

Forschung + Praxis 53

U-Verkehr und unterirdisches Bauen



STUVA-Tagung 2019 – STUVA Conference 2019

Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur
International Forum for Tunnels and Infrastructure

Studiengesellschaft für Tunnel und
Verkehrsanlagen e. V., STUVA, Köln

STUVA

Forschung + Praxis 53

**U-Verkehr und
unterirdisches Bauen**

**STUVA-Tagung 2019 –
Internationales Forum für
Tunnel und Infrastruktur**

**STUVA Conference 2019 –
International Forum for
Tunnels and Infrastructure**

STUVA-Tagung 2019 in Frankfurt am Main

veranstaltet von der

Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. –
STUVA, Köln

26. bis 28. November 2019
Langfassungen der Vorträge

Brandschutz in Tunnelanlagen bei Fahrzeugen mit neuen Energieträgern (NET): Erste Erkenntnisse aus Realbrandversuchen

Der Anteil an Fahrzeugen mit neuen Energieträgern (NET) nimmt in jüngster Zeit deutlich zu. Allerdings sind die von den neuen Antriebskonzepten ausgehenden Gefahren bei Unfällen und Bränden bislang noch weitgehend unerforscht. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsvorhaben SUVEREN hat daher zum Ziel, die spezifischen Gefahren für urbane Verkehrsanlagen, die von einem steigenden Anteil der NET-Fahrzeuge am Gesamtverkehr ausgehen, zu identifizieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Fernziel ist ein „Performance-Based Design“ für sensible urbane Verkehrsstrukturen wie beispielsweise Tunnel und Parkhäuser, um für jede Anlage individuelle Schutzmaßnahmen sicher selektieren zu können. Im Folgenden werden erste Forschungsergebnisse präsentiert. So ist in SUVEREN eine Bemessungsbrandkurve für Pkw mit NET entwickelt worden, und es wurden großmaßstäbliche Brandversuche unter anderem an verschiedenen Typen von Traktionsbatterien durchgeführt.

1 Hintergrund

Klimaschutz und der nachhaltige Umgang mit Rohstoffen sind in den letzten Jahren immer stärker in den öffentlichen und politischen Fokus gerückt. Mit dem Ziel, die Produktion von klimaschädlichem CO₂ zu reduzieren, wird im Mobilitätsbereich die Entwicklung von alternativen Antrieben intensiv vorangetrieben. Weltweit und in Deutschland werden daher, auch durch politische Entscheidungen motiviert, zunehmend mehr Fahrzeuge mit neuen Energieträgern (NET) zugelassen. Dabei umfasst der Begriff NET Energieträger, die auf elektrischen Antriebskonzepten basieren (voll elektrische, Hybrid- oder Brennstoffzellen-Fahrzeuge) und mit Gas betriebene Verbrennungsmotoren (CNG, LNG, LPG, Wasserstoff). Sowohl im Individual- und öffentlichen Personennahverkehr als auch in der Logistikbranche ist daher zukünftig mit einer starken Zunahme von NET-Fahrzeugen zu rechnen (Bild 1).

Bei Verwendung von NET treten im Vergleich zu konventionell betriebenen Fahrzeugen geänderte Gefahren auf, z. B. Batteriebrände, Strahlflammen aus Überdruckventilen von Druckgasbehältern oder die Ausbreitung leicht entzündlicher Gase. Bei Batteriebränden kann ein thermisches Durchgehen der Batteriezellen auftreten. Dabei werden durch das Überschreiten einer kritischen Temperatur in einer Batteriezelle weitere exotherme Reaktionen in angrenzenden Zellen ausgelöst, sodass es zu einer Kettenreaktion kommt. Aktuelle Sicherheitskonzepte sowie Richtlinien für die Planung und den Betrieb von Tunneln

Fire Protection in Tunnel Systems for Vehicles with New Energy Technologies (NET): Findings from Real Fire Tests

The proportion of vehicles propelled by new energy sources has increased significantly in recent times. However, the risks of the new drive systems causing accidents and fires have so far remained largely unexplored. The Federal Ministry for Education and Research sponsored the SUVEREN research project which has the aim of identifying the specific risks for urban transport systems due to the increasing proportion of NET-vehicles in the total transport fleet and of developing appropriate counter measures. The ultimate goal is a performance-based design for sensitive urban transport structures, such as tunnels and car parks, in order to be able to select individual protection measures for each piece of infrastructure. The first research results are presented below. Thus, in SUVEREN a calculated fire curve has been developed for cars with NET and large-scale fire tests were carried out, on among other things, different types of traction batteries.

und unterirdischen Räumen, Rettungskonzepte und Brandbekämpfungsmaßnahmen basieren ausschließlich auf den Risiken konventioneller Energieträger, entsprechend werden Risiken aus NET bislang nicht berücksichtigt.

In unterirdischen Verkehrsanlagen resultieren aus dem NET-spezifischen Verhalten zusätzliche Gefahren gegenüber den auf der freien Strecke auftretenden, da sich die Folgen von Wärme, Rauch und freigesetzten toxischen Stoffen in räumlich abgeschlossenen Bereichen konzentrieren. Bedingt durch den prognostizierten Anstieg der Häufigkeit von NET-Fahrzeugen sind zukünftig vermehrt solche Ereignisse zu erwarten. Bislang wird jedoch bei der Planung von Straßentunneln in Deutschland nicht explizit auf die Gefahren bei Bränden mit NET in Tunneln eingegangen. Die gültigen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006), wie auch die Mitte 2019 eingeführten Empfehlungen EABT-80/100, beinhalten keine Aussagen zum Umgang mit NET bzw. erforderliche Maßnahmen zur Vermeidung spezifischer Gefahren. Auch für Verkehrsanlagen wie Tiefgaragen, unterirdische Busbahnhöfe und -depots sowie Anlieferungszone sind die neuen Risiken von NET nicht ausreichend bekannt.

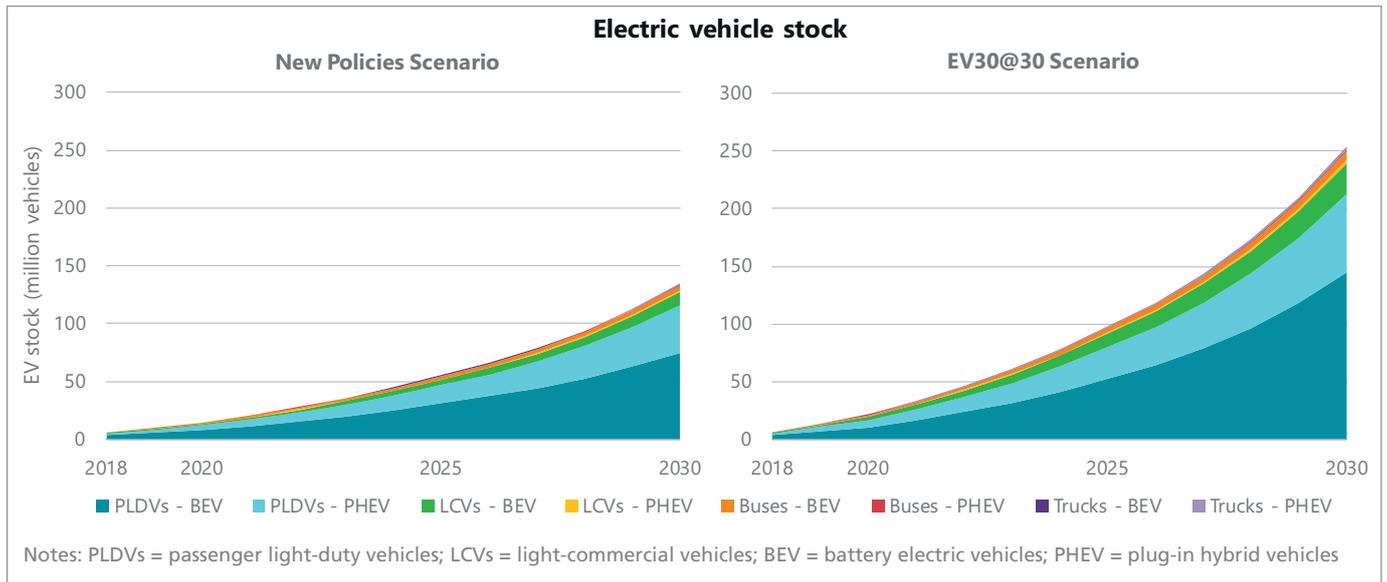


Bild 1 Prognose der Anzahl an Elektrofahrzeugen bis 2030 in unterschiedlichen Szenarien [1]
Forecast of the number of electric vehicles in service in different scenarios by 2030 [1]

2 Forschungsprojekt SUVEREN

Zur Verbesserung der zuvor beschriebenen Situation fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschung für die zivile Sicherheit, Bekanntmachung: „Zukünftige Sicherheit in Urbanen Räumen“, unter den Förderkennzeichen 13N143 91-93 das Forschungsprojekt „Verbesserung der Sicherheit in unterirdischen städtischen Verkehrsbereichen bei Einsatz neuer Energieträger – SUVEREN“ (Bild 2). Ziel des Projekts ist neben der Bewertung der aus dem vermehrten Einsatz von NET in Fahrzeugen resultierenden Risiken die Entwicklung numerischer Werkzeuge, um geeignete Sicherheitskonzepte und Maßnahmen abzuleiten.

SUVEREN fokussiert sich auf folgende Verkehrsanlagen, die bislang anhand präskriptiver Richtlinien ausgelegt werden und in urbanen Strukturen besonders relevant sind:

- Tiefgaragen/geschlossene Parkhäuser,
- Busbahnhöfe,
- Busdepots,
- Tunnel,
- Anlieferungszone.

Um künftig unter Berücksichtigung der spezifischen Nutzung und auftretender Gefahren diese Verkehrsbereiche sicherer planen zu können, werden im Forschungsprojekt SUVEREN Werkzeuge und Konzepte für ein „Performance-Based Design“ entwickelt, mit dem die komplexen Zusammenhänge individuell abgebildet werden können. In einem ersten Schritt wurde daher die Pkw-Bestandentwicklung der letzten Jahre analysiert. Neben dem erhöhten Anteil an NET zeigt sich dabei eine Zunahme des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts sowie ein vermehrter Einsatz von



Bild 2 Logo des Forschungsprojekts SUVEREN
Logo of the research project SUVEREN

brennbaren Materialien. Aus diesen Erkenntnissen wurde eine Brandverlaufskurve mit einer maximalen Wärmefreisetzung von 7 MW und einer Gesamtwärmefreisetzung von 10 GJ abgeleitet. Details zu dieser Bemessungsbrandkurve sind in [1] veröffentlicht.

2.1 Brandversuche

Im Rahmen des Projekts sind im April und Juni 2019 auf dem Gelände des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Trauen Brandversuche im Realmaßstab mit Batterien, Gas und Ersatzbrandlasten durchgeführt worden. Die Ersatzbrandlasten bestanden aus Holzpaletten, welche in einem Fahrzeug-Mockup angeordnet wurden. Ziele der Brandversuche waren ein verbessertes Verständnis des Brandverhaltens von NET sowie die gezielte Ermittlung geeigneter Daten für die Validierung numerischer Simulationen.

Die Versuchsdurchführung erfolgte in einem eigens für diesen Zweck konzipierten und mit umfangreicher Messtechnik ausgestatteten Kalorimeter, in dem ein regelbarer Ventilator im Abzugsschacht für einen kontrollierten Luftstrom sorgte. Die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung wurde im Inneren des Kalorimeters sowie an der Brandlast selbst von im Raster angeordneten Thermoelementen erfasst. Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates (HRR) erfolgte nach drei unabhängigen Messverfahren, per Sauerstoffverbrauchsmethode, Bestimmung der Massenverluste mit einer Abbrandwaage und einer auf Energiebilanzen beruhenden Messmethode, um das für Batteriebrände am besten geeignete Verfahren identifizieren zu können. Zusätzlich wurden die Versuche mit je zwei optischen und zwei Infrarot-Kameras aufgezeichnet. Zum Einsatz kamen auch verschiedene Gasmesssysteme, darunter ein FTIR-Gerät (Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie), um die anfallenden Verbrennungsprodukte zu detektieren. Bild 3 zeigt eine Prinzipskizze des verwendeten Versuchsaufbaus.

Um geeignete Methoden zur Brandbekämpfung bei NET (z. B. Hemmen des thermischen Durchgehens einer Batterie) zu identifizieren, wurde das Kalorimeter zusätzlich mit einer Brandbekämpfungsanlage (BBA) ausgestattet. Da zurückliegende Brandversuche vielfach gezeigt haben, dass Wassernebel bei

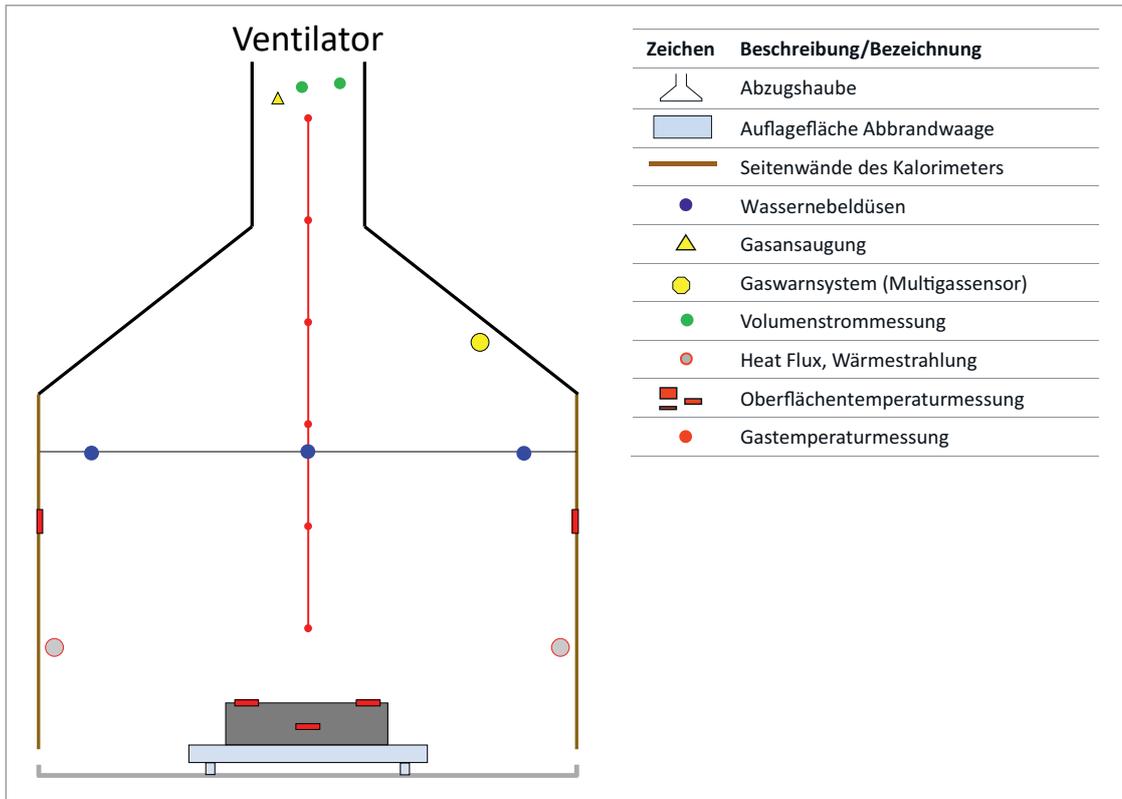


Bild 3 Prinzipskizze des verwendeten Kalorimeters [3]
Schematic diagram of the calorimeter used [3]

unterschiedlichen Brandlasten effektiv zur Kühlung und Reduzierung der Strahlungswärme eingesetzt werden kann, wurde eine Hochdruck-Wassernebelanlage eingesetzt. Dabei kamen je nach Versuchsziel zwischen drei und fünf Einzeldüsen mit einer Gesamtbeaufschlagung von 40 bis 80 l/min zum Einsatz.

Das Löschwasser der BBA wurde aufgefangen und hinsichtlich im Wasser gelöster Elemente chemisch analysiert. Weiterhin wurden Wärmemelder, punkt- und linienförmige Rauchmelder sowie Rauchgasansaugsysteme getestet.

Von einem Fahrzeughersteller wurden Traktionsbatterien in verschiedenen Ausführungen (30 kWh mit prismatischen Zellen

und 40 kWh mit zylindrischen Zellen) für die Brandversuche im Realmaßstab zur Verfügung gestellt. Das Verfahren zur gezielten Auslösung des thermischen Durchgehens der Batterien wurde variiert. Absichtliches Überladen und punktuell Erhitzen führten nicht zum angestrebten Durchgehen der Batterie. Als zuverlässigste Methode erwies sich das Anbohren einer Zelle.

In drei von fünf Versuchen wurde die Reaktion und der Brandverlauf der Batterie ohne äußeren Eingriff im Freibrand beobachtet, um die Energie- und Stofffreisetzungsraten zu erfassen. Bei zwei Versuchen wurde die installierte BBA ausgelöst, um die Wirkung auf den Brandverlauf und die resultierenden Randbedingungen zu ermitteln.

Zusätzlich zu den Batterieversuchen wurden zur Datengewinnung für die Kalibrierung der im Projekt entwickelten numerischen Modellierungen Versuche mit einer Ersatzbrandlast bestehend aus einer Pkw-Attrappe bestückt mit 24 Holzpaletten durchgeführt. Die Attrappe bildet eine Pkw-Karosserie inklusive Dach und Motorhaube aus Stahlblechen nach. Der zugehörige Versuchsaufbau der Ersatzbrandlast im Kalorimeter ist (mit zwei geöffneten Wänden) in Bild 4 dargestellt. Bei der Durchführung der Versuche wurde der Zeitpunkt der Aktivierung der BBA variiert und die eintretende Löschwirkung dokumentiert.

Bei Fahrzeugen mit Druckgasbehältern werden Überdruckventile eingebaut, um ein Bersten des Druckbehälters bei Überhitzung auszuschließen. In Kombination mit einem Brand entzündet sich das durch das Überdruckventil ausströmende Gas, sodass sich eine Strahlflamme ausbildet. Um dieses Abblasen des Druckbehälters zu simulieren, wurden Versuche mit einer Methan-Strahlflamme (Bild 5) durchgeführt und die Wirkung einer BBA auf die eintretende Temperaturverteilung erfasst.



Bild 4 Kalorimeter und Fahrzeugattrappe mit Ersatzbrandlast aus Holz
Calorimeter and dummy vehicle with replacement fire load consisting of wood



Bild 5 Brandversuch mit Methanstrahlflamme und Wasserdampf
Fire testing with methane jet flame and water mist

2.2. Vorläufige Erkenntnisse

Schon bei den Freibrandversuchen hatten die unterschiedlichen Batteriezelltypen stark voneinander abweichende Reaktionsneigungen gezeigt. Daher wurde bei den Brandversuchen, in denen die Löschwirkung der BBA getestet werden sollte, der Zeitpunkt der Aktivierung zelltypspezifisch variiert. Die Aktivierung der BBA erfolgte im Fall der zylindrischen Zellen ca. 20 s nach Beginn des sehr schnell und heftig ablaufenden thermischen Durchgehens. Bei den prismatischen Zellen wurde die BBA ausgelöst, sobald eine zweite Zelle mit Entzündung der austretenden Gase durchging. Bei diesem Versuch war zu beobachten, dass die BBA durch die direkte Einwirkung sowohl den Brand löschte als auch ein thermisches Durchgehen weiterer Zellen unterband. Eine detaillierte Analyse aller Versuche mit aktivierter BBA steht zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch aus.

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse aus einem Brandversuch einer Traktionsbatterie mit prismatischen Zellen ohne Einsatz der BBA dargestellt. Die Batterie wurde um zwei der regulär acht Module reduziert und wies bei einem Ladezustand (SOC) von 100 % einen Energieinhalt von 24 kWh auf. Im dargestellten Versuch wurden die Brandversuche inklusive zugehöriger Kunststoffabdeckung ohne Auslösung der BBA durchgeführt. Die Auslösung des thermischen Durchgehens erfolgte durch Anbohren einer Zelle.

Bild 6 zeigt die nach der Sauerstoffverbrauchsmethode bestimmte resultierende Wärmefreisetzungsrate (HRR) nach Bereinigung temperaturabhängiger Störgrößen und unterschiedlicher Sensorlatenzen. Visuelle Beobachtungen bestätigten, dass die dargestellten Peaks beim Platzen und Abblasen der Zellen auftraten. Dieses Abblasen äußerte sich in mehrere Sekunden anhaltenden Strahlflammen von mehreren Dezimetern Länge. Bis zum Abschluss der Reaktion, d. h. bis alle Zellen der Batterie thermisch durchgegangen waren, dauerte es ca. 85 min.

Aus der Integration der Wärmefreisetzungsrate ergibt sich im betreffenden Versuch eine insgesamt von der Batterie mit 24 kWh freigesetzte Energie von ca. 0,225 GJ. Diese beträgt ca. 1/10 der rechnerisch beim Brand von 70 l Benzin (voller Pkw-Kraftstofftank) freigesetzten Energiemenge. Hinsichtlich der Wärmefreisetzung ist die getestete Batterie im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen somit als deutlich weniger kritisch einzustufen. Allerdings betrug die Gesamtdauer der Energiefreisetzung 85 min. Feuerwehrkräfte müssen daher während eines realen Einsatzes mit lang anhaltender bzw. plötzlich wieder einsetzender Brandaktivität der Batterie rechnen.

In **Bild 7** sind ausgewählte, mithilfe der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) im Abluftstrom gemessene Konzentrationen für toxische Stoffe (Cyanwasserstoff, HCN, Fluorwasserstoff, HF und Salzsäure, HCl) dargestellt. Die gemessenen Werte sind vor dem Hintergrund zu bewerten, dass das Kalorimeter während der Versuche permanent von Frischluft durchströmt wurde, was eine Verdünnung der emittierten Gase verursachte. Insgesamt wurde während des Versuches ein Luftvolumen von 8.325 m³ durch das Kalorimeter geführt.

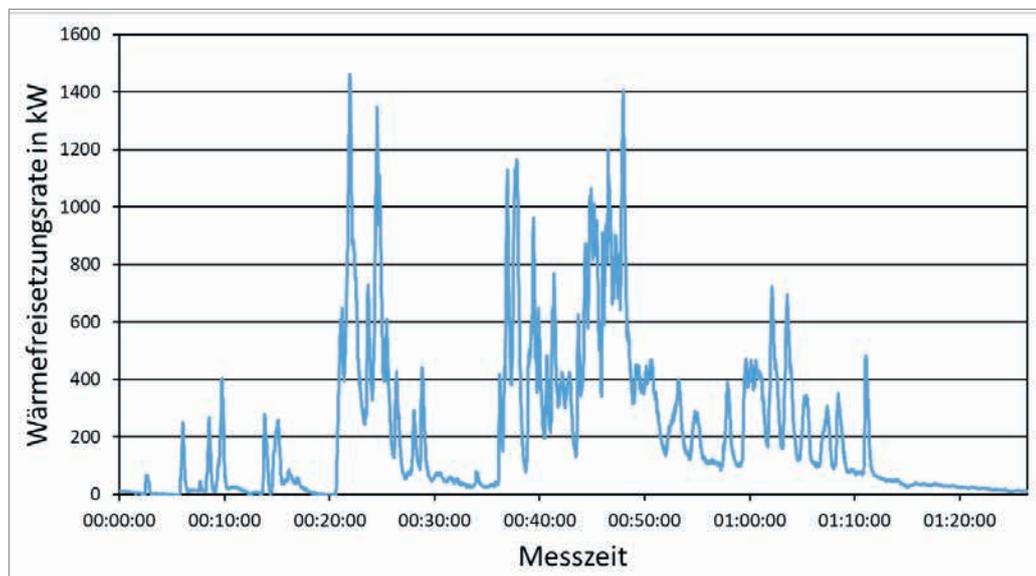


Bild 6 Wärmefreisetzungsrate einer 24 kWh-Batterie nach Sauerstoffverbrauchsmethode
Heat release rate of a 24 kWh-battery by the oxygen consumption method

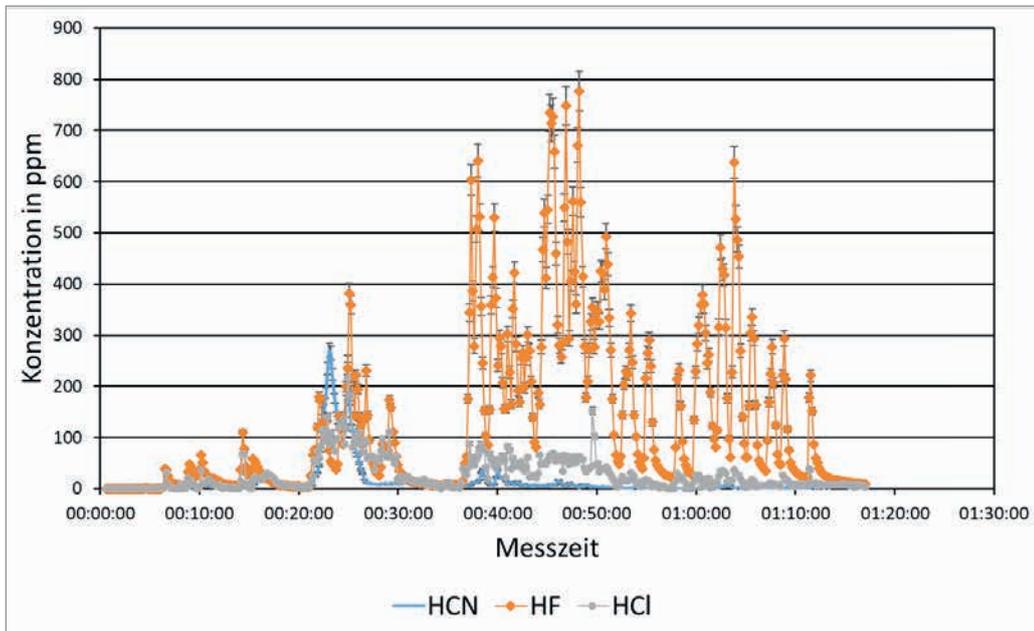


Bild 7 Gemessene Konzentrationen der Gase Cyanwasserstoff (HCN), Fluorwasserstoff (HF) und Salzsäure (HCl) inkl. Fehlerindikatoren
 Measured concentrations of the gases hydrogen cyanide (HCN), hydrofluoric acid (HF) and hydrochloric acid (HCl) incl. error indicators

Die im Versuch durchschnittlich gemessene HF-Freisetzung lag bei 128 ppm. Legt man nach [4] einen Grenzwert von 500 ppm bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit als kritische Kontaminierung fest, so führt der betrachtete Batteriebrand (unter Vernachlässigung des Abkühlungsprozesses) in einem abgeschlossenen Volumen von ca. 2.100 m³ zu einer Grenzwertüberschreitung bei HF. Auch bezüglich HCN und HF sind die gemessenen Konzentrationen für die Personensicherheit als kritisch zu bewerten. Der HCl-Wert ist deutlich erhöht.

In einem weiteren Versuch mit einer Batterie aus prismatischen Zellen wurde ein Löschversuch mittels BBA durchgeführt und dabei das eingebrachte Wasser an drei Orten (auf der Abbrandwaage neben der Batterie, auf dem Fußboden seitlich der Batterie und direkt unter der Batterie) aufgefangen und normgerecht auf darin enthaltene Substanzen geprüft. **Table 1** zeigt die ermittelten Messwerte bzw. in Klammern den Faktor, um den die Messwerte der Proben vom Ausgangswert abweichen. Insbesondere für Fluorid sowie Kobalt und Mangan sind gegenüber dem Ausgangswert signifikant erhöhte Messwerte zu verzeichnen.

Bei den Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass die Batterien mit prismatischen Zellen einem deutlich langsamer ablaufenden thermischen Durchgehen unterlagen als die Batterien mit zylindrischen Zellen. Die konstruktionsbedingten massiven Unterschiede im Ablauf des thermischen Durchgehens deuten darauf

hin, dass dem passiven Brandschutz bei der Konstruktion der Batterien eine sehr große Bedeutung zukommt.

In allen Versuchen, die mit dem Einsatz einer BBA geplant wurden, konnte das Übergreifen des thermischen Durchgehens auf benachbarte Zellen unter den gegebenen Versuchsbedingungen beendet und die Umgebung erfolgreich gekühlt werden.

2.3 Weiterer Projektverlauf

Die Arbeiten im Forschungsprojekt werden bis Sommer 2020 andauern. Neben der Entwicklung und Validierung numerischer Tools soll die Detektionstechnik verbessert werden, um freigesetzte Stoffe frühzeitig erkennen und Schadensereignisse mit NET sicher detektieren zu können. Kernziel ist es, künftig in realen Verkehrsanlagen die Dauer zwischen dem Beginn des Schadensereignisses und der Einleitung von Gegenmaßnahmen so kurz wie möglich zu gestalten, um eine effektive Brandbekämpfung zu ermöglichen.

3 Bewertung der Risiken von NET

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand des Projekts kann davon ausgegangen werden, dass das in richtlinienkonform ausgestatteten Straßentunneln vorliegende Sicherheitsniveau auch für die

Substanz		Abbrandwaage seitlich Batterie	Fußboden	Unter Batterie
Fluorid	mg/l (-)	21,0 (104)	18,0 (89)	35,0 (174)
Kobalt	mg/l (-)	48,0 (639)	22,1 (294)	20,8 (276)
Nickel	mg/l (-)	47,9 (162)	26,9 (90)	24,6 (82)
Mangan	mg/l (-)	43,0 (433)	22,0 (221)	26,0 (262)
Kobalt	mg/l (-)	48,0 (639)	22,1 (294)	20,8 (276)

Table 1 Menge der im Löschwasser gemessenen Substanzen, in Klammern Faktor gegenüber Ausgangswert
 Quantity of substances measured in the extinguishing water, in brackets factor compared to output value

abweichenden Risiken beim Brand eines mit NET betriebenen Pkw ausreicht.

Im Unterschied zum betrieblichen Brandschutz in Straßentunneln, der für Brände von beladenen Lkw ausgelegt wird, ergeben sich für unterirdische Verkehrsanlagen wie Tiefgaragen, Busbahnhöfe oder Busdepots zusätzliche Anforderungen aus den NET-spezifischen Gefahren an den Brandschutz. Einen Ansatz, diese Anforderungen zu bestimmen, stellt das Performance-Based Design (PBD) dar. Im Gegensatz zur präskriptiven Auslegung berücksichtigt PBD eine individuelle Gestaltung der Verkehrsanlage, welche die örtlichen Gegebenheiten, die geplante Nutzungsart und das Vorkommen von NET-Fahrzeugen hinreichend berücksichtigt.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Rettungskräfte mit verschärften Bedingungen konfrontiert werden, da mit einem zeitlich veränderten Brandverlauf sowie Wiederentzündung und Freisetzung toxischer und korrosiver Gase zu rechnen ist. Daher müssen in allen genannten Verkehrsanlagen Feuerwehren und Rettungskräfte ihre Einsatzstrategien an die veränderten Randbedingungen anpassen.

Die zentralen Ergebnisse des Forschungsprojekts werden im Spätsommer 2020 in Form eines Leitfadens veröffentlicht, der Betreiber, Berater, Einsatzkräfte und sonstige involvierte Parteien über den Umgang mit NET-Bränden in Verkehrsanlagen informiert und konkrete Handlungsempfehlungen gibt.

Literatur

- [1] IEA: Global EV Outlook – Scaling up the transition to electric mobility. 27 Mai 2019. <https://www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/>. [Zugriff am 16. August 2019].
- [2] Klüh, S., Kutschenreuter, M., Leismann, F., Lakkonen, M.: Fire safety in car parks using Performance based design. Nordic Fire Safety Days, Kopenhagen, 2019.
- [3] Peters, B.: Versuchskonzept SUVEREN. IFAB GmbH, Berlin, 2018 (unveröffentlicht)
- [4] ISO 13571:2007: Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data.

Anzeige



INSTANDSETZUNG IM KANALTUNNEL RENSBURG

**Vertrauen Sie unseren Referenzen
und bauen Sie auf unser Know-how:**

- Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)
- Betoninstandsetzung nach ZTV-ING (PCC/SPCC)
- Injektionstechnologie
- Brandschutz
- Oberflächenschutz mit Sternchenlistung

Kontaktieren Sie uns

flooring_refurbishment@de.sika.com
+49 711 8009 2211

www.sika.de/tunnel

BUILDING TRUST

