

Arbeitshilfe Brandschutz der Südwestkammern

X



Elektromobilität in Garagen

ENTWURF

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

mit den „Arbeitshilfen Brandschutz der Südwestkammern“ möchte die Arbeitsgruppe Brandschutz der Südwestkammern einen Beitrag leisten, um Wissen an Kolleginnen und Kollegen weiter zu geben und die Sicherheit in den Haushalten zu erhöhen und um Planungsleistungen zu unterstützen.

Wir hoffen, dass diese Lektüre für Sie hilfreich ist.

Die Südwestkammern

Diese Arbeitshilfe soll – als Service Ihrer Ingenieurkammer – erste Hinweise geben und erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Obwohl es mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurde, kann eine Haftung für die inhaltliche Richtigkeit nicht übernommen werden.

Inhalt

Einleitung	2
Vorwort Politischer Willen der Bundesregierung	3
Brandszenario Elektrofahrzeugbrand inkl. Zahlen, Daten, Fakten	4
Baurecht Deutschland	5
Baurecht Europa (exemplarisch)	6
Vorgaben Elektrotechnik - wie läuft ein Ladevorgang ab	8
Brandszenario/ Brandlast	10
Vorgaben / Ansicht der Versicherer	13
Brandbekämpfung aus Sicht der Feuerwehr inkl. Löschwasser und Löschwasser- rückhaltung	17
Fazit/ Zusammenfassung	19
Weitere Quellen	20
Anlagen	21
Auswertung aktueller Realbrandversuche an E-PKW	24
Rauchgaszusammensetzung	27
Vorschlag für einen Bemessungsbrand	31

Einleitung

“Erhöhte Brandgefahr bei E-Autos?”

“E-Auto-Brand zerstört Wohnhaus”

Derartige Headliner sind oft in regionalen und überregionalen Zeitungen zu lesen oder in Nachrichten der Fernsehsender zu sehen.

Verbände und Fachzeitschriften veröffentlichen dazu Stellungnahmen, die Überwachungsvereine/Gesellschaften führen Tests dazu durch und durch die Vielzahl von Veröffentlichungen wird es immer schwieriger den Überblick über die Fakten zu behalten.

Um Ihnen als Planer/Dienstleister im Baubereich verlässliche Hinweise für den Umgang mit diesen Brandlasten zu geben, haben wir die Daten, Zahlen und Fakten aus allen Bereichen in einem Pamphlet zusammengefasst.

Hiermit solle Sie in die Lage versetzt werden, ihre Kunden auch über den Bereich "Gefahren der Elektromobilität im Hinblick auf die Bauausführung" tiefgründig und fachkundig zu beraten.

Vorwort Politischer Willen der Bundesregierung

Bis 2030 sollen sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sein, ist das Ziel der Bundesregierung. Um den Umstieg zu beschleunigen, haben Bundesregierung und Automobilindustrie haben die Kaufprämie, den "[Umweltbonus](#)" für E-Autos erhöht: Bis zu 6.000 Euro können Käuferinnen und Käufer für Elektro- oder Brennstoffzellen- Autos erhalten. Bis zu 4.500 Euro beträgt der Zuschuss beim Kauf eines von außen aufladbaren Hybridelektrofahrzeugs. Der Umweltbonus gilt rückwirkend für alle Fahrzeuge, die ab dem 5. November 2019 zugelassen wurden und bis zum 31.12.2025. Auch junge Elektro-Gebrauchtwagen werden gefördert.

Bis Ende 2021 konnten Käuferinnen und Käufer reiner E-Fahrzeuge von bis zu 9.000 Euro Innovationsprämie profitieren. Der staatliche Förderanteil am Umweltbonus wurde mit dem Konjunkturpaket zur Abfederung der Coronakrise verdoppelt. Darüber hinaus gelten seit Anfang 2020 weitere [steuerliche Anreize für Elektrofahrzeuge](#): Anschaffung und Nutzung von Elektro-Dienst- und Lieferfahrzeugen werden steuerlich besser gefördert. Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer können ihre Elektro- oder Hybridelektrofahrzeuge beispielsweise in der Tiefgarage des Arbeitgebers bis Ende 2030 steuerfrei aufladen.

Eine Million Ladepunkte für Elektromobilität: In Deutschland sollen bis 2030 insgesamt eine Million Ladepunkte zur Verfügung stehen, davon 50.000 bis 2020. Das Bundeskabinett hat dafür im November 2019 einen "[Masterplan Ladesäuleninfrastruktur](#)" beschlossen. Private Lademöglichkeiten fördert die Bundesregierung erstmals 2020 mit zusätzlichen 50 Millionen Euro. Ebenfalls gefördert werden Ladepunkte an Kundenparkplätzen.

Die Automobilwirtschaft will bis 2022 15.000 öffentliche Ladepunkte und bis 2030 100.000 Ladepunkte auf ihren Betriebsgeländen und beim angeschlossenen Handel beisteuern. An allen Tankstellen soll man künftig Batteriefahrzeuge laden können. Größere Parkplätze, die zu Wohn-, Firmen- oder sonstigen Gebäuden gehören, müssen künftig mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden. Einzelnen Wohnungseigentümern und Mietern muss künftig der Einbau einer Lademöglichkeit auf eigene Kosten gestattet werden. Die Bundesregierung hat entsprechende gesetzliche Neuregelungen auf den Weg gebracht.

Auszüge aus beispielhaften Garagenverordnungen der Länder:

Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen (Garagenverordnung - GaV) Hessen:

§ 2 GaV – Allgemeine Anforderungen

(3) ¹Garagen müssen eine ausreichende Anzahl von Einstellplätzen haben, die über einen Anschluss an Ladestationen für Elektrofahrzeuge verfügen. ²Der Anteil dieser Einstellplätze bezogen auf die Gesamtzahl der Einstellplätze muss mindestens 5 Prozent betragen. ³Satz 1 findet keine Anwendung auf Einstellplätze von Wohnungen, die über eine Stromversorgung verfügen, die für die Installation von Kraftfahrzeugladestationen geeignet ist.

Brandszenario Elektrofahrzeugbrand inkl. Zahlen, Daten, Fakten

Stand 2021 waren in Deutschland 1,1 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen inklusive aller anderen Fahrzeugarten wie Hybrid und Mild-Hybrid waren 1.3 Mio. E-Autos in Deutschland unterwegs.

Gemäß der Mitteilung des Kraftfahrtbundesamtes waren 43% aller Neufahrzeuge E-Autos.

Die Bundesregierung möchte bis 2030 zehn Millionen Elektroautos auf den Straßen haben.

Brandverhalten von Elektroautos:

Betrachtet man die Brandszenarien wird sehr oft in der Presse von Elektroautos berichtet. Der Gesamtverband der Versicherer e.V. (GDV) geht in seinen Statistiken von 40 brennenden VERBRENNERAUTOS pro Tag aus.

Gemäß einer Studie des amerikanischen Versicherers Autoinsurance ET brennen:

- 25 von 100.000 versicherten Elektroautos
- 1530 von 100.000 versicherten Verbrenner
- 3474 von 100.000 versicherten Plug-in Hybridfahrzeugen

In Deutschland sind hierzu leider noch keine Statistiken verfügbar, wobei man natürlich bei den oben genannten Zahlen beachten muss, dass die Mehrheit der Elektroautos natürlich noch sehr neu ist und sicherlich auch das Fahrzeugalter ein entscheidender Faktor für die Gefahr einer Brandentstehung bei einem Fahrzeug darstellt.

Tesla hat aufgrund zahlreicher Presseberichte über brennende Fahrzeuge selbst eine Auswertung gestartet und kam zu dem Ergebnis, dass im Zeitraum von 2012 bis 2020 durchschnittlich alle 329,9 Millionen gefahrenen Kilometer ein Tesla brannte. Daten zu "Verbrennern" nennen für 2018 in den USA einen PKW Brand alle 28,6 Millionen Kilometer.

Demnach läge der Faktor der Brandeintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf die gefahrenen Kilometer bei diesem Hersteller bei ungefähr 1:10, verglichen mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Baurecht Deutschland

Die grundsätzlichen Anforderungen an Gebäude und bauliche Anlagen sind in der Musterbauordnung (MBO)¹ bzw. den jeweiligen Bauordnungen der Länder geregelt. Im Folgenden wird im Wesentlichen auf die Anforderungen der Musterbauordnung eingegangen, sofern sich nach den jeweiligen Bauordnungen der Länder keine weitergehenden Anforderungen ergeben.

Nach den Begriffsdefinitionen unter § 2 (7) MBO² sind Garagen Gebäude oder Gebäudeteile, welche zum Abstellen von Kraftfahrzeugen dienen. Eine Ergänzung zur MBO bildet die Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen (Muster-Garagenverordnung M-GarVO)³, in welchen zusätzlichen Anforderungen gestellt oder aber auch Erleichterungen gegenüber den Anforderungen der MBO gestattet werden. Die M-GarVO ist über die Muster-Verwaltungsvorschrift technische Baubestimmungen (MVV TB)⁴ eingeführt. Dies ist in den Bundesländern jeweils analog geregelt. In Baden-Württemberg ist die Garagenverordnung (GaVO)⁵ über die VVV TB⁶ baurechtlich eingeführt.

Weder die M-GarVO, noch die insgesamt 16 landesrechtlichen Regelungen für den Bau und Betrieb von Garagen differenzieren zwischen den unterschiedlichen Antriebsarten von Kraftfahrzeugen (Benzin-, Diesel-, Gas-, Elektro-, Hybrid- oder Wasserstoffantriebe), sodass aus bauordnungsrechtlicher Sicht Kraftfahrzeuge unabhängig von deren Antriebsart innerhalb von Garagen abgestellt werden dürfen.

Kraftfahrzeuge sind im § 1 des Straßenverkehrsgesetz (StVG) wie folgt definiert.

Straßenverkehrsgesetz (StVG) § 1 Zulassung

(1) Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger, die auf öffentlichen Straßen in Betrieb gesetzt werden sollen, müssen von der zuständigen Behörde (Zulassungsbehörde) zum Verkehr zugelassen sein. Die Zulassung erfolgt auf Antrag des Verfügungsberechtigten des Fahrzeugs bei Vorliegen einer Betriebserlaubnis, Einzelgenehmigung oder EG-Typgenehmigung durch Zuteilung eines amtlichen Kennzeichens.

(2) Als Kraftfahrzeuge im Sinne dieses Gesetzes gelten Landfahrzeuge, die durch Maschinenkraft bewegt werden, ohne an Bahngleise gebunden zu sein.

(3) Keine Kraftfahrzeuge im Sinne dieses Gesetzes sind Landfahrzeuge, die durch Muskelkraft fortbewegt werden und mit einem elektromotorischen Hilfsantrieb mit einer Nennleistung von höchstens 0,25 kW ausgestattet sind, dessen Unterstützung sich mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit progressiv verringert und

1. beim Erreichen einer Geschwindigkeit von 25 km/h oder früher,
2. wenn der Fahrer im Treten einhält,

unterbrochen wird. Satz 1 gilt auch dann, soweit die in Satz 1 bezeichneten Fahrzeuge zusätzlich über eine elektromotorische Anfahr- oder Schiebehilfe verfügen, die eine Beschleunigung des Fahrzeuges auf eine Geschwindigkeit von bis zu 6 km/h, auch ohne gleichzeitiges Treten des Fahrers, ermöglicht. Für Fahrzeuge im Sinne der Sätze 1 und 2 sind die Vorschriften über Fahrräder anzuwenden.

¹ MBO

² bzw. der jeweiligen Bauordnung der Bundesländer

³ bzw. die Garagenverordnung des jeweiligen Bundeslandes

⁴ MVV TB

⁵ GaVO

⁶ VVV TB

Fahrzeuge nach dieser Definition dürfen demnach in einer Garage betrieben und abgestellt werden. Zu dem Betrieb eines Elektrofahrzeuges zählt auch der Ladevorgang.

Explizite baurechtliche Vorgaben, die den Brandschutz betreffen gibt es für Elektrofahrzeuge in den verschiedenen Garagenverordnungen nicht.

Darüber hinaus wird z. B. in der GaV⁷ des Landes Hessen gefordert, dass Garagen eine ausreichende Anzahl von Einstellplätzen haben müssen, die über einen Anschluss an Ladestationen für Elektrofahrzeuge verfügen. Der Anteil dieser Einstellplätze wird hierbei mit 5 %, bezogen auf die Gesamtzahl der Einstellplätze beziffert.

Gleichwohl werden auch im Rahmen der GaV-Hessen keine konkreten Anforderungen wie z. B. an die Baukonstruktion, die sicherheitstechnischen Anlagen oder die Anordnung von Stellplätzen speziell in Bezug auf Kraftfahrzeuge mit „alternativen“ Antriebsarten gestellt.

Baurecht Europa (exemplarisch)

Schweiz

In der Schweiz wird das Thema Elektromobilität in Garagen hinsichtlich des Brandschutzes mit dem Merkblatt „Lithium-Ionen-Batterien“ vom 01.06.2021 geregelt. Dort wird in Abschnitt 4.11 zunächst festgestellt, dass für reines Parkieren von Elektrofahrzeugen dieselben Brandschutzvorschriften gelten, wie für konventionelle Fahrzeuge (Benzin, Diesel). Darüber hinaus wird für das Laden von Elektrofahrzeugen auf mögliche Gefahren sowie die Schutzziele hingewiesen und Lösungsmöglichkeiten zum Laden in Garagen beschrieben, welche sich im Wesentlichen auf die Sach- und Fachgerechte Installation der Elektroinstallationen sowie der Ladeinfrastruktur beziehen.

Das Merkblatt kann unter dem nachstehenden Link online eingesehen werden:

<https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-3688.pdf/content>

Österreich (Stadt Wien)

Die in Österreich für den Brandschutz in Garagen maßgebende OIB Richtlinie 2.2 „Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks“ vom März 2015 enthält keine Vorgaben zum Thema Elektromobilität.

Es gibt jedoch in Wien ein Rundschreiben der Baupolizei an alle Dezernate zum Thema „Ladepplätze für Elektrofahrzeuge einschließlich Ladestationen“ vom 29.02.2016. In diesem Schreiben wird u. a. auf Lüftungstechnische Maßnahmen zur Vorbeugung allfälliger Explosionsrisiken eingegangen und einem separaten Abschnitt auf folgende gesetzliche Grundlagen verwiesen:

⁷ Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen - Fassung Nov. 2014

- Gesetz über das Einstellen von Kraftfahrzeugen, kraftbetriebenen Parkeinrichtungen, Tankstellen und Abstellplätze für Fahrräder in Wien (Wiener Garagengesetz 2008 - WGarG 2008)
- OIB-Richtlinie 2.2 "Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks"
- OIB-Richtlinie 3 "Gesundheit, Hygiene und Umweltschutz"
- ÖVE/ÖNORM EN 50272-2 "Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Teil 2: Stationäre Batterien"
- ÖVE/ÖNORM EN 50272-3 "Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Teil 3: Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge"
- ÖVE/ÖNORM EN 61851-1 "Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen"
- ÖVE/ÖNORM EN 61851-22 "Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 22: Wechselstrom-Ladestation für Elektrofahrzeuge"

Frankreich

In Frankreich ist im Sinne einer Transformation zu umweltfreundlicheren Antriebsarten für Neubauten die Ausstattung mit bzw. Vorbereitung für Ladestationen mittlerweile gesetzlich vorgeschrieben. Nach Art. 63 des LOI n° 2019-1428 vom 24 décembre 2019, sind in öffentlichen Parkings beispielsweise 1 von 20 Parkplätzen mit Ladepunkten auszustatten.

Die Brandschutzvorgaben ergeben sich aus dem Arrêté du 9 mai 2006 für öffentlich zugängliche Parkhäuser (parcs de stationnement couverts recevant du public) i.V.m. der Arbeitshilfe (Guide pratique relatif à la sécurité incendie dans les parcs de stationnement couverts ouverts au public) von Januar 2018.

Hierin existieren keine Vorgaben zur Nutzung durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. Geregelt werden aber die Installationen von Ladestationen hinsichtlich

- Ort: Nur im Bezugsgeschoss sowie ein Geschoss darüber oder darunter
- Anzahl und Leistung von Ladesäulen
- Mindestabständen und Abschnittsbildung
- Notwendige Lösch- und Sicherheitseinrichtungen z.B. Feuerlöscher, Not-Aus, Steigleitung etc.

Darüber hinaus wird zwischen einzelnen Ladepunkten und Ladestationen mit bis zu zehn Ladepunkten unterschieden. Für Schnellladevorrichtungen („borne de charge rapide“ > 43 kW) gelten höhere Anforderungen. Diese sind nur in Verbindung mit einer Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage möglich. Mit Installation einer dieser Löschanlagenformen sind unabhängig von der Ladeart Erleichterungen möglich (betr. Abstände, Anzahl Fahrzeuge / Brandabschnitt...).

Vorgaben Elektrotechnik - wie läuft ein Ladevorgang ab

Normative Vorgaben (anerkannte Regeln der Technik) zur Errichtung und den Betrieb der Ladeinfrastruktur

Die normativen Anforderungen an die Installation von Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge bilden u.a. die Normen der Reihe DIN VDE 0100 ab. Neben den allgemeinen Anforderungen an den Schutz gegen elektrischen Schlag, thermische Auswirkungen sowie Überlast und Kurzschluss, werden im Rahmen der DIN **VDE 0100-722** besondere Anforderungen an die Errichtung der Ladeinfrastruktur gestellt.

Die wesentlichen normativen Anforderungen sind:

- Für jeden Ladepunkt muss ein separater Stromkreis zur Verfügung gestellt werden.
- Für öffentlich zugängliche Anschlusspunkte sind Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen (Überspannungsschutzgeräte, SPD) erforderlich.
- Die Ladepunkte sowie deren Leitungsanlage (einschließlich Verteiler) sind derart zu errichten, dass die Gefahr einer möglichen mechanischen Beschädigung gering ist. Dies betrifft im Bereich von Tiefgaragen auch die Gefahr einer mechanischen Beschädigung in Folge von Fahrzeugkollisionen. Dies ist bei der Planung bereits zu beachten, z.B. ist ein Rammschutz im Falle von E-Verteilern in den Fahrwegen der Fahrzeuge zwingend erforderlich.
- Es ist jeder Ladepunkt durch eine separate Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) mit einem Bemessungsdifferenzstrom nicht größer als 30 mA zu schützen. Falls die Ladeeinrichtung mit einer Steckdose oder einer Fahrzeugkupplung nach der Normenreihe DIN EN 62196 (VDE 0623) ausgestattet ist, müssen vorgelagerte Schutzvorkehrungen gegen Gleichfehlerströme vorgesehen werden, es sei denn, diese sind bereits in der Ladeeinrichtung (z.B. Wallbox) integriert.
- Die Vorgaben der Hersteller zum bestimmungsgemäßen Gebrauch der Ladeeinrichtungen sind der jeweiligen Montage- und Bedienungsanleitung des Produktes zu entnehmen und zwingend zu beachten.
- Da es sich bei den Ladeeinrichtungen im Sinne der DIN VDE 0100-700 um Anlagen besonderer Art handelt, sind diese gemäß Tabelle 1A der Durchführungsanweisung zur DGUV V 3, im Abstand von 1 Jahr wiederkehrend zu prüfen. Die vorhandenen Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen sind im Abstand von 6 Monaten zu prüfen.
- Nach erfolgter Erstinstallation der Ladeinfrastruktur ist eine Erstprüfung u.a. nach DIN VDE 0100 Teil 600 durchzuführen.

Bezugsquelle der DIN VDE 0100 Teil 722:

<https://www.vde-verlag.de/normen/0100527/din-vde-0100-722-vde-0100-722-2019-06.html>

Kommunikation zwischen Ladeeinrichtung Mode 3 (nach IEC 61851-1, AC laden mit Wallbox / Ladesäule) und dem E-Fahrzeug

Die Kommunikation zwischen einer Mode 3 Ladeeinrichtung (Wallbox oder Ladesäule) und dem Fahrzeug erfolgt über das Ladekabel. Es gibt Ausführungen, bei denen das Ladekabel an der Ladeeinrichtung fest angeschlossen ist. Ebenso gibt es Ausführungen, bei denen das Ladekabel an der Ladeeinrichtung mittels Steckvorrichtung eingesteckt werden kann. Um ein Ziehen der Steckvorrichtung unter Last zu verhindern, werden die Steckverbinder (Typ 2, nach IEC 62196) während dem Ladevorgang verriegelt.

Die Typ 2 Steckverbinder beinhalten neben den Drehstromleitungen (L1, L2, L3, N, PE) zwei Kommunikationsleitungen (PP und CP), über die ein Datenaustausch zwischen Ladeeinrichtung und Fahrzeug erfolgt.

Über die Kommunikationsleitung mit der Bezeichnung "PP" (Proximity Pilot) wird der maximal zulässige Ladestrom (für den das Ladekabel ausgelegt ist) kommuniziert. Hierzu befindet sich zur Codierung ein im Ladekabel zwischen PP-Kontakt und PE (Schutzleiter) eingesetzter Widerstand. Die einheitliche Codierung ist in der IEC 61851-1 geregelt.

Die weitere Kommunikationsleitung mit der Bezeichnung "CP" (Control Pilot) wird zum Datenaustausch mittels Pulsweitenmodulationsverfahren (PWM) genutzt.

Es werden u.a. Daten zu nachfolgenden Zuständen ausgetauscht:

- Fahrzeug angeschlossen / nicht angeschlossen
- Ladebereitschaft Fahrzeug
- Lüftungsanforderung
- Fehlerzustand "Kurzschluss"
- Fehlerzustand "Keine Verbindung zur Wallbox / Ladegerät"

Zusammengefasst, findet nachfolgender Ablauf statt:

- Die Ladeeinrichtung verriegelt die infrastrukturseitige Steckvorrichtung.
- Das E-Fahrzeug verriegelt die Steckvorrichtung und fordert anschließend den Start des Ladevorganges an.
- Die Ladeeinrichtung prüft die Verbindung (Durchgängigkeit) des Schutzleiters (PE) zum Fahrzeug.
- Die Ladeeinrichtung übermittelt an das Fahrzeug den maximal zur Verfügung stehende Ladestrom.
- Erst wenn alle Sicherheitsabfragen erfüllt sind, wird der Ladevorgang gestartet.
- Während dem Ladevorgang wird die Durchgängigkeit des Schutzleiters durchgehend überwacht.

Brandszenario / Brandlast

Brandbeitrag der Batteriepakete

Bei der Untersuchung des Brandverhaltens einzelner Batteriezellen, -modulen und -paketen zeigt sich, dass ein klarer linearer Zusammenhang zwischen der freigesetzten Energie und der maximal auftretenden Brandleistung mit der Speicherkapazität und dem Ladezustand vorliegt. Konkrete Informationen hierzu sind in entsprechenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen (z. B. **WILLSTRAND ET AL. [10]**, **BISSCHOP ET AL. [1]**, **Kunkelmann [4]**, **Sun et al. [3]**) zu finden.

Die Erkenntnisse lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

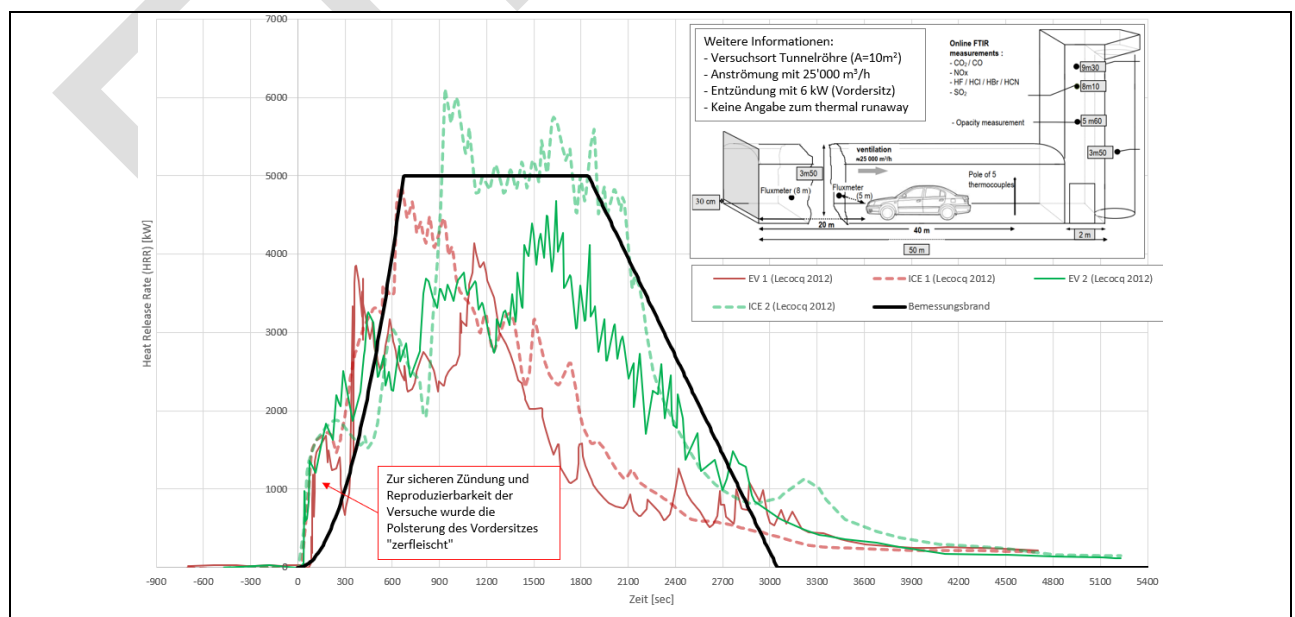
- Eine grössere Batterie (höhere Masse) führt zu einer Erhöhung der Brandlast
- Eine entladene Batterie setzt im Brandfall weniger Energie frei als eine volle Batterie
- Der Beitrag der Batterie an der Brandleistung liegt in der Größenordnung des Benzins von PKW mit Verbrennungsmotor. Bezogen auf die damit jeweils erzielbare Reichweite ist der Beitrag der Batterie allerdings grösser als der von Treibstoff-Tanks
- Den genannten Quellenangaben zufolge wird bei einem reinen Batteriebrand die 6 bis 13.5-fache Energie bezogen auf die elektrische Batteriekapazität (bei vollem Ladezustand) freigesetzt.

Auswertung aktueller Realbrandversuche an E-PKW

In den folgenden Abbildung 4 und Abbildung 5 sind exemplarisch die Ergebnisse von zwei Versuchsreihen ausgewertet, welche die Verläufe der Wärmefreisetzung von E-PKW zeugen. Dabei ist zu beachten, dass die Versuche teilweise grundlegend unterschiedliche Versuchsaufbauten, Zündorte und -quellen sowie Versuchsrandbedingungen aufweisen.

Zur besseren Vergleichbarkeit und dem Verständnis der Ergebnisse wurde ein typischer PKW-Bemessungsbrand nach den Grundlagen nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in die Diagramme integriert, wobei folgende Parameter angesetzt wurden:

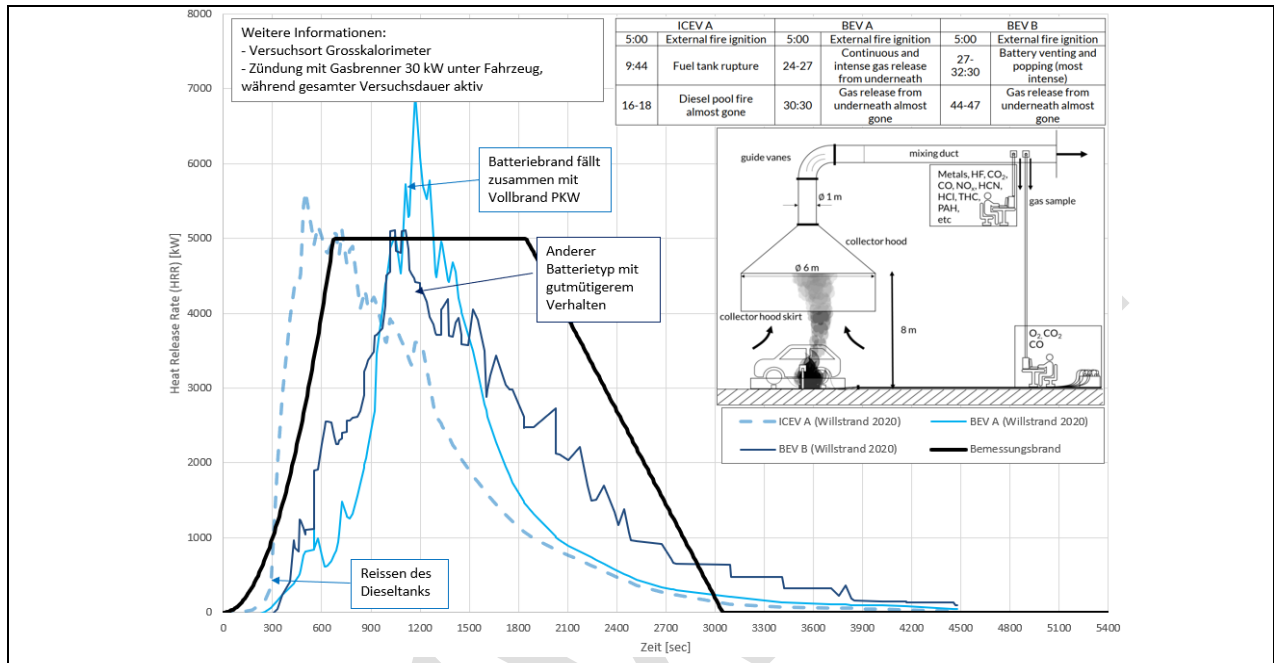
Mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit ($t_g = 300$ s)
Max. Wärmefreisetzungsrate 5 MW
Brandlast 10'000 MJ



Lecocq et al., 2012 [9]

Tests an jeweils zwei baugleichen Fahrzeugen: Je ein Diesel-Antrieb sowie ein E-PKW, alle Fahrzeuge französischer Hersteller.
Die Kurven wurden zeitlich auf den Beginn der Brandentwicklung (Zündung des Vordersitzes) verschoben
Brandverlauf: Zunächst Innenraum, dann Heck, dann Motorraum.

Abbildung: Verlauf der Wärmefreisetzungsrates in Brandversuchen Lecocq et al. [9]



Willstrand et al., 2020 [10]

Fahrzeug A (E-PKW u. PKW mit Verbrennungsmotor): Baugleicher Van, Fahrzeug B (E-PKW): kleines Familien-Kfz.

Abbildung: Verlauf der Wärmefreisetzungsrates in Brandversuchen WILLSTRAND ET AL. [10]

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus der Auswertung der Kurven der Wärmefreisetzung ableiten:

Bei Zündung der PKW von aussen oder am Sitz, kann in Übereinstimmungen mit den Feststellungen aus **DAST 2021 [5]** kein signifikant anderer Brandverlauf als bei PKW mit Verbrennungsmotor festgestellt werden, auch nicht bei Mitbrand der Batterien. Teilweise festgestellte Peaks in der Wärmefreisetzung (z.B. Versuch BEV A, **WILLSTRAND ET AL. [10]**) lassen sich auch bei PKW mit Verbrennungsmotor finden (z.B. Versuch B-ICEV, **LAM ET AL. [11]**).

Unabhängig von der Antriebsart ist eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit ($t_g = 300$ s) hinreichend zur Beschreibung der Brandentwicklung, wenn von einem Initialbrandereignis mit vergleichsweise geringer Energiefreisetzung ausgegangen wird (z. B. der 30 kW-Brenner von aussen bei **WILLSTRAND ET AL. [10]** oder der 6 kW-Brenner bei **LECOCQ ET AL. [9]**).

Abweichend davon muss mit einer schnellen bis sehr schnellen Brandentwicklungsgeschwindigkeit gerechnet werden, wenn

die Initialbrandbeanspruchung sehr gross ist (wie z.B. die Versuche von **LAM ET AL. [11]** mit einem Gasbrenner von 2 MW Leistung zeigen, welcher den kompletten PKW von unten beflammt),

der Treibstofftank eines PKW mit Verbrennungsmotor aufgrund der Brandbeanspruchung reisst und der auslaufende Treibstoff mitbrennt (**WILLSTRAND ET AL. [10]**),

durch gezieltes Eingreifen von aussen ein Thermal Runaway aller oder sehr vieler Zellen der Batterie eines E-PKW gestartet wird (siehe die Versuche **BRAFA 2021 [13]**),

durch versuchstechnische Massnahmen die Reproduzierbarkeit der Versuche erhöht wird, wie das «Zerfleischen» der Sitzpolsterung bei **LECOCQ ET AL. [9]**.

Ein Thermal Runaway, welcher sehr schnell alle Zellen der Batterie umfasst (siehe die Versuche **BRAFA 2021 [13]**), ist durch einen sehr schnellen Anstieg der Wärmefreisetzung sowie einer Erhöhung der maximalen Brandleistung charakterisiert (in Abhängigkeit des Zeitpunktes des Beginns des Thermal Runaway).

Ein solcher Thermal Runaway trat, abgesehen von den Versuchen **BRAFA 2021 [13]**, wo dieser von aussen erzeugt wurde, in den anderen Versuchsdaten nicht auf.

Rauchgaszusammensetzung

In Abhängigkeit der Zellchemie entstehen eine Vielzahl anorganische und organische Reaktionsprodukte. Auf eine detaillierte Erläuterung dieser Reaktionsprodukte wird im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung verzichtet, da sie sehr stark vom Batterietyp, dem Versuchsaufbau und den Versuchsrandbedingungen abhängen. Entsprechende Informationen können den wissenschaftlichen Berichten (z. B. **WILLSTRAND ET AL. [10]**, **LÖNNERMARK/BLOMQUIST [17]**, **LECOCQ ET AL. [9]**, **TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [18]**).

Exemplarisch sind die Ergebnisse der Auswertung der Rauchgaszusammensetzung aus PKW-Brandversuchen in Abbildung 9 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass in den ausgewerteten Versuchen abgesehen von Fluorwasserstoffsäure HF keine Anzeichen für eine erhöhte Produktion anderer relevanter erstickender oder reizender Rauchgasbestandteile vorliegen.

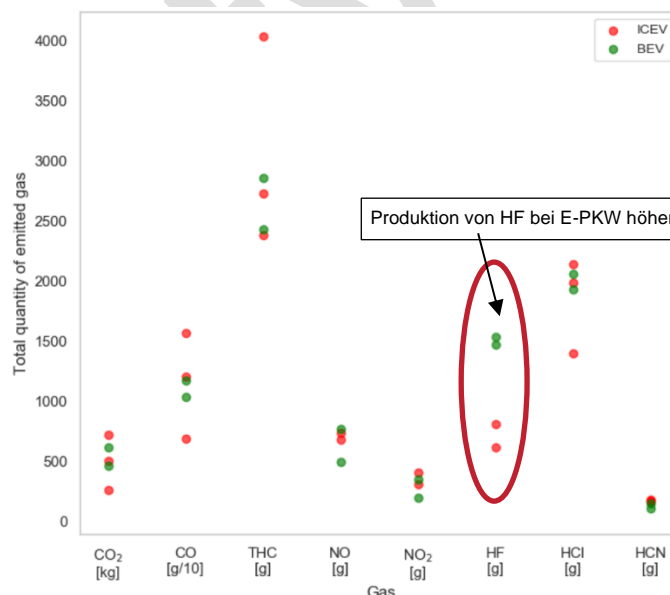


Abbildung: Gesamtmasse an freigesetzten Rauchgasbestandteilen aus PKW-Brandversuchen, Daten aus [9] und [17]; Diagramm aus [10]

Vorgaben / Ansicht der Versicherer

Nicht nur die baurechtlichen Vorgaben sind für die Betreiber von Garagen relevant, natürlich geht es auch immer darum, wer im Schadensfall bezahlt. Deshalb sind natürlich auch die

Vorgaben der Versicherer, deren Verband (GDV) und der relevanten Schadenverhütungs-gesellschaften (VdS) zu betrachten.

GDV/VdS:

Der GDV unterstützt den Einbau von Ladestationen in Garagen ausdrücklich,

„Der Einbau sicherer und schneller E-Tankstellen in privaten Garagen kann die Elektromobilität und damit die Transformation zu einer klimafreundlicheren Wirtschaft und Gesellschaft wesentlich voranbringen“

Jörg Asmussen, GDV-Hauptgeschäftsführer

Quelle: www.gdv.de

weist aber in verschiedenen Papieren auf der Homepage, auch auf die Gefahren hin:

Versicherer warnen: E-Autos nur in Ausnahmefällen an normalen Steckdosen laden

Quelle: www.gdv.de

Um das Ganze für die Kunden greifbarer zu machen, wurde eine Broschüre aufgelegt: ‚VdS 3885 Elektrofahrzeuge in geschlossenen Garagen – Sicherheitshinweise für die Wohnungswirtschaft‘.

Natürlich kann diese Broschüre auch in Garagen von Verkaufsstätten, Bürogebäuden usw. als Grundlage gesehen werden.

Hier die wichtigsten Punkte aus der VdS 3885:

Planung

- Überprüfung der zur Verfügung stehenden el. Anschlussleistung durch eine Elektrofachkraft oder Fachplaner, um die Anzahl der Ladestationen und deren möglichen Ladeleistung zu ermitteln.
- Haushaltsübliche Schutzkontaktsteckdosen sind nicht für eine Dauerbelastung mit 16 Ampere ausgelegt.
- CEE-Steckdosen sind für die Ladung eines E-Fahrzeugs nur geeignet, wenn die Installation (Leitungsquerschnitte, Klemmen, etc.) für den stundenlang fließenden Dauerstrom ausreichend bemessen (Dimensioniert) sind.

Installation

- Die Installation der Ladeinfrastruktur darf nur durch einen, im Installateurverzeichnis des Energieversorgers bzw. Netzbetreibers eingetragenen Elektrofachbetrieb erfolgen.

- Die gesetzlichen, behördlichen, technischen und vertraglich vereinbarten Vorschriften sind einzuhalten.
- Ladeeinrichtungen sollten nur auf nichtbrennbarem Untergrund montiert werden.
- Ladeeinrichtungen sollten möglichst in der Einfahrt- bzw. Ausfahrtebene angeordnet werden.
- Eine Erstprüfung muss gemäß VDE 0100-600 durch eine Elektrofachkraft erfolgen.
- Wiederkehrende Prüfungen durch eine Elektrofachkraft sind vorzusehen.

Baulicher Brandschutz

- Es sollten zur Vermeidung einer Brandausbreitung ausschließlich nichtbrennbare Baustoffe verwendet werden.
- Nach erfolgter Leitungsverlegung für die Ladeeinrichtungen ist die brandschutz-technische Trennung zwischen Brandabschnitten und Geschossen wiederherzustellen.

Anlagentechnischer Brandschutz

- Um eine frühzeitige Branderkennung zu gewährleisten ist die Installation einer automatischen Brandmeldeanlage inkl. Aufschaltung (NSL) vorzusehen.
- Stellplätze und Ladestandorte in geschlossenen Großgaragen sollten aus Sicht des Sachwertschutzes mit einer Sprinkleranlage geschützt werden.
- Wandhydranten (Typ F) an nassen Steigleitungen oder auch trockene Löschwasserleitungen können den Feuerwehreinsatz erleichtern.
- Es sollten möglichst Öffnungen zur Rauchableitung ins Freie oder maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlagen vorgesehen werden.

Organisatorischer Brandschutz

- Beachtung der Herstellervorgaben zum sicheren Betrieb der Ladestationen
- Rauchen, Feuer und offenes Licht ist in Garagen nicht zulässig
- Die Stellplätze sind sauber und frei von Abfällen (anderweitige Brandlasten) zu halten.
- Verunfallte oder beschädigte Elektrofahrzeuge, bei denen eventuell die Batterie in Mitleidenschaft geraten oder beschädigt sein könnte, stellen eine besondere Brandgefahr dar und sollten deswegen keinesfalls in Garagen abgestellt werden. Diese Fahrzeuge sind einzeln im Freien, mit ausreichendem Sicherheitsabstand von mind. 5m seitlich und nach oben hin offen, zu Gebäuden oder anderen brennbaren Gegenständen abgestellt werden.
- Haushaltsübliche Verlängerungsleitungen wie z.B. Kabeltrommeln bzw. Mehrfachsteckdosenleisten dürfen zum Laden von Elektrofahrzeugen nicht verwendet werden.
- Die Ladekabel und Ladeeinrichtungen sollten regelmäßig, vor jedem Ladevorgang, auf Beschädigungen durch den Nutzer anhand einer Sichtprüfung kontrolliert werden. Defekte Steckvorrichtungen und Leitungen sind unverzüglich auszutauschen.

- Erstellung einer Betriebsvorschrift für die Benutzung der Garage mit Ladepunkten und deren Bekanntmachung bei den Nutzern.

Abwehrender Brandschutz

- Gute Zugänglichkeit zum Grundstück für die Feuerwehr ermöglichen
- Ausreichende Löschwasserversorgung berücksichtigen
- ggf. werden besondere Maßnahmen für eine Löschwasserrückhaltung erforderlich

Versicherer

Da der Markt der Versicherer in Deutschland sehr groß ist (gemäß Statista 107 Unternehmen, die verbundene Wohngebäudeversicherungen anbieten), kann hier kein allumfassendes Urteil abgegeben werden. Die Masse der Versicherer sieht zuerst die baurechtlichen Vorgaben (siehe 2. in diesem Bericht) und dann die VdS 3885 als Grundlage für die Verträge. Einige Versicherer haben auch noch eigene Ingenieurabteilungen die weitere Optimierungsmaßnahmen vorschlagen.

Hier einige Beispiele:

- Erweiterung bzw. Nachrüstung einer Brandmeldeanlage (BMA) nach DIN 14675 bzw. DIN VDE 0833, auf den Bereich der Stellplätze mit Ladepunkten
- Um eine frühestmögliche Branderkennung, bereits im Stadium der ersten Rauchentwicklung zu gewährleisten, ist es sinnvoll, insbesondere in Tiefgaragen, zumindest die Bereiche der Parkplätze, die mit Ladepunkten ausgestattet werden, in die automatische Brandmeldeanlage zu integrieren. Dies kann bspw. durch sog. neuronale Brandmelder mit integrierten optischen- und Wärmesensoren erfolgen. Somit wird stets gewährleistet, dass der abwehrende Brandschutz frühestmöglich alarmiert wird, insbesondere wenn Ladevorgänge zu Randzeiten bzw. über Nacht stattfinden.
- Automatisierte, allpolige Abschaltung der Ladepunkte (Freischaltung) bei Branderkennung (Brandfallsteuerung)
- Bei einem Entstehungsbrand, der aus der Ladeinfrastruktur bzw. dem Fahrzeugakku hervorgeht, kann durch die frühestmögliche Unterbrechung des Ladevorgangs, eine zeitliche Verzögerung der Brandausbreitung erreicht werden. Dies kann technisch durch Integration der Ladeinfrastruktur in die Brandfallsteuerung erreicht werden, indem bei einer Branderkennung durch die Brandmeldeanlage, automatisiert der Ladevorgang an allen Ladepunkten unterbrochen und allpolig spannungslos geschaltet wird.
- Erweiterung bzw. Nachrüstung einer Sprinkleranlage, auf den Bereich der Stellplätze mit Ladepunkten
- Ein Entstehungsbrand kann sich ohne automatische Löschanlage schnell auf angrenzende Fahrzeuge, bis hin zu einem Vollbrand ausbreiten. Um einen Entstehungsbrand frühestmöglich bis zum Eintreffen des abwehrenden Brandschutzes in seiner Ausbreitung einzudämmen und um eine Kühlwirkung zu erreichen, wird empfohlen, eine Sprinklerung zumindest für die Stellplätze, die mit Ladepunkten ausgerüstet werden vorzusehen, bzw. Ladepunkte wenn möglich nur in gesprinklerten Bereichen von Tiefgaragen zu errichten.

Dadurch kann eine Brandausbreitung verzögert werden und der abwehrende Brandschutz gewinnt wertvolle Zeit, um geeignete Brandbekämpfungsmaßnahmen einzuleiten, bevor der Brand und die Hitzeentwicklung zu weit fortgeschritten sind.

- Anderweitige Lademöglichkeiten für Elektrostraßenfahrzeuge (u.a. per Mode 1 oder Mode 2 an Schuko-Steckdosen) unterlassen
- Schuko-Steckdosen nach DIN VDE 0620-1 sind für den Hausgebrauch und vergleichbare Anwendungen ausgelegt und daher nur temporär mit dem max. Nennstrom belastbar. Deshalb sind diese nicht zum Laden von Elektrostraßenfahrzeugen über mehrere Stunden hinweg geeignet. Durch Alterungsprozesse an Kontakten u. Klemmstellen können erhöhte Übergangswiderstände entstehen, was zu einer unzulässigen Erwärmung, bis hin zu einem Brand führen kann. Das Laden von Elektrostraßenfahrzeugen an Schuko-Steckdosen nach DIN VDE 0620-1 sollte daher zur Risikominimierung unterlassen werden.
- Prävention durch regelmäßige Thermografieprüfungen
- Bei der Infrarotthermografie wird die Infrarotstrahlung, die von jedem Objekt ausgeht, in ein sichtbares Wärmebild umgewandelt. Bei der Messung müssen weder laufende Prozesse unterbrochen, noch Anlagenteile ausgebaut werden; trotzdem lassen sich dadurch Störungen an elektrischen Anlagen frühzeitig und präzise ermitteln. Fehlerhafte, verschlissene bzw. überlastete Komponenten der Ladeinfrastruktur können somit ausgetauscht werden, bevor Folgeschäden (z.B. ein Schmorbrand) an den Anlagen auftreten und deren Funktion beeinträchtigen, oder gar einen Brand verursachen können.

Die Versicherer machen sich hier tiefgründige Gedanken, welche zusätzlichen Schutzmaßnahmen, über den Personenschutz hinaus, noch getroffen werden können, um das Gebäude in seinem Bestand zu schützen. Hierbei handelt es sich um einen privatrechtlichen Vertrag, dem beide Seiten zustimmen.

Brandbekämpfung aus Sicht der Feuerwehr inkl. Löschwasser und Löschwasserrückhaltung

Um einen Elektrofahrzeugbrand zu bekämpfen, wird nach einhelliger Expertenmeinung in erster Linie (verglichen mit der Brandbekämpfung bei Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren) relativ viel Wasser benötigt. Gemäß der Aussage des Deutschen Feuerwehr Verband sowie der AGBF Bund stellen Elektrofahrzeuge in Tiefgaragen keine erhöhte Brandgefahr dar (vgl. DFV und AGBF 20.02.21).

Weiterhin untersuchen diverse Teststellen gerade andere Möglichkeiten der Löschung/Brandunterdrückung durch Penetration der Batterien oder durch das Abdecken mit einer Löschdecke. Beispielsweise hat die Dekra im Oktober 2021 im Crash-Test-Center in Neumünster Penetrationstests durchgeführt. Andere Anbieter von Feuerwehrausrüstung bieten Akkubrand-Löschsysteme und spezielle Löschmittel an.

Vorgehen bei der Brandbekämpfung

Der Deutsche Feuerwehrverband in Verbindung mit der AGBF Bund empfiehlt:

Die Feuerwehr führt wirksame Löschmaßnahmen mit Wasser durch und verhindert eine weitere Brand- und Rauchausbreitung in andere Brandabschnitte. Im weiteren Verlauf sollte die Wärmeentwicklung des Lithium-Ionen-Speichermediums, z.B. mittels Wärmebildkamera, überwacht werden. Indikatoren, aus denen mit ausreichender Sicherheit eine Rückzündung ausgeschlossen werden kann fehlen. Aus diesem Grund sollten Lithium-Ionen-Speichermedien an einen sicheren Ort verbracht oder einem Entsorger übergeben werden.

Was bedeutet dies im Detail?

Löschmittel:

Sowohl bei Bränden von Lithium-Ionen-Speichermedien als auch von Geräten mit eingebauten Lithium-Ionen-Speichermedien wird als Löschmittel der Wahl Wasser empfohlen. Die Verwendung von Löschmittelzusätzen ist möglich. Durch eine möglichst frühzeitige und ausreichend lange Kühlung des Speichermediums kann das thermische Durchgehen („thermal runaway“) verhindert werden. Die Wärmeentwicklung der Batterie bzw. ihrer Einhausung sollte bis zur Übergabe der Einsatzstelle z.B. mittels Wärmebildkamera regelmäßig kontrolliert werden. Es kann meist von der Feuerwehr nur „Feuer unter Kontrolle“ festgestellt werden, da es bis zu „Feuer aus“ zu einem tage- bis wochenlanger chemischer Prozess kommen kann. Dieser sollte durch den Entsorger oder Betreiber betreut wird. Die Löschmittel Metallbrandpulver, Sand, ABC-Pulver oder CO₂ erzielen keinen ausreichenden Kühleffekt.

Einsatztaktik:

Im Brandfall sind Elektrofahrzeuge mit Wasser zu löschen. Löschmittelzusätze können verwendet werden. Die Temperaturentwicklung nach dem Ablöschen des Fahrzeugs im Bereich der Batterie sollte z.B. mittels Wärmebildkamera engmaschig kontrolliert werden. Eine Temperaturerhöhung deutet auf ein drohendes Wiederentzünden hin.

Eine Temperaturabnahme kann auch bei bestehender Gefahr des Wiederentzündens festgestellt werden. Um Rückzündungen zu vermeiden, ist der Batteriebereich ausreichend lange mit Wasser bis zur Übergabe an den Abschleppdienst zu kühlen. Der Abschleppdienst ist aufgrund der möglichen Rückzündungsgefahr darüber zu informieren, dass es sich um ein Elektrofahrzeug handelt. Elektrofahrzeuge, die in geschlossenen Bereichen (z.B. Garagen) stehen und bei denen eine Rückzündungsgefahr nicht ausgeschlossen werden kann, sollten ggf. ins Freie verbracht werden.

Die Wurfweite sollte bei der Löschwasserabgabe zur Reduzierung der Gefährdung für die Einsatzkräfte ausgenutzt werden. Produktaustritt (z.B. Elektrolyt) kann hier zusätzlich auftreten. In solchen Fällen ist entsprechend der FwDV 500 vorzugehen⁸.

Zur besseren Lageeinschätzung können Rettungsdatenblätter oder Softwarelösungen verschiedener Anbieter herangezogen werden. Über die Integrierten Leitstellen besteht die Möglichkeit, über die Fahrzeugkennzeichenabfrage, den genauen Fahrzeugtyp festzustellen und das entsprechende Rettungsdatenblatt an die Einsatzstelle zu versenden

Löschwasserbedarf:

Wasser ist als Löschmittel zu bevorzugen, da dieses auch kühlend auf den Hochvolt-Energiespeicher wirkt. Es ist mit viel Wasser (ca. 200 l /min) zu löschen bzw. zu kühlen. (Merkblatt 0604 VFDB) Dies entspricht 12 m³/h, geht man davon aus, dass die Feuerwehr noch umliegende Teile kühlen muss und noch weitere Fahrzeuge durch den Brand entzündet wurden sind die derzeit vorgegebenen Löschmittelmengen gemäß DVGW W405 ausreichend.

Jedoch muss an dieser Stelle vor allem das Thema: "Wieviel Löschwasser wird benötigt und wie wir die Löschwasserrückhaltung gemanagt", betrachtet werden:

Elektrolyte sind in der Regel reizend, brennbar und potenziell ätzend. Je nach Art der eingesetzten Batterien und abhängig vom Brandverlauf können unterschiedliche Stoffe und Stoffgemische entstehen.

Hinweis: Austretende Flüssigkeiten aus Hochvolt-Energiespeichern sind meist Kühlmittel und kein Elektrolyt. Elektrolyte sind nur in geringen Mengen (Millilitern) in den einzelnen Zellen verteilt vorhanden. (Merkblatt 0604 VFDB). Für die Aufnahme der austretenden Flüssigkeiten sind konventionelle Bindemittel zu verwenden.

Löschwasserrückhaltung:

Aufgrund der gegenüber Großbränden geringen Löschwassermenge und der geringen Mengen an austretenden Stoffen, die sich meist aus konventionellen Kühlmitteln und geringen Mengen Elektrolyt zusammensetzen, besteht gemäß Merkblatt 0604 der VFDB und den Einsatzhinweise der LFS BW gegenüber konventionellen Fahrzeugen in der Regel keine zusätzliche Gefahr für das Trinkwasser.

⁸ Quelle: DFV/AGBF: Fachempfehlung

Fazit / Zusammenfassung

Nach einer genauen Betrachtung aller Fakten:

1. Die Statistiken weisen bei Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren keine höheren Brandgefahren auf;
 2. die Brandszenarien sind hinsichtlich der Wärmefreisetzung denen von "Verbrenner" ähnlich und liegen größtenteils in der Normbrandkurve;
 3. unsere Bauwerke sind so ausgelegt, dass Sie einem Normbrand standhalten,
- kann man zusammenfassend sagen, dass aufgrund der Elektromobilität keine erheblichen Änderungen am Baurecht notwendig sind.

Natürlich bleibt das Problem, dass sich eine brennende Fahrzeugantriebsbatterie nicht löschen lässt und sich die Feuerwehren in Deutschland darauf einstellen müssen, längere und zeitintensivere Einsätze zu haben, aber gerade darauf zielen ja auch die Hinweise aus der Versicherungsbranche ab, den Brand zu verhindern, frühzeitig zu entdecken und gegebenenfalls durch Löschtechnik klein zu halten.

Architekten und Ingenieure sollten hier im Rahmen ihrer Beratungsleistungen den Bauherren darauf hinweisen, dass die Brandgefahr vom Fahrzeug unabhängig ist und nach Baurecht errichtete Gebäude diesem Brandereignis standhalten werden, es aber natürlich technische Möglichkeiten gibt um einen größeren Sachschaden und den damit einhergehenden Aufwand/Ärger abzumildern und so mit geringen Mitteln Ärger und Nutzungsausfälle zu vermeiden.

Weitere Quellen

MBO, Musterbauordnung– Fassung November 2002, geändert 25.09.2020

M-GarVO - Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen (Muster-Garagenverordnung M-GarVO) Fassung Mai 1993, geändert durch Beschlüsse vom 19.09.1996, 18.09.1997 und 30.05.2008

GaV - Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen (Garagenverordnung - GaV) Vom 17. November 2014

StVG - Straßenverkehrsgesetz Ausfertigungsdatum: 03.05.1909

VFDB: Merkblatt 0604 Stand 2017

DVGW: Arbeitsblatt W 405: Bereitstellung von Löschwasser durch die Trinkwasserversorgung

DFV/AGBF Bund: Risikoeinschätzung Lithium-Ionen Speichermedien Stand 2018

Landesfeuerwehrschule BW: Einsatzhinweise für alternativ angetrieben Fahrzeuge und alternative Energieträger

DIN VDE 0100 – Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 722 Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Stromversorgung von Elektrofahrzeugen.

VdS 3885 - Elektrostraßenfahrzeuge in geschlossenen Garagen – Sicherheitshinweise für die Wohnungswirtschaft

Pressemitteilung KBA vom 05.02.22

Anlagen

Ausführliches zu den Brandlasten

Problematik: Ladevorgang als zusätzliche Zündquelle

Zunächst: Beitrag der Batterie

Es existiert ein klarer Zusammenhang zwischen der freigesetzten Energie und der Speicherkapazität (und dem Ladestand).

WILLSTRAND ET AL. [10] haben diesbezüglich aus eigenen Versuchen sowie Literaturangaben einen linearen Zusammenhang zwischen elektrischer Batteriekapazität und beim Batteriebrand freigesetzter Energie nachwiesen, der zur Abschätzung des Brandbeitrags von Batterien herangezogen werden kann. Dieser lineare Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung ersichtlich. Mit $1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ kJ}$ wird nach dieser Untersuchung etwa das 13.5-fache der elektrischen Speicherkapazität bei einem kompletten Ausbrand der Batterien als Wärmeenergie freigesetzt

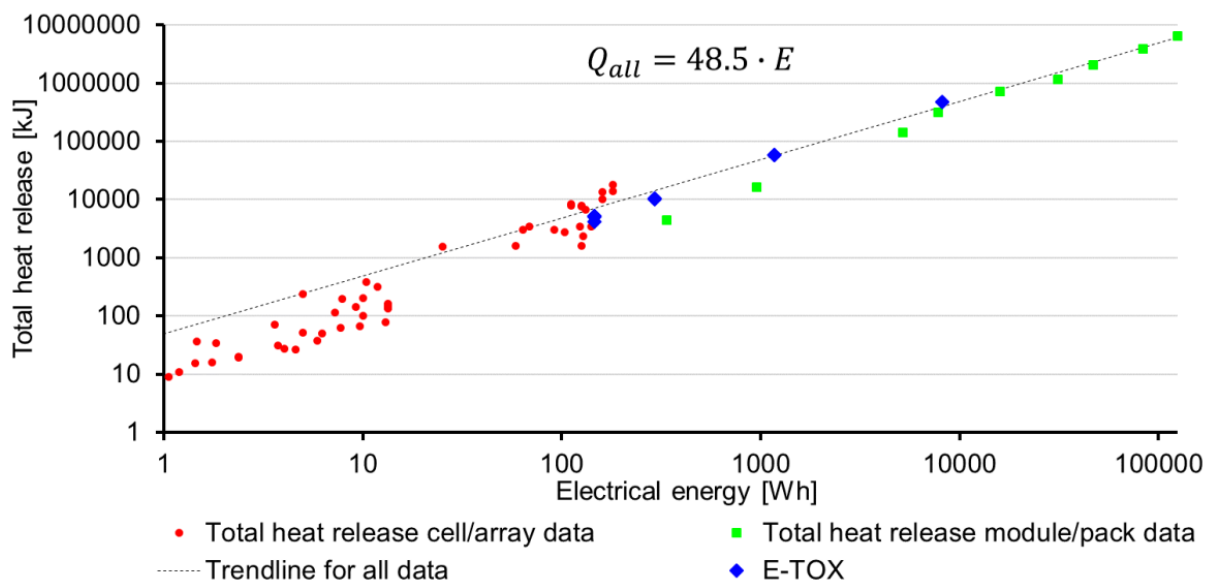


Abbildung 1: Gesamtenergiefreisetzung von Zellen / Modulen und Batterien im Verhältnis zur elektrischen Batteriekapazität, aus [10]

Auch nach **BISSCHOP ET AL. [1]** ist die freigesetzte Energie vom Ladezustand abhängig, volle Zellen haben eine höhere Energiefreisetzungsrates als entleerte Zellen. Nach **Kunkelmann [4]**, der verschiedene Sekundärquellen ausgewertet hat, entspricht die thermisch in Lithium-Ionen-Batterien gespeicherte Energie dem 6- bis 11-fachen der elektrisch gespeicherten Energie. Diese Werte liegen niedriger als in **WILLSTRAND ET AL. [10]** festgestellt.

Eine weitere Darstellung der Zusammenhänge zwischen elektrischer Batteriekapazität und Ladezustand, im Vergleich zu fossilen Brennstoffen ist aus **Sun et al. [3]** entnommen und in Abbildung 2 dargestellt

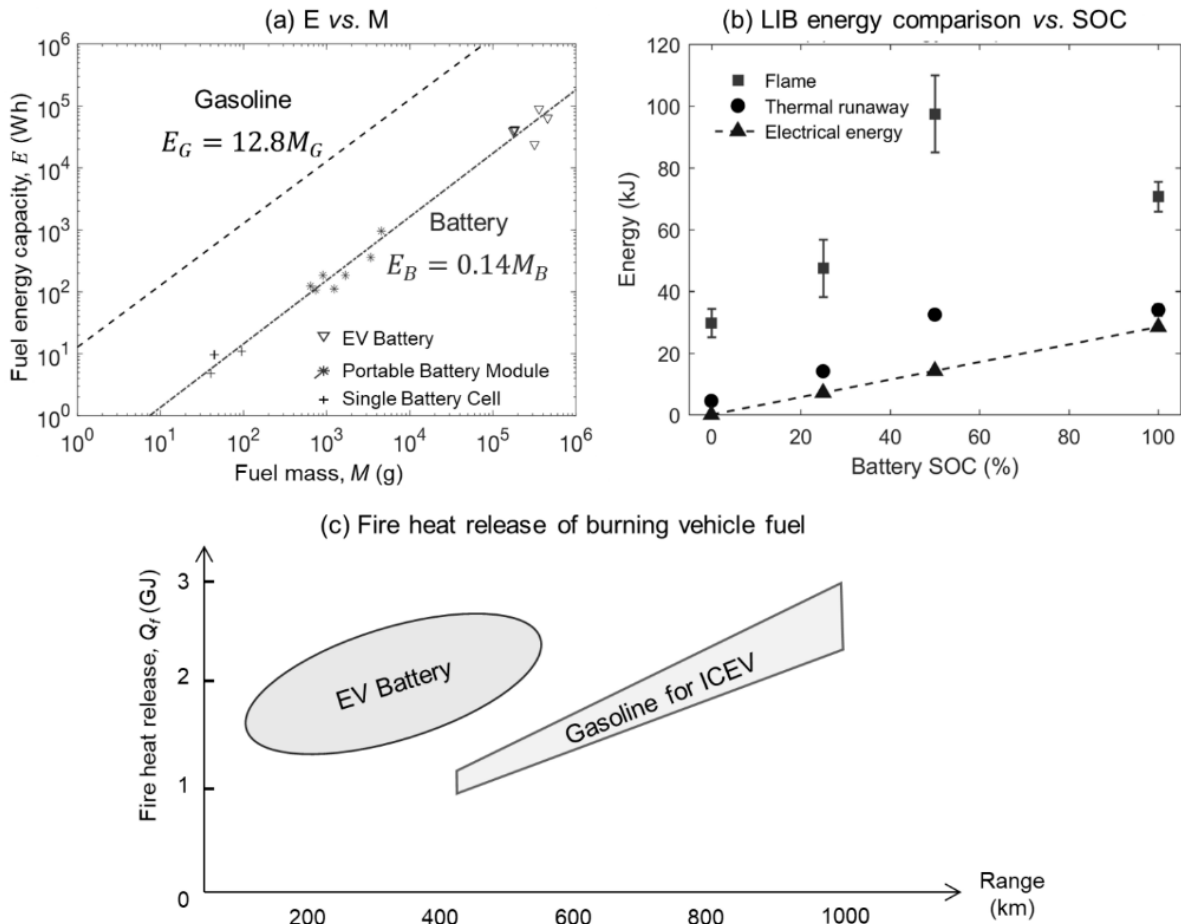


Abbildung 2: Gespeicherte elektrische Energie von Lithium-Ionen-Batterien im Vergleich zu Benzin (a), Flammen- und thermische Energiefreisetzung in Abhängigkeit vom Ladezustand (b) und Energiefreisetzung der Batterie bzw. des Kraftstoffs (c) in Abhängigkeit der Reichweite, aus [3]

Auch für die Kenngröße der Wärmefreisetzungsrate existieren Untersuchungen bezogen auf die einzelne Batterie, sodass nach **SUN ET AL. [3]** und **WILLSTRAND ET AL. [10]** ein Zusammenhang zwischen maximaler Wärmefreisetzung und der elektrischen Batteriekapazität hergestellt werden kann, siehe Abbildung 3.

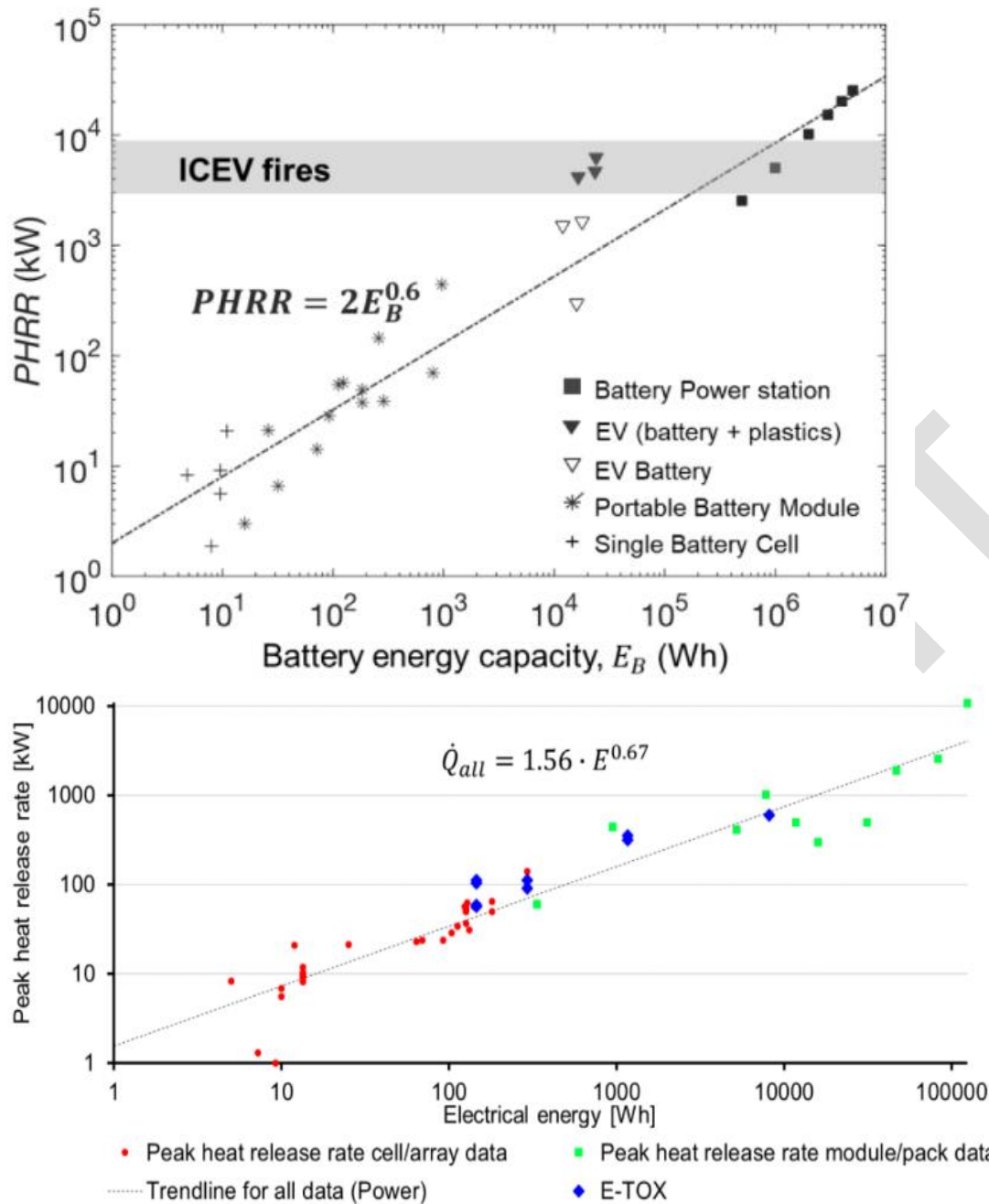


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen maximaler Wärmefreisetzungsrate und elektrischer Batteriekapazität (links aus [3], rechts aus [10])

Die Erkenntnisse lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

- Eine größere Batterie (höhere Masse) führt zu einer Erhöhung der Brandlast
- Eine entladene Batterie setzt im Brandfall weniger Energie frei als eine volle Batterie
- Der Beitrag der Batterie an der Brandleistung liegt in der Größenordnung des Benzins von PKW mit Verbrennungsmotor. Bezogen auf die damit jeweils erzielbare Reichweite ist der Beitrag der Batterie allerdings grösser als der von Treibstofftanks

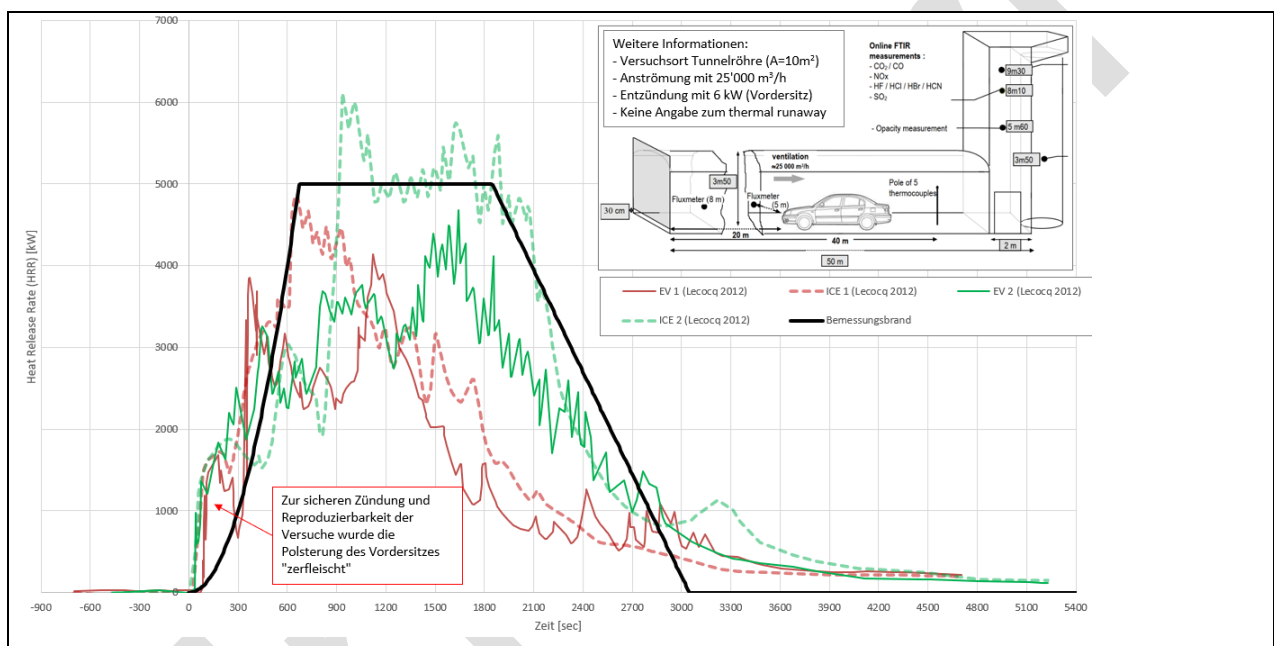
Den genannten Quellenangaben zufolge wird bei einem reinen Batteriebrand die 6 bis 13,5-fache Energie bezogen auf die elektrische Batteriekapazität (bei vollem Ladezustand) freigesetzt.

Auswertung aktueller Realbrandversuche an E-PKW

In den folgenden Abbildung 4 bis Abbildung 7 sind die Verläufe der Wärmefreisetzung von E-PKW ausgewertet. Dabei ist zu beachten, dass die Versuche teilweise grundlegend unterschiedliche Versuchsaufbauten, Zündorte und -quellen sowie Versuchsrandbedingungen aufweisen.

Zur besseren Vergleichbarkeit und dem Verständnis der Ergebnisse wurde ein typischer PKW-Bemessungsbrand nach den Grundlagen nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in die Diagramme integriert, wobei folgende Parameter angesetzt wurden:

- Mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit ($t_g = 300$ s)
- Max. Wärmefreisetzungsrate 5 MW
- Brandlast 10'000 MJ

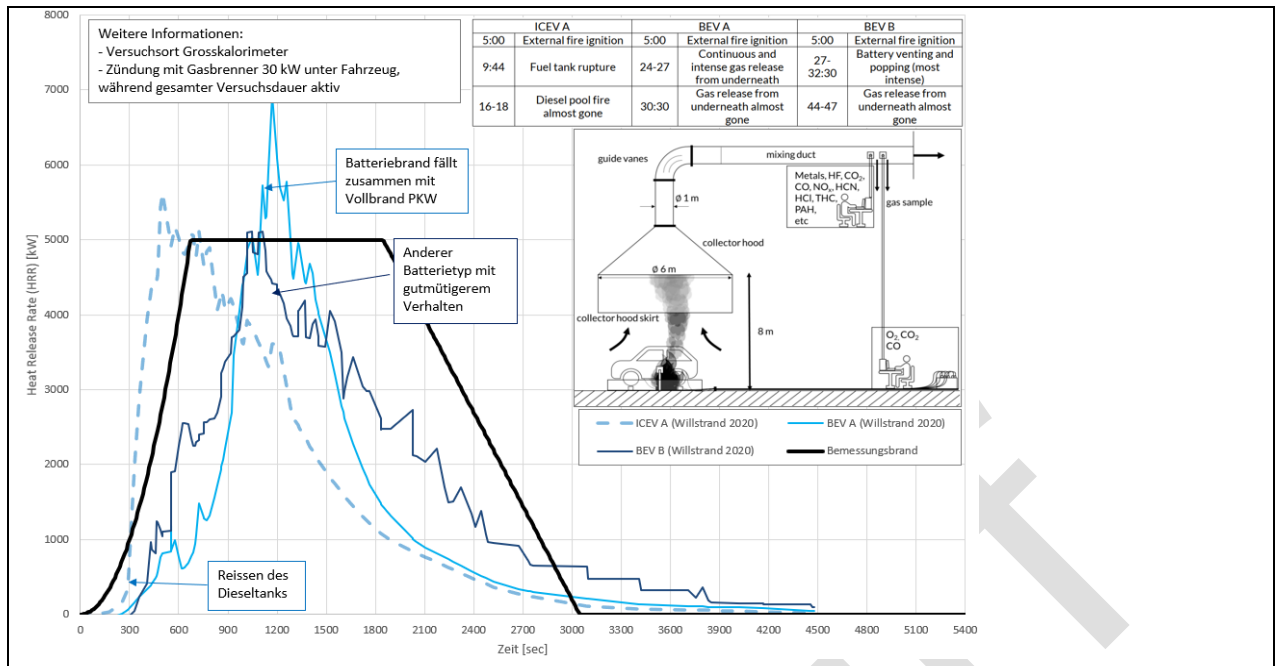


Lecocq et al., 2012 [9]

Tests an jeweils zwei baugleichen Fahrzeugen: Je ein Diesel-Antrieb sowie ein E-PKW, alle Fahrzeuge französischer Hersteller.

Die Kurven wurden zeitlich auf den Beginn der Brandentwicklung (Zündung des Vordersitzes) verschoben
Brandverlauf: Zunächst Innenraum, dann Heck, dann Motorraum.

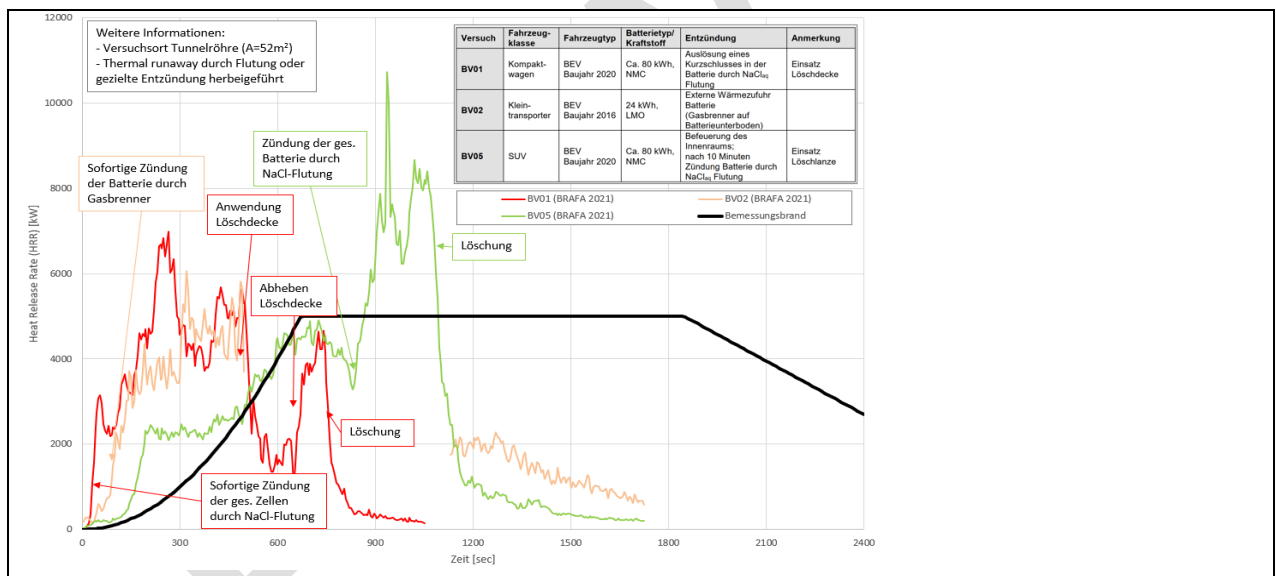
Abbildung 4: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen Lecocq et al. [9]



Willstrand et al., 2020 [10]

Fahrzeug A (E-PKW u. PKW mit Verbrennungsmotor): Baugleicher Van, Fahrzeug B (E-PKW): kleines Familien-Kfz.

Abbildung 5: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen WILLSTRAND ET AL. [10]



BRAFA 2021 [13]

Tunnelbrandversuche an vollständigen Fahrzeugen: BV 01 Kompaktwagen, BV 02 Kleintransporter, BV 05 SUV.

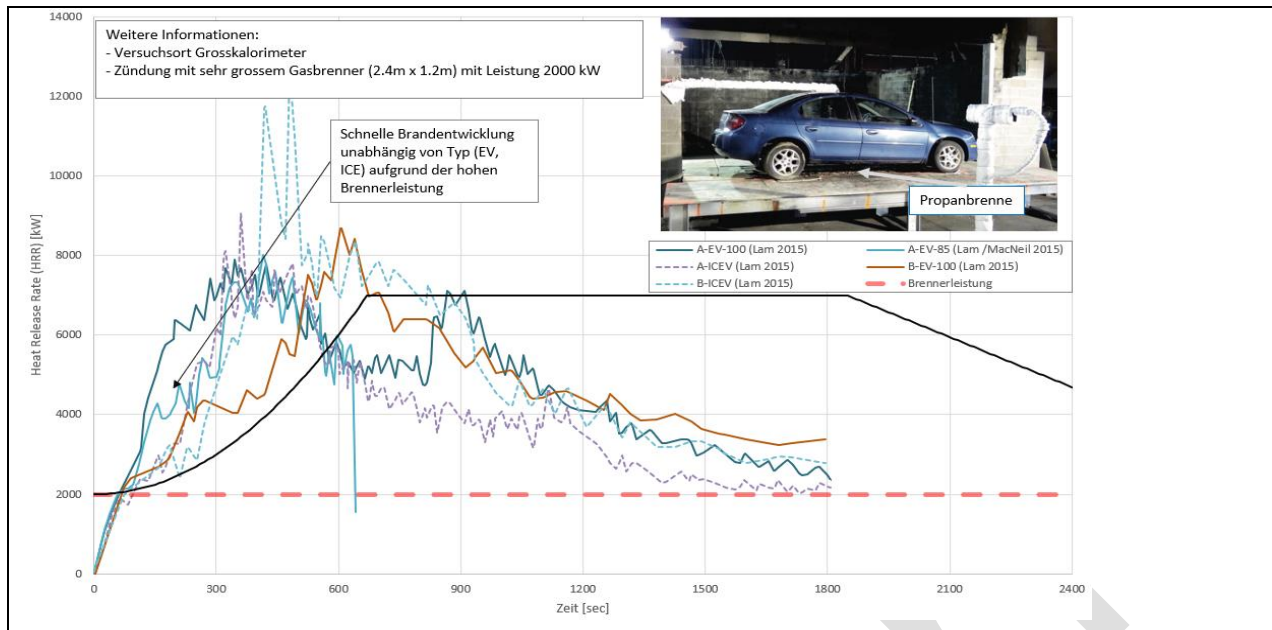
Hinweise:

Zündung der aller Zellen der Batterie durch Flutung mit NaCl

BV 02: Stromausfall während Test, daher Unterbrechung der Kurve.

Aufgrund der diversen Löschmassnahmen stellen die Kurven keine ungestörten Brandverläufe dar.

Abbildung 6: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen BRAFA 2021 [13]



Lam, MacNeil et al., 2015 [11]

Testreihe A, 2 baugleiche E-PKW, Batterieladestand 100 % und 85 % sowie ein vergleichbarer PKW mit Verbrennungsmotor. Testreihe B: 2 gleiche Modelle mit unterschiedlicher Antriebsart.

Alle E-PKW mit «grosser» Batteriekapazität, jedoch ohne genaue Angabe.

Abbildung 7: Verlauf der Wärmefreisetzungsrates in Brandversuchen LAM ET AL. [11]

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus der Auswertung der Kurven der Wärmefreisetzung ableiten:

- Bei Zündung der PKW von aussen oder am Sitz, kann in Übereinstimmungen mit den Feststellungen aus **DAST 2021 [5]** kein signifikant anderer Brandverlauf als bei PKW mit Verbrennungsmotor festgestellt werden, auch nicht bei Mitbrand der Batterien. Teilweise festgestellte Peaks in der Wärmefreisetzung (z.B. Versuch BEV A, **WILLSTRAND ET AL. [10]**) lassen sich auch bei PKW mit Verbrennungsmotor finden (z.B. Versuch B-ICEV, **LAM ET AL. [11]**).
- Unabhängig von der Antriebsart ist eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit ($t_g = 300$ s) hinreichend zur Beschreibung der Brandentwicklung, wenn von einem Initialbrandereignis mit vergleichsweise geringer Energiefreisetzung ausgegangen wird (z. B. der 30 kW-Brenner von aussen bei **WILLSTRAND ET AL. [10]** oder der 6 kW-Brenner bei **LECOCQ ET AL. [9]**).
- Abweichend davon muss mit einer schnellen bis sehr schnellen Brandentwicklungsgeschwindigkeit gerechnet werden, wenn
- die Initialbrandbeanspruchung sehr gross ist (wie z.B. die Versuche von Lam et al. [11] mit einem Gasbrenner von 2 MW Leistung zeigen, welcher den kompletten PKW von unten beflammt),
- der Treibstofftank eines PKW mit Verbrennungsmotor aufgrund der Brandbeanspruchung reisst und der auslaufende Treibstoff mitbrennt (Willstrand et al. [10]),
- durch gezieltes Eingreifen von aussen ein Thermal Runaway aller oder sehr vieler Zellen der Batterie eines E-PKW gestartet wird (siehe die Versuche BRAFA 2021 [13]),
- durch versuchstechnische Massnahmen die Reproduzierbarkeit der Versuche erhöht wird, wie das «Zerfleischen» der Sitzpolsterung bei Lecocq et al. [9].

- Ein Thermal Runaway, welcher sehr schnell alle Zellen der Batterie umfasst (siehe die Versuche BRAFA 2021 [13]), ist durch einen sehr schnellen Anstieg der Wärmefreisetzung sowie einer Erhöhung der maximalen Brandleistung charakterisiert (in Abhängigkeit des Zeitpunktes des Beginns des Thermal Runaway).
- Ein solcher Thermal Runaway trat, abgesehen von den Versuchen BRAFA 2021 [13], wo dieser von aussen erzeugt wurde, in den anderen Versuchsdaten nicht auf.

Rauchgaszusammensetzung

Batterien

In Abhängigkeit der Zellchemie entstehen eine Vielzahl anorganische und organische Reaktionsprodukte. Auf eine detaillierte Erläuterung dieser Reaktionsprodukte wird im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung verzichtet, da sie sehr stark vom Batterietyp, dem Versuchsaufbau und den Versuchsrandbedingungen abhängen.

E-PKW

Die Rauchgaszusammensetzung von E-PKW können in einem Grosskalorimeter bestimmt werden. Hierbei ist es wichtig, alle entstehenden Rauchgase mit der Absaughaube zu erfassen und im Absaugkanal der passenden Messtechnik zuzuführen. Der Versuchsaufbau aus **WILLSTRAND ET AL. [10]**, welcher einem typischen Versuchsaufbau für die Untersuchung von grossen Brandlasten entspricht, ist in Abbildung 8 dargestellt.

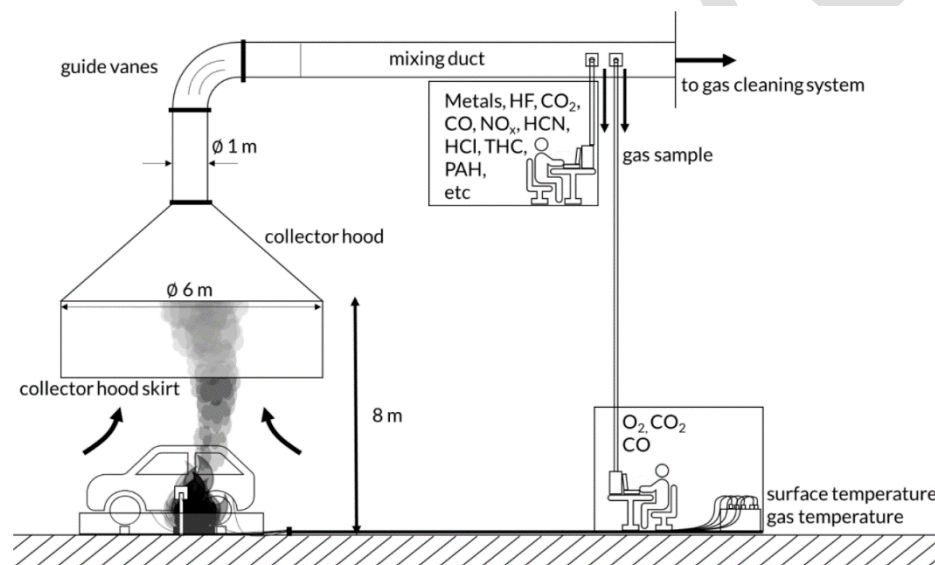


Abbildung 8: Typischer Versuchsaufbau der Brandversuche an E-PKW zur Toxizitätsanalyse aus [10]

Versuchsaufbauten im Freien, in Räumen oder Tunnelröhren sind für eine quantitative Bestimmung der Rauchgasbestandteile nicht geeignet, da keine Rauchgasanalysestrecke mit definierten Randbedingungen vorhanden ist. Aus diesem Grund existieren deutlich weniger Brandversuche, welche eine gesicherte Aussagekraft hinsichtlich der Rauchgasanalyse besitzen. Geeignet sind die Versuche von **LECOQ ET AL. [9]** und **LÖNNERMARK/BLOMQVIST [17]**, welche in [10] gemeinsam ausgewertet wurden.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass abgesehen von der bereits erwähnten Fluorwasserstoffsäure HF keine Anzeichen für eine erhöhte Produktion anderer relevanter erstickender oder reizender Rauchgasbestandteile vorliegen.

Die eigenen Versuche des RISE Forschungsvorhabens 2020:90 [10] bestätigen diese Erkenntnisse, siehe Abbildung 10. Die dortige Bezeichnung PAH bezeichnet dabei den Anteil an polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffen im ausgewerteten Rauchgas.

Auch in der Darstellung der zeitlichen Verläufe (Abbildung 11, Abbildung 12) ist der deutlich grössere Anteil an Fluorwasserstoffsäure HF bei E-PKW im Vergleich zu Verbrennern zu identifizieren. Andere Säuren (HBr, HCl) wurden in den Brandversuchen von **WILLSTRAND ET AL [10]** ebenfalls im Vergleich zu PKW mit Verbrennungsmotor erhöht gemessen, wenn auch nicht in gleicher Grössenordnung wie HF.

Durch die erhöhte Produktion der Fluorwasserstoffsäure (HF) sind Rauchgase von E-PKW-Bränden potenziell kritischer zu beurteilen, da HF eine stark reizende Wirkung besitzt und darüber hinaus (das Fluorid-Ion in gelöster Form) in der Lage ist, über die Haut in den Körper zu gelangen und Vergiftungserscheinungen zu bewirken [10].

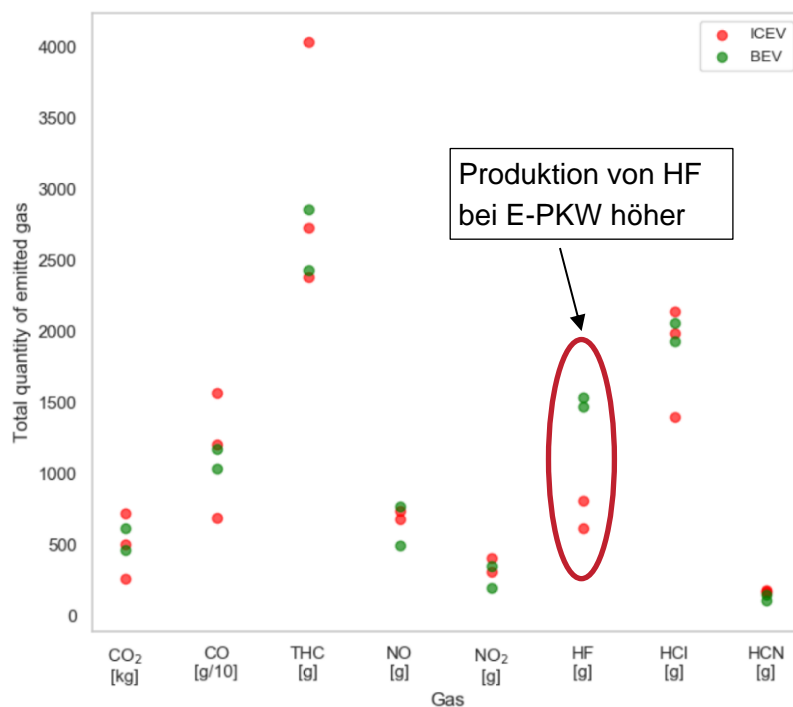


Abbildung 9: Gesamtmasse an freigesetzten Rauchgasbestandteilen aus PKW-Brandversuchen, Daten aus [9] und [17]; Diagramm aus [10]

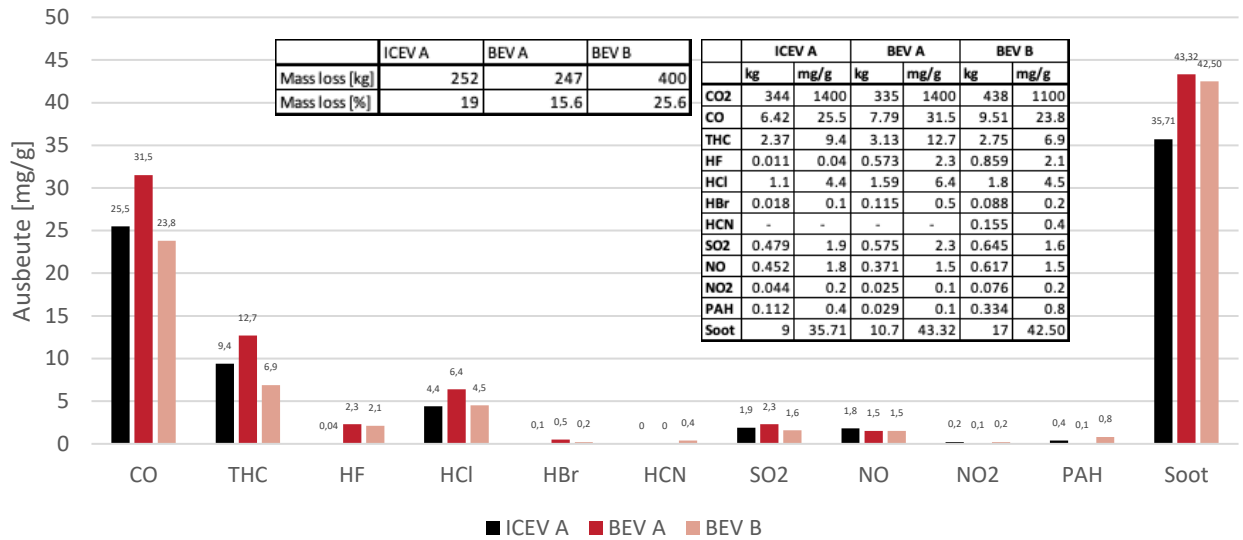


Abbildung 10: Ausbeuten bei Brandversuchen an 3 PKW (1x PKW mit Verbrennungsmotor, 2x E-PKW), bezogen auf den Gesamtmassenverlust, Daten entnommen aus [10]

Abbildung 11 zeigt die Verläufe der Wärmefreisetzung der Brandversuche, sowohl den konvektiven Anteil als auch den Gesamtanteil. Diese sind zur besseren Beurteilung der zeitabhängigen Verläufe der Rauchgasprodukte aus Abbildung 12 dienlich, welche mittels FTIR-Analyse (Fourier-Transformierte-Infrarot-Spektroskopie) sowie diverser Filtertechnik bestimmt wurden. Weitere Details zur angewendeten Messtechnik sind in [10] beschrieben.

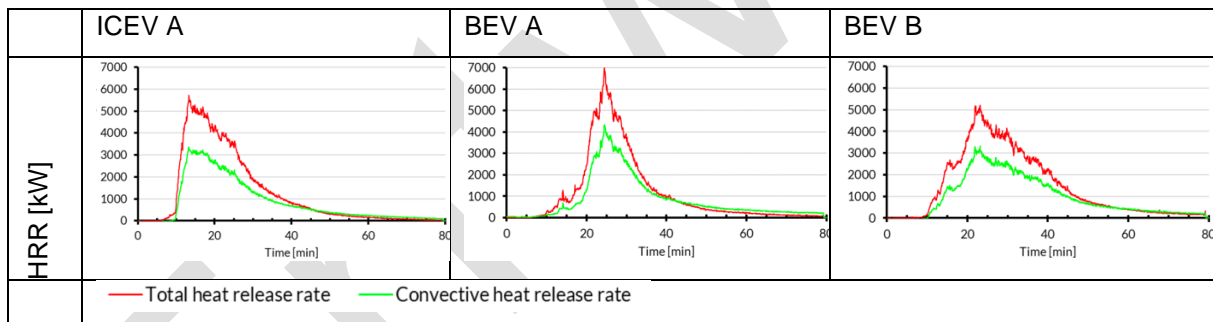
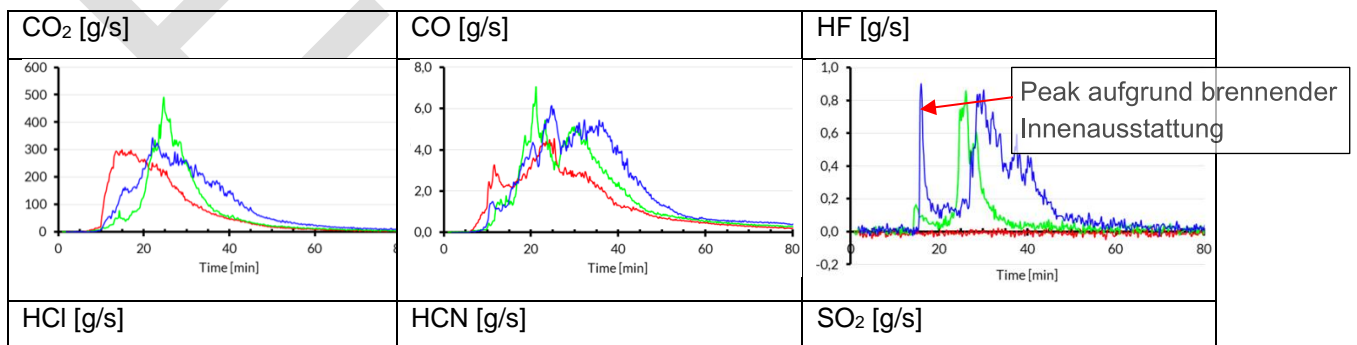


Abbildung 11: Zeitliche Verläufe der Wärmefreisetzungsrate der Versuche aus [10]



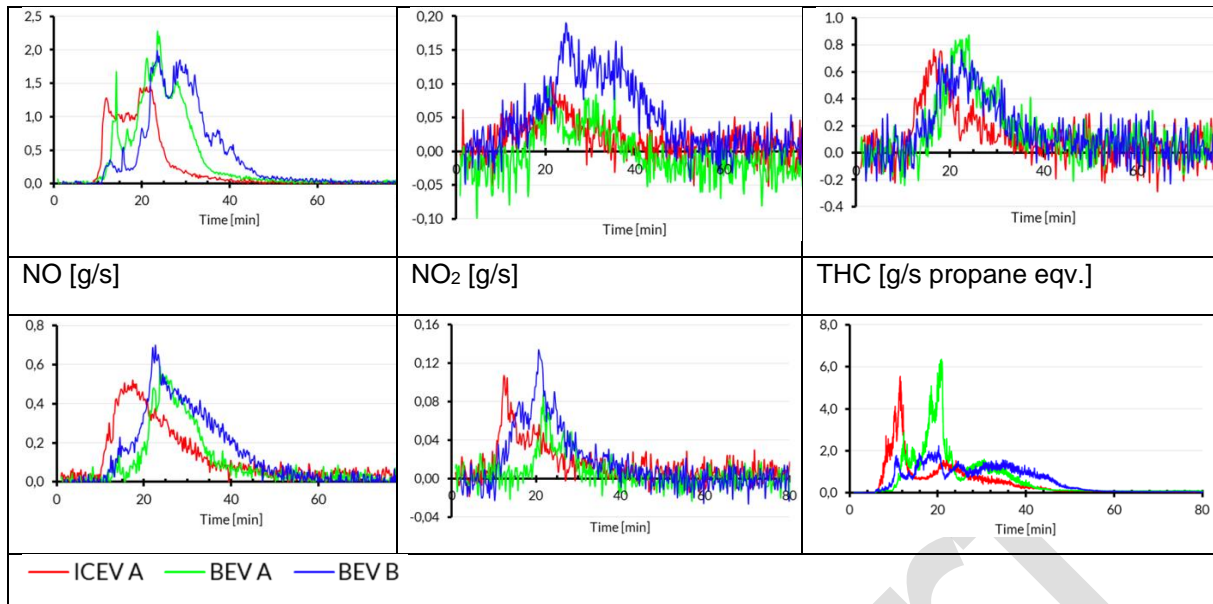


Abbildung 12: Zeitliche Verläufe der gemessenen Rauchgasbestandteile der Versuche aus [10]

Nicht in jeder Auswertung von veröffentlichten Brandversuchen ist die deutlich erhöhte Produktion von Fluorwasserstoffsäure HF so eindeutig unterscheidbar zwischen E-PKW und Verbrenner. So tritt in den Brandversuchen von **TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [18]** ein deutlicher Peak in der Messung sowohl des Verbrenner-Modells als auch des E-PKW auf.

Nach deren Versuchsbeschreibung waren beide PKW augenscheinlich der gleiche Fahrzeugtyp, «Medium class familial car», jeweils vorne am Fahrersitz mit einem 20 kW-Propangasbrenner entzündet. Bei beiden Versuchen lag mit 275 kg bzw. 278.5 kg ein nahezu identischer Massenverlust vor, die max. Wärmefreisetzungsrate sowie die freigesetzte Energie unterschieden sich jedoch (siehe [18] für weitere Details).

In diesem Fall scheint bei Brand der Innenausstattung der untersuchten PKW ebenfalls Fluorwasserstoffsäure HF in signifikanten Umfang zu entstehen, während der später auftretende Batteriebrand ebenfalls erkennbar ist, aber zu einer weniger starken Konzentration im Rauchgas führt.

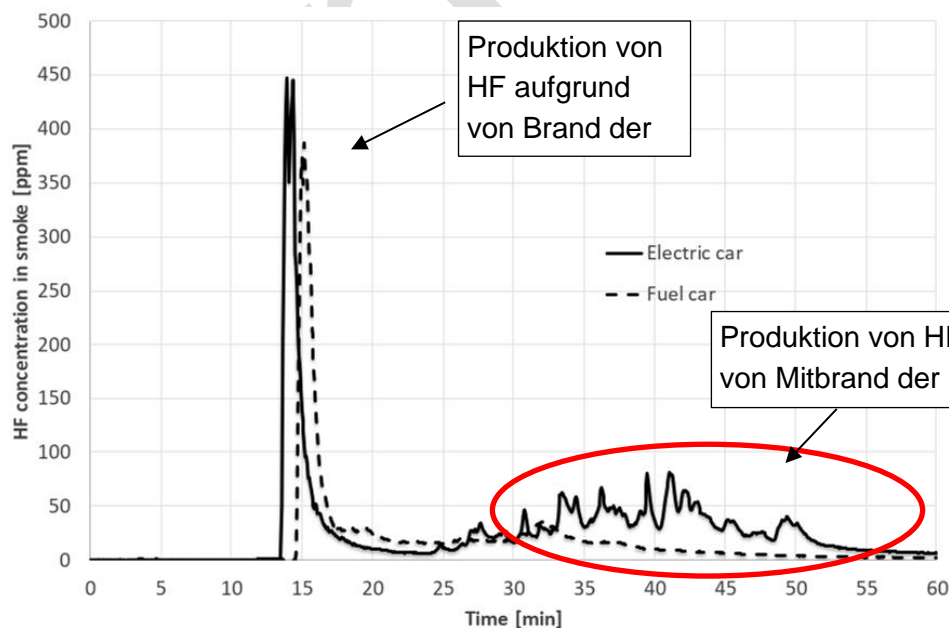


Abbildung 13: Vergleich des Ausstoßes von HF während dem Brand eines E-PKW und eines PKW mit Verbrennungsmotor, Bild aus [18]

Die Berechnung der Emissionen als CO-Äquivalente durch TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET in [18] lässt sich dementsprechend so interpretieren, dass E-PKW und PKW mit Verbrennungsmotor einen vergleichbar gefährlichen Schadstoffausstoß aufweisen, der auch schon nach wenigen Minuten hohe Werte erreicht.

Vorschlag für einen Bemessungsbrand

Auf Basis der Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel lassen sich folgende Kenngrößen für Bemessungsbrände von E-PKW vorschlagen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Kenngrößen für Bemessungsbrände von E-PKW

Kenngröße	Standard	Folgebrand	Thermal Runaway
Max. Brandleistung	5 MW	5 MW	$1.56 * E_{\text{Bat}}^{0.67}$
Brandlast	10'000 MJ	10'000 MJ	$48.5 * E_{\text{Bat}}$
Brandausbreitungsgeschw.	$t_g = 300 \text{ s}$	$t_g = 150 \text{ s}$	$t_g = 75 \text{ s}$
Effektiver Heizwert	20'000 kJ/kg (nach WILLSTRAND ET AL. [10])		
Russausbeute	0.116 kg/kg (stark russende Brandlast)		
CO-Ausbeute	0.1 kg/kg (nach TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [18])		
Hinweise:			
E_{Bat} : Elektrische Batteriekapazität in kWh			

Aufgrund der grossen Unsicherheiten bei den weiteren toxischen Rauchgasbestandteilen und den zugehörigen Stoffausbeuten sollten diese projektspezifisch angesetzt werden. Eine gute Hilfestellung bietet der Bericht von WILLSTRAND ET AL. [10].

Die Bemessungsbrände «Standard» und «Folgebrand» sind aus den Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7 ableitbar. Dabei stellt der «Folgebrand» einen Bemessungsbrand dar, bei dem der PKW bereits durch benachbarte, brennende PKW beeinflusst ist oder ausgelaufener Treibstoff einen Lachenbrand verursacht, welcher direkt den PKW direkt beflammt (vgl. Versuchsgrundlagen Abbildung 7). Durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 1 in die Funktionen, welche in Abschnitt Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. beschrieben sind, erhält man den entsprechenden zeitlichen Verlauf der Brandleistung (siehe Abbildung 14).

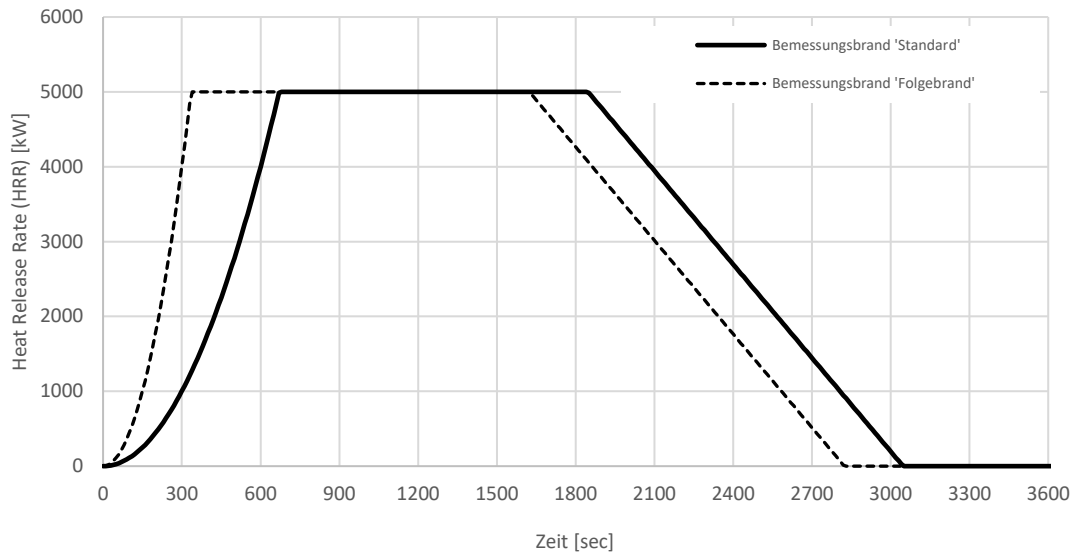


Abbildung 14: Bemessungsbrand «Standard» und «Folgebrand»

Ist ein gleichzeitiger Thermal Runaway einer Vielzahl an Batteriezellen nicht auszuschliessen, ist dieser ebenfalls zu berücksichtigen. Dies kann geschehen, indem zusätzlich zu dem Basis-Bemessungsbrand ein zweiter Bemessungsbrand mit den Parametern aus Tabelle 1, rechte Spalte, erzeugt wird und die resultierende Brandleistung für jeden Zeitschritt auf die des zugrunde gelegten Basis-Bemessungsbrandes addiert wird. Mit diesem Vorgehen erhält man die in Abbildung 15 dargestellten Verläufe, welche die bisher vorhandenen Versuchsergebnisse aus BRAFA 2021 [13] gut abbilden.

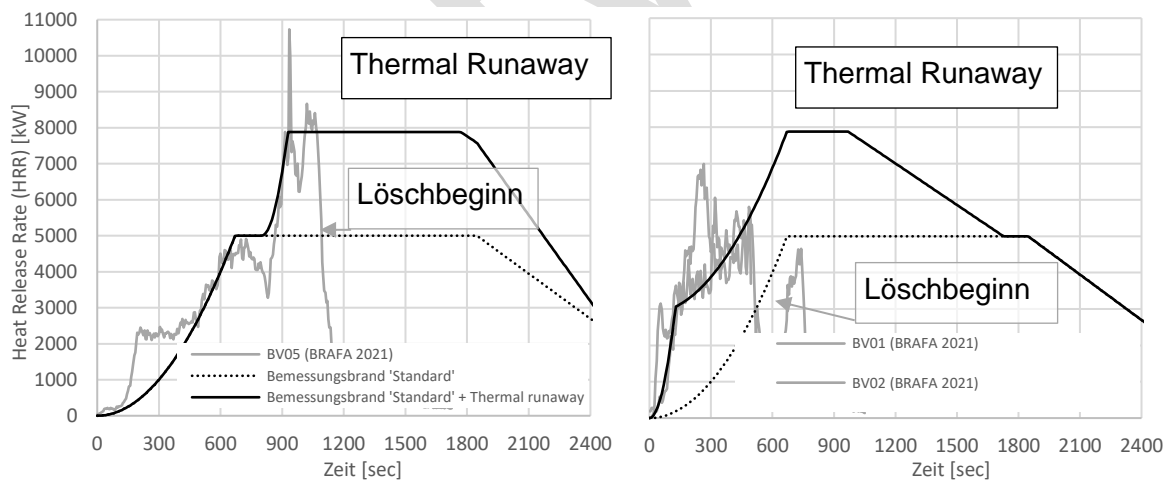


Abbildung 15: Bemessungsbrand «Standard» und zeitschrittweise addierter Teil «Thermal Runaway» im Vergleich