

# Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen bei zunehmender E-Mobilität – Erkenntnisse aus Brandversuchen, Nachweiskonzept für Brandbekämpfungsanlagen in Parkgaragen

Die aktuell politisch geförderte Elektromobilität verändert nicht nur den Verkehr als solchen, sondern hat auch Auswirkungen auf den Brandschutz in Garagen. Bereits der seit Jahren andauernde Trend zu immer größeren und aufwändiger ausgestatteten Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb hat zu einer deutlich gestiegenen Brandleistung pro Pkw geführt. Bei Elektrofahrzeugen muss zusätzlich das Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien beachtet werden. Deren Brände laufen mitunter sehr schnell und heftig ab, so dass der Brand eines einzelnen Elektrofahrzeugs leicht zur Entzündung benachbarter Fahrzeuge führen kann. Deshalb wurde im Forschungsprojekt SUVEREN erforscht, wie der Abbrand solcher Batterien abläuft und welche Konsequenzen dies für den Brandschutz in Garagen auslöst. Im Folgenden werden eine Versuchsanordnung und ein Nachweiskonzept vorgestellt, mit denen die Wirksamkeit einer Brandbekämpfungsanlage in einer Parkgarage unter der Annahme eines von der Batterie ausgelösten Vollbrands nachgewiesen werden kann. Dabei kam eine Ersatzbrandlast zum Einsatz, die aus getrennten Ersatzbrennstoffen für die Traktionsbatterie und das Fahrzeug bestand. Der gewählte SUVEREN-Bemessungsbrand berücksichtigt sowohl Brände von elektrischen als auch konventionell angetriebenen Fahrzeugen.

## 1 Hintergrund

Um die international verabschiedeten Klimaziele im Verkehrssektor zu erreichen, müssen in Deutschland im Vergleich zu 1990 die verkehrsbedingten Emissionen bis 2030 um knapp 42 % sinken. Dazu hat die Bundesregierung ein Paket aus mehr Elektromobilität, Rad- und Bahnverkehr, alternativen Kraftstoffen und CO<sub>2</sub>-(Kohlendioxid-)Bepreisung beschlossen. Der Umstieg auf Elektromobilität wird mit dem Ziel gefördert, dass bis 2030 sieben bis zehn Mio. Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sind [1]. Dazu passend sollen bis 2030 eine Mio. Ladepunkte für Elektromobilität errichtet werden.

Vor diesem Hintergrund untersuchte das Forschungsprojekt SUVEREN – „Sicherheit in unterirdischen städtischen Verkehrsbereichen bei Einsatz neuer Energieträger“ die ge-

## Fire Protection in Underground Transportation Systems with Increasing E-Mobility – Findings from Fire Tests, Performance Evaluation for Firefighting Systems in Parking Garages

The current politically promoted electromobility is not only changing transport in itself, but also has an impact on fire protection in garages. The trend towards ever larger and more elaborately equipped vehicles with conventional drives, which has been going on for years, has already led to a significant increase in combustible mass per passenger car. In the case of electric vehicles, the fire behaviour of lithium-ion batteries must also be taken into account. Their fires have the potential to occur very quickly and violently, so that the burning of a single electric vehicle can easily lead to the ignition of other vehicles. Therefore, the SUVEREN research project investigated how the burning of such batteries takes place and what consequences this has for fire protection in garages. This paper presents a test set-up and a verification concept that can be used to demonstrate the effectiveness of a fire-fighting system in a parking garage under the assumption of a full fire triggered by the battery. A substitute fire load was used, which consisted of separate surrogate combustibles for the traction battery and the vehicle. The chosen SUVEREN design fire takes into account fires from both electric and conventionally powered vehicles.

änderten Gefahren beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien, Biodiesel, Ethanol und Gas (LPG, CNG, H<sub>2</sub>) in räumlich abgeschlossenen und daher besonders kritischen Verkehrsbereichen. SUVEREN wurde im Rahmen der Forschung für zivile Sicherheit über eine Laufzeit von dreieinhalb Jahren (Juni 2017 bis Dezember 2020) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Der inhaltliche Forschungsschwerpunkt des Projekts lag auf den Auswirkungen der Elektromobilität in unterirdischen Verkehrsanlagen, insbesondere

dem Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien und Untersuchungen zur Brandbekämpfung in Parkgaragen.

Das Löschen eines einzelnen brennenden Pkw auf freier Strecke ist für die Feuerwehr tägliche Routine. Tritt ein Brand jedoch in einer Parkgarage auf, erschweren die baulichen Gegebenheiten den Einsatz der Feuerwehr. Wenn Pkw dicht an dicht geparkt sind, ist eine Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge wahrscheinlich. Im Extremfall können daraus Großbrände entstehen, die für die Feuerwehr nicht mehr zu kontrollieren sind [2, 3]. Zur Reduzierung des Schadensausmaßes können bauliche und/oder anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen zum Einsatz kommen.

Bei der Beurteilung von Brandschutzmaßnahmen wird ein Pkw-Brand anhand von Bemessungsbränden angesetzt. Im Rahmen von SUVEREN wurde ein Bemessungsbrand für einen modernen Pkw unter Berücksichtigung von elektrischen und konventionellen Antrieben erarbeitet [4, 5]. Dieser Bemessungsbrand berücksichtigt eine schnelle Brandausbreitung aufgrund eines von der Traktionsbatterie ausgehenden Brandszenarios mit anschließendem thermischen Durchgehen der Batterie. Die maximale Wärmefreisetzung (HRR – Heat Release Rate) beträgt 7 MW und entspricht damit auch der Brandleistung eines konventionell angetriebenen Fahrzeugs mit Benzin oder Dieseltank.

**2 Brandversuche**

Im Projekt SUVEREN wurde die Wirksamkeit von Brandbekämpfungsanlagen beim Brand eines Elektro-Pkw in einer Garage im Rahmen von Brandversuchen im Realmaßstab untersucht. Als Alternative zum Einsatz echter Fahrzeuge kamen Ersatzbrandlasten zum Einsatz, die aus Brennstoffen mit bekanntem Abbrandverhalten bestanden. Durch geeignete Wahl

von Menge und Anordnung der Brennstoffe ist es möglich, die relevanten Brandeigenschaften eines Pkw mit Elektroantrieb nachzubilden. Zudem ermöglicht der Einsatz von Ersatzbrandlasten Versuchsdurchführungen unter definierten Testbedingungen und damit besser reproduzierbare Ergebnisse.

Die Brandversuche wurden mit einer Ersatzbrandlast auf der Grundlage des Bemessungsbrands aus SUVEREN [3, 4] sowie externer Forschungsberichte [6, 7] dimensioniert. Die maximale Versuchsdauer bis zum Abbruch der Versuche durch Ablöschen betrug 30 Minuten, da angenommen werden kann, dass ab diesem Zeitpunkt die Feuerwehr die Löscharbeiten in einer Garage übernommen hat.

**2.1 Ersatzbrandlast Elektro-Pkw**

Die verwendete Ersatzbrandlast setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, die die Anteile für die Batterie und das Fahrzeug getrennt abbilden und in Summe der Vorgabe des Bemessungsbrandes entsprechen. Das unterschiedliche

|                | EBL A – Langsamer Brandverlauf      | EBL B – Schneller Brandverlauf        |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Versuchsbasis  | Prismatische Batterie <sup>1)</sup> | Batterie mit Rundzellen <sup>2)</sup> |
| Reaktionsdauer | 30 Minuten                          | 10 Minuten                            |
| Maximale HRR   | 660 kW                              | 3.200 kW                              |

<sup>1)</sup> Batterieversuche vorgestellt in [5]

<sup>2)</sup> Batterieversuche mit Rundzellen aus SUVEREN mit Sicherheitsaufschlag 2,0

**Tabelle 1** Übersicht der Parameter verwendeter Ersatzbrandlasten  
*Overview of the parameters of used replacement fire loads*

**Bild 1** Versuchshalle mit der Fahrzeugatruppe während der Platzierung der Brennstoffe für die Ersatzbrandlast  
*Testing hall with the dummy vehicle during the placement of the fuels for the replacement fire load*



Brandverhalten von Batterie und Fahrzeug wird durch spezifische Brennstoffe berücksichtigt.

N-Heptan weist eine hohe und reproduzierbare Abbrandgeschwindigkeit auf und ist geeignet, die schnelle und heftige Reaktion von Batterien nachzubilden. Die maximale Wärmefreisetzung wird bei einem Poolbrand durch die Größe der Oberfläche der Brandwannen bestimmt. Die Dauer der Reaktionen wird durch die Menge des n-Heptans bestimmt. Analytisch wurden diese Parameter nach den Berechnungsverfahren aus [7] ermittelt.

Die Versuche berücksichtigten zwei verschiedene Batteriekombinationen mit unterschiedlichen Brandverläufen und Wärmefreisetzungsraten durch entsprechende Ersatzbrandlasten EBL A und EBL B (**Tabelle 1**).

Im Sinne einer konservativen Betrachtung und auch um größere Traktionsbatterien als in den Vorversuchen getestet zu berücksichtigen, wurde die maximale Wärmefreisetzung bei EBL B gegenüber im Brandversuch gemessenen Ergebnissen verdoppelt.

Die Brandlast des Fahrzeugs wird durch gestapelte standardisierte Europaletten aus Holz nachgebildet. Mit diesen kann das Brandverhalten der überwiegend festen Brennstoffe im Fahrzeug wie Reifen, Sitzpolster oder Verkleidungen in guter Näherung abgebildet werden. Die unterstellte Wärmefreisetzung je Holzpalette basiert auf Analysen von RISE und VTT zum Brandverhalten von Holzpaletten [9, 10]. Über die Anzahl an Paletten pro Versuch konnte so die maximale Wärmefreisetzung der verwendeten EBL definiert werden. Bei den Versuchen mit der EBL A wurden 33 Paletten im Brandversuch verwendet, um zusammen mit den 660 kW der Brandwanne eine Wärmefreisetzung von 7 MW zu erzielen. Mit dieser Ersatzbrandlast wird sowohl der Brand eines konventionellen Fahrzeugs abgedeckt als auch das teilweise sehr heftige Brandverhalten der Batterie von Elektrofahrzeugen berücksichtigt.

## 2.2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einer Halle (Innenmaße 9,60 x 14,60 m) mit einer Raumhöhe von 3,28 m durchgeführt. Am Übergang zwischen Halleninnenwänden und -decke befand sich ein 1,0 m breiter Spalt, durch den die Brandgase frei nach oben abströmen und abgesaugt werden konnten, so dass ein Raum ohne Flächenbegrenzung simuliert wurde (**Bild 1**). Eine geöffnete Tür des Versuchsgebäudes (ca. 2 m<sup>2</sup>) diente als ausreichend dimensionierte Ventilationsöffnung, um einen brandlastgesteuerten Brand zu gewährleisten.

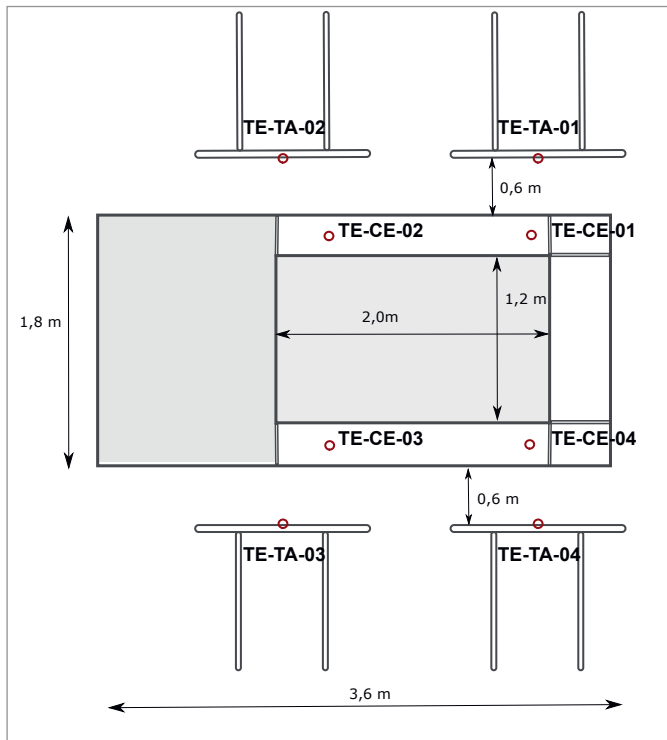
Basierend auf experimentellen und theoretischen Voruntersuchungen wurde in Anlehnung an vergleichbare Anwendungen der International Maritime Organization (IMO) in [11] eine Fahrzeugatrappe (3,60 m lang, 1,80 m breit und 1,75 m hoch) aus Stahlblechen entwickelt, die für die Brandbekämpfungsanlage realistisch erschwerend als Sprühschutz wirkt (**Bild 2** und **Bild 3**).

Um die Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung zu ermitteln, wurden seitlich der Fahrzeugatrappe vier Sperrholzplatten (1,20 m breit, 1,75 m hoch und 6,5 mm dick) als Zielbrandlasten in einem Abstand von 60 cm positioniert. Diese Zielbrandlasten repräsentierten benachbarte Fahrzeuge (**Bild 2**). Durch die Bewertung der Oberflächentemperaturen und eingetretener Schäden nach der Versuchsdurchführung wird die kombinierte Wirkung der Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion und Wärmestrahlung auf die Entzündung und damit Brandausbreitung messbar.

Zur Dokumentation des Versuchsverlaufs wurden an charakteristischen Positionen im Versuchsstand die auftretenden Temperaturen gemessen. Dabei wurden Typ K-Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1 cm verwendet sowie vier Thermoelemente 10 cm unterhalb der Decke und je ein Element an jeder Zielbrandlast angebracht. Die Positionen der Thermoelemente sowie die Anordnung von Fahr-



**Bild 2** Fahrzeugatrappe mit Zielbrandlasten kurz nach der Zündung  
*Dummy vehicle with target fire loads shortly after ignition*



**Bild 3** Abmessungen der Fahrzeugatrappe, Position der Zielbrandlasten und Thermoelemente im Grundriss  
 Dimensions of the dummy vehicle, position of the target fire loads and thermocouples in the floor plan

zeugatrappe und Zielbrandlasten ist schematisch in **Bild 3** dargestellt.

### 2.3 Durchführung

Alle Versuche wurden durch Entzünden der jeweiligen Batterie-Ersatzbrandlast EBL A oder EBL B gestartet. Es kamen die in **Tabelle 2** aufgeführten Brandbekämpfungssysteme zum Einsatz.

In allen Versuchen wurden vier Sprühköpfe mit gleichem Abstand zueinander eingesetzt. Die Düsen in den Versuchen mit Hochdruck-Wassernebel (BBA\_01 und BBA\_02) waren baugleich, wobei die Brandbekämpfung manuell nach 1 Minute oder temperaturgesteuert gestartet wurde. Im dritten System wurden Sprinkler statt der Wassernebeldüsen eingesetzt.

In der Halle wurde während der Versuchsdurchführung die Sauerstoffkonzentration gemessen. Diese lag zu jedem Zeitpunkt über 15 Vol.-%, so dass eine beobachtete brandreduzierende Wirkung eindeutig auf die Brandbekämpfungsanlage zurückzuführen ist.

### 2.4 Versuchsergebnisse

In **Bild 4** sind die Temperaturverläufe der Batteriesysteme EBL A (langsam) und EBL B (schnell) bei Verwendung eines automatisch auslösenden Hochdruckwassernebelsystems BBA\_02 gegenübergestellt. Unmittelbar nach Entzündung des n-Heptan (Batteriebrandlast) war in beiden Fällen ein Anstieg der Temperaturen unter der Decke zu verzeichnen. Dieser fiel bei der schnell reagierenden Batterie (EBL B) stärker aus und hatte

daher einen etwas früheren Eingriff der automatisch auslösenden Brandbekämpfungsanlage bereits nach 35 Sekunden zur Folge. Im Versuch mit der langsamer reagierenden Batterie EBL A zeigten sich in den ersten 15 Minuten des Brands geringfügig höhere maximale Temperaturen unter der Decke, die jedoch im gesamten Brandverlauf 250 °C nicht überschritten. Ab der 15. Minute wurden bei der schneller reagierenden Batterie EBL B an zwei Thermoelementen (TE-CE-03, TE-CE-04) Temperaturen über 300 °C gemessen, was bei einem Realbrand auf eine weiter fortgeschrittene Ausbreitung des Brands auf das Fahrzeug zurückzuführen wäre.

Zwischen Minute 15 und 28 kommt es zum Brand aller Holzpaletten, weil deren Entzündung, trotz aktiver Brandbekämpfung, durch die Abschirmung der Fahrzeugatrappe begünstigt wird.

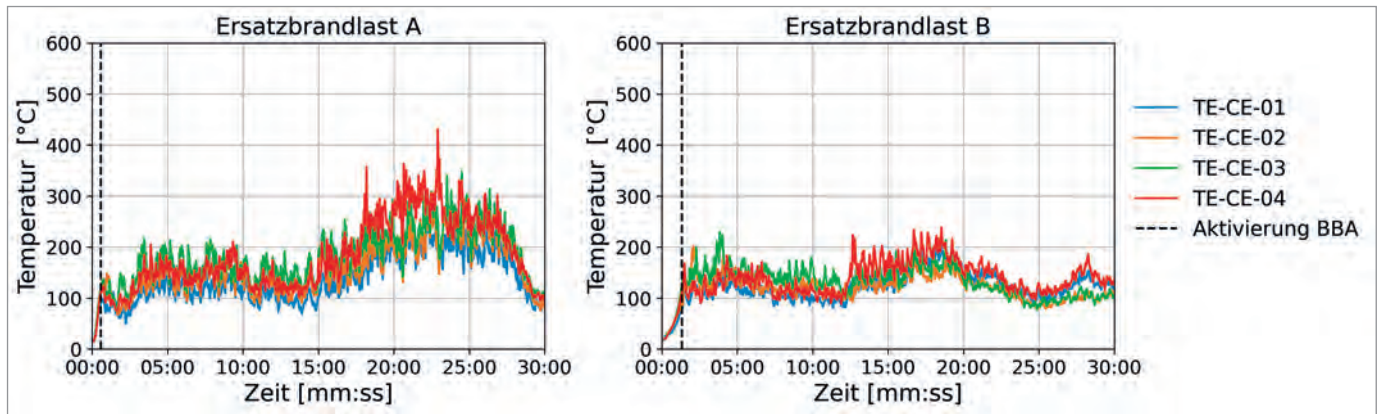
In **Bild 5** sind die Temperaturen unter der Decke bei Versuchen mit EBL B und drei verschiedenen Brandbekämpfungssystemen (BBA\_01, BBA\_02 und BBA\_03) dargestellt. Die größte Temperaturreduzierung unmittelbar nach der Aktivierung zeigte sich beim Hochdruckwassernebelsystem BBA\_01. In diesem Versuch fallen die Temperaturen im gesamten Verlauf niedriger aus als bei den beiden anderen getesteten Systemen. Auch im späteren Brandverlauf werden bei BBA\_01 niedrigere Temperaturen gemessen als bei BBA\_02. Die höchsten Temperaturen mit lokal und temporär auftretenden Peaks über 500 °C zeigten sich beim sprinklerbasierten System BBA\_03.

Die Abschirmung durch die Fahrzeugatrappe erschwert bei allen Systemen die direkte Einwirkung auf den Brandherd. Jedoch erzielen die Hochdruckwassernebelsysteme BBA\_01 und BBA\_02 signifikant niedrigere Temperaturen unter der Decke. Dies ist auf die Wirkungsweise des Löschmittels Wassernebel mit sehr kleinen Wassertropfen zurückzuführen. Das Verdampfen der kleinen Wassertropfen kühlt die Umgebungsluft, auch ohne den Brandherd direkt zu erreichen.

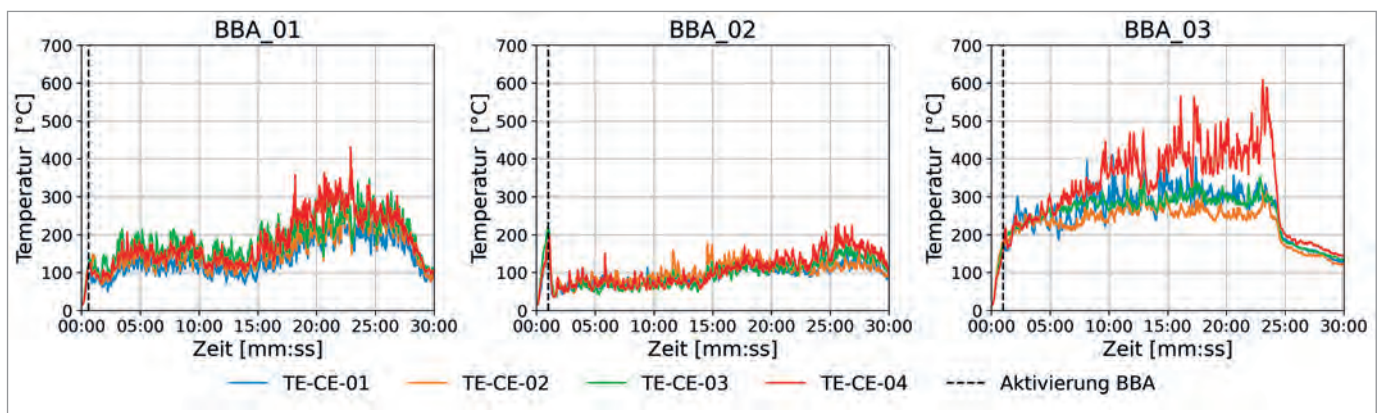
Die niedrigeren Temperaturen bei System BBA\_01 im Vergleich zum System BBA\_02 mit baugleichen Düsen sind auf die gleichzeitige Aktivierung aller vier Düsen zurückzuführen. Die Brandbekämpfung bei BBA\_02 setzt zwar bereits nach 35 Sekunden ein, doch bis zur Aktivierung der vierten Düse dauert es weitere 90 Sekunden. Eine mögliche Ursache

|                             | BBA_01                          | BBA_02                | BBA_03        |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|
| Technologie                 | Hochdruck-Wassernebel           | Hochdruck-Wassernebel | Sprinkler     |
| Anzahl Sprühköpfe           | 4                               | 4                     | 4             |
| Aktivierung                 | 1 Minute nach Zündung (manuell) | Glasfass              | Glasfass      |
| Wasserbeaufschlagung gesamt | ca. 100 l/min                   | ca. 100 l/min         | ca. 240 l/min |

**Tabelle 2** Übersicht der getesteten Systeme für Brandbekämpfungsanlagen (BBA)  
 Overview of tested systems for fire fighting systems (BBA)



**Bild 4** Temperaturverlauf unter der Decke bei Versuchen mit den beiden Ersatzbrandlasten EBL A und B. Brandbekämpfung durch System BBA\_02  
 Temperature curve under the ceiling during tests with the two substitute fire loads EBL A and B. Fire fighting with system BBA\_02



**Bild 5** Temperaturverlauf unter der Decke bei drei verschiedenen Systemen zur Brandbekämpfung. Brandlast in allen Versuchen EBL B  
 Temperature curve under the ceiling for three different firefighting systems. Fire load in all tests EBL B

ist, dass die erste Düse durch die unmittelbare Kühlung der Luft die Aktivierung der weiteren Düsen verzögert. Der mindernde Einfluss auf die Temperaturen fällt beim dritten System BBA\_03, obwohl die vier Sprinkler fast gleichzeitig auslösten, geringer aus. Darüber hinaus verdampfen die größeren Tropfen deutlich weniger und kühlen somit die Lufttemperatur unter der Decke signifikant geringer. Zusätzlich werden die größeren Tropfen der Sprinkler am stärksten durch die Fahrzeugattrappe abgeschirmt, was ein Vordringen zum Brandherd erschwert.

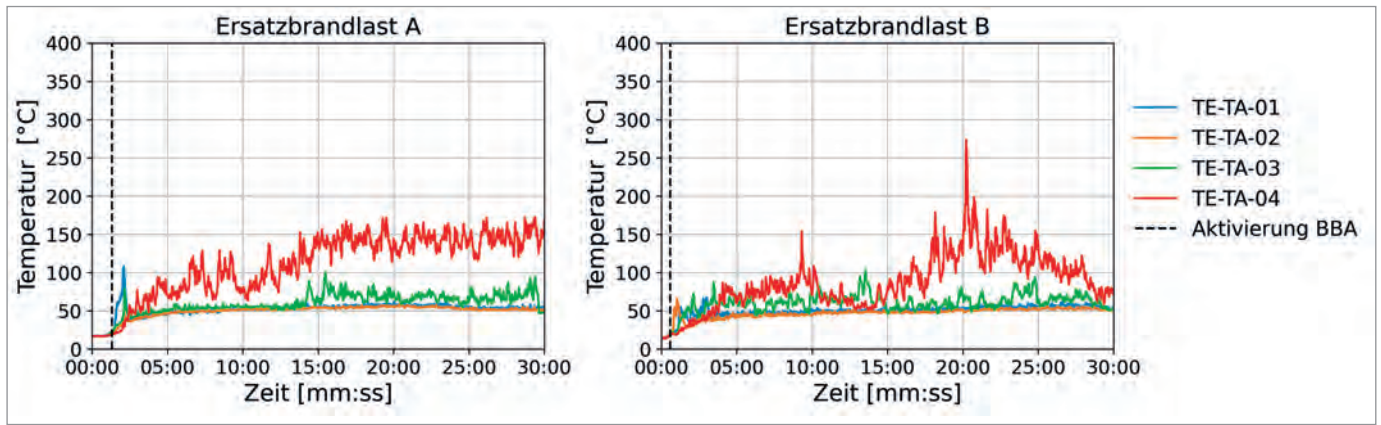
### 3 Schutzkonzept

Baurechtlich ist der Brandschutz in Garagen durch die Garagenverordnungen der Bundesländer geregelt, welche auf der Muster-Garagenverordnung (M-Gar-VO) basieren. Die derzeit in Überarbeitung befindliche, aber bis auf Weiteres gültige Version stammt aus dem Jahr 2008. Die gesetzlich festgelegten Schutzziele dienen der sicheren Evakuierung von Personen sowie dem Ermöglichen von Löscharbeiten durch die Feuerwehr. Im Regelfall sind nach M-Gar-VO keine Brandbekämpfungsanlagen vorgesehen. Ausnahmen bestehen bei Großga-

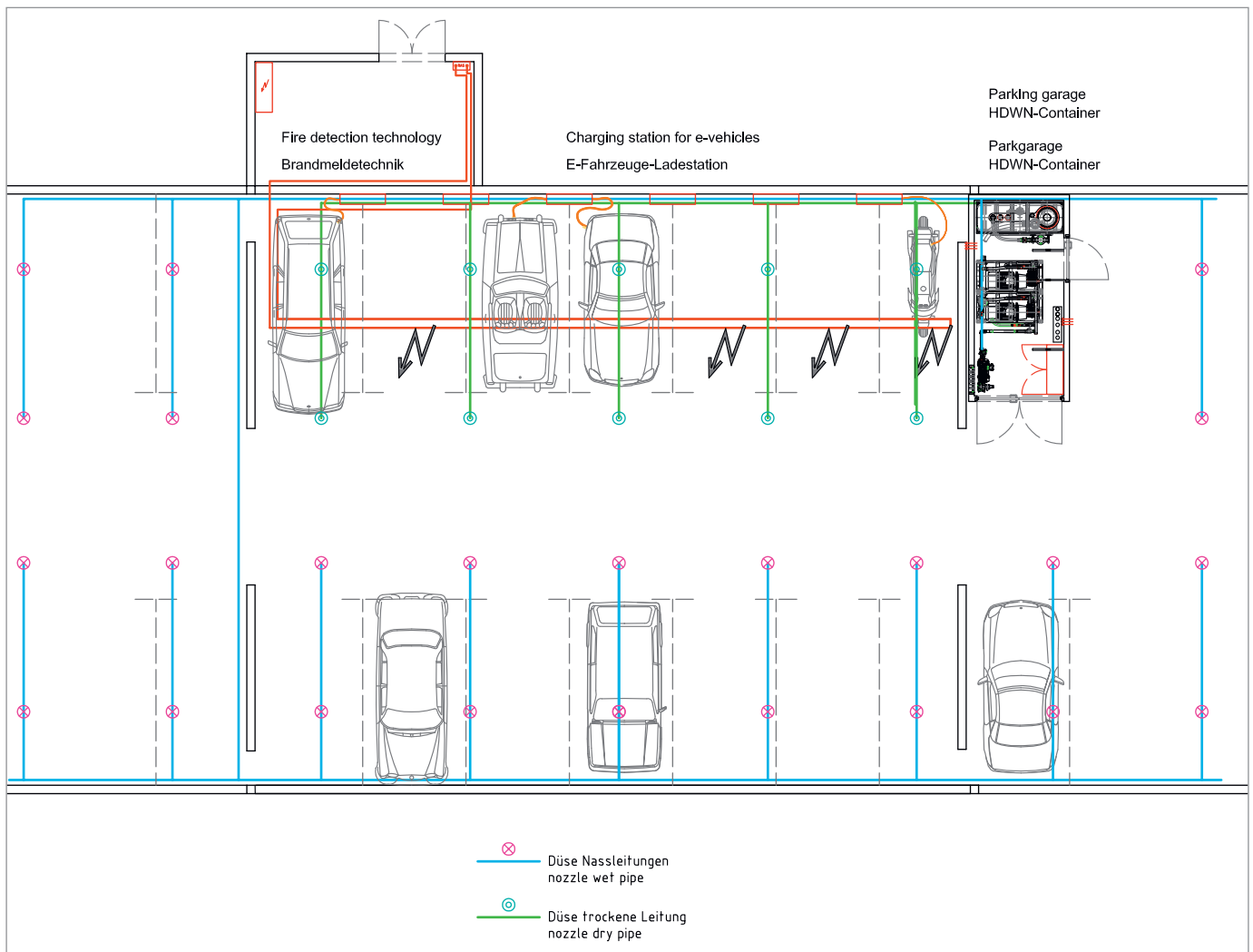
ragen, wenn der Fußboden der Geschosse mehr als 4 m unter der Geländeoberfläche liegt und das Gebäude nicht allein der Garagennutzung dient.

Bei Bränden in Parkgaragen treten aufgrund der kurzen Fluchtwege nur selten Personenschäden und Einsätze zur Personenrettung auf. So zeigen Untersuchungen zu Garagenbränden in den USA, dass es bei im Durchschnitt 1.858 jährlichen Bränden zu 20 Verletzungen von meist unmittelbar involvierten Personen gekommen ist [13]. Jedoch kommt es häufig zu hohen Sachschäden, langen Stillstandzeiten oder in Extremfällen sogar einem Verlust des Bauwerks. Um sich vor solchen Risiken zu schützen, besteht über die baurechtlichen Anforderungen hinaus aus wirtschaftlichen Überlegungen oder Vorgaben der Versicherungswirtschaft das Ziel, das Schadensausmaß zu begrenzen. Dazu muss die Feuerwehr zeitnah innerhalb der Garage Löscharbeiten durchführen können. Insbesondere bei einem Einsatz ohne notwendige Personenrettung muss dabei die Gefährdung der Einsatzkräfte abgewogen werden.

Beim Brand in einer Garage werden die Löscharbeiten durch eingeschränkte Sichtverhältnisse erschwert und es können als Folge von hohen Temperaturen Betonabplatzungen auftreten, die die Einsatzkräfte gefährden. Bei einer Brandausbreitung auf mehrere Fahrzeuge verschärfen sich die Bedingun-



**Bild 6** Temperaturverläufe an den Oberflächen der Zielbrandlasten bei Versuchen mit den Ersatzbrandlasten EBL A und EBL B. Brandbekämpfungssystem in beiden Versuchen BBA\_02  
 Temperature curves at the surfaces of the target fire loads during tests with the fire loads EBL A and EBL B. Fire fighting system in both tests BBA\_02



**Bild 7** Anlagentechnik in einem Parkhaus mit einem Ladebereich und einer Branderkennung  
 Technical systems in a multi-storey car park with a loading area and a fire detection system

gen zunehmend und sind ab einem bestimmten Ausmaß nicht mehr zu kontrollieren. Ein derartiges Szenario kann jedoch durch verbesserte Brandschutzmaßnahmen wie die Installation zusätzlicher Anlagentechnik vermieden werden. Wie zuvor dargestellt, sind Brandbekämpfungsanlagen geeignet, um eine

großflächige Brandausbreitung in Garagen zu verhindern oder zu verlangsamen. An die Brandbekämpfungsanlage wird somit folgende Anforderung gestellt: Der Brand eines Fahrzeugs in einer Tiefgarage ist auf dieses Fahrzeug zu begrenzen. Die Kontrolle des Brands ist auf geeignete Weise nachzuweisen.

Der Nachweis kann im Einzelfall für eine konkrete Anlage unter Verwendung der im Rahmen von SUVEREN entwickelten Methodik und Versuchsanordnung geführt werden.

### 3.1 Nachweisführung

Der zuvor dargestellte Versuchsaufbau ist für die Nachweisführung einer stationären Brandbekämpfungsanlage bei Bränden von konventionellen und Elektro-Pkw in Parkgaragen geeignet. Im Folgenden wird die Nachweisführung für das System BBA\_02 (**Tabelle 2**) mit vier Hochdruck-Wassernebel-düsen vorgestellt.

Neben der Bewertung der Temperaturentwicklung unter der Decke im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit von Betonabplatzungen (**Bild 4**) werden die an den Zielbrandlasten gemessenen Temperaturen ausgewertet (**Bild 6**).

Die an den Zielbrandlasten gemessenen Temperaturen lagen an den Messstellen TE-TA-01 bis -03 bei beiden Ersatzbrandlasten EBLA A und EBL B durchgängig unter 100 °C. An der Messstelle TE-TA-04 lag die Temperatur, abgesehen von einer kurzen Überschreitung (< 60 Sekunden) während des Brandversuchs unterhalb 200 °C. Zusätzlich zu diesen geringen gemessenen Temperaturbelastungen wiesen alle vier Zielbrandlasten keinen relevanten Brandschaden auf. Damit ist der Nachweis erbracht, dass die getestete Brandbekämpfungsanlage die Brandausbreitung auf ein benachbartes Fahrzeug verhindert hat.

Neben der Brandausbreitung auf die Zielbrandlasten wurde auch die Intensität des Brands und mögliche Auswirkungen auf die Deckenkonstruktion durch Temperaturmessungen unter der Decke bewertet. Die auftretenden Temperaturen lagen, abgesehen von kurzzeitigen Überschreitungen an zwei Messstellen, unter 300 °C und sind damit für Deckenkonstruktionen aus Stahlbeton als unkritisch zu bewerten.

Das Hochdruck-Wassernebelsystem BBA\_02 mit vier Düsen ist folglich in der Lage, eine Kontrolle der Brandausbreitung zu gewährleisten und die geforderten Schutzziele beim Brand eines Elektro-Pkw in einer Garage einzuhalten.

## 4 Anlagentechnische Umsetzung und Fazit

In Garagen werden zunehmend Ladestationen installiert. Auch wenn erhöhte Anforderungen an den Brandschutz in diesen Bereichen gesetzlich nicht explizit gefordert sind, wird

häufig – auch international – eine Branddetektion mit aktiver Brandbekämpfung empfohlen [6, 12]. **Bild 7** zeigt exemplarisch die Umsetzung des dargestellten Brandschutzkonzepts im Ladebereich einer Parkgarage durch eine Hochdruck-Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage. Layout, Planung und Nachweisführung erfolgten auf Basis der beschriebenen Versuche und Methodik.

### Literatur

- [1] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>
- [2] N. McCormack, „Kings Dock Car Park Fire“, Merseyside Fire & Rescue Service, Merseyside, 2018.
- [3] K. Storesund, C. Sesseng, R. Fjellgaard Mikalsen, O. A. Holmvaag und A. Steen-Hansen, „Evaluation of fire in Stavanger airport car park 7 January 2020“, Fire Technology, Norwegian Fire Academy, 2020.
- [4] S. Klüh, „Investigation of Fires with Electric Vehicles in Underground Traffic Areas“, Tunnel 2021 Vol 01, p. 34–37, 2021.
- [5] M. Kutschenreuter, A. Feltmann, T. Usner und F. Leismann, „Fire Protection in Tunnel Systems for Vehicles with New Energy Technologies (NET): Findings from Real Fire Tests“, in STUVA-Conference 2019, 2019.
- [6] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu und X. Huang, „A Review of Battery Fires in Electric Vehicles“, Fire Technology, Bd. 56, p. 1361–1410, 2020.
- [7] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple und J. Anderson, „Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles“, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, 2020.
- [8] D. Stroup, G. Taylor und G. Hausman, „Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program (NUREG-1805, Supplement 1, Volumes 1 & 2)“, Washington, DC, 2013.
- [9] Y. Z. Li und H. Ingason, „Scaling of wood pallet fires“, SP Technical Research, 2014.
- [10] J. Hietaniemi und E. Mikkola, „Design Fires for Fire Safety Engineering“, 2010.
- [11] International Maritime Organization (IMO), „Guidelines for the approval of fixed water-based fire-fighting systems for RO-RO spaces and special category spaces equivalent to that referred to in resolution A.123(V)“, London, 2008.
- [12] „Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression“, DNV GL AS Maritime, 2019.
- [13] H. Boehmer, S. Olenick und M. Klassen, „Modern vehicle fire hazards“, Fire Protection Research Foundation, Columbia, Maryland, USA, 2020.