



SACHSEN-ANHALT

Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher

Untersuchungen zum einsatztaktischen
Mehrwert gegenüber anderen
Löschtechniken und -taktiken



Ergebnisse aus zwei Projekten im Rahmen der
Brandschutzforschung der Bundesländer

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



Institut für Brand- und
Katastrophenschutz
Heyrothsberge

**Heyrothsberger
Manuskript**

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

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

Projektdaten

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Michael Neske (Projektleiter)

Dr. rer. nat. Julia Kaufmann

Dr.-Ing. Daniel Butscher

M. Sc. Christoph Vogel

Projektlaufzeiten:

Teilschritt 1: Januar 2021 bis Oktober 2022

Teilschritt 2: November 2022 bis Juni 2024

Forschungsberichtsnummern:

IMK 210 und 216

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.

Die Forschungsberichte und daraus produzierte Videos zum Thema E-Mobilität sind auf den Internetseiten des IBK Heyrothsberge unter folgendem Link bzw. dem QR-Code zu finden ¹:



<https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/forschungstaetigkeit/e-mobilitaet>

Heyrothsberge, April 2024

¹ Der Forschungsbericht 216 wird ab Juli 2024 zum Download zur Verfügung stehen.

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, nur unzureichend aufbereitet vorliegen.

Die nachfolgend vorgestellten Forschungsprojekte setzen an diesem Punkt an. Hierzu wurden die derzeit zur Anwendung empfohlenen Brandbekämpfungsstrategien von im Brand befindlichen Elektrofahrzeugen, bei denen der Batteriebrand ursächlich dafür ist, untersucht. Die Teilschritte 1 und 2 konzentrierten sich dabei auf Brandbekämpfungsmaßnahmen bei Voll- bzw. Entstehungsbränden.

Neben den üblicherweise bei Feuerwehren eingesetzten Hohlstrahlrohren wurden zwei Systeme, mit deren Unterstützung die Einsatzkräfte Lösch- und Kühlwasser in die Hochvoltspeicher (HV-Speicher) einbringen können, angewendet. Es kam weiterhin ein Sondereinsatzmittel zur externen Kühlung des HV-Speichers zum Einsatz, welches unter dem Fahrzeug zu positionieren ist. Zwei weitere Experimente dienten der Evaluierung des Mehrwerts von

Brandbegrenzungsdecken. Ergänzt wurde diese Auswahl um zwei Referenzversuche, bei denen keine Brandbekämpfung vorgenommen wurde. Die Bewertung der Wirksamkeit dieser Techniken und Taktiken erfolgte auf der Basis der Erfassung von Messgrößen, wie Lösch-/Kühlwasserverbräuche, 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, spezielle Gefahren für Personen sowie die Umwelt zu identifizieren und die derzeitigen Einsatzhinweise zu aktualisieren.

Grundlagen

Allgemeiner Aufbau eines HV-Speichers im Fahrzeug

HV-Speicher 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 eingesetzte HV-Speicher in Elektrofahrzeugen sind, trotz der Begrifflichkeit „Hochvolt“ [2], nach DIN VDE 0132 aufgrund ihrer Spannung (i.d.R. $< 1.000\text{ V}$) als Niederspannungsanlagen eingestuft [3]. Bei der Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohren sind die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände für Niederspannungsanlagen zwingend zu beachten (5 m bei Voll- und 1 m bei Sprühstrahl).

Zum Schutz der empfindlichen Komponenten des HV-Speichers 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 HV-Speichers im unteren Bereich des Fahrzeuges gestalten sich Kühl- und Löschmaßnahmen bei einem Brand des HV-Speichers oft schwierig.

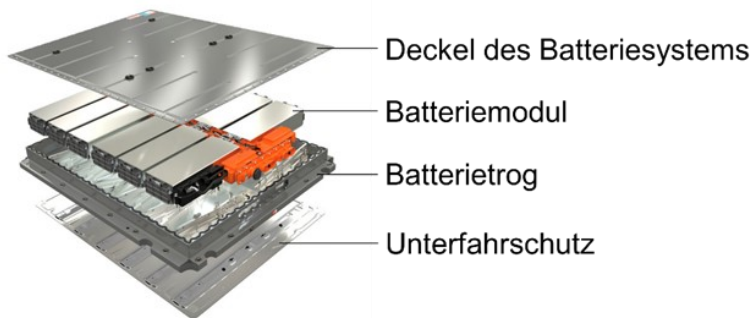


Abbildung 1: HV-Speicher mit Batteriegehäuse [4] mit Ergänzungen der Autoren

Thermal Runaway

Dem Brand eines HV-Speichers geht die Beschädigung einer einzelnen Batteriezelle oder eines Batteriemoduls voraus. Ursächlich dafür können neben Überladung und Tiefenentladung auch Wärmeexposition oder eine mechanische Beschädigung sein [5, 6]. 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. Die 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 den gesamten HV-

Speicher ausbreiten. In der nachfolgenden Abbildung 2 sind die beschriebenen Schritte schematisch dargestellt.

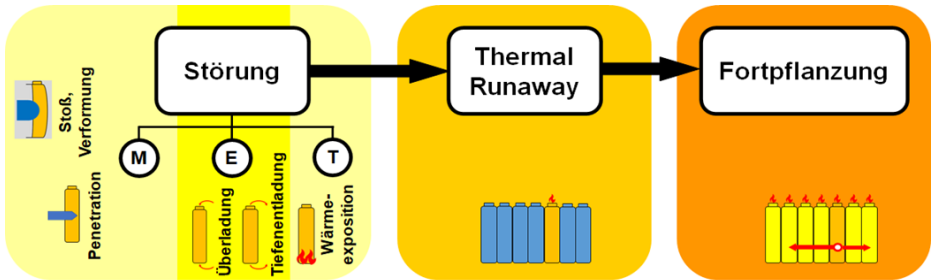


Abbildung 2: Beschreibung des Thermal Runaway [7]

Versuchskonzeption

Initiierung des Batteriebrandes

Die Initiierung des Batteriebrandes erfolgte mittels Penetration. Hierzu ist für die Versuchsreihe herstellerseitig eine Position am HV-Speicher vorbereitet worden, in der ein Metalldorn von unten in die HV-Speicher getrieben wurde. Dadurch kam es zu einem Kurzschluss in einer Batteriezelle mit sich anschließendem Thermal Runaway (TR). Für eine genaue Positionierung des Metaldorns mussten die Fahrzeuge aufgebockt werden. Aufgrund von Wärmeexposition folgte die Propagation weiterer Zellen mit anschließendem Brandereignis. Diese Art der Initiierung des TR stellt, im Vergleich zu anderen evaluierten Methoden und dem realen Einsatzfall, den Worst Case dar.

Brandentwicklungsdauer

Die Penetration des HV-Speichers markierte den Versuchsstart. Beim Erreichen der zu untersuchenden Brandphase erfolgte die Brandbekämpfung. Die Brandentwicklungsdauer lag im Bereich von 7,5 Minuten bis 25 Minuten nach Versuchsstart. Zur besseren Reproduzierbarkeit wurden immer die gleichen Vorbereitungsschritte angewendet (SOC: > 90 %², Starttemperatur HV-Speicher: ca. 20 °C).

Fahrzeuge für die Brand- und Löschversuche

Für die Brand- und Löschversuche wurden von den Herstellern BMW Group, Opel Automobile GmbH und Volkswagen AG insgesamt 15 Fahrzeuge als Versuchsobjekte zur Verfügung gestellt. Die BMW Group übergab für die Versuchszwecke 3 Fahrzeuge des Modells i4. Von der

² SOC – „State of Charge“, gibt Auskunft über den Ladezustand eines Fahrzeuges. Bei einem Fahrzeug lag der SOC bei 76 %.

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 15 Fahrzeuge verwendet. Die verbleibenden 3 waren 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 für die Untersuchungen relevant sind. Die vier in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführten Strategien wurden im Rahmen der Brand-/ Löschversuche angewandt und bewertet. Für Referenzversuche, bei denen für eine vergleichende Betrachtung keine Brandbekämpfungsmaßnahmen zum Einsatz kamen, wurden zwei Fahrzeuge verwendet.

Brandbekämpfungsstrategien	Anzahl der Versuche
Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (Storz C-Kupplung)	5
Löschmitteleinbringung in Batteriesysteme mittels spezieller Löschtechnik (Murer Löschlanze und Rosenbauer Löschsystem)	5
Externe Kühlung mittels unter dem Fahrzeug positionierter Kühllarmatur	1
Brandbegrenzungsdecke	2
Referenzversuche	2

Tabelle 1: Auflistung der durchgeführten Brand- und Löschversuche im Forschungsprojekt

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 angebracht. An der Beifahrerseite im Bereich der B-Säule sowie am Heck wurden zeitabhängige Verläufe der auf Einsatzkräfte einwirkenden Strahlungswärme in Form der Wärmestromdichte gemessen.

Zur Bewertung der einzelnen Brandbekämpfungsstrategien wurden die benötigten Lösch- und Kühlwasservolumenströme, deren kumulierte Gesamtverbräuche sowie die Einsatzzeiten gemessen. Im Rahmen eines Versuches unter Verwendung der Murer E-Löschlanze wurden zudem Messungen zur Körperdurchströmung durchgeführt³. Sie sollten zeigen, ob für den Anwendenden bei der fachgerechten Nutzung des Löschgerätes, Gefahren durch Stromschläge resultieren.

Weiterhin erfolgte eine Rauchgasanalyse mittels Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie, ergänzt um einen Wasserstoff- sowie einen Sauerstoffsensor. Von besonderem Interesse waren neben den typischen Rauchgaskomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Chlorwasserstoff (HCl) und Cyanwasserstoff

³ Die Ergebnisse können dem Abschlussbericht 216 entnommen werden.

(HCN) auch Fluorwasserstoff (HF), verschiedene in Li-Ionen-Batterien verwendete Elektrolytsubstanzen und die Zersetzungsprodukte des Leitsalzes Phosphorylfluorid (POF_3) und Carbonylfluorid (COF_2). Die Gasmessstelle war im Innenraum der Fahrzeuge an der Kopfstütze des Fahrersitzes positioniert. Bei einem Versuch befand sich die Messtelle unterhalb des Fahrzeugs.

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 im Brustbereich an der PSA der Einsatzkräfte PSA-Proben platziert. Im Teilschritt 3 des Projektes wird eine Methode zur Auswertung dieser Proben erarbeitet und die Kontamination bewertet.

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

Brandphasen

Der zeitliche Ablauf der provozierten Brände verlief trotz gleicher Vorbereitungsprozeduren und gleicher Initiierung des TR auch bei baugleichen Fahrzeugen oft unterschiedlich. Die Einsatzkräfte müssen sich beim Eintreffen an der Einsatzstelle demzufolge auf eine der nachfolgenden Brandphasen einstellen und entsprechend die Taktik anpassen. Der Übergang zwischen den einzelnen Brandphasen ist fließend. Der Einsatz von Löschgeräten und die dafür erforderlichen Hilfsmittel werden im Kapitel „Brand- und Löschexperimente“ näher erläutert.

Brandverlauf bei Beteiligung des HV-Speichers

Phase 1: Ausgasen/ Stichflamme/ Funkensprühen

Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten Ventinggase im Bereich der Penetrationsstelle aus (siehe Abbildung 3), die sich aufgrund der darin enthaltenen brennbaren Bestandteile entzünden können. Die Folgen sind eine Brandausbreitung auf andere Fahrzeugteile sowie die Konditionierung weiterer Batteriemodule im HV-Speicher. 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 HV-Speichers⁴

⁴ Das Aufbocken der Fahrzeuge ist im Zusammenhang der Versuchsdurchführung erforderlich und stellt keine einsatzrelevante Maßnahme für die Brandbekämpfung dar.

Phase 2: Exponentielle Zunahme der Brandintensität

Schreitet die Propagation weiter fort und werden keine einsatztaktischen Maßnahmen ergriffen, geht das Fahrzeug in die Brandentstehungsphase über. In dieser Brandphase 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. Entsprechend findet eine schnelle Brandausbreitung auf brennbare Fahrzeugteile (z. B. Reifen, Radkästen, Schweller) statt.

Werden keine eindämmenden Brandbekämpfungsmaßnahmen durchgeführt, folgt die Vollbrandphase.



Abbildung 4: Beispiele für die Brandentwicklungsphase

Phase 3: Vollbrand

Diese Brandphase ist dadurch charakterisiert, dass sich das Fahrzeug unter Beteiligung des HV-Speichers 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 Übergänge zwischen den einzelnen Brandphasen 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, Kühlaraturen 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. In der nachfolgenden Abbildung 6 ist je Brandversuch die Dauer der einzelnen Brandphasen für die Referenzversuche visualisiert.

Die Einsatzkräfte der Feuerwehren müssen vor Ort die Brandphase identifizieren und ihre Taktik auf die vorliegende Brandphase anpassen. Besonders gilt es, die Gefahren der verschiedenen Phasen zu beachten. Das Spektrum reicht von der Produktion größerer Menge unverbrannter Ventinggase, bis zu in Vollbrand stehenden Fahrzeugen mit entsprechender Wärmestrahlung.

Feuerwehreinsatzkräfte müssen sich beim Eintreffen an der Einsatzstelle auf verschiedene Brandphasen einstellen. Das Spektrum reicht von austretenden unverbrannten Ventinggasen, bis zu einem im Vollbrand stehenden Fahrzeug.

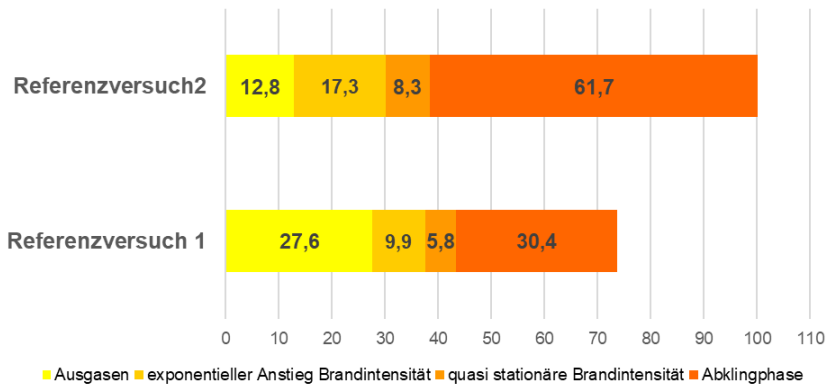


Abbildung 6: Dauer der Brandphasen in Sekunden bei den Referenzversuchen

Brandbekämpfung in der Vollbrandphase

Brandbekämpfung mittels Hochstrahlrohren

Die Versuche haben gezeigt, dass Brände in dieser Phase mit Hilfe von Hohlstrahlrohren beherrschbar sind. Zu empfehlen ist, die Brandbekämpfung durch zwei Trupps ausführen zu lassen. Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen ausschließlich Hohlstrahlrohre zum Einsatz kamen. Im ersten der drei Fälle wurde mit 135 l/min die Standardeinstellung der verwendeten Strahlrohre gewählt. Über die Einsatzzeit von knapp 35 min wurden kumuliert 6.000 l Wasser verbraucht. Eine Erkenntnis aus diesem ersten Versuch war, dass ein Großteil des Wassers ungenutzt oberflächlich abfloss und nicht lösch-/kühlwirksam wurde. Daher wurde der Volumenstrom bei

den zwei weiteren Versuchen auf 60 l/min reduziert. Es zeigte sich, dass trotz des reduzierten Volumenstroms die Brände beherrschbar waren. Bei ähnlicher Einsatzzeit betrugen die verbrauchten Löschwasservolumina nur 1.550 l bzw. 960 l. Die Reaktionen im HV-Speicher können bei ausschließlichem Einsatz von Hohlstrahlrohren nur durch das Einbringen von Wasser über Löcher oder sonstige Öffnungen im Gehäuse beendet werden. Alternativ ist eine kontrollierte Propagation der Zellen im HV-Speicher bei möglichst niedrigem Wassereinsatz zu gewährleisten. Dabei gilt es, eine Brandausbreitung auf die Umgebung und dem Fahrzeug zu verhindern und den Brand entsprechend auf den HV-Speicher zu begrenzen.

Die Reaktion im HV-Speicher kann durch Hohlstrahlrohre nur dann gestoppt werden, wenn über Löcher und sonstige Öffnungen Wasser in den HV-Speicher eingebracht wird. Eine alternative Taktik stellt die Verhinderung der Brandausbreitung auf die Umgebung sowie das Fahrzeug unter möglichst geringem Wassereinsatz bei kontrolliertem Abbrand der Zellen im HV-Speicher dar.

Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien

In drei Versuchen kamen in der Phase des Vollbrandes Systeme zur Löschmitteleinbringung in den HV-Speicher zum Einsatz. Sie wurden erst dann eingesetzt, als die Einsatzkräfte den peripheren Fahrzeugbrand mit Hohlstrahlrohren so weit abgelöscht hatten, dass das Vorbringen der Löschsysteme unter Wahrung des Eigenschutzes möglich war. Es gilt bei Verwendung dieser Systeme zu beachten, dass die Anwendung nur durch geschulte Einsatzkräfte erfolgen darf.

Weiterhin kann die Notwendigkeit bestehen, dass das Fahrzeug zur Platzierung eines der Systeme unter dem Fahrzeug durch weitere Hilfsmittel (Wagenheben, Spreizer) kurzzeitig angehoben oder zum Eintreiben einer Löschlanze mit robusten Keilen unterbaut werden muss. Die Intensität des Batteriebrandes ging nach der Anwendung der Systeme zurück.

In der Tabelle 2 sind die Einsatzzeiten zur Brandbekämpfung und die Wasserverbräuche für diese Versuche aufgelistet. Die Anwendung der Sondergeräte führt zu ähnlichen Einsatzzeiten sowie Löschwasservolumina bei der Brandbekämpfung in der Vollbrandphase wie bei der ausschließlichen Verwendung von Hohlstrahlrohren.

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 Hohlstrahlrohren

Hinsichtlich der Einsatzzeiten und dem Löschwasservolumen wurden im Vergleich zu den Versuchen unter Nutzung von Hohlstrahlrohren in der Vollbrandphase, vergleichbare Werte bei der Anwendung von Sondergeräten zur Löschmitteleinbringung gemessen.

Externe Kühlung mittels spezieller Kühlaraturen

In einem Brandversuch wurde exemplarisch eine spezielle Kühlaratur zur Positionierung unter dem Fahrzeug, um den HV-Speicher auf diese Weise zu kühlen, untersucht.

Beide Trupps mussten unter Verwendung der beiden Hohlstrahlrohre trotz der Kühlung durch die Kühlaratur weiterhin die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindern, bis alle Zellen im HV-Speicher 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 Kühlaratur und dem zeitgleichen Einsatz der Hohlstrahlrohre wurden insgesamt 22,4 m³ Lösch-/Kühlwasser verbraucht.

Die äußere Kühlung eines HV-Speichers durch ein System unter dem Fahrzeug unterbindet nicht die Propagation und führt zu keinem Löscherfolg. Das Gerät wird für diese Anwendung als ungeeignet eingestuft.

Brandbegrenzungsdecken

Als mögliche Alternative zu wasserführenden Einsatzmitteln wurden im Projekt zwei Brandversuche mit Brandbegrenzungsdecken (BBD) durchgeführt. Vor der Verwendung der BBD wurde das im Vollbrand befindliche Fahrzeug mittels Hohlstrahlrohren abgelöscht, damit ein sicherer Einsatz gewährleistet war. Ein Wiedereinsetzen der Flammenbildung konnte mittels der BBD wirksam begrenzt werden.

Jedoch konnte aufgrund fehlender Kühlwirkung die Propagation im HV-Speicher nicht beendet werden. Entsprechend traten über einen Zeitraum von bis zu 50 Minuten am Übergang zwischen der Decke und dem Boden zyklisch Ventinggase aus. In der Abbildung 7 ist dieser Vorgang zu sehen. Im Vergleich zu den anderen Versuchen konnte durch den Einsatz einer BBD der Einsatz an Löschmittel reduziert werden, jedoch verlängerten sich die Einsatzzeiten.

Die Verwendung einer Brandbegrenzungsdecke verhindert eine wiedereinsetzende Flammenbildung bei gleichzeitiger Reduzierung der Löschwassermenge. Die Reaktion im HV-Speicher kann nicht unterbrochen werden, weshalb bei einer erhöhten Einsatzzeit größere Mengen an Ventinggasen freigesetzt werden können.

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

Versuch	Beginn Löscharbeiten mittels HSR	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserver- brauch
1	ca. nach 15 min	ca. 123 min	799 l
2	ca. nach 25 min	ca. 48 min	266 l

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

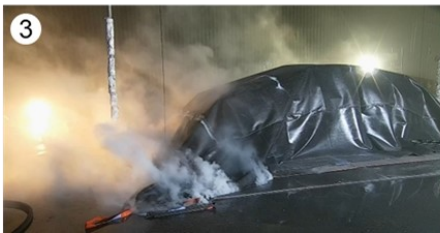


Abbildung 7: Einsatz der Brandbegrenzungsdecke an einem Elektrofahrzeug mit Batteriebrand

Brandbekämpfung in der Brandentstehungsphase

Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren

Die beiden durchgeführten Brand- und Löschversuche mit HSR zeigen, dass sich die Maßnahmen zur Gefahrenabwehr in der Brandentstehungsphase von denen bei Vollbrandszenarien unterscheiden. Analog dem Vollbrandszenario wird die Brandbekämpfung durch zwei agierende 2-Mann-Trupps oder zwei erweiterte Trupps mit jeweils drei Einsatzkräften empfohlen.

Die Hohlstrahlrohre sollten ebenfalls auf einen Volumenstrom von je 60 l/min eingestellt werden. Im Unterschied zum Vollbrandszenario ist die bedeutend geringere Brandintensität charakteristisch für einen Entstehungsbrand. Weshalb Öffnungen im Gehäuse des HV-Speichers seltener vorliegen. Das gezielte Einbringen von Wasser in den HV-Speicher ist daher ohne Hilfsmittel weniger wahrscheinlich als bei

einem Vollbrand⁵. Bei einer Brandentstehungsphase sollte entsprechend davon ausgegangen werden, dass der Brand im HV-Speicher nicht gelöscht und bislang unversehrte Module/Zellen nicht gekühlt werden. Die alternative Taktik, die Brandausbreitung auf den Batteriebrand zu begrenzen und bei geringem Wasserverbrauch die Zellen im HV-Speicher kontrolliert reagieren zu lassen, ist in der Brandentstehungsphase sehr wahrscheinlich zu nutzen. Bei beiden Versuchen fielen die Einsatzzeiten mit ca. 87 bzw. 63 Minuten länger als in der Vollbrandphase mit maximal ca. 35 Minuten (siehe Tabelle 4) aus. Die Ergebnisse der Brand- und Löschversuche machen eine erhöhte Einsatzzeit und höhere Löschwasserverbräuche in dieser Phase deutlich. Im schlechtesten Fall sind Löschwassermengen bis zu 7.000 Liter notwendig. Stoppt die Propagation im HV-Speicher selbstständig, bevor alle Zellen reagiert haben, sind eine reduzierte Einsatzzeit und ein geringer Löschmittelbedarf möglich.

Versuch	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserver- brauch
1	ca. 87 min	6.700 l
2	ca. 63 min	1.115 l

Tabelle 4: Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei der Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren bei Entstehungsbränden

⁵ Die Hersteller Renault und Dacia haben für die Einsatzkräfte der Feuerwehr einen Zugang in den HV-Speicher vorgesehen, worüber Löschmittel zur Kühlung der Zellen appliziert werden kann.

Bei dem ausschließlichen Einsatz von Hohlstrahlrohren in der Brandentstehungsphase ist das gezielte Einbringen von Kühlwasser über Öffnungen und Löcher in den HV-Speicher sehr unwahrscheinlich. Die alternative Taktik, die Zellen im HV-Speicher ausreagieren zu lassen und den Brand auf den HV-Speicher zu begrenzen, wird hier eher Anwendung finden müssen. Entsprechend sind mit einer längeren Einsatzdauer und mit einem höheren Löschwasserverbrauch als bei Vollbrandszenarien zu rechnen.

Brandbekämpfung mit Systemen zur Löschwassereinbringung

In zwei Versuchen sollte festgestellt werden, ob Systeme zur Löschwassereinbringung in der Brandentstehungsphase einen größeren Mehrwert gegenüber HSR als in der Vollbrandphase haben. Im Vergleich zum ausschließlichen Einsatz von Hohlstrahlrohren in der Brandentstehungsphase halbiert sich die Einsatzzeit in beiden Fällen auf ca. 34 min (siehe Tabelle 5). Das zur Löschung des Batteriebrandes notwendige Lösch-/Kühlwasservolumen ist bei der Verwendung von Systemen zur Löschwassereinbringung in der Brandentstehungsphase deutlich geringer als bei der ausschließlichen Verwendung von Hohlstrahlrohren. Demzufolge haben die Systeme zur Löschmitteleinbringung in der Brandentstehungsphase durch die direkte Kühlung des HV-Speichers einen größeren Mehrwert gegenüber dem ausschließlichen Einsatz von Hohlstrahlrohren.

Versuch	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserver- brauch
1	ca. 34 min	662 l
2	ca. 34 min	919 l

Tabelle 5: Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei der Brandbekämpfung mit Systemen zur Löschwassereinbringung während der Brandentstehungsphase

Systeme zur Löschmitteleinbringung besitzen in der Brandentstehungsphase in puncto Lösch-/Kühlwasserverbrauch und Einsatzzeit einen größeren Mehrwert gegenüber der ausschließlichen Verwendung von Hohlstrahlrohren.

Chemische Untersuchungen

Gasmessungen

Wie bei allen Verbrennungen, werden auch beim Brand von E-Fahrzeugen mit Beteiligung des HV-Speichers, typische Schadgase 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 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 (Explosionsgrenzen: 4,0 bis 77 Vol.-%) kommen [8]. 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, die zur Ausbildung einer entzündungs- bzw. explosionsfähigen Atmosphäre beitragen, detektiert. Somit muss beim Entfernen der Decke mit einer Durchzündung gerechnet werden.

Die erwähnten organischen Carbonate stammen aus dem

Elektrolytgemisch der HV-Speicher. Erfasst wurden folgende sechs Verbindungen: Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC), Ethylencarbonat (EC), Propylencarbonat (PC) und Vinylencarbonat (VC). DMC, DEC und EMC sind 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, so dass eine Auswertung der Infrarotspektren für die organischen Carbonate nicht mehr möglich war.

Fluorwasserstoff (HF) wurde im Zusammenhang mit auftretenden Zersetzungsgasen, wie Carbonylfluorid (COF_2) und Phosphorylfluorid (POF_3), durch ergänzende Methoden 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 HV-Speicher trat HF ebenso auf. Allerdings weisen die Untersuchungen auf höhere HF-Konzentrationen bei Elektrofahrzeugen mit HV-Speichern hin. Die punktuell gemessenen Maximalkonzentrationen im Innenraum des Fahrzeugs überschreiten in Einzelfällen den Einsatztoleranzwert [9].

Schadstoffuntersuchungen in Lösch- und Kühlwässern

Vereinzelte 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.

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 die Brandbekämpfung beschrieben.

Erkundung und Informationsbeschaffung

In der Erkundungsphase eines Einsatzes ist die Information über die Antriebsart des Fahrzeugs essenziell. Das nachfolgende Kapitel zeigt eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Antriebsart.

AUTO-Regel

In den Feuerwehrcreisen besteht Einigkeit darüber, bei Einsätzen unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien 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 [10]

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 herunterladen⁶. 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 HV-Speichers, und der Trennstellen zum Abschalten des Hochvoltsystems entnommen werden.

eCall-System

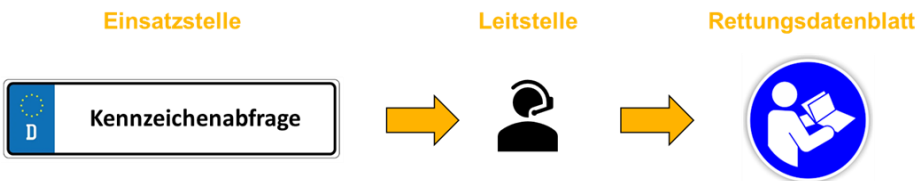


Abbildung 9: Prinzip der Kennzeichenabfrage

Fahrzeuge mit Typgenehmigung ab April 2018 müssen mit dem sog.

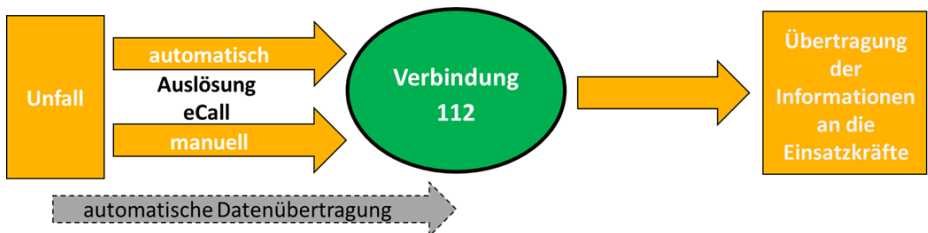


Abbildung 10: Prinzip von eCall

eCall ausgerüstet sein [11]. Das System nutzt Mobilfunk und Satellitenortung gleichermaßen. Es gewährleistet die Herstellung einer automatischen oder bei Bedarf manuellen Telefonverbindung zur Rettungsleitstelle. Ursache eines automatischen Anrufs ist

⁶ z. B. kostenlos unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/rettungskarte/> oder <https://www.dekra.de/de/download-rettungskarte/>

beispielsweise das Auslösen eines Airbags.

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.

Brandbekämpfungsmaßnahmen

Identifikation der Beteiligten des HV-Speichers 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 sich der HV-Speicher am Brand beteiligt. Folgende Indikatoren weisen auf die Beteiligung des HV-Speichers am Brand hin [5]:

- zyklische Rauchfreisetzung (hell-/dunkelgrau) im Bereich der Hochvoltbatterie,
- untypischer aromatischer Geruch,
- zischende, pfeifende und knatternde Geräusche,
- Funkenflug und zyklische Stichflammen sowie
- nachweisbare Temperaturerhöhung des HV-Speichers (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 HV-Speicher aus.

Phase 1:

Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten Ventinggase aus, die sich

entzünden können. Auch Funkenbildung aus dem HV-Speicher ist möglich.

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 HV-Speichers im Vollbrand.

In den Experimenten erwies es sich als zweckmäßig, die Brandbekämpfung durch mindestens 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 den HV-Speicher vorhanden sein, kann dieses durch einen dritten 2-Mann-Trupp, der mit

Phase 0: Das Fahrzeug ist beschädigt, aber es geht keine Eskalation/Brand vom HV-Speicher 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 HV-Speicher, dar. Während dieser Phase ist immer auf eine mögliche Reaktion aus dem HV-Speicher zu achten. Ob es zu einer Erwärmung des HV-Speichers infolge einer chemischen Reaktion, also dem Beginn der Phase 1, kommt, kann mit Hilfe einer WBK überprüft werden. Es empfiehlt sich, in engen zeitlichen Abständen z.B. den Boden des Fahrzeuginnenraums über dem HV-Speicher 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 Lüfter in Position zu bringen. An der Einsatzstelle sollte geprüft werden, ob eine ausreichende Anzahl von voll ausgestatteten Atemschutzgeräteträgern zur Verfügung steht.

Phase 1: Austritt von Ventinggasen aus dem HV-Speicher

Auch wenn keine Flammenbildung erkennbar ist, müssen alle am Fahrzeug tätigen Einsatzkräfte die vollständige Persönliche Schutzausrüstung für die Brandbekämpfung im Innenangriff einschließlich Pressluftatmer tragen. Prioritär sollte verhindert werden,

dass sich die aus dem HV-Speicher austretenden Ventinggase entzünden. So kann die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindert und das resultierende Thermofeedback, das für die Beschleunigung der Reaktion im HV-Speicher verantwortlich ist, unterbunden werden. Gelingt dies nicht, tritt das Fahrzeug in die Brandentstehungsphase ein.

Insbesondere in geschlossenen Räumen ist beim Austritt von Ventinggasen mit explosionsfähigen Atmosphären zu rechnen. Auch die Ansammlung im Fahrzeuginneren birgt die Gefahr solcher Ereignisse. 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.

Messungen auf Explosionsgefahren mit Standardmessgeräten der Feuerwehr ergeben keine genauen Ergebnisse!

Daher ergeben sich folgende Handlungshinweise.

- Treten aus dem HV-Speicher Ventinggase aus,
- ist bei Annäherung mit Wasser am Strahlrohr vorzugehen.
- muss zeitnah mit deren spontaner Entzündung gerechnet werden.
- können die Ventinggase zur Reduzierung der bevorstehenden Flammenerscheinungen mit Hilfe eines Lüfters o. ä. Einsatzmitteln⁷ verdünnt und verwirbelt werden. In urbanen

⁷ In Ermangelung eines Lüfters können in die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs Sprühstöße abgegeben werden. Es ist zu beachten, dass diese Vorgehensweise weniger effektiv ist.

Gebieten kann die Verwendung eines Hydroschildes oder Düsenschläuchen in Betracht gezogen werden, um brennbare Strukturen vor den Gasen zu schützen (siehe Abbildung 12). Der Einsatz solcher Mittel darf nicht auf Kosten der eigentlichen Brandbekämpfung und entsprechend nur bei einer ausreichenden Wasserversorgung gewählt werden.

- sollte zur Prävention einer Entzündung versucht werden, deren Ansammlung im Innenraum des Fahrzeugs zu vermeiden (z.B. durch Öffnen der Fahrzeurtüren).

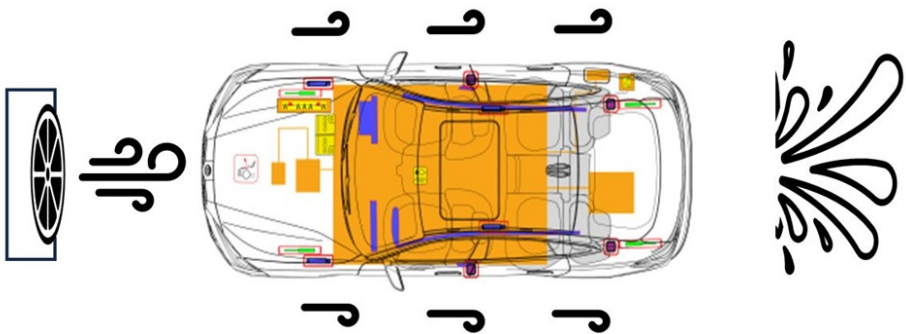


Abbildung 12: Schema zur Verhinderung von Veninggasansammlungen durch die Verwendung eines Lüfters (links) und eines Hydroschildes (rechts)

- Sind in geschlossenen Räumen oder in Gebäudeteilen Veninggase ausgetreten,

- besteht akute Explosionsgefahr.
- müssen die Veninggase zur Vermeidung explosionsfähiger Atmosphären mit Hilfe von Lüftern o. ä. Einsatzmitteln verdünnt werden. Ein Hydroschild oder Düsenschläuche können angewendet werden, um die Ausbreitung der Gase in größeren

Räumen zu begrenzen, wobei auch hier eine entsprechende Wasserversorgung sicherzustellen ist.

- sollte versucht werden, das Fahrzeug unter Wahrung des Eigenschutzes ins Freie zu befördern.

Besonders beim Einsatz eines Lüfters sind die räumlichen Gegebenheiten an der Einsatzstelle zu beachten. Der Transport der Ventinggase in Gebäudestrukturen, in denen sich eine explosionsfähige Atmosphäre bilden kann, ist auszuschließen.

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

Bei derartigen Einsätzen ist die oberste Priorität, 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 der HV-Speicher durch zusätzliche Flammen und das resultierende Thermofeedback thermisch konditioniert wird und sich die Reaktionen im HV-Speicher unter Zunahme der Brandleistung intensiviert. Nach aktuellem Erkenntnisstand kann der Batteriebrand nur dann gelöscht werden, wenn über Öffnungen oder mit Hilfe von Systemen zur Löschmitteleinbringung Lösch-/Kühlwasser eingebracht wird. Ist dies nicht der Fall, sollten sich die Brandbekämpfungsmaßnahmen auf das kontrollierte Ausreagieren der Module im HV-Speicher beschränken.

Folgende Brandbekämpfungsoptionen bestehen.

Option 1: Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohren

Die Brandbekämpfung sollten zwei zeitgleich agierende Trupps mit Hohlstrahlrohren sicherstellen, um die Brandausbreitung auf das gesamte Fahrzeug und weitere brennbare Objekte in der Nähe zu verhindern. Allerdings sollte Wasser sparsam verwendet werden, weil ein Großteil unwirksam abfließt. Durch die Verhinderung der Brandausbreitung auf das Fahrzeug begrenzt sich der Brand auf den HV-Speicher und die Konditionierungsgeschwindigkeit weiterer Zellen/Module kann reduziert werden. Die Experimente haben gezeigt, dass bei ausschließlicher Verwendung von Hohlstrahlrohren eine Löschwassermenge von ca. 7.000 l und eine Einsatzzeit von etwa 90 Minuten angesetzt werden müssen.

Option 2: Brandbekämpfung mit einem Verfahren zur Löschmitteleinbringung in den HV-Speicher

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. Die Untersuchungen zeigen, dass die Systeme zur Löschwassereinbringung in dieser Brandphase einen Mehrwert gegenüber der ausschließlichen Verwendung von Hohlstrahlrohren haben. Voraussetzung ist, dass die Systeme fachgerecht eingesetzt werden, wobei eine sofortige Applikation von Löschwasser mit dem Eindringen in den HV-Speicher sichergestellt

werden muss.

Auch in dieser Brandphase kann es zu einer verstärkten Produktion von Ventinggasen kommen, besonders, wenn der Fahrzeugbrand erfolgreich gelöscht wurde. Aus diesem Grund sollten auch hier die Hinweise aus der Phase 1 beachtet werden. Darunter zählen beispielsweise der Einsatz eines Lüfters oder das Öffnen der Fahrzeugtüren, um eine Ansammlung von Ventinggasen im Fahrzeuginnenraum zu verhindern. Bei Letzterem ist möglicherweise ein mehrfaches Öffnen und Schließen der Fahrzeugtüren vorteilhafter, um eine Brandausbreitung vom Batteriebrand auf den Fahrzeuginnenraum zu vermeiden.

Phase 3: Fahrzeuge im Vollbrand unter Beteiligung des HV-Speichers

Die Einsatzkräfte können in dieser Phase beim Eintreffen an der Einsatzstelle davon ausgehen, dass bereits ein Teil der im HV-Speicher befindlichen Batteriemodule (unter Flammenbildung) reagiert hat. Die bislang nicht am Brand beteiligten Module sind durch das Thermofeedback des Vollbrandes wahrscheinlich bereits thermisch aufbereitet und werden sich im weiteren Verlauf am Brand beteiligen.

Die erste Maßnahme zweier zeitgleich vorgehender Trupps ist es, bei Annäherung 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 HV-Speichers kontrolliert und ohne Brandausbreitung auf die Umgebung des Fahrzeugs ausreagieren können. Sind infolge der Wärmefreisetzung Löcher oder sonstige Öffnungen im HV-Speicher entstanden, sind diese mit Hilfe der WBK durch einen erfahrenen, fachkundigen Einheitsführer (z.B. erstes Löschfahrzeug) lokalisierbar. Hier ist 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 den HV-Speicher

Die beiden Angriffstrupps werden durch einen weiteren Trupp zur Verwendung eines Sonderlöschgerätes zur Löschmitteleinbringung in den HV-Speicher 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 Gebäuden 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 HV-Speicher ermöglichen (z.B. zwei Trupps des ersten Löschfahrzeugs).
- Die Erkundung des Fahrzeugs muss sichergestellt werden, um mögliche Öffnungen im HV-Speicher zu finden (z.B. Staffelführer 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 HV-Speichers) 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 06-12 gibt hierzu Hinweise. 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 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 06-13,

angefertigt werden [12]. 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

Literatur

- [1] Jürgen Garche und Klaus Brand, „Li-Battery Safety, Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications“, Elsevier, 2019.
- [2] vfdb e.V., „Merkblatt 06-12: Übergabeprotokoll Fahrzeuge“, Verfügbar: https://www.vfdb.de/media/doc/merkblaetter/MB_06_12_Uebergabeprotokoll_Fahrzeuge.pdf (Zugriff am: 12.2022).
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V., „Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung im Bereich elektrischer Anlagen“, DIN VDE 0132 (0132:2018-07), Berlin, 2018.
- [4] Motor-Traffic, „Batteriemodul Volkswagen“, Verfügbar: <https://motor-traffic.de/bildergalerie.php?newsid=619585>.
- [5] P. Vorwerk, S.-K. Hahn, C. Daniel, U. Krause und K. Keutel, „Detection of Critical Conditions in Pouch Cells Based on Their Expansion Behavior“, Batteries, Jg. 8, Nr. 5, S. 42, 2022. doi: 10.3390/batteries8050042, Verfügbar: <https://www.mdpi.com/2313-0105/8/5/42>.
- [6] Nic-Yves Kysler, „E-Mobilität vs. Garagenverordnung“, Masterarbeit, Lehrstuhl für Chemische Sicherheit und Abwehrenden Brandschutz, Bergische Universität Wuppertal, 2019.
- [7] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia und X. He, „Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review“, Energy Storage Materials, Jg. 10, 2017, doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [8] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „GESTIS-Stoffdatenbank: Eintrag Wasserstoff“. (Zugriff am: 5.7.2022).
- [9] vfdb e.V., „Anlage 1 der vfdb-Richtlinie 10/01“, verfügbar: https://www.vfdb.de/media/referate/referat10/doc/RL10-01_Anlage1_ETW_Ref10_2023.pdf (Zugriff am: 15.2.2023).

[10] Staatliche Feuerweherschule Würzburg, „Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns - Alternativ angetriebene Fahrzeuge.“ Verfügbar: https://www.feuerwehr-lernbar.bayern/fileadmin/downloads/Merkblaetter_und_Broschueren/Technischer_Hilfsdienst/Alternativ_angetriebene_Fahrzeuge_Version-4.0/, (Zugriff am: 19.4.2024).

[11] K. Dümmer, „eCall: So funktioniert das automatische Notrufsystem im Auto.“, Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/unfall/ecall/> (Zugriff am: 29. April 2024).

[12] vfdb e.V., „Merkblatt 06-13: Temperaturmessprotokoll für beschädigte Energiespeicher“, verfügbar: https://www.vfdb.de/media/doc/merkblaetter/MB_06_13_Temperaturmessprotokoll_fuer_beschaedigte_Energiespeicher.pdf, (Zugriff am: 19.4.2024).

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

April 2024

Bildnachweis:

IBK Heyrothsberge
