

# **BRAFA**

## **Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018  
**(VIF 2018)**

September 2021



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

## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Graz  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen  
und Thermodynamik  
Inffeldgasse 19 / III  
8010 Graz



Graz University of Technology



Institut für  
Verbrennungskraftmaschinen  
und Thermodynamik

Technische Universität Graz  
Institut für Fahrzeugsicherheit  
Inffeldgasse 23 / I  
8010 Graz



Graz University of Technology



Vehicle Safety Institute

ILF Consulting Engineers Austria GmbH  
Harrachstrasse 26  
4020 Linz



CONSULTING  
ENGINEERS

BRAFA



Montanuniversität Leoben  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering  
Erzherzog-Johann-Straße 3/III  
8700 Leoben



Österreichischer Bundesfeuerwehrverband  
Voitgasse 4  
1220 Wien



**ÖSTERREICHISCHER**  
**BUNDES FEUERWEHR VERBAND**

**Programmmanagement:**  
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien



TUG/IVT - Bericht Nr. I-20/21/PSt-V&U Inst-18/13/640 vom 08.09.2021

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.

# **BRAFA**

## **Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2018)

### **AutorInnen:**

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter-Johann STURM

Dipl.-Ing. Patrik FÖßLEITNER

Dipl.-Ing. Daniel FRUHWIRT

Dipl.-Ing. Simon HEINDL

Dipl.-Ing. Bernhard KOHL

Mag.rer.nat. Oliver HEGER

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert GALLER

Dipl.-Ing. Robert WENIGHOFER

Dipl.-Ing. Stefan KRAUSBAR

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik


Technische Universität Graz

Inffeldgasse 19 / III


8010 Graz

**Repository:**

Ergebnisbericht: DOI [10.3217/8vj91-gc832](https://doi.org/10.3217/8vj91-gc832)

["BRAFA" - Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Fahrzeugantrieben](#) © 2021 by Sturm, Peter; Fößleitner, Patrik; Fruhwirt, Daniel; Heindl, Simon; Kohl, Bernhard; Heger, Oliver; Galler, Robert; Wenighofer, Robert; Krausbar, Stefan is licensed under [CC BY 4.0](#) 

Messdaten, Teil 1: DOI [10.3217/ysgwn-3a318](https://doi.org/10.3217/ysgwn-3a318)

["BRAFA" - Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Fahrzeugantrieben](#) © 2021 by Sturm, Peter; Fößleitner, Patrik; Fruhwirt, Daniel; Heindl, Simon; Kohl, Bernhard; Heger, Oliver; Galler, Robert; Wenighofer, Robert; Krausbar, Stefan is licensed under [CC BY 4.0](#) 

## INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis .....	9
Glossar .....	10
Zusammenfassung .....	11
Abstract .....	12
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>13</b>
1.1 Derzeitige und künftige Entwicklung der Fahrzeugflotte.....	13
1.2 Auswirkung einer Veränderung der Fahrzeugflotte auf den Betrieb und die Sicherheit von unterirdischen Verkehrsanlagen.....	18
1.3 Forschungsziele .....	19
<b>2 Stand der Technik und des Wissens .....</b>	<b>21</b>
2.1 Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen .....	21
2.1.1 Grundlagen batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge .....	21
2.1.2 Gefahrenpotenzial .....	23
2.2 Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV).....	32
2.3 Risikomodellierung unter Berücksichtigung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (ILF) .....	32
2.4 Auswirkungen von Bränden auf Tunnelinfrastruktur und Tunnelausrüstung.....	35
2.4.1 Brandeinwirkungen auf Beton- und Stahlbetonstrukturen .....	35
2.4.2 Brandeinwirkungen auf Einbauten aus Stahl .....	40
2.4.3 Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen für die Brandbekämpfung.....	41
2.5 Brandbekämpfung bei Bränden von Elektrofahrzeugen .....	43
2.5.1 Allgemeine taktische Vorgehensweisen.....	43
2.5.2 Unterirdische Verkehrsanlagen.....	47
<b>3 Defizitanalyse .....</b>	<b>52</b>
3.1 Brandverhalten von Fahrzeugen.....	52
3.2 Brandauswirkungen auf Infrastruktur .....	52
3.3 Risikoanalyse .....	53
3.4 Brandbekämpfung .....	53
<b>4 Vorversuche zum Brandverhalten batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge ..</b>	<b>54</b>
4.1 Untersuchungsablauf.....	54
4.2 Versuche an Batterie-Zellen .....	54
4.2.1 Versuchsplanung und -aufbau .....	55
4.2.2 Eingesetzte Messtechnik .....	55
4.2.3 Versuchsdurchführung.....	55



4.2.4	Resultate .....	56
4.2.5	Fazit .....	57
4.3	Versuche an Batterie-Modulen .....	58
4.3.1	Versuchsplanung und -aufbau .....	58
4.3.2	Eingesetzte Messtechnik .....	60
4.3.3	Versuchsdurchführung.....	61
4.3.4	Resultate .....	62
4.3.5	Fazit .....	63
4.4	Versuche an Batterie-Packs .....	64
4.4.1	Versuchsplanung und -aufbau .....	64
4.4.2	Eingesetzte Messtechnik .....	66
4.4.3	Versuchsdurchführung.....	67
4.4.4	Resultate .....	68
4.4.5	Fazit .....	70
5	Versuche an batterieelektrischen betriebenen PKW .....	71
5.1	Versuchsplanung und -aufbau .....	71
5.2	Eingesetzte Messtechnik .....	73
5.3	Versuchsdurchführung.....	76
5.3.1	BV01 (BEV Kompakt) .....	76
5.3.2	BV02 (BEV Kleintransporter) .....	77
5.3.3	BV03 (ICEV SUV).....	77
5.3.4	BV04 (ICEV Kleintransporter).....	77
5.3.5	BV05 (BEV SUV).....	78
5.4	Resultate .....	78
5.4.1	Massenverlust .....	78
5.4.2	Wärmefreisetzung .....	79
5.4.3	Temperatur Batterie.....	83
5.4.4	Lufttemperatur .....	83
5.4.5	Gasemissionen.....	86
5.4.6	Schwermetalle .....	87
6	Brandbekämpfung .....	96
6.1	Versuchsaufbau und Grundlagen .....	96
6.2	Löschtechniken beim Brand von BEV .....	97
6.2.1	Feuerlöschdecke für PKW .....	98
6.2.2	Löschlanze .....	102
6.2.3	Löschleitung mit Hohlstrahlrohr.....	105
6.3	Löschmittel beim Brand von BEV.....	108

6.3.1	Wasser .....	108
6.3.2	Netzmittel .....	110
6.4	Zusammenfassung .....	110
7	Numerische Simulationen.....	112
7.1	Erstellung Simulationsmodell.....	112
7.2	Ergebnisse der Validierungsrechnungen .....	114
7.3	Skalierung der Eingangsdaten für Busse .....	117
8	Risikobetrachtung.....	123
8.1	Personengefährdung während eines Tunnelbrandes.....	123
8.2	Analyse der gemessenen Stoffkonzentrationen & Temperaturverläufe.....	124
8.3	Modellierungsansatz für die Risikobewertung eines BEV-Brandes .....	128
8.3.1	Modellbrandkurven .....	129
8.3.2	Stofffreisetzung.....	134
8.3.3	Fractional Incapacitating Dose und Fractional Incapacitating Concentration....	136
8.4	Szenario Untersuchung und Risikobewertung .....	137
8.4.1	Szenario Untersuchung .....	138
8.4.2	Risikoanalyse .....	147
8.5	Schlussfolgerungen .....	151
9	Infrastrukturelle Auswirkungen .....	152
9.1	E&M Ausrüstung.....	152
9.1.1	Sensorik zur Branderkennung .....	152
9.1.2	Dimensionierungsvorgaben für Lüftungsanlagen .....	152
9.1.3	Löschwasser und Gewässerschutzanlagen .....	153
9.2	Struktur Bauwerk, Materialien .....	153
9.3	Nachsorge bzw. Entsorgung der Fahrzeuge .....	154
10	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	156
11	Danksagung .....	160
12	Referenzen .....	161
13	Abbildungsverzeichnis.....	167
14	Tabellenverzeichnis.....	172
15	Anhang.....	174
15.1	Belastung der Tunnelwände, Detailergebnisse der Vliesbelegung.....	174
15.2	Detailergebnisse der Wasseranalysen.....	181
15.3	Sensitivitätsanalyse .....	183

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung	General Ordinance on Sewage Water Emissions
BEV	Batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug	Battery Electric Vehicle
BF	Berufsfeuerwehr	Professional Fire Brigade
BTF	Betriebsfeuerwehr	Company Fire Brigade
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
FF	Freiwillige Feuerwehr	Volunteer Fire Brigade
HEV	Fahrzeug mit Hybridantrieb	Hybrid Electrical Vehicle
HRR	Wärmefreisetzungsrate	Heat Release Rate
HV	Hochvolt	-
ICE	Verbrennungskraftmaschine	Internal Combustion Engine
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid	Lithium-Cobalt-Oxyd
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat	Lithium-Iron-Phosphate
LMO	Lithium-Mangan-Oxyd	Lithium-Manganese-Oxyd
LNG	Verflüssigtes Erdgas	Liquefied Natural Gas
LPG	Flüssiggas / Autogas	Liquefied Petroleum Gas
NG	Nachweisgrenze	Detection Limit
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	Nickel-Manganese-Cobalt-Oxyd
PHEV	Fahrzeug mit Hybridantrieb und externe Stromlademöglichkeit	Plug-in Hybrid Electrical Vehicle
SOC	Ladezustand der Batterie	State of Charge
UVE	Unterirdische Verkehrsanlagen	Underground Traffic Facilities
xEV	BEV, HEV, PHEV	BEV, HEV, PHEV

## GLOSSAR

Infrastruktur	Im vorliegenden Bericht wird unter dem Begriff "Infrastruktur" das gesamte Tunnelbauwerk verstanden. Darunter fällt auch dessen Ausstattung (elektrische Anlage, etc.) sowie die Fahrbahn und Abwasserentsorgung.
Thermal Runaway	Eine Temperaturerhöhung der Batteriezellen, die eine Kettenreaktion auslöst, bei der sich die Zellen nacheinander erwärmen. Dabei kann es zum Austritt von Gasen und Schwermetallen kommen; die Gase können sich dabei entzünden.
Traktionsbatterie	Elektrochemischer Energiespeicher (Akkumulator) zur Vorhaltung von Antriebsenergie für Fahrzeuge. Die Bezeichnung gilt unabhängig von der Speicherkapazität und kann von wenigen kWh (Mild-Hybrid) bis zu mehreren Hundert kWh (Nutzfahrzeuge mit Elektroantrieb) reichen.
xEV	Die Abkürzung xEV steht für "x Electric Vehicle". Damit werden alle Fahrzeuge bezeichnet, die über eine Traktionsbatterie verfügen und somit - zumindest zum Teil - ihre Antriebsenergie aus einem elektrochemischen Energiespeicher beziehen. Beispiele sind: HEV, PHEV, BEV, FCEV



## ZUSAMMENFASSUNG

Die E-Mobilität wird derzeit als ein probates Mittel zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Sektors Verkehr angesehen. Dies spiegelt sich in der in den letzten Jahren merklich gestiegenen Anzahl von Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb im Straßenverkehr wieder. Die derzeit im Einsatz befindlichen Energiespeicher bauen stark auf eine Lithium-Ionen-Technologie auf, die im Falle eines Brandereignisses ein gänzlich anderes Verhalten als herkömmliche Energieträger (flüssige oder gasförmige Kraftstoffe) aufweist. Dies bezieht sich auf die Brandursache ebenso wie auf Brandverlauf und Personengefährdung durch die entstehenden Rauchgase. Besonders kritisch ist dies in unterirdischen Verkehrsanlagen oder im Garagenbereich, da hier die Brandbekämpfung erschwert ist und die Verdünnungsmöglichkeiten giftiger Rauchgase stark eingeschränkt sind.

Im Rahmen des Forschungsprojektes BRAFA wurden nun die Auswirkungen von Bränden von E-Fahrzeugen auf die Sicherheit von Tunnelbenutzern und die Tunnelinfrastruktur untersucht sowie Methoden zur Bekämpfung von Bränden von E-Fahrzeugen bewertet. Basis dazu sind Realbrandversuche, die im „Zentrum am Berg“ in geeigneten Versuchstunneln durchgeführt wurden. Die Hauptaussagen aus diesen Versuchen können wie folgt zusammengefasst werden:

Bei PKW-Bränden erhöht sich die Wärmefreisetzungsrate gegenüber Bränden mit konventionellen Kraftstoffen geringfügig. Kommt es jedoch zu einem Spontanbrand der gesamten Batterieeinheit, so ist kurzzeitig mit einer merklich höheren Wärmefreisetzungsrate zu rechnen.

Betrachtet man die beim Brand freigesetzten Rauchgase, so wurden teilweise merklich erhöhte CO, HF und H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Konzentrationen festgestellt, wobei die thermisch bedingte Rauchgasschichtung dazu führte, dass sich die hochkonzentrierten Brandgase im Firstbereich des Tunnels befinden. Im Bereich unter 2 m über Fahrbahn wurden kritische Grenzwerte in der Regel eingehalten.

In Bezug auf die Brandbekämpfung zeigte sich, dass Wasser aufgrund der großen Kühlwirkung weiterhin das probate Löschmittel darstellt. Im Rahmen der Versuche wurden auch alternative Löschmethoden wie z.B. der Einsatz von Löschlanzen zu unmittelbarer Kühlung im Batteriegehäuse oder von Löschdecken untersucht.

In Bezug auf die Bewertung des Risikos der Tunnelnutzer ergab sich, dass bei merklichen Anteilen von BEV im PKW- und Bussegment ein Anstieg des Gesamtrisikos im unteren Prozentbereich möglich ist, das alleinige Brandrisiko steigt stärker an.

## ABSTRACT

E-mobility is currently seen as an effective means of reducing greenhouse gas emissions in the transport sector. This is reflected in the noticeably increased number of vehicles with battery-electric drives in road traffic in recent years. The energy storage devices currently in use are largely based on lithium-ion technology, which behaves completely differently than conventional energy sources (liquid or gaseous fuels) in the event of a fire. This relates to the cause of the fire as well as to the fire development. This is particularly critical in underground traffic infrastructure, such as tunnels or garages, as fire-fighting is more difficult here and the options for diluting toxic smoke gases are severely limited.

Within the BRAFA research project, the effects of fires in e-vehicles on the safety of tunnel users and the tunnel infrastructure were examined, and methods for fighting fires in e-vehicles were evaluated. Real fire tests were carried out in suitable test tunnels in the Austrian tunnel research facility 'Zentrum am Berg'. The main results from these tests can be summarized as follows:

In car fires, the heat release rates increase slightly compared to fires with conventional fuels. However, if the whole battery-pack is affected in a spontaneous fire within a very short time, a noticeably higher rate of heat release can be expected.

Concerning smoke gases released during the fire, noticeably increased CO, HF and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> concentrations were found. However, the thermally induced smoke gas stratification led to the highly concentrated gases being in the roof area of the tunnel. In the area less than 2 m above the roadway, critical limit values were generally not exceeded.

With regard to firefighting, it was found that water continues to be the most effective extinguishing agent due to its great cooling effect. As part of the tests, alternative extinguishing methods such as the use of extinguishing lances for direct cooling in the battery housing or fire blankets were also investigated.

With regard to the assessment of the risk for tunnel users, it emerged that with a noticeable proportion of BEV in the car and bus fleet-segment, the overall risk tends to increase in the lower percentage range, while the sole fire risk can increase more strongly.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Derzeitige und künftige Entwicklung der Fahrzeugflotte

Die E-Mobilität wird derzeit als ein probates Mittel zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Sektors Verkehr angesehen. Dies spiegelt sich in der in den letzten Jahren merklich gestiegenen Anzahl von Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb im Straßenverkehr. Obwohl derartige Antriebssysteme vornehmlich in Personenkraftwagen mit einem noch eingeschränkten Wirkungsbereich in Bezug auf ihre Reichweite zu finden sind, geht die Entwicklung in Richtung Batteriesysteme mit höheren Speicherkapazitäten, um einerseits die Fahrleistungen zwischen den Ladevorgängen zu erhöhen und andererseits auch in den Nutzfahrzeugverkehr vorzustoßen.

Abbildung 1 zeigt den Bestand an zugelassenen Personenkraftwagen in Österreich, welcher seit Jahrzehnten kontinuierlich am Steigen ist. Mit Stand 2020 sind hierzulande 5,1 Millionen PKW zugelassen.

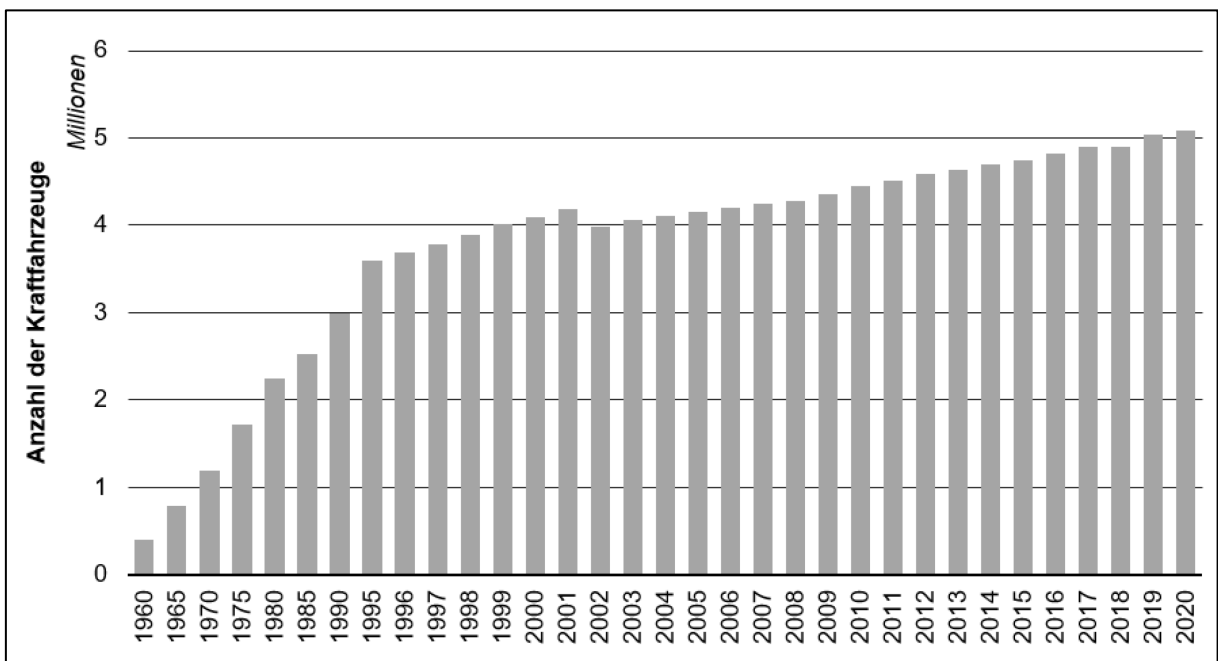


Abbildung 1: Anzahl der PKW zwischen 1960 und 2020 in Österreich [1]

In Abbildung 2 sind die Fahrzeuge anhand ihres Antriebssystems aufgegliedert, wobei ersichtlich ist, dass Benzin- und Dieselfahrzeugen seit jeher den Markt dominieren. Der Bestand an anderen Antriebssysteme als diese - bzw. auch alternative Antriebssysteme genannt - liegt mit ca. 2,7% noch bei weitem in der Minderheit.

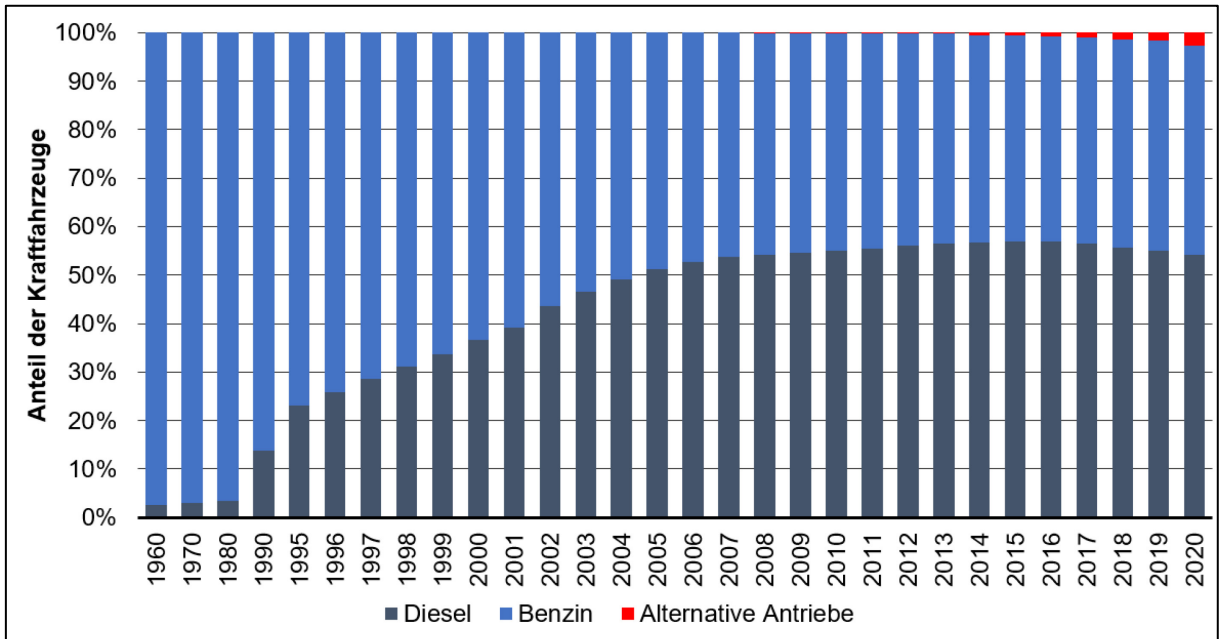


Abbildung 2: Anzahl der PKW aufgegliedert nach Antriebsarten zwischen 1960 und 2020 in Österreich [1]

Mit Stand Ende 2020 sind in Österreich somit ca. 83 000 Hybrid-Fahrzeuge und 44 000 Elektrofahrzeuge unterwegs. Erdgas dient als Energieträger für etwa 6 000 Fahrzeuge, Flüssiggas ist in 300 Fahrzeugen verbaut und Wasserstoff in 45 Fahrzeugen (Abbildung 3).

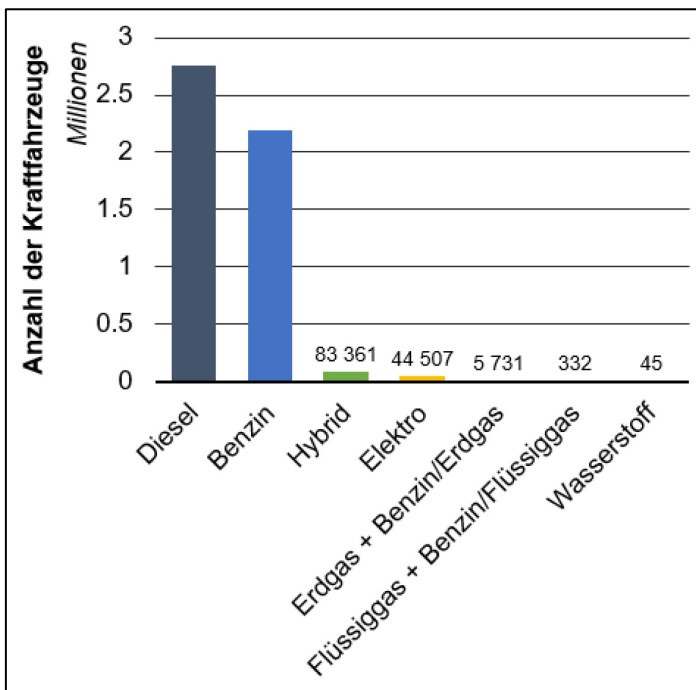


Abbildung 3: Anzahl der PKW aufgegliedert nach Antriebsarten 2020 in Österreich [1]



Änderungen im Fahrzeugbestand machen sich erst nach einigen Jahren bemerkbar; aussagekräftiger ist allerdings die Anzahl an Neuzulassungen. Wie man Abbildung 4 entnehmen kann, ist der Anteil von neu zugelassenen Fahrzeugen mit einem alternativen Antriebssystem merklich im Steigen begriffen, zuletzt betrug er sogar knapp über 20%. Dies beinhaltet Elektro, Erdgas, (sowohl monovalenter als auch bivalenter Betrieb), Wasserstoff wie auch jegliche Formen von Hybrid-Antrieben.

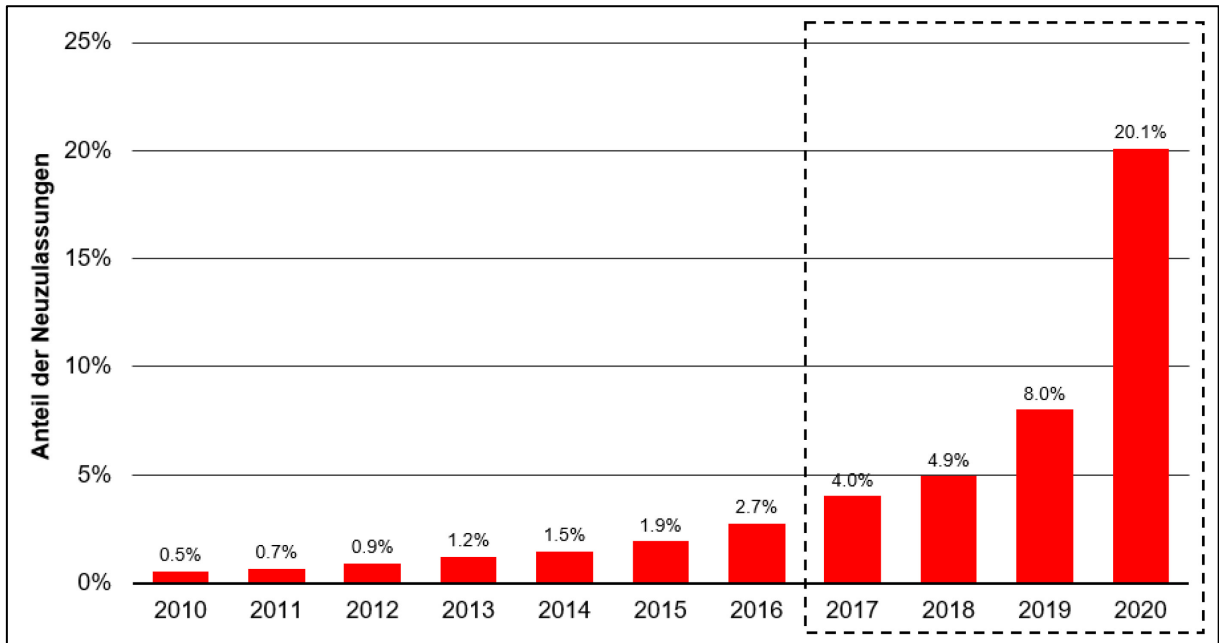


Abbildung 4: Anzahl der neu zugelassenen PKW mit alternativen Antriebsarten zwischen 2010 und 2020 in Österreich [1]

Welche Antriebsart die neu zugelassenen Fahrzeuge im Detail aufweisen ist in Abbildung 5 dargestellt. Betrachtet man die vergangenen vier Jahre genauer, so erkennt man, dass ein Großteil der alternativen Antriebssysteme Hybrid-Fahrzeuge beinhaltet, also eine Kombination verschiedener Energiespeicher bzw. Energiewandler. Auch der Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen wächst kontinuierlich an; im Jahr 2020 wurden gar 16 000 PKW mit solch einer Antriebsart verkauft.

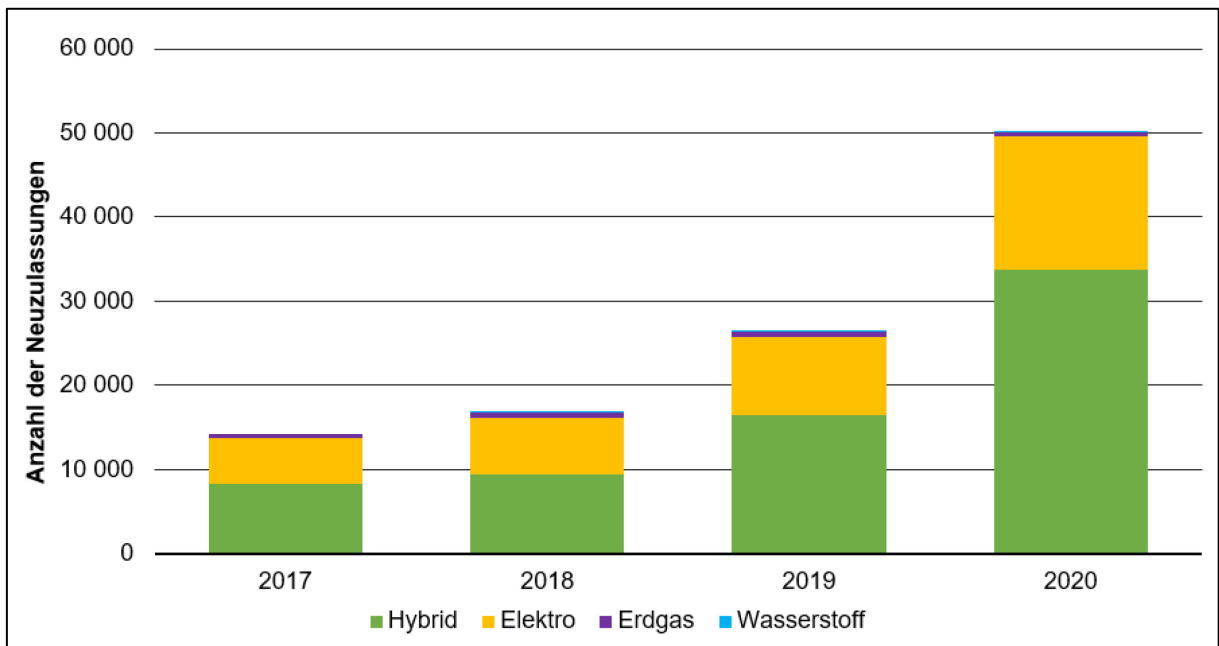


Abbildung 5: Anzahl der neu zugelassenen PKW mit alternativer Antriebsart zwischen 2017 und 2020 in Österreich [1]

Wie Abbildung 6 zu entnehmen, wird derzeit davon ausgegangen, dass in den nächsten Jahren ein Großteil der verkauften Fahrzeuge als Hybrid-Fahrzeug unterwegs ist. Außerdem wird von einer merklich steigenden Anzahl von BEV ausgegangen. Eine Aussage über die Prognose der zukünftigen Antriebsarten im Bereich der PKW zu treffen, ist im Allgemeinen schwierig und von zahlreichen Rahmenbedingungen abhängig. So wird etwa in der E-Mobilitätsoffensive 2021 des BMK [2] der Einsatz rein elektrisch oder mit Wasserstoff betriebener Fahrzeuge stark propagiert. Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) werden aber auch 2030 zumindest im PKW Bereich noch in einer sehr geringen Anzahl vorhanden sein.

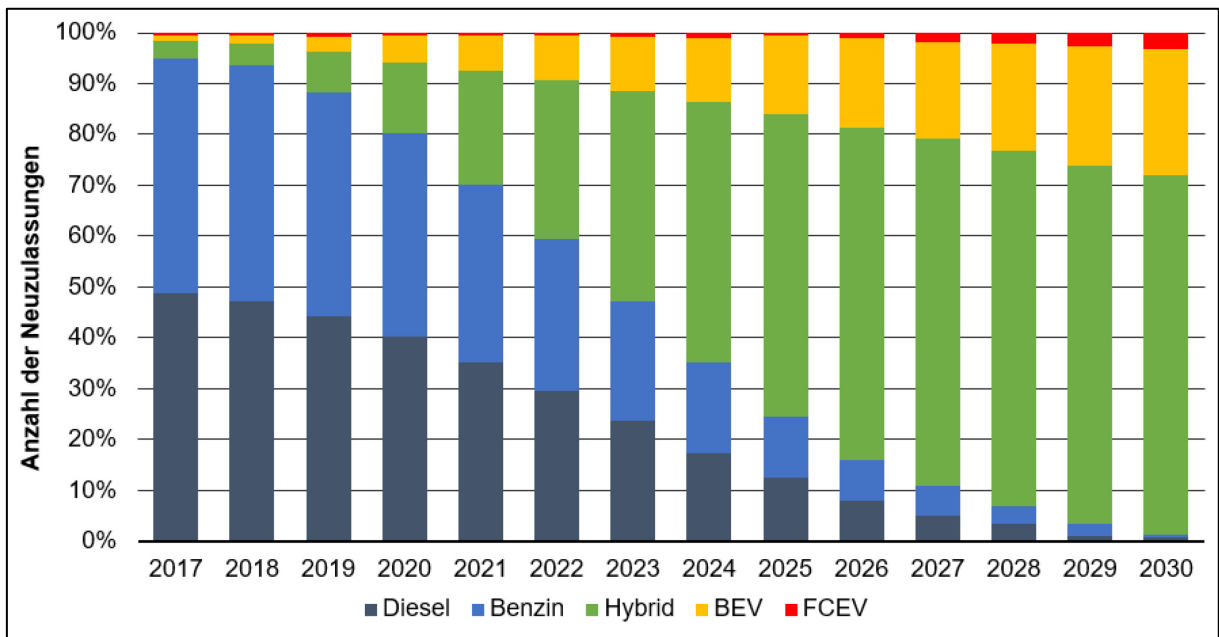


Abbildung 6: Prognostizierte Entwicklung der neu zugelassenen PKW aufgegliedert nach Antriebsarten bis 2030 [1]

Die angestrebte Wende bei den Energieträgern im Verkehrswesen setzt jedoch mittelfristig auch auf erhöhten Einsatz gasförmiger fossiler Energie (CNG, LNG und LPG) und langfristig aber auch auf den Einsatz von sogenannten e-Fuels, also synthetische Kraftstoffe, die mittels Strom, Wasser und Kohlenstoff hergestellt werden (power-to-liquid „PtL“ oder power-to-gas „PtG“). Hoffnungsträger bei den synthetischen Kraftstoffen ist Wasserstoff, der einerseits über die Nutzung in Brennstoffzellen zur Erzeugung elektrischer Energie (FCEV) oder auch als direkter Kraftstoff in Verbrennungskraftmaschinen (ICEV) eingesetzt werden kann.

Da Hybridfahrzeuge, allen voran Kombinationen von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen und mit fossilen Brennstoffen betriebenen Verbrennungsmotoren, nur eingeschränkt zur Emissionsfreiheit und somit zur Klimaneutralität beitragen können, sind sie aller Voraussicht vor allem als Übergangslösung relevant. Als gänzlich (sowohl global als auch lokal) emissionsfrei und klimaneutral, können aus heutiger Sicht lediglich der Betrieb von rein elektrischen Fahrzeuge sowie wasserstoffbasierten Verbrennungsmotoren betrachtet werden. Und dies auch nur unter der Voraussetzung der Stromerzeugung bzw. Wasserstoffherzeugung aus erneuerbaren Energien. Aus diesen Gründen ist es derzeit vor allem der batterieelektrische Antrieb, der im Großteil der neu zugelassenen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zu finden sein wird. Und zwar entweder als monovalenter Antrieb, für den Kurz- und Mittelstreckeneinsatz, oder in Verbindung mit fossilen Energieträgern, e-Fuels oder Wasserstoff, in Hybrid-Fahrzeugen, für die Langstrecke und für größere Nutzfahrzeuge.

## 1.2 Auswirkung einer Veränderung der Fahrzeugflotte auf den Betrieb und die Sicherheit von unterirdischen Verkehrsanlagen

Die Tunnelbrände rund um die Jahrtausendwende legten die möglichen katastrophalen Auswirkungen von Bränden auf Nutzer des Tunnels und die Infrastruktur dar. Die Unfallhäufigkeit ist jedoch in Straßen- und Bahntunneln niedriger als auf der offenen Strecke oder im Bahnhofsbereich; Unfälle noch dazu mit einem Brandereignis sind hingegen ungleich kritischer. Der Brand nimmt die Sicht und verbraucht die für die Atmung nötigen Sauerstoff. Die mit dem Brand einhergehende Rauchentwicklung und die Hitze entsprechen den hauptsächlichen Risiken solcher Unfälle, zudem tritt eine Verunreinigung der Tunnellaibung durch ebenda ausfallende Rauchpartikel auf. Die Brandphasen unterteilen sich dabei in die Phase der Entzündung (20-25°C), des Schwelens (ca. 100°C), der Ausbreitung (bis 1500°C) und des Abklingens [3]. Neben den menschlichen Gefährdungen und Verlusten rufen Tunnelbrände schwerwiegende Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur hervor. So verursachte der Brand im St. Gotthard Tunnel, dass die Zwischendecke über eine Strecke von 250 m versagte (Haack, 2002). Beträchtliche bauliche Schäden wie ein Versagen der Zwischendecke bewirkte z.B. auch der Tunnelbrand im Gleinalm Tunnel im Jahr 2018. Die exemplarischen Kennwerte in Tabelle 1 gelten für die jeweiligen Fahrzeugtypen.

*Tabelle 1: Exemplarische Brandenergien und maximale auf die bauliche Struktur einwirkende Brandtemperaturen nach Fahrzeugart [3]*

Art des Fahrzeuges	Brandenergie [MJ]	Max. Brandtemperatur [°C]
Personenkraftwagen	3.000 bis 3.900	200
Bus	41.000	800
Tanklastwagen (50m <sup>3</sup> Diesel)	1.500.000	1400

Für die Bemessung der Tunnelinfrastruktur sind im Hinblick auf die Ausrüstung und die tragenden Elemente die Brandenergie oder die Brandtemperatur von Tragweite für den Fall eines Brandereignisses.

Mit der steigenden Anzahl von Fahrzeugen batterieelektrischer Antriebe wird folgerichtig die Häufigkeit von Unfällen auf offener Strecke, wie auch in Tunnels anwachsen, in die diese Fahrzeuge verwickelt sind. Durch das gegenüber Fahrzeugen mit konventionellen Kraftstoffen veränderte Brandverhalten lässt sich auch eine Veränderung der Auswirkungen von Bränden alternativ betriebener Fahrzeuge auf die Tunnelanlagen erwarten. Die derzeitigen Batteriegenerationen bauen stark auf eine Lithium - Ionen Technologie auf, die im Falle eines Brandereignisses teilweise anderes Verhalten als fossile Energieträger aufweist. Dies bezieht sich auf die Brandursache ebenso wie auf Brandverlauf und Personengefährdung durch die entstehenden Rauchgase.



## 1.3 Forschungsziele

Um dieser potenziellen Problemstellung im Tunnel verstärkt auf wissenschaftlicher Basis auf den Grund gehen zu können, wurde im Zuge der Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2018 ein Projekt zur Erweiterung des Wissensstandes in diesem Bereich initiiert. Unter Federführung der TU Graz (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Institut für Fahrzeugsicherheit) und arbeiten die MU Leoben (Lehrstuhl für Subsurface Engineering), der Österreichische Bundesfeuerwehrverband sowie die ILF Beratende Ingenieure zusammen, um das Brandverhalten derartiger Fahrzeuge und dessen Auswirkungen auf die Sicherheit von Tunnelnutzern zu untersuchen. Der gegenständliche Bericht fasst die wissenschaftlichen Methoden zusammen und dokumentiert die erzielten Ergebnisse sowie die darauf basierenden Schlussfolgerungen. Wie bereits angeführt erfolgte eine Fokussierung der Untersuchungen auf batteriebetriebene Fahrzeuge.

Auf Basis des derzeitigen allgemeinen Wissensstandes zu Bränden batteriebetriebener Fahrzeuge im Tunnel wurden bestehende Wissenslücken identifiziert und folgend die relevanten Forschungsziele formuliert. Konkret sollen im vorliegenden Projekt folgende Forschungsziele erreicht werden:

### **Brandverhalten von Traktionsbatterien**

- Methodenentwicklung zur absichtlichen Herbeiführung eines Thermal Runaway bei Batteriezellen und -modulen
- Methodenentwicklung zur messtechnischen Erfassung relevanter Systemgrößen

### **Brandverhalten von Fahrzeugen**

- Rauchgasemissionen in Form von Schwermetallen
- Rauchgasemissionen in Form Säuren
- Abschätzung der Heat Release Rate

### **Brandauswirkungen auf Infrastruktur**

- Messung der Temperaturverteilung im Tunnel
- Vergleich des Schadstoffeintrags in die Gewässerschutzanlagen zwischen regulärem Tunnelbetrieb und dem Brand batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge
- Dokumentation der Folgen für die Tunnelinfrastruktur
- Simulation des Wärmeeintrags eines batterieelektrisch angetriebenen Busses
- Verfahrensvorgaben nach Brandfällen batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge

### **Risikobetrachtung**

- Allgemeine Analyse der Gefährdungen für Personen durch Elektrofahrzeugbrände in Tunneln auf Basis der geänderten Brandparameter – höhere Hitzefreisetzung, höhere Rauchgastoxizität
- Berücksichtigung der geänderten Brandparameter in der Risikoanalyse – Adaptierung des österreichischen Tunnelrisikomodels
- Bewertung der potenziellen Auswirkungen des steigenden Anteils batteriebetriebener Elektrofahrzeuge – Szenario Analyse und Risikobewertung

### Feuerwehreinsatz und Brandbekämpfung

- Ist es für die Feuerwehr möglich zu erkennen, dass es sich bei einem PKW-Brand in einem Tunnel um ein BEV handelt?
- Ist der Einsatz einer Löschdecke im Tunneleinsatz bei Elektrofahrzeugen sinnvoll?
- Ist der Einsatz einer Löschlanze im Tunneleinsatz bei Elektrofahrzeugen sinnvoll?
- Muss man damit rechnen, dass beim Brand eines BEV, bei dem (wie in den meisten bisher bekannten Fällen) der Brand nicht in der Batterie entsteht, die Batterie nach 10 Minuten Vollbrand zum Brandgeschehen beiträgt?

In Abbildung 7 ist der gewählte Lösungsansatz zur Erreichung der Forschungsziele dargestellt:

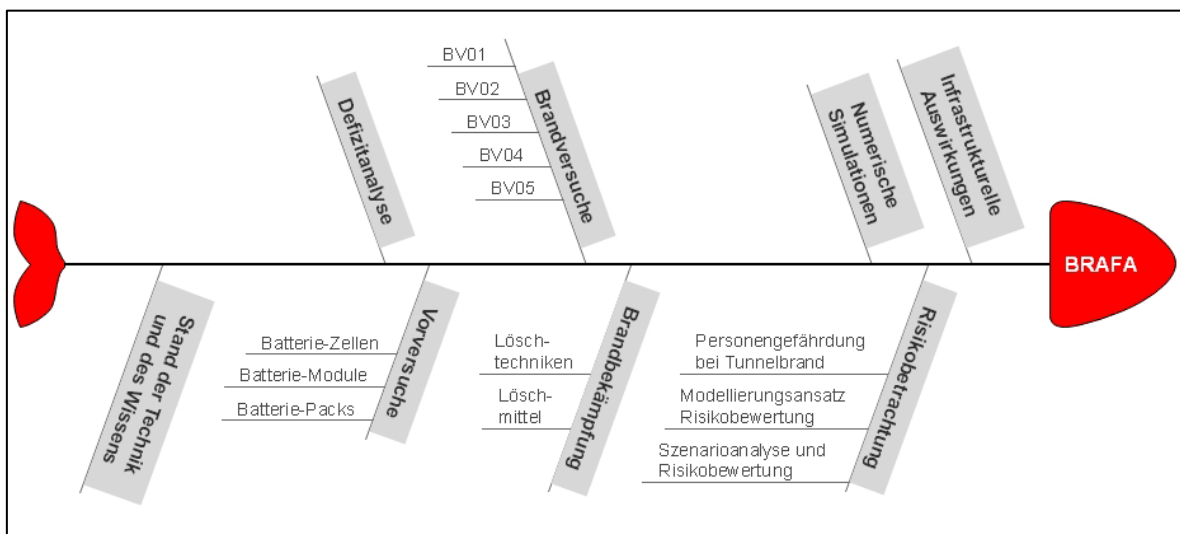


Abbildung 7: Wissenschaftliche Vorgehensweise

## **2 STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS**

### **2.1 Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen**

Bei Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen 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<sub>2g</sub>) und in einem Tank gespeichert ist, ist dies bei BEV die in einem Akkumulator gespeicherte elektrische Energie.

Fahrzeuge mit Erdgas (CNG) oder Flüssiggas/Autogas (LPG) als Kraftstoff sind bereits seit langem bewährt und im Einsatz. Die Anzahl mit derartigen Kraftstoffen betriebener Fahrzeuge ist im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen sehr gering (siehe Kapitel 1.1) Das Gefahrenpotenzial ist bekannt und betrifft in der Regel Unfälle während Betankungsvorgängen und in ganz wenigen Fällen explosionsartige Verbrennungsvorgänge bei massiven Unfällen von Einzelfahrzeugen. Verflüssigtes Erdgas (LNG) als Energieträger ist derzeit im österreichischen Straßenverkehr noch nicht im Einsatz.

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie (FCEV) erfolgt die Brennstoffspeicherung - üblicherweise Wasserstoff(H<sub>2g</sub>) - gasförmig und die Stromerzeugung erfolgt in der Brennstoffzelle. Als Zwischenspeicher - unter anderem zur Speicherung rekuperierter Energie - dient wiederum ein Akkumulator, der jedoch eine geringere Kapazität als jener von BEV haben kann. Ein größerer Einsatz von FCEV ist in den nächsten Jahren schon aufgrund der fehlenden Betankungsinfrastruktur unwahrscheinlich.

Auch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) werden zu den alternativen Antriebssystemen gezählt. Diese Technologie ist nun für den Kurz- und Mittelstreckenbereich ausgereift und in zunehmendem Maße im Einsatz. Es wird darauf hingewiesen, dass in diesem Bericht dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend der Akkumulator als Energiespeicher in Fahrzeugen „Batterie“ genannt wird.

#### **2.1.1 Grundlagen batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge**

Wie zuvor erwähnt, beschränken sich im gegenständlichen Forschungsprojekt die Auswirkungen von Unfällen mit alternativen Antriebsarten auf jene von BEV. Diese sind seit geraumer Zeit Gegenstand intensiver Untersuchungen, wobei der Fokus bis vor Kurzem eindeutig auf Untersuchungen zu Akkumulatoren (von Zellebenen bis zu Modulen) und mit geringen Ausnahmen auch auf Brände einzelner Fahrzeuge lag.

Die Antriebsenergie wird bei jeglichen Fahrzeugen mit vornehmlich elektrischem Antrieb (xEV) in elektrochemischer Form in einer Traktionsbatterie gespeichert. Der Aufbau der Traktionsbatterie ist im Allgemeinen hierarchisch: Die kleinste Einheit ist die Zelle; mehrere Zellen werden wiederum zu Modulen verschaltet. Module werden weiter zu einem Pack, also der gesamten Fahrzeugbatterie, zusammengeschlossen. Zellen bzw. Module werden elektrisch entweder seriell oder parallel verschaltet. Eine Serienschaltung bewirkt eine höhere Systemspannung, während eine Parallelschaltung die Kapazität der Batterie erhöht. Abbildung 8 zeigt schematisch den Aufbau einer Traktionsbatterie eines Serienfahrzeuges.

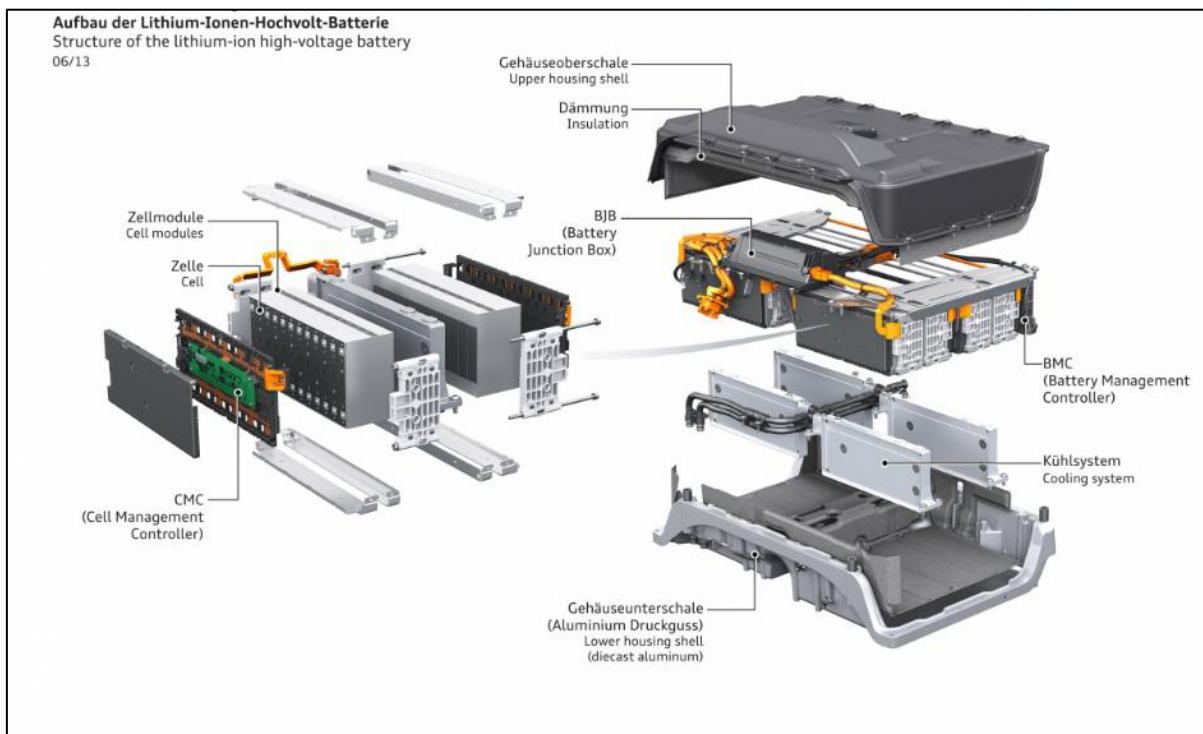


Abbildung 8: Exemplarischer Aufbau eines Batteriesystems [4]

Die gängigste Technologie für Batteriesysteme in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist zurzeit die Lithium-Ionen (Li-Ion) Batterie. Es ist zu erwarten, dass dies auch in den kommenden Jahren der Fall sein wird [5].

Die Funktionsweise einer State-of-the-Art Li-Ion Batterie wird durch Transportvorgänge im Inneren der Zelle beschrieben. Diese werden durch die elektrochemische Potentialdifferenz zwischen zwei Elektroden getrieben. Die hauptsächlichen Eigenschaften der Li-Ion Batterie werden dabei durch die Elektrodenpaarung bestimmt. Verschiedenste Elektrodenmaterialien wurden bisher kommerzialisiert [6], [7].

Der schematische Aufbau einer Li-Ion Batterie ist in Abbildung 9 am Beispiel einer LCO-Zelle dargestellt.

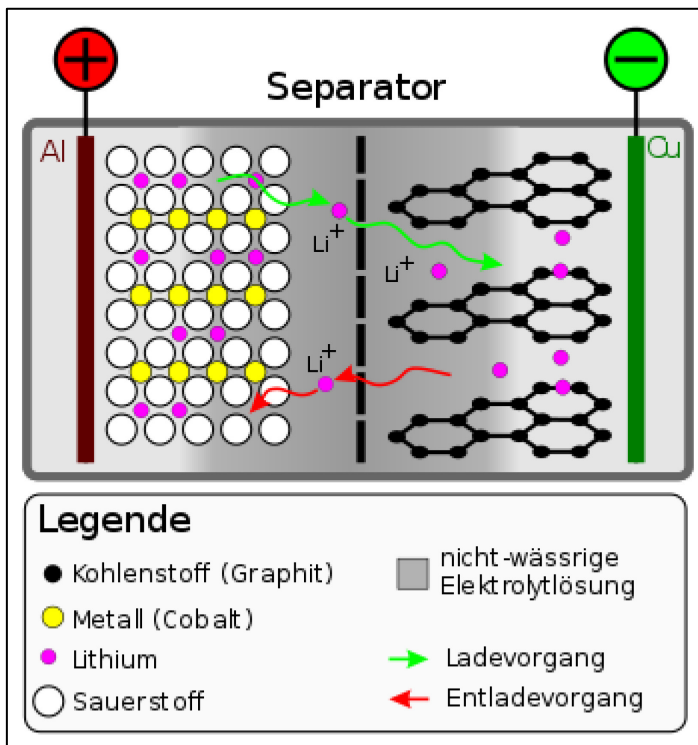


Abbildung 9: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batterie [8]

Li-Ionen ( $\text{Li}^+$ ) wandern beim Entladevorgang von der negativen Elektrode (Anode) zur positiven Elektrode (Kathode) und werden dort im Elektrodenmaterial (z.B.  $\text{LiCoO}_2$ ) eingelagert. Gleichzeitig fließen Elektronen ( $e^-$ ) über einen äußeren Stromkreis und verrichten dort elektrische Arbeit am Verbraucher (z.B. Elektromotor). Beim Ladevorgang wird durch eine außen angelegte Spannung die Flussrichtung umgekehrt, und Li-Ionen werden im negativen Elektrodenmaterial (z.B. Graphit) eingelagert [6].

### 2.1.2 Gefahrenpotenzial

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. Eine 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 [6].

Durch verschiedene Ursachen, wie z.B. elektrische, thermische oder mechanische Überbelastung [6], aber auch Alterungserscheinungen [9], [10], [11], [12], [13] kann der Separator lokal zerstört werden, was in Folge zu einem inneren Kurzschluss führen kann. Durch die darauffolgende ohmsche Erwärmung der Zelle können weitere unerwünschte Prozesse aktiviert werden [14]. Neben internen Kurzschlüssen kann die Li-Ionen-Zelle auch extern kurzgeschlossen werden. Kommt es, z.B. im Falle eines Crashes, zu Deformationen an

der Batterie, so kann dabei eine leitende Verbindung zwischen den Elektroden und somit ein externer Kurzschluss entstehen. Gefahren, die von (beschädigten) Li-Ionen-Zellen ausgehen, wurden in [15] ausführlich analysiert

Eine mögliche Folge eines internen oder externen Kurzschlusses ist die chemische und thermische Zersetzung der Zellkomponenten. Nach Doughty und Roth [16] sind die häufigsten Reaktionen auf eine Beschädigung der Zelle, die unkontrollierte Abgabe von Wärme (=Thermal Runaway) und die Freisetzung toxischer und brennbarer Gase (= Venting).

Kommt es in weiterer Folge zu einem Brand, können zudem schwermetallhaltige Aerosole emittiert werden [17]. Gemäß Angaben aus der Literatur [17] kann davon ausgegangen werden, dass bis zu 0,15 m<sup>3</sup> HF (gasförmig) pro kWh Batteriekapazität freigesetzt werden. Untersuchungen an einzelnen Pouch-Zellen Elementen zeigten, dass bei einem Thermal Runaway in größeren Mengen CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und unterschiedliche weitere Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden, bevor es überhaupt zu einem Brand kommt [18]. Mellert [19] zeigte zudem, dass Metalle wie Kobalt, Lithium, Mangan, aber auch HF, fluorhaltige Aerosole und Phosphin freigesetzt werden.

Das Brandverhalten von Li-Ionen Zellen ist im Grunde gut erforscht. Zahlreiche Publikationen behandeln dazu verschiedenste, sicherheitsrelevante Themen [20], [21], [22] und [23]. Das Brandverhalten einer Zelle wurde u.a. von Ribière et al. detailliert beschrieben. Hierbei wurde in einem „Tewarson“-Kalorimeter eine kommerzielle Pouchzelle (Elektrischer Energieinhalt: 11 Wh ~ 40 kJ) bei unterschiedlichen Ladezuständen (0, 50 und 100% SOC) durch externe Wärmezufuhr zum Thermal Runaway gebracht [24]. Die dabei entstandenen Gase, die Wärmeabgabe und die Masseveränderung des Prüflings wurden aufgezeichnet und sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die abgegebene Wärmemenge und die Dauer der Wärmeabgabe signifikant vom Ladezustand der Zelle abhängen.

Relevant für das gegenständliche Projektvorhaben ist hierbei, dass Tests unter der Prämisse eines Worst-Case-Szenarios bei möglichst hohem Ladezustand durchgeführt werden sollten. Auch kann von einer Brandlast ausgegangen werden, die in etwa dem zehnfachen der elektrisch gespeicherten Energie entspricht. Diese Feststellung deckt sich auch mit früheren Arbeiten in der Literatur [25].



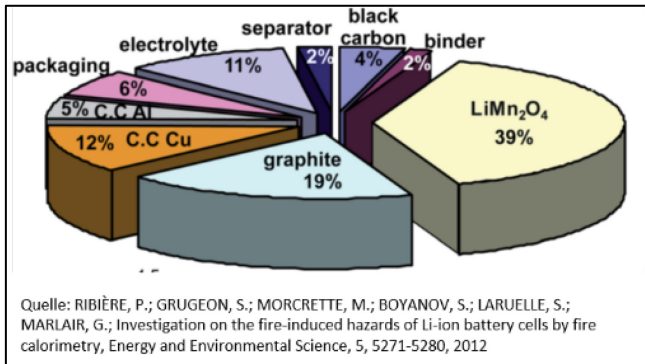


Abbildung 10: Zusammensetzung Gase [24]

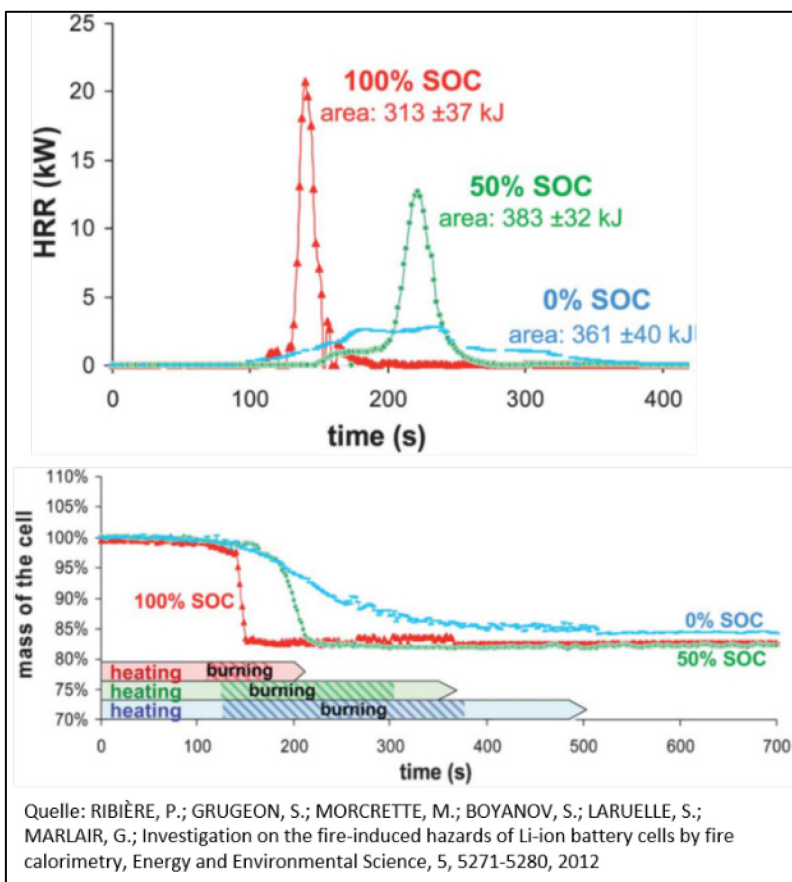


Abbildung 11: HRR und Masseverlust [24]

Wärmeentwicklung und Thermal Runaway von Batteriezellen und die thermischen Gegebenheiten in Batteriemodulen zeigten u.a. Spinner et al. [26] und Spotnitz und Franklin [27]. Es stellte sich dabei heraus, dass die Energie einer Zelle im Thermal Runaway ausreicht, um weitere, benachbarte Zellen kritisch zu erwärmen. Dies wird besonders durch beengte, räumliche Verhältnisse im Batteriemodul und eine ungenügende Wärmeabfuhr aus dem Modul begünstigt.

Im Folgenden werden die beiden kritischen Aspekte der Wärmefreisetzung und der Generierung von Schadstoffen eingehender betrachtet.

### 2.1.2.1 Wärmefreisetzung

Vor allem die Brennbarkeit des Elektrolyten wurde in diesem Zusammenhang umfassend in einer Studie von Hess et al. [28] untersucht. Nach Mikolajczak et al. [25] kann im Falle eines Thermal Runaway von einer 7 bis 11-fach höheren Wärmefreisetzung, bezogen auf die in der Zelle gespeicherte elektrische Energie, ausgegangen werden.

Studien haben gezeigt, dass bei Bränden batteriebetriebener Elektrofahrzeuge mit ähnlichen Brandgrößen wie bei Bränden konventioneller Fahrzeuge zu rechnen ist [29], [30]. Abbildung 12 zeigt den Vergleich der zeitlichen Verläufe der Hitzefreisetzungsrates aus Vollbrandversuchen für zwei unterschiedliche Fahrzeugtypen (linke Abbildung bzw. rechte Abbildung), für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (gepunktete Linien) bzw. für konventionell angetriebene Fahrzeuge (durchgängige Linien), durchgeführt in der INERIS Tunnelversuchsanlage [29]. Die Wärmefreisetzungsrates nach Erreichen der Vollbrandphase bewegten sich dabei zwischen 2,5 MW und 4,5 MW (Fahrzeugtyp 1 – linke Abbildung) und zwischen 3,5 MW und 5,5 MW (Fahrzeugtyp 2 – rechte Abbildung).

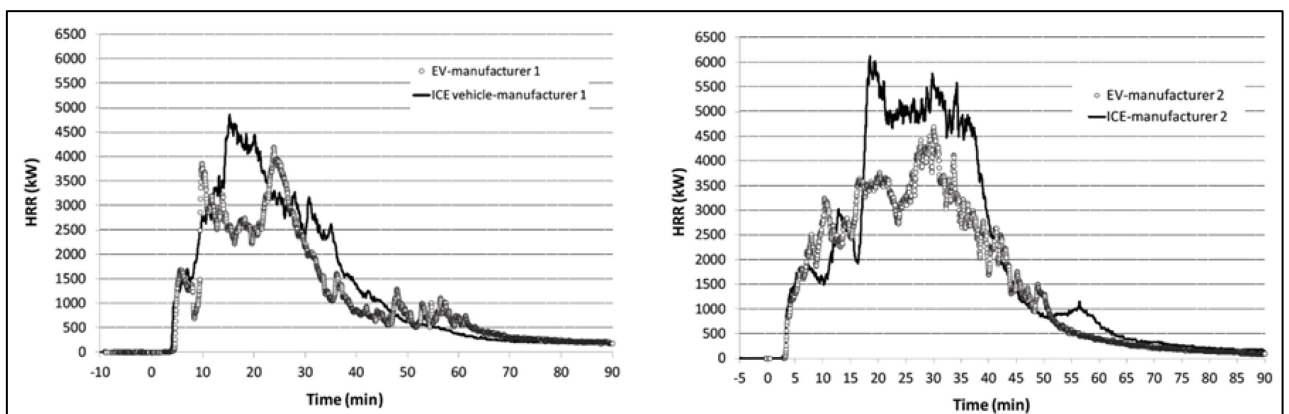


Abbildung 12: Vergleich der Wärmefreisetzungsrates von konventionell angetriebenen Fahrzeugen (durchgehende Linie) und vergleichbaren BEVs (gepunktete Linie) [29]

Willstrand et al. [31] führten umfangreiche Brandversuche an Batterien durch. Abbildung 13 zeigt die Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrates als Funktion der am Brandgeschehen beteiligten Anzahl der Zellen (Zelle, Modul, gesamtes Pack).



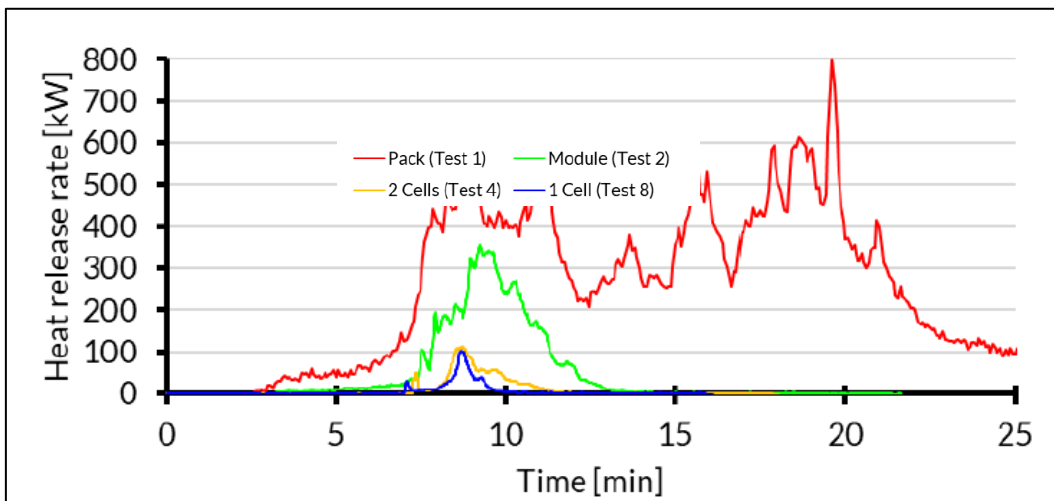


Abbildung 13: Wärmefreisetzungsraten als Funktion der am Brand beteiligten Anzahl von Zellen [31]

[31] 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 (80 – 100 % SOC). 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.

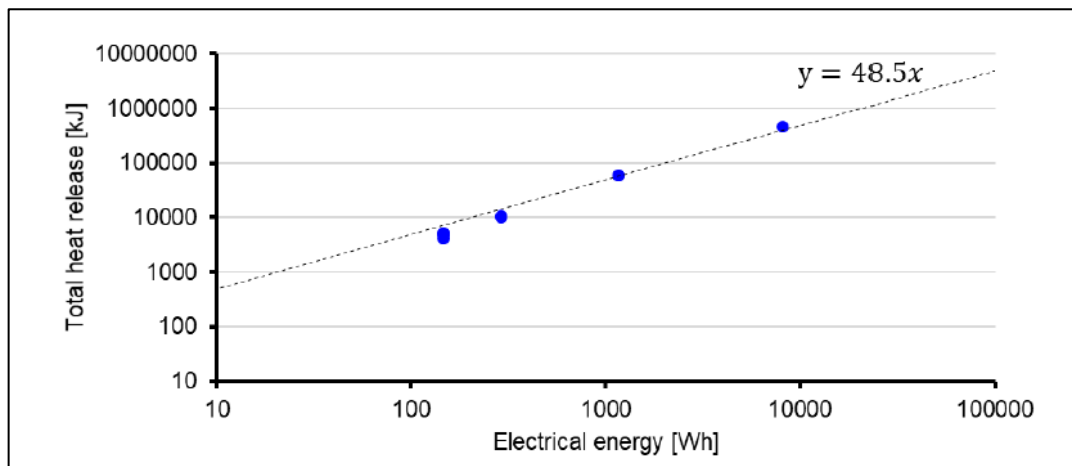


Abbildung 14: Gesamte Wärmefreisetzung als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [31]

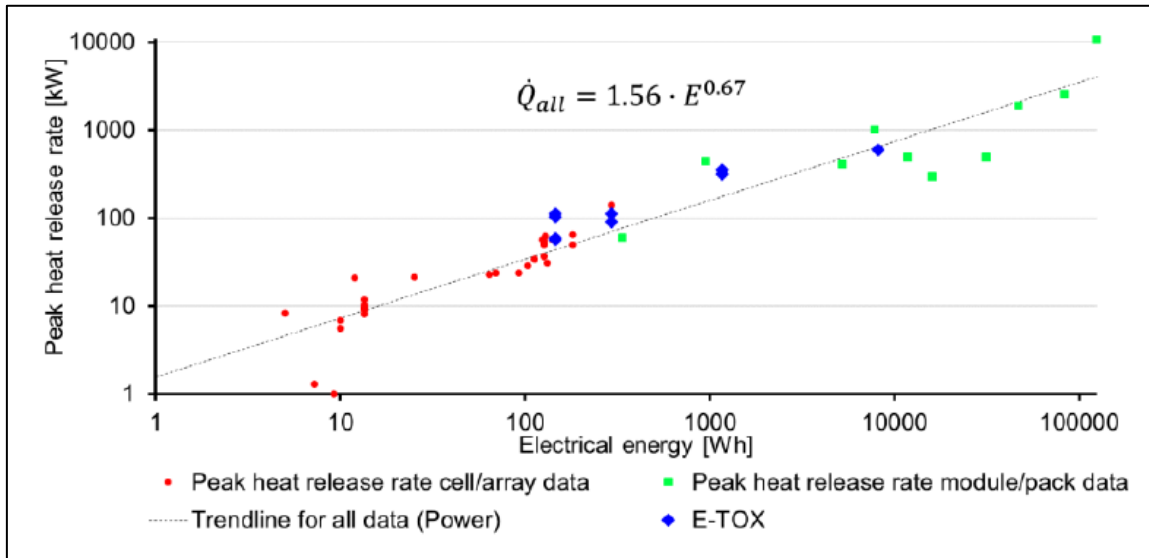


Abbildung 15: Spitzenwerte der Wärmefreisetzungsraten bei BEVs als Funktion der gespeicherten Energie der Batterien [31]

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/m<sup>2</sup> liegen, aber naturgemäß 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.

#### 2.1.2.2 Fluorwasserstoff (HF)

Abbildung 16 zeigt die HF-Emissionsraten für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge sowie jene für konventionell angetriebene Fahrzeuge, gemessen während Vollbrandversuchen von [29]. Die HF-Spitzen, etwa 10 bis 15 Minuten nach Brandbeginn, treten sowohl für batteriebetriebene als auch für konventionelle Fahrzeuge auf und sind demnach auf antriebsunabhängige Quellen, wie etwa die Kühlflüssigkeit der Klimaanlage oder Bestandteile der Innenausstattung, zurückzuführen. Die restlichen, weniger ausgeprägten und seriell aufgetretenen Emissionsspitzen sind typisch für Li-Ionen Batteriebrände und hängen mit dem seriellen Ausgasen der einzelnen Zellen zusammen. Die Emissionsraten der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge bewegen sich für beide Fahrzeuggrößen jeweils in etwa zwischen 0,5 und 1,0 g/s. Legt man diese Emissionsraten wiederum auf einen Fahrzeugbrand

in einen Straßentunnel nach obigen Annahmen um, ergibt sich zur Abschätzung eine durchschnittliche HF Konzentration von ca. 6,5-13 ppm.

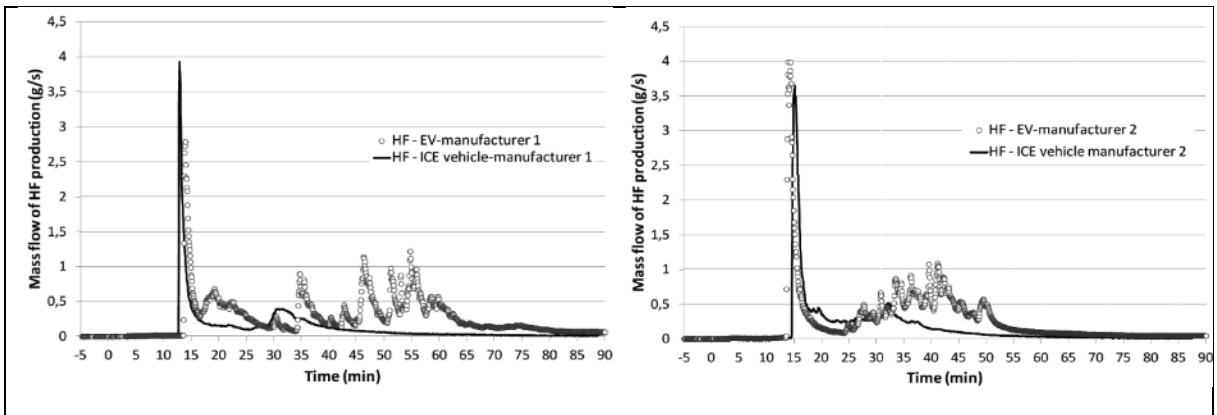


Abbildung 16: HF-Emissionen bei Brandversuchen an Gesamtfahrzeugen in der INERIS Tunnelversuchsanlage. [29]

[31] 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 [29] veröffentlichten Daten scheint die derzeit übliche Zellchemie merklich weniger HF freizusetzen (Abbildung 17).

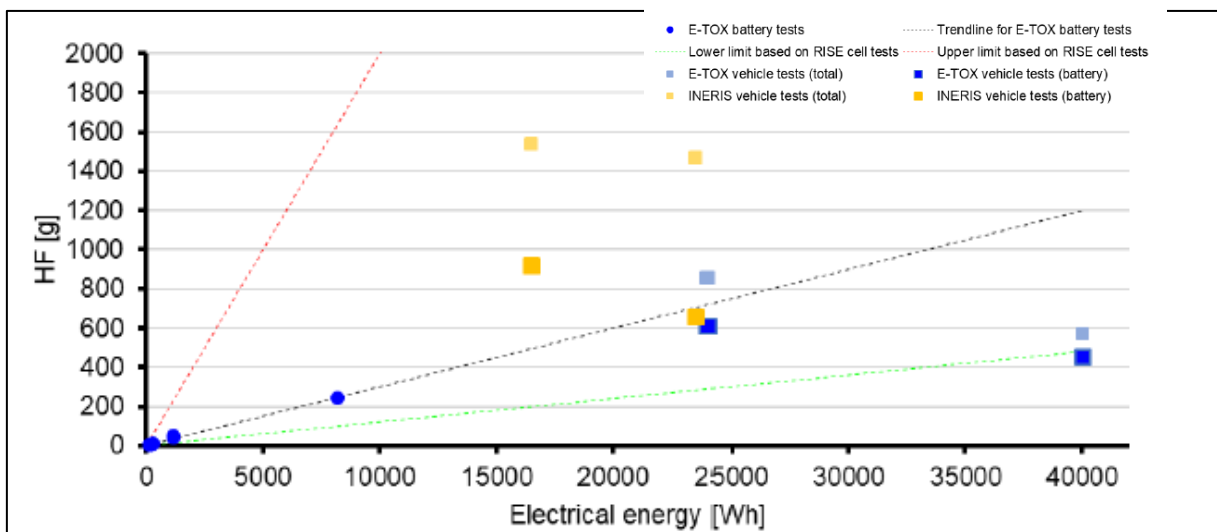


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen HF-Emissionsmengen und der gespeicherten Energie der Batterien [31]

Überträgt man die in [32] nachgewiesenen HF-Emissionen pro Wh auf die Kapazität einer modernen Li-Ionen Batterie eines Elektrofahrzeuges, ergeben sich durchschnittliche Konzentrationen von etwa 8 ppm HF (Batterietyp A: 25 mg/Wh) bzw. 66 ppm HF ( Batterietyp B: 200 mg/Wh) im Falle eines Batteriebrandes in einem Straßentunnel. Zur Abschätzung der Durchschnittskonzentrationen wurde von einer Emissionsdauer von 20 Minuten, einer Gesamtkapazität von 30 kWh, einem Tunnelquerschnitt von 50 m<sup>2</sup>, einer Luftdichte von 1,14

kg/m<sup>3</sup>, einer Lüftungsgeschwindigkeit von 2 m/s sowie molaren Massen von 30 g/Mol für trockene Luft bzw. 20 g/Mol HF ausgegangen.

Im Rahmen des Projekts E-TOX [31] wurden umfangreiche Gasmessungen durchgeführt. Auf Batterieebene konnte eine klare Abhängigkeit der HF-Emissionsmenge von der gespeicherten Energie (80-100% SOC) gefunden werden (Abbildung 18).

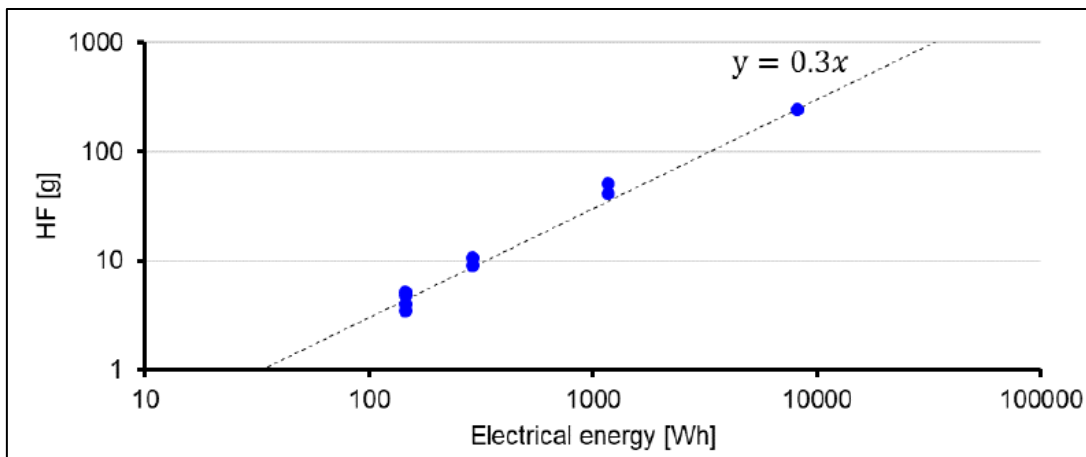
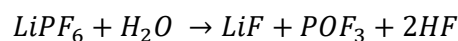
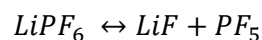


Abbildung 18: HF-Emissionsmenge als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [31]

Der Vergleich dieser Konzentrationsabschätzungen mit den Grenzwerten für die Bewegungseinschränkung (200 ppm) und die Bewegungsunfähigkeit (900 ppm) gemäß [33] durch die direkte Reizwirkung von HF legt nahe, dass die alleinige Wirkung von HF, zumindest auf Basis der Durchschnittskonzentrationen, zu keiner signifikanten zusätzlichen Gefährdung für Tunnelnutzer führen würde.

### 2.1.2.3 Weitere Brandgase

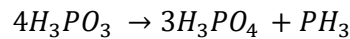
Stöchiometrische Rechnungen lassen darauf schließen, dass neben den leichter messbaren Stoffen wie HF ebenso schädliche, jedoch weitaus flüchtigere Stoffe im Brandfall auftreten können. [34] [35]



PF<sub>5</sub> (Phosphorpentafluorid) ist bei Standardbedingungen ein farbloses, sehr giftiges und nicht brennbares Gas mit stechendem Geruch. In feuchter Luft oder in Wasser gelöst reagiert es heftig unter Bildung von HF (Fluorwasserstoff) und H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Phosphorsäure).

POF<sub>3</sub> (Phosphoroxidfluorid) ist ein farbloses, stechend riechendes Gas, welches in hohen Konzentrationen Glas angreifen kann. Keines dieser beiden Gase wurde im Rahmen der publizierten Großversuche ([29], [19], [30]) gemessen.

Durch thermische Zersetzung von kristalliner Phosphorsäure kann es weiters zur Entstehung von  $\text{PH}_3$  (Monophosphan, veraltet „Phosphan“ oder „Phosphin“) kommen. Es handelt sich um ein brennbares, äußerst giftiges, farb- und geruchloses Gas.



Mellert et al. konnten  $\text{PH}_3$  bei ihren Versuchen nachweisen [19].

Bisherige Forschungsbemühungen haben gezeigt, dass die im Zuge eines Thermal Runaway in Li-Ionen Batterien freiwerdenden Stoffe, auf Grund ihrer toxischen Wirkung, eine zusätzliche Gefährdung für Personen im unmittelbaren Gefahrenbereich darstellen können. In Abhängigkeit des in der Li-Ionen Batterie verwendeten Anoden/Kathoden Materials sowie des verwendeten Elektrolyts, kommt es dabei zur Freisetzung unterschiedlicher Stoffe, mit denen bei Bränden konventionell angetriebener Fahrzeuge nicht, bzw. nicht in diesem Ausmaß, zu rechnen ist.

Eine wesentliche Bedeutung kommt in diesem Kontext  $\text{LiPF}_6$  (Lithiumhexafluorphosphat) zu, das häufig als Elektrolytsalz verwendet wird, und das während des Thermal Runaway in die toxischen Derivate HF und  $\text{POF}_3$  umgewandelt wird. Abbildung 19 zeigt die normierten HF-Emissionen bei einem Li-Ionen Batteriebrandversuch für unterschiedliche Elektrodenmaterialien – Lithium-Kobalt-Oxid/Carbon (A), Lithium-Eisen-Phosphat/Carbon (B-E), Nickel-Kadmium-Aluminium-Oxid/Lithium-Aluminium-Titan-Phosphat (F), unbekannt (G) – und Ladungszustände, sowie den zeitlichen Verlauf der  $\text{POF}_3$  und HF Emissionen der Lithium-Kobalt-Oxid Zelle (A). Das Elektrolyt der getesteten Zellen bestand jeweils aus Lithiumhexafluorphosphat [32]. Dabei konnten HF-Emissionen von bis zu 200 mg/Wh nachgewiesen werden.

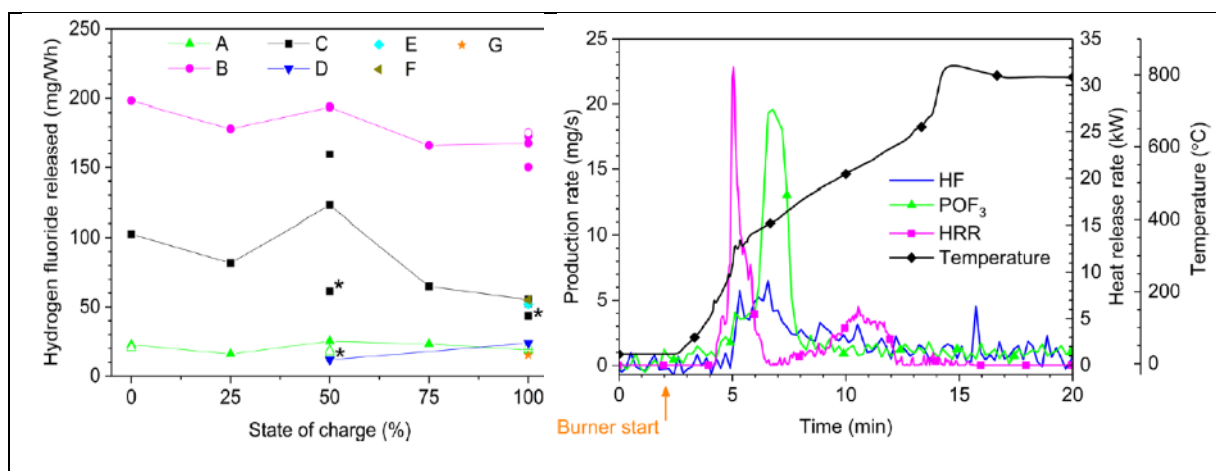


Abbildung 19: HF-Emissionen bei Brandversuchen an Li-Ionen Batteriezellen unterschiedlicher Elektrodenzusammensetzung und Ladungszustände [35]

## 2.2 Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV)

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie (FCEV) erfolgt die Brennstoffspeicherung ( $H_2$ ) gasförmig 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 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 [36].

Detailliertere Untersuchungen zum Brandverhalten von FCEV wurden u.a. durchgeführt von [37] und [38]. Dabei wurde festgestellt, dass es bei einer – in Japan nach Unfällen mit FCV 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 ( $89,9 \text{ g } H_2/\text{min}$ ) konnte keine ernsthafte Gefährdung für Personen im unmittelbaren Umfeld des Fahrzeuges festgestellt werden. Bei den von [37] durchgeführten Brandversuchen wurde festgestellt, dass das notfallmäßige Entleeren des  $H_2$ -Tanks über die Überdruckschutzvorrichtung in Kombination mit einer Entzündung zu einer Stichflamme und zu umherfliegenden Teilen führen kann. Dies stellt eine erhebliche Gefahr für Personen im Umkreis von etwa 10 m um das Fahrzeug dar.

Umfangreiche Forschungsarbeiten zum Thema Wasserstoff im Tunnel laufen derzeit im Rahmen des Projektes HyTunnel [39]. Ergebnisse dazu werden Ende 2021 erwartet.

## 2.3 Risikomodellierung unter Berücksichtigung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (ILF)

Ziel des Forschungsprojektes ist es unter anderem, die gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich neuartiger Gefährdungen für Tunnelnutzer zu quantifizieren und im österreichischen Tunnelrisikomodell abbildbar zu machen. Das österreichische Tunnelrisikomodell wurde in einer gemeinschaftlichen Anstrengung durch die Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr erarbeitet und 2015, als „Richtlinie und Vorschrift für das Straßenwesen“ RVS 09.03.11, veröffentlicht [40]. Ergänzt wird die offizielle Richtlinie durch einen Hintergrundbericht, verfasst durch die zuständigen Arbeitsgruppe der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene Verkehr [41]. Das Risikomodell betrachtet das Personenrisiko der Tunnelnutzer durch Unfälle und Ereignisse in Bezug auf die Verkehrsführung durch

Tunnelanlagen. Die verwendeten Schadensausmaßmodelle werden in ein mechanisches Schadensausmaßmodell und ein Schadensausmaßmodell-Brand unterteilt.

Die Berechnung der mechanischen Schadenswirkung beruht auf einer Auswertung von Unfällen mit Personenschaden aus der Unfalldatenbank des hochrangigen österreichischen Straßennetzes sowie auf einer Anpassung der Schadensausmaßwerte gemäß der im betrachteten Tunnel erlaubten Höchstgeschwindigkeit. 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.

Das (detaillierte) Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände verknüpft physikalische, computergestützte Modelle, zur Bestimmung der Ausbreitung des Brandrauches und der konvektiven Wärme, mit physiologischen Modellen zur Bewertung der Schadenswirkung auf den Menschen. Die Bewegung und das Verhalten der Tunnelnutzer während eines Brandereignisses werden dabei durch ein simples Evakuierungsmodell abgebildet. Erfolg oder Fehlschlag der Selbstrettung von Tunnelnutzern während eines Brandereignisses, werden auf Basis des Akkumulationsmodells von Purser, anhand der damit berechneten Fractional Effective Dose (FED), bestimmt [33]. Die FED berücksichtigt dabei die Wirkung der auftretenden Hitze (Gastemperatur und Strahlungswärme), die Wirkung toxischer Stoffe (CO, HCN, HF etc.) sowie die Reizwirkung von Säuren (HCL, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HF etc.). Da 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.

Wie bereits diskutiert, sind HF sowie POF<sub>3</sub> die wesentlichen Rauchgaskomponenten, die zur potentiell erhöhten Gefährdung bei BEV-Bränden beitragen. Zusätzlich zur Reizwirkung besitzt HF und insbesondere Flusssäure (HF<sub>aq</sub>), die wässrige Lösung von HF, eine systemisch toxische Wirkung. Die Fluorid-Ionen, die aufgrund der hohen Lipidlöslichkeit schnell über die Haut aufgenommen werden können, blockieren den Calcium- und Magnesiumstoffwechsel, was in weiterer Folge zu Krämpfen, Herzkreislaufstörungen, Organversagen und sogar zum Tod führen kann [42]. Der aktuelle Forschungsstand bzgl. der Toxizität von Wasserstofffluorid wurde vom Unterausschuss für „Acute Exposure Guideline Levels“ (AEGL), des „National US Research Councils“, zur Herleitung der AEGL-Grenzwerte, zusammengefasst [43]. Zur Bewertung der Letalität ist dabei der AEGL-3 Grenzwert relevant. Dieser „Acute Exposure Guideline Levels“-Grenzwert entspricht der Luftkonzentration einer Substanz in ppm, oberhalb



derer vorausgesagt wird, dass die allgemeine Bevölkerung, einschließlich anfälliger Personen, lebensbedrohliche gesundheitliche Auswirkungen bis hin zum Tod erleiden könnte. Der AEGL-3 Grenzwert wurde auf Basis unterschiedlicher Tierversuche sowie dokumentierter Expositionen von Menschen, für verschiedene Expositionszeiträume, abgeleitet.

Tabelle 2: HF-Konzentrationen nach AEGL-3, IDLH und  $LC_{50}$

Expositionsdauer	10 Min	30 Minuten	1 Stunde	4 Stunden
AEGL-3	170 ppm	62 ppm	44 ppm	22 ppm
IDLH	-	30 ppm	-	-
$LC_{50}$		2900 ppm		

Im Unterschied zum  $LC_{50}$  Wert entspricht der AEGL-3 Grenzwert weniger einer Konzentration / Dosis, bei der eine Todesfolge bei einem gewissen Anteil der Bevölkerung wahrscheinlich eintritt, sondern einer Konzentration / Dosis, unter der mit keiner Todesfolge zu rechnen ist. Dies wird auch durch den in diesem Konzentrationsbereich liegenden IDLH-Wert (Immediately Dangerous to Life and Health) von 30 ppm [42] verdeutlicht, der um fast zwei Zehnerpotenzen unter dem genannten  $LC_{50}$ -Wert liegt. Der Vergleich des in [33] verzeichneten  $LC_{50}$  Grenzwertes von 2900 ppm über 30 Minuten und dem AEGL-3 Grenzwert von 62 ppm über 30 Minuten zeigt die große Unsicherheit, die mit der Verträglichkeit von Fluorwasserstoff bzw. von Flusssäure verbunden ist.

Die allgemeine Formulierung des akkumulationsbasierten Intoxikationsmodells von Purser, das im österreichischen Tunnelrisikomodell, sowie im internationalen Kontext, zur Bewertung der Auswirkungen von Brandereignissen auf flüchtende Personen verwendet wird, erlaubt die Quantifizierung der Auswirkungen einer erhöhten HF Konzentration. Ein erster Ansatz zur quantitativen Bewertung der Konsequenzen von Batteriebränden wurde in [44] aufgestellt. Die bei Bränden auftretenden toxischen Verbrennungsprodukte CO, HCL, HF und  $NO_x$  wurden dabei anhand der Methodik in [45] zu CO-Äquivalenzkonzentrationen umgewandelt und mit CO-Äquivalenzkonzentrationen bei konventionellen Fahrzeugbränden verglichen. Dabei wurde eine erhöhte CO-Äquivalenzkonzentration für BEV Brände festgestellt, vgl. Abbildung 20. Es wurden hierbei jedoch keine Antriebsarten verglichen. Vielmehr wurde der Brand eines Li-Ionen Transporters der standardisierten französischen Brandkurve für LKW-Brände gegenübergestellt.



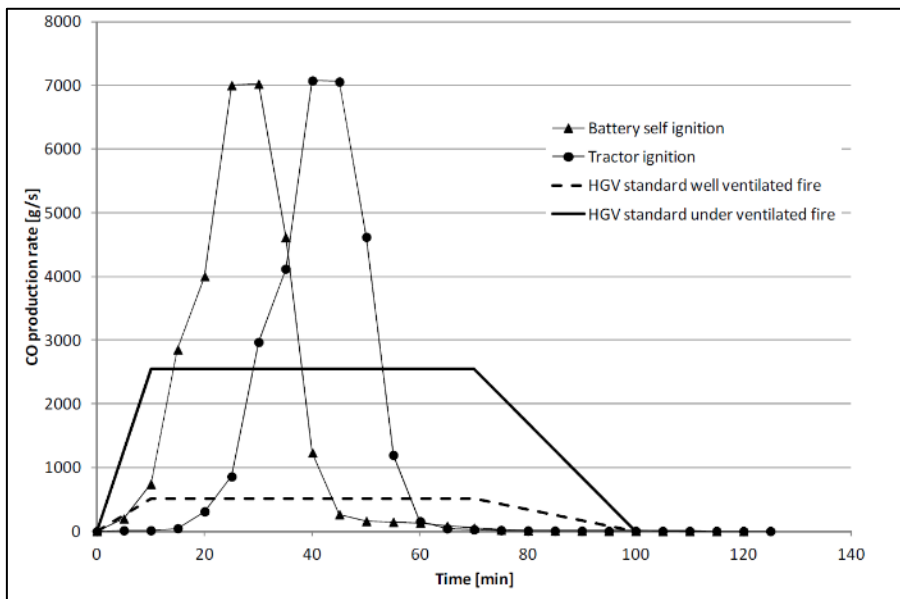


Abbildung 20: Vergleich der Emissionsraten für CO-Äquivalente, zwischen einem mit Li-Ionen Batterien beladenem Transporter und der französischen Standard LKW Emissionsrate [44]

## 2.4 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 die derzeit vorhandenen Sicherheitseinrichtungen 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 auf Tunnelinfrastruktur und Tunnelausrüstung wurden bis dato nicht erhoben.

### 2.4.1 Brandeinwirkungen auf Beton- und Stahlbetonstrukturen

Betone sind schlechte Wärmeleiter, was heißt, dass 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. So vermindert sich die Druckfestigkeit von Normalbeton unter Temperatureinflüssen jenseits der 200°C dramatisch, dies gilt in ähnlicher Weise für Zugfestigkeit und E-Modul. Die Restfestigkeiten von Normalbeton stellen ein differenziertes Bild dar, weil eine raschere Temperaturabnahme mit einer geringeren Restfestigkeit einhergeht. Hier zeigt sich ein Zusammenhang eines schnelleren Abkühlvorgangs mit einem stärkeren Verlust der Tragfähigkeit des Bauelements. Auch das Dehnungsverhalten des

Normalbetons entwickelt sich nachteilig und wird bei Temperaturen oberhalb der 600°C duktil. Eine Abhängigkeit negativ beeinflusster Betoneigenschaften von einer mineralischen Zusammensetzung der Zuschlagstoffe ist gering, Kalkzuschlagstoffe haben einen geringfügig günstigeren Effekt bei Brandereignissen und deren Temperaturen [46].

Die Materialeigenschaften von Beton- und Spannstählen zeigen bei Exposition gegenüber hohen Temperaturen ebenso unvorteilhafte Entwicklungen, so nehmen Streckgrenze und Zugfestigkeit bei Brandtemperaturen ab. Die prozentuelle Abnahme streut jedoch abhängig von der Stahlqualität und den Herstellungsbedingungen. Auch die Restfestigkeit verhält sich in dieser Weise nach erfolgter Abkühlung [46].

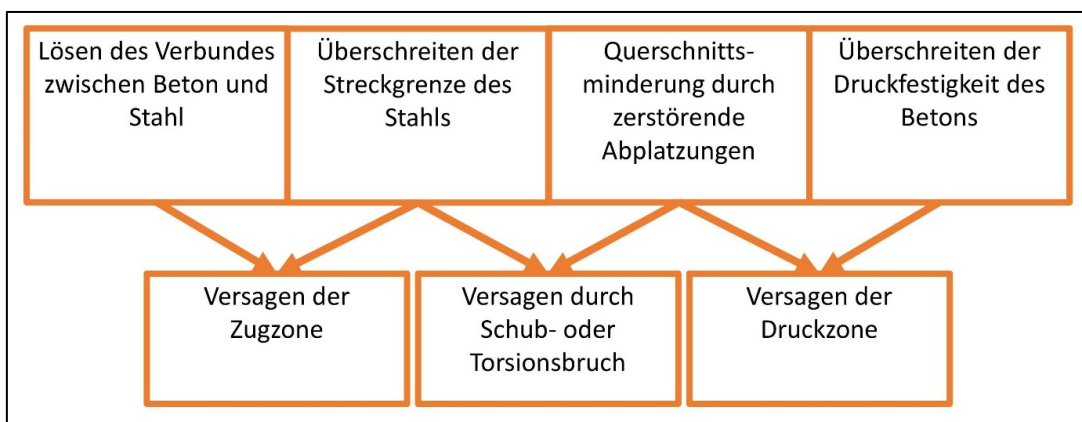


Abbildung 21: Übersicht der Versagensmechanismen von Stahlbetonteilen im Brandfall [47]

#### 2.4.1.1 Versagensmechanismen von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton

Abbildung 21 gibt die Versagensmechanismen von Stahlbeton wieder, die mit der Exposition gegenüber hohen Temperaturen von Brandereignissen einhergehen. Sie legt die Folgen der Überbeanspruchung des Baustoffes sowie der Stahl-Beton-Verbundwirkung für den daraus folgenden Versagensmechanismus dar.

Die Reduktion der Zugfestigkeit der in der Zugzone liegenden Bewehrung verursacht ein Versagen in diesem Bereich des Querschnitts. Daraus kann ein vollständiges Versagen eines einachsial gespannten Tragelements entstehen. Demgegenüber kann sich ein Versagen lediglich von Teilbereichen bei mehrseitiger Lagerung eines tragenden Bauteils ereignen. Unterschreiten die am Verbund von Rippenstahl und Beton auftretenden Temperaturen 300°C, lässt sich kaum ein Nachlassen der Verbundwirkung feststellen, während weitere Temperaturzuwächse die Verbundwirkung mehr und mehr aufheben. Einen Schutz der Konstruktion stellt dabei die Betondeckung über der Bewehrung dar [46], [48].

Ein Versagen der Druckzone entsteht bei einer Überschreitung der Festigkeit des Betons, der dort hauptsächlich für das Tragverhalten verantwortlich ist. Auslöser eines solchen häufig

schlagartigen Ausbrechens von Betonteilen sind Risse. Einen konstruktiven Schutz bilden Faserbewehrung in der Druckzone und eine hohe Betondeckung [49].

#### 2.4.1.2 Versagensmechanismus von Beton infolge Abplatzungen

Diesen Versagensmechanismus kennzeichnet die Geschwindigkeit des Vorgangs, der eine Querschnittsverminderung sowie ein Freilegen der Bewehrung herbeiführt, damit den konstruktiven Schutz tragender Bauteile beseitigt und sie den Brandtemperaturen aussetzt [46].

Abplatzungen besitzen vielerlei Ursachen, die Eigenspannungen, behinderte Dehnung der Bauteile, chemische Prozesse und veränderlichen Dampfdruck infolge des Temperaturanstiegs umfassen.

Eine Ursache ist der Heterogenität des Baustoffs geschuldet, der sich aus Material mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten (Beton versus Stahl) zusammensetzt und der die Rissbildung an der Verbundfläche beider Materialien fördert.

Bei Exposition gegenüber Brandtemperaturen treten im betroffenen Bauteil Eigenspannungen infolge behinderter Dehnung auf. Der Energieeintrag ruft entsprechend der Temperatureindringungskurve unterschiedliche Dehnungen hervor, die von der den Brandtemperaturen ausgesetzten Betonseite zur abgewandten Seite in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten variieren. Aus ihnen können Zugspannungen in den noch ‚kühlen‘ Teilen des Bauteils entstehen, die, sofern die Zugfestigkeiten übertroffen werden, in einem Risswachstum münden, das wiederum Abplatzungen begünstigt.

Speziell Zwischendecken sind von Zwängungsspannungen betroffen, die infolge der Temperatureinwirkungen und der hervorgerufenen erheblichen Längenänderungen an den Dehnungsfugen nicht mehr ausgeglichen werden können. Diese zusätzlichen Zug- und Druckspannungen entladen sich in Abplatzungen und führten bei den Bränden im St. Gotthard- und Tauerntunnel zum Versagen der Zwischendecke [46].

Verringerungen der Betonfestigkeit können auf chemische Prozesse in Beton zurückgehen. Die Dehydrierung führt beispielsweise eine Abnahme der Zementsteinfestigkeit beziehungsweise einen Zerfall des Betons herbei. Im Brandfall fördert das im gasförmigen Aggregatzustand vorkommende, verdampfende Wasser das Auftreten von Abplatzungen.

Chemische Prozesse stellen die Quarzumbildung ab 573°C sowie das Kalkbrennen ab 800°C in Beton dar. Sie kommen in Abhängigkeit vom jeweiligen Betonzuschlagstoff vor. Beiden Vorgängen entspringt eine Volumenzunahme infolge der entstehenden Produkte aus den Prozessen. Auch sie fördern Entfestigung der Bauteile und Abplatzungen [46].

Der Beton weist in seinem Porensystem eine Feuchte sowie ein chemisch gebundenes Wasser auf, das im Brandfall in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht und für wachsenden Dampfdruck innerhalb des Betons sorgt. Dieser Wechsel des Aggregatzustands ist ein Hauptgrund explosionsartiger Abplatzungen randnaher Betonteile in Tunnelbränden. Diese abrupten Abplatzungen setzen sich gegenüber Abplatzungen einzelner Gesteinskörnungen sowie gegenüber jenen ab, die langsam stetig voranschreiten und sich im fortlaufenden Brandgeschehen in intervallartig herunterbrechenden Betonteilen äußern. Letztere Abplatzungen treten auch während des Abkühlens nach dem Brand auf.

Die gestaltenden Faktoren der Abplatzungen sind

- Fasergehalt
- Bewehrungsgrad
- Betonfestigkeit
- Gesteinskörnung und Korngrößen
- Porenstruktureigenschaften wie Permeabilität und Porosität
- Spannungszustand des Bauteils
- Temperatur-Zeitkurve mit Temperaturmaximum und -gradient
- Bauteilfeuchte

Unter 2% Massenanteil von Wasser (bestimmt bei 105°C) bei der Bauteilfeuchte wirkt sich beispielsweise positiv gegen eine Anfälligkeit für Betonabplatzungen aus [46].

#### 2.4.1.3 Integration von Brandschutz in der Tragwerksbemessung

Für untertägige Infrastrukturanlagen liegt die Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ von der Österreichischen Bautechnik Vereinigung vor. Ihre Anwendung richtet sich auf die „*Festlegung von organisatorischen Maßnahmen und baulichen Einrichtungen zur Personensicherheit im Tunnel, für die Tunnelausrüstung (Kommunikation, Stromversorgung, Sicherheitseinrichtungen, Lüftungsanlagen, Brandbekämpfungsanlagen etc.) oder für die Bestimmung von möglichen Umweltauswirkungen*“ [50].

Ihre Gültigkeit erstreckt sich mit dem Verkehrsträger Schiene über alle Eisenbahnen, „*das sind alle Haupt- und vernetzten Nebenbahnen, sowie alle Anschlussbahnen zu oder von Güterterminals in Normal- oder Breitspur, ist diese Richtlinie gemäß der RVE 08.00.01 [51] für alle neu zu errichtenden unterirdischen Verkehrsbauwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton mit Längen größer gleich 100 m anzuwenden. Für tunnelähnliche Bauwerke (Unterwerfungsbauwerke, Galerien, Einhausungen...), unterirdische Haltestellen, kurze Tunnel mit Längen ab 50 m bis 100 m, Notausgangsbauwerke und Nothaltestellen sind die Regelungen dieser Richtlinie anzuwenden, sofern nicht anderslautende Vorschriften*

*hierzu definiert sind.*“ Bahnhöfe sowie deren Überbauungen sowie Brücken fallen nicht in den Gültigkeitsbereich der Richtlinie [50].

Betreffend den Verkehrsträger Straße wird diese Richtlinie auf Straßentunnel mit Ausdehnungen jenseits der 200 m Länge angewandt. Dafür liegt die 09.01.45 vor [52].

Den Versagensmechanismen wird eine geeignete Tragwerksbemessung entgegengehalten, welche in der Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ geregelt ist. Neben den mechanischen Einwirkungen auf die Tunnelstruktur finden in ihr thermische Einwirkungen, Materialparameter und das Thema der Abplatzungen Berücksichtigung. Um Abplatzungen zu vermeiden, wird auf den Zusatz feiner Polypropylenfasern als wirkungsvollste Maßnahme verwiesen. Damit wird eine erhöhte Brandbeständigkeit des Bauwerks erlangt [50].

Der Bemessungsablauf bezieht die Kaltbemessung, die Tragwerksauslegung ohne Brandfall, und die Heißbemessung für das Brandereignis ein. Der Bemessungsablauf für den Brandfall setzt sich unter Wahl eines adäquaten Rechenverfahrens zusammen aus der:

- Festlegung eines Schutzniveaus inklusive der zugehörigen mechanischen und thermischen Einwirkungen,
- Festlegung bzw. Ermittlung der Temperaturentwicklung und -verteilung im Tunnelquerschnitt sowie geeigneter Temperatur-Zeit-Kurven,
- Festlegung bzw. Ermittlung der geeigneten Temperatureindringkurven betreffend das Bauteil,
- Bestimmung der Hochtemperatureigenschaften von Beton bzw. Beton- und Spannstahl [50].

Der Begriff des Schutzniveaus zielt auf das Erreichen bestimmter Schutzziele bei einem Brandereignis ab. Die Zuordnung zu einem Schutzniveau schließt Umfeldkriterien wie direkte Überbauung, betroffene benachbarte Objekte, Wasser sowie an der Oberfläche gelegene Verkehrswege ein. Diese Umfeldkriterien werden entsprechend deren Häufigkeit, Beherrschbarkeit und Wichtigkeit gegliedert und ergeben das Schutzniveau, das mit einer Brandeinwirkungsdauer und den Temperaturzeitkurven verknüpft ist. In der RVS 09.01.45 [52] und der RVE 08.00.01 [51] werden für die Brandlasten die Temperaturzeitkurven ETK (Einheitstemperaturkurve), die HC1200 (Hydrokarbon-Temperaturzeitkurve 1200°C) und die HC<sub>inc</sub> (Hydrokarbon Increased) angenommen (Abbildung 22). Die HC<sub>inc</sub> berücksichtigt als Brandfall beispielsweise den Feststoffbrands eines LKW mit gestapelten Autoreifen als Ladung, ohne dass die Brandlast eines benachbarten LKW einen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur Brandlast beisteuert [51], [52]. „Es ist sicherzustellen, dass die Bauteiloberflächentemperatur bei Beton 350°C und die Temperatur an der Bewehrung von

250°C während der durch die Schutzniveaus definierten Nachweiszeiten nicht überschreitet.“ [52].

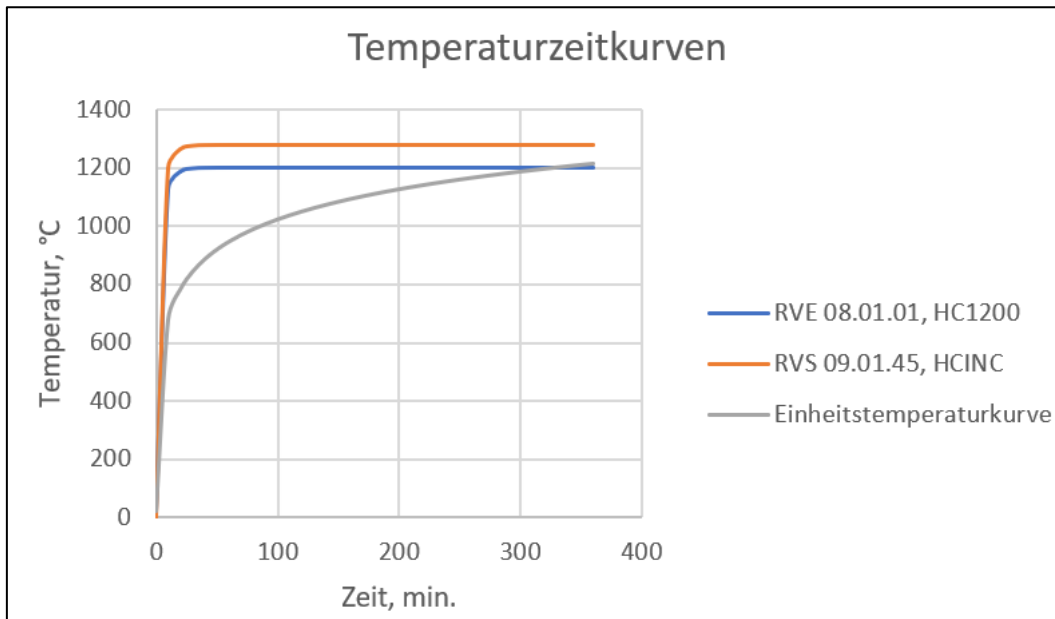


Abbildung 22: Temperaturzeitkurven in RVE 08.00.01 [51] und RVS 09.01.45 [52].

Zur Einhaltung der Schutzziele lassen sich auch ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen einsetzen, die in RVS 09.02.51 [53] definiert sind.

Die brandschutztechnischen Anforderungen der Zwischendecke und Auflagerkonsole werden in der RVS 09.01.23 [54] angeführt. Ihre Erfüllung ist mit der Einhaltung einer vorgegebenen Betondeckung, einer Mindestdicke der Zwischendecke und Betoneigenschaften gemäß der ÖBV Richtlinie Innenschalenbeton [55] gegeben. Die auf die Zwischendecke und Auflagerkonsolen zutreffende Temperaturzeitkurve ist die Einheitstemperaturkurve [54].

#### 2.4.2 Brandeinwirkungen auf Einbauten aus Stahl

[56] et al. untersuchten die Brandentwicklung und Temperaturbelastung von ungeschützten Stahlkonstruktionen in einer Tiefgarage unter verschiedenen Szenarien ausgehend von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Die Tests umfassten Dieselaautos als Referenzfall, batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge sowie CNG- und LPG-betriebene Autos. Der Aufbau für jeden Test bestand immer aus zwei Fahrzeugen, einem NEC und einem ICE, 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 77-MPa-Wasserstofftank und einem auf den Boden gerichteten Standard-TPRD ausgestattet. Das LPG-Fahrzeug war mit einem Überdruckventil (2,7 MPa) und einem TPRD (110°C) ausgestattet. Der Tank des CNG Autos 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-, H<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>-FCEV das Maximum über dem zwei Fahrzeug (ICEV-Auto) 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.

### **2.4.3 Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen für die Brandbekämpfung**

#### **2.4.3.1 Sensorik**

In Bezug auf betriebs- und sicherheitstechnische Einrichtungen sind derzeit keine NEC-spezifischen Einrichtungen vorhanden. Nachdem die Brandcharakteristik bei PKW-BEV sich von jener konventioneller Fahrzeuge nur unwesentlich unterscheidet, sind Branddetektion und Rauchsensoren auch bei NEC Fahrzeugen wirksam. Ein Problem könnte sich bei H<sub>2</sub> Bränden (FCEV) einstellen, da die H<sub>2</sub> Flamme fast farblos ist und somit Rauchdetektion – solange das Fahrzeug am Brand nicht beteiligt ist – eine eingeschränkte Wirkung hat<sup>1</sup>.

#### **2.4.3.2 Einrichtungen zur Brandbekämpfung**

In RVS 09.02.22 [57] ist die Ausrüstung von Tunnels in Abhängigkeit von ihrer Gefährdungsklasse geregelt. Die Ermittlung der Gefährdungsklasse fußt auf der Tunnelrisikoanalyse [40] und bestimmt die Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (BuS) rund um Brandbekämpfung und Löscheinrichtungen (siehe Tabelle 3). Das Straßentunnel-Sicherheitsgesetz (STSG) schreibt in seiner Anlage der Sicherheitsmaßnahmen fest, dass in allen Tunnels eine Löschwasserversorgung vorzusehen ist. Ist eine Wasserversorgung nicht gegeben, ist eine Überprüfung nötig, anderweitig Löschwasser bereitzustellen.

---

<sup>1</sup> Auf die Situation einer H<sub>2</sub> Freisetzung und den daraus folgenden Wirkungen wird im Projekt BRAFA nicht näher eingegangen. Dies ist Gegenstand eines anderen Forschungsprojektes.



Tabelle 3: In Tunneln vorzusehende Einrichtungen zur Brandbekämpfung gemäß RVS 09.02.22 [57]

Löscheinrichtungen	GV I	GV II	GV III	GV IV
Tragbare Feuerlöscher	X	X	X	X
Wasserverteilung:				
Trockenlöschleitung in Tunneln mit einer Länge von 500 m bis 1000 m	X	X	---	---
Nasslöschleitung in Tunneln mit einer Länge von 500 m bis 1000 m	-	-	X	X
Nasslöschleitung in Tunneln mit einer Länge > 1000 m	X	X	X	X
Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen	o	o	o	o
Legende: X erforderlich o Ausführung nach dokumentierten Kosten/Nutzen Überlegungen - nicht erforderlich --- nicht zulässig GV Gefährdungsklasse				

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass bestimmte Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen für die Brandbekämpfung ungeachtet der Länge des Tunnels bereitgehalten werden müssen. Die in Tabelle 2 erwähnten Nasslöschleitungen unterliegen den Anforderungen, dass sie binnen 80 s einen Fließdruck von 6 bis maximal 12 bar mit 20 l/s Wasserdurchfluss über eine Dauer von 90 Minuten gewährleisten müssen [58]. Dies ergibt eine Wassermenge von 108 m<sup>3</sup> [53].

Aus durchgeführten Brandversuchen mit BEV ist bekannt, dass große Mengen (bei PKW ca. 10 m<sup>3</sup>) 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 [59] konnte die positive Wirkung von HDWNA auf die Brandunterdrückung bei BEV Bränden im Großversuch nachgewiesen werden.

#### 2.4.3.3 Löschwasserentsorgung

Nachgewiesenermaßen benötigen BEVs große Mengen an Wasser zur Löschung bzw. nachhaltigen Kühlung der Energiespeicher. Üblicherweise werden Werte um 10 m<sup>3</sup> 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.

## 2.5 Brandbekämpfung bei Bränden von Elektrofahrzeugen

### 2.5.1 Allgemeine taktische Vorgehensweisen

Grundsätzlich liegt für Einsätze bei Fahrzeugbränden eine geregelte Vorgangsweise vor. Betrachtet man die Checklisten für den Einsatzleiter der Feuerwehr muss man feststellen, dass die Abarbeitung der üblichen Vorgangsanweisungen in unterirdischen Verkehrsanlagen jedoch deutlich schwieriger ist. Die sogenannte GAMS-Regel ist eine grundlegende Regel zur Vorgehensweise im Feuerwehreinsatz und beinhaltet die wichtigsten Schritte in der richtigen Reihenfolge:

- **G**efahr erkennen
- **A**bsperrn /Absichern
- **M**enschenrettung oder Maßnahmen
- **S**pezialkräfte anfordern oder spezielle Maßnahmen

Die AUTO-Regel ist speziell für den Einsatz bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben anzuwenden und soll den Einsatzleiter unterstützen ein solches Fahrzeug zu identifizieren und anschließend die richtigen spezifischen Maßnahmen zu setzen. Sie umfasst:

- **A**ustritt von Stoffen
- **U**nterboden kontrollieren
- **T**ankdeckel öffnen
- **O**berflächen kontrollieren

Die Informationsbeschaffung und damit das Erkennen des alternativen Antriebes ist bereits die erste Herausforderung des Einsatzleiters. Genaue Vorgehensweisen stehen grundsätzlich in spezifischen Rettungsleitfäden und Rettungsdatenblättern zur Verfügung, jedoch sind diese Empfehlungen sehr umfangreich und komplex. Seit Ende 2020 steht den Feuerwehren die Möglichkeit einer Kfz-Kennzeichenabfrage zur Verfügung, womit es möglich ist vor Ort mittels einer App auf einem mobilen Gerät diese Informationen abzurufen und zu nutzen. Darüber hinaus besteht bereits seit 2013 die Möglichkeit das Baujahr, die Marke und den Typ eines betroffenen PKW über die vor Ort befindliche Polizei abzufragen.

Rettungsdatenblätter können über verschiedene Möglichkeiten im Internet abgerufen werden und stellen Informationen wie z.B. die Einbauorte von Batterien und Hochvoltbauteilen grafisch zur Verfügung.

Aufgrund solcher im Zuge der Erkundung mittels der genannten Merkregeln einzuholenden Informationen sind entsprechende Einsatzmaßnahmen festzulegen. Bei einem Brand von

Fahrzeugen beschäftigt, werden in weiterer Folge die wichtigsten Maßnahmen bei einem Brand eines elektrisch betriebenen Autos aufgelistet:

- Aufstellort der Einsatzfahrzeuge bei Gefälle oberhalb des Brandobjektes
- Betroffene Fahrzeuge gegen Wegrollen sichern
- Abschalten der Zündung, wenn dies noch gefahrlos möglich ist
- Umluftunabhängigen Atemschutz verwenden
- Durch das hohe Wärmebindungsvermögen ist Wasser weiterhin das erste Mittel der Wahl bei der Kühlung von in Brand geratenen Hochvoltbatterien. Löschmittelzusätze sind nicht erforderlich. Dabei ist mit großen Mengen an Löschwasser zu rechnen.
- Vortragen des Löschangriffes diagonal von der Seite und von vorne, beginnend mit dem Vollstrahl unter Ausnutzung der Wurfweite (siehe Abbildung 23)
- HV-Batteriebrand identifizieren, kühlen und HV-System deaktivieren
- Gesichert Abstellen (Rundumabstand von 10 m zu Gebäuden bzw. brennbaren Gegenständen)

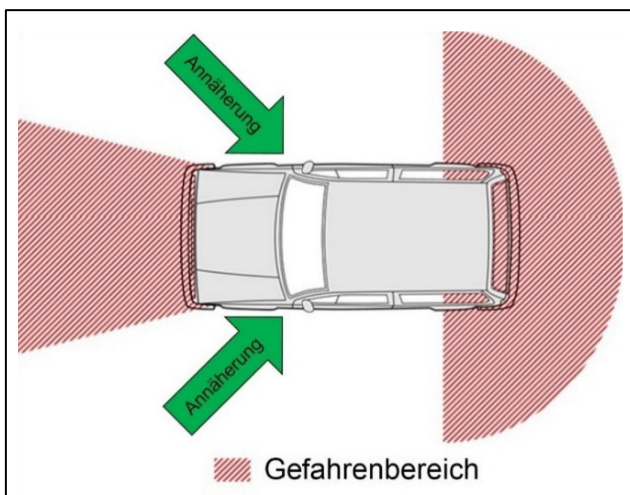


Abbildung 23: Schematische Darstellung der möglichen Gefahrenbereiche [60]

Eine elektrische Gefährdung der Einsatzkräfte durch die Hochvoltanlage eines Elektrofahrzeuges ist konstruktionsbedingt unwahrscheinlich, dennoch sind die für elektrische Anlagen vorgegebenen Sicherheitsabstände einzuhalten. Bei Niederspannungen bis 1000 V sind diese 1 m bei Sprühstrahl und 5 m bei Vollstrahl.

Unter bestimmten Umständen kann es auch sinnvoll sein, eine Li-Ionen-Batterie kontrolliert abbrennen zu lassen.

Wenn entsprechende Behälter zur Verfügung stehen, dann ist das Versenken des betroffenen Fahrzeuges im Wasserbad bis auf das Niveau der Hochvoltbatterie eine Möglichkeit, die Gefahr der Wiederezündung zu reduzieren. Ein pauschales Versenken in einen

wassergefüllten Container wird allerdings nicht empfohlen und es wird nicht als Aufgabe der Feuerwehr angesehen, Container dieser Art dafür verpflichtend vorhalten zu müssen.

Diese Maßnahmen zielen auf das Kühlen der Batterie ab, bzw. kann durch beim Brand entstandene Öffnungen Wasser in die Batterie eindringen. Eine effizientere Möglichkeit Wasser in das Gehäuse einzubringen sind sogenannte Löschlanzen, welche mit einer Spitze am Kopf in das Gehäuse gestoßen werden. Dafür muss der Einsatztrupp sehr nahe an die Batterie herankommen und es ist auf die Gefahr von Stichflammen und Kurzschlussreaktionen (z.B. Lichtbögen, Körperdurchströmungen etc.) zu achten. Eine generelle Empfehlung zur Verwendung dieser Löschgeräte wird seitens des ÖBFV aktuell nicht ausgesprochen, es erscheint vielmehr eine Möglichkeit für Spezialkräfte wie Betriebsfeuerwehren in einem entsprechenden Produktionswerk.

Den Feuerwehren steht ein Einsatzmerkblatt zur Verfügung, welches als Checkliste abgearbeitet werden kann.

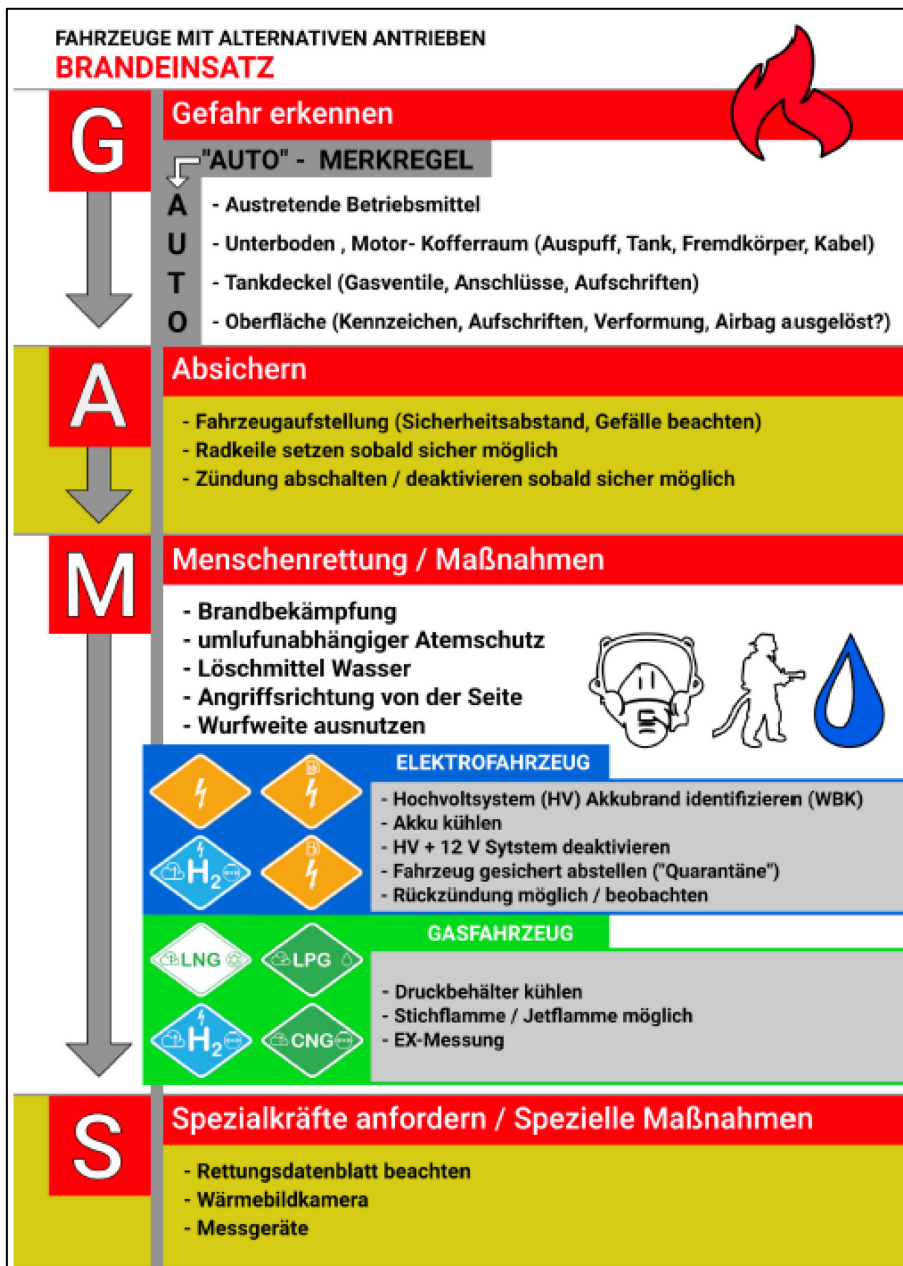


Abbildung 24: Einsatzmerkblatt für die Vorgehensweise der Feuerwehr [60]

Nach dem Löschvorgang ist es grundsätzlich die Aufgabe einer Fachfirma das Fahrzeug ordnungsgemäß zu versorgen. Nachdem dies nicht immer möglich sein wird, werden von Landesfeuerwehrverbänden vielseitig verwendbare Abrollcontainer zur Verfügung gestellt, welche bei ausgewählten Stützpunkfeuerwehren stationiert sind und angefordert werden können. Damit wird für die zuständigen Feuerwehren zumindest die Möglichkeit geschaffen, ein betroffenes Auto gesichert abstellen zu können und wenn erforderlich auch bis auf Batterieniveau zu fluten [61]. Der Einsatz dieses Containers soll aber nicht standardmäßig zum Einsatz kommen, weil es nicht mehr die Aufgabe der Feuerwehr ist ein betroffenes Elektroauto

nach erfolgtem Löschvorgang gesichert abzustellen, sondern soll den Feuerwehren die Möglichkeit geben zu handeln, wenn keine Fachfirmen zur Verfügung stehen.

## 2.5.2 Unterirdische Verkehrsanlagen

Unterirdische Verkehrsanlagen (UVA) bergen für die eingesetzten Kräfte im Einsatzfall ein erhöhtes Sicherheitsrisiko und erfordern besondere einsatztaktische Maßnahmen. [62] Die Schnelligkeit der Brandbekämpfung ist maßgeblich für die Minimierung des Schadens und trägt zur Erhöhung der Sicherheit für die Selbst- und Fremdrettungsphase bei.

Unfälle und Brände in Tunnelanlagen können sowohl für die Nutzer der Anlagen als auch für die Einsatzkräfte wesentlich massivere Aus- und Einwirkungen nach sich ziehen, als dies bei vergleichbaren Ereignissen auf freier Strecke zu erwarten ist. So ist etwa bei einem Brandereignis und/oder einer entsprechenden Verrauchung mit einer großen Zahl Betroffener zu rechnen. Beengter Raum kann eine hohe Schadensdynamik nach sich ziehen, eine insgesamt unklare Schadenslage verursachen und die Entwicklungsmöglichkeiten der Einsatzkräfte erheblich einschränken. [62]

Zusätzliche Gefahren:

- mögliche große Betroffenenanzahl (auch Gehunfähige, Panik etc.)
- gesteigerte Auswirkungen durch gefährliche Stoffe, Schadstoffe, etc.
- eingeschränkte Kommunikations- und Erkundungsmöglichkeiten
- mögliche hohe Schadensdynamik wie beispielsweise hohe Temperaturen, Sichttrübung, ätzende und toxische Gasbestandteile, aggressive und korrosive Gaskomponenten, ventilations-beschleunigter Abbrand etc.
- lange Angriffs-, Rettungs- und Rückzugswege
- eingeschränkter Entwicklungs- und Einsatzraum (Umkehrmöglichkeiten, Fahrzeugrückstau etc.)

Insgesamt sind dies Faktoren, die eine Vielzahl an Einsatzkräften allein für Entwicklungsmaßnahmen binden und die Einleitung der eigentlichen Notfallmaßnahmen in der Tunnelanlage verzögern können.

Für Straßentunnelanlagen kann der Ablauf nach Ereigniseintritt sowie nach Detektion und Alarmierung/Warnung in drei Hauptphasen gegliedert werden:

- Selbstrettung
- Fremdrettung
- Löscheinsatz

Diese Hauptphasen und die zeitliche Abfolge sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

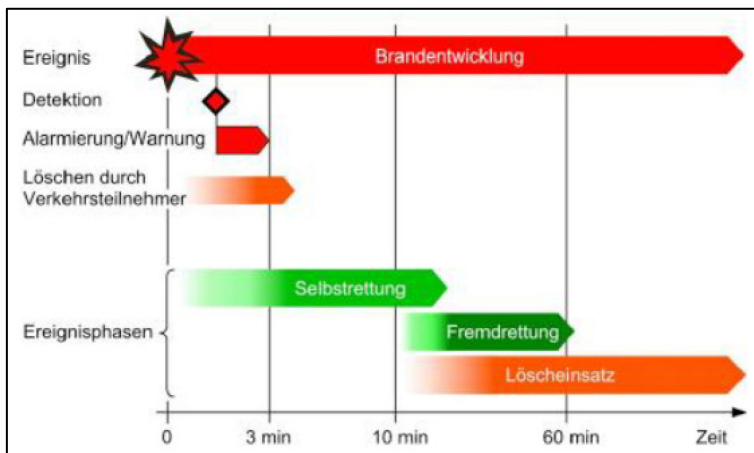


Abbildung 25: Ereignisphasen [62]

Die Selbstrettung ist im Regelfall die zentrale Basis für Sicherheitskonzepte von Straßentunnelanlagen. Der Selbstrettung zuzurechnen ist auch die gegenseitige Hilfestellung der Nutzer. Sie beginnt mit der Wahrnehmung des Ereignisses bzw. der Warnung, mit der die Verkehrsteilnehmer aufgefordert werden, die Fahrzeuge zu verlassen, zu flüchten und sich damit in Sicherheit zu bringen. Die Möglichkeiten zur Selbstrettung stehen in direktem Zusammenhang mit den Fluchtweglängen in der betreffenden Anlage und können durch Verrauchung zudem erheblich eingeschränkt werden. Gelingt es etwa nicht, entstehende Brandgase wirkungsvoll abzuführen (absaugen, entlüften etc.), verkürzt sich die Phase der Selbstrettung auf wenige Minuten. [62]

Die Fremdrettung ist im Regelfall Aufgabe der Einsatzkräfte. Im Vordergrund stehen die Erkundung des Ereignisses, das Absuchen des Tunnelfahrraums und die Rettung der Tunnelnutzer, denen die Selbstrettung nicht möglich war. Abhängig von den Anfahrtszeiten der Einsatzkräfte (Entfernung zum Portal, Verkehrsaufkommen etc.), von der Länge und Lage der Tunnelanlage, vom Ereignisort und den sonstigen Ereignisbegleitumständen, beginnt diese Phase frühestens etwa 10 Minuten nach der Alarmierung.

Der Löscheinsatz schafft die Voraussetzungen für ein gesichertes/sicheres Vorgehen der Einsatzkräfte und für die Fremdrettung. Darüber hinaus schränkt der rasch eingeleitete Löscheinsatz die Ereignisausbreitung ein und mindert Schäden an Anlagen und Bauwerk.

Die Berücksichtigung des Gefälles beim Aufstellen der Fahrzeuge, sowie die Angriffsrichtung von vorne seitlich ist im Tunnel nicht möglich, weil sich die Anfahrtsrichtung aus der Lüftungsanlage und der dadurch vorherrschenden Lüftungsrichtung ergibt und damit vorgegeben ist.

Das Tragen eines umluftunabhängigen Atemschutzes ist im Tunnel jedenfalls vorgesehen und die Verwendung des Löschmittels Wasser ebenfalls kein Problem, sondern Stand der Technik.



Der aktuelle Stand bei der Brandbekämpfung ist die Verwendung von Wasser in großen Mengen. Die daraus resultierende Kühlwirkung kann die Auswirkungen eines Thermal Runaway abmindern 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.

In Tunnelanlagen mit Richtungsverkehr (Abbildung 26) stauen sich die Fahrzeuge nach einem Ereignis grundsätzlich in Fahrtrichtung vor dem Ereignisort. Die Selbstrettung der Verkehrsteilnehmer findet gegen die Fahrtrichtung zu den nächstgelegenen Notausgängen oder dem Einfahrtsportal statt. Da die Notausgänge über Querverbindungen häufig in die benachbarte Tunnelröhre führen, muss diese für den Verkehr gesperrt werden.

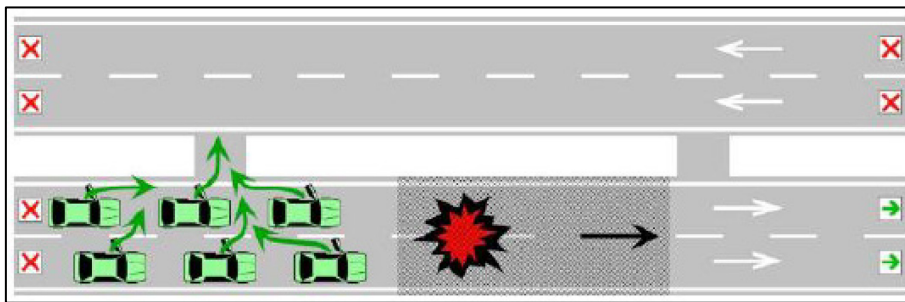


Abbildung 26: Phase Selbstrettung im Tunnel mit Richtungsverkehr [62]

In Tunnelanlagen mit Richtungsverkehr herrscht allgemein Luftlängsströmung in Fahrtrichtung vor. Zumindest kurz nach dem Ereignis findet deshalb auch die Brandgasausbreitung in dieser Richtung statt und die Gefährdung der in der Gegenrichtung Flüchtenden ist beschränkt. Falls diese Längsströmungsrichtung jedoch nicht durch Strahlventilatoren erhalten wird oder die Brandgase über Abluftklappen abgesaugt werden, kann die Längsströmung nach kurzer Zeit zum Stillstand kommen oder sich auch umkehren. Ein Abströmen der Brandgase in Fluchtrichtung entgegen der Fahrtrichtung ist in diesem Fall nicht auszuschließen.

Befinden sich stauende Fahrzeuge zu beiden Seiten des Ereignisortes (Abbildung 27) - beispielsweise nach einem Auffahrunfall auf eine in den Tunnel rückstauende Kolonne - muss die Selbstrettung in beiden Richtungen erfolgen. Die im Stau vor dem Ereignisort blockierten Verkehrsteilnehmer sind dabei besonders gefährdet. Das Ereignis passiert hinter ihnen und wird unter Umständen nicht sofort wahrgenommen. Zudem können die Brandgase den Staubereich sehr rasch einholen bzw. überlaufen.

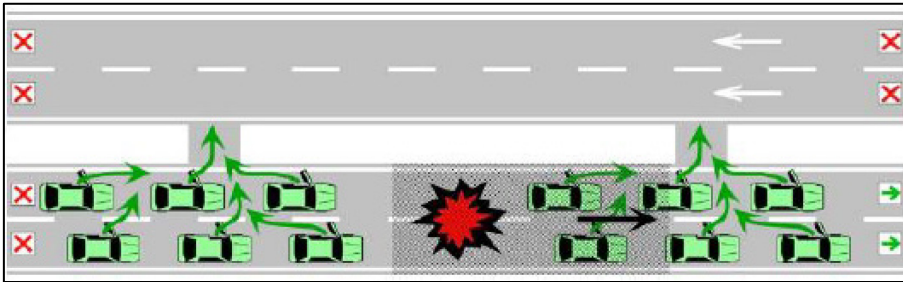


Abbildung 27: Phase Selbstrettung im Tunnel mit Richtungsverkehr bei einem Stau [62]

Die Intervention der Feuerwehr in den Phasen Löscheinsatz und Fremdrettung erfolgt im Regelfall von der benachbarten, nicht betroffenen Tunnelröhre über die am nächsten zum Ereignisort gelegenen Querverbindungen und mit der Luftlängsströmung (Abbildung 28, Abbildung 29). Um dies sicherzustellen, wird die benachbarte Tunnelröhre mit Hilfe der Anlagen zur Verkehrsbeeinflussung unverzüglich gesperrt, leer gefahren und mit der Belüftungsanlage unter Überdruck gestellt.

Ein Vorgehen der Feuerwehren entgegen der Luftlängsströmung und damit in der verrauchten Zone erfolgt nur bei erforderlicher Fremdrettung oder im Falle der Unzugänglichkeit des Ereignisortes von der rauchfreien Seite.

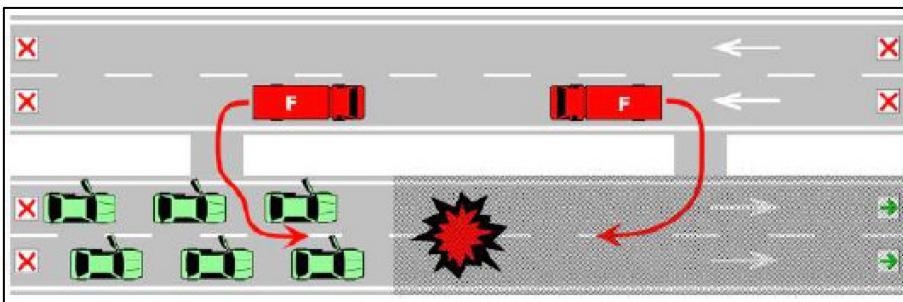


Abbildung 28: Durchgeführte Intervention in einem Tunnel mit Richtungsverkehr in den Phasen Löscheinsatz und Fremdrettung, vorrangig von der rauchfreien Seite [62]

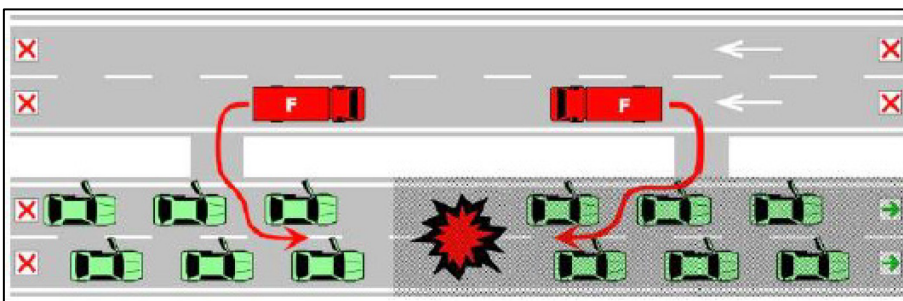


Abbildung 29: Durchgeführte Intervention bei einem Stau in einem Tunnel mit Richtungsverkehr in den Phasen Löscheinsatz und Fremdrettung [62]



Bei geringem Verkehrsaufkommen oder Ereignissen, bei welchen die Tunnelbenutzer die Fahröhre freigefahren haben (z. B.: Ereignis in einer Nische) kann auch ein Einsatz mit Richtungsverkehr in der betroffenen Röhre zielführend sein. Jene Feuerwehr in der betroffenen Röhre fährt mit ihren Einsatzfahrzeugen bis zur Einsatzstelle oder dem Stauende vor. Das Vorrücken wird dabei möglicherweise erschwert durch flüchtende Tunnelnutzer und auch umkehrende und gegen die Fahrtrichtung fahrende Fahrzeuge. Auch ein Vorgehen gegen die Luftlängsströmung ist nicht grundsätzlich auszuschließen, wird aber zudem durch minimale Sichtverhältnisse und Wärme/Hitze behindert.

### **3 DEFIZITANALYSE**

#### **3.1 Brandverhalten von Fahrzeugen**

In der Literatur finden sich nur wenige gut dokumentierte Fahrzeugbrandversuche. Zudem konnte bisher keine Publikation gefunden werden, in der eine ausreichende (d.h. statistisch signifikante) Anzahl an Hybrid- oder Elektrofahrzeugen – mit Variation aller relevanten Parameter – untersucht wurden. Die wenigen bisher durchgeführten Brandversuche an Fahrzeugen umfassen ausschließlich PKW. Somit kann geschlossen werden:

- Das Brandverhalten und die Rauchgasentwicklung von Fahrzeugen sind in der Literatur nur ungenügend erforscht. Dies bezieht sich auf die Wärmefreisetzung sowie die Produktion und Zusammensetzung von Rauchgasen.
- Für größere Fahrzeuge im Bereich der Nutzfahrzeugkategorie liegen keine Erfahrungen vor.

#### **3.2 Brandauswirkungen auf Infrastruktur**

Die Auswirkungen von Bränden batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge auf die Tunnelinfrastruktur zählt zu den wenig behandelten Forschungsthemen, insbesondere mit realen Fahrzeugen. Dieser Mangel rührt aus dem Mangel von Versuchsträgern und dem Mangel geeigneter Anlagen zur Versuchsdurchführung her. Daraus ergeben sich Defizite, inwiefern diese Resultate auf BEV-Fahrzeugbrände übertragbar sind.

Aus Untersuchungen von Baustoffen und Bränden herkömmlicher ICE-Fahrzeuge liegen Erkenntnisse vor, auf denen die Bemessung baulicher Strukturen in Tunnels gegenüber Brandtemperaturen beruhen, aus denen Versagensformen der Baustoffe Beton und Stahlbeton bekannt sind und die die Brandleistungen beschreiben. Die dabei bis dato zugrunde gelegten hohen Temperaturbelastungen ergeben sich in erster Linie aus Bränden der Fracht bzw. des Ladegutes von Nutzfahrzeugen. Hier ist durch den Einsatz von BEV mit keiner Veränderung zu rechnen.

Die Brandauswirkungen erstrecken sich jedoch auch auf die Themen der Löschwassermengen, erwartbaren Instandsetzungsmaßnahmen nach dem Brandgeschehen in der Infrastruktur, Kontaminationen des Löschwassers und der Abwässer nach Reinigung des Unfallorts sowie die Behandlung des Brandfahrzeugs nach dem Brand. Diese Themen sind ebenso den Defiziten zuzurechnen, die bei der Forschung mit realen Versuchsträgern bearbeitet werden können.

### 3.3 Risikoanalyse

Die bei BEV-Bränden zusätzlich bzw. geändert auftretenden Gefährdungen sind, zumindest qualitativ bzw. auf älteren Fahrzeugmodellen basierend auch quantitativ, bekannt und in diversen Veröffentlichungen zu finden. Ein jüngerer durchgängiger Vergleich der emittierten Stoffe sowie der Hitzefreisetzung zwischen ähnlichen BEV und ICEV fehlte jedoch bislang. Dieser ist notwendig, um die geänderten Gefährdungen in einer Risikoanalyse realitätsnah zu berücksichtigen. Die dafür notwendigen Submodelle (bzgl. toxischer Wirkung und Wirkung der auftretenden Hitze) existieren und sind bereits vielfach in Anwendung.

Erste Versuche, die Auswirkungen der erhöhten HF-Freisetzung bei Batterie-Bränden mit den übrigen freiwerdenden Brandprodukten zu verknüpfen, wurden bereits angestellt (z.B. [44]), jedoch nicht speziell auf BEV und ICEV übertragen.

### 3.4 Brandbekämpfung

Betrachtet man die Checklisten für den Einsatzleiter der Feuerwehr, wie sie im Kapitel 2.5 erläutert sind, so muss man feststellen, dass deren Abarbeitung in unterirdischen Verkehrsanlagen deutlich schwieriger ist. Bereits das Erkennen der Gefahr, in diesem Fall vorerst das Erkennen, dass es sich um ein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug handelt, ist an sich schwierig und durch die Sichtverhältnisse erschwert.

Aus den bisher vorliegenden Erfahrungen und Entwicklungen sowie einer umfassenden Literaturrecherche ergeben sich Fragestellungen, welche nur bei realen Brandversuchen untersucht werden können.

Einerseits können dem Löschmittel Wasser Löschmittelzusätze für eine bessere Löschwirkung zugesetzt werden. Diese Methode wird bei Feststoffbränden häufig eingesetzt und könnte auch bei Batteriebränden einen Löscherfolg bringen. Andererseits werden aktuell Löschdecken für PKW am Markt angeboten, die eine schnelle Rauchunterdrückung bewirken sollen.

Löschlanzen ermöglichen den gezielten Einsatz des Löschmittels im Inneren der Batterie, wenn es gelingt, mit der Spitze der Lanze durch das Gehäuse in die Batterie 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 des in Brand geratener Batterien aufgrund der Freisetzung brennbarer Gase die Sicherheit der Einsatzkräfte gefährden, bzw. dabei besondere Vorsicht geboten ist.

## **4 VORVERSUCHE ZUM BRANDVERHALTEN BATTERIEELEKTRISCH BETRIEBENER FAHRZEUGE**

### **4.1 Untersuchungsablauf**

Ziel ist die experimentelle Untersuchung von Fahrzeugbränden zum Vergleich des Brandverhaltens von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen, sowie die Sammlung von Daten zu Brandverhalten und Rauchgasentwicklung. Die hierbei gewonnenen Messdaten dienen in den weiteren Arbeitspaketen als Grundlage, um auf das Brandverhalten von z.B. Nutzfahrzeugen schließen zu können. Weiters sollen die Brandversuche die Möglichkeit bieten, die Brandbekämpfungstaktik und -technik unter realistischen Bedingungen evaluieren und weiterzuentwickeln zu können.

Zunächst wurden Vorversuche mit Batteriezellen und -modulen durchgeführt. Diese Vorversuche dienten folgenden Zwecken:

- Aufbau von Erfahrung in der Applikation der Messtechnik
- Kalibrierung der Datenerfassung auf die zu erwartenden Messgrößen
- Entwicklung einer Methode zur zuverlässigen Entzündung der Li-Ionen Batterie
- Suche der geeigneten Anordnung der Messgeräte im Tunnelquerschnitt (etwa zur zweckmäßigen Probenahme der Gase)

Der Hauptteil dieses Arbeitspaketes umfasste mehrere Brandversuche mit xEV und konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Folgende Ziele wurden hierbei verfolgt:

- Vergleich des Brandverhaltens von Fahrzeugen mit konventionellem und elektrischem Antrieb
- Ermittlung der Rauchgas- bzw. Schadstoffentwicklung und -ausbreitung im Tunnel
- Ermittlung der Temperatureinwirkung auf das Tunnelbauwerk
- Erprobung von Brandbekämpfungstechniken

Anzumerken ist, dass der Fokus im Projekt auf den Auswirkungen eines Fahrzeugbrandes auf die Infrastruktur (Tunnel) liegt. Ein Fahrzeugbrand ausgehend von einer schadhaften Zelle bzw. einem Defekt in der Traktionsbatterie stellt ein realistisches Szenario dar. Für den vorliegenden Fall ist es jedoch unerheblich, ob dabei die konkrete Methode, mit der die Zelle bzw. das Modul zum Thermal Runaway gebracht wird, ein realistisches Szenario auf Zell- bzw. Modul-Ebene darstellt oder nicht.

### **4.2 Versuche an Batterie-Zellen**

Zur Durchführung von Fahrzeugbrandversuchen ist es notwendig, eine zuverlässige Methode zur Entzündung der Fahrzeugbatterie zu entwickeln. Ziel der ersten Vorversuche war daher,

einzelne Zellen wiederholbar und sicher zum Thermal Runaway zu bringen. Durch die exotherme Reaktion einer Zelle soll in weiterer Folge ein Brand im Batteriemodul und schließlich in der gesamten Fahrzeugbatterie entstehen.

#### 4.2.1 Versuchsplanung und -aufbau

Zunächst wurde ein Batteriemodul geöffnet und der innere Aufbau analysiert und dokumentiert. Abbildung 30 zeigt die einzelnen Schritte dieser Tätigkeit. Im vorliegenden Modul befanden sich 2 Semi-Module mit je 12 Metalcan-Zellen in Serienschaltung. Auf Basis dieser Analyse konnte eine fundierte Planung des weiteren Vorgehens bei den Brandversuchen sowie der Platzierung der diversen Sensoren vorgenommen werden. Die Versuchsträger wurden im Voraus auf 100 % SOC geladen und deren Oberflächen zwecks besserer Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera matt schwarz lackiert.

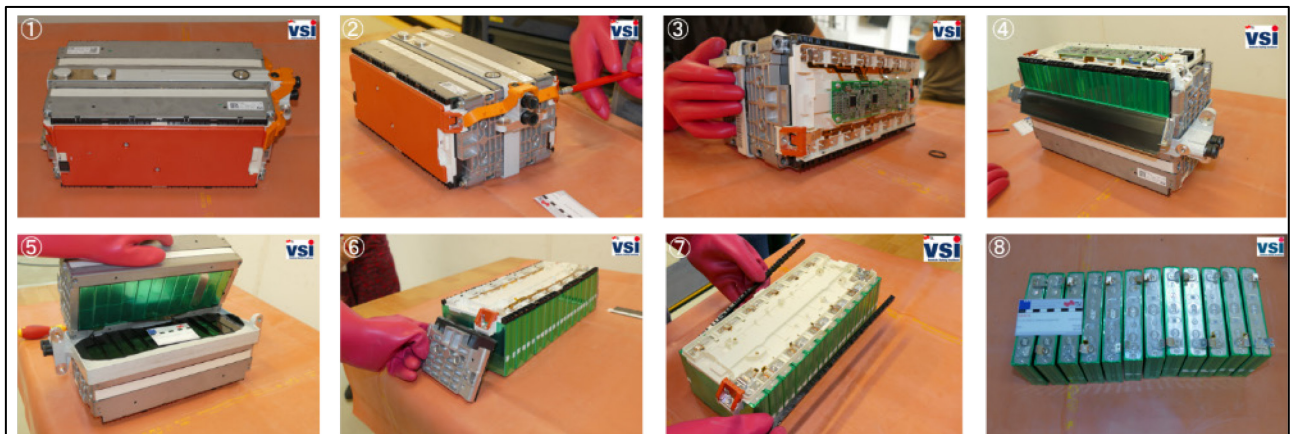


Abbildung 30: Analyse eines Moduls

#### 4.2.2 Eingesetzte Messtechnik

Es wurden folgende Messgrößen aufgezeichnet:

- elektrische Spannung an den Batterie-Zellen
- Oberflächentemperatur an den Batterie-Zellen

Des Weiteren erfolgte eine Video- und Fotodokumentation der Versuchsreihen.

#### 4.2.3 Versuchsdurchführung

Vier Varianten wurden zur Provokation eines Thermal Runaway für eine Zelle untersucht. Diese sind in Abbildung 31 skizziert. Insgesamt wurden dafür elf Tests durchgeführt.

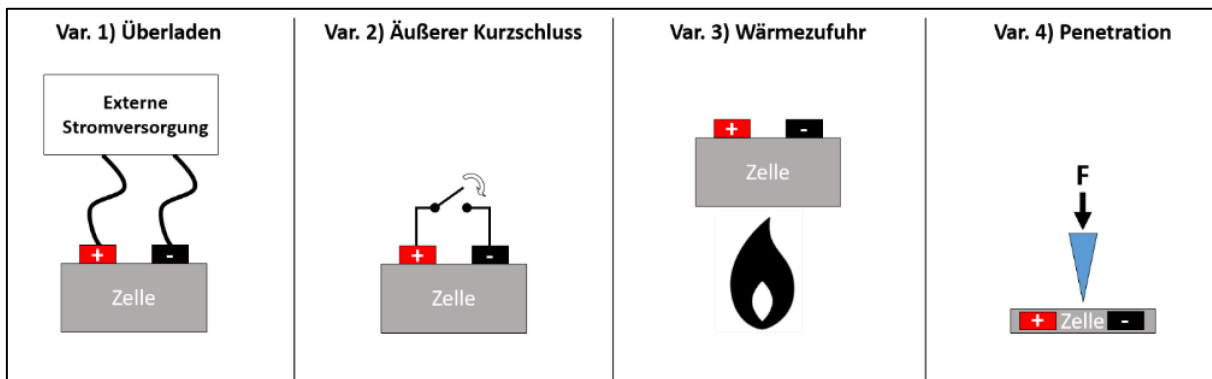


Abbildung 31: Möglichkeiten zur Generierung eines Thermal Runaway

Die Zellen wurden in einer Edelstahlwanne positioniert (Abbildung 32 links). Abbildung 32 rechts zeigt den Versuchsträger nach erfolgter Zündung und vollständigem Abbrand.



Abbildung 32: Versuchsaufbau mit Batterie-Zellen (links), Versuchsträger nach vollständigem Abbrand (rechts)

#### 4.2.4 Resultate

Abbildung 33 zeigt den Temperatur- und Spannungsverlauf am Beispiel einer Zelle bei externer Erwärmung.



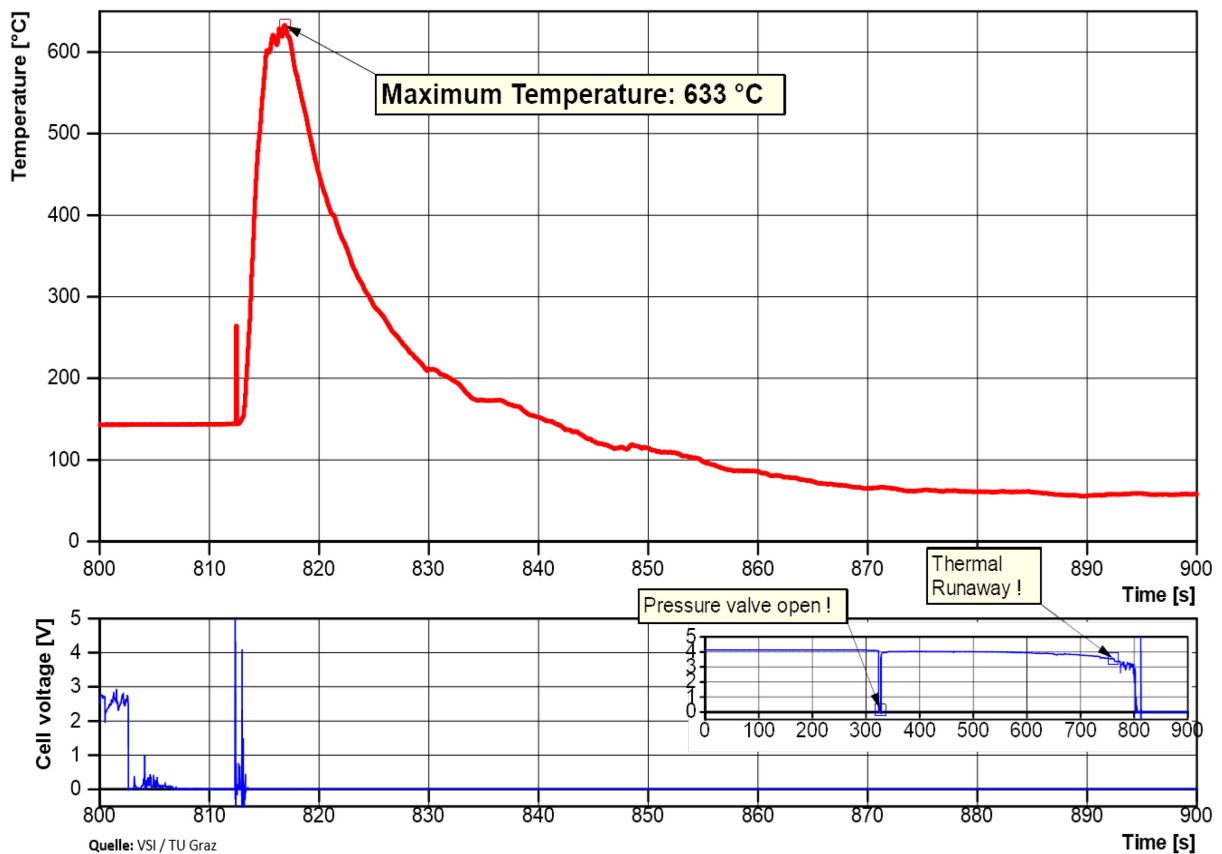


Abbildung 33: Temperatur- und Spannungsverlauf in einer Zelle bei Generierung eines Thermal Runaway durch externe Wärmezufuhr

Die Erwärmung der Batterie führte zu einer Bildung von Reaktionsgas im Inneren der Zelle. Nach etwas mehr als fünf Minuten Versuchszeit öffnete das Überdruckventil der Zelle (Berstscheibe) und Reaktionsgas konnte ausströmen. Nach über 13 Minuten Versuchszeit erreichte die Zelle eine kritische Temperaturschwelle. Bei einer Temperatur von ca. 140°C bricht die Zellspannung ein und ein rapider Temperaturanstieg wurde gemessen. Dies deckt sich mit Angaben in der Literatur [63] [64], wonach bei ca. 135°C die Schmelztemperatur des Separatormaterials erreicht wird. Es kann daher von einem plötzlich auftretenden, flächigen inneren Kurzschluss der Zelle (Einbruch der Zellspannung) in Folge von Separatorversagen ausgegangen werden. Die weitere Erwärmung der Zelle (gemessene Maximaltemperatur 633°C) ergibt sich durch ohmsche Erwärmung aufgrund des Kurzschlusses und exothermen Zersetzungsreaktionen der Zellkomponenten.

#### 4.2.5 Fazit

Während die Varianten 1, 2 und 4 zur Generierung eines Thermal Runaway zwar eine irreversible Schädigung und zum Teil auch ein Ausgasen der Zelle hervorriefen, kam es aufgrund einer fehlenden Zündquelle zu keinem Thermal Runaway. Als wirksamste Methode

stellte sich die externe Erwärmung der Zelle (z.B. mittels Gasflamme) heraus. Zum sicheren Provozieren eines Thermal Runaway einer Zelle im Experiment ist somit eine externe Zündquelle nötig. Diese kann bei einem realen Verkehrsunfall z.B. durch Kurzschluss einer Zelle oder durch Brand von anderen Fahrzeugteilen erfolgen. Im vorliegenden Projekt ist dazu jedoch eine externe Wärmequelle (z.B. Gasflamme) nötig. Die Zelle konnte so zum Ausgasen gebracht werden. Die Gasflamme sorgte danach zuverlässig für eine Entzündung des Reaktionsgases. Für die weiteren Versuche auf Modul- bzw. Pack-Level wurde daher diese Variante gewählt.

### 4.3 Versuche an Batterie-Modulen

Nach der Entwicklung einer Methode zur zuverlässigen Provokation eines Thermal Runaway auf Zellenebene, sollte als nächstes eine grobe Zusammensetzung der entstehenden Rauchgase bzw. eine Abschätzung der Größenordnungen der Komponenten beim Brand einer Li-Ionen-Batterie ermittelt werden. Im Zuge dessen wurde auch die für die nachfolgenden Versuche vorgesehene Messtechnik erprobt.

#### 4.3.1 Versuchsplanung und -aufbau

In einem eigens aufgebauten Testtunnel wurde das Brandverhalten von verschiedenen Modulen untersucht. Durch den kleineren Messquerschnitt des Testtunnels im Vergleich zu einem realen Straßentunnelquerschnitt konnte der Ort der Probenahme gezielt so gewählt werden, dass ein Großteil der Rauchgase erfasst werden konnte. Tabelle 4 enthält die geometrischen Abmessungen der Testeinrichtung.

*Tabelle 4: Geometrische Daten Versuchstunnel*

<b>Bezeichnung</b>	Testtunnel
<b>Querschnittsfläche</b>	1,9 m <sup>2</sup>
<b>Umfang</b>	5,5 m
<b>Länge</b>	10 m





Abbildung 34: Testtunnel für die Ermittlung des Brandverhaltens verschiedener Module.

In insgesamt 7 Tests mit unterschiedlichen Konfigurationen wurden sowohl einzelne als auch mehrere Module gleichzeitig getestet. Als Versuchsträger kamen sowohl Module von zwei Serienfahrzeugen (Bezeichnung „A“, „B“) als auch eines Prototyp-Fahrzeuges (Bezeichnung „C“) zum Einsatz. Bei den Batterietypen „A“ und „B“ handelte es sich um NMC (Nickel-Mangan-Kobalt) Zellen, bei Batterietyp „C“ um LFP (Lithium-Eisen-Phosphat). Beide Typen beinhalteten Zellen prismatischer Bauart.

Tabelle 5: Untersuchte Batterietypen

Batterietyp	Zelltechnologie	Zelltyp	Kapazität [Ah]	Anzahl an Zellen pro Modul
A	NMC	Prismatisch	25	24
B	NMC	Prismatisch	60	13
C	LFP	Prismatisch	20	40

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die durchgeführten Tests. Mit Ausnahme von Batterietyp C, waren alle Module vollgeladen (SOC 100%).

Tabelle 6: Überblick der durchgeführten Tests

Test-Nr.	Batterietyp	Konfiguration
M01	A	1 Modul (24 Zellen)
M02	A	1 Modul (24 Zellen)
M03	A	2 Module (2x24 Zellen)
M04	A	2 Module (2x24 Zellen)
M05	C	1 Modul (1x40 Zellen)
M06	B	1 Modul (1x13 Zellen)
M07	B	7 Module (7x13 Zellen)

### 4.3.2 Eingesetzte Messtechnik

Bei den Versuchen wurden die in Tabelle 7 gelisteten Messgrößen ermittelt.

Tabelle 7: Übersicht eingesetzte Messtechnik

Messgröße	Messverfahren / Messgerät	Bemerkung
Spannung Batterie	DEWETRON 2602	Messung an Einzelzellen Messung der Gesamtspannung
Massenverlust	Wägezellen	
Lufttemperatur	Thermoelemente Typ K, Klasse1	Zuströmung: 1x Messung Abströmung: Messungen an einem Vertikalprofil an 8 unterschiedlichen Höhen
Strömungsgeschwindigkeit Tunnel	DURAG D-FL	streckengemittelte Ultraschall- Laufzeitdifferenzmessung, Messung im Gesamt- querschnitt des Tunnels
Strömungsgeschwindigkeit Testtunnel	Staudrucksonden	Messung im Testtunnel
Gase	HORIBA Gas Analysator	CO
	Filterstacks mit Quarz- und Teflonfilter	HF, HCl, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
	Waschflaschen	
	Dräger Kurzzeitröhrchen	
Schwermetalle	Quarzfilter	aktive Beprobung
	Vlies	passive Abscheidung
Video- und Fotodokumentation		

**Spannung Batterie:** Die Spannung wurde je nach Versuch sowohl an Einzelzellen als auch am gesamten Batterie-Modul gemessen; siehe dazu Abbildung 35.



Abbildung 35: Spannungsmessung an einem Modul

**Gas:** Zur Erprobung des passenden Messsystems für die Gasemissionen wurden insgesamt vier verschiedene Methoden getestet. Die Probenahme für die Gasmessung befand sich jeweils stromabwärts am Ende des Testtunnels und erfolgte punktuell.

- Gas Analysator: Hiermit erfolgte eine kontinuierliche Gasmessung für bestimmte Gase mit einem portablen Messgerät (HORIBA PG-250A) mit vorgeschaltetem Natronkalkfilter.
- Filterstacks: Es wurden hier sowohl Quarz- als auch Teflonfilter verwendet.
- Waschflaschen: Vier Waschflaschen wurden mit Natronlauge und destilliertem Wasser befüllt.
- Dräger Kurzzeitröhrchen: Die Rauchgase wurden in einen Gasbeutel gesaugt und anschließend direkt analysiert.

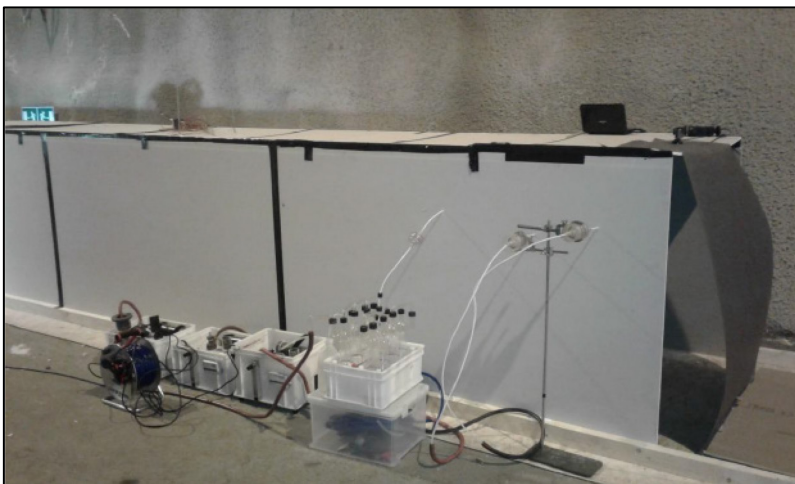


Abbildung 36: Teilansicht der Anordnung der Gasmesstechnik am Testtunnel

### 4.3.3 Versuchsdurchführung

Auf den Erkenntnissen der vorhergegangenen Versuche mit Batterie-Zellen aufbauend, ist die Erhitzung der Batterien eine zuverlässige Vorgehensweise zur Bildung eines Thermal Runaways. Als Zündquelle diente für alle Tests ein Gasbrenner, mit welchem die Versuchsträger so lange erhitzt wurden, bis an den ersten Zellen ein Thermal Runaway erkennbar war.



Abbildung 37: Erhitzung des Versuchsträgers mittels Gasbrenner

#### 4.3.4 Resultate

Folgende Messdaten konnten bei den Modul-Versuchen dokumentiert werden:

Tabelle 8: Ergebnisse der Modul-Brandversuche

Test-Nr.	max. Temperatur	Massenverlust
M01	634 °C	8,2 kg
M02	508 °C	4,8 kg
M03	960 °C	9,1 kg
M04	660 °C	7,2 kg
M05	737 °C	5,3 kg
M06	649 °C	1,7 kg
M07	>1372 °C (Sensor in Sättigung)	n/a (nicht gemessen)

Die folgenden beiden Abbildungen geben einen Eindruck über die durchgeführten Untersuchungen am Beispiel eines NMC-Batterietyps und einer LFP-Zelle. Beide zeigten ein sehr unterschiedliches Brandverhalten. Die NMC-Zellen ließen sich schneller entzünden und reagierten in der Folge auch heftiger als die LFP-Zellen. Es muss allerdings erwähnt werden, dass hier auch der Ladezustand der Batterie eine große Rolle spielt. Die NMC-Zellen waren voll geladen; der Ladezustand der LFP-Zellen war unbekannt.





Abbildung 38: Heftige Brandreaktion eines NMC-Batterietyps



Abbildung 39: Brandreaktion eines LFP-Batterietyps

#### 4.3.5 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Brandverhalten von Li-Ionen Zellen sehr unterschiedlich ist, sowohl was die Dauer bis zur Entzündung als auch die Intensität der Reaktion betrifft. Wie in aus der Literatur bekannt, ist dies sowohl von den verwendeten Materialien als auch vom Ladezustand abhängig.

Ebenso ist aus der Literatur der Effekt der “Thermal Runaway Propagation“ bekannt. Eine Zelle gibt im Thermal Runaway demnach genügend thermische Energie an benachbarte Zellen weiter, sodass auch diese in einen kritischen Zustand bzw. darüber hinaus versetzt werden. Es kommt dabei zu einer schrittweisen Reaktion im Modul von Zelle zu Zelle. Dieser Effekt kann gut am stufenweisen Verlauf der aufgezeichneten Messdaten abgelesen werden.

Bei den Modulbrandversuchen wurden an dem Modul Temperaturen von teilweise über 1000°C gemessen. Dies stimmt ebenfalls mit Daten aus der Literatur überein. Diese Werte wurden direkt am brennenden Modul gemessen. In einiger Entfernung zum Brandherd (z.B. an der Tunnelwand) ist jedoch von erheblich niedrigeren Temperaturmaxima auszugehen.

Bezüglich Gasmessung wurde erkannt, dass die Dräger Röhren aufgrund ihrer Handhabung und wegen möglicher Querempfindlichkeiten als Messmethode für die weiteren Brandversuche ausgeschlossen werden können. Ebenfalls ausgeschlossen wurden die Waschflaschen, welche aufgrund des Montageaufwandes für größere Brandversuche nicht praktikabel sind.

Es wurden daher Filterstacks mit Quarzfiltern als Vorabscheidern als Probenahmemethode für die weiteren Versuche ausgewählt. Die Quarzfilter können gleichzeitig der Probenahme für Schwermetalle dienen. Zur Messung der Gase CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> wurde entschieden, dass der Horiba-Analysator mit vorgeschalteten Waschflaschen herangezogen wird.

## **4.4 Versuche an Batterie-Packs**

Die Traktionsbatterie eines BEV besteht aus mehreren einzelnen Batterie-Modulen, welche miteinander zu einem großen Batterie-Pack verschaltet sind. In der zweiten Versuchsreihe wurden nun gesamte Batterie-Packs entzündet, um die Messorte der Messtechnik für die darauffolgenden Fahrzeugbrandversuche festlegen zu können.

### **4.4.1 Versuchsplanung und -aufbau**

Die Versuche auf der Ebene der Batterie-Packs wurden im Querschnitt des Eisenbahntunnels West (EBW) am Zentrum am Berg (ZaB) durchgeführt. Die bereitgestellte Infrastruktur kann hier ideal genutzt werden, weiters ist mit einem vorhandenen Querschlag in eine Parallelröhre ein sicherer Bereich bzw. eine Fluchtmöglichkeit ins Freie geboten. Zu guter Letzt kann in diesem Tunnelquerschnitt ein realistisches Strömungsverhalten erzeugt werden, um die Rauchgasausbreitung zu beobachten.

Tabelle 9: Geometrische Daten Versuchsort

<b>Bezeichnung</b>	EBW (Eisenbahntunnel West)
<b>Querschnittsfläche</b>	ca. 52 m <sup>2</sup> (das hier berücksichtigt die lichte Weite für die Luftströmung)
<b>Umfang</b>	ca. 26.5 m



Abbildung 40: Tunnelquerschnitt des Eisenbahntunnels West

Wie auch bei den Modul-Versuchen, kamen hier als Versuchsträger Module des Batterietyps „B“ und „C“ zum Einsatz (siehe Tabelle 5). Der Batterietyp „B“ wurde im Voraus auf 100% SOC geladen, der Ladezustand von Batterietyp „C“ war unbekannt.

Zusätzlich wurde auch ein Batterie-Pack (Versuch BP03) entzündet, bei welchem für die Einsatzkräfte die Handhabung einer Löschlanze demonstriert wurde. Dabei wurden keine Messungen durchgeführt.

Tabelle 10: Überblick der durchgeführten Tests

Test-Nr.	Batterietyp	Konfiguration
<b>BP01</b>	„C“	18 Module (18x40 Zellen)
<b>BP02</b>	„B“	27 Module (27x13 Zellen)
<b>BP03</b>	NMC	8 Module (8x12 Zellen)



#### 4.4.2 Eingesetzte Messtechnik

Bei den Versuchen BP01 und BP02 wurden folgende Parameter gemessen:

Tabelle 11: Übersicht eingesetzte Messtechnik

Messgröße	Messort*	Messverfahren / Messgerät	Bemerkung
Spannung Batterie	Pack	DEWETRON 2602	Messung an Einzelzellen; Messung der Gesamtspannung
Lufttemperatur	① ② ③	Thermoelemente Typ K, Klasse1	Zuströmung: 1x Messung Abströmung: Messungen an 2 Entfernungen und an 8 Höhen
Strömungs- geschwindigkeit	①	DURAG D-FL	streckengemittelte Ultraschall- Laufzeitdifferenzmessung
Gase	②	HORIBA Gas Analysator	CO, CO2, O2, NOx
	②	Filterstacks mit Quarzfilter	HF, HCl, H3PO4
Schwermetalle	②	Quarzfilter	aktive Beprobung
	④⑤	Vlies	passive Abscheidung
Video- und Fotodokumentation	①		

\* Messort gemäß Abbildung 41

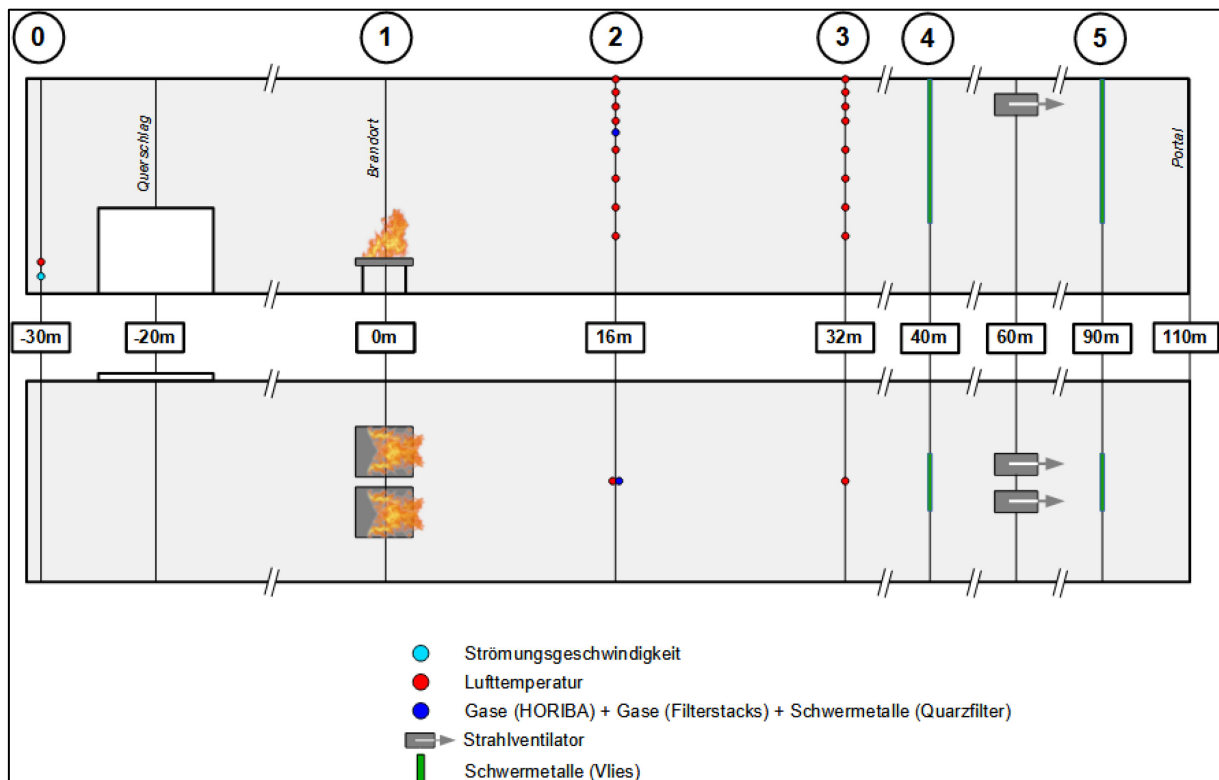


Abbildung 41: Übersicht der Messtechnik-Positionen für Tunnelinfrastruktur

**Gase:** Um trotz diskontinuierlicher Probenahme bei den Filterstacks eine etwaige Konzentrationsänderung während des Brandverlaufs abbilden zu können, wurden die Stacks seriell für mehrere Minuten beprobt, um so die Annäherung einer Konzentration-Zeit-Kurve zu erhalten. Die Probenahme erfolgte an punktuellen Messpositionen und befand sich 16 m (Messort ②) stromabwärts vom Brandort in 5.5 m Höhe (BP01) bzw. in 6.5 m Höhe (BP02) über der Fahrbahn.

**Lufttemperatur:** Die Temperaturmessung der Luft erfolgte zuströmseitig (①) und an zwei Messorten stromabseitig (②, ③) nach dem Brandort an unterschiedlichen Höhen.

**Schwermetalle:** Die Schwermetalle wurden auf zwei unterschiedliche Weise gemessen:

- Die Filterstacks mit Quarzfilter waren 16 m nach dem Brandort (②) platziert.
- In einer Entfernung von 40 m (④) und 90 m (⑤) in stromab Richtung war jeweils ein Vlies montiert.

Anmerkung: Natürlich ist bewusst, dass die Oberflächenstruktur eines Vlieses sich von jener der Betonoberfläche unterscheidet und somit unterschiedliche Ablagerungsbedingungen gegeben sind, es ist jedoch davon auszugehen, dass die Schadstoffagglomeration am Vlies höher ist als auf der glatten Betonoberfläche. Zudem ist die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchen aufgrund der Verwendung gleicher Materialien gegeben, sodass die Aussagekraft der Versuchsergebnisse nicht eingeschränkt ist. Die Spezifikationen des Vlieses sind 100 g/m<sup>2</sup> bei einer Stärke von 0,5 mm. Die Montage in Abzugsrichtung bewirkt die Ablagerung von Elementen (Ni, Co, Mn etc.) aus dem Rauchgas auf dem Vlies. Das Vlies mit einer Fläche von zirka 2 m<sup>2</sup> wurde unmittelbar vor dem Versuch aufgehängt, nach den Brandversuchen abgenommen und in Plastiksäcken jeweils getrennt bis zur Untersuchung aufbewahrt, sodass eine nachträgliche Verfälschung von Elementkonzentrationen infolge der Kontamination durch das Behältnis oder infolge des Entschwindens flüchtiger Verbindungen ausgeschlossen wird. Für die Analyse der Schwermetalle mittels ICP-MS Screenings (inductively coupled plasma mass spectrometry) kommt ein ICP-MS des Herstellers Agilent Technologies des Typs 7500CE zum Einsatz. Dafür ist ein Totalaufschluss der Probe gemäß ÖNORM EN 13656 nötig. In den Totalaufschluss für die Analyseprobe fließt auch das aufgelöste Vlies selbst ein, weswegen eine Analyse des nicht kontaminierten Vlieses, einer Nullprobe vorgenommen wurde.

#### 4.4.3 Versuchsdurchführung

Die Entzündung der Versuchsträger wurde mittels Gasbrenner durchgeführt. Bei BP01 und BP02 wurden die Batterien in zwei Brandtassen positioniert, welche erhöht angebracht waren. Unter diesen Brandtassen wurden zusätzlich zwei Gasbrenner fixiert, die eine konstante

Erwärmung von unten gewährleistet. Zusätzlich dazu wurden die Module händisch mit zwei Gaslanzen von oben so lange beflammt, bis ein Thermal Runaway beobachtet wurde.



Abbildung 42: Erhitzung der Versuchsträger mittels Gasbrenner

#### 4.4.4 Resultate

**BP01:** Wie bereits bei den vorangegangenen Modul-Brandversuchen mit Zelltyp LFP beobachtet wurde, dauerte es verhältnismäßig lange (ca. 40 Minuten) bis ein Thermal Runaway erreicht werden konnte. Zudem wurden hier auch keine markanten Stichflammen beobachtet; viel mehr handelte es sich um einen ruhigen, kontinuierlichen Brand, siehe nachfolgende Abbildung. Dies kann auch der Tatsache geschuldet sein, dass der Ladezustand dieser Module eher niedrig war.



Abbildung 43: Brandversuch BP01 mit LFP-Zelltyp

**BP02:** Die Entzündung der Module dauerte bei dem Batterietyp NMC etwa 15 Minuten. In der Folge kam es regelmäßig zu Thermal Runaways einzelner Zellen, welche durch Stichflammen eindeutig erkennbar waren. Es waren regelmäßig kleinere Explosionen wahrnehmbar, wodurch brennende Teile mehrere Meter weg vom Brandort geschleudert wurden (Abbildung 36).



*Abbildung 44: Brandversuch BP02 mit NMC-Zelltyp*

**BP03:** Dieser Versuch wurde zur Demonstration bzw. als Training zur Anwendung für die Löschlanze durch die Feuerwehr durchgeführt.



*Abbildung 45: Brandversuch BP03 mit Anwendung der Löschlanze*

#### 4.4.5 Fazit

Wie bereits bei den Modulbrandversuchen beobachtet, zeigten beide Batterietypen - obwohl jeweils auf Li-Ionen Technologie basierend - ein sehr unterschiedliches Brandverhalten (Dauer bis zur Entzündung, Intensität der Reaktion). Dies kann einerseits an der unterschiedlichen Zelltechnologie und/oder aber auch am unterschiedlichen Ladezustand der Batterien liegen.

Bezüglich der Positionen der Probenahme kann gesagt werden, dass aufschlussreiche Ergebnisse erzielt wurden und diese als eine solide Ausgangsbasis für die folgenden Fahrzeugbrandversuche herangezogen werden können.

Aussagen zur Verwendung der Löschlanze finden sich in Kapitel 6.2.1.



## 5 VERSUCHE AN BATTERIEELEKTRISCHEN BETRIEBENEN PKW

Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts liegt in der Beurteilung des Brandverhaltens bzw. der Auswirkungen von Bränden batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge. Ziel ist es einerseits, die Temperaturentwicklung und -verteilung im Tunnel zu messen. Andererseits soll die Art der Rauchgaszusammensetzung bzw. deren Menge und Verteilung im Tunnel eruiert werden. Ein weiteres Forschungsziel ist die Brandbekämpfung von Elektrofahrzeugen, daher wurde bei den Versuchen die Feuerwehr in die Versuchsplanung und den Versuchsablauf intensiv eingebunden.

### 5.1 Versuchsplanung und -aufbau

Die PKW-Brandversuchen fanden im Querschnitt des Eisenbahntunnels West (EBW) am Zentrum am Berg (ZaB) statt, wo durch die durchgeführten Vorversuche bereits gute Erfahrungen gesammelt werden konnten. Insgesamt wurden fünf Brandversuche durchgeführt; eine Übersicht ist in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Übersicht Brandversuche BEV

Versuch	Fahrzeug-klasse	Fahrzeugtyp	Batterietyp/ Kraftstoff	Entzündung	Anmerkung
<b>BV01</b>	Kompakt-wagen	BEV Baujahr 2020	Ca. 80 kWh, NMC	Auslösung eines Kurzschlusses in der Batterie durch NaCl <sub>aq</sub> Flutung	Einsatz Löschdecke
<b>BV02</b>	Klein-transporter	BEV Baujahr 2016	24 kWh, LMO	Externe Wärmezufuhr Batterie (Gasbrenner auf Batterieunterboden)	
<b>BV03</b>	SUV	ICEV Baujahr 2020	Diesel	Befeuern des Innenraums	
<b>BV04</b>	Klein-transporter	ICEV Baujahr 2010	Diesel	Befeuern des Motorraums	
<b>BV05</b>	SUV	BEV Baujahr 2020	Ca. 80 kWh, NMC	Befeuern des Innenraums; nach 10 Minuten Zündung Batterie durch NaCl <sub>aq</sub> Flutung	Einsatz Löschlanze

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen exemplarisch die beiden Versuchsträger für Kleintransporter.



Abbildung 46: BV02, Versuchsträger



Abbildung 47: BV04, Versuchsträger

**BV01 (BEV Kompakt):** Als Versuchsträger kam ein Kompaktwagen der neuesten Generation eines Serienfahrzeuges (Baujahr 2020) zum Einsatz. Es handelte sich um ein BEV mit NMC-Technologie, welches auf 100% SOC geladen war.

**BV02 (BEV Kleintransporter):** Als Versuchsträger kam ein Kleintransporter mit Baujahr 2016 zum Einsatz. Die Hochvoltbatterie wies als Zellchemie LMO auf und bestand aus Pouchzellen, welche auf 100% SOC geladen waren. Das Fahrzeug wies einen mechanischen Totalschaden auf, war jedoch eingeschränkt fahrtüchtig und die Hochvoltbatterie unbeschädigt.

**BV03 (ICEV SUV):** Als Versuchsträger kam ein mit Diesel angetriebener SUV mit Baujahr 2020 zum Einsatz. Dieses Fahrzeug stellt das Vergleichsfahrzeug zu BV05 dar.



**BV04 (ICEV Kleintransporter):** Beim Versuchsträger handelt es sich um einen Kleintransporter mit Baujahr 2010. Dieses Fahrzeug war baugleich zu jenem aus BV02, wodurch ein Vergleich der Ergebnisse zwischen diesen beiden Fahrzeugen möglich ist.

**BV05 (BEV SUV):** Zum Einsatz kam hier ein BEV SUV, gebaut 2020 und mit einer Traktionsbatterie, welche für den Fahrzeughersteller die neueste Generation darstellt.

## 5.2 Eingesetzte Messtechnik

Die eingesetzte Messtechnik teilt sich im Wesentlichen auf zwei Bereiche auf: Zum einen die Messtechnik direkt an den Versuchsfahrzeugen bzw. an deren Traktionsbatterien und zum anderen die Messtechnik für die umgebende Tunnelinfrastruktur. Es wurde bei allen Versuchen dieselbe Messtechnik eingesetzt, teilweise wurden einzelne Messpositionen im Zuge der Erfahrungen der vorangegangenen Brandversuche individuell angepasst.

Tabelle 13: Übersicht eingesetzte Messtechnik

Messgröße	Messort *	Messverfahren / Messgerät	Bemerkung
Spannung Batterie	PKW	DEWETRON 2602	nur bei BEV, Messung an Einzelzellen und der Gesamtspannung
Temperatur Batterie	PKW	DEWETRON 2602	nur bei BEV
Innendruck Batterie	PKW	DEWETRON 2602	nur bei BEV
Massenverlust	PKW	Achslastwaage	
Lufttemperatur	①① ②③	Thermoelemente Typ K, Klasse1	Messungen an unterschiedlichen Höhen über der Fahrbahn
Strömungsgeschwindigkeit	①	DURAG D-FL	streckengemittelte Ultraschall-Laufzeitdifferenzmessung
Gase	③	HORIBA Gas Analysator	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
	②	ABB Uras 26 IR -Analysator	CO
	②	Filterstacks mit Quarzfilter	HF, HCl, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Schwermetalle	②	Quarzfilter	aktive Beprobung
	④⑤	Vlies	passive Abscheidung
	Portal	Abwasserprobe	
Video- und Fotodokumentation	①		

\* Messorte gemäß Abbildung 48

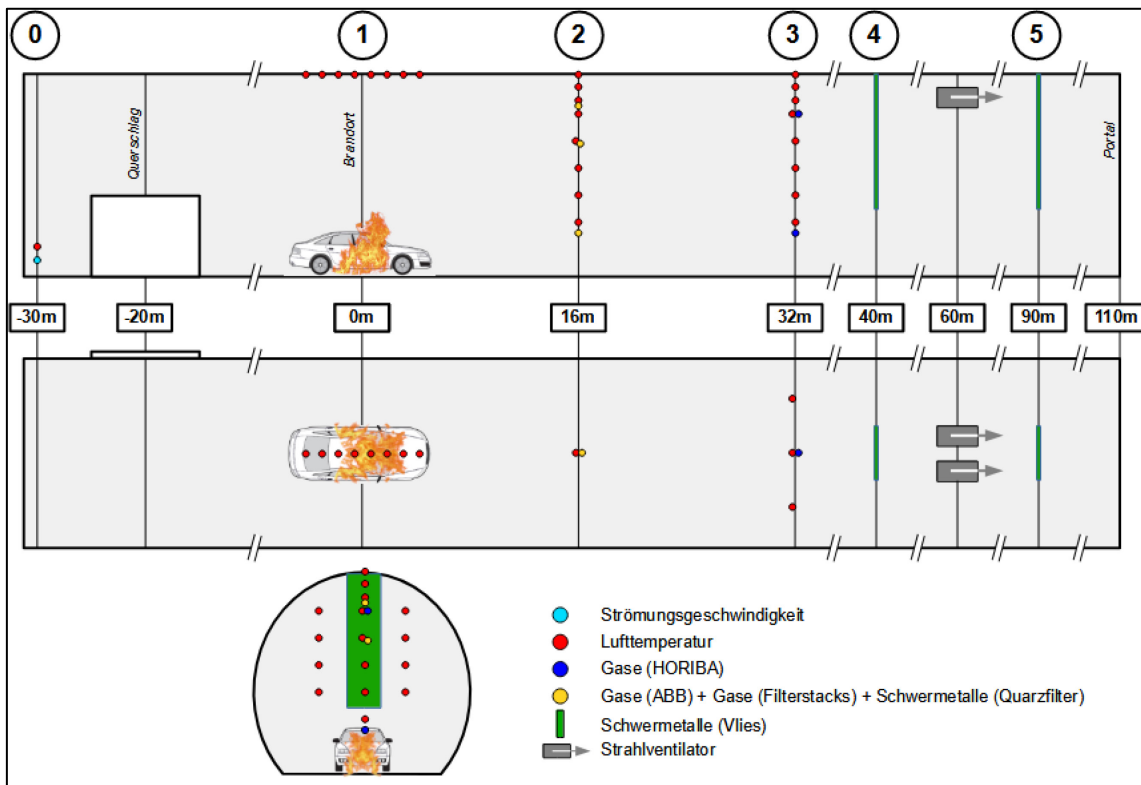


Abbildung 48: Übersicht der Messtechnik-Positionen für Tunnelinfrastruktur

**Spannung, Temperatur und Innendruck an der Batterie:** Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen schematisch den Aufbau der Batterie-Packs aus mehreren Modulen. Es sind die Positionen der eingesetzten Sensoren zur Erfassung von Spannungen, Temperaturen und dem Innendruck im Batteriegehäuse eingezeichnet. Die Traktionsbatterie war bei allen Versuchsfahrzeugen im Fahrzeugunterboden verbaut. In Abbildung 49 ist zudem die Position der externen Wärmezufuhr eingezeichnet.

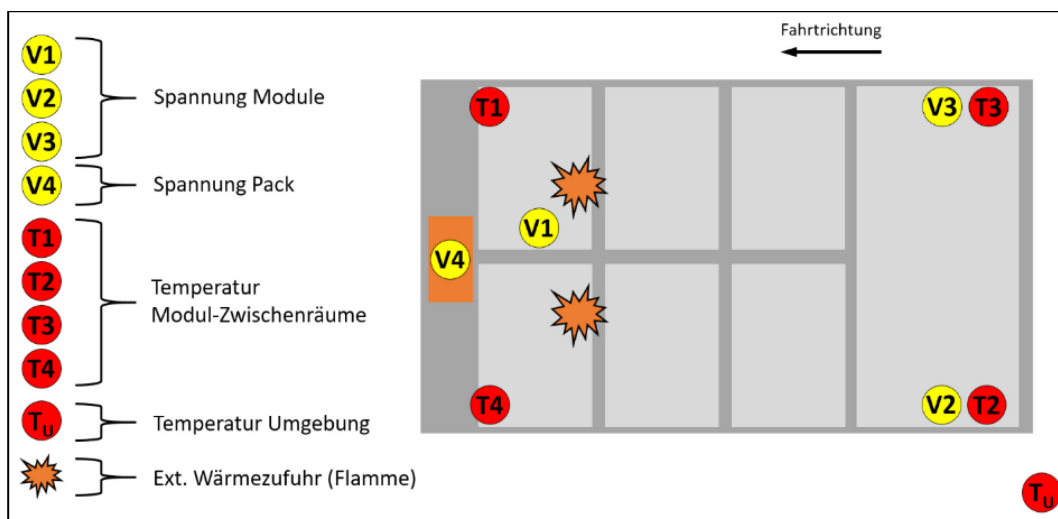


Abbildung 49: Übersicht der Messtechnik-Positionen an der Batterie des Versuchsträgers BV02

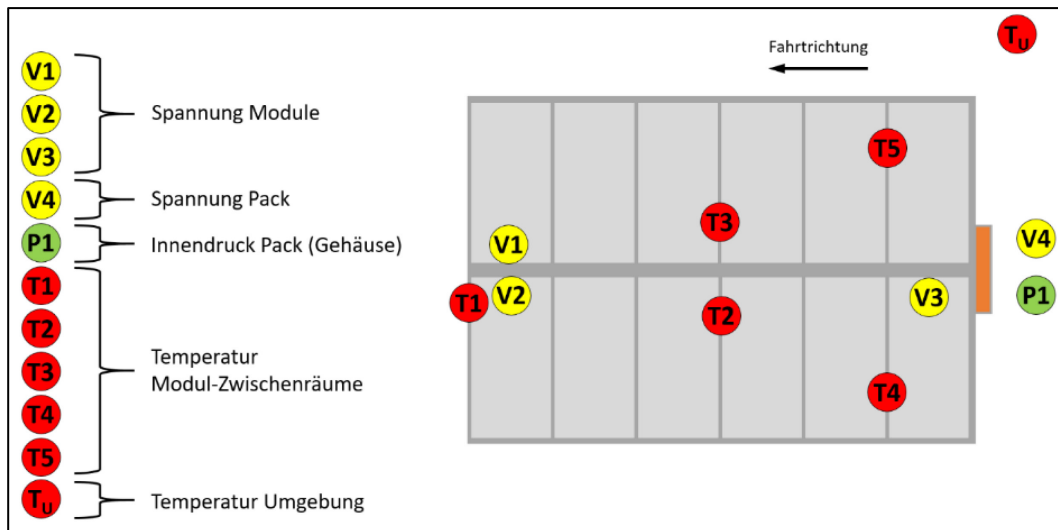


Abbildung 50: Übersicht der Messtechnik-Positionen an der Batterie der Versuchsträger BV01 und BV05

**Strömungsgeschwindigkeit:** Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Zuströmung zum Brandort erfolgte 30 m vor dem Brandort (Messort ①).

**Lufttemperatur:** Direkt über dem Brandort (Messort ①) wurden entlang der Tunnelfirste 8 Temperatursensoren montiert. Zudem wurden in einer Entfernung von 16 m (②) und 32 m (③) stromabwärts des Brandorts mittig Temperaturschnüre befestigt, welche ein Vertikalprofil der Temperatur in 0.5 Meter bis 1 Meter Abständen von First bis Boden aufnahmen. Je vier weitere Temperatursensoren wurden links und rechts der Mitte an der Position von Messort ③ angebracht.

**Schwermetalle:** Die Schwermetalle wurden auf drei unterschiedliche Weise gemessen:

- Die Filterstacks mit Quarzfilter waren 16 m nach dem Brandort (②) platziert.
- In einer Entfernung von 40 m (④) und 90 m (⑤) in Abstromrichtung war jeweils ein Vlies montiert.
- Die Abwasserproben des Löschwassers wurden nach dem Portal in der Gewässerschutzanlage gezogen. Das Wasser wurde vor Eintritt in das Becken entnommen.

**Gasmessung:** Die Gasmessung mit den ABB Analysatoren erfolgte in 16 m Abstand (②) zum Brandort; eine weitere Gasmessung mit HORIBA Analysatoren war in 32 m (③) Entfernung platziert.

## 5.3 Versuchsdurchführung

Ziel des gegenständlichen Forschungsprojekts ist eine möglichst realitätsnahe Testdurchführung. Durch die Örtlichkeit am Zentrum am Berg kann ein Fahrzeugbrand im Tunnel realitätsnah nachgestellt werden, etwa durch Zuströmverhältnisse zum Brandort, wie sie auch bei einem Brandereignis im Straßentunnel auftreten können. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit den stromabwärts gelegenen Strahlventilatoren und mit Unterstützung durch einen mobilen Lüfter stromauf des Brandortes auf etwa 2 m/s eingestellt.

Die Versuchsszenarien der einzelnen Brandversuche sind in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

### 5.3.1 BV01 (BEV Kompakt)

Zur Entzündung des Fahrzeuges wurde ein direkter Zugang in das Batterie-Pack gelegt, durch welchen eine Salzlösung eingeleitet werden konnte. Vorteil dieser Variante ist, dass sich der Brand innerhalb der Batterie relativ rasch ausbreitet. Es handelt sich hiermit um den Worst-Case-Szenario, wo ein Großteil der Batteriezellen gleichzeitig einen Thermal Runaway erfahren.

Durch die Flutung kam es somit zu einem Kurzschluss mit anschließendem Brand. Die Zeitspanne zwischen Beginn der Befüllung und Brandausbruch betrug etwa 6 Minuten. Zur Brandbekämpfung wurde eine Löschdecke erprobt, wie sie bei konventionellen Fahrzeugbränden zum Einsatz kommen kann. Außerdem war geplant, das Fahrzeug am Ende konventionell mit Wasser aus 2 C-Rohren zu löschen.



Abbildung 51: BV01, Anwendung der Löschdecke (© Lunghammer, TU Graz)

### 5.3.2 BV02 (BEV Kleintransporter)

Die Entzündung des Fahrzeugs von BV02 wurde mittels Gasbrenner durchgeführt. Das Fahrzeug wurde auf Betonblöcke aufgebockt, wodurch zwei Gasbrenner darunter fixiert werden konnten. Die Wärmezufuhr erfolgte von unten und außerhalb des Batteriegehäuses. Um eine raschere Erwärmung der Batteriezellen zu erreichen, wurden Teile des Batteriegehäuses an diesen Positionen im Versuch entfernt. Zwei weitere Gasbrenner wurden händisch bedient und kamen sowohl unterhalb als auch an der Oberseite des Fahrzeugs zum Einsatz.



Abbildung 52: BV02, Entzündung des Fahrzeuges ausgehend von der Batterie

### 5.3.3 BV03 (ICEV SUV)

Ziel dieses Brandversuches ist ein Vergleich der Rauchgasemissionen von BV03 (ICEV) mit BV05 (BEV), da diese beiden SUV die dieselbe Karosserie hatten.

Die Entzündung erfolgte durch Befeuern des vorderen Innenraums. Da nach 10 Minuten noch kein selbsterhaltender Brand zustande gekommen war, wurde zusätzlich die Rückbank entzündet. Der Brandverlauf war tendenziell ruhiger als bei den vorangegangenen Brandversuchen, da es zu keinen Stichflammen kam. Der Brand wurde gegen Ende des Versuches mittels C-Rohr gelöscht.

### 5.3.4 BV04 (ICEV Kleintransporter)

Dieses Fahrzeug stellt das Vergleichsfahrzeug zu BV02 (BEV Kleintransporter) dar. Die Entzündung erfolgte durch Befeuern des Motorraums. Da das Fahrzeug mit dem Heck stromaufwärts ausgerichtet war, kam es nicht zu einem Feuerüberschlag auf den Tank, womit es zu keinem Dieselbrand kam.



### 5.3.5 BV05 (BEV SUV)

Um die Ausbreitung des Brandes bzw. einen Feuerüberschlag auf ein benachbartes Fahrzeug beurteilen zu können, wurde bei diesem Brandversuch in etwa 3 m Abstand stromabwärts ein angenommenes Unfallfahrzeug platziert, welches keine Betriebsmittel mehr beinhaltete. Die Anordnung ist in Abbildung 53 zu sehen.



Abbildung 53: BV05, Versuchsträger und Unfallfahrzeug

Zur Entzündung des Versuchsträgers wurde Ethanol auf der Rückbank verteilt und anschließend angezündet. Nach etwa 10 Minuten war noch kein Brand der Batterie zustande gekommen; die Fahrzeugkarosserie war hier allerdings bereits stark ausgebrannt. Daher wurde nun zur Generierung eines Thermal Runaways - wie auch bei BV01 - eine Salzlösung direkt in die Batterie injiziert. Der danach einsetzende Thermal Runaway war deutlich bemerkbar.

Etwa 20 Minuten nach Versuchsbeginn wurde durch die Feuerwehr eine Personenrettung aus dem Unfallfahrzeug simuliert und der Dummy geborgen. Anschließend kam es zum Löschen mittels Löschlanze. Diese wurde gemäß Rettungsblatt im Fußraum der Rückbank eingeschlagen, siehe dazu Kapitel 6.

## 5.4 Resultate

### 5.4.1 Massenverlust

In Tabelle 14 ist der Massenverlust bei den Fahrzeugen dargestellt. Die Versuchsträger bei BV01 und BV05 haben während der Brandversuche in etwa ein Drittel ihrer ursprünglichen Masse verloren, die anderen Versuchsträger 11 % bis 17 %.

Tabelle 14: Masseverluste der Fahrzeuge

Test-Nr.	Masseverlust Fahrzeug	Bemerkung
BV01	634 kg (34 %)	
BV02	266 kg (17 %)	
BV03	188 kg (11 %)	
BV04	489 kg (40 %)	Fahrzeugmasse vor dem Versuch basierend auf Literaturwerten
BV05	683 kg (35 %)	

#### 5.4.2 Wärmefreisetzung

Eine direkte Messung der Wärmefreisetzungsrates 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 Wärmefreisetzungsrates 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 O<sub>2</sub> 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 Wärmefreisetzungsrates ermittelt werden.



Abbildung 54 zeigt den Verlauf der HRR aller 5 durchgeführten Fahrzeugbrandversuche. Bei BV02 wurde kam es nach Erreichen des Vollbrands - also nach etwa 9 Minuten ab Beginn des Thermal Runaways - zu einem Stromausfall, wodurch einige Messgeräte für mehrere Minuten ausfielen (punktirierte Linie). Die Ursache konnte 8 Minuten später behoben werden.

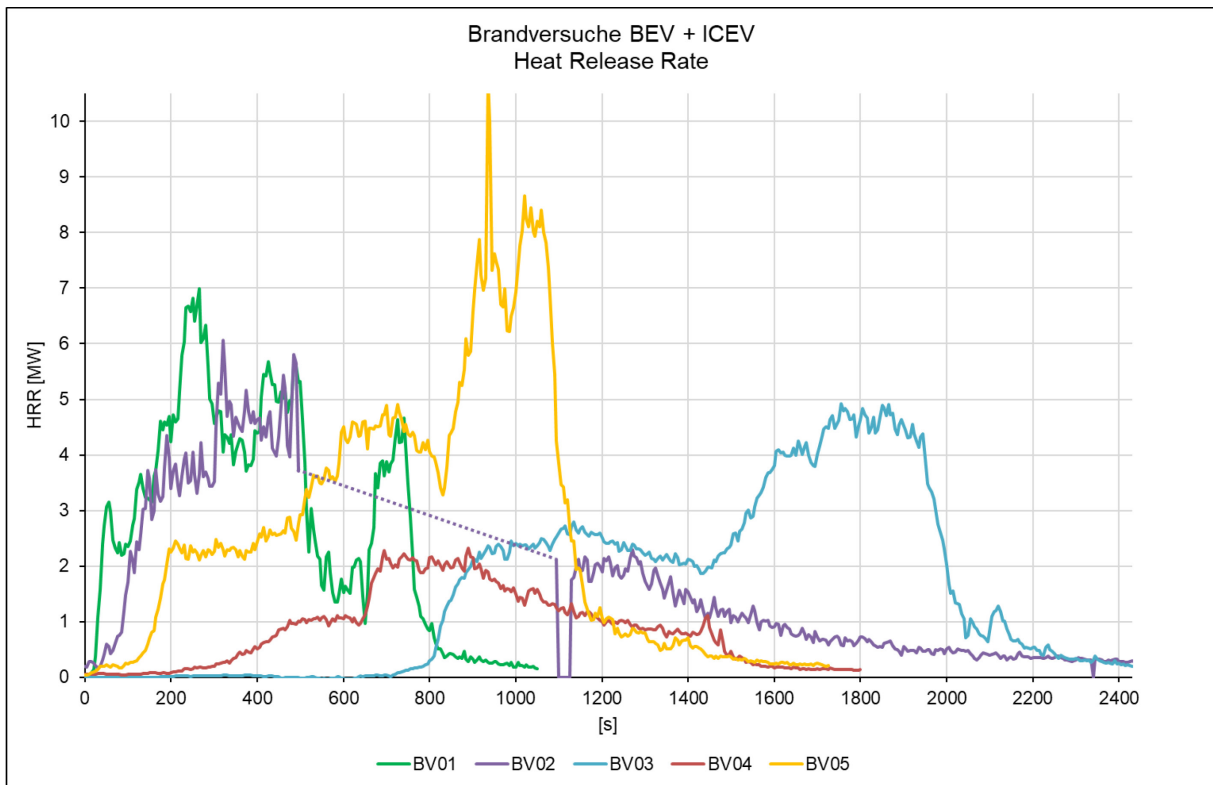


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf von HRR, BEV und ICEV

In Abbildung 55 sind die zeitlichen Verläufe der HRR der Brandversuche mit BEV dargestellt. Bei Brandversuch BV01 ist ein schneller Anstieg der HRR zu erkennen, was durch die Art der Entzündung zurückzuführen ist. Durch Fluten der Batterie mit Salzlösung begann der Thermal Runaway in zahlreichen Batteriezellen gleichzeitig. Die maximale HRR stieg innerhalb kurzer Zeit auf 7 MW an, zu diesem Zeitpunkt standen also sowohl die Karosserie als auch die Batterie in Vollbrand. Nachdem der Brandverlauf wieder etwas abflachte, begann gemäß geplantem Versuchsablauf die Feuerwehr mit dem Einsatz der Löschdecke (siehe Kapitel 6.2.1). Diese Löschdecke bedeckte das Fahrzeug für 2,5 Minuten; dieser Zeitraum ist in einem massiven Einbruch im Verlauf der HRR zu erkennen. Das Entfernen der Decke macht sich in einem neuerlichen Anstieg bemerkbar, ehe das Fahrzeug nach etwa 12 Minuten auf konventionellem Wege gelöscht wurde.

Der Brandverlauf bei Versuch BV05 zeigt einen gemäßigeren Anstieg, da der Brand hier nicht von der Batterie, sondern von der Rückbank ausgehend seinen Ursprung hatte. Selbst nach 10 Minuten zeigte sich die Batterie von der brennenden Karosserie noch unbeeindruckt, was

sich anhand der Messdaten der Temperatur- und Spannungssensoren im Batteriegehäuse bestätigen lässt. Daher wurde nun begonnen, wie auch bei BV01, Salzlösung direkt in die Batterie zu injizieren. Als der Brand der Karosserie schon am Abklingen war, setzte der Thermal Runaway ein. Dies war von den anwesenden Personen deutlich zu erkennen und spiegelt sich auch im Verlauf der massiv ansteigenden HRR wider. Nach knapp 18 Minuten begann die Feuerwehr mit dem Löschen der Karosserie, was in einer Reduktion der HRR sichtbar ist. Es wurde jedoch festgestellt, dass dadurch die Temperaturen im Inneren des Batteriegehäuses nicht gesenkt werden konnten. Weitere drei Minuten später wurde mit dem Einsatz der Löschlanze begonnen; die Temperaturen an den Batteriemodulen konnte schlagartig gesenkt werden.

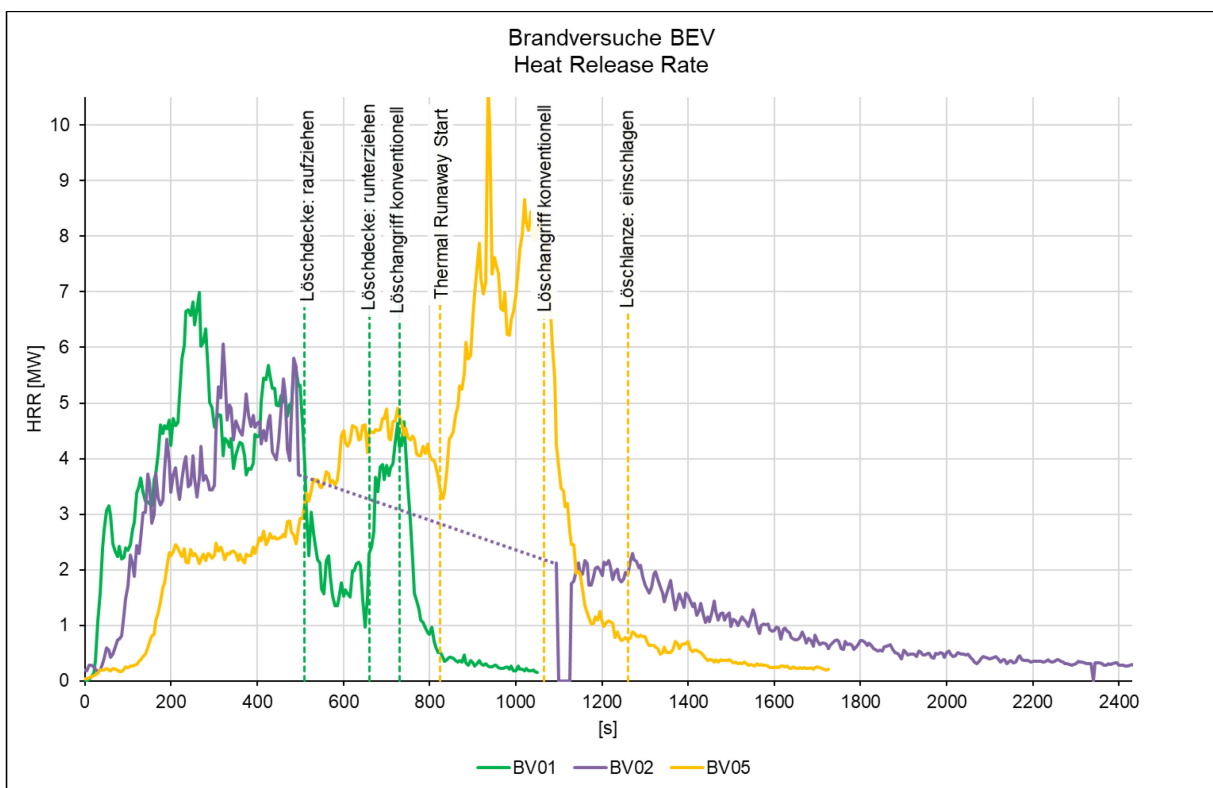


Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf von HRR, nur BEV

In nachstehenden Diagramm sind die beiden Brandversuche mit konventionellem Antrieb abgebildet. BV03 wurde ausgehend vom Motorraum entzündet. Das Fahrzeug war allerdings so ausgerichtet, dass die Fahrzeugfront in Strömungsrichtung blickte, daher breitete sich der Brand vom Motorraum nicht weiter aus. Nach etwa 10 Minuten wurde zusätzlich die Rückbank entzündet und der Brandverlauf beschleunigte sich deutlich. Der konventionelle Löschangriff begann 32 Minuten nach erstmaliger Entzündung, was deutlich am Einbruch der HRR erkennbar ist.

Der Verlauf der Wärmefreisetzung bei BV04 zeigte eine sehr flache Kurve mit einem Peak bei 2,3 MW. Es handelte sich hierbei um einen leeren Kastenwagen und wenig Interieur, somit war die Brandlast im Vergleich zu den anderen Versuchsträgern gering.

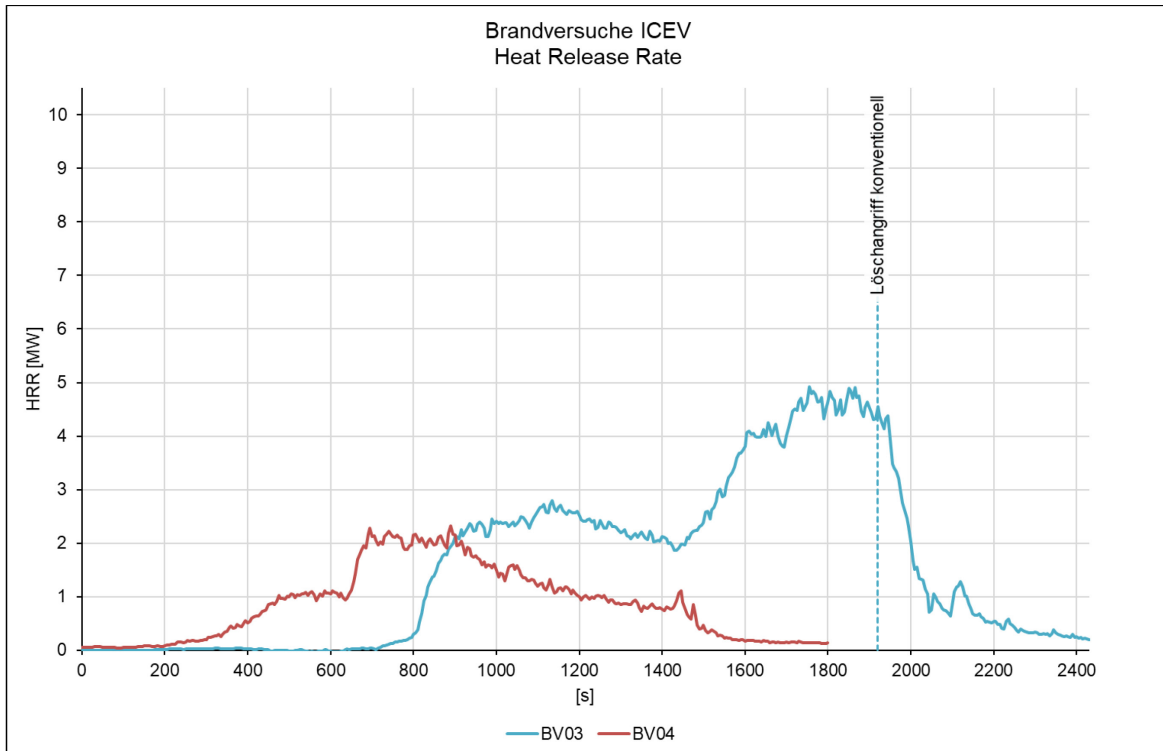


Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf von HRR, nur ICEV

In Tabelle 15 sind die Spitzenwerte der HRR dargestellt. Wie bereits angeführt, ist das geringe Maximum der HRR von 2,3 MW bei BV04 durch die geringe Brandlast zu erklären. Auf der anderen Seite ist BV05 mit einem kurzzeitigem Maximum von beinahe 10,7 MW hervorzuheben. Dieser Spitzenwert nach Beginn des Thermal Runaways ist eventuell als Ausreißer zu betrachten, allerdings lag die HRR für den gesamten Zeitraum bis zum Beginn des Löschangriffes auf außergewöhnlich hohem Niveau.

Tabelle 15: HRR Maximum der Fahrzeuge

Test-Nr.	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

Der Wärmeinhalt entspricht, vereinfacht ausgedrückt, der Fläche unter der HRR-Kurve und ist in Tabelle 16 notiert.

*Tabelle 16: Wärmeinhalt der Fahrzeuge*

Test-Nr.	Wärmeinhalt	Bemerkung
BV01	2 893 MJ	
BV02	n/a	Teilweise Messausfall
BV03	3 792 MJ	
BV04	1 540 MJ	
BV05	4 454 MJ	

### 5.4.3 Temperatur Batterie

Die maximalen Temperaturen, welche bei den BEV-Versuchsträgern an der Traktionsbatterie gemessen wurden, sind in Tabelle 17 aufgelistet. Teilweise sind sehr hohe Temperaturen (über 1000 °C) an der Batterie gemessen worden.

*Tabelle 17: Temperaturmaxima an der Batterie*

Test-Nr.	max. Temperatur, Batterie	Bemerkung
BV01	583 °C	
BV02	1144 °C	
BV03	n/a	ICEV
BV04	n/a	ICEV
BV05	> 1372 °C	Sensor in Sättigung

### 5.4.4 Lufttemperatur

Die Lufttemperaturen wurden an mehreren Positionen bzw. Höhen gemessen. Am höchsten sind die Temperaturen direkt über dem Brandort an der Tunnelfirste (Messpunkt ①); mit steigender Entfernung zum Brandort sinken die Temperaturen in dieser Höhe (② ist 16 m entfernt, ③ ist 32 m entfernt) erwartungsgemäß, siehe Tabelle 18. Die Temperatursensoren auf Kopfhöhe bzw. 2 m über der Fahrbahn sind an ③ jedoch noch etwas höher als an ②, was zeigt, dass der Tunnelquerschnitt hier mit den Rauchgasen bereits stärker durchmischt ist (Tabelle 19).

Die maximalen Temperaturen sind in den nachstehenden Tabellen und Diagrammen dargestellt und stimmen gut mit den Ergebnissen der Wärmefreisetzungen überein. Die niedrigen Temperaturen bei BV04 decken sich mit dessen geringen Wärmefreisetzungsraten

bzw. Wärmehalten. Umgekehrt zeigen die Brandversuche mit hoher HRR auch hohe Temperaturmaxima.

*Tabelle 18: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase an der Tunnelfirste*

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

*Tabelle 19: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase in 2 m über Fahrbahnniveau*

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

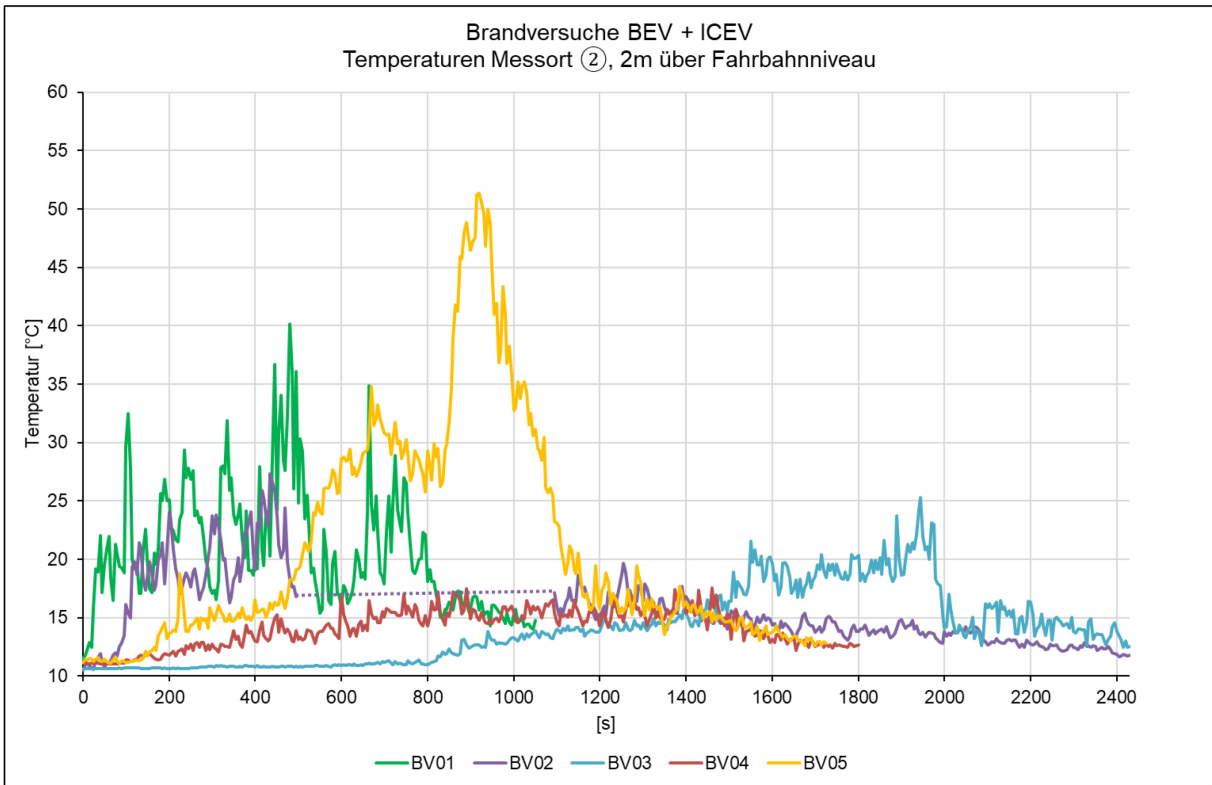


Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf von Temperaturen am Messort ②, 2 m über Fahrbahnniveau

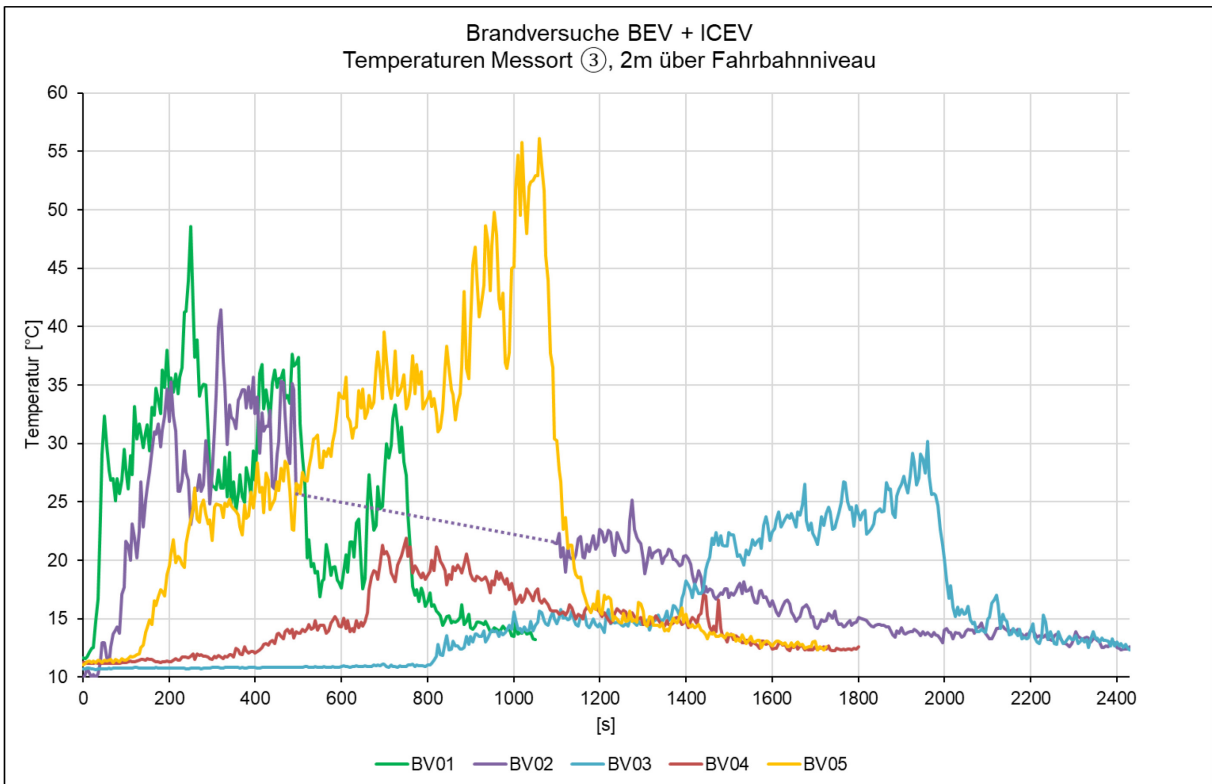


Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf von Temperaturen am Messort ③, 2 m über Fahrbahnniveau

### 5.4.5 Gasemissionen

Eine kontinuierliche Messung der Brandgase CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> sowie der O<sub>2</sub>-Reduktion erfolgte punktuell an den Messorten ② und ③. Die aus den Messungen ermittelten absoluten Mengen an emittierten Brandgasen sind in Tabelle 20 dargestellt.

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

Tabelle 20: Klassische Brandgase, ermittelte Absolutmengen

Test-Nr.	CO ②	CO ③	CO <sub>2</sub> ③	NO <sub>x</sub> ③	Bemerkung
BV01	4 530 g	6 377 g *	228 kg *	581 g *	* teilweise Messausfall
BV02	n/a	n/a	n/a	n/a	Keine Gasmessungen durchgeführt
BV03	4359 g	7341 g	405 kg	1137 g	
BV04	1643 g	2526 g	246 kg	633 g	
BV05	9904 g	14835 g	638 kg	1600 g	

Eine Messung weiterer Gase, welche im Speziellen für BEV von Relevanz sind, wurde durch die Filterstacks bewerkstelligt. Dazu wurden diese seriell für mehrere Minuten beprobt, um so die Annäherung einer Konzentration-Zeit-Kurve zu erhalten. Die in dieser Zeit aufsummierte Absolutmenge an emittierten Gasen ist Tabelle 21 dargestellt. Tabelle 22 und Tabelle 23 enthalten die messtechnisch ermittelten Maximalwerte der Gaskonzentrationen an den Messorten ② und ③.

Tabelle 21: Saure Gase, ermittelte Absolutmenge

Test-Nr.	HCl incl. Cl- ②	SO <sub>2</sub> incl. SO <sub>4</sub> - ②	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> incl. PO <sub>4</sub> - ②	HF incl. F- ②	Bemerkung
BV01	1120 g	259 g	99 g	1333 g	
BV02	n/a	n/a	n/a	n/a	
BV03	1261 g	145 g	14 g	164 g	
BV04	121 g	88 g	n/a	<NG	
BV05	1409 g	175 g	n/a	1142 g	



Tabelle 22: Klassische Brandgase, maximale Konzentrationen

Test-Nr.	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]			CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]		CO <sub>2</sub> [vol%]		NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	
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

Tabelle 23: Saure Gase, maximale Konzentrationen

Test-Nr.	HCl [mg/Nm <sup>3</sup> ]			SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]			H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]			HF [mg/Nm <sup>3</sup> ]		
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	<NG	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

#### 5.4.6 Schwermetalle

Die Schwermetalle im Rauchgas wurden auf zweifache Weise nachgewiesen. Einerseits durch aktive Beprobung der Filterstacks, andererseits durch passive Abscheidung auf Vlies-Stoffe. Die Kontamination des Löschwassers durch Schwermetalle wurde durch Beprobung vor Eintritt in die Gewässerschutzanlage ebenfalls gemessen.

##### 5.4.6.1 Aktive Beprobung der Filterstacks

Bei Auswertung der Absolutwerte bestimmter Schwermetalle auf den Filterstacks wurde dieselbe Vorgehensweise wie bei den sauren Gasen gewählt.

Tabelle 24: Schwermetalle, Absolutmenge der aktiven Beprobung an Messort ②

Element [g]	BV01	BV02	BV03	BV04	BV05
Al	285.72	n/a	58.91	13.19	286.17
Sb	57.28	n/a	20.39	*	17.10
Pb	*	n/a	*	6.60	0.75
Cd	0.03	n/a	0.02	*	0.02
Co	312.26	n/a	*	*	153.57
Cu	51.21	n/a	15.85	*	64.89
Li	290.03	n/a	0.73	*	343.01
Mn	414.93	n/a	8.13	*	438.03
Ni	1253.50	n/a	47.04	*	1480.02
Se	0.41	n/a	*	*	*
Tl	*	n/a	*	*	*

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

Die durchschnittlichen Konzentrationen, welche bei den Brandversuchen an Messort ② in unterschiedlichen Höhen gemessen wurden, sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Schwermetalle, Konzentrationen der aktiven Beprobung an Messort ②

Element [mg/Nm <sup>3</sup> ]	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	*	*
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

Vergleicht man die ermittelten Konzentrationen der Schwermetalle an Messort ② mit den IDLH-Werten (Tabelle 26), so kann man bei den BEV in BV01 und BV05 eine Überschreitung für das Schwermetall Nickel feststellen. Dieser Grenzwert wurde an den oberen beiden Messpositionen (6,4 m sowie 4,8 m über der Fahrbahn) deutlich überschritten, allerdings nicht auf der für das Personenrisiko relevanten Messposition von 1,6 m über der Fahrbahn.

Tabelle 26: IDLH-Limits für bestimmte Schwermetalle

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

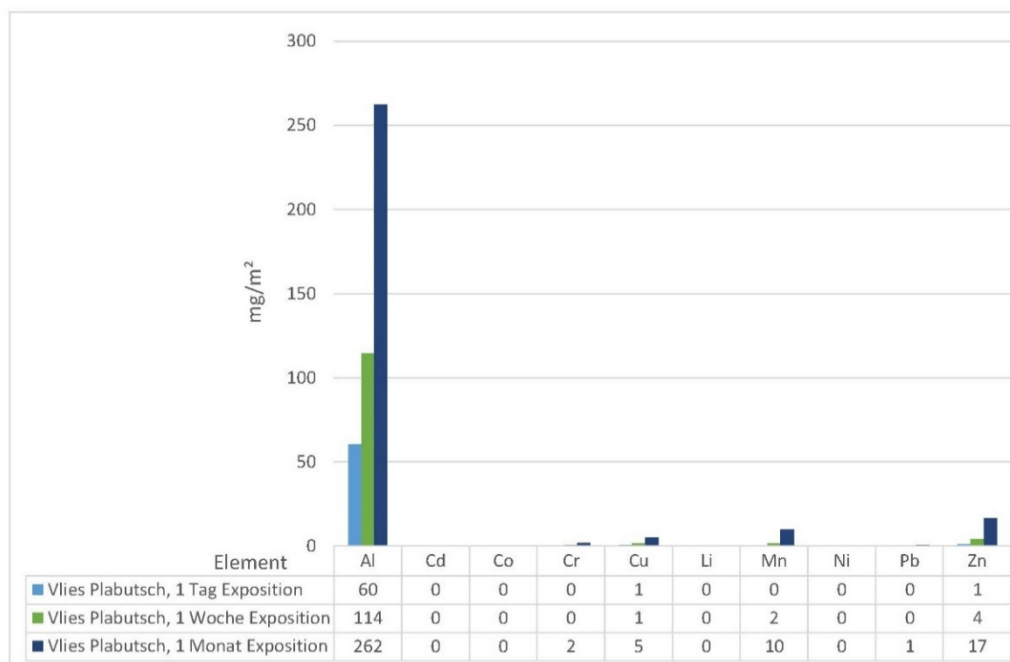
#### 5.4.6.2 Abscheidungen von Kontaminationen am Vlies

Die Einflussfaktoren der Fahrzeugbrände für die Infrastruktur setzen sich im Wesentlichen aus der Temperaturentwicklung, den toxischen Rauchgasentwicklungen und der Kontamination des Brandorts und der Löschwässer zusammen. Das messtechnische Versuchsprogramm zielt vorwiegend auf diese genannten Einflussfaktoren ein. Auf die messtechnische Instrumentierung während der Brandversuche wird auf Kapitel 5.2 verwiesen.

Zusätzlich zur messtechnischen Erfassung des Brandgeschehens wurden Analysen der Schadstoffbelastung des Versuchsorts durchgeführt. Dies sind Analysen von Löschwässern und Vliesen. Die beiden Vliese wurden während der Brandversuchsdurchführung in Rauchabzugsrichtung in bestimmten Abständen vom Brandherd an der Tunnelfirste montiert. Die Positionen V1 und V2 der Vliese und der Temperaturmessstellen TM1 und TM2 in Bezug auf die Brandstelle gehen aus Abbildung 48 hervor. Die Kontaminationen wurden aus den Analysen nach den Brandereignissen abzüglich der Nullprobe (reines Vlies) ermittelt.

Als Vergleichsbasis wurde die zu erwartende Wandablagerung an einem Tunnel im Normalbetrieb herangezogen. Dazu wurden Vliesbahnen im 10 km langen Plabutschtunnel angebracht und nach unterschiedlichen Expositionszeiträumen analysiert. Der Vergleich der einzelnen Proben nach einer Expositionszeit von einem Tag, einer Woche und einem Monat zeigt deren kontinuierlichen Anstieg mit zunehmender Dauer der Exposition an, was als folgerichtig anzunehmen ist.

Abbildung 59 zeigt die Kontamination mit Al, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, Pb und Zn im Regelbetrieb des Plabutschunnels auf der Pyhrnautobahn A9 über die unterschiedliche Dauer der Exposition auf einem Vlies. Aus den Analyseergebnissen von Al, Mn und Zn geht gut sichtbar hervor, dass die Elementkonzentrationen kontinuierlich mit der Dauer der Exposition wachsen, was die Plausibilität der Resultate untermauert, da nur Teile des Vlieses angesichts des nötigen Totalaufschlusses analysiert werden können. Die schwerpunktmäßigen Elemente der Zellchemie von BEV-Fahrzeugen (Nickel, Kobalt und Mangan) treten nicht nachweisbar im Regelverkehr auf (Abbildung 59)<sup>2</sup>.



*Abbildung 59: Elementkonzentrationen bei unterschiedlich langer Kontamination durch den Regelbetrieb im Plabutschtunnel*

In Abbildung 60 ist die bei der Durchführung des Brandversuchs abgeschiedene Elementkonzentration baugleicher Fahrzeuge BV03 (ICEV) und BV05 (BEV)

<sup>2</sup> Anmerkung: die hohen Aluminiumkontaminationen sind auf die Vorbelastung der natürlichen Umgebungsluft zurückzuführen.

gegenübergestellt, die einen konventionellen und einen batteriebetriebenen Antrieb besitzen. Die im Wesentlichen der Zellchemie NMC (Nickel, Mangan und Kobalt) entstammenden Elemente lassen sich in den Konzentrationen von BV05 wiedererkennen. Die hohen NMC Werte des BV03 bei Tunnelmeter 20 (TM 20) werden als Ausreißer erachtet (eventuell Rückstände aus den vorherigen Brandversuchen mit BEV), weil es sich um ein konventionelles Fahrzeug handelt.

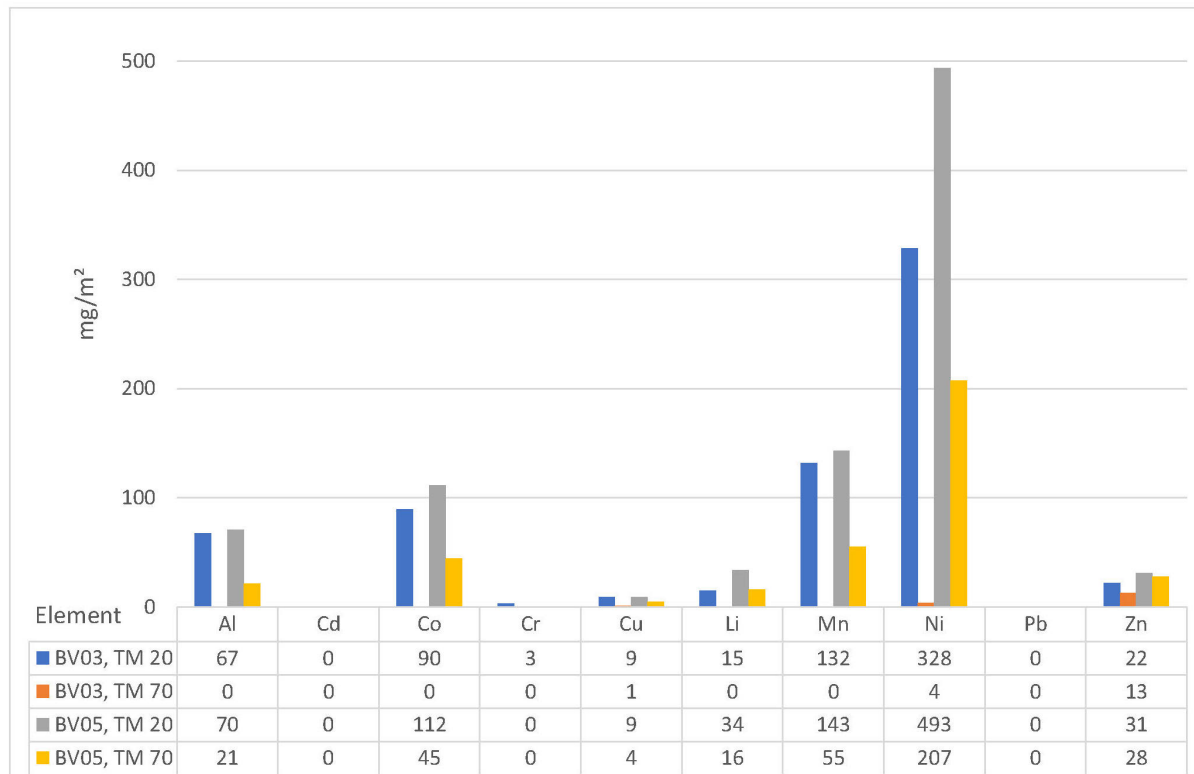


Abbildung 60: Vergleich baugleicher konventioneller und elektrischer Fahrzeuge BV03 (ICEV) und BV05 (BEV)

Abbildung 61 enthält die Konzentrationen der aus den Rauchgasen abgeschiedenen Elemente für die 3 BEV Brandversuche BV01, BV02 und BV03. Speziell die Konzentrationen der in den Batteriesystemen eingesetzten Elemente Mangan, Kobalt und Nickel treten heraus. Beachtlich sind die Streuungen der Elementkonzentrationen bei den unterschiedlichen abgebrannten BEV-Fahrzeugen.

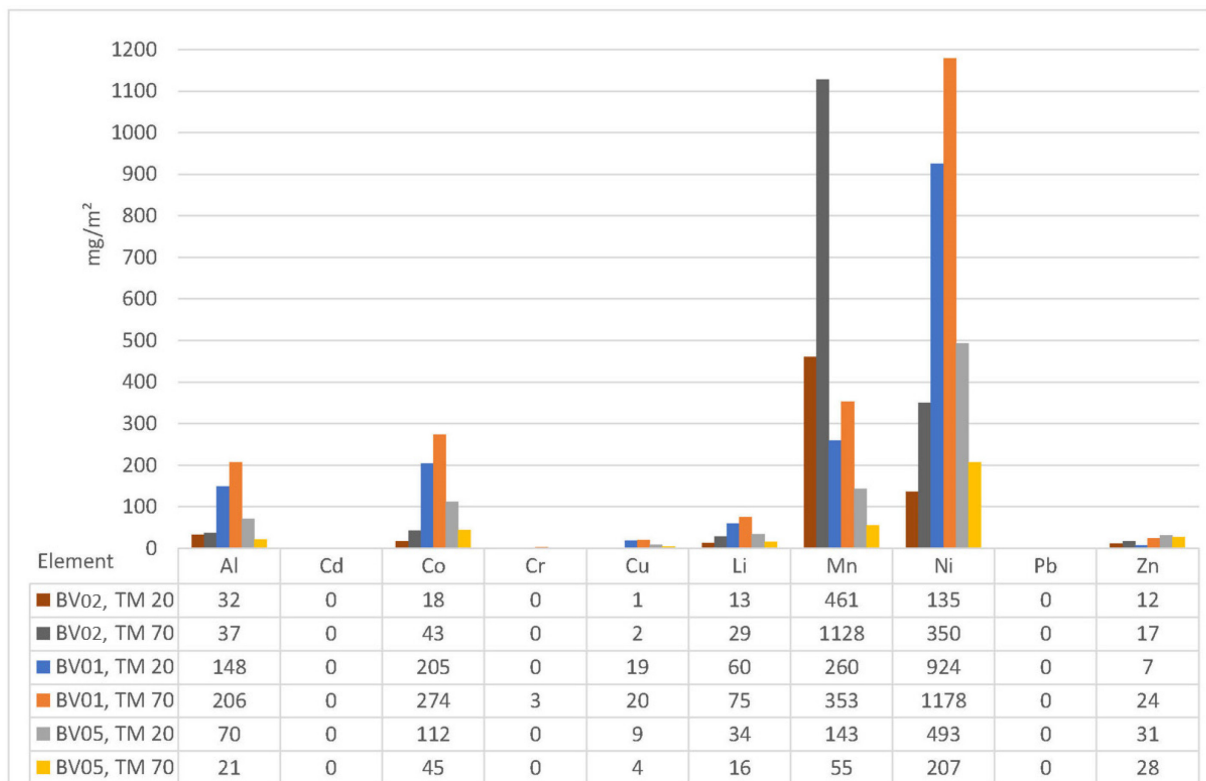


Abbildung 61: Vergleich batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge (BV01, BV02 und BV05)

Die Abscheidungen aus den Brandversuchen mit Fahrzeugen konventioneller Antriebe (BV03, BV04) gibt Abbildung 62 wieder. Angesichts der hohen Nickel- und Mangankonzentrationen bei BV03 (TM 20) ist auch hier von einem Einfluss der vorher durchgeführten BEV Brandversuche auszugehen.



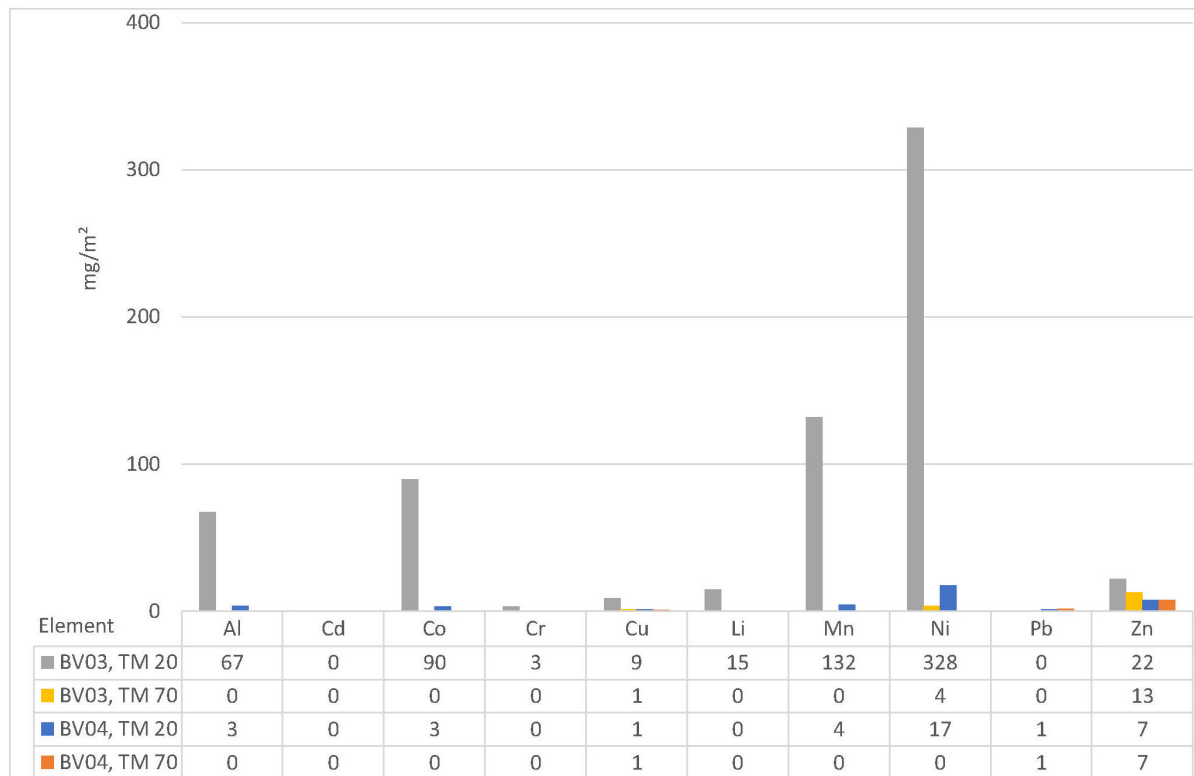


Abbildung 62: Vergleich der mit konventionellen Antrieben ausgestatteten Fahrzeuge (BV03, BV04)

Ein Trend abnehmender Konzentration mit wachsender Entfernung vom Brandort lässt sich anhand der Analysen nicht durchgehend bestätigen. TM 70 ist dem Brandort näher als TM 20, der sich nahe dem Tunnelportal befindet. Die Konzentrationen der sich an dem in der Firste montierten Vlies ablagernden Elemente sind innerhalb des BEV-Fahrzeugtyps sehr unterschiedlich. In den Analysen erweist sich in den Rauchemissionen jedoch das Element Lithium als weniger volatil im Vergleich zu den die Batterien zusammensetzenden Elemente, wie es die hohen Konzentrationen von Mangan, Kobalt und Nickel ausweisen (Abbildung 61).

Detaillierte Angaben zu den Vliesbelegungen finden sich in Tabelle 38 bis Tabelle 44 im Anhang.

#### 5.4.6.3 Kontamination des Löschwassers

Wässer von stark frequentierten Verkehrsflächen fallen in den Geltungsbereich der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (AAEV). Diese Verordnung legt Grenzwerte fest. Die Grenzwerte der den Analysen zu Grunde gelegten Elemente sind in Tabelle 45 in der Spalte rechts angegeben. Die allgemeine Abwasseremissionsverordnung enthält nicht für alle Elemente Grenzwerte.

Wässer stark frequentierter Verkehrsflächen müssen gemäß der AAEV mit Maßnahmen nach dem Stand der Technik sowie unter Berücksichtigung der Forderung der Erhaltung der

ökologischen Funktionsfähigkeit des betroffenen Fließgewässers gereinigt und eingeleitet werden. Die Oberflächenwässer der Fahrbahn werden bei Tunnelprojekten im Allgemeinen in die Gewässerschutzanlage (GSA) eingeleitet, wie dies auch am Zentrum am Berg geschieht.

Für die Untersuchung der Löschwasserkontamination wurden Wasserproben nach den Brandversuchen entnommen. Die Entnahmestelle lag am Übergang zur Gewässerschutzanlage, ehe das Abwasser in dieselbe eintritt. Diese befindet sich vom Brandort zirka 100 m entfernt. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 46. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung des nicht kontaminierten Löschwassers am ZaB zu Vergleichszwecken (Tabelle 45), um Kontaminationen auf eine Löschwasserreferenzprobe beziehen zu können. Die Löschwasserversorgung des ZaB beruht auf einer der Anlage eigenen Quelle. Die Analysen wurden im Labor des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben vorgenommen.

Zu Vergleichszwecken wurden die Wässer verschiedener Tunnelwäschen untersucht. Es liegen die Analysen der Tunnelreinigungen des Plabutschtunnels sowie des Versuchstunnels des ZaB vor. Die Tunnelreinigung des Plabutschtunnels erfolgt halbjährlich und die aus der GWA am ZaB entnommenen Abwässer spiegeln die Kontaminationen wider, die die Brandversuche des gegenständlichen Projekts hinterlassen haben. (Tabelle 47) erlaubt den direkten Vergleich eines Tunnels im regulären Verkehrsbetrieb und eines Tunnels mit einer Kontamination, die alleinig in den Brandversuchen entspringt.

Abbildung 63 veranschaulicht die Schadstoffkonzentrationen der bei der Tunnelwäsche des Plabutschtunnels und des ZaB anfallenden Abwassers in Bezug zu den im Projekt gesammelten Löschwässern. Zusätzlich lagen noch Ergebnisse einer Löschwasseranalyse nach dem Brand eines Hybridfahrzeuges<sup>3</sup> vor. Aus Gründen der Skalierung wird die y-Achse mit 10000 µg/L begrenzt. Anhand der Analysen lässt sich erkennen, dass die Konzentrationen über weite Bereiche variieren. Auch wenn die Batterietypen wie bei BV01 und BV05 ident sind, richten sich die beim Löschvorgang abgegebenen Schadstoffkonzentrationen nach der jeweiligen Phase der in Brand befindlichen Batterieteile sowie der eingesetzten Löschwassermenge. Abbildung 63 zeigt insbesondere erhöhte Schadstoffkonzentrationen jener Elemente im Abwasser der Tunnelreinigung des ZaB an, die auf die in den Batterien verwendeten Metalle wie Co, Li, Mn und Ni hindeuten. Diese heben sich gegenüber den Konzentrationen des Normalbetriebs im Plabutschtunnel gut erkennbar ab.

---

<sup>3</sup> Die Löschwässer des Hybrid-Fahrzeugs entstammen dem Brand dieses Fahrzeugs auf offener Straße, der Hybrid-PKW war mit drei Lithium-Eisen-Phosphat Batterien ausgestattet, welche im Motorraum verbaut waren.

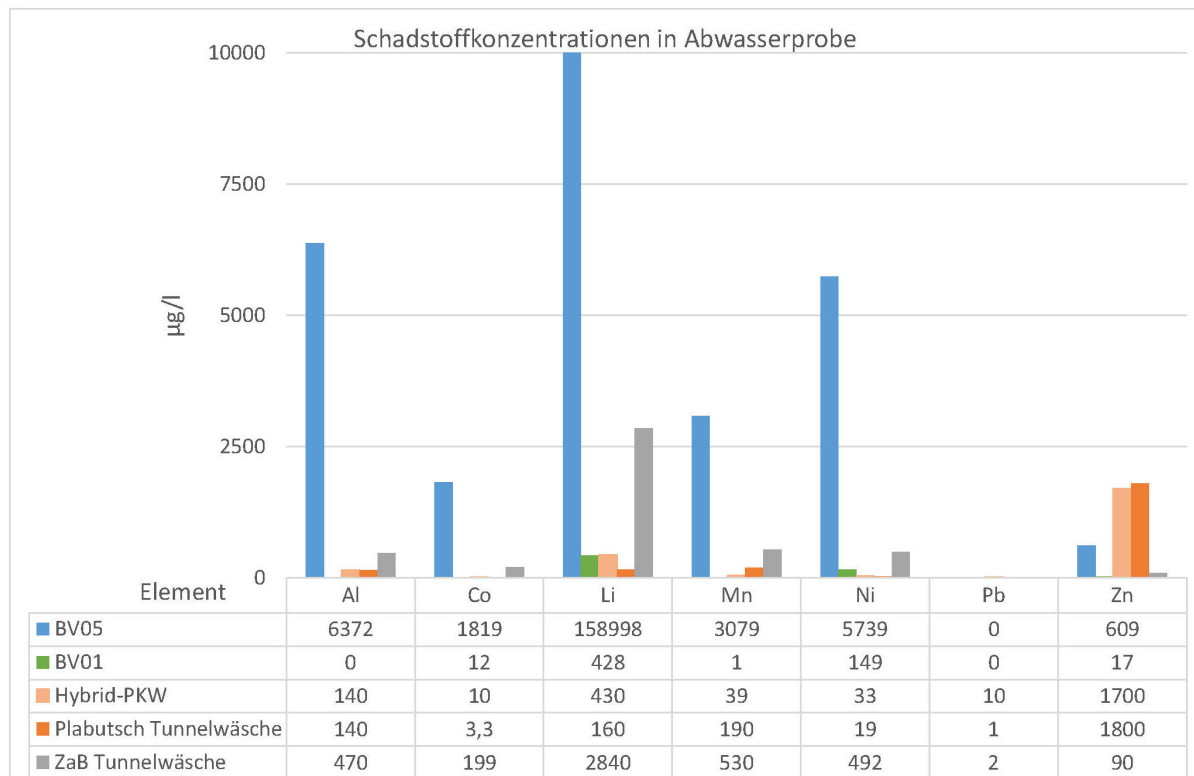


Abbildung 63: Vergleich der Löschwässer mit den Kontaminationen infolge der Tunnelwäsche

Aus der Brandbekämpfung in Tunnels und der angestrebten hohen Kühlwirkung entstehen entsprechende Löschwassermengen, die durch die Oberflächenentwässerung zur Gewässerschutzanlage abfließen. Beispielsweise übersteigen die Spitzenwerte der Löschwasserkontaminationen der BEV-Fahrzeuge BV01 und BV05 in Abbildung 63, wie z.B. bei Nickel und Kobalt, die in der AAEV angegebenen Emissionsbegrenzungen. Aus der Variabilität der Werte erschließen sich jedoch die beim Löschvorgang auftretenden unterschiedlichen für andere Brände erwartbaren Kontaminationen des Wassers. Zu beachten ist zusätzlich die haarscharf an der Emissionsbegrenzung liegende Konzentration von Nickel im Abwasser der Tunnelreinigung des ZaB (nach Durchführung aller Brandversuche). Detaillierte tabellarisch aufgelistete Ergebnisse finden sich in Kapitel 15.2.

## 6 BRANDBEKÄMPFUNG

### 6.1 Versuchsaufbau und Grundlagen

Alle Ergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten Brandversuche werden auf der Grundlage interpretiert, dass sie für jede Feuerwehr in Österreich gelten können und dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht jede Feuerwehr ein Sonderwissen über batteriebetriebene Fahrzeuge haben kann. Eine weitere Grundlage ist, dass bei allen Versuchen der Brand auch die Batterie zur Entzündung gebracht wurde. Dies zeigt sich bei den Brandversuchen sehr deutlich durch das Flammenbild und die Brandentwicklung.

Die verwendeten Fahrzeuge hatten nicht die Merkmale jener BEV wie sie im Verkehr vorkommen (z.B. grüne Nummerntafel). Die Möglichkeiten für die Feuerwehr den Autotyp nach der beschriebenen AUTO-Regel (Kapitel 2.5), somit anhand der Karosserie, allfälligen Kennzeichnungen oder dem behördlichen Kfz-Kennzeichen zu erkennen werden hier nicht mehr näher erläutert. Jedoch ist klar ersichtlich, dass diese grundsätzlich gegebenen Möglichkeiten in Tunnelanlagen aufgrund der Umgebungsbedingungen schwieriger anzuwenden sind.

Im Brandversuch BV03 wurde der Brand mit einem Gasbrenner gezündet, zuerst im Motorraum und danach im Innenraum. Ziel des Versuches war es, das Auto ausbrennen zu lassen und damit wurde keine Intervention der Feuerwehr gesetzt. Der Löschvorgang wurde durchgeführt, nachdem eine ausreichende Branddauer für das Erfassen aller Messwerte erreicht war.

Feuerwehrtechnisch interessant ist das Flammenbild des Brandes im Vergleich zu einem Batteriebrand in einem BEV.

Die langsame Brandentwicklung ist bei einem ICEV PKW üblich, während sich im Vergleich dazu der Brand nach der Batteriezündung – wie im nachstehenden Bild beim Brandversuch BV01 ersichtlich - deutlich schneller entwickelt:

Die nachstehenden Bilder vergleichen die Versuche BV01 und BV03 und zeigen die Situation beim ICEV in BV03 nach etwa 10 Minuten und die Situation beim BEV in Brandversuch BV01 nach bereits einer Minute.



Abbildung 64: BEV aus Brandversuch BV01 nach 1 Minute Branddauer (links), ICEV aus Brandversuch BV03, ca. 10 Min nach Brandbeginn (rechts)

Sehr deutliche Unterschiede zwischen ICE-Fahrzeugen und BEV ergeben sich auch 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.

Die beiden nachstehenden Bilder vergleichen wiederum die Brandversuche BV01 (BEV) und BV03 (ICEV) rechts. Der Unterschied ist deutlich erkennbar und kann für die Feuerwehr ein Hinweis auf einen Batteriebrand sein.



Abbildung 65: Vergleich Flammenbild Batteriebrand (links) und Brand des Innenraumes (rechts)

## 6.2 Löschtechniken beim Brand von BEV

Aus den erläuterten Grundlagen ergaben sich weitere Fragestellungen, welche in den Versuchsreihen behandelt wurden.

- Ist der Einsatz einer Feuerlöschdecke im Tunneleinsatz bei Elektrofahrzeugen sinnvoll?
- Ist der Einsatz einer Löschlanze im Tunneleinsatz bei Elektrofahrzeugen sinnvoll?
- Ist die gängige Löschtaktik mit 2 C-Rohren ausreichend für einen Löscherfolg innerhalb der ersten 2 Minuten, oder ist ein weiteres Rohr erforderlich?

### 6.2.1 Feuerlöschdecke für PKW

Eine PKW-Feuerlöschdecke ist eine Möglichkeit den beginnenden Fahrzeugbrand in der Entstehungsphase zu ersticken und den entstehenden Rauch gleichzeitig zu unterdrücken. Diese Wirkung wird auch erzielt, wenn der Brand bereits weiter fortgeschritten ist. Vor allem die Wirkung der Decke zur Rauchunterdrückung und Reduzierung der Auswirkungen auf Tunnelnutzer und weitere Fahrzeuge ist beim Einsatz in Tunnelanlagen interessant. Da vor allem beim Brand von BEV die Zusammensetzung des Brandrauches untersucht wird und kritisch betrachtet wird, erscheint der Einsatz einer PKW-Löschdecke umso interessanter, weshalb die Löschdecke bei den Brandversuchen eingesetzt wurde.

Die Feuerlöschdecken bestehen aus Silikonglasfasern und sind grundsätzlich zur mehrmaligen Anwendung gedacht, hierbei gibt es allerdings unterschiedliche Produkte am Markt. Zur Anwendung kam eine 6x8 m große Decke eines namhaften Herstellers. Das angewendete Produkt ist zwar als Einwegprodukt angeschrieben, es wird allerdings die mehrmalige Verwendungsmöglichkeit in Aussicht gestellt.

Verwendet wurde die Decke beim Brandversuch BV01. Nachdem der Brand von der Batterie ausgeht, entwickelt er sich sehr schnell. Berücksichtigt man die Zeiten bis zum Eintreffen der Feuerwehr (Alarmierung, Anfahrt, Erkundung) muss man davon ausgehen, dass das Fahrzeug in Vollbrand steht. Bei diesem Versuch wurde die Löschdecke nach einer Branddauer von ca. 8 Minuten angewendet.

Grundsätzlich gestaltete sich der Einsatz schwierig, weil die Löschdecke zu klein war - und das, obwohl es sich bei dem Versuchsträger um ein Kompaktfahrzeug handelte. Nachdem der Trupp die Decke über das Auto gezogen hatte und vor dem Auto auf den Boden legte, entstand im Heckbereich eine Lücke, aus der sofort Flammen und Rauch entweichen konnten. Zahlreiche Versuche von Herstellern zeigen, dass das Format an sich ausreichend sein sollte, um einen Pkw vollflächig abzudecken und den Brand zu ersticken. Nachgelagerte Trockenversuche bestätigen die ausreichende Größe, trotzdem hat der Einsatz bei genanntem Brandversuch nicht funktioniert. Es konnte allerdings kein fehlerhaftes Aufbringen des Trupps erkannt werden, die Decke entfaltete sich ordnungsgemäß. Die hohe Branddynamik sowie die weitgehend ungestörte Versorgung des Brandherdes mit Sauerstoff aus der Batterie scheinen sich hier unvorteilhaft ausgewirkt zu haben.





Abbildung 66: Löschdecke auf BEV (© TU Graz, Lunghammer)

Es zeigt sich, dass der Brandrauch durch die Decke durchgeht, er wird aber generell heller und weniger, wodurch eine bessere Sicht entsteht.



Abbildung 67: Brand des BEV vor und nach Anwendung der Löschdecke

An der linken Ulmenseite sieht man nach dem Aufbringen der Decke nicht nur die Fluchtwegbeleuchtung, sondern auch die Einrichtung im oberen Bereich. In diesem Beispiel hat der Einsatz der Decke letztendlich keine eindeutig vorteilhaften Auswirkungen für die Rauchunterdrückung, weil sich immer wieder, je nachdem auf welcher Seite die Lage der Decke korrigiert wird, Öffnungen ergeben aus denen Flammen und Brandrauch entweichen können.

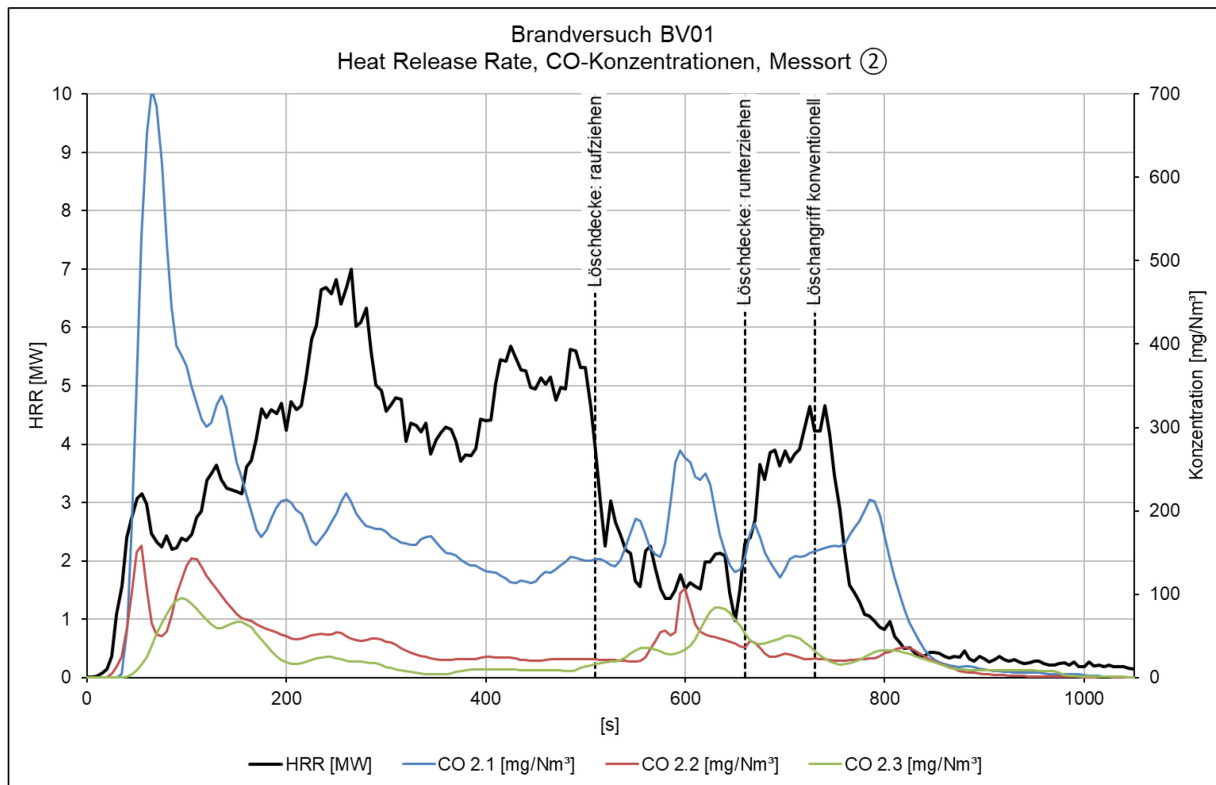


Abbildung 68: HRR und CO Konzentrationsverlauf beim Brandversuch BV01

In Abbildung 68 ist eine Auswirkung des Einsatzes der Löschdecke auf die HRR eindeutig erkennbar. Die maximale HRR wird nach etwa 250 Sekunden erreicht, nach 500 Sekunden scheint sich die HRR im Bereich von 5 MW einzustellen und wird mit dem Aufbringen der Decke auf unter 2 MW reduziert. Dabei ist noch einmal zu erwähnen, dass die Decke nicht so aufgebracht werden konnte, wie es vorgesehen ist. Dies bedeutet, dass der Brand und der Rauch nicht vollständig unterdrückt werden konnten.

Die Wirkungsweise der Decke zeigt sich dennoch deutlich, da nach der Entfernung der Decke die HRR wieder auf über 4 MW ansteigt. Der Einsatz der Löschdecke wird nach 660 Sekunden aufgegeben, da eine Fixierung über dem Brandherd nicht machbar war und sich somit das gewünschte Ergebnis nicht eingestellt hat. Es zeigt sich ein sofortiger Anstieg der HRR. Der darauffolgende Löschangriff mit 235 l/Min Wasser beginnt nach 720 Sekunden; reduziert die HRR und zeigt nach 80 Sekunden eine deutliche Wirkung, bis „Brand aus“ erfolgte.

Nach in Summe 2 Minuten war der Löschangriff erfolgreich und es waren bis zum endgültigen „Brand aus“ nur mehr vereinzelte Nachlöscharbeiten erforderlich (siehe dazu Kapitel 6.3).

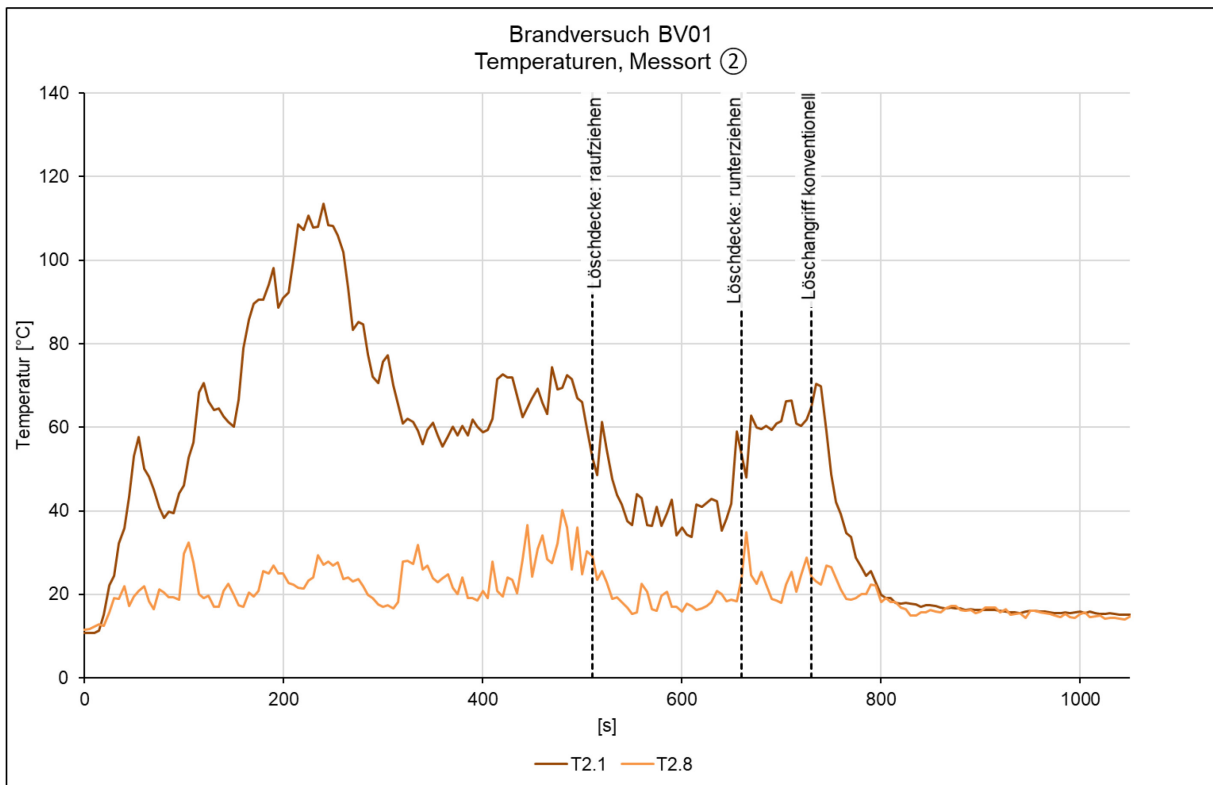


Abbildung 69: Temperatursensoren im Tunnelquerschnitt bei BV01

Der Temperaturverlauf in Abbildung 69 zeigt die Sensoren 2.1 (16 m nach dem Fahrzeug an der Firste) und 2.8 (16 m nach dem Fahrzeug in Bodennähe). Während bei dem höheren Wert an der Firste der Einsatz der Löschdecke und der Einsatz der Löschmaßnahmen deutlich erkennbar ist, zeigt der Wert in Bodennähe keine Veränderung.

Zusammenfassend zeigt sich für den Einsatz einer Feuerlöschdecke, dass sie speziell beim Elektrofahrzeugbrand aus der Batterie kein probates Mittel ist, weil sich der Brand sehr schnell entwickelt und damit die Decke erst in der Vollbrandphase durch die Feuerwehr aufgebracht werden könnte. Der Batteriebrand ist dabei zusätzlich ungünstig, weil die Flammen im unteren Bereich seitlich am stärksten sind und durch die Thermik das Niederhalten der Decke schwierig ist. Ziel beim Aufbringen der Decke ist es, sie möglichst eng, ohne Luftpolster zwischen der Decke und dem Fahrzeug, anzubringen und diese Methode ist durch die starken Flammen in Bodennähe sehr schwierig. Zudem kann sich der Hauptmechanismus der Decke, ein Sauerstoffentzug am Brandherd, nicht entfalten, da die Batterie genügend Sauerstoff enthält um den Brand weiterzuführen. Für weitere Erkenntnisse wären dazu fortführende Versuche erforderlich, dieser durchgeführte einzelne Versuch ist für eine definitive Aussage nicht ausreichend und dient lediglich einer grob richtungsweisenden Aussage.

Demnach ist ein mögliches Einsatzgebiet in Tiefgaragen als erweiterte Löschhilfe denkbar, wenn geschultes Personal des organisatorischen Brandschutzes bereits in der Phase des

Entstehungsbrandes reagieren könnte und eine mögliche Ausbreitung auf weitere Fahrzeuge mit dem Einsatz einer Feuerlöschdecke unterbinden könnte.

## 6.2.2 Löschanze

### 6.2.2.1 Anwendung an einem Batterie-Pack

In einem Versuch wurde ein vollständigen Batteriepack eines BEV durch Zündung mit NaCl zum Thermal Runaway und in weiterer Folge zum Vollbrand gebracht. Die Brandentwicklung erfolgte wiederum sehr schnell, wie in den nachstehenden Bildern in Abbildung 70 zu erkennen ist. Die folgenden Bilder zeigen die Reaktion einer Batterie bei der Zündung durch Einfüllen von NaCl, wodurch eine Kurzschlussreaktion erzeugt wird. Nach der Zündung wurde die Löschanze seitlich in das Modul eingetrieben und der Löschvorgang eingeleitet.



*Abbildung 70: Zündung der Batterie durch spontane Kurzschlussreaktionen nach Einfüllen von  $\text{NaCl}_{aq}$*

Für diesen Löschversuch wurde eine 1m lange Löschanze aus Edelstahl mit isoliertem (bis 1.000 V) Haltegriff und einer Anschlusskupplung "Storz D" verwendet. Als Zubehör stand eine eigene Haltestange, quasi als Armverlängerung, zur Verfügung.



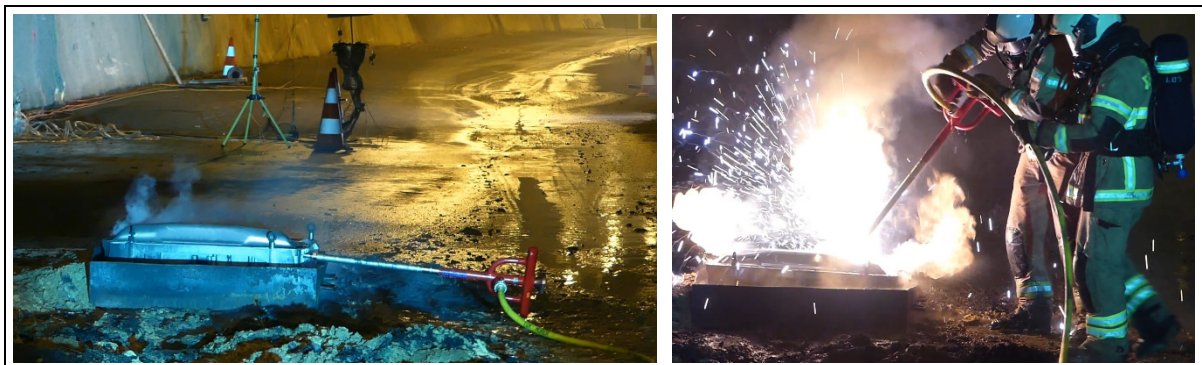


*Abbildung 71: Einbringung der Löschanze*

Das Einbringen der Lanze gestaltete sich schwierig und zeigt, dass Übung und Vorwissen über Wirkungsweise und Gefahren des Einsatzes einer Löschanze erforderlich sind. Vor allem dann, wenn man die Löschanze 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 zufolge hatte.

Nachdem die Lanze richtig eingetrieben wurde konnte der Brand rasch unter Kontrolle und in weiterer Folge auch zeitnah zum vollständigen Ausgehen gebracht werden.

Ungefähr 4 Minuten später wurde die Lanze entfernt und die Batterie zeigte äußerlich keine weiteren Reaktionen, wie am folgenden linken Bild in Abbildung 72 ersichtlich ist. Das rechte Bild zeigt die Reaktion, nachdem die Löschanze anschließend an einer anderen Stelle in diese Batterie eingetrieben wurde. Es kam wiederum zu einer heftigen Reaktion.

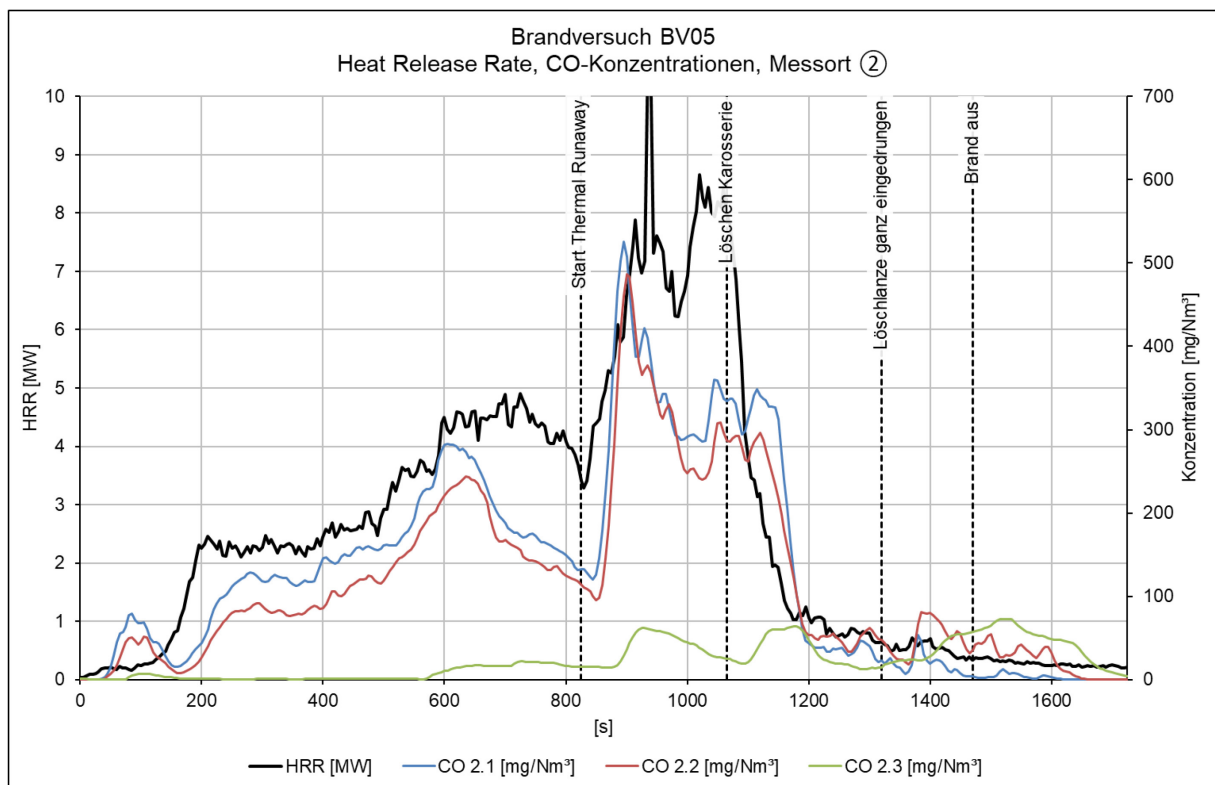


*Abbildung 72: Gekühlte Batterie (links) und nochmaliges Eintreiben der Löschanze in das Batteriegehäuse*

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. Die Verwendung erfordert umfassendes Wissen über den Aufbau von Batterien, die Wirkungsweise und Gefahren, wie etwa Stichflammen und Kurzschlussreaktionen (z.B. Lichtbögen, Körperdurchströmungen) beim Eintreiben, welches flächendeckend von Mitgliedern in Freiwilligen Feuerwehren (FF) nicht gefordert werden kann. Es braucht die spezielle Auseinandersetzung mit diesem Thema und dafür gibt es für FF zu viele weitere Themen, die aktuell erforderlichen Ausbildungen sind bereits sehr fordernd. Speziallösungen wie Löschlanzen für BEV sind im System der Freiwilligen Feuerwehren nicht vorgesehen.

#### 6.2.2.2 Anwendung bei einem Fahrzeugbrand (BV05)

Wie in Kapitel 6.1 diskutiert zeigt das Flammenbild, dass der Einsatz der Lanze im Vollbrandszenario nicht möglich ist. Daher wurde vorweg ein konventioneller Löschangriff gestartet. Der Löschvorgang mit einem C-Rohr dauert 80 Sekunden mit einem Wasserverbrauch von 300 l und reduziert die HRR auf ca. 1,5 MW (siehe Abbildung 73). Durch diesen Löschvorgang konnten die Flammen soweit unterdrückt werden, dass der Einsatz der Löschlanze möglich wurde.





*Abbildung 73: Verlauf der HRR und der CO Konzentration bei BV05*

In der Zeit zwischen dem Ende des ersten Löschvorganges und dem Einsatz der Löschlanze wurden keine Lösch Tätigkeiten durchgeführt, trotzdem ist die HRR weiter gesunken und es konnte der Einsatz der Löschlanze gut vorbereitet werden.

Die Löschlanze wirkt in diesem Brandversuch sehr gut und schnell, wenn man sie fachgerecht einbringt. Die beim Versuch verwendete Löschlanze verfügt über Zusätze wie eine Verlängerungsstange zum Aufrechterhalten der Lanze, sodass beim Einschlagen mit dem Hammer (TNT-Tool) ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden kann. Diese Vorrichtung ist sehr hilfreich und empfehlenswert.

Aufgrund der Erkenntnisse im vorangegangenen Brandversuch mit dem „Battery-Pack“ zeigte sich, dass der Einsatz der Lanze bei einer unbeschädigten Batterie nicht sinnvoll ist, jedenfalls aber bei einem Batteriebrand in diesem Bereich sehr effizient eingesetzt werden kann, wenn die Zugangsmöglichkeiten bestehen und die Lage der Batterie bekannt ist.

Fachwissen und eine entsprechende Übung in der Handhabung sind für den Einsatz jedenfalls erforderlich, deshalb können Löschlanzen für BTF in entsprechenden Betrieben, für BF oder für Stützpunkt-Feuerwehren - welche die Möglichkeit haben die Lanze zu transportieren und sich damit regelmäßig beschäftigen - durchaus geeignet sein. Nachdem in diesem Forschungsprojekt Lösungen für jede Feuerwehr gesucht werden, kann sie für einen allgemeinen Einsatzfall nicht empfohlen werden. Die im ÖBFV Informationsblatt angeführte Verwendungsempfehlung bleibt demnach aufrecht.

### **6.2.3 Löschleitung mit Hohlstrahlrohr**

Die Anwendung von Löschleitungen mit einem Nenndurchmesser zwischen 42 und 52 mm mit angeschlossenen Strahlrohren als wasserführenden Armaturen, sogenannte C-Rohre, sind das gängigste Mittel der Feuerwehr in der Brandbekämpfung. Beim Einsatz in UVA besteht der Löschrupp grundsätzlich aus fünf Personen, die zwei C-Rohre zur Brandbekämpfung vornehmen können. Aufgrund der zu erwartenden hohen Löschwasserrate bei BEV-Bränden wird diese Vorgehensweise anhand des Brandversuches BV05 untersucht.

Wie aus Abbildung 73 ersichtlich, ist der Verlauf der HRR durchaus mit dem Verlauf aus dem Brandversuch BV01 zu vergleichen und untermauert damit die Unterschiede zu einem ICEV Pkw Brand. Die HRR verläuft im Bereich von 2-3 MW und erhöht sich mit der Fortdauer des Brandes auf ein Maximum von etwa 5 MW. Dadurch dass die HRR während der Befüllung nicht mehr ansteigt erkennt man, dass für das Fahrzeug in diesem Bereich das Maximum erreicht ist.

Mit dem Beginn des Batteriebrandes erhöht sich die HRR schnell und auf einen deutlich höheren Wert. In diesem Fall ist nicht sichergestellt, dass der Brand aus dem Innenraum auf die Batterie übergegriffen hatte. Um eine definitive Zündung der Batterie zu erreichen, wurde die Batterie nach ca. 10 Minuten durch Füllung mit  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$  in einen Kurzschlusszustand und somit zum Brand gebracht.

Der schnelle Anstieg durch den Batteriebrand betrifft deshalb im Falle eines technischen Defektes oder einer anderen Ursache vor allem die Phase der Selbstrettung und nicht vorrangig die Phase der Intervention der Feuerwehr. In diesem Versuch wurde der Einsatz der Feuerwehr vier Minuten nach Beginn des Thermal Runaways und nachfolgendem Vollbrand der Batterie gestartet. Zu diesem Zeitpunkt lag die HRR mit 8 MW sehr hoch.

Der Löschvorgang mit einem C-Rohr dauert 80 Sekunden mit einem Wasserverbrauch von 300 l und reduziert die HRR auf ca. 1,5 MW. Durch diesen Löschvorgang konnten die Flammen soweit unterdrückt werden, dass der Einsatz der Löschanze möglich wurde.



*Abbildung 74: Löschtrupp beim Einsatz gegen Ende des Brandversuches BV05*

Bei diesem Szenario wurde ein Unfall mit einem zweiten (blauen) Fahrzeug simuliert, um die Anzahl der vorzunehmenden Löschleitungen zu überprüfen. Dieses blaue Fahrzeug wurde im Abstand von ca. 2,5 m zum Brandobjekt positioniert. Die Arbeit der Feuerwehr mit einem C-Rohr scheint in diesem Fall zu gering, es ist keine Riegelstellung und keine Strukturkühlung möglich. Grundsätzlich sieht die Einsatztaktik 2 C-Rohre vor und damit könnte neben dem Löschvorgang mit einem C-Rohr die Strukturkühlung und die Riegelstellung mit dem zweiten C-Rohr vorgenommen werden. Noch besser erscheinen im Fall eines PKW-Brandes mit einem gleichzeitigen Unfall 3 C-Rohre, um alle Aufgaben (Brandbekämpfung, Strukturkühlung und Riegelstellung) abdecken zu können.

Gemessen wurden die Temperaturverhältnisse zusätzlich auch an und im zweiten Fahrzeug, um die Notwendigkeit und Möglichkeiten einer allfälligen Fremdrettung feststellen zu können.

An diesem Unfallfahrzeug wurden zusätzliche Temperatursensoren angebracht (Abbildung 75).

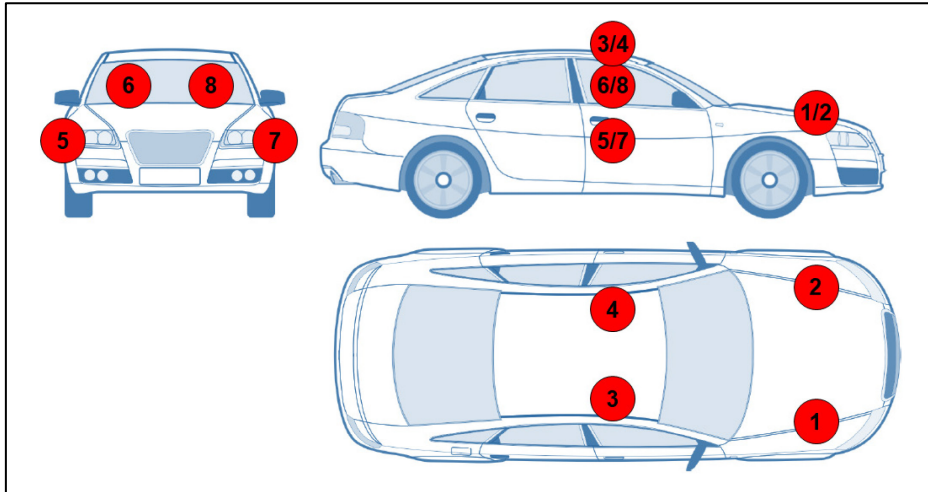


Abbildung 75: Lage der Temperatursensoren am zweiten beteiligten Fahrzeug

Die Situation im Unfallfahrzeug stellt sich nach Auswertung der Daten wie folgt dar. Die Temperatursensoren 1 und 2 an der Motorhaube außen zeigten folgende Ergebnisse:

- Sensor 1 auf der brandabgewandten Seite, maximal 30 Grad, sehr kurze Spitze auf 35 Grad.
- Sensor 2 erreicht beim konventionelle Brand maximal 38 Grad und geht dann bereits zurück, erst nach der Zündung der Batterie steigt die Temperatur wieder und dabei auf ein Maximum von 50 Grad mit dem Maximum der HRR.

Die Temperatursensor 3 und 4 am Dach des Fahrzeuges außen zeigten folgende Ergebnisse:

- Sensor 3 auf der brandabgewandten Seite verläuft parallel zu Sensor 1 und hat ebenso beim konventionellen Brand einen Maximalwert von unter 30°C. Er steigt bis zum Löschvorgang der Feuerwehr auf maximal 38 Grad.
- Sensor 4 verläuft parallel zum Sensor 2, ist allerdings niedriger und erreicht beim konventionellen Brand maximal 30 Grad, beim Batteriebrand maximal 35 Grad.
- Die Sensoren 5, 6 7 und 8 im Inneren des Fahrzeuges registrierten keine relevanten Temperaturerhöhungen und bleiben während des konventionelle Brandes im Bereich unter 20 Grad Celsius. Auch die Zündung der Batterie hat in diesem Bereich im Vergleich zu den anderen Sensoren keine steigende Temperatur zur Folge. Die Temperatur erhöht sich lediglich kurzfristig kurz nach dem Beginn des Löschvorganges auf 25 Grad Celsius.

Aus dieser Versuchsstellung kann wie folgt geschlossen werden:

- Der Brand der Batterie erhöht die Temperatur an der Motorhaube merklich, bleibt aber in Summe niedrig und unterhalb von relevanten Werten. Es kam zu keinem

Brandüberschlag auf das zweite Fahrzeug, welches zeitweise mit Wasser gekühlt wurde.

- Die Atmosphäre im Auto ist temperaturseitig unkritisch und auch im Außenbereich herrschen keine Temperaturen die einen Überschlag des Brandes auf das zweite Auto zur Folge haben könnten, in diesem Fall ist eine Riegelstellung der Feuerwehr nicht notwendig.
- Die Temperatur ist beim Batteriebrand höher als beim konventionellen Autobrand.
- Die Temperatursenkung zum Beginn der Füllung mit  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$  ist vom Brandverlauf her gegeben und hat keine Relevanz. Die doch stärkere Absenkung der Temperatur kurz vor dem Beginn des Batteriebrandes liegt daran, dass das blaue Auto mit einem C Rohr gekühlt wurde, um zu verhindern, dass das Fahrzeug ausgast und zum Brandgeschehen mit beiträgt<sup>4</sup>.

Auch aus diesem Versuch leitet sich keine Änderung der Vorgehensweise der Feuerwehr ab. Die bisherigen taktischen Konzepte können bestätigt werden.

## 6.3 Löschmittel beim Brand von BEV

### 6.3.1 Wasser

Der Einsatz des Löschmittels Wasser wurde bei BEV in den Versuchen BV01 und BV05 und bei ICEV Fahrzeugen im Versuch BV03 angewendet. Nachdem aus bisherigen Versuchen bekannt ist, dass der alternative Einsatz von Schaummittel, Metallbrandpulver oder Gellöschern durch die schlechtere Kühlwirkung keinen besseren Einsatzerfolg bringt, sollte in den genannten Versuchen vorrangig überprüft werden, welche Löschwassermenge für die Brandbekämpfung eines BEV erforderlich ist. Dafür wurde auch ein Vergleich bei den unterschiedlichen Antriebsarten angestrebt. Verwendet wurden C-Hohlstrahlrohre mit einem Wasserdurchfluss von 235l/min.

---

<sup>4</sup> Während des Versuchs war nicht bekannt, dass die Temperatur dafür zu niedrig ist, augenscheinlich erschien diese Kühlung erforderlich.

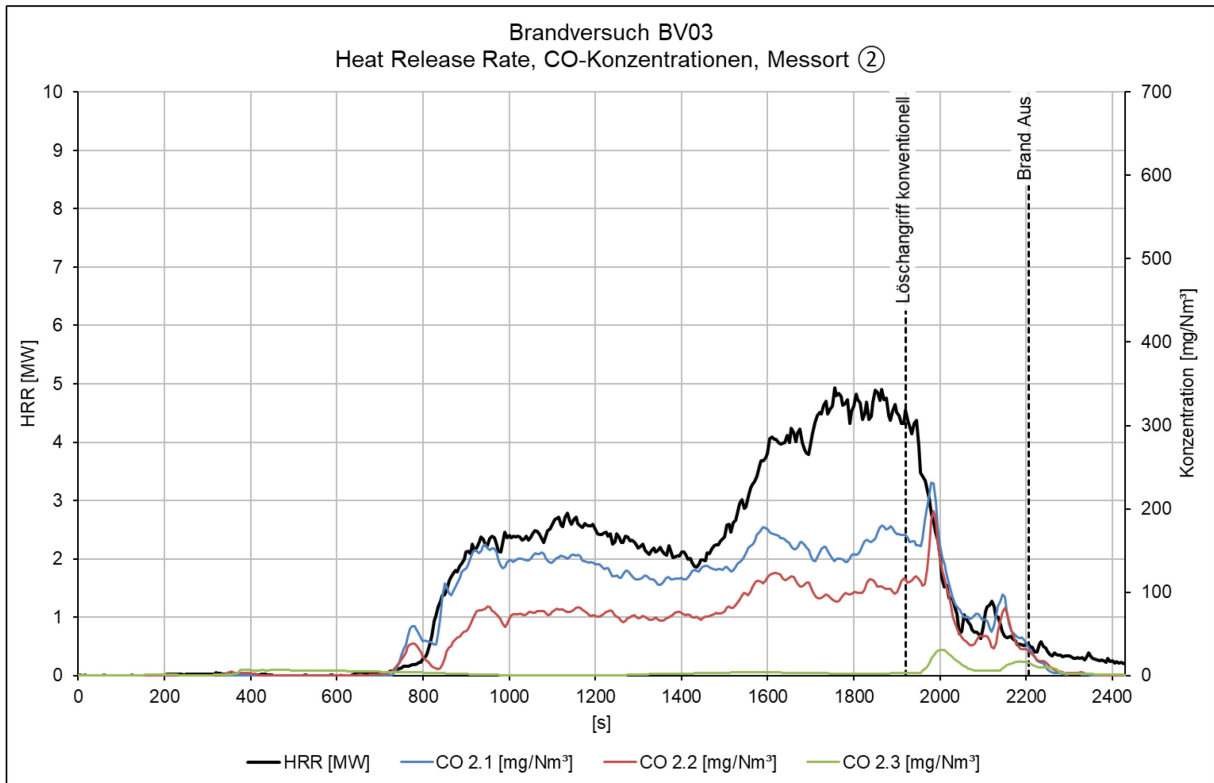


Abbildung 76: Verlauf der HRR und der CO Konzentration beim Brandversuch BV03

Der Brand im Motorraum zeigt zu Beginn des Versuches keine Auswirkungen auf die HRR, erst nach der zusätzlichen Beflammung des Innenraumes des Fahrzeuges begann sich der Brand zu entwickeln. Bei Sekunde 1400 wurde der Brand ein weiteres Mal mit dem Brenner unterstützt, woraus sich der Anstieg der HRR erklärt (Abbildung 76).

Der Löschvorgang wurde sehr spät eingeleitet, um ausreichend Messergebnisse aus dem Brandrauch zu erhalten. Nach etwa zwei Minuten und einem Verbrauch von 470 l Wasser war der Brand gelöscht, vereinzelt brannte noch austretendes Betriebsmittel.

Vergleicht man den Brandverlauf mit einem echten Brandfall und der anzunehmenden Brandentstehung im Motorraum, dann wäre die Intervention der Feuerwehr in diesem Fall so zeitgerecht, dass ein Löschvorgang bei einer HRR von unter 3 MW stattfinden könnte.

Beim Beginn des Löschvorganges herrschten hinsichtlich der Wärmefreisetzung in etwa die gleichen Bedingungen wie beim BV01 Batteriebrand nämlich im Bereich von 4,5 MW. Das ist beim konventionellen Auto ein bekannter Maximalwert, während beim BEV auf die HRR im Brandversuch BV05 hinzuweisen ist. Dabei wurden Wärmefreisetzungsraten bis 8 MW gemessen.

Beim Brandversuch BV01 wird der Einsatz der Löschdecke nach 660 Sekunden aufgegeben, es zeigt sich ein sofortiger Anstieg der HRR. Der darauffolgende Löschangriff beginnt nach 720 Sekunden und zeigt mit 2 C-Löschleitungen nach 80 Sekunden eine deutliche Wirkung. Die HRR sinkt dabei auf 0,5 MW, der Wasserverbrauch in diesem Zeitraum war ca. 400 l. Nach in Summe zwei Minuten war der Löschangriff erfolgreich und es waren bis zum endgültigen „Brand aus“ nur mehr vereinzelte Nachlöscharbeiten erforderlich.

Der Löschwasserverbrauch ist bei den durchgeführten Versuchen generell gering und beim BEV Brand nicht wesentlich höher als beim Brand eines ICEV Fahrzeuges, anders als wie bisher angenommen. Eine Ursache dafür liegt vermutlich daran, dass die Vorbrenndauer jeweils lange war und damit die Brandlast soweit reduziert wurde, dass der Löscherfolg schnell erzielt werden konnte.

Letztendlich stellte sich mit dem Löschmittel Wasser und der sehr guten Kühlwirkung ein schneller Löscherfolg ein. Man darf dabei nicht vergessen, dass ein Batteriebrand angenommen wird und dadurch das Wasser durch das zerstörte Gehäuse sehr gut in den Batterieinnenraum eindringen kann.

Was passiert nun, wenn nicht die Batterie in Brand gerät, sondern andere Teile eines BEV? In diesem Fall wird es für die Feuerwehr schwierig in das Innere der Batterie Wasser einzubringen, dafür wäre beispielsweise die Löschlanze geeignet. Beim Versuch BV05 zeigte sich allerdings, dass bei einem Vollbrand eines BEV die Batterie unversehrt geblieben ist und damit ein gewöhnlicher Löschangriff durchgeführt werden konnte.

Aus diesem einzelnen Versuch kann keine Regel abgeleitet werden, jedoch sind die Ergebnisse vielversprechend.

### **6.3.2 Netzmittel**

Ein Löschmittelzusatz kann zum Löscherfolg beitragen, wurde aber aufgrund anderer Fragestellungen im Projekt nicht mehr behandelt und scheint auch für die Feuerwehr als nicht zwingend erforderlich. Die Hauptfrage beim Brand ist, ob und wie man in das Innere der Batterie Löschwasser einbringen kann. Ob dabei Wasser oder Wasser mit einem Zusatzmittel gemischt eingebracht wird erscheint aus heutiger Sicht für den Löscherfolg nicht maßgebend und wurde aus diesem Grund im Projekt nicht weiter untersucht.

## **6.4 Zusammenfassung**

Zusammenfassend zeigte sich für den Einsatz einer Feuerlöschdecke, dass sie ihre Funktion erfüllen kann, aber speziell beim Elektrofahrzeugbrand aus der Batterie kein wesentlicher Mehrwert für den Feuerwehreinsatz aus den Versuchen ableitbar ist. Ziel beim Aufbringen der



Decke ist es, sie möglichst eng, ohne Luftpolster zwischen der Decke und dem Fahrzeug, anzubringen und diese Methode ist durch die starken Flammen in Bodennähe sehr schwierig. Für weitere Erkenntnisse wären dazu fortführende Versuche erforderlich, dieser hier durchgeführte einzelne Versuch ist für eine definitive Aussage nicht ausreichend und dient lediglich einer grob richtungsweisenden Aussage.

Demnach ist ein mögliches Einsatzgebiet in Tiefgaragen als erweiterte Löschhilfe denkbar, wenn geschultes Personal des organisatorischen Brandschutzes bereits in der Phase des Entstehungsbrandes reagieren könnte und eine mögliche Ausbreitung auf weitere Fahrzeuge mit dem Einsatz einer Feuerlöschdecke unterbinden könnte.

Der Einsatz einer Löschlanze der genannten Art funktioniert sehr gut, erfordert allerdings ein umfassendes Wissen über Batterien und mögliche Gefährdungen beim Einbringen der Lanze. Demnach ist auch dieses Gerät für Spezialkräfte eine sinnvolle Ergänzung, erscheint jedoch für die breite Verwendung jeder FF nicht tauglich.

Der Löschwasserverbrauch ist bei den durchgeführten Versuchen beim BEV Brand nicht wesentlich höher als beim Brand eines ICEV Fahrzeuges, anders als bisher angenommen und aus Einsätzen bekannt. Eine Ursache dafür liegt vermutlich an der durch die Art der Zündung mit  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$  verursachten schnellen Brandentwicklung, sowie an der Vorbrenndauer bis zum Beginn des Löschvorganges. Dadurch wurde die Brandlast bereits soweit reduziert, dass der Löscherfolg schnell erzielt werden konnte. Man muss weiterhin davon ausgehen, dass für die Brandbekämpfung bei BEV 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 oder mit Wasser mit Zusatzmittel erfolgt erscheint nicht maßgebend für den Einsatzerfolg.

## 7 NUMERISCHE SIMULATIONEN

Im Arbeitspaket 5 wurde ein numerisches Modell zur Simulation der Brandauswirkungen von batterie-elektrischen Fahrzeugen in Tunnelanlagen entwickelt. Dieses bildet alle wesentlichen Aspekte (thermische Gefahr und toxische Gefahr) für Tunnelnutzer ab und liefert wichtige Eingangsdaten für die darauf aufbauenden Risikobetrachtungen.

Bevor das numerische Modell auf ausgewählte Szenarien respektive zur Skalierung der Batteriebrände bis hin zu Bränden von Bussen eingesetzt wurde, wurden die im Zuge der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Messdaten zur Validierung des Simulationsmodells herangezogen. Es wurden drei verschiedene CFD Codes zur Simulation der BEV Brände eingesetzt. Ein Abgleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment zeigte, dass der CFD Solver Fire Dynamics Simulator (FDS) die besten Ergebnisse lieferte (siehe dazu auch Kapitel 7.2). Aus diesem Grund wurde entschieden, die Skalierungsrechnungen mit FDS durchzuführen.

### 7.1 Erstellung Simulationsmodell

Das Simulationsmodell umfasst alle wichtigen Eigenschaften und Effekte, die bei einem Brand eines BEV in einem Tunnel von Relevanz sind. Neben der Tunnelgeometrie, welche von der realen Geometrie des Versuchsorts (ZaB - Eisenbahntunnel West) abgeleitet wurde, wurde auch eine vereinfachte Geometrie (Quader) der Versuchsträger berücksichtigt. So wurden die Versuchsträger durch einen Quader mit den Abmaßen ( $L \times B \times H = 5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ ) modelliert (Abbildung 77). Zudem wurden auch entsprechende Monitorpunkte für die Temperaturen und Schadstoffkonzentrationen in das Modell implementiert, welche die applizierten Sensoren bei den Realbrandversuchen widerspiegeln. Diese Monitorpunkte lieferten die Vergleichsdaten zu den Messdaten für die Validierung der Simulationen.

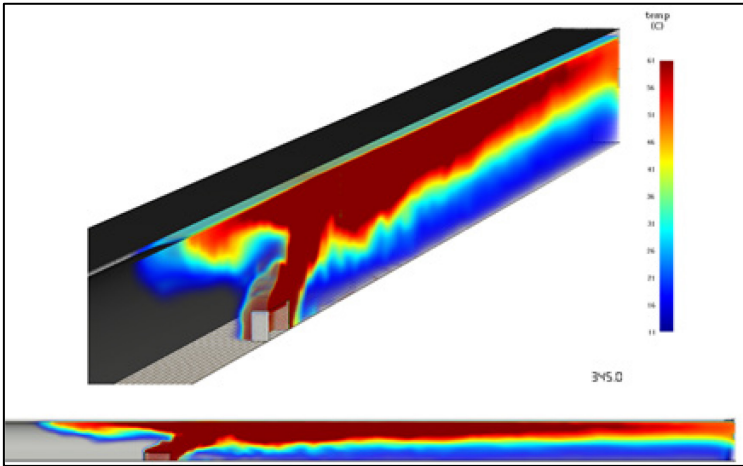


Abbildung 77: Längsschnitt und Schrägansicht von oben der verwendeten Geometrie in FDS inkl. Darstellung der Temperaturverteilung während BV01

Ein wesentlicher Aspekt von CFD Simulationen sind die zu definierenden Randbedingungen. Im Fall der gegenständlichen Untersuchungen umfassen diese sowohl Strömungs-Randbedingungen als auch thermische-Randbedingungen und Freisetzungsraten für die Schadstoffe CO, CO<sub>2</sub>, HF und HCl.

Als Strömungsrandbedingung wurden die aufgezeichneten Verläufe der Längsströmungsgeschwindigkeiten als inlet-velocity definiert. Die thermischen Randbedingungen umfassten im Wesentlichen die freigesetzte Wärme als Funktion der Zeit (HRR), sowie die Modellierung der Strahlungswärme respektive der Emissivität der jeweiligen Oberflächen. Mit Hilfe der bei den Realbrandversuchen erfassten Temperaturen vor und nach dem Brandort, wurde eine Energiebilanz aufgestellt, welche Rückschluss auf die Wärmefreisetzungsraten ermöglicht (siehe Kapitel 5.4.2). Die so ermittelte Wärmefreisetzungsraten wurden in den Simulationen Flächen-aliquot auf die Flächen des modellierten Versuchsträgers übertragen. Hierbei sei erwähnt, dass auf Grund der Positionierung des Versuchsträgers im Tunnel und der vorherrschenden Grundströmung jene Quader-Fläche (Rückseite des Fahrzeugs), die entgegen der Grundströmung ausgerichtet ist, nicht als Quellfläche berücksichtigt wurde.

Für die Modellierung der Strahlungswärme wurde von einem Emissionsfaktor von 0,44 ausgegangen, welcher einen üblichen Wert für hochglänzenden Stahl (Fahrzeugkarosserie) darstellt.

Analog zur Wärmefreisetzung wurde mit Hilfe der in unterschiedlichen Höhen gemessenen Schadstoffkonzentrationen über eine Massenbilanzierung auf die Massen-Freisetzungsraten zurückgerechnet. Diese Freisetzungsraten wurden wiederum Flächen-aliquot auf die Geometrie der Fahrzeuge übertragen.

## 7.2 Ergebnisse der Validierungsrechnungen

Für die Validierungsrechnungen wurden die beiden BEV Brandversuche BV01 und BV05 herangezogen. Die Indikatoren für die Eignung des Simulationsmodells sind durch die Verläufe der Temperaturen sowie der Schadstoffkonzentrationen in den definierten Monitorpunkten (=Sensorpositionen) definiert. Dazu erfolgte eine Gegenüberstellung dieser Verläufe aus den Experimenten sowie den numerischen Simulationen (FDS, Converge CFD), siehe Abbildung 78. Speziell die Verläufe aus Experiment und FDS Simulation in Monitorpunkt 2.8 zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung. Die Ergebnisse der Berechnung mit Converge CFD können grundsätzlich ebenfalls als solide eingestuft werden, zeigen jedoch geringfügige Abweichungen.

Die Verläufe aus Monitorpunkt 2.1 zeigen ebenfalls eine grundsätzliche Übereinstimmung zwischen Experiment und FDS Simulation. Diese Übereinstimmung der Temperaturverläufe konnte auch in anderen Höhenlagen (im Diagramm nicht dargestellt) beobachtet werden. Dies ist ein wichtiger Indikator für die korrekte Abbildung der Rauchgasschichtung stromab der Brandquelle und Grundvoraussetzung für valide Eingangsdaten für die Risikobetrachtung.

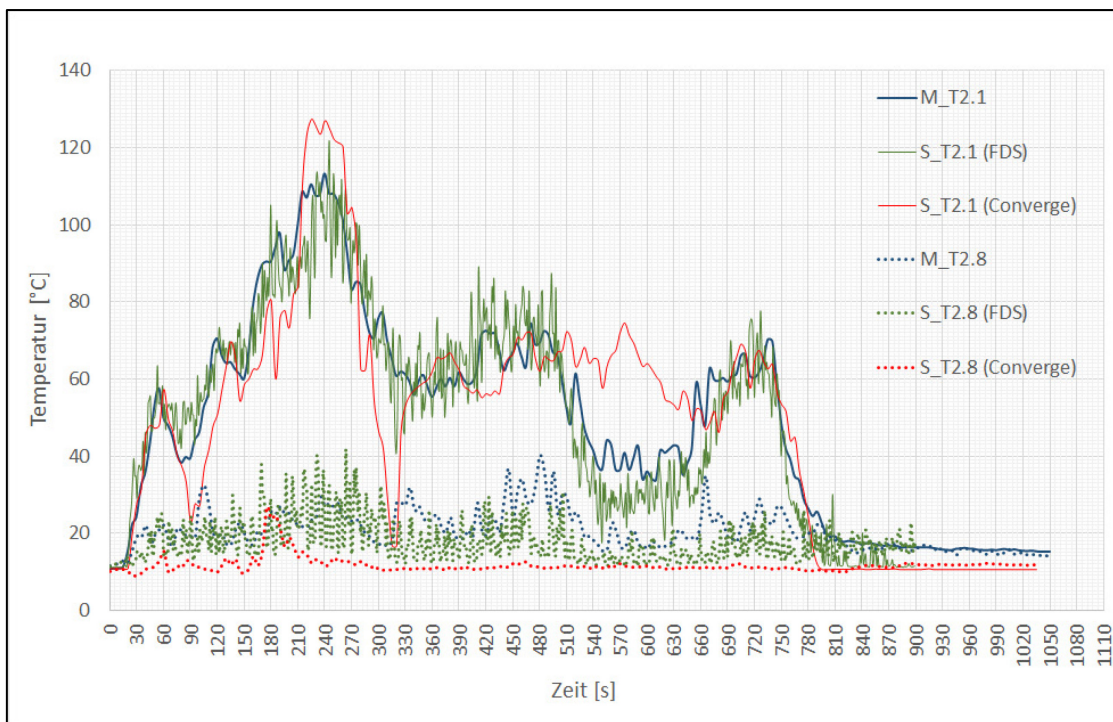


Abbildung 78: Verläufe der Temperaturen in ausgewählten Monitorpunkten während BV01

Analog zum Verlauf der Wärmefreisetzungsrate unterliegen auch die Freisetzungsraten der Schadstoffe einer zeitlichen Abhängigkeit, welche wiederum maßgebend vom Brandverlauf

abhängig ist. Die maximalen aus den Experimenten abgeleiteten Freisetzungsraten der betrachteten Schadstoffe sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Maximal auftretende Schadstoff-Freisetzungsraten während BV01

Schadstoff	Summe
CO	0.023 kg/s
CO <sub>2</sub>	0.770 kg/s
HCl	0.002 kg/s
HF	0.001 kg/s

Diese Freisetzungsraten sowie deren zeitlicher Verlauf wurden in den FDS Simulationen als Randbedingung vorgegeben.

Exemplarisch sei der Vergleich der Massenkonzentrationen von Salzsäure (HCl) aus den Experimenten sowie den FDS und Converge CFD Simulationen für drei unterschiedlichen Höhenpositionen während BV01 gezeigt (siehe Abbildung 79). Es zeigt sich wiederum, dass speziell die in tieferen Höhenpositionen relevanten Konzentrationswerte in der FDS Simulation deutlich besser abgebildet werden. In Hinblick auf die Risikobetrachtung stellen die FDS Ergebnisse somit valide Daten bezogen auf die toxische Einwirkung der betrachteten Schadstoffe auf den menschlichen Organismus dar. Von einer weiteren Verwendung des weitaus komplexeren Modells Converge wurde daher abgesehen.

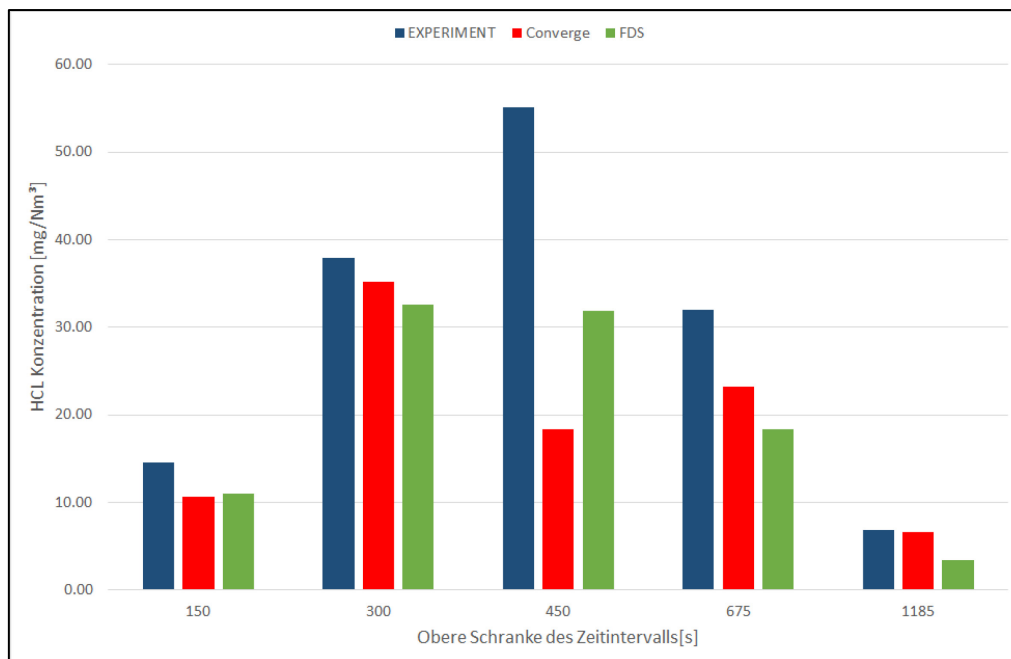


Abbildung 79: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 1 (Firste)

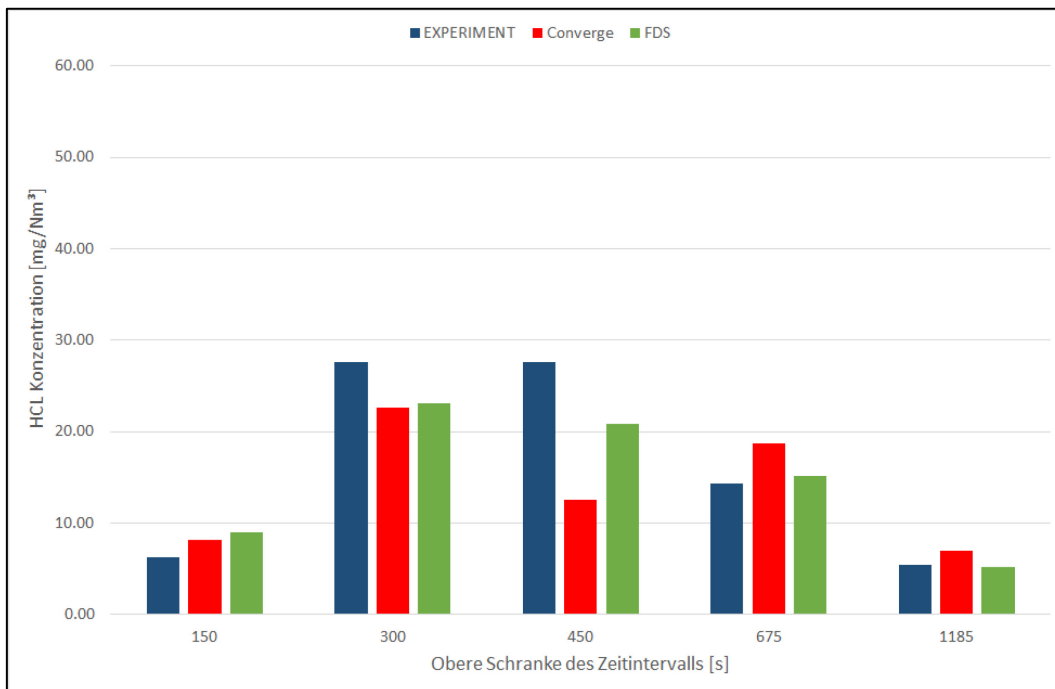


Abbildung 80: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 2 (4 m)

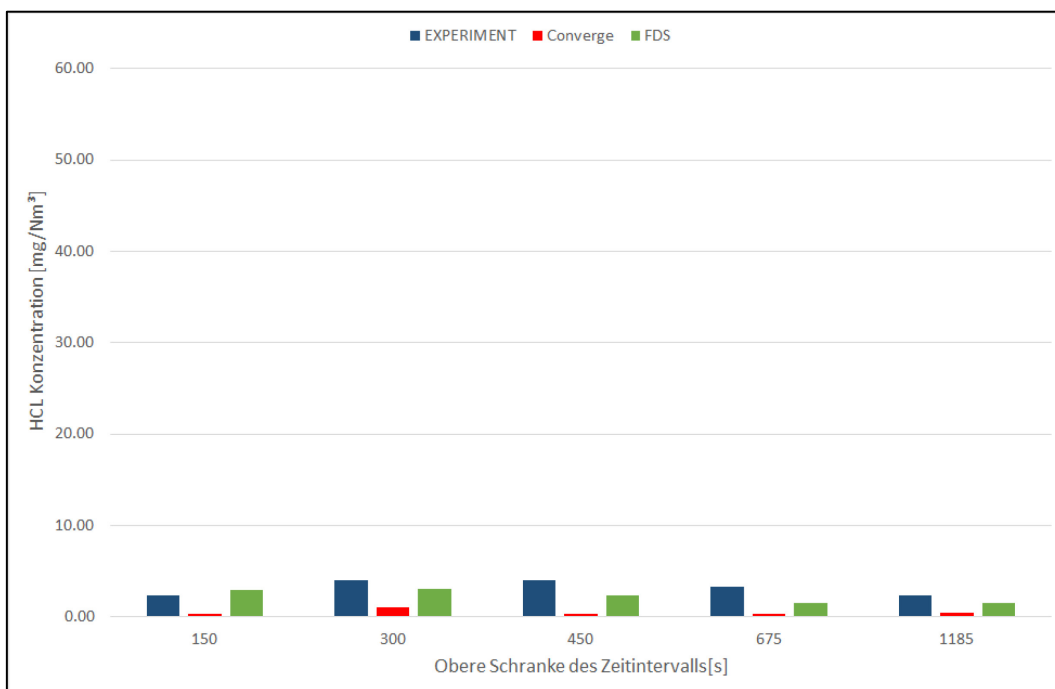


Abbildung 81: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 3 (1.6 m über Fahrbahn)



Grundsätzlich zeigte sich, dass sowohl in Bezug auf die Wärmefreisetzung als auch bezogen auf die Freisetzung von Schadstoffen, die Brandgeometrie einen entscheidenden Einfluss ausübt. So sind die Brände von BEV und ICEV dahingehend zu unterscheiden, dass die Batterien meist in der Bodenplatte des Kfz verbaut sind und bei den Versuchen primär Flammen beobachtet werden konnten, die seitlich aus dem Fahrzeug schlugen. Dieses Erkenntnis zeigte auch Auswirkungen auf die Schichtung von Temperatur und Rauch (Schadstoffkonzentrationen) in den Simulationen.

### **7.3 Skalierung der Eingangsdaten für Busse**

Das im Zuge der Validierungsrechnungen erstellte numerische Modell wurde in weiterer Folge für die Skalierung der BEV Brände hin zu Bränden von BEV-Bussen eingesetzt. Hierbei wurde die Geometrie der Brandquelle entsprechend den Abmaßen (L x B x H = 12.135 m x 2.55 m x 3.12 m) eines derzeit am Markt verfügbaren BEV Bus berücksichtigt.

Die Batterien dieser Omnibusse sind generell am Dach des Busses situiert, sodass sich die Brandgeometrie doch deutlich von jener bei PKW unterscheidet. Hinsichtlich der Schichtung von Rauchgasen hat dieses Setup ebenfalls einen maßgebenden Einfluss. Da sich bereits bei den Simulationen von PKW gezeigt hat, dass eine Freisetzung von Schadstoffen über die Dachfläche des Fahrzeuges nur zu vernachlässigbaren Schadstoff-Konzentrationen in Kopf- respektive Brusthöhe von Menschen führt. Dieses Erkenntnis in Kombination mit der Einbauhöhe der Batterien in Bussen und der Unsicherheit bezüglich des Brandverhaltens größerer Batterien hat zur Entscheidung geführt, die Schadstofffreisetzung bei der Skalierung nicht explizit zu modellieren.

Die Unsicherheit in Bezug auf das Brandverhalten von größeren Batterien, wie sie z.B. in Bussen verbaut werden, ergibt sich aus der Brandursache sowie der Brandausbreitung innerhalb der Batterie. Die Brandausbreitung innerhalb der Batterie ist maßgebend durch die Einbauposition der Battery-Packs respektive dem "Packaging" (Anordnung der Batterie-Module innerhalb des Battery-Packs) bestimmt. Diese beeinflusst das Übergreifen des Brandes von einem Modul auf das nächste. Die Anzahl der gleichzeitig in Brand befindlichen Module ergibt wiederum den Beitrag der Batterie an der gesamten Brandleistung.

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 [65] kann die maximale Brandleistung eines Busses mit 30 MW angenommen werden. Der Verlauf der Brandleistung als Funktion der Zeit wurde wiederum aus der RVS 09.03.11 [40] 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. Der beschriebenen Verlauf der HRR Kurve bei einem ICEV-Bus Brand ist in Abbildung 82 enthalten.

Diese ICEV-Bus Brandkurve stellte die Basis für die Betrachtung von BEV-Bus Bränden dar. Um jedoch 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.

Ausgehend davon, dass der Energieinhalt der Karosserie für ICEV- und BEV-Busse derselbe ist, können die Unterschiede lediglich durch den Energieinhalt des Energieträgers entstehen. Um den Energieinhalt der BEV- Bus-Batterie möglichst realitätsnahe abzubilden wurde eine online Recherche zu den derzeit am Markt verfügbaren BEV-Busse und deren Batteriekapazitäten (Energieinhalt) durchgeführt. Tabelle 28 zeigt eine Übersicht der Batteriekapazitäten der BEV-Busse einiger namhafter Hersteller.

*Tabelle 28: Energieinhalt von ausgewählten, derzeit am Markt verfügbaren BEV-Bussen*

Hersteller	Energieinhalt
A	640 kWh
B	396 kWh
C	385 kWh

Von diesen Daten abgeleitet, wurde eine Batterie mit einem Energieinhalt von 400 kWh in den Skalierungs-Rechnungen berücksichtigt. Um die 400 kWh elektrische Energie in eine bei einem Brand freigesetzte thermische Energie umzurechnen, wurde ein von (Willstrand, 2020) veröffentlichter Äquivalenzfaktor von 48.5 herangezogen. Dies ergibt eine durch den Energieträger (Batterie) freigesetzte Wärmemenge von 20 GJ und resultiert in einer um 10 GJ erhöhten gesamt freigesetzten Wärmemenge eines BEV Busses (60 GJ).

Unter diesem Aspekt (Erhöhung der gesamt freigesetzten Wärmemenge) wurden zwei relevante Szenarien für das Brandverhalten größerer Batterien definiert und mittels numerischer Simulationen untersucht. Diese Szenarien definieren sich wie folgt:

- Die maximale Brandleistung entspricht jener von konventionellen Bussen, jedoch kommt es zu einer Verlängerung der Branddauer.
- Die Branddauer entspricht jener eines Brandes eines konventionellen (Diesel)-Busses. Dies resultiert in einem Anstieg der maximalen Brandlast (HRR).

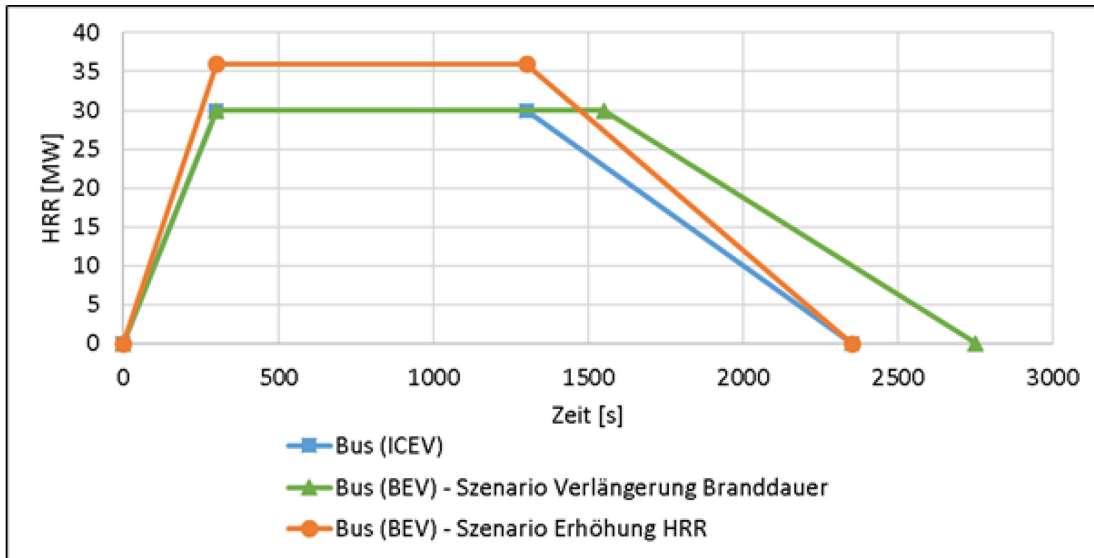


Abbildung 82: Vergleich der Bus-Brandkurve gemäß RVS 09.02.31 (Bus - ICEV) und den abgeleiteten BEV-Bus Brandkurven

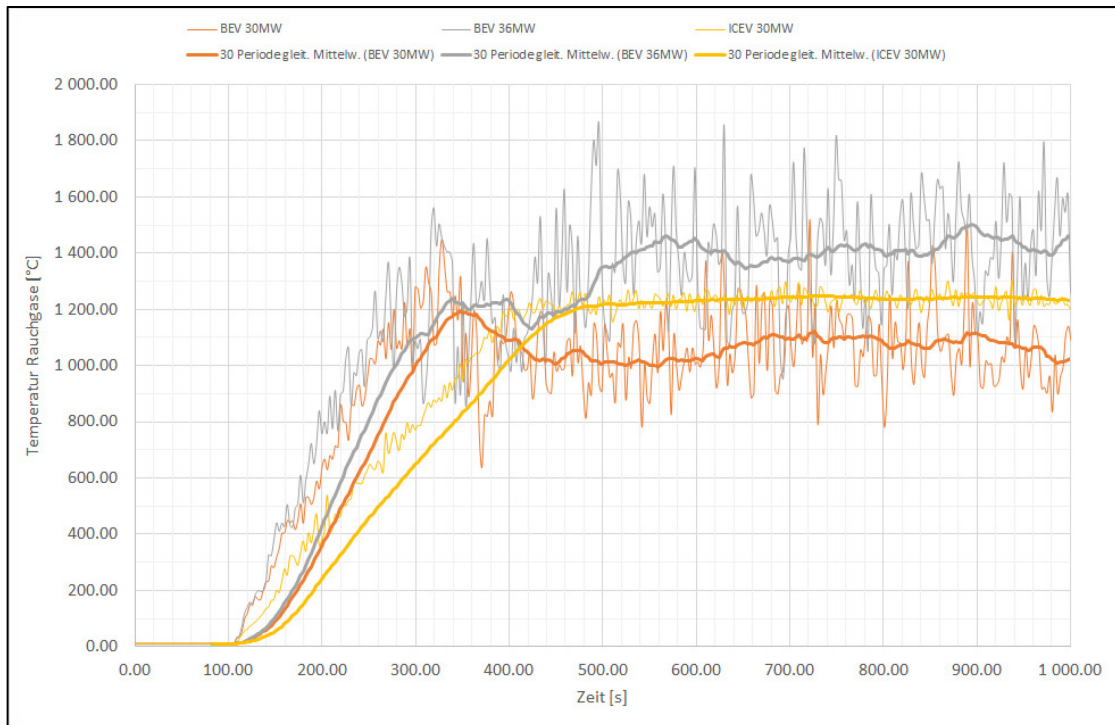
Die Verlängerung der Branddauer bei einer maximalen HRR von 30 MW in Szenario 1 beläuft sich auf eine um 250 s verlängerte Phase konstanter, maximaler HRR, bevor die lineare Abnahme der HRR einsetzt. Die Erhöhung der gesamt freigesetzten Energie um 10 GJ (Differenz von ICEV und BEV Bus) bei gleicher Branddauer (Szenario 2), erfordert eine Erhöhung der maximalen HRR von 30 MW (ICEV) auf 36 MW (BEV). Die HRR Kurven beider Szenarien sind in Abbildung 82 dargestellt.

Der Anteil der HRR, welcher der Karosserie entspricht, wurde in den numerischen Simulationen auf die beiden Seitenflächen sowie die Vorderseite (in Strömungsrichtung des nunmehr größeren Quaders aufgeprägt. Der Anteil der HRR zufolge des Batterie-Brandes wurde in vollem Ausmaß auf die Deckfläche des Quaders aufgeprägt. Dies wurde mit Rücksicht auf die Einbauposition der Batterie in einem Bus umgesetzt. Tabelle 29 zeigt einen Überblick über die aktivierten Quellflächen bei der Simulation eines BEV-Bus Brands.

Tabelle 29: Zuweisung der aktiven Quellflächen entsprechend deren Beteiligung am Brand von Karosserie und Energieträger bei einem BEV-Bus Brand

	Top	Left	Right	Front
Karosserie	nein	ja	ja	ja
Energieträger	ja	nein	nein	nein

Entsprechend den berücksichtigten Brandgeometrien (Quellflächen) ergeben sich für die drei untersuchten Fälle (ICEV-BUS, BEV-Bus 30 MW und BEV-Bus 36 MW) die in Abbildung 83 dargestellten Verläufe der Rauchgastemperaturen in Monitorpunkt 3.8 (Firste - 32 m stromab der Brandquelle). Die Steigerung der HRR von 30 MW auf 36 MW bei den BEV Bränden resultiert in einer um ca. 200 °C -300 °C erhöhten maximalen Temperatur in Monitorpunkt 3.8.



*Abbildung 83: Verlauf der Temperaturen bei Monitorpunkt 3.8 für einen ICEV-Bus Brand sowie den beiden Szenarien eines BEV-Bus Brandes*

Zusätzlich zu den auftretenden Rauchgastemperaturen respektive der zu erwartenden Rauchsichtung wurde ebenfalls die Auswirkung eines BEV-Bus Brandes auf die Zwischendecke eines Tunnels mit Rechteck-Querschnitt untersucht. Die erwarteten thermischen Lasten in diesem Fall wurden als besonders hoch eingestuft, da die Distanz zwischen der Bus-Batterie und der Oberfläche der Beton-Zwischendecke mit ca. 2 m relativ gering ist. Um die im Beton auftretenden Temperaturen berechnen zu können, ist die Modellierung der Strahlungswärme von besonderer Bedeutung. Für den Bereich zwischen Bus-Dach und Zwischendecke ist davon auszugehen, dass der Wärmetransport durch Strahlung der dominante Wärmetransport-Mechanismus ist. Der Strahlungs-Emissionsfaktor der Oberfläche des Busses wurde mit 0,44 (hochglänzender Stahl)) angenommen. Die der Berechnung zugrunde gelegten Eigenschaften des Betons der Zwischendecke sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Stoffwerte von Stahlbeton

<b>Wärmeleitkoeffizient</b>	3.7	W/mK
<b>Dichte</b>	2500	kg/m <sup>3</sup>
<b>spez. Wärmekapazität</b>	880	kJ/kgK

Abbildung 84 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur an der Oberfläche der Zwischendecke zentral über dem brennenden BEV-Bus sowie den Verlauf der Betontemperatur in verschiedenen Eindringtiefen in der Zwischendecke. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das Versagen der Beton-Zwischendecke sowie etwaige Abplatzungen an der Oberfläche und eine damit einhergehende Verringerung der Wandstärke sowie der Betondeckung der Zwischendecke nicht berücksichtigt wurden.

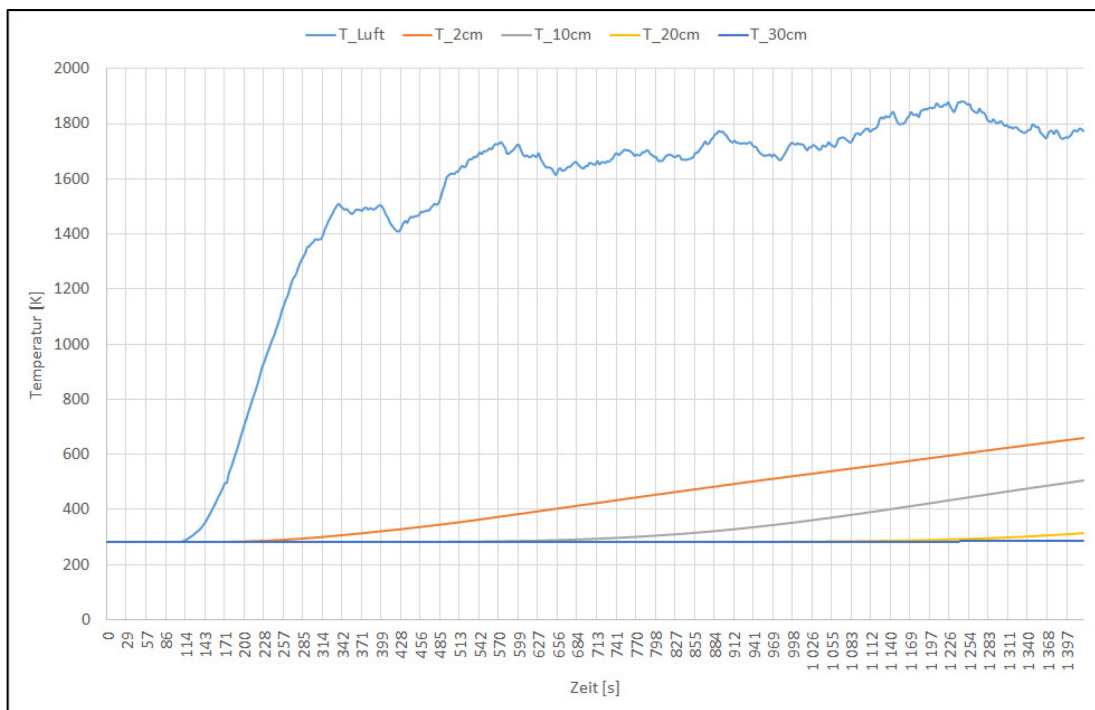


Abbildung 84: Verlauf der Lufttemperatur an der Oberfläche der Zwischendecke sowie in unterschiedlichen Eindringtiefen im Beton der Zwischendecke

Die maximale, lokal auftretende Lufttemperatur über dem brennenden Bus beträgt in etwa 1.800 K (ca. 1.530 °C). Dies hat zur Folge, dass die Betontemperatur in geringer Eindringtiefe (2 cm) am Ende der Phase mit konstanter, maximaler HRR (vgl. Abbildung 82 - erhöhte HRR) auf ca. 670 K (ca. 400 °C) ansteigt. Der weitere Verlauf der Temperaturen bei abnehmender HRR ist in Abbildung 84 nicht dargestellt, da kein nennenswerter weiterer Anstieg der Betontemperaturen erfolgt.

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.



## 8 RISIKOBETRACHTUNG

### 8.1 Personengefährdung während eines Tunnelbrandes

Im Allgemeinen wird die Gefährdung von Personen während eines Brandes durch drei Gefahrenfaktoren bestimmt - Hitze, Einschränkung der Sicht und Toxizität des Brandrauches. [66]

#### **Gefährdung durch Hitze:**

Die Gefährdung für Personen durch direkte Hitzeeinwirkung entsteht sowohl durch eine "Überhitzung" des Körpers, die sogenannte Hypothermie, bei der die Körpertemperatur über einen maximal verträglichen Wert (ca. 42°C) steigt, als auch durch direkte Verbrennung, entweder der Haut oder der Atemwege. In trockener Luft treten Verbrennungen der Haut stets vor Verbrennungen der Lunge auf, wonach die Verträglichkeitsgrenzen für Hautverbrennung relevant für die Bewertung der Personensicherheit sind. Lediglich bei heißer, mit Wasserdampf gesättigter Luft, kann bereits eine Lufttemperatur von 60°C zu Verbrennungen der Atemwege führen und somit ohne gleichzeitig auftretende Hautverbrennungen relevant werden.

#### **Gefährdung durch Einschränkung der Sicht:**

Wenn sich Rauch bzw. Rußpartikel in einem (teilweise) geschlossenen Raum sammeln, kommt es zu einer teils starken Beeinträchtigung der Sichtweite und in weiterer Folge der Orientierungsfähigkeit von flüchtenden Personen. Dieser Verlust der Orientierungsfähigkeit wird vielfach über eine Reduktion der Fluchtgeschwindigkeit mit steigender Rauchdichte bzw. steigendem Extinktionskoeffizienten (EC) abgebildet. D.A. Purser leitete auf Basis aufgezeichneter Fluchtgeschwindigkeiten in verrauchten Räumen einen linearen Zusammenhang zwischen der Fluchtgeschwindigkeit und der Sichtweite bzw. der optischen Dichte ab [67]. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die typische Fluchtgeschwindigkeit bei nicht eingeschränkter Sicht von deutlich über 1.0 m/s, bei Vorhandensein von dichtem Rauch auf deutlich unter 0.5 m/s sinkt, womit eine deutlich längere Exposition im Rauch und damit eine deutlich höhere Gefährdung einhergehen.

#### **Gefährdung durch toxische Stoffe**

Die während eines Verbrennungsvorganges freiwerdenden toxischen Stoffe können grundsätzlich in zwei Wirkungskategorien eingeteilt werden:

- Stickgase, welche die Aufnahme von Sauerstoff durch Körperzellen verhindern und so zur Bewusstlosigkeit und in weiterer Folge zum Tod führen, und
- Reizstoffe, welche zur sofortigen Bewegungseinschränkung führen können, indem sie eine übermäßige bis unerträgliche Reizung der Augen und der oberen Atemwege

verursachen. Außerdem kann es durch eine Schädigung der Lunge zu Langzeitfolgen, bis hin zum verzögerten Tod, kommen.

Zu den Hauptvertretern der Stickgase im Brandrauch zählen vor allem Kohlenmonoxid (CO) und Cyanidwasserstoff (HCN), welcher vor allem bei der Verbrennung von Kunststoffen entsteht. Zusätzlich begünstigt wird die Erstickung durch eine geringe Sauerstoffkonzentration in der Atemluft und eine Anreicherung mit Kohlendioxid, das selbst nicht erstickend aber ab einer Konzentration von 5% toxisch wirkt und zusätzlich die Atemfrequenz und damit die Aufnahme der Stickgase und Reizstoffe erhöht [68].

Als Reizstoffe kommen vor allem Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Schwefeloxid (SO<sub>2</sub>), Halogenwasserstoffe (HCl, HBr, HF) sowie organische Reizstoffe, z.B. Akrolein, im Brandrauch vor. Grundsätzlich hängen Menge und Art der freigesetzten Stoffe stark von den Verbrennungsprodukten, also den Fahrzeugmaterialien, sowie der Verbrennungsdynamik, im Speziellen der auftretenden Hitze und dem vorhandener Sauerstoff ab [68].

Zusätzlich zu Stickgasen und Reizstoffen können Schwermetalle, die selbst wiederum toxisch wirken, als Aerosole im Brandrauch vorkommen. Dies kann insbesondere durch die in der Batterie eines BEV verwendeten Materialien verstärkt werden. Dabei gelangen die Schwermetalle über die Verbrennung des Elektrodenmaterials als Aerosole in den Brandrauch [69]. Die Art und Zusammensetzung der als Aerosol auftretenden Schwermetalle hängen stark vom verwendeten Elektrodenmaterial ab. Häufig in Fahrzeugbatterien verwendete Elektrodenmaterialien beinhalten beispielsweise Kobalt, Mangan, Eisen, Nickel oder Cadmium.

## **8.2 Analyse der gemessenen Stoffkonzentrationen & Temperaturverläufe**

Die im Zuge der Brandversuche BV01, BV03 und BV05 aufgezeichneten Temperaturverläufe und Gaskonzentrationen wurden in einer ersten Grobanalyse mit gängigen Grenzwerten aus Tabelle 31 verglichen. Die Konzentrationsgrenzwerte (ISO 13571 und AEGL-3) entsprechen dabei den Schwellenwerten für sofortige Bewegungsunfähigkeit durch unmittelbare Reizung der Augen bzw. der Atemorgane. Die Dosisgrenzwerte (SFPE LD<sub>50</sub>) beziehen sich auf Entzündungsprozesse in der Lunge, die bei länger anhaltender Exposition zu langfristigen Gesundheitsschäden bzw. zum Tod führen können. Im Falle von CO entspricht der Grenzwert einer Dosis, die durch CO Sättigung des Blutes zur Bewusstlosigkeit führt.

Tabelle 31: Konzentrations- und Dosis Grenzwerte gemäß [70] und [45]

Rauchgasbestandteil	ISO 13571 Grenzwert [ppm]	AEGL-3 (30 Minuten) [ppm]	SFPE LD50, ID50 [ppm Minuten]
CO	-	600	35'000 (ID50)
HCL	1000	250	114'000
HF	500	62	87'000
SO <sub>2</sub>	150	30	12'000
NO <sub>2</sub>	250	25	1'900

Abbildung 85 bis Abbildung 89 zeigen die Verläufe der über den Tunnelquerschnitt gemittelten Konzentrationen, der wichtigsten gemessenen Gase, im Vergleich zum jeweiligen AEGL-3 Grenzwert. Die über den Tunnelquerschnitt gemittelten Konzentrationen wurden dabei auf Basis der gemessenen Absolutmengen der Gase, vgl. Kapitel 5.4.5 und Kapitel 5.4.6 sowie des Tunnelluft-Massenstroms des jeweiligen Zeitintervalls, berechnet.

Grundsätzlich zeigen sich deutlich höhere Konzentrationsverläufe in den Brandversuchen BV01 und BV05, als für konventionell angetriebene Fahrzeuge, und zwar für alle untersuchten toxischen Stoffe. Dies kann aber unter Umständen auch auf die deutlich geringere Brandlast in BV03 zurückzuführen sein. Die ermittelten Durchschnittskonzentrationen liegen bei allen Brandversuchen zu jedem Zeitpunkt deutlich unter den AEGL-3 Grenzwerten. Lediglich die NO<sub>x</sub> Konzentration reicht für den BV05 bis auf wenige ppm an den AEGL-3 Grenzwert heran, liegt aber dennoch deutlich (1 Größenordnung) unterhalb des ISO 13571 Grenzwertes für die Bewegungsunfähigkeit. Auf Basis der Einzelkonzentrationen, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung der gemessenen toxischen Stoffe, ist daher keine unmittelbare Gefährdung, bei keinem der Brandversuche, ableitbar.

Die gemessenen Temperaturen im Fluchtbereich (bis 2 m über der Fahrbahn) liegen für alle drei Brandversuche (BV01, BV03 und BV05) 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.

Ob sich unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der freigesetzten Stoffe bzw. konvektiver und radiativer Wärmeeinwirkung, eine geänderte Gefährdung bei Batteriebrände ergibt, wird auf Basis des FID/FIC Modells in Kapitel 2.3 weiterführend untersucht.

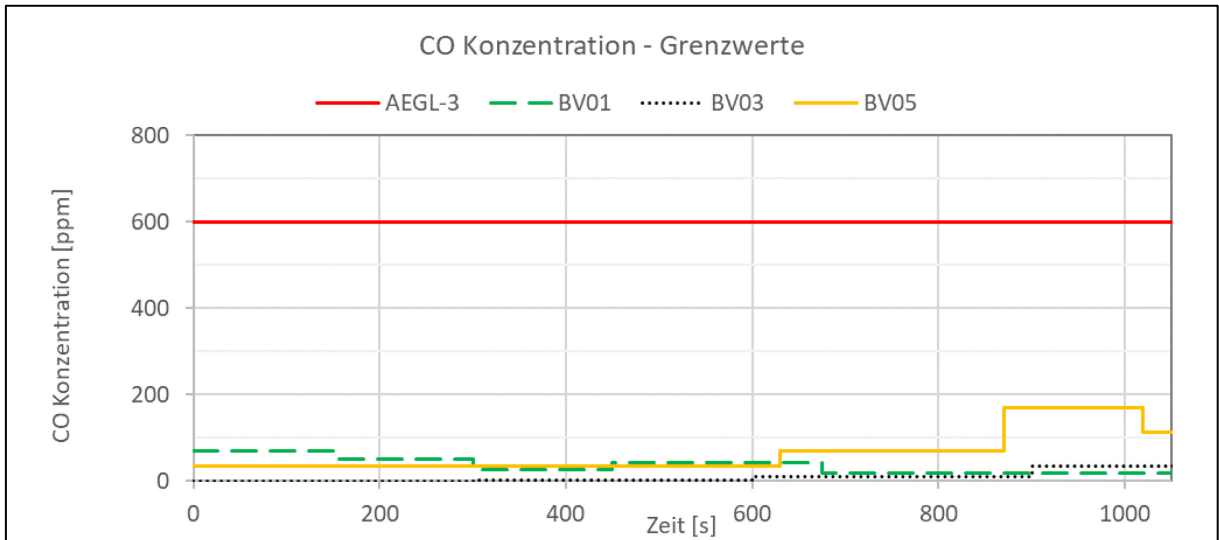


Abbildung 85: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für CO.

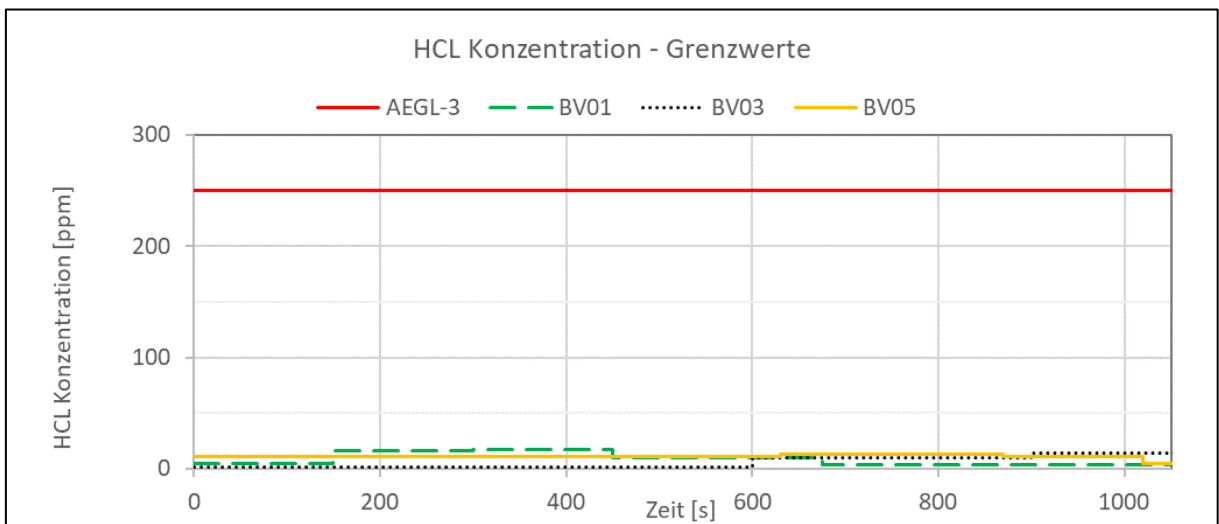


Abbildung 86: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für HCl.

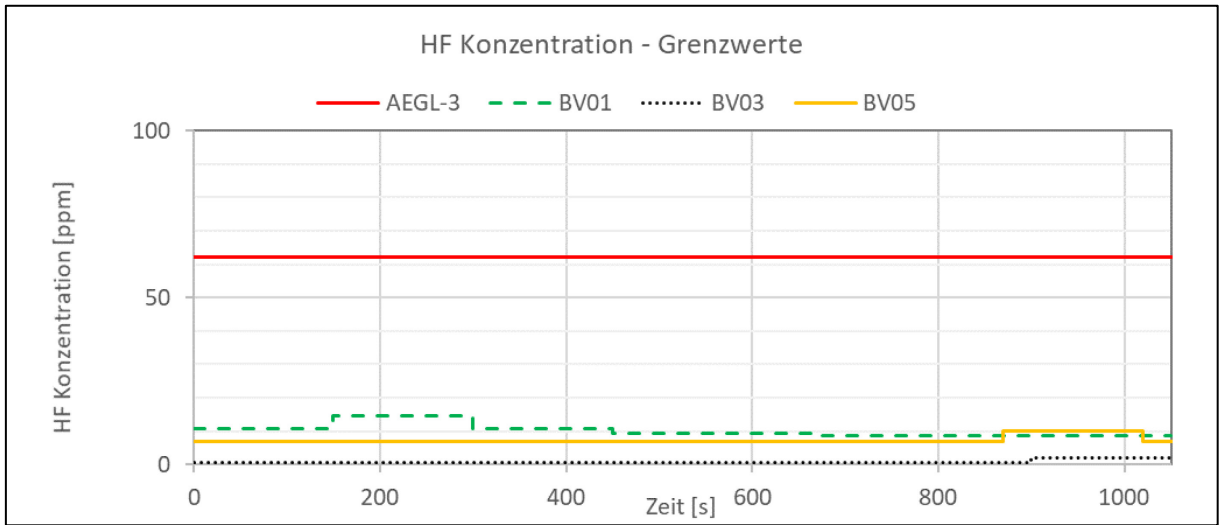


Abbildung 87: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für HF.

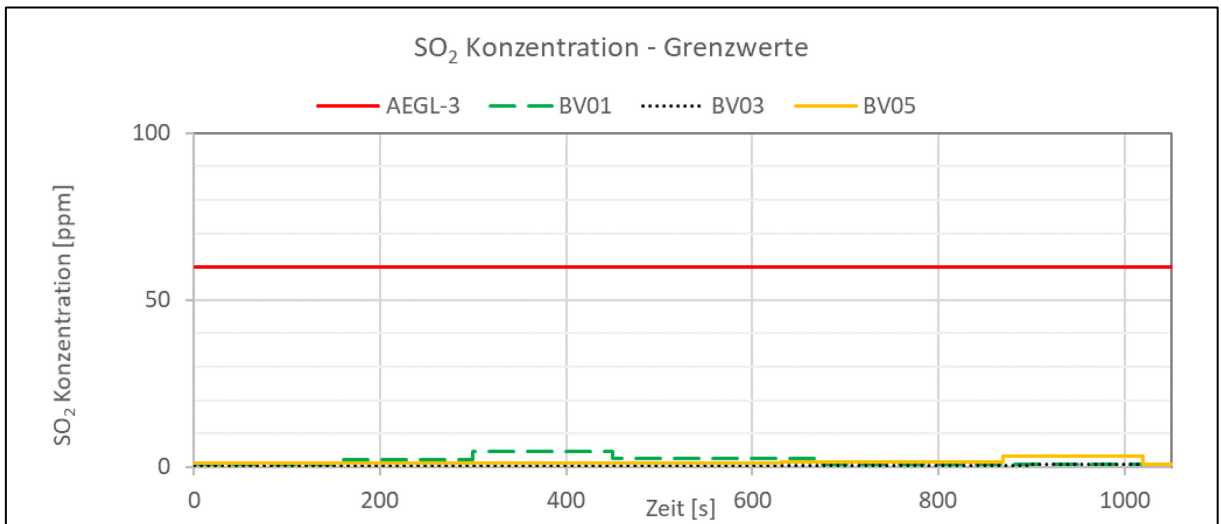


Abbildung 88: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für SO<sub>2</sub>.

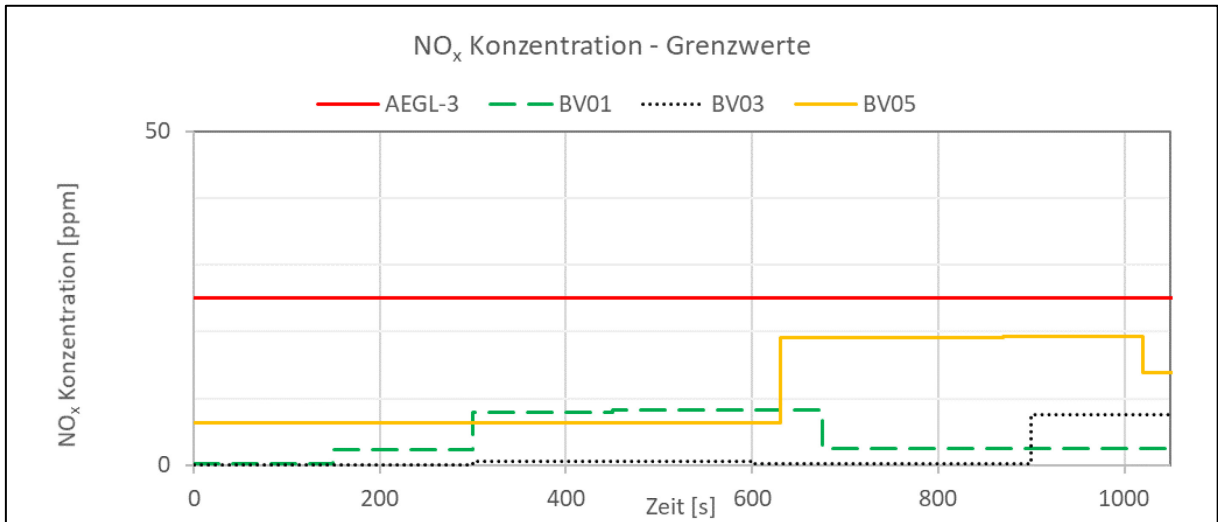


Abbildung 89: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für NO<sub>2(x)</sub>.

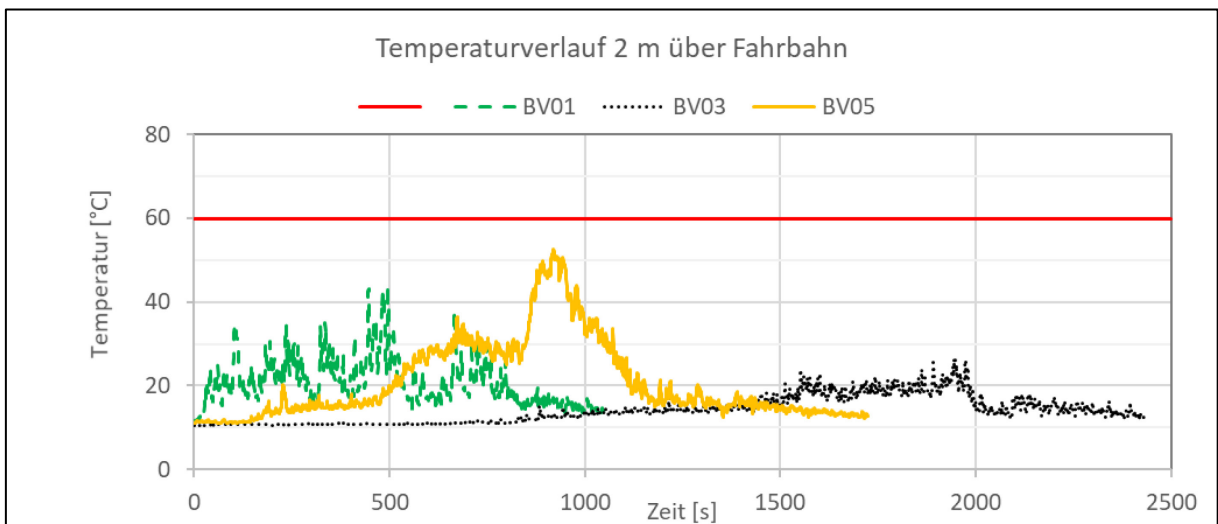


Abbildung 90: Vergleich der Temperaturverläufe für den Messpunkt T<sub>2.8</sub> (2 m über Boden).

### 8.3 Modellierungsansatz für die Risikobewertung eines BEV-Brandes

Wie bereits erwähnt, ist ein zentrales Ziel des gegenständlichen Forschungsprojektes die Bewertung von Batteriefahrzeugbränden auf die Personensicherheit in Tunneln. Als Grundlage für die Risikobewertung eines BEV-Brandes bzw. für den Risikovergleich von BEV Bränden und ICEV Bränden wird das österreichische Tunnelrisikomodell bzw. im Speziellen das Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände herangezogen. Dieses Schadensausmaßmodell beruht im Wesentlichen auf einer Verknüpfung dreier numerischer Submodelle:



- Ein eindimensionales Strömungsmodell mit dem die zeitliche Entwicklung der Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel, vom Zeitpunkt des Initialereignisses während des Normalbetriebes, bis zum Eintreffen der Fremdrettung während des Ereignisbetriebs, bestimmt wird.
- Ein dreidimensionales CFD Modell auf Basis der Software FDS, zur Bestimmung der zeitlich veränderlichen Rauchgas- und Temperaturverteilungen in einem lokalen Bereich um den Brandort.
- Ein eindimensionales Evakuierungsmodell, welches auf Basis der Rauchgas- und Temperaturverteilungen sowie des angenommenen Fluchtverhaltens der Tunnelnutzer den möglichen Personenschaden quantifiziert.

Um die speziellen Charakteristika eines BEV-Brandes abzubilden, wurden die Brandkurve für Personenwagenbrände und Busbrände hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Hitzefreisetzungs- und Emissionsraten sowie das Akkumulationsmodell zur Bestimmung der Personenschäden adaptiert. Die notwendigen Modellierungsschritte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 8.3.1 Modellbrandkurven

#### PKW-Brandkurve

Abbildung 91 zeigt die Brandkurven der Brandversuche BV01, BV03 und BV05. Die Ergebnisse des Brandversuches BV04 werden aufgrund der gänzlich anderen Charakteristik (leerer Kastenwagen ohne Fahrzeuginterieur, geringe Brandgröße) nicht für die weitere Modellierung herangezogen. Ziel der Modellierung ist die Ableitung von BEV Modellbrandkurven für den Vergleich mit der ICEV PKW Modellbrandkurve des österreichischen Tunnelrisikomodells gemäß [40].

Die strichlierten Linien zeigen den Beginn des jeweils ersten Löscheinsatzes während der drei betrachteten Brandversuche. Das österreichische Risikomodell betrachtet grundsätzlich den Zeitbereich der Selbstrettung. Daher wird die Entwicklung der Brandkurven nach Beginn des Löscheinsatzes im Folgenden nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird in der RVS PKW Modellbrandkurve von einem unmittelbaren Beginn der Brandwachstumsphase ausgegangen. In den Brandversuchen BV03 und BV05 ist eine deutliche Zeitverzögerung -  $\Delta t_{BV03}$ ,  $\Delta t_{BV05}$  - beobachtbar. Dieser Schwelbrand-Zeitbereich wird in den Modellbrandkurven für die Risikobetrachtung nicht weiter berücksichtigt. Die derart adaptierten und linearisierte Brandkurven für die Brandversuche BV01, BV03 und BV05, sind in Abbildung 92 dargestellt.

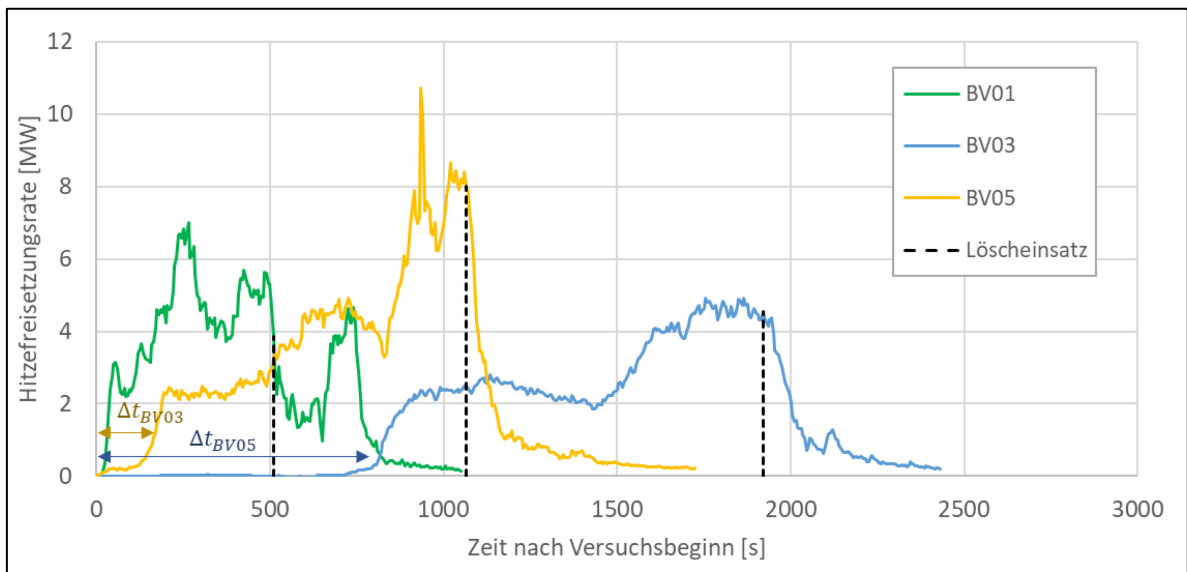


Abbildung 91: Brandkurven der Gesamtfahrzeugbrandversuche inklusive Zeitpunkte des ersten Löscheinsatzes.

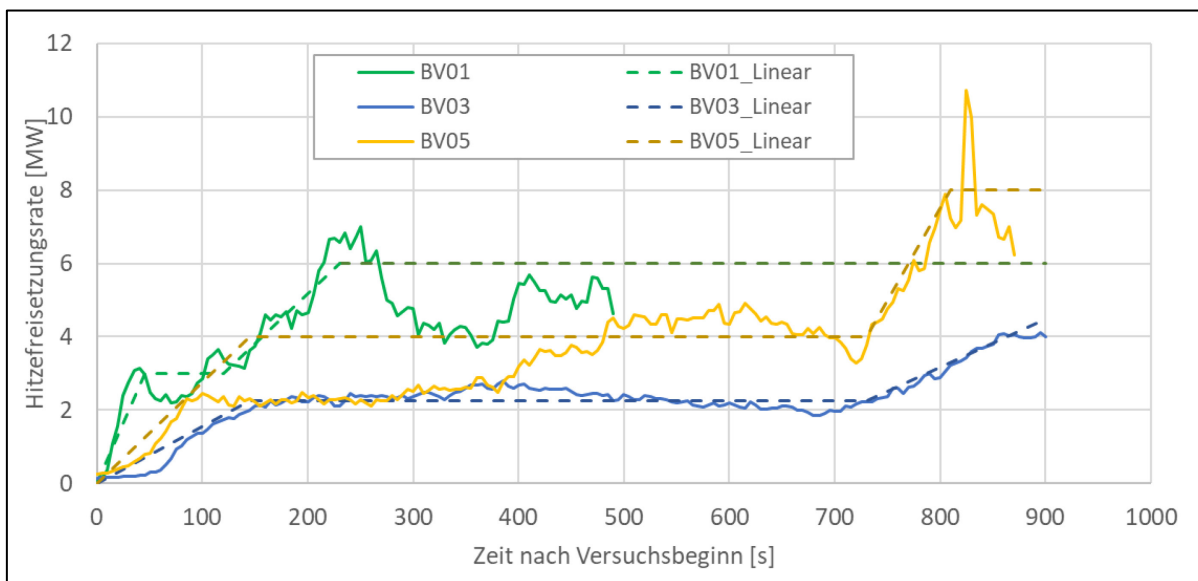


Abbildung 92: Angepasste Originalbrandkurven und linearisierte Brandkurven.

Die in Abbildung 92 dargestellten Modellbrandkurven berücksichtigen also die wesentlichsten Grundannahmen in der österreichischen Tunnelrisikoanalysemethodik, entsprechen aber gleichzeitig so gut als möglich den tatsächlich gemessenen Originalbrandkurven (inklusive subjektiver Vereinfachungen). Einige Charakteristika der derart abgeleiteten Brandkurven sind, aufgrund des beobachteten Versuchsherganges sowie der Analyse der Messergebnisse, jedoch diskussionswürdig.

Das sehr schnelle Brandwachstum zu Beginn des BV01 und der damit verbundene rasche Anstieg der Brandkurve ist auf die Art der Entzündung zurückzuführen. Durch Einleiten einer

großen Menge Salzlösung wurde das gesamte Batteriegehäuse geflutet und ein kollektiver Thermal Runaway mit folgendem Vollbrand initiiert. Bei einem tatsächlichen Brandereignis im Tunnel mit dem Brandursprung in der Batterie (etwa bedingt durch einen Kurzschluss infolge einer mechanischen Einwirkung) ist eher von davon Auszugehen, dass der Thermal Runaway in wenigen Zellen beginnt (dort wo die mechanische Einwirkung für den Kurzschluss sorgt) und sich dann kaskadenartig in der Batterie fortpflanzt.

Bei einem Brandursprung außerhalb der Batterie wird der Thermal Runaway in der Batterie durch die thermische Einwirkung des Fahrzeugbrandes initiiert. Ob und wann der Brand auf die Batterie übergreift, wird von Brand zu Brand unterschiedlich sein. Im BV05 reichte die thermische Einwirkung alleine nicht aus, um den Thermal Runaway in der Batterie auszulösen. Aus diesem Grund wurde das Batteriegehäuse wiederum mit Salzlösung geflutet. Die dementsprechend gleichzeitige Zündung aller Batteriezellen führte zu einer signifikanten Erhöhung der Brandlast mit kurzzeitigen Spitzen von bis zu 10 MW. Grundsätzlich kann der Thermal Runaway infolge eines Fahrzeugbrandes mit Entzündung außerhalb der Batterie nicht ausgeschlossen werden, auch wenn der entsprechende BV05 eben dieses Verhalten zeigte. Der gemessene Brandverlauf erscheint aufgrund des Versuchsablaufes aber als zu konservativ.

Grundsätzlich wird die Art der Entzündung einen Einfluss auf die Branddynamik bzw. die maximale Brandlast haben. Diese hängt aber ebenfalls von anderen Parametern (Ladezustand der Batterie, Gepäck im Fahrzeug, Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, Tunnelgeometrie, etc.) ab, sodass die Ableitung einer repräsentativen maximalen Brandlast für BEVs auf Basis beider BEV-Brandversuche sinnvoll, weil zuverlässiger, erscheint, als die Annahme unterschiedlicher maximaler Brandlasten für die beiden Brandentstehungsarten auf Basis der jeweiligen Einzelbrandversuche alleine.

Auch die Brandkurve des ICEV-Fahrzeugbrandkurve ist zu diskutieren. In diesem Fall betrug die Brandlast über einen langen Zeitraum 2 MW und steig erst am Ende des Betrachtungszeitraumes auf 4 MW an. ICEV-Fahrzeugbrände sind gut erforscht und vielfach dokumentiert. Durchschnittliche maximale Brandlasten für ICEV-PKW Brände betragen üblicherweise um die 5 MW. Die, zumindest für den Großteil der Branddauer, deutlich geringere Brandlast im BV03 ist eventuell auf einen nicht gefüllten Tank zurückzuführen.

Zusätzlich zu den linearisierten Brandkurven aus Abbildung 92, wurden daher, unter Berücksichtigung der festgestellten Besonderheiten in den Versuchsabläufen, allgemeine, für ICEV-PKW Brände sowie für BEV-PKW Brände mit Entzündung in der Batterie bzw. Entzündung im Fahrzeuginnenraum repräsentative Modellbrandkurven abgeleitet (siehe Abbildung 93). Dabei wurden folgende Beobachtungen berücksichtigt:

- Als repräsentative maximale Brandlast für BEV-PKW Brände wurde die durchschnittliche maximale Brandlast der beiden BEV Brandversuche von 7 MW festgelegt.
- Der anfängliche Anstieg der Hitzefreisetzungsrates in den Brandversuchen BV05 sowie BV03 entspricht in guter Näherung dem Anstieg der RVS 5 MW Brandkurve. Daher wurde für alle Modellbrandkurven der Anstieg gemäß RVS 5 MW Brandkurve angenommen.
- Der steilere Anstieg zu Beginn für BV01 ist auf die Flutung des gesamten Batteriegehäuses mit Salzwasser und den daraus resultierenden kollektiven Thermal Runaway zurückzuführen. Bei einem Tunnelbrand infolge eines Ereignisses ist von einem weniger raschen Anstieg auszugehen. Für einen tatsächlichen BEV Tunnelbrand mit der Batterie als Brandursprung wird daher auch von einem anfänglichen Anstieg wie bei der RVS 5 MW Brandkurve ausgegangen.
- Für beide BEV Modellbrände wird daher derselbe anfängliche Anstieg der Hitzefreisetzungsrates angenommen.
- Die maximale Brandlast für ICEV-Brandkurve wird auf den üblicherweise verwendeten Wert von 5 MW angehoben<sup>5</sup>.

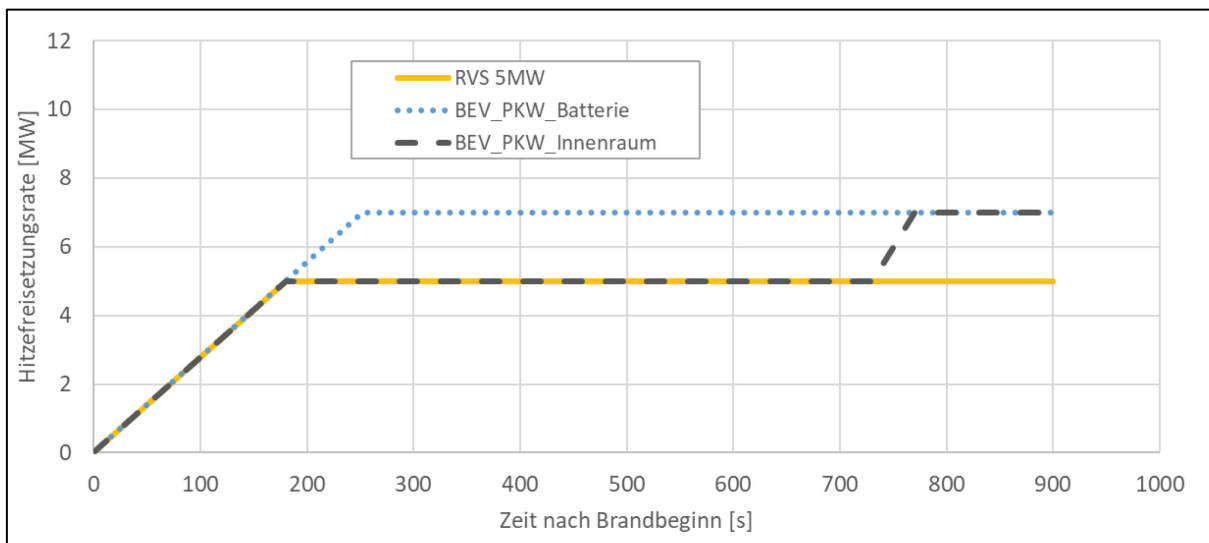


Abbildung 93: Aus den Realbrandversuchen abgeleitete BEV-Modellbrandkurven

Die abgeleiteten Brandkurven, welche in weiterer Folge in der Risikountersuchung betrachtet werden, sind zur Übersicht in Tabelle 32 dargestellt. Die ersten drei Brandkurven - BV01\_linear, BV03\_linear und BV05\_linear aus Abbildung 92 - entsprechen im Wesentlichen den tatsächlich ermittelten Brandverläufen der drei Brandversuche. Diese dienen im Folgenden dem direkten Risikovergleich der tatsächlichen Brände. Ein einzelner

<sup>5</sup> Die Modellbrandkurve entspricht damit exakt der RVS 5 MW Brandkurve

Brandversuch ist jedoch immer nur ein (1) Repräsentant eines ganzen Spektrums von möglichen Brandverläufen für eine bestimmte Fahrzeugkategorie. Daher wurden, unter Berücksichtigung des momentanen Wissensstandes bzgl. PKW Bränden, repräsentative Modellbrandkurven (siehe Abbildung 93 - BEV\_PKW\_Batterie, BEV\_PKW\_Innenraum, RVS 5 MW) entwickelt, die wiederum dem Vergleich von BEV- und ICEV-PKW Bränden dienen.

In der folgenden Szenario Untersuchung bzw. Risikoanalyse werden daher jeweils die Brandkurven BV01\_linear, BV03\_linear und BV05\_linear, bzw. die Brandkurven BEV\_PKW\_Batterie, BEV\_PKW\_Innenraum und RVS 5 MW, betrachtet. Ein Quervergleich der sechs Brandkurven soll vermieden werden. Beide Risikovergleiche zwischen ICEV- und BEV-PKW Bränden, sowohl auf Basis der linearisierten Brandkurven, als auch auf Basis der Modellbrandkurven sind bestenfalls Indikatoren für einen Bereich, in dem die tatsächliche Änderung des Brandrisikos durch BEV-PKW Brände nach heutigem Wissensstand liegen wird.

*Tabelle 32: Übersicht der Modellbrandkurven - PKW für die Risikobetrachtung*

Brandkurve	Maximale HRR	Kurzbeschreibung
<b>BV01_linear</b>	6 MW	Adaptierte (vereinfachte) Brandkurve BV01
<b>BV03_linear</b>	4.5 MW	Adaptierte (vereinfachte) Brandkurve BV03
<b>BV05_linear</b>	8 MW	Adaptierte (vereinfachte) Brandkurve BV05
<b>BEV_PKW_Batterie</b>	7 MW	BEV Modellbrandkurve - Batterie als Ursprung
<b>BEV_PKW_Innenraum</b>	7 MW	BEV Modellbrandkurve - Innenraum als Ursprung
<b>RVS 5 MW</b>	5 MW	Modellbrandkurve ICEV-PKW gemäß RVS 09.03.11

### **Bus-Brandkurve**

Für BEV-Busbrände wurde, aufgrund der Größe der üblicherweise verbauten Batterie, eine im Vergleich zu ICEV-Bussen gesteigerte Wärmefreisetzung abgeleitet, siehe Abschnitt 7.3. Die Steigerung der gesamthaft freigesetzten Wärme wurde auf zwei Arten modelliert – durch eine verlängerte Branddauer sowie durch eine erhöhte maximale Hitzefreisetzungsrates (erhöhte Brandgröße). Beide daraus resultierenden Modellbrandkurven sind in Abbildung 94 dargestellt. Die verlängerte Branddauer ist für die Untersuchung mittels österreichischem Risikomodell irrelevant, da die Betrachtung auf die Phase der Selbstrettung, also die ersten 15 Minuten nach Brandbeginn, festgelegt ist. Das mit dieser Modellbrandkurve verknüpfte Risiko ist trotz des identen Verlaufs der Hitzefreisetzungsrates, aufgrund der andersartigen Stofffreisetzungen potentiell unterschiedlich zur BUS-ICEV Brandkurve gemäß RVS und wird daher ebenfalls berücksichtigt. Die abgeleiteten BUS-Brandkurven, welche in weiterer Folge

in der Risikountersuchung betrachtet werden, sind zur Übersicht in Tabelle 33 zusammengefasst.

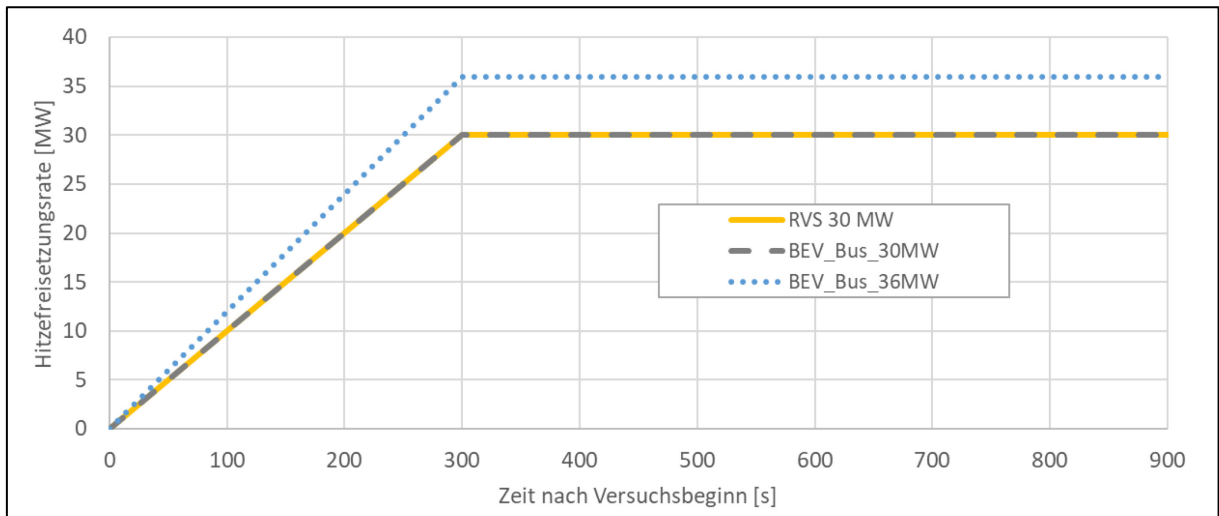


Abbildung 94: Bus Modellbrandkurven

Tabelle 33: Übersicht der Modellbrandkurven - Bus für die Risikobetrachtung

Brandkurve	Maximale HRR	Kurzbeschreibung
<b>RVS_30MW</b>	30 MW	ICEV Bus Modellbrandkurve gemäß RVS
<b>BEV_Bus_30MW</b>	30 MW	BEV Bus Modellbrandkurve – verlängerte Branddauer
<b>BEV_Bus_36MW</b>	36 MW	BEV Bus Modellbrandkurve – erhöhte Brandgröße (HRR_max)

### 8.3.2 Stofffreisetzung

Neben einer geänderten Hitzefreisetzung wird vor allem die geänderte Stofffreisetzung als potenziell unterschiedlich bei BEV-Bränden und ICEV-Bränden angesehen. Die Absolutmengen der gemessenen gasförmigen Verbrennungsprodukte wurden bereits in Abschnitt.5.4.5 verglichen und Unterschiede diskutiert. Inwieweit die geänderte Stofffreisetzung tatsächlich zu einer erhöhten (oder gegebenenfalls verringerten) Personengefährdung führt, wird durch Berücksichtigung im österreichischen Tunnelrisikomodell und Anwendung auf einen Modelltunnel bewertet.

Dazu wurden aus den gemessenen Absolutmengen der freigesetzten gasförmigen Verbrennungsprodukte Emissionsraten berechnet. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass die momentane Hitzefreisetzungsrates und die momentan gemessenen Stoffkonzentrationen nicht in allen Fällen in direkter Abhängigkeit stehen. Ein Zeitbereich mit einer hohen Hitzefreisetzung kann unter Umständen zu einer geringen Stofffreisetzung führen und umgekehrt. Grund dafür



können etwa die Materialeigenschaften der in dem betrachteten Zeitintervall vom Brand betroffenen Fahrzeugkomponenten sein. Eine Fahrzeugkomponente kann etwa einen hohen Heizwert besitzen, aber nur zu einem geringen Anteil aus Stoffen bestehen, die zu bestimmten Verbrennungsprodukten führen. Um diese Unterschiede in einer Risikobetrachtung berücksichtigen zu können, wäre eine experimentelle Untersuchung und weiter folgende Modellierung auf Komponenten-Ebene notwendig, die den Rahmen dieses Forschungsprojektes bei weitem übersteigt.

Für die Risikobetrachtung ist ohnehin die über einen gewissen Zeitraum aufgenommene Dosis, und nur zu einem geringen Teil, die kurzzeitig vorherrschende Konzentration, vgl. Abschnitt 8.3.3 ausschlaggebend. Daher wurden die Emissionsraten aus Gründen der Praktikabilität in direkter Abhängigkeit zur Hitzefreisetzungsrates modelliert. Die gemessenen Absolutmengen der freigesetzten Gase wurden (bis zum letzten Intervall vor dem ersten Löscheinsatz) mit der im selben Zeitraum freigesetzten Wärmemenge normiert und im Risikomodell mit der zeitlich veränderlichen Hitzefreisetzungsrates multipliziert. Diese Methodik erlaubt es außerdem, die für die Brandversuche BV01, BV03 und BV05 ermittelten Emissionsraten [kg/MJ] auf die Modellbrandkurven mit geänderten Verlauf der Hitzefreisetzungsrates zu übertragen und Freisetzungsrates für die Modellbrandkurven BEV\_PKW\_Batterie, BEV\_PKW\_Innenraum, RVS 5 MW, BEV\_Bus\_30 MW, BEV\_Bus\_36 MW abzuschätzen, welche nicht direkt gemessen wurden.

Tabelle 34 zeigt die ermittelten Freisetzungsrates der relevanten Stoffe pro freigesetzter Wärmemenge für die drei in der Risikoanalyse untersuchten Brandversuche sowie die in RVS 09.03.11 definierten Freisetzungsrates für einen ICEV-PKW Brand. Der Vergleich der Freisetzungsrates zeigt folgende Relationen:

- CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und HCl Freisetzungsrates wichen in allen drei Brandversuchen um maximal 55 % voneinander ab, sind also in allen drei Brandversuchen vergleichbar.
- SO<sub>2</sub> Freisetzungsrates sind für BV03 und BV05 vergleichbar jedoch weniger als halb so hoch wie für BV01. Es lässt sich daher keine eindeutige Tendenz bzgl. BEV und ICEV erkennen.
- Die H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Freisetzungsrates ist für den BV01 mehr als acht Mal so hoch wie für den BV03. In BV05 wurde kein H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> nachgewiesen. Eine erhöhte Freisetzung für BEV liegt also nahe, konnte aber durch den zweiten BEV Brandversuch nicht bestätigt werden.
- HF Freisetzungsrates der BEV Brände sind gegenüber dem ICEV Brand signifikant erhöht.
- Die in RVS 09.03.11 definierten Freisetzungsrates für CO und CO<sub>2</sub> sind mit den gemessenen Freisetzungsrates vergleichbar, wobei die Freisetzungsrates für CO gemäß RVS in etwa doppelt so hoch, wie die gemessenen CO Freisetzungsrates ist.

- HCN bzw. Rußproduktion wurden in den Brandversuchen messtechnisch nicht berücksichtigt. Für die Risikoanalyse werden daher die in der RVS definierten Freisetzungsraten für HCN und Ruß für alle Brandkurven verwendet.

Tabelle 34: Freisetzungsraten der Brandversuche BV01, BV03 und BV05 bezogen auf die gesamte Wärmefreisetzung und entsprechende Freisetzungsraten der RVS 09.03.11 PKW Brandkurve

Freigesetzter Stoff	BV01 [kg/MJ]	BV03 [kg/MJ]	BV05 [kg/MJ]	RVS ICEV-PKW [kg/MJ]
CO	0.001994	0.001336	0.001883	0.003600
CO <sub>2</sub>	0.093781	0.124234	0.101416	0.092000
NO <sub>x</sub>	0.000247	0.000348	0.000340	-
HCl	0.000520	0.000387	0.000336	-
SO <sub>2</sub>	0.000118	0.000044	0.000045	-
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.000034	0.000004	-	-
HF	0.000487	0.000050	0.000214	-
HCN	-	-	-	0.0009
Ruß	-	-	-	0.0025

Die in Tabelle 34 definierten Freisetzungsraten werden den entsprechenden Brandkurven aus Tabelle 32 und Tabelle 33 zugewiesen und in der folgenden Risikobetrachtung verwendet.

### 8.3.3 Fractional Incapacitating Dose und Fractional Incapacitating Concentration

Das Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände als Teil des österreichischen Tunnelrisikomodells setzt sich aus einem eindimensionalen Strömungsmodell, einem dreidimensionalen Ausbreitungsmodell und einem eindimensionalen Evakuierungsmodell zusammen. Der Verlauf der Hitzefreisetzungsraten sowie die Emissionsraten werden im Strömungsmodell und im Ausbreitungsmodell berücksichtigt. Die daraus resultierenden Temperaturverteilungen und Schadstoffkonzentrationen werden im Evakuierungsmodell zur Berechnung des Personenschadens verwendet.

Die Berechnung des Personenschadens basiert auf einem Akkumulations- und Konzentrationsmodell gemäß [70] bzw. ISO 13571 [45]. Dabei wird der Grad der Intoxikation anhand der Schadstoffkonzentration entlang des Fluchtweges einer evakuierenden Person bestimmt. In jedem Zeitschritt werden dabei die "Fractional Effective Doses" (FED) bzgl. Erstickung ("Asphyxiation") und Hypothermie, sowie die "Fractional Incapacitation Concentration" (FIC) bestimmt. Eine flüchtende Person wird als bewegungsunfähig bzw. durch

den Brand getötet gewertet, wenn einer (oder mehrere) der FED bzw. FIC aus nachstehender Gleichung den Wert 1.0 erreicht bzw. übersteigt.

Die Dosis-bezogenen FED Werte ergeben sich dabei als Summe über alle betrachteten Zeitschritte vom Brandbeginn startend bis zum Erreichen des sicheren Bereiches bzw. bis zur Bewegungsunfähigkeit. Der FIC Wert beruht hingegen ausschließlich auf den Konzentrationen zum jeweiligen Zeitpunkt.

$$FED_{Asphyxiation} = (FI_{CO} + FI_{CN} + FLD_{Irr}) \times V_E \times V_{CO}$$

$$FED_{Hypothermia} = \frac{1}{t_{Rad}} + \frac{1}{t_{Conv}}$$

$$FIC_{Irr} = \frac{C_{HCL}}{1000} + \frac{C_{HF}}{500} + \frac{C_{SO_2}}{150} + \frac{C_{NO_x}}{250}$$

$FI_{CO}$	Beitrag zur "Fractional Incapacitation Dose" durch Kohlenmonoxid
$FI_{CN}$	Beitrag zur "Fractional Incapacitation Dose" durch Blausäure
$FLD_{Irr}$	Beitrag zur "Fractional Incapacitation Dose" durch Reizgase (HCL, HF, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )
$V_E$	Atemvolumen [l/min]
$V_{CO_2}$	Erhöhung der Atemfrequenz durch erhöhte CO <sub>2</sub> Konzentration
$t_{Rad}$ bzw. $t_{Conv}$	Zeit bis zur Bewegungsunfähigkeit durch Strahlungs- bzw. konvektive Hitze
$C_i$	Konzentration des Rauchgasbestandteils $i$ in ppm

## 8.4 Szenario Untersuchung und Risikobewertung

Um den unterschiedlichen Einfluss von BEV Bränden und ICE-Fahrzeug Bränden auf das Personenrisiko in Tunneln zu untersuchen, wurde das adaptierte Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände auf einen repräsentativen Modelltunnel angewendet. Die Parameter des Modelltunnels sind in Tabelle 35 zusammengefasst. Im Zuge der Szenario Untersuchung bzw. der Risikobewertung wurden die abgeleiteten Brandkurven aus Abschnitt 8.3.1 mit den entsprechenden Freisetzungsraten aus Abschnitt 0 kombiniert, siehe Tabelle 36 und Tabelle 37, und als Fahrzeugbrände, gemäß der TuRisMo Methodik berücksichtigt.

Zunächst wurden mit Hilfe einer Szenarien-Analyse die direkten Unterschiede der BEV-Brandkurven und ICE-Fahrzeug Brandkurven hinsichtlich Strömungsverhalten, Rauchausbreitung und -Dichte sowie Fluchtbedingungen untersucht. Im letzten Schritt wurde das adaptierte Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände samt adaptierter Brandkurven vollständig in das österreichische Tunnelrisikomodell integriert. Mit diesem wurden in weiterer Folge Risikoerwartungswerte für unterschiedliche Anteile von BEV-Fahrzeugen am Gesamtverkehr ermittelt.

Tabelle 35: Parameter Modelltunnel

Tunnelparameter	Parameterwert
Tunnelsystem	Richtungsverkehrsführung mit 2 Fahrstreifen je Richtung
Tunnellänge	3000 m
Längsneigung	1.5 %
Querschnitt	Gewölbequerschnitt, A=57m <sup>2</sup>
Notausgangsabstand	300 m
Verkehrsstärke	30'000 Fahrzeuge pro Tag und Richtung
Verkehrsaufteilung	85 % PKW, 14.5 % LKW, 0.5 % Bus
Lüftungssystem	Längslüftung, 16 SV pro Röhre, Schub=400 N, Durchmesser=1.0 m
Aktivierungszeitpunkt der Lüftung	120 s nach Brandbeginn
Start der Personenevakuierung	150 s nach Brandbeginn

Tabelle 36: Betrachtete PKW Modellbrände und Freisetzungsraten

PKW Brandverläufe gemäß Messung			
Brandkurve gemäß Tabelle 32	BV01_linear	BV03_linear	BV05_linear
Freisetzungsraten gemäß Tabelle 34	BV01	BV03	BV05
PKW Brandverläufe gemäß repräsentativer Modellbrandkurven			
Brandkurve gemäß Tabelle 32	BEV_PKW_Batterie	BEV_PKW_Innen- raum	RVS_5MW
Freisetzungsraten gem. Tabelle 34	BV01	BV05	BV03

Tabelle 37: Betrachtete Bus Modellbrände und Freisetzungsraten

Bus Brandverläufe gemäß Modellbrandkurve			
Brandkurve gemäß Tabelle 33	RVS_30MW	BEV_Bus_30MW	BEV_Bus_36MW
Freisetzungsraten gem. Tabelle 34	BV03	BV01	BV01

#### 8.4.1 Szenario Untersuchung

In der Szenario Untersuchung liegt der Fokus, dem Namen entsprechend, auf der Betrachtung einzelner Brandszenarien. Im Folgenden werden die aus den Brandkurven und den Tunnelparametern, allen voran der Tunnellüftung und dem Verkehr, resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten und Verrauchungsmuster diskutiert.

Exemplarisch sind die Verläufe der Längsströmungsgeschwindigkeit resultierend aus dem 1D-Strömungsmodell, für die beiden Brandkurven BV03\_linear und BV\_05 linear (linearisierte Brandkurven) bzw. RVS 5 MW und BEV PKW Batterie (Modellbrandkurven) in Abbildung 95

und Abbildung 96 dargestellt. Als Brandort wurde die Tunnelmitte (1500 m) gewählt. Trotz der unterschiedlichen Brandverläufe sind die Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit praktisch ident. Grund dafür ist, dass für derart geringe Brandgrößen und geringe Längsneigungen, die Auftriebseffekte gegenüber der Tunnellüftung bzw. dem Kolbeneffekt der Fahrzeuge eine untergeordnete Rolle spielen.

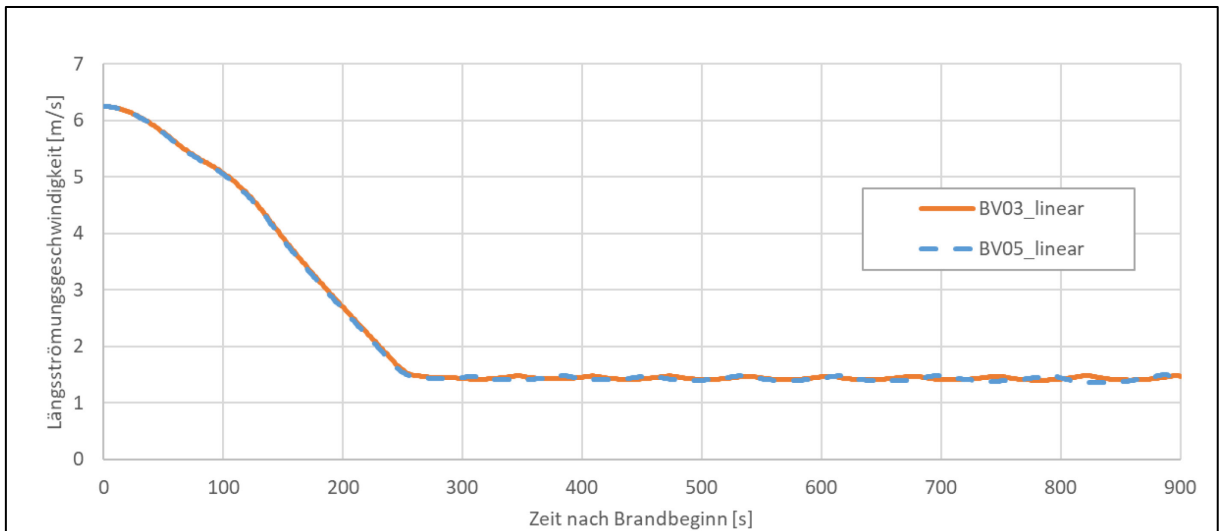


Abbildung 95: Vergleich der Längsströmungsgeschwindigkeiten für BV03\_linear und BV05\_linear

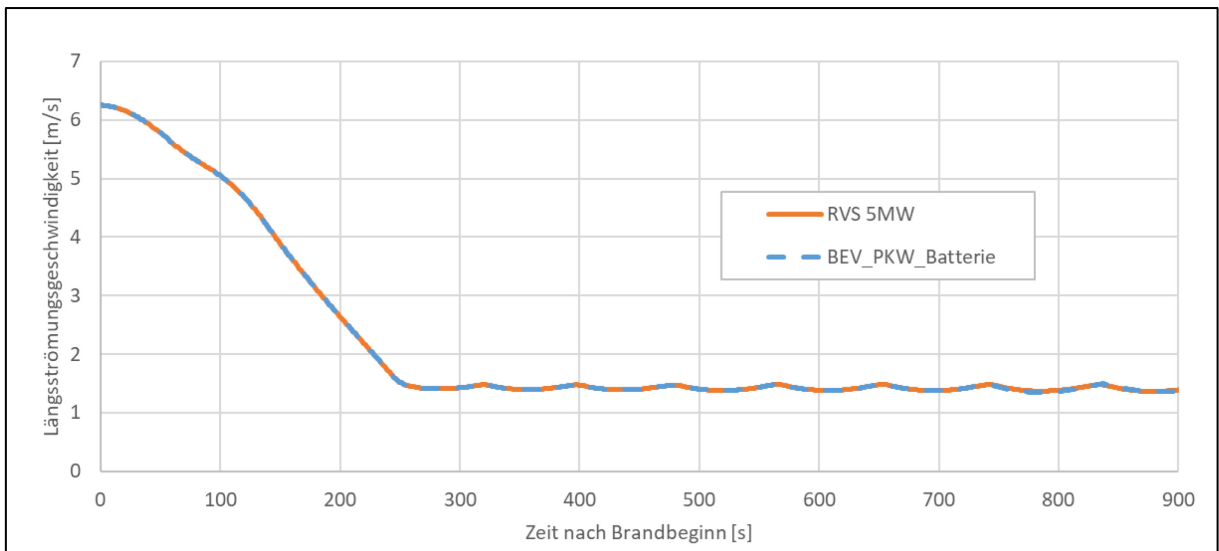


Abbildung 96: Vergleich der Längsströmungsgeschwindigkeiten für RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Batterie

Beginnend bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 6 m/s, bedingt durch den Kolbeneffekt der Fahrzeuge im Tunnel und die Reibungseffekte an der Tunnelwand, sinkt die Geschwindigkeit nach Brandbeginn bzw. nach Beginn der Verkehrsstörung, infolge des geringer werdenden Kolbeneffekts und des größer werdenden Strömungswiderstands der

haltenden Fahrzeuge, ab. Nach Aktivierung der Ereignislüftung wird die Längsströmungsgeschwindigkeit auf 1.5 m/s entsprechend den hinterlegten Steuerungsvorgaben geregelt.

Die aus diesen Strömungsverläufen sowie den jeweiligen Brandkurven und dazugehörigen Emissionen resultierenden Rauchausbreitungsmuster sind in Abbildung 97 und Abbildung 98 veranschaulicht. Die Abbildungen zeigen die Rauchdichte (bzw. den Extinktionskoeffizienten), auf Längsschnitten entlang der Tunnelachse, für unterschiedliche Zeitpunkte, beginnend bei 60 s nach Brandbeginn, bis hin zur maximalen Simulationszeit von 900 s nach Brandbeginn. Der Vergleich der beiden Brandkurven BV03\_linear und BV05\_linear (Abbildung 46) zeigt deutlich höhere Rauchdichten für den BEV-PKW Brand (BV05\_linear) als für den ICEV-PKW Brand (BV03\_linear). In der Simulation des BEV-PKW Brandes tritt außerdem ein ausgeprägtes Backlayering auf, in der Simulation des ICEV-PKW Brandes nicht. Beides ist auf die höhere gemessene Hitzefreisetzungsrate und die dem entsprechend modellierte Ruß-Produktion zurückzuführen.

Der Vergleich der Rauchausbreitungsmuster für die Brandkurven RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Batterie zeigt ebenfalls eine höhere Rauchdichte für den BEV Brand, jedoch in weniger deutlichem Ausmaß als in Abbildung 97. Außerdem tritt in diesem Fall sowohl für die ICEV Brandkurve als auch für die BEV Brandkurve Backlayering auf.

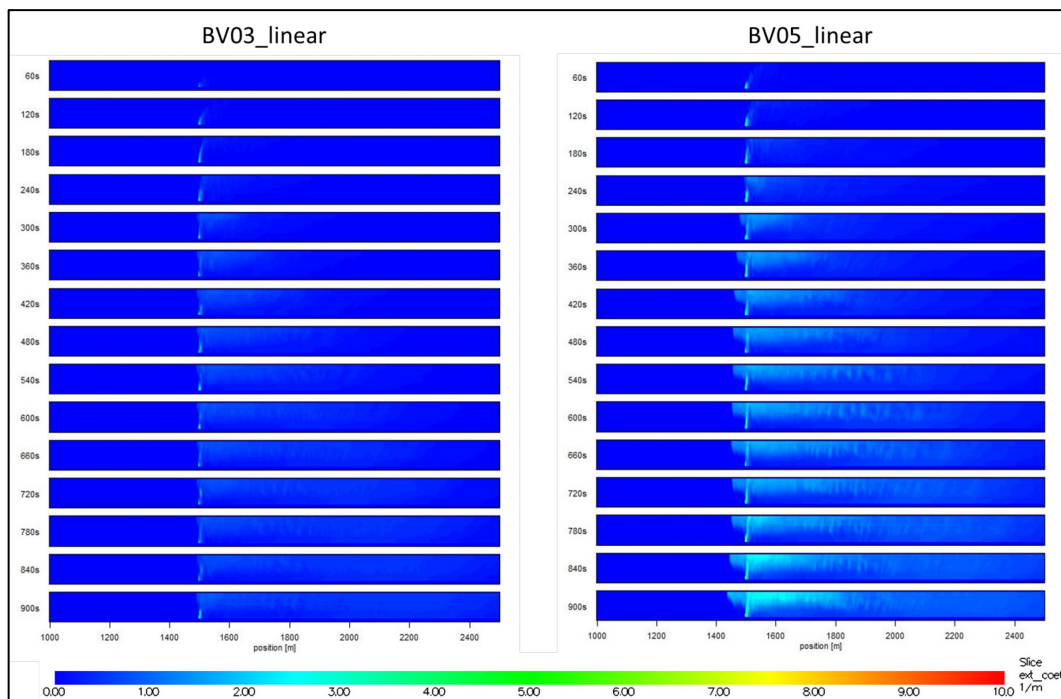


Abbildung 97: Verrauchung entlang der Tunnelachse für die Brandkurven BV03\_linear und BV05\_linear



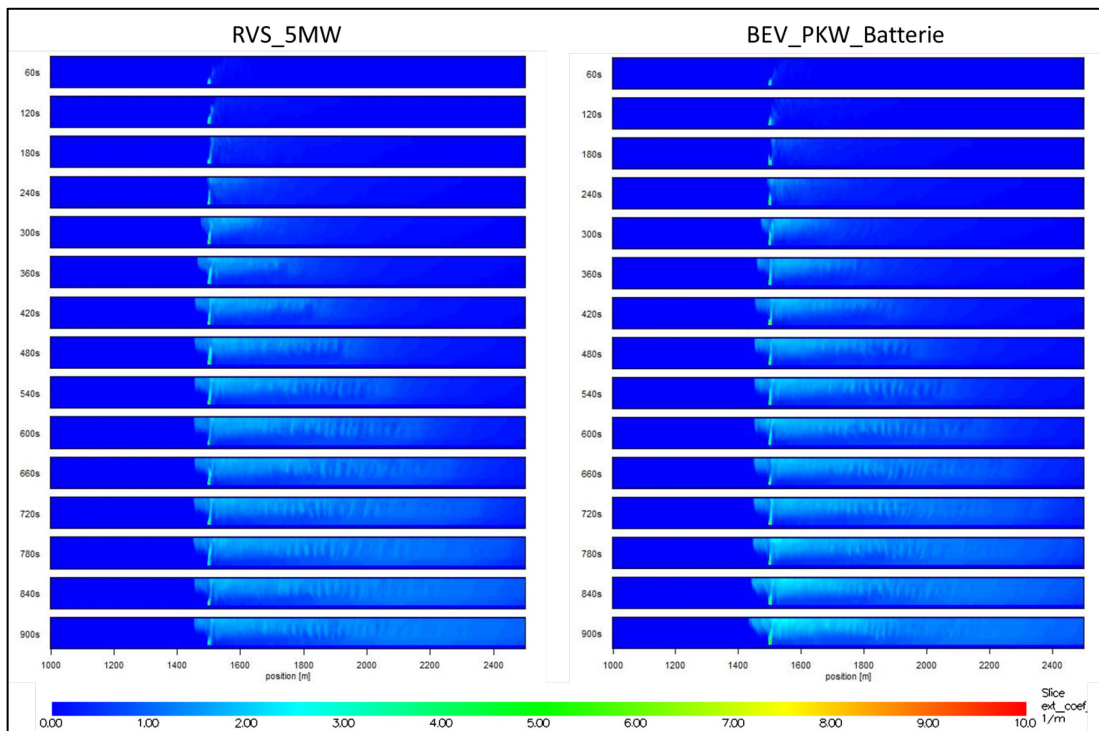


Abbildung 98: Verrauchung entlang der Tunnelachse für die Brandkurven RVS\_5MW und BEV\_PKW\_Batterie

Entscheidend für die Personensicherheit während der Selbstrettungsphase ist (neben der Temperatur) die Rauchdichte bzw. Rauchgaskonzentration auf Kopfhöhe (1.6 m). Diese ist für die Brandkurven BV03\_linear und BV05\_linear, in Form des Extinktionskoeffizienten, entlang der Tunnelachse für unterschiedliche Zeiten in Abbildung 99 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass stromauf des Brandes trotz Backlayering keine relevanten Rauchdichten auf Kopfhöhe nachweisbar sind und somit in beiden Szenarien innerhalb dieses Zeitbereiches keine Gefährdung durch Rauchgase stromauf des Brandes entsteht (eventuell aber durch Hitzestrahlung). In Strömungsrichtung liegen die Rauchdichten auf Kopfhöhe für den BEV-PKW Brand (BV05\_linear) über jenen des ICEV-PKW Brandes (BV03\_linear). Die selben Relationen gelten für den Vergleich der ICEV und BEV Modellbrandkurven RVS\_5MW und BEV\_PKW\_Batterie in Abbildung 100.

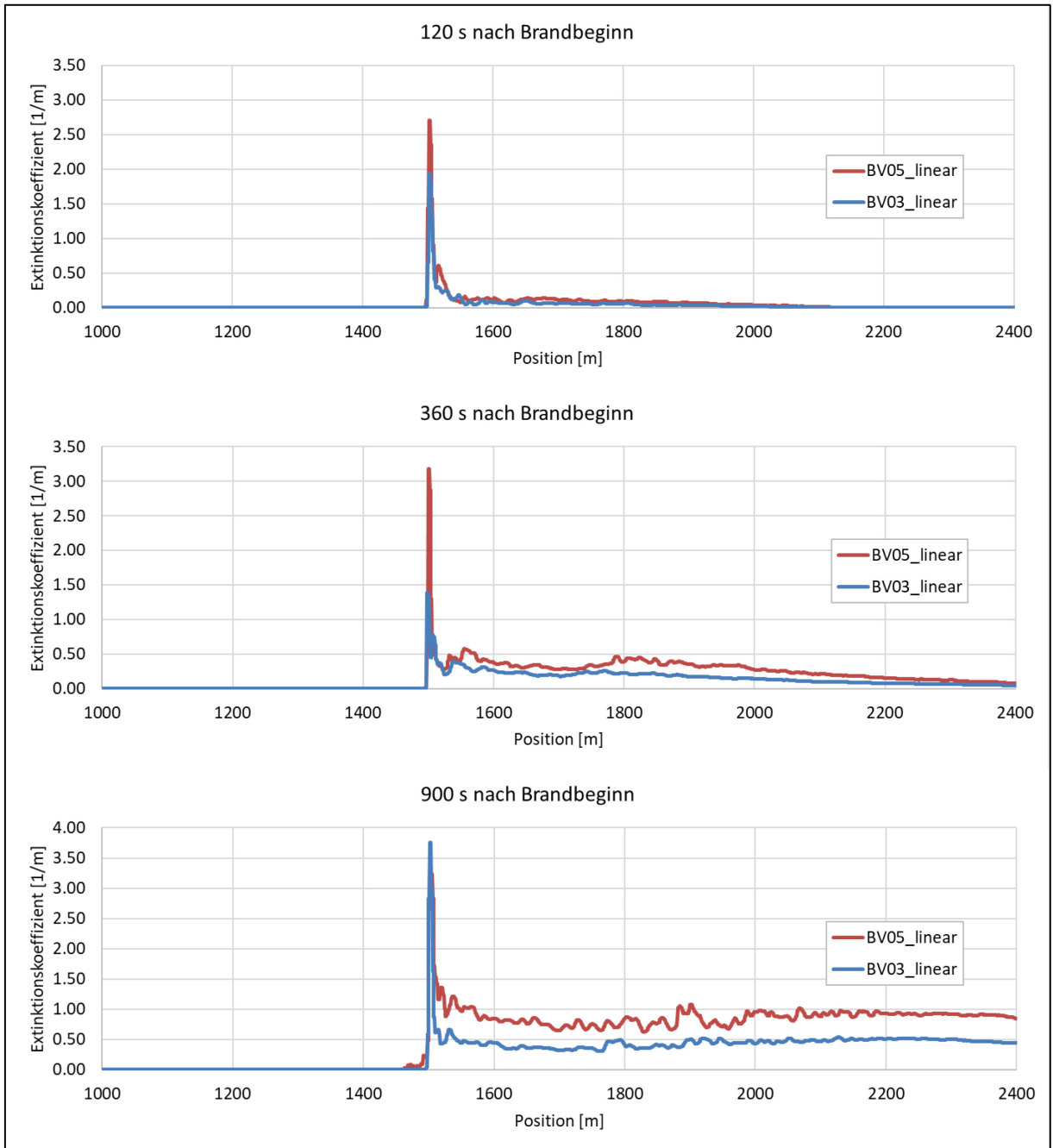


Abbildung 99: Rauchdichte entlang auf Kopfhöhe entlang der Tunnellängsachse für die Brandszenarien BV05\_linear und BV03\_linear

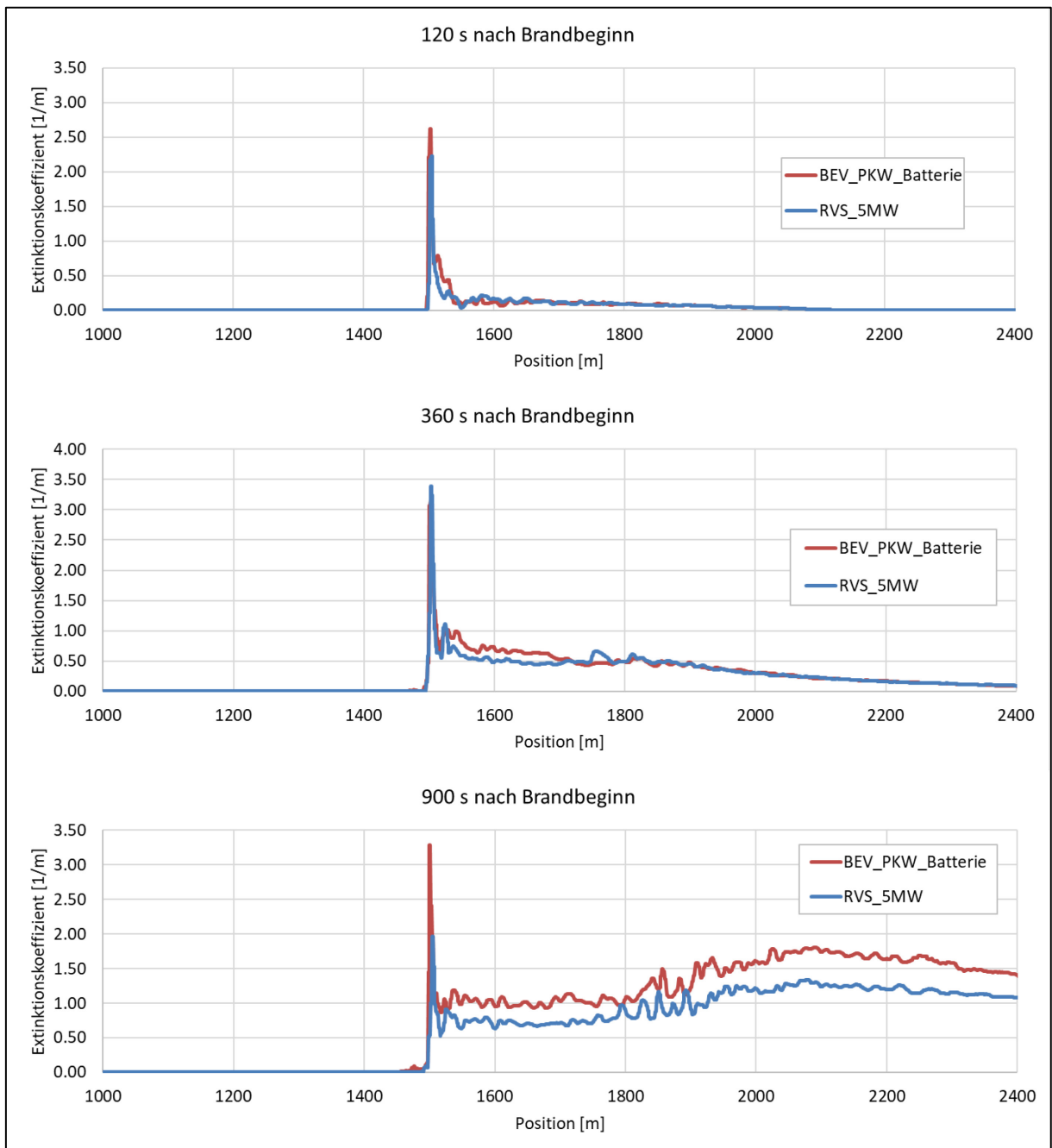


Abbildung 100: Rauchdichte entlang auf Kopfhöhe entlang der Tunnellängsachse für die Brandszenarien BEV\_PKW\_Batterie und RVS\_5 MW

Eine höhere Rauchgaskonzentration auf Kopfhöhe bzw. eine höhere Temperatur muss nicht zwangsläufig auch zu einem höheren Schadensausmaß führen. Entscheidend für eine negative Flucht eines "Agent" ist die Überschreitung des FED bzw. FIC Grenzwertes gemäß Abschnitt 8.3.3. Der Begriff Agent bezeichnet dabei einen in der Evakuierungssimulation betrachteten Stellvertreter für eine flüchtende Person bzw. Personengruppe. Grundsätzlich ist

der Zusammenhang zwischen Rauchgaskonzentration und Evakuierung eines Agent im österreichischen Tunnelrisikomodell nicht trivial, da nicht nur der Fluchterfolg, über den FED bzw. FIC Wert, von der Rauchgaskonzentration abhängt, sondern auch die Fluchtgeschwindigkeit beeinflusst wird. Eine einfache Darstellung der Evakuierungspfade eines Agent in einem Diagramm ist daher schwierig. Um die Auswirkung der unterschiedlichen Brandkurven auf den möglichen Fluchterfolg dennoch auf Basis der Szenarien vergleichen zu können, werden die stationären FED bzw. FIC Werte betrachtet.

Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen den maximalen FED / FIC Wert für einen stationären Agent (gepunktete Linien). Also einen Agent, der während der gesamten Simulationszeit bzw. bis zum Erreichen des Grenzwerts von 1.0 an der jeweiligen Position im Tunnel verweilt. Darüber ist die jeweilige FED / FIC = 1.0 Isolinie dargestellt (durchgezogene Linie). Die Kurven zeigen, zu welchem Zeitpunkt der Grenzwert von FED / FIC = 1.0 am jeweiligen Ort überschritten wird. Für Positionen, an denen der Grenzwert innerhalb der Simulationszeit nicht überschritten wird, liegt die Isolinie auf der maximalen Simulationszeit von 900 Sekunden.

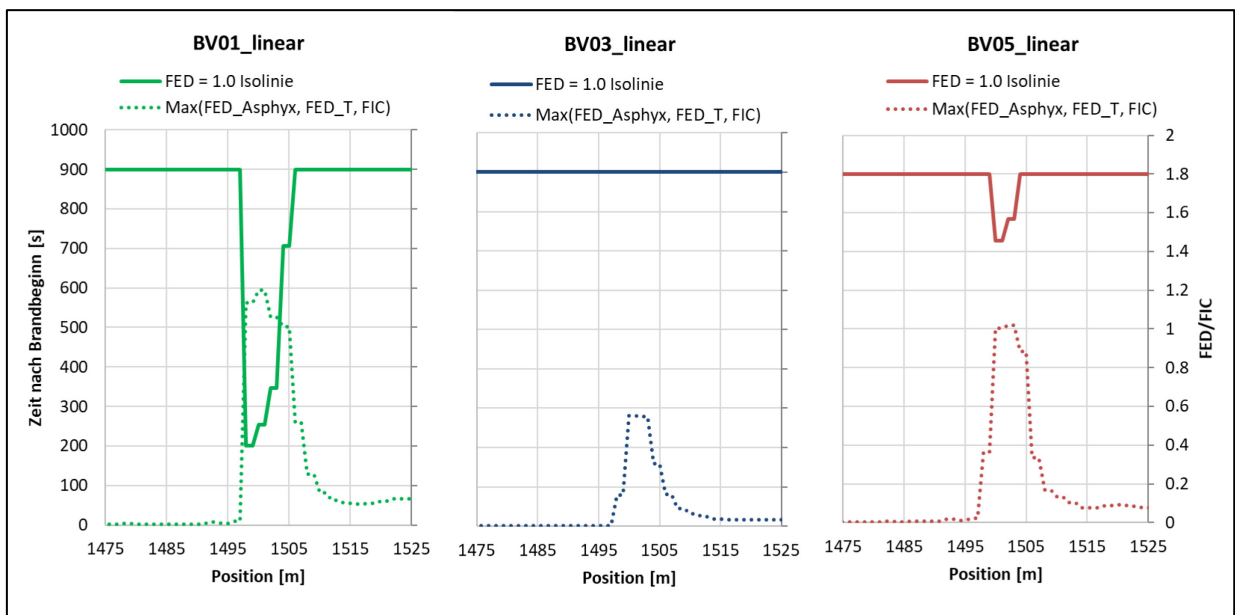


Abbildung 101: FED/FIC =1.0 Isolinie und maximale FED/FIC Werte für die Szenarien BV01\_linear, BV03\_linear und BV05\_linear

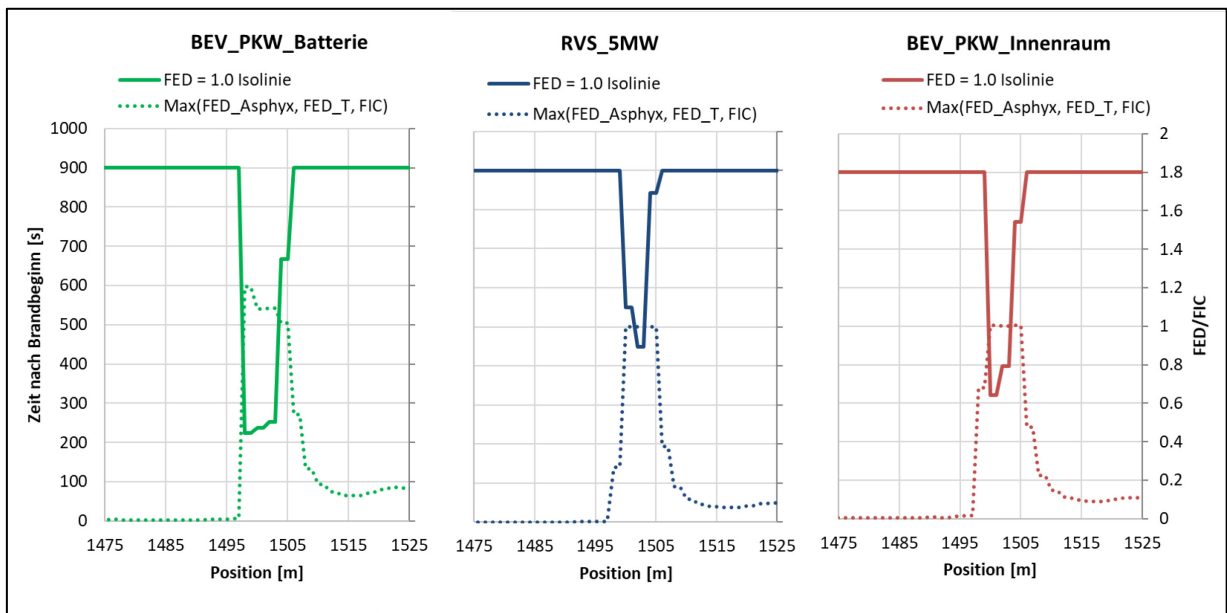


Abbildung 102: FED/FIC=1.0 Isolinie und maximale FED/FIC Werte für die Szenarien BEV\_PKW\_Batterie, RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Innenraum

Der Vergleich der BEV-Brandszenarien und ICEV-Brandszenarien zeigt, dass mit BEV-Brandszenarien mit der Batterie als Brandursprung, das größte Schadensausmaßpotenzial verknüpft ist. Für Brandszenario BV01\_linear wird der FED / FIC Grenzwert über einen deutlich größeren Bereich um den Brandort überschritten, als bei den Brandszenarien BV03\_linear und BV05\_linear. Auch der Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung ist deutlich früher und damit kritischer für die Selbstrettung. Selbe Relation kann für die Brandszenarien BEV\_PKW\_Batterie im Vergleich zu den Szenarien RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Innenraum beobachtet werden.

Für Brandszenario BV03\_linear bleiben die FED/FIC Werte während der gesamten Simulationszeit unterhalb des Grenzwertes von 1.0. Die direkt aus dem ICEV-Brandversuch abgeleitete Brandkurve zeigt daher insgesamt ein deutlich geringeres Schadensausmaßpotenzial als die direkt aus den BEV-Brandkurven abgeleiteten Brandszenarien BV01\_linear und BV05\_linear. Weniger deutlich aber ebenfalls beobachtbar ist dieser Unterschied für die Brandszenarien BEV\_PKW\_Batterie, RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Innenraum. Auch hier ergibt sich eine Grenzwertüberschreitung für den BEV-Brand mit Brandursprung in der Batterie über einen größeren Bereich und zu einem früheren Zeitpunkt. Der Unterschied zwischen den Brandszenarien RVS\_5 MW und BEV\_PKW\_Innenraum, und damit zwischen ICEV-Brandkurve und BEV-Brandkurven, sind für die Modellbrandkurven aber weniger deutlich ausgeprägt.

Zusammenfassend kann aus der Szenarioanalyse geschlossen werden, dass sich für die direkt an die Brandversuche angelehnten BEV-Brandkurven, ein höheres Schadensausmaßpotenzial ergibt, als für die direkt an den ICEV-Brandversuch angelehnte Brandkurve. Für die "repräsentativen" Modellbrandkurven, ist dieser Unterschied weniger deutlich. Für die Selbstrettung ist dieser Unterschied außerdem daher zu relativieren, da der früheste Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung in allen Fällen 200 s beträgt. Die dargestellte Gefährdung ist damit zu einem großen Teil nur für den Anteil der sogenannten "Sitzenbleiber", also jener Agents, für die ein Verbleiben am Ursprungsort angenommen wird, relevant. Diese werden in der Evakuierungssimulation mit einem Anteil von 3 % berücksichtigt. Der übrigen Agents werden für den angenommenen Evakuierungszeitpunkt von 150 s den gefährdeten Bereich bereits größtenteils verlassen haben.

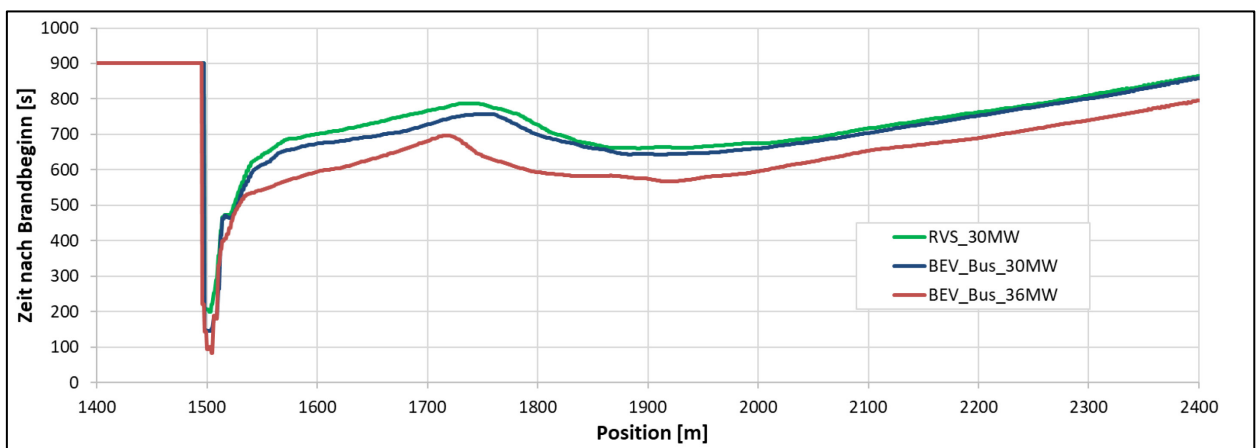


Abbildung 103: FED/FIC =1.0 Isolinie für die betrachteten Bus-Brand Szenarien

Abbildung 103 zeigt die FED/FIC =1.0 Isolinien für die betrachteten Bus-Brandkurven. Die Zeitpunkte der Grenzwertüberschreitung unterscheiden sich für die beiden 30 MW Brandkurven - RVS\_30 MW und BEV\_BUS\_30 MW - kaum. Die angewandten BEV-Freisetzungsraten führen bei unveränderter Brandlast also zu keinem maßgeblich erhöhten Schadensausmaßpotenzial. Die BEV-Busbrandkurve BEV\_Bus\_36 MW führt, aufgrund der erhöhten Brandlast und dementsprechend erhöhten Freisetzungsmenge, zu einer Verschiebung der FED/FIC=1.0 Isolinie nach unten. Das bedeutet, der Gefährdungsbereich bleibt der selbe, die kritischen Werte werden aber schon zu früheren Zeiten erreicht. Für Bus-Brände ergibt sich insgesamt aufgrund der höheren Brandlast und der größeren Freisetzungsmengen ein deutlich vergrößerter Gefährdungsbereich als für PKW Brände, vor allem stromab des Brandortes. Der Unterschied zwischen BEV- und ICEV Bussen ist jedoch gering und nur unter Annahme einer erhöhten Brandleistung, nicht aber unter der Annahme einer erhöhten Branddauer von Bedeutung.



### 8.4.2 Risikoanalyse

Die in Abschnitt 8.4.1 durchgeführte Szenarienanalyse dient zur Abschätzung und Veranschaulichung der durch BEV-Brände potentiell geänderten Gefährdungsbereiche. Aufgrund der nicht berücksichtigten Dynamik der flüchtenden Personen, erlaubt sie jedoch keine Quantifizierung des Risikounterschieds. Für ebendiese Quantifizierung wurde daher eine Risikoanalyse mithilfe des vollständigen Tunnelrisikomodells (inklusive Fluchtmodell) gemäß RVS 09.03.11 (inklusive zuvor beschriebener Adaptionen), am Modelltunnel nach Tabelle 35 durchgeführt. Nach der darin definierten Methodik kam zunächst das detaillierte Schadensausmaßmodell für Tunnelbrände zur Anwendung.

#### Schadensausmaßanalyse

Abbildung 104, Abbildung 105 und Abbildung 106 zeigen die ermittelten Schadensausmaßwerte für Primärereignisse, Sekundärereignisse und Tertiärereignisse, für die neun abgeleiteten Brandmodellkurven. Sekundär und Tertiärereignisse sind dabei aufgrund der deutlich höheren Schadensausmaßwerte in einer getrennten Grafik (rechts) mit adaptierter Skala dargestellt.

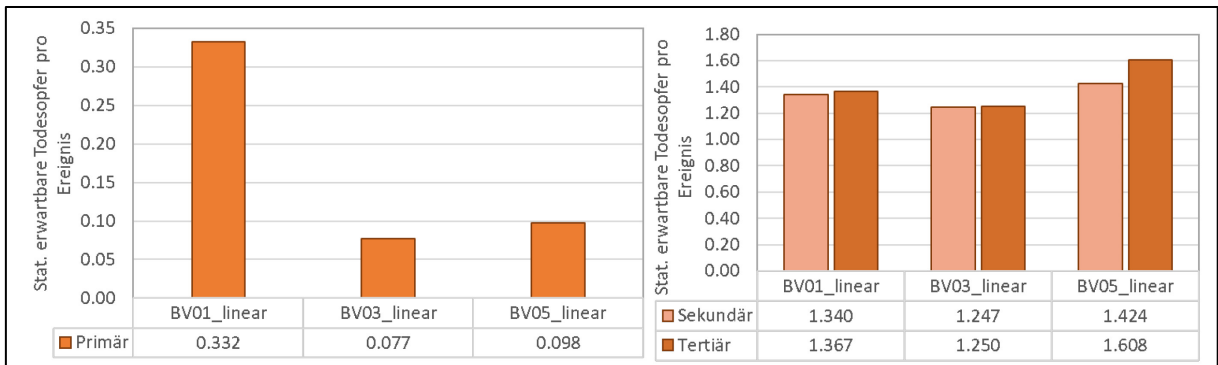


Abbildung 104: Schadensausmaßwerte für PKW Brandkurven gemäß Brandversuche

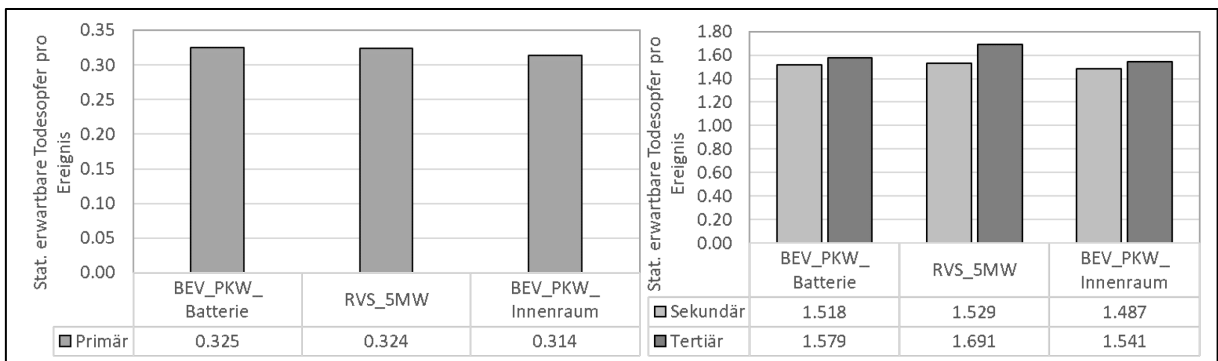


Abbildung 105: Schadensausmaßwerte für PKW Brandkurven gemäß repräsentativer Modellbrandkurven

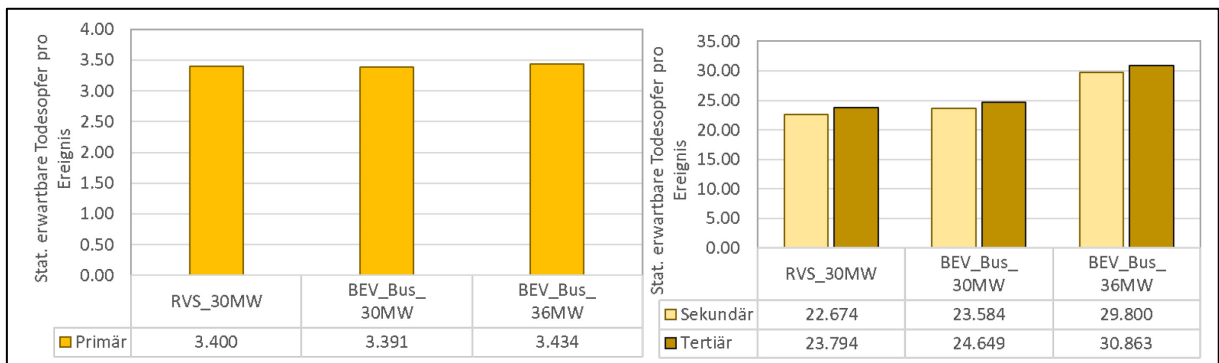


Abbildung 106: Schadensausmaßwerte für Bus Brandkurven

Für die direkt aus den Brandversuchen abgeleiteten linearisierten Brandkurven (Abbildung 104) zeigt sich ein deutlich höheres primäres Schadensausmaß für den Brandversuch BV01, also den BEV Brand mit Entzündung in der Batterie. Diese Ergebnis deckt sich mit der Szenariountersuchung, vgl. Abbildung 101. 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.

Für die abgeleiteten repräsentative Modellbrandkurven (Abbildung 105) ist sowohl für Primäreignisse als auch für Sekundär- und Tertiäreignisse kein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Brandkurven und damit der unterschiedlichen Freisetzungsraten hinsichtlich toxischer- und reizender Stoffe feststellbar. Selbe Feststellung gilt für die abgeleiteten Bus-Brandkurven (Abbildung 106). Hier wird lediglich ein gegenüber den PKW Brandkurven insgesamt erhöhtes Schadensausmaß, aufgrund der allgemein höheren Brandlast, deutlich.

Um diese Ergebnisse besser einordnen zu können, wird auf die Herleitung der Brandkurven verwiesen. Die direkt aus den Brandversuchen abgeleitete Brandkurve BV01\_linear enthält den im Vergleich zu den Brandkurven BV03\_linear und BV05\_linear deutlich rascheren Anstieg. Dieser wurde durch die gezielte Einleitung der Salzlösung in das Batteriegehäuse und die den damit initialisierten gleichzeitigen Thermal Runaway eines Großteils der Batteriezellen ausgelöst. Dieses Brandverhalten ist in einem realen Unfall nicht zu erwarten. Sollte es durch mechanische Einwirkung etwa zu einem Batteriebrand kommen, ist es eher wahrscheinlich, dass sich die einzelnen Zellen zeitversetzt entzünden und so der Anstieg der Brandkurve verlangsamt wird. Dieser Konservatismus wurde in der Ableitung der repräsentativen Modellbrandkurven berücksichtigt, bei denen für alle drei Brandkurven, das selbe initiale Brandwachstum angesetzt wurde.

## Risikoevaluierung

Die diskutierten Schadensausmaßwerte wurden 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 grobe Abschätzung des potenziellen Einflusses von BEV-Bränden auf das Tunnelrisiko zu ermöglichen, wurden daher maximale Verkehrsszenarien betrachtet:

- Im ersten Verkehrsszenario - BEV 100 % wurde ein BEV Anteil von 100 %, sowohl für PKW als auch für Busse angenommen.
- Im zweiten Verkehrsszenario - ICEV 100 % - wurde ein ICEV Anteil von 100 %, sowohl für PKW als auch für Busse angenommen.
- Für LKW wurde in beiden Verkehrsszenarien ein ICEV Anteil von 100 % angenommen.

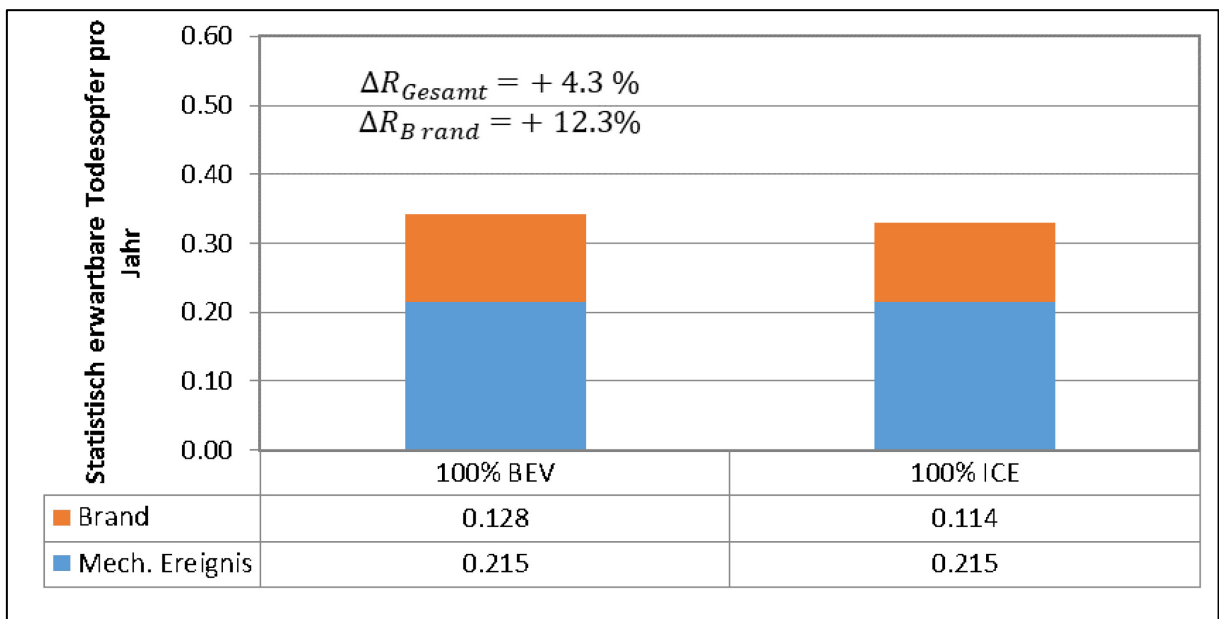


Abbildung 107: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01\_linear und BV03\_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV\_Bus\_36 MW bzw. RVS\_30 MW

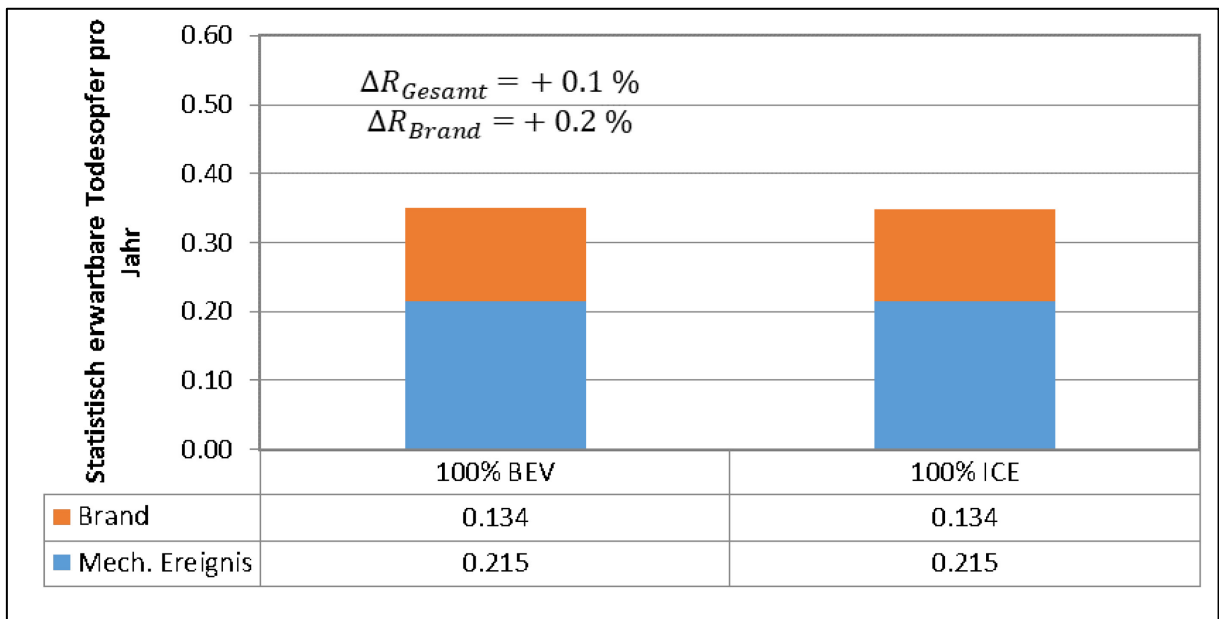


Abbildung 108: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der Modellbrandkurven - BEV\_PKW\_Batterie bzw. RVS\_5 MW sowie der Bus-Brandkurven BEV\_Bus\_36 MW bzw. RVS\_30 MW

Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen die Risikoerwartungswerte für die beiden betrachteten Verkehrsszenarien. 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. Werden die Modellbrandkurven für den Vergleich herangezogen ist kein relevanter Risikoanstieg festzustellen.

Die beiden Vergleiche zeigen, dass auf Basis der während der Brandversuche gesammelten Daten (insbesondere hinsichtlich Freisetzung toxischer Stoffe) und der getroffenen Annahmen zur Verallgemeinerung der Brandverläufe, kein signifikanter Einfluss von BEV-Fahrzeugen auf das Personenrisiko im Tunnel abgeleitet werden kann (Risikoerhöhung < 1 %). Gleichzeitig wird aber deutlich, dass einzelne Brände in ihrem Ablauf immer vom "Regelfall" abweichen können und sich somit ein geringeres, oder erhöhtes Brandrisiko und damit ein geänderter Einfluss von BEV-Fahrzeugen, ergeben kann - Erhöhung Brandrisiko für linearisierte Brandkurven ohne Verallgemeinerung > 10 %). Insgesamt zeigen die beiden Risikovergleiche einen Bereich auf, in dem der Einfluss von BEV-Fahrzeugen nach heutigem Wissensstand am ehesten liegen wird. Eine absolute verallgemeinerte Aussage ist aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen schwierig. Diese Einschränkung muss bei der Interpretation der Forschungsergebnisse auf jeden Fall berücksichtigt werden.

## **Sensitivitätsbetrachtung**

Um die Risikoevaluierung durchzuführen, wurden Annahme getroffen, die den Einfluss von BEV-Fahrzeugen auf das zu erwartende Risiko eventuell beeinflussen können. Daher wurde für die Eingangsgrößen Verkehrsparameter und FED/FIC Tolerabilität eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse finden sich in Kapitel 15.3.

## **8.5 Schlussfolgerungen**

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 wobei aber gleichzeitig berücksichtigt werden muss, dass eine Ableitung allgemeiner Schlussfolgerungen auf Basis weniger Brandversuche schwierig ist. Alle Gefährdungs- und Risikovergleiche zwischen BEV und ICE-Fahrzeugen wurden daher sowohl auf Basis der adaptierten Brandkurven der Brandversuche sowie auf Basis der verallgemeinerten Brandkurven, die wiederum aus den gemessenen Brandkurven und allgemeinen Annahmen abgeleitet wurden, durchgeführt.

Der Vergleich auf Basis der verallgemeinerten Brandkurven, die mit dem Ziel repräsentativ für allgemeine BEV-Brände bzw. ICE-Fahrzeugbrände zu sein, modelliert wurden, zeigt keinen relevanten Einfluss von BEV-Bränden auf das Personenrisiko im betrachteten Modelltunnel. Eine allgemein höhere Gefährdung durch BEV und insbesondere durch während der Brandes freiwerdenden Stoffe, allen voran HF bzw. Flusssäure, kann auf Basis der durchgeführten Analyse nicht bestätigt werden.

Andererseits zeigen die Vergleiche auf Basis der linearisierten gemessenen Brandkurven, dass sich im Einzelfall für Brände vergleichbarer Fahrzeuge durchaus eine geänderte Gefährdung ergeben kann.

Die Ermittlung eines festen Risikofaktors zwischen BEV und ICE-Fahrzeugen auf Basis einiger weniger Brandversuche ist nicht möglich. Vielmehr zeigt der verwendete Ansatz einen Bereich auf, in dem sich die Risikoänderung von BEV-Bränden aus heutiger Sicht am ehesten befinden wird. Eine Eingrenzung bzw. Absicherung der Risikoänderung durch BEV-Brände kann nur mit Hilfe einer größeren Datenbasis, entweder durch weitere Fahrzeugbrandversuche, oder durch den größer werdenden Erfahrungsschatz hinsichtlich aus BEV-Brandereignissen in Straßentunneln, beruhen.

## 9 INFRASTRUKTURELLE AUSWIRKUNGEN

Der Untersuchungsumfang im Rahmen des Forschungsprojektes war sehr groß gesteckt, sodass aus budgetären Gründen eine Priorisierung von Themen erfolgen musste. Im Fokus der Untersuchungen waren die Brandversuche von BEV und die daraus abgeleiteten Gefährdungspotentiale für Tunnelnutzer.

### 9.1 E&M Ausrüstung

#### 9.1.1 Sensorik zur Branderkennung

Prinzipiell zeigte sich bei den Versuchen gegenüber Brandereignissen mit konventionellen Fahrzeugen keine grundlegenden Veränderungen, die eine Veränderung oder Erweiterung der bestehenden Sensorik zur Branderkennung erfordern würde. Die Erkennungsmerkmale für Brände – Rauchfreisetzung, Temperaturanstieg, sind die gleichen.

Bei Unfällen, bei denen es zu Ausgasungen von Schadstoffen aus den Batterien ohne darauffolgende Brandentstehung kommt, kann eine Detektion dieser Gase mit der derzeitigen Sensorik nicht erfolgen. Hier sind weiterführende Untersuchungen vor allem in Bezug auf Häufigkeit und Relevanz notwendig, bevor an einen Einsatz zusätzlicher Sensorik gedacht wird.

#### 9.1.2 Dimensionierungsvorgaben für Lüftungsanlagen

Die Versuche haben gezeigt, dass sich die Wärmefreisetzungsraten bei BEV-PKW Bränden leicht ändern, diese Brandereignisse sind aber in der Regel nicht dimensionierungsrelevant. Bei Nutzfahrzeugen kommt es durch den Energiespeicher zu einer höheren Brandlast, aber auch hier ist anzumerken, dass bei Großbränden (50 MW max. HRR) das Ladegut die dominierende Wärmequelle ist und nicht der Energiespeicher. Falls es sich jedoch um einen Tunnel mit einem hohen Anteil von BEV-Bussen handelt ist eine Erhöhung der max. HRR von derzeit 30 MW auf 36 bis 40 MW anzudenken. Sollte es sich doch um einen Tunnel mit ausschließlichem PKW Verkehr handeln, so wäre auch in diesem Fall eine Erhöhung der Dimensionierungsbrandlast zu diskutieren.

Eine gewisse Änderung wäre eventuell auch in der Regelstrategie der Lüftung im Falle eines Unfalles mit BEV-Beteiligung anzudenken. Wie oben angeführt, kann eine reine Gasfreisetzung aufgrund der zu erwartenden geringen Rauchdichte kaum detektiert werden. Derzeit wird der Brandfallmodus einer mechanischen Lüftung erst mit Detektion eines Brandes aktiviert. Solange dies nicht erfolgt verbleibt die Lüftung im Normalbetrieb (CO und Trübe-Überwachung). Um die Konzentration eventuell aus BEV freigesetzten Schadgasen gering zu



halten, wäre eine forcierte Lüftung ein möglicher Weg. Vorgaben dazu wären aber erst auszuarbeiten.

### **9.1.3 Löschwasser und Gewässerschutzanlagen**

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 m<sup>3</sup> werden angesichts der durchgeführten Brandversuche mit PKWs seitens der am Projekt beteiligten Feuerwehr als ausreichend beurteilt.

Nachdem keine große Änderung der Löschwassermengen zu erwarten sind, erscheint aus heutiger Sicht auch die Größe der Gewässerschutzanlage für ausreichend. Es ist jedoch zu erwarten, dass das im Rückhaltebecken gesammelte Löschwasser nach BEV Brandereignissen fachgerecht entsorgt werden muss.

## **9.2 Struktur Bauwerk, Materialien**

Die Auswirkungen der Brände von Fahrzeugen mit herkömmlichem und alternativem Antrieb können entsprechend einer Sichtweise beurteilt werden, die einerseits speziell auf den Brandort ZaB und die zugehörige Anlage und andererseits auf allgemeine Auswirkungen fokussiert. So musste für die Durchführung der Brandversuche eine thermische Isolierung von Kabeltrassen sowie etwaiger Sensoren installiert werden, damit Beschädigungen der Tunnelinfrastruktur nicht eintraten.

Zu den allgemeinen erwartbaren Auswirkungen auf die Infrastruktur von BEV-Fahrzeugbränden zählen Schäden an der Fahrbahn, die aus deren Branddauer und den höheren Temperaturen herrühren. Zu ihnen gesellen sich längere Sperrzeiten betreffend den Verkehr und höhere Kosten der Sanierung (Fahrbahndecke, Tunnelanstrich etc.) und der Reinigung des Infrastrukturbauwerks, da infolge der längeren Branddauer mehr Rückstände an der Tunnelaibung auftreten werden. Diese Auswirkungen hängen jedoch vom individuellen Brandgeschehen des jeweiligen Fahrzeuges ab. Aus der Anzahl der im vorliegenden Projekt durchgeführten Brandversuche lässt sich kein statistisch signifikantes Brandverhalten ableiten. Zusätzliche Aufwände ergeben sich aus der Behandlung des Fahrzeuges nach dem Brand.

Die Auswirkungen der Brände von Fahrzeugen können von einem Gesichtspunkt der Brandlast betrachtet werden. So lassen sich trivial aus einem Brand eines Fahrzeuges mit herkömmlichem Antrieb, aber höherer Brandlast (z.B. Bus) größere Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur folgern, als aus einem Brand eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuges mit geringerer Brandlast (z.B. PKW). Die Versuche mit PKW-Fahrzeugen haben

infolge der bei den Bränden entstandenen Temperaturen keinen Effekt auf die Tunnelschale gezeitigt. Damit traten in dem Projekt die von Brandszenarien bekannten Versagensformen der Baustoffe wie Beton und Stahlbeton nicht auf.

Um mögliche Auswirkungen darzustellen, wurde eine numerische Hochskalierung der PKW-Versuche auf weitere Fahrzeugtypen wie einen batterieelektrisch betriebenen Omnibus vorgenommen. Dieser BEV-Fahrzeugtyp vermag eine höhere Brandlast zu entfalten, als ein herkömmlicher ICEV-Omnibus, wobei die Position der Fahrzeugbatterie speziell auf dem Autodach eine Gefährdung der Innenschale sowie einer allfälligen Zwischendecke ausstrahlt. Aus dieser Bauart kann eine besondere Exposition von Stahlbetonbauteilen oberhalb geschlussfolgert werden, weil mit dieser Positionierung der Batterie die Distanz zur Struktur des Tunnels stark verkleinert wird. In der Hochskalierung wurden die an einer Zwischendecke ankommenden Brandtemperaturen hergeleitet, die in Abbildung 46 veranschaulicht sind. Die Abbildung 46 weist auf die zu erwartenden Temperaturen innerhalb des Betons sowie an Bewehrungslagen hin, die Entfestigungen von Stahlbetonbauteilen abhängig von der Branddauer herbeiführen können. Die zunehmende Branddauer bewirkt ein Eindringen steigender Temperaturen in das Bauteil, die einen negativen Effekt für Verformungs- und Festigkeitsparameter haben und beschriebene Versagensformen der Baustoffe wahrscheinlicher machen. Die ermittelten Temperaturen können auch potenziell mit der in RVS 09.01.45 genannten Bauteiloberflächentemperatur bei Beton 350°C und der Temperatur an der Bewehrung von 250°C in Konflikt innerhalb der vom Schutzniveau festgelegten Nachweiszeit stehen. Bei der Bezugnahme auf diesen Fahrzeugtyp muss jedoch berücksichtigt werden, dass im vorliegenden Projekt kein Brandversuch mit diesem Fahrzeugtyp durchgeführt worden ist und die Simulation einen Thermal Runaway der Batterie zu Grunde legt, um diese Brandlast zu entfalten. Das zahlenmäßige Vorkommen dieser Omnibusse im Verkehr ist gegenwärtig gering.

### **9.3 Nachsorge bzw. Entsorgung der Fahrzeuge**

Eine Entsorgung des gesamten Fahrzeuges (Karosserie und Batterie) ist nach der derzeitigen österreichischen Rechtslage nicht möglich, sodass vor der Entsorgung immer eine Demontage der Batterie durch eine Spezialfirma erfolgen muss.

Die kontrollierte Versuchsdurchführung mit den bereitstehenden batterieelektrisch betriebenen Brandfahrzeugen hat deren spezielle Versuchsvorbereitung vorausgesetzt. Diese Versuchsvorbereitung umfasste auch Maßnahmen zur erleichterten Entsorgung des Fahrzeugwracks im Nachgang des Versuchs, wo eine Trennung des Fahrzeuges und dessen Batterie unumgänglich war. Die Batterie sollte auch trotz eventueller Verformungen des Fahrzeugwracks ausbaubar sein, indem deren Befestigungen im Vorhinein gelockert wurden,

um eine separate Entsorgung zu ermöglichen. Da die Fahrzeuge zum Brandort gehoben wurden, waren Anforderungen seitens der normalen Verkehrstüchtigkeit nicht mehr gegeben. Die Fahrzeugwracks unterschieden sich folglich von einem herkömmlichen Brandunfall in einem Tunnel, wo die Fahrzeugentsorgung im Nachhinein Schwierigkeiten verursachen wird.

Die Aufgaben der Feuerwehr sind im Brandunfall von BEV-Fahrzeugen sowie auch von ICE-Fahrzeugen der Abtransport des beschädigten Fahrzeugs bis zu einem Abstellplatz. Die Flutung des Fahrzeugs in einem Abrollcontainer ist lediglich ein letztes Mittel zur Verhinderung einer neuerlichen Entflammung des Fahrzeugs und ist nicht für jeden Brand vorgesehen. Eine Übergabe an ein Abschleppunternehmen kann erst erfolgen, nachdem keine Anzeichen eines fortbestehenden Brands vorliegen. Für die Verwahrung empfiehlt sich ein Platz im Freien isoliert von anderen Gegenständen, um die Gefahr einer Brandausbreitung im Falle eines erneuten Aufflammens zu minimieren. Abbildung 109 zeigt den Versuchsträger von BV02 nach dem Brandversuch und dem Transport aus dem Tunnel. Der ausgebaute Energiespeicher (Bild rechts sowie im unteren Teil von Bild links) ist noch im glühenden Zustand.



*Abbildung 109: Versuchsträger nach dem Brandversuch (links) sowie Batterie im ausgebauten aber noch glühendem Zustand (rechts)*

Die Messdatenerfassung betreffend die Schwermetallabscheidungen während des Brandes warfen Überschreitungen der IDLH-Werte (Immediately Dangerous to Life and Health) von Ni aus. Es ist zu beachten, dass bei der Hantierung mit dem Fahrzeugwrack und der Batterie zur separaten Entsorgung nicht von einem vollständigen Fehlen erhöhter, für die Bearbeiter relevanter Nickelkonzentrationen ausgegangen werden kann.

## 10 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

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. Diese 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 bezogen auf die gesamte freigesetzte Menge 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 O<sub>2</sub>-Verläufe bestätigen die Annahme, dass es sich um kraftstoffgesteuerte Brände handelte. Bei den Gasmessungen konnte festgestellt werden, dass H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> bei allen Versuchen und Messpunkten 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-BUS-Brand, jedoch verlängerte 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 einstellte. Dies liegt u.a. auch daran, dass der Löschangriff in der Regel erst nach ca. 10 Minuten nach Brandbeginn erfolgte und die Batterie vor den Löschanversuchen 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 Löschlanze 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 m<sup>3</sup> 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 bleiben 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 der 0,5 mg/l der 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 herkömmlicher 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 Referenzunnel 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<sup>6</sup>. 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 Raumdichte 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 Wärmefreisetzungsraten. 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.
- Wärmefreisetzungsraten: Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsraten erfolgte über messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen, die ein sehr dichtes Temperatur- und

---

<sup>6</sup> Diesen Ergebnissen liegen die direkt gemessenen Brandkurven zu Grunde, die sich zum Teil auf Grund der Art der Entzündung (Flutung der gesamten Batterie) unter Umständen von realen Tunnelereignissen unterscheiden.



Geschwindigkeitsmessnetz in den Messquerschnitten erfordern. Auch hier wirkte sich das limitierte Budget auf die Aussagegenauigkeit ungünstig aus. Alternativmethoden, wie z.B. die Verwendung von O<sub>2</sub>-Bilanzen sind jedoch bei den hohen Luftmengen in einem Tunnel nicht zielführend

- Nutzfahrzeuge: Die Auswirkungen von BEV-Nutzfahrzeug Bränden 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.

## 11 DANKSAGUNG

Das Forschungsteam dankt ausdrücklich allen Teilnehmern des Workshops 2018 für Ihre Unterstützung:

- Fa. Saubermacher, Dr. Astrid Arnberger
- Fa. Samsung Batterie, Dr. Florian Prosznigg
- RI.SE – Professor Haukur Ingason (S)
- STUVA – Dr. Frank Leismann (D)

Den Mitgliedern des Koordinationsteams:

- MR DI Sonja Wiesholzer (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, BMK)
- DI Stansilaw Lopacinski (BMK)
- Ing. Günter Rattei (ASFINAG)
- Ing. Klaus Schinagl (ASFINA)

sowie folgenden Organisationen:

- Laboratorium für Umweltanalytik GmbH, Cottagegasse 5, 1180 Wien, DI Reinhard Ellinger
- Technische Universität Wien, Institut für Chemische Technologien und Analytik, Ao. Univ.-Prof. Dr. Anne Kasper-Giebl

## 12 REFERENZEN

- [1] Statista GmbH, 2021. [Online]. Available: <https://de.statista.com/>.
- [2] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „E-Mobilitätsoffensive 2021,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/alternative\\_verkehrskonzepte/elektromobilitaet/foerderungen/e-mobilitaet2021.html](https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/alternative_verkehrskonzepte/elektromobilitaet/foerderungen/e-mobilitaet2021.html).
- [3] K. Bergmeister, Sicherheit und Brandschutz im Tunnelbau in: Beton-Kalender 2013, Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [4] AUDI AG, „Audi A3 Sportback e-tron,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/hybrid-technologies/audi-a3-e-tron\\_en](https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/hybrid-technologies/audi-a3-e-tron_en).
- [5] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2018, Towards cross-modal electrification, 2018.
- [6] R. Korthauer, Handbuch Lithium-Ionen Batterien, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [7] J. Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, Elsevier Science, 2015.
- [8] Wikimedia Foundation Inc., „Lithium-Ionen-Akkumulator,“ 2021. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>.
- [9] R. Marom, F. Amalraj, N. Leifer, D. Jacob und D. Aurbach, „A review of advanced and practical lithium battery materials,“ *Journal of Materials Chemistry*, 2011.
- [10] M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler und J. Garche, „Aging mechanisms of lithium catode materials,“ *Journal of Power Sources*, 2004.
- [11] J. Vetter, P. Novák, M. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler und A. Hammouche, „Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, 2005.
- [12] G. Sarre, P. Blanchard und M. Broussely, „Aging of Lithium-Ion Batteries,“ *Journal of Power Sources*, 2004.
- [13] P. Arora und R. E. White, „Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries,“ *Journal of the Electrochemical Society*, 1998.
- [14] X. Feng, M. Fang, X. He, M. Ouyang, L. Lu, H. Wang und M. Zhang, „Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry,“ *Journal of Power Sources*, 2014.

- [15] W. Sinz, F. Feist, G. Gstrein, J. Gugler, E. Tomasch, C. Breitfuß, P. Luttenberger, H. Steffan, V. Hennige und P. Gollob, „Concepts for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries,“ *Proceedings of SAE World Congress*, 2012.
- [16] R. E. Doughty D, „A general discussion of Li Ion battery safety,“ *Electrochemical Society Interface*, 2012.
- [17] F. Colella, N. Ponchaut, H. Biteau, K. Marr, V. Somandepalli, Q. Horn und R. Long, „Electric vehicle fires,“ *7th International Symposium on Tunnel Safety and Security*, 2016.
- [18] J. Kunkelmann, Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.
- [19] L. D. Mellert, U. Welte, M. Hermann, M. Kompatscher und X. Ponticq, „Electric Mobility and Road Tunnel Safety,“ in *9th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'*, Graz, 2018.
- [20] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén und B.-E. Mellander, „Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests,“ *Journal of Power Sources*, 2014.
- [21] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist und B.-E. Mellander, „Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires,“ *Scientific Reports* 7, 10018, 2017.
- [22] F. Larsson und B.-E. Mellander, „Abuse by External Heating, Overcharge and Short Circuit of Commercial Lithium-Ion Battery Cells,“ *Journal of the Electrochemical Society*, pp. A1611-A1617, 2014.
- [23] F. Larsson, P. Andersson und B.-E. Mellander, „Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests,“ *Batteries*, p. 9, 2016.
- [24] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle und G. Marlair, „Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry,“ *Energy and Environmental Science*, pp. 5271-5280, 2012.
- [25] 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.
- [26] N. S. Spinner, C. R. Field, M. H. Hammond, A. Bradley, K. M. Myers und A. L. Lubrano, „Physical and chemical analysis of lithium-ion battery cell-to-cell failure events inside custom fire chamber,“ *Journal of Power Sources*, pp. 713-721, 2015.
- [27] R. M. Spotnitz und J. Franklin, „Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, pp. 81-100, 2003.
- [28] S. Hess, M. Wohlfahrt-Mehrens und M. Wachtler, „Flammability of Li-Ion Battery Electrolytes: Flash Point and Self-Extinguishing Time Measurements,“ *Journal of The Electrochemical Society*, 2015.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple und J. Anderson, Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles., Sweden: RISE Research Institutes of Sweden AB, 2020.
- [32] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist und B. E. Mellander, „Toxic flouride gas emissions from lithium-ion battery fires,“ *Scientific Reports* 7, 10018, 2017.
- [33] D. Purser, „Toxicity Assessment of Combustion Products,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy, MA, USA, National Fire Protection Association, 2002, pp. 2-83 - 2-171.
- [34] N. P. Lebedeva und L. Boon-Brett, „Considerations on the chemical toxicity of contemporary Li-Ion battery electrolytes and their components,“ *Journal of the Electrochemical Society*, pp. 821-830, 2016.
- [35] F. Larsson, Lithium-ion battery safety, Göteborg, Schweden: Chalmers tekniska högskola, 2017.
- [36] M. Swain, Fuel Leak Simulation, Miami: Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535, 2001.
- [37] Y. Maeda, H. Ito, Y. Tamura, J. Suzuki und S. Watanabe, „Diffusion and Ignition Behavior on teh Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen Fuelled Vehicle,“ *SAE Technical Papers Series*, 2007.
- [38] 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.
- [39] 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].
- [40] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell, Wien, 2015.
- [41] C. Forster, Arbeitsbericht zum Arbeitsausschuss Tunnel-Sicherheit: Erweiterung und Vertiefung des österreichischen Tunnelrisikomodells - TuRisMo 2.0, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015.

- [42] National Center for Biotechnology Information, „PubChem Database: Hydrofluoric acid - CID=14917,“ 15 Mai 2020. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrofluoric-acid>. [Zugriff am 15 Mai 2020].
- [43] Subcommittee of the National Research Council (US) on Acute Exposure Guideline Levels, National Center for Biotechnology Information, 2004. [Online]. Available: <http://www.nap.edu/catalog/10902.html>. [Zugriff am 15 Mai 2020].
- [44] B. Truchot, G. Leroy und G. Marlair, „CFD And Engineering Method Coupling for Evaluating the Fire Relative to Battery Transportation,“ in *8th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'*, Graz, 2016.
- [45] Internationale Organisation für Normung (ISO), ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, 2012.
- [46] W. Kusterle, „Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton,“ *Straßenforschung Heft 544*, 2004.
- [47] K. Kordina und C. Meyer-Ottens, *Beton Brandschutz-Handbuch*, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 1999.
- [48] H. Falkner, K. Kordina und D. Gerritzen, *Untersuchungen zum Brandverhalten von Flachdecken mit freier Spannliedlage*, TU Braunschweig, 2002.
- [49] K. Bergmeister, M. Matousek und A. Haack, *Tunnelsicherheit in: Beton-Kalender 2005*, Berlin: Ernst & Sohn, 2005.
- [50] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), *Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke*, Wien, 2015.
- [51] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), *RVE 08.00.01 Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken*, Wien, 2018.
- [52] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), *RVS 09.01.45 Baulicher Brandschutz in Straßentunnel*, Wien, 2015.
- [53] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), *RVS 09.02.51 Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen*, Wien, 2014.
- [54] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), *RVS 09.01.23 Innenausbau*, Wien, 2010.
- [55] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), *Innenschalenbeton*, Wien, 2012.
- [56] 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.



- [57] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 09.02.22 Tunnelausrüstung - Betrieb und Sicherheit - Tunnelausrüstung, Wien, 2019.
- [58] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 09.01.24 Bauliche Anlagen für Betrieb und Sicherheit, Wien, 2014.
- [59] SUVEREN, „SUVEREN – Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen städtischen Verkehrsbereichen bei Einsatz neuer Energieträger,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.suveren-nec.info>.
- [60] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Informationsblatt E 20 Einsatz mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen und deren Peripherie, 2021.
- [61] Oberösterreichischer Landesfeuerwehrverband, Leitfaden für Einsätze an Fahrzeugen unter Beteiligung von Lithium-Ionen Batterien, 2021.
- [62] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Merkblatt E 25 Leitfaden für die Intervention der Feuerwehren bei Brandereignissen in Straßentunnelanlagen, 2014.
- [63] C. Love, „Thermomechanical analysis and durability of commercial microporous polymer Li-Ion battery separators,“ *Journal of Power Sources*, 2011.
- [64] C. Orendorff, „The Role of Separators in Lithium-Ion Cell Safety,“ *The Electrochemical Society Interface*, 2012.
- [65] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 09.02.31 Tunnelausrüstung - Belüftung - Grundlagen, Wien, 2014.
- [66] A. Stec und T. Hull, „Introduction to fire toxicity,“ in *Fire toxicity*, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [67] D. A. Purser, „Hazards from smoke and irritants,“ in *Fire toxicity*, Woodhead Publishing Limited, 2010, pp. 51-117.
- [68] A. Stec und T. Hull, *Fire toxicity*, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [69] L. D. Mellert, U. Welte, M. Hermann, M. Kompatscher, X. Ponticq, M. Tesson und J. Beckbissinger, „Elektromobilität und tunnelsicherheit - Gefährdungen durch Elektrofahrzeuge: Forschungsprojekt VSS 2016/221,“ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2016.
- [70] D. Purser und J. McAllister, „Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition*, New York, Springer-Verlag, 2016.
- [71] J. Wohlslagel, L. DiPashale und E. Vernot, „Toxicity of solid rocket motor exhaust: Effects of HC., HF, and alumina on rodents,“ *Journal of Combustion Toxicology*, Nr. 3, pp. 61-69, 1976.

- [72] J. MacEwan und E. Vernot, „Toxic Hazards Research Unit Annual Technical Report,“ Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air force Base, Ohio, 1970.
- [73] H. L. Kaplan, A. F. Grand und W. G. Switzer, „Acute inhalation toxicity of the smoke produced by five halogenated polymers,“ *Journal of Fire Sciences*, pp. 153-172, 04 1984.
- [74] J. Jankovic, W. Jones, J. Burkhart und G. Noonan, „Environmental Study of Firefighter,“ *Annual Occupational Hygiene*, pp. 581-602, 1991.
- [75] A. F. Grand, H. L. Kaplan, J. J. B. III, W. G. Switzer und G. E. Hartzell, „An Evaluation of Toxic Hazards from Full-Scale Furnished Room Fire Studies,“ *Fire Safety*, pp. 330-353, 1985.
- [76] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia und X. He, „Thermal runaway mechanisms of lithium ion battery for electric vehicles,“ *Energy Storage Materials*, pp. 246-267, 2018.
- [77] W. Dalbey, B. Dunn, R. Bannister, W. Daughtrey, C. Kirwin, F. Reitman, A. Steiner und J. Bruce, „Acute effects of 10-minute exposure to hydrogen fluoride in rats and derivation of a short-term exposure limit for humans,“ *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Bd. 27, pp. 207-216, 1998.
- [78] Schirmer, A.; Masterarbeit TU Graz (in Bearbeitung), „Messkonzept der chemischen Bestandteile bei Brandversuchen von Batteriemodulen von batterie-elektrischen Fahrzeugen im Tunnel,“ Technische Universität Graz, Graz, 2020.

## 13 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Anzahl der PKW zwischen 1960 und 2020 in Österreich [1] .....	13
Abbildung 2: Anzahl der PKW aufgegliedert nach Antriebsarten zwischen 1960 und 2020 in Österreich [1].....	14
Abbildung 3: Anzahl der PKW aufgegliedert nach Antriebsarten 2020 in Österreich [1] .....	14
Abbildung 4: Anzahl der neu zugelassenen PKW mit alternativen Antriebsarten zwischen 2010 und 2020 in Österreich [1].....	15
Abbildung 5: Anzahl der neu zugelassenen PKW mit alternativer Antriebsart zwischen 2017 und 2020 in Österreich [1].....	16
Abbildung 6: Prognostizierte Entwicklung der neu zugelassenen PKW aufgegliedert nach Antriebsarten bis 2030 [1] .....	17
Abbildung 7: Wissenschaftliche Vorgehensweise .....	20
Abbildung 8: Exemplarischer Aufbau eines Batteriesystems [4].....	22
Abbildung 9: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batterie [8]	23
Abbildung 10: Zusammensetzung Gase [24].....	25
Abbildung 11: HRR und Masseverlust [24].....	25
Abbildung 12: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von konventionell angetriebenen Fahrzeugen (durchgehende Linie) und vergleichbaren BEVs (gepunktete Linie) [29] .....	26
Abbildung 13: Wärmefreisetzungsraten als Funktion der am Brand beteiligten Anzahl von Zellen [31] .....	27
Abbildung 14: Gesamte Wärmefreisetzung als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [31].....	27
Abbildung 15: Spitzenwerte der Wärmefreisetzungsraten bei BEVs als Funktion der gespeicherten Energie der Batterien [31].....	28
Abbildung 16: HF-Emissionen bei Brandversuchen an Gesamtfahrzeugen in der INERIS Tunnelversuchsanlage. [29].....	29
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen HF-Emissionsmengen und der gespeicherten Energie der Batterien [31].....	29
Abbildung 18: HF-Emissionsmenge als Funktion der in der Batterie gespeicherten Energie [31] .....	30
Abbildung 19: HF-Emissionen bei Brandversuchen an Li-Ionen Batteriezellen unterschiedlicher Elektrodenzusammensetzung und Ladungszustände [35]..	31
Abbildung 20: Vergleich der Emissionsraten für CO-Äquivalente, zwischen einem mit Li-Ionen Batterien beladenem Transporter und der französischen Standard LKW Emissionsrate [44].....	35
Abbildung 21: Übersicht der Versagensmechanismen von Stahlbetonteilen im Brandfall [47].....	36
Abbildung 22: Temperaturzeitkurven in RVE 08.00.01 [51] und RVS 09.01.45 [52]..	40
Abbildung 23: Schematische Darstellung der möglichen Gefahrenbereiche [60].....	44
Abbildung 24: Einsatzmerkblatt für die Vorgehensweise der Feuerwehr [60] .....	46
Abbildung 25: Ereignisphasen [62].....	48
Abbildung 26: Phase Selbstrettung im Tunnel mit Richtungsverkehr [62] .....	49
Abbildung 27: Phase Selbstrettung im Tunnel mit Richtungsverkehr bei einem Stau [62].....	50

Abbildung 28: Durchgeführte Intervention in einem Tunnel mit Richtungsverkehr in den Phasen Löscheinsatz und Fremdrettung, vorrangig von der rauchfreien Seite [62].....	50
Abbildung 29: Durchgeführte Intervention bei einem Stau in einem Tunnel mit Richtungsverkehr in den Phasen Löscheinsatz und Fremdrettung [62].....	50
Abbildung 30: Analyse eines Moduls.....	55
Abbildung 31: Möglichkeiten zur Generierung eines Thermal Runaway .....	56
Abbildung 32: Versuchsaufbau mit Batterie-Zellen (links), Versuchsträger nach vollständigem Abbrand (rechts) .....	56
Abbildung 33: Temperatur- und Spannungsverlauf in einer Zelle bei Generierung eines Thermal Runaway durch externe Wärmezufuhr.....	57
Abbildung 34: Testtunnel für die Ermittlung des Brandverhaltens verschiedener Module.....	59
Abbildung 35: Spannungsmessung an einem Modul .....	60
Abbildung 36: Teilansicht der Anordnung der Gasmesstechnik am Testtunnel .....	61
Abbildung 37: Erhitzung des Versuchsträgers mittels Gasbrenner .....	62
Abbildung 38: Heftige Brandreaktion eines NMC-Batterietyps .....	63
Abbildung 39: Brandreaktion eines LFP-Batterietyps .....	63
Abbildung 40: Tunnelquerschnitt des Eisenbahntunnels West.....	65
Abbildung 41: Übersicht der Messtechnik-Positionen für Tunnelinfrastruktur.....	66
Abbildung 42: Erhitzung der Versuchsträger mittels Gasbrenner.....	68
Abbildung 43: Brandversuch BP01 mit LFP-Zelltyp.....	68
Abbildung 44: Brandversuch BP02 mit NMC-Zelltyp .....	69
Abbildung 45: Brandversuch BP03 mit Anwendung der Löschlanze.....	69
Abbildung 46: BV02, Versuchsträger .....	72
Abbildung 47: BV04, Versuchsträger .....	72
Abbildung 48: Übersicht der Messtechnik-Positionen für Tunnelinfrastruktur.....	74
Abbildung 49: Übersicht der Messtechnik-Positionen an der Batterie des Versuchsträgers BV02.....	74
Abbildung 50: Übersicht der Messtechnik-Positionen an der Batterie der Versuchsträger BV01 und BV05 .....	75
Abbildung 51: BV01, Anwendung der Löschdecke (© Lunghammer, TU Graz) .....	76
Abbildung 52: BV02, Entzündung des Fahrzeuges ausgehend von der Batterie .....	77
Abbildung 53: BV05, Versuchsträger und Unfallfahrzeug .....	78
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf von HRR, BEV und ICEV.....	80
Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf von HRR, nur BEV.....	81
Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf von HRR, nur ICEV.....	82
Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf von Temperaturen am Messort ②, 2 m über Fahrbahnniveau.....	85
Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf von Temperaturen am Messort ③, 2 m über Fahrbahnniveau.....	85
Abbildung 59: Elementkonzentrationen bei unterschiedlich langer Kontamination durch den Regelbetrieb im Plabutschunnel .....	90
Abbildung 60: Vergleich baugleicher konventioneller und elektrischer Fahrzeuge BV03 (ICEV) und BV05 (BEV).....	91

Abbildung 61: Vergleich batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge (BV01, BV02 und BV05).....	92
Abbildung 62: Vergleich der mit konventionellen Antrieben ausgestatteten Fahrzeuge (BV03, BV04).....	93
Abbildung 63: Vergleich der Löschwässer mit den Kontaminationen infolge der Tunnelwäsche.....	95
Abbildung 64: BEV aus Brandversuch BV01 nach 1 Minute Branddauer (links), ICEV aus Brandversuch BV03, ca. 10 Min nach Brandbeginn (rechts).....	97
Abbildung 65: Vergleich Flammenbild Batteriebrand (links) und Brand des Innenraumes (rechts).....	97
Abbildung 66: Löschdecke auf BEV (© TU Graz, Lunghammer).....	99
Abbildung 67: Brand des BEV vor und nach Anwendung der Löschdecke .....	99
Abbildung 68: HRR und CO Konzentrationsverlauf beim Brandversuch BV01 .....	100
Abbildung 69: Temperatursensoren im Tunnelquerschnitt bei BV01.....	101
Abbildung 70: Zündung der Batterie durch spontane Kurzschlussreaktionen nach Einfüllen von NaCl <sub>aq</sub> .....	102
Abbildung 71: Einbringung der Löschlanze .....	103
Abbildung 72: Gekühlte Batterie (links) und nochmaliges Eintreiben der Löschlanze in das Batteriegehäuse .....	103
Abbildung 73: Verlauf der HRR und der CO Konzentration bei BV05 .....	105
Abbildung 74: Löschtrupp beim Einsatz gegen Ende des Brandversuches BV05... ..	106
Abbildung 75: Lage der Temperatursensoren am zweiten beteiligten Fahrzeug.....	107
Abbildung 76: Verlauf der HRR und der CO Konzentration beim Brandversuch BV03 .....	109
Abbildung 77: Längsschnitt und Schrägansicht von oben der verwendeten Geometrie in FDS inkl. Darstellung der Temperaturverteilung während BV01 .....	113
Abbildung 78: Verläufe der Temperaturen in ausgewählten Monitorpunkten während BV01 .....	114
Abbildung 79: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 1 (Firste) .....	115
Abbildung 80: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 2 (4 m) .....	116
Abbildung 81: Gemittelte Massenkonzentration HCl als Funktion der Zeit - Messpunkt 3 (1.6 m über Fahrbahn).....	116
Abbildung 82: Vergleich der Bus-Brandkurve gemäß RVS 09.02.31 (Bus - ICEV) und den abgeleiteten BEV-Bus Brandkurven.....	119
Abbildung 83: Verlauf der Temperaturen bei Monitorpunkt 3.8 für einen ICEV-Bus Brand sowie den beiden Szenarien eines BEV-Bus Brandes .....	120
Abbildung 84: Verlauf der Lufttemperatur an der Oberfläche der Zwischendecke sowie in unterschiedlichen Eindringtiefen im Beton der Zwischendecke .....	121
Abbildung 85: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für CO. ....	126
Abbildung 86: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für HCl.....	126
Abbildung 87: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für HF.....	127

Abbildung 88: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für SO <sub>2</sub> .....	127
Abbildung 89: Vergleich der gemessenen Durchschnittskonzentrationen und des AEGL-3 Grenzwertes für NO <sub>2(x)</sub> .....	128
Abbildung 90: Vergleich der Temperaturverläufe für den Messpunkt T_2.8 (2 m über Boden).....	128
Abbildung 91: Brandkurven der Gesamtfahrzeugbrandversuche inklusive Zeitpunkte des ersten Löscheinsatzes.....	130
Abbildung 92: Angepasste Originalbrandkurven und linearisierte Brandkurven.....	130
Abbildung 93: Aus den Realbrandversuchen abgeleitete BEV-Modellbrandkurven	132
Abbildung 94: Bus Modellbrandkurven.....	134
Abbildung 95: Vergleich der Längsströmungsgeschwindigkeiten für BV03_linear und BV05_linear.....	139
Abbildung 96: Vergleich der Längsströmungsgeschwindigkeiten für RVS_5 MW und BEV_PKW_Batterie.....	139
Abbildung 97: Verrauchung entlang der Tunnelachse für die Brandkurven BV03_linear und BV05_linear.....	140
Abbildung 98: Verrauchung entlang der Tunnelachse für die Brandkurven RVS_5MW und BEV_PKW_Batterie.....	141
Abbildung 99: Rauchdichte entlang auf Kopfhöhe entlang der Tunnellängsachse für die Brandszenarien BV05_linear und BV03_linear.....	142
Abbildung 100: Rauchdichte entlang auf Kopfhöhe entlang der Tunnellängsachse für die Brandszenarien BEV_PKW_Batterie und RVS_5 MW.....	143
Abbildung 101: FED/FIC =1.0 Isolinie und maximale FED/FIC Werte für die Szenarien BV01_linear, BV03_linear und BV05_linear.....	144
Abbildung 102: FED/FIC=1.0 Isolinie und maximale FED/FIC Werte für die Szenarien BEV_PKW_Batterie, RVS_5 MW und BEV_PKW_Innenraum.....	145
Abbildung 103: FED/FIC =1.0 Isolinie für die betrachteten Bus-Brandszenarien ....	146
Abbildung 104: Schadensausmaßwerte für PKW Brandkurven gemäß Brandversuche.....	147
Abbildung 105: Schadensausmaßwerte für PKW Brandkurven gemäß repräsentativer Modellbrandkurven.....	147
Abbildung 106: Schadensausmaßwerte für Bus Brandkurven.....	148
Abbildung 107: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01_linear und BV03_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV_Bus_36 MW bzw. RVS_30 MW.....	149
Abbildung 108: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der Modellbrandkurven - BEV_PKW_Batterie bzw. RVS_5 MW sowie der Bus-Brandkurven BEV_Bus_36 MW bzw. RVS_30 MW.....	150
Abbildung 109: Versuchsträger nach dem Brandversuch (links) sowie Batterie im ausgebauten aber noch glühendem Zustand (rechts).....	155
Abbildung 110: Risikoerhöhung durch BEV-Fahrzeuge in Abhängigkeit des Busanteils für die Risikoevaluierung auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01_linear und BV03_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV_Bus_36 MW bzw. RVS_30 MW.....	184



Abbildung 111: Risikoerhöhung durch BEV-Fahrzeuge in Abhängigkeit des LKW-Anteils für die Risikoevaluierung auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01_linear und BV03_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV_Bus_36 MW bzw. RVS_30 MW .....	185
Abbildung 112: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der Modellbrandkurven - BEV_PKW_Batterie bzw. RVS_5MW sowie der Bus-Brandkurven BEV_Bus_36 MW bzw. RVS_30 MW für einen geänderten FED/FIC Grenzwert von 0.3 .....	186

## 14 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Exemplarische Brandenergien und maximale auf die bauliche Struktur einwirkende Brandtemperaturen nach Fahrzeugart [3].....	18
Tabelle 2: HF-Konzentrationen nach AEGL-3, IDLH und LC50 .....	34
Tabelle 3: In Tunneln vorzusehende Einrichtungen zur Brandbekämpfung gemäß RVS 09.02.22 [57] .....	42
Tabelle 4: Geometrische Daten Versuchstunnel .....	58
Tabelle 5: Untersuchte Batterietypen .....	59
Tabelle 6: Überblick der durchgeführten Tests.....	59
Tabelle 7: Übersicht eingesetzte Messtechnik .....	60
Tabelle 8: Ergebnisse der Modul-Brandversuche.....	62
Tabelle 9: Geometrische Daten Versuchsort.....	65
Tabelle 10: Überblick der durchgeführten Tests.....	65
Tabelle 11: Übersicht eingesetzte Messtechnik .....	66
Tabelle 12: Übersicht Brandversuche BEV .....	71
Tabelle 13: Übersicht eingesetzte Messtechnik .....	73
Tabelle 14: Masseverluste der Fahrzeuge .....	79
Tabelle 15: HRR Maximum der Fahrzeuge .....	82
Tabelle 16: Wärmehalt der Fahrzeuge .....	83
Tabelle 17: Temperaturmaxima an der Batterie .....	83
Tabelle 18: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase an der Tunnelfirste.....	84
Tabelle 19: Temperaturmaxima der Luft/Rauchgase in 2 m über Fahrbahnniveau...	84
Tabelle 20: Klassische Brandgase, ermittelte Absolutmengen.....	86
Tabelle 21: Saure Gase, ermittelte Absolutmenge .....	86
Tabelle 22: Klassische Brandgase, maximale Konzentrationen.....	87
Tabelle 23: Saure Gase, maximale Konzentrationen .....	87
Tabelle 24: Schwermetalle, Absolutmenge der aktiven Beprobung an Messort ② ...	88
Tabelle 25: Schwermetalle, Konzentrationen der aktiven Beprobung an Messort ②	88
Tabelle 26: IDLH-Limits für bestimmte Schwermetalle.....	89
Tabelle 27: Maximal auftretende Schadstoff-Freisetzungsraten während BV01 .....	115
Tabelle 28: Energieinhalt von ausgewählten, derzeit am Markt verfügbaren BEV-Bussen.....	118
Tabelle 29: Zuweisung der aktiven Quellflächen entsprechend deren Beteiligung am Brand von Karosserie und Energieträger bei einem BEV-Bus Brand .....	119
Tabelle 30: Stoffwerte von Stahlbeton.....	121
Tabelle 31: Konzentrations- und Dosis Grenzwerte gemäß [70] und [45] .....	125
Tabelle 32: Übersicht der Modellbrandkurven - PKW für die Risikobetrachtung .....	133
Tabelle 33: Übersicht der Modellbrandkurven - Bus für die Risikobetrachtung .....	134
Tabelle 34: Freisetzungsraten der Brandversuche BV01, BV03 und BV05 bezogen auf die gesamte Wärmefreisetzung und entsprechende Freisetzungsraten der RVS 09.03.11 PKW Brandkurve .....	136
Tabelle 35: Parameter Modelltunnel.....	138
Tabelle 36: Betrachtete PKW Modellbrände und Freisetzungsraten .....	138
Tabelle 37: Betrachtete Bus Modellbrände und Freisetzungsraten .....	138

Tabelle 38: Elementkonzentration in unbelasteter Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS).....	174
Tabelle 39: Elementkonzentration des Vlieses nach der Installation im Plabutsch Tunnel mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS).....	175
Tabelle 40: Elementkonzentrationen des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs BV01 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS).....	176
Tabelle 41: Elementkonzentrationen des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs BV02 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS).....	177
Tabelle 42: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV03 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS) .....	178
Tabelle 43: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV04 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS) .....	179
Tabelle 44: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV05 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS) .....	180
Tabelle 45: Elementkonzentrationen des unkontaminierten Löschwassers des ZaB. ....	181
Tabelle 46: Löschwasserkontaminationen nach den Brandversuchen mit den Fahrzeugen BV00 und BV05 .....	182
Tabelle 47: Kontamination des analysierten Wassers nach der Reinigung des Plabutschtunnels und der Reinigung des ZaB, der Lokalität der Brandversuche.....	182

## 15 ANHANG

### 15.1 Belastung der Tunnelwände, Detailergebnisse der Vliesbelegung

Ergebnisse der Messungen der Schadstoffbelegung der Tunnelwände bzw. der aufgetragenen Vliesbahnen.

*Tabelle 38: Elementkonzentration in unbelasteter Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)*

Vlies Referenzprobe		
Element		Ergebnis
		mg/kg TS
Ag	<	0,13
Al		96
As	<	1,3
Ba		7,4
Be	<	1,3
Ca		140
Cd	<	0,13
Co		15
Cr		2,7
Cu		1,4
Fe		290
Hg	<	0,13
K		45
Li		2,7
Mg		76
Mn		21
Mo	<	0,13
Na		65
Ni		16
P		34
Pb		0,31
Pd	<	0,13
Sb	<	0,13
Se	<	1,3
Si		190
Sn	<	0,25
Sr		0,59
Te	<	0,13
Ti		8
Tl	<	0,13
V		2,4

Vlies Referenzprobe		
Element		Ergebnis
W	<	0,13
Zn		14

*Tabelle 39: Elementkonzentration des Vlieses nach der Installation im Plabutsch Tunnel mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)*

Tunnel Plabutsch, Vlies						
1 Tag Exposition		1 Woche Exposition		1 Monat Exposition		
Element	Ergebnis	Element	Ergebnis	Element	Ergebnis	
	mg/kg TS		mg/kg TS		mg/kg TS	
Ag	22,87	Ag	0	Ag	0	
Al	604	Al	1144	Al	2624	
As	0	As	0	As	0	
Ba	522,6	Ba	552,6	Ba	392,6	
Be	0	Be	0	Be	0	
Ca	50	Ca	2170	Ca	6430	
Cd	0	Cd	0	Cd	0	
Co	0	Co	0	Co	0	
Cr	1,4	Cr	4,8	Cr	19,3	
Cu	6,7	Cu	14,6	Cu	51,6	
Fe	280	Fe	930	Fe	3460	
Hg	0	Hg	0	Hg	0	
K	235	K	345	K	755	
Li	0	Li	0	Li	0	
Mg	294	Mg	594	Mg	1564	
Mn	0	Mn	15	Mn	99	
Mo	0,72	Mo	1,27	Mo	2,37	
Na	1285	Na	1435	Na	1525	
Ni	0	Ni	0	Ni	0	
P	0	P	10	P	50	
Pb	0,57	Pb	2,39	Pb	5,29	
Pd	0	Pd	0	Pd	0	
Sb	0,77	Sb	2,27	Sb	9,77	
Se	0	Se	0	Se	0	
Sn	1,05	Sn	2,65	Sn	9,45	
Sr	4,01	Sr	9,31	Sr	22,41	
Te	< 0,12	Te	< 0,12	Te	< 0,12	
Ti	12	Ti	67	Ti	242	
Tl	0	Tl	0	Tl	0	

Tunnel Plabutsch, Vlies						
1 Tag Exposition		1 Woche Exposition		1 Monat Exposition		
Element	Ergebnis	Element	Ergebnis	Element	Ergebnis	
V	0	V	0	V	0	
W	0	W	0,14	W	0,68	
Zn	9	Zn	43	Zn	166	

*Tabelle 40: Elementkonzentrationen des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs BV01 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)*

TM 20, BV01			TM 70, BV01		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Ag		0,14	Ag		0,27
Al		1484	Al		2064
As		0	As		0,5
Ba		172,6	Ba		152,6
Be		0	Be		0
Ca		0	Ca		2480
Cd		0	Cd		0,08
Co		2045	Co		2735
Cr		0	Cr		28,3
Cu		188,6	Cu		198,6
Fe		0	Fe		1020
Hg		1,57	Hg		2,07
K		105	K		665
Li		597,3	Li		747,3
Mg		34	Mg		414
Mn		2599	Mn		3529
Mo		3,07	Mo		6,97
Na		635	Na		785
Ni		9244	Ni		11784
P		256	P		336
Pb		0,59	Pb		3,89
Pd		0	Pd		0
Sb		64,87	Sb		189,87
Se		0	Se		0
Sn		2,55	Sn		7,65
Sr		0,71	Sr		10,41
Te	<	0,12	Te	<	0,12
Ti		0	Ti		31
Tl		0	Tl		0



TM 20, BV01			TM 70, BV01		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
V		0	V		0
W		80,87	W		109,87
Zn		68	Zn		236

*Tabelle 41: Elementkonzentrationen des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs BV02 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)*

TM 20, BV02			TM 70, BV02		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Ag		5,87	Ag		32,87
Al		324	Al		374
As		0	As		0
Ba		322,6	Ba		262,6
Be		0	Be		0
Ca		0	Ca		0
Cd		0	Cd		0
Co		175	Co		425
Cr		0	Cr		0
Cu		12,6	Cu		20,6
Fe		0	Fe		0
Hg		0	Hg		0
K		52	K		7
Li		127,3	Li		287,3
Mg		94	Mg		64
Mn		4609	Mn		11279
Mo		1,57	Mo		1,77
Na		735	Na		545
Ni		1354	Ni		3504
P		76	P		186
Pb		0,79	Pb		0,89
Pd		0	Pd		0
Sb		28,87	Sb		40,87
Se		0	Se		0
Sn		4,35	Sn		6,05
Sr		1,51	Sr		1,21
Te	<	0,12	Te	<	0,12
Ti		0	Ti		0

TM 20, BV02			TM 70, BV02		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Tl		0	Tl		0
V		0	V		0
W		0	W		0
Zn		116	Zn		166

*Tabelle 42: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV03 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)*

TM 20, BV03			TM 70, BV03		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Ag		0	Ag		0
Al		674	Al		0
As		3,3	As		0
Ba		49,6	Ba		0
Be		0	Be		0
Ca		1120	Ca		0
Cd		0	Cd		0
Co		895	Co		0
Cr		30,3	Cr		0
Cu		86,6	Cu		10,6
Fe		320	Fe		0
Hg		0,35	Hg		0
K		585	K		0
Li		147,3	Li		0,1
Mg		254	Mg		0
Mn		1319	Mn		2
Mo		6,97	Mo		1,77
Na		485	Na		0
Ni		3284	Ni		36
P		166	P		4
Pb		1,89	Pb		0,21
Pd		0	Pd		0
Sb		57,87	Sb		48,87
Se		0	Se		0
Sn		5,75	Sn		3,05
Sr		6,11	Sr		0

TM 20, BV03			TM 70, BV03		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Te	<	0,12	Te	<	0,12
Ti		17	Ti		0
Tl		0	Tl		0
V		0	V		0
W		26,87	W		0,29
Zn		216	Zn		126

Tabelle 43: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV04 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)

TM 20, BV04			TM 70, BV04		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Ag		0	Ag		0
Al		34	Al		3
As		3,1	As		0
Ba		50,6	Ba		162,6
Be		0	Be		0
Ca		0	Ca		0
Cd		0	Cd		0
Co		30	Co		0
Cr		0	Cr		0
Cu		10,6	Cu		6,2
Fe		0	Fe		0
Hg		0	Hg		0
K		255	K		315
Li		3,7	Li		0
Mg		84	Mg		94
Mn		42	Mn		0
Mo		1,97	Mo		2,27
Na		545	Na		815
Ni		174	Ni		0
P		4	P		0
Pb		11,69	Pb		13,69
Pd		0	Pd		0
Sb		4,97	Sb		6,47
Se		0	Se		0

TM 20, BV04			TM 70, BV04		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		mg/kg TS			mg/kg TS
Sn		1,75	Sn		2,15
Sr		3,01	Sr		1,21
Te	<	0,12	Te	<	0,12
Ti		0	Ti		0
Tl		0	Tl		0
V		0	V		0
W		1,27	W		0
Zn		73	Zn		73

Tabelle 44: Elementkonzentrationen des konventionellen Fahrzeugs BV05 mit abgezogener Vlies-Referenzprobe in Trockensubstanz (TS)

TM 20, BEV05			TM 70, BEV05		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		[mg/kg TS]			[mg/kg TS]
Ag		0,04	Ag		0
Al		704	Al		214
As		0	As		0
Ba		50,6	Ba		17,6
Be		0	Be		0
Ca		0	Ca		0
Cd		0	Cd		0
Co		1115	Co		445
Cr		3	Cr		0
Cu		88,6	Cu		44,6
Fe		30	Fe		0
Hg		0,74	Hg		0,19
K		145	K		155
Li		337,3	Li		157,3
Mg		114	Mg		0
Mn		1429	Mn		549
Mo		2,87	Mo		2,17
Na		395	Na		355
Ni		4934	Ni		2074
P		156	P		66
Pb		3,19	Pb		1,19
Pd		0	Pd		0
Sb		22,87	Sb		32,87

TM 20, BEV05			TM 70, BEV05		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		[mg/kg TS]			[mg/kg TS]
Se		0	Se		0
Sn		3,65	Sn		3,75
Sr		3,21	Sr		0,61
Te	<	0,12	Te	<	0,12
Ti		7	Ti		0
Tl		0	Tl		0
V		0	V		0
W		42,87	W		17,87
Zn		306	Zn		276

## 15.2 Detailergebnisse der Wasseranalysen

Tabelle 45: Elementkonzentrationen des unkontaminierten Löschwassers des ZaB.

Löschwasser-Referenzprobe		Grenzwerte AAEV
Element	µg/L	µg/L
Al	28	2000
Cd	< 5	100
Co	< 1	1000
Cr	< 1	500
Cu	< 1	500
Ni	< 1	500
Pb	< 5	500
Zn	< 1	2000
Ag	1	
As	5	
Ba	4	
Ca	48376	
Cd	< 5	
Fe	8	
K	1115	
Li	2	
Mg	25998	
Mn	<1	
Na	841	
Ni	<1	
Pb	<5	
Si	2053	
Sr	64	

TI	<5	
----	----	--

pH Wert 8

**Tabelle 46: Löschwasserkontaminationen nach den Brandversuchen mit den Fahrzeugen BV00 und BV05**

17.09.20_BV05 Löschwasser GSA			16.09.20_BV02 GSA		
ZaB, Gewässerschutzanlage			ZaB, Gewässerschutzanlage		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		µg/l			µg/l
Ag	<	1	Ag	<	1
Al		6372	Al	<	10
As	<	10	As	<	10
Ba		126	Ba		32
Ca		0	Ca		4424
Cd	<	1	Cd	<	1
Co		1819	Co		12
Cr	<	1	Cr	<	2
Cu		10	Cu		3
Fe		20	Fe	<	10
K		20385	K		21185
Li		158998	Li		428
Mg		0	Mg		0
Mn		3079	Mn	<	2
Na		170159	Na		24859
Ni		5739	Ni		149
Pb	<	1	Pb		0
Si		1877	Si		907
Sr		226	Sr		21
Tl	<	1	Tl	<	1
Zn		609	Zn		17
Cl		0	Cl		30315,7
NO3		0	NO3		1155,8
F		42280,8	F		0

**Tabelle 47: Kontamination des analysierten Wassers nach der Reinigung des Plabutschunnels und der Reinigung des ZaB, der Lokalität der Brandversuche.**

Kontamination Tunnelwäsche Plabutschunnel			Kontamination Tunnelwäsche Zentrum am Berg		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		µg/l			µg/l
Al		140	Al		470
Cd	<	1	Cd	<	0,3



Kontamination Tunnelwäsche Plabutschtunnel			Kontamination Tunnelwäsche Zentrum am Berg		
Element		Ergebnis	Element		Ergebnis
		µg/l			µg/l
Co		3,3	Co		199
Cr		5,3	Cr		4
Cu		270	Cu		41,6
Li		160	Li		2840
Mg		7290	Mg		
Mn		190	Mn		530
Na		80100	Na		
Ni		19	Ni		492
Pb	<	1	Pb		2
Zn		1800	Zn		90
Cl		140000	Cl		25600
NO3		16000	NO3		1300
F	<	1000	F		3700

## 15.3 Sensitivitätsanalyse

### Sensitivitätsbetrachtung - Verkehrsparameter

Um die Risikoevaluierung durchzuführen, wurden eine Annahme getroffen, die den Einfluss von BEV-Fahrzeugen auf das Risiko eventuell beeinflussen können. Daher wurde für einige dieser Parameter eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Abbildung 110 und Abbildung 111 zeigen die Risikoerhöhung bei 100 % BEV PKW und Bussen in Abhängigkeit des Bus-Anteils bzw. LKW-Anteils. Die Risikoevaluierung auf Basis der linearisierten Versuchsbrandkurven wurde für Sensitivitätsbetrachtungen herangezogen. Für einen Bus-Anteil von 0,5 % in Abbildung 110 bzw. für einen LKW-Anteil von 14,5 % in Abbildung 111, ergibt sich demnach jeweils die Gesamtrisikoerhöhung von 4 % bzw. die Brandrisikoerhöhung von 12 % aus Abbildung 107.

Für beide Sensitivitätsbetrachtungen steigt die Risikoerhöhung mit geringer werdendem Bus- bzw. LKW-Anteil. Für Abbildung 111 ist dies auf die Relationen der mittleren Schadensausmaßwerte zurückzuführen, vgl. Abbildung 104 als für die PKW-Brandkurven - BV03\_linear und BV01\_linear. Für LKW-Brände wurden nur ICEV-Brände (RVS\_30MW bzw. RVS\_100MW) betrachtet. Je höher der LKW-Anteil am Gesamtverkehr, desto geringer der Einfluss von BEV-Bränden, die generell nur für PKW- und Bus-Brände betrachtet wurden.

Insgesamt zeigt sich eine relevante Parameterabhängigkeit nur für einen sehr geringen LKW-Anteil, und auch nur bezogen auf das Brandrisiko. Für einen LKW-Anteil von 1% ergibt sich

eine Erhöhung des Brandrisikos durch BEV-Fahrzeuge von ca. 70 %. Für die Risikoevaluierung ist üblicherweise aber das Gesamtrisiko relevant. Die Erhöhung des Gesamtrisikos durch BEV-Fahrzeuge bei einem LKW-Anteil von 1 % entspricht etwa 8 % und relativiert somit den Einfluss des LKW-Anteils auf die Risikoevaluierung. Außerdem sind derart geringe LKW-Anteile äußerst unrealistisch für einen durchschnittlichen Straßentunnel.

Das Ergebnis der Risikoevaluierung wird von den betrachteten Verkehrsparametern - Busanteil und LKW-Anteil - außer für sehr geringe LKW-Anteile, daher nicht maßgeblich beeinflusst.

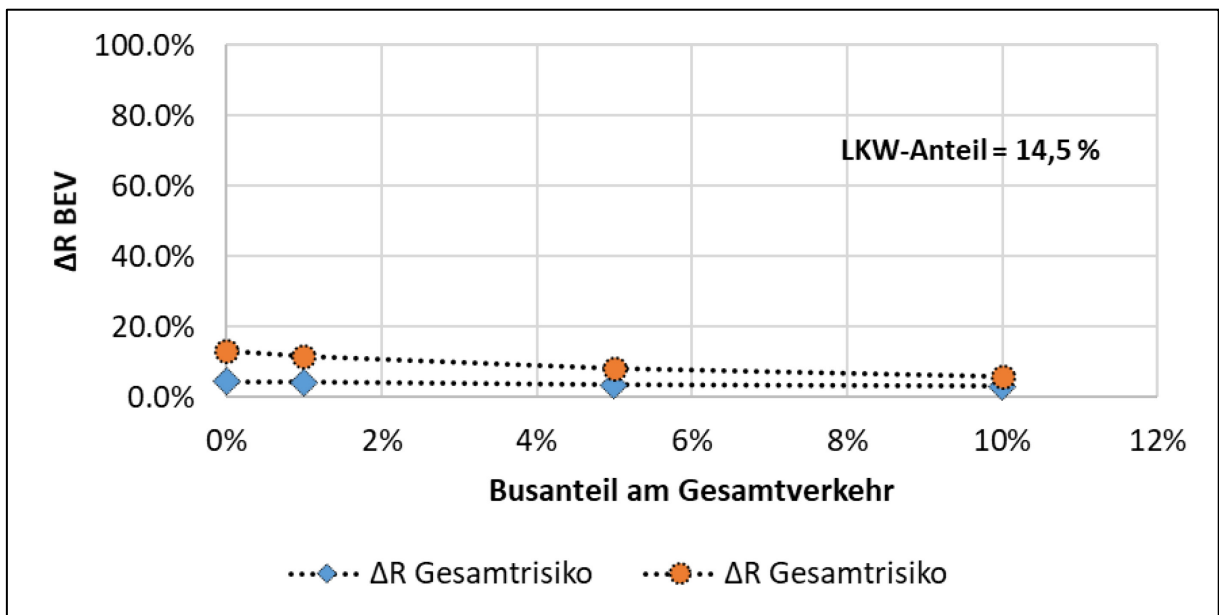


Abbildung 110: Risikoerhöhung durch BEV-Fahrzeuge in Abhängigkeit des Busanteils für die Risikoevaluierung auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01\_linear und BV03\_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV\_Bus\_36 MW bzw. RVS\_30 MW

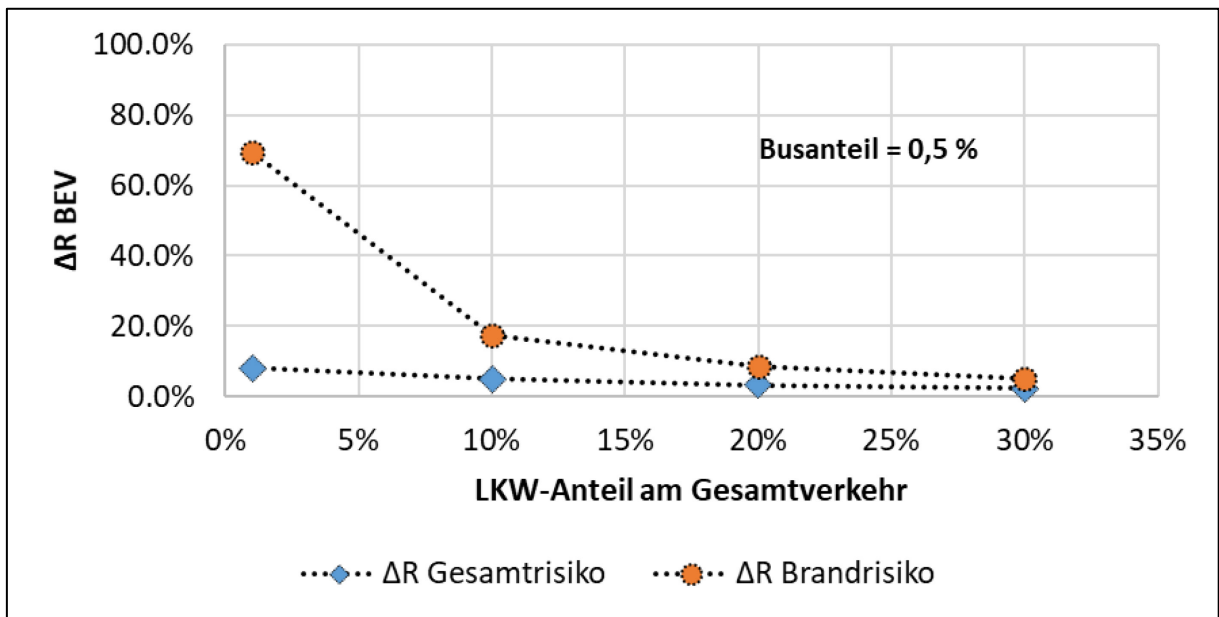


Abbildung 111: Risikoerhöhung durch BEV-Fahrzeuge in Abhängigkeit des LKW-Anteils für die Risikoevaluierung auf Basis der linearisierten Brandkurven - BV01\_linear und BV03\_linear sowie der Bus-Brandkurven BEV\_Bus\_36 MW bzw. RVS\_30 MW

### Sensitivitätsbetrachtung - FED/FIC Tolerabilität

Der in der Schadensausmaßsimulation verwendete Grenzwert von FED/FIC = 1.0 zur Bewertung der Schadstoffkonzentrationen und Temperaturen, beruht grob gesprochen auf einer Auswertung von Sterblichkeiten bei Tierversuchen. Der FED/FIC Wert von 1.0 entspricht dabei dem Median der auf den Menschen übertragenen Sterblichkeitsverteilungen. D.h. 50% der Personen werden bereits bei einem geringeren FED/FIC Wert bewegungsunfähig werden bzw. sterben und 50% werden erst bei höheren FED/FIC Werten betroffen. Um den Einfluss von BEV-Bränden auf vulnerablere Personengruppen zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung eines FED/FIC Grenzwertes von 0.3 durchgeführt. Nach Angaben von D.A. Purser entspricht dieser Grenzwert in etwa dem 99% Perzentil. D. h. nur mehr 1% der Bevölkerung würde bereits bei einem geringeren FED/FIC Wert bewegungsunfähig werden bzw. zu Tode kommen. Abbildung 112 zeigt den Risikoanstieg durch BEV-Fahrzeuge unter Berücksichtigung dieses verringerten Grenzwertes. Das Gesamtrisiko für 100% BEV PKW und Busse ist um ca. 10% gegenüber reinem ICEV Verkehr erhöht. Das Brandrisiko um fast 24 %.

Die dargestellten Risikowerte sind nicht als repräsentativer Vergleich zu verstehen, da sie nur für die empfindlichste Bevölkerungsgruppe zutreffen. Im Mittel treffen die Ergebnisse aus Abbildung 107 bzw. Abbildung 108 zu. Der hier dargestellte Vergleich zeigt aber, dass die Auswirkungen von BEV-Fahrzeugbränden für vulnerabel Personen durchaus relevant sein

können und sich deren Gefährdung durch einen BEV-Brand gegenüber eines ICEV-Brandes unter Umständen erhöht.

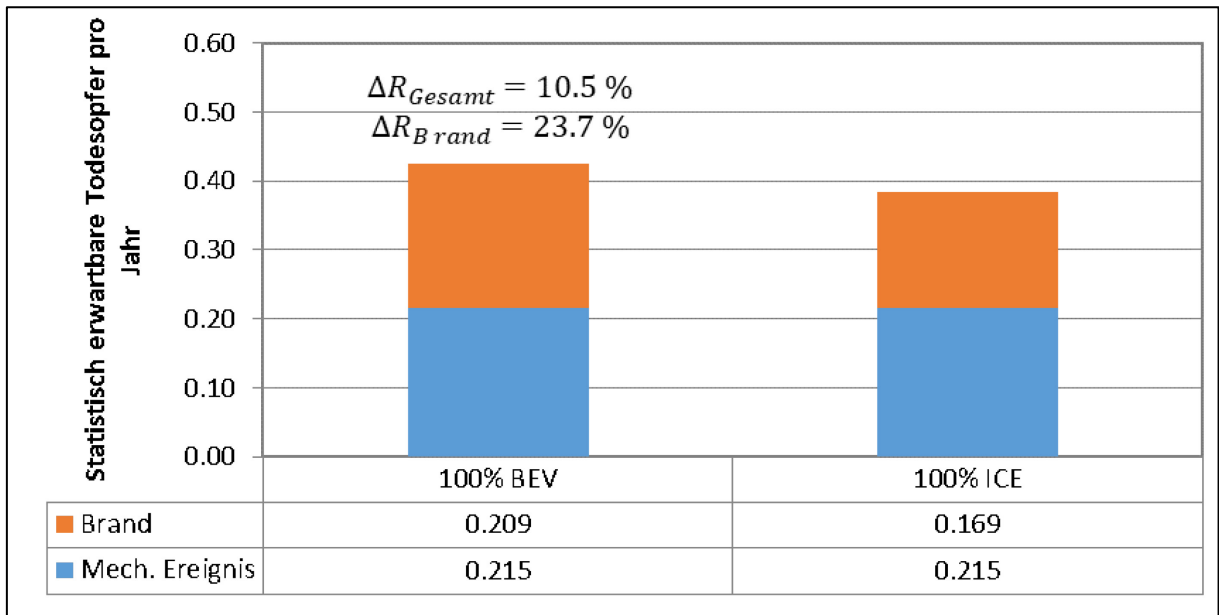


Abbildung 112: Vergleich des Modelltunnelrisikos für 100% BEV PKW+Bus bzw. 100% ICEV PKW+Bus auf Basis der Modellbrandkurven - BEV\_PKW\_Batterie bzw. RVS\_5MW sowie der Bus-Brandkurven BEV\_Bus\_36 MW bzw. RVS\_30 MW für einen geänderten FED/FIC Grenzwert von 0.3