

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



**Evaluierung von technischen
Verfahren zur Löschmittelein-
bringung in Hochvoltspeicher**

210

**Untersuchungen zum einsatztaktischen
Mehrwert gegenüber anderen
Löschtechniken und -taktiken**

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

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

Forschungsbericht Nr. 210

Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher

**Untersuchungen zum einsatztaktischen Mehrwert gegenüber anderen
Löschtechniken und -taktiken**

von

Dr.-Ing. Michael Neske (Projektleiter)

Dr. rer. nat. Julia Kaufmann

Dr.-Ing. Daniel Butscher

M.Sc. Christoph Vogel

Institut für Brand-und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -

Heyrothsberge

Oktober 2022

BERICHTS-KENNBLATT

BERICHTSNUMMER: 210		TITEL DES BERICHTES: Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher		ISSN: 0170-0060	
AUTOREN: Dr.-Ing. Michael Neske (Projektleiter) Dr. rer. nat. Julia Kaufmann Dr.-Ing. Daniel Butscher M.Sc. Christoph Vogel		DURCHFÜHRENDE INSTITUTION: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Biederitz, OT Heyrothsberge Komm. Direktor: BrD Jörg Buchaly			
NUMMER DES AUFTRAGES: 106 (2/2021) IBK		AUFTRAGGEBENDE INSTITUTION: Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung			
DATUM DES BERICHTES: Oktober 2022					
SEITENZAHL: 152	BILDER: 62	TABELLEN: 26	LITERATURVERWEISE: 47		
KURZFASSUNG: Es ist erklärtes Ziel in Europa, die durch den Straßenverkehr verursachten CO₂-Emissionen zu reduzieren. Elektrofahrzeuge sollen einen Beitrag dazu leisten. Der Anstieg der Zulassungszahlen dieser Fahrzeuge wirft insbesondere in Feuerwehkreisen die Frage nach dem potenziellen Wandel der Brandbekämpfungstaktik auf. Beiträge in der Boulevardpresse, in denen reißerisch über Brände mit Elektrofahrzeugen berichtet wird, forcieren die Bedenken und schüren Ängste gegenüber dieser Antriebstechnologie. Verbände und Organisationen des Feuerwehrwesens haben zur Unterstützung der Einsatzkräfte Einsatzhinweise in Form von Merkblättern mit zielgerichteten Hinweisen zum Umgang mit in Brand geratenen Elektrofahrzeugen erarbeitet. Es ist jedoch festzustellen, dass die Ergebnisse von Realbrandexperimenten, bei denen dezidiert auch Löschmaßnahmen vorgenommen wurden, für die Feuerwehren, wenn überhaupt, unzureichend aufbereitet vorliegen. Hier setzt das Forschungsprojekt an. Untersucht wurden daher neben den üblicherweise bei Feuerwehren eingesetzten Hohlstrahlrohren zwei Systeme, mit deren Unterstützung die Einsatzkräfte Lösch- und Kühlwasser in die Batteriesysteme einbringen können. In einem weiteren Versuch kam ein externes Kühlsystem zum Einsatz, welches unter dem Fahrzeug positioniert, das Batteriesystem im Brandfall kühlen soll. Zwei weitere Experimente dienten der Evaluierung des Mehrwerts von Brandbegrenzungsdecken. Die Untersuchungen wurden um zwei Referenzversuche ergänzt, bei denen auf Brandbekämpfungsmaßnahmen verzichtet wurde. Die Bewertung der Wirksamkeit dieser Techniken und Taktiken erfolgte auf der Basis gemessener Werte für Lösch-/Kühlwasservolumenströme, Einsatzzeit, Temperatur und Wärmestrahlung.					
SCHLAGWÖRTER: E-Mobilität, Li-Ionen-Akkumulatoren, Batteriesysteme, Brandbekämpfung, Löschen, Kühlen, Einsatzhinweise, Einsatztaktik, Feuerwehr, Löschwasserkontamination, PSA-Kontamination, Temperatur, Wärmestrahlung, BEV					

DANKSAGUNG

Zum Gelingen des Forschungsprojektes haben eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure beigetragen. Das Projektteam möchte allen Beteiligten für die geleistete Arbeit herzlich Danke sagen.

An erster Stelle gebührt ausnahmslos allen Mitarbeitenden des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Dank. Beginnend bei der Beschaffung von Literatur über die Sicherstellung des Brandschutzes in den eingesetzten Trupps, der Bedienung der Messgeräte bis hin zur Korrekturlesung und der Bereitstellung von Atemschutzgeräten. Jede und Jeder hatte Anteil an der erfolgreichen Bearbeitung des Projektes.

Besonderer Dank gilt dem Leiter der Versuchsanlagen des IBK, Herrn M.Sc. Christoph Vogel, für die unverzichtbare Unterstützung bei der materiellen und technischen Sicherstellung der Versuche, der Unterstützung bei der Kommunikation mit den Herstellern der Fahrzeuge und der Mitwirkung im IBK-Angriffstrupp. Gleichfalls gebührt Herrn Dr. Daniel Butscher besonderer Dank für den Aufbau und den Betrieb der physikalischen Messtechnik und die Federführung im IBK-Angriffstrupp. In gleicher Weise gebührt Frau Dr. Julia Kaufmann Dank für Aufbau und Betrieb der chemischen Messtechnik, die Bewertung der Ergebnisse und die Mitwirkung im Angriffstrupp.

Die hervorragenden Kontakte zu den Feuerwehren Sachsen-Anhalts ermöglichten es, dass Einsatzkräfte aus Magdeburg, Halle (Saale) und Dessau-Roßlau die Brandbekämpfung im zweiten Angriffstrupp sicherstellten und Erfahrungen im Umgang mit den Szenarien sammeln konnten. Allen Mitwirkenden sei an dieser Stelle für das Engagement gedankt.

Besonderer Dank gilt auch den Vertretern der beteiligten Automobilhersteller für die offene Kommunikation auf Augenhöhe. Ohne die unkomplizierte Bereitstellung der Fahrzeuge wäre nur ein geringer Teil der Versuche möglich gewesen. Auch die interessanten Gespräche zur Fahrzeugtechnik sind an dieser Stelle hervorzuheben.

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	I
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
ZUSAMMENFASSUNG.....	1
1 EINLEITUNG, ZIELSTELLUNG UND THEMENABGRENZUNG.....	6
2 AUFBAU VON BATTERIESYSTEMEN FÜR TRAKTIONSBATTERIEN UND TECHNISCHE LEISTUNGSPARAMETER	9
3 BRANDCHARAKTERISTIK VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN	13
3.1 Thermal Runaway	13
3.2 Brandcharakteristik auf Zellebene.....	14
3.2.1 Ausgasung (engl. Venting oder Smoker)	14
3.2.2 Stichflammen (engl. Burner).....	15
3.2.3 Funkensprühen (engl. Flare)	16
3.2.4 Feuerball (engl. Fireball).....	16
3.2.5 Explosion	17
3.3 Brandcharakteristik eines Batteriesystems	18
4 ERKENNTNISSTAND ZUR EINSATZTAKTIK BEI BRÄNDEN UNTER BETEILIGUNG VON BEVS	19
4.1 Erkundung und Informationsbeschaffung	20
4.2 Brandbekämpfung	22
4.3 Übergabe des Fahrzeugs nach Abschluss der Brandbekämpfungsmaßnahmen	27
5 FAHRZEUGE FÜR DIE BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	29
5.1 BMW Group	29

5.2	Opel Automobile GmbH	30
5.3	Volkswagen AG	31
6	UNTERSUCHTE BRANDBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN.....	34
6.1	Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren	34
6.2	Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien mittels spezieller Löschtechnik.....	35
6.2.1	Rosenbauer Löschsystem	35
6.2.2	Murer E-Löschlanze	36
6.3	Externe Kühlung (EK) mittels spezieller Feuerwehrrmaturen	37
6.4	Brandbegrenzungsdecken.....	38
7	PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE MESSTECHNIK.....	40
7.1	Temperatur und Wärmestrahlung.....	40
7.2	Lösch- und Kühlwasserströme	42
7.3	Chemische Untersuchungen	43
7.3.1	Rauchgasanalysen	43
7.3.2	Schadstoffe in Lösch- und Kühlwässern.....	44
7.3.3	PSA-Kontaminationen	46
7.4	Videodokumentation	47
7.4.1	Videotechnik	47
7.4.2	Wärmebildkamas.....	47
8	EXPERIMENTE ZUR WIRKSAMKEIT AUSGEWÄHLTER BRANDBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN	48
8.1	Initiierung des Thermal Runaways.....	48
8.2	Brandverlauf	50
8.3	Brandbekämpfung	51
8.4	Ergebnisse der Brand- und Löschexperimente.....	55
8.4.1	Referenzversuche	55
8.4.1.1	Ergebnisse des Referenzversuchs 1	56

8.4.1.2	Ergebnisse des Referenzversuchs 2	58
8.4.1.3	Diskussion der Ergebnisse der Referenzversuche	60
8.4.2	Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren.....	61
8.4.2.1	Ergebnisse des Versuches HSR_2	63
8.4.2.2	Ergebnisse des Versuches HSR_3	65
8.4.2.3	Diskussion der Löschversuche mit HSR	67
8.4.3	Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien.....	69
8.4.3.1	Ergebnisse des Versuches LE_1	71
8.4.3.2	Diskussion der Ergebnisse	72
8.4.4	Externe Kühlung mittels spezieller Kühlaraturen.....	73
8.4.4.1	Ergebnisse des Versuches mit externer Kühlung	74
8.4.4.2	Diskussion der Ergebnisse	76
8.4.5	Brandbegrenzungsdecken	77
8.4.5.1	Ergebnisse des Versuches BBD_1.....	78
8.4.5.2	Ergebnisse des Versuches BBD_2.....	80
8.4.5.3	Diskussion der Ergebnisse	82
8.5	Ergebnisse der chemischen Untersuchungen	85
8.5.1	Gasmessungen.....	85
8.5.2	Schadstoffuntersuchungen der Lösch- und Kühlwässer	96
8.5.3	PSA-Kontamination	101
9	VORGESCHLAGENE EINSATZTAKTIK.....	102
9.1	Fahrzeuge im Vollbrand unter Beteiligung des Batteriesystems	103
9.2	Fahrzeuge in der Brandentstehungsphase mit aus dem Batteriesystem austretenden Flammen.....	105
9.3	Austritt von Ventinggasen aus dem Batteriesystem.....	107
9.4	Wesentliche Aufgaben an der Einsatzstelle	107
10	AUSBLICK.....	109
	LITERATUR	111

ANHANG.....	117
A1 Messstellen	119
A2 Referenzversuche.....	120
A2.1 Referenzversuch 1	120
A2.2 Referenzversuch 2	121
A3 Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (HSR).....	122
A3.1 Versuch HSR_1	122
A3.2 Versuch HSR_2	124
A3.3 Versuch HSR_3	125
A3.4 Versuch HSR_4	126
A4 Löschmitteleinbringung (LE) in Traktionsbatterien	127
A4.1 Versuch LE_1	127
A4.2 Versuch LE_2	128
A4.3 Versuch LE_3	129
A5 Externe Kühlung mittels spezieller Feuerwehrrmaturen	130
A6 Brandbegrenzungsdecken (BBD)	131
A6.1 Versuch BBD_1.....	131
A6.2 Versuch BBD_2.....	132

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AbwV	Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer Abwasserverordnung
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
BBD	Brandbegrenzungsdecke
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
c	Konzentration
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COF ₂	Carbonylfluorid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DEC	Diethylcarbonat
DFV	Deutscher Feuerwehrverband
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN VDE	Gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Normung veröffentlichte elektrotechnische Normen des Verbandes der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
DMC	Dimethylcarbonat
EC	Ethylencarbonat
ECE	Regelungen zum Übereinkommen über die Annahme einheitlicher Bedingungen für die Genehmigung der Ausrüstungsgegenstände und Teile von Kraftfahrzeugen (Motorfahrzeugen) und über die gegenseitige Anerkennung der Genehmigung
EK	Externe Kühlung
EMC	Ethylmethylcarbonat
EUCAR	European Council for Automotive R&D
Ex-Messung	Messung explosionsfähiger Gas-Luftgemische
FTIR	Fourier Transformations Spektrometrie / - Spektrometer
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HCl	Chlorwasserstoff
HCN	Cyanwasserstoff
HF	Fluorwasserstoff
HSR	Hohlstrahlrohr
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry
IMK	Innenministerkonferenz

LE	Löschmitteleinbringung
LiF	Lithiumfluorid
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat
max.	maximal
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
NH ₃	Ammoniak
norm	normiert
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
PAK	Polyzyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PC	Propylencarbonat
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
pH-Wert	Maß für die Aktivität von Protonen einer wässrigen Lösung
POCl ₃	Phosphorylchlorid
POF ₃	Phosphorylfluorid
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
SO ₂	Schwefeldioxid
SoC	State of Charge
t	Zeit
TR	Thermal Runaway
TrFü_A	Angriffstruppführer
TrM_A	Angriffstruppmann
UEG	Untere Explosionsgrenze
VC	Vinylencarbonat
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
WBK	Wärmebildkamera
WS	Wärmeflusssensor
WWAZ	Wolmirstedter Wasser- und Abwasserzweckverband

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Schematische Darstellung eines Batteriesystems [12]	11
Abbildung 2:	Batteriesystem mit Batteriegehäuse [16] mit Ergänzungen der Autoren dieses Berichtes	12
Abbildung 3:	Austritt von Gasen/ Dämpfen während des TR einer zylindrischen Zelle [18].....	15
Abbildung 4:	Austritt von Stichflammen nach Penetration einer prismatischen Zelle (SoC > 90 %) eines Batteriemoduls mit einer Nagelpistole	15
Abbildung 5:	Austritt von Funken nach dem Verlöschen einer Stichflamme nach Penetration einer prismatischen Zelle (SoC > 90 %) eines Batteriemoduls mit einer Nagelpistole	16
Abbildung 6:	Austritt großer Mengen zum Teil brennbarer Gase/ Dämpfe/ Zersetzungsprodukte nach Penetration eines im BEV eingebauten Batteriesystems.....	17
Abbildung 7:	Entzündung von Zersetzungsprodukten in Form eines Feuerballs; vorangegangen war der in Abbildung 6 visualisierte Gas-/ Dampfaustritt	17
Abbildung 8:	Vorgehensweise nach der A U T O – Regel [21].....	20
Abbildung 9:	Schema der AGBFbund und des DFV zur Festlegung der Einsatztaktik nach der Antriebsart [6]	24
Abbildung 10:	Quarantäne-/ Havarieplatz nach OVE-Richtlinie R 19 [9]	28
Abbildung 11:	BMW i4 im Brandraum des IBK	29
Abbildung 12:	Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des BMW i4 [23]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metaldorn zur Brandinitiierung ingetrieben wurde	30
Abbildung 13:	Opel Corsa e im Brandraum des IBK.....	30
Abbildung 14:	Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Opel Corsa e [24]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metaldorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde.....	31
Abbildung 15:	Volkswagen ID.4 im Brandraum des IBK	32

Abbildung 16:	Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.4 [25]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metallhorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde 33
Abbildung 17:	Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.5 [26]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metallhorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde 33
Abbildung 18:	Fotos des Rosenbauer Löschsystems [27] 36
Abbildung 19:	Fotos der Murer E-Löschlanze (links); wechselbare Spitze der Löschlanze (rechts) [29] 37
Abbildung 20:	Anordnung der Thermoelemente und Wärmeflussaufnehmer im Brandraum 41
Abbildung 21:	Messstrecke für Volumenstrom und Druck..... 43
Abbildung 22:	Messplatz mit FTIR-Spektrometer DX4000 44
Abbildung 23:	Auffangwanne mit Brandrückständen und Löschwasser 45
Abbildung 24:	An der Überjacke angebrachte 3-lagige PSA-Probe 47
Abbildung 25:	Versuchsablauf nach Brandstadien..... 48
Abbildung 26:	Einsatzbereiche der Trupps 52
Abbildung 27:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (mittige Messachse) und Wärmestrahlung im Referenzversuch 1 57
Abbildung 28:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (mittige Messachse), Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom im Referenzversuch 2 59
Abbildung 29:	Dauer der Brandphasen beider Referenzversuche 60
Abbildung 30:	Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit Hohlstrahlrohren..... 62
Abbildung 31:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und den Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_2..... 64
Abbildung 32:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Fahrzeuginnenraum des Versuches HSR_2 65
Abbildung 33:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse und Messachse am Heck), die Wärmestromdichte und den Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_3..... 66
Abbildung 34:	Einsatzzeiten und Löschwasservolumina bei Versuchen mit HSR 67

Abbildung 35:	Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit Systemen zur Löschmitteleinbringung.....	70
Abbildung 36:	Zeitabhängige Verläufe für die Temperaturen (Messachse am Heck) und den Löschwasservolumenstrom des Versuchs LE_1.	72
Abbildung 37:	Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit einem System zur externen Kühlung	74
Abbildung 38:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches mit einer Kühllarmatur.....	75
Abbildung 39:	Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit BBD.....	77
Abbildung 40:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches BBD_1	78
Abbildung 41:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Innenraum des Fahrzeugs im Versuch BBD_1.....	79
Abbildung 42:	Momentaufnahmen nach dem Auflegen der BBD im Versuch BBD_1.....	79
Abbildung 43:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches BBD_2	81
Abbildung 44:	Momentaufnahmen nach dem Auflegen der BBD im Versuch BBD_2.....	81
Abbildung 45:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Innenraum des Fahrzeugs im Versuch BBD_2.....	82
Abbildung 46:	Konzentrationsverläufe von O ₂ , CO und CO ₂ für Versuch HSR_3	86
Abbildung 47:	Verläufe der Wasserstoffkonzentrationen im und unterhalb des Fahrzeugs für die Brand- und Löschversuche mit Brandbegrenzungsdecke (BBD_1: Messstelle Kopfstütze; BBD_2: Messstelle unterhalb des Fahrzeugs).....	87
Abbildung 48:	Zeitliche Verläufe der normierten Konzentration von COF ₂ , POF ₃ und HF für Versuch LE_1	91
Abbildung 49:	Zeitliche Verläufe der normierten Konzentration von HCl und HCN für Referenzversuch 2.....	93

Abbildung A1:	Messstellen im Fahrzeuginnenraum	119
Abbildung A2:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck, Messachse	120
Abbildung A3:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck, Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) des Referenzversuches 2	121
Abbildung A4:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_1	123
Abbildung A5:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck und Messachse Front) und Wärmestrahlung des Versuches HSR_2	124
Abbildung A6:	Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) des Versuches HSR_3	125
Abbildung A7:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_4	126
Abbildung A8:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) und Wärmestrahlung des Versuches LE_1	127
Abbildung A9:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches LE_2	128
Abbildung A10:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches LE_3	129
Abbildung A11:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck sowie Messstellen im Fahrzeuginnenraum) und Wärmestrahlung des Versuches mit externer Kühlung	130
Abbildung A12:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck) und Wärmestrahlung des Versuches BBD_1	131
Abbildung A13:	Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck) und Wärmestrahlung des Versuches BBD_2	132

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	EUCAR Hazard Level [15].....	10
Tabelle 2:	Technische Daten BMW i4.....	29
Tabelle 3:	Technische Daten Opel Corsa e	31
Tabelle 4:	Technische Daten Volkswagen ID.4.....	32
Tabelle 5:	Technische Daten Volkswagen ID.5.....	32
Tabelle 6:	Experimentell untersuchte Brandbekämpfungsstrategien und Brandszenarien	34
Tabelle 7:	Messstellenplan für Thermoelemente und Wärmeflussaufnehmer.....	42
Tabelle 8:	Aufstellung der Trupps bei unterschiedlichen Brandbekämpfungsstrategien.....	53
Tabelle 9:	Brandstadien nach Penetration mit Metaldorn.....	54
Tabelle 10:	Beschreibung des zeitlichen Ablaufes des ersten Referenzversuches .	56
Tabelle 11:	Beschreibung des zeitlichen Ablaufes des zweiten Referenzversuches.....	58
Tabelle 12:	Versuchsparameter der Brandversuche mit Hohlstrahlrohren	61
Tabelle 13:	Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Löschexperimenten mit Hohlstrahlrohren.....	62
Tabelle 14:	Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Experimenten mit Systemen zur Löschmitteleinbringung.....	71
Tabelle 15:	Vergleich der Einsatzzeiten und Kühl-/ Löschwasserverbräuche der Versuche HSR_3, HSR_4, LE_2 und LE_3	72
Tabelle 16:	Vergleich der Einsatzzeiten und Kühl-/ Löschwasserverbräuche der Versuche BBD_1 und BBD_2	78
Tabelle 17:	Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Experimenten mit BBD, HSR und Systemen zur Löschmitteleinbringung	84
Tabelle 18:	Maximale gemessene Wasserstoffkonzentrationen für die Brand- und Löschversuche.....	87
Tabelle 19:	Oberste Grenze des Kalibrierbereichs der organischen Carbonate.....	89
Tabelle 20:	Maximale HF und COF ₂ -Konzentrationen aller Brand und Löschversuche.....	90
Tabelle 21:	Maximale HCN-Konzentrationen aller Brand- und Löschversuche....	92

Tabelle 22:	pH-Werte und Anionengehalte der Gaswaschwässer	94
Tabelle 23:	Am IBK durchgeführte Wasseruntersuchungen der Lösch- und Kühlwässer im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44]	97
Tabelle 24:	Schwermetallgehalte bestimmt nach DIN EN 38407-39 (2011-09) im Vergleich mit Grenzwerten der Abwasserbeseitigungssatzung nach §11 Abs. 6 des WWAZ [44].....	98
Tabelle 25:	Am IBK durchgeführte Wasseruntersuchungen der bei Modulversuchen angefallenen Tauchwässer im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44]	99
Tabelle 26:	Schwermetallgehalte bestimmt nach DIN EN 38407-39 (2011-09) im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44]	100

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Projektes war es, die derzeit zur Anwendung empfohlenen Brandbekämpfungsstrategien von im Brand befindlichen Elektrofahrzeugen, bei denen der Batteriebrand ursächlich dafür war, zu untersuchen. Wichtige Versuchsparameter waren die Einsatzzeit sowie die Lösch- und Kühlwasserverbräuche. Neben den üblicherweise bei Feuerwehren eingesetzten Hohlstrahlrohren wurden zwei Systeme untersucht, mit deren Unterstützung die Einsatzkräfte Lösch- und Kühlwasser in die Batteriesysteme einbringen können. In einem weiteren Versuch kam ein externes Kühlsystem zum Einsatz, welches unter dem Fahrzeug positioniert, das Batteriesystem im Brandfall kühlen soll. Zwei weitere Experimente dienten der Evaluierung des Mehrwerts von Brandbegrenzungsdecken. Die Untersuchungen wurden um zwei Referenzversuche ergänzt, bei denen auf Brandbekämpfungsmaßnahmen verzichtet wurde.

Für die Brand- und Löschversuche stellten die Hersteller BMW Group, Opel Automobile GmbH und Volkswagen AG dankenswerter Weise Fahrzeuge als Versuchsobjekte zur Verfügung.

Die Initiierung der Batteriebrände erfolgte nach Abwägung verschiedener anderer Methoden mit Hilfe von Metaldornen. Sie wurden an herstellerseitig vorbereiteten Positionen von unten in die Batteriesysteme eingetrieben und führten bei allen Versuchen zum Kurzschluss mit einhergehender spontaner Wärmefreisetzung und einem sich anschließenden Brand. Diese Art der Initiierung des Thermal Runaways stellt im Vergleich zu anderen evaluierten Methoden und dem realen Einsatzfall den worst case dar. Die Brände verliefen insbesondere in der Brandentstehungsphase trotz gleicher Vorbereitungsprozeduren auch bei baugleichen Fahrzeugen oft unterschiedlich. Daher lagen bei meist gleichbleibender Vorbrennzeit zum Zeitpunkt des Löschangriffs unterschiedliche Brandzustände vor. Daraus wurde abgeleitet, dass sich die Einsatzkräfte beim Eintreffen an der Einsatzstelle auf eines der nachfolgenden Brandphasen einstellen müssen.

1. Das Fahrzeug ist unter Beteiligung des Batteriesystems im Vollbrand.
2. Das Fahrzeug ist in der Brandentstehungsphase mit Flammenbildung an Radkästen, im Bereich der Schweller sowie an Front und Heck.
3. Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten lediglich Ventinggase aus.

Die Übergänge zwischen diesen Phasen sind fließend. Gezeigt wurde, dass die Einsatztaktik dahingehend angepasst werden muss. Im Projekt konnte aufgrund der Fokussierung auf Vollbrände eine durch zahlreiche Messwerte belegte taktische Vorgehensweise für die Brandphase 1 beschrieben werden. Die Ergebnisse zeigen, dass ein solcher Einsatz durch zwei Trupps mit unterschiedlichen Einsatzmitteln sicher beherrschbar ist. Obwohl sich wenige Fahrzeuge bei Beginn des simulierten Löschangriffes in der Phase des Entstehungsbrandes befanden, konnten auch für diesen Fall einsatztaktische Maßnahmen vorgeschlagen werden. Analog dem Vollbrand kann die Brandbekämpfung durch zwei Trupps sichergestellt werden. Allerdings muss mit längeren Einsatzzeiten und größeren Mengen Lösch- bzw. Kühlwasser gerechnet werden. Einsätze in der Brandphase 3 wurde im Projekt nicht explizit betrachtet. Es konnten aber aus den Erfahrungen und Erkenntnissen der sonstigen Versuche erste Vorschläge zur Einsatztaktik für diesen Fall unterbreitet werden. Diese müssen allerdings durch weitere Experimente validiert werden.

Bei den durchgeführten Versuchen wurden unterschiedliche Einsatzmittel, beginnend mit Hohlstrahlrohren, hinsichtlich ihrer Löschwirksamkeit untersucht. Es zeigte sich, dass die Brände mit Hilfe von Hohlstrahlrohren beherrschbar waren. Die Versuche belegten, dass die Brandbekämpfung durch zwei Trupps durchgeführt werden sollte. Dabei erwies sich die Reduzierung des Volumenstroms als zweckmäßig. Er wurde im Verlauf der Versuchsreihe auf den an den verwendeten Hohlstrahlrohren minimal einstellbaren Volumenstrom von 60 l/min reduziert. Anlassbezogen kann die Durchflussmenge erhöht, ggf. auch gesenkt, werden. Löschmittelzusätze kamen nicht zum Einsatz. Die Versuche zeigten, dass bei einem durch einen Thermal Runaway im Batteriesystem verursachten Vollbrand, die Reaktion im Batteriesystem durch Hohlstrahlrohre nur dann gelöscht werden kann, wenn über Löcher und sonstige Öffnungen Wasser in das Batteriesystem gebracht werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss die Taktik auf die Verhinderung der Brandausbreitung auf die Umgebung des Fahrzeugs und dem

kontrollierten Abbrand der Zellen im Batteriesystem ausgerichtet werden. In den untersuchten Fällen lag die Einsatzzeit für die Bewältigung eines im Vollbrand befindlichen Fahrzeugs im Maximum bei etwa 35 Minuten. Die Löschwasservolumina lagen bei auf 60 l/min eingestellten Strahlrohren im Maximum bei insgesamt 1.600 l. Auch bei einem Entstehungsbrand kann die Reaktion im Batteriesystem mit Hilfe von Hohlstrahlrohren nur gelöscht werden, wenn zur Kühlung bzw. Löschung ausreichend Wasser in das Batteriesystem eingebracht werden kann. Gelingt dies nicht, kann sich die Reaktion im Batteriesystem von Zelle zu Zelle fortpflanzen. Tritt dieser Fall ein, muss es oberste Priorität haben, die Ausbreitung des Batteriebrandes auf das gesamte Fahrzeug und damit das für die Forcierung des Brandes verantwortliche Thermofeedbacks zu verhindern. Für die Brandbekämpfung ist im Vergleich zum Vollbrand eine BEVs mit längeren Einsatzzeiten und größeren Löschwassermengen zu rechnen.

In drei Versuchen kamen in der Phase des Vollbrandes, bei dem der Batteriebrand ursächlich war, Systeme zur Löschmitteleinbringung in Batteriesysteme zum Einsatz. Sie wurden erst dann eingesetzt, als die Einsatzkräfte den peripheren Fahrzeugbrand so weit abgelöscht hatten, dass das Vorbringen der Löschsysteme 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 Teilschritt 1 des Projektes nicht durchgeführt werden. Es sei auf Folgeversuche im sich unmittelbar anschließenden Teilschritt 2 verwiesen. Es wird eingeschätzt, dass der Einsatz der Systeme zur Löschmitteleinbringung in der Phase eines Entstehungsbrandes einen größeren Mehrwert hinsichtlich Löschwassersparnis und Einsatzzeit im Vergleich zur Verwendung von Hohlstrahlrohren haben. Inwieweit der frühe Einsatz dieser Systeme durch eingebrachtes Löschwasser zur Forcierung des Batteriebrandes durch Kurzschlüsse führt, muss in weiteren Versuchen evaluiert werden.

Feuerwehrspezifische Merkblätter verweisen darauf, dass sowohl im Rahmen der Brandbekämpfung als auch im weiteren Verlauf des Einsatzes Kühlmaßnahmen an

den Batteriesystemen der Fahrzeuge durchgeführt werden sollen. Dadurch sollen bereits im Thermal Runaway befindliche Zellen gekühlt und nicht betroffene Zellen durch Kühlung vor einer Erwärmung geschützt werden.

Neben den üblicherweise bei Feuerwehren eingesetzten Hohlstrahlrohren werden von Feuerwehrausstattem spezielle Kühllarmaturen angeboten. Diese sind unterhalb der Fahrzeuge zu positionieren, um mit Hilfe des an die Unterseite der Batteriesysteme applizierten Wassers, eine Kühlwirkung am Batteriesystem herbeizuführen. Eines der Systeme wurde bei den durchgeführten Versuchen exemplarisch untersucht. Die Messergebnisse zeigten, dass trotz enormer Wassermengen, die Kühlung durch eine unter dem Fahrzeug positionierten Kühllarmatur nicht ausreicht, um das Gesamtsystem zu kühlen oder den Thermal Runaway zu unterbinden. Die Taktik, sich nach dem Ablöschen des Fahrzeugs ausschließlich auf die Kühlung unter dem Fahrzeug zu konzentrieren, führte nicht zur nachhaltigen Temperatursenkung.

Als mögliche Alternative für „klassische“ wasserführende Einsatzmittel wurden im Projekt zwei Brandversuche mit Brandbegrenzungsdecken durchgeführt. Die Versuche an im Vollbrand befindlichen Fahrzeugen zeigten, dass die Flammenbildung wirksam begrenzt werden konnte. Die durch Wärmeexposition verursachte 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 Ventinggas aus. Im Vergleich mit den weiteren Versuchen verlängerten sich dadurch die Einsatzzeiten. Durch die Versuchsbeteiligten wurde eingeschätzt, dass Brandbegrenzungsdecken für den Einsatz auf Quarantäneplätzen bei Abschleppunternehmen geeignet sein können. Der Thermal Runaway und die damit verbundene Freisetzung von Ventinggasen kann nicht unterdrückt werden, wohl aber die Entzündung an heißen Oberflächen im Fahrzeug selbst. Damit könnten später auftretende Brände vermieden und die Brandausbreitung auf benachbarte Objekte verhindert werden. Es ist jedoch nicht möglich, eine zum späteren Zeitpunkt entstehende chemische Reaktion im Batteriesystem zu verhindern. Auch bei besonderen Einsatzlagen, z.B. in Trinkwasserschutzgebieten, in denen es notwendig ist, den oberflächlichen Abfluss von kontaminiertem Löschwasser zu verhindern, ist der Einsatz einer Brandbegrenzungsdecke zur Reduzierung der Lösch-/ Kühlwassermenge denkbar.

Ableitend aus allen Untersuchungen wird zur Sicherstellung des Brandschutzes der Einsatz zweier Löschfahrzeuge mit mindestens Staffelbesatzung empfohlen. Die Mannschaft sollte um einen Leitungsdienst (Zugführer) mit einfachen Führungsmitteln ergänzt werden. Als essenziell wurde die Verfügbarkeit eines Tablets/ Smartphones mit Internetzugang erachtet, um beispielsweise fahrzeugspezifische Rettungsdatenblätter einsehen zu können. Darüber hinaus ist zur Identifizierung von Hot Spots und möglichen Öffnungen zur Löschmitteleinbringung das Mitführen einer Wärmebildkamera zweckmäßig.

Die im Rahmen der durchgeführten Experimente eingesetzten Kräfte gingen mit unterschiedlichen persönlichen Voraussetzungen und Detailwissen in die Versuchsreihe. Dies äußerte sich zu Beginn der Versuchsreihe in einer eher konservativen taktischen Vorgehensweise mit vergleichsweise hohen Löschwasserverbräuchen und längeren Einsatzzeiten. Diese Tatsache war der bis dato lückenhaften Erkenntnislage im Kontext validierter Brandbekämpfungsstrategien geschuldet. Durch die im weiteren Verlauf der Versuchsreihe gewonnenen Erkenntnisse zu den möglichen Szenarien an der Einsatzstelle, dem Brandverhalten der Fahrzeuge und den wirksamen Brandbekämpfungsstrategien konnten die involvierten Kräfte einen großen Erfahrungsschatz im Umgang mit solchen Brandereignissen aufbauen. Gleichzeitig konnten Vorbehalte abgebaut werden. Dies führte in den weiteren Versuchen zur Optimierung der Taktik und sinkenden Löschwasserverbräuchen und verkürzten Einsatzzeiten.

Die durchgeführten Versuche zeigten im Nachgang eindrucklich, wie wichtig die fundierte Aus- und Fortbildung sowie intensives wiederkehrendes Training ist.

1 EINLEITUNG, ZIELSTELLUNG UND THEMENABGRENZUNG

In Europa ist es erklärtes Ziel, die durch den Straßenverkehr verursachten CO₂-Emissionen zu reduzieren. Elektrofahrzeuge sollen hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Während steigende Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit eingebauten Hochvolt-speichern das Erreichen der vereinbarten Klimaziele in greifbare Nähe rücken lassen, wirft deren Anstieg in Feuerwehrcreisen nicht selten Fragen nach einem potentiellen Wandel der Einsatztaktik auf. Zuweilen reißerisch geschriebene Beiträge in der Boulevardpresse, in denen sehr plakativ von Einsätzen mit brennenden E-Fahrzeugen berichtet wurde, forcieren die Bedenken und schüren Ängste gegenüber dieser nicht mehr ganz so neuen Antriebstechnologie.

Dabei ist festzustellen, dass trotz der Zunahme der Wärmefreisetzung von Fahrzeugen im Allgemeinen, diese im Wesentlichen unabhängig von der Antriebsart ist [1]. Außerdem ist nach Auswertung zahlreicher Statistiken festzustellen, dass die Gefahr eines Brandes unter Beteiligung eines Elektrofahrzeuges nicht größer ist als bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (internal combustion engine vehicles (ICEV)) [2] [3]. In [2] konnten für den Zeitraum von 2014 bis September 2020 weltweit 87 mit Quellen belegte Brände an E-Fahrzeugen recherchiert werden¹. Davon waren allein bei 19 Fällen Fehler der Bediener (z.B. Unfälle) ursächlich. Bei dieser Erhebung muss berücksichtigt werden, dass die Zahlen für vergleichsweise neue E-Fahrzeuge gelten. Laufleistungsbedingte Veränderungen in der Brandentstehung und im Brandverhalten sind aufgrund sehr begrenzter Langzeitbetrachtungen der Technologie schwer prognostizierbar.

Die feuerwehrspezifische Fachpresse sowie Verbände und Organisationen des Feuerwehrwesens agieren in diesem Zusammenhang weitaus gelassener. Zur Klärung offener Fragestellungen und resultierender Erkenntnislücken geben sie mit Einsatzhinweisen, in Form von Merkblättern, zielgerichtete Hinweise zum Umgang mit in Brand

¹ Im Bericht zum vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt ALBERO wird davon ausgegangen, dass im Beobachtungszeitraum vor allem in China und den weiteren asiatischen Staaten mehr Fälle auftraten. Besonders für China wird darauf hingewiesen, dass die Datenerhebung durch die komplizierte Übersetzung der Schriftzeichen und die restriktive Medienpolitik unvollständig ist. [4].

geratenen Elektrofahrzeugen [5] [6] [7] [8] [9]. Gleichwohl ist festzustellen, dass die Ergebnisse von, bei unabhängigen Forschungsstellen durchgeführten, Realbrandexperimenten, bei denen dezidiert auch Löschmaßnahmen vorgenommen wurden, für die Feuerwehren, wenn überhaupt, unzureichend aufbereitet vorliegen. Nach Einschätzung der Autoren des hier vorliegenden Berichtes besteht also Handlungsbedarf, die Erkenntnislage im Kontext von Löschtechniken und –taktiken zu verbessern. Dadurch können eine Reihe offener Fragen beantwortet, resultierende Bedenken und zuweilen auch Ängste, ausgeräumt werden.

Ziel des Projektes ist es, die derzeit zur Anwendung empfohlenen Strategien für die Brandbekämpfung von im Brand befindlichen vollelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle (BEV)²) mit eingesetzten Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Hochvolt-Batteriesysteme als Traktionsbatterien) anzuwenden und sie anhand von Messergebnissen hinsichtlich der Wirksamkeit zu bewerten. Die Grundlage, welche Löschgeräte/–verfahren und welche Brandbekämpfungsstrategien betrachtet werden, bildeten u.a. die aus den ausgewerteten feuerwehrspezifischen Merkblättern gewonnenen Erkenntnisse, die Rechercheergebnisse aktueller Fachliteratur, Expertenbefragungen und eigene Expertisen. Selbstverständlich brachten auch die beteiligten Automobilhersteller (OEM) ihr umfangreiches Wissen mit ein.

Die im Folgenden vorgestellten Brand-/ Löschversuche wurden mittels physikalischer und chemischer Messtechnik begleitet. Neben den resultierenden zeitabhängigen Temperatur- und Wärmestrahlungsverläufen bildeten die aufgezeichneten Lösch-/ Kühlwasserverbräuche objektive Bewertungskriterien für den Löscherfolg. Im Projekt wurden neben Gasmessungen auch erste Ergebnisse zu relevanten Schadstoffen in den entstandenen Lösch- und Kühlwässern sowie ein Ansatz zur Bestimmung resultierenden Kontaminationen an der Persönlichen Schutzausrüstung vorgestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit des Berichtes und aufgrund der Diversität der unterschiedlichen Lithium-Ionen-Akkumulatoren, wird darauf verzichtet, detailliert auf den Aufbau und die Zellchemie einzugehen. Es sei auf umfangreiche Abhandlungen von [10], [11] und [12] verwiesen.

² Nicht untersucht wurden mild hybrid electric vehicle (MHEV), plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) und Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Die in Experimenten untersuchten BEV wurden dankenswerter Weise von den OEM BMW Group, Opel Automobile GmbH und Volkswagen AG zur Verfügung gestellt. Sie stellten auch die fachgerechte Entsorgung sicher. Fahrzeuge weiterer OEM konnten aufgrund begrenzter Projektmittel nicht untersucht werden.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden erste einsatztaktische Maßnahmen für die Brandbekämpfung an BEVs vorgeschlagen. Aufgrund von Erkenntnislücken, besonders im Kontext von Entstehungsbränden, können im vorliegenden Abschlussbericht zu Teilschritt 1 nicht in vollem Umfang Handlungshinweise vorgestellt werden. Im sich unmittelbar an das aktuelle Projekt anschließenden Teilschritt 2 wird es aber möglich sein, Teile der identifizierten Erkenntnislücken durch Folgeversuche zu schließen. Beim Vorliegen entsprechender Versuchsergebnisse können mit Abschluss des Teilschritts 2 dann ausführliche Handlungshinweise und deren didaktische Aufbereitung in Form von frei verfügbaren Unterrichtspräsentationen erstellt werden. In diesem Folgeprojekt werden auch anderen OEM die Möglichkeit eingeräumt, sich an den Untersuchungen zu beteiligen. Entsprechende Vorgespräche wurden bereits erfolgreich geführt. Teilschritt 2 wird im Frühjahr 2023 abgeschlossen. Der Abschlussbericht, die Handlungsempfehlungen und die frei verfügbaren Unterrichtspräsentationen folgen anschließend.

Im vorliegenden Abschlussbericht wird besonderer Wert auf die Anonymisierung der Ergebnisse gelegt. Demnach wird darauf verzichtet, dezidiert einzelne Produkte der Löschgerätehersteller zu bewerten. Gleiches gilt für das spezifische Brandverhalten der untersuchten Fahrzeuge. Somit wird dem Forschungsauftrag Rechnung getragen, aus den Ergebnissen allgemeingültige herstellerunabhängige Aussagen abzuleiten.

2 AUFBAU VON BATTERIESYSTEMEN FÜR TRAKTIONSBATTERIEN UND TECHNISCHE LEISTUNGSPARAMETER

Kernstück eines BEV ist der für den Antrieb notwendige Motor³. Er wird mit Elektroenergie betrieben, die in der Traktionsbatterie gespeichert ist. Nach der Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom wandelt der Elektromotor die elektrische Energie in mechanische Energie um.

Batteriesysteme für den Einsatz als Traktionsbatterie in BEV bestehen aus Batteriemodulen. In einem Batteriemodul ist eine Gruppe von Zellblöcken verbaut, die wiederum aus Einzelzellen bestehen (siehe Abbildung 1). 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 [11]. Eine Gruppe von sechs in Reihe geschalteten Einzelzellen mit einer Spannung von 3,6 V ergibt eine Nennspannung von 21,6 V. Die Parallelschaltung von Gruppen bewirkt die Erhöhung der elektrischen Ladung, respektive die üblicherweise bei Batterien angegebene Kapazität in Amperestunden (Ah). Der Anstieg der Kapazität bewirkt die Erhöhung des maximalen Lade- und Endladestroms. Angepasst an die für den Anwendungsfall notwendige Kapazität, wird eine entsprechende Anzahl von Einzelzellen bzw. Modulen in Reihe oder parallel geschaltet [12].

In Traktionsbatterien können Pouchzellen, zylindrische oder prismatische Zellen eingesetzt werden [13]. Im Automobilbereich als Traktionsbatterien in BEVs eingesetzte Batteriesysteme sind aufgrund ihrer Spannung i.d.R. als Hochvolt-Systeme eingestuft [8]. Hochvoltssysteme sind elektrische Anlagen gemäß DIN VDE 0132. Sie verfügen über einen Betriebsspannungseffektivwert von $60\text{ V} < U_{eff} \leq 1500\text{ V}$ bei Gleichstrom und $30\text{ V} < U_{eff} \leq 1000\text{ V}$ bei Wechselstrom.

³ Bei Allradfahrzeugen kommen i.d.R. zwei Elektromotoren zum Einsatz, die die Vorder- und Hinterachse direkt antreiben.

Die in Traktionsbatterien eingesetzten Li-Ionen-Zellen müssen im Vergleich zu Zellen in Spielzeugen oder anderen Gebrauchsgegenständen höheren Sicherheitsanforderungen entsprechen [14]. Die Anforderungen zur Sicherstellung eines hohen Sicherheitsstandards resultieren u.a. aus der Norm ECE-R100. Sie legt fest, dass im Automobilsektor eingesetzte Li-Ionen-Zellen bestimmte Prüfungen zur Sicherheit durchlaufen haben müssen. Dazu zählen z.B. solche zur Feuerbeständigkeit, zum Schutz vor externen Kurzschlüssen und zum Überladungsschutz. Über die Anforderungen der ECE-R100 hinaus ist festgelegt, dass von den in Traktionsbatterien eingesetzten Li-Ionen-Zellen beim Thermal Runaway (TR) keine Gefährdungen oberhalb des Hazard-Levels 4 nach EUCAR ausgehen dürfen [14]. Eine Übersicht der Hazard-Levels liefert Tabelle 1.

Tabelle 1: EUCAR Hazard Level [15]

Hazard Level	Beschreibung	Effekte
0	Keine Auswirkung	Kein Effekt, Keine Beeinflussung der Funktionalität
1	Schutzsystem spricht an	Kein Defekt; Zelle wiederherstellbar, Reparatur Schutzsystem
2	Defekt, Schaden	Zelle beschädigt, Reparatur notwendig
3	Leck, Massenverlust < 50 %	Verlust von Elektrolyt, kein Abblasen, keine Flamme oder Feuer
4	Gasaustritt, Massenverlust > 50 %	Verlust von Elektrolyt, Abblasen der Zelle, keine Flamme oder Feuer
5	Feuer und Flamme	Kein Bruch, keine Explosion, keine fliegenden Teile
6	Bruch	Keine Explosion, fliegende Teile
7	Explosion	Explosion, Zerstörung in kürzester Zeit

Beim Lade- und Entladeprozess überwacht das Batteriemanagementsystem (BMS) den Ladezustand, den sog. State of Charge (SoC in %), auf Zell- und Systemebene. Zusätzlich werden mit Hilfe von Sensoren Strom, Spannung und Temperatur der Einzelzellen und des gesamten Batteriesystems gemessen und zum Teil geregelt. Das

BMS ist z.B. durch die Möglichkeit der Protokollierung von Fehlern, dem Zu-/ Abschalten des Batteriesystems und dem Schutz vor Tiefenentladung essentieller Bestandteil der Sicherheitsarchitektur des Gesamtsystems [12].

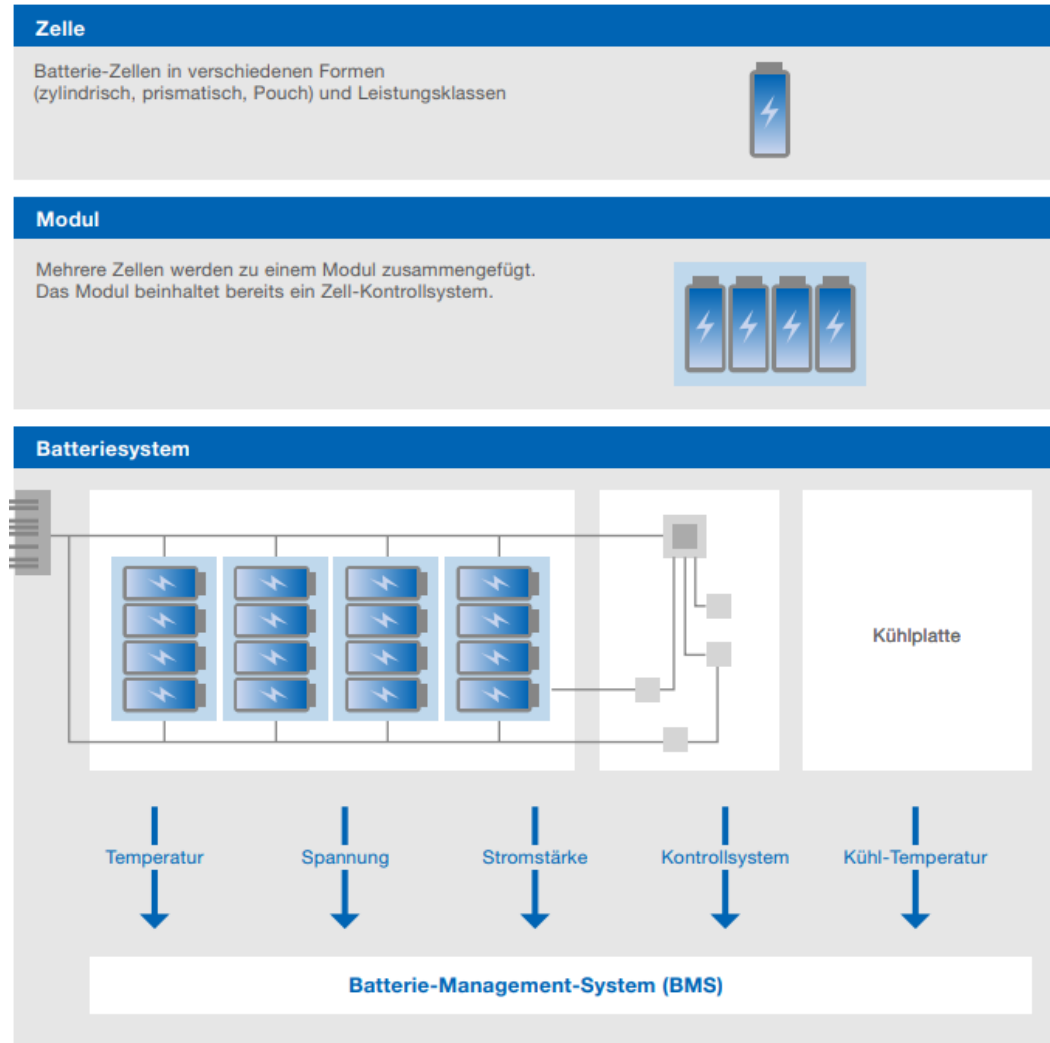


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Batteriesystems [12]

Zum Schutz der empfindlichen Komponenten des Batteriesystems vor Umwelteinflüssen, wie Staub und Wasser, befindet es sich in einem Gehäuse, das üblicherweise über ein Kühlsystem für alle Batteriemodule verfügt. Im oberen Bereich des Gehäuses wird ein Gehäusedeckel aufgeschraubt und verklebt. Der Kantenbereich wird mit Hilfe von Dichtmaterial soweit abgedichtet, dass das Eindringen von Störstoffen, wie Wasser oder Staub, verhindert wird. Durch die Positionierung unterhalb des Fahrzeugs ist der

untere Teil des Gehäuses, Batterietrog genannt, gegen Beschädigungen entweder mechanisch stabiler ausgeführt oder, wie in Abbildung 2 erkennbar, mit einem Schutz ausgestattet.

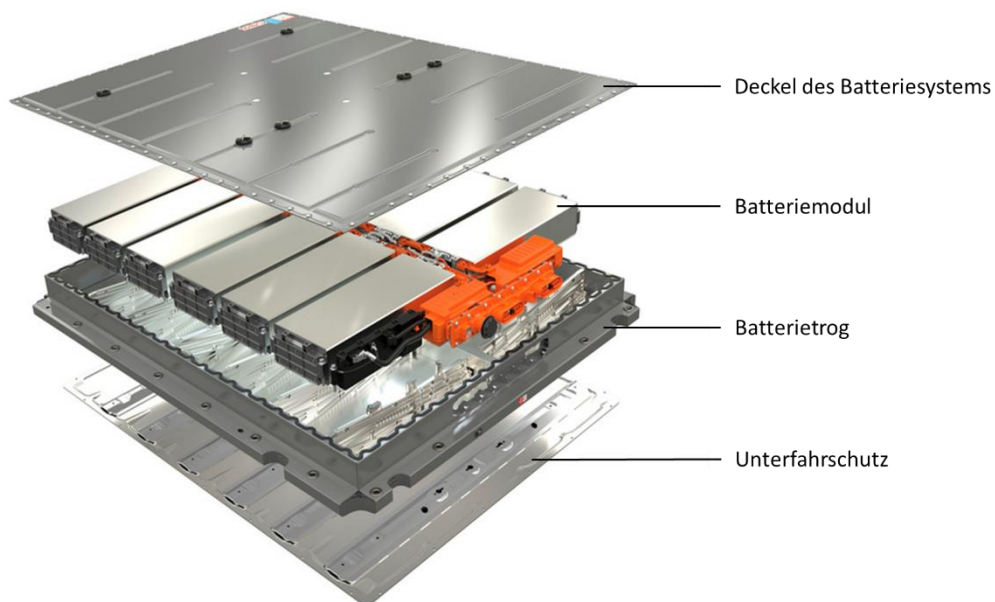


Abbildung 2: Batteriesystem mit Batteriegehäuse [16] mit Ergänzungen der Autoren dieses Berichtes

3 BRANDCHARAKTERISTIK VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Dem Brand eines Batteriesystems geht die Beschädigung einer einzelnen Batteriezelle oder eines Batteriemoduls voraus. Ursächlich dafür können neben Überladung und Tiefenentladung z.B. Wärmeexposition oder eine mechanische Beschädigung sein [14] [17].

3.1 Thermal Runaway

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass für Li-Ionen-Batterien stabile Bedingungen bei Temperaturen von bis zu 60 °C vorliegen⁴ [11]. Bei einer Temperaturerhöhung auf über 100 °C reagieren die chemischen Komponenten miteinander bzw. sie zersetzen sich unter Wärmefreisetzung. Diesem Vorgang schließt sich ein Temperaturanstieg mit einhergehender Volumenvergrößerung und Druckaufbau an. Über Sicherheitsventile mit Berstscheiben⁵ erfolgt bei einem festgelegten Grenzdruck die Druckentlastung [11]. Eine Druckentlastung kann auch über Risse im Zellgehäuse erfolgen. Dabei treten teils in großem Umfang toxische und entzündliche Gase bzw. Dämpfe aus [18].

Hauptkomponenten sind Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff sowie kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Daneben werden organische und fluororganische Verbindungen sowie anorganische Phosphor- und Fluor-Verbindungen freigesetzt [2]. Dies konnte auch bei den Untersuchungen für diesen Bericht bestätigt werden, wie im Kapitel 8.5 nachzulesen ist. Allerdings ist die konkrete Zusammensetzung von der verwendeten Zellchemie abhängig.

Diese sich selbst beschleunigende Reaktion mit exotherm verlaufender Zersetzung der Zellbestandteile wird als Thermal Runaway (TR) bezeichnet. Beim Vorhandensein eines Oxidationsmittels und einer Zündquelle sind Flammenerscheinungen zu erwarten [6]. Unter bestimmten Umständen kann das Oxidationsmittel bereits im Rahmen

⁴ Unterschiede existieren bei verschiedenen Zellchemien.

⁵ Pouchzellen verfügen i.d.R nicht über Berstscheiben. Nach der Volumenvergrößerung erfolgt die Druckentlastung über die Versiegelungsstellen im Randbereich der Zelle.

des TR durch zellinterne Zerfallsprozesse entstehen [19]. Durch den Zerfall von sauerstoffhaltigen Kathodenmaterialien kann Sauerstoff freigesetzt werden. Bei ausreichender Sauerstofffreisetzung können sich Reaktionsprodukte direkt nach dem Austritt aus der Zelle, auch unter Luftausschluss, entzünden. Dieser Fall wurde im Rahmen der durchgeführten Experimente gemäß Kapitel 8 nicht beobachtet.

Ausschlaggebend für den Verlauf des TR sind u.a. die angewendete Zellchemie ([2] [18]) und die verwendeten Sicherheitsvorrichtungen, wie Elektrolyt-Additive [14]. Belegt ist außerdem, dass die thermische Stabilität von Lithium-Ionen-Zellen und damit die Zeit bis zum Eintreten des TR, mit steigendem SoC abnimmt. Respektive steigt das Potential des Eintretens des TR. Zellen mit hohem SoC zeigen kürzere aber heftigere Reaktionen [20]. In diesem Fall steigt auch das Volumen freigesetzter Gase bzw. Dämpfe [2] [18].

3.2 Brandcharakteristik auf Zellebene

[18] beschreibt die nachfolgend aufgeführten fünf möglichen Szenarien eines TR auf Zellebene. Im Rahmen der für dieses Forschungsprojekt durchgeführten Experimente wurde gezeigt, dass diese in zeitlicher Abfolge auftreten und sich zum Teil überlagern. Erkenntnisse hierzu sind Kapitel 8 zu entnehmen. Die Aussagen aus [18] werden daher im Folgenden um eigene Erkenntnisse ergänzt.

3.2.1 Ausgasung (engl. Venting oder Smoker)

Im Verlauf des TR treten aus der Zelle Gase, Dämpfe bzw. Zersetzungsprodukte unter Wärmefreisetzung aus (siehe Abbildung 3). Diese bestehen aus brennbaren Nebenprodukten, wie Aerosolen, Dämpfen und giftigen Gasen. Damit verbunden sind zischende und pfeifende sowie beim Vorhandensein von Ventilations-/ Druckentlastungsöffnungen, „ploppende“ Geräusche hörbar. Wie in den nächsten Abschnitten gezeigt, können sich die Substanzen in Anwesenheit einer Zündquelle und einem Oxidationsmittel entzünden.



Abbildung 3: Austritt von Gasen/ Dämpfen während des TR einer zylindrischen Zelle [18]

3.2.2 Stichflammen (engl. Burner)

Während der stark impulsbehafteten zyklischen Ausgasung können sich die austretenden Gase und Dämpfe durch externe Zündquellen, wie Flammen, Funken, heiße Oberflächen, entzünden. Verursacht durch batterieinterne Zündquellen, wie Lichtbögen, können aus eskalierten Zellen, auch ohne das oben beschriebene Ausgasen, Stichflammen austreten. Abbildung 4 zeigt diesen Vorgang.



Abbildung 4: Austritt von Stichflammen nach Penetration einer prismatischen Zelle (SoC > 90 %) eines Batteriemoduls mit einer Nagelpistole

3.2.3 Funkensprühen (engl. Flare)

Im Verlauf des TR können nach Abschluss der Ausgasung mit oder ohne resultierende Stichflammen glühende Batteriebestandteile ausgestoßen werden. Die dabei entstehenden Geräusche erinnern an ein gezündetes Feuerwerk. Abbildung 5 zeigt ein Foto, das wenige Sekunden nach der Momentaufnahme in Abbildung 4, also nach dem Verlöschen der Stichflammen, entstanden ist.

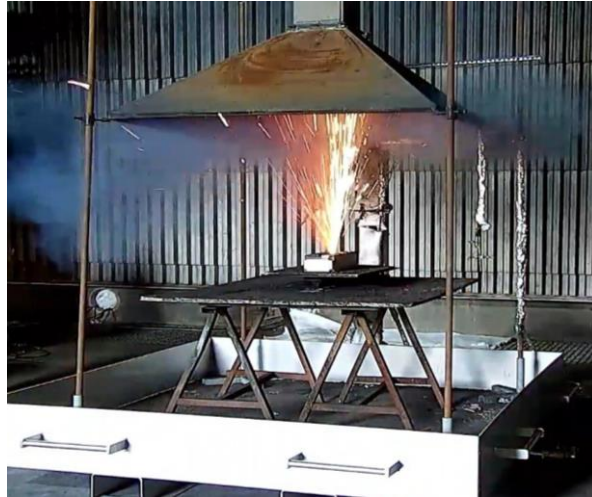


Abbildung 5: Austritt von Funken nach dem Verlöschen einer Stichflamme nach Penetration einer prismatischen Zelle (SoC > 90 %) eines Batteriemoduls mit einer Nagelpistole

3.2.4 Feuerball (engl. Fireball)

Treten im Verlauf der Ausgasung unverbrannte brennbare Gase bzw. Dämpfe aus, besteht die Gefahr der schlagartigen Durchzündung. Besondere Vorsicht ist in geschlossenen Räumen geboten. Die Ausdehnung des resultierenden Feuerballs ist abhängig von der Menge der freigesetzten Gase bzw. Dämpfe, dem Anteil an brennbaren Bestandteilen und der Menge an reaktionsbedingt entstandenem Sauerstoff. Im Rahmen der durchgeführten Realbrandexperimente trat dieses Phänomen einmalig auf (siehe Abbildung 7). Vorausgegangen war das massive und langanhaltende Ausgasen aus einem Batteriesystem. Der Durchmesser des Feuerballs betrug 5 m bis 6 m. Zum spürbaren Druckaufbau kam es nicht.



Abbildung 6: Austritt großer Mengen zum Teil brennbarer Gase/ Dämpfe/ Zersetzungsprodukte nach Penetration eines im BEV eingebauten Batteriesystems



Abbildung 7: Entzündung von Zersetzungsprodukten in Form eines Feuerballs; vorangegangen war der in Abbildung 6 visualisierte Gas-/ Dampfaustritt

3.2.5 Explosion

Weitere Quellen verweisen im Kontext von Lithium-Ionen-Batterien auf noch heftigere Reaktionen, wie Explosionen von Batteriezellen und -modulen [14] [18]. Als Ursachen werden fehlende Qualitätssicherungsmaßnahmen und fehlende Sicherheitsstandards genannt⁶. Darüber hinaus können fehlerhafte Druckentlastungsöffnungen zum Druckaufbau in der Zelle und einer sich anschließenden Explosion führen. Diese Erscheinung trat im Rahmen der durchgeführten Experimente nicht auf.

⁶ Diese Mängel können bei Lithium-Ionen-Batterien für den Automotivebereich aufgrund höchster Sicherheitsstandards ausgeschlossen werden.

3.3 Brandcharakteristik eines Batteriesystems

Zur Einleitung eines TR im gesamten Batteriesystem muss die beim TR einer einzelnen Zelle freiwerdende Energie wirksam auf benachbarte Zellen übertragen werden. Ist die Wärmebilanz positiv, d.h., die entstehende Wärme kann nicht effektiv nach außen transportiert oder absorbiert werden, besteht die Gefahr der thermischen Konditionierung weiterer Zellen und Module. Erst wenn diese in ausreichendem Maße thermisch konditioniert sind, wird auch hier ein TR ausgelöst. Entscheidend für die Einleitung der dann möglicherweise unkontrollierbaren Kettenreaktion ist die Temperaturdifferenz zwischen der momentanen Temperatur der Zelle und der Temperatur, ab der sie vom stabilen in den instabilen Zustand übergeht. Je höher die Differenz zu dieser Grenztemperatur ist, desto unwahrscheinlicher bzw. verzögerter ist die Ausbreitung des TR von Zelle zu Zelle. Übertragen auf Batteriesysteme ist demnach davon auszugehen, dass sich bei niedrigen Zelltemperaturen, respektive einer hohen Temperaturdifferenz zwischen der Momentantemperatur und der Grenztemperatur, bei dem die Zellen in einen instabilen Zustand übergehen, der TR im gesamten Batteriesystem langsamer ausbreitet. Genügt die freigesetzte Energie einer einzelnen eskalierten Zelle nicht zur Konditionierung weiterer Zellen, oder wird Energie z.B. durch Lösch-/ Kühlwasser absorbiert, stoppt die Kettenreaktion⁷. Kommt es zur Weiterleitung des TR von Zelle zu Zelle bzw. greift die Reaktion auf weitere Batteriemodule über, werden analog den Ausführungen des Abschnitts 3.2 Gase, Dämpfe und Zersetzungsprodukte freigesetzt. Sie treten infolge der resultierenden Druckdifferenz gerichtet aus dem Batteriesystem aus. Dies geschieht üblicherweise an Druckentlastungsöffnungen des Batteriesystems selbst. Dadurch wird ein Druckaufbau im Batteriesystem und die Gefahr einer schlagartigen Freisetzung mit erheblichem Druckaufbau bzw. eine Explosion verhindert. Sind diese herstellerseitig nicht vorgesehen, treten die Stoffe z.B. im Übergang zwischen dem Batterietrog und dem Deckel aus. Sind alle Zündbedingungen erfüllt, also Brennstoff, Oxidationsmittel und Zündquelle sind vorhanden, treten u.a. in Abhängigkeit vom Druck im Batteriesystem an den genannten Stellen gerichtete Flammen aus.

⁷ Im Rahmen von ersten Versuchen auf Modulebene wurde festgestellt, dass eine Abhängigkeit zwischen der Starttemperatur des Batteriemoduls und der Heftigkeit des sich anschließenden TR besteht. Die Verifizierung der Beobachtungen erfolgt derzeit im Rahmen einer bereits in Bearbeitung befindlichen Masterarbeit. Die Ergebnisse werden im Herbst 2022 vorliegen.

4 ERKENNTNISSTAND ZUR EINSATZTAKTIK BEI BRÄNDEN UNTER BETEILIGUNG VON BEVS

Feuerwehren stehen im Einsatz schon immer Fahrzeugbränden gegenüber. Es sind Standardeinsätze im Feuerwehrralltag. Die Risiken bei der Brandbekämpfung von konventionellen Fahrzeugen, beispielsweise durch auslaufenden Kraftstoff, sind bekannt. Ihnen wird einsatztaktisch z.B. durch die Verwendung von Löschwasserzusätzen, wie Löschschaum, Rechnung getragen. Auch die in den letzten ca. 30 Jahren zu beobachtende Zunahme des Kunststoffanteils in Fahrzeugen mit der verbundenen höheren Wärme- und Rauchgasfreisetzung hat an dieser Tatsache nichts geändert [6]. Mit Wasser als Löschmittel, in Verbindung mit den eingesetzten Strahlrohren, stehen den Feuerwehren effektive Einsatzmittel zur Einsatzbewältigung zur Verfügung.

Die Hauptlöschwirkung des Wassers beruht auf dem Kühleffekt. Zur vollständigen Verdampfung von 1 Liter Wasser ist eine Energiemenge von etwa 2676 kJ notwendig. Wasser hat damit ein sehr hohes Wärmebindungsvermögen. Löschmittelzusätze wie Löschschaum oder spezielle Löschsysteme, wie Hochdrucksysteme, können in speziellen Einsatzfällen bedarfsgerecht hinzugezogen werden. Die Voraussetzung für den effektiven Einsatz ist allerdings die Zugänglichkeit des Löschmittels zum Brandobjekt.

Die steigende Anzahl von Elektro- und Hybridfahrzeugen sorgt bei den Feuerwehren allerdings nicht selten für Verunsicherung. Im Fokus steht die Fragestellung, ob die bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren erfolgreich angewendeten Löschtechniken und -taktiken auch bei Elektro- und Hybridfahrzeugen angewendet werden können und ob ggf. Änderungen bei den Einsatzmitteln und der -taktik notwendig sind. Die mediale Berichterstattung im Kontext von Brandereignissen im Allgemeinen konzentriert sich nicht selten auf die brennenden E-Fahrzeuge. Damit wird aus Sicht der Autoren des hier vorliegenden Berichtes ein Bild von schwer oder unlöschbaren Fahrzeugen erzeugt, das sich in den Köpfen, auch denen der Feuerwehrangehörigen, nachhaltig einbrennt.

Im Folgenden wird anhand der verfügbaren Literatur, vor allem Merkblättern von Verbänden, Organisationen und einzelnen Feuerwehren, die derzeit angewandte Einsatztaktik im Kontext solcher Brandereignisse beschrieben. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass einzelne Feuerwehren, die bereits Erfahrung im Umgang mit solchen Bränden gesammelt oder an praktischen Lehrgängen teilgenommen haben, eigene Strategien entwickelt haben und diese zur Anwendung bringen.

In den ausgewerteten Merkblättern werden neben der eigentlichen Brandbekämpfung auch die Erkundung und die sich an die Brandbekämpfung anschließende Übergabe der Einsatzstelle an Dritte thematisiert.

4.1 Erkundung und Informationsbeschaffung

In den Feuerwehrkreisen besteht Einigkeit darüber, bei Einsätzen unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien neben der bekannten G A M S – Regel⁸ ergänzend die sog. A U T O – Regel anzuwenden. Letztere stellt eine Handlungsempfehlung speziell für Einsätze unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben dar. Durch Abarbeitung der formulierten Regeln soll zweifelsfrei festgestellt werden, um welche Antriebstechnologie es sich handelt (siehe Abbildung 8).

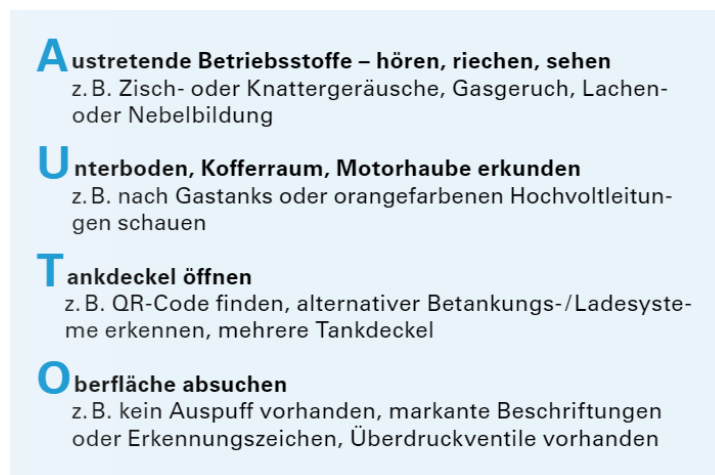


Abbildung 8: Vorgehensweise nach der A U T O – Regel [21]

⁸ G A M S – Regel: **G**efahr erkennen, **A**bsperren, **M**enschenrettung durchführen, **S**pezialkräfte alarmieren

Angaben zum Fahrzeugtyp und dem Baujahr können auch im Rahmen der Kennzeichenabfrage über die Leitstellen eingeholt werden. Hier fragen die Leitstellen die Daten beim Kraftfahrt-Bundesamt ab und geben sie an die Kräfte an der Einsatzstelle weiter. Mit Hilfe dieser Informationen können sie vor Ort das korrekte fahrzeugspezifische Rettungsdatenblatt, z.B. online⁹ oder aus einer App, kostenlos herunterladen. Sie 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. Beispiele sind in den Abbildungen 12, 14, 16 und 17 angegeben.

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 Rettungsleitstelle. Ursache eines automatischen Anrufs ist 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.

⁹ <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/rettungskarte/>

4.2 Brandbekämpfung

Bei einem im Brand befindlichen Elektrofahrzeug unter Beteiligung des Batteriesystems stehen die Einsatzkräfte vor der Entscheidung, welche operativ taktischen Brandbekämpfungsmaßnahmen eingeleitet werden müssen. Als Hilfestellung können sie auf eine Reihe von Einsatzhinweisen aus Merkblättern zurückgreifen. Diese sind hinsichtlich des Detaillierungsgrades allerdings sehr heterogen. Die Recherche zeigt, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen zumeist eher allgemeiner Natur sind. Angaben zur Anzahl und Zusammensetzung von Trupps sowie zur eigentlichen Löschtaktik sind eher selten. Es kann nur vermutet werden, dass dies auf die eingeschränkten Einsatzerfahrungen infolge der geringen Anzahl von Brandereignissen mit E-Fahrzeugen und auf fehlende Experimentaldaten zurückzuführen ist.

Insbesondere bei Feuerwehren in Großstädten liegen aufgrund einzelner Einsätze mittlerweile entsprechende Einsatzerfahrungen vor. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen der Nachbereitung analysiert und aufbereitet. Der Erfahrungstransfer in die Einsatzabteilungen ist aufgrund der „kurzen Wege“ einfacher. Das Wissen wird akkumuliert und von Einsatz zu Einsatz erweitert.

Die im Projekt durchgeführten Experimente zeigen, dass die Herausforderung bei der Brandbekämpfung an BEVs nicht der Brand im Fahrzeuginnenraum ist, denn dort gelingt es, Löschwasser zielgerichtet und effektiv zu applizieren. Demgegenüber ist bei einem Brand eines äußerlich unversehrten Batteriesystems durch den verdeckten Einbau unterhalb des Fahrgastraumes die Einbringung von Lösch-/ Kühlwasser ohne Hilfsmittel oder Öffnungen schwer möglich. Das Batteriesystem ist seitlich durch die Fahrzeugschweller und von unten durch einen Unterfahrschutz bzw. einen widerstandsfähigen Batterietrog geschützt. Ein Zugang vom Fahrgastraum besteht i.d.R. nicht. Recherchierte Ausnahmen sind bei zahlreichen Fahrzeugen der Hersteller Renault und Dacia zu finden. Sie setzen in aktuellen PHEV- und BEV-Modellen auf den sog. „Fireman Access“. Es handelt sich dabei um eine Öffnung mit direktem Zugang zum Batteriesystem, um Lösch- bzw. Kühlwasser einzubringen. Diese Öffnungen werden jedoch erst nach dem Ausbrand des Fahrzeuginnenraums/ Sitzgarnitur für einen gezielten Wasserstrahl zugänglich.

Die übliche Bauweise von BEVs führt dazu, dass sowohl der Zeit- als auch der Materialaufwand im Vergleich zur Brandbekämpfung bei ICEV steigt [6]. Diese erhöhten Aufwände führen letztlich auch zu einem höheren Personalbedarf. Unstrittig ist außerdem der Anstieg der Lösch- und Kühlwasserverbräuche. Beispielhaft wird hier der OEM Tesla angeführt, der angibt, dass nach bisher üblichen Löschtaktik zum Löschen des Fahrzeugtyps Model S ca. 11.000 l Löschwasser notwendig sind [22]. Durch diesen hohen Wasserverbrauch wird insbesondere aufgrund von bislang fehlenden validierten Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Empfehlungen zu Wassermengen und Volumenströmen sicherheitshalber empfohlen, große Mengen an Wasser einzusetzen. Wieviel des eingesetzten Lösch-/ Kühlwassers dafür aber letztlich tatsächlich notwendig gewesen wären, ist in Nachbereitung derartiger Einsätze nicht zu rekapitulieren.

Bei Auswertung einschlägiger Merkblätter und Handlungsempfehlungen ist festzustellen, dass diese mit wenigen Ausnahmen ähnliche Maßnahmen vorschlagen. Einzelnen betrachtet, hat jedes dieser Dokumente, auch wegen der unterschiedlichen thematischen Ausrichtung, einen anderen Fokus. Werden die in allen berücksichtigten Merkblättern vorgeschlagenen Maßnahmen übereinandergelegt, ergibt sich die nachfolgend aufgeführte Datenlage zur Einsatztaktik.

Die Autoren der Merkblätter sind sich einig, dass insbesondere in der ersten Phase des Einsatzes, beim Eintreffen an der Einsatzstelle, die Erkundung zur Auswahl der Taktik essentiell ist. Hierfür liefert das in Abbildung 9 dargestellte Fließschema einen guten Überblick. Folgende Indikatoren deuten 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).

Für den Fall, dass z.B. unter Nutzung des Schemas in Abbildung 9 die Brandbeteiligung des Batteriesystems zweifelsfrei festgestellt wurde, werden in den recherchierten Merkblättern folgende Einsatzhinweise gegeben [6] [5] [7] [8] [9] [21].

Die nachfolgende Zusammenstellung stellt lediglich das Ergebnis der durchgeführten Literaturrecherche dar und legt nicht die Reihenfolge taktischer Maßnahmen fest.

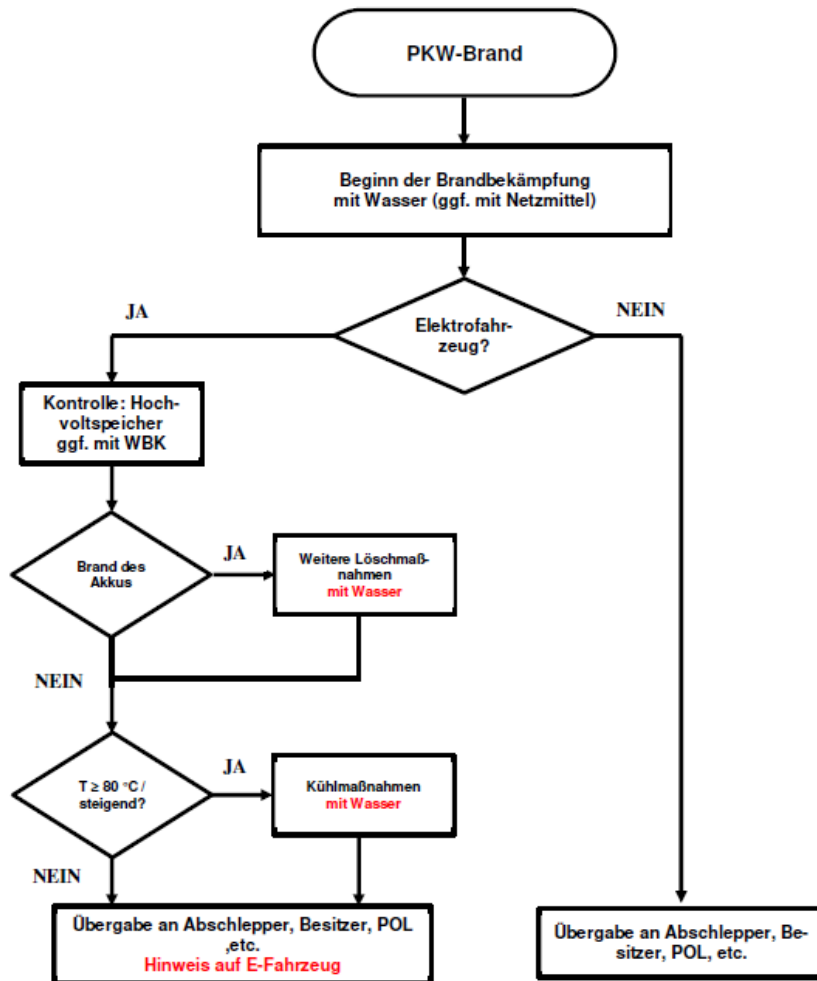


Abbildung 9: Schema der AGBFBund und des DFV zur Festlegung der Einsatztaktik nach der Antriebsart [6]

Einsatzhinweise aus den recherchierten Merkblättern

- Fahrzeuge sind mit Radkeilen gegen Wegrollen zu sichern
 - Wenn möglich, Schaltung auf „P“ stellen bzw. Handbremse betätigen.
- Wenn möglich, ist die „Zündung“ abzuschalten oder die 12 V Batterie abzuklemmen bzw. die Trennstelle zu nutzen, um das Hochvoltsystem elektrisch gesehen, vom Fahrzeug zu trennen (siehe fahrzeugspezifisches Rettungsdatenblatt).
- Orangefarbene Hochvoltkabel dürfen nicht beschädigt werden.
- Ist das Fahrzeug noch mittels Kabel mit der Ladestation verbunden, soll die Verbindung getrennt werden (wenn nötig, auch mit Gewalt).
- Die Menschenrettung ist durchzuführen.
- Wird eine deutliche über der Umgebung liegende Temperatur des Batteriesystems gemessen bzw. wird ein kontinuierlicher Temperaturanstieg verzeichnet, ist das Batteriesystem mit Hilfe von Wasser zu kühlen.
- Wasser wird als das Löschmittel der Wahl vorgeschlagen.
 - Bei der Brandbekämpfung sind wegen der Hochvoltbauteile, Löschabstände einzuhalten (siehe auch Abschnitt 6.1).
 - Bei peripheren Flüssigkeitsbränden kann bei Bedarf fluorfreier Schwer-/ Mittelschaum angewendet werden.
 - Die Brandbekämpfung sollte mittels großer Mengen Wasser durchgeführt werden, um die Batterie zu kühlen.
 - Wasser kann ggf. über herstellerseitig vorgesehene Öffnungen in das Batteriesystem eingebracht werden, z.B. über den sog. „Fireman Access“ bei Renault und Dacia.
 - Im Bereich der „Service-Disconnect“ haben einige Hersteller die Möglichkeit geschaffen, Wasser in das Batteriesystem einzubringen. Diese Öffnungen werden aber oftmals erst nach dem Einsatz bei ausgebrannten Fahrzeugen freigelegt.¹⁰
- Das kontrollierte Abbrennen kann eine Option sein, weil sich dabei die Anzahl der aktiven Zellen verringert und das Risiko für eine Wiederentzündung sinkt.
- Das Verbringen von Fahrzeugen in mit Wasser befüllte Container kann im Einzelfall zielführend sein, um Wasser über möglicherweise verdeckte Öffnungen in das

¹⁰ Bei der durchgeführten Recherche ist kein Fahrzeug ermittelt worden, das diese Möglichkeit bietet.

Batteriesystem einzubringen und das System zu kühlen. Dabei entlädt sich die Batterie. Es wird hervorgehoben, dass diese Prozedur mit hohem organisatorischem Aufwand verbunden ist und nur in gut begründeten Einzelfällen angewendet werden sollte. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass das kontaminierte Löschwasser einer fachgerechten Entsorgung zuzuführen ist.

- Handgeführte Löschgeräte zum Einbringen von Löschwasser in das Batteriesystem können nach aktuellem Stand nicht zur Anwendung empfohlen werden, weil mit Stichflammen und mit einer Gefährdung durch Elektrizität, z.B. Lichtbögen und Körperdurchströmungen, zu rechnen ist.
- Nach Möglichkeit sollen Wärmebildkameras (WBK) zum Einsatz kommen.
 - Aber: WBK können einen TR im Inneren des Batteriesystems aufgrund der mehrfachen Kapselung nicht immer sicher detektieren.
 - Mit Hilfe der WBK soll nach Öffnungen Ausschau gehalten werden, um dort Löschmittel einzubringen. Öffnungen können z.B. durch thermische Einwirkungen entstehen.
 - Auch über Druckentlastungsöffnungen kann ggf. Wasser eingebracht werden (Anmerkung der Autoren: Diese befinden sich jedoch in der Regel auf der Oberseite des Batteriegehäuses im Übergang zum Fahrzeugboden. Sie sind somit nicht direkt zugänglich).
- Die Annäherung an den Brand sollte zunächst unter voller Ausnutzung der Wurfweite des Strahlrohrs mit Vollstrahl erfolgen, weil durch die Brandeinwirkung Fahrzeugteile, z. B. von Airbags, Gasdruckdämpfern, Reifen, brennenden Leichtmetallen, umherfliegen können.
- Durch die diagonale Annäherung über die Fahrzeugecken wird der größtmögliche Abstand zum unmittelbaren Gefahrenbereich gewahrt.
- Löschwasser ist, wenn möglich, aufzufangen.
- Austretende Flüssigkeiten aus Batterien sind mit Chemikalienbindemittel aufzunehmen.
- Beim Brand oder Zersetzung werden entzündbare und toxische Gase und Dämpfe freigesetzt. In geschlossenen Räumen ist mit einer explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen
 - Brandgase sind, wenn möglich mittels Sprühstrahl zu verdünnen.
 - Wenn möglich, ist eine Ex-Messung zu veranlassen.
 - In geschlossenen Räumen ist für ausreichend Belüftung zu sorgen.

Auch hinsichtlich der zu tragenden PSA werden in den ausgewerteten Merkblättern Hinweise gegeben.

- Im Gefahrenbereich ist umluftunabhängiger Atemschutz zu tragen.
- Es ist die vollständige PSA für die Brandbekämpfung im Innenangriff nach vfdB-Richtlinie 0810 bzw. DGUV Information 205-014 zu tragen.
 - Zusätzliche Teile, wie PSA für die Brandbekämpfung bei starker Wärmestrahlung, sind nicht erforderlich.
- Es sind die Grundsätze der Einsatzstellenhygiene zu beachten.

4.3 Übergabe des Fahrzeugs nach Abschluss der Brandbekämpfungsmaßnahmen

Nachfolgend werden die recherchierten Einsatzhinweise aufgelistet, die nach Abschluss der Brandbekämpfungsmaßnahmen eingeleitet werden sollen.

- Fahrzeuge, bei denen sich keine Anzeichen für eine weitere Eskalation zeigen, sollen mit dem Verweis auf den zurückliegenden Einsatz und Versehen mit Sicherheitshinweisen an ein Abschleppunternehmen übergeben werden. Die Sicherheitshinweise sollten folgende Inhalte haben.
 - Das Fahrzeug kann sich trotz beendeter Maßnahmen der Feuerwehr wieder entzünden.
 - Es sollte auf die Anforderungen an den Abstellplatz und die Schlüsselqualifikationen des Personals des Unternehmens¹¹ hingewiesen werden.
 - Das Fahrzeug soll, z.B. durch eine Abdeckplane, gegenüber Witterungseinflüssen geschützt werden.
 - Das Fahrzeug ist in einem abgesperrten Bereich im Freien zu lagern. Empfohlen wird in Deutschland ein Abstand über 5 m zu brennbaren Materialien (Anmerkung der Autoren: siehe VDA/ VDIK Merkblatt "Anforderung an einen Quarantäneplatz"). Das Merkblatt des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes, siehe Abbildung 10, gibt davon abweichend an, dass ein Mindestabstand von 10 m einzuhalten ist.
 - Es ist zu übermitteln, welche Sicherheitsmaßnahmen durch die Einsatzkräfte vorgenommen wurden (z.B. Freischaltung).

¹¹ In Bayern muss jedes Abschleppunternehmen nachweisen, dass ein Mitarbeitender für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen qualifiziert sein muss.

- Für die Einschätzung, dass vom Hochvoltsystem kein weiteres Eskalationspotential ausgeht, kann vor der Übergabe des Fahrzeugs an das Abschleppunternehmen eine kontinuierliche Temperaturüberwachung an mehreren Punkten des Batteriesystems über einen Zeitraum von mindestens 30 min durchgeführt und dem Vorgang zur Dokumentation beigelegt werden.
- Nicht empfohlen wird das präventive Verbringen des Fahrzeugs in einen mit Wasser befüllten Container.
- Eine Servicewerkstatt ist durch den Abschleppdienst bzw. den Fahrzeugeigentümer zu informieren, damit das Batteriesystem sachgerecht ausgebaut, entladen und abtransportiert werden kann.
- Kommunale Feuerwehren müssen für die „Lagerung“ der Fahrzeuge bei den Abschleppunternehmen keine Transport- und Kühleinrichtungen vorhalten. Die Zuständigkeit liegt beim Abschleppunternehmen bzw. dem Entsorger.

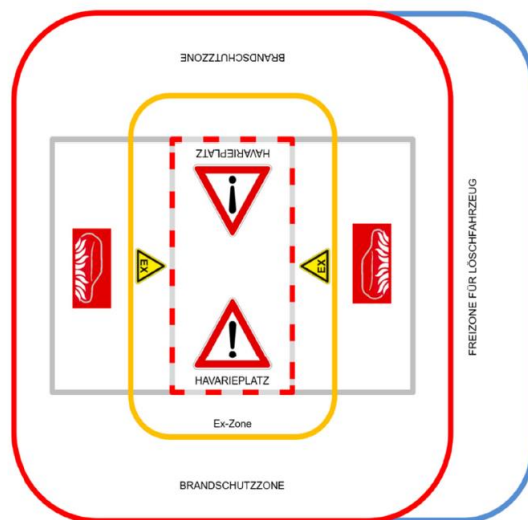


Abbildung 10: Quarantäne-/ Havarieplatz nach OVE-Richtlinie R 19 [9]

5 FAHRZEUGE FÜR DIE BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

Durch die OEM BMW Group, Opel Automobile GmbH und Volkswagen AG wurden insgesamt 14 Fahrzeuge zur Verfügung gestellt. Deren technische Daten und die Rettungsdatenblätter mit der Markierung des Ortes zur Brandinitiierung mittels Metallhorn (siehe hierzu auch Kapitel 8.1) werden im Folgenden alphabetisch geordnet vorgestellt.

5.1 BMW Group

Seitens der BMW Group wurden zwei Fahrzeuge des Modells i4, siehe Abbildung 11, zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeuge wiesen die in Tabelle 2 aufgeführten technischen Daten auf. Ein Auszug des Rettungsdatenblattes ist in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 11: BMW i4 im Brandraum des IBK

Tabelle 2: Technische Daten BMW i4

Masse:	ca. 2.125 kg
Antrieb:	Hinterrad
Leistung:	340 PS
Abmessungen (L x B x H):	4.783 mm x 1.852 mm x 1.448 mm
Batteriekapazität:	80,7 kWh netto / 83,9 kWh brutto

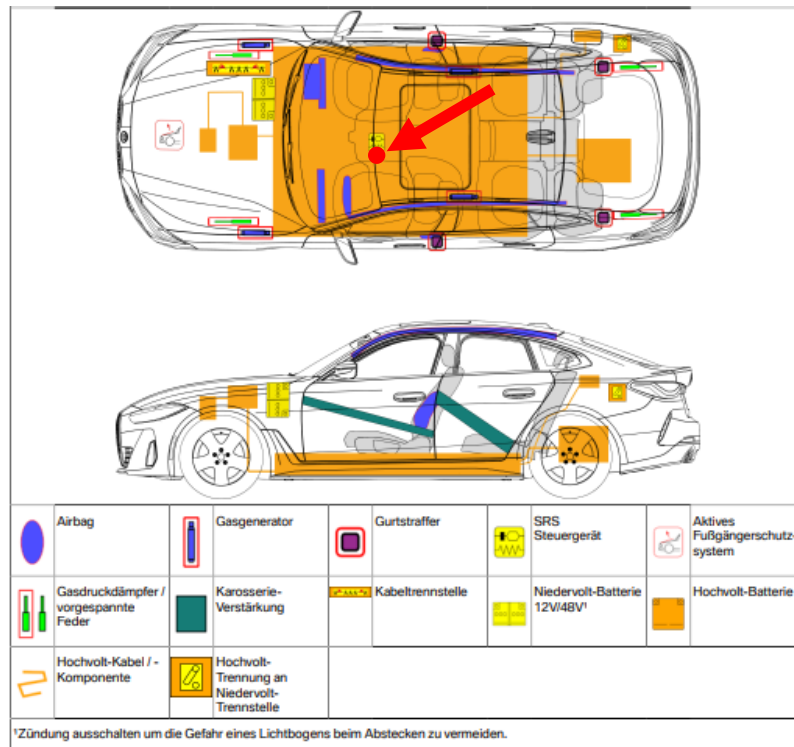


Abbildung 12: Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des BMW i4 [23]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metaldorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde

5.2 Opel Automobile GmbH

Die Opel Automobile GmbH stellte für das Forschungsprojekt 5 Opel Corsa e und einen Opel Mokka e zur Verfügung. Für die Versuche im Teilschritt 1 wurden 4 Corsa e eingesetzt (siehe Abbildung 13 und Tabelle 3). Die 2 verbliebenen Fahrzeuge werden im Teilschritt 2 mit Projektabschluss im Frühjahr 2023 des Vorhabens untersucht. Ein Auszug des Rettungsdatenblattes ist in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 13: Opel Corsa e im Brandraum des IBK

Tabelle 3: Technische Daten Opel Corsa e

Masse:	ca. 1.530 kg
Antrieb:	Front
Leistung:	136 PS
Abmessungen (L x B x H):	4.060 mm x 1.765 mm x 1.433 mm
Batteriekapazität:	45 kWh netto / 50 kWh brutto

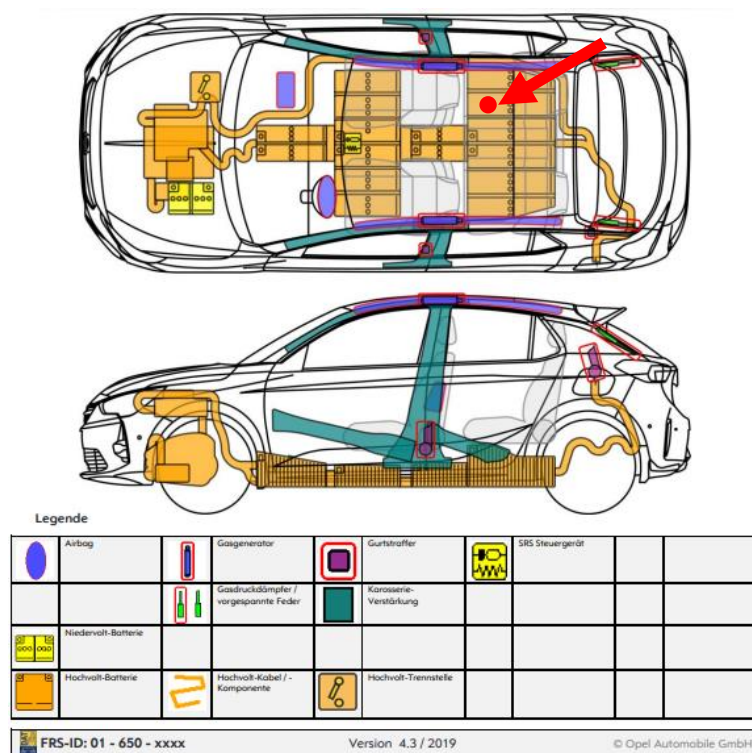


Abbildung 14: Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Opel Corsa e [24]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metallstift zur Brandinitiierung eingetrieben wurde

5.3 Volkswagen AG

Die Volkswagen AG unterstützte das Forschungsprojekt durch die Bereitstellung von 6 Fahrzeugen. Es handelt sich um 5 PKW des Modells ID.4 und ein PKW des Modells ID.5. Nähere Informationen können Abbildung 15 sowie den Tabellen 4 und 5 entnommen werden. Es sei hinzugefügt, dass die ID.4 Modelle mit verschiedenen Leistungen und Antriebsarten zur Verfügung standen (4 x ID.4 und 1 x ID.4 GTX). Auszüge der Rettungsdatenblätter zeigen die Abbildungen 16 und 17.



Abbildung 15: Volkswagen ID.4 im Brandraum des IBK

Tabelle 4: Technische Daten Volkswagen ID.4

Masse:	ca. 2.120 kg
Antrieb:	4 PKW mit Heck, 1 PKW mit Allrad (GTX)
Leistung:	4 PKW mit 204 PS, 1 PKW mit 299 PS (GTX)
Abmessungen (L x B x H):	4.584 mm x 1.852 mm x 1.640 mm
Batteriekapazität:	77 kWh netto / 82 kWh brutto

Tabelle 5: Technische Daten Volkswagen ID.5

Masse:	ca. 2.243 kg
Antrieb:	Allrad
Leistung:	299 PS
Abmessungen (L x B x H):	4.599 mm x 1.852 mm x 1.616 mm
Batteriekapazität:	77 kWh netto / 82 kWh brutto

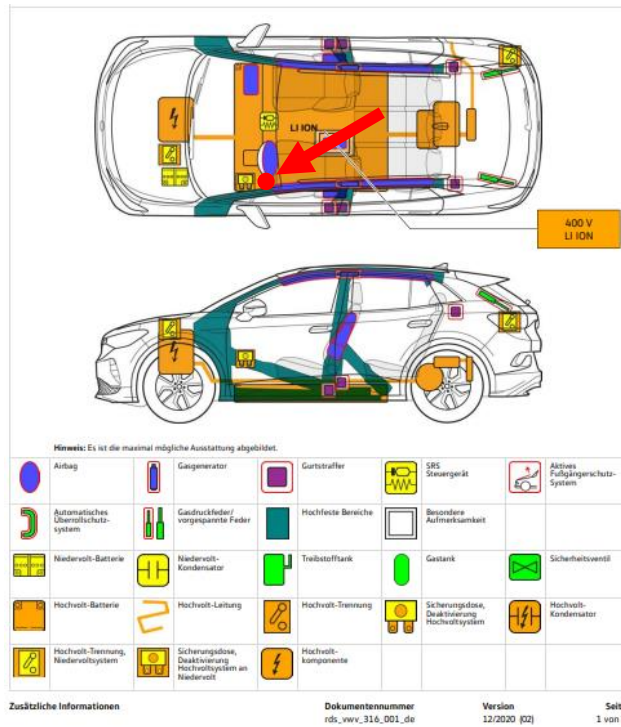


Abbildung 16: Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.4 [25]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metaldorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde

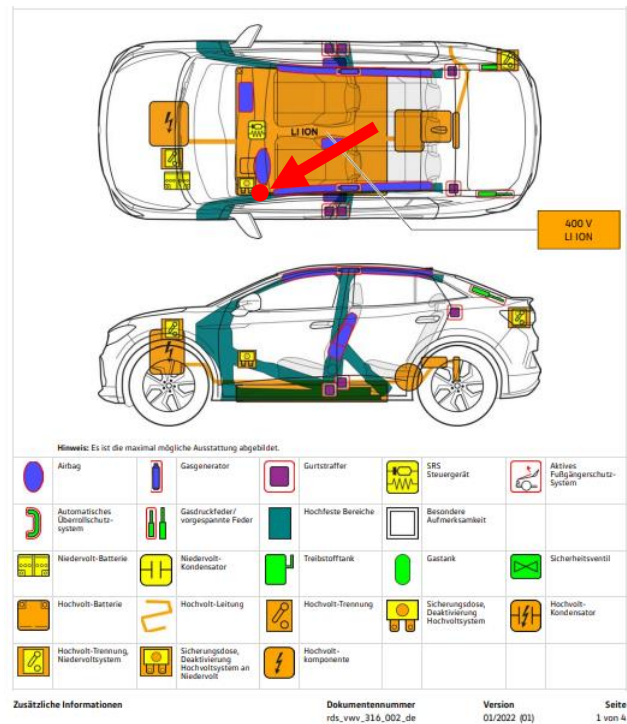


Abbildung 17: Auszug aus dem Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.5 [26]; die Pfeilmarkierung zeigt den Ort, an dem von unten der Metaldorn zur Brandinitiierung eingetrieben wurde

6 UNTERSUCHTE BRANDBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN

Die durchgeführten Recherchen ergaben, dass mit Ausnahme der Verbringung eines BEV in mit Wasser befüllte Abrollbehälter o.ä. vier Brandbekämpfungsstrategien erfolgversprechend sind. Die vier in Tabelle 6 aufgeführten Strategien wurden im Rahmen der Brand-/ Löschversuche angewandt und bewertet. Zur Bewertung des Lösch Erfolgs wurden die resultierenden Lösch-/ Kühlwassermengen und die Löschzeit herangezogen. Löschmittelzusätze, wie Löschschaum oder -gel kamen nicht zur Anwendung. Die Versuche wurden um zwei Referenzversuche ergänzt, bei denen keine Brandbekämpfungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Die dabei gemessenen Referenzzeiten für den vollständigen Abbrand dienten dazu, die bei den unterschiedlichen Brandbekämpfungsstrategien gemessenen Einsatzzeiten bewerten und den Mehrwert der angewendeten Techniken und Taktiken quantifizieren zu können.

Tabelle 6: Experimentell untersuchte Brandbekämpfungsstrategien und Brandszenarien

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

6.1 Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren

Eines der wegen seiner Variabilität am häufigsten eingesetzten Einsatzmittel ist das Hohlstrahlrohr mit Storz C-Kupplung. Es erlaubt die stufenlose Einstellung des Sprühkegels von bis zu 120°. Zumeist kann auch der Volumenstrom geregelt werden. Hohlstrahlrohre werden daher auch bei Bränden an BEV verwendet. Das applizierte Wasser soll zum einen den Brand des Fahrgastraums und ggf. den Brand des Batteriesystems bekämpfen. Zum anderen zielt der Löschwassereinsatz auf die (externe) Kühlung des

Batteriesystems ab. Im optimalen Fall kann durch im Brandverlauf entstandene Beschädigungen (Öffnungen oder sonstige Zugänge), Wasser in das Batteriesystem eingebracht und die Zellen sowie Module gekühlt werden. Es wurde bereits erwähnt, dass die in BEVs eingesetzten Traktionsbatterien als Hochvoltsysteme eingestuft sind. Daher müssen bei der Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren Schutzmaßnahmen vor elektrischen Gefährdungen, respektive Sicherheitsabstände (Sprühstrahl: 1 m, Vollstrahl: 5 m), eingehalten werden [5].

6.2 Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien mittels spezieller Löschtechnik

Für die Brandbekämpfung von Fahrzeugen, in denen Hochvoltbatterien eingesetzt werden, stehen den Feuerwehren spezielle Löschsysteme zur Verfügung, deren Wirkweisen auf der direkten Einbringung von Lösch-/ Kühlwasser in die Batteriesysteme beruhen. Diese sind von eingewiesenem Personal nach Angaben der Löschgerätehersteller zu nutzen. Das eingebrachte Wasser soll die Temperatur der Zellen/ Module auf ein Niveau reduzieren, auf dem stabile Bedingungen herrschen und der TR in weiteren Zellen/ Module verhindert wird (siehe auch Kapitel 3). Nachfolgend werden zwei mittlerweile in Deutschland etablierte Systeme zur Löschmitteleinbringung vorgestellt. Beide Systeme dürfen erst dann zur Anwendung kommen, wenn eine erkennbare exotherme Reaktion bzw. ein TR aufgetreten ist. Der präventive Einsatz muss organisatorisch ausgeschlossen werden. Durch Ablöschung des Primärbrandes im Fahrzeuginnenraum wird ein gefahrungsarmes Arbeiten in der Fahrzeugnähe ermöglicht. Vor der Anwendung der Systeme muss unter Verwendung des Rettungsdatenblattes die optimale Stelle über bzw. unter dem Batteriesystem identifiziert werden, an der Wasser zur Kühlung bzw. Löschung eingebracht wird.

6.2.1 Rosenbauer Löschsystem

Das System ist aus zwei Bestandteilen konfiguriert. Beide Teile sind mittels eines Löschmittel- und drei Pneumatikschläuchen verbunden. Wenn das Fahrzeug auf allen vier Rädern steht, wird die eigentliche Löscheinheit (linkes und rechtes Bild in Abbildung 18) unterhalb des Batteriesystems positioniert. Ist die Bodenfreiheit in der Folge des Brandes reduziert, muss das Fahrzeug mit Hilfe einer Hebeeinrichtung angehoben

werden. Die Bedieneinheit, mit dem die Löscheinheit ausgelöst wird, kann im Abstand von 8 m von der Löscheinheit positioniert werden. Bei Betätigung der Bedieneinheit, siehe mittleres Bild in Abbildung 18, fährt schlagartig ein pneumatisch angetriebener Löschdorn aus der Löscheinheit heraus und dringt in das Batteriesystem ein. Zeitgleich wird Lösch- bzw. Kühlwasser eingebracht [27]. Das System wird ohne zusätzliche Druckerhöhungseinrichtung über eine Storz-D-Kupplung mit der Löschwasserversorgung an der Einsatzstelle verbunden. Bei einem Systemdruck von 8 bar arbeitet das System mit einem Volumenstrom von etwa 30 l/min.



Abbildung 18: Fotos des Rosenbauer Löschsystems [27]

6.2.2 Murer E-Löschlanze

Im oberen Bereich der E-Löschlanze ist ein isolierter Griff (< 1000 V) mit Schlagkopf angebracht. Dort wird der Löschwasserschlauch mit Storz-D-Kupplung angeschlossen. Im unteren Bereich verfügt die Lanze über eine Spitze, die in das Batteriesystem eingetrieben wird. Über in der Spitze befindliche Öffnungen wird Lösch-/ Kühlwasser in den Batterietrog eingebracht. Bereits vor dem Eintreiben der Lanze muss das Wasser freigegeben sein. Seitens des Herstellers wird ein Betriebsdruck von 3 bar empfohlen. Die Lanze wird z.B. in den Fußbereich des Fonds auf der Fahrerseite aufgesetzt und mit Hilfe eines Schlagwerkzeugs eingetrieben. Im Griffbereich wird zur Sicherstellung des Arbeitsschutzes ein Abstandshalter angebracht [28] [29].

Vor dem Einschlagvorgang sollte das Fahrzeug unterbaut werden, um das Einfedern zu verhindern, respektive um die Kraftübertragung zu verbessern.

In einem in der Zeitschrift BrandSchutz erschienenen Artikel [30] wurde auf die Gefahren durch die E-Löschlanze eingegangen und eine Risikobeurteilung basierend auf mehreren Löschversuchen mit Li-Ionen-Akkus für Fahrzeuge erstellt. Es wurden mechanische, elektrische, chemische und thermische Gefährdungen sowie die Gefährdung durch Brand und Explosion sowie zusätzliche äußere Gefahren, wie Sichtbehinderung oder Straßenverkehr identifiziert. Wesentliche Schutzmaßnahmen, wie das Tragen der vollständigen PSA oder die Nutzung der Wärmebildkamera wurden in diesem Bericht in Kapitel 4.2 bereits erläutert. Die deutliche Forderung einer Einweisung und regelmäßigen Schulung der Nutzer der Löschlanze wurde gestellt. Der wesentlichen Frage der elektrischen Gefahren durch die Hochvolttechnik ging der Artikel darüber hinaus nach. Hierzu wurden elektrische Spannungen an den beteiligten Einsatzkräften gemessen. Die gemessenen elektrischen Spannungen lagen je nach Versuch und Messort zwischen -1,95 Volt und 19,71 Volt. Diese Werte liegen weit unterhalb des HV-Bereichs. Von den gemessenen Spannungen gehen bei regelkonformer Anwendung damit keine elektrischen Gefahren aus.



Abbildung 19: Fotos der Murer E-Löschlanze (links); wechselbare Spitze der Löschlanze (rechts) [29]

6.3 Externe Kühlung (EK) mittels spezieller Feuerwehrrmaturen

Zur Unterstützung der Brandbekämpfung wird in nahezu allen Merkblättern empfohlen, im kritischen Zustand befindliche Batteriesysteme zu kühlen [5] [6] [7] [8] [9]. Diese Vorgehensweise soll dazu dienen, Wärme von bereits im TR befindlichen Zellen bzw. Modulen an das Kühlwasser zu übertragen. Bisher noch nicht im kritischen Zustand befindliche Zellen oder Module sollen durch die externe Kühlwasserapplikation

vor der Erwärmung geschützt werden. Kühlwasser kann zum einen durch die standardmäßig bei Feuerwehren eingesetzten Strahlrohre aufgebracht werden. Zum anderen werden von Feuerwehrausstattern spezielle Armaturen angeboten oder von einzelnen Feuerwehren selbst entwickelt [31]. Sie werden in aller Regel unter dem Fahrzeug positioniert und sollen das Batteriesystem durch kontinuierliche Wasserapplikation kühlen. Batteriemodule und -zellen sind jedoch durch die mehrfache „Kapselung“ im Batteriegehäuse wirksam vor Wassereintritt geschützt (siehe auch Kapitel 0). Diese Maßnahmen bewirken auch eine thermische Isolation der Module/ Zellen gegenüber der Umgebung. Externe Kühlmaßnahmen können daher bei Unversehrtheit des Batteriegehäuses aus physikalischer Sicht nur einen sehr begrenzten Beitrag zur Systemkühlung leisten. Dennoch, aufgrund der Tatsache, dass die den Feuerwehren zur Verfügung gestellten Handlungshinweise im Kontext eines Fahrzeugbrandes auf externe Kühlmaßnahmen verweisen, wurden mögliche positive Effekte dieser taktischen Maßnahme bei einem Versuch beleuchtet. Dabei kam ein exemplarisch ausgewähltes Kühlsystem zum Einsatz. Es verfügt im vorderen Bereich über drei sprinklerähnliche Düsen. Sie applizieren zur Sicherstellung der größtmöglichen Fläche, Kühlwasser nach oben gerichtet in verschiedene Richtungen. Das hier verwendete System arbeitet bei einem Druck von 8 bar mit einem Volumenstrom von etwa 400 l/min. Abweichend davon arbeiten Systeme anderer Hersteller mit geringerem Durchfluss.

6.4 Brandbegrenzungsdecken

Neben den „klassischen“ wasserführenden Einsatzmitteln stehen den Feuerwehren mittlerweile Alternativen, wie Brandbegrenzungsdecken, zur Verfügung. Sie werden im Kontext brennender E-Fahrzeuge in der Presse jedoch fälschlicherweise als Löschdecke bezeichnet. Im Unterschied zum Brand eines ICEV, kann eine Brandbegrenzungsdecke, die bei einer hohen Systemtemperatur in der Traktionsbatterie begonnene Kettenreaktion, bei der sich der TR von Zelle zu Zelle fortpflanzt, mangels eines Kühlmediums in aller Regel nicht stoppen. Eine thermisch beständige Brandbegrenzungsdecke kann jedoch bei entsprechender Dichtigkeit dazu dienen, Flammenerscheinungen durch Sauerstoffreduzierung zu unterbinden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn infolge des TR kein Sauerstoff freigesetzt wird. Damit soll die Brandausbreitung auf benachbarte Objekte verhindert werden. Durch das Fehlen von Flammen infolge redu-

zierter Wärmestrahlung und Konvektion wird die Erwärmung des Batteriesystems verhindert (Reduzierung des Thermofeeds). Damit kann die fortschreitende Konditionierung potentieller Brennstoffe (Batteriezellen/ -module, Interieur) verringert werden.

Brandbegrenzungsdecken bestehen zumeist aus wärmebeständigem Gewebe (z.B. Glas- oder Silikatfasern). Damit die Diffusion von Sauerstoff nach innen und in umgekehrter Richtung, die Diffusion von Rauchgasen nach außen, reduziert wird, sind Brandbegrenzungsdecken i.d.R. beidseitig mittels einer thermisch beständigen Beschichtung versehen. In Abhängigkeit vom Einsatzzweck sind die Decken in verschiedenen Abmessungen erhältlich.

7 PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE MESSTECHNIK

Die durchgeführten Experimente wurden messtechnisch begleitet. Neben der Erfassung von zeitabhängigen Temperaturverläufen wurden an zwei ausgewählten Positionen auch die resultierenden Verläufe der Wärmeflüsse gemessen. Zur objektiven Beurteilung der Löschmaßnahmen wurden mittels eines Durchflussmessers die Lösch-/Kühlwasserströme erfasst. Im Projekt konnten aufgrund begrenzter Finanzmittel nur bei ausgewählten Versuchen die relevanten Schadstoffe in den Lösch-/Kühlwässern und an der PSA der Einsatzkräfte gemessen werden. Diesen Fragestellungen wird in einem für 2023 beantragten Projekt nachgegangen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass der Fokus der Brand-/Löschversuche auf der Evaluierung der unterschiedlichen Brandbekämpfungsstrategien lag. Dadurch war es essentiell, den eingesetzten Löschtrupp in puncto Eigenschutz, d.h. Gefahr durch Stolpern oder Hängenbleiben, die größtmögliche Bewegungsfreiheit zu garantieren. Auch für die möglichst ungestörte Anwendung der unterschiedlichen Einsatzmittel, wie Strahlrohre und Schläuche, musste die Zugänglichkeit der Karosserie in allen Richtungen gewährleistet sein. Abstriche bei der Instrumentierung der Fahrzeuge und des Brandraumes waren daher unumgänglich. Die eingesetzten Messtechnikkomponenten, also Sensoren, Messleitungen, Kühlwasserschläuche für Wärmeflussaufnehmer, mussten außerdem so verlegt bzw. angebracht werden, dass Stolpergefahren unterbunden wurden und Beschädigungen der Sensorik ausgeschlossen waren.

7.1 Temperatur und Wärmestrahlung

In drei vertikal verlaufenden Achsen wurden mit Hilfe von an Ketten angebrachten Thermoelementen vom Typ K oberhalb der Fahrzeuge zeitabhängige Temperaturverläufe im Messtakt von 1 Hz gemessen¹². Details können Abbildung 20 und Tabelle 7 entnommen werden. Der Abstand zwischen den Achsen wurde bei allen Versuchen nicht verändert. Er betrug 2,6 m. Die mittlere Kette war in der Mitte der Fahrzeuge positioniert. Der Abstand der äußeren Ketten zur Stoßstange an Front und Heck ergab sich durch die Länge des Fahrzeugs. Zur Messung der Strahlungswärmestromdichte

¹² Bei den Versuchen 1 und 2 waren nur die Ketten an Front und am Heck angebracht.

kamen zwei wassergekühlte Wärmeflussaufnehmer zum Einsatz. Sie waren an der Beifahrerseite und am Heck in einer Höhe 1,5 m positioniert (siehe Abbildung 20 und Tabelle 7). Vier weitere Thermoelemente waren im Innenraum der Fahrzeuge verbaut. Eine Übersicht zu den Positionen im Fahrzeug kann Abbildung A1 im Anhang entnommen werden.

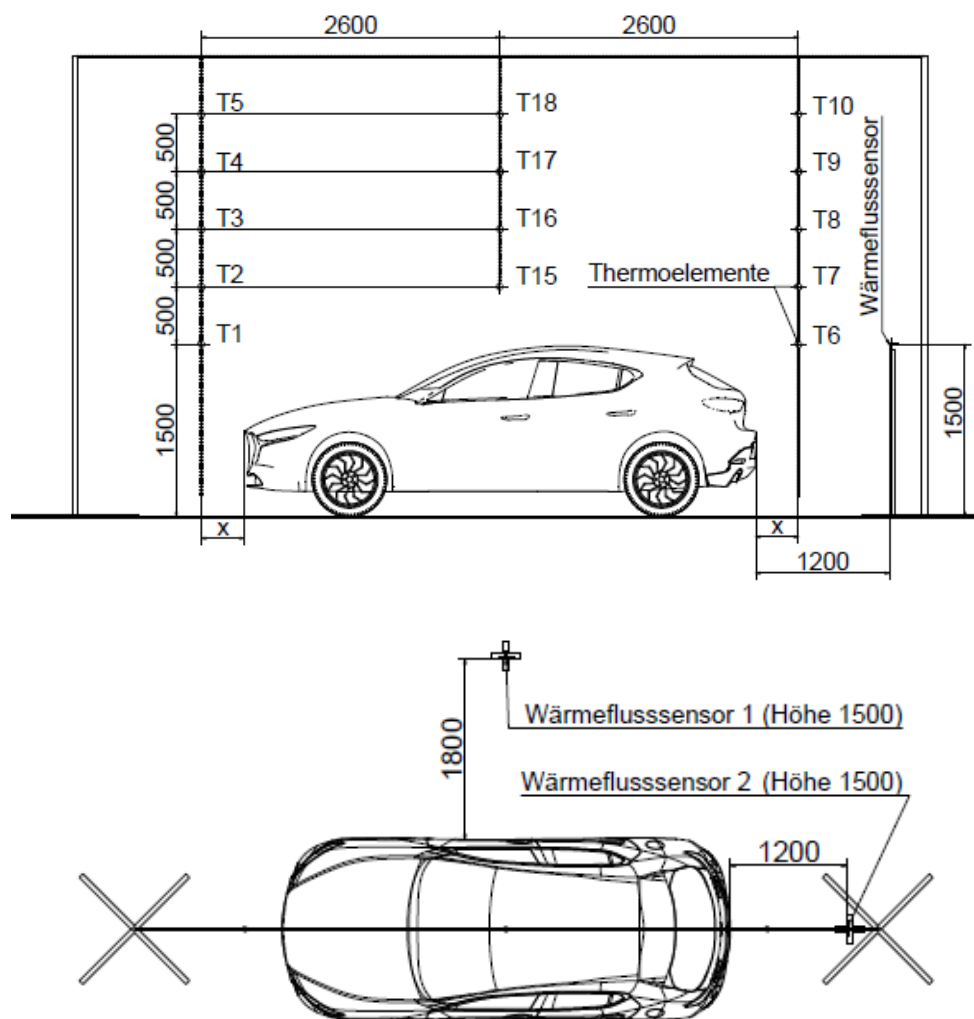


Abbildung 20: Anordnung der Thermoelemente und Wärmeflussaufnehmer im Brandraum

Tabelle 7: Messstellenplan für Thermoelemente und Wärmeflussaufnehmer

Mess- stelle	Benennung	Höhe über Grund in m	Mess- stelle	Benennung	Höhe über Grund in m
T1	Thermoelement- Messkette Front	1,5	T11	Fußraum Fahrer Boden	-
T2		2,0	T12	Kopfstütze Fahrer	-
T3		2,5	T13	Fußraum Fahrerseite hinten Boden	-
T4		3,0	T14	Hutablage	-
T5		3,5	T15		2,0
T6	Thermoelement- Messkette Heck	1,5	T16	Thermoelement-Mess- kette Mitte	2,5
T7		2,0	T17		3,0
T8		2,5	T18		3,5
T9		3,0	WS1	Wärmefluss- sensor 1	1,5
T10		3,5	WS2	Wärmefluss- sensor 1	1,5

7.2 Lösch- und Kühlwasserströme

Zur Messung der Lösch- und Kühlwasserströme kam der in Abbildung 21 dargestellte Durchflussmesser mit zusätzlich angebrachtem Druckaufnehmer zum Einsatz. Das Messsystem war unmittelbar nach der Entnahmestelle und vor dem B-CBC-Verteiler angebracht. An den C-Abgängen waren Hohlstrahlrohre zur Brandbekämpfung angeschlossen. Am B-Abgang waren gemäß den Löschszenarien anlassbezogen die Einsatzmittel zur Löschmitteleinbringung bzw. die Armatur zur externen Kühlung angeschlossen. Somit wurde das gesamte im Verlauf der Versuche applizierte Wasser in Summe gemessen. Die Volumenströme der Lösch-/ Kühlsysteme, die zusätzlich zu den Strahlrohren zum Einsatz kamen, wurden nach den Versuchen separat gemessen. Aus den Versuchsaufzeichnungen wurden dann die Applikationszeiten bestimmt. Mit beiden Werten konnten die spezifischen Wasserverbräuche approximiert werden.



Abbildung 21: Messstrecke für Volumenstrom und Druck

7.3 Chemische Untersuchungen

7.3.1 Rauchgasanalysen

Zur Analyse der Rauchgasbestandteile kam das in Abbildung 22 dargestellte FTIR-Spektrometer DX4000 der Firma Gasmet zum Einsatz (FTIR: Fourier Transformation Infrarot Spektroskopie). Zur Berechnung der Konzentrationen der Einzelstoffe diente die Auswertesoftware Calcmeter, der ein Mehrkomponenten-Algorithmus zugrunde liegt. Dieser stützt sich auf Datensätze von Referenzspektren für die einzelnen Stoffe, die mit definierten Konzentrationen hinterlegt sind. Aus den Intensitäten der gemessenen Infrarotspektren werden über das Lambert-Beer-Gesetz (Gleichung 1) die Konzentrationen zugänglich [32].

$$E_{\lambda} = \lg \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d \quad (\text{Gleichung 1})$$

Hierbei sind:

- E_{λ} : Extinktion bei der Wellenlänge λ
- I_0 : Intensität einfallende Strahlung
- I : Intensität transmittierte Strahlung
- ε_{λ} : Extinktionskoeffizient
- c : Stoffmengenkonzentration
- d : Schichtdicke.

Zur Vermeidung von Kondensaten in den Transferleitungen waren diese beheizt. Von besonderem Interesse waren neben den typischen Rauchgaskomponenten CO, CO₂ auch Substanzen wie HCl, HCN und HF sowie verschiedene in Li-Ionen-Batterien

verwendete Elektrolyte und die Zwischenprodukte des Leitsalzes POF_3 und COF_2 . Darüber hinaus war das Gasmessgerät um einen Wasserstoff - (Conthos 3E TCD der Firma LFE GmbH & Co. KG) sowie einen Sauerstoffsensor (M&C Technologies) ergänzt. Die Gasentnahmestelle lag im Innenraum der Fahrzeuge an der Kopfstütze des Fahrersitzes. Bei einem Versuch befand sich die Entnahmestelle unterhalb des Fahrzeugs.

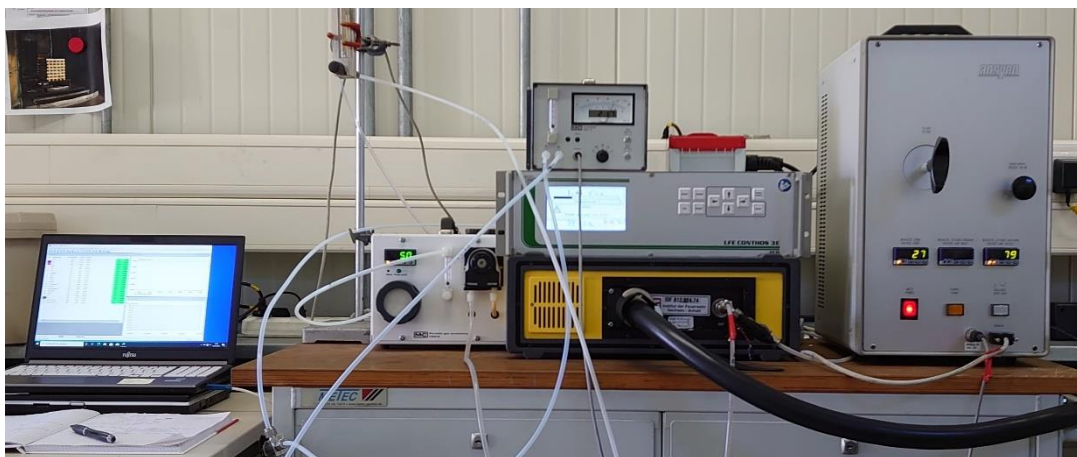


Abbildung 22: Messplatz mit FTIR-Spektrometer DX4000

Der Messgasstrom wurde nach der Analyse durch mit Wasser gefüllte Waschflaschen geleitet, um wasserlösliche Komponenten aufzunehmen und gegebenenfalls ergänzende Rückschlüsse zur Rauchgaszusammensetzung zu gewinnen. Neben dem pH-Wert wurden am IBK mit einem Spektralphotometer DR 3800 der Firma Hach die Konzentrationen verschiedener in Wasser gelöster Anionen, wie beispielsweise Fluorid, Chlorid und Cyanid, bestimmt. Bei einem Spektralphotometer wird über das gesamte Lichtspektrum die Remissionswerte (ungerichtete Reflexion) gemessen, die mit der Stoffmengenkonzentration korrelieren. Auch hier wird aus den gemessenen Intensitäten die Extinktion berechnet, welche wiederum nach Gleichung 1 den Zugang zur Stoffmengenkonzentration erlaubt [33].

7.3.2 Schadstoffe in Lösch- und Kühlwässern

Neben den Rauchgaskomponenten wurden bei ausgewählten Versuchen auch die Schadstoffe in den entstandenen Lösch-/ und Kühlwässern bestimmt. Von besonderer Relevanz waren die Konzentrationen bestimmter Schwermetalle in den Löschwässern.

Es wurde eine etwa 45 Liter fassende Auffangwanne unterhalb der Fahrzeuge positioniert, die an den Schwellern über die Grundfläche der Fahrzeuge hinausragte. So konnte das Löschwasser aus dem Batteriesystem und aus dem Innenraum des Fahrzeugs in die Wanne fließen. Auch das von der Karosserie nach unten tropfende Löschwasser konnte somit aufgefangen werden (Abbildung 23). Bei vollständiger Füllung der Auffangwanne im Verlauf der Versuche erfolgte die Probenahme.



Abbildung 23: Auffangwanne mit Brandrückständen und Löschwasser

Darüber hinaus galt es, neue Erkenntnisse zur Schadstoffbelastung von Kühlwässern zu erhalten, die beispielsweise beim Verbringen von E-Fahrzeugen in Abrollbehälter entstehen. Im Fokus standen Schwermetalle und PAK (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). Da für die Untersuchungen kein entsprechender Abrollbehälter zur Verfügung stand, wurden die Dimensionen hinsichtlich der Wassermengen herunterskaliert. Den Ansatz lieferte die Masterarbeit von Jonas Tennert, deren Veröffentlichung für Oktober 2022 vorgesehen ist. Die Wassermenge eines Abrollbehälters, in dem ein E-Fahrzeug bis zur Überdeckung der Traktionsbatterie eingetaucht ist, wurde berechnet. Bekannt ist in solch einem Fall, wie viele Batteriemodule in der Traktionsbatterie verbaut wurden. Damit lässt sich das Verhältnis zwischen der Anzahl der Batteriemodule und der Wassermenge berechnen. Es bestand die Möglichkeit, einzelne Batteriemodule gezielt in den TR zu überführen. Als Eskalationsmethode wurde hier, wie auch bei den Fahrzeugen, die Penetration einer Zelle gewählt. Im Vorfeld wurden die Module bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert. So sollten sich mögliche Zusammenhänge beim Eskalationsverhalten aufzeigen lassen. Die Temperierung der Module erfolgte bei -10 °C, 20 °C bzw. 40 °C. Im Nachgang wurden die Batteriemodule

in einen Behälter mit definierter Wassermenge verbracht und gemäß obigem Skalierungsansatz mit Wasser überschichtet. Nach einer realitätsnahen Standzeit von 24 Stunden wurden Wasserproben genommen und analysiert.

Die Analyse der Wasserproben erfolgte zum Teil am IBK. Der Großteil wurde durch ein akkreditiertes Prüflabor umgesetzt. Am IBK wurden Messungen zum pH-Wert und zur elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Mit Hilfe des Spektralphotometers DR 3800 wurden die Konzentrationen verschiedener im Wasser gelöster Anionen (Fluorid, Chlorid, Cyanid, Sulfat, Phosphat) sowie der CSB (Chemische Sauerstoffbedarf) und AOX-Gehalt (adsorbierbare organisch gebundene Halogene) ermittelt.

Weiterhin wurden in dem akkreditierten Prüflabor nach DIN EN ISO 11885 (2009-9) die Gehalte folgender Elemente mittels ICP-OES (gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektrometrie) ermittelt: Eisen, Kupfer, Mangan, Cobalt, Nickel, Blei, Zink, Chrom, Vanadium, Lithium, Magnesium und Aluminium. Vereinzelt Proben wurden darüber hinaus nach DIN 38407-39 (2011-09) zusätzlich auf ihre PAK-Belastung untersucht. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind im Kapitel 8.5.2 zu finden.

7.3.3 PSA-Kontaminationen

Feuerwehreinsatzkräfte sind im Einsatzgeschehen einer Vielzahl von Schadstoffen ausgesetzt, die sich in Form von Feststoffpartikeln oder Kondensaten auf der PSA niederschlagen. Diesbezüglich sei auf den Bericht von Schuppe verwiesen [34]. Bekannt ist, dass bedingt durch die Inhaltsstoffe der Li-Ionen-Batterien, bei batteriebetriebenen Fahrzeugen z.T. mit hohen Konzentrationen von Schwermetallen in Löschwässern zu rechnen ist [2]. Es muss also davon ausgegangen werden, dass sich diese Partikel auch an der PSA der Einsatzkräfte wiederfinden. Das tatsächliche Ausmaß und damit einhergehende Gefährdungen für die Einsatzkräfte sind bislang unzureichend bis gar nicht erforscht. Im aktuellen Projekt wurden erste Anstrengungen für eine mögliche Quantifizierung unternommen. Dazu wurde bei einigen Versuchen, wie in Abbildung 24 zu erkennen, je eine Stoffproben mit den Abmessungen 5 cm x 5 cm an die Überjacken der Einsatzkräfte geklebt. Gemeinsam mit akkreditierten Laboren sollen verschiedene Methoden zur Extraktion der partikelgebundenen Schwermetalle entwickelt und evaluiert werden. Damit diese wichtige Fragestellung zeitnah beantwortet werden

kann, wurde bereits ein Folgeprojekt analog Teilschritt 2 beantragt. Damit sollen die Extrakte im Nachgang reproduzierbar quantitativ analysiert werden können.



Abbildung 24: An der Überjacke angebrachte 3-lagige PSA-Probe

7.4 Videodokumentation

7.4.1 Videotechnik

Für die Videodokumentation der Versuche kamen zwei Kameras zum Einsatz. Beide verwendeten Kameras waren vom Typ BX der Firma IndigoVision, die über ein Netzwerk auf einen Server miteinander synchronisiert die Versuche erfassten. Beide Kameras standen sich in den Versuchen, ausgehend vom E-Fahrzeugen in dem Brandraum, diagonal gegenüber. Eine Kamera war entsprechend auf die Fahrerseite und die Front, die andere auf die Beifahrerseite und das Heck ausgerichtet. Diese Positionierung ermöglichte die Erfassung aller Seiten des Fahrzeuges.

7.4.2 Wärmebildkameras

Die beiden Trupps für die Brandbekämpfung waren nach den Tabelle 8 und Tabelle 12 jeweils mit einer Wärmebildkamera ausgerüstet. Hierfür kamen die mobilen Feuerwehr-Wärmebildkameras UCF 7000 und UCF 9000 zum Einsatz. Der Vorteil dieser Kameras für solche Experimente sind die Aufnahmefunktionen für die spätere Auswertung.

8 EXPERIMENTE ZUR WIRKSAMKEIT AUSGEWÄHLTER BRANDBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN

Die gleichen vorbereitenden Handlungsschritte sollten eine maximale Vergleichbarkeit der Versuche ermöglichen. Die Penetration des Batteriesystems markierte, wie in Abbildung 25 zu erkennen, den Versuchsstart. In der Folge entwickelte sich der Brand. Der Löschangriff sollte 15 Minuten nach der Penetration erfolgen. Bei sieben der 10 Versuche, bei denen Techniken zur Brandbekämpfung zum Einsatz kamen, war der Brand zu dieser Zeit im Stadium der „quasi stationären Brandintensität“. Aufgrund der unterschiedlichen Brandverläufe musste in drei der zehn Versuche von dieser Bedingung abgewichen werden. Die Gründe werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert. Die Autoren des Berichtes möchten an dieser Stelle noch einmal betonen, dass die im Folgenden beschriebene Brandcharakteristik in der Antriebs- und Speichertechnologie begründet ist und bei allen aktuell am Markt verfügbaren Fahrzeugen mit ähnlicher Antriebs- und Speichertechnologie zu erwarten ist.

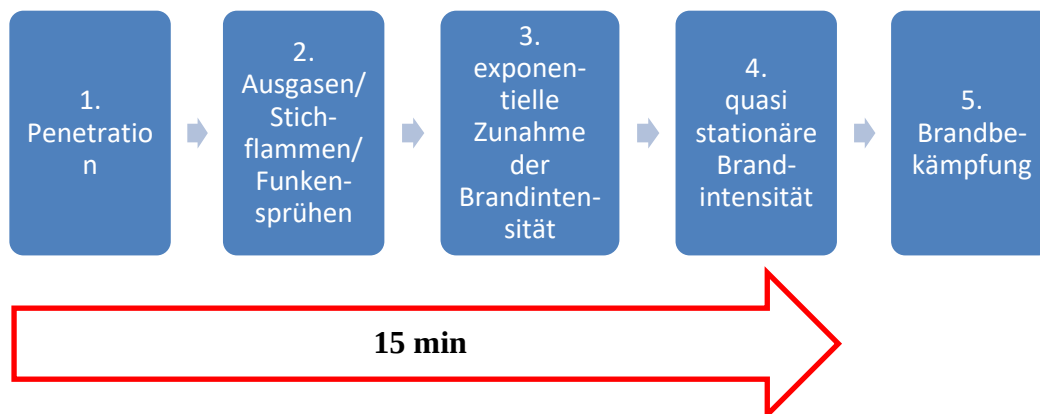


Abbildung 25: Versuchsablauf nach Brandstadien

8.1 Initiierung des Thermal Runaways

Zur Initiierung eines TR mit sich anschließendem Brand auf Zellebene stehen im Labormaßstab eine Reihe von Methoden zur Verfügung. Beschrieben sind z.B. Vorrichtungen zur gezielten Zellüberladung [17]. Häufiger werden elektrisch betriebene Heizelemente, wie Heizplatten, Heizdrähte und Heizkartuschen oder kleinere Poolfeuer verwendet [2] [10].

Eine Adaptierung auf Batteriesysteme würde den Ausbau und die Öffnung der Batterie erfordern. Darüber hinaus müssten für herstellersistenspezifische Parameter, wie Zelltypen (Wärmekapazität, Einhausung etc.) angepasste Heizelemente installiert werden. Somit ließe sich der TR aus sicherer Entfernung initiieren. Die Prozedur fand bei einem Versuch Anwendung. Zwar ließ sich der TR unter Gasfreisetzung (Ausgasung) einleiten, eine Entzündung blieb jedoch aus, da die freigesetzte Energie nicht ausreichte, um benachbarte Zellen zu triggern. Die Reaktion kam daher zum Stillstand. Es wurde daher die Entscheidung getroffen, für die weiteren Versuche eine andere Methode zur Brandinitiierung zu verwenden.

Zur gezielten Initiierung des TR wurde auch das Einleiten gesättigter Kochsalzlösung in das Batteriesystem in Betracht gezogen. Bei bisher noch unveröffentlichten Experimenten anderer Forschungsgruppen erzielte die Methode gute Ergebnisse. Allerdings besteht die Gefahr, dass der TR bei nahezu allen Zellen/ Modulen zeitgleich auftritt. Demgegenüber steht der schwer quantifizierbare Kühl-/ Löscheffekt durch das eingeleitete Wasser. Aus diesen Gründen und dem fehlenden Realitätsbezug kam diese Initiierungsmethode nicht zur Anwendung.

Die Wärmeexposition mit Hilfe von Poolfeuern wurde ebenfalls verworfen, da von einem Übergang des Fahrzeugs in den Vollbrand bereits in der Initiierungsphase ausgegangen werden muss, wobei die Batteriesysteme ggf. nicht am Brand teilnehmen.

Um die genannten Unwägbarkeiten zu umgehen, wurde nach erfolgreichen Vorversuchen mit Batteriemodulen festgelegt, den Batteriebrand mit Hilfe von Metaldornen sicherzustellen. Diese Herangehensweise bot eine schnelle und günstige Alternative für die Brandinitiierung und die Einleitung des TR, die gleichzeitig den Worst-Case widerspiegelt. Durch die Perforation des Separators, der zur elektrischen Trennung der Elektroden dient, tritt der TR infolge des resultierenden Kurzschlusses sicher ein. Der im Abschnitt 3.2 beschriebene Prozess der Ausgasung von Zersetzungsprodukten wird dabei zum Teil übersprungen.

Durch die herstellersistenspezifisch unterschiedlich aufgebauten Batteriesysteme war die Penetrationsstelle bei jedem OEM an einer anderen Position. Von zwei OEM konnten die geeigneten Stellen herstellersistensseitig präpariert werden, sodass das Eintreiben des

Dorns ohne massive Gewalteinwirkung realisiert werden konnte. Bei den anderen Fahrzeugen wurde an den betreffenden Stellen mit Gewalt ein Metaldorn eingetrieben. Die Penetrationsorte sind in den Abbildungen 12, 14, 16 und 17 mittels roter Pfeile gekennzeichnet.

8.2 Brandverlauf

Der Ablauf der Brände vollzog sich bezogen auf die in Abbildung 25 vorgestellten Brandstadien immer gleich. Lediglich deren Dauer variierte von Versuch zu Versuch. Nachfolgend werden die beobachteten Brandverläufe gemäß den Brandstadien zeitlich gestuft allgemein zusammengefasst. Eine Fotodokumentation der genannten Stadien zeigt Tabelle 9.

Ausgasen/ Stichflammen/ Funkensprühen

Unmittelbar nach der Penetration treten an der Dorneintrittsstelle Ventinggase aus. Infolge des TR intensiviert sich die Ausgasung, sodass die weißgrauen Dämpfe an den Druckentlastungsöffnungen der Batteriesysteme bzw. am Übergang zwischen Batterietrog und Deckel austreten. Häufig ist das Öffnen von Überdruckschutzsystemen an Zellen akustisch durch dumpfe ploppende Geräusche wahrnehmbar. In einigen Versuchen entzündeten sich die Ventinggase in kurzen und räumlich begrenzten Durchzündungen und verloschen in den meisten Fällen wieder. In dieser Phase wurden infolge der Wärmefreisetzung weitere Zellen und Module thermisch konditioniert, welche anschließend ebenfalls in den TR übergingen und ausgasen. Die Zeitspanne von der Penetration bis zur stabilen Flammenbildung variiert in einem Bereich von 90 s bis 950 s. Ab diesem Brandstadium treten insbesondere im Bereich der Radkästen und der Schweller, teils auch im Bereich der Fahrzeugfront und dem Heck, gerichtete Flammen aus. Das Gesamtsystem erwärmt sich durch die von den Flammen ausgehende Wärmestrahlung (Thermofeedback).

Exponentielle Zunahme der Brandintensität

Infolge der aus dem Batteriesystem austretenden Flammen entzündeten sich am Fahrzeug Kunststoffteile in Radkästen und die Reifen, später das Interieur. Die Intensität des Batteriebrandes nahm infolge des Thermofeedbacks zu. Die aus dem Batteriesystem austretenden Flammen hatten zumeist eine Länge von 1 m bis 2 m. Trotz des

druckgetriebenen Entweichens der Gase und Flammen in horizontaler Richtung, verliefen die Flammen infolge der Thermik überwiegend vertikal nach oben.

Quasi stationäre Brandphase

Etwa 10 min bis 25 min nach der Penetration erreichte der Fahrzeugbrand sein Maximum und ging in eine quasi stationäre Brandphase bei maximaler Wärmefreisetzungsrate über. Der Brand war in diesem Stadium auf sämtliche brennbare Teile des Fahrzeugs ausgedehnt. Anschließend folgte bei den Referenzversuchen die Abklingphase. Nachdem der Großteil der Brandlast verbraucht war, wurden letzte Löscharbeiten durchgeführt.

8.3 Brandbekämpfung

Der Löschangriff startete bei acht Versuchen 15 min nach der Penetration. Bei zwei der durchgeführten zehn Löschversuche waren nach 15 min noch keine Flammenercheinungen erkennbar. In diesen Fällen wurden die Löschmaßnahmen auf den Zeitpunkt der beginnenden exponentiellen Zunahme der Brandintensität verschoben (Versuch HSR_2 nach 20 min bzw. Versuch BBD_2 nach 25 min).

Mit Ausnahme eines Versuches führten immer zwei Trupps (à drei Mann) die Brandbekämpfung durch. Der erste Trupp bestand aus Einsatzkräften des IBK, welcher personell über alle Versuche gleich besetzt war und den Brandschutz am Heck der Fahrzeuge sicherstellte. Im zweiten Trupp führten rollierend Einsatzkräfte der Berufsfeuerwehren aus Sachsen-Anhalt die Brandbekämpfung durch. Ebenso im Einsatz waren unterschiedliche Werkfeuerwehren der beteiligten OEM. Die im Trupp 2 eingesetzten Einsatzkräfte wurden vor Beginn der Versuche umfassend über den derzeitigen Stand der Erkenntnisse zur Strahlrohrführung und zur weiteren Einsatztaktik informiert. Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, stellten sie den Brandschutz an der Front der Fahrzeuge sicher. Beiden Trupps war je eine mit einer WBK ausgerüstete Einsatzkraft zugeteilt. Sie waren für die Suche nach Hotspots zuständig. Aber auch das Finden von Öffnungen im Batteriesystem, um dort mittels Hohlstrahlrohren Wasser einzubringen, gehörte zu den Aufgaben.

Den unterschiedlichen Brandbekämpfungsstrategien gemäß Tabelle 6 waren immer Brandbekämpfungsmaßnahmen mittels Hohlstrahlrohren vorgelagert. Damit wurde sichergestellt, dass der Brand so weit eingedämmt ist, dass die speziellen Einsatzmittel sicher angewendet werden konnten. Die Einsatzkräfte näherten sich dem Fahrzeug unter Ausnutzung der Reichweite der Strahlrohre. Ziel der ersten Brandbekämpfungsmaßnahmen war es, den Brand im Fahrzeuginneren so schnell wie möglich abzulöschen. Dabei sollte so wenig Wasser wie möglich eingesetzt werden.

Im ersten Versuch waren die Hohlstrahlrohre auf einen Durchfluss von 135 l/min eingestellt. Es zeigte sich, dass der Großteil des Wassers ungenutzt oberflächlich abfloss und nicht löschwirksam wurde. Deshalb wurde der Durchfluss im Folgenden auf den niedrigsten am Hohlstrahlrohr einstellbaren Wert von 60 l/min reduziert. Dieser Volumenstrom stellte sich in allen weiteren Versuchen als ausreichend heraus. Mit Ausnahme der im Brand befindlichen Batteriesysteme trat unter massiver Dampfentwicklung ein sofortiger Löscherfolg ein.

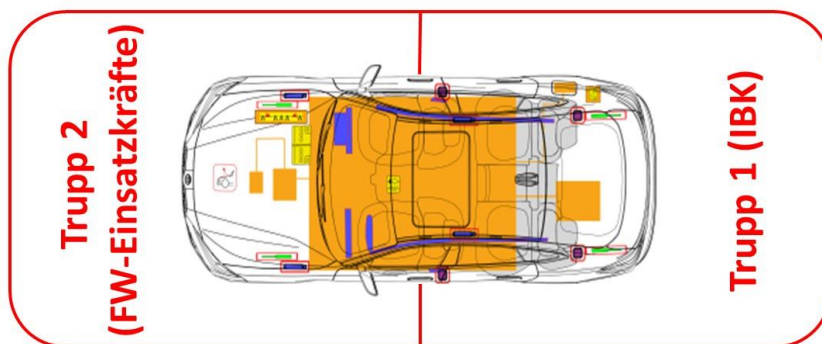


Abbildung 26: Einsatzbereiche der Trupps

Bei den Versuchen mit Systemen zur Löschmitteleinbringung kam zusätzlich ein speziell an den Einsatzmitteln ausgebildeter Trupp zum Einsatz. Tabelle 8 zeigt die Zusammensetzung der Trupps bei den angewendeten Brandbekämpfungsstrategien.

Tabelle 8: Aufstellung der Trupps bei unterschiedlichen Brandbekämpfungsstrategien

Brandbekämpfungsstrategie	Personelle Aufstellung
Hohlstrahlrohre (HSR)	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK)
Systeme zur Löschmitteleinbringung (LE)	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK) Angriffstrupp 3: TrFü_A3.1, TrM_A3.2
Externe Kühllarmatur (EK)	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK)
Brandbegrenzungsdecke (BBD)	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK)

Die grafische Darstellung in Form von Taktikschemas wird in den Kapiteln 8.4.2, 8.4.3, 8.4.4 und 8.4.5 im Rahmen der Ergebnisdiskussion vorgestellt.

Trotz gleichbleibender Vorbereitungsprozeduren verliefen die Brände hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs der Brandstadien auch bei baugleichen Fahrzeugen oft unterschiedlich. Dies kann z.B. auf Unterschiede in den Bauweisen der Batteriesysteme, den chemischen Zusammensetzungen der Zellen und den Zelltypen zurückgeführt werden. Dadurch, in Verbindung mit der wechselnden Zusammensetzung des Trupps 2, wurden anlassbezogen abweichende Einsatzhandlungen bei der Brandbekämpfung durchgeführt. Der Löschangriff war somit, wie auch im Einsatzfall, subjektiv geprägt.

Tabelle 9: Brandstadien nach Penetration mit Metalldorn

OEM	Ausgasen	Exponentielle Zunahme der Brandintensität	Quasi stationäre Brandintensität
BMW Group			
Opel Automobile GmbH			

8.4 Ergebnisse der Brand- und Löschexperimente

Im Folgenden werden die Messergebnisse der durchgeführten Brand- und Löschversuche gemäß der in Tabelle 6 dargestellten Versuchsblöcke vorgestellt und diskutiert. Beigefügt sind relevante zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenströme. Nicht aufgeführte Diagramme können im Anhang eingesehen werden. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit können nicht alle Versuche im Detail vorgestellt werden. Die Ergebnisse der nicht dargestellten Versuche werden in der Diskussion der einzelnen Versuchsblöcke aber für die Bewertung herangezogen. Die zeitabhängigen Verläufe der gemessenen Werte der nicht vorgestellten Versuche sind im Anhang aufgeführt. Oberhalb aller Diagramme verweisen Zeitstempel auf besonders erwähnenswerte Ereignisse im Versuchsverlauf. Die Erläuterung erfolgt nachfolgend im Text. Es wird darauf hingewiesen, dass der SoC eines Fahrzeugs lediglich bei 76 % lag. Bei allen anderen Fahrzeugen betrug der SoC > 90 %.

8.4.1 Referenzversuche

Bei zwei Referenzversuchen mit Modellen unterschiedlicher Hersteller wurde ihr 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. Weiterhin können die bei ungestörten Abbrandbedingungen gemessenen zeitabhängigen Verläufe für Temperatur und Wärmestromdichte als Eingangsparameter für numerische Simulationen genutzt werden. Außerdem war es unter den Aspekten Sicherheit der Versuchseinrichtungen des IBK und Sicherstellung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes wichtig, Erfahrungen zu möglichen fahrzeugspezifischen Besonderheiten beim Abbrand zu sammeln. Es stand im Besonderen die Frage im Raum, wie sich der Brand unmittelbar nach einer Penetration des Batteriesystems entwickelt. Diesbezüglich ist in internationalen Veröffentlichungen und der Presse ein breites Spektrum möglicher Szenarien dokumentiert. Dieses reicht von der sofortigen Entzündung der Ventinggase bis hin zu Fällen, in denen sie über einen Zeitraum von bis zu 30 Minuten ohne Entzündung austreten. Insbesondere im zuletzt ge-

nannten Fall müssen zum Schutz der Versuchseinrichtungen des IBK Sicherheitsmaßnahmen zur Unterdrückung einer massiven Rauchgasdurchzündung getroffen werden. Dass dieses Szenario realistisch ist, zeigte sich im nachfolgend beschriebenen Referenzversuch 2. Im Referenzversuch 1 zeigte sich hinsichtlich der Brandentstehung dagegen ein vollkommen anderes Bild. Nachfolgend werden die Brandverläufe beider Experimente zunächst einzeln beschrieben. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt gemeinsam im Anschluss.

8.4.1.1 Ergebnisse des Referenzversuchs 1

Der zeitliche Ablauf des ersten Referenzversuches ist in der Tabelle 10 beschrieben. Die Geschehnisse im Experiment werden in geeigneten Zeitschritten zusammengefasst.

Tabelle 10: Beschreibung des zeitlichen Ablaufes des ersten Referenzversuches

Versuchszeit in s	Ereignisse
0	Nach erfolgter Penetration traten infolge des TR weißgraue Ventinggase aus.
1 - 765	Im weiteren Verlauf wurden weitere Zellen thermisch aufbereitet. Sie gingen in der Folge ebenfalls in den TR über. Die Reaktion im Batteriesystem verlief von Zelle zu Zelle. Die zeitliche Abfolge des TR der Zellen konnte durch dumpfe ploppende Geräusche, gefolgt von Ventinggas-Freisetzungen in wechselnder Intensität wahrgenommen werden. Die Zeitspannen dazwischen nahmen mit voranschreitender Versuchszeit ab. Das deutete auf eine steigende Ausbreitungsgeschwindigkeit infolge der zunehmenden Wärmefreisetzung hin. Zwischen Versuchszeit 650 s und 740 s waren weder Geräusche noch austretende Ventinggase wahrnehmbar. Es wurde angenommen, dass die Zellen eines Batteriemoduls ausgereagiert haben. Wenig später waren erneut Geräusche unter Freisetzung von Ventinggasen wahrnehmbar.
766	Unter Zischen trat an der Unterseite des Batteriesystems eine nach unten gerichtete Stichflamme auf, die in der Folge nicht verlösch. Anstiege für Temperatur und Wärmestrahlung wurden zu diesem Zeitpunkt noch nicht registriert.
767 - 1112	Die zischenden und ploppenden Geräusche intensivierten sich unter Freisetzung von Ventinggasen, die sich unmittelbar nach dem Austritt aus dem Batteriesystem entzündeten. Die sich verkürzenden Zeitspannen zwischen den Freisetzungen erlaubten den Schluss, dass die Module des Batteriesystems thermisch aufbereitet waren.

1113	Es kam zur spontanen Freisetzung großer Ventinggasmengen, die sich schlagartig entzündeten. In der Folge traten an zahlreichen anderen Stellen wie Radkästen und im Bereich der Schweller Flammen aus.
1114 - ca. 1800	Unter ploppenden Geräuschen und zyklischen Stichflammen stieg die Brandintensität.
ca. 1801 - ca. 2300	Die Brandintensität erreichte den quasistationären Zustand. Die Temperatur erreichte in dieser Brandphase einen Maximalwert von $T_{\max} = 1082 \text{ °C}$ (mittige Messachse).
ab 2301	Die Brandintensität nahm ab. In der Folge verloschen die Flammen.

In der Abbildung 27 sind links die Temperatur-Zeit-Verläufe der Temperaturmessstellen an der mittleren Position über dem Fahrzeug zu sehen. Im rechten Diagramm sind die Wärmestromdichten beider Sensoren über den zeitlichen Verlauf des ersten Referenzversuches dargestellt.

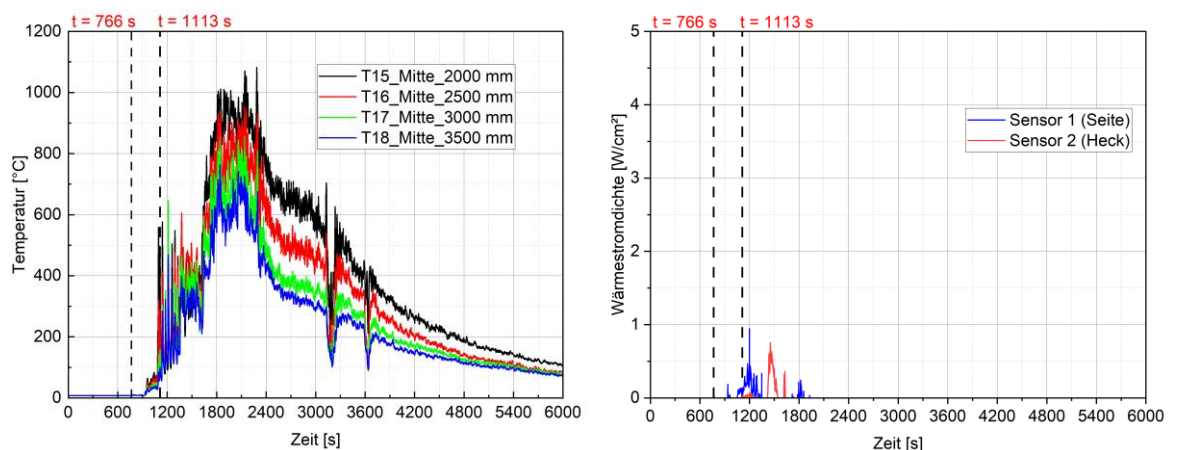


Abbildung 27: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (mittige Messachse) und Wärmestrahlung im Referenzversuch 1

8.4.1.2 Ergebnisse des Referenzversuchs 2

Die nachfolgende Tabelle 11 beinhaltet zusammenfassend die Geschehnisse beim zweiten Referenzversuch.

Tabelle 11: Beschreibung des zeitlichen Ablaufes des zweiten Referenzversuches

Versuchszeit in s	Ereignisse
0	Direkt nach der Penetration traten kurzzeitig nach unten gerichtete Flammen auf, die nach wenigen Sekunden wieder verloschen. In Folge des TR werden weißgraue Ventinggase ausgestoßen.
1 - 600	Begleitet von zischenden Geräuschen treten am Heck und an der Beifahrerseite zyklisch große Ventinggasmengen aus. Es schien, dass sich der TR von Zelle zu Zelle ausbreitete. Die Abstände der einzelnen Venting-Ereignisse lagen zwischen 60 s und 360 s.
601 - 900	Die Reaktion im Batteriesystem verstärkte sich. In Abständen von 30 s bis 60 s traten Ventinggase aus. Der Brandraum füllte sich trotz des Betriebs der Rauchgasreinigungsanlage mit Ventinggasen. 900 s nach Versuchsbeginn wurde aus zwei Hohlstrahlrohren Wasser als Sprühstrahl in die Umgebung des Fahrzeugs appliziert, um die Ventinggase zu verdünnen und ggf. zu inertisieren. Beide Strahlrohre waren auf 60 l/min eingestellt.
901 - 1657	Die Gasproduktion durch Zersetzung der chemischen Komponenten stieg infolge der Wärmefreisetzung mit einhergehender Systemerwärmung an (siehe Abbildung 6). Es traten fast ununterbrochen in großen Mengen Ventinggase aus, sodass sich der Brandraum zunehmend mit Ventinggasen füllte. In diesem Zeitintervall wurden für die Kühlwasserapplikation zur Inertisierung des Gas-/ Luftgemisches 358 l Wasser verbraucht. Mit Beginn der Durchzündung wurden die Kühlmaßnahmen eingestellt.
1658	Die Ventinggase zündeten in einem Feuerball mit einem Durchmesser von etwa 5 m bis 6 m (siehe Abbildung 7) durch.
1659 - ca. 2250	Nach dem Verlöschen des Feuerballs ging das Fahrzeug in die exponentiell wachsende Brandphase über. Das Batteriesystem wurde thermisch derart konditioniert, dass das Fahrzeug in den Vollbrand überging. Flammen traten an den Radkästen, Schwellern und besonders am Heck aus. Auch an der Front entwickelte sich der Brand. Die Brandintensität nahm exponentiell zu. Die Wärmestromdichte erreichte in dieser Phase ihren Maximalwert von $\dot{q} = 3,1 \text{ W/cm}^2$.
2251 - ca. 2600	Der Brand befand sich in der quasistationären Phase. Die Temperatur erreichte in dieser Brandphase einen Maximalwert von $T_{\text{max}} = 792 \text{ °C}$ (mittige Messachse).
ca. 2601 – 4425	Die Brandintensität nahm ab.
Ab 4426	Zwei Trupps führten Restlöscharbeiten durch.

In den nachfolgenden Diagrammen der Abbildung 28 sind die Temperatur-Zeit-Verläufe der mittleren Thermoelementkette, die über dem Fahrzeug positioniert war, für den zweiten Referenzversuch dargestellt. Weiterhin können die zeitlichen Verläufe der resultierenden Wärmestromdichten der beiden Sensoren sowie die notwendigen Wasserverbräuche für die Rauchgasverdünnung eingesehen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass das Wasser nicht zum Löschen des Fahrzeugbrandes eingesetzt worden ist, da es sich hierbei um einen Referenzversuch handelte.

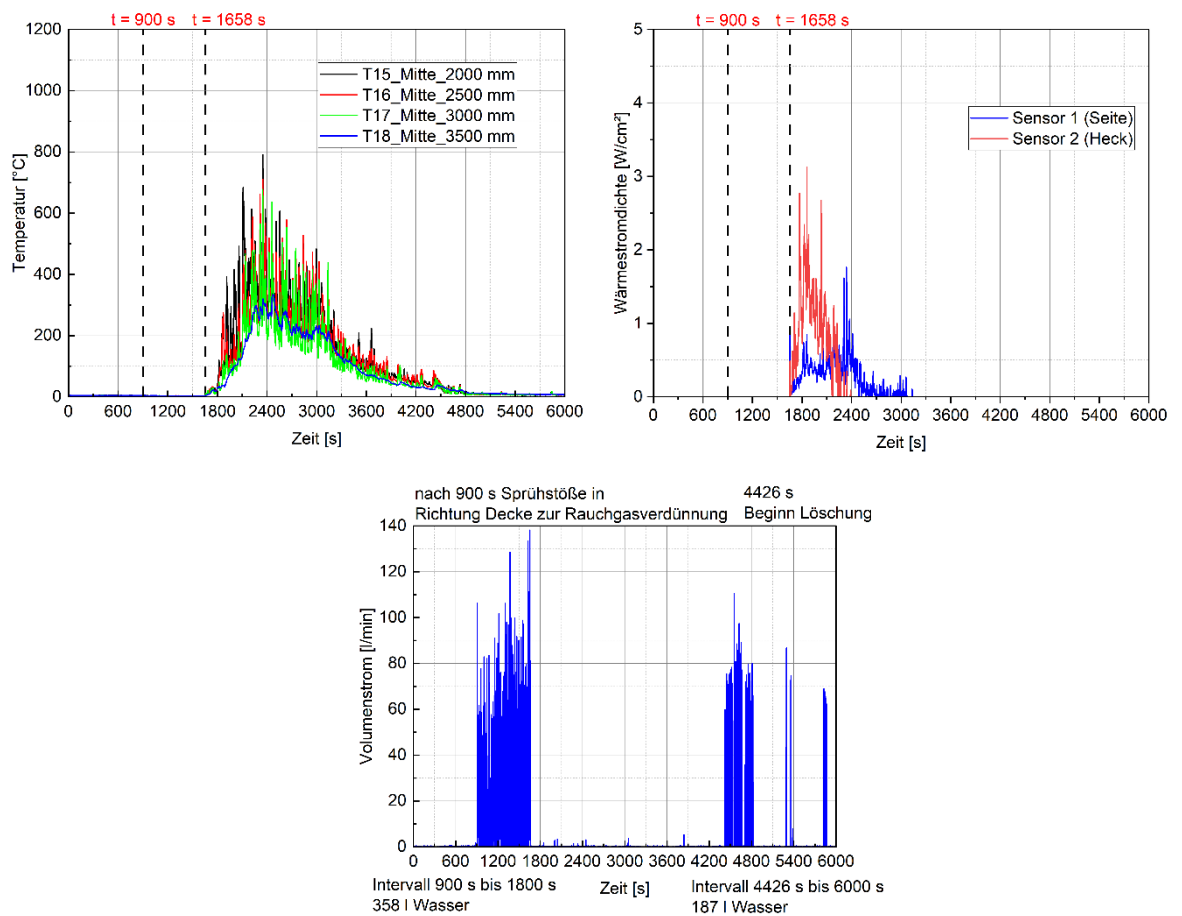


Abbildung 28: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (mittige Messachse), Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom im Referenzversuch 2

8.4.1.3 Diskussion der Ergebnisse der Referenzversuche

Die beiden Referenzversuche verliefen sowohl in der Brandentstehungsphase als auch im sich anschließenden Abbrand unterschiedlich. Eine Gegenüberstellung der Brandphasen zeigt Abbildung 29.

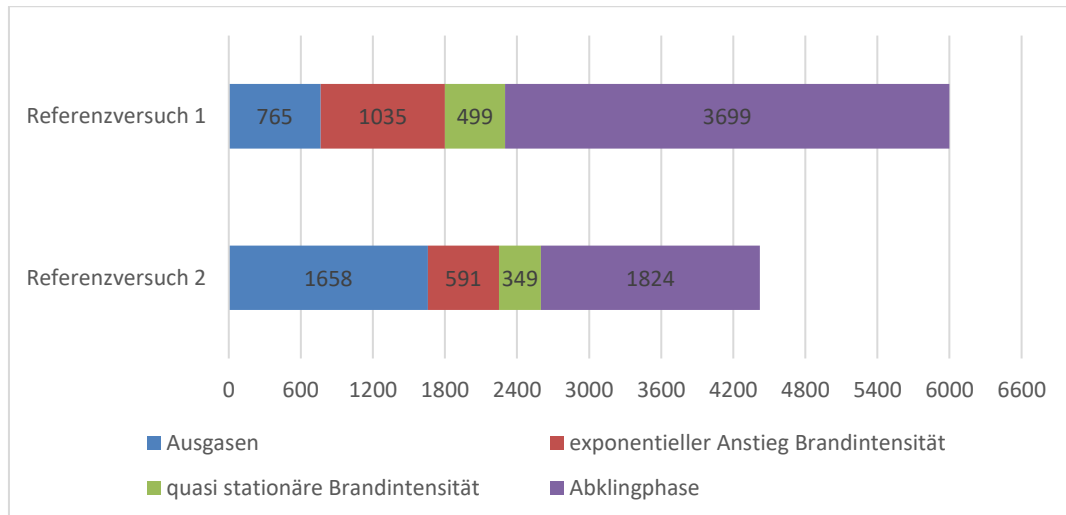


Abbildung 29: Dauer der Brandphasen beider Referenzversuche

Es ist ersichtlich, dass beim Fahrzeug im Referenzversuch 1 bereits nach 765 s nicht verlöschende Flammen aus dem Batteriesystem austraten. Im Referenzversuch 2 trat dies erst nach 1658 s ein. Die Freisetzung von Ventinggasen war in diesem Versuch derart stark, dass die Einsatzkräfte zyklisch insgesamt 545 l Wasser mittels Sprühstrahlen in die Umgebung des Fahrzeugs abgaben, um die Gase zu kühlen und zu verdünnen. Dennoch kam es nur wenig später zu einer Durchzündung in Form eines Feuerballs. Nachdem dieser verlösch, ging der Brand innerhalb von knapp 10 min in den quasi stationären Zustand über. Im Referenzversuch 1 dauerte die Phase der exponentiellen Zunahme der Brandintensität fast doppelt so lange. Die Dauer des quasi stationären Brandzustands lag bei beiden Versuchen in der gleichen Größenordnung. Nachfolgend dauerte es etwa doppelt so lange, bis das Fahrzeug im Referenzversuch 1 verlösch.

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. Inwieweit diese unterschiedlichen Brandstadien die Löscharbeiten beeinflussen, wird in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich erläutert.

8.4.2 Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren

Zur Evaluation der Wirksamkeit der Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (HSR) wurden vier Brand-/ Löschversuche durchgeführt. Dabei wurden die in Tabelle 12 vorgestellten Versuchsparameter angewendet. Das Taktikschema der Versuche HSR_1 bis HSR_3 zeigt Abbildung 30. Nach den Löscherfolgen der Versuche HSR_1 bis HSR_3 wurde im Versuch HSR_4 die Taktik hin zu einem Trupp umgestellt. Es sollte untersucht werden, ob die Brandbekämpfung auch in reduzierter Stärke erfolgreich durchgeführt werden kann.

Tabelle 12: Versuchsparameter der Brandversuche mit Hohlstrahlrohren

Lfd Nr.:	Anzahl/ Zusammensetzung der Trupps	Volumenstrom Hohlstrahlrohre
HSR_1	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK)	variabel, ausgehend von 135 l/min
HSR_2	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_2.3 (WBK)	60 l/min
HSR_3	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK) Angriffstrupp 2: TrFü_A2.1, TrM_A2.2, TrM_A2.3 (WBK)	60 l/min
HSR_4	Angriffstrupp 1: TrFü_A1.1, TrM_A1.2, TrM_A1.3 (WBK)	60 l/min

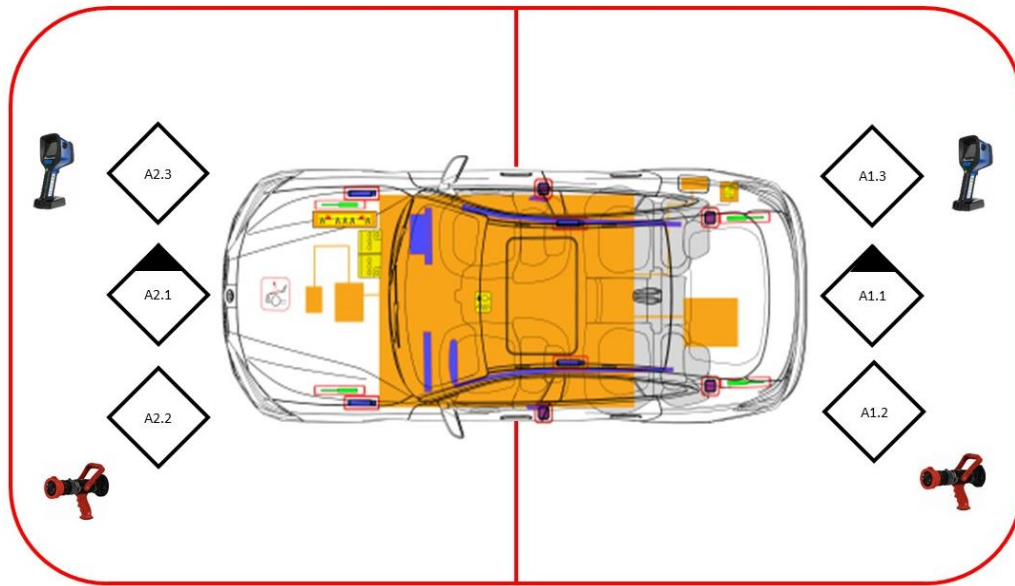


Abbildung 30: Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit Hohlstrahlrohren

In Tabelle 13 sind die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse für die Einsatzzeit sowie Lösch- und Kühlwasserverbräuche gegenübergestellt. Es zeigt sich die bereits erwähnte Streuung der Werte. Der Versuch HSR_1 diente dazu, erste Erfahrungswerte für die Brandbekämpfung zu sammeln. Die Strahlrohre waren auf einen Standardwert von 135 l/min eingestellt. Der Versuch wurde nach Beendigung im Kreise der beteiligten Einsatzkräfte ausgewertet. Es wurde eingeschätzt, dass ein großer Teil des applizierten Wassers nicht löschwirksam wurde und oberflächlich abfloss. Für alle weiteren Versuche wurde an den HSR daher der minimal am Strahlrohr einstellbare Wert von 60 l/min verwendet. Anlassbezogen konnten die eingesetzten Kräfte den Durchfluss erhöhen.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Löschexperimenten mit Hohlstrahlrohren

Lfd Nr.:	Löschmaßnahmen		Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserverbrauch
	Beginn nach Penetration	Ende nach Penetration		
HSR_1	917 s	2989 s	2072 s	6,0 m ³
HSR_2	1180 s	6370 s	5190 s	6,7 m ³
HSR 3	920 s	2726 s	1806 s	1,55 m ³
HSR 4	906 s	2365 s	1459 s	0,96 m ³

Wegen der besseren Übersichtlichkeit werden im Folgenden die Versuche HSR_2 und HSR_3 vorgestellt. Sie stehen exemplarisch für zwei Szenarien, denen sich Einsatzkräfte im Realfall stellen müssen. Die Versuche HSR_1 und HSR_4 verliefen trotz erheblicher Unterschiede beim Löschwasserverbrauch, hinsichtlich der Brandverläufe und dem Ablauf der Brandbekämpfungsmaßnahmen, ähnlich HSR_3. Die Verläufe für Temperatur und Wärmestrahlung beider Versuche sowie die für die Löschwasserverbräuche können im Anhang eingesehen werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Wärmeflussaufnehmer bei der Brandbekämpfung mit Löschwasser beaufschlagt wurden. In den Diagrammen werden ab Beginn der Brandbekämpfung daher keine Werte angegeben.

8.4.2.1 Ergebnisse des Versuches HSR_2

Nach erfolgter Penetration des Batteriesystems traten, wie erwartet, weiße Ventingase aus. Die Freisetzung von Ventinggasen intensivierte sich. Durch die Öffnung von Überdruckventilen waren ploppende Geräusche wahrnehmbar. Ploppenden Geräuschen folgten zyklisch Ventinggasfreisetzungen. Es war festzustellen, dass thermisch konditionierte Zellen nacheinander in den TR übergingen. Anders als bei den meisten Versuchen traten nach 15 min noch keine Flammenerscheinungen auf. Es wurde entschieden, den Löschangriff erst dann zu beginnen, wenn stabile Flammenerscheinungen vorlägen. Nach einer ersten Stichflamme, 1085 s nach der Penetration, erfolgte wenig später bei 1180 s der Löschangriff. Der Brand war zu diesem Zeitpunkt in der Entstehungsphase. Flammen waren lediglich unterhalb des Batteriesystems feststellbar. Diese Tatsache führte auch dazu, dass die in Abbildung 31 dargestellten Temperaturen oberhalb des Fahrzeugs nur geringfügig stiegen.

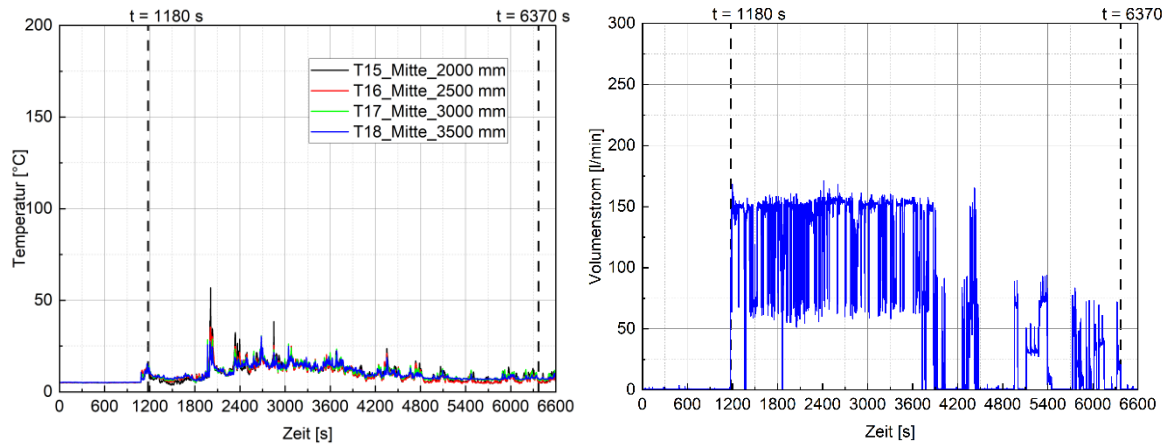


Abbildung 31: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und den Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_2

Mit Hilfe zweier HSR wurde Löschwasser aufgebracht. Ein Löscherfolg stellte sich jedoch nicht ein. Wenig später traten auch im Bereich der Radkästen Flammen aus. Auch hier blieb der Löscherfolg aus. Zu diesem Zeitpunkt war feststellbar, dass die thermische Konditionierung der Zellen im Batteriesystem weiter voranschritt und sich dadurch der Brand weiter intensivierte. Es gelang nicht, die aus dem Batteriesystem tretenden Flammen, die durch sich entzündende Ventinggase resultierten, zu löschen. Die sich infolge der Flammen entzündenden Anbauteile konnten allerdings bereits in der Entstehungsphase sicher gelöscht werden. Die Suche mit den WBK nach möglichen Öffnungen, zur Löschwassereinbringung, blieb auch im Fahrzeuginnenraum erfolglos. Das Fahrzeug war zu diesem Zeitpunkt nahezu unversehrt. Daher konzentrierten sich die Trupps bis zur Versuchszeit 1900 s darauf, ein Übergreifen des Batteriebrandes auf das Fahrzeug zu verhindern. Wenige Sekunden später traten auch im Bereich der Fronthaube Flammen aus dem Fahrzeug. Den Einsatzkräften gelang es erfolgreich, den Brand auf das Batteriesystem zu begrenzen. Dies ist auch in den Temperatur- und Wärmestrahlungsverläufen in Abbildung 31 erkennbar. Oberhalb des Fahrzeugs liegt das Temperaturmaximum bei lediglich 57 °C. Es war feststellbar, dass die Intensität der Reaktionen in den Zellen infolge des TR zunahm. Zwischen der Versuchszeit 2300 s und 3700 s intensivierte sich die Flammen weiter und erreichten in diesem Zeitfenster ihren Höhepunkt. In diesem Zeitraum traten, wie in Abbildung 32 durch steigende Temperaturen an den im Innenraum des Fahrzeugs angebrachten Thermoelementen zu erkennen, kleinere Durchzündungen im Innenraum auf.

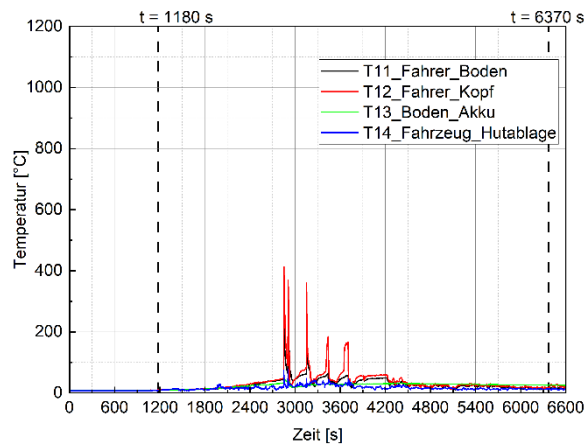


Abbildung 32: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Fahrzeuginnenraum des Versuches HSR_2

Da kein direkter Zugang zu den Austrittsstellen der sich entzündenden Ventinggase bestand, konzentrierten sich die Maßnahmen weiterhin auf die Verhinderung der Brandausbreitung. Die Brandintensität nahm bis zur Versuchszeit 4079 s weiter ab. Bis 4440 s traten nur noch vereinzelte Flammen auf, die umgehend gelöscht werden konnten. Bis zum Versuchsende bei 6370 s wurden unter starker Dampfentwicklung Kühlmaßnahmen an Hotspots durchgeführt. Die nachträgliche Begutachtung des Batteriesystems ergab, dass kein Wasser eingebracht werden konnte. Dadurch reagierten alle Module unter Wärmefreisetzung und Flammenbildung. Das Interieur und Exterieur war nach Abschluss des Brandversuches weitestgehend erhalten.

8.4.2.2 Ergebnisse des Versuches HSR_3

Unmittelbar nach der Penetration traten dort weiße Ventinggase aus, die sich 20 s später entzündeten. Ab der Versuchszeit von 95 s war eine stetig steigende Brandintensität feststellbar. Dabei kam es im Bereich des Hecks zur Freisetzung großer Mengen von Ventinggasen. Sie entzündeten sich fast zeitgleich. In der Zeit von 121 s bis 480 s stieg die Brandintensität, respektive auch die Wärmestromdichte, insbesondere am Heck stark an (siehe Abbildung 33).

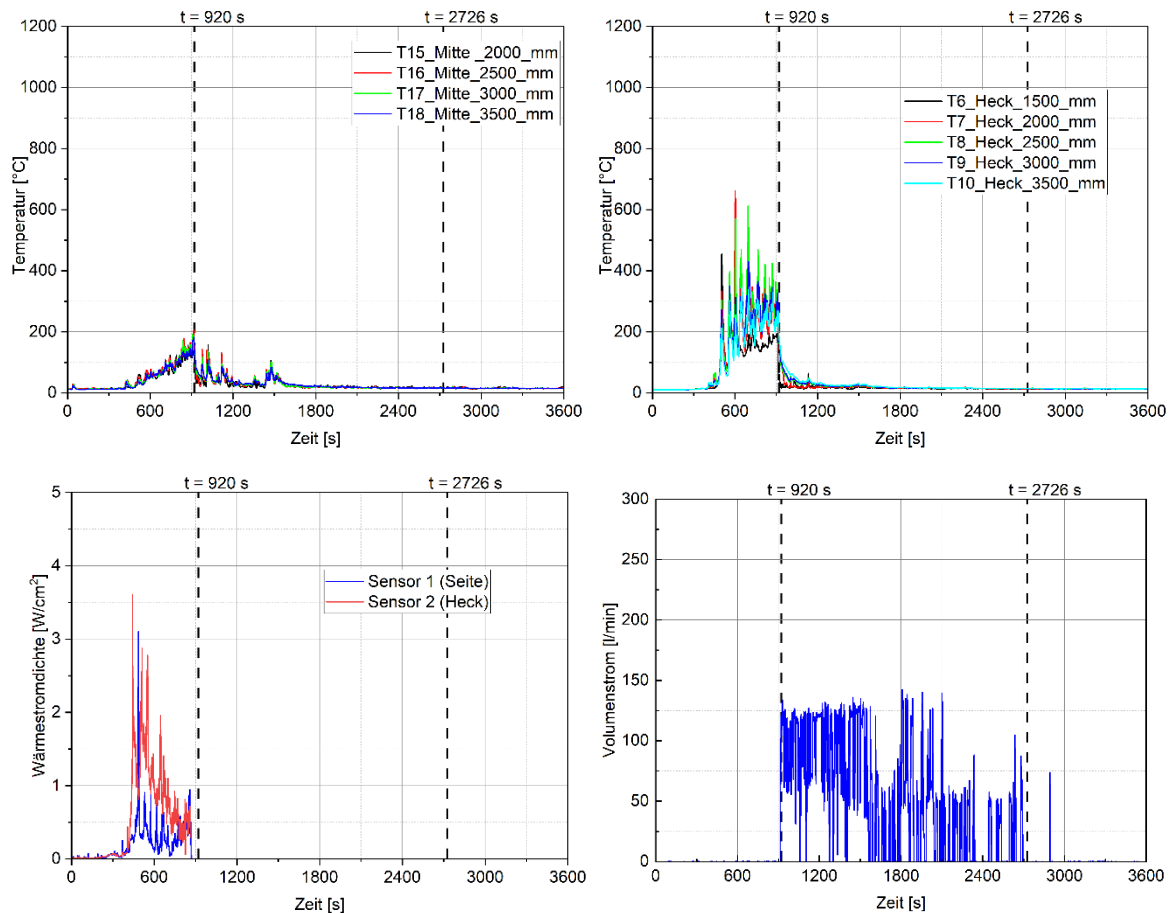


Abbildung 33: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse und Messachse am Heck), die Wärmestromdichte und den Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_3

Bis zum Zeitpunkt des Löschangriffes entwickelte sich das Szenario hin zu einem Vollbrand bei maximaler Wärmefreisetzung. Mit Beginn des Löschangriffes waren die Zellen des Batteriesystems thermisch derart stark konditioniert, dass es bis zur Versuchszeit 1100 s nur mit erheblichem Löschwassereinsatz gelang, die rings um das Fahrzeug austretenden Flammen unter Kontrolle zu bringen. Es war feststellbar, dass sich der Brand im Batteriesystem anschließend sukzessive auf den Frontbereich ausbreitete. Etwa ab Versuchszeit 1400 s, also etwa 8 min nach Beginn des Löschangriffes, gelang es den Einsatzkräften, die Brandintensität drastisch zu senken. Folgend nahm sie etwa bis zur Versuchszeit 1600 s weiter ab. Anschließend wurden im gesamten Fahrzeug Kühlmaßnahmen durchgeführt. In unregelmäßigen Abständen traten Flammen auf, die mit Hilfe der HSR umgehend gelöscht werden konnten. Über den Zeitraum der Brandbekämpfung wurde insgesamt ein Löschwasservolumen von $1,55 \text{ m}^3$ verbraucht.

8.4.2.3 Diskussion der Löscharbeiten mit HSR

Die beiden vorgestellten Versuche zeigen das breite Spektrum möglicher Brandphasen an der Einsatzstelle. Es reicht von einem im Vollbrand stehenden Fahrzeug (HSR_1, HSR_3 und HSR_4) bis hin zu einem Fahrzeug, das sich in der frühen Brandentstehungsphase (HSR_2) befindet. Die Versuche zeigen außerdem, dass der Aufwand für die Brandbekämpfung mittels HSR vom vorliegenden Brandzustand abhängig ist. Abbildung 34 zeigt, dass sowohl die Einsatzzeit, als auch das zur Einsatzabarbeitung notwendige Wasservolumen bei dem in der Brandentstehungsphase befindlichen Fahrzeug am Größten waren. Die Löscheziten der anderen drei Experimente, bei denen sich die Fahrzeuge im Vollbrand befanden, lagen etwa um den Faktor 2,5 darunter. Gleiches gilt für die Löschwasservolumina.

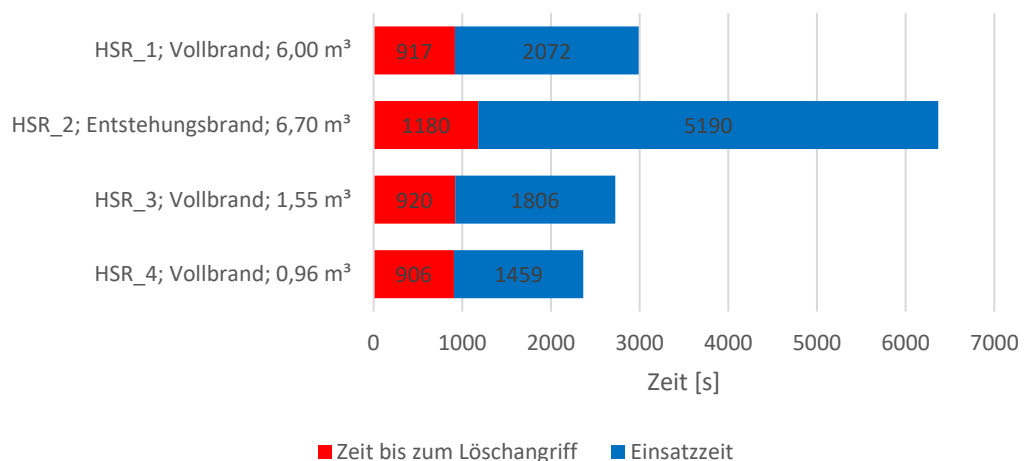


Abbildung 34: Einsatzzeiten und Löschwasservolumina bei Versuchen mit HSR

Aus den Versuchen lässt sich trotz der begrenzten Anzahl von Versuchen ableiten, dass bei Fahrzeugen, die sich beim Eintreffen der Kräfte an der Einsatzstelle in einem durch einen Batteriebrand verursachten Vollbrand befinden, ein nicht quantifizierbarer Anteil der Batteriemodule bereits unter Wärmefreisetzung und Flammenbildung reagiert haben. Die noch verbliebenen „aktiven“ Module sind infolge des Thermofeedbacks thermisch aufbereitet und beteiligten sich nur wenig später am Brand. Im Versuch HSR_3 resultierte daher ein im Vergleich zum Versuch HSR_2 kurzer Löschein-satz mit hoher Brandintensität und vergleichsweise geringem Wasserverbrauch. Durch die eingesetzten zwei Trupps wurde eingeschätzt, dass das Szenario eines Vollbrandes

trotz hoher Brandintensität auch mit auf 60 l/min reduzierten Durchflussmengen am Strahlrohr gut beherrschbar war.

Im Versuch HSR_4 lag nach der Vorbrennzeit ebenfalls ein durch einen Batteriebrand verursachter Vollbrand vor. Die Brandbekämpfung wurde anders als in den übrigen Versuchen durch nur einen Trupp durchgeführt. Die Videoaufnahmen des Einsatzes zeigen, dass es für die eingesetzten Kräfte schwerer war, die Flammen unter Kontrolle zu bringen. Es gelang ihnen aber, innerhalb weniger Minuten den Brand im Fahrzeuginnenraum zu löschen. Die Kontrolle des Batteriebrandes von einer Seite war nur eingeschränkt möglich, da die Flammen nur einseitig gelöscht werden konnten. Auf der dem Trupp gegenüberliegenden Seite traten zu diesem Zeitpunkt weiterhin Flammen auf. Gemeinsam mit einem dort positionierten zweiten Trupp hätte die Brandintensität gesenkt werden können. Aber auch dem einen eingesetzten Trupp gelang es, die Brandintensität zu senken und das Batteriesystem unter reduzierter Flammenbildung kontrolliert ausreagieren zu lassen. Da im Versuch nur ein Angriffstrupp tätig war, lag die verbrauchte Löschwassermenge bei nur etwa 1 m³. Es wurde eingeschätzt, dass sich die Löschwassermenge durch den Einsatz eines zweiten Trupps erhöht hätte.

Bei einem durch einen TR im Batteriesystem verursachten Entstehungsbrand in einem Batteriemodul, wie im Versuch HSR_2, ist es wichtig zu versuchen, die betroffenen Zellen zu kühlen. Bei diesem Vorgang kann beim Vorhandensein, auch von außen nicht sichtbarer Öffnungen, Wasser zur Kühlung bzw. Löschung in das Batteriesystem eingebracht werden. Durch die Verhinderung der Brandausbreitung auf das gesamte Fahrzeug konnte im Versuch HSR_2 die Konditionierungsgeschwindigkeit weiterer Zellen/ Module reduziert werden. Ein Vollbrand analog HSR_1, HSR_3 und HSR_4 mit verhältnismäßig kurzer Brenndauer und vergleichsweise hoher Brandintensität, trat daher nicht ein. Wird die Brandausbreitung auf das Fahrzeug verhindert, kann der Brand auf das Batteriesystem begrenzt werden. Wie im Versuch HSR_2 zu beobachten war, sind durch die freiwerdende Wärme einiger weniger im TR befindlicher Zellen/ Module sukzessive alle Zellen konditioniert worden und gingen in der Folge thermisch durch¹³. Diese Art der Brandausbreitung im Batteriesystem erfolgt anders als in

¹³ Die Untersuchung des Batteriesystems durch den Hersteller ergab, dass alle Batteriemodule ausgebrannt waren.

den Versuchen HSR_1, HSR_3 und HSR_4 langsamer und mit geringerer, jedoch steigender Brandintensität. Der Löscheinsatz wurde im Vergleich zu den genannten Versuchen mit Vollbränden zeitlich gestreckt. Dadurch stieg auch die für die Einsatzbewältigung notwendige Löschmittelmenge. Die im Versuch HSR_2 involvierten Einsatzkräfte schätzten nach Versuchsende ein, dass die Brandbekämpfung, respektive das Verhindern eines Vollbrandes, trotz des vergleichsweise langen Einsatzes sicher gewährleistet werden konnte.

Die Versuche zeigten, dass bei einem durch einen Thermal Runaway im Batteriesystem verursachten Vollbrand, die Reaktion im Batteriesystem durch Hohlstrahlrohre nur dann gelöscht werden kann, wenn über Löcher und sonstige Öffnungen Wasser in das Batteriesystem gebracht werden kann. Dies zeigte die Begutachtung ausgewählter Batteriesysteme nach dem herstellerseitigen Ausbau.

8.4.3 Löschmitteleinbringung in Traktionsbatterien

Neben Hohlstrahlrohren stehen den Einsatzkräften zur Sicherstellung des Brandschutzes Systeme zur Löschmitteleinbringung in Batteriesysteme zur Verfügung. Deren Wirksamkeit wurde im Rahmen dreier Experimente untersucht. Für die Versuche erfolgte die in Tabelle 8 dargestellte personelle Aufstellung der Trupps. Das Taktikschema der Einsatzkräfte zeigt Abbildung 35. Der Fahrzeugbrand wurde durch die beiden Trupps A1 und A2 mittels HSR so weit abgelöscht, dass der gefahrlose Einsatz der Systeme zur Löschmitteleinbringung durch den zusätzlichen Trupp A3 möglich war. Während die Systeme zum Einsatz gebracht wurden, schützte Trupp A1 den Trupp A3 vor möglichen Flammen. Als die Systeme in Betrieb waren, wurde die Bekämpfung mittels HSR im Wesentlichen eingestellt. Sie kamen nur für gezielte Restlöscharbeiten zum Einsatz.

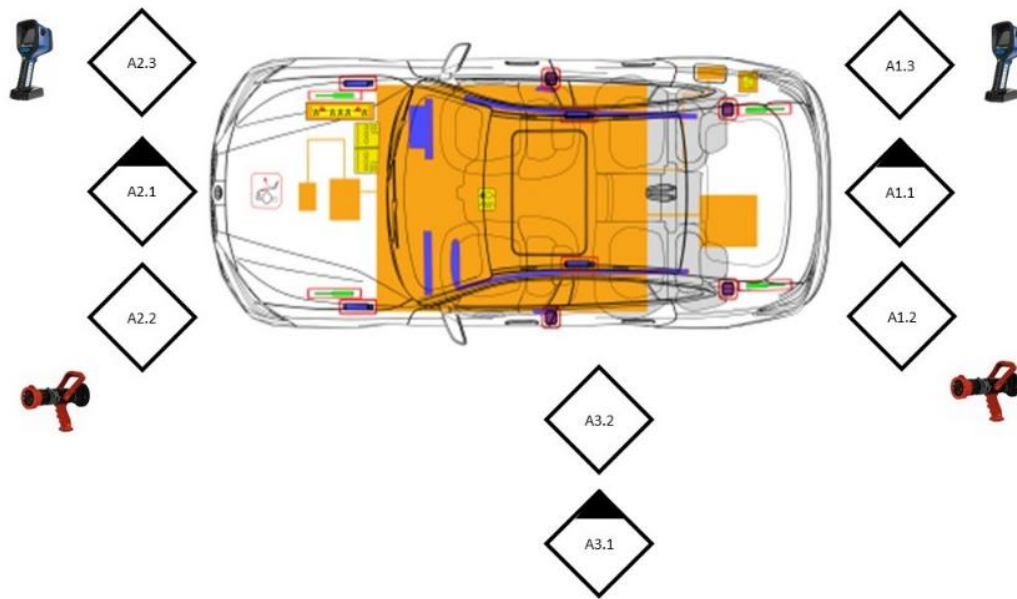


Abbildung 35: Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit Systemen zur Löschmitteleinbringung

In Tabelle 14 sind die gemessenen Werte für die Einsatzzeiten sowie Lösch- und Kühlwasservolumina gegenübergestellt. Auf die Darstellung der Verläufe für die Volumenströme wird verzichtet, weil ablesbar wäre, welches System bei welchem Versuch zum Einsatz kam.

Es wird darauf hingewiesen, dass anders als in den Versuchen LE_2 und LE_3 die Vorbrennzeit im Versuch LE_1 nicht bei 900 s, sondern bei 680 s lag. Das Vorverlegen war notwendig, weil die Versuchsbeteiligten im Verlauf der Vorbrennzeit einschätzten, dass der Brand im Vergleich zu bereits durchgeführten Versuchen weiter fortgeschritten war. Versuch LE_1 war der erste dieser Reihe. Um Erfahrungen im Umgang mit den untersuchten Systemen zu sammeln, war die Brandbekämpfung auf die maximale Sicherheit der Einsatzkräfte angelegt. Unter dem Aspekt der Eigensicherung kam das System zur Löschmitteleinbringung erst zum Einsatz, als die Flammen durch die HSR weitestgehend gelöscht waren. Dadurch ist auch der im Vergleich zu LE_2 und LE_3 höhere Löschwasserverbrauch zu erklären. In den Versuchen LE_2 und LE_3 hingegen wurde mit den Erfahrungen aus LE_1 die Einsatztaktik optimiert. Die Systeme zur Löschmitteleinbringung kamen bereits etwa 2 Minuten nach dem Erstangriff mittels HSR zum Einsatz. Die für die Systeme zur Löschmitteleinbringung zuständigen Einsatzkräfte wurden durch die mit HSR ausgerüsteten Kräfte geschützt.

Im Folgenden wird der Versuch LE_1 vorgestellt, weil er wegen der maximalen Eigensicherungsmaßnahmen als realistisch für den Feuerwehralltag angesehen wird.

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Experimenten mit Systemen zur Löschmitteleinbringung

Lfd Nr.:	Löschmaßnahmen HSR	Löschmitteleinbringung	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasser- verbrauch
	Beginn/ Ende nach Penetration	Beginn/ Ende nach Penetration		
LE_1	680 s/ 2180 s	1150 s/ 2550 s	1870 s	3 m ³
LE_2	916 s/ 1129 s	1018 s/ 1980 s	1064 s	1,1 m ³
LE_3	909 s/ 2190 s	1025 s/ 2910 s	2001 s	1,4 m ³

8.4.3.1 Ergebnisse des Versuches LE_1

Unmittelbar nach der Penetration traten aus dem Batteriesystem weiß gefärbte Ventinggase aus. Sie entzündeten sich nur wenige Sekunden später. Es war feststellbar, dass sich der TR ausgehend von der penetrierten Zelle auf benachbarte Zellen ausbreitete. Bis zum Beginn des Löschangriffs entwickelte sich der Brand bis zum Vollbrand. Mit Beginn des Löschangriffs bei Versuchszeit 680 s wurde der Brand innerhalb von knapp 8 Minuten weitestgehend unter Kontrolle gebracht. Der Erfolg der Löschmaßnahmen mittels HSR war, wie in Abbildung 36 zu erkennen, durch fallende Temperaturen gekennzeichnet. Bei Versuchszeit 1150 s kam das System zur Löschmitteleinbringung zum Einsatz. Den zeitabhängigen Verlauf des Volumenstroms zeigt Abbildung 36. Der aus dem Batteriesystem austretende Dampf zeigte, dass erfolgreich Wasser eingebracht werden konnte.

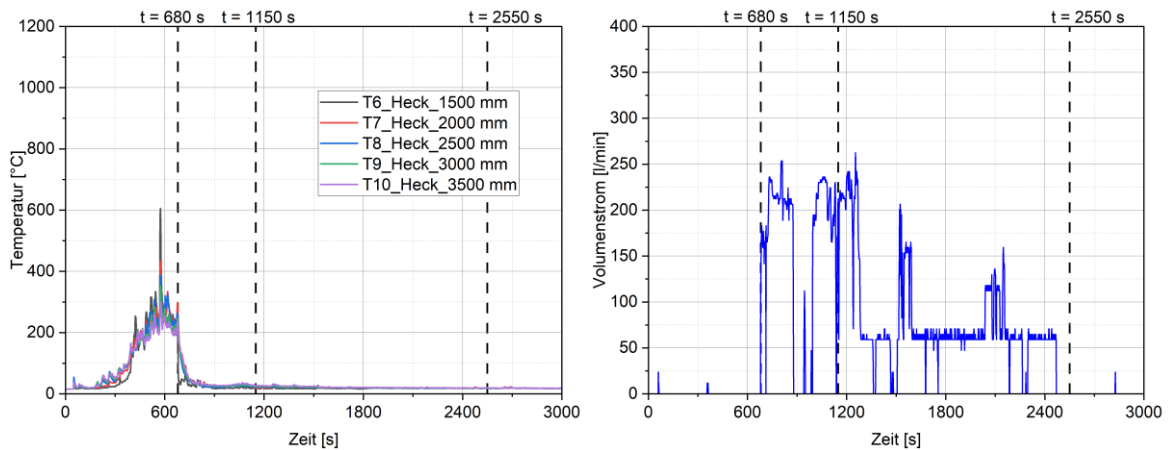


Abbildung 36: Zeitabhängige Verläufe für die Temperaturen (Messachse am Heck) und den Löschwasservolumenstrom des Versuchs LE_1

8.4.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Die untersuchten Systeme wurden in der Brandphase des Vollbrandes eingesetzt. Bevor sie zur Anwendung kamen, wurden die Fahrzeuge mittels HSR soweit abgelöscht, dass die Systeme unter Beachtung der Eigensicherung eingesetzt werden konnten. Es zeigte sich, dass die Brandintensität durch die gezielte Einbringung von Wasser zurückging. Für den Einsatz der Systeme im Vergleich zur „klassischen“ Brandbekämpfung mittels HSR ist ein zusätzlicher Trupp vorzuhalten.

Die Versuche LE_2 und LE_3 sowie HSR_3 und HSR_4 waren hinsichtlich der Brandzustände vergleichbar. In allen Fällen lag zum Zeitpunkt des Löschbeginns ein Vollbrand vor. Der Vergleich der Einsatzzeiten und der Löschwasservolumina in Tabelle 15 zeigt, dass bei der Brandbekämpfung mittels HSR und mit Systemen zur Löschmitteleinbringung vergleichbare Werte gemessen wurden.

Tabelle 15: Vergleich der Einsatzzeiten und Kühl-/ Löschwasserverbräuche der Versuche HSR_3, HSR_4, LE_2 und LE_3

Lfd Nr.:	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasser- verbrauch
HSR_3	1806 s	1,55 m ³
HSR_4	1459 s	0,96 m ³
LE_2	1064 s	1,1 m ³
LE_3	2001 s	1,4 m ³

Die Analyse der Messwerte zu Lösch- und Kühlwasserverbräuchen zeigt, dass bei den Versuchen mit HSR diese bis zum Ende der Brandbekämpfung eingesetzt wurden. Bei den Versuchen mit Systemen zur Löschmitteleinbringung mussten die HSR nach dem Einsatz der Systeme nur noch zur Ablöschung peripherer Kunststoffteile und für Restlöscharbeiten eingesetzt werden. Während die Systeme kontinuierlich Kühlwasser in die Batteriesysteme einbrachten, konnten die Einsatzkräfte z.B. nach Hotspots suchen. Es wurde außerdem festgestellt, dass die Systeme zur Löschmitteleinbringung auch nach Löschung des Brandes präventiv weiterliefen, was zum Aufwuchs der Löschwasserverbräuche führte. Gleichzeitig bedeutet die Einbringung von Kühlwasser aber eine erhöhte Sicherheit vor Wiederentzündung.

Es wird eingeschätzt, dass der Einsatz der Systeme zur Löschmitteleinbringung in der Phase der „exponentiellen Zunahme der Brandintensität“ gemäß Tabelle 9 einen größeren Mehrwert hinsichtlich Löschwasserersparnis und Einsatzzeit hat. So hätte das Einbringen von Löschwasser in das Batteriesystem im Versuch HSR_2, bei dem über eine Einsatzzeit von fast 90 Minuten 6,7 m³ Wasser verbraucht wurde, wahrscheinlich zu einer deutlichen Reduzierung der Einsatzzeit und des Löschwasservolumens geführt.

Beim Einbringen von Löschwasser in der Brandentstehungsphase, in der noch eine ganze Reihe von Batteriemodulen intakt sind, muss berücksichtigt werden, dass ggf. ein noch unversehrtes Modul penetriert wird. Der durch die eingetriebene Metallspitze und das eingeleitete Wasser resultierende Kurzschluss kann zur Forcierung des Brandes führen. Diesbezüglich werden im Teilschritt 2 des Projektes weitere Untersuchungen durchgeführt.

8.4.4 Externe Kühlung mittels spezieller Kühlaraturen

Die feuerwehrspezifischen Merkblätter verweisen im Kontext der Brandbekämpfung auf Kühlmaßnahmen. Dadurch sollen die im TR befindlichen Zellen gekühlt werden. Die Maßnahmen zielen aber auch darauf ab, die noch nicht im TR befindlichen Zellen und Module vor einer Erwärmung zu schützen. Im Rahmen eines Versuches kam ein exemplarisch ausgewähltes System zur externen Kühlung (EK) mit einem Durchfluss

von 400 l/min bei 8 bar zum Einsatz. Analog zu den Versuchen mit HSR und Systemen zur Löschmitteleinbringung wurde das Batteriesystem eines Fahrzeugs mittels Metaldorn penetriert. Die Aufstellung der Trupps erfolgte gemäß Tabelle 8. Die angewendete Taktik ist in Abbildung 37 visualisiert. Der Angriffstrupp, bestehend aus TrFü A1.1 und TrM A1.2, brachte die Kühlarmatur unter dem Fahrzeug zum Einsatz.

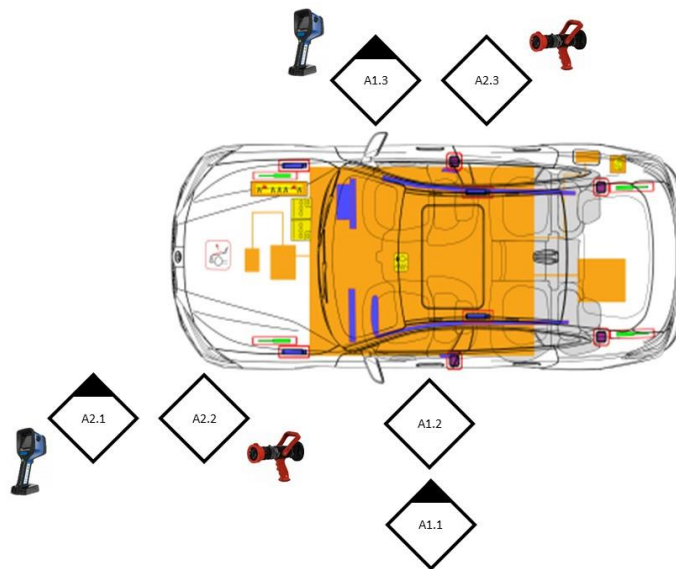


Abbildung 37: Taktikschema der Brand- und Löschversuche mit einem System zur externen Kühlung

8.4.4.1 Ergebnisse des Versuches mit externer Kühlung

Wie bei den zuvor vorgestellten Versuchen, wurde das Fahrzeug durch die Einsatzkräfte nach der Vorbrennzeit bei Versuchszeit 915 s mittels HSR soweit abgelöscht, dass die Kühlarmatur bei Versuchszeit 1037 s zum Einsatz gebracht werden konnte (siehe Abbildung 38). Der Erfolg der Löschmaßnahmen zeigte sich, wie in Abbildung 38 zu erkennen, anhand fallender Temperaturen an der mittleren Messachse. Anschließend wurde die Brandbekämpfung mittels HSR bis zum vollständigen Verlöschen der Flammen fortgesetzt. Ab Versuchszeit 1500 s mussten die HSR wegen zurückgehender Flammen nur noch sporadisch eingesetzt werden. Um einen möglichen Effekt der Kühlarmatur zu bestimmen, wurde anders als in den Versuchen mit HSR ab diesem Zeitpunkt weitestgehend auf Kühlmaßnahmen, vor allem im Fahrzeuginnenraum, verzichtet. Aufgrund weiter fallender Temperaturen und rückläufiger Dampfungwicklung wurde die Armatur bei Versuchszeit 1929 s abgeschaltet.

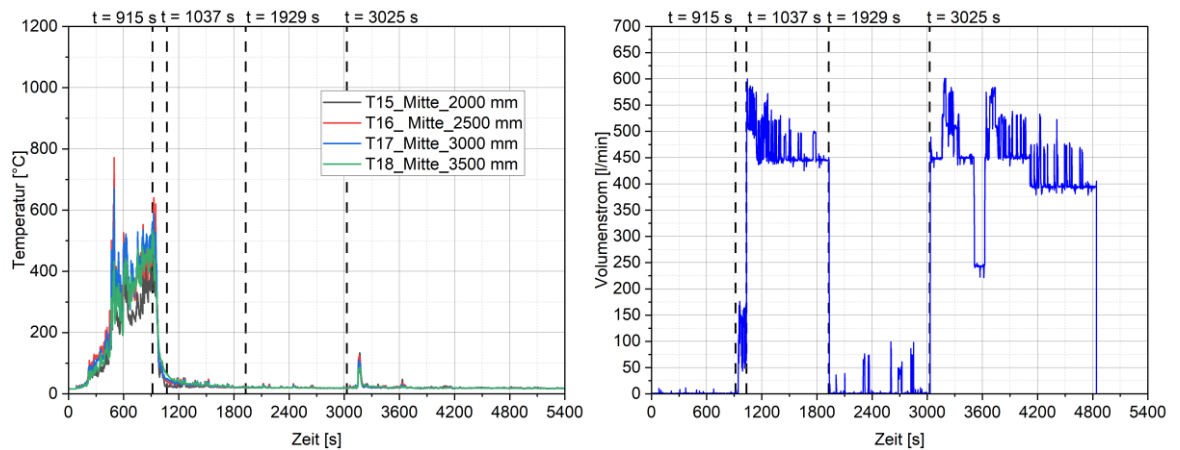


Abbildung 38: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches mit einer Kühlarmlatur

Ab Versuchszeit 2911 s intensivierte sich die Rauchentwicklung. Dies deutete auf die Forcierung der Reaktion im Batteriesystem hin. Die Kühlarmlatur wurde daraufhin bei Versuchszeit 3025 s erneut eingeschaltet. Das von unten applizierte Wasser konnte jedoch nicht verhindern, dass es nach der weiteren Intensivierung der Rauchentwicklung bei Versuchszeit 3149 s zu einer räumlich auf den Fahrzeuginnenraum begrenzten Durchzündung entstandener Ventinggase kam. Die Flammen konnten mittels HSR nur wenige Sekunden später gelöscht werden. Der Durchfluss der Kühlarmlatur wurde infolge sinkender Temperaturen bei Versuchszeit 3506 s auf 250 l/min reduziert. Zu einer erneuten, jedoch weniger stark ausgeprägten, Flammenbildung kam es bei Versuchszeit 3620 s. Der Durchfluss der Kühlarmlatur wurde wieder auf den Ursprungswert von 450 l/min erhöht. Bei der Löschung der Flammen und der Kühlung des Innenraums des Fahrzeugs kam es zur Bildung großer Mengen Dampf, der zur Nullsicht in der Umgebung des Fahrzeugs führte. Das deutet darauf hin, dass insbesondere im Bodenbereich des Innenraums infolge nicht durchgeführter Kühlmaßnahmen mittels HSR hohe Temperaturen herrschten. Bis zum Versuchsende bei 4840 s gingen die Temperaturen weiter zurück. Flammen traten nicht mehr auf. Kumuliert über den gesamten Einsatz wurde für Lösch- und Kühlmaßnahmen ein Wasservolumen von $22,4 \text{ m}^3$ verbraucht.

8.4.4.2 Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund begrenzter Ressourcen konnte nur ein Versuch mit einer Kühlarmlatur durchgeführt werden. Die nachfolgenden Erkenntnisse müssen mangels Vergleichswerten durch Folgeversuche verifiziert werden. Wegen annähernd gleicher Einsatztaktik und einem bei Start der Brandbekämpfung vorliegenden Vollbrand wird der Versuch im Folgenden in Relation zu den Löschversuchen HSR_1, HSR_3 und HSR_4 gesetzt. In diesen drei Versuchen lag der Fokus nach dem Ablöschen des Brandes auf der Kühlung im Fahrzeuginneren sowie an Front und Heck. Im hier vorgestellten Versuch kam nach der Löschung des Brandes zur Batteriekühlung statt HSR die Kühlarmlatur zum Einsatz. Die verwendete Kühlarmlatur konnte ohne Schwierigkeiten durch eine einzelne Person unter dem Fahrzeug positioniert werden.

Die Brandversuche, zum einen gelöscht mit HSR und zum anderen gekühlt mit der speziellen Armlatur, verliefen hinsichtlich der Einsatzzeit und den Wasserverbräuchen sehr unterschiedlich. Bei den drei Versuchen HSR_1, HSR_3 und HSR_4 wurde das Feuer spätestens 2072 s nach Beginn der Brandbekämpfung für gelöscht erklärt. Es wurden im Maximum 6 m³ Wasser verbraucht. Im Versuch mit der Kühlarmlatur lag die Einsatzzeit mit 3925 s fast doppelt so hoch. Die Löschwassermenge war mit 22,4 m³ fast 4-Mal so hoch.

Zunächst kann eingeschätzt werden, dass der Löschangriff mittels HSR zum Erfolg führte und der Brand des Batteriesystems trotz noch „aktiver“ Module wirksam bekämpft werden konnte. Es zeigte sich aber, dass trotz enormer Wassermengen, die Kühlung durch eine unter dem Fahrzeug positionierte Kühlarmlatur nicht genügt, um das Gesamtsystem zu kühlen. Die mögliche Taktik, sich nach dem Ablöschen des Fahrzeugs ausschließlich auf die Kühlung unter dem Fahrzeug zu konzentrieren, führt aufgrund des hohen Wärmeleitwiderstandes der einzelnen unterschiedlich gut leitenden Schichten unterhalb der Batteriemodule (siehe Abbildung 2) offensichtlich nicht zur nachhaltigen Temperatursenkung. Dies wurde durch die späteren, räumlich auf den Fahrzeuginnenraum begrenzten, Durchzündungen gezeigt. Die beteiligten Einsatzkräfte schätzten im Nachgang des Versuchs ein, dass Kühlmaßnahmen mit HSR, insbesondere im Bodenbereich des Innenraums, effektiver gewesen wären und die Einsatzzeit verkürzt hätten. Dass die Kühlung notwendig gewesen wäre, zeigte die massive Dampfbildung bei der Durchführung von Lösch- und Kühlmaßnahmen im

Bodenbereich des Innenraums im Verlauf der Durchzündungen. Es wurde festgestellt, dass bei der Kühlung von unten mit deutlich höheren Löschwassermengen gerechnet werden muss. Es zeigte sich ebenfalls, dass ein Großteil des von unten applizierten Wassers ungenutzt, also ohne Kühleffekt, abfloss.

8.4.5 Brandbegrenzungsdecken

Im Rahmen zweier Versuche mit unterschiedlichen Fahrzeugmodellen sollte der mögliche Mehrwert von Brandbegrenzungsdecken (BBD) untersucht werden. Bei beiden Versuchen kam dasselbe Deckenmodell zum Einsatz. Analog der o.g. Versuche sollte der erste Löscheinsatz mit HSR nach einer Vorbrennzeit von 15 Minuten erfolgen. Im Versuch BBD_1 lag zu dieser Zeit ein Vollbrand vor, sodass die Löscharbeiten mittels HSR unmittelbar erfolgen konnten. Aus dem Fahrzeug im Versuch BBD_2 traten zu diesem Zeitpunkt lediglich Ventinggase aus. Als sich das Fahrzeug nach 25 Minuten in der Phase der exponentiellen Zunahme der Brandintensität befand, wurden auch hier die Löscharbeiten mittels HSR begonnen (Taktikschema siehe Abbildung 30). Wenige Minuten nach Beendigung der ersten Löscharbeiten kamen die Decken zum Einsatz. Vorausgegangen waren die Einschätzungen der Einsatzkräfte, dass sie gefahrlos angewendet werden können. Die Decken wurden ausgehend von der Front über die Fahrzeuge gezogen. Dies erfolgte nach Umstellung der Trupps gemäß des in Abbildung 39 dargestellten Taktikschemas.

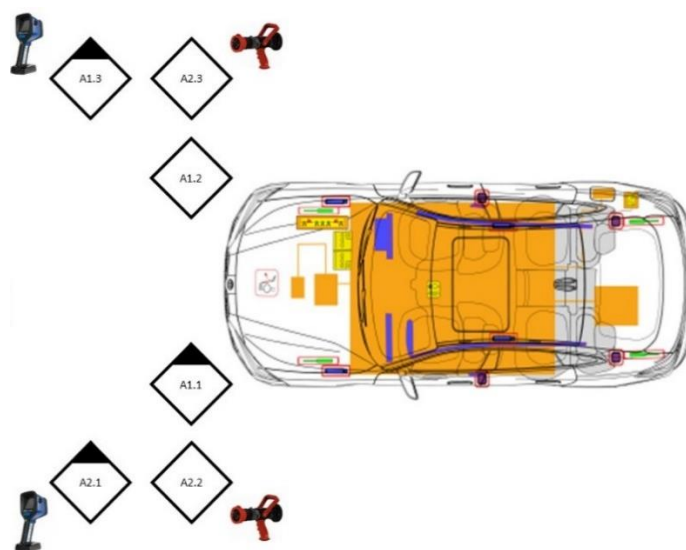


Abbildung 39: Taktikschema der Brand- und Löscharbeiten mit BBD

Die Brandverläufe und die sich anschließenden Brandbekämpfungsmaßnahmen verliefen unterschiedlich. Im Folgenden werden daher beide Versuche vorgestellt. Die Diskussion erfolgt gemeinsam am Ende des Kapitels. Die zur Löschung notwendigen Löschwasservolumina und die Einsatzzeiten zeigt die Übersicht in Tabelle 16.

Tabelle 16: Vergleich der Einsatzzeiten und Kühl-/ Löschwasserverbräuche der Versuche BBD_1 und BBD_2

Lfd Nr.:	Beginn Löscharbeiten mittels HSR	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserver- brauch
BBD_1	931 s	7374 s	1,3 m ³
BBD_2	1517 s	2864 s	2,95 m ³

8.4.5.1 Ergebnisse des Versuches BBD_1

Nachdem, wie in Abbildung 40 anhand fallender Temperaturen zu erkennen ist, ein Großteil der Flammen mittels HSR gelöscht waren, kam durch einen Trupp bei Versuchszeit 1226 s die BBD zum Einsatz. Er wurde gemäß o.g. Taktikschema durch zwei Trupps geschützt. Die Flammen verlöschen sofort.

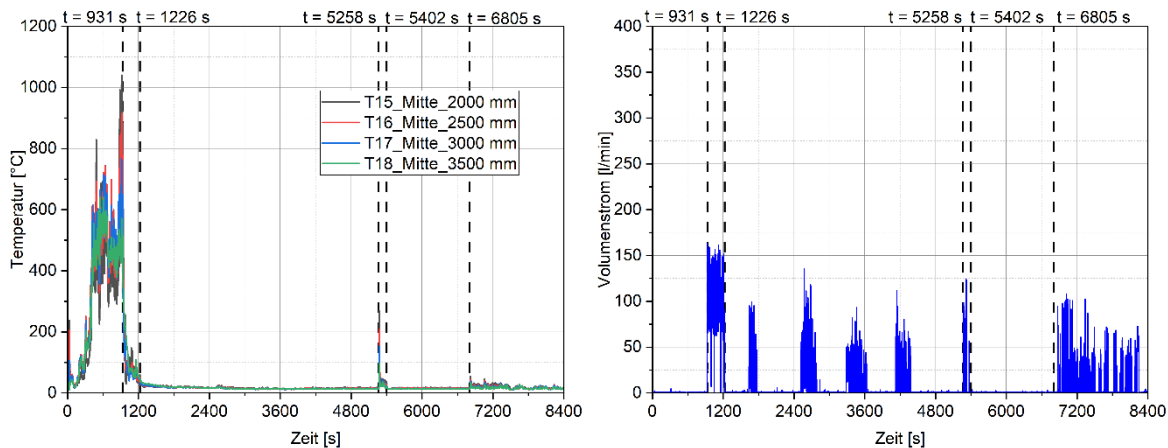


Abbildung 40: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches BBD_1

Die Momentaufnahmen in Abbildung 42 zeigen die Situation nach dem Auflegen der BBD im Abstand von ca. 30 s. Es ist ersichtlich, dass die Reaktionen der im Batteriesystem noch „aktiven“ Batteriemodule weiter voranschritt. Immer dann, wenn Zellen thermisch durchgingen, war dies von außen durch pumpende Bewegungen der BBD erkennbar. In Abbildung 41 sind diese Ereignisse anhand steigender Temperaturen an

den Messstellen T12_Fahrer_Kopf und T14_Fahrzeug_Hutablage zu erkennen. Wenige Sekunden später traten am Übergang zwischen der BBD und dem Boden zyklisch Ventinggase aus. Zur Entzündung kam es mangels einer Zündquelle nicht.

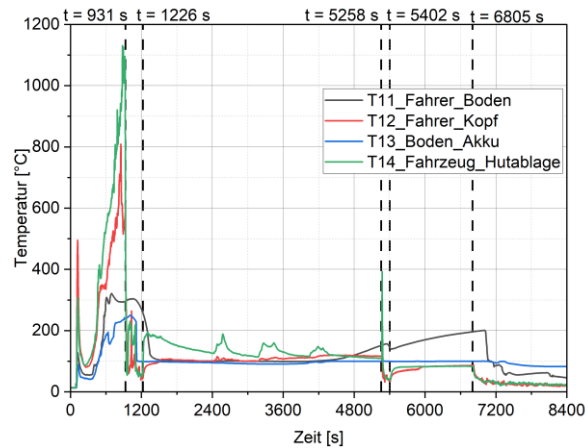


Abbildung 41: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Innenraum des Fahrzeugs im Versuch BBD_1

Im Bild 4 in Abbildung 42 ist zu erkennen, dass sich der Brandraum infolge der intensiven Freisetzung von Ventinggasen sukzessive füllte. Um eine Durchzündung wie im Referenzversuch 2 zu verhindern, wurden zur Verwirbelung und Verdünnung Sprühstöße in die Umgebung des Fahrzeugs abgegeben.

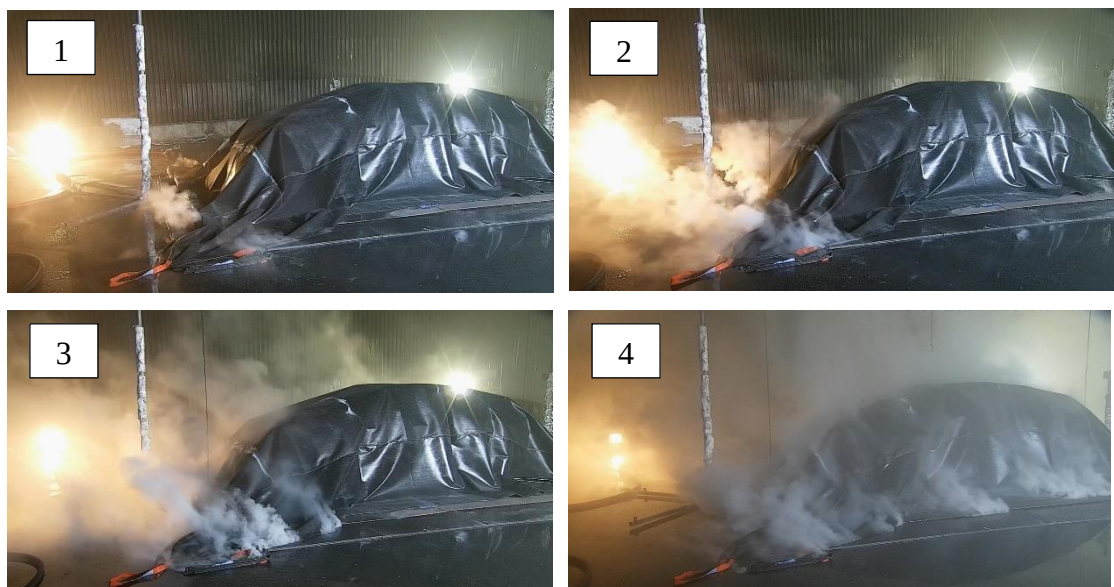


Abbildung 42: Momentaufnahmen nach dem Auflegen der BBD im Versuch BBD_1

Die vierfache Wasserabgabe bei den Versuchszeiten 1500 s, 2500 s, 3300 s und 3900 s ist im rechten Bild in Abbildung 40 zu erkennen. Etwa 15 Minuten nach der letzten erkennbaren Reaktion wurde die Decke bei Versuchszeit 5258 s abgenommen. Die Zufuhr von Luftsauerstoff führte dazu, dass sich das unter der Decke befindliche Vielstoffgemisch brennbarer Gase und Dämpfe sofort entzündete. Dies ist im linken Bild in Abbildung 40 anhand steigender Temperaturen erkennbar. Nach Flammenlöschung mittels HSR wurde die Decke bei Versuchszeit 5402 s wieder aufgelegt. Nach dem erneuten Entfernen der Decke bei 6805 s traten erneut Flammen auf. Mit Hilfe von HSR wurden in der Folge letzte Glutnester gelöscht und das Fahrzeug bis zum Versuchsende gekühlt.

8.4.5.2 Ergebnisse des Versuches BBD_2

Der Löschangriff mittel HSR erfolgte bei Versuchszeit 1517 s. Die Flammen waren nach knapp 3 Minuten so weit gelöscht, dass die BBD bei Versuchszeit 1686 s zum Einsatz kommen konnte. Abbildung 43 zeigt den Löscherfolg durch fallende Temperaturen an der mittigen Messachse. Zeitgleich mit dem Auflegen der BBD wurde im Fahrzeuginneren eine Kühllarmatur positioniert. Sie sollte jedoch erst dann eingeschaltet werden, wenn wie im Versuch BBD_1 große Mengen Ventinggase unter der BBD hervortreten. Mit Hilfe des aus der Kühllarmatur austretenden Wassers sollten die Ventinggase inertisiert und der Fahrzeuginnenraum, insbesondere im Bodenbereich, gekühlt werden. Die Maßnahme sollte dazu dienen, dass sich die unter der BBD sammelnden Gase beim Entfernen der BBD nicht entzünden. Die Lanze arbeitete mit einem Volumenstrom von ca. 75 l/min.

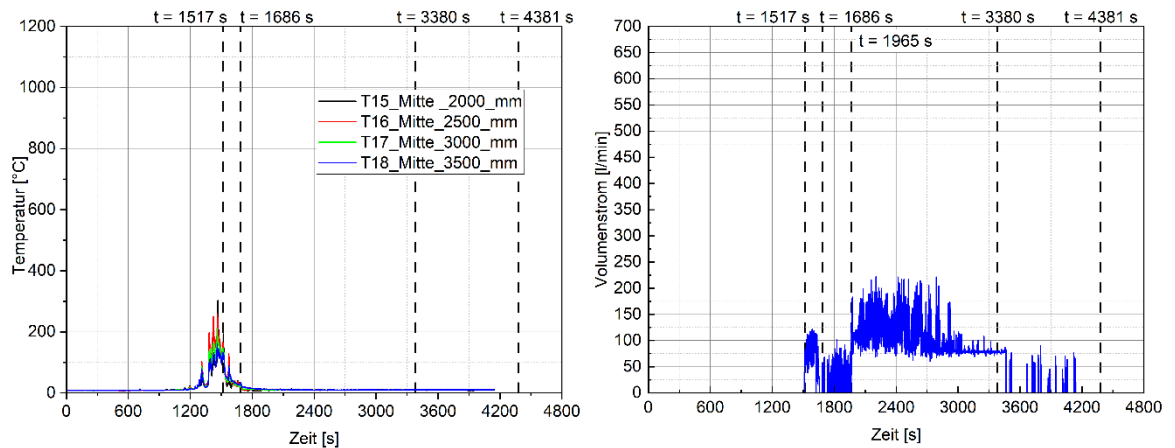


Abbildung 43: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (mittige Messachse) und Löschwasserverbrauch des Versuches BBD_2

Wie auch im Versuch BBD_1 traten am Übergang zwischen der BBD und dem Hal-
lenboden mit wechselnder Intensität Ventinggase aus (siehe Abbildung 44). Vorange-
gangen waren ploppende Geräusche von sich öffnenden Überdruckventilen der Batte-
riezellen. Dieser Vorgang wiederholte sich mehrfach. Die beiden eingesetzten Trupps
nutzten die HSR zur Verwirbelung und Verdünnung der unter der BBD austretenden
Ventinggase. Nachdem sich die Freisetzung wie in Bild 4 in Abbildung 44 zu erken-
nen, weiter intensivierte, wurde die im Fahrzeug positionierte Kühlarmatur bei Ver-
suchszeit 1965 s eingeschaltet.

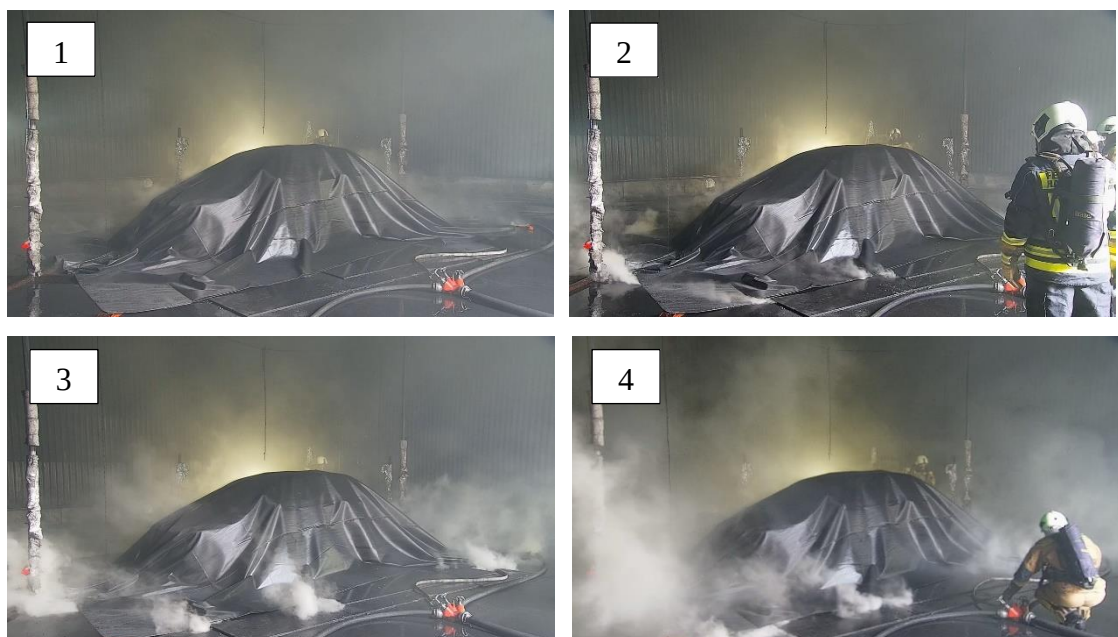


Abbildung 44: Momentaufnahmen nach dem Auflegen der BBD im Versuch BBD_2

Durch die Kühlung des unter der Decke befindlichen Vielstoffgemisches brennbarer Gase und Dämpfe, waren die Freisetzungseignisse an den Temperaturmessstellen im Innenraum des Fahrzeugs nicht zu erkennen. Durch das eingesetzte Wasser fielen die Temperaturen im Innenraum des Fahrzeugs um etwa 90 K (siehe Abbildung 45).

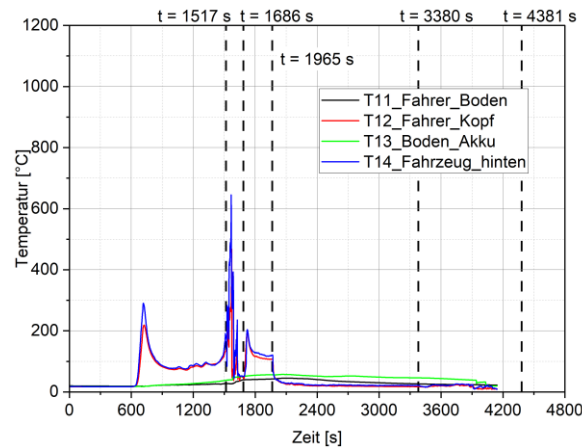


Abbildung 45: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen im Innenraum des Fahrzeugs im Versuch BBD_2

Trotz des eingesetzten Wassers gelang es nicht, das Batteriesystem wirksam zu kühlen, sodass in der Folge weitere Zellen thermisch durchgingen.

Die Einsatzkräfte sorgten mit Hilfe kurzer Sprühstöße aus den HSR bis zur Versuchszeit 3000 s für die Verwirbelung der unter der BBD austretenden Ventinggase. Bis zum Entfernen der Decke bei Versuchszeit 3380 s ging die Reaktion im Batteriesystem nach äußerlicher Wahrnehmung weiter zurück. Zu einer Durchzündung des im Innenraum vorliegenden Vielstoffgemisches brennbarer Gase und Dämpfe kam es beim Abnehmen der BBD aufgrund der betriebenen Kühlarmatur nicht. Bis zum Versuchsende bei 4381 s wurden mit Hilfe von HSR letzte gezielte Kühlmaßnahmen durchgeführt.

8.4.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Das im Rahmen der Versuche verwendete BBD-Modell wurde unmittelbar nach Beendigung erster Löscharbeiten angewandt. Beim potentiellen Zerfall von sauerstoffhaltigen Kathodenmaterialien wurde offenbar nicht ausreichend Sauerstoff freigesetzt, sodass es in beiden Versuchen zur sofortigen Löschung der Flammen, offenbar verursacht durch Sauerstoffreduktion, kam. Während eine erneute Flammenbildung durch

den Einsatz der BBD unterdrückt wurde, konnten die durch Wärmeexposition verursachten Reaktionen im Batteriesystem nicht gestoppt werden. Dies zeigte sich durch die zyklisch auftretenden Ventinggasfreisetzungen. Im Versuch BBD_1 fanden die Freisetzungen zwischen dem Auflegen der BBD und der Versuchszeit 4300 s, also über einen Zeitraum von mehr als 3000 s, statt. Danach stoppte die Reaktion, weil alle Batteriemodule¹⁴ den TR durchlaufen hatten und die Reaktion zum Erliegen kam. Im Versuch BBD_2 kam die Reaktion im Batteriesystem bereits etwa bei Versuchszeit 3000 s zum Stillstand¹⁵.

Bei einem der untersuchten Fahrzeuge entwickelte sich nach Abschluss der Löscharbeiten, zu einem späteren Zeitpunkt, erneut ein Brand. Der Fahrzeugbrand war konventionell mit Wasser gelöscht und mittels der Brandbegrenzungsdecke bis zum Ende der Brandreaktion im Batteriesystem abgedeckt worden. Nicht alle Batteriezellen waren thermisch durchgegangen und es verblieb ausreichend Restenergie, die zu einem Wiederentzünden geführt hat. Das Auftreten eines solchen Wiederentzündens kann abhängig von der Löschmethodik, vom Fortschritt der Brandreaktion innerhalb der Traktionsbatterie sowie der Beschädigungen der Batteriemodule und im Speziellen vom Einbringen von Löschwasser in das reagierende Batteriesystem sein. Gelangt Löschwasser in das Innere einer brennenden Traktionsbatterie, wird zum einen eine direkte Kühlwirkung erzielt und zum anderen als Sekundäreffekt das vollständige Durchreagieren der einzelnen Zellmodule gefördert. Darüber hinaus werden auch in Staubform vorliegende Brandfolgeprodukte gebunden. Grundsätzlich sollte nach jedem Elektrofahrzeugbrand unter Beteiligung des Batteriesystems der Zustand der Zellmodule entsprechend gängiger Vorgaben ermittelt und das Fahrzeug auf einer geeigneten Quarantänefläche gemäß [35] gelagert werden.

Im Versuch BBD_1 wurde die BBD bei einem im Vollbrand befindlichen Fahrzeug angewendet. Das Fahrzeug im Versuch BBD_2 war hinsichtlich des Brandverlaufes über einen Entstehungsbrand hinaus. Zum Zeitpunkt des Auflegens der BBD lag allerdings noch kein Brand vor, der sich auf das gesamte Fahrzeug ausgebreitet hatte. Vergleicht man beide Experimente mit Versuchen, bei denen sich die Fahrzeuge im

¹⁴ Im Rahmen der nachträglich durchgeführten Begutachtung des Batteriesystems hatten alle Batteriemodule unter Wärmefreisetzung reagiert.

¹⁵ Eine Begutachtung des Batteriesystems konnte nicht durchgeführt werden.

gleichen Brandzustand befanden, ist feststellbar, dass die Einsätze bei der Verwendung von BBD länger dauerten (siehe Tabelle 17). Die gemessenen Verbräuche für Lösch- und Kühlwasser lagen hingegen etwa in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der Einsatzzeiten und Wasserverbräuche bei Experimenten mit BBD, HSR und Systemen zur Löschmitteleinbringung

Lfd Nr.:	Einsatzzeit	Lösch-/ Kühlwasserverbrauch
BBD_1	7374 s	1,3 m ³
BBD_2	2864 s	2,95 m ³
HSR_1	2072 s	6,0 m ³
HSR_3	1806 s	1,55 m ³
HSR_4	1459 s	0,96 m ³
LE_1	1870 s	3 m ³
LE_2	1064 s	1,1 m ³
LE_3	2001 s	1,4 m ³

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass trotz der Löschung des Brandes, die Reaktion im Batteriesystem nicht beendet werden konnte. Die längeren Einsatzzeiten resultieren aus der Tatsache, dass infolge der Brandlöschung das Thermofeedback auf das Batteriesystem nicht unterbunden aber in seiner Intensität reduziert wurde. Dadurch verlief der TR von Zelle zu Zelle langsamer ab als bei den in Tabelle 17 dargestellten Versuchen mit HSR und Systemen zur Löschmitteleinbringung. Die Fotos in den Abbildungen 42 und 44 zeigen, dass bei der Verwendung von BBD mit der Freisetzung großer Mengen von Ventinggasen zu rechnen ist. Die Anwendung von BBD in geschlossenen Räumen sollte daher ausgeschlossen werden.

Durch die Versuchsbeteiligten wurde eingeschätzt, dass in der Zeit, in der die BBD auf den Fahrzeugen lagen, Kühlmaßnahmen mittel HSR effektiver gewesen wären. Dies hätte zur Reduzierung der Einsatzzeit geführt. Es wurde ebenso eingeschätzt, dass BBD für den Einsatz auf Quarantäneplätzen bei Abschleppunternehmen geeignet sein können. Dadurch können die Auswirkungen, wie der Vollbrand des Fahrzeuges oder Sekundärbrände in dessen Umfeld, die durch eine spätere Rückzündung aufgrund beschädigter Zelle möglicherweise auftreten, vermieden bzw. reduziert werden. Der TR

und die damit verbundene Freisetzung von Ventinggasen können wie oben beschrieben jedoch nicht unterdrückt werden. Denkbar ist der Einsatz einer BBD auch in besonderen Einsatzlagen, wie in Trinkwasserschutzgebieten, in denen es notwendig ist, den oberflächlichen Abfluss von kontaminiertem Löschwasser zu verhindern. Auch zum Schutz besonders schützenswerter Objekte (Gebäude, andere Fahrzeuge) in der direkten Umgebung kann die BBD dazu eingesetzt werden, eine Brandweiterleitung durch Wärmestrahlung zu verhindern.

8.5 Ergebnisse der chemischen Untersuchungen

8.5.1 Gasmessungen

Mittels FTIR, einem Wasserstoff- sowie einem Sauerstoffsensor wurden die Versuche gasmesstechnisch begleitet. Bis auf einen Versuch (BBD_2) fand die Probenahme im Innenraum an der Kopfstütze des Fahrersitzes statt. Im Folgenden werden die Resultate vorgestellt. Es ist zu beachten, dass bei den beschriebenen Versuchen Elektrofahrzeuge untersucht wurden. Viele Schadgase treten aber ebenfalls bei ICEV auf. Sofern Daten vorhanden sind, werden entsprechende Bezüge hergestellt.

Wie bei allen Verbrennungen werden Schadgase und typische Verbrennungsgase freigesetzt. Neben Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂), treten Verbindungen wie Schwefeldioxid (SO₂), Ammoniak (NH₃) und Stickoxide (NO_x) sowie diverse Kohlenwasserstoffe auf. Diese Gase treten auch bei den vorgestellten Versuchen auf, werden aber nicht in ihrer Gesamtheit im Einzelnen näher betrachtet. Lediglich relevante Verbindungen, die insbesondere bei Elektrofahrzeugen auftreten oder durch ihr zeitliches Verhalten hervorstechen, werden betrachtet.

Zunächst veranschaulicht Abbildung 46 die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen von O₂, CO und CO₂ für die Brand- und Löschversuche beispielhaft. Dargestellt sind die Konzentrationsverläufe des Versuches HSR_3, einem Vollbrandszenario. Die Beschreibung des Versuches, die Taktik zur Brandbekämpfung sowie gemessene Temperaturen und Löschwasserverbräuche sind im Kapitel 8.4.2 beschrieben. In den Konzentrationsverläufen der an Verbrennungsprozessen beteiligten Stoffe ist der Vollbrand sehr gut herauszulesen. Nach Penetration des Fahrzeuges ist ab einer Zeit von 95 s eine stetig steigende Brandintensität zu erkennen. Die Gasmessungen im Inneren

des Fahrzeuges geben die Entwicklung des Brandes durch eine fallende O_2 - und steigende CO - und CO_2 -Konzentrationen wieder. Die Konzentrationen der drei Stoffe bleiben trotz Schwankungen auf dem entsprechenden Niveau. Erst mit Einsatz der Löschmaßnahmen steigt der O_2 -Gehalt auf die in der Atmosphäre übliche Größenordnung und die Konzentrationen von CO und CO_2 sinken durch die erfolgreiche Brandbekämpfung im Innenraum des Fahrzeuges ab. Die Konzentrationsverläufe der drei Stoffe in der Abbildung 46 sind charakteristisch an der Position der Kopfstütze im Inneren des Fahrzeuges bei dem Szenario Vollbrand und dem Einsatz von Hohlstrahlrohren als Brandbekämpfungsmittel.

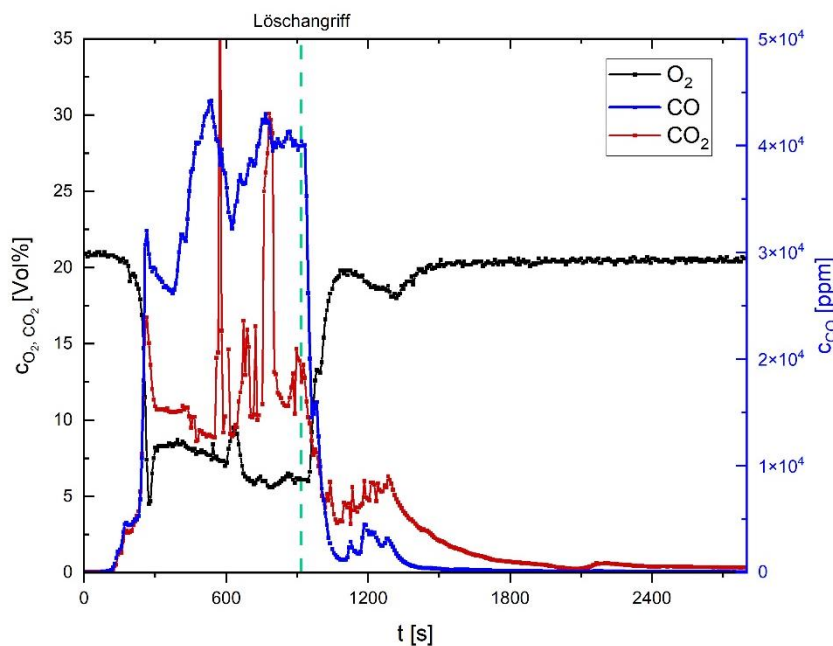


Abbildung 46: Konzentrationsverläufe von O_2 , CO und CO_2 für Versuch HSR_3

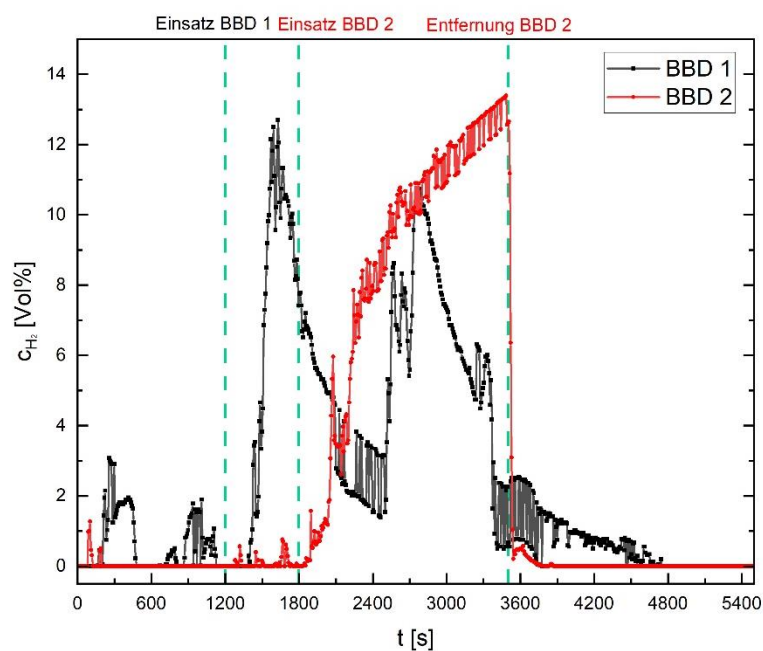
Interessant ist unter anderem die Freisetzung von Wasserstoff. Dieser entsteht bei Zersetzungsreaktionen innerhalb der Batteriezellen. Beim Austritt größerer Mengen entsteht eine explosionsfähige Atmosphäre (UEG 4,0 Vol.-%) [36]. In der folgenden Tabelle 18 sind die gemessenen maximalen Wasserstoffkonzentrationen zusammengefasst.

Tabelle 18: Maximale gemessene Wasserstoffkonzentrationen für die Brand- und Löschversuche

	HSR	LE	EK	BBD	Referenz	ohne Akku
Wasserstoff H ₂ [Vol.-%]	0,7	0,34	Keine Daten	12,7 – 13,4*	13,4	0,5

* unterhalb des Fahrzeugs gemessen

In der folgenden Abbildung 47 sind die Konzentrationsverläufe von Wasserstoff für die Versuche BBD_1 und BBD_2 vergleichend dargestellt.

**Abbildung 47:** Verläufe der Wasserstoffkonzentrationen im und unterhalb des Fahrzeugs für die Brand- und Löschversuche mit Brandbegrenzungsdecke (BBD_1: Messstelle Kopfstütze; BBD_2: Messstelle unterhalb des Fahrzeugs)

Nach Einsatz der BBD stiegen durch die fortwährende Freisetzung von Ventinggasen (siehe hierzu Abbildung 42 für BBD_1 und Abbildung 44 für BBD_2) die Wasserstoffkonzentrationen stetig an, wodurch sich unter der Decke eine explosionsfähige Atmosphäre ausbildete. In beiden Fällen lagen die Maximalkonzentrationen bei über 10 Vol.-%. Die unterschiedlichen Verläufe der Wasserstoffkonzentrationen in den beiden Versuchen sind mit großer Wahrscheinlichkeit den verschiedenen Messpositionen geschuldet. Es ist nachvollziehbar, dass nicht jede Freisetzung von Ventinggasen im unteren Fahrzeugbereich auch an der Kopfstütze durch die Messwerterfassung registriert wird. Deshalb kommt es zu Schwankungen der Wasserstoffverläufe bei BBD_1.

Bei BDD_2 hingegen befindet sich die Messstelle zur Gasentnahme unter dem Fahrzeug und damit näher im Bereich der Gasfreisetzung. Laut Abbildung 47 sank im Experiment BDD_2 nach dem Entfernen der Decke die Konzentration des Wasserstoffs schlagartig an dieser Messposition, da kaum noch ein Gasaustritt aus dem Akku zu verzeichnen war und die geringen Gasmengen nun entweichen konnten.

Die Bildung einer explosiven Atmosphäre führte, wie im Kapitel 8.4.5.1 beschrieben, beim Abnehmen der Decke bei Versuchszeit 5258 s zu einer Durchzündung. Die Ursache hier liegt darin, dass unterhalb der Brandbegrenzungsdecke ein Wärme- und Gasstau erfolgt. Die Decke lag nicht formschlüssig auf dem Fahrzeug. Dadurch konnten sich beim TR entstehende Stoffe auf Grund ihrer Dichte im oberen Bereich der Decke konzentrieren. Hierdurch entstand unterhalb der Decke ein Vielstoffgemisch, welches u.a. Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ethan und Wasserdampf enthielt. Viele dieser Stoffe sind brennbar und können eine explosionsfähige Atmosphäre bilden. Unter der Brandbegrenzungsdecke gab es diverse heiße Oberflächen, die als Zündquellen in Frage kamen. Sofern ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht, erfolgt eine Verbrennung. Während sich die Decke auf dem Fahrzeug befand, sank der Sauerstoffanteil unter der Decke, was neben dem Verbrennungsprozess, der abläuft so lange Sauerstoff ausreichend vorhanden ist, auch an Pyrolyseprozessen in der Rauchgasschicht begründet liegt. Hierbei werden langkettige Kohlenwasserstoffe in kürzere und leichter entzündbare Kohlenwasserstoffe gecrackt. Dem unter der Decke entstandenen Gasgemisch wurde durch Herunternehmen der Decke der notwendige Sauerstoff zugeführt, was zu der besagten Durchzündung führte. Im Fall dieses Versuches wurden die Flammen mittels HSR abgelöscht und die Decke bei der Versuchszeit 5402 s wieder auf dem Fahrzeug positioniert.

Im Fall einer Einzelzellbeschädigung, bspw. durch Penetration, treten Ventinggase aus. Neben bereits erläuterten Wasserstoff werden auch organische Carbonate freigesetzt. Sie werden als Elektrolytgemisch, bestehend aus mehreren nichtwässrigen Lösungsmitteln sowie thermischen und dendriten-/kristallhemmend wirkenden Stabilisatoren, eingesetzt [12]. Folgende sechs dieser Verbindungen wurden messtechnisch erfasst:

- Dimethylcarbonat (DMC),
- Diethylcarbonat (DEC),

- Ethylmethylcarbonat (EMC),
- Ethylencarbonat (EC),
- Propylencarbonat (PC),
- Vinylencarbonat (VC).

Zwar konnten alle Verbindungen detektiert werden, jedoch lässt sich eine Konzentration nur bedingt angeben. Laut den Messergebnissen liegen die Konzentrationen oberhalb des Kalibrierbereichs des Messgeräts, wie in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Oberste Grenze des Kalibrierbereichs der organischen Carbonate

	DMC [ppm]	DEC [ppm]	EMC [ppm]	EC [ppm]	PC [ppm]	VC [ppm]
Oberste Grenze	> 1.000	> 200	> 1.000	> 200	> 200	> 200

Die Resultate der Messungen sind zumindest als qualitativer Nachweis eindeutig anzuerkennen. Auch dass sich die Konzentrationen nicht nur in den unteren Grenzen der Kalibrierung bewegten, lässt sich daraus ableiten. Wegen diverser Querempfindlichkeiten und Überlagerungen, unter anderem aufgrund der hohen Konzentrationen und Komplexität des Rauchgasgemischs, können an dieser Stelle keine genaueren Konzentrationsangaben zu den auftretenden Carbonaten erfolgen.

Eine weitere interessante Komponente hinsichtlich der betrachteten Thematik ist Fluorwasserstoff (HF). Die Verbindung entsteht nach Gleichung 2 unter anderem bei der Zersetzung des Leitsalzes Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6).



Kommt das Salz mit Wasser, bereits Luftfeuchtigkeit ist ausreichend, in Kontakt, bildet sich neben HF auch als reaktive Zwischenstufe Phosphorylfluorid (POF_3), ein stechend riechendes Gas, welches an der Luft schwach raucht [37] und sogar Glas angreift [38]. Toxikologische Daten stehen für diese Verbindung nicht zur Verfügung, dennoch reagiert es mit zahlreichen organischen Verbindungen oder mit Wasser unter Bildung von HF. Chlorierte Analoga (POCl_3 ; Phosphorylchlorid) sind teilweise sogar noch toxischer als HF [39]. Mit der verwendeten Gasmessstechnik war ein qualitativer

Nachweis dieser Verbindung bei allen Versuchen positiv. Eine Quantifizierung war nicht möglich, da entsprechende Referenzspektren nicht zur Verfügung standen. Die Bildungsrate konnte anhand der sich verändernden Intensitäten aus den IR-Spektren abgeleitet werden. Darüber hinaus wurde Carbonylfluorid (COF_2) als ein weiteres Zwischenprodukt gemessen. Dieses kann u.a. mit Wasser unter Bildung von HF reagieren [40]. Die folgende Tabelle 20 zeigt die ermittelten Maximalkonzentrationen bei den unterschiedlichen Brand- und Löschversuchen.

Tabelle 20: Maximale HF und COF_2 -Konzentrationen aller Brand und Löschversuche

	HSR	LE	EK	BBD	Referenz	Ohne Akku
HF [ppm]	4,8 bis > 10	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
COF_2 [ppm]	19 - 170	65 - 151	126	170 – 900*	87 - 900	18

* unterhalb des Fahrzeugs gemessen

Lediglich ein Versuch lieferte als punktuelle Maximalkonzentration einen Wert von unter 10 ppm. Wie sich aus den angegebenen Werten erkennen lässt, liegen die Werte für die HF-Konzentration oberhalb des zugrundeliegenden Kalibrierbereichs, auch bei dem Fahrzeug ohne Batteriesystem. Bei letzterem liegt die höchste gemessene HF-Konzentration um 10 ppm. Das bei Fahrzeugbränden HF auftritt, ist bekannt. Als Quellen sind neben Klimaflüssigkeiten u.a. bestimmte Kunststoffteile, Leitungen und elektrische Kabel zu nennen [41].

Extrapoliert man die Messwerte der Experimente mit den BEV, unter Annahme eines linearen Zusammenhangs, lassen sich HF-Konzentrationen abschätzen, die dem drei- bis fünffachen, bei einem Versuch sogar dem zehnfachen, der hier angegebenen Maximalen HF-Konzentration vermuten lassen. Das ist mit Ergebnissen aus der Literatur durchaus vergleichbar [42].

Beispielhaft zeigt Abbildung 48 die nach Gleichung 3 auf die Maximalkonzentration normierten Konzentrationsverläufe der Zwischenprodukte COF_2 , POF_3 sowie den Verlauf von HF für Versuch LE_1.

$$c_{norm} = \frac{c(t)}{c_{max}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Hierbei sind:

c_{norm} : Normierte Konzentration

$c(t)$: Konzentration in Abhängigkeit der Zeit

c_{max} : Maximale Konzentration

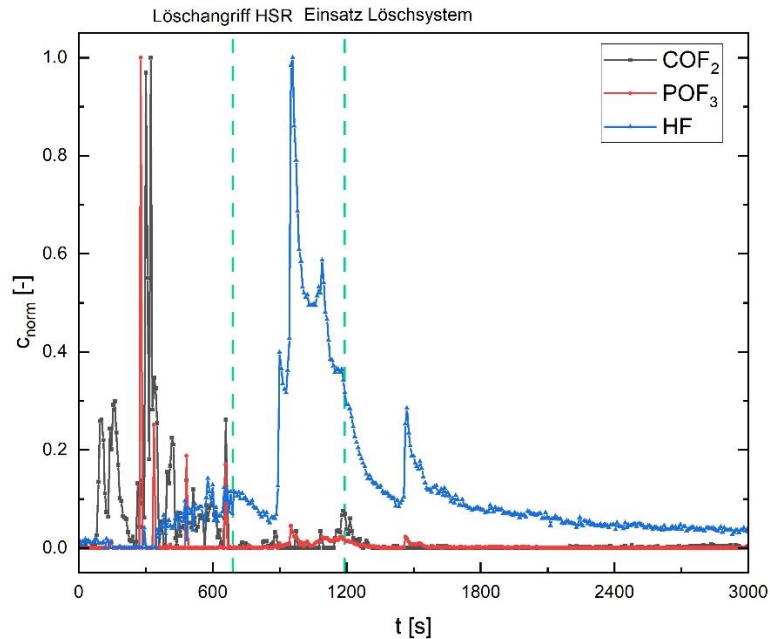


Abbildung 48: Zeitliche Verläufe der normierten Konzentration von COF_2 , POF_3 und HF für Versuch LE_1

Im Versuch LE_1 zeigten sich vor dem Löschangriff und dem Einsatz des Systems zur Löschmitteleinbringung hauptsächlich die Zersetzungsprodukte des Leitsalzes. Nach ungefähr fünf Minuten war an der Kopfstütze ein Anstieg der HF -Konzentration erkennbar, der mit dem Abklingen der Zwischenprodukte einherging. Nach dem Löschangriff zeigte sich ein Anstieg der HF -Konzentration, der im Anschluss allmählich abklang. Es ist anzunehmen, dass es durch die Einbringung von Wasser zu einer Reaktion der Zwischenprodukte unter Bildung von HF kam. Dieses Verhalten ist im Bereich um den Löschangriff (600 s bis 900 s) in Abbildung 48 zu erkennen. Auch nach Beginn des Löschangriffs eskalierten weitere einzelne Module, was ebenfalls mit dem Ausstoß der erwähnten Stoffe einherging. Hier ist anzunehmen, dass diese durch das Wasserüberangebot direkt zu HF weiter reagierten, was den Anstieg der HF -Konzentration erklärt.

Chlor- (HCl) und Cyanwasserstoff (HCN) zählen gleichfalls zu den typischen Verbrennungsprodukten. Abgesehen von einem Versuch (HSR_2) wurden HCl-Konzentrationen von über 1.000 ppm gemessen. Im diesem Versuch hatte die gemessene Konzentration einen Maximalwert von 538 ppm. Aus einem Versuch mit einem Fahrzeug ohne Batteriesystem ergab sich punktuell eine maximale HCl-Konzentration von 953 ppm. Die ermittelten HCN-Maximalkonzentrationen sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Maximale HCN-Konzentrationen aller Brand- und Löschversuche

	HSR	LE	EK	BBD	Referenz	Ohne Akku
HCN [ppm]	641 – 2.766	225 – 2.800	232	242 – 2.506	1.787 – 2.061	4.900

Die Bildung von HCN und dessen Konzentration ist temperaturabhängig [43]. Durch Abweichungen im Versuchsablauf, die Einfluss auf lokale Temperaturverteilungen ausüben, lassen sich die Schwankungen erklären. Des Weiteren sind durch beispielsweise zerborstene Fenster andere Gaszusammensetzungen am Messpunkt hinter der Kopfstütze zu erwarten. Trotz Bemühungen ließen sich die Löschbedingungen nicht über alle Versuche reproduzieren, was die Schwankung der Konzentrationen begründet. Abbildung 49 demonstriert den beispielhaften Verlauf, der auf die Maximalkonzentrationen normierten Konzentrationsverläufe von HCl und HCN, für den zweiten Referenzversuch.

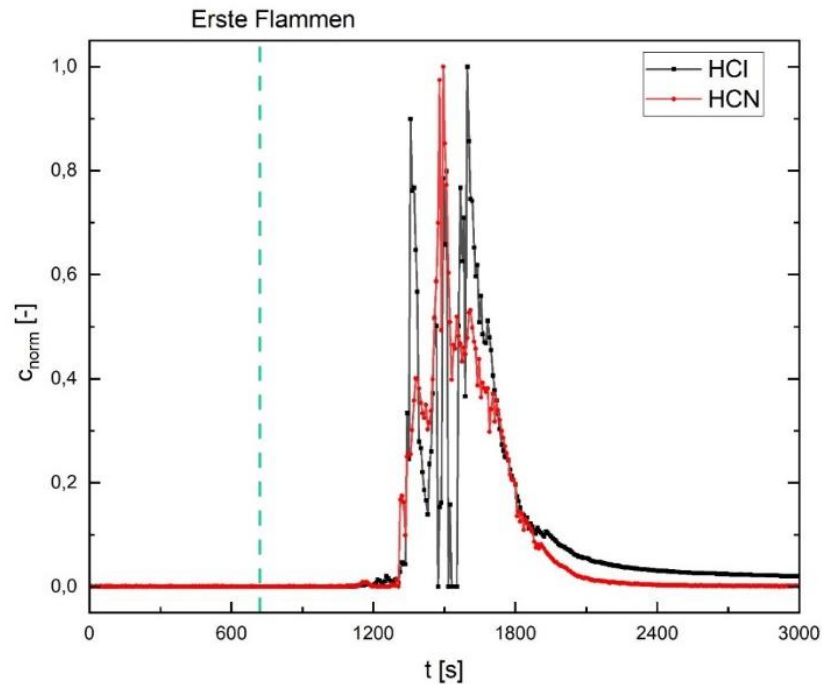


Abbildung 49: Zeitliche Verläufe der normierten Konzentration von HCl und HCN für Referenzversuch 2

Während des Brandes zeigten sich mit Verzögerung auch im Innenraum die typischen Verbrennungsgase HCN und HCl. Nach der Brandinitiierung variierte die Dauer, bis sich die Brände auf den Fahrgastinnenraum ausbreiteten und damit auch die Zeiten bis zur Erfassung der Verbrennungsgase. Zurückzuführen lässt sich das u.a. auf unterschiedliche Randbedingungen und Brandverläufe. So war in manchen Fahrzeugen beispielsweise ein Panoramadach eingebaut, welches während des Brandes zerbarst, was wiederum einen Einfluss auf die Gaszusammensetzung nahm. Des Weiteren blieben manche Fenster während des Brandverlaufs intakt, während andere aufgrund von Einsatztaktiken beim Löschangriff oder infolge des Brandes selbst zerstört wurden. Diese und weitere Abweichungen führten zu Problemen bei der Interpretation der Ergebnisse.

Der Gasanalytik nachgeschaltet war eine Gaswäsche. Hierfür wurde das Messgas durch eine definierte Menge deionisierten Wassers geleitet. Dieses wurde nach den Experimenten hinsichtlich des sich verändernden pH-Wertes und einzelner Anionen besonders gut wasserlöslicher Verbindungen photometrisch untersucht. Aus den Messwerten ließen sich die Gehalte berechnen, die in Tabelle 22 zusammengefasst dargestellt sind.

Tabelle 22: pH-Werte und Anionengehalte der Gaswaschwässer

	HSR	LE	EK	BBD
pH [-]	3,4 – 5,4	3,0 – 3,6	3,6	2,3 – 4,8
Chlorid [mg]	1.210 – 7.840	350 – 1.410	350	170 – 3.640
Fluorid [mg]	21 – 75	22 – 80	22	05 – 18
Cyanid [mg]	3,5	0,5 – 8	0,5	0,5 – 2

In allen Fällen zeigt sich eine Verschiebung des pH-Wertes in den sauren Bereich. Das weist auf säurebildende Gase hin. Dazu zählen u. a. SO_2 , HX (Halogenkohlenwasserstoffe), HCN und weitere. Die entsprechenden Anionen ließen sich analytisch nachweisen. Die dargestellten Gehalte geben eine Größenordnung der an der Kopfstütze erfassten Mengen an. Die Gehalte und Verteilungen decken sich mit den in den Gasmessungen ermittelten Konzentrationen von HCl, HF und HCN.

Zusammenfassend werden hier die Ergebnisse diskutiert. Typische Brandgase, wie CO_2 und CO, zeigten sich bei den Versuchen unter charakteristischem Sauerstoffabfall während der Vollbrandphase. Ebenso wurden SO_2 , NO_x , Ammoniak und niedermolekulare Kohlenwasserstoffe erfasst. Auf deren nähere Auswertung wurde verzichtet. Beispielhaft wurden die Konzentrationsverläufe von HCl und HCN gezeigt, die ebenfalls bei Verbrennungsprozessen entstehen. Der Fokus lag auf den für Elektrofahrzeuge als typisch angenommenen Stoffen.

So erreichten die gemessenen Wasserstoffkonzentrationen Werte oberhalb des UEG. Damit lag im Innenraum der Fahrzeuge nachweislich eine explosionsfähige Atmosphäre vor. Weiterhin wurde in einigen Versuchen im zeitlichen Verlauf der Brandausbreitung und deren Bekämpfung mehrfach die UEG überschritten, vgl. Abbildung 47, weshalb es im Versuchsablauf während der Brandbekämpfung zu Durchzündungen im Fahrzeuginneren kam. Des Weiteren wurden organische Carbonate erfasst, welche als Elektrolytgemisch in Batteriesystemen eingesetzt werden. Für DMC, DEC und EMC ließen sich Maximalkonzentrationen von über 1.000 ppm feststellen. Für die Verbindungen EC, PC und VC beliefen sich die Maximalkonzentrationen auf über 200 ppm. Dass keine genaueren Konzentrationen angegeben werden können, ist auf die Größenordnung des Versuchsszenarios zurückzuführen und zeigte sich wiederholt bei den Versuchen. Die aus der Konzentration und Komplexität der Dämpfe und

Rauchgase resultierenden Ausmaße an Störungen und verstärkten Querempfindlichkeiten waren stellenweise so intensiv, dass eine Auswertung der IR-Spektren nicht mehr möglich war. Die Messwerte lagen teils außerhalb des kalibrierten Messbereichs, was genaue Konzentrationsangaben erschwerte oder teils unmöglich machte. Zukünftig soll mit einer Verdünnung des Messgases Abhilfe geschaffen werden. Eine entsprechende Vorrichtung liegt am IBK bereits vor und befindet sich derzeit im Status der Evaluierung.

Auch unterschiedliche Randbedingungen und Brandverläufe führten wiederholt zu Interpretationsproblemen bei den Ergebnissen der Gasmessungen. Dazu zählen u.a. das verzögerte Ausbreiten des Brandes auf den Fahrgastraum, da die Messtelle an der Kopfstütze angebracht war und Abweichungen bei Fahrzeugaufbau und -ausstattung.

Für die grafische Darstellung der zeitlichen Konzentrationsverläufe erfolgte für bestimmte Verbindungen eine Normalisierung der Messwerte auf den jeweiligen Maximalwert der entsprechenden Einzelkomponenten. Dass das Gesamtsystem des Experimentes nicht abgeschlossen war, womit einhergehend kein abgeschlossener Bilanzraum vorlag, ist der Grund hierfür. Auch liefern die punktuellen Messungen durchaus Spielraum für Interpretationen. Diese Form der Darstellung lieferte grundsätzliche Konzentrationsverläufe, die eine Vergleichbarkeit der einzelnen in diesem Projekt durchgeführten Versuche untereinander ermöglichte. Eine Vergleichbarkeit der Messdaten mit Literaturwerten ist, alleine durch die umfänglichen Rahmenbedingungen der hier vorgestellten Versuche, nicht zulässig.

HF wurde in Zusammenhang mit auftretenden Gasen wie COF_2 und POF_3 ebenfalls eindeutig nachgewiesen. Auch hier ließen sich aufgrund des begrenzten Kalibrierbereichs keine genauen Konzentrationen angeben. Dennoch können durch Extrapolation HF-Konzentrationen abgeschätzt werden. Die Konzentrationen betrugen ein Vielfaches des Kalibrierbereichs. Bei einem Versuch mit einem Fahrzeug ohne Batteriesystem trat HF ebenso auf, aber die Untersuchungen weisen auf höhere HF-Konzentrationen bei Elektrofahrzeugen mit Batteriesystemen hin. Untermauert wird das u.a. von den niedrigeren COF_2 -Konzentrationen bei einem Fahrzeug ohne Batteriesystem. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Bildung von HF auch bei Bränden von konventionellen Fahrzeugantrieben in der Vergangenheit bereits

eine relevante Rolle gespielt hat. Wie bereits oben erwähnt wurde, ist HF auch ein Produkt bei der Zersetzung von bestimmten Typen von Kühlflüssigkeiten und Kunststoffen. Als Vergleich können hierzu die Messdaten aus dem Versuch ohne Akku herangezogen werden. Eine Aussage, ob die hier gemessenen Größenordnungen anscheinbar mehr auftretenden HF bei Elektrofahrzeugen mit Batteriesystem aus einsatztechnischen Gesichtspunkten relevant sind, kann an dieser Stelle nicht getätigt werden.

Pauschal können keine Aussagen für Einsatzkräfte abgeleitet werden, da die Gasmessungen im Innenraum (eine Ausnahme: Versuch BBD 2) stattfanden. Einige gemessene Verbindungen bei den Referenzversuchen unterschieden sich nicht in der Positionsabhängigkeit der Messstelle (innen und außen). Andere hingegen wiesen Unterschiede auf. Eine pauschale Aussage ist an dieser Stelle nicht möglich.

8.5.2 Schadstoffuntersuchungen der Lösch- und Kühlwässer

Die bei den einzelnen Experimenten angefallenen Lösch- und Kühlwässer wurden zeitnah zunächst am IBK auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, ausgewählte Anionen, den CSB- und AOX-Gehalt untersucht. Die Ergebnisse der photometrischen Messungen sind in Tabelle 23 zusammengefasst. Dem sind zum Vergleich Grenzwerte der Abwasserbeseitigungssatzung des Wolmirstedter Wasser- und Abwasserzweckverbandes (WWAZ) gegenübergestellt. Ergänzt werden diese durch Werte aus verschiedenen Anwendungsbereichen der Abwasserverordnung (AbwV).

Tabelle 23: Am IBK durchgeführte Wasseruntersuchungen der Lösch- und Kühlwässer im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44] (die Bereiche kennzeichnen den Minimal- und Maximalwert verschiedener Versuche)

	HSR	LE	EK	BBD	WWAZ
pH [-]	6,6 – 8,2	7,4 – 10,2	7,4	7,2 – 7,4	6 - 10
Elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	1.943 – 7.220	4.400 – 4.663	4.663	1.908 – 2.627	keine Daten
Chlorid [mg/l]	772 – 1.650	167 – 469	167	175 – 394	300
Sulfat [mg/l]	743 – 890	743 - 890	613	646 – 738	400
Fluorid [mg/l]	7,5 – 15,3	6,2 – 72,1	1,26	15,7 – 39,0	60
Phosphat [mg/l]	0,17 – 0,97	0,17 – 0,97	0,19	0,7 – 2,8	keine Daten
Cyanid [mg/l]	0,05	0,01 – 0,03	0,03	0,05	5,0
CSB [mg/l]	394 - 512	245 – 1.035	245	1.953 – 2.769	600
AOX [mg/l]	0,26 – 1,19	0,19 – 0,92	0,19	0,53 – 1,22	0,5

Die pH-Werte änderten sich nur geringfügig. Bei zwei Versuchen wies das aufgefangene Löschwasser einen basischen pH-Wert auf, während bei den übrigen Proben die pH-Werte im neutralen Bereich lagen. Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit deuten auf ein hohes Maß der im Wasser gelösten Ionen bzw. leitfähigen Teilchen hin. Zu diesen gehören unter anderem Magnesium, Calcium, Chlor, Stickstoff und Schwefelsalze. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Indiz für den Mineralisationsgrad des Wassers und gilt als ein Indikator für die Wasserqualität. Eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit ist ein Zeichen für eine Beeinträchtigung des Wassers durch Kontaminationen. Als Vergleich dienten die folgenden Werte:

- Destilliertes Wasser: bis zu 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$,
- Trinkwasser: durchschnittlich zwischen 300 bis 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und
- Meerwasser: 56 mS/cm [45].

Die erfassten Anionen liegen, mit Ausnahme von Cyanid, meist über dem angegebenen Grenzwert. Ebenso verhalten sich die Konzentrationen von CSB und AOX. Auch wenn individuelle Werte unterhalb der angegebenen Grenzen liegen, gibt es keine Löschwasserprobe, die den Einleit- und Benutzungsbedingungen im vollen Umfang entspricht [44].

Vereinzelt wurden Löschwasserproben zusätzlich auf ihre PAK-Belastung untersucht. Die untersuchten Lösch- und Kühlwasserproben weisen einen PAK-Gehalt von 14,5 mg/l bis 16,5 mg/l auf. In der Abwasserverordnung (AbwV), Anhang 46, ist der Grenzwert mit 0,05 mg/l angegeben [46]. Dieser ist deutlich überschritten. Die darüber hinaus in einem akkreditierten Prüflabor ermittelten Schwermetallbelastungen sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24: Schwermetallgehalte bestimmt nach DIN EN 38407-39 (2011-09) im Vergleich mit Grenzwerten der Abwasserbeseitigungssatzung nach §11 Abs. 6 des WWAZ [44]

Element	HSR	LE	BBD	WWAZ
Fe [mg/l]	2,47 – 3,44	12,4	2,67 – 2,84	5,0 ¹
Cu [mg/l]	0,19 – 4,97	2,47	0,20 – 0,58	1,0 ¹
Mn [mg/l]	3,73 – 13,7	19,7	3,73 – 18,4	3,0 ¹
Co [mg/l]	1,79 – 17,5	10,7	0,70 – 12,7	0,5 ¹
Ni [mg/l]	9,39 – 94,6	44,1	2,19 – 50,8	0,1 ¹
Pb [mg/l]	0,023	0,026	< 0,02	0,2 ¹
Zn [mg/l]	0,93 – 8,19	9,28	2,21 – 4,1	5,0 ¹
Cr [mg/l]	0,048	0,052	0,14	0,2 ¹
V [mg/l]	< 0,02	0,058	< 0,02	4 ²
Li [mg/l]	4,73 – 88,5	25,3	31,5 – 36,9	keine Daten
Mg [mg/l]	27,9 – 38,9	79,9	25,3 – 27,7	keine Daten
Al [mg/l]	1,68 – 32,2	46,7	0,63 – 7,21	3 - 6 ²

¹Grenzwert WWAZ §11 Abs. 6

² AbwV (Wert abhängig vom Anwendungsbereich)

Wie bereits bei den Untersuchungen in Tabelle 23 zeigen die Schwermetallbelastungen eine breite Verteilung, wobei auch hier keine der untersuchten Proben den Anforderungen für eine Einleitung des Abwassers im vollen Umfang entspricht. Besonders

hervortretend sind die Gehalte an Aluminium, Lithium, Mangan, Cobalt und Nickel. Typische Metalle, die bei der Herstellung von Batteriesystemen bspw. als Zellelektrodenmaterialien zum Einsatz kommen [12].

Die Wasseruntersuchungen der in Kapitel 7.3.2 getauchten Batteriemodule wurden ebenfalls auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, ausgewählte Anionen sowie den CSB- und AOX-Gehalt untersucht. Die Ergebnisse der photometrischen Messungen sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Am IBK durchgeführte Wasseruntersuchungen der bei Modulversuchen angefallenen Tauchwässer im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44]

	Lagerung bei -10°C	Lagerung bei 20°C	Lagerung bei 40°C	WWAZ
pH [-]	9,7	9,4	9,0	6 - 10
Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]	16667	17800	17533	keine Daten
Chlorid [mg/l]	48,7	50,4	50,1	300
Sulfat [mg/l]	119,7	111,3	118,0	400
Fluorid [mg/l]	35,7	59,2	70,7	60
Phosphat [mg/l]	0,7	1,5	14,3	keine Daten
Cyanid [mg/l]	< 0,01	0,047	0,023	5,0
CSB [mg/l]	< 100	< 100	< 100	600
AOX [mg/l]	0,2	0,2	0,2	0,5

Die pH-Werte zeigen erwartungsgemäß eine Verschiebung in den basischen Bereich. Auch hier deuten die Werte der elektrischen Leitfähigkeit auf ein hohes Maß gelöster Ionen hin. Im Fall der Lagerung bei 40 °C liegt der Fluoridwert oberhalb des angegebenen Grenzwertes. Die ermittelten PAK-Konzentrationen liegen zwischen 0,028 ppm und 1,036 ppm und damit niedriger als bei den aufgefangenen Lösch- und Kühlwässern. Allerdings muss hier der hohe Verdünnungsgrad beachtet werden. Zwar bringt die Verdünnung mit viel Wasser eine Verringerung der Konzentrationen mit sich, da aber die Ausgangskonzentrationen nicht bekannt sind, können dennoch Parameterkonzentrationen oberhalb geltender Grenzen angesiedelt sein.

In der folgenden Tabelle 26 sind die Messwerte der Schwermetalluntersuchungen zu den getauchten Batteriemodulen nach Kapitel 7.3.2 dargestellt.

Tabelle 26: Schwermetallgehalte bestimmt nach DIN EN 38407-39 (2011-09) im Vergleich mit Grenzwerten nach §11 Abs. 6 der Abwasserbeseitigungssatzung des WWAZ [44]

	Lagerung bei -10 °C	Lagerung bei 20 °C	Lagerung bei 40 °C	WWAZ
Fe [mg/l]	0,127	0,061	0,052	5,0 ¹
Cu [mg/l]	0,264	0,068	0,164	1,0 ¹
Mn [mg/l]	1,113	0,391	0,896	3,0 ¹
Co [mg/l]	1,584	0,506	1,20	0,5 ¹
Ni [mg/l]	8,49	2,66	6,3	0,1 ¹
Pb [mg/l]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,2 ¹
Zn [mg/l]	0,043	0,041	0,022	5,0 ¹
Cr [mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,2 ¹
V [mg/l]	0,003	0,004	0,005	4 ²
Li [mg/l]	85,0	139	104	keine Daten
Mg [mg/l]	4,24	1,29	1,43	keine Daten
Al [mg/l]	63,2	61,0	75,3	3 - 6 ²

¹Grenzwert WWAZ §11 Abs. 6

² AbwV (Wert abhängig vom Anwendungsbereich)

Hier zeigt sich, dass auch eine hohe Verdünnung kein Garant für geringe Schadstoffbelastungen sein muss. Ein großer Teil der Werte liegt oberhalb der zugrunde gelegten Grenzwerte, insbesondere Nickel, Cobalt und Aluminium.

Die vorgestellten Messdaten der Analyse des Löschwassers machen deutlich, dass das Löschwasser eine zu hohe Belastung an Schwermetallen und anderen Stoffen aufweist, um es ohne Behandlung in das öffentliche Kanalnetz zu leiten. Schlussfolgernd sollte im Einsatz möglichst mit so wenig Wasser wie möglich die Brandbekämpfung durchgeführt werden, was in den Versuchen dieses Projekts bei korrekter Anwendung der richtigen Einsatzmittel gezeigt werden konnte. Wie bei anderen Brandereignissen auch, sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, die Ausbreitung des Löschwassers zu verhindern und dieses ggf. Aufzufangen und umweltgerecht zu entsorgen.

Neben den Erkenntnissen zum Umgang mit dem Löschwasser, kann auch aus den Daten geschlossen werden, dass es bei der Brandbekämpfung von brennenden Elektrofahrzeugen mit Batteriesystem möglicherweise zu einer Schwermetallbelastung der Einsatzkleidung der Vorort agierenden Einsatzkräfte kommen kann. Wieweit dieser Sachverhalt bezüglich Kontaminationsverschleppung sowie bei Fragestellung der Reinigung der Einsatzkleidung eine Rolle spielt, soll im Teilschritt 3 des Projektes anhand von Experimenten näher beleuchtet werden.

8.5.3 PSA-Kontamination

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden zahlreiche Proben zur Untersuchung der PSA-Kontamination gewonnen. Zunächst muss eine geeignete Methode entwickelt werden, die belastbare Ergebnisse erzielt und eine Bewertung der Verunreinigungen sowie der von ihnen ausgehenden Gefahren ermöglicht. Derzeit laufen in Zusammenarbeit mit dem TÜV Rheinland und einem weiteren akkreditierten Labor Vorversuche zur Entwicklung einer geeigneten Methodik zur quantitativen Erfassung der Kontaminationen. In den Teilschritten 2 und 3 des Projekts werden die Ergebnisse an entsprechender Stelle vorgestellt.

9 VORGESCHLAGENE EINSATZTAKTIK

Feuerwehren müssen sich bei Einsätzen unter Beteiligung von E-Fahrzeugen, bei denen erkennbare Reaktionen im Batteriesystem vorliegen, auf die nachfolgend aufgeführten drei Brandphasen/-szenarien einstellen. Bereits bei der Aufstellung einer Alarm- und Ausrückeordnung ist eine sichere Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl von Atemschutzgeräteträgern zwingend zu gewährleisten. Zur Sicherstellung des Brandschutzes wird der Einsatz zweier Löschfahrzeuge mit Staffelbesatzung (je vier Atemschutzgeräteträger sowie ein Einheitsführer, der unter Pressluftatmer vorgehen kann) empfohlen. Die Einsatzkräfte sollten um einen Leitungsdienst (Zugführer) mit einfachen Führungsmitteln ergänzt werden. Dabei ist die Verfügbarkeit eines Tablets/ Smartphones mit Internetzugang sicherzustellen. Alternativ sollten die Rettungsdatenblätter auf dem lokalen Datenträger verfügbar sein.

1. Das Fahrzeug ist unter Beteiligung des Batteriesystems im Vollbrand.
2. Das Fahrzeug ist in der Brandentstehungsphase mit Flammenbildung an Radkästen, im Bereich der Schweller sowie an Front und Heck.
3. Aus dem Fahrzeug bzw. der Batterie treten lediglich Ventinggase aus.

Die Einsatztaktik ist auf die vorliegende Brandphase auszurichten. In den durchgeführten Experimenten erwies es sich als zweckmäßig, die Brandbekämpfung mindestens durch zwei Trupps mit Hohlstrahlrohren durchführen zu lassen. Die Strahlrohre sollten auf eine geringere 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 der Front und dem Heck (auch an den Radkästen). Daher sollten sich die Brandbekämpfungsmaßnahmen auf diese Bereiche konzentrieren. Beide Trupps sollten sich daher dem Fahrzeug über die Front und das Heck nähern. Auch die in den recherchierten Merkblättern formulierte Taktik der diagonalen Annäherung an das Fahrzeug ist zielführend. Es sind weiterhin die üblichen sicherheitsrelevanten Gesichtspunkte, wie die Gefahr eines rollenden Fahrzeuges oder die Sicherheitsabstände zu elektrischen Anlagen bei Löschmaßnahmen, zu beachten. Für die Suche nach Hotspots sowie Öffnungen zur gezielten Löschmitteleinbringung ist einem Einheitsführer (Staffelführer) unter umluftunabhängigem Atemschutz eine WBK bereitzustellen.

Diese im experimentellen Einsatz bewährte personelle Aufstellung wird für die im Folgenden vorgeschlagenen Taktikoptionen empfohlen. Bei der Einsatzbearbeitung aller obigen Fälle ist darauf zu achten, dass zu Beginn des Einsatzes versucht wird, Türen, Fronthaube und Heckklappe zu öffnen, da sich diese infolge der Wärmeexposition zu einem späteren Zeitpunkt ggf. nicht mehr öffnen lassen. Unterstützend kann beispielsweise ein Halligan-Tool o.Ä. verwendet werden. Diese Maßnahme stellt außerdem sicher, dass sich im Innenraum keine explosionsfähige Atmosphäre bildet. Es sollte dafür Sorge getragen werden, dass Türen und Klappen nicht permanent geöffnet bleiben, um das Eindringen von Flammen in den Innenraum und damit die Forcierung des Brandes zu verhindern.

Zur Informationsbeschaffung ist eine Erkundung notwendig. Beim Vorliegen eines Brandes muss diese während der Brandbekämpfung durchgeführt werden. Sie beinhaltet neben der G A M S – Regel auch die A U T O – Regel. Ein unverzichtbarer Bestandteil ist die Einsichtnahme in das fahrzeugspezifische Rettungsdatenblatt. Ihm können z.B. Angaben zur Lage der Trennstelle des Hochvoltsystems entnommen werden. Angaben zur Position und dem Aufbau des Batteriesystems sind insbesondere bei Anwendung eines Systems zur Löschmitteleinbringung essentiell, um die zum Zugang geeignete Position zu wählen. Die Rettungsdatenblätter geben ebenso Auskunft über die Lage von herstellerspezifischen konstruktiven Maßnahmen zur Löschmitteleinbringung in Batteriesysteme (vgl. Fireman Access bei Renault und Dacia). Der Einsatz eines Leitungsdienstes mit Tablet/ Smartphone und einfachen Führungsmitteln ist für diese Tätigkeiten zielführend.

Zur Temperaturüberwachung und -protokollierung empfiehlt es sich, dass Fahrzeug nach Abschluss der Brandbekämpfung mittel hydraulischen Rettungsgeräten oder sonstigen Hebewerkzeugen seitlich etwas anzukippen. Diese Maßnahme ermöglicht die bessere Sicht für die WBK von unten auf das Batteriesystem.

9.1 Fahrzeuge im Vollbrand unter Beteiligung des Batteriesystems

Dieser Brandzustand wurde im Forschungsprojekt umfassend untersucht. Beim Eintreffen der Kräfte an der Einsatzstelle muss zunächst der Brand der umgebenden Fahr-

zeugkarosserie mittels Hohlstrahlrohren gelöscht werden. Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass die Einsatzkräfte beim Eintreffen an der Einsatzstelle davon ausgehen können, 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.

Infolge der Wärmefreisetzung besteht die Möglichkeit, dass im Batteriesystem Löcher oder sonstige Öffnungen entstanden sind, über die Wasser in das Batteriesystem eingebracht werden kann. Existieren diese nicht, dauert die Bekämpfung des Batteriebrandes aufgrund der verdeckten Position unterhalb des Fahrzeugs länger. In diesem Fall führt die Anwendung von, mit geringen Volumenströmen eingestellten Hohlstrahlrohren dazu, dass die Batteriezellen kontrolliert ausreagieren können.

Die nachfolgenden zwei Taktikoptionen sind bei Einsätzen an Fahrzeugen in dieser Brandphase zielführend. Bei beiden Optionen muss mit Löschwasserverbräuchen von 1000 l bis 3000 l (entspricht der mitgeführten Löschwassermenge zweier Löschfahrzeuge) und mit einer Brandbekämpfungsdauer von 30 bis 45 min gerechnet werden. Der Einsatz einer Brandbegrenzungsdecke ist nicht zielführend, weil sich die Einsatzzeit verlängert und dies weitere Atemschutzgeräteträger erfordern würde. Auch der Einsatz einer Kühllarmatur unter dem Fahrzeug wird nicht empfohlen, weil äußerlich appliziertes Kühlwasser die Temperatur von bereits thermisch stark aufbereiteten Modulen nicht wirksam senken kann.

Option 1

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 gezielte Löschwasserapplikation mittels Hohlstrahlrohren ziel-

führend, um den Batteriebrand zu löschen und thermisch aufbereitete Module zu kühlen. Es wird empfohlen, dass der Einheitsführer zusätzlich Brechwerkzeug mitführt. Es ist auszuschließen, dass dieses zur Manipulation des Batteriesystems verwendet wird.

Option 2

Die Einsatzkräfte setzen zum Ablöschen des Fahrzeugbrandes Hohlstrahlrohre ein. Zur Löschung des Batteriebrandes werden unter Wahrung des Eigenschutzes Verfahren zur Löschmitteleinbringung angewendet. Hinsichtlich der personellen Aufstellung wird auf das Taktikschema in Abbildung 35 verwiesen. Danach werden die zwei Angriffstrupps um einen erfahrenen, fachkundigen Einheitsführer (z.B. erstes Löschfahrzeug) ergänzt, der eine WBK und Brechwerkzeug mitführt. 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.

9.2 Fahrzeuge in der Brandentstehungsphase mit aus dem Batteriesystem austretenden Flammen

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 übergeht. Dadurch wird verhindert, dass das ohnehin bereits im Anfangsstadium der Eskalation befindliche Batteriesystem durch das Thermofeedback weiter thermisch konditioniert wird. Dies würde zu einer weiteren Forcierung des Batteriebrandes führen. Es muss davon ausgegangen werden, dass durch die geringe Brenndauer keine Löcher oder sonstige Öffnungen im Batteriesystem entstanden sind. Durch das fehlende Thermofeedback des Vollbrandes kann angenommen werden, dass einzelne Batteriemodule noch nicht thermisch aufbereitet sind. Weiterhin kann nach aktuellem Erkenntnisstand nicht davon ausgegangen werden, dass die aus dem Batteriesystem austretenden gerichteten Flammen gelöscht werden können. Die Brandbekämpfungsmaßnahmen beschränken sich auf das kontrollierte Ausreagieren der Module im Batteriesystem. Gestützt werden diese Aussagen durch Erkenntnisse des im Kapitel 8.4.2 vorgestellten Experimentes HSR_2 und frei verfügbare Einsatzberichte und -videos wie [47]. Im durchgeführten Experiment HSR_2 war zur Löschung des

Fahrzeugs eine Wassermenge von $6,7 \text{ m}^3$ notwendig. Die Einsatzzeit betrug 86 min 30 s. Diese Parameter können als realistisch für derartige Einsätze angesehen werden.

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

Option 1

Die Brandbekämpfung sollten zwei zeitgleich agierende Trupps mit Hohlstrahlrohren sicherstellen, um die Brandausbreitung auf das Fahrzeug zu verhindern. Allerdings sollte Wasser nicht im Überfluss verwendet werden, weil ein Großteil unwirksam abfließt. Auch Kühlmaßnahmen im Fußraum der Fahrzeuge mittels eines der angewendeten Hohlstrahlrohre kann angedacht werden. Bei diesem Vorgang kann beim Vorhandensein, auch von außen nicht sichtbarer Öffnungen, Wasser zur Kühlung bzw. Löschung in das Batteriesystem eingebracht werden. 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

Wie in Option 1 muss durch die Einsatzkräfte die Brandausbreitung unterbunden werden. 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. Inwieweit durch die Anwendung eines solchen Systems der Brand durch die Anwendung einer Lanze/ eines Dorns forciert wird, muss in weiteren Versuchen im Teilschritt 2 des Projektes evaluiert werden.

9.3 Austritt von Ventinggasen aus dem Batteriesystem

Auch wenn keine Flammenbildung erkennbar ist, müssen alle am Fahrzeug tätigen Einsatzkräfte die vollständige Persönliche Schutzausrüstung einschließlich Pressluftatmer tragen.

Prioritär muss verhindert werden, dass sich die aus dem Batteriesystem austretenden Ventinggase entzünden. So kann die Brandausbreitung auf das Fahrzeug und das resultierende Thermofeedback unterbunden werden. Gelingt dies nicht, tritt das Fahrzeug die Brandphase 2 und anschließend ggf. Phase 1 ein.

Analog den Ausführungen des Kapitels 9.2, ist die im Projekt gewonnene Informationslage nicht ausreichend, um validierte Vorschläge zur Einsatztaktik zu unterbreiten. Als einsatztaktische Maßnahmen können sich nach aktuellem Erkenntnisstand die zwei in Kapitel 9.2 genannten Maßnahmen eignen. Allerdings soll im Unterschied zu diesen Maßnahmen die Flammenentstehung verhindert werden.

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.

9.4 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 (zwei Trupps des ersten Löschfahrzeugs).
- Die Erkundung des Fahrzeugs muss sichergestellt werden, um mögliche Öffnungen im Batteriesystem zu finden (Staffelführer des ersten Löschfahrzeugs unter Pressluftatmer).
- Es ist ein Sicherheitstrupp zu stellen (erster Trupp des zweiten Löschfahrzeuges).
- 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 sind 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.
- Erforderlich ist die Dokumentation der Einsatzmaßnahmen durch den Staffelführer des zweiten Löschfahrzeugs im Zusammenwirken mit dem Zugführer. Es sind beispielhaft folgende Daten zu erfassen
 - zeitlicher Ablauf,
 - Löschwasserverbrauch und dessen Verbleib (Mischkanal, Straßengraben etc.).
- Die Leitung des Einsatzes (z.B. Zusammenarbeit mit der Polizei und dem Abschleppunternehmen) obliegt dem Zugführer.
- Nach der Brandbekämpfung ist das Fahrzeug an ein Fachunternehmen zum Abtransport und zur sicheren Verwahrung zu übergeben. Hierzu ist ein Protokoll zu führen. Hier endet die Zuständigkeit der Feuerwehr.

10 AUSBLICK

In den vorangestellten Kapiteln wurden die Ergebnisse der bislang einmaligen Experimente im Einzelnen vorgestellt. Trotz des neu gewonnenen Wissens wurden Erkenntnislücken identifiziert, die es kurzfristig zu schließen gilt. Die wichtigsten dieser Fragen sollen im sich anschließenden Teilschritt 2 untersucht werden. Hier liegt der Fokus insbesondere auf der Evaluierung der Taktik bei BEVs, die sich aufgrund der beginnenden exothermen Reaktion im Batteriesystem in der Phase der Brandentstehung befinden. Im Besonderen ist zu klären, inwieweit Verfahren zur Löschmitteleinbringung dazu geeignet sind, den im Batteriesystem begonnenen TR zu beenden und nicht betroffene Batteriemodule vor einer Erwärmung zu schützen. Dabei wird auch die Frage zu beantworten sein, ob durch die Löschmitteleinbringung mittels Dornen, gleich ob handgeführt oder halbautomatisch, in der frühen Brandentstehungsphase eine Forcierung der Reaktion eintritt. Anschließend ist es angedacht, die dann weiter konkretisierten Ergebnisse auch an Fahrzeugen anderer Hersteller zu verifizieren.

Auf der Basis der Ergebnisse werden im Teilschritt 2 anschließend validierte Handlungsempfehlungen für die Brandbekämpfung von E-Fahrzeugen erstellt. Um den Transport der Informationen in die Fläche zu realisieren, werden z.B. für die Standortausbildung der Feuerwehren Deutschlands frei verfügbare und didaktisch aufbereitete Unterrichtspräsentationen erstellt.

Im bereits beim Fördermittelgeber beantragten Teilschritt 3 sollen die bereits in den Kapiteln 7.3.2, 7.3.3, 8.5.2 und 8.5.3 beschriebenen und bisher offen gebliebene Fragen zur Höhe von PSA- und Löschwasserkontaminationen beantwortet werden. Des Weiteren sollen konkrete Möglichkeiten von Löschwasserrückhaltmaßnahmen bei Brandeinsätzen im Zusammenhang mit E-Fahrzeugen evaluiert werden.

Dennoch ist absehbar, dass im Rahmen der bislang beantragten Projekte die Frage nach dem Brandverhalten von Fahrzeugen mit SOC-Werten kleiner als 80 % und den resultierenden Auswirkungen auf Gefahrenabwehrmaßnahmen nicht beantwortet werden kann. Daher wird derzeit intensiv nach entsprechenden Fördermöglichkeiten gesucht.

LITERATUR

Literaturverzeichnis

- [1] LECOCQ, Amandine (Hrsg.); BERTANA, Marie (Hrsg.); TRUCHOT, Benjamin (Hrsg.); MARLAIR, Guy (Hrsg.): *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*
- [2] DR. DANA MEIßNER: *Projekt ALBERO – AP 2.2 Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit möglicher Gefahren bei einfachem Transport bzw. bei Ladeprozessen von batteriebetriebenen Fahrzeugen auf Fährschiffen*. URL https://alberoprojekt.de/index_htm_files/AP%202.2%20Auswertung%20von%20Unfallstatistiken%20von%20Elektrofahrzeugen%20in%20Bezug%20auf%20die%20Unfallursache.pdf
- [3] JULIANE GUTMANN: *Wenn das E-Auto brennt: Die Feuerwehr kann mit Löschdornen den Akku mit Wasser fluten*. URL <https://www.tz.de/auto/elektroauto-fahrzeugbrand-akku-feuerwehr-autos-loeschen-91274704.html#:~:text=Dann%20helfe%20nur%20k%C3%BChlen%2C%20um%20den%20Brand%20unter,E-Autos%20mit%20hohem%20Zeitaufwand%20verbunden%2C%20so%20der%20ADAC.> – Aktualisierungsdatum: 2022-02-10 – Überprüfungsdatum 2022-06-03
- [4] DR. DANA MEIßNER: *Projekt ALBERO*. Oktober 2021
- [5] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG E.V.: *Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen -Akkus bei Fahrzeugbränden*. URL <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3907>. – Aktualisierungsdatum: 2020-07-28 – Überprüfungsdatum 2022-04-12
- [6] AGBFBUND UND DFV: *Merkblatt - Empfehlungen zur Brandbekämpfung von Kraftfahrzeugen mit elektrischen Antrieben*. Peter Bachmeier. URL <https://www.agbf.de/downloads-fachausschuss-vorbeugender-brand-und-gefahrenschutz/category/28-fa-vbg-oeffentlich-empfehlungen?download=356:2021-01-fachempfehlung-elektrofahrzeuge> – Überprüfungsdatum 2022-04-12
- [7] INSTITUT FÜR BRAND- UND KATASTROPHENSCHUTZ HEYROTHSBERGE: *Einsatzhinweise „Fahrzeuge mit Li-Ionen-Akkumulatoren“*. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum 2022-04-12

- [8] VFDB E.V.: *Merkblatt 06/04: Unfallhilfe und Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen.* – Aktualisierungsdatum: 2017-11-01
- [9] ÖSTERREICHISCHER BUNDESFEUERWEHRVERBAND: *Informationsblatt E 20 Einsatz mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen und deren Peripherie.* URL <https://www.bundesfeuerwehrverband.at/wp-content/uploads/2021/04/E-20.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 02/2021 – Überprüfungsdatum 2022-06-02
- [10] DIPL.-PHYS. KAROLA KEUTEL ; DR. RER. NAT. ANICA PULZ: *Gefahren durch die Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Ausrüstungsgegenständen der Feuerwehr.* November 2021
- [11] JÜRGEN GARCHE ; KLAUS BRAND: *Li-Battery Safety.* Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications : Elsevier, 2019
- [12] LYDIA DORRMANN ; DR. KERSTIN SANN-FERRO ; PATRICK HEININGER ; DR. JOCHEN MÄHLIß: *Kompodium: Li-Ionen-Batterien - Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen.* Oktober 2021
- [13] MIAO, Yu ; HYNAN, Patrick ; JOUANNE, Annette von ; YOKOCHI, Alexandre: *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements.* In: *Energies* 12 (2019), Nr. 6, S. 1074 – Überprüfungsdatum 2022-05-17
- [14] NIC – YVES KYSLER: *E-Mobilität vs. Garagenverordnung.* Wuppertal, Bergische Universität, Lehrstuhl für Chemische Sicherheit und. 2019-11-18 – Überprüfungsdatum 2022-05-19
- [15] WÄRMEPROZESS- UND KLIMAPRÜFTECHNIK MICHEL GMBH & CO. KG: *Sicheres Prüfen im Umfeld der E-Mobilität.* URL https://www.wkm-michel.de/fileadmin/user_upload/EUCAR_Hazard_Levels/WKM_erkla__rt_einfach_E-Mobilitaet_V4_03.pdf
- [16] MOTOR-TRAFFIC: *Batteriemodul Volkswagen 1.* URL <https://motor-traffic.de/bildergalerie.php?newsid=619585>
- [17] PASCAL VORWERK¹, SARAH-KATHARINA HAHN², CHRISTIAN DANIEL¹, ULRICH KRAUSE¹, KAROLA KEUTEL³: *Detection of Critical Conditions in Pouch Cells Based on Their Expansion Behavior*

- [18] WILLIAMS, Frederick W. ; BACK, Gerard G.: *Lithium Battery Fire Tests and Mitigation*. Fort Belvoir, VA, 2014
- [19] ROELAND BISSCHOP ; OLA WILLSTRAND ; FRANCINE AMON ; MAX ROSENGREN: *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*. 2019
- [20] HUANG, Peifeng ; WANG, Qingsong ; LI, Ke ; PING, Ping ; SUN, Jinhua: *The combustion behavior of large scale lithium titanate battery*. In: *Scientific reports* 5 (2015), S. 7788 – Überprüfungsdatum 2022-05-19
- [21] STAATLICHE FEUERWEHR SCHULE 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/
- [22] CONSTANTIN BERGANDER: *Das ist zu tun, wenn ein Elektroauto brennt*. URL <https://www.mobile.de/magazin/artikel/das-ist-zu-tun-wenn-ein-elektroauto-brennt-20738#brennendes-elektroauto-mehr-wasser-zum-loschen>. – Aktualisierungsdatum: 2020-08-05 – Überprüfungsdatum 2022-06-03
- [23] BMW GROUP: *Rettungsdatenblatt des BMW i4*. URL https://aos.bmwgroup.com/downloads/53c6c6aed14df870d5db808e81523cd7/62f6237e/rescue-information/bmwi/i4/VUL-REK-P-BMW_G26BEV_de-DE.pdf
- [24] OPEL AUTOMOBILE GMBH: *Rettungsdatenblatt des Opel Corsa e*. URL https://www.ifz-berlin.de/ret_deu_pdf/deu_ov_corsa_e_f_5.pdf
- [25] VOLKSWAGEN AG: *Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.4*. URL <https://www.volkswagen.de/de/besitzer-und-nutzer/wichtige-kundeninformationen/rechtliches/rescue-data.html>
- [26] VOLKSWAGEN AG: *Rettungsdatenblatt des Volkswagen ID.5*. URL <https://www.volkswagen.de/de/besitzer-und-nutzer/wichtige-kundeninformationen/rechtliches/rescue-data.html>
- [27] Rosenbauer Löschesystem : <https://www.rosenbauer.com/de/at/group/presse/wirtschaftspresse/wirtschaftspresse-detail/nd/neues-loeschsystem-fuer-brennende-traktionsbatterien-bei-elektrofahrzeugen>

- [28] MURER-FEUERSCHUTZ GMBH: *Bedienungsanleitung Murer E-Löschlanze*.
URL https://www.murer-feuerschutz.de/_pdf/E-Loeschlanze_DE_20210928_SCREEN.pdf?m=1643720580& – Überprüfungsdatum 2022-06-03
- [29] MURER-FEUERSCHUTZ GMBH: *Murer E-Löschlanze*. URL <https://www.murer-feuerschutz.de/e-loeschlanze/>
- [30] LANGE, Claus: *E-Mobilität: Wirksames Löschen von Fahrzeugbränden ist möglich : Test der E-Löschlanze unter realen Bedingungen - keine elektrische Gefahr*. In: *BRANDSchutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung* 2022, Nr. 2
- [31] LUTZ LUNKEWITZ: „*Magnus-Tool*“: *Seesener erfindet Löscheinheit zur Brandbekämpfung an E-Fahrzeugen*. URL <https://feuerwehr-seesen.de/index.php/informationen/news/702-%E2%80%9Emagnus-tool%E2%80%9C-seesener-erfindet-werkzeug-zur-brandbek%C3%A4mpfung-an-e-fahrzeugen> – Überprüfungsdatum 2022-06-02
- [32] M. HESSE, H. MEIER, B. ZEEH: *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*. 6. Auflage. Stuttgart New York : Thieme Verlag, 2002
- [33] H. NAUMER ; W. HELLER: *Untersuchungsmethoden in der Chemie – Einführung in die moderne Analytik*. 2. Auflage. Stuttgart / New York : Thieme Verlag, 1990
- [34] DIPL.-CHEM. FRANK SCHUPPE: *Untersuchung und Bewertung der Kontamination von PSA der Feuerwehren bei der Brandbekämpfung in Innenräumen*. Mai 2021
- [35] VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE E.V., VERBAND DER INTERNATIONALEN KRAFTFAHRZEUGHERSTELLER E.V. (Hrsg.): *Technische Quarantäneflächen für beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien*. 08/2022
- [36] INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG: *GESTIS-Stoffdatenbank : Eintrag Wasserstoff*
- [37] GEORG BRAUER; Marianne Baudler u.a. (Mitarb.): *Handbuch der Präparativen Anorganischen Chemie*. 3. Auflage. Stuttgart : Ferdinand Enke, 1975
- [38] ARNOLD F. HOLLEMAN, EGON WIBERG, NILS WIBERG: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. 101. Auflage. Berlin : Walter de Gruyter, 1995

- [39] FREDERIK LARSON, PETRA ANDERSON, PER BLOMQVIST, BENGT-ERIK MELLANDER: *Toxic fluorid gas emissions from lithuium-ion battery fires*. In: *Scientific reports* (2018), Vol. 7 Issue 10018 p. 1-13 art. no 10018
- [40] M. W. FARLOW, E. H. MAN, C. W. TULLOCK: *Carbonyl Fluoride*. In: *Inorganic Syntheses* (1960), Vol. 6
- [41] BENJAMIN TRUCHOT, FABIEN FOUILLEN, SERGE COLLET: *An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires*. In: *Fire Safety Journal* (2018)
- [42] OLA WILLSTRAND, ROELAND BISSCHOP, PER BLOMQVIST, ALASTAIR TEMPLE, JOHAN ANDERSON: *Toxic Gases from Electric Vehicle Fires*
- [43] MARGARET SIMONSON, HEIMO TUOVINEN, VIKTOR EMANUELSSON: *Formation of Hydrogencyanid in Fires : Brandforsk Project 510-991*. 2000
- [44] WOLMIRSTEDTER WASSER- UND ABWASSERZWECKVERBAND: *Abwasserbeseitigungssatzung des Wolmirstedter Wasser- und Abwasserzweckverbandes : §11 Abs. 6*. URL https://www.wwaz.de/download/Abwasserbeseitigungssatzung_2012new.pdf – Überprüfungsdatum 2022-07-07
- [45] *Elektrische Leitfähigkeit im Wasser*. URL [test-wasser.de](https://www.test-wasser.de) – Überprüfungsdatum 2022-07-07
- [46] *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer Abwasserverordnung - AbwV* (idF v. 20. 1. 2022) (1997-03-21)
- [47] SHOOTER-MEDIA-TV: *Hybrid brennt über 2h, 5 Rohre ballern Wasser auf BMW, Feuerwehr Denkendorf + Werkfeuerwehr*. URL <https://www.youtube.com/watch?v=MlaVR9Q-Qyk> – Überprüfungsdatum 2022-07-18

ANHANG

Inhaltsverzeichnis

A1	Messstellen	119
A2	Referenzversuche	120
A2.1	Referenzversuch 1	120
A2.2	Referenzversuch 2	121
A3	Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (HSR)	122
A3.1	Versuch HSR_1	122
A3.2	Versuch HSR_2	124
A3.3	Versuch HSR_3	125
A3.4	Versuch HSR_4	126
A4	Löschmitteleinbringung (LE) in Traktionsbatterien	127
A4.1	Versuch LE_1	127
A4.2	Versuch LE_2	128
A4.3	Versuch LE_3	129
A5	Externe Kühlung mittels spezieller Feuerwehrrmaturen	130
A6	Brandbegrenzungsdecken (BBD).....	131
A6.1	Versuch BBD_1.....	131
A6.2	Versuch BBD_2.....	132

A1 Messstellen

Neben den im Kapitel 7.1 beschriebenen Messstellen außerhalb der Fahrzeuge, wurden auch Temperaturmessstellen im Fahrzeug vorgesehen. Die Positionen dieser Messstellen im Fahrzeug sind in der folgenden Abbildung A1 dargestellt. Die Bezeichnung der Messstellen ist auch noch einmal in der Tabelle 7 im Berichtsteil zu finden.

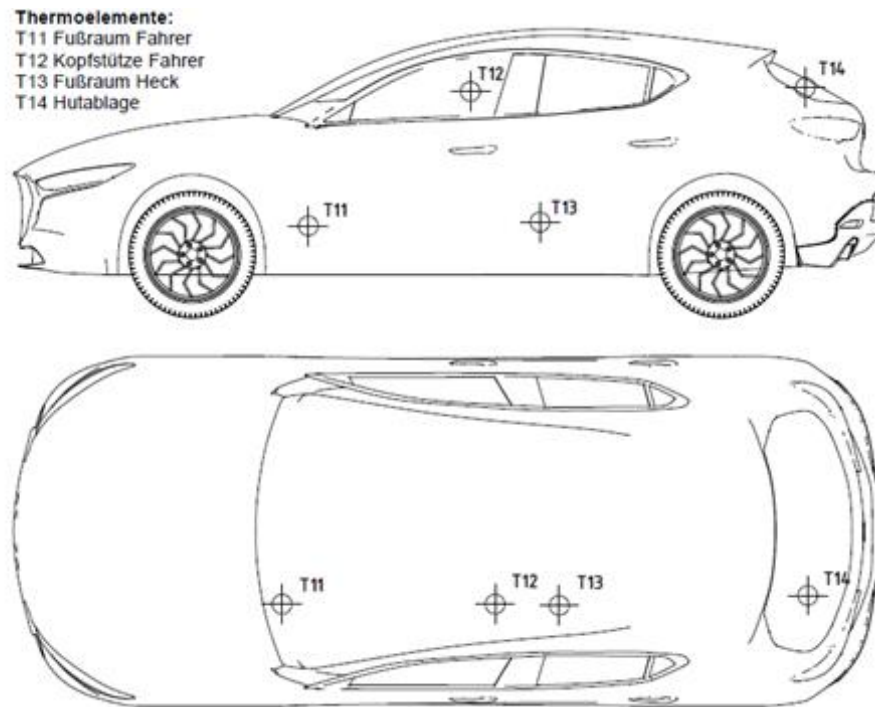


Abbildung A1: Messstellen im Fahrzeuginnenraum

A2 Referenzversuche

In diesem Teil des Anhangs werden die im Berichtsteil fehlenden Temperatur-Zeit-Verläufe für die beiden Referenzversuche aufgelistet.

A2.1 Referenzversuch 1

In der Abbildung A2 sind die im Berichtsteil nicht gezeigten Temperatur-Zeit-Verläufe für die Messstellen an der Front und dem Heck des Fahrzeuges sowie für die Temperaturmessstellen im Inneren des Fahrzeuges dargestellt. Das Kapitel A2.1 ergänzt somit das Kapitel 8.4.1.1 im Berichtsteil. Ebenfalls werden in den Diagrammen zwei markante Zeitpunkte durch gestrichelte Linien dargestellt. Eine Beschreibung dieser Zeitpunkte sowie den gesamten Versuchsablauf kann der Tabelle 10 im Berichtsteil entnommen werden.

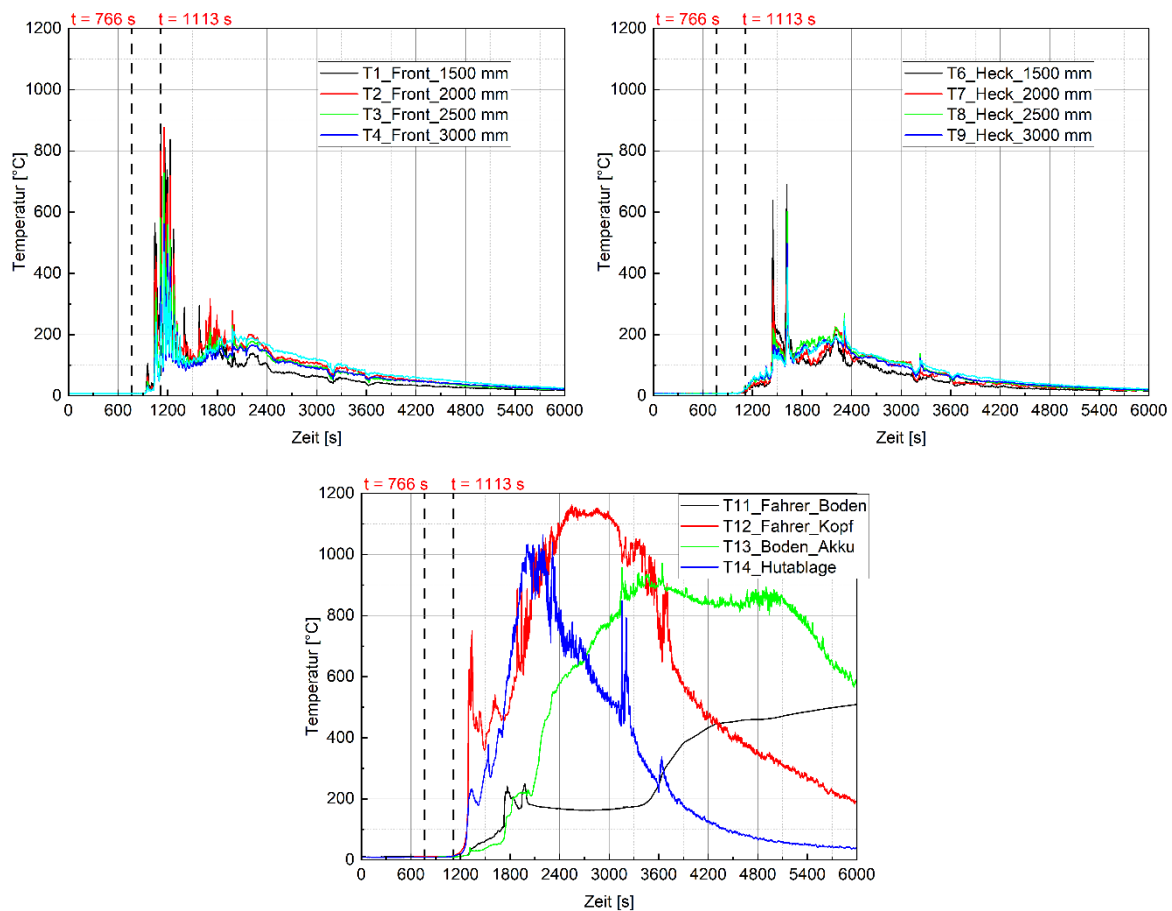


Abbildung A2: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck, Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) des Referenzversuches 1

A2.2 Referenzversuch 2

Wie im vorangegangenen Kapitel A2.1 des Anhangs werden in der nachfolgenden Abbildung A3 die nicht im Berichtsteil dargestellten Temperatur-Zeit-Verläufe gezeigt. Auch diese stellen eine Ergänzung der Versuchsbeschreibung des Kapitels 8.4.1.2 dar. Der zeitliche Ablauf des zweiten Referenzversuches mit einer Zusammenfassung von markanten Zeitschritten kann in der Tabelle 11 im Berichtsteil eingesehen werden.

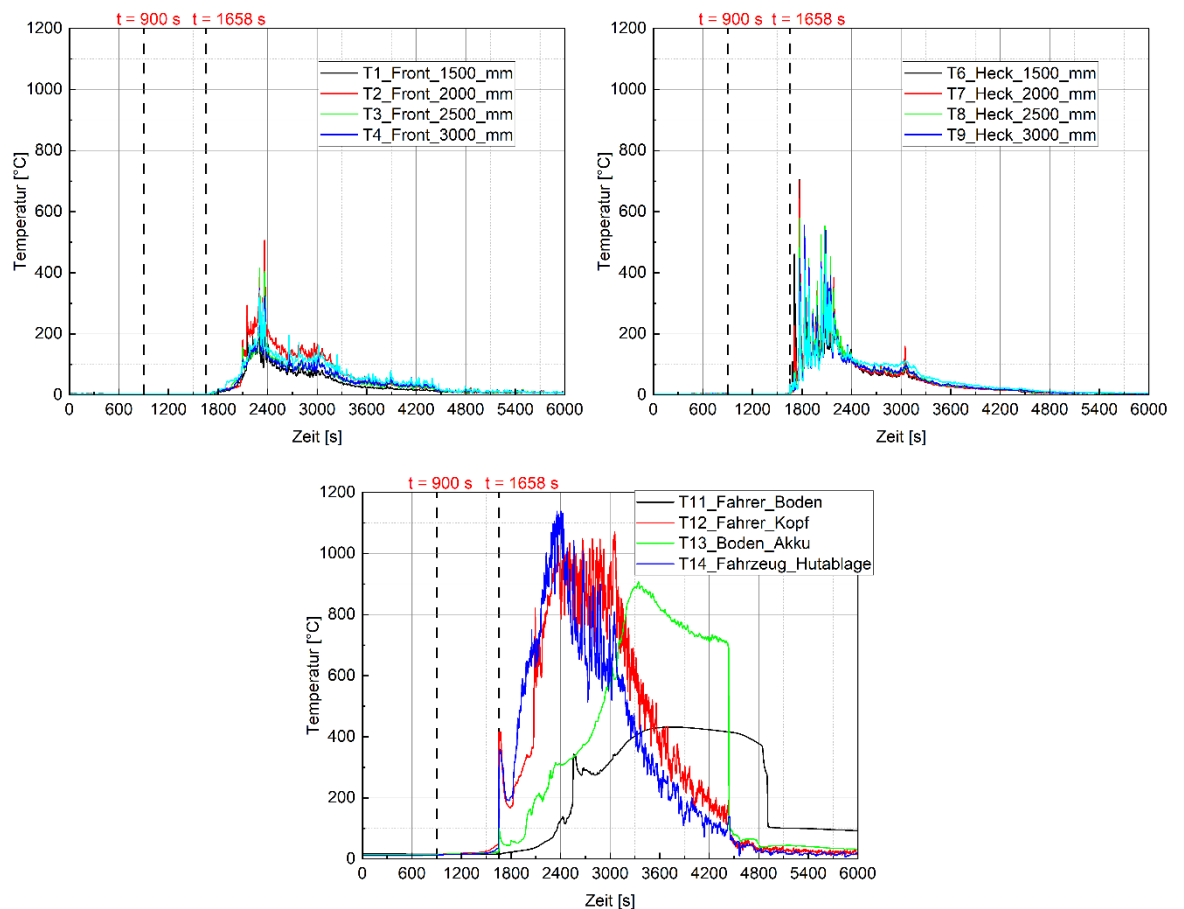


Abbildung A3: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck, Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) des Referenzversuches 2

A3 Brandbekämpfung mittels Hohlstrahlrohren (HSR)

Dieses Kapitel des Anhangs beinhaltet die im Berichtsteil fehlenden Diagramme der Messstellen aller Versuche, bei denen die Brandbekämpfung ausschließlich mit Hohlstrahlrohren durchgeführt worden ist. Die nachfolgenden Diagramme wurden aus Gründen der Übersicht nicht im Berichtsteil gezeigt. Weitere Informationen zu den Versuchen, z.B. zur Brandbekämpfungstaktik sind im Kapitel 8.4.2 des Berichtsteils zu finden.

A3.1 Versuch HSR_1

Die Messdaten für den Versuch HSR_1, bei dem Hohlstrahlrohre für die Brandbekämpfung genutzt wurden, werden in der nachfolgenden Abbildung A4 zusammengefasst dargestellt. Es ist hierbei zu beachten, dass bei diesem Versuch noch keine mittlere Thermoelementkette über dem Fahrzeug installiert war und der Durchfluss der HSR nicht auf 60 l/min, sondern auf 135 l/min eingestellt war. Aus diesem Grund lag der Löschwasserverbrauch höher als bei den anderen Versuchen dieser Versuchsserie (siehe hierzu Tabelle 13 im Berichtsteil).

Im Versuch HSR_1 wurden Brandbekämpfungsmaßnahmen in der Vollbrandphase durchgeführt, was an vergleichsweise schnell steigenden Temperaturen zu erkennen ist. Das Fahrzeug brannte im Heckbereich besonders stark, was an den höheren Temperaturen zu erkennen ist. Der Erfolg der Brandbekämpfungsmaßnahmen zeigte sich ab der Versuchszeit 917 s durch fallende Temperaturen an allen Messstellen.

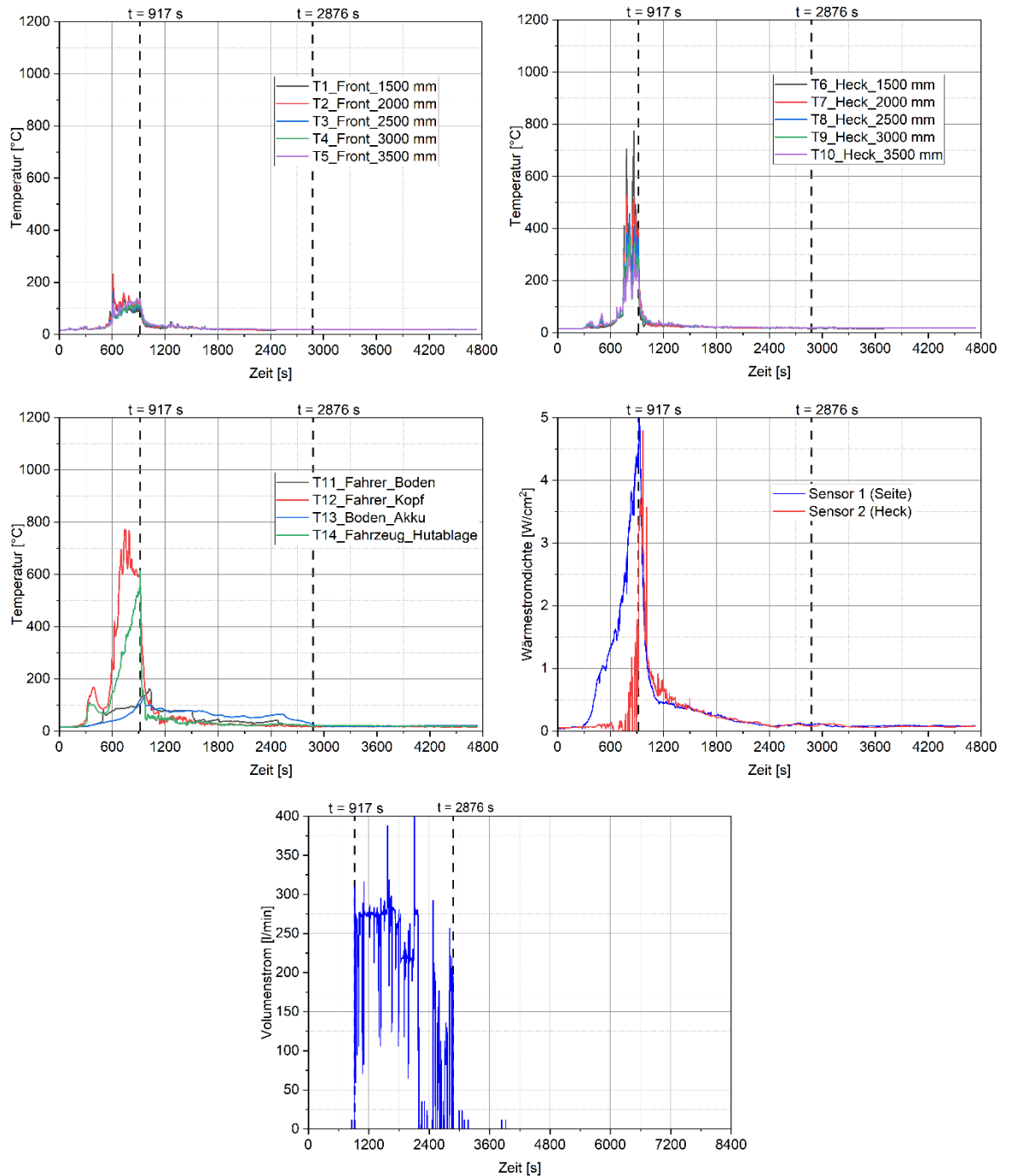


Abbildung A4: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_1; Beginn des Löschangriffes bei $t = 917$ s; Ende des Einsatzes bei $t = 2876$ s

A3.2 Versuch HSR_2

Der zweite Versuch unter Einsatz von Hohlstrahlrohren zur Brandbekämpfung ist im Berichtsteil unter den Kapitel 8.4.2.1 ausführlich beschrieben. Die Diagramme in der Abbildung A5 ergänzen die Beschreibung um die im Bericht nicht dargestellten zeitabhängigen Verläufe für Temperatur und Wärmestrahlung.

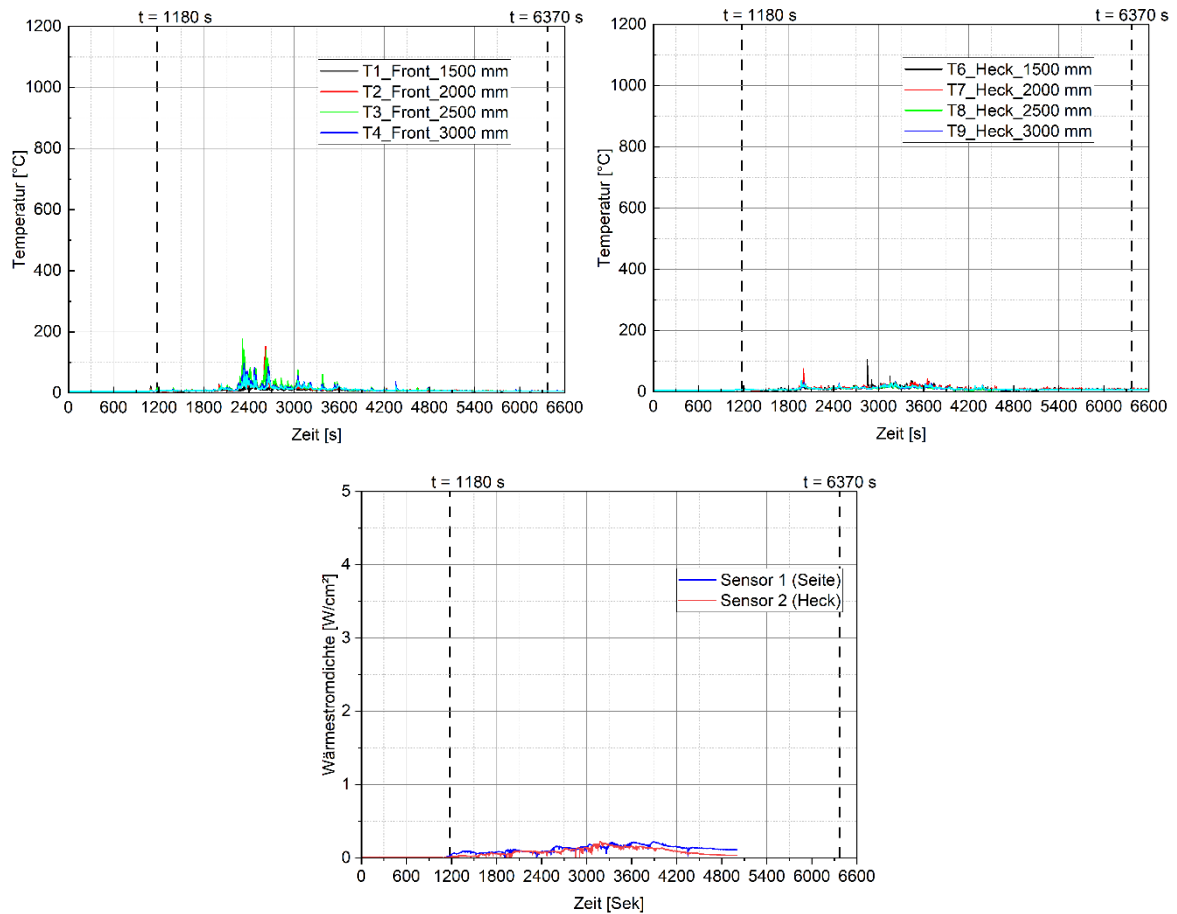


Abbildung A5: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Heck und Messachse Front) und Wärmestrahlung des Versuches HSR_2; Beginn des Löschangriffes bei $t = 1180$ s; Ende des Einsatzes bei $t = 6370$ s

A3.3 Versuch HSR_3

Auch der Versuch HSR_3 wird im Bericht unter dem Kapitel 8.4.2.2 ausführlich beschrieben. Die Diagramme in der Abbildung A6 zeigen die Temperatur-Zeit-Verläufe, die im Berichtsteil aus Gründen der besseren Übersicht nicht aufgelistet wurden.

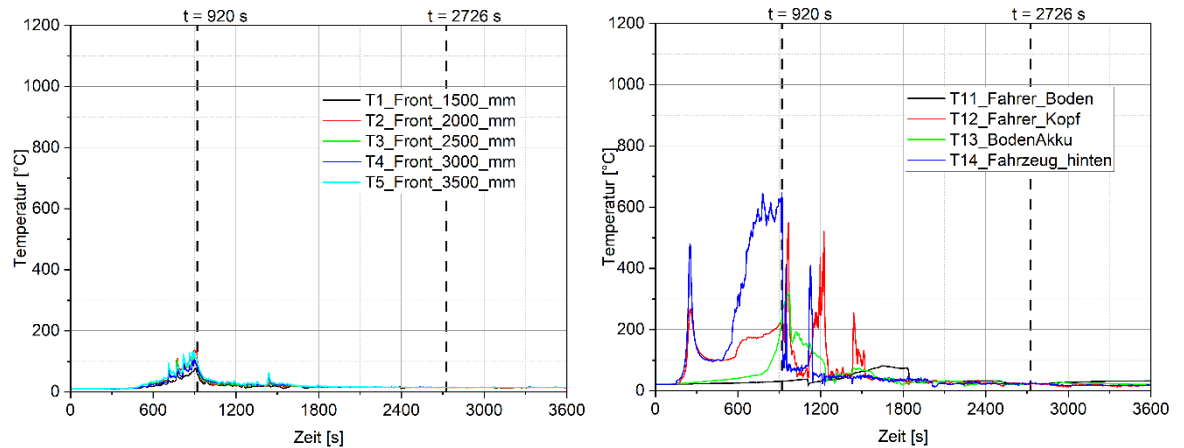


Abbildung A6: Zeitabhängige Verläufe für Temperaturen (Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) des Versuches HSR_3; Beginn des Löschangriffes bei $t = 920$ s; Ende des Einsatzes bei $t = 2726$ s

A3.4 Versuch HSR_4

Die dargestellten Daten in Abbildung A7 zeigen die Messdaten des Versuches HSR_4. Die Brandbekämpfungsmaßnahmen wurden ebenfalls im Brandstadium des Vollbrandes begonnen. Anders als in den anderen Versuchen dieser Versuchsserie wurden die Brandbekämpfungsmaßnahmen mit nur einem Hohlstrahlrohr durchgeführt. Weitere Informationen zum Versuch können dem Kapitel 8.4.2.3 entnommen werden.

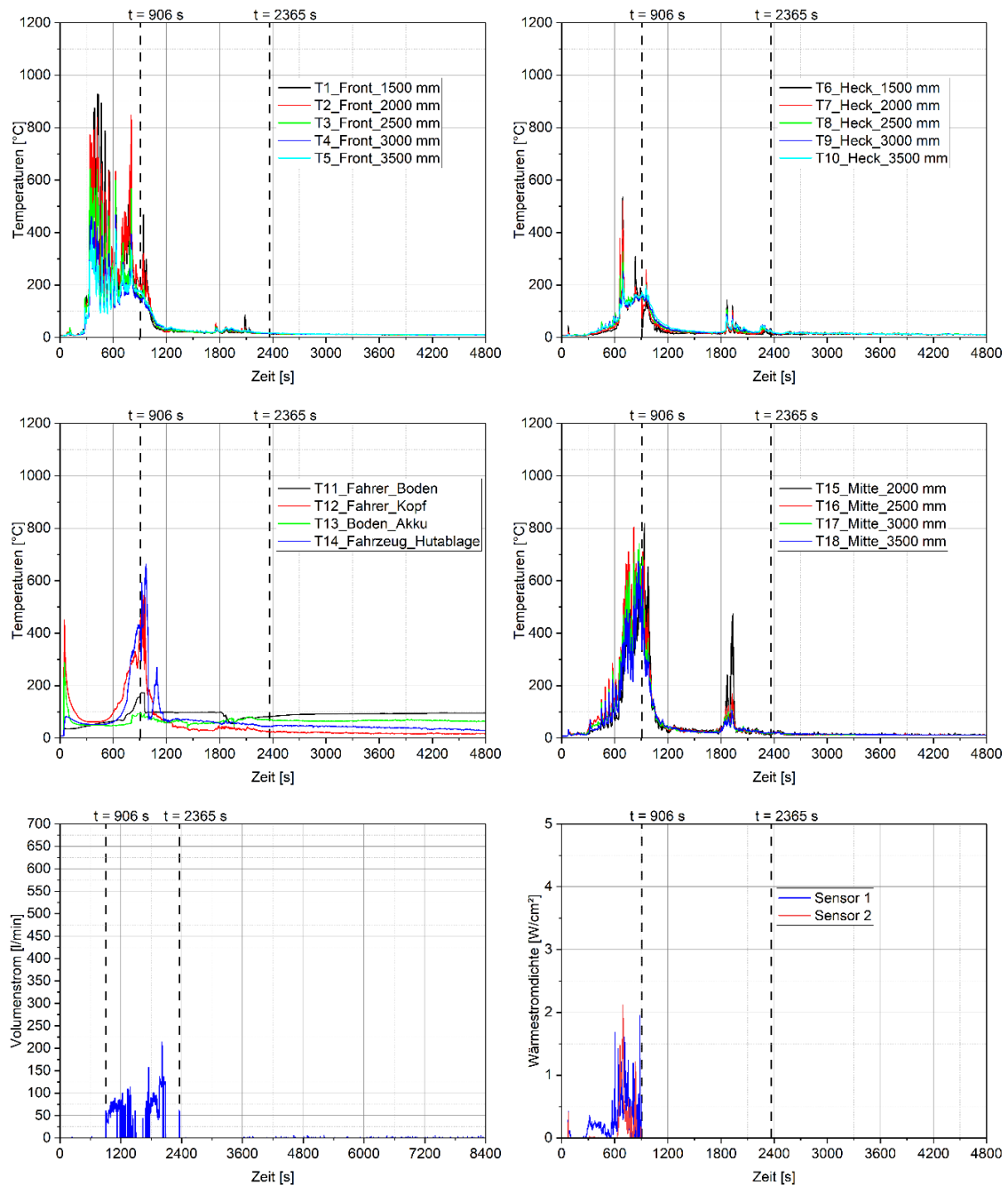


Abbildung A7: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches HSR_4; Beginn des Löschangriffes bei $t = 906$ s; Ende des Einsatzes bei $t = 2365$ s

A4 Löschmitteleinbringung (LE) in Traktionsbatterien

In diesem Teil des Anhangs werden die im Berichtsteil nicht dargestellten Temperatur-Zeit-Verläufe der Versuche, bei dem neben den Hohlstrahlrohren Systeme zur Löschmitteleinbringung in die Traktionsbatterie genutzt wurden. Die detaillierte Beschreibung der Versuche ist im Berichtsteil im Kapitel 8.4.3 zu finden.

A4.1 Versuch LE_1

In der folgenden Abbildung A8 sind die aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Berichtsteil vorgestellten zeitabhängigen Verläufe des Versuches LE_1 dargestellt. Dazu zählen die Temperaturen an der Front und im Inneren des Fahrzeuges sowie die gemessenen Wärmestromdichten. Alle weiteren Daten zu diesem Versuch können im Kapitel 8.4.3.1 des Berichtsteils eingesehen werden.

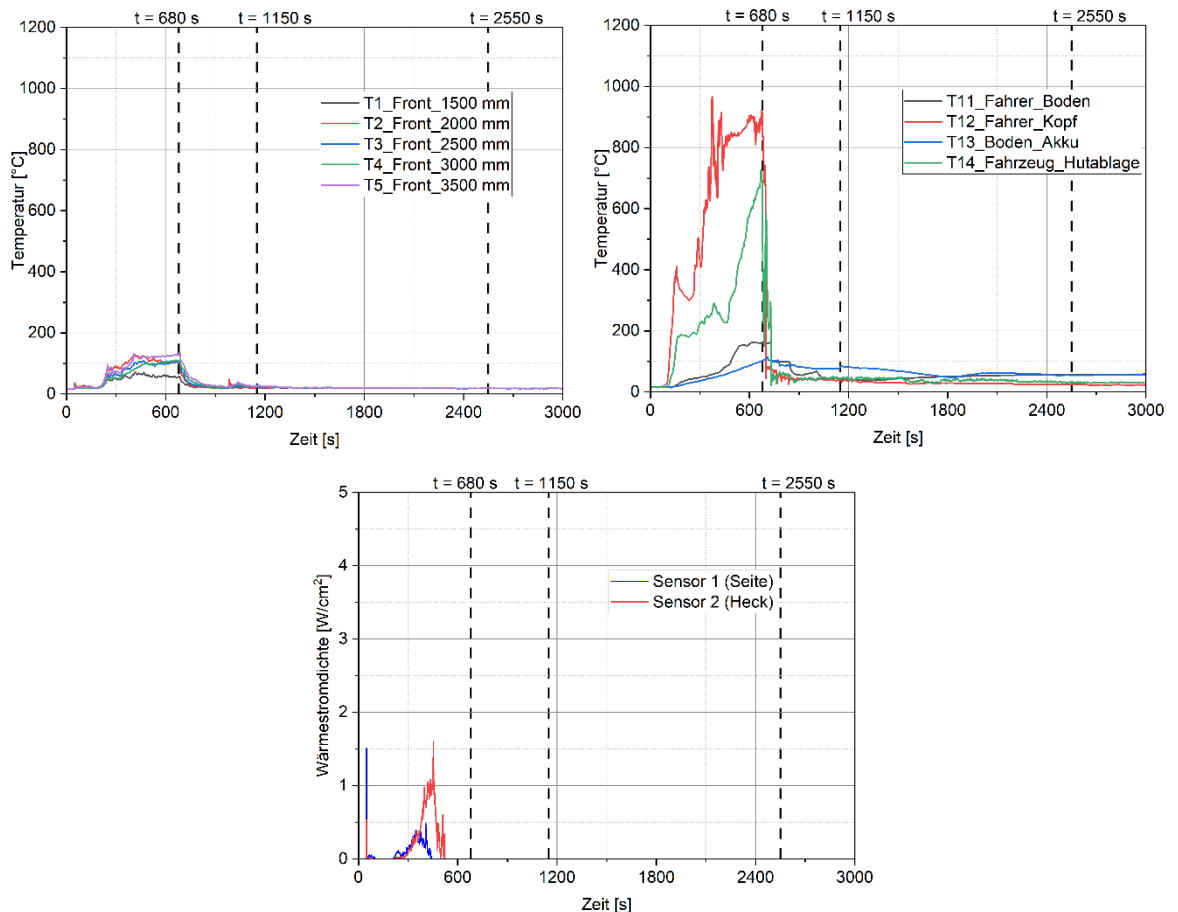


Abbildung A8: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachse Front und Messstellen im Fahrzeuginnenraum) und Wärmestrahlung des Versuches LE_1; Beginn des Löschangriffes bei t = 680 s; Beginn Löschmitteleinbringung bei t = 1150 s, Ende des Einsatzes bei t = 2550 s

A4.2 Versuch LE_2

In der Abbildung A9 sind alle physikalischen Messdaten aus dem Versuch LE_2 zu sehen. Im Verlauf der Löschwasserverbräuche ist gut der dauerhafte Einsatz des Sonderlöschgerätes (ca. 30 – 40 l/min) bei einsatzbedingter Nutzung von HSR ersichtlich.

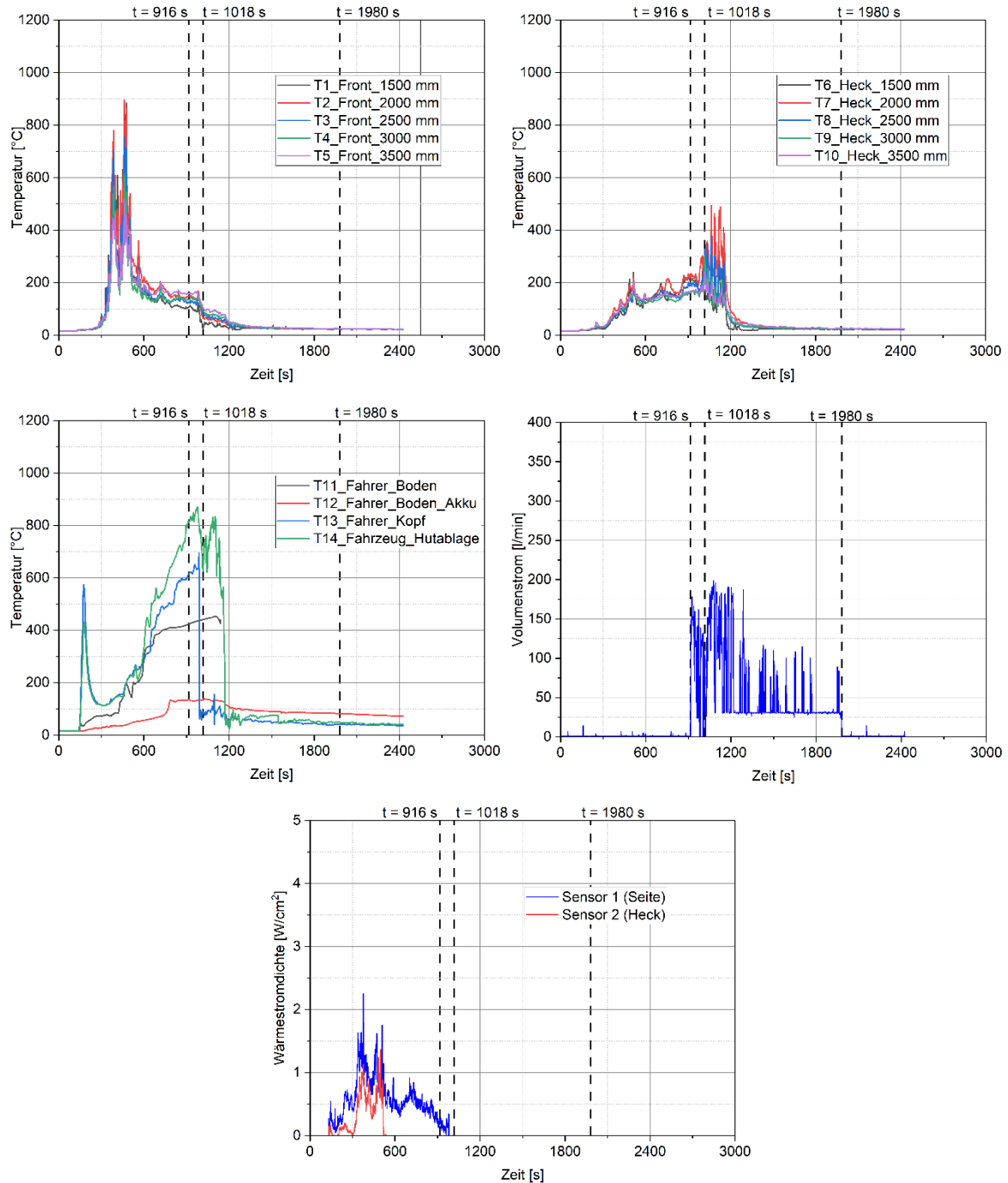


Abbildung A9: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches LE_2; Beginn des Löschangriffes bei $t = 916 \text{ s}$; Beginn Löschmitteleinbringung bei $t = 1018 \text{ s}$, Ende des Einsatzes bei $t = 1980 \text{ s}$

A4.3 Versuch LE_3

Die nachfolgende Abbildung A10 beinhaltet alle zeitabhängigen Verläufe der physikalischen Größen des Versuches LE_3. Auch hier ist bei der Aufzeichnung des Löschwasserverbrauches der dauerhafte Einsatz des Sonderlöschgerätes unter einsatzbezogener Nutzung der HSR zu sehen. Die kumulierte Löschwassermenge ist in Tabelle 15 im Berichtsteil dargestellt.

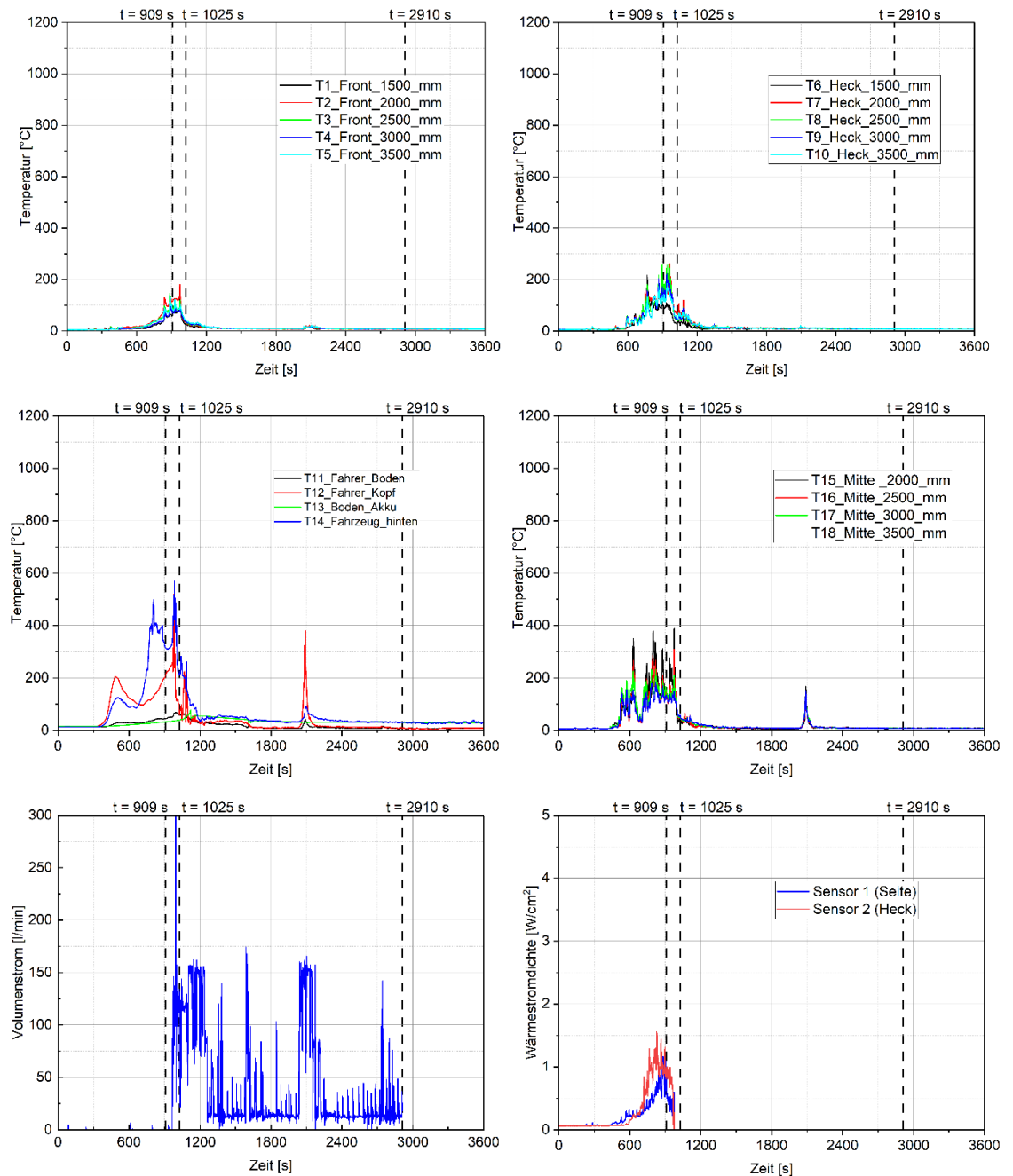


Abbildung A10: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur, Wärmestrahlung und Löschwasservolumenstrom des Versuches LE_3; Beginn des Löschangriffes bei $t = 909$ s; Beginn Löschmitteleinbringung bei $t = 1025$ s, Ende des Einsatzes bei $t = 2910$ s

A5 Externe Kühlung mittels spezieller Feuerwehrrmaturen

Die Daten des Versuchs zur Evaluierung einer Armatur zur externen Kühlung, die aus Gründen der Übersicht nicht im Berichtsteil enthalten sind, können nachfolgend in Abbildung A11 eingesehen werden. Der Versuch ist im Berichtsteil im Kapitel 8.4.4 ausführlich beschrieben.

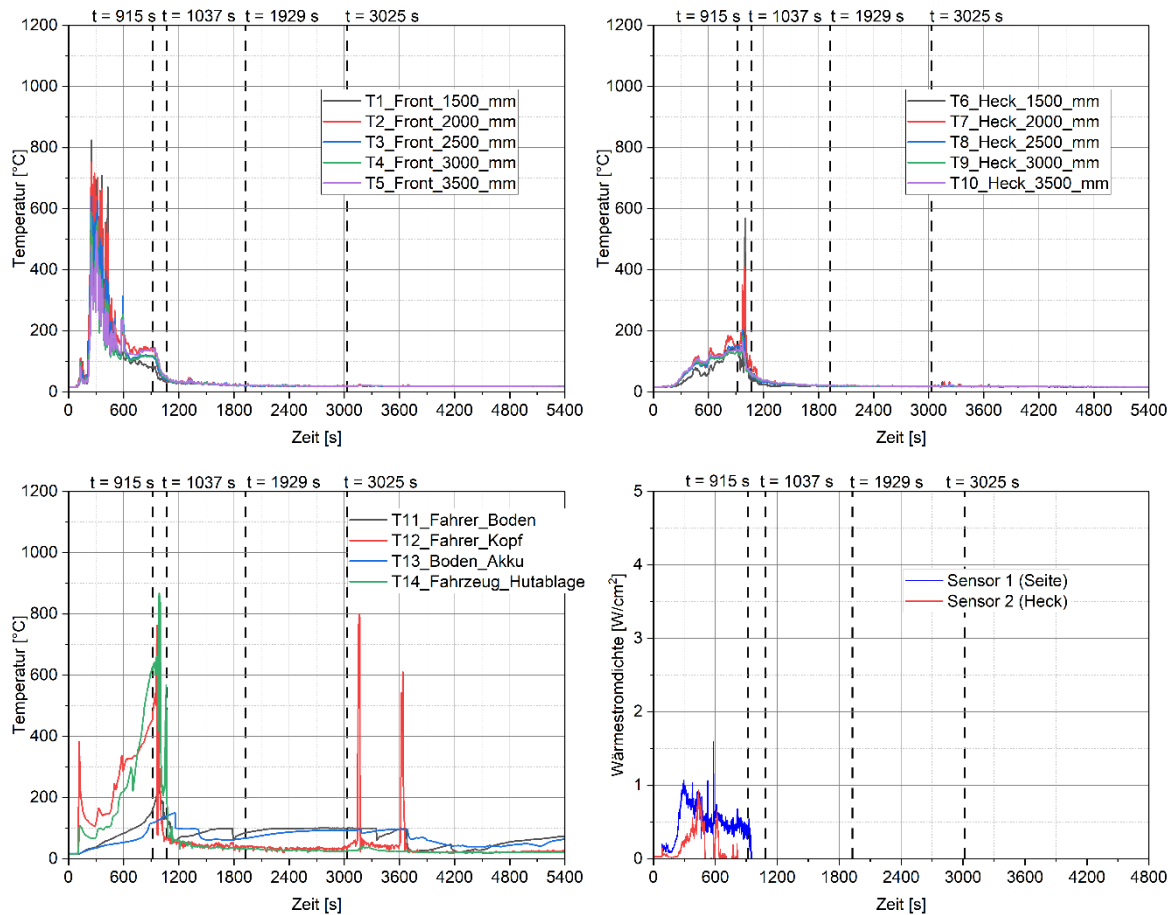


Abbildung A11: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck sowie Messstellen im Fahrzeuginnenraum) und Wärmestrahlung des Versuches mit externer Kühlung; Beginn des Löschangriffes bei $t = 915$ s; Beginn externe Kühlung bei $t = 1037$ s; Ende externe Kühlung bei $t = 1929$ s; erneuter Beginn externe Kühlung bei $t = 3025$ s

A6 Brandbegrenzungsdecken (BBD)

Dieser Teil des Anhangs beinhaltet die im Berichtsteil nicht dargestellten Messdaten zu den Versuchen, bei denen eine Brandbegrenzungsdecke zum Einsatz kam. Die Beschreibung der Versuche ist im Berichtsteil im Kapitel 8.4.5 zu finden.

A6.1 Versuch BBD_1

In der nachfolgenden Abbildung A12 sind die Temperaturverläufe der Messketten an der Front und am Heck des Fahrzeuges zu sehen. Außerdem werden im unteren Diagramm die gemessenen Wärmestromdichten gezeigt. Alle weiteren Daten zu diesem Versuch sind im Berichtsteil im Kapitel 8.4.5.1 einzusehen.

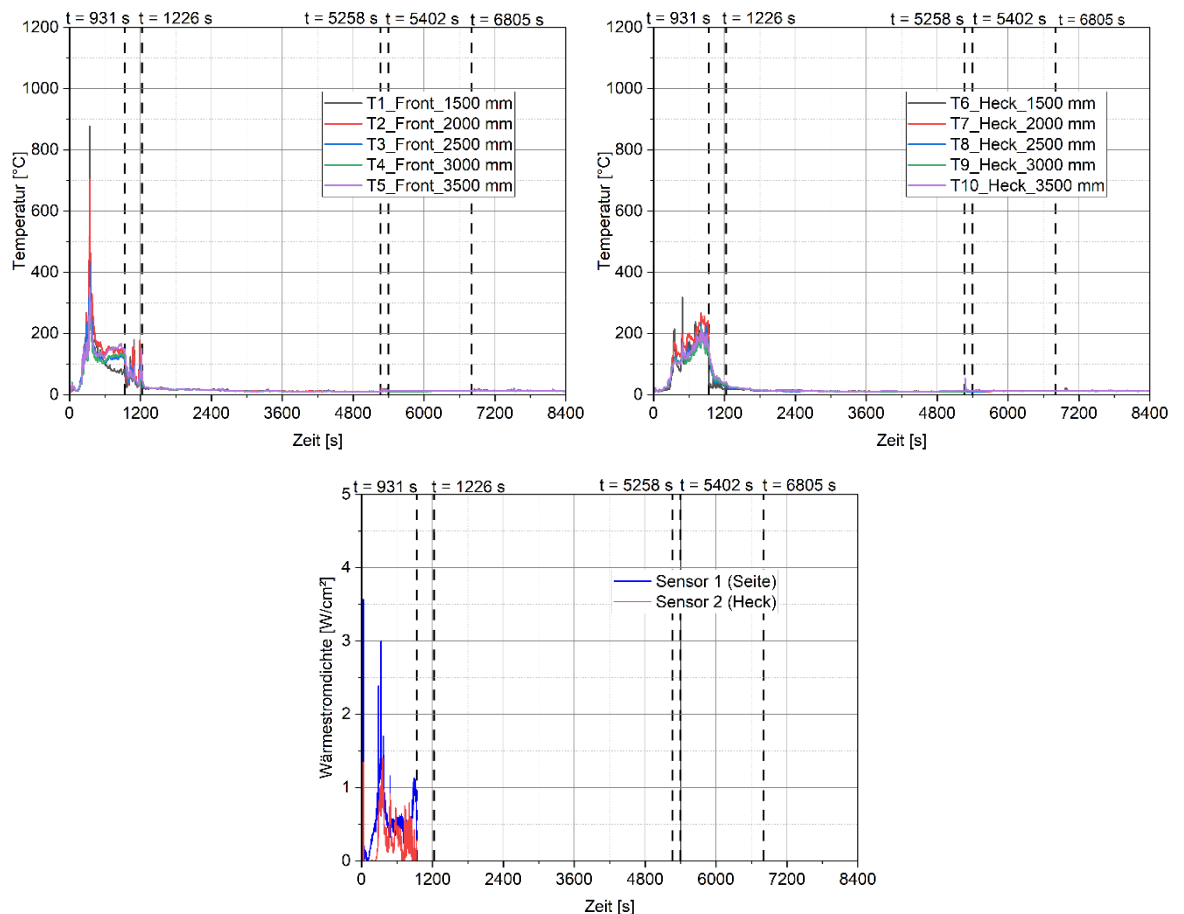


Abbildung A12: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck) und Wärmestrahlung des Versuches BBD_1; Beginn des Löschangriffes bei $t = 931$ s; Auflegen der BBD bei $t = 1226$ s; Abnehmen der BBD bei $t = 5258$ s; erneutes Auflegen der BBD bei $t = 5402$ s; erneutes Abnehmen der BBD bei $t = 6805$ s

A6.2 Versuch BBD_2

Abbildung A13 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe an der Front und am Heck des Fahrzeuges sowie die auftretenden Wärmestromdichten über die Dauer des Versuches. Alle weiteren Daten und Informationen zum Versuch BBD_2 sind im Kapitel 8.4.5.2 des Berichtseils einzusehen.

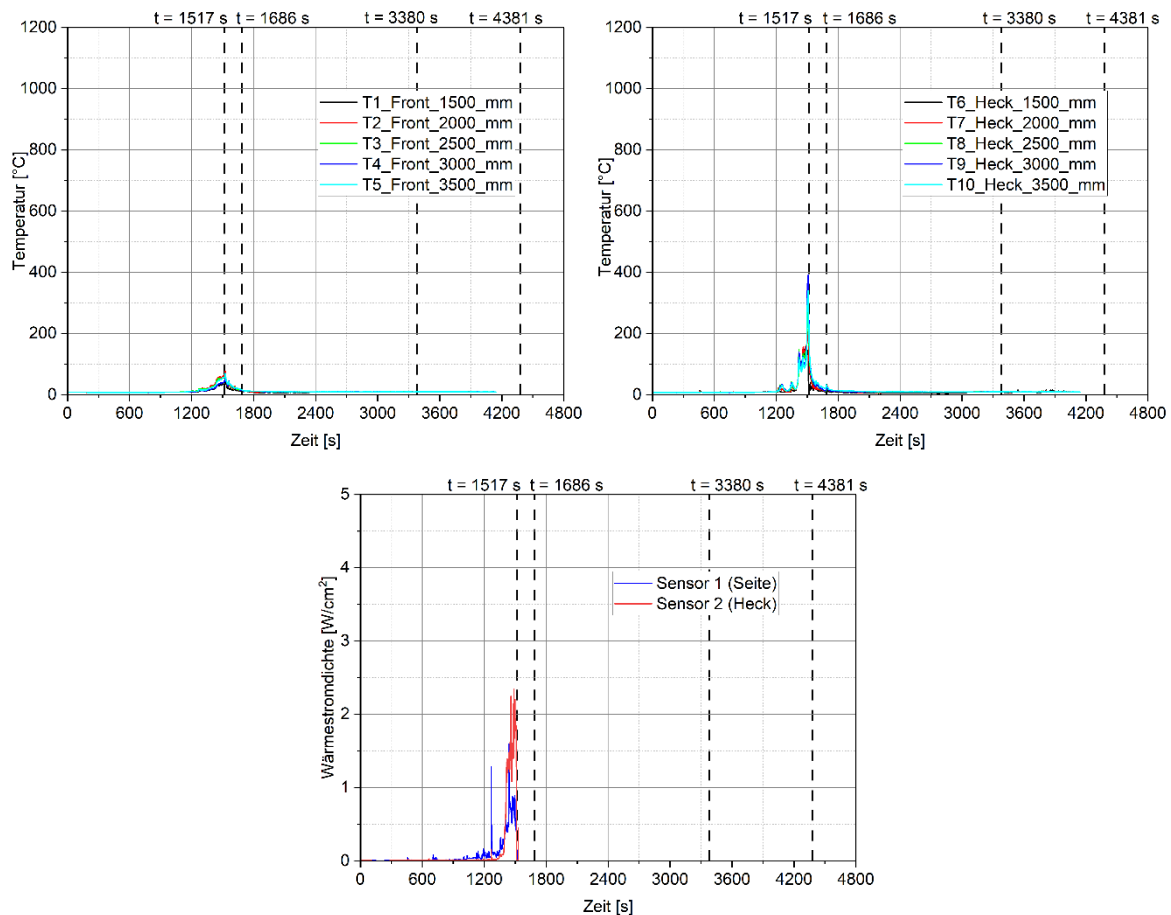


Abbildung A13: Zeitabhängige Verläufe für Temperatur (Messachsen Front und Heck) und Wärmestrahlung des Versuches BBD_2; Beginn des Löschangriffes bei $t = 1517$ s; Auflegen der BBD bei $t = 1686$ s; Abnehmen der BBD bei $t = 3380$ s; Versuchsende bei $t = 4381$ s