

BRAFA

Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen - Kurzfassung -



Erstellt im Auftrag von
Bundesministerium für Klimaschutz
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2018)

Bericht Nr. I-21/21/PSt-V&U Inst-18/13/640 vom 08.09.2021

Vollständiger Bericht unter
<https://www.ivt.tugraz.at/forschung/bereiche/vuu/projektbeispiele/brafa.html>

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und Hinzufügen, veröffentlicht werden.
Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden,
so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Verfasser einzuholen.

Projektpartner



BRAFA

Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen
- Erweiterte Kurzfassung -

Erstellt: Ao.Univ.-Prof. Dr. Peter Sturm

08.09.2021

Inhalt

1	Stand der Technik und des Wissens	4
1.1	Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge.....	4
1.1.1	Allgemein	4
1.1.2	Gefahrenpotenzial von Batterien für batteriebetriebene Fahrzeuge.....	4
1.1.3	Gefahrenpotenzial bei batteriebetriebenen Fahrzeugen	5
1.2	Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV).....	7
1.3	Risikomodellierung unter Berücksichtigung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben	8
1.4	Auswirkungen von Bränden auf Tunnelinfrastruktur und Tunnelausrüstung	8
1.4.1	Brandeinwirkung auf die Tunnelstruktur.....	8
1.4.2	Betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen für die Branderkennung und -bekämpfung	10
1.4.3	Brandbekämpfung – Löschrategie	10
2	Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen zu Bränden batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge	12
2.1	Voruntersuchungen an einzelnen Batteriezellen.....	12
2.2	Brandversuche an Batteriemodulen und Batteriepacks	12
2.3	Brandversuche an Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb sowie konventionellen Fahrzeugen.....	13
2.3.1	Wärmefreisetzungsrates.....	15
2.3.2	Gasemissionen	16
2.3.3	Schwermetalle	18
2.3.4	Thermische Belastung	19
2.3.5	Schadstoffablagerungen an den Tunnelwänden.....	20
2.3.6	Schadstoffbelastung des Löschwassers	20
2.3.7	Brandbekämpfung.....	20
2.3.8	Fahrzeugnachsorge.....	23
3	Brandauswirkungen von Nutzfahrzeugen.....	24
4	Risikobetrachtung	26
5	Zusammenfassung	29
6	Verwendete Abkürzungen	33
7	Abbildungsverzeichnis	34
8	Literaturverzeichnis	35

1 Stand der Technik und des Wissens

Bei Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen (NEC) stellt der Energiespeicher das Hauptunterscheidungsmerkmal zu Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben dar. Während bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor der Energieträger in überwiegenden Fällen flüssig (Diesel, Benzin, LPG, LNG, synthetische Kraftstoffe) oder gasförmig (CNG, H_{2g}) und in einem Tank gespeichert ist, ist dies bei BEV die in einer Batterie¹ gespeicherte elektrische Energie.

1.1 Batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge

1.1.1 Allgemein

Die Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeuges (EV) ist im Allgemeinen hierarchisch aufgebaut. Die kleinste Einheit ist die Zelle. Mehrere Zellen werden wiederum zu Modulen (Stack) verschaltet. Module werden weiter zu einem Pack, also der gesamten Fahrzeugbatterie, zusammengeschlossen. Zellen bzw. Module werden elektrisch entweder in Serie oder parallel geschaltet. Eine Serienschaltung bewirkt eine höhere Systemspannung, während eine Parallelschaltung die Kapazität der Batterie erhöht.

In der Regel befindet sich die Batterie bei PKW in der Bodenplatte des Fahrzeuges, bei Bussen entweder am Dach oder unter dem Passagiererraum und bei LKW hinter der Vorderachse.

Die gängigste Speichertechnologie für elektrisch angetriebene Fahrzeuge ist zur Zeit die Lithium-Ionen (Li-Ion) Batterie. Es ist zu erwarten, dass dies auch in den kommenden Jahren der Fall sein wird [1].

1.1.2 Gefahrenpotenzial von Batterien für batteriebetriebene Fahrzeuge

Eine entscheidende Rolle für die Funktion und vor allem die Sicherheit von Li-Ion Zellen spielt der Separator. Dies ist eine dünne, für Ionen durchlässige aber für Elektronen undurchlässige Kunststoffolie. Die Hauptaufgabe des Separators ist die räumliche Trennung der Elektroden, um die gewünschte Funktion der Zelle zu gewährleisten und einen direkten Kontakt zwischen den Elektroden zu verhindern [2]. Durch unterschiedlichste Ursachen wie elektrische, thermische oder mechanische Überbelastungen, aber auch durch Alterserscheinungen, kann der Separator geschädigt werden, was in weiterer Folge zu einem inneren Kurzschluss und zu einer lokalen Erwärmung führen kann. Ist einmal eine bestimmte Grenztemperatur (derzeit ab ca. 135°C) überschritten, tritt ein thermisches Durchgehen (Thermal Runaway) ein. Aufgrund der thermischen und chemischen Zersetzung der Zellkomponenten kommt es dabei zu einer Freisetzung von toxischen und brennbaren Gasen. Im Falle eines Thermal Runaway ist bei modernen Batterien mit vollständiger Ladung (100% SOC) mit einer bis zu 14-fach höheren Wärmefreisetzung, bezogen auf die in der Zelle gespeicherte elektrische Energie, zu rechnen [3], [4].

Betrachtet man die freigesetzten Gase, so sind Fluorwasserstoff (HF) und Phosphorsäure (H₃PO₄) als kritische Komponenten anzuführen. Eine wesentliche Bedeutung kommt in diesem Kontext dem Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) zu, welches häufig als Elektrolytsalz verwendet wird, und das während des Thermal Runaway in die toxischen Derivate HF und

¹ Beim Energiespeicher eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuges handelt es sich technisch gesehen um einen Akkumulator. Umgangssprachlich hat sich jedoch der Begriff Batterie durchgesetzt, sodass dieser Begriff hier durchgehend Verwendung findet.

Phosphorylfluorid (POF_3) umgewandelt wird. Überträgt man die in [5] nachgewiesenen HF-Emissionen pro auf die Kapazität von modernen Li-Ionen Batterie eines Elektrofahrzeuges, ergeben sich Konzentrationen bis zu 66 ppm HF pro Wh im Falle eines Batteriebrandes in einem Straßentunnel². Die von [4] durchgeführten umfangreiche Gasmessungen konnten auf Batterieebene eine klare Abhängigkeit der HF Emissionsmenge von der gespeicherten Energie nachweisen (Abbildung 1). Bei diesen untersuchten Batterien lag die durchschnittliche Produktionsrate von HF bei 300 mg/Wh.³

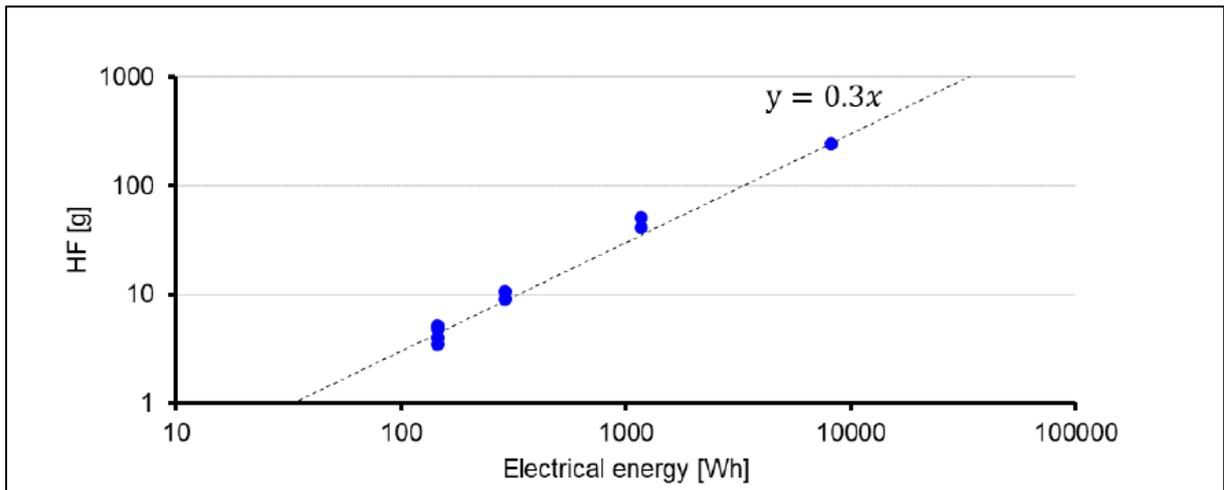


Abbildung 1: HF-Emissionsmenge als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [4]

Die mengenmäßigen Angaben zu diesen Gasen schwanken je nach eingesetzter Chemie in der Batterie merklich, qualitativ kann jedoch festgehalten werden, dass relevante Konzentrationen zu erwarten sind.

1.1.3 Gefahrenpotenzial bei batteriebetriebenen Fahrzeugen

1.1.3.1 Wärmefreisetzung

Studien auf Basis von Brandversuchen haben gezeigt, dass bei Bränden batteriebetriebener Elektrofahrzeuge mit ähnlichen Brandgrößen wie bei Bränden konventioneller Fahrzeuge zu rechnen ist [6], [7]. Die Wärmefreisetzungsraten nach Erreichen der Vollbrandphase bewegten sich dabei zwischen 2,5 MW und 4,5 MW bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen und zwischen 3,5 MW und 5,5 MW bei BEV.

Willstrand et al. [4] führten die aus ihren Batterie- und Fahrzeugbrandversuchen abgeleiteten Daten zusammen und fanden einen linearen Zusammenhang zwischen den Spitzenwerten der Wärmefreisetzungsraten und der in der Batterie gespeicherten Energie (Abbildung 2). Zu beachten ist jedoch, dass die logarithmische Darstellung der Ordinate hier eine Genauigkeit vortäuscht, und den großen Schwankungsbereich, vor allem bei hohen Energiedichten nicht widerspiegelt.

² Zur Abschätzung der Durchschnittskonzentrationen wurde von einer Emissionsdauer von 20 Minuten, einer Gesamtkapazität von 30 kWh, einem Tunnelquerschnitt von 50 m², einer Luftdichte von 1,14 kg/m³, einer Lüftungsgeschwindigkeit von 2 m/s sowie molaren Massen von 30 g/Mol für trockene Luft bzw. 20 g/Mol für HF ausgegangen.

³ Anzumerken ist, dass die in Abbildung 1 gewählte doppelt-logarithmische Darstellung eine Genauigkeit vorgibt, die in einer linearen Betrachtung so nicht gegeben ist.

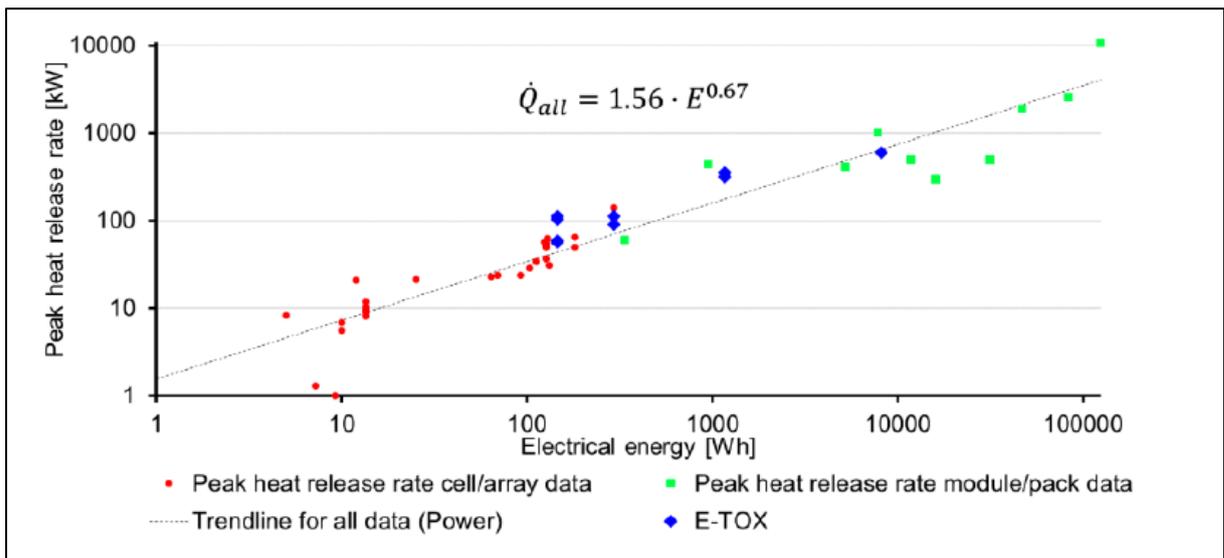


Abbildung 2: Spitzenwerte der Wärmefreisetzungsraten bei BEVs als Funktion der gespeicherten Energie der Batterien [4]

Relevant für die Personengefährdung ist jedoch nicht nur die insgesamt frei gewordene Wärmeenergie, sondern die Wärmeübertragung auf den menschlichen Körper bzw. in erster Linie die strahlungsbedingte Wärmestromdichte, deren Effekt in weiterer Folge zu Überhitzung, Verbrennungen der Haut sowie der Verbrennung der Atemwege (bei Inhalation heißer Luft bzw. mit heißem Wasserdampf gesättigter Luft) führen kann.

Alle bisher publizierten Ergebnisse zeigen, dass gemessene Wärmestromdichten deutlich über der Verträglichkeitsgrenze von 2,5 kW/m² liegen, aber stark mit zunehmendem Abstand von der Brandquelle abnehmen. Demzufolge ist eine hitzebedingte Gefährdung von Personen hauptsächlich in der unmittelbaren Umgebung zum Brandherd gegeben und grundlegende Unterschiede zwischen batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen und Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor sind diesbezüglich nicht zu erwarten.

1.1.3.2 Schadstofffreisetzung

Gut dokumentierte Brandversuche mit gesamten Fahrzeugen gibt es viel weniger als Versuche an Batterien. Wie schon bei den Batteriebränden sind auch bei Bränden von BEV die Schadstoffe Fluorwasserstoff HF und Phosphorsäure H₃PO₄ als kritische Komponenten anzuführen. Anzumerken ist jedoch, dass HF – zwar mit hohen Konzentrationen aber einer sehr kurzen Dauer – auch bei Bränden konventioneller Fahrzeuge, aufgrund der Verdampfung/Verbrennung der Kühlflüssigkeit der Klimaanlage auftritt. Bei BEV Bränden gibt es jedoch eine zweite merklich länger wirkende Emissionsperiode.

Bei den 2012 durchgeführten Versuche bei INERIS [6] sowie jenen im Rahmen des E-TOX Projektes [4] konnte HF in relevanten Dosen festgestellt werden. Willstrand et al. [4] listet die gemessenen HF Emissionsmengen verschiedener Versuche auf. Die Streuung der Messwerte ist sehr hoch. Ein Trend ist nicht erkennbar. Im Vergleich zu den von INERIS [6] veröffentlichten Daten scheint die derzeit übliche Zellchemie merklich weniger HF freizusetzen (Abbildung 3).

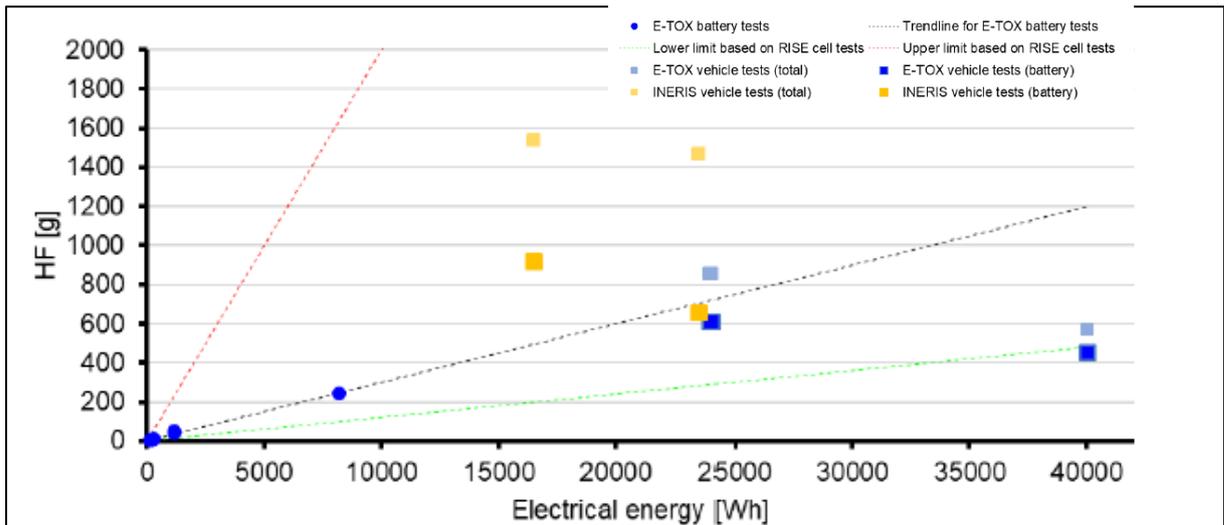


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen HF-Emissionsmengen und der gespeicherten Energie der Batterien [4]

1.2 Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV)

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie (FCEV) erfolgt die Brennstoffspeicherung in Form von Wasserstoff (H_2) und die Stromerzeugung in der Brennstoffzelle. Als Zwischenspeicher (hauptsächlich für Speicherung rekuperierter Energie) dient wiederum eine Batterie, die jedoch eine geringere Kapazität als jene von BEV hat. Ein weiterer zu berücksichtigender sicherheitsrelevanter Aspekt ist die ungewollte Freisetzung von gespeichertem H_2 . Derzeit erfolgt die Speicherung von Wasserstoff üblicherweise gasförmig bei Drücken von 700 bar (PKW) bzw. 350 bar (Nutzfahrzeuge). Um ein Bersten des Tanks zu vermeiden, sind diese mit temperaturgesteuerten Druckentlastungsventilen ausgestattet. Ab einer bestimmten Temperatur ($110^\circ C$) öffnen diese, womit es zu einem kontrollierten Ausblasen des Wasserstoffes kommt. Die für eine H_2 Entflammung geringe notwendige Zündenergie wird in der Regel zu einem sehr raschen Abbrand des Treibstoffes führen [8].

Detailliertere Untersuchungen zum Brandverhalten von FCEV wurden u.a. durchgeführt von [9], [10] und [11].

Maeda et al. [9] hat festgestellt, dass es bei einer – in Japan nach Unfällen mit FCEV zulässigen – Ausströmrates von $11,8 \text{ g } H_2/\text{min}$ und anschließender Entzündung zu keiner ernsthaften Gefahr für Personen im Abstand von 1 m zum Fahrzeug kommt. Sogar bei einem Vielfachen der zulässigen Ausströmrates ($89,9 \text{ g } H_2/\text{min}$) kann von keinen ernsthaften Gefährdungen für Personen im unmittelbaren Umfeld des Fahrzeuges ausgegangen werden. Bei den von [10] durchgeführten Brandversuchen wurde festgestellt, dass eine defekte Überdruckschutzvorrichtung in Kombination mit einer Entzündung zu umherfliegenden Teilen bis zu 100 m führen kann. Maeda et al. [9] urteilten, dass bei einer funktionierendem Überdruckschutzvorrichtung die Stichflamme eine erhebliche Gefahr für Personen im Umkreis von etwa 10 m um das Fahrzeug darstellt.

Umfangreiche Forschungsarbeiten zum Thema Wasserstoff im Tunnel laufen derzeit im Rahmen des Projektes HyTunnel [12]. Ergebnisse dazu werden Ende 2021 erwartet.

1.3 Risikomodellierung unter Berücksichtigung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

Ziel des Forschungsprojektes ist es unter anderem, die gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich neuartiger Gefährdungen für Tunnelnutzer zu quantifizieren und im österreichischen Tunnelrisikomodell [13] abbildbar zu machen.

Für die mechanische Schadenswirkung sind vor allem die aktiven und passiven Sicherheitssysteme im Fahrzeug (Bremsassistent, Airbag, Knautschzone etc.) sowie die relative Anprallgeschwindigkeit und der Anprallwinkel verantwortlich. Diese Parameter sind im Allgemeinen für konventionell und alternativ angetriebene Fahrzeuge ident. Das zu erwartende mechanische Schadensausmaß bei Unfällen mit alternativ angetriebene Fahrzeuge kann daher analog zu Unfällen mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen bestimmt werden. Die Schadenswirkung von Unfällen mit Bränden ist abhängig von Wärme- und Schadstofffreisetzung. Da hier bei BEV Bränden vor allem im Bereich der Schadstoffe Unterschiede auftreten, sind Adaptierungen notwendig. Da jedoch grundsätzlich Teilmodelle für die speziell bei Batteriebränden relevanten Stoffe – allen voran HF – bekannt sind, lassen sich die Auswirkungen von BEV Bränden mit dem österreichischen Tunnelrisikomodell bewerten. Die dazu notwendigen Grundlagedaten wurden im Zuge dieses Projektes überarbeitet.

1.4 Auswirkungen von Bränden auf Tunnelinfrastruktur und Tunnelausrüstung

Die derzeitigen im Tunnel befindlichen sicherheitstechnischen Ausrüstungen und baulichen Einrichtungen sind das Ergebnis einer jahrzehntelangen Entwicklung, die durch die Erfahrungen und den technischen Fortschritt definiert ist. Demgemäß beruhen diese auf den Anforderungen zur Erkennung von Bränden konventioneller Fahrzeuge sowie der Berücksichtigung der daraus folgenden Vorgaben in Hinsicht auf baulichen Brandschutz, Löschwasserversorgung, Gewässerschutzbecken usw. Auswirkungen von Brandereignissen von BEV Fahrzeugen wurden bis dato nicht erhoben.

1.4.1 Brandeinwirkung auf die Tunnelstruktur

1.4.1.1 Beton- und Stahlbetonstrukturen

Betone sind schlechte Wärmeleiter, wodurch im Brandfall von der Betonoberfläche zu dessen Kernbereich ein erheblicher Temperaturgradient herrscht. Die mechanischen Eigenschaften des Betons verändern sich mit steigenden Temperaturen und reduzieren die Tragfähigkeit der Bauelemente. Abplatzungen bei hohen Temperaturen reduzieren die Schutzwirkung gegenüber der Bewehrung und beschleunigen das Materialversagen. Die derzeitigen thermischen Anforderungen sind in den gängigen Regelwerken wie RVS oder RVE definiert und erfordern einen Funktionsbestand der Bauteile gegenüber einer Exposition mit hoher Temperatur-Zeit Belastung (Abbildung 4).

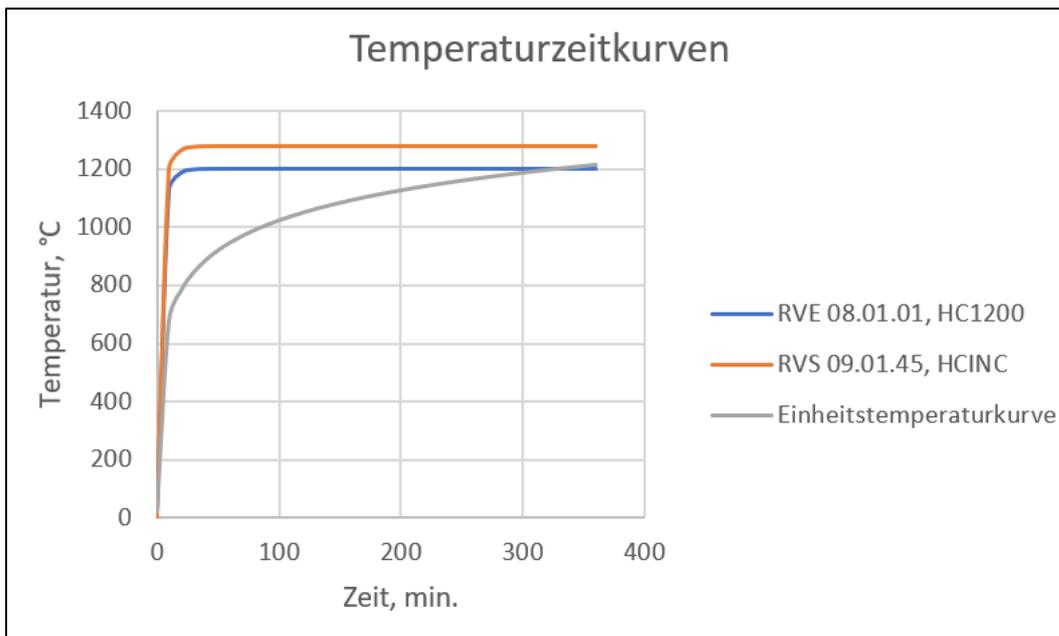


Abbildung 4: Temperaturzeitkurven in RVE 08.01.01 und RVS 09.01.45

Die durch Brände von BEV ausgehenden Problemstellungen betreffen die Themen Temperaturanforderungen sowie Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Säuren.

1.4.1.2 Einbauten aus Stahl

Tramoni et al. [14] untersuchten die Brandentwicklung und Temperaturbelastung von ungeschützten Stahlkonstruktionen in einer Tiefgarage unter verschiedenen Szenarien ausgehend von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Die Tests umfassten Dieselautos (ICEV) als Referenzfall, batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge sowie CNG- und LPG-betriebene Fahrzeuge. Der Aufbau für jeden Test bestand immer aus zwei Fahrzeugen, einem NEC Fahrzeug und einem ICEV, die Seite an Seite standen. Die Zündung fand immer im NEC Fahrzeug statt (außer im Basisfall mit zwei dieselbetriebenen Verbrennungsmotoren). Das FCEV war mit einem 770 bar-Wasserstofftank und einem auf den Boden gerichteten Standard-TPRD ausgestattet. Das LPG-Fahrzeug war mit einem Überdruckventil (27 bar) und einem TPRD (110°C) ausgestattet. Der Tank des CNG-Fahrzeugs war ebenfalls mit einem TPRD ausgestattet. Das BEV (Modelljahr 2010) enthielt eine LMP-Batterie und repräsentiert eine Technologie, die heute veraltet ist. Dabei wurden sowohl die Branddynamik als auch die Temperaturen an den Stahlkonstruktionen beobachtet. Die Autoren schlossen wie folgt:

Die globale Analyse der Versuche zeigte, dass sich die Struktur bei allen Tests auf die gleiche Weise erwärmte. Bei den Referenz-, Brennstoffzellen- und LPG-Tests lagen die Temperaturen etwas über 900°C. Der Hauptunterschied war in der örtlichen und zeitlichen Lage dieses Maximums zu sehen. Referenz-, CNG- und LPG-Fahrzeuge zeigten maximale Temperaturen über dem NEC Auto, während beim FCEV das Maximum über dem zweiten Fahrzeug (ICEV) lag. Das BEV zeigte im Test eine gleichmäßige, aber geringere Erwärmung. Diese Tests legen nahe, dass die Stabilität der Struktur durch den Fahrzeugtyp nicht unterschiedlich beeinträchtigt wird.

Beim BEV konnte kein thermisches Durchgehen der Batterie beobachtet werden. Bei den anderen Fahrzeugen führte die Aktivierung der Sicherheitseinrichtungen der Gastanks zu

einer deutlichen Erhöhung der Wärmeaufnahme der Bauteile. Die Dauer war jedoch zu kurz, um zu kritischen Auswirkungen auf die Stahlstruktur zu führen.

1.4.2 Betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen für die Branderkennung und -bekämpfung

1.4.2.1 Sensorik

In Bezug auf betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen sind derzeit keine NEC-spezifischen Einrichtungen vorhanden. Nachdem die Brandcharakteristik bei BEV sich von jener konventioneller PKW nur unwesentlich unterscheidet, sind Branddetektion und Rauchsensoren auch bei NEC Fahrzeugen wirksam. Ein Problem könnte sich bei Bränden von FCEV einstellen, da die H₂ Flamme fast farblos ist und somit Rauchdetektion – solange das Fahrzeug am Brand nicht beteiligt ist – eine eingeschränkte Wirkung hat.⁴

1.4.2.2 Einrichtungen zur Brandbekämpfung

Aus durchgeführten Brandversuchen mit BEV ist bekannt, dass große Mengen an Löschwasser zur Kühlung der Brandquelle (Energiequelle) notwendig sind. Gängige Methoden die zum Sauerstoffentzug am Brandort führen (Schaum bzw. Löschdecken) zeigen kaum Wirkung, da die Batterie genügend Sauerstoff in sich hat und somit der Brand ungehindert ablaufen kann. Wassernebelanlagen – vor allem Hochdruckwassernebelanlagen (HDWNA) – zur Brandunterdrückung können sich positiv auswirken, da durch die feine Verteilung der Wassertröpfchen und den hohen Wärmeentzug durch deren Verdampfung ein guter Kühleffekt zu erwarten ist. Im Forschungsprojekt SUVEREN [15] konnte die positive Wirkung von HDWNA auf die Brandunterdrückung bei BEV Bränden im Großversuch nachgewiesen werden.

1.4.2.3 Löschwasserentsorgung

Nachgewiesenermaßen benötigen BEV große Mengen an Wasser zur Löschung bzw. nachhaltigen Kühlung der Energiespeicher. Üblicherweise werden Werte um 10 m³ pro brennendem BEV der PKW Klasse angeführt. Die derzeitigen Wasserrückhalteanlagen in Tunneln sind für größere Mengen ausgelegt, sodass sich für PKW Brände kein Anpassungsbedarf ergibt.

Für Brände der Kategorie BEV Nutzfahrzeuge gibt es derzeit noch keine Untersuchungen.

1.4.3 Brandbekämpfung – Löschrategie

Betrachtet man die Checkliste für den Einsatzleiter der Feuerwehr muss man feststellen, dass die Abarbeitung der üblichen Vorgangsanweisungen in unterirdischen Verkehrsanlagen deutlich schwieriger ist. Bereits das Erkennen der Gefahr, in diesem Fall vorerst das Erkennen, dass es sich um ein elektrisch betriebenes Fahrzeug handelt, ist an sich schwierig und durch die Sichtverhältnisse erschwert. Aufschriften und Kennzeichen am Tankdeckel sind bei einem Brandereignis an sich schwer zu erkennen, aber in der Umgebung in einem Tunnel noch schwieriger.

Die Angriffsrichtung ergibt sich aus Randbedingungen wie Verkehrsführung, Lüftungsanlage und vorherrschende Lüftungsrichtung und ist somit nicht mehr frei wählbar. Das Tragen eines umluftunabhängigen Atemschutzes ist im Tunnel jedenfalls vorgesehen und die Verwendung des Löschmittels Wasser ebenfalls kein Problem, sondern Stand der Technik.

⁴ Auf die Situation einer H₂ Freisetzung und den daraus folgenden Wirkungen wird im Projekt BRAFA nicht näher eingegangen. Dies ist Gegenstand eines anderen Forschungsprojektes.

Der aktuelle Stand bei der Brandbekämpfung ist die Verwendung von Wasser in großen Mengen. Die daraus resultierende Kühlwirkung kann die Auswirkungen eines Thermal Runaway abmildern, bzw. eine Ausbreitung des Brandes verhindern. Nachteilig sind dabei die erforderliche hohe aufzubringende Löschwasserrate, sowie die Löschdauer bzw. die Schwierigkeit das Löschwasser möglichst direkt an der Quelle des Brandes im Inneren der Batterie einzubringen. Das Ziel der Feuerwehr ist es Möglichkeiten zu finden, den Brand schneller unter Kontrolle zu bringen. Aus den bisherigen Erfahrungen und Entwicklungen ergeben sich dafür folgende Varianten, welche bei den Brandversuchen im Realeinsatz getestet wurden.

Einerseits können dem Löschmittel Wasser Löschmittelzusätze für eine bessere Löschwirkung zugesetzt werden. Andererseits werden aktuell Löschdecken für PKW am Markt angeboten, die eine schnelle Rauchunterdrückung bewirken sollen. Löschlanzen ermöglichen den gezielten Einsatz des Löschmittels im Inneren des Batteriegehäuses, wenn es gelingt, mit der Spitze der Lanze durch das Gehäuse einzudringen. Die hohen Temperaturen können dabei zur Zerstörung der Lanze und zum Schmelzen des Materials führen. Dies wurde bereits bei einigen Versuchen festgestellt, weshalb sich die Produktwahl schwierig gestaltet. Darüber hinaus zeigt sich aus den bisherigen Brandversuchen, dass Löscharbeiten im Nahbereich der in Brand geratenen Batterie aufgrund der Freisetzung brennbarer Gase die Sicherheit der Einsatzkräfte gefährden bzw. dabei besondere Vorsicht geboten ist.

Letztendlich ist der derzeitige Erfahrungsschatz noch relativ klein, wodurch eine eindeutige Verfahrensvorschrift zur Bekämpfung von BEV Bränden noch nicht vorliegt.

2 Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen zu Bränden batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge

Aufgrund der derzeit forcierten Einführung von BEV Fahrzeugen in die Fahrzeugflotte sowie des demgegenüber derzeit noch geringen Anwendungsgrades von FCEV im täglichen Gebrauch, lag der Fokus des Forschungsvorhabens BRAFA klar im Bereich der BEV.

Die Untersuchungen wurden wie folgt systematisch aufgebaut.

2.1 Voruntersuchungen an einzelnen Batteriezellen

Diese dienten dazu methodische Untersuchungen zur Auslösung eines Batteriebrandes durchzuführen. Dazu wurden folgende Methoden untersucht: Penetration der Batterieelemente / mechanischer Schaden, Überladung und Entzündung mittels externer Wärmezufuhr. Dabei stellte sich heraus, dass aufgrund zunehmender Sicherheitsmaßnahmen eine Brandentstehung durch Überladung aber auch durch mechanische Schädigungen geringeren Ausmaßes (Nagel-Penetration) eine zuverlässige Brandentstehung nicht sichergestellt werden kann. Es kam teilweise zum thermischen Durchgehen einzelner Zellen, aber nicht immer zu einem gesicherten Brand. Schlussendlich zeigte sich die Methode der externen Wärmezufuhr mittels Gasbrenner als zuverlässigste Methode zur Erzeugung eines Brandes der gesamten Batterie.

2.2 Brandversuche an Batteriemodulen und Batteriepacks

In einem Folgeschritt wurden Brandversuche mit Batteriemodulen in größerem Maßstab durchgeführt, wobei diese bereits in einer Tunnelumgebung stattfanden. Der erste Teil dieser Brandversuche fand in einem Versuchstunnel mit einem Querschnitt von ca. 1.9 m² statt. Die Entzündung der Module erfolgte durch externe Gasbrenner. Ziel dieser Versuche war, einen Einblick in das Brandverhalten einzelner Module zu bekommen und die Messtechnik für Großversuche festzulegen. Aufgrund der limitierten budgetären Mittel zeigte sich die Verwendung von Filterstacks mit Quarzfiltern als Vorabscheider für HF, HCl und H₃PO₄ sowie online Messungen mit vorgeschalteten Waschflaschen für NO_x, CO, CO₂ und O₂ als zielführend. Bei den Filterstacks erfolgte eine serielle Beprobung, um ebenso einen gewissen Zeitverlauf der Emissionsentwicklung aufzuzeichnen. Die Quarzfilter als Vorabscheider dienten zudem der Analyse der Schwermetalle. Als letzter Teil der Vorversuche wurde eine vollständige Batterieanordnung eines BEV (17 NMC Module) im Tunnel im vollen Querschnitt in Brand gesetzt, um die für die nachfolgenden Brandversuche an Gesamtfahrzeugen bestmögliche Anordnung der Sensoren für die Gasmessungen sowie jener für die thermischen Messungen zu finden (siehe Abbildung 5). Die im Rauchgas ermittelten Konzentrationen von HF, HCl und H₃PO₄ lagen aufgrund der hohen Verdünnung mit Tunnelabluft allesamt unter den entsprechenden IDLH Werten.



Abbildung 5: Brandversuch vollständige Batterieanordnung PKW (17 Module)

2.3 Brandversuche an Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb sowie konventionellen Fahrzeugen

Die Versuchsreihe umfasste fünf Fahrzeuge der PKW Klasse, wobei drei davon BEV und zwei konventionelle ICEV waren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Versuchsfahrzeuge. Der Ladezustand der Batterien lag bei allen Versuchen auf 100%.

Tabelle 1: Übersicht über die Versuchsträger

Versuch	Fahrzeugklasse	Fahrzeugtyp	Batterietyp/ Kraftstoff	Entzündung	Anmerkung
BV01	Kompaktwagen	BEV 2020	ca. 80 kWh, NMC	Auslösung eines Kurzschlusses in der Batterie durch NaCl _{aq} Flutung	Einsatz Löschdecke
BV02	Kleintransporter	BEV 2016	24 kWh, LMO	Externe Wärmezufuhr Batterie (Gasbrenner auf Batterieunterboden)	
BV03	SUV	ICEV 2020	Diesel	Befuerung des Innenraums	
BV04	Kleintransporter	ICEV 2010	Diesel	Befuerung des Motorraums	
BV05	SUV	BEV 2020	ca. 80 kWh, NMC	Innenraum, nach 10 Minuten Zündung Batterie durch NaCl _{aq} Flutung	Einsatz Löschlanze

Der Versuchsaufbau war bei allen Fahrzeugen gleich. Die Brandentstehung wurde variiert, um die unterschiedlichen Forschungszwecke bestmöglich abzudecken. Während zum einen das Brandverhalten mit den Parametern Wärmefreisetzungsrate und Schadstoffemissionen von großem Interesse war, lag der Fokus der beteiligten Feuerwehr auf der Brandbekämpfung.

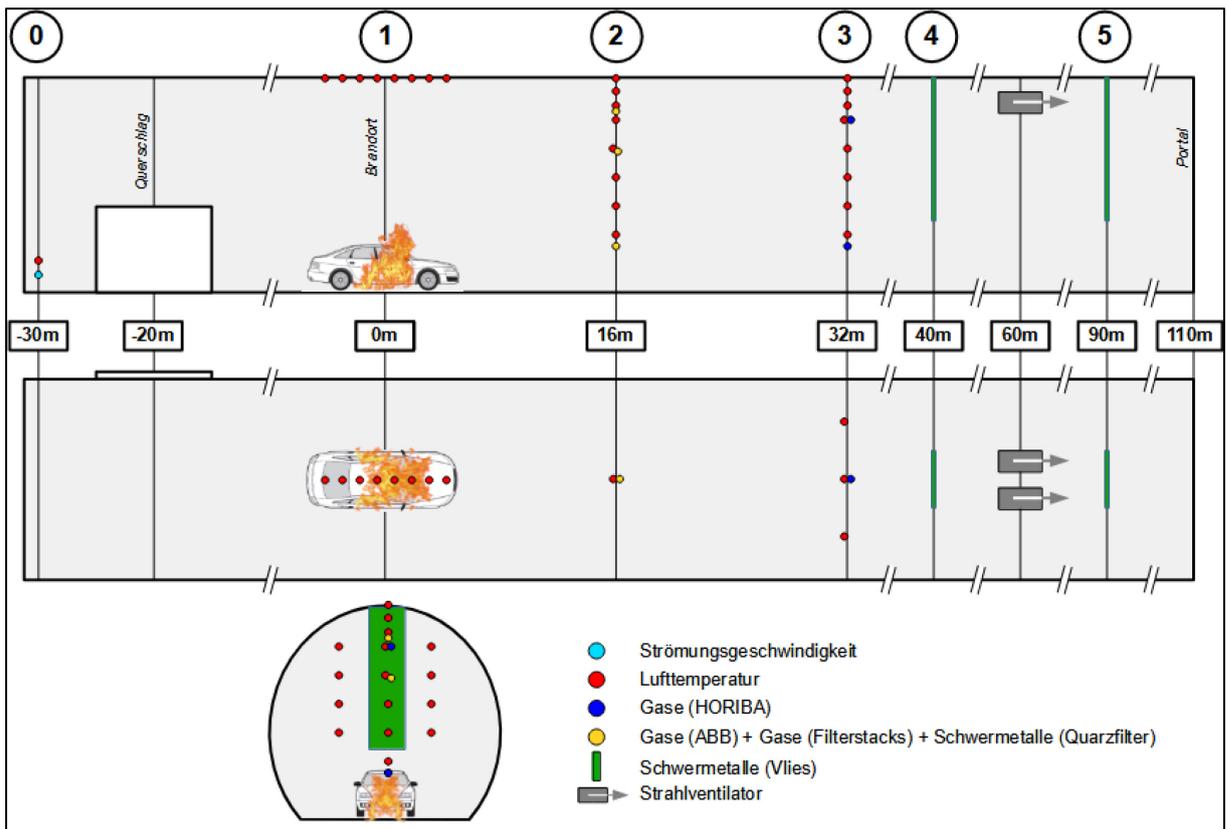


Abbildung 6: Messaufbau Fahrzeugversuche

Abbildung 6 zeigt den Messaufbau für die Messung der Gaskonzentrationen und Temperaturprofile, Abbildung 7 zeigt den Versuchsträger BV02 bei Vollbrand von Fahrzeug und Energiespeicher.



Abbildung 7: BV02 Vollbrand Fahrzeug und Batterie

2.3.1 Wärmefreisetzungsrate

Eine direkte Messung der Wärmefreisetzungsrate ist nicht möglich, da dazu der Masseverlust mit dazugehörigem Heizwert als Funktion der Zeit bekannt sein müsste. Dies ist aber schon alleine aufgrund der unbekanntenen Brandentwicklung (d.h. welche Komponente im Fahrzeug gerade brennt) nicht machbar. Üblicherweise wird die Wärmefreisetzungsrate über die entstandenen Verbrennungsprodukte und den Restsauerstoffgehalt in den Brandgasen bestimmt. Dies ist die bevorzugte Methode bei Brandversuchen in geschlossenen Brandhäusern mit einem relativ geringen Luftvolumenstrom. Bei Realbrandversuchen in Tunnelanlagen ist diese Methode nicht zielführend, da aufgrund der hohen Luftmenge (trotz niedriger Luftgeschwindigkeit) die Abnahme des O₂ Gehaltes im Rauchgas verschwindend gering ist. Also musste auf eine alternative Variante zurückgegriffen werden. Konkret wurde mithilfe der Temperaturmessungen der Enthalpiestrom vor und nach dem Brandort berechnet und aus der Differenz die effektiv an den Luftstrom abgegebene Wärmemenge ermittelt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass etwaige in die Tunnelwand gehende Strahlungswärme bereits exkludiert ist. Der Nachteil besteht darin, dass ein sehr genaues Temperaturprofil über den gesamten Tunnelquerschnitt mit der dazugehörigen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein muss. Auf Basis des vorhandenen Temperaturmessnetzes konnte eine gute vertikale Temperaturverteilung ermittelt werden. Abweichungen in horizontaler Richtung (quer zur Tunnellängsachse) sind nur spärlich erhoben, es zeigte sich allerdings an den Temperatursensoren bei Messort 3, dass diese nur gering voneinander abweichen. Die größte Unsicherheit liegt jedoch bei der Ermittlung der Luft/Rauchgasgeschwindigkeit in Tunnellängsrichtung. Hier wurde mittels Ultraschall-Anemometer der Mittelwert über den gesamten Tunnelquerschnitt stromaufwärts des Brandortes erhoben. Zu erwarten ist jedoch, dass aufgrund der brandbedingten Temperatur- und Rauchsichtung in den oberen (wärmeren) Bereichen eine höhere Geschwindigkeit vorliegt als in den unteren Bereichen des Querschnitts. Trotz dieser Unzulänglichkeiten konnten jedoch plausible und vor allem vergleichbare Wärmefreisetzungsraten ermittelt werden.

Tabelle 2 enthält die Wärmefreisetzungsraten, in Abbildung 8 ist der zeitliche Ablauf der Wärmefreisetzung dargestellt. Die unterschiedlichen Zeiten des Anstieges der Wärmefreisetzung sind auf die unterschiedlichen Arten der Zündung des Brandes – äußere Wärmezufuhr, Brand vom Motorraum aus und Brand vom Innenraum aus – zurückzuführen. Die teilweise starken Abnahmen der Wärmefreisetzung – vor allem beim BV01 – begründet sich im Einsatz von Löschmitteln.

Tabelle 2: Wärmefreisetzungsrate (HRR)

Versuch	Max. HRR [MW]	Durchschnittliche HRR [MW]	Anmerkung
BV01 (BEV)	7,0	2,7	Löschversuch nach ca. 500 s mittels Löschdecke
BV02 (BEV)	6,1	3,4	Teilweise Messausfall
BV03 (ICEV)	4,9	2,5	10 Minuten Brand mit ca. 2 MW, dann Anstieg auf durchschnittlich 3,5 MW über 5 Minuten
BV04 (ICEV)	2,3	1,5	Ausschließlich Karosserie, Tank war fast leer
BV05 (BEV)	4,9 / 10,7	3 / 5	Zuerst 10 Minuten Brand der Karosserie / nach 10 Minuten sehr rasche Entzündung der Batterie aufgrund Flutung mit NaCl und rapider Anstieg der Wärmefreisetzung

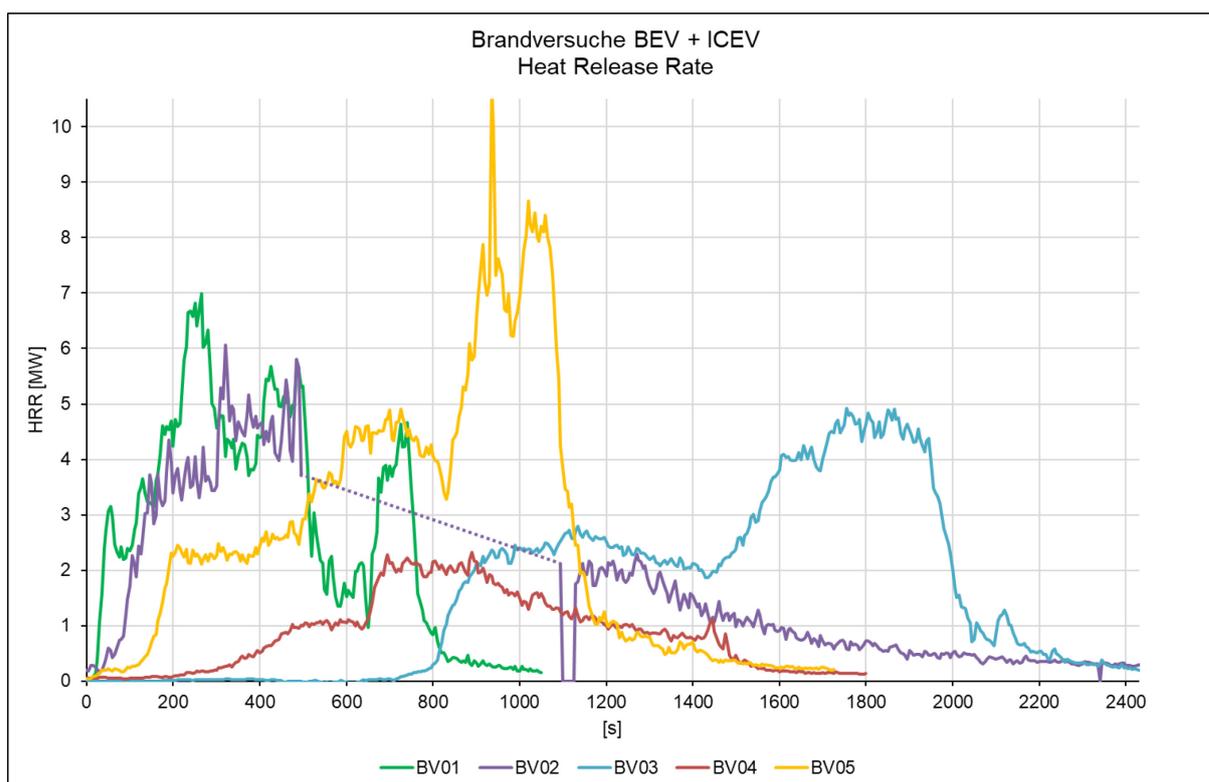


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrates bei den Brandversuchen

Prinzipiell kann geschlossen werden, dass bei den durchgeführten Brandversuchen mit BEV die maximale sowie die durchschnittliche Wärmefreisetzungsrates gegenüber dem herkömmlichen Fahrzeug (ICEV) erhöht ist. Hierfür werden die Versuchsträger der Fahrzeugklasse „Kleintransporter“ (BV02 vs. BV04) bzw. der Klasse „SUV“ (BV03 vs. BV05) miteinander verglichen.

Kommt es zu einer Spontanreaktion, die die gesamte Batterie innerhalb kürzester Zeit erfasst (BV01 gleich zu Beginn bzw. BV05 nach ca. 1400 s), so ist über einige Minuten eine merklich höhere Wärmefreisetzung zu erwarten.

Brandversuch BV04 mit einem herkömmlichen Fahrzeug (ICEV) ohne Treibstoff zeigt, dass das Fahrzeug alleine (Karosserie, Interieur, Reifen etc.) eine Wärmefreisetzung von 2 MW über einen längeren Zeitraum generiert. Dem steht gegenüber BV03, bei dem nach einer ähnlichen Wärmefreisetzung innerhalb der ersten 10 Minuten durch die Brandentfackung des Kraftstoffes (ICEV) die Wärmefreisetzungsrates verdoppelt wurde. Handelt es sich um baugleiches BEV bei 100% SOC, so ist die maximale Wärmefreisetzung nochmals um ca. 1 MW höher. Lediglich bei spontaner Reaktion der gesamten Batterieeinheit ist mit einer merklich höheren Wärmefreisetzung zu rechnen.

2.3.2 Gasemissionen

Es wurde festgestellt, dass es bei BEV Bränden zu deutlich höheren CO-Emissionen kommt als bei ICEV Bränden. Dies ist auf die chemische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterien zurückzuführen, deren Bestandteile wie organische Lösungsmittel selbst als Quelle für Sauerstoff und in weiterer Folge für CO dienen. Es ist aber auch anzuführen, dass an keinem Messpunkt IDLH-Werte überschritten wurden und somit keine unmittelbare Gefahr für Leib und Leben bestand. Die konstanten O₂-Verläufe bestätigen die Annahme, dass es sich auch hier um kraftstoffgesteuerte Brände handelte.

Bei den Gasmessungen konnte festgestellt werden, dass H_3PO_4 bei allen Versuchen und Messpunkten unter der Nachweisgrenze lag. Bei HF und HCl konnte im Allgemeinen die Schichtung der Rauchgase mit hohen Konzentrationen im Firstbereich und niedrigen Werten im unteren Bereich dokumentiert werden. Bei HF wurden teilweise die IDLH-Werte im Firstbereich überschritten. Bei den restlichen Messstellen – und vor allem im Bereich von 1.6 m (durchschnittliche Kopfhöhe) – lagen die HF Werte merklich niedriger. Generell war festzustellen, dass bei BEV Bränden – wie zu erwarten – merklich mehr HF freigesetzt wird als bei konventionellen Fahrzeugen. Bei HCl ist bei beiden Fahrzeugtypen (BEV bzw. ICEV) von vergleichbaren Größenordnungen auszugehen, da hier die Ursache in der Verbrennung des Interieurs zu sehen ist und nicht im Energiespeicher. Die HCl Konzentrationen lagen immer unterhalb der kritischen IDLH-Werte.

Anmerkung: Alle Werte werden auf Normbedingungen gem. DIN 1343 (273,15 K und 101 325 Pa) bezogen.

Tabelle 3: Höchstwerte Gasemissionen bei den Fahrzeugbrandversuchen (klassische Brandgase)

Test-Nr.	CO [mg/Nm ³]			CO [mg/Nm ³]		CO ₂ [vol%]		NO _x [mg/Nm ³]	
Messort	②			③		③		③	
Höhe über Fahrbahn	6,4 m	4,8 m	1,6 m	6,0 m	1,6 m	6,0 m	1,6 m	6,0 m	1,6 m
BV01	706	158	96	n/a	344	n/a	0,317	n/a	17
BV02	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
BV03	231	197	30	222	131	0,522	0,199	32	12
BV04	75	70	14	77	29	0,229	0,109	18	8
BV05	526	487	73	450	229	0,735	0,414	36	20
IDLH-30	1500					4		41	

Anmerkung: n/a = nicht analysiert, * = Messwerte kleiner der Nachweisgrenze

Tabelle 4: Höchstwerte Gasemissionen bei den Fahrzeugbrandversuchen (saure Gase)

Test-Nr.	HCl [mg/Nm ³]			SO ₂ [mg/Nm ³]			H ₃ PO ₄ [mg/Nm ³]			HF [mg/Nm ³]		
Messort	②			②			②			②		
Höhe über Fahrbahn	6,4 m	4,8 m	1,6 m	6,4 m	4,8 m	1,6 m	6,4 m	4,8 m	1,6 m	6,4 m	4,8 m	1,6 m
BV01	61,8	31,0	4,4	2,8	14,3	1,5	2,5	1,3	0,3	38,4	10,3	13,5
BV02	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
BV03	61,2	32,1	0,9	0,9	3,0	0,5	0,1	0,1	0,1	8,3	3,2	0,7
BV04	n/a	6,3	n/a	n/a	3,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	*	n/a
BV05	18,8	35,0	2,6	0,5	9,3	0,7	n/a	n/a	n/a	17,3	20,1	5,3
IDLH-30	81			286			1092			27		

Anmerkung: n/a = nicht analysiert, * = Messwerte kleiner der Nachweisgrenze

2.3.3 Schwermetalle

Im Gegensatz zu den Gasmessungen konnten Schwermetalle über die Analyse der Quarzfilter nur als Durchschnittswerte über den gesamten Versuchsablauf ermittelt werden. Die BEV Brände zeigen erhöhte Werte der Elemente Al, Co, Li, Mn und Ni, was sich durch die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Batterietechnologie (NMC) erklären lässt. Die Hauptbestandteile der NMC Batterie setzen sich aus Nickel, Mangan und Cobalt in der Kathode, Lithium im Elektrolyt und Aluminium als Gehäuse zusammen. Der Stromkollektor (Current-Collector), auf den das Aktivmaterial der Elektroden aufgebracht ist, ist häufig Kupfer (Anode) bzw. Aluminium (Kathode); das Anodenmaterial besteht häufig aus Graphit (C). Kupfer ist als elektrischer Leiter in Kabeln verbaut. Der Vergleich mit den IDLH-Werten zeigt, dass bei Nickel diese Grenzwerte überschritten wurden (in Tabelle 6 rot hinterlegt). Allerdings ist anzuführen, dass die Überschreitungen für die Messhöhen 6,4 m und 4,8 m über Fahrbahn zu verzeichnen waren, in der für den Menschen relevanten Messhöhe von 1,6 m (Kopfhöhe) wurde der IDLH-Grenzwert nicht mehr erreicht.

Tabelle 5: IDLH-30 Grenzwerte für die gemessenen Schwermetalle

Element		Grenzwert [mg/Nm ³]
Aluminium	Al	-
Antimon	Sb	55
Blei	Pb	109
Cadmium	Cd	10
Cobalt	Co	22
Kupfer	Cu	109
Lithium	Li	-
Mangan	Mn	546
Nickel	Ni	11
Selen	Se	1
Thallium	Tl	16

Tabelle 6: Höchstwerte Schwermetallkonzentrationen [mg/Nm³] bei den Fahrzeugbrandversuchen

Element [mg/Nm ³]	BV01			BV02			BV03			BV04			BV05		
Messort	②														
Höhe über Fahrbahn	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6, m	4,8m	1,6m
Al	5.988	4.318	0.899	n/a	n/a	n/a	0.157	0.415	0.354	n/a	0.238	n/a	5.381	3.197	0.697
Sb	0.998	0.565	0.376	n/a	n/a	n/a	0.428	0.237	*	n/a	*	n/a	0.356	0.273	*
Pb	*	*	*	n/a	n/a	n/a	*	*	*	n/a	0.119	n/a	0.047	*	*
Cd	0.002	*	*	n/a	n/a	n/a	0.001	*	*	n/a	*	n/a	0.001	*	*

Element [mg/Nm ³]	BV01			BV02			BV03			BV04			BV05		
Messort	②														
Höhe über Fahrbahn	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6,4m	4,8m	1,6m	6, m	4,8m	1,6m
Co	9.139	4.215	0.730	n/a	n/a	n/a	*	*	*	n/a	*	n/a	6.292	*	0.558
Cu	0.746	0.668	0.281	n/a	n/a	n/a	0.233	0.222	*	n/a	*	n/a	0.993	0.780	0.172
Li	5.778	4.524	0.899	n/a	n/a	n/a	0.038	*	*	n/a	*	n/a	4.222	4.679	0.837
Mn	11.555	5.963	0.899	n/a	n/a	n/a	0.045	0.142	*	n/a	*	n/a	8.692	5.458	0.744
Ni	26.262	20.048	3.371	n/a	n/a	n/a	0.151	0.503	0.188	n/a	*	n/a	29.140	18.325	2.603
Se	0.032	*	*	n/a	n/a	n/a	*	*	*	n/a	*	n/a	*	*	*
Tl	*	*	*	n/a	n/a	n/a	*	*	*	n/a	*	n/a	*	*	*

Anmerkung: n/a = nicht gemessen, * = Messwerte kleiner der Nachweisgrenze

2.3.4 Thermische Belastung

Die Lufttemperaturen wurden an mehreren Positionen bzw. Höhen gemessen. Am höchsten sind die Temperaturen direkt über dem Brandort an der Tunnelfirste, mit steigender Entfernung zum Brandort sinken erwartungsgemäß die Temperaturen in dieser Höhe. Die maximalen Temperaturen sind in nachstehender Tabelle dargestellt und stimmen gut mit den Ergebnissen der Wärmefreisetzungen überein. Die niedrigen Temperaturen bei BV04 decken sich mit dessen geringen Wärmefreisetzungsraten bzw. Wärmeinhalten. Umgekehrt zeigen die Brandversuche mit hoher HRR auch hohe Temperaturmaxima.

Tabelle 7: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase an der Tunnelfirste bei den Fahrzeugbrandversuchen

Test-Nr.	max. Temperatur ①	max. Temperatur ②	max. Temperatur ③	Bemerkung
BV01	203 °C	113 °C	100 °C	
BV02	146 °C	101 °C	76 °C	Teilweise Messausfall
BV03	126 °C	80 °C	71 °C	
BV04	80 °C	46 °C	40 °C	
BV05	175 °C	109 °C	92 °C	

Tabelle 8: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase in Kopfhöhe (2 m über Boden) bei den Fahrzeugbrandversuchen

Test-Nr.	max. Temperatur ②	max. Temperatur ③	Bemerkung
BV01	40 °C	49 °C	
BV02	27 °C	41 °C	Teilweise Messausfall
BV03	25 °C	30 °C	
BV04	18 °C	22 °C	
BV05	51 °C	56 °C	

2.3.5 Schadstoffablagerungen an den Tunnelwänden

Zur Erfassung von Schadstoffablagerungen an den Tunnelwänden wurde während der Brandversuche Vliese an zwei unterschiedlichen Stellen stromabwärts der Brandstelle den Rauchgasen ausgesetzt. Als Vergleichswert wird eine Referenzmessung aus dem 10 km langen Plabutschtunnel bei normalem Verkehrsaufkommen (ca. 12.000 Kfz pro Tag und Röhre) angeführt. Ein Vergleich der Messungen bei den BEV-Brandversuchen mit den Expositionsmessungen aus dem Plabutschtunnel im Normalbetrieb zeigt, dass brandbedingt bei den Hauptbestandteilen der Batterien Li, Mn, Ni und Co aber auch bei Zn eine deutliche Mehrbelastung auftritt. Lediglich bei den Metallen Fe und Al dominiert der Normalbetrieb. Bei Bränden von konventionellen Fahrzeugen wurden zwar auch erhöhte Ni, Mn und Co Belastungen festgestellt, jedoch in einem merklich geringeren Ausmaß.

2.3.6 Schadstoffbelastung des Löschwassers

Zur Erfassung möglicher Kontaminierungen des Löschwassers wurden bei den einzelnen Versuchen Proben aus der Gewässerschutzanlage gezogen. Diese wurden auf die kritischen Spurenstoffe untersucht. Als Vergleichsbasis wurde Abwasser einer Tunnelwäsche im Plabutschtunnel sowie der Tunnelwäsche nach Durchführung der Brandversuche im Versuchstunnel des ZaB herangezogen.

Prinzipiell ist zu den Wasseranalysen zu sagen, dass es sich hier um reine Konzentrationsmessungen handelte, die verwendete Wassermenge jedoch stark variiert. Besonders bemerkbar ist dies beim Vergleich der Konzentrationen der Tunnelwaschwässer Plabutsch und ZaB etwa bei Aluminium. Während die Flächenbelastungen der Tunnelschale im Plabutschtunnel gegenüber den Brandversuchen im ZaB merklich höhere Werte aufweisen, finden sich im Waschwasser des ZaB um ein Mehrfaches höhere Werte als für den gleichen Vorgang im Plabutschtunnel. Eine umgekehrte Aussage lässt sich für Zink treffen⁵.

Die Messungen zeigten, dass in den Fällen der BEV im Löschwassers teilweise Schadstoffkonzentrationen in der Nähe der zulässigen Grenzwerte auftraten.

2.3.7 Brandbekämpfung

Prinzipiell dienten die Versuche dazu Erfahrungen über die Brandentwicklung und eine mögliche nachfolgende Brandbekämpfung zu machen. Aufgrund der Notwendigkeit der Erfassung von Informationen für Fahrzeuge im Vollbrand, konnten Löschversuche aber erst nach vollständiger Entwicklung eines Vollbrandes und genügender Zeit zur Messdatenerfassung gestartet werden.

Sehr deutliche Unterschiede zwischen ICEV und BEV ergeben sich beim Flammenbild während des Brandes. Da die Batterie im Unterraum verbaut ist, entwickeln sich die Flammen eindeutig unter dem Auto heraus und zur Seite. Ein solches Flammenbild ist ein deutliches Zeichen für einen Batteriebrand.

Während einzelner Versuche wurden unterschiedliche Löschtechniken getestet. Neben dem Einsatz von Wasser als herkömmliches Löschmittel wurden auch alternative Löschverfahren wie z.B. der Einsatz einer Löschdecke oder von Lösch-/Kühlanlagen erprobt. Abbildung 9 zeigt den Einsatz einer Löschdecke im Rahmen des BV01 (BEV). Die Löschdecke

⁵ Anzumerken ist, dass Al auch in hohen Anteilen im mineralischen Abrieb (Gestein) enthalten ist und hier vor allem im derzeitigen Betriebszustand des ZaB noch hohe Staubmengen im Tunnel- und Abwassersystem enthalten sind.

wurde auf das im Vollbrand stehende BEV gezogen. Dies führte zu einem merklichen Rückgang der Wärmefreisetzung (siehe Abbildung 10, BV01 bei 500 s). Da jedoch die Sauerstoffzufuhr für das Brandgeschehen zum Teil durch die Batterie selbst erfolgt, ist ein Erstickten der Flammen – wie dies bei einem konventionellen Brennstoff möglich wäre – nicht möglich. Nach ca. 3 Minuten musste der Versuch mit der Löschdecke aufgegeben werden, da unter anderem die Löschdecke auch schon schadhaft war. Dies ist auch aus dem Zeitverlauf in Abbildung 10 ersichtlich, wo ab ca. 650 s das Brandgeschehen wieder voll auflebte. Nachdem das Fahrzeug inklusive Energiespeicher fast vollständig ausgebrannt war, konnte mit Wasser eine endgültige Löschung des Brandherdes erfolgen.



Abbildung 9: Einsatz einer Löschdecke bei BV01 (Foto: Lunghammer/TU Graz)

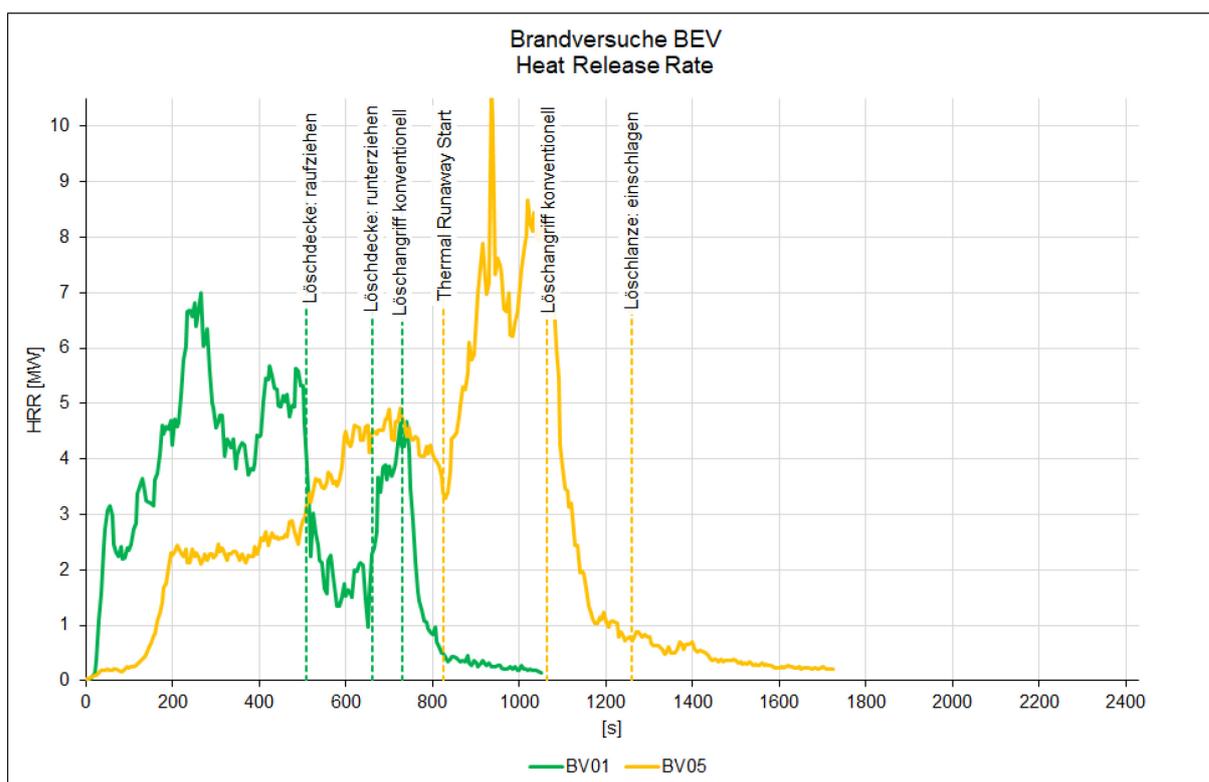


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung bei BV01 und BV05

Als alternative Löschmethode wurde der Einsatz einer Löschlanze erprobt. Dies wurde zuerst an einem vollständigen Batteriepack eines PKW getestet und erst in weiterer Folge bei einem Brandversuch (BV05) eingesetzt. Die Intervention durch die Feuerwehr mit konventionellem Löschmittel erfolgte hier ca. 1050 s nach Brandbeginn sowie der Einsatz einer Löschlanze ca. 1275 s nach Brandbeginn.

Das Einbringen der Lanze gestaltete sich schwierig und zeigt, dass Übung und Vorwissen über Wirkungsweise und Gefahren des Einsatzes einer Löschlanze erforderlich sind. Vor allem wenn man die Löschlanze in Bereichen der Batterie einsetzt, bei denen augenscheinlich noch kein Thermal Runaway stattgefunden hat. Die Lanze wurde dabei von einem Feuerwehrmann gehalten und musste beim Eintreiben in die Batterie in der Lage korrigiert werden, dabei berührte der Feuerwehrmann die nicht isolierte Schlagplatte und bekam einen kurzen Stromschlag, der keine weiteren Auswirkungen oder Verletzungen zu Folge hatte. Wenn die Lanze richtig eingetrieben wurde ist eindeutig erkennbar, dass sie funktioniert, der Brand rasch unter Kontrolle gebracht wird und in weiterer Folge auch zeitnah gelöscht werden kann.

Das erste Fazit aus diesem Versuch ist, dass die Lanze eine erfolgreiche Brandbekämpfung ermöglicht, aber nicht für jede Feuerwehr geeignet scheint, sondern für Spezialfeuerwehren wie Betriebsfeuerwehren (BTF) in entsprechenden Produktionsbetrieben oder Berufsfeuerwehren (BF) sinnvoll ist.

Bezüglich der Verwendung von Wasser zur Brandbekämpfung kann wie folgt zusammengefasst werden: Der Löschwasserverbrauch ist bei den durchgeführten Versuchen beim BEV Brand nicht wesentlich höher als beim Brand eines ICEV, so wie bisher angenommen und aus Einsätzen bekannt. Eine Ursache dafür liegt vermutlich an der Art der Zündung der Batterie mit NaCl und der dadurch erzielten schnellen Brandentwicklung, sowie an der Vorbrenndauer bis zum Beginn des Löschvorganges, welche jeweils lange war und somit die

Brandlast schon so weit reduziert war, dass der Löscherfolg schnell erzielt werden konnte. Man muss weiterhin davon ausgehen, dass für die Brandbekämpfung mehr Wasser erforderlich ist als bei ICEV.

Letztendlich stellte sich mit dem Löschmittel Wasser und der sehr guten Kühlwirkung ein schneller Löscherfolg ein. Netzmittel sind grundsätzlich hilfreich, aber für den Löscherfolg ist das Eindringen in die Batterie vorrangig entscheidend. Ob dies mit Wasser mit oder ohne Zusatzmittel erfolgt, erscheint nicht maßgebend für den Einsatzerfolg.

2.3.8 Fahrzeugnachsorge

Die Versuchsdurchführung mit BEV hat deren spezielle Versuchsvorbereitung zur erleichterten Trennung des Fahrzeugs und dessen Batterie impliziert. Die Schwermetallkonzentrationen in den Rauchgasen warfen Überschreitungen der IDLH-Werte von Nickel aus. Bei der Hantierung mit dem Fahrzeugwrack und der Batterie zur Entsorgung sollte die Möglichkeit von erhöhten relevanten Schwermetallkonzentrationen (vor allem Nickel) für die Bearbeiter berücksichtigt werden.

3 Brandauswirkungen von Nutzfahrzeugen

Für Auswirkungen von Bränden von batterieelektrisch betriebenen Nutzfahrzeuge liegen keine Brandversuche vor. Im Zuge des Projektes wurden nun auf Basis von numerischen Simulationen Hochrechnungen auf ein Brandereignis bei einem batterieelektrisch betriebenen Stadtbuss durchgeführt. Das numerische Modell wurde anhand der Daten aus den Brandversuchen BV01 und BV05 validiert.

Um das Brandverhalten von Bussen näher zu betrachten, wurde eine Analyse der gesamt freigesetzten Energie bei einem Brand durchgeführt. Hierbei wurde zwischen dem Beitrag der Karosserie und dem Interieur sowie jenem des Energieträgers unterschieden. Gemäß der RVS 09.02.31 (2014) kann die maximale Brandleistung eines konventionellen Busses mit 30 MW angenommen werden. Der Verlauf der Brandleistung als Funktion der Zeit wurde wiederum aus der RVS 09.03.11 (2015) entnommen. Dieser sieht einen linearen Anstieg der HRR bis hin zur maximalen HRR innerhalb der ersten 300 Sekunden vor. Anschließend folgt eine Phase von 1000 Sekunden in denen die HRR konstant bleibt. Die bis zu diesem Zeitpunkt (1330 s) freigesetzte Energie entspricht 70% der gesamt freigesetzten Energie bei einem ICEV Bus Brand. Das Abklingen des Brandes wird wiederum durch eine lineare Abnahme der HRR bis zum Zeitpunkt 2350 Sekunden angenommen. Um nun die Unterschiede zwischen ICEV- und BEV-Bussen zu berücksichtigen, wurde die gesamt freigesetzte Energie beider Varianten untersucht. Das zeitliche Integral der ICEV-Bus Brandkurve ergibt eine gesamt freigesetzte Wärme (Energie) von ca. 50 GJ (Fläche unter der Kurve). Unter der Annahme, dass der Bus mit einem 300 l Diesel Tank ausgestattet ist, können die Anteile des Kraftstoffs mit ca. 20% (10 GJ) sowie jener der Karosserie und des Interieurs mit ca. 80% (40 GJ) beziffert werden.

Unter der Annahme, dass der Energieinhalt der Karosserie für ICEV- und BEV-Busse derselbe ist, können Unterschiede lediglich durch den Energieinhalt des Energieträgers entstehen. Gemäß Recherche werden derzeit üblicherweise Batterien mit bis zu 400 kWh und auch mehr auf dem Dach der Busse verbaut. Gemäß [4] entspricht eine Batteriekapazität von 400 kWh einer bei einem Brand freigesetzten thermischen Energie von 20 GJ und somit um 10 GJ mehr als bei einem konventionellen ICEV Bus.

Die Brandentwicklung und -fortpflanzung in einer Batterie rechentechnisch abzubilden ist aufgrund der vielen externen Einflussparameter wissenschaftlich gesichert nicht möglich. Daher wurden folgende Szenarien gewählt:

- Gleiche maximale Brandleistung wie bei einem ICEV Bus, aber verlängerte Branddauer (um 250 s)
- Gleiche Branddauer wie bei einem ICEV Bus, aber erhöhte maximale Brandleistung (36 MW)

Die Ergebnisse diese Berechnungen sind vor allem für die Bauwerksbelastung von Interesse und finden Eingang in die Risikoanalyse. Wie Abbildung 11 zeigt führen die beiden Brandfälle ICEV-Bus und BEV-Bus mit verlängerter Branddauer zu vergleichbaren Werten der Lufttemperatur im Deckenbereich (ca. 1200°C). Beim Szenario mit erhöhter Brandlast steigt die Maximaltemperatur auf 1400°C bis 1500°C an.

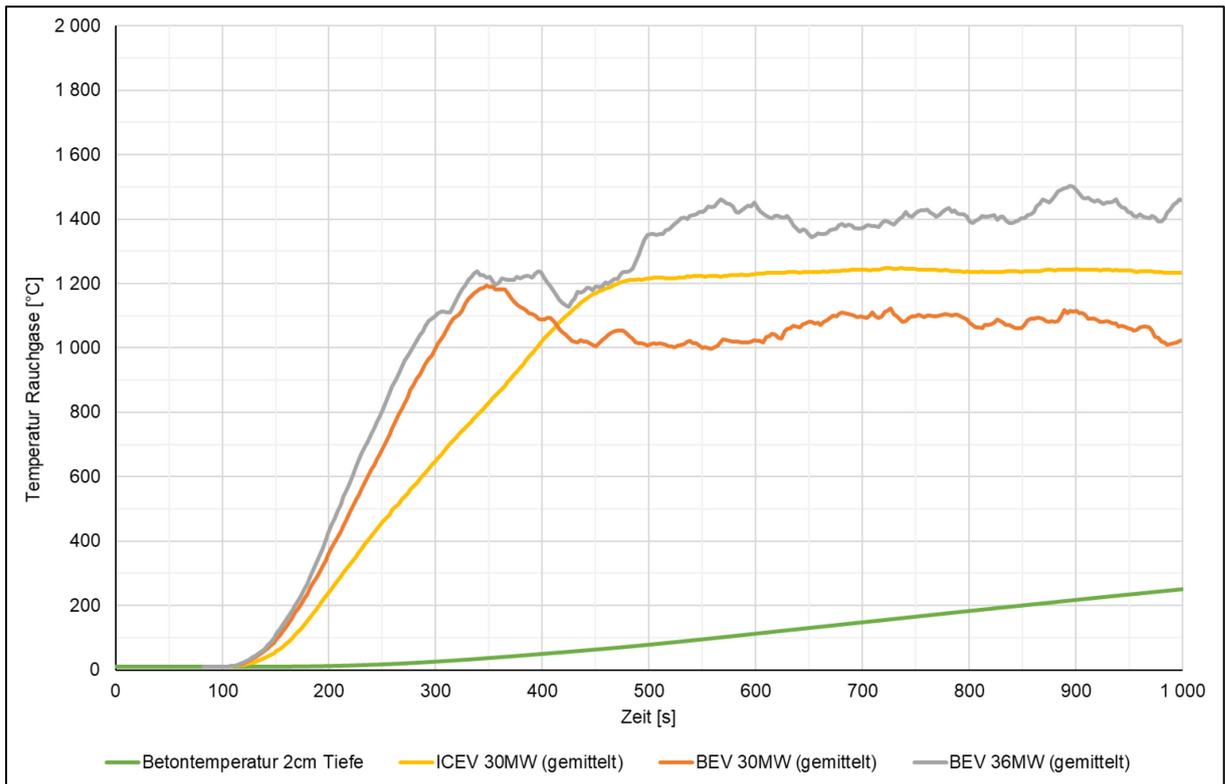


Abbildung 11: Maximale Rauchgastemperaturen an der Decke eines Tunnels mit Kastenprofil (Pos 3.1) mit Betontemperatur in 2 cm Tiefe für Fall BEV 36 MW

Für das Szenario der erhöhten Wärmefreisetzung beim BEV-Bus Brand wurden die maximal auftretenden Temperaturen direkt über dem Bus mit ca. 1530°C und die Betontemperaturen in der Zwischendecke mit ca. 400°C in 2 cm Eindringtiefe und ca. 230°C in 10 cm Tiefe ermittelt. Derart hohe Temperaturen führen erwartungsgemäß zu massiven Schäden der Betonoberfläche durch Abplatzungen.

Simulationen zur Entwicklung von Brandgasen wurden nicht angestellt. Dies begründet sich u.a. auch damit, dass im Busbereich die Brandentstehung und -fortpflanzung einer noch höheren Variabilität unterliegt als im PKW Bereich. Zudem wurden für die Risikoanalyse Freisetzungsraten pro kW Brandlast verwendet, die auf Basis der Erkenntnisse der Brandversuche hochskaliert wurden.

4 Risikobetrachtung

Die Gefährdung von Personen während eines Brandes entsteht in der Regel durch die Gefahrenfaktoren Hitze, Einschränkung der Sicht und Toxizität der Brandgase. Die während der Brandversuche ermittelten Konzentrationen auf Kopfhöhe (1.6 m über Boden) brachten bei Betrachtung der Einzelkonzentrationen, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung der gemessenen toxischen Stoffe, keine unmittelbare Gefährdung von Flüchtenden. Festzustellen ist aber, dass das Konzentrationsniveau bei den meisten kritischen Gasen bei den BEV Bränden höher war als bei den Bränden mit konventionellen Fahrzeugen.

Die gemessenen Temperaturen im Fluchtbereich (bis 2 m über der Fahrbahn) liegen für alle Brandversuche unterhalb der 60°C "Grenze". Diese Grenze soll nicht als definierter Grenzwert für eine Verträglichkeit der Gastemperatur, sondern als Richtwert für den Beginn des Gefährdungsbereiches verstanden werden. Auch hier liegen die gemessenen Temperaturen für die Brandversuche mit batteriebetriebenen Fahrzeugen deutlich über jenen des konventionell angetriebenen Fahrzeuges. Eine Gefährdung durch die Gastemperatur alleine kann aber wiederum bei keinem der Brandversuche abgeleitet werden.

Um die speziellen Charakteristika eines BEV-Brandes in der Risikoanalyse abzubilden, wurden die Brandkurve für PKW-Brände und Busbrände hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Hitzefreisetzung- und Emissionsraten sowie das Akkumulationsmodell zur Bestimmung der Personenschäden adaptiert (Abbildung 12). Für BEV Bus Brände erfolgte die Adaptierung auf Basis der Modellergebnisse (Abbildung 13).

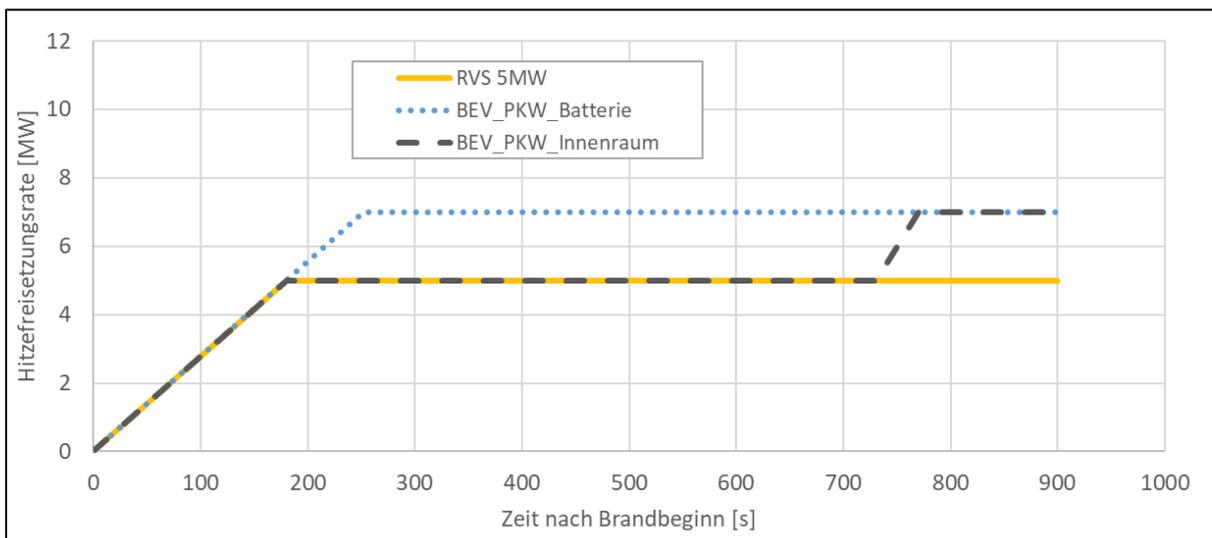


Abbildung 12: Aus Brandversuchen abgeleitete Wärmefreisetzung bei BEV – PKW Bränden mit Brandausgang Batterie bzw. Innenraum

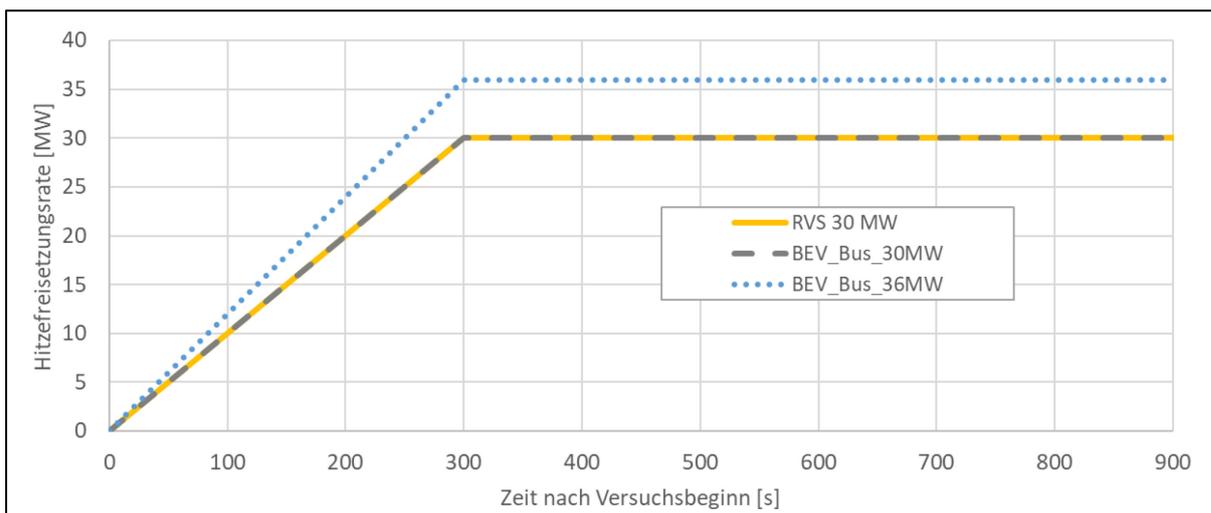


Abbildung 13: Aus Simulationen abgeleitete Wärmefreisetzung bei BEV – Bus Bränden

Mit diesen Randbedingungen sowie den auf kW Brandlast normierten Schadstofffreisetzungsraten erfolgte eine Adaptierung bzw. Erweiterung des bestehenden Tunnelrisikomodells.

Bezüglich des Schadensausmaßes zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Für die direkt aus den Brandversuchen abgeleiteten linearisierten Brandkurven zeigt sich ein deutlich höheres primäres Schadensausmaß für den Brandversuch BV01, also den BEV Brand mit Entzündung in der Batterie. Das Schadensausmaß des BEV Brandes mit Entzündung im Innenraum ist hingegen nur leicht gegenüber dem ICEV Brandversuch erhöht. Für Ereignisse mit Fahrzeugen stromab des Brandes - Sekundär- und Tertiäreignisse - zeigt die ICEV PKW Brandkurve zwar ebenfalls ein geringeres Schadensausmaß als die entsprechenden BEV Brandkurven, der Unterschied ist jedoch deutlich geringer und beschränkt sich auf wenige Prozent.
- Dieselbe Feststellung gilt für die abgeleiteten Bus-Brandkurven. Hier wird lediglich ein gegenüber den PKW Brandkurven insgesamt erhöhtes Schadensausmaß, aufgrund der allgemein höheren Brandlast, deutlich.

Für die Risikoevaluierung wurden die Schadensausmaßswerte in den Ereignisbaum gemäß RVS 09.03.11 eingefügt. Grundsätzlich ist der Anteil BEV-betriebener Fahrzeuge am Verkehrsaufkommen ein stark veränderlicher Parameter, der die Auswirkungen einer geänderten Brandgefahr durch BEV-Brände auf das Tunnelrisiko beeinflussen wird. Aus heutiger Sicht scheint der Anteil von BEV-Fahrzeugen noch nicht relevant für das Risikoprofil eines Straßentunnels, jedoch steigt dieser Anteil rasch an. Um eine Abschätzung der Auswirkung machen zu können, wurden folgende Szenarien betrachtet: Das erste Szenario beschreibt eine Flotte mit 100% ICEV-PKW und Bussen, das zweite einen Extremwert von 100% BEV-PKW und Busse. Die LKW werden bei beiden Szenarien weiterhin konventionell als ICEV betrieben. Werden die linearisierten Versuchsbrandkurven für den Vergleich herangezogen, steigt das Gesamtrisiko bei 100% BEV-Anteil für PKW und Busse um ca. 4%. Das Brandrisiko steigt in diesem Vergleich um ca. 12%. Für die linearisierten Brandkurven ergibt sich somit eine relevante (Brand)Risikoerhöhung durch BEV-Fahrzeuge.

Zusätzlich zu den linearisierten Brandkurven, die direkt an die gemessenen Brandkurven der durchgeführten Brandversuche angelehnt sind, wurden auch repräsentative Brandkurven,

auf Basis der breiten Erfahrung vor allem bzgl. ICEV-PKW Bränden, unter Berücksichtigung der gemessenen Stoffkonzentrationen, abgeleitet, siehe Abbildung 12, und für die Risikoanalyse herangezogen. In dieser Betrachtung zeigt sich ein wesentlich geringerer Einfluss von BEV Bränden auf das Tunnelrisiko. Der Risikoanstieg bei 100% BEV-Anteil für PKW und Busse bleibt dabei, sowohl was das Brandrisiko als auch das Gesamtrisiko betrifft, deutlich unter 1%, und stellt sich somit als nicht relevant dar.

5 Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projektes BRAFA durchgeführten Brandversuche brachten wertvolle Erkenntnisse, die merklich über das bestehende Wissen zur Thematik von Bränden an BEV hinausgehen. Aufgrund der Einbindung eines Fahrzeugherstellers und eines Entsorgungsunternehmens was es zudem möglich, merklich mehr Versuche an Batterien und vor allem an Gesamtfahrzeugen durchzuführen. Die Hauptaussagen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Brandversuch mit einem herkömmlichen Fahrzeug (ICEV) ohne Treibstoff zeigt, dass das Fahrzeug alleine (Karosserie, Interieur, Reifen etc.) eine Wärmefreisetzung von 2 MW über einen längeren Zeitraum generiert. Wird nun der flüssige Kraftstoff am Brand beteiligt, ist mit einer Verdoppelung der Wärmefreisetzungsrates zu rechnen. Dieses Erkenntnis deckt sich mit bekannter Literatur. Handelt es sich um BEV, so ist die maximale Wärmefreisetzung bei 100% SOC nochmals um ca. 1 MW höher. Kommt es aufgrund äußerer Umstände zu einer spontanen Beteiligung der gesamten Batterieeinheit am Brandgeschehen, so ist mit einer merklich höheren Wärmefreisetzung zu rechnen.
- Es wurde festgestellt, dass es bei BEV-PKW Bränden zu höheren CO-Emissionen kommt als bei ICEV Fahrzeugbränden. Dies ist auf die chemische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterien zurückzuführen, deren Bestandteile wie organische Lösungsmittel selbst als Quelle für Sauerstoff und in weiterer Folge für CO dienen. Die konstanten O₂-Verläufe bestätigen die Annahme, dass es sich um kraftstoffgesteuerte Brände handelt. Bei den Gasmessungen konnte festgestellt werden, dass H₃PO₄ bei jenen Versuchen, wo der Stoff gemessen wurde, deutlich unter der Nachweisgrenze lag. Bei HF und HCl konnte die Schichtung der Rauchgase mit hohen Konzentrationen im Firstbereich und niedrigen Werten im unteren Bereich dokumentiert werden. Bei HF wurden teilweise die IDLH-Werte im Firstbereich überschritten. Bei den restlichen Messstellen – und vor allem im Bereich von 1.6 m (durchschnittliche Kopfhöhe) – lagen die HF Werte merklich niedriger. Generell war festzustellen, dass bei BEV Bränden – wie zu erwarten – merklich mehr HF freigesetzt wird als bei konventionellen Fahrzeugen. Bei HCl lagen bei beiden Fahrzeugtypen (BEV bzw. ICEV) die Konzentrationen in vergleichbaren Größenordnungen, da hier die Ursache in der Verbrennung des Interieurs zu sehen ist und nicht im Energiespeicher. Es kann angeführt werden, dass an keinem Messpunkt in Bereichen, wo sich Personen aufhalten können, IDLH-Werte überschritten wurden und somit keine unmittelbare Gefahr für Leib und Leben bestand.
- Um Aussagen zur Auswirkung von Bränden bei BEV-Bussen machen zu können, erfolgten Hochrechnungen des Brandgeschehens auf Basis von CFD Rechnungen. Dabei wurde eine Stadtbuss Konfiguration mit Batteriepositionierung am Dach des Fahrzeuges gewählt. Da die Brandentwicklung innerhalb der Batterie kaum modellierbar ist und zudem verschiedenste Möglichkeiten der Brandentstehung vorliegen können, erfolgte die Modellierung der Wärmefreisetzung für zwei Szenarien: gleiche maximale Wärmefreisetzungsrates wie bei einem ICEV-Busbrand mit verlängerter Branddauer bzw. gleich lange Branddauer jedoch erhöhte Wärmefreisetzungsrates.
- In Bezug auf Brandbekämpfung bei BEV-Bränden zeigte sich, dass sich mit dem Löschmittel Wasser und der sehr guten Kühlwirkung ein schneller Löscherfolg ein-

stellte. Dies liegt u.a. auch daran, dass der Löschangriff in der Regel erst ca. 10 Minuten nach Brandbeginn erfolgte und die Batterie vor den Löschversuchen schon einige Zeit in Vollbrand war. Somit lag schon eine reduzierte Brandlast vor, wodurch der Löscherfolg schnell erzielt werden konnte. Netzmittel sind grundsätzlich hilfreich, aber für den Löscherfolg ist das Eindringen in die Batterie vorrangig entscheidend. Ob dies mit Wasser mit oder ohne Zusatzmittel erfolgt, erscheint nicht maßgebend für den Einsatzerfolg.

- Der Einsatz einer Löschanlage zur unmittelbaren Einbringung von Wasser in das Batteriegehäuse funktioniert sehr gut, erfordert allerdings ein umfassendes Wissen über Batterien und mögliche Gefährdungen beim Einbringen der Lanze.
- Es zeigte sich, dass der Einsatz einer Feuerlöschdecke ab dem Zeitpunkt, wenn die Batterie bereits im Brandgeschehen involviert ist, keinen wesentlichen Mehrwert für den Feuerwehreinsatz mit sich bringt. Ziel beim Aufbringen der Decke ist es, sie möglichst eng ohne Luftpolster zwischen der Decke und dem Fahrzeug anzubringen und dies ist bei einem Batteriebrand aufgrund der Branddynamik (starke Flammen in Bodennähe) und Sauerstoffselbstversorgung der Batterie sehr schwierig.
- Aus den Versuchen ging kein Mehrbedarf an Löschwasser bei BEV-PKW Bränden hervor, obgleich die allgemeinen Erfahrungen auf einen erhöhten Löschwasserbedarf hindeuten. Die in Nasslöschleitungen vorzuhaltenden 108 m³ werden angesichts der durchgeführten Brandversuche mit PKW als ausreichend beurteilt.
- Die Versuche haben ergeben, dass die Löschwässer die in der AAEV festgelegten Parameter teilweise übertroffen haben. Die Abwässer der nach den Versuchen durchgeführten Tunnelreinigung blieben teilweise sehr knapp unterhalb der AAEV Parameter. Die abfiltrierbaren Stoffe wurden um den mehrfachen Schwellenwert der AAEV übertroffen, die Nickelkonzentration war nur sehr knapp unterhalb von 0,5 mg/l (Emissionsbegrenzung der AAEV). Eine Hochskalierung zu anderen Fahrzeugtypen mit leistungsstärkeren Batterien lässt auch hier auf höhere Kontaminationen rund um den Brandort rechnen. Es ist zu erwarten, dass das im Rückhaltebecken gesammelte Löschwasser nach BEV Brandereignissen fachgerecht entsorgt werden muss.
- In Bezug auf die Struktur bzw. Materialien des Bauwerkes kann geschlossen werden, dass durch Brand eines BEV PKW trotz der geringfügig höheren Brandlast bei den Temperaturbelastungen kein relevanter Unterschied zu Bränden konventioneller PKW festzustellen ist. Die numerischen Simulationen zeigten bei BEV-Busbränden sehr hohe Temperaturen an der Tunneldecke. Aber auch hier ist im Vergleich zu Bränden konventioneller Fahrzeuge gleicher Kategorie kein merklich geändertes Schadensbild zu erwarten. D.h. Betonschäden durch Abplatzungen sind bei beiden Fahrzeugkategorien bei Vollbrandereignissen zu erwarten, außer es liegen spezielle Ausstattungen des Tunnels vor, die die Brandlast reduzieren (z.B. Wassernebelanlagen) oder die Tunnelwände zusätzlich gegen hohe Temperaturen schützen (baulicher Brandschutz).
- In Bezug auf die Bewertung des Risikos für Tunnelnutzer kann wie folgt geschlossen werden: Die Analyse der Brandversuche hat gezeigt, dass sich BEV-Brände hinsichtlich der während des Brandes freigesetzten Stoffe sowie der Hitzefreisetzungsraten durchaus von ICEV-Bränden unterscheiden können. Die durchgeführten Risikoberechnungen haben gezeigt, dass für einen Referenz tunnel im Extremfall von 100%

BEV-PKW und BEV-Bussen das Gesamtrisiko um ca. 4% und das Brandrisiko in diesem Vergleich zum Basisfall (je 100% ICEV) um ca. 12 % steigt. Es muss aber berücksichtigt werden, dass eine Ableitung allgemeiner Schlussfolgerungen auf Basis weniger Brandversuche schwierig ist. Diese Einschränkung wird auch durch wesentlich geringere Risikoanstiege bei Berücksichtigung der abgeleiteten repräsentativen Brandkurven anstelle der linearisierten Brandkurven deutlich. Hier blieben die Risikoanstiege deutlich unter 1% im Vergleich zu 100% ICEV-PKW und ICEV-Bussen.

- Hinsichtlich Sensorik zur Branderkennung ist mit keinen Änderungen zu rechnen. Anzumerken ist jedoch, dass Ereignisse mit BEV, bei denen es zu einem reinen Ausgasen von Schadstoffen ohne weiterfolgendem Brand kommt, aufgrund der zu erwartenden geringen Rauchdichte kaum detektiert werden können. Hier wäre zur Geringhaltung von Konzentrationen eine Aktivierung einer Schutzlüftung (als Vorstufe einer Brandlüftung) zu diskutieren.
- Dimensionierungsvorgaben für eine mechanische Lüftung beziehen sich unter anderem auch auf die maximale Wärmefreisetzungsrate. Bei Tunnelanlagen mit ausschließlichen PKW-Betrieb (derzeit 5 MW) sowie bei Tunnel mit einem höheren Anteil von BEV-Bussen (derzeit 30 MW) ist eine Erhöhung der max. HRR für die Dimensionierung der Lüftungsanlage zu diskutieren. Bei höheren Wärmefreisetzungsraten (z.B. 50 MW) stellt die Ladung die Hauptquelle für die hohe HRR dar und nicht der Energiespeicher. Bei derartigen Fällen ist es aus derzeitiger Sicht nicht notwendig die max. HRR für den Dimensionierungsfall zu erhöhen.

Generell kann zudem angeführt werden, dass im Rahmen des Forschungsprojektes BRAFA aufgrund der deutlich mehr als geplanten Realbrandversuche die Projektziele mehr als erfüllt wurden. Trotz der umfangreichen Untersuchungen sind jedoch weiterführende Untersuchungen zielführend. Diese betreffen u.a.:

- Brandgase: Es wurden zwar die wichtigsten Brandgase messtechnisch aufgezeichnet, aufgrund des limitierten Forschungsbudgets konnten aber nur zeitlich integrale Messungen an wenigen Stellen im Tunnelquerschnitt ermittelt werden. Dadurch sind u.a. die zur Einschätzung der Brandauswirkungen auf flüchtende Personen notwendigen zeitlichen Verläufe der Gas- und Säurekonzentrationen nur indikativ zu sehen.
- Wärmefreisetzungsrate: Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate erfolgte über messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen, die ein sehr dichtes Temperatur- und Geschwindigkeitsmessnetz in den Messquerschnitten erfordern. Auch hier wirkte sich das limitierte Budget auf die Aussagegenauigkeit ungünstig aus. Alternativmethoden, wie z.B. die Verwendung von O₂ -Bilanzen sind jedoch bei den hohen Luftmengen in einem Tunnel nicht zielführend.
- Nutzfahrzeuge: Die Auswirkungen von Bränden mit BEV-Bussen konnte nur mittels numerischer Simulationen erhoben werden. Dazu sind aber Annahmen in Bezug auf Brandentwicklung, Branddauer und Schadstofffreisetzungsraten notwendig. Für diese Annahmen gibt es jedoch bis dato keine belastbaren messtechnischen Verifizierungen. Hier sind experimentelle Untersuchungen im Großversuch notwendig, um die Aussagegüte merklich zu verbessern.
- Brandbekämpfung: Innovative Löschmethoden wie Löschlanze und Löschdecke (hier ev. für den Einsatz im Garagenbereich) bedürfen einer weiterführenden Entwicklung und Untersuchung.

Anmerkungen: Aufgrund der ständigen Entwicklung zu leistungsfähigeren Batterien ändert sich deren Zellchemie und somit auch die Schadstoffproduktion während eines Brandes. Somit können die nun vorliegenden Daten nicht uneingeschränkt auf neue Technologien übertragen werden. In Bezug zur Risikoanalyse ist anzuführen, dass auch dort bei Vorliegen neuerer Erkenntnisse aus den o.a. Themen eine Adaptierung der Eingangsparameter notwendig ist.

6 Verwendete Abkürzungen

AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung	General Ordinance on Sewage Water Emissions
BEV	Batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug	Battery Electric Vehicle
CNG	Verdichtetes Erdgas (gasförmig)	Compressed Natural Gas
FCEV	Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb	Fuel Cell Electric Vehicle
FED	Bruchteil der für die Bewegungsunfähigkeit notwendigen Dosis	Fractional Effective Dose
H _{2g}	Wasserstoff gasförmig	Hydrogen gaseous
HRR	Wärmefreisetzungsrate	Heat Release Rate
ICE	Verbrennungskraftmaschine	Internal Combustion Engine
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine	Internal Combustion Engine Vehicle
LNG	Verflüssigtes Erdgas	Liquefied Natural Gas
LMO	Lithium-Mangan-Oxid	Lithium-Manganese-Oxyd
LPG	Flüssiggas / Autogas	Liquefied Petroleum Gas
NaCl _{ag}	Flüssige Lösung von Natriumchlorid	Sodium chloride liquid
NEC	Alternativer Fahrzeugantrieb	New Energy Carrier
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	Nickel-Manganese-Cobalt-Oxyd
SOC	Ladezustand der Batterie	Status of Charge

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: HF-Emissionsmenge als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [4]	5
Abbildung 2: Spitzenwerte der Wärmefreisetzungsraten bei BEVs als Funktion der gespeicherten Energie der Batterien [4].....	6
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen HF-Emissionsmengen und der gespeicherten Energie der Batterien [4].....	7
Abbildung 4: Temperaturzeitkurven in RVE 08.01.01 und RVS 09.01.45.....	9
Abbildung 5: Brandversuch vollständige Batterieanordnung PKW (17 Module).....	13
Abbildung 6: Messaufbau Fahrzeugversuche	14
Abbildung 7: BV02 Vollbrand Fahrzeug und Batterie	14
Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei den Brandversuchen	16
Abbildung 9: Einsatz einer Löschdecke bei BV01 (Foto: Lunghammer/TU Graz).....	21
Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung bei BV01 und BV05.....	22
Abbildung 11: Maximale Rauchgastemperaturen an der Decke eines Tunnels mit Kastenprofil (Pos 3.1) mit Betontemperatur in 2 cm Tiefe für Fall BEV 36 MW	25
Abbildung 12: Aus Brandversuchen abgeleitete Wärmefreisetzung bei BEV – PKW Bränden mit Brandausgang Batterie bzw. Innenraum	26
Abbildung 13: Aus Simulationen abgeleitete Wärmefreisetzung bei BEV – Bus Bränden	27

8 Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2018, Towards cross-modal electrification, 2018.
- [2] R. Korthauer, Handbuch Litium-Ionen Batterien, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [3] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White und R. T. Long, „Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment,“ Exponent Failure Analysis Associates, Inc. - The Fire Protection Research Foundation, 2011.
- [4] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple und J. Anderson, „Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles,“ RISE Report 2020:90, ISBN: 978-91-89167-75-9 (electronic), 2020.
- [5] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist und B. E. Mellander, „Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires,“ *Scientific Reports* 7, 10018, 2017.
- [6] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot und G. Marlair, „Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle,“ in *Conference proceedings of Fires in vehicles (FIVE) 2012*, 2012.
- [7] N. Watanabe, O. Sugawa, T. Suwa, Y. Ogawa, M. Hiramatsu, H. Tomonori, H. Miyamoto, K. Okamoto und M. Honma, „Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test,“ in *Conference proceedings of Fires in vehicles (FIVE) 2012*, 2012.
- [8] M. Swain, Fuel Leak Simulation, Miami: Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535, 2001.
- [9] Y. Maeda, H. Ito, Y. Tamura, J. Suzuki und S. Watanabe, „Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen Fuelled Vehicle,“ *SAE Technical Papers Series*, 2007.
- [10] K. H. Digges und R. Stephenson, „Research in Fire Safety for Hydrogen-Fueled Vehicles,“ MVFRI Research Summary.
- [11] O. Gentilhomme, C. Proust, D. Jamois, I. Tkatschenko, B. Cariteau und E. Studer, „Data for the evaluation of hydrogen risks onboard vehicles,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012.
- [12] HyTunnel, „HyTunnel-CS Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces. Project No. 826193,“ 2019. [Online]. Available: <https://hytunnel.net/>. [Zugriff am 26 März 2021].
- [13] FSV, RVS 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell, Wien: Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, 2015.

- [14] J. Tramoni, C. Thauvoye, F. Hanus, B. Poutrain, M. Suzanne und A. Thiry, „Temperature assessment of steel members subjected to fire generated by alternative fuel vehicles: Experimental tests,“ *Fire and Materials*, DOI: 10.1002/fam.2830 March 2020.
- [15] SUVEREN, „SUVEREN – Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen städtischen Verkehrsbereichen bei Einsatz neuer Energieträger,“ [Online]. Available: <https://www.suveren-nec.info>.