

## Brandszenarien bei E-PKW

### Stand der Wissenschaft

Autoren

Dr.-Ing. Matthias Siemon  
Moritz Rupp, M. Eng.

Die dem vorliegenden Whitepaper zugrunde gelegte Studie wurde im Auftrag Gebäudeversicherung Zürich (GVZ) erstellt. Wir bedanken uns bei der GVZ für die Freigabe, die gewonnenen Erkenntnisse veröffentlichen zu dürfen.



## Einleitung

Die Elektromobilität ist ein aktueller Megatrend, der von vielen Hoffnungen, aber auch neuen Herausforderungen begleitet wird. Auch der Brandschutz bleibt hiervon nicht unberührt. Ganz im Gegenteil, es sind alle Bereiche des vorbeugenden, abwehrenden und organisatorischen Brandschutzes betroffen.

Die Erkenntnisse des vorliegenden Whitepapers wurden im Rahmen einer Gutachtenerstellung erarbeitet, wobei eine konkrete und klar abgegrenzte Fragestellung auf Grundlage einer Literaturstudie beantwortet wurde. Zusammengefasst war die Aufgabe:

*Eine quantitative Beschreibung eines Bemessungsbrandes bei Brand eines E-PKW.*

Dieser Bemessungsbrand wiederum kann als Beurteilungsgrundlage für die Ableitung geeigneter baulicher, anlagentechnischer, abwehrender und/oder organisatorischer Massnahmen dienen.

Wir denken, dass die gewonnenen Erkenntnisse in zusammengefasster Form auch anderen eine Hilfestellung bieten können. Daher bedanken wir uns für die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse veröffentlichen zu dürfen.



## 1 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. [1], BISSCHOP ET AL. [2], KUNKELMANN [3], SUN ET AL. [4]) zu finden.

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.

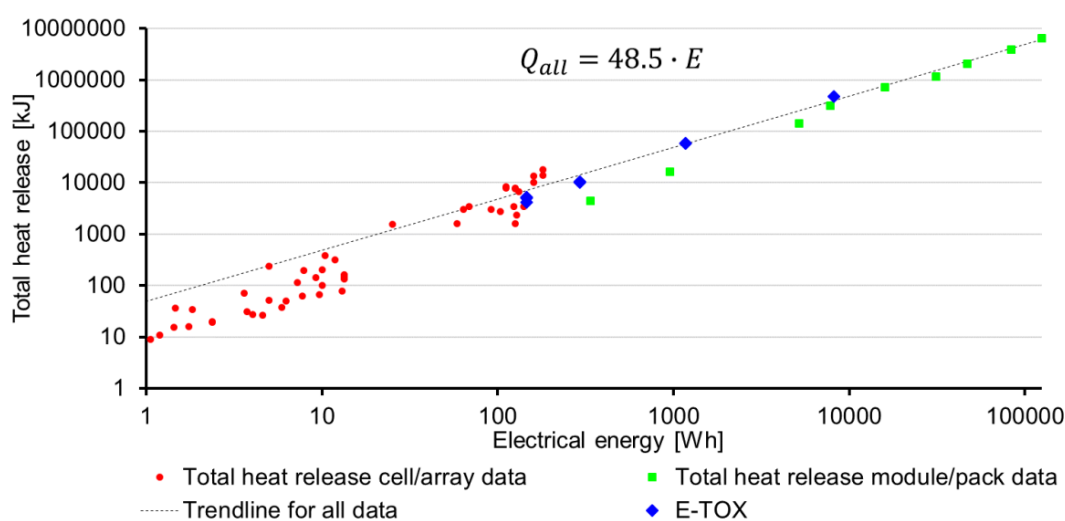


Abbildung 1: Gesamtenergiefreisetzung von Zellen / Modulen und Batterien im Verhältnis zur elektrischen Batteriekapazität, aus [1]

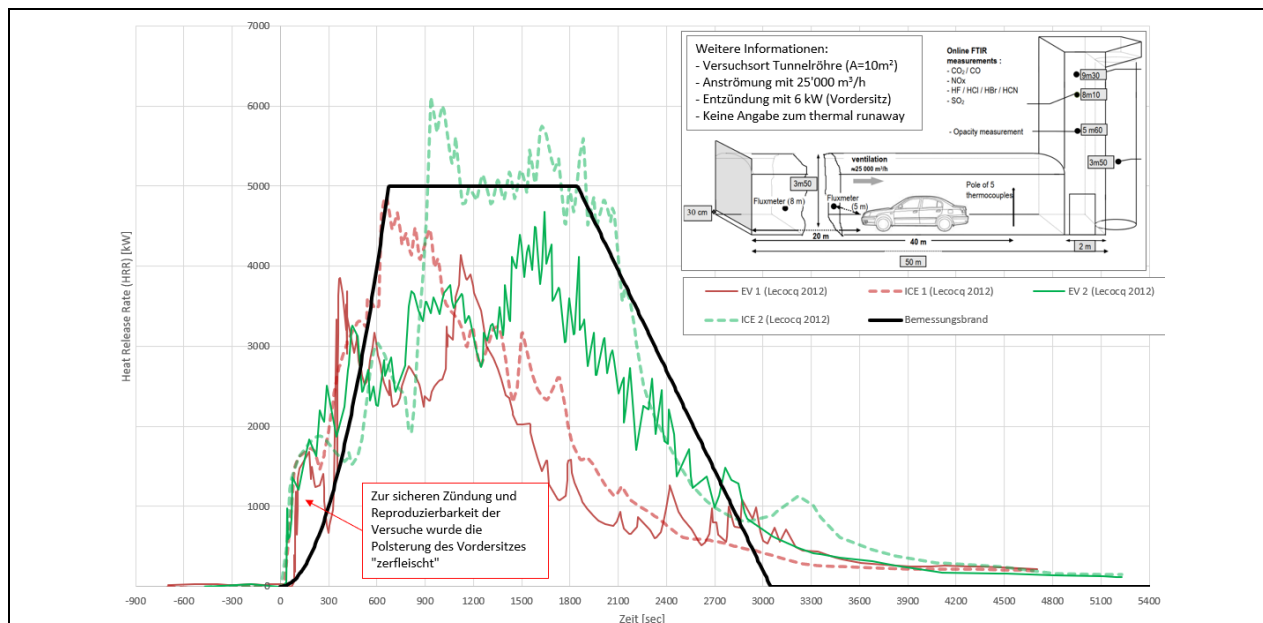
Die Erkenntnisse lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

- Eine grössere Batterie (höhere Masse) führt zu einer Erhöhung der Brandlast
- Eine entladene Batterie setzt im Brandfall signifikant 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 elektrisch gespeicherte Energie (Batteriekapazität bei vollem Ladezustand) freigesetzt.

## 2 Auswertung aktueller Realbrandversuche an E-PKW

In den folgenden Abbildung 2 bis Abbildung 5 sind exemplarisch die Ergebnisse von vier Versuchsreihen ausgewertet, welche die Verläufe der Wärmefreisetzung von E-PKW zeigen. Dabei ist zu beachten, dass die Versuche teilweise grundlegend unterschiedliche Versuchsaufbauten, Zündorte und -quellen sowie Versuchsrandbedingungen aufweisen. Diese sind, kurz zusammengefasst, unter der entsprechenden Grafik beschrieben.

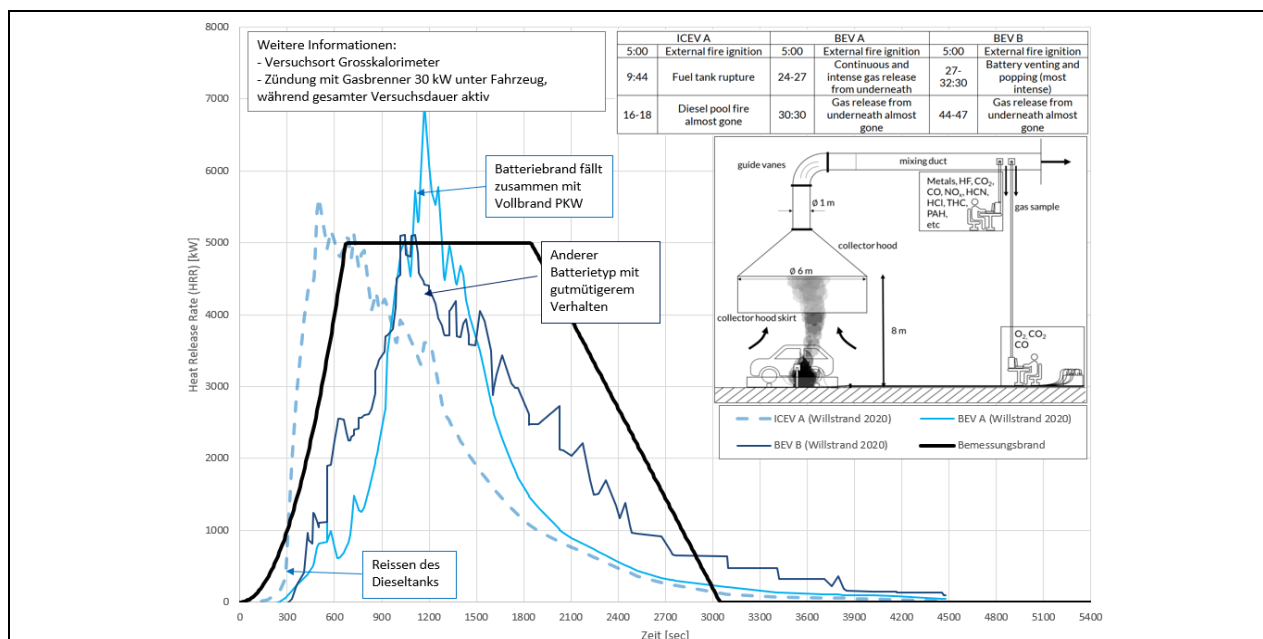
Zur besseren Vergleichbarkeit und dem Verständnis der Ergebnisse wurde ein typischer PKW-Bemessungsbrand nach den Grundlagen des VFDB-LEITFADENS [5] in die Diagramme integriert, wobei folgende Parameter angesetzt wurden: Mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit ( $t_g = 300$  s), max. Wärmefreisetzungsrate 5 MW, Brandlast 10'000 MJ.



**Lecocq et al., 2012 [6]**

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.

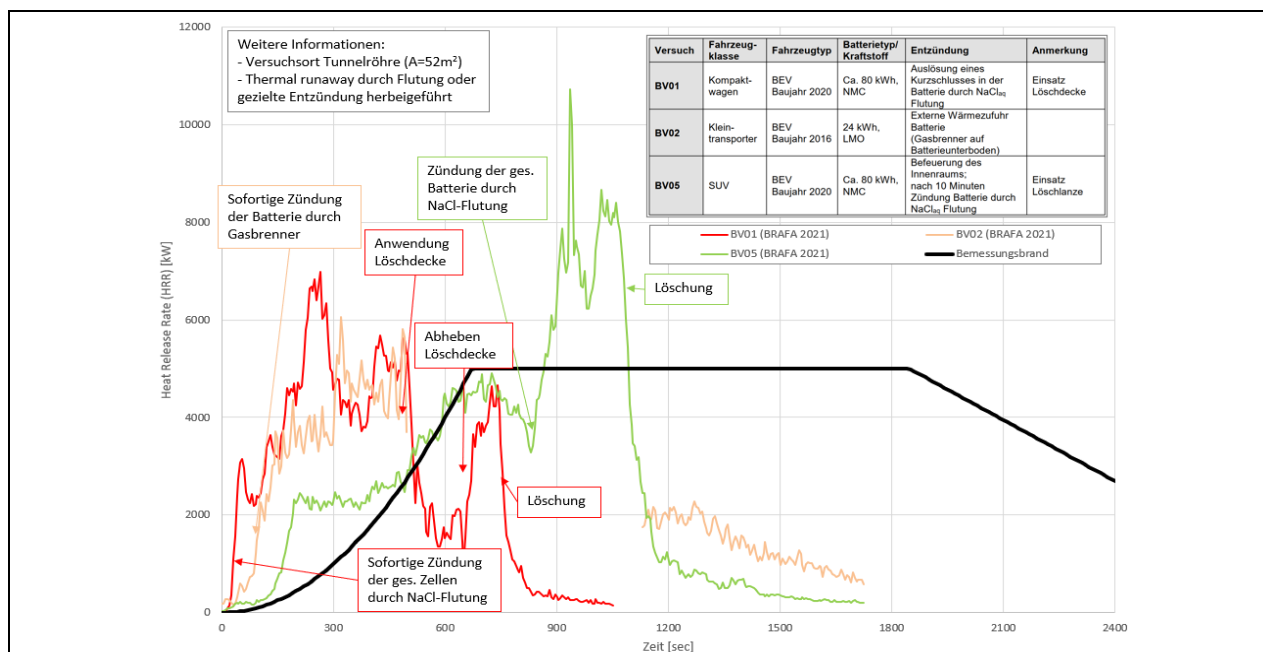
Abbildung 2: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen Lecocq et al. [6]



**Willstrand et al., 2020 [1]**

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

Abbildung 3: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen WILLSTRAND ET AL. [1]



#### BRAFA 2021 [7]

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

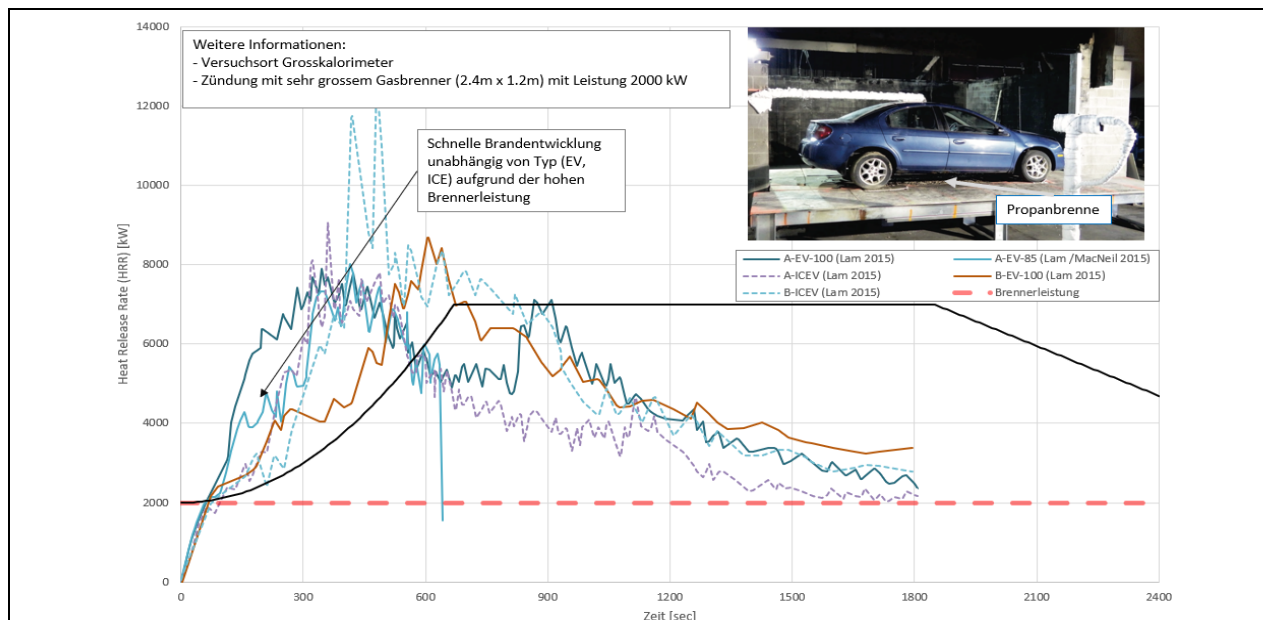
Hinweise:

Zündung 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 4: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen BRAFA 2021 [7]



#### Lam, MacNeil et al., 2015 [8]

Testreihe A, 2 baugleiche E-PKWs, 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 5: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Brandversuchen LAM ET AL. [8]



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 [9] und SCHAUMANN/MEYER [10] 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. [1]) lassen sich auch bei PKW mit Verbrennungsmotor finden (z.B. Versuch B-ICEV, LAM ET AL. [8]).
- 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. [1] oder der 6 kW-Brenner bei LECOCQ ET AL. [6]).
- 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. [8] 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. [1]),
  - 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 [7]),
  - durch versuchstechnische Massnahmen die Reproduzierbarkeit der Versuche erhöht wird, wie das «Zerfleischen» der Sitzpolsterung bei LECOCQ ET AL. [6].
- Ein Thermal Runaway, welcher sehr schnell alle Zellen der Batterie umfasst (siehe die Versuche BRAFA 2021 [7]), 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 [7], wo dieser von aussen erzeugt wurde, in den anderen Versuchsdaten nicht auf.

### 3 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. [1], LÖNNERMARK/BLOMQVIST [11], LECOCQ ET AL. [6], TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [12], LARRSON ET AL. [13], [14], STURK ET AL. [15], MELLERT ET AL. [16], DNV GL AS [17], BERGSTRÖM ET AL. [18], RIBIÈRE ET AL. [19]) entnommen werden.

Exemplarisch sind die Ergebnisse der Auswertung der Rauchgaszusammensetzung aus PKW-Brandversuchen in Abbildung 6 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.

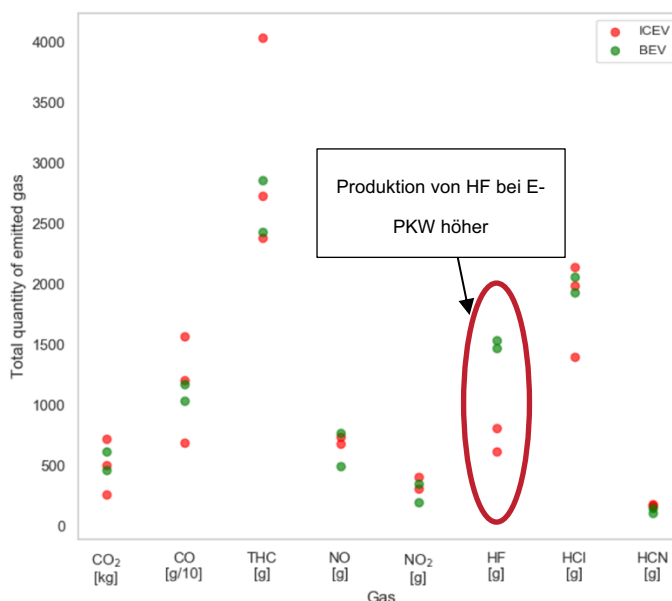


Abbildung 6: Gesamtmasse an freigesetzten Rauchgasbestandteilen aus PKW-Brandversuchen, Daten aus [6] und [11]; Diagramm aus [1]

#### Rauchausbeute:

- Die lichttrübende Wirkung der Rauchgase ist für die ausgewerteten Versuche für den experimentell ermittelten Wert der Russausbeute von 0.05 kg/kg die massgebende Kenngrösse, vor allen sonstigen Leistungskriterien auf Grundlage der Rauchgastoxizität.
  - Basis dieser Aussage ist eine einfache Betrachtung der Freisetzung in ein Kontrollvolumen. Strömungs- und Mischungsverhältnisse sowie die Ausbildung einer Rauchsicht können hierbei nicht berücksichtigt werden.
  - Ohne gegenteiligen Nachweis aus Basis weiterer Untersuchungen ist die Vorgabe der VKF-BSR 27-15 [20] einer stark russenden Brandlast mit üblicher Russausbeute von 11.6 % auch für E-PKW-Brände eine hinreichend konservative Annahme.
- Eine Unterscheidung zwischen Fahrzeug und Batterie ist nach Auswertung der vorliegenden Versuche dann sinnvoll, wenn explizit ein Brand einer vereinzelt Batterie untersucht werden soll.

#### Toxizität:

- Bei Brand von E-PKW konnte in erhöhtem Umfang die Freisetzung von Flusssäure (HF) sowie Metallen (an Russpartikeln angelagert) festgestellt werden (TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [12], WILLSTRAND ET AL. [1]).
  - Bei allen anderen ausgewerteten Kenngrössen konnte in der untersuchten Literatur kein signifikanter Unterschied zu PKW mit Verbrennungsmotor festgestellt werden.
  - Die Grössenordnung und der zeitliche Verlauf der Freisetzung streut sehr stark und hängt vom konkreten PKW, dem Ort der Entzündung sowie dem Brandverlauf ab.
- Ganz allgemein korrelieren die Freisetzungsraten mit der Massenverlustrate bzw. Wärmefreisetzungsrate. Je nach Ort der Entzündung und der konkreten Brandausbreitung kann es zu zeitlich lokalen Spitzen bei einzelnen Stoffen kommen.
- Bereits mit der experimentell bestimmten Russausbeute von 0.05 kg/kg zeigt sich, dass die Auswertung des Extinktionskoeffizienten bei Ansatz typischer Leistungskriterien nach VKF-BSR 27-15 [20] oder VFDB-LEITFADEN [5] massgebend ist. Sowohl die Kriterien der einzelnen Kenngrössen als auch das



kummulierte FED-Kriterium erreichen in der einfachen, auf ein Kontrollvolumen von 1'000 m<sup>3</sup> bezogenen Beurteilung die kritischen Grenzwerte später.

- Für die Beurteilung der Selbstrettung ist die Auswertung des Extinktionskoeffizienten ausreichend.

#### 4 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	$1.56 * (E_{\text{Bat}} * 1000)^{0.67}$ [Erg. in kW]
Brandlast	10'000 MJ	10'000 MJ	$48.5 * E_{\text{Bat}}$ [Ergebnis in MJ]
Brandausbreitungsgeschw.	$t_g = 300$ s	$t_g = 150$ s	$t_g = 75$ s
Effektiver Heizwert	20'000 kJ/kg	(nach WILLSTRAND ET AL. [1])	
Russausbeute	0.116 kg/kg	(stark russende Brandlast)	
CO-Ausbeute	0.1 kg/kg	(nach TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [12])	
Hinweise: $E_{\text{Bat}}$ : 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. [1] und allgemein PURSER/MCALLISTER [21], MULHOLLAND [22].

Die Bemessungsbrände «Standard» und «Folgebrand» sind aus den Abbildung 2, Abbildung 3, Abbildung 4, Abbildung 5 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 den PKW direkt beflammt (vgl. Versuchsgrundlagen Abbildung 5). Durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 1 in die bekannten Funktionen, welche z. B. im VFDB-LEITFADEN [5] und weiterer Literatur ([23], [24]) beschrieben sind, erhält man den entsprechenden zeitlichen Verlauf der Brandleistung (siehe Abbildung 7).

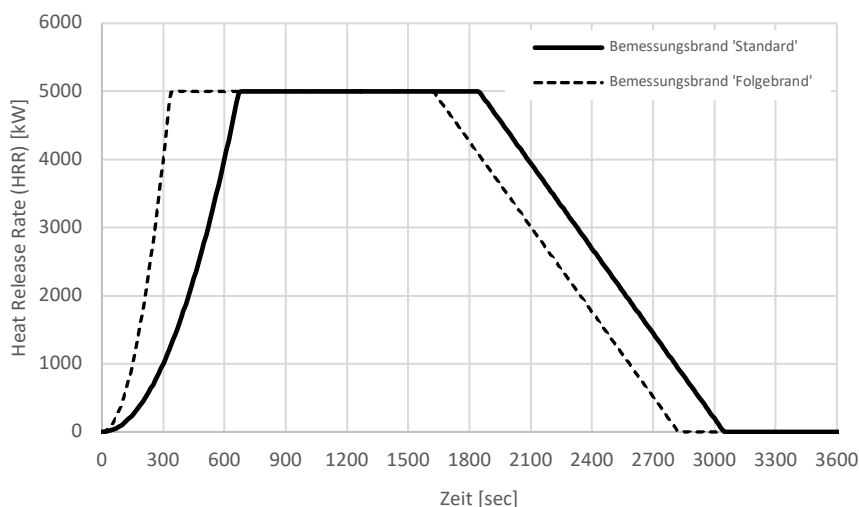


Abbildung 7: Bemessungsbrand «Standard» und «Folgebrand»

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 8 dargestellten Verläufe, welche die bisher vorhandenen Versuchsergebnisse aus BRAFA 2021 [7] gut abbilden.

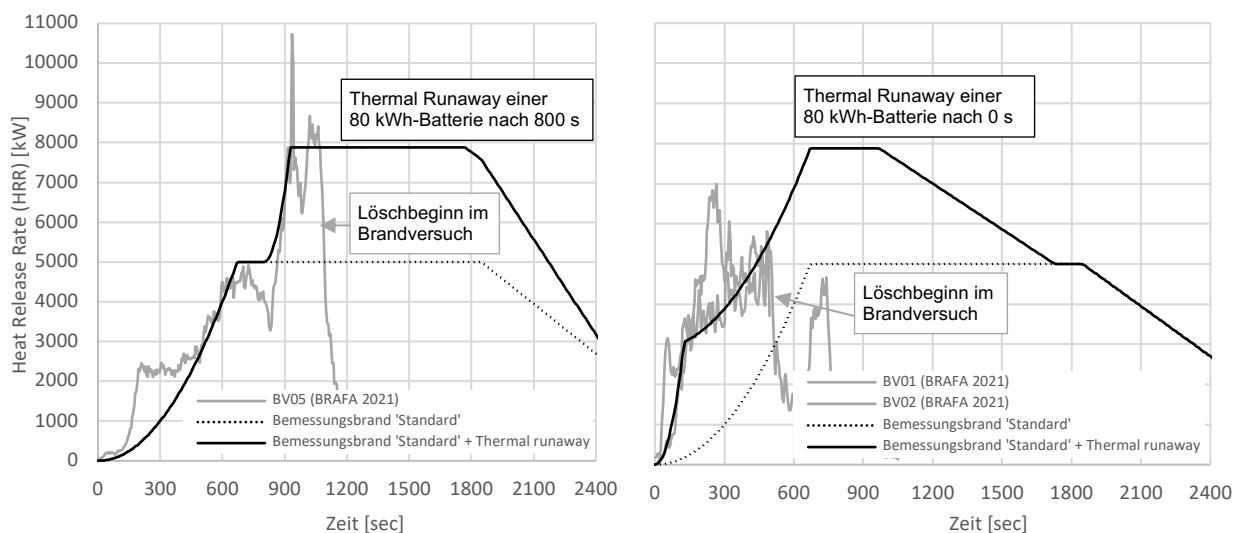


Abbildung 8: Bemessungsbrand «Standard» und zeitschrittweise addierter Teil «Thermal Runaway» im Vergleich mit den Versuchen aus [7]

## 5 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

### Ausbreitungsgeschwindigkeit und max. Brandleistung:

- Für einen vergleichbaren PKW unterscheiden sich die maximale Brandleistung sowie der zeitliche Verlauf der Brandleistung zwischen E-PKW und PKW mit Verbrennungsmotor nur in folgenden Fällen:
  - Gleichzeitiger Thermal Runaway einer Vielzahl der Batteriezellen eines E-PKW.
  - Besondere Ereignisse wie das Reißen des Treibstofftanks bei PKW mit Verbrennungsmotor mit Auslaufen und Entzünden des Treibstoffes unterhalb des PKW.
- Ein Thermal Runaway, bei dem gleichzeitig eine Vielzahl der Batteriezellen betroffen waren, trat in den meisten der ausgewerteten Brandversuchen nicht auf. Davon ausgenommen sind die Brandversuche aus [7] bei denen dieser gezielt ausgelöst wurde.
- Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass Brände von E-PKW je nach konkreter, nachzuweisender Situation mit typischen Brandausbreitungsgeschwindigkeit  $t_g = 300$  s bzw.  $t_g = 150$  s, z.B. Folgebrände ansetzbar sind. Die entsprechenden Varianten können der Tabelle 1 entnommen werden.

### Rauchausbeute:

- Die lichttrübende Wirkung der Rauchgase ist für die ausgewerteten Versuche für den experimentell ermittelten Wert der Russausbeute von 0.05 kg/kg die massgebende Kenngrösse, vor allen sonstigen Leistungskriterien auf Grundlage der Rauchgastoxizität.





- Basis dieser Aussage ist eine einfache Betrachtung der Freisetzung in ein Kontrollvolumen. Strömungs- und Mischungsverhältnisse sowie die Ausbildung einer Rauchschiicht können hierbei nicht berücksichtigt werden.
- Ohne gegenteiligen Nachweis aus Basis weiterer Untersuchungen ist die Vorgabe der VKF-BSR 27-15 [20] einer stark russenden Brandlast mit üblicher Russausbeute (z. B. 11.6 %) auch für E-PKW-Brände eine hinreichend konservative Annahme.
- Eine Unterscheidung zwischen Fahrzeug und Batterie ist nach Auswertung der vorliegenden Versuche dann sinnvoll, wenn explizit ein Brand einer vereinzelt Batterie untersucht werden soll.

#### **Toxizität:**

- Bei Brand von E-PKW konnte in erhöhtem Umfang die Freisetzung von Flusssäure (HF) sowie Metalle (an Russpartikeln angelagert) festgestellt werden (TRUCHOT, FOUILLEN, COLLET [12], WILLSTRAND ET AL. [1]).
  - Bei allen anderen ausgewerteten Kenngrößen kann kein signifikanter Unterschied zu PKW mit Verbrennungsmotor festgestellt werden.
  - Die Größenordnung und der zeitliche Verlauf der Freisetzung streut sehr stark und hängt vom konkreten PKW, dem Ort der Entzündung sowie dem Brandverlauf ab.
- Ganz allgemein korrelieren die Freisetzungsraten mit der Massenverlustrate bzw. Wärmefreisetzungsraten. Je nach Ort der Entzündung konkreter Brandausbreitung kann es zu zeitlich lokalen Spitzen bei einzelnen Stoffen kommen.
- Bereits mit der experimentell bestimmten Russausbeute von 0.05 kg/kg zeigt sich, dass die Auswertung des Extinktionskoeffizienten massgebend ist. Sowohl die Kriterien der einzelnen Kenngrößen als auch das kumulierte FED-Kriterium erreichen in der einfachen, auf ein Kontrollvolumen von 1'000 m<sup>3</sup> bezogenen Beurteilung die kritischen Grenzwerte später.

#### **Ausblick und offene Fragen**

- Die Annahme einer stark russenden Brandlast sowie der Nachweis auf Basis der lichttrübenden Wirkung der Rauchgase als massgebendes Leistungskriterium sollte unter Berücksichtigung der realen Strömungs- und Mischungsverhältnisse validiert werden, z.B. durch Brandsimulationen.
- Ein spontaner Thermal Runaway einer Vielzahl von Batteriezellen trat in den ausgewerteten Brandversuchen nicht auf. Auswertungen von Schadensfällen (siehe z.B. [1], [4], [26], [25]) weisen allerdings einzelne Fälle aus, in denen ein solcher auftrat, auch ohne vorherige Brandeinwirkung.
  - Für eine Beurteilung ist zu prüfen, inwieweit Häufigkeiten und Auswirkungen dieser Ereignisse das allgemein akzeptierte Sicherheitsniveau gefährden.
  - Inwieweit solche Ereignisse nachweisbar in bestimmten Situationen auftreten (z. B. im Fall der Ladung der Batterie).
  - Ob geeignete Massnahmen für bestimmte Situationen sinnvoll sind.
- Über den Nachweis der Selbstrettung hinaus ist zu prüfen, ob die bestehende Schutzausrüstung der Einsatzkräfte einen hinreichenden Schutz gegenüber den höheren HF-Expositionen gewährleistet.



## Literatur

- [1] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple und J. Anderson, „Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles, RISE Report 2020:90,“ RISE Research Institutes of Sweden AB , Borås, 2020.
- [2] R. Bisschop, O. Willstrand, F. Amon und M. Rosengren, „Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Report 2019:50,“ RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, 2019.
- [3] J. Kunkelmann, „Forschungsbericht 175: Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen,“ KIT, Forschungsstelle für Brandschutz, Karlsruhe, 2015 (überarb. 2016).
- [4] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu und X. Huang, „A Review of Battery Fires in Electric Vehicles,“ Fire technology, 2020.
- [5] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 4. Aufl., J. Zehfuß, Hrsg., Münster, Braunschweig: vfdb, 2020.
- [6] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot und G. Marlair, „Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,“ in 2. International Conference on Fire In Vehicles - FIVE 2012, Chicago, United States, 2012.
- [7] P.-J. Sturm, P. Föbtleitner, D. Fruhwirt, S. Heindl, B. Kohl, O. Heger und et.al, „BRAFA Brandauswirkung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen,“ Wien, 2021.
- [8] C. Lam, D. MacNeil, R. Kroeker, G. Lougheed und G. Lalime, „Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles,“ in 4. International Conference on Fire in Vehicles, Baltimore, United States, 2016.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt (Hrsg.), „Untersuchung zur Tragsicherheit offener Parkgaragen in Stahl- und Verbundbauweise unter Brandeinwirkungen von E-Fahrzeugen und kraftstoffbetriebenen Fahrzeugen,“ Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Düsseldorf, 2021.
- [10] P. Schaumann und P. Meyer, „Brandrisikoanalyse von oberirdischen Parkgaragen unter Berücksichtigung der E-Mobilität,“ in Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2020. Heft 239, Braunschweig, 2020.
- [11] A. Lönnemark und P. Blomqvist, „Emissions from an automobile fire,“ Chemosphere 62, pp. 1043-1056, 2006.
- [12] B. Truchot, F. Fouillen und S. Collet, „An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fire,“ Fire Safety Journal, Nr. 97, pp. 111-118, 2018.
- [13] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén und B.-E. Mellander, „Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests,“ Journal of Power Sources, Nr. 271, pp. 414-420, 2014.
- [14] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist und B.-E. Mellander, „Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires,“ Scientific Reports, Nr. 7:10018, pp. 1-13, 2017.
- [15] D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist und A. Ahlberg Tidblad, „Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber,“ batteries, Bd. 5, Nr. 61, pp. 1-17, 2019.
- [16] L. D. Mellert, U. Welte, M. K. Michael Hermann, X. Ponticq, M. tesson und B. Jürgen, „Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände,“ Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Schweiz, 2016.
- [17] DNV GL AS Maritime, „Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression,“ Norwegen, 2019.
- [18] U. Bergström, Å. Gustafsson, L. Hägglund, C. Lejon, D. Sturk und T. Tengell, „Vented Gases and Aerosol of Automotive Li-ion LFP and NMC Batteries in Humified Nitrogen under Thermal Load,“ Sweden, 2015.



- [19] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruellea und G. Marlair, „Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calometry,“ *Energy Environ, Sci.*, Nr. 5, pp. 5271-5280, 2012.
- [20] VKF-Brandschutzrichtlinie 27-15de «Nachweisverfahren im Brandschutz», 01.01.2015, Stand 22.03.2017
- [21] D. A. Purser und J. L. McAllister, „Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5. Edit. Hrsg., M. J. Hurley, Hrsg., New York Heidelberg Dordrecht London, Springer, 2016, p. 2308–2422.
- [22] G. W. Mulholland, „Smoke Production and Properties,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 4. Hrsg., Quincy, Ma, United States, National Fire Protection Association, 2008, pp. 2-291 – 2-302.
- [23] P. Frey, Basellandschaftliche Gebäudeversicherung (BGV, Hrsg.), *Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden*, Basel: Schwabe Verlag, 2019.
- [24] M. J. Hurley, Hrsg., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, 2016.
- [25] A. W. Brandt und K. Glansberg, „Charging of electric cars in parking garages. Report 2020:30,“ RISE Research Institutes of Sweden AB, Trondheim, Norway, 2020.
- [26] A. Dorsz und M. Lewandowski, „Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures,“ *Energies* 2022, 15, 21 12 2021.

## **Anschrift und Kontakt**

### **Basel**

Kasburg Siemon Ingenieure KIG  
Rüchligweg 101  
CH-4125 Riehen, Basel-Stadt  
[www.ksi-brandschutz.ch](http://www.ksi-brandschutz.ch)

### **Zürich**

Kasburg Siemon Ingenieure KIG  
Konradstrasse 61  
CH-8005 Zürich  
[www.ksi-brandschutz.ch](http://www.ksi-brandschutz.ch)