



SACHSEN-ANHALT

Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltsspeicher

Untersuchungen zum einsatztaktischen
Mehrwert gegenüber anderen
Löschtechniken und -taktiken



Ein Projekt im Rahmen der
Brandschutzforschung der Bundesländer

Ständige Konferenz der Innenminister und
-senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss
für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Verantwortlich:

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Biederitzer Str. 5
39175 Biederitz/OT Heyrothsberge

E-Mail: poststelle.ibk@ibk.sachsen-anhalt.de
Telefon: (+49) 039292 6101
www.ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de

März 2023

Bildnachweis:

IBK Heyrothsberge



Institut für Brand- und
Katastrophenschutz
Heyrothsberge

Heyrothsberger
Manuskript

Biederitzer Straße 5
39175 Biederitz
Tel. (039292) 61 - 01
Fax (039292) 61 - 306

poststelle.ibk@ibk.sachsen-anhalt.de
www.sachsen-anhalt.de
www.ibk-heyrothsberge.de

Literatur

- [1] Jürgen Garche ; Klaus Brand: Li-Battery Safety. Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Elsevier, 2019
- [2] vfdb e.V.: Merkblatt 0604: Unfallhilfe und Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen. Aktualisierungsdatum: 2017-11-01
- [3] Motor-Traffic: Batteriemodul Volkswagen.
URL <https://motor-traffic.de/bildergalerie.php?newsid=619585>
- [4] Pascal Vorwerk, Sarah-Katharina Hahn, Christian Daniel, Ulrich Krause, Karola Keutel: Detection of Critical Conditions in Pouch Cells Based on Their Expansion Behavior
- [5] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Stoffdatenbank: Eintrag Wasserstoff
- [6] vfdb e.V.: Anlage 1 der vfdb-Richtlinie 10/01. URL https://www.vfdb.de/media/referate/referat10/doc/RL10-01_Anlage1_ETW_Ref10_2023.pdf – Überprüfungsdatum 2023-02-15
- [7] Staatliche Feuerweherschule Würzburg: Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns - Alternativ angetriebene Fahrzeuge. URL https://www.feuerwehr-lernbar.bayern/fileadmin/downloads/Merkblaetter_und_Broschueren/Technischer_Hilfsdienst/Alternativ_angetriebene_Fahrzeuge_Version-4.0/
- [8] vfdb e.V.: Merkblatt 0612: Übergabeprotokoll Fahrzeuge. Aktualisierungsdatum: 2022 – Überprüfungsdatum 12.2022
- [9] vfdb e.V.: Merkblatt 0613: Temperaturmessprotokoll für beschädigte Energiespeicher. Aktualisierungsdatum: 2022 – Überprüfungsdatum 12.2022

Projektdaten

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Michael Neske (Projektleiter)

Dr. rer. nat. Julia Kaufmann

Dr.-Ing. Daniel Butscher

M. Sc. Christoph Vogel

Projektlaufzeit:

Januar 2021 bis Oktober 2022

Forschungsberichtsnummer:

IMK 210

Texte und Grafiken – Nutzungsrechte:

Das Copyright für Texte und Grafiken liegt bei den Autoren, sofern dies nicht separat gekennzeichnet ist. Eine anderweitige Veröffentlichung ist nur mit Erlaubnis der Autoren möglich.

Der ausführliche Bericht ist auf den Internetseiten des IBK Heyrothsberge zu finden.



Heyrothsberge, März 2023

Einleitung

Die steigenden Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen werfen in Feuerwehrcreisen die Frage nach der Brandbekämpfungstaktik für solche Fahrzeuge auf. Beiträge in den Medien zu diesem Thema forcieren zusätzlich die Bedenken und schüren Ängste gegenüber dieser Antriebstechnologie. Um die Einsatzkräfte zu unterstützen, haben Verbände und Organisationen des Feuerwehrwesens Einsatzhinweise in Form von Merkblättern mit zielgerichteten Hinweisen zum Umgang mit in Brand geratenen Elektrofahrzeugen erarbeitet. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Ergebnisse von Realbrandexperimenten, bei denen dezidiert auch Löschmaßnahmen vorgenommen wurden, für die Feuerwehren, wenn überhaupt, unzureichend aufbereitet vorliegen.

Das nachfolgend vorgestellte Forschungsprojekt setzt an diesem Punkt an, indem die derzeit zur Anwendung empfohlenen Brandbekämpfungsstrategien von im Brand befindlichen Elektrofahrzeugen, bei denen der Batteriebrand ursächlich dafür ist, untersucht wurden. Neben den üblicherweise bei Feuerwehren eingesetzten Hohlstrahlrohren wurden zwei Systeme, mit deren Unterstützung die Einsatzkräfte Lösch- und Kühlwasser in die Batteriesysteme einbringen können, angewendet. Es kam ein Sondereinsatzmittel zur externen Kühlung des Batteriesystems zum Einsatz, welches unter dem Fahrzeug zu positionieren ist. Zwei weitere Experimente dienten der Evaluierung des Mehrwerts von Brandbegrenzungsdecken.

beschädigte Hochvolt-Komponenten oder mit Wasser in Kontakt gekommene Hochvolt-Komponenten (z.B. Stromschlag oder Brandrisiko, auch zeitlich verzögert, durch den Hochvolt-Energiespeicher) hinzuweisen. ...“. Es empfiehlt sich daher, über die durchgeführten taktischen Maßnahmen ein Protokoll gemäß obigem vfdb-Merkblatt zu führen und dies dem Fachunternehmen in Kopie zu übergeben. Zuvor sollte ein Temperaturmessprotokoll, z.B. nach vfdb-Merkblatt 0613, angefertigt werden [9]. Im Zuge dessen werden über einen Zeitraum von mindestens 30 Minuten verteilt Messungen (z.B. alle 5 Minuten) an drei verschiedenen Stellen des Hochvoltspeichers durchgeführt. Verwendet werden können z.B. WBK, Fernthermometer oder Temperaturmesssonden. Nach der Fahrzeugübergabe endet die Zuständigkeit der Feuerwehr.

Ergänzt wurde diese Auswahl um zwei weitere Referenzversuche, bei dem keine Brandbekämpfung vorgenommen wurde. Die Bewertung der Wirksamkeit dieser Techniken und Taktiken erfolgte auf der Basis der Erfassung von Messgrößen, wie Lösch-/Kühlwasservolumenströme, Einsatzzeiten, Temperatur und Wärmestrahlung. Neben der Evaluierung von geeigneten Mitteln der Brandbekämpfung, wurden chemische Untersuchungen des Rauchgases, des Löschwassers und der persönlichen Schutzkleidung durchgeführt. Ziel war es, mögliche spezielle Gefahren für Personen sowie die Umwelt zu identifizieren und die derzeitigen Einsatzhinweise zu aktualisieren.

Grundlagen

Allgemeiner Aufbau eines Lithium-Batteriesystems im Fahrzeug

Batteriesysteme für den Einsatz als Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen bestehen aus Batteriemodulen. Ein Batteriemodul ist wiederum eine Gruppe von Zellblöcken, welche aus Einzelzellen bestehen. Aufgrund der höchsten Energiedichte bei wiederaufladbaren Zellen werden hierfür i.d.R. Lithium-Ionen-Batteriezellen mit Einzelspannungen von 2,2 V bis 4,2 V verwendet [1]. Im Automobilbereich als Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen eingesetzte Batteriesysteme sind nach DIN VDE 0132 aufgrund ihrer Spannung i.d.R. als Hochvolt-Systeme eingestuft [2]. Dadurch müssen bei der Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohren die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zwingend beachtet werden.

Zum Schutz der empfindlichen Komponenten des Batteriesystems vor Umwelteinflüssen, wie Staub und Wasser, befinden sich die Batteriemodule in einem Gehäuse, das üblicherweise über ein Kühlsystem verfügt. Im oberen Bereich des Gehäuses wird ein Gehäusedeckel aufgeschraubt und verklebt. Durch die Positionierung unterhalb des Fahrzeugs ist der untere Teil des Gehäuses, Batterietrog genannt, gegen Beschädigungen entweder mechanisch stabiler ausgeführt oder mit einem Schutz ausgestattet. Eine beispielhafte Darstellung des Aufbaus ist in Abbildung 1 zu sehen. Durch den verdeckten Einbau des Batteriesystems im unteren Bereich des Fahrzeuges gestalten sich Kühl- und Löschmaßnahmen oft schwierig.

des ersten Löschfahrzeugs unter Pressluftatmer).

- Es ist ein Sicherheitstrupp zu stellen (z.B. erster Trupp des zweiten Löschfahrzeugs).
- Durch den zweiten Trupp des zweiten Löschfahrzeugs ist die Löschwasserversorgung an einer Wasserentnahmestelle sicherzustellen. Dieser Trupp kann in der Folge sonstige Einsatzmittel (z.B. System zur Löschmitteleinbringung) vornehmen. An Einsatzorten, an denen nicht die notwendige Löschwasserversorgung durch Entnahmestellen sichergestellt ist, muss diese durch andere Maßnahmen realisiert werden (z.B. Pendelverkehr).
- Besonders wichtig ist die Informationsbeschaffung zum Fahrzeug (insbesondere Rettungsdatenblätter) durch den Leitungsdienst (Zugführer) und die Informationsweitergabe (z.B. Einbauort des Batteriesystems) an den Einheitsführer (Staffelführer erstes Löschfahrzeug) unter Pressluftatmer.
- Die Dokumentation der Einsatzmaßnahmen durch die Einsatzleitung (zeitlicher Ablauf, Löschwasserverbrauch und dessen Verbleib (Mischkanal, Straßengraben etc.)) wird sichergestellt.
- Die Zusammenarbeit mit der Polizei und dem Abschleppunternehmen obliegt dem Einsatzleiter.
- Nach der Brandbekämpfung ist das Fahrzeug an ein Fachunternehmen zum Abtransport und zur sicheren Verwahrung zu übergeben. Das vfdb-Merkblatt 0612 gibt hierzu Hinweise [8]. Darin ist Folgendes formuliert „...Bei der Übergabe an Behördenvertreter/ Bergeunternehmer sind die Antriebsart des Fahrzeugs und die erfolgten Feuerwehrmaßnahmen (z.B. Hochvolt-Deaktivierung) mitzuteilen. Insbesondere ist auf eine mögliche Gefährdung durch

die gezielte Löschwasserapplikation mittels Hohlstrahlrohren zielführend, um den Batteriebrand zu löschen und thermisch aufbereitete Module zu kühlen.

Option 2: Brandbekämpfung mit einem Verfahren zur Löschmitteleinbringung in das Batteriesystem

Die beiden Angriffstrupps werden durch einen weiteren Trupp zur Verwendung eines Sonderlöschgerätes zur Löschmitteleinbringung in das Batteriesystem ergänzt. Der Trupp für die Bedienung des Systems zur Löschmitteleinbringung muss aufgrund der Nähe zum Fahrzeug durch mindestens einen der eingesetzten Angriffstrupps vor Flammenbeaufschlagung geschützt werden.

Wesentliche Aufgaben an der Einsatzstelle

- Die Absicherung der Einsatzstelle gegen den fließenden Verkehr muss sichergestellt sein.
- Es ist sicherzustellen, dass aufgrund der hohen Toxizität der Rauchgase Fenster und Türen von nahestehenden Gebäude zu schließen sind. Dabei ist permanent die Ausbreitungsrichtung zu berücksichtigen. Unbeteiligte haben sich nicht im Gefahrenbereich aufzuhalten.
- Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die die Vornahme zweier Hohlstrahlrohre zur Brandbekämpfung am Fahrzeug bzw. für Kühlmaßnahmen am Batteriesystem ermöglichen (z.B. zwei Trupps des ersten Löschfahrzeugs).
- Die Erkundung des Fahrzeugs muss sichergestellt werden, um mögliche Öffnungen im Batteriesystem zu finden (z.B. Staffelführer

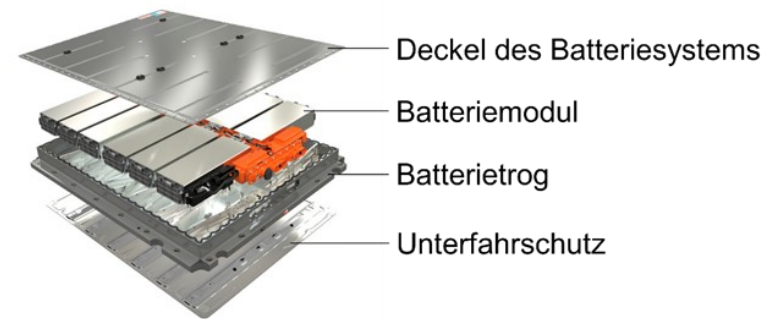


Abbildung 1: Batteriesystem mit Batteriegehäuse [3] mit Ergänzungen der Autoren

Thermal Runaway

Dem Brand eines Batteriesystems geht die Beschädigung einer einzelnen Batteriezelle oder eines Batteriemoduls voraus. Ursächlich dafür können neben Überladung und Tiefenentladung, auch Wärmeexposition oder eine mechanische Beschädigung sein [3, 4]. Die Folge ist eine Reaktion der chemischen Komponenten einer Zelle miteinander, also eine Zersetzung der Komponenten unter Wärmefreisetzung. Diesem Vorgang schließen sich ein Temperaturanstieg mit einhergehender Volumenvergrößerung und ein Druckaufbau an. Diese sich selbst beschleunigende Reaktion mit exotherm verlaufender Zersetzung der Zellbestandteile wird als Thermal Runaway (TR) bezeichnet. Der Druck kann über Druckentlastungsventile abgebaut werden. Durch die freiwerdende Wärme können jedoch weitere Batteriezellen konditioniert werden und anschließend ebenfalls in den TR übergehen. Bei diesem als Propagation (Fortpflanzung) bezeichneten Vorgang kann sich der TR bei ausreichender thermischer Konditionierung auf das gesamte Batteriesystem ausbreiten. In der nachfolgenden Abbildung 2 sind die beschriebenen Schritte schematisch dargestellt.

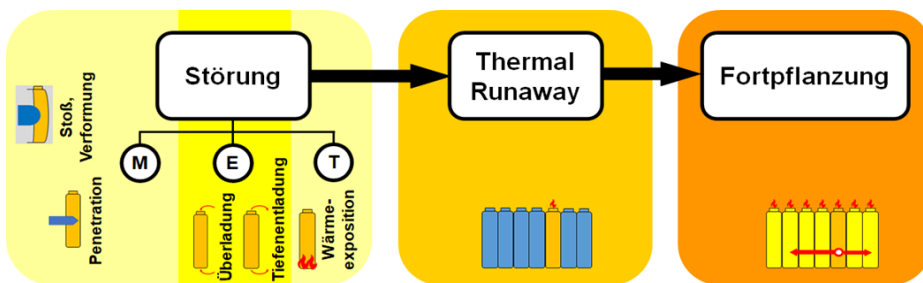


Abbildung 2: Beschreibung des Thermal Runaway

Phase 3: Fahrzeuge im Vollbrand unter Beteiligung des Batteriesystems

Die Einsatzkräfte können beim Eintreffen an der Einsatzstelle davon ausgehen, dass bereits ein Teil der im Batteriesystem befindlichen Batteriemodule (unter Flammenbildung) reagiert hat. Dadurch können sich nur noch die verbliebenen aktiven Module am Brand beteiligen. Es ist naheliegend, dass die bislang nicht am Brand beteiligten Module durch das Thermofeedback des Vollbrandes thermisch aufbereitet sind und sich im weiteren Verlauf am Brand beteiligen. Die erste Maßnahme zweier zeitgleich vorgehender Trupps ist es, zunächst den Brand der peripheren brennbaren Bauteile, wie Kunststoffteile in den Radkästen oder die Reifen mittels Hohlstrahlrohren zu löschen. Danach können abhängig von den zur Verfügung stehenden Einsatzmitteln die nachfolgenden beiden Optionen angewandt werden. Bei beiden Optionen muss mit einem Löschwasserverbrauch von 1000 l bis 3000 l und einer Brandbekämpfungsdauer von 30 bis 45 min gerechnet werden.

Option 1: Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohren

Die Einsatzkräfte zweier zeitgleich vorgehender Trupps sorgen nach dem Ablöschen des Fahrzeugbrandes mittels Hohlstrahlrohren dafür, dass die thermisch aufbereiteten Module des Batteriesystems kontrolliert und ohne Brandausbreitung auf die Umgebung des Fahrzeugs ausreagieren können. Sind infolge der Wärmefreisetzung Löcher oder sonstige Öffnungen im Batteriesystem entstanden, sind diese mit Hilfe der WBK durch einen erfahrenen, fachkundigen Einheitsführer (z.B. erstes Löschfahrzeug) lokalisierbar. Hier ist die

Option 1: Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohren

Die Brandbekämpfung sollten zwei zeitgleich agierende Trupps mit Hohlstrahlrohren sicherstellen, um die Brandausbreitung auf das Fahrzeug zu verhindern. Allerdings sollte Wasser sparsam verwendet werden, weil ein Großteil unwirksam abfließt. Durch die Verhinderung der Brandausbreitung auf das gesamte Fahrzeug, kann die Konditionierungsgeschwindigkeit weiterer Zellen/ Module reduziert werden. Wird die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindert, kann der Brand auf das Batteriesystem begrenzt werden.

Option 2: Brandbekämpfung mit einem Verfahren zur Löschmitteleinbringung in das Batteriesystem

Die Einsatzkräfte verhindern eine weitere Brandausbreitung durch den Einsatz von Hohlstrahlrohren. Steht ein System zur Löschmitteleinbringung zur Verfügung, besteht die Möglichkeit, dieses unter Beachtung der Sicherheitsanforderungen anzuwenden. In diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass beim Eintreffen der Kräfte an der Einsatzstelle ein großer Anteil der Batteriemodule noch unversehrt ist. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Systeme zur Löschwassereinbringung in dieser Brandphase einen Mehrwert gegenüber der ausschließlichen Verwendung von Hohlstrahlrohren haben können. Voraussetzung ist, dass die Systeme fachgerecht eingesetzt werden, wobei eine sofortige Applikation von Löschwasser mit dem Eindringen in das Batteriesystem sichergestellt werden muss.

Initiierung des Batteriebrandes

Die Initiierung des Batteriebrandes erfolgte mittels eines Metalldornes, der an herstellerseitig vorbereiteten Positionen von unten in die Batteriesysteme eingetrieben wurde. Dadurch kam es zu einem Kurzschluss in einer Batteriezelle mit sich anschließendem TR. Durch Wärmeexposition verursacht folgte die Propagation mit sich anschließendem Brand. Diese Art der Initiierung des Thermal Runaway stellt im Vergleich zu anderen evaluierten Methoden und dem realen Einsatzfall den Worst Case dar.

Brandentwicklungsphase

Die Penetration des Batteriesystems markierte den Versuchsstart. Mindestens 15 Minuten nach Versuchsstart erfolgte die Brandbekämpfung. In der Zwischenzeit konnte sich der Brand entwickeln. Diese immer gleichen Vorbereitungsschritte sollten eine maximale Vergleichbarkeit der Versuche untereinander ermöglichen.

Fahrzeuge für die Brand- und Löschversuche

Für die Brand- und Löschversuche wurden von den Herstellern BMW Group, Opel Automobile GmbH und Volkswagen AG insgesamt 14 Fahrzeuge als Versuchsobjekte zur Verfügung gestellt. Die BMW Group übergab für die Versuchszwecke zwei Fahrzeuge des Modells i4. Von der Opel Automobile GmbH wurden 5 Corsa e und 1 Mokka e zur Verfügung gestellt. Die Volkswagen AG hat das Forschungsprojekt mit 5 PKW des Modells ID.4 und mit einem PKW des Modells ID.5 unterstützt.

Für die Versuche des Teilschrittes 1 des Projekts wurden 12 der 14 Fahrzeuge verwendet. Die verbleibenden 2 sind für Versuche des Teilschrittes 2 vorgesehen.

Untersuchte Brandbekämpfungsstrategien

Eine Recherche ergab, dass mit Ausnahme der Verbringung eines Elektrofahrzeuges in mit Wasser befüllte Abrollbehälter o.ä. vier Brandbekämpfungsstrategien erfolgversprechend sind. Die vier in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführten Strategien wurden im Rahmen der Brand-/ Löschversuche angewandt und bewertet. In Referenzversuchen wurden zwei Fahrzeuge verwendet. Hierbei wurde für vergleichende Betrachtungen auf Brandbekämpfungsmaßnahmen verzichtet.

Brandbekämpfungsstrategien	Anzahl der Versuche
Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (Storz C-Kupplung)	4
Löschmitteleinbringung in Batteriesysteme mittels spezieller Löschtechnik (Murer Löschlanze und Rosenbauer Löschsystem)	3
Externe Kühlung mittels unter dem Fahrzeug positionierter Kühllarmatur	1
Brandbegrenzungsdecke	2
Referenzversuche	2

Phase 2: Fahrzeuge in der Brandentwicklungsphase mit Flammenbildung an Radkästen, im Bereich der Schweller sowie an Front und Heck.

Bei derartigen Einsätzen muss es oberste Priorität sein, die Ausbreitung der Flammen auf das gesamte Fahrzeug zu verhindern, damit der Brand nicht in die exponentielle Brandphase/ Vollbrandphase übergeht. Dadurch kann verhindert werden, dass das Batteriesystem durch zusätzliche Flammen und das resultierende Thermofeedback thermisch konditioniert wird und sich die begonnene chemische Reaktion unter Zunahme der Brandleistung intensiviert. Nach aktuellem Erkenntnisstand können die aus dem Batteriesystem austretenden gerichteten Flammen nur dann gelöscht werden, wenn über Öffnungen Lösch-/Kühlwasser eingebracht werden kann. Ist dies nicht der Fall, sollten sich die Brandbekämpfungsmaßnahmen auf das kontrollierte Ausreagieren der Module im Batteriesystem beschränken. In einem Experiment unter Verwendung von Hohlstrahlrohren wurde hierfür eine Löschwassermenge von ca. 6.700 l und eine Einsatzzeit von 86 Minuten und 30 Sekunden benötigt.

Validierte Vorschläge für einsatztaktische Maßnahmen sind aufgrund der Informationslage bzw. fehlender weiterer Experimente derzeit noch nicht abschließend vorhanden. Dennoch erscheinen ableitend vom eben genannten Experiment folgende Optionen aussichtsreich.

Phase 1: Austritt von Ventinggasen aus dem Batteriesystem.

Auch wenn keine Flammenbildung erkennbar ist, müssen alle am Fahrzeug tätigen Einsatzkräfte die vollständige Persönliche Schutzausrüstung für die Brandbekämpfung einschließlich Pressluftatmer tragen. Prioritär muss verhindert werden, dass sich die aus dem Batteriesystem austretenden Ventinggase entzünden. So kann die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindert und das resultierende Thermofeedback, das für die Beschleunigung der Reaktion im Batteriesystem verantwortlich ist, unterbunden werden. Gelingt dies nicht, tritt das Fahrzeug in die Brandentwicklungsphase ein.

Insbesondere in geschlossenen Räumen ist beim Austritt von Ventinggasen mit explosionsfähigen Atmosphären zu rechnen. Es ist durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, dass sich die Ventinggase nicht entzünden. Dies kann z.B. durch den Einsatz eines Hydroschildes oder die Applikation von Wasser aus Hohlstrahlrohren erreicht werden. Zudem kann der Einsatz eines Überdruckbelüfters, bevorzugt in explosionsgeschützter Ausführung, vielversprechend sein. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Messung auf Explosionsgefahren mit den Standardmessgeräten der Feuerwehr (Kalibrierung z.B. auf Methan o.Ä.) keine genauen Messergebnisse liefert.

Eingesetzte Messtechnik

Der Versuchsaufbau wurde im Laufe des Projektes erweitert. Beschrieben wird nachfolgend der finale Zustand messtechnischer Ausstattung. An insgesamt 18 Messstellen wurden die zeitabhängigen Temperaturverläufe gemessen. Davon waren jeweils 5 in unterschiedlichen Höhen im Front- und Heckbereich des Fahrzeuges sowie 4 weitere in der Mitte über dem Fahrzeug positioniert. Die verbleibenden 4 Temperaturmessstellen wurden im Innenbereich des Fahrzeuges platziert. Von einer Fahrzeugseite und dem Heck wurden zeitabhängige Verläufe der Strahlungswärmestromdichte erfasst.

Zur Bewertung der einzelnen Brandbekämpfungsstrategien wurden die zur Brandbekämpfung benötigten Lösch- und Kühlwasservolumenströme, deren kumulierte Gesamtverbräuche sowie die Einsatzzeiten gemessen.

Weiterhin erfolgte eine Rauchgasanalyse mittels Fourier-Transformation Infrarot Spektroskopie, ergänzt um einen Wasserstoff- sowie einen Sauerstoffsensoren. Von besonderem Interesse waren neben den typischen Rauchgaskomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid CO₂, Chlorwasserstoff (HCl) und Cyanwasserstoff (HCN) auch Fluorwasserstoff (HF), verschiedene in Li-Ionen-Batterien verwendete Elektrolytsubstanzen und die Zersetzungsprodukte des Leitsalzes Phosphorylfluorid (POF₃) und Carbonylfluorid (COF₂). Die Gasmessstelle war im Innenraum der Fahrzeuge an der Kopfstütze des Fahrersitzes positioniert. Bei einem Versuch befand sich die Entnahmestelle unterhalb des Fahrzeuges.

Weiterhin wurden bei ausgewählten Versuchen die Lösch- und Kühlwässer hinsichtlich verschiedener Kontaminationen untersucht. Von besonderer Relevanz waren die Konzentrationen bestimmter Metalle, wie Eisen, Kupfer, Mangan, Cobalt, Nickel, Blei, Zink, Chrom, Vanadium, Lithium, Magnesium und Aluminium sowie die PAK-Belastung (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe).

Auch bezüglich der PSA-Kontaminationen wurden in diesem Projekt erste Anstrengungen zur Probengewinnung unternommen. Dazu wurden an der PSA der Einsatzkräfte im Brustbereich PSA-Proben platziert. In einem nachfolgenden Projekt soll eine Methode zur Auswertung dieser Proben erarbeitet und die Kontamination bewertet werden.

Alle Versuche wurden durch zwei Kameras videodokumentiert. Zusätzlich nutzten die Einsatzkräfte noch Wärmebildkameras (WBK) mit Aufnahmefunktion.

Phase 0: Das Fahrzeug ist beschädigt, aber es geht keine Eskalation/Brand vom Batteriesystem aus.

In dieser Phase ist die allgemeine Einsatztaktik, wie bei einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb, zu wählen. Einen wichtigen Unterschied stellt die Beachtung der Hinweise im Rettungsdatenblatt des Fahrzeugs, wie z.B. die Vorgehensweise zur Entkopplung der Hochvoltkomponenten vom Batteriesystem, dar. Während dieser Phase ist immer auf eine mögliche Reaktion aus dem Batteriesystem zu achten. Ob es zu einer Erwärmung des Batteriesystems infolge einer chemischen Reaktion, also den Beginn der Phase 1, kommt, kann mit Hilfe einer WBK überprüft werden. Es empfiehlt sich, in engen zeitlichen Abständen z.B. den Fußbodenbereich des Fahrzeuginnenraums hinsichtlich möglicher Temperaturerhöhungen zu überprüfen. Als vorbereitende Maßnahme auf eine möglicherweise eintretende Phase 1 ist die Wasserversorgung mit zwei Hohlstrahlrohren vorzubereiten und wenn vorhanden, ein Überdruckbelüfter in Position zu bringen. Mit Hilfe der Hohlstrahlrohre oder eines Lüfters können die brennbaren Ventinggase der Phase 1 verwirbelt und damit die Entzündung bzw. den Beginn der Phase hinausgezögert werden. Besonders beim Einsatz eines Überdruckbelüfters sind die räumlichen Gegebenheiten an der Einsatzstelle zu beachten. Die Ausbreitung und damit die Verdünnung der Ventinggase muss zweifelsfrei möglich sein, um nicht eine Ansammlung einer explosiven Atmosphäre an anderer Stelle zu erzeugen. An der Einsatzstelle sollte geprüft werden, ob eine ausreichende Anzahl von voll ausgestatteten Atemschutzgeräteträgern zur Verfügung stehen.

Trupps abgesichert werden. Diese allgemeine Vorgehensweise ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

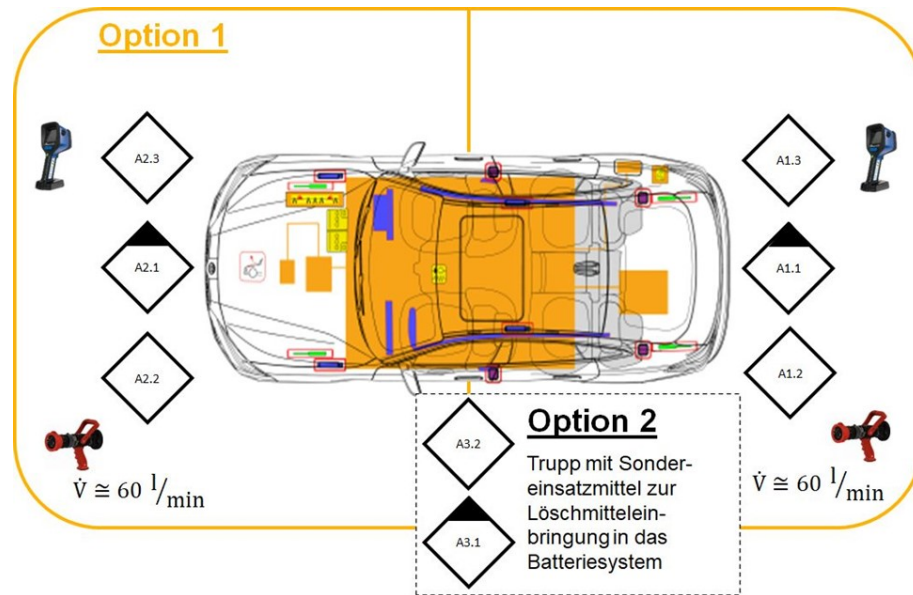


Abbildung 11: Empfehlung einer allgemeinen Vorgehensweise bei der Brandbekämpfung eines E-Fahrzeugs mit Beteiligung des Batteriesystems am Brand

Die Vorgehensweise ist auf die vorhandene Brandphase und die zur Verfügung stehenden Einsatzmittel abzustimmen. Auf die möglichen Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit der Brandphasen wird nachfolgend eingegangen.

Die Brände verliefen in den 15 Minuten Entwicklungszeit trotz gleicher Vorbereitungsprozeduren auch bei baugleichen Fahrzeugen oft unterschiedlich. Daher lagen zum Zeitpunkt des Löschangriffs oftmals verschiedene Brandzustände vor. Die Einsatzkräfte müssen sich beim Eintreffen an der Einsatzstelle demzufolge auf eine der nachfolgenden Brandphasen einstellen.

Brandverlauf bei Beteiligung des Batteriesystems

Phase 1: Ausgasen/ Stichflamme/ Funkensprühen

Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten Ventinggas im Bereich der Einstichposition aus (siehe Abbildung 3), die aufgrund der darin enthaltenen brennbaren Bestandteile sich entzünden können. Die Folgen sind eine Brandausbreitung auf andere Fahrzeugteile sowie die Konditionierung weiterer Batteriemodule. Die Brandversuche haben gezeigt, dass sich ein E-Fahrzeug bis zu 30 min in dieser Phase befinden kann.

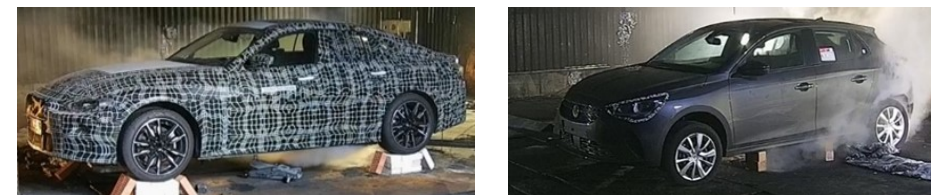


Abbildung 3: Beispiele für die Phase des Ausgasens des Batteriesystems

Phase 2: Exponentielle Zunahme der Brandintensität

Wenn die freigewordene Wärme im Batteriesystem durch die Eskalation hoch genug ist, um ein Thermal Runaway auszulösen und keine einsatztaktischen Maßnahmen ergriffen werden, geht das Fahrzeug in die nächste Brandphase über. In dieser Brandentwicklungsphase ist mit Flammenbildung an Radkästen, im Bereich der Schweller sowie an Front und/ oder Heck zu rechnen (siehe Abbildung 4).

Die Brandintensität nimmt schnell zu und entsprechend findet eine schnelle Brandausbreitung statt. Werden keine eindämmenden Brandbekämpfungsmaßnahmen durchgeführt, folgt die nächste Brandphase.



Abbildung 4: Beispiele für die Brandentwicklungsphase

Phase 2:

Das Fahrzeug befindet sich in der Brandentwicklungsphase mit Flammenbildung an Radkästen, im Bereich der Schweller sowie an Front und Heck.

Phase 3:

Das Fahrzeug ist unter Beteiligung des Batteriesystems im Vollbrand.

In den Experimenten erwies es sich als zweckmäßig, die Brandbekämpfung mindestens durch zwei Trupps mit Hohlstrahlrohren durchführen zu lassen. Die Strahlrohre sollten auf eine möglichst geringe Durchflussmenge (in den Versuchen waren 60 l/min ausreichend) eingestellt sein. Anlassbezogen kann der Durchfluss erhöht oder, wenn möglich, auch weiter reduziert werden.

Der Schwerpunkt der Brandbekämpfung liegt im Bereich Front und Heck (auch an den Radkästen). Daher sollten sich die Brandbekämpfungsmaßnahmen auf diese Bereiche konzentrieren. Beide Trupps sollten sich dem Fahrzeug über die Front und das Heck unter Ausnutzung der Reichweite der Strahlrohre nähern. Auch die in den recherchierten Merkblättern formulierte Taktik der diagonalen Annäherung an das Fahrzeug ist zielführend. Sollte eines der Sondereinsatzmittel zur Löschmitteleinbringung in das Batteriesystem vorhanden sein, kann dieses durch einen dritten 2-Mann-Trupp, der mit entsprechend geschultem Personal besetzt ist, zum Einsatz gebracht werden. Der Trupp sollte durch mindestens einen der ersten beiden

Brandbekämpfungsmaßnahmen

Identifikation der Beteiligten des Batteriesystems an dem Brand

Die Auswahl einer Einsatztaktik ist unter anderem abhängig von der Art des Antriebes. Daher ist die Erkundung, z.B. nach der AUTO-Regel, essenziell. Zur Festlegung der Einsatztaktik ist des Weiteren zu klären, ob das Batteriesystem sich am Brand beteiligt. Folgende Indikatoren weisen auf die Beteiligung des Batteriesystems am Brand hin [5]:

- Zyklische Rauchfreisetzung (hell-/dunkelgrau) im Bereich der Hochvoltbatterie,
- abnormaler aromatischer Geruch,
- Zischende, pfeifende und knatternde Geräusche,
- Funkenflug und zyklische Stichflammen sowie
- nachweisbare Temperaturerhöhung der Batterie (Detektion mittels WBK).

Die zu verwendende Einsatztaktik muss außerdem auf die dem Einsatz zugrundeliegende Brandphase des Fahrzeuges angepasst werden. Folgende Brandphasen können auftreten:

Phase 0:

Das Fahrzeug ist beschädigt, aber es geht keine Eskalation/Brand vom Batteriesystem aus.

Phase 1:

Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten Ventinggase aus, die sich entzünden können. Auch Funkenbildung aus dem Batteriesystem ist möglich.

Phase 3: Vollbrand

Diese Brandphase ist dadurch charakterisiert, dass sich das Fahrzeug unter Beteiligung des Batteriesystems im Vollbrand befindet, siehe Abbildung 5. Das bedeutet, die Flammen haben sich von der Front und/oder dem Heck über das gesamte Fahrzeug ausgebreitet. Der Brand ist auch in den Innenbereich des Fahrzeugs vorgedrungen.



Abbildung 5: Beispiele für die Vollbrandphase

Die Brandversuche machen deutlich, dass die Einsatztaktik auf die Brandphasen angepasst werden muss. Die Übergänge zwischen den Phasen sind fließend.

Brand- und Löschexperimente

In allen Versuchen, in denen eine Brandbekämpfung vorgenommen wurde, kam ausschließlich Wasser als Löschmittel zum Einsatz. Löschmittelzusätze wurden nicht verwendet.

Referenzversuche

Bei zwei Referenzversuchen mit Modellen unterschiedlicher Hersteller wurde das Abbrandverhalten ohne Brandbekämpfungsmaßnahmen, respektive die Abbrandzeit, bestimmt. Diese lässt sich in Relation zur Einsatzzeit setzen, wenn Einsatzmittel wie Hohlstrahlrohre, Kühllarmaturen oder spezielle Verfahren zur Löschmitteleinbringung verwendet werden. Damit kann deren möglicher Mehrwert gegenüber der in einigen Merkblättern angegebenen Option, im Einzelfall das Fahrzeug kontrolliert abbrennen zu lassen, bestimmt werden. Die beiden Referenzversuche verliefen sowohl in der Brandentstehungsphase als auch im sich anschließenden Abbrand unterschiedlich.

Ableitend aus den Referenzversuchen ist festzuhalten, dass sich Feuerwehreinsatzkräfte beim Eintreffen an der Einsatzstelle auf verschiedene Brandszenarien bzw. -phasen einstellen müssen. Das Spektrum reicht von einem Einsatz, bei dem aus dem Batteriesystem über einen längeren Zeitraum brennbare, noch nicht entzündete Ventinggase austreten, bis hin zu einem im Vollbrand stehenden Fahrzeug.

Rettungsleitstelle. Ursache eines automatischen Anrufs ist beispielsweise das Auslösen eines Airbags.

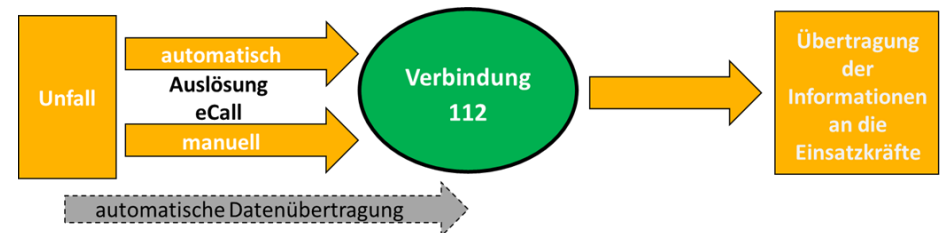


Abbildung 10: Prinzip von eCall

Im Verlauf des Anrufes werden folgende Daten übermittelt:

- Zeitpunkt des Unfalls,
- Auslöseart: manuell oder automatisch,
- 17-stellige Fahrzeugidentifizierungsnummer,
- Antriebsart, wie Benzin, Diesel, Gas, Elektro sowie Fahrzeugklasse,
- Fahrzeugposition,
- die letzten zwei Fahrzeugpositionen (Längen- und Breitengradunterschiede in Bezug zur aktuellen Fahrzeugposition),
- Fahrtrichtung des Autos,
- Anzahl der Insassen, sofern die Sicherheitsgurte angelegt wurden.

Dieses System ermöglicht es den Leitstellen, die alarmierten Kräfte bereits auf der Anfahrt zum Einsatzort über wichtige Punkte, wie die Antriebsart, zu informieren.

Kennzeichenabfrage bei der Leitstelle und Sichtung von Rettungsdatenblättern

Angaben zum Fahrzeugtyp und Baujahr können im Rahmen der Kennzeichenabfrage über die Leitstellen eingeholt werden. Mit Hilfe dieser Informationen können die Einsatzkräfte vor Ort ein fahrzeugspezifisches Rettungsdatenblatt herunterladen². Die Rettungsdatenblätter sind durch die Vielzahl an unterschiedlichen Fahrzeugmodellen zu einem wichtigen Bestandteil der Informationsgewinnung geworden. Den Datenblättern können beispielsweise die Lage der Hochvoltbauteile, einschließlich des Batteriesystems, und der Trennstellen zum Abschalten des Hochvoltsystems entnommen werden.



Abbildung 9: Prinzip der Kennzeichenabfrage

eCall-System

Fahrzeuge mit Typgenehmigung ab April 2018 müssen mit dem sog. eCall ausgerüstet sein. Das System nutzt Mobilfunk und Satellitenortung gleichermaßen. Es gewährleistet die Herstellung einer automatischen oder bei Bedarf manuellen Telefonverbindung zur

² z. B. kostenlos unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/rettungskarte/> oder <https://www.dekra.de/de/download-rettungskarte/>

In der nachfolgenden Abbildung 6 ist je Brandversuch die Dauer der einzelnen Brandphasen für die Referenzversuche visualisiert.

Es zeigte sich, dass trotz des reduzierten Volumenstroms die Brände beherrschbar waren. Bei etwa gleicher Einsatzzeit betrug die verbrauchte Löschwassermenge nur 1.550 l bzw. 960 l. Bei einem der o.g. vier Versuche lag zum Beginn des Löschangriffes ein Entstehungsbrand vor. Die Einsatzzeit lag, im Vergleich zu den untersuchten Vollbränden, mit fast 87 min bedeutend höher. Mit 6.700 l war auch der Lösch-/Kühlwasserbedarf, trotz eingestelltem Volumenstrom von 60 l/min, deutlich höher als bei den initiierten Vollbränden.

Die Versuche zeigten, dass die Reaktion im Batteriesystem durch Hohlstrahlrohre nur dann gestoppt werden kann, wenn über Löcher und sonstige Öffnungen Wasser in das Batteriesystem eingebracht wird. Sollte keine Möglichkeit zur Löschwassereinbringung in das Batteriesystem bestehen, muss die Taktik auf die Verhinderung der Brandausbreitung auf die Umgebung des Fahrzeugs und den kontrollierten Abbrand der Zellen im Batteriesystem ausgerichtet werden.

Diese Vorgehensweise der Brandbekämpfung ist sowohl in der Vollbrand- als auch in der Entstehungsphase anzuwenden.

Nach aktuellem, jedoch durch weitere Versuche zu verifizierendem Erkenntnisstand, muss bei Szenarien mit Entstehungsbränden mit längeren Einsatzzeiten und größeren Löschwassermengen gerechnet werden. Außerdem ist in dieser Phase mit einer erhöhten Entwicklung

Erkundung und Informationsbeschaffung

In der Erkundungsphase eines Einsatzes ist die Information der Antriebsart des Fahrzeugs essenziell. Das nachfolgende Kapitel zeigt die Vorgehensweisen auf, die Antriebsart zu bestimmen.

AUTO-Regel

In den Feuerwehreinheiten besteht Einigkeit darüber, bei Einsätzen unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien neben der bekannten G A M S – Regel ergänzend die sog. A U T O – Regel (siehe Abbildung 8) anzuwenden. Letztere wurde speziell für die Feststellung der Antriebsart eines Kraftfahrzeuges entwickelt.

- A**ustretende Betriebsstoffe – hören, riechen, sehen
z. B. Zisch- oder Knattergeräusche, Gasgeruch, Lachen- oder Nebelbildung
- U**nterboden, Kofferraum, Motorhaube erkunden
z. B. nach Gastanks oder orangefarbenen Hochvoltleitungen schauen
- T**ankdeckel öffnen
z. B. QR-Code finden, alternativer Betankungs-/ Ladesysteme erkennen, mehrere Tankdeckel
- O**berfläche absuchen
z. B. kein Auspuff vorhanden, markante Beschriftungen oder Erkennungszeichen, Überdruckventile vorhanden

Abbildung 8: Vorgehensweise nach der A U T O – Regel, nach [7]

Einsatzempfehlungen auf Grundlage durchgeführter Brand-/Löschversuche

Die nachfolgenden Empfehlungen spiegeln die aktuellen Forschungsergebnisse des IBK im Kontext der Brandbekämpfung an vollelektrischen Fahrzeugen wider. Die darin formulierten Vorschläge zur Einsatztaktik sind nicht als rechtsverbindliche Vorgaben zu verstehen.

Zur Sicherstellung des Brandschutzes wird der Einsatz zweier Löschfahrzeuge mit mindestens Staffelbesatzung empfohlen. Die Mannschaft sollte um einen Leitungsdienst (Zugführer) mit einfachen Führungsmitteln ergänzt werden. Als essenziell wird die Verfügbarkeit eines Tablets/Smartphones mit Internetzugang erachtet, um beispielsweise fahrzeugspezifische Rettungsdatenblätter einsehen zu können. Darüber hinaus ist zur Lokalisierung von Hot Spots und möglichen Öffnungen zur gezielten Löschmitteleinbringung die Nutzung einer WBK zweckmäßig. Nachfolgend werden Empfehlungen für die Bereiche Erkundung und Informationsbeschaffung sowie Brandbekämpfung beschrieben.

Einsatztaktische Informationen sind außerdem den vom IBK Heyrothsberge erstellten Einsatzhinweisen „Fahrzeuge mit Li-Ionen-Akkumulatoren“¹ zu entnehmen.

¹Das in der Version 1.0 vorliegende Merkblatt wird nach Abschluss des Teilschrittes 2 grundlegend überarbeitet. Die Neufassung steht ab dem 3.Quartal 2023 zur Verfügung.

an brennbaren Gasen zu rechnen. Es empfiehlt sich die Verdünnung mittels Sprühstrahlstößen.

Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien

In drei Versuchen kamen in der Phase des Vollbrandes Systeme zur Löschmitteleinbringung in das Batteriesystem zum Einsatz. Sie wurden erst dann eingesetzt, als die Einsatzkräfte den peripheren Fahrzeugbrand mit Hohlstrahlrohren soweit abgelöscht hatten, dass das Vorbringen der Löschsyste unter Wahrung des Eigenschutzes möglich war. Die Intensität des Batteriebrandes ging nach der Anwendung der Systeme zurück.

Hinsichtlich der Einsatzzeiten wurden im Vergleich zu den Versuchen unter Nutzung von Hohlstrahlrohren in der Vollbrandphase, vergleichbare Werte gemessen. Gleiches gilt für die Löschwasservolumina.

Versuche mit Systemen zur Löschmitteleinbringung in der Brandentstehungsphase konnten aufgrund begrenzter Ressourcen im aktuellen Projekt nicht durchgeführt werden. Zur Evaluierung dieser Systeme in der Brandentstehungsphase werden im Teilschritt 2 des Projektes weitere Versuche durchgeführt. In der Tabelle 2 sind die Einsatzzeiten zur Brandbekämpfung und die Wasserverbräuche für diese Versuche aufgelistet.

Versuch	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserverbrauch
1	ca. 31 min	3.000 l
2	ca. 18 min	1.100 l
3	ca. 33 min	1.400 l

Tabelle 2: Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Experimenten mit Systemen zur Löschmitteleinbringung und Hohlstrahlrohre

Externe Kühlung mittels spezieller Kühlarmaturen

In einem Brandversuch wurde exemplarisch eine spezielle Kühlarmatur zur Positionierung unter dem Fahrzeug, um das Batteriesystem auf diese Weise zu kühlen, untersucht.

Die Messergebnisse beim Einsatz eines solchen Systems in Zusammenarbeit mit zwei Hohlstrahlrohren zeigten, dass trotz hoher Wasserverbräuche, die Kühlung durch eine unter dem Fahrzeug positionierte Kühlarmatur nicht ausreicht, um das Gesamtsystem zu kühlen bzw. die Propagation zu unterbinden. Die Taktik, sich nach dem Ablöschen des Fahrzeugs ausschließlich auf die Kühlung unter dem Fahrzeug zu konzentrieren, führte nicht zur nachhaltigen Temperatursenkung.

Die punktuell gemessenen Maximalkonzentrationen im Innenraum des Fahrzeugs überschreiten in Einzelfällen den Einsatztoleranzwert [6]. Genauere Untersuchungen zur Gefährdung der Einsatzkräfte durch HF stehen aus.

Schadstoffuntersuchungen in Lösch- und Kühlwässern

Vereinzelt wurden erste Untersuchungen zu Schadstoffgehalten im aufgefangenen Lösch- und Kühlwasser durchgeführt. Unterschieden wurde zwischen Löschwasser, welches aus der Brandbekämpfung hervorgeht und Kühlwasser, welches beim Tauchvorgang von E-Fahrzeugen in z.B. Abrollbehältern anfällt. Löschwässer sind aufgrund des höheren Verdünnungsfaktors und der geringeren Kontaktzeit mit dem Brandobjekt in der Regel weniger stark mit Schadstoffen belastet als Kühlwässer, in welchen havarierte Fahrzeuge in Abrollbehältern bis zu 24 Stunden gelagert sind. Die Analysenergebnisse machen deutlich, dass die Schadstoffgehalte der untersuchten Wasserproben zu hoch waren, um sie ohne Behandlung in das öffentliche Kanalnetz zu leiten. Daraus schlussfolgernd sollte die Brandbekämpfung im Einsatz mit so wenig Wasser wie möglich durchgeführt werden. Dass diese Vorgehensweise mit gezieltem Löschwassereinsatz, respektive reduzierten Volumenströmen, und den lageangepassten Einsatzmitteln zielführend ist, zeigten die durchgeführten Löschversuche. Wie auch bei anderen Brandereignissen, sollten Möglichkeiten zur Löschwasserrückhaltung in Betracht gezogen werden.

Die erwähnten organischen Carbonate stammen aus dem Elektrolytgemisch der Batteriesysteme. Erfasst wurden folgende sechs Verbindungen: Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC), Ethylencarbonat (EC), Propylencarbonat (PC) und Vinylencarbonat (VC). Bei DMC, DEC und EMC handelt es sich um entzündliche Verbindungen, die mit punktuellen Konzentrationen in einer Höhe detektiert wurden, die gemeinsam mit anderen Verbindungen zur Ausbildung einer entzündungsfähigen Atmosphäre beitragen. Auch die Verbindungen EC, PC und VC wurden in signifikanten Konzentrationen nachgewiesen. Festzuhalten bleibt, dass aus den Konzentrationen und der Komplexität der Dämpfe und Rauchgase Störungen und Querempfindlichkeiten in einem Ausmaß resultieren, wodurch eine Auswertung der Infrarotspektren für die organischen Carbonate nicht mehr möglich war.

Fluorwasserstoff (HF) wurde im Zusammenhang mit auftretenden Zersetzungsgasen wie Carbonylfluorid (COF₂) und Phosphorylfluorid (POF₃) und ergänzenden Methoden ebenfalls eindeutig nachgewiesen.

Wie bereits angedeutet, entsteht HF auch bei Bränden von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren als Produkt der vollständigen Verbrennung fluorhaltiger Verbindungen, wie sie in der Kühlflüssigkeit der Klimaanlage oder bei speziellen Kunststoffen vorliegen. Bei einem Versuch mit einem Fahrzeug ohne Batteriesystem trat HF ebenso auf. Allerdings weisen die Untersuchungen auf höhere HF-Konzentrationen bei Elektrofahrzeugen mit Batteriesystemen hin.

Beide Trupps mussten unter Verwendung der beiden Hohlstrahlrohre trotz der Kühlung durch die Kühllarmatur weiterhin die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindern, bis alle Zellen im Batteriesystem thermisch durchgingen. Die Folge war, dass die Einsatzzeit, also der Zeitraum zwischen der Brandinitiierung und der erfolgreichen Brandbekämpfung, ca. 81 Minuten betrug. Durch den Einsatz der externen Kühllarmatur und den zeitgleichen Einsatz der Hohlstrahlrohre wurden insgesamt 22,4 m³ Lösch-/Kühlwasser verbraucht.

Brandbegrenzungsdecken

Als mögliche Alternative zu wasserführenden Einsatzmitteln wurden im Projekt zwei Brandversuche mit Brandbegrenzungsdecken (BBD) durchgeführt. Vor der Verwendung der BBD wurde das sich im Vollbrand befindende Fahrzeuge mittels Hohlstrahlrohren abgelöscht, damit ein sicherer Einsatz gewährleistet war.

Die Versuche zeigten, dass eine wiedereinsetzende Flammenbildung wirksam begrenzt werden konnte. Die Reaktion im Batteriesystem konnte aufgrund des Fehlens eines Löschmittels mit Kühlwirkung jedoch nicht gestoppt werden. Somit traten über einen Zeitraum von bis zu 50 Minuten im Übergang zwischen den Decken und dem Boden zyklisch Ventinggase aus. In der Abbildung 7 ist dieser Vorgang zu sehen. Im Vergleich zu den anderen Versuchen verlängerten sich durch den Einsatz der Brandbegrenzungsdecke die Einsatzzeiten.

In der Tabelle 3 sind die Einsatzzeiten und verbrauchten Löschwassermengen für beide Versuche aufgelistet.

Versuch	Beginn Löscharbeiten mittels HSR	Einsatzzeit	Lösch-/Kühlwasserverbrauch
1	ca. nach 15 min	ca. 123 min	1.300 l
2	ca. nach 25 min	ca. 48 min	2.950 l

Tabelle 3: Einsatzzeiten und Kühl-/ Löschwasserverbräuche bei den Versuchen mit Einsatz einer Brandbegrenzungsdecke

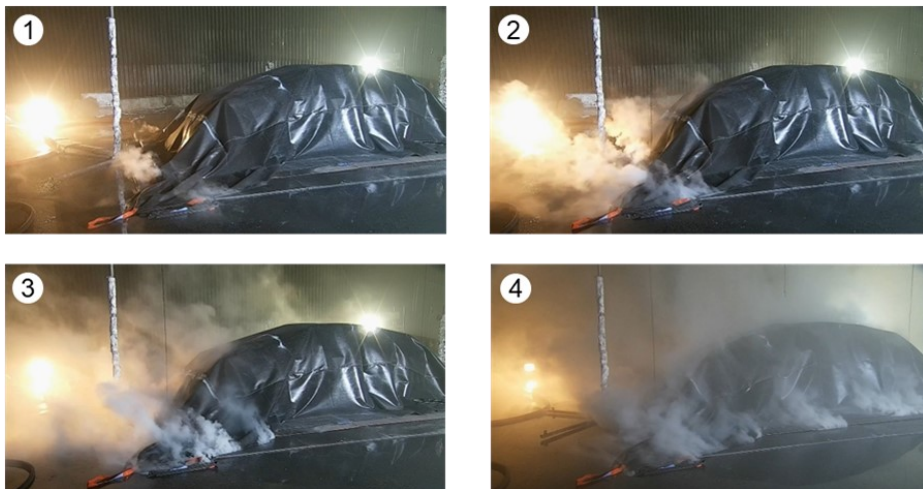


Abbildung 7: Einsatz der Brandbegrenzungsdecke an einem Elektrofahrzeug mit Batteriebrand

Chemische Untersuchungen

Gasmessungen

Wie bei allen Verbrennungen werden, auch beim Brand von E-Fahrzeugen mit Beteiligung des Batteriesystems, Schad- und typische Verbrennungsgase freigesetzt. Entsprechend muss darauf hingewiesen werden, dass Schadgase, wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Ammoniak (NH₃), Stickoxide (NO_x), Chlor- (HCl) und Cyanwassertoff (HCN) sowie diverse Kohlenwasserstoffe in beträchtlichen Mengen auftreten. Gleiches gilt auch bei Bränden an Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben. Eine genaue Differenzierung der Schadstoffquellen ist schwierig. Diese genannten Verbindungen werden im Folgenden nicht näher betrachtet. Lediglich relevante Verbindungen, wie z. B. Wasserstoff (H₂), die spezifisch oder verstärkt bei Elektrofahrzeugen auftreten, werden diskutiert.

H₂ entsteht bei Zersetzungsreaktionen innerhalb der Batteriezellen. Beim Austritt größerer Mengen kann es zur Ausbildung einer explosionsfähigen Atmosphäre (UEG 4,0 Vol.-%) kommen [5]. Vereinzelt Messungen ergaben Konzentrationen oberhalb der UEG mit bis zu 13,4 Vol.-% Wasserstoff. Insbesondere beim Einsatz von Brandbegrenzungsdecken traten hohe H₂-Konzentrationen auf. Neben H₂ wurden eine Vielzahl anderer Verbindungen, wie CO und diverse Kohlenwasserstoffe, darunter organische Carbonate, detektiert, die zur Ausbildung einer entzündungs- bzw. explosionsfähigen Atmosphäre beitragen. Somit muss beim Entfernen der Decke mit einer Durchzündung gerechnet werden.