



EINSCHÄTZUNG VON MÖGLICHEN
AUSWIRKUNGEN AUF PASSAGIERE,
SCHIFF UND PERSONAL IM FALLE EINES
UNFALLS MIT EINEM ALTERNATIV
BETRIEBENEN FAHRZEUG
Arbeitspakete 2.3 und 2.4

Projekt ALBERO

Einschätzung der möglichen Auswirkungen für Passagiere, Schiff und Personal im Falle eines Unfalls mit einem alternativ betriebenen Fahrzeug (AP 2.3 und AP 2.4)

Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V.

1. 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
- 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 Beschädigung
- 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 1: mögliche Folgen bei der Beschädigung von abF infolge einer Schiffshavarie

2. 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 von Teilen
- 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 2: mögliche Folgen bei der Beschädigung von abF infolge fahrzeuginterner Ursachen

3. 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 nahezu 2/3 (42) aller 65 in AP 2.2. aufgeführten Fälle wurde in den Quellen deutlich darauf verwiesen, dass die Löscharbeiten am Elektrofahrzeug 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 7 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“:

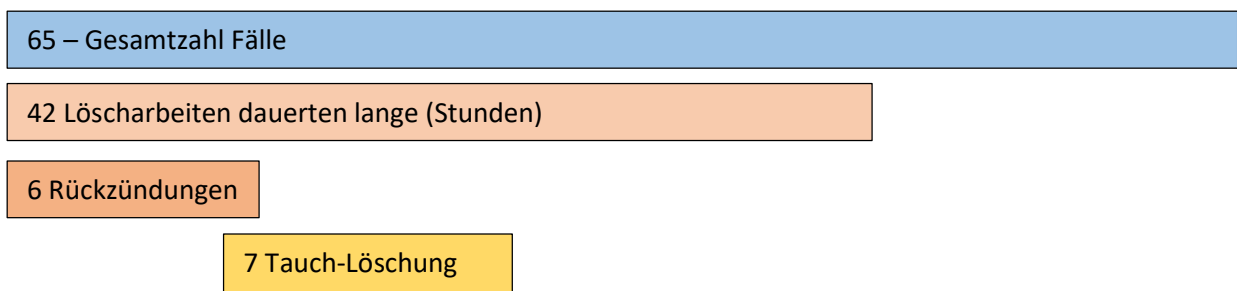


Abbildung 1: Anteil verlängerter Löscharbeiten bei der Brandbekämpfung von Elektrofahrzeugen

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.

Obwohl man verschiedentlich Aussagen lesen kann, dass Li-Ionen-Batterien heißer brennen als Benzin oder Diesel, konnte für diese Aussage keine Publikation gefunden werden, die dies wissenschaftlich belegt. 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 [1]. Für Li-Ionen-Batterien wurde kein Wert gefunden. In Abbrandversuchen mit Li-Ionen-Batterien wurden maximale Flammentemperaturen von 900 °C gemessen [2]. In anderen Brandversuchen [3] wurde die Wärmefreisetzungsrate 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 [4] 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 [5] wird z.B. in einem Kalorimeter eine freigesetzte Wärme von 800 kWh für 58 l Benzin ermittelt. Wie auch immer – eine Arbeit, die eindeutig experimentell wissenschaftlich beweist, dass Li-Ionen-Batterien heißer brennen als Benzin oder Diesel, konnte nicht recherchiert werden.

Die zu erwartenden maximalen Temperaturen sind für Propan und Methan (bei Brand eines LPG- bzw. LNG-Fahrzeuges) mit ca. 1970 °C gemäß [1] etwas niedriger als für Dieselkraftstoff (2140°C)

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.

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. 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. Eine Zusammenfassung liegt bereits mit dem Dokument „Gasentwicklung bei thermal runaway“ aus AP 1.4 vor. 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 Verdrängung des Sauerstoffes durch das freiwerdende Gas.

d. Freisetzung von Schadstoffen

Brandversuche mit Fahrzeugakkus in einem Tunnel [6] 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 IGHV-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 mal höher. Auch andere Publikationen weisen auf die Freisetzung von Schwermetallen bei einem Brand von Elektrofahrzeugen hin [7]. Dies ist ein deutlicher Unterschied im Vergleich zu konventionellen Bränden und Gasbränden!

4. Auswirkungen auf Schiff, Passagiere und Personal

In Beachtung der oben aufgeführten Aspekte lassen sich die Auswirkungen von Unfällen von ab 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 <ul style="list-style-type: none">- Brand schwieriger zu löschen- Herausschleudern von einzelnen Zellen möglich	Höhere Gefahr für Leib und Leben, da schnellere Brandausbreitung, Kontamination durch freigesetzte Schwermetalle, giftige	Annäherung für Löscharbeiten schwieriger, da <ul style="list-style-type: none">- Herausschleudern von einzelnen Zellen möglich- Freisetzung ätzender, sehr giftiger Gase

	<ul style="list-style-type: none"> - Sprühflutanlagen für eine Eindämmung nicht ausreichend <p>Erreichte maximale Temperaturen nicht höher, aber gesamte Wärmefreisetzung höher, da längerer Brand, massiver Einsatz von Löschwasser notwendig</p> <p>Fazit: Größere zu erwartende Schäden, schnellere Brandausbreitung, Probleme mit Stabilität durch Löschwasser möglich, Löschwasser kann korrosiv auf Schiffskonstruktion wirken</p>	anorganische Verbindungen	<p>(Fluor- und Phosphorverbindungen)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Freisetzung giftiger Aerosole (Schwermetalle) <p>Übliche Schutzkleidung möglicherweise nicht ausreichend!</p>
Brand eines gasbetriebenen Fahrzeuges	<p>Brandgefahr insgesamt nicht höher, Gefahr der Brandausbreitung ist jedoch höher, da</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brand schwieriger zu löschen - Lange Stichflammen möglich - Sprühflutanlagen für eine Eindämmung nicht ausreichend <p>Erreichte maximale Temperaturen nicht höher</p> <p>Fazit: Größere zu erwartende Schäden, schnellere Brandausbreitung</p>	Höhere Gefahr für Leib und Leben, da schnellere Brandausbreitung	<p>Annäherung für Löscharbeiten schwieriger, da</p> <ul style="list-style-type: none"> - lange Stichflammen möglich
Freisetzen von Gasen aus einer defekten Traktions-batterie	<p>Mengen gleichzeitig freigesetzter Gase relativ gering, da Zellen nacheinander aufplatzen</p> <p>Explosions- und Brandgefahr, falls Zündquellen in der Nähe</p>	<p>Zu erwartende Gase teilweise so toxisch, dass in unmittelbarer Nähe Gesundheitsgefahr bestehen kann!</p> <p>Explosionsgefahr</p>	
Freisetzen von Gasen aus LPG-Fahrzeug	<p>Relativ große Mengen werden schnell freigesetzt,</p>	<p>Propan/Butan-Gasgemisch wirkt in sehr hohen Konzentrationen narkotisierend bis erstickend, das Einatmen solcher hohen Konzentrationen ist</p>	

	Explosions- und Brandgefahr, falls Zündquellen in der Nähe	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

Quellen:

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_flame_temperature#cite_note-Physics_p._15-51-3
- [2] https://www.researchgate.net/publication/270909577_The_combustion_behavior_of_large_scale_lithium_titanat_battery
- [3] <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/2/9>; 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
- [4] <https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/thermal-propagation-in-lithium-ion-batteries.pdf>
- [5] https://www.bse.polyu.edu.hk/researchCentre/Fire_Engineering/summary_of_output/journal/IJEPBFC/V9/p59-64.pdf
- [6] https://hagerbach.ch/fileadmin/user_upload/news/Road_tunnel_safety_Hazards_of_electric_vehicle_fires_Mellert_2018.pdf
- [7] https://www.brandskyddsforeningen.se/globalassets/brandforsk/rapporter-2000-2015/matning-av-miljopaverkan-av-brander.-ecotox/bf_700_121_rapport.pdf