schiffes integriert sein. Empfehlenswert wäre eine Integration in der Gruppierung „unwichtiger Verbraucher“. Im Falle von zu hohem Leistungsbedarf kann die Ladesäule automatisch vom Netz abgekoppelt werden, bis wieder ausreichend Leistung zur Verfügung steht.
- **Manuelle Abschaltung bei besonderen Situationen:** Die gesamte Ladesäule sollte einfach vom Netz getrennt werden können, z.B. durch eine manuelle Abschaltung (Zugang nur für Crew), so dass die Benutzung nicht möglich ist. Dies kann z.B. erforderlich werden, wenn an Stellplätzen in der Nähe Gefahrgut transportiert wird oder schweres Wetter zu erwarten ist. Die Abschaltvorrichtung (Ladesäule spannungsfrei schalten) sollte immer in einem nicht explosionsgefährdeten Bereich/Raum stattfinden. Ggf. kann dies auch über die Integration in das „Power Management System“ realisiert werden.

Sicherheitsmaßnahmen und Überwachung

- **Anfahrtschutz:** Die Ladesäule sollte durch entsprechende bauliche Schutzmaßnahmen vor Beschädigung durch Gegenfahren geschützt sein.
- **Integrierte Schutzfunktionen:** Die Ladesäule muss über sämtliche auch an Land geforderte Sicherheitsmaßnahmen verfügen, dies erfordert u.a. die Funktionalität der Kommunikation zwischen Ladesäule und Batteriemanagementsystem des Fahrzeuges z.B.
 - Kurzschlusschutz

- Überladeschutz – Abschaltung bei drohender Überladung der Batterie
 - Ggf. interne Kühlung der Ladesäule bzw. des Ladekabels (je nach Leistung)
 - Temperaturüberwachung der Ladesäule, des Kabels und des Steckers– Abschaltung bei Überhitzung
 - Überwachung der Integrität des Kabels – Abschaltung bei Beschädigungen
 - Abschaltung bei Gefahrenmeldung des Batteriemanagementsystems des Fahrzeugs
- Zusätzlich erscheinen bestimmte schiffsspezifische Schutzfunktionen sinnvoll, z.B.:
- Abschaltung bei starken Neigungswinkeln
 - Abschaltung bei starker äußerer Krafteinwirkung
- **Integration in das Alarm- und Monitoring-system des Schiffes:** Die Ladesäule sollte bei internen als auch bei externen Fehlfunktionen einen Alarm geben, der auf der Brücke oder in einer ständig besetzten Leitzentrale (z.B. Maschinenkontrollraum) aufläuft.
 - **Notfall-Fernabschaltung:** Im Falle von Havarien, z.B. einem Brand in der Nähe, sollte eine Fernabschaltung der Ladesäule möglich sein.
 - **Alarm:** Ggf. kann es sinnvoll sein, dass die Ladesäule im Falle von Gefahrensituationen (z.B. Problem in der Ladesäule, des Anschlusses oder der Autobatterie) einen bemerkbaren Alarm auslöst. Dieser muss akustisch und visuell wahrnehmbar sein.
 - **Monitoring:** In der Nähe der Ladesäule sind verschiedenen Detektionssysteme zur frühzeitigen Gefahrenerkennung sinnvoll, z.B.
 - Kameraüberwachung
 - Gassensorik (z.B. Wasserstoff)
 - Thermografie, Wärmebildkamera

Die Auswahl und Auslegung hängen vom konkreten Standort an Bord ab (offenes oder geschlossenes Deck, Sonneneinstrahlung, Luft-Zirkulation, ...). Bei der Überschreitung bestimmter gefährlicher Grenzwerte sollte Alarm ausgelöst werden (Brücke, akustisch, optisch).

- **Brandschutz:** Standorte von Ladestationen sollten mit geeigneten, ggf. zusätzlichen, Brandmeldern ausgerüstet sein. Wasser-Anschlussmöglichkeiten in der Nähe für die Bekämpfung eines brennenden Elektroautos sind sinnvoll. Vor Beginn der Brandbekämpfung sollte der Ladevorgang abgebrochen und die Ladesäule spannungsfrei geschaltet werden!

Sofern keine legale Lademöglichkeit an Bord geschaffen wird, sollte unbedingt sichergestellt werden, dass auch keine illegale Lademöglichkeiten bestehen, d.h. sämtliche Steckdosen auf dem Fahrzeugdeck sind gegen unbefugte Nutzung zu sichern!

7. AP 6 - Qualifizierung des Personals

Es wurde eine umfassende Untersuchung durchgeführt, welche Qualifikationen die am gesamten Transportprozess beteiligten Personen laut derzeitiger Gesetzeslage haben müssen (Tabelle 22). Parallel dazu wurden die verschiedenen Qualifikationsstufen für Elektrofachkräfte an Land ermittelt (Tabelle 23).

Bezeichnung	Qualifizierungsstufe	Personenkreis	Merkmale	zeitlicher Umfang	Qualifizierungsinhalte
Nichtelektrotechnische Arbeiten	1	Testfahrer, Mitarbeiter Werkstatt, Karosseriearbeiten, Rad- und Ölwechsel	Stufe 1 beschreibt alle nichtelektrotechnischen Arbeiten, die an einem Fahrzeug oder an Anlagen mit HV-Systemen durchgeführt werden müssen. Die Mitarbeiter müssen auf die möglichen elektrischen Gefährdungen des HV-Systems hingewiesen und in die bestimmungsgemäße Verwendung des Fahrzeuges unterwiesen werden.	2 bis 4 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Bedienen von Fahrzeugen und den dazugehörigen Einrichtungen • Durchführung allgemeiner Tätigkeiten, die keine Spannungsfreischaltung des HV-Systems erfordern • Durchführung aller mechanischen Tätigkeiten am Fahrzeuge (aber Hände weg von "orange") • Freischalten des HV-Systems, Service-Disconnect/Wartungsstecker "ziehen und stecken" als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme • Festlegen der anzusprechenden Person bei Unklarheiten • Unzulässige Arbeiten am Fahrzeug • Organisationsablauf bei elektrotechnischen Arbeiten, die unter Leitung und Aufsicht eines Fachkundigen für Hochvoltssysteme durchgeführt werden
Elektrotechnische Arbeiten	2a	Personen ohne elektrotechnische Vorkenntnisse mit technischer Ausbildung	Für Stufe 2 ist die Fachkunde für Arbeiten an HV-Systemen, die nicht HV-eigensicher sind, notwendig. Dies beinhaltet alle elektrotechnischen Arbeiten, die im spannungslosen Zustand ausgeführt werden. Dazu ist die Außer- und Wiederinbetriebnahme der HV-Anlage entsprechend der Anwendung und Durchführung der ersten drei Regeln der "Fünf Sicherheitsregeln" erforderlich.	mindestens 100 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrotechnische Grundkenntnisse • Elektrische Gefährdungen und Erste Hilfe • Schutzmaßnahmen gegen elektrische Körperdurchströmung und Störlichtbögen • Organisation von Sicherheit und Gesundheit bei elektrotechnischen Arbeiten • Fach- und Führungsverantwortung • Mitarbeiterqualifikationen im Tätigkeitsfeld der Elektrotechnik • Einsatz von HV-Systemen im Fahrzeug
	2b	Personen mit elektrotechnischen Vorkenntnissen im Kraftfahrzeugbereich (bspw. Kfz-Elektriker, Kfz-Mechatroniker, Kfz-Mechaniker)		mindestens 48 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Gefährdungen und Erste Hilfe • Schutzmaßnahmen gegen elektrische Körperdurchströmung und Störlichtbögen • Organisation von Sicherheit und Gesundheit bei elektrotechnischen Arbeiten • Fach- und Führungsverantwortung • Mitarbeiterqualifikationen im Tätigkeitsfeld der Elektrotechnik • Einsatz von HV-Systemen im Fahrzeug
	2c	Elektrofachkräfte (bspw. Industrieelektroniker, Elektromonteur, Elektroingenieure)		mindestens 20 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Fach- und Führungsverantwortung • Mitarbeiterqualifikationen im Tätigkeitsfeld der Elektrotechnik • Einsatz von HV-Systemen im Fahrzeug • Aufbau und Wirkungsweise von Bordnetzen in Fahrzeugen
Elektrotechnische Arbeiten unter Spannung	3a	Mitarbeiter mit einer Qualifikation der Stufe 2b und 2c	Voraussetzung für die Qualifizierung zur Stufe 3 ist die erfolgreiche Qualifizierung zur Stufe 2 und die sichere Durchführung der damit verbundenen praktischen Tätigkeiten. Mit der Qualifizierung zum Arbeiten unter Spannung am HV-System können alle elektrotechnischen Arbeiten am Fahrzeug durchgeführt werden.	mindestens 8 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Definition des Anwendungsbereiches • Voraussetzungen für das Arbeiten unter Spannung am HV-System: Befähigung der Mitarbeiter, Organisation der Arbeiten, einzusetzende Schutz- und Hilfsmittel • Praktische Übungen
	3b	Mitarbeiter mit einer Qualifikation nach Stufe 2a Vorbildung: ingenieur- oder naturwissenschaftliches Studium		mindestens 48 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifizierungsinhalte Stufe 3a sowie Vermittlung von praktischen Inhalten zu folgenden Schwerpunkten: • Elektrische Messtechnik • Durchführen von Messungen entsprechend den elektrotechnischen Normen (bspw. VDE-Bestimmungen) • Schaltungstechnik • Gebrauch von Werkzeugen bei der Elektromontage • Verlegen und Befestigen von Leitungen • Aufbauen und Verdrahten von Schaltungen nach Schaltungsunterlagen (Stückliste, Klemmenplan, Aufbauplan, Stromlaufplan) • Sensorik in der Steuerungstechnik • Anschließen und Bedienen von Peripheriegeräten • Prüfen von Funktionen an digitalen Schaltgliedern und Schaltungen • Störungsanalyse, systematische Fehlersuche, Anwenden fahrzeug- und anlagenbezogener Diagnosegeräte • Beheben von Störungen
	3b	Mitarbeiter mit einer Qualifikation nach Stufe 2a Vorbildung: nichtelektrotechnische Facharbeiter- oder Gesellenausbildung		mindestens 100 UE	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifizierungsinhalte Stufe 3a sowie Vermittlung von praktischen Inhalten zu folgenden Schwerpunkten: • Elektrische Messtechnik • Durchführen von Messungen entsprechend den elektrotechnischen Normen (bspw. VDE-Bestimmungen) • Schaltungstechnik • Gebrauch von Werkzeugen bei der Elektromontage • Verlegen und Befestigen von Leitungen • Aufbauen und Verdrahten von Schaltungen nach Schaltungsunterlagen (Stückliste, Klemmenplan, Aufbauplan, Stromlaufplan) • Sensorik in der Steuerungstechnik • Anschließen und Bedienen von Peripheriegeräten • Prüfen von Funktionen an digitalen Schaltgliedern und Schaltungen • Störungsanalyse, systematische Fehlersuche, Anwenden fahrzeug- und anlagenbezogener Diagnosegeräte • Beheben von Störungen

Tabelle 23: Qualifikationsstufen für Berufsbilder mit elektrotechnischem Bezug an Land

Nach Bewertung der an Bord auftretenden Situationen sollten die am Transport beteiligten Personen folgende Kompetenzen besitzen:

- Kenntnisse über die verschiedenen Arten von alternativen Antrieben in Fahrzeugen
- Möglichkeiten zur Erkennung der unterschiedlichen Antriebsarten durch äußere Merkmale
- Verständnis der in den verschiedenen alternativ angetriebenen Fahrzeugen verwendeten Kraftstoffe (CNG, LPG, H₂) und deren Besonderheiten bei der Freisetzung (Dichte, Toxizität, Explosionsgefahr)
- Verständnis der Ursachen eines thermischen Durchgehens in Fahrzeugbatterien
- Kenntnis der möglichen Folgen eines Thermal Runaway in Fahrzeugbatterien (Gasfreisetzung, Brand, Flashbacks)
- Bewertung geeigneter Stellplätze für alternativ betriebene Fahrzeuge auf Autodecks
- Bewertung von Situationen, in denen das Laden von Fahrzeugen an Deck nicht erlaubt sein sollte
- Kenntnis der ersten Maßnahmen beim Gasaustritt aus einem alternativ angetriebenen Fahrzeug
- Kenntnis der Erstmaßnahmen im Brandfall eines alternativ angetriebenen Fahrzeugs
- Verwendung von persönlicher Schutzausrüstung bei Unfällen mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen
- Umgang mit kontaminierten Oberflächen nach einem Brand in einem Elektrofahrzeug

Am Transport von abF beteiligte Personengruppen sollten regelmäßig entsprechend in einem extra dafür konzipierten Weiterbildungskurs geschult werden.

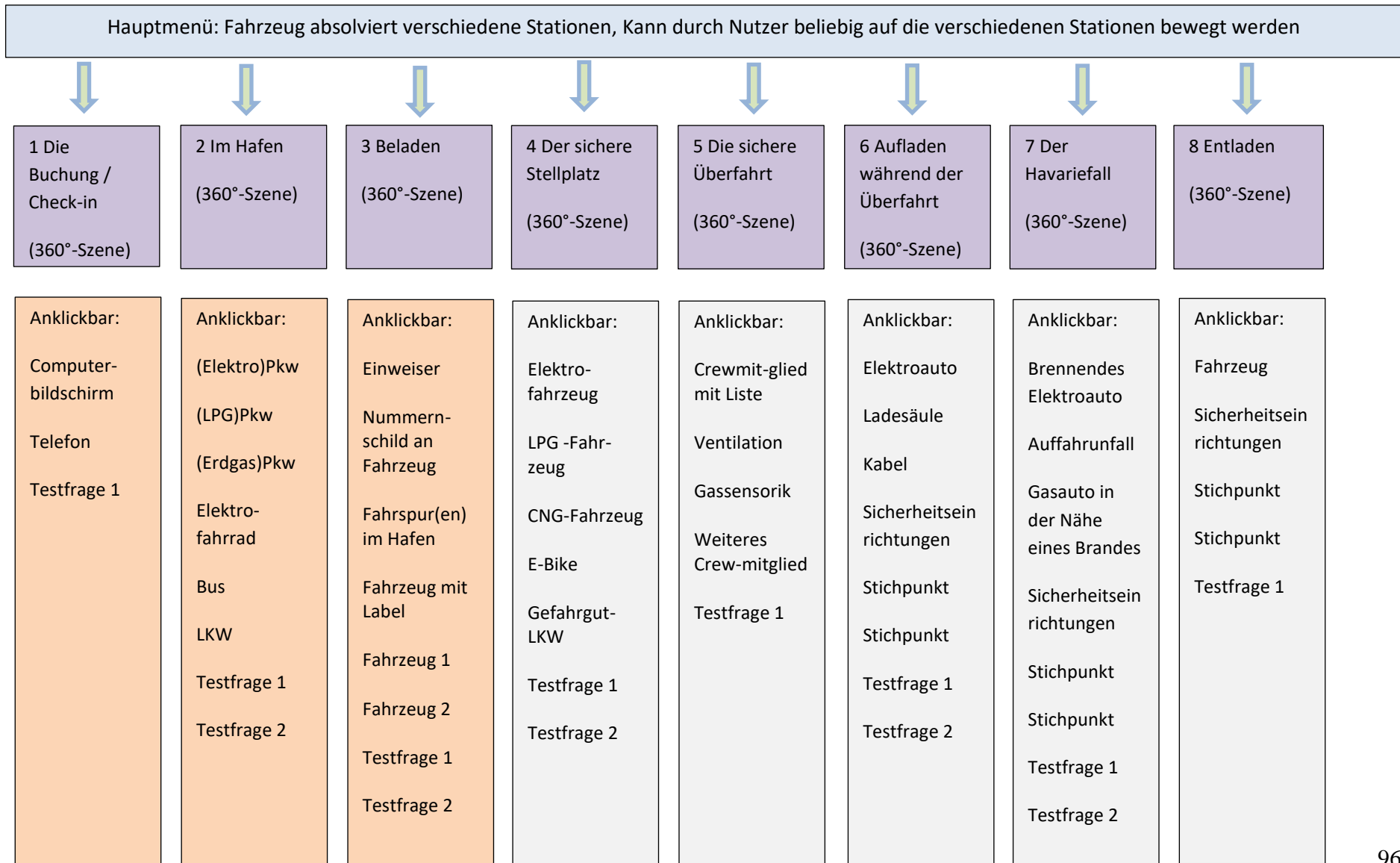
7.1 Erarbeitung von Lehrmaterialien

Innerhalb von AP 6 wurde ein online-basiertes Lehrsystem für die Schulung von am Transport von abF beteiligte Personengruppen konzipiert und umgesetzt. Die Struktur des Lehrsystems basierte dabei auf den einzelnen Abschnitten des Transportprozesses, also

1. Buchung
2. Im Hafen
3. Beladen
4. Der sichere Stellplatz
5. Die sichere Überfahrt
6. Aufladen während der Überfahrt
7. Der Havariefall
8. Entladen

In jedem Kapitel sind spezielle Unterpunkte anklickbar. Zudem wurde ein Plan für die Medienerstellung (360 °-Fotos) an Bord gemacht.

Grundstruktur Lehrprogramm „Umgang mit alternativ betriebenen Fahrzeugen auf RORO-Fährschiffen“



Plan für die Standorte für die Medienerstellung

Kapitel 1 - Buchung / Check-in: Hier wird erklärt, dass man bereits während der Buchung die verschiedenen Typen von abF erfassen sollte und welche Fragen auf die Mitarbeiter der Buchungszentrale in dem Zusammenhang zukommen können.

360°- Szene: Standort: In der Buchungszentrale einer Fährreederei, anklickbar sind: Telefon, Mitarbeiter(in), Computerbildschirm

Kapitel 2 - Im Hafen: In diesem Kapitel wird erklärt, welche Typen alternativ betriebener Fahrzeuge es generell überhaupt gibt und sehr vereinfacht der Aufbau erklärt.

360°- Szene: Standort: Auf der Vorstauffläche, dort sieht man verschiedene Fahrzeuge / Fahrzeugtypen, anklickbar sind: verschiedene Pkws, Lkw, Bus, E-Bike (wenn nicht alle dieser Fahrzeuge / Fahrzeugtypen für ein Foto gleichzeitig da sind, kann man diese teilweise noch später einmontieren)

Kapitel 3 – Beladen: In diesem Kapitel wird erklärt, woran alternativ betriebene Fahrzeuge äußerlich zu erkennen sind und welche organisatorischen Maßnahmen man treffen kann, um sie zu unterscheiden (Vorsortieren durch Extra Spuren, Labelling,...)

360°- Szene: Standort: direkt vor der Einfahrt auf die Fähre, wenn man nach vorn schaut, sieht man die Einfahrt, wenn man zurück schaut, sieht man die Fahrzeuge in den verschiedenen Zufahrtsspuren, anklickbar sind: Der Einweiser an der Einfahrt, verschiedene Fahrzeuge auf den einzelnen Fahrspuren

Kapitel 4 - Der sichere Stellplatz: In diesem Kapitel wird erklärt, welche Gefahren von den einzelnen Fahrzeugen ausgehen und es wird EMPFOHLEN, sie auf besondere Stellplätze zu stellen oder in besondere Bereiche des Schiffes

360°- Szene: Standort: auf dem geschlossenen Fahrzeugdeck, normale Parksituation während einer Überfahrt, anklickbar sind verschiedene parkende Fahrzeuge und verschiedene Bereiche auf dem Fahrzeugdeck

Kapitel 5 – Die sichere Überfahrt: In diesem Kapitel wird erklärt, welche Sicherheitseinrichtungen an Bord vorhanden sein sollten, um abF sicher zu transportieren, auch welche organisatorischen Maßnahmen durchgeführt werden sollten (z.B. auch Rettungsdatenblätter an Bord)

360°- Szene: Standort: auf dem geschlossenen Fahrzeugdeck, möglichst wenig Fahrzeuge, damit die verschiedenen Sicherheitseinrichtungen nicht verdeckt werden, anklickbar sind z.B. Brandmelder, Sprinkler, Feuerlöscheinrichtungen, Ventilation, ...

Kapitel 6 - Aufladen während der Überfahrt: In diesem Kapitel wird alles zum Thema Ladesäule und Laden erklärt sowie Empfehlungen zu Sicherheitseinrichtungen rund um den Ladeprozess gegeben.

360°- Szene: Standort: auf dem geschlossenen Fahrzeugdeck, man sieht ein Fahrzeug, das an einer Ladesäule aufgeladen wird (da es bisher keine Ladesäulen Gibt an Bord, muss das wohl einmontiert werden), anklickbar sind die Ladesäule, das Kabel, das Fahrzeug und verschiedene Sicherheitseinrichtungen in der Nähe (z.B. Überwachungskamera, muss ggf. auch einmontiert werden)

Kapitel 7 - Der Havariefall: In diesem Kapitel werden die verschiedenen Havariearten vorgestellt und erklärt, welche Gefahren dabei entstehen können (z.B. Freisetzen giftiger Gase) und welche Maßnahmen die Mannschaft ergreifen sollte

360°- Szene: Standort: analog Kapitel 4, an einem Fahrzeug wird ein Feuer einmontiert, an einem Fahrzeug eine Rauchwolke, anklickbar ist das brennende Fahrzeug und das rauchende Fahrzeug sowie verschiedene Sicherheitseinrichtungen (Sprinkler, Feuerlöschgeräte, Ventilation,...)

Kapitel 8 – Entladen: In diesem Kapitel wird u.a. erklärt, was zu tun ist, wenn ein abF stehen bleibt

360°- Szene: Standort: Ausfahrt aus dem Schiff, Klappe ist schon geöffnet, wenn man nach vorn schaut, sieht man durch die geöffnete Klappe die Hafengebiete, wenn man nach hinten schaut, sieht man Fahrzeuge auf dem Fahrzeugdeck, anklickbar sind zwei Fahrzeuge und ggf. ein Abschleppvorrichtung (muss einmontiert werden)

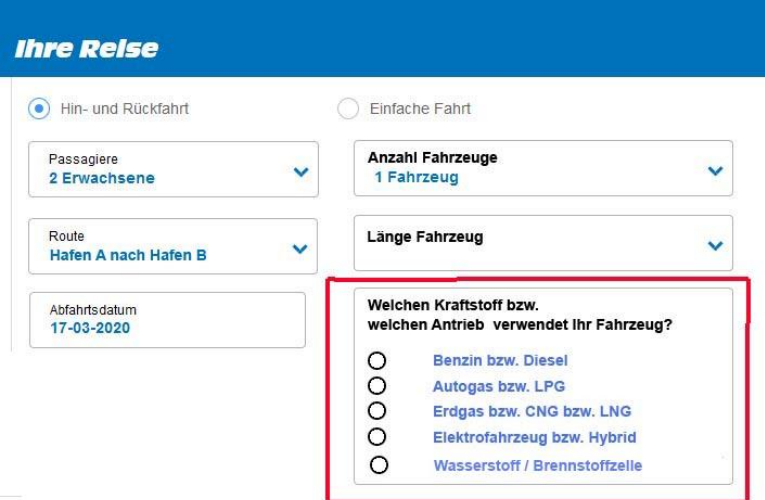
Bei zwei Fototerminen an Bord der RORO-Fähre „Mecklenburg-Vorpommern“ wurde umfangreiches Foto- und Videomaterial erstellt. Für diesen Zweck wurde uns von dem Autohaus Ferdinand Schulz Nachfahren in Rostock ein Elektro VW iD3 zur Verfügung gestellt. Ein Ladepunkt wurde als Attrappe gebaut und an einer geeigneten Stelle auf dem Fahrzeugdeck installiert.

Gemäß der Gliederung wurden für die einzelnen Kapitel ausführliche Drehbücher in Deutsch und Englisch erarbeitet. Das Drehbuch beschreibt genau, wann welche Bilder / Animationen erscheinen bzw. welche Informationen als Schrifttext oder als Sprechertext vermittelt werden sollen. Im Folgenden wird beispielhaft das Kapitel 1 dargestellt. Die Drehbücher für alle Kapitel befinden sich im digitalen Anhang.

Kapitel „Buchung / Check-in“:

Nach Anklicken Kapitel „Buchung / Check-in“

Ablauf	Regie	Inhalte (<i>kursiv - Regieanweisungen</i> , normal – dieser Text soll tatsächlich erscheinen)	Englisch
1	Großes Foto (Kapiteleingangsszene) einblenden oder 360°Szene, im Foto soll vorhanden und anklickbar sein: 1. Computerbildschirm 2. Telefon 3. Testfrage 1 (Nach kurzer Zeit Klickhinweis auf diese Dinge setzen)	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;"> <p>Bild 1.0 (360°)</p> <p>Szene stellt eine Buchungszentrale dar, Büroszene, ggf. „maritime Landschaft“ durch die Fenster sichtbar</p> </div>	
2	Text wird gesprochen	Für die Schiffsführung und die Crew ist es wichtig, einen möglichst genauen Überblick zu haben, welche Arten von Fahrzeugen sich bei jeder Überfahrt an Bord befinden. Deshalb sollte bereits bei der Buchung vom Passagier abgefragt werden, über welchen Antrieb sein Fahrzeug verfügt. Schauen Sie sich in der Buchungszentrale um und finden Sie interaktive Elemente. Wenn Sie diese anklicken, bekommen Sie weitere Informationen.	It is important for the ship's management and for the crew to have a most exact overview about the types of vehicles that are onboard during each passage. That's why passengers should be already asked at the booking about the kind of fuel the vehicle is powered with. Have a look around the booking centre and find interactive elements. Click on and you will get further information.
	Text wird eingeblendet	Es sollte bereits bei der Buchung vom Passagier abgefragt werden, über welchen Antrieb sein Fahrzeug verfügt. <i>Bitte klicken Sie die einzelnen Elemente im Bild an!</i>	Passengers should be already asked at the booking about the kind of fuel the vehicle is powered with. <i>Please click on the single elements in the picture!</i>
3	Bei Klick auf 1 (Computer): Kapiteleingangsszene verschwindet,		

	Navigation zur Kapiteleingangsszene aber immer möglich		
3a	Text wird gesprochen (nach Mausklick kommt 3b),	Die meisten Buchungen werden heute durch die Kunden online getätigt. Für die Durchführung angepasster Sicherheitsmaßnahmen ist es sinnvoll, bereits während der Buchung die verschiedenen Antriebsarten abzufragen. Dies kann über das bereitgestellte Buchungsformular erfolgen. Mögliche Abfragemöglichkeiten sind z.B. <ul style="list-style-type: none"> • Benzin bzw. Diesel • Autogas bzw. LPG • Erdgas bzw. CNG bzw. LNG • Elektrofahrzeug bzw. Hybrid • Wasserstoff bzw. Brennstoffzelle 	Today most bookings are made by customers online. For the implementation of adapted safety measures, it is useful to already query the different fuel and propulsion types during booking. This can be done using the booking form provided. <p>Possible query options are e.g.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petrol or Diesel • Liquefied Petroleum Gas/LPG • Compressed Natural Gas/CNG or Liquefied Natural Gas/LNG • Electric Vehicle or Hybrid • Hydrogen or Fuel Cell
	Text wird eingeblendet	Mögliche Abfragemöglichkeiten auf dem Buchungsformular sind z.B.	Possible query options on the booking form are e.g.
3b	Grafisch Buchungsformular andeuten Es werden nur die rot umrandeten Auswahlmöglichkeiten gesprochen und nacheinander eingeblendet (nach Mausklick kommt 3c)	 <p>The screenshot shows a booking form titled "Ihre Reise". It includes several dropdown menus: "Passagiere" (2 Erwachsene), "Route" (Hafen A nach Hafen B), and "Abfahrtsdatum" (17-03-2020). There are also radio buttons for "Hin- und Rückfahrt" (selected) and "Einfache Fahrt". Other dropdowns include "Anzahl Fahrzeuge" (1 Fahrzeug) and "Länge Fahrzeug". A red box highlights a section titled "Welchen Kraftstoff bzw. welchen Antrieb verwendet Ihr Fahrzeug?" with five radio button options: "Benzin bzw. Diesel", "Autogas bzw. LPG", "Erdgas bzw. CNG bzw. LNG", "Elektrofahrzeug bzw. Hybrid", and "Wasserstoff / Brennstoffzelle".</p>	
3c	Text einblenden und sprechen	Die Anzahl der verschiedenen alternativ betriebenen Fahrzeuge sollte der Schiffsführung vor Beginn des Beladevorganges übermittelt werden.	The number of different alternatively powered vessels should be communicated to the ship's management before loading begins.

Grafik 1.1

	Nach Mausclick Navigation zurück zur Kapiteleingangsszene blenden		
4	Bei Klick auf 2 (Telefon): Kapiteleingangsszene verschwindet, Telefonhörer wird größer eingeblendet		
4a	Text wird gesprochen (nach Klick 4b)	Im Zusammenhang mit alternativ betriebenen Fahrzeugen werden vermehrt entsprechende Anfragen in der Buchungszentrale eingehen. Es ist wichtig, dass es dazu reedereiintern festgelegte Antworten gibt. Stellen Sie sich u.a. auf folgende oder ähnliche Fragen ein:	In relation to alternatively powered vehicles, the booking centre will increasingly receive corresponding enquiries. It is important to have fixed answers available within the shipping company. Be prepared to answer the following or similar questions, among others:
	Text wird eingeblendet (nach Klick 4b)	Stellen Sie sich auf Kunden-Anfragen im Zusammenhang mit alternativ betriebenen Fahrzeugen ein.	Respond to customer enquiries related to alternatively powered vehicles.
4b	Fragen als Text nacheinander neben dem Hörer einblenden und jeweils von einer anderen Stimme (männlich, weiblich) sprechen lassen (nach Klick 4c)	Gibt es eine Ladesäule im Hafengebiet? Kann ich mein Elektroauto während der Überfahrt aufladen? Kann ich mein E-Bike während der Überfahrt aufladen? Darf ich meine eigenen Kabel zum Aufladen benutzen? Wo muss ich mich melden, wenn ich mein Fahrzeug laden möchte? Kostet das Aufladen extra? Gibt es an Bord gesonderte Stellplätze für Elektrofahrzeuge?	Is there a charging point available in the port area? May I charge my electric car during the passage? May I charge my e-bike during the passage? Can I use my own cables for charging? Where do I have to report if I want to load my vehicle? Does it cost any extra money to charge? Are there separate parking spaces for electric vehicles on board?
4c	Text wird gesprochen, Nach Mausclick Navigation zurück zur Kapiteleingangsszene blenden	Denken Sie auch daran, die Fragen und Antworten, je nach Fahrtgebiet, in anderen Sprachen vorzubereiten.	Also remember to prepare the questions and answers in other languages, depending on vessels sailing route.
	Text wird eingeblendet	Bereiten Sie sich auf Anfragen in verschiedenen Sprachen vor.	Prepare for requests in different languages.

Tabelle 24: zweisprachiges Drehbuch für das Kapitel 1 des online-Lehrsystems

Die Layout-Gestaltung sowie die programmiertechnische Umsetzung der Drehbücher erfolgte durch die Firma ANOVA GmbH im Unterauftrag. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Screenshots aus dem fertigen System.

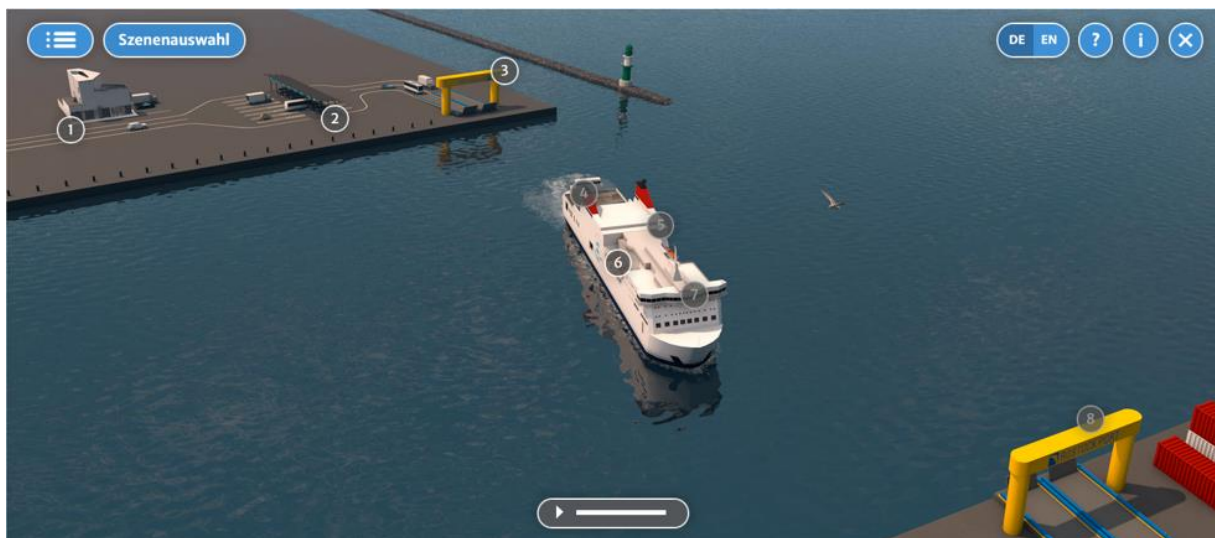


Abbildung 63: Hauptmenü des Lehrprogrammes, oben rechts: u.a. Umschaltmöglichkeit zwischen Deutsch und Englisch, bei Klick auf die Zahlen kommt man in die jeweiligen Kapitel, z.B. 1 – „Buchung“

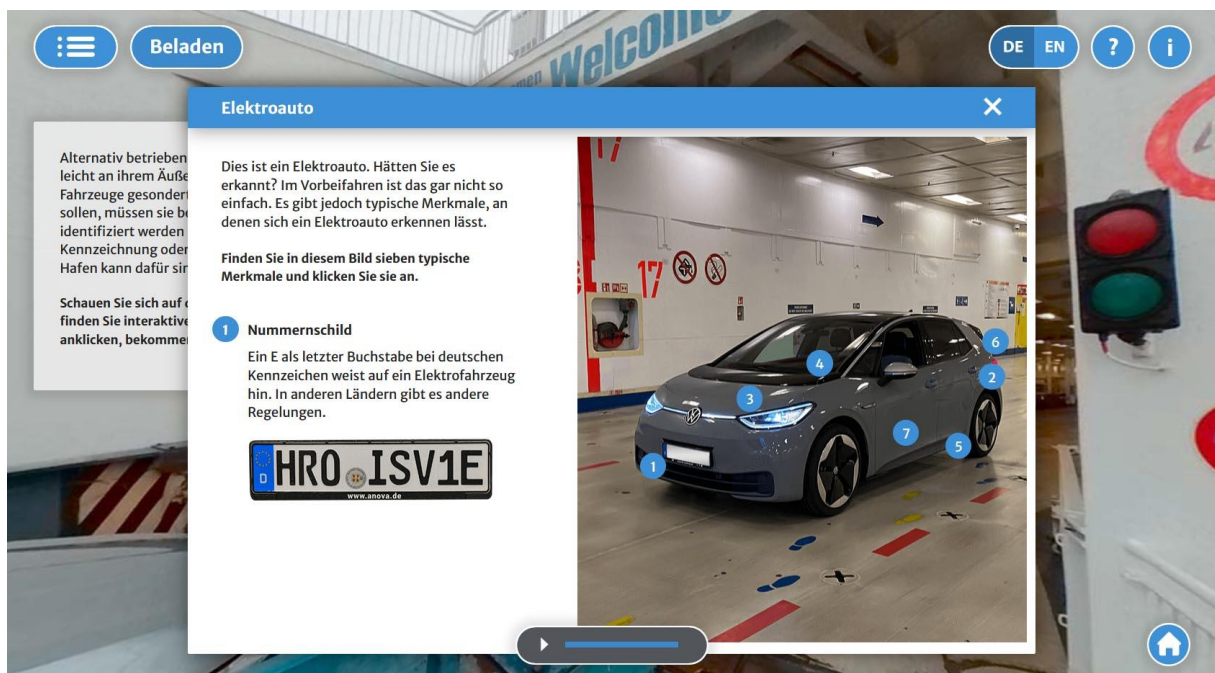


Abbildung 64: Screenshot aus dem Lehrprogramm, Kapitel „Beladen“

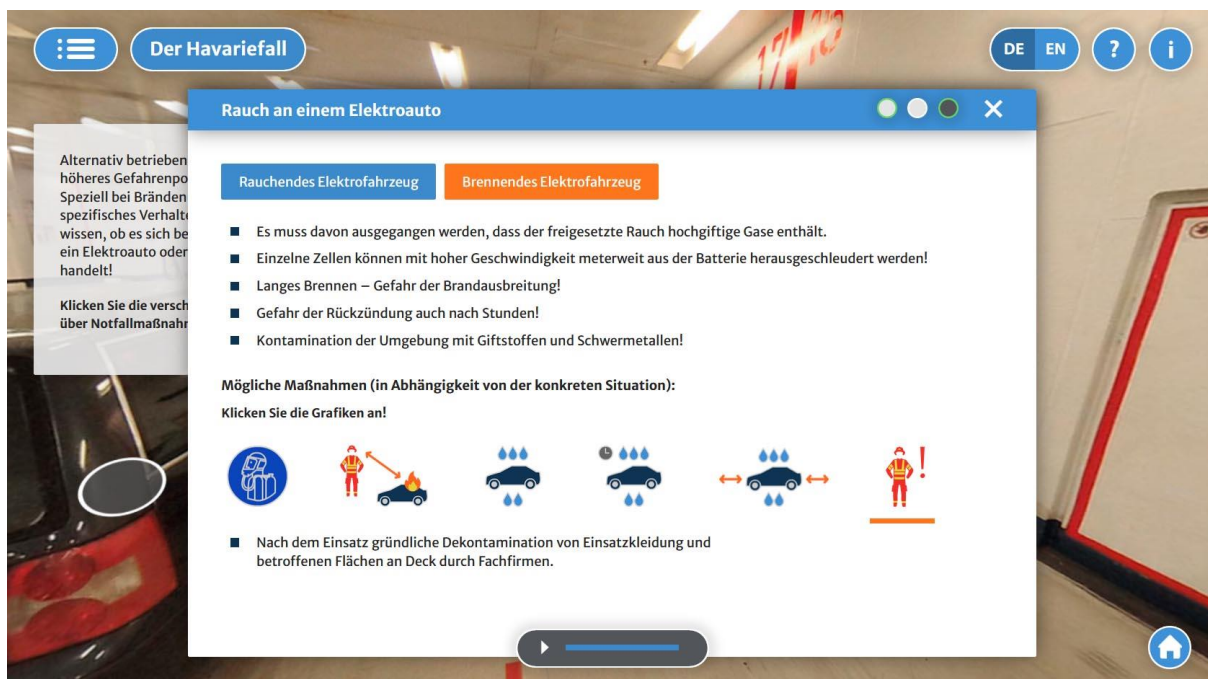


Abbildung 65: Screenshot aus dem Lehrprogramm, Kapitel „Der Havariefall“

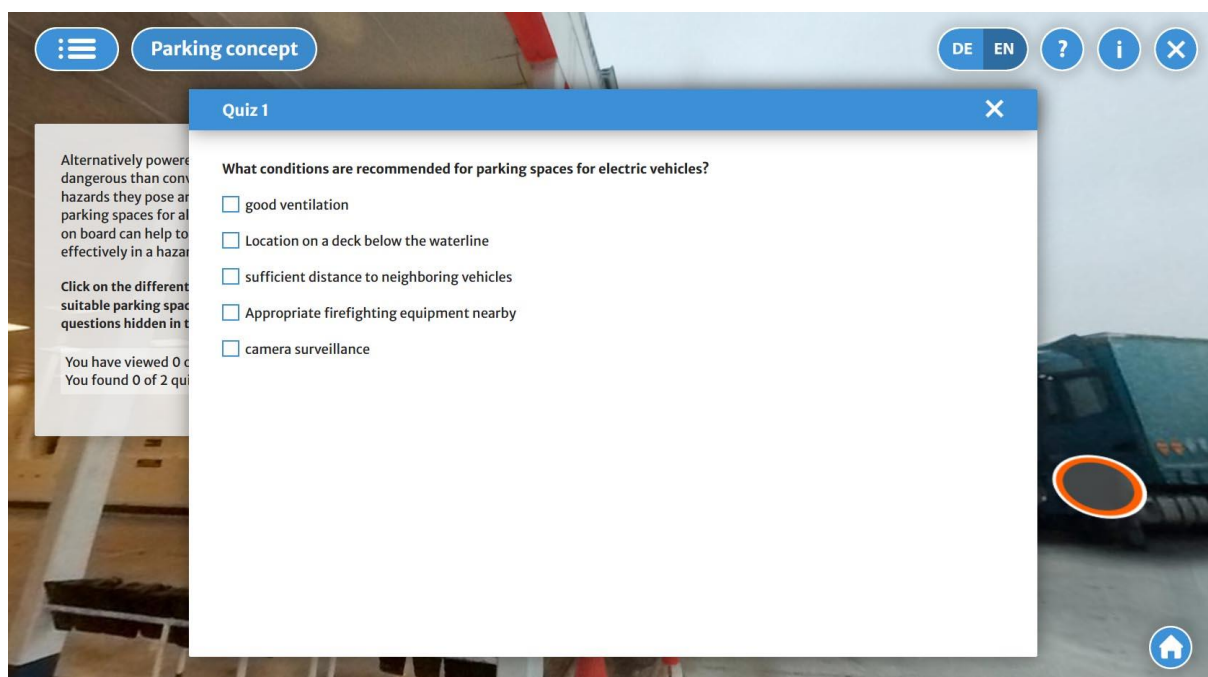


Abbildung 66: Screenshot aus dem Lehrprogramm, Kapitel „Parking Concept“, Testfrage

Das Lehrprogramm wurde allen assoziierten Partnern zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Kommentare zur Verbesserung wurden innerhalb einer Korrekturschleife eingearbeitet. Das Programm ist fertig und steht Interessenten zur sofortigen Nutzung zur Verfügung. Auf der Webseite des ALBERO-Projekts steht eine DEMO-version zur Verfügung.

8. AP 7 – Gesamtkonzept

Die von den einzelnen Partnern innerhalb des ALBERO-Projektes erarbeiteten Konzepte und Sicherheitsmaßnahmen für den sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen an Bord von RORO-Schiffen und das sichere Aufladen an Bord wurden in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst. Dieser wurde den relevanten nationalen (BMVI) und internationalen Stellen (European Maritime Safety Agency EMSA und LASHFIRE-Projekt) zur Verfügung gestellt. Zudem bildet er eine wichtige Grundlage für das Formal Safety Assessment (FSA), das während des Projektes unter Federführung des Projektpartners Lloyds Register begonnen wurde. Neben den spezifischen Maßnahmen für konkrete Probleme sind darin die folgenden Ergebnisse und Vorschläge formuliert, die gesamtgesellschaftlich bzw. politisch bearbeitet werden sollten:

- Es sollte eine allgemeine europäische Regelung geben, die eine einfache Erkennung der Antriebsart schnell von außen ermöglicht, z.B. durch die spezielle Farbe des Kennzeichens (muss von den europäischen Behörden vereinbart werden).
- Wir empfehlen die Ausgabe eines optischen und / oder akustischen Alarmsignals, wenn das Batteriemanagementsystem eines Elektroautos einen schwerwiegenden Ausfall erkennt (muss von Herstellern von Elektroautos realisiert werden, muss ihnen von europäischen Behörden vorgeschrieben werden). Auch ein „stummes“ Funksignal an die Schiffsbrücke oder den Betreiber eines Parkhauses könnte sinnvoll sein.
- Für eine effektive Kühlung im Falle eines thermischen Durchgehens einer EV-Batterie könnte eine Art Zugang zum Inneren des Batteriepacks zur direkten (Wasser-)Kühlung der Batterie sinnvoll sein. (Muss von Herstellern von Elektroautos realisiert werden, muss ihnen von europäischen Behörden abverlangt werden)
- Es sollte eine technische Möglichkeit entwickelt werden, um in einer Unfallsituation ein Fahrzeug ohne Zerstörung (des Kabels) von einer Ladestation zu trennen.
- Flammenrückschläge können auftreten, wenn in einem beschädigten Batteriemodul noch intakte Zellen vorhanden sind. Zur Verbesserung der Sicherheit nach einem Brand in einem Elektrofahrzeug soll ein Verfahren/technisches System entwickelt werden, das eine sichere Entladung nicht betroffener Restzellen in teilweise beschädigten Fahrzeugbatteriemodulen gewährleistet.
- Regelmäßige Schulungen der verantwortlichen Personen (Schiffsbesatzungen, Feuerwehrleute an Land, ...) sollten obligatorisch sein.

Der komplette Maßnahmenkatalog ist dem Bericht als Anhang beigelegt.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Teilprojektes „Qualifikation von maritimem Personal für den sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen im Fährverkehr“ im Verbundprojekt ALBERO hat das Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V. verschiedene Konzepte für den sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen sowie das Aufladen während der Fahrt an Bord von RORO-Fähren mitentwickelt und getestet.

Das ISV ist aktiv bestrebt, diese Erkenntnisse durch Vorträge, Publikationen und Workshops auch nach Abschluss des Projektes in entsprechenden Kreisen zu verbreiten und Verbesserungen durchzusetzen, dazu gehört u.a.:

- die Mitarbeit in verschiedenen nationalen und internationalen Arbeitskreisen und Gremien zur Verbesserung der Schiffssicherheit
- die Übertragung der Ergebnisse in relevante andere Branchen, z.B. im Zusammenhang mit Parkhäusern oder Tiefgaragen mit Stell- und Ladeplätzen für Elektrofahrzeuge
- die Zusammenarbeit mit Herstellern von alternativ betriebenen Fahrzeugen zur konstruktiven Verbesserung der Sicherheit von Fahrzeugen
- die Zusammenarbeit mit Herstellern von Ladeinfrastruktur zur Entwicklung einer schiffsspezifischen Ladesäule bzw. zur generellen Verbesserung eines sicheren Ladevorganges

Die erarbeiteten Konzepte und Ergebnisse stellen grundlegende Ansätze dar, die für die konkreten Schiffe oder Reedereien angepasst werden können. Als ein wichtiges Projektergebnis ist auch die generelle wissenschaftliche Versachlichung des Themas zu nennen. So wird es allmählich immer besser möglich, die vielfach insbesondere die von Elektrofahrzeugen ausgehenden Gefahren seriös auf der Basis von Forschungsergebnissen zu bewerten.

Während der Projektbearbeitung ergab sich auch die Erkenntnis, dass eine deutlich bessere Zusammenarbeit aller an dem Thema forschenden Arbeitsgruppen, zumindest in Deutschland angestrebt werden sollte. Real-Brandversuche mit Elektrofahrzeugen sind für die beteiligten Forscher aber auch für die Umwelt eine extreme Belastung. Ein effektiver Austausch von Ergebnissen ist sinnvoll, damit diese aufwendigen und nicht ungefährlichen Versuche besser koordiniert werden können.

10. Veröffentlichungen

2019

D. Meißner	15. 05. 2019	4. Elektromobilitätsmesse in Rostock, Vortrag: Vorstellung des Projektes ALBERO
J. Edler D. Meißner		„Elektroautos mit und als Gefahrgut an Bord“ Artikel in Ingenieurwissenschaften 05/ 2019, S. 8

2020

D. Meißner	21. 09. 2020	Online Veranstaltung: Vortrag: Fire detection on closed RORO spaces
D. Meißner	14. 10. 2020	Online-WEBINAR des Projektes LASHFIRE, Gastvortrag: „Results of the Project ALBERO“
D. Meißner	15. 12. 2020	Online-Konferenz FIVE “Fire in Vehicles” – Vortrag: “Results of the Project ALBERO”
J. Edler		Alternativ betriebene Fahrzeuge an Bord von RoPax-Schiffen Schiff&Hafen, Nr.7, Juli 2020

2021

D. Meißner	26. 01. 2021	Online- Fachtagung “Li-Ionen-Batterien”, Vortrag: Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fäherschiffen - das Projekt ALBERO”
D. Meißner	25. 02. 2021	Online-Veranstaltung MCN und VDI, Vortrag: “Ergebnisse des Projektes ALBERO”
D. Meißner	08. 09. 2021	Forum Elektromobilität Neubrandenburg, Vortrag “Ergebnisse des Projektes ALBERO”
D. Meißner	21. 09. 2021	Internationale Konferenz AUBE Automatische Branderkennung Duisburg, Vortrag: Transport of alternatively powered vehicles on RORO-Ferries – the Project ALBERO” Proceedings
D. Meißner	14. 10. 2021	Abschlussveranstaltung des Projektes ALBERO, Vortrag “Havarierte Li-Ionen-Batterien - Die Gas-Gespenster”
D. Meißner	14. 12. 2021	Internationale Konferenz CFIS „Conference on Fire Safety at Sea“ Vortrag: „Damaged Li-Ion- Batteries – the gas ghosts“

Geplant 2022:

D. Meißner	28. 04. 2022	„Fachkonferenz & Seminare Lithiumbatterien 2022 in Göttingen, Vortrag: Brandbegrenzungsdecken bei Havarien von Elektrofahrzeugen - Einsatzszenarien und praktische Tests
D. Meißner	01.06.2022	DMT-Fachtagung „Brandschutz im Schiffbau“ in Bremerhaven, Vortrag: Das ALBERO-Projekt - Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fäherschiffen

11. Literatur

- [1] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>
- [2] <https://gas.info/presse-publikationen/gas-statistik/kenndaten-mobilitaet>
- [3] International Maritime Dangerous Goods Code, Verkehrsblatt 2016, S. 718ff.
- [4] R. Gaßner „SP 962 stiftet Verwirrung“, Der Gefahrgutbeauftragte 03/2012, S. 5
- [5] BMVI-Formal Safety Assessment: Electric mobility on RoRo / RoPax vessels, Report-Nr. MAGDE717 2014.114
- [6] IMO SUB-COMMITTEE ON SHIP SYSTEMS AND EQUIPMENT, SSE 2 / Inf. 3 „Transport of electric vehicles and vehicles with refrigeration units on board ro-ro vessels“, 19.12. 2014
- [7] International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 17.06. 2016
- [8] U. Lohmann Vortrag „Fire Protection on ro-ro vessels Investigations by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure“, Workshop on fires on ro-ro decks“ der European Maritime Safety Agency ; 25. 09. 2015, Lissabon
- [9] Markus Egelhaaf, David Kress, Dieter Wolpert, Hartung Wilstermann, Rainer Justen: Löschversuche an Li-Ionen Traktionsbatterien, Deutsche Feuerwehrzeitung 2/13, S. 104
- [10] J. Kunkelmann “Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Forschungsbericht Nr. 192, Karlsruhe 2017
- [11] International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Sea farers (STCW 95)
- [12] https://de.wikipedia.org/wiki/Thermisches_Durchgehen
- [13] H. Döring, M. Wörz: *Initializing of thermal runaway for Li-Ion cells*, **Workshop JRC 2018**, Petten <https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/initializing-of-thermal-runaway-for-lithium-ion-cells.pdf>
- [14] Melcher, A.; Ziebert, C.; Rohde, M.; Seifert, H.J. *Modeling and Simulation of the Thermal Runaway Behavior of Cylindrical Li-Ion Cells—Computing of Critical Parameters*. **Energies** **2016**, **9**, 292.
- [15] Quelle: Dr. Jochen Mähliß, Li-Ionen-Batterietechnologie, Vortrag an der Hochschule RheinMain Rüsselsheim, Juni 2016 <https://www.hs-rm.de/fileadmin/persons/khofmann/Gastvortraege/Vortragsfolien/20160603-Maehliiss-Lithium-Ionen-Batterietechnologie.pdf>
- [16] Andrey W. Golubkov et. al : Thermal runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivon-type cathodes, RSC Adv., 2014(4), 3633 - 3642
- [17] Michael Buser, Jochen Mähliß: Lithiumbatterien Brandgefahren und Sicherheitsrisiken, 2016
- [18] Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center, Aviation Research Division: Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis, Final Report, 2016 <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-15-59.pdf>
- [19] Alexander Königseder: Investigation of the Thermal Runaway in Lithium Ion batteries, Masterarbeit, Technischen Universität Graz, März 2017 <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5a1df03198f5a&location=browse>
- [20] Antonio Nedjalkov et.al.: Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution, Batteries 2016, 2, 5
- [21] Fredrik Larsson et. al.: Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires doi:10.1038/s41598-017-09784-z
- [22] Ulrika Bergström et.al. Vented Gases and Aerosol of Automotive Li-ion LFP and NMC Batteries in Humidified Nitrogen under Thermal Load, Rapport Number FOI-R—4166—SE, Dezember 2015 <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/27998.pdf>
- [23] M. Ghiji; V. Novozhilov; K. Moinuddin; P. Joseph; I. Burch, B. Suendermann; G.Gamble: A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression, *Energies* **2020**, **13**(19), 5117
- [24] J. Vetter et. al.: Ageing mechanisms in lithium-ion batteries *Journal of Power Sources* **147** (2005) 269–28
- [25] I. Belharouak; W. Lu; D. Vissers; K. Amine: Safety characteristics of Li(Ni_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05})O₂ and Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂, *Electrochemistry Communications*, Volume 8, Issue 2, February 2006, Pages 329-335

- [26] J. C. Hewson, S. P. Domino: Thermal runaway of lithium-ion batteries and hazards of abnormal thermal environments, thU.S. National Combustion Meeting Organized by the Central States Section of the Combustion Institute, May 17-20, 2015 Cincinnati, Ohio
- [27] N. E. Galushkin et al. Mechanism of Thermal Runaway in Lithium-Ion Cells 2018 J. Electrochem. Soc. 165 A1303
- [28] <https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kompndium-li-ionen-batterien-data.pdf>
- [29] J. Wandt, A. T.S. Freiberg, A. Ogrodnik, H. A. Gasteiger: Singlet oxygen evolution from layered transition metal oxide cathode materials and its implications for lithium-ion batteries, Materials Today Volume 21, Number 8 October 2018
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Limiting_oxygen_concentration
- [31] R. Bisschop; O. Willstrand; F. Amon; M Rosengren: Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles RISE Report 2019:50, Borås 2019
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1317419/FULLTEXT02>
- [32] F. Larsson: Thermal propagation in Li-Ion-Batteries, RISE 2018
<https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/thermal-propagation-in-lithium-ion-batteries.pdf>
- [33] J. Becker: Feuer in Elektrofahrzeugen Brennende Fragen Süddeutsche Zeitung, 11. März 2021
<https://www.sueddeutsche.de/auto/elektroauto-feuer-batteriebrand-1.5224993>
- [34] J. Thorns: Einsatz der Feuerwehr und des Rettungsdienstes an Elektrofahrzeugen, Deutsche Feuerwehrzeitung, Verlag W. Kohlhammer, 73. Jahrgang, 12/2019, S.965
<http://www.feuerwehr-eggenfelden.com/images//Beitraege/Download/Elektrofahrzeuge.pdf>
- [35] R. Thomas Long Jr., Andrew F. Blum, Thomas J. Bress, and Benjamin R.T. Cotts - Exponent, Inc. Fire Protection Research Foundation report: "Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results", July 2013,
<https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Emergency-Responders/Emergency-Response-to-Incident-Involving-Electric-Vehicle-Battery-Hazards>
- [36] M. Egelhaaf, D. Kress, D. Wolpert and T. Lange, "Fire Fighting of Li-ion Traction Batteries," SAE International Journal of Alternative Power, vol. 2, no. 1, pp. 37-48, 2013.
- [37] DNV-GL: Technical Reference for Li-ion_Battery Explosion Risk and Fire Suppression, Report No.: 2019-1025, Rev.4
- [38] Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Strassen, Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen, Forschungsprojekt AGT2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnel-forschung (AGT)
https://plus.empa.ch/images/2020-08-17_Brandversuch-Elektroauto/AGT_2018_006_EMob_RiskMin_Unterird_Infrastr_Schlussbericht_V1.0.pdf
- [39] <https://money.cnn.com/2018/05/17/news/companies/electric-car-fire-risk/index.html>
- [40] R. Skarics: Wie oft brennen Elektroautos im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor?, Autorevue, 2017
<https://autorevue.at/ratgeber/statistik-brennen-elektroautos>
- [41] S. Hajek: Brennen E-Autos wirklich öfter als Diesel und Benziner? Wirtschaftswoche 2019, 2021
<https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/brandgefahr-spontane-selbstentzuendung-nur-ein-mythos/24457024-3.html>
- [42] F. Larsson, P. Andersson, B.-E. Mellander: Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests, Batteries 2016, 2, 9; doi:10.3390/batteries2020009
- [43] <https://www.dekra-solutions.com/2017/11/wenn-das-fahrzeug-feuer-faengt/>
- [44] M. Thronsen: Slik vinner du elbildebildiskussionen #6: Er elbiler brannfarlige?, 2018
<https://elbil.no/slik-vinner-du-elbildebildiskussionen-6/>
- [45] <https://www.statista.com/statistics/377006/number-of-us-highway-vehicle-fires/>
- [46] National Fire Data center: Highway Vehicle fires (2014 – 2016), Topical Fire Report Series, 19(2), 2018
<https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/statistics/v19i2.pdf>
- [47] https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_flame_temperature#cite_note-Physics_p._15-51-3
- [48] P.Huang, Q. Wang: The combustion behavior of large scale lithium titanate battery, Scientific Reports 5, 2015
- [49] W.K. Chow and S.S. Han: Estimation of heat release rate for gasoline pool fires, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol.9 (2), 2007 p.59-64

- [50] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple, J. Anderson; Toxic Gases from Electric Vehicle Fires, RISE Research Institutes of Sweden, https://www.ri.se/sites/default/files/2020-12/FIVE2020_Willstrand.pdf
- [51] Peiyi Sun, Roeland Bisschop, Huichang Niu, Xinyan Huang: A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technology* 4, 2020
- [52] M. Dienst, Über Lateralpläne, Resilienz und Seetüchtigkeit, <https://www.grin.com/document/415904>
- [53] Naturverhältnisse Ostsee, Teil B zu den Handbüchern für die Ostsee und das Kattegat, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie
- [54] <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klima/1981-2010/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/ostseekueste/coastdat-2.html>
- [55] Memorandum of Understanding for the Transport of Packaged Dangerous Goods on Ro-Ro Ships in the Baltic Sea <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/IMoU%202017%20Lubeck%20edition.pdf>
- [56] T. Cepowski "Influence analysis of changes of design parameters of passenger-car-ferries on their selected sea-keeping Qualities Polish Maritime Research1(63) 2010 Vol 17; pp. 25-32
- [57] H. Meier-Peter, F. Bernhardt (Hrsg) „Handbuch Schiffsbetriebstechnik“ 2. Auflage, DVV Media Group GmbH Hamburg, 2012, S. 1007
- [58] Kurt Illies „Handbuch der Schiffsbetriebstechnik“ Vieweg, 1970, S.487
- [59] <https://www.ostsee.de/schon-gewusst/salz.html>
- [60] <https://www.io-warnemuende.de/wird-die-ostsee-zum-suesswassermeer.html>
- [61] U. Jessel „Beiträge zur Spurenstoffchemie der Meeres- und Brandungsluft“, *Archiv für Physikalische Therapie* 1955, Vol. 7: 230-234
- [62] Textbook of maritime medicine: Vibration on board ships <http://textbook.ncmm.no/index.php/49-textbook-of-maritime-medicine/18-vibration/729-vibration-on-board-ships>
- [63] J. Örn „Vibration guideline for large diesel engines“ University of applied science, Vasaa, 2014
- [64] J. Werny: Mit dem ADR über die Ostsee, www.gefahrgut-online.de 10 / 2011 <https://media1.autohaus.de/fm/5293/main.8905284.pdf>
- [65] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/2/2b/Road_freight_transport_of_dangerous_goods_by_type_of_goods%2C_EU-28%2C_2017_%28%25_share_in_tonne-kilometres%29.png
- [66] https://www.brandskyddsforeningen.se/globalassets/brandforsk/rapporter-2000-2015/matning-av-miljopaverkan-av-brander.-ecotox/bf_700_121_rapport.pdf
- [67] H. Döring, M. Wörz, O. Rohozneanu, K. Spachmann, J. Klee Barillas: *Results of Fire-Extinguishing Tests on Li-Batteries*, Battery Experts Forum N.13, Aschaffenburg, **2017**
- [68] Petra Andersson, Magnus Arvidson, Franz Evegren, Mourhaf Jandali, Fredrik Larsson, Max Rosengren: Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea, RISE Report 2018:77
- [69] R. Rothe: *Löschmittel im Test – Anwendungsbeispiele am Beispiel der Automobilbranche*, Digitale Fachkonferenz Lithiumbatterien – Logistik. Lagerung. Entsorgung, **2021**
- [70] L. Derek Mellert, U. Welte, M. Hermann, M. Kompatscher, X. Ponticq, M Tesson, J. Beckbissinger: *Elektromobilität und Tunnelsicherheit –Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände*, Forschungsprojekt VSS 2016/221 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen-und Verkehrsfachleute (VSS), **2018**
- [71] Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium Ionen Akkus bei Fahrzeugbränden , Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2020; <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3907>
- [72] <https://www.lion-care.com/loeschmittel/pyrobubbles>
- [73] <https://www.poraver.com/extover/>
- [74] <https://de.wikipedia.org/wiki/Vermiculit>
- [75] <https://www.jockel.de/produkte/feuerloescher/gel-loescher/>
- [76] <https://www.creasorb.com/en/interschutz-2000-101427.html>
- [77] http://www.flameguard.ch/docs/fireex_gel_pruefbericht.pdf
- [78] https://alberoprojekt.de/index_htm_files/Bericht%20Test%20Boundary%20Cooling%20Device.pdf
- [79] <https://electrek.co/2019/06/01/tesla-fire-supercharger/>
- [80] <https://www.container-ellermann.com/redboxx/>

- [81] O. Willstrand: Fire Suppression Tests for Vehicle Battery Pack, Swedish Energy Agency Report Project No. 45629-1,
- [82] <https://www.murer-feuerschutz.de/e-loeschlanze/>
- [83] <https://www.youtube.com/watch?v=W2Fcjnvt-CA>
- [84] <https://www.youtube.com/watch?v=yO8cVWOqZcg>
- [85] <https://www.kfv-segeberg.org/infothek/loeschdecke-e-auto/>
- [86] <https://www.stoebich-technology.de/en/produkte/e-mobilityprotector-1>
- [87] <https://protect.ibena.de/de/news/ibena-entwickelt-brandschutzdecke-f%C3%BCr-elektroautos.html>
- [88] T. Yim et al. Self-Extinguishing Lithium Ion Batteries Based on Internally Embedded Fire-Extinguishing Microcapsules with Temperature-Responsiveness, Nano Lett. 2015, 15, 8, 5059–5067
- [89] <https://patents.google.com/patent/JP5849692B2/en>
- [90] <https://www.lewa.de/de/branchen/gasodorierung>
- [91] Technische Regel „Gasodorierung“, DVGW-Arbeitsblatt G 280-1
- [92] <https://www.greengear.de/vergleich-autos-mit-autogas-lpg/>
- [93] <https://www.lpgforum.de/threads/wieviel-passt-in-den-tank.4543/>
- [94] https://de.wikipedia.org/wiki/Autogas#cite_note-autogas-umruestungen.de-9
- [95] <https://www.energie-lexikon.info/fluessiggas.html>
- [96] <https://www.chemie.de/lexikon/Autogas.html>
- [97] <https://www.bild.de/auto/tests/fahrbericht/opel-zafira-tourer-lpg-autogas-test-28533278.bild.html>
- [98] <https://www.scandlines.de/uber-scandlines/uber-scandlines-titelseite/fahren-und-hafen/berlin>
- [99] <https://www.bazonline.ch/auto/autos-werden-immer-breiter-und-laenger/story/25635086>
- [100] <https://www.ewv-hamm-netz.de/fileadmin/user-storage/EWV/Gas/Erdgas-Kennwerte.pdf>
- [101] Sicherheitsdatenblatt LBG, Shell
https://www.shell.de/geschaefts-und-privatkunden/shell-kraftstoffe-fuer-geschaeftskunden/bezugsquellen-und-kontakte/_jcr_content/par/tabbedcontent_ceef/tab_b10c/textimage_9921.stream/1519807636488/c12a09e75332403c46d79ad9b6c71973fc332d01/lng-gasnor-de-de-180416.pdf
- [102] <https://www.pkw-label.de/alternative-antriebe/erdgas-cng>
- [103] <https://www.krafthand.de/artikel/der-erdgastank-und-die-mehrfachfunktionen-des-tankventils-21139/>
- [104] https://www.erdgas.info/fileadmin/Public/PDF/erdgas_mobil/FAQ-Erdgasmobiliaet.pdf
- [105] https://de.wikipedia.org/wiki/Erdgasfahrzeug#Technische_Grundlagen
- [106] https://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/1960_IVECO_CNG-Range-Broschuere_online_Version.pdf
- [107] <https://www.autosieger.de/opel-zafira-tourer-cng-groesste-gas-reichweite-seiner-klasse-article23137.html>
- [108] Sicherheitsdatenblatt Erdgas getrocknet, Stadtwerke München, 2021
<https://www.swm-infrastruktur.de/dam/swm-infrastruktur/dokumente/gas/sicherheitsdatenblatt-erdgas.pdf>
- [109] Sicherheitsdatenblatt Erdgas getrocknet, Edis, 2017
https://www.e-dis-netz.de/content/dam/revu-global/e-dis-netz/dokumente/Sicherheitsdatenblatt_Erdgas.pdf
- [110] https://de.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai
- [111] https://www.youtube.com/watch?v=IA1k2n_ooPs
- [112] <https://www.spiegel.de/auto/wasserstoff-wie-die-brennstoffzelle-die-weltweite-mobilitaet-veraendert-a-268d3939-b0ab-43ca-af01-a32bc130f19c>
- [113] https://www.draeger.com/library/content/9046261_sab_ex_schutz_de.pdf
- [114] Studie zum Brandschutz bei der Beförderung von Fahrzeugen mit Elektroaggregaten oder mit Elektroantrieb auf RoRo- und RoPax-Schiffen, BMVBS, GL, Bericht Nr. 2013.003
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/WS/brandschutz-roro-schiffen.pdf?__blob=publicationFile

12. Anlagen

- Catalogue of measures and recommendations for the transport of alternatively powered vehicles on board of RORO-f ferries and for the provision of charging options for electric vehicles during the crossing
- Erfolgskontrollbericht
- Kurzfassung (Berichtsblatt)
- Lister der Veröffentlichungen

Diesem Abschlussbericht sind folgende Anlagen auf digitalem Datenträger beigefügt:

- Abschlussbericht ALBERO
- Fragenkatalog zum Projekt ALBERO (Excel-Tabelle)
- AP2_2_Unfaelle_Elektroautos (Excel-Tabelle)
- 20190916 ALBERO_Havarien_RoRo_RoRoPax_Final (Excel-Tabelle)
- AP 2.2 Havarien fahrzeugtransportierender Schiffe (pdf-Datei)
- Vergleich von Fahrzeuggewichten unter Berücksichtigung alternativer Antriebsarten (pdf-Dokument)
- Auswertung der Daten von Stena Line (pdf-Dokument, **VERTRAULICH!!!**)
- AP 4.1 Analyse derzeitiger gesetzlicher Vorschriften für RORO-Fahrzeugdecks (pdf-Dokument)
- Zusammenfassung_ALBERO_Loeschdeckenversuche (pdf-Dokument)
- ALBERO_Wegfliegen_Funken.mp4 (Video)
- ALBERO_Auffliegen_Decke.mp4 (Video)
- ALBERO_Glueheffekt_Loch.mp4 (Video)
- ALBERO_Dampflachen.mp4 (Video)
- Lehrprogramm_Kapitel_1_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_2_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_3_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_4_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_5_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_6_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_7_zweisprachig (pdf-Dokument)
- Lehrprogramm_Kapitel_8_zweisprachig (pdf-Dokument)
- all_over_summary_ALBERO_results_final (pdf-Dokument)



Catalogue of measures and recommendations for the transport of alternatively powered vehicles on board of RORO-ferries and for the provision of charging options for electric vehicles during the crossing

Summary of the results of the project ALBERO

"Transport of alternatively operated vehicles on RoRo ferries"

Developed by:

- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)
- Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE)
- GTE Industrieelektronik GmbH (GTE)
- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (HBRS)
- Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V. (ISV)
- Lloyd's Register (LR)

With support of our associated partners:

- StenaLine
- TT-Line
- Scandlines
- Verband Deutscher Reeder
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

VDI Technologiezentrum

Inhalt

1. Background	3
2. Types of alternatively powered vehicles and their special features relevant for the transport on ferries	3
2.1 Electric vehicles	3
2.2 CNG powered cars	4
2.3 LPG powered cars	5
2.4 Hydrogen powered cars	5
3. Organizational Measures	6
4.1 Selected areas for the transport of alternatively operated vehicles	7
4.2 Safety technique to ensure early detection of hazardous situations	8
4.3 Adapted fire-fighting measures and equipment at dedicated areas	8
4.4 Towing devices	10
5. Measures in an Emergency	10
5.1 General characteristics and measures	10
5.2 Electric car fire	11
5.3 LPG car fire	11
5.4 CNG car fire	11
5.5 Hydrogen car fire	11
6. Charging points on Board	12
7. Training of the people involved	15
8. General recommendations for (political) measures	17

1. Background

The number of alternatively operated vehicles is increasing more and more. Accordingly, such vehicles are increasingly being transported on ferries. Passengers with electric vehicles ask about the possibility of charging their cars during the crossing. Shipping companies have to face the new challenges that come up with that and adapt their service and safety concepts.

The aim of the ALBERO research project was to develop concepts and technologies for the safe integration of alternatively powered vehicles (APV) into the RORO ferry transport processes. Both electric vehicles and vehicles with alternative fuels such as natural gas (CNG) and autogas (LPG) should be considered. In the project technical, structural and organizational measures and concepts should be developed that enable the safe transport and (for electric vehicles) safe charging while crossing. In addition, recommendations for effective hazard prevention measures in an emergency situation should be drawn up.

2. Types of alternatively powered vehicles and their special features relevant for the transport on ferries

2.1 Electric vehicles

- Electric vehicles are heavier than identical conventional models. The difference in weight is between 200 and 500 kg.
- The likelihood of fires for EV is not higher than for conventional vehicles with internal combustion engines. In discussions we agreed to report that this comparison is valid for “young” EVs, because there is no experience yet, if this statement will be correct for older electric vehicles, for which a sufficient data base is still missing.
- The combustion temperatures or the heat release rate are not higher than for conventional vehicles with internal combustion engines.
- During a thermal runaway, gases are released which could be used for early detection measures. The main gases to be expected are hydrogen, carbon monoxide and carbon dioxide. The quantities released and the proportions of these gases to one another depend primarily on the specific cell chemistry, the state of charge of the battery and the charging cycles that have already taken place. In addition, electrolyte, which usually consists of compounds containing hydrocarbons, is blown off.
- Once the fire has spread to the battery, the fire becomes difficult to extinguish. Due to the longer duration of the fire and, especially when round cells are used in the battery modules, the risk of burning battery parts flying away, there is a higher risk of the fire spreading.
- During the fire, toxic gases are produced, the composition of which differs from that of conventional vehicle fires, e.g. the release of highly corrosive HF and HCl. However, HF is highly reactive, reacts quickly with substances in the environment and therefore does not last very long in this form in the ambient air or in the extinguishing water. There are also highly toxic gases or aerosols of organometallic compounds, as well as phosphorus and fluorine compounds. Graphite dust can also be released in larger quantities.

- Sprinkler systems can help to contain the spread of fire, but have no cooling effect on the battery, which is usually installed in the underbody of the vehicle.
- Re-ignition has to be expected even hours after apparently put out of the fire.
- The hazard of a dangerous contamination of extinguishing water exists especially if the battery is severely destroyed, so that there can be direct contact with the metallic components of the battery. The extinguishing water then is strongly alkaline and contains various toxic (metal) compounds.
- After the extinguishing work, it must be expected that the soot etc. deposited in the environment and on work clothing contains high proportions of highly toxic (organic) heavy metal compounds. Professional decontamination or disposal is necessary.
- Immersing a damaged battery or an entire damaged electric car in water-filled containers can lead to the development of hydrogen (by electrolysis reactions in cells that are still undamaged or by reactions of water with metallic elements inside damaged cells). In closed rooms there can be a risk of explosion.

2.2 CNG powered cars

- The main component of natural gas is methane. The gas can be used as compressed natural gas (CNG) or as cryogenic liquefied natural gas (LNG) as fuel for vehicles. Currently CNG technology is much more widespread.
- All CNG cars are bivalent vehicles. That means they also have the possibility to drive with petrol. So, beside the gas tank, all CNG cars also have a tank for petrol.
- In the car CNG gas is stored in tanks at 200 bar. On most models the filler neck for the gas is located directly next to the fuel tank inlet behind the same flap. Most CNG car models can be filled up with a natural gas volume between 12 kg and 37 kg.
- The tanks are fitted with the following safety devices:
 - thermally activated pressure relief device (TPRD) opens at 110°C and empties the entire contents of the tank
 - check valve that prevents reverse flow to the fill line
 - automatic shut-off valve that can close to prevent flow from the tank to the fuel cell or internal combustion engine. This valve closes after the car is switched off or in the event of an accident.
- In the event of overheating, safety devices on the tank ensure that all gas in the tank is blown off. CNG is highly flammable and explosive. Ignition sources nearby can cause jet flames or fire.
- CNG gas is much lighter than air and can accumulate in areas under the ceiling. Outside it rises very quickly into the atmosphere.
- At poor ventilation there is the hazard of local displacement of oxygen.
- In closed areas, depending on the ventilation and flow conditions, the gas can accumulate and thus the explosion hazard can occur even far away from the point where the gas exits. Possible initial measures are intensive ventilation and the control of smouldering fires.

2.3 LPG powered cars

- LPG (Autogas) is a mixture of propane and butane. LPG is the abbreviation for Liquefied Petrol Gas.
- Vehicles powered by LPG are currently always bivalent vehicles, which means that they can run on both petrol and LPG. The petrol tank and petrol operation remain completely. A second fuel system is installed inside the vehicle for the gas. Either petrol or LPG can be burned in the engine.
- In the car LPG is stored as a liquid in tanks at ca. 6 – 8 bar.
- Often, LPG gas-powered vehicles are retrofits or conversions. Retrofitted gas tanks are often installed in the form of a spare wheel in the spare wheel well. Such a wheel well tank can hold between 30 and 60 litres of liquid gas.
- For safety reasons a tank can only be filled up to 80% to have an expansion reserve.
- At a certain overpressure (ca. 27,5 bar) the gas is blown off in a controlled manner via a safety valve. The blow-off occurs stepwise as the overpressure is for the moment reduced when the valve has opened.
- LPG is highly flammable and explosive. If during gas release ignition sources are nearby, it can lead to jet flames or fire.
- In closed areas, depending on the ventilation and flow conditions, the gas can accumulate and thus the explosion hazard can occur even far away from the point where the gas escapes.
- LPG is heavier than air and can therefore accumulate on the floor or even, if openings are present, in areas and rooms below.
- At poor ventilation there is the hazard of local displacement of oxygen.
- Possible initial measures are intensive ventilation and cooling of the vehicle to prevent further gas release.

2.4 Hydrogen powered cars

- Hydrogen is a pure gas and can be stored compressed (H_2) or cryogenic liquefied (LH_2).
- H_2 can be used for internal combustion engines and fuel cell applications.
- Today hydrogen cars have 2 or 3 tanks with 4 to 7 kg hydrogen with a pressure of up to 700 bar.
- The tanks are fitted with the following closure devices:
 - Thermally activated pressure relief device (TPRD) opens at 110°C and empties the entire contents of the tank.
 - Check valve that prevents reverse flow to the fill line.
 - Automatic shut-off valve that can close to prevent flow from the tank to the fuel cell or internal combustion engine. This valve closes after the car is switched off or in the event of an accident.
- In the event of TPRD activation an ignition is very likely, this can lead to an explosion. After explosion a flash fire will develop until the tank is empty. (CFD simulation has been done in the project further information here:

https://alberoprojekt.de/index_htm_files/H2-Fahrzeug%20Simulation%20auf%20RoPax%20Faehren.pdf

- Hydrogen has a minimum ignition energy of 0.017mJ for comparison methane 0.274mJ. This makes an autoignition after release very likely (e.g. by electrostatic effects).

- Hydrogen is highly buoyant and diffusive in air, if unconfined these characteristics can assist with reducing the formation of flammable-mixtures, whereas in confined spaces, inadequate ventilation, and, or restricted vertical flow paths, have the potential to create an environment where the formation of flammable mixtures is possible.

3. Organizational Measures

- register the propulsion type of each vehicle and registration plate number during booking process and assess or verify latest upon entry at gate
- establish a labelling system for different alternatively powered vehicles, e. g. by coloured inlay under windshield, to get with ticket, to be placed by customer
- establish a system of dedicated parking positions/areas on board for the distinct types of alternative powered vehicles, possibly offer a charging point
- establish a system of dedicated parking positions/areas on board for the transport of electric bikes, possibly offer a charging point
- pre-sort different alternatively powered vehicles in port area, e. g. with different lanes for sorting to dedicated positions or areas
- assess positions of alternatively powered vehicles retrospectively or with automatic lane detection systems when no dedicated areas or positions are determined
- if no official charging point is provided, ensure that no other sockets are used for “illegal” charging
- use a software system to plan and/or visualize the vehicle distribution at each deck with special concern to alternative powered vehicles
- the ships command should always have an overview about the actual situation on board

ALBERO result (FKIE): LOMOSS-System

- User studies show a high intent of use and overall good/excellent user experience of a load monitoring support system (LoMoSS) that displays the location and fuel type of vehicles on board the ship (e.g. Image 1).
- LoMoSS supports the crew in the process of applying safety measures locally, i.e. by visualizing the installation of mobile safety equipment on board.
- LoMoSS increases situational awareness of the crew by providing crew with essential information. In case of an incident on a ship, it is essential for the crew, to possess knowledge of the vehicle types involved in the incident and those vehicles at risk, if there is an escalation of events.
- The system provides identification possibilities of the fuel type of a vehicle involved in an incident to enable the crew and first responders to be suitably equipped and take the most effective measures to safely resolve the incident.
- It provides identification possibilities of the fuel type of a vehicle involved in an incident to save valuable time (i.e. crew can enter registration number and is provided with booking information

which contains fuel type and therefore does not have to figure out fuel type by analysing fire behaviour).

- LoMoSS provides users with access to information describing the properties, characteristics and hazards of alternative fuelled vehicles (see Image 2 section 5), and a visualization of the location of available firefighting tools (see Image 3 section 1).
- LoMoSS provides users with the possibility to take notes during their watch (see Image 4 section 3) and pin these to an appropriate location where applicable.
- It enables crew to search for essential driver booking details (i.e. fuel type, cabin number) via the registration plate (see Image 5 section 4).
- LoMoSS connects alerting (i.e. gas or thermal runaway detection systems) to this system to display the respective alerts (see Image 6 section 2) along with information on alert type, location of alert, as well as, if applicable, respective fire-response checklists for the involved vehicles.

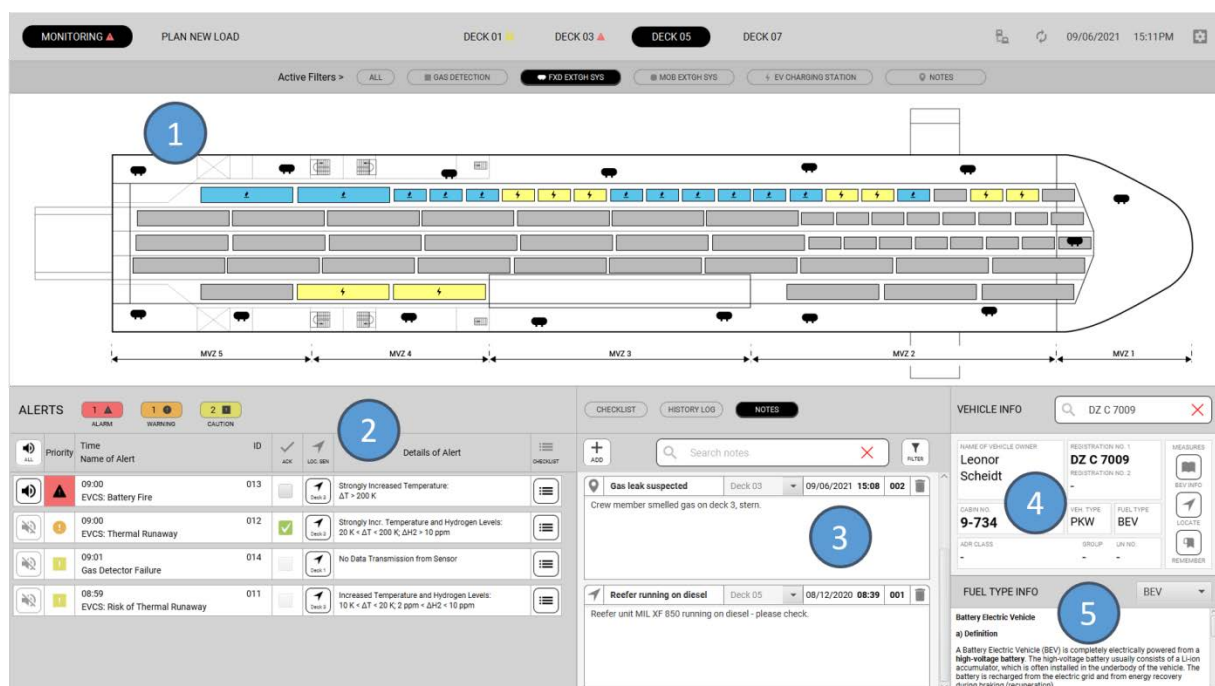


Image 1: Overview of Load Monitoring Support System LOMOSS

4. Technical Measures

4.1 Selected areas for the transport of alternatively operated vehicles

Because of the special features of APV the selection of dedicated areas to position them during transport could be meaningful.

- deck above the waterline – especially for electric vehicles- to get out big amounts of water in case of a fire
- sufficiently dimensioned drainage openings
- continuous and sufficient ventilation (if necessary installation of extra ventilation systems)

- camera surveillance

4.2 Safety technique to ensure early detection of hazardous situations

ALBERO result (GTE): combined sensor system H₂-Gas sensor and IR-Sensor

Real tests were carried out to evaluate the detection characteristics. Additional classification work has been done - The fire hazard of a battery electric vehicle (“bev” or “plug in hybrid”) has to be structured:

A – thermal runaway, with mechanical integrity

B – thermal runaway, cells cracked and electrolyte released

C – battery fire, the electrolyte burns with a flame

D – battery and car fire, the electrolyte and plastics of the car interior is burning

For fire phases C and D the existing detection methods by use of smoke detection and / or flame detection is sufficient – and additionally manual fire fighting is not recommended during this phase, to avoid high personal risks. One experimental result is, that the duration of phase A is several minutes up to hours, while phase B is significantly shorter, even only some seconds. Therefore in ALBERO we focus on detection of phase A.

During thermal runaway we found mainly the release of H₂ gas in combination with a slight increase of surface temperature of the battery housing.

Detection of just H₂ will give false alarms, as other sources of H₂ are present on the ferry, like corrosion process or hot metals, e. g. conventional engines.

The thermal runaway detector (ALBERO detection demonstrator of GTE) combines H₂ increase detection with detection of surface-temperature increase – and performing correlation evaluation.

The alarming interface consists of at least 2 alarm switches and one failure switch (relay contacts). Optional IP access via ethernet for alarm information and sensors signals can be provided.

Installation requirements:

-Aside each single car that has to be monitored; e. g. near to a “wall box” if installed.

-Suitable only in closed, lower decks, at positions with low air flow

The environmental properties at different installation positions will interfere with optimal detection threshold settings – engineering will be required.

4.3 Adapted fire-fighting measures and equipment at dedicated areas

- ensure a parking distance of min 60 cm (according to sprinkler test procedure for car decks) between electric cars and conventional cars to prevent spreading of fire and to ease firefighting measures
- ensure regular fire patrols
- provision of mobile devices to prevent fire spread (e.g. fire blankets, mobile walls), to be applied to the accidental car manually by firefighting team or semi-automatically, use in combination with water deluge system

ALBERO result: Tests regarding the suitability of fire blankets for fighting fires in electric vehicles

Real tests were carried out to evaluate the behaviour of fire blankets and / or sprinkler systems when fighting Li-ion battery fires. The following observations and findings resulted:

- Fire blankets cannot stop the thermal runaway in the battery module from continuing. However, the combustion of other vehicle construction materials can be stopped by the blanket and the flying away of particles is reduced. So the blanket clearly helps to prevent the fire from spreading.
- A fire blanket does not hold tight. Without warning there occurred violent outbreaks of gas from under the blanket, often with these gases igniting. Emergency services in the vicinity need to know this - there is no such thing as a “safe stay” in the vicinity of a covered electric vehicle!
- Despite the use of a fire blanket, there is a strong accumulation of smoke gas outside the blanket, even if a sprinkler system is used at the same time – resulting in low visibility and toxic environment. A breathing apparatus must be worn!
- Depending on the type, the material of the fire blanket can be destroyed if a jet flame from a battery module directly hits the blanket. Holes can arise.
- After removing the fire blanket, the reaction in the battery module can continue. This mainly depends on whether there are any unreacted cells.
- A re-use of the blanket is not recommended because of toxic organometallic contaminations.

- use of mobile water spraying system which can be placed only in case of emergency under the car or on the bottom near the car to cool the cars bottom

ALBERO result (LR, FKFS): mobile boundary cooling system

- The suggested boundary cooling device (see image 2) is a device that is positioned next to the vehicle and sprays water on to the underbody of the vehicle as well as creates a water wall next to it.
- The cooling performance of the mobile boundary cooling device and a deluge system on a traction battery or gas tank was tested. For these tests a heated battery/gas tank dummy was used. The following observations were made:
 - No significant cooling effect of the deluge system on to the battery/gas tank, due to the mounting position underneath the vehicle.
 - The boundary cooling device sprays water on to the underbody of the vehicle where the battery or gas tank is typically mounted. Thereby the cooling effect on to the surfaces of a battery or gas tank is high.
- In the case of an external heat source heating up the battery or gas tank, the boundary cooling device helps to protect them, in order to avoid a thermal runaway or the release of gas.
- In the case of a battery malfunction, which lead to an increasing temperature of the cells, the cooling effect of the boundary cooling device mainly depends on the thermal conductivity between the battery housing and the cells. Due to the influence of low temperatures on to the battery performance, the cells are typically isolated from the housing, which leads to low cooling capabilities during these scenarios.
- The water wall, created next to the vehicle, helps to avoid the spread of fire to adjacent vehicles.

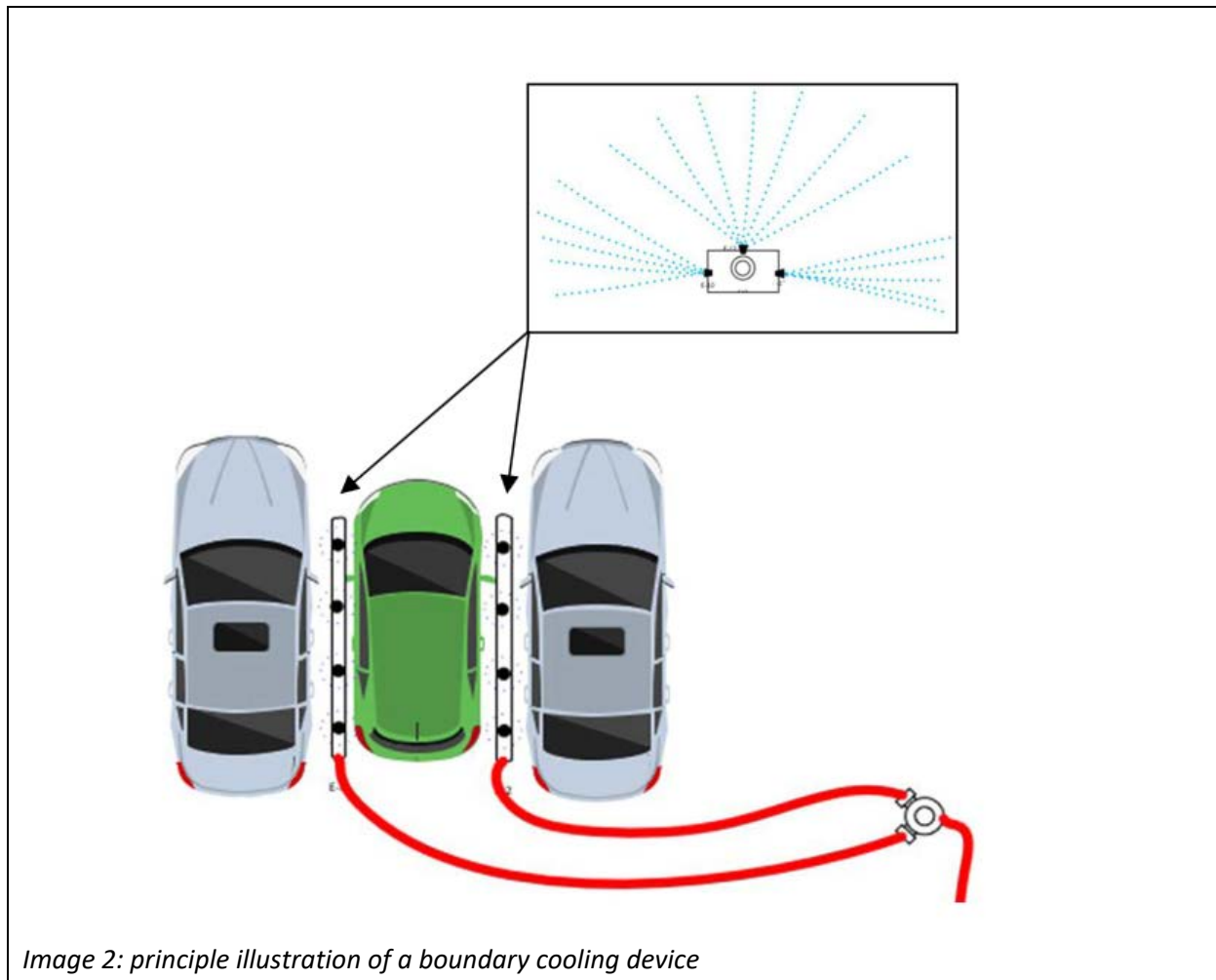


Image 2: principle illustration of a boundary cooling device

4.4 Towing devices

- be aware that electric cars possibly could be unable to drive after passage because of complete discharge of battery (especially at very low temperatures outside)
- provide suitable towing devices to move the car to a safe place, follow the manufacturer's recommendations

5. Measures in an Emergency

5.1 General characteristics and measures

- Alternatively powered vehicles can show specific behaviour in case of an emergency.
- Emergency services should know whether the damaged vehicle is an electric car or a gas-powered vehicle!
- All alternatively powered vehicles can release gases that are explosive or flammable on the one hand and harmful to health on the other. An approach may therefore only be made with self-contained breathing apparatus and suitable personal protective equipment. Intensive ventilation can be useful. Avoid sources of ignition!

- All alternatively powered vehicles can suddenly release gases which can cause spontaneously long jet flames. Emergency services should keep sufficient distance to the damaged vehicle!
- Independently from the type of car it is advisable to use a lot of water as extinguishing and / or cooling agent. Make sure that there is sufficient drainage to avoid endangering the stability of the ship!

5.2 Electric car fire

Possible measures (depending on the specific situation):

- Fast and massive cooling of the vehicle with water. Use of sprinkler system in the affected section.
- If possible, direct water supply also to the underbody of the affected vehicle.
- If possible, try to apply separating aids, like fire blankets or mobile separating walls.
- Continue cooling with water even if the fire appears to be extinguished - re-ignition is possible even after hours!
- Monitoring of the vehicle / battery e.g. with a handheld thermal camera.
- Parts of the battery can be thrown away for meters from burning electric vehicles. Keep distance whenever possible.

5.3 LPG car fire

Inside the tank of a LPG vehicle no fire can occur because there is not enough oxygen in it. Usually, a fire spreads to the tank from the outside which causes an increase in pressure inside the tank. At a certain overpressure the gas is blown off in a controlled manner step by step via a safety valve. If there is already a fire nearby or another source of ignition the gas release can be expected to result in sudden, long jet flames. When all gas has been blown out of the tank and burned further firefighting can be carried out like for a conventional vehicle.

5.4 CNG car fire

Inside the tank of a CNG vehicle no fire can occur because there is not enough oxygen in it. Usually, a fire spreads to the tank from the outside which causes an increase in pressure inside the tank. In case of overheating safety devices on the tank ensure that all gas in the tank is blown off. If there is already a fire in the vicinity or another source of ignition the gas release can be expected to result in sudden, long jet flames. Because a CNG vehicle has several gas tanks, it can never be guaranteed that all tanks are empty. Firefighters must be aware of this.

5.5 Hydrogen car fire

Inside the tank of a H₂ vehicle no fire can occur because there is not enough oxygen in it. Usually, a fire spreads to the tank from the outside which causes the activation of the TPRD opens at 110°C. In case of overheating safety devices on the tank ensure that all gas in the tank is blown off. If there is already a fire in the vicinity or another source of ignition the gas release can be expected to result in sudden, long jet flames. Because a H₂ vehicle has several gas tanks, it can never be guaranteed that all tanks are empty. Firefighters must be aware of this.

6. Charging points on Board

The conditions on board differ from those on land. Charging stations have to be adapted to this special surrounding.

ALBERO-Result (LR, ISV): Requirements catalogue for charging stations on board

Selection of a suitable charging station (DC or AC)

The selection should be done according to the following aspects, among others:

- Number of electric cars to be transported. What capacity utilization can be expected?
- Time of passage
- Available power: The number and capacity of the charging station(s) must be calculated according to the "surplus" power available on board. The safety of ship's operation takes priority in any case and must always primarily guaranteed.
- maximum possible length of the charging cable: Depending on the power the maximum possible length of the charging cable is limited. A longer charging cable allows greater flexibility in terms of positioning the vehicles and also allows to charge several vehicles in the vicinity of the charging station. On the other hand a longer cable may increase the risk of tripping and falling over or the damage of the cable when driving over it. If necessary, the cable routing e.g. from top down to the car should be considered.
- Type of charging plug: There are several types of charging plugs available for electric cars. In any case, the charging station should offer the type 2 plug, which has been defined as the European standard. Some charging stations also offer (two) cable outlets with different plug types.
- Current issue of today is still that there is no possibility for conventional AC charging to get sufficient information via the charger station out of the car (BMS). For DC-charging such information exchange can be ensured by the requirements of the IEC 61851-23 and -24.

Electrical protection class:

Charging stations ashore offer an IP 54 protection class in accordance to the industry standard. For onboard operation a protection class of IP 55 (closed decks) or IP 56 (weather decks) is required for electrical installations. In addition, resistance to salty atmosphere should be provided, proven by a separate standardized test.

Explosion protection:

Charging stations ashore are not designed to be ex-protected. On board this is different:

Below the bulkhead deck all electrical equipment must be approved to be used in ex-protection area zone 1, above the bulkhead deck in ex-protection area zone 2 but at least IP 55 at all decks. Many decks or deck areas are designated as explosion protected zones up to a height of 45 cm or fully protected (if dangerous goods are to be transported or below the bulkhead deck). All electrical installations in these areas must have an appropriate explosion protection. Since the implementation of this requirement is very cost-intensive an alternative location on board should be defined that is not subject to these requirements. It should be noted that the charging cable can also pose an explosion hazard, but could be covered with a metallic cable sheath. As the cable will be maintained like this within the responsibility of the ship's operator (only ship's cable can be used), there should not be a point of a bigger hazard, in relation to the zones.

Vibrations:

Onboard charging stations should have at least the same vibration resistance as required for all other electrical installations on board. Electrical machinery and equipment used on board ships must be designed to withstand a vibration load of at least 0.7 g according to most classification regulations. This is based on vibrations in a defined frequency range (e.g. from 2 - 100 Hz according to the classification regulations of Lloyds Register).

Inclined positions:

No unintentional switching operations or functional changes may occur at electrical or electronic devices on board up to an angle of inclination of 22.5° to each side.

Electromagnetic compatibility:

Corresponding regulations apply to electrical equipment that have to be complied on board. When charging electric cars the plug connection between the charging station and the car is a challenge. In this context the focus should also be placed on the rectifier (converter) at DC-charging stations as this is clocked and works with power electronics.

Electrical equipment installed on board, which is not defined as being essential, safety and/or habitable related, needs as the minimum comply with the EMC requirements for radiated and conducted emissions (refer to IEC 60092-504, IACS E10 or LR Type Approval Test Specification No. 1)

Voltage and frequency deviations:

All electrical equipment on board must be designed to operate without interference coming from voltage and frequency deviations during normal operation. These deviations are defined for onboard equipment as follows:

voltage: +6/-10% (permanently) +20/-20% (temporarily)

frequency: +5/-5% (permanently) +10/-10% (temporarily)

The industrial standard ashore usually requires a tolerance of +10/-10% for voltage or frequency.

Network parameters:

While the transmission voltage ashore is usually at 400 V and 50 Hz most vessels are operating at 440 V and 60 Hz. A charging station must be able to function accordingly to these input values, this especially applies if the conversion of voltage and frequency is done within the charging station and not by the car.

Power grid, grounding, distribution:

Charging stations ashore are designed for TT or TN networks which both guarantee grounding of the connected consumers via the distributing network. Onboard ships, however, an IT network is often used, where the neutral point of the network is not connected to earth. The devices are individually and separately connected directly to earth instead. For safety reasons and to ensure that the charging electronics detects a protective conductor an earthed network must be created by using an isolating transformer. The transformer must be adapted to the performance parameters of the charging station.

Cable: The cable should be firmly connected to the charging station in a way that no driver can use his own cables.

For the risk of ship's movement, the cars should be fixed and secured. So far, an emergency disconnection of the cable is not possible. If heavy weather is expected, no charging should be allowed.

Integration into the onboard Power Management System: The charging station should be integrated into the ship's Power Management System. In the future for applications where the communication between ship-charger-car can be established and sensitive data can be transferred (e.g. SOH-state of health, battery temperature, cell voltage, etc.), an automatic / remote stop of the energy flow from charger to car should be possible, while ensuring that the communication will still be working. So, the battery behaviour can further be monitored. Same will be also applicable for other scenarios, where fires might endanger the EV resp. its battery. The disconnection will only be required, if the car already burns or if the situation is so critical that even the sensitive data from the battery does not have any benefit anymore.

Manual switch-off in special situations:

It should be possible to disconnect the entire charging station easily from the grid to stop further use, e.g. by a manual switch-off (access only for crew). This may become necessary, for example, if dangerous goods are transported at nearby parking spaces or if heavy weather is expected. The switch-off device (to disconnect charging station from power supply) should always be located in a non-explosive area/room. This can also be realized by integration into the Power Management System, if necessary.

Integrated safety features:

The charging station must include all safety measures that are also required ashore. Among other things the functionality of communication between the charging station and the battery management system of the vehicle is required, e.g.

- short circuit protection
- overcharging protection – shut down if an overcharging of the battery occurs
- internal cooling of the charging station or the charging cable, if necessary (depending on power)
- temperature monitoring of the charging station, the cable and the plug - switch-off in case of damage and overheating
- shutdown at a hazard alert of vehicle's battery management system Additionally certain ship-specific protection functions seem to be useful, e.g:
- shutdown at severe angles of inclination
- shutdown at strong external forces

Integration into ship's Alarm and Monitoring System:

The charging station should give an alert in case of internal as well as external malfunctions. The alert should be transferred to the bridge or to a permanently manned control center (e.g. engine control room).

Remote emergency shutdown:

In case of an accident, e.g., a fire nearby, it should be possible to remotely switch off the charging station.

Alarm:

If necessary, it may be useful for the charging station to trigger a noticeable alert in case of dangerous situations (e.g. problem within the charging station, with the connection or with the car battery). This alert must be audible and visually perceptible.

Early detection Measures:

In the vicinity of the charging station various systems are useful for early detection of hazards, e.g.

- camera surveillance
- fixed installation of a combination of H₂-Sensor and IR-Sensor at charging points
- thermography, thermal imaging camera

The choice and design of monitoring depends on the specific location of the charging station onboard (open or closed deck, solar radiation, air circulation, ...). If certain hazardous limits are exceeded an alert should be triggered (bridge, acoustic, optical).

Fire prevention:

Locations of charging stations should be equipped with suitable, possibly additional, fire detectors. Water connection possibilities nearby are useful to extinguish a burning electric car. Before starting to fight the fire the charging process should be stopped and the charging station should be disconnected from the power supply! Good point is of course that the drencher system will be released by the operator / manually and therefore the operator has to ensure that water release will be safe and does not create additional hazards for the fire fighters.

Also keep in mind charging possibilities for E-bikes. The charging of portable bike-accumulators somewhere on board (e.g. at cabins) should not be allowed.

7. Training of the people involved

- Have rescue cards from the car manufacturers on board which describe the basic construction of different alternative powered car types and recommend suitable measures for each type.
- All responsible personnel on board and in port should be qualified in a special course according to the topic, especially how to recognize alternative powered vehicles, which hazards are connected with alternative powered cars and what to do in case of an emergency.

ALBERO-Result (ISV): Definition of competencies involved staff should have with regard to the transport of alternatively powered vehicles on RORO-ferries

- Knowledge of the different types of alternative drives in vehicles
- Possibilities of recognizing the different drive types by external characteristics
- Understanding of the fuels used in the various alternatively powered vehicles (CNG, LPG, H₂) and their special features when released (density, toxicity, risk of explosion)
- Understanding of causes of a thermal runaway in vehicle batteries
- Knowledge of the possible consequences of a thermal runaway in vehicle batteries (gas release, fire, flashbacks)
- Evaluation of suitable parking spaces for alternatively operated vehicles on car decks
- Assessment of situations where charging of vehicles on deck should be permitted or not

- Knowledge of the first measures to be taken when gas is released from an alternatively powered vehicle
- Knowledge of initial measures in the event of a fire in an alternatively powered vehicle
- Use of personal protective equipment in accidents with alternatively powered vehicles
- Dealing with contaminated surfaces after a fire in an electric vehicle

ALBERO-Result (ISV): web-based training system “Handling of alternatively powered vehicles on RORO-Ferries”

- Online training system, structured according to the single steps in the transport process
- Language switching German / English
- Interactive 360 ° representation of the individual scenes in the port, during loading, on deck, during unloading
- structured presentation of the special features of the various alternatively powered vehicles (construction, identifying features)
- Recommendations for a safe location on board
- Recommendations for the safe installation of a charging point on board
- Instructions on how to behave in emergency situations
- Test questions to query the knowledge you have learned

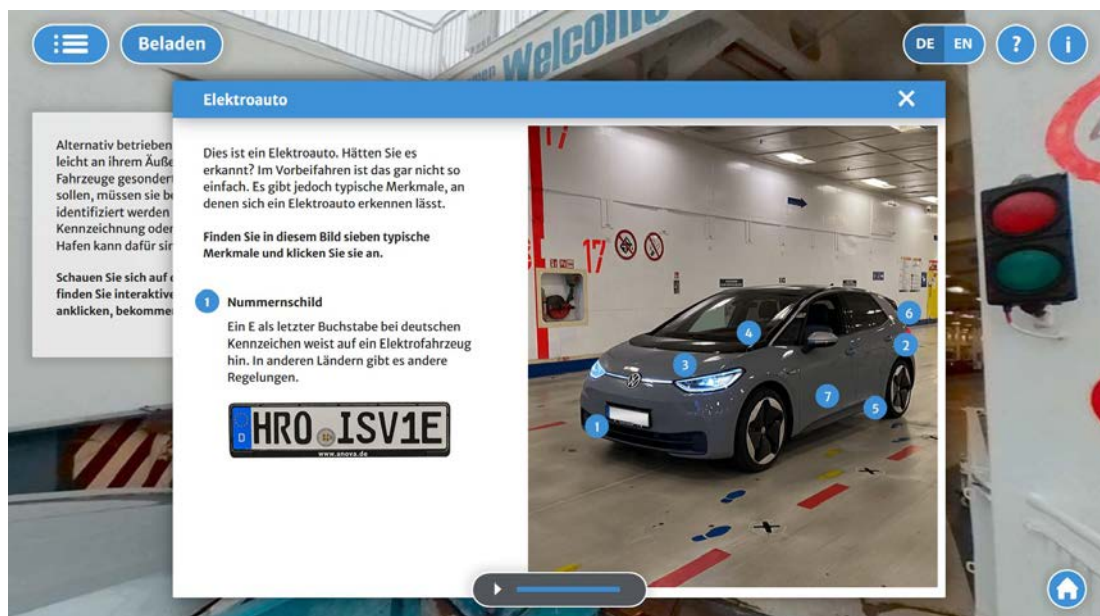


Image 3: Screenshot from the web based training system

- handling accidents with alternative powered cars should be regularly trained in practical drills on board

8. General recommendations for (political) measures

- There should be a general European regulation to enable the easy recognition of the kind of propulsion quickly from outside, e.g. by colour of license plate (has to be agreed by European authorities).
- We recommend the output of an optical and / or acoustical alarm signal, if the battery management system of an electric car detects a severe failure (Has to be realized by manufacturers of electric cars, has to be required from them by European authorities). A “silent” radio signal to the ship’s bridge or the operator of a parking garage could also be meaningful.
- For effective cooling in case of a thermal runaway of an EV-battery a kind of access leading to the inside of the battery pack for direct (water) cooling of the battery could be meaningful. (Has to be realized by manufacturers of electric cars, has to be required from them by European authorities.)
- Demand of general European regulation to declare RoPax crew (acting fire squads/first responders) same rights as firefighters i.e. to permit access to car-registry information.
- A technical possibility should be developed to enable the disconnection of a vehicle from a charging station in an accident situation without destroying (the cable).
- Re-ignition can occur if there are remaining intact cells in a damaged battery module. For improved safety after a fire in an electric vehicle, a procedure/technical system should be developed that ensures a safe discharge of unaffected residual cells in partially damaged vehicle battery modules.
- Regular training of responsible persons (ship crews, firefighters on shore,...) should be mandatory.

For detailed result presentation see

www.alberoprojekt.de

Kurzbericht zu den Ergebnissen des FuE-Vorhabens „Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen“ ALBERO

Teilvorhaben: Qualifikation von maritimem Personal für den sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen im Fährverkehr

(FKZ: 13N14682)

Aufgabenstellung:

In Folge der Zunahme von alternativ betriebenen Fahrzeugen abF (Elektrofahrzeuge, gasbetriebene Fahrzeuge) werden auch auf RORO-Schiffen zunehmend solche Autos transportiert, wodurch sich neue Risiken für den Fährverkehr ergeben. Im Verbundprojekt ALBERO ging es um die Entwicklung von angepassten Maßnahmen, um einen sicheren Transport dieser Fahrzeuge zu ermöglichen. Zudem sollten Konzepte entwickelt werden, die ein sicheres Aufladen von Elektrofahrzeugen während der Überfahrt ermöglichen, da dies von den Kunden zunehmend nachgefragt wird.

Das Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V. (ISV) hat das Forschungsprojekt ALBERO koordiniert und in verschiedenen Arbeitspaketen mitgewirkt. Dabei wurden u.a. folgende Ergebnisse erarbeitet:

1.1 Untersuchungen zum Verhalten havariierter Li-Ionen-Batterien

Es wurde theoretisch und praktisch untersucht, welche Ursachen zu Schäden an Lithium-Ionen-Batterien führen können und welche Auswirkungen dann zu erwarten sind. Neben einer strukturierten Literaturrecherche wurden auch Real-Brand-Versuche mit Li-Ionen-Fahrzeugakkus durchgeführt und die dabei entstehenden Temperaturen sowie die freigesetzten Gase bestimmt. Wasserstoff wurde als sehr früh freigesetztes Gas identifiziert, so dass hier ggf. ein Ansatz für eine frühe Detektion von Gefahren möglich wäre. Es bestätigte sich zudem, dass die Menge der freigesetzten Gase vom Ladezustand der Batterie abhängt. Auch die Zellchemie und die Form der Zellen hat einen wichtigen Einfluss auf das Brandverhalten. Insgesamt wurde festgestellt, dass die Gefahr einer Brandausbreitung durch Brände von Elektrofahrzeugen größer ist, da sie schwerer zu löschen sind (also länger brennen), Batterieteile weit umherfliegen können und es immer wieder zu Rückzündungen kommen kann. Dies gilt insbesondere für die enge Stausituation während einer Fähr-Überfahrt. Während des Brandes können zudem Gase und Abbrandprodukte entstehen, die sich von denen konventioneller Fahrzeuge unterscheiden. Einsatzkräfte müssen darauf vorbereitet sein.

1.2 Bewertung der Risiken für den Transport von abF auf RORO-Fährschiffen

Im Teilprojekt wurden strukturierte Statistiken zur Bewertung des Risikos durch alternativ betriebene Fahrzeuge auf RORO-Schiffen erarbeitet. Zunächst wurde eine Aufstellung von Unfällen mit Elektrofahrzeugen weltweit angefertigt, wobei das besondere Augenmerk darauf gelegt wurde, in welcher Situation ein Brand entstanden ist. Hauptsächlich gerieten E-Fahrzeugen während des Aufladens oder während des Parkens in Brand. Auch Unfälle sind eine wichtige Brandursache. Interessant, insbesondere im Zusammenhang mit der Flutkatastrophe 2021 ist, dass es in einigen Fällen auch durch Überflutung von Elektrofahrzeugen nachfolgend zu einem Brand kam.

Eine weitere Statistik ermittelte, inwieweit die Gefahrensituation von außen (also vom Schiff oder vom Transportprozess) ausgehen kann, also welche Schiffshavarien auch Elektrofahrzeuge hätten derart beschädigen können, dass diese in Brand geraten würden. Als häufigste Schiffshavarie für Fährschiffe wurden Kollisionen, insbesondere mit Hafenanlagen, ermittelt. Dabei kam es auch immer wieder zur Beschädigung von Fahrzeugen. Auch schweres Wetter führte durch Ladungsverschiebung an Bord zu

massiven Beschädigungen von Fahrzeugen. Ein Brand auf einem Fahrzeugdeck ist auch eine wichtige Ursache für Folgebrände. Insgesamt ist die Gefahr von Folgebränden durch Schiffshavarien jedoch für Elektrofahrzeuge ähnlich groß wie für konventionelle Fahrzeuge.

Besonderheiten ergeben sich bei der zusätzlichen Betrachtung eines Aufladens während der Fahrt. Hier wurden Situationen definiert, in denen ein Aufladen nicht gestattet werden sollte, u.a. bei schwerem Wetter oder bei Transport von speziellem Gefahrgut auf dem gleichen Deck.

1.3 Maßnahmen zum sicheren Transport

Im Projekt wurde eine Vielzahl technischer, baulicher und organisatorischer Maßnahmen für einen sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen konzipiert und in Demonstratoren umgesetzt, u.a.:

- Empfehlungen für besonders geeignete Stellplätze für die verschiedenen Arten von abF
- Mitarbeit an der Entwicklung eines mobilen Wassersprühsystems, welches unter bzw. neben ein Fahrzeug gelegt werden kann und so eine effektivere Kühlwirkung hat als ein Sprinklersystem
- Berechnungen zu sinnvollen Luftwechselzahlen auf einem geschlossenen Fahrzeugdeck zur Verhinderung der Bildung explosionsfähiger Gemische durch Abblasen von Gastanks
- Empfehlungen zum Einsatz von Brandbegrenzungsdecken auf der Basis von Real-Brandversuchen

1.4 Maßnahmen zum sicheren Aufladen

An Bord sind andere Bedingungen als an Land, z.B. metallische Umgebung, Schiffsbewegungen und andere Stromnetz-Parameter. Eine für diese Bedingungen ausgelegte Ladesäule gibt es bisher nicht. Im Projekt wurde daher ein Anforderungskatalog entwickelt, der die besonderen technischen Spezifikationen benennt. Zudem wurden begleitende Umstände für die Ladeinfrastruktur bewertet und ggf. Empfehlungen ausgesprochen, u.a.:

- Unter welchen Bedingungen sollte eine AC- oder DC- Ladesäule installiert werden?
- Wie sollte die Kabelführung zwischen Auto und Ladesäule gewählt werden, um Gefahren (Beschädigungen, Stolperfallen) zu vermeiden?
- Welche Steckertypen sollte die Ladesäule anbieten?
- Wie kann man sicherstellen, dass nicht „normale“ Steckdosen an Bord durch Passagiere illegal zum Laden verwendet werden?

1.5 Online-Trainingsystem für beteiligte Personen

Im Teilprojekt wurde ein E-Learning-System für alle am Transport beteiligten Personen entwickelt. Es ist gemäß den einzelnen Prozessschritten (Buchung, im Hafen, Beladen, der sichere Stellplatz, die sichere Überfahrt, Aufladen an Bord, der Havariefall, Entladen) gegliedert und richtet sich an verschiedene Zielgruppen, z.B. Mitarbeiter in der Buchungszentrale, Stauplaner, Einweiser auf den Fahrzeugdecks oder Brandbekämpfungstrupps an Bord. Das System ist zweisprachig aufgebaut und barrierefrei, da die Informationen sowohl gelesen als auch gehört werden können. Für eine anschauliche Umsetzung wurden im Hafen und an Bord einer Fähre 360°-Fotoaufnahmen gemacht, wodurch ein modernes Design und eine innovative Bedienbarkeit möglich wurden. Das Lehrsystem wurde allen assoziierten Reedereien des Projektes (Scandlines, Stena Lines, TT-Lines) zur Verfügung gestellt und ist vollumfänglich nutzbar. Anpassungen an die ganz konkreten Bedingungen auf den einzelnen Schiffen sind möglich.

Liste der Veröffentlichungen des FuE-Vorhabens „Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen“ ALBERO
Teilvorhaben: Qualifikation von maritimem Personal für den sicheren Transport von alternativ betriebenen Fahrzeugen im Fährverkehr (FKZ: 13N14682)

Außerhalb des Abschlussberichtes sind die Ergebnisse des o.g. FuE-Vorhabens in folgenden Beiträgen publiziert worden:

2019

D. Meißner	15. 05. 2019	4. Elektromobilitätsmesse in Rostock, Vortrag: Vorstellung des Projektes ALBERO
J. Edler D. Meißner		„Elektroautos mit und als Gefahrgut an Bord“ Artikel in Ingenieurwissenschaften 05/ 2019, S. 8

2020

D. Meißner	21. 09. 2020	Online Veranstaltung STENA Line; Vortrag: <i>Fire detection on closed RORO spaces</i>
D. Meißner	14. 10. 2020	Online-WEBINAR des Projektes LASHFIRE, Gastvortrag: „ <i>Results of the Project ALBERO</i> “
D. Meißner	15. 12. 2020	Online-Konferenz FIVE “Fire in Vehicles” – Vortrag: “ <i>Results of the Project ALBERO</i> ”
J. Edler		Alternativ betriebene Fahrzeuge an Bord von RoPax-Schiffen Schiff&Hafen, Nr.7, Juli 2020

2021

D. Meißner	26. 01. 2021	Online- Fachtagung “Li-Ionen-Batterien”, Vortrag: <i>Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen - das Projekt ALBERO</i> ”
D. Meißner	25. 02. 2021	Online-Veranstaltung MCN und VDI, Vortrag: “ <i>Ergebnisse des Projektes ALBERO</i> ”
D. Meißner	08. 09. 2021	Forum Elektromobilität Neubrandenburg, Vortrag “ <i>Ergebnisse des Projektes ALBERO</i> ”
D. Meißner	21. 09. 2021	Internationale Konferenz AUBE (Automatische Branderkennung) Duisburg, Vortrag: <i>Transport of alternatively powered vehicles on RORO-Ferries – the Project ALBERO</i> ” Proceedings
D. Meißner	14. 10. 2021	Abschlussveranstaltung des Projektes ALBERO, Vortrag “ <i>Havarierte Li-Ionen-Batterien - Die Gas-Gespenster</i> ”
D. Meißner	14. 12. 2021	Internationale Konferenz CFIS „Conference on Fire Safety at Sea“ online- Vortrag: „ <i>Damaged Li-Ion- Batteries – the gas ghosts</i> “

Geplant 2022:

D. Meißner	28. 04. 2022	„Fachkonferenz & Seminare Lithiumbatterien 2022 in Göttingen, Vortrag: „ <i>Brandbegrenzungsdecken bei Havarien von Elektrofahrzeugen - Einsatzszenarien und praktische Tests</i> “
------------	--------------	--

D. Meißner	01.06.2022	DMT-Fachtagung „Brandschutz im Schiffbau“ in Bremerhaven, Vortrag: „Das ALBERO-Projekt - Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RoRo-Fährschiffen“
------------	------------	--

Durch Dritte u.a. erwähnt in:

- Eberhard Krummenheuer: „Elektroautos auf der Fähre – Stromschlag auf See?“, FAZ online, 21.05.2020
<https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/risiken-lauern-wenn-elektroautos-auf-fahren-mitfahren-16774513.html>
- Täglicher Hafenbericht, 22.10. 2021. No. 205: *Albero Projekt für mehr Sicherheit an Bord*
- *Wenn das E-Auto brennt: Forschung für neue Sicherheitskonzepte auf RoRo-Fähren*
<https://www.deutsche-flagge.de/de/aktuelles/aktuelle-nachrichten/wenn-das-e-auto-brennt-forschung-fuer-neue-sicherheitskonzepte-auf-ro-ro-fahren>
- Täglicher Hafenbericht, 22.02. 2022. No. 35: *E-Autos wohl Auslöser für Carcarrier-Brand*

Warnemünde, 23.02. 2022

Dr. Dana Meißner (Projektmanagment)