

**ANLAGENTECHNISCHER
BRANDSCHUTZ FÜR BUSDEPOTS**



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | 2 |
| 1. Einleitung | 2 |
| 1.1 Forschungsprojekt SUVEREN_4_Depots | 3 |
| 1.2 Ziel und Anwendungsbereich des White Papers | 4 |
| 2. Räumliche Gegebenheiten in Busdepots | 4 |
| 3. Aufbau von (E-)Bussen | 5 |
| 4. Brandrisiko und Auswirkungen von Bränden in Busdepots | 6 |
| 4.1 Brandursachen | 6 |
| 4.2 Brandverhalten von (E-)Bussen | 6 |
| 4.3 Brandszenario Busdepot und die Auswirkungen | 7 |
| 4.4 Versicherungstechnische Aspekte | 8 |
| 5. Brandversuche für die Absicherung von Busdepots | 9 |
| 5.1 Auswahl der Brandbekämpfungsanlage | 9 |
| 5.2 Auslegung der Brandbekämpfungsanlage | 10 |
| 5.3 Versuchsraum und Versuchsbedingungen | 11 |
| 5.4 Busattrappe und Brandlasten | 11 |
| 5.5 Messkonzept und Versuchsdurchführung | 12 |
| 6. Ergebnisse der Brandversuche | 13 |
| 6.1 Zielbrandlasten | 13 |
| 6.2 Temperatur an der Decke | 14 |
| 6.3 Schadstoffkonzentrationen | 15 |
| 7. Schlussfolgerungen aus den Brandversuchen | 16 |
| 8. Empfehlungen für die anlagentechnische Absicherung von Busdepots .. | 16 |
| 8.1 Branderkennung | 17 |
| 8.2 Brandbekämpfung | 17 |
| 9. Vorgehen bei der Genehmigung eines Busdepots mit BBA | 19 |
| 10. Fazit | 20 |
| 11. Literaturverzeichnis | 20 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|---|
| BBA | Brandbekämpfungsanlage |
| BMA | Brandmeldeanlage |
| FT-IR | Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer |
| IC | Ionenchromatographie |
| HDWN | Hochdruck-Wassernebel |
| LFP | Lithium-Eisen-Phosphat |
| LIB | Lithium-Ionen-Batterien |
| LTO | Lithium-Titanat |
| NMC | Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid |
| RWA | Rauch- und Wärmeabzugsanlage |
| TR | <i>Thermal Runaway</i> , thermisches Durchgehen |

1. Einleitung

Der Ersatz von Bussen mit fossilen Energieträgern durch Busse mit erneuerbaren Energien ist ein wesentlicher Schritt in Richtung der Dekarbonisierung des Verkehrs. Elektrobusse (E-Busse) mit Lithium-Ionen-Batterien (LIB) bringen jedoch neue Risiken für Busdepots mit sich. Neu einzuschätzen ist vor allem die Brandgefährdung, die von den mitgeführten Batterien und Verwendung der Ladeinfrastruktur ausgeht. Dazu kommt, dass moderne Busse unabhängig vom Antrieb mehr brennbare Kunststoffmaterialien enthalten als frühere Busgenerationen [1].

Durch die enge Abstellung der Fahrzeuge in Busdepots kann sich der Brand eines Busses sehr schnell auf benachbarte Busse und anschließend auf eine komplette Abstellanlage ausbreiten. In den letzten Jahren sind mehrere Schadenereignisse aufgetreten, die gezeigt haben, wie verheerend Brände in Busdepots sein können. Ein Beispiel ist der Großbrand in einem Stuttgarter Busdepot, der sich im September 2021 ereignete und 25 Busse, darunter zwei E-Busse, vollständig zerstörte. Als eine mögliche Brandursache wurde ein E-Bus identifiziert, der zum Zeitpunkt des Brandausbruchs geladen wurde [2]. Ein weiteres Beispiel ist der durch einen technischen Defekt an einem Diesel-Bus verursachte Brand auf einem Betriebshof in Düsseldorf Heerdt. Dieser ereignete sich im April 2021 und zerstörte sowohl die Abstellhalle als auch die darin geparkten 38 Busse, darunter acht E-Busse [3].

Die bisherigen Brandschutzkonzepte für Busdepots berücksichtigen oftmals nur eine Brandmeldeanlage (BMA) und große Brandabschnitte. Aus veränderten Randbedingungen, wie z. B. Busse mit hohem Kunststoffanteil (hohe Brandlast) und E-Busse mit der zugehörigen Ladeinfrastruktur (zusätzliche Zündquelle), können andere (höhere) Gefährdungen für Busdepots resultieren. Aus Sachschutzgründen und der Versicherbarkeit der Anlagen kann der Betreiber neue Schutzziele definieren. Bauordnungsrechtlich gibt es bislang jedoch keinen Bedarf für neue Brandschutzkonzepte, da große Brandabschnitte weiterhin zulässig sind. Eine Brandeindämmung ausschließlich mittels baulicher oder organisatorischer Maßnahmen kann in

Busdepots allerdings sehr aufwändig sein und den Betrieb erschweren, wenn z. B. relativ kleine Brandabschnitte gebildet werden müssen. Eine Möglichkeit, ein Busdepot wirksam zu schützen, ist die Installation einer geeigneten automatischen Brandbekämpfungsanlage (BBA). Im Brandfall wird die BBA in dem betroffenen Brandabschnitt frühzeitig durch eine BMA mit dem Ziel aktiviert, den Brand bis zum Eintreffen der Feuerwehr zu kontrollieren und damit möglichst gering zu halten. Zusätzlich kann auch eine manuelle Auslösung durch den Betreiber erfolgen.

Aufgrund seiner sehr hohen Kühlwirkung ist Wasser ein besonders geeignetes Brandbekämpfungsmittel für LIB und Elektrofahrzeuge [4]. Jedoch ist nicht jede wasserbasierte BBA für den Einsatz in Busdepots geeignet. Für eine erfolgreiche anlagentechnische Absicherung von Busdepots muss eine BBA in realitätsnahen Brandversuchen ihre Leistungsfähigkeit beweisen. BBA, die Additive zur Brandbekämpfung verwenden, sollten vermieden werden, da durch diese die Anlagenkomplexität steigt und ggf. Umweltbelastungen entstehen können.

1.1 Forschungsprojekt SUVEREN_4_Depots

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt SUVEREN¹ beschäftigte sich im Zeitraum von 2017 bis 2020 mit den Risiken durch neue Energieträger, insbesondere LIB, in unterirdischen urbanen Verkehrsbereichen. Während das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Folgeprojekt SUVEREN2use² (Projektstart Ende 2022) diverse Bereiche der LIB-Wertschöpfungskette mit besonderem Fokus auf LIB-Lagerung untersucht, beschäftigt sich das hier beschriebene eigenfinanzierte Forschungsprojekt SUVEREN_4_Depots explizit mit dem Schutz von Busdepots.

FOGTEC Brandschutz GmbH, die Bergische Universität Wuppertal, das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH, die Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) und der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) waren am Projekt beteiligt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts SUVEREN_4_Depots wurden im Juli 2023 in einer speziellen Versuchsanlage 1:1-Brandversuche für Busdepots durchgeführt. Nach dem Kenntnisstand der Autoren war dies das erste Mal weltweit, dass LIB-Brandversuche in einem derart großen Maßstab umgesetzt wurden. Das Ziel der Brandversuche war es, eine geeignete

¹ <https://www.suveren-nec.info/>

² <https://www.suveren2use.de/>

BBA zu entwickeln und deren Wirksamkeit für die Absicherung von Busdepots bei Bränden von modernen Bussen inkl. E-Bussen nachzuweisen.

1.2 Ziel und Anwendungsbereich des White Papers

Dieses White Paper gibt Empfehlungen für die anlagentechnische Absicherung von Busdepots basierend auf den Ergebnissen von Brandversuchen im Rahmen des Forschungsprojektes SUVEREN_4_Depots. Es enthält Informationen und Hinweise für Berater, Planer, Betreiber von Busdepots, Versicherungen und genehmigende Stellen. Das White Paper ist ausschließlich für Fachleute im Bereich des Brandschutzes gedacht.

2. Räumliche Gegebenheiten in Busdepots

Es gibt verschiedene Abstellmöglichkeiten für Busse – eingeschossige Hallen, ober- und unterirdische Anlagen, seitlich offene überdachte Abstellanlagen (Carports) sowie Freiabstellanlagen. In den meisten Fällen handelt es sich bei Busdepots um eingeschossige großflächige Hallen bzw. Carports, in denen die Busse wettergeschützt abgestellt werden können. Oft besitzen Busdepots auf zwei gegenüberliegenden Seiten große Tore, die das Ein- und Ausfahren der Busse ermöglichen. In der Dachstruktur sind in der Regel Oberlichter integriert, die in vielen Fällen auch als Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) dienen.



Abbildung 1: Beispiel eines Busdepots Foto: 123RF

Gegebenenfalls befinden sich weitere räumlich abgetrennte Bereiche in dem Busdepot z. B. eine angrenzende Werkstatt, Waschstraße, Lager für Betriebsmittel oder Sozialräume.

Ist das Busdepot für E-Busse vorgesehen, befindet sich darin in der Regel die entsprechende Ladeinfrastruktur. Zu dieser kann auch ein stationärer LIB-Energiespeicher gehören.

Daneben gibt es Planungen für mehrgeschossige Busabstellanlagen. So wird beispielsweise in Hamburg eine mehrgeschossige Abstellanlage mit dem Namen „Mobilitätshub Elbinseln“ geplant, die einen Busbetriebshof für ca. 160 Elektrobusse in Form einer Hochgarage, eine darunterliegende zweigeschossige Pkw-Tiefgarage, eine Fahrradgarage und Gewerbeflächen einschließt.

3. Aufbau von (E-)Bussen

Das Grundgerüst eines Busses besteht in den meisten Fällen aus einem Stahlrahmen. Der technische Bereich im Heck des Busses ist oft vom Passagierraum durch eine Trennwand mit diversen Öffnungen z. B. für Bedien- und Wartungsklappen sowie Leitungsdurchführungen abgetrennt. Im Brandfall verlangsamt diese Trennung die Brandausbreitung aus diesem Bereich heraus in den Innenraum.

Die Wände, das Dach und das Interieur bestehen bei vielen modernen Bussen größtenteils aus verschiedenen Kunststoffen. Typische in Bussen vorkommende Materialien sind in der Abbildung 2 veranschaulicht. Die Anforderungen an das Brandverhalten der Innenraummaterialien für Busse liegen weit unter denen in anderen Transportsektoren wie Schienenfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge.

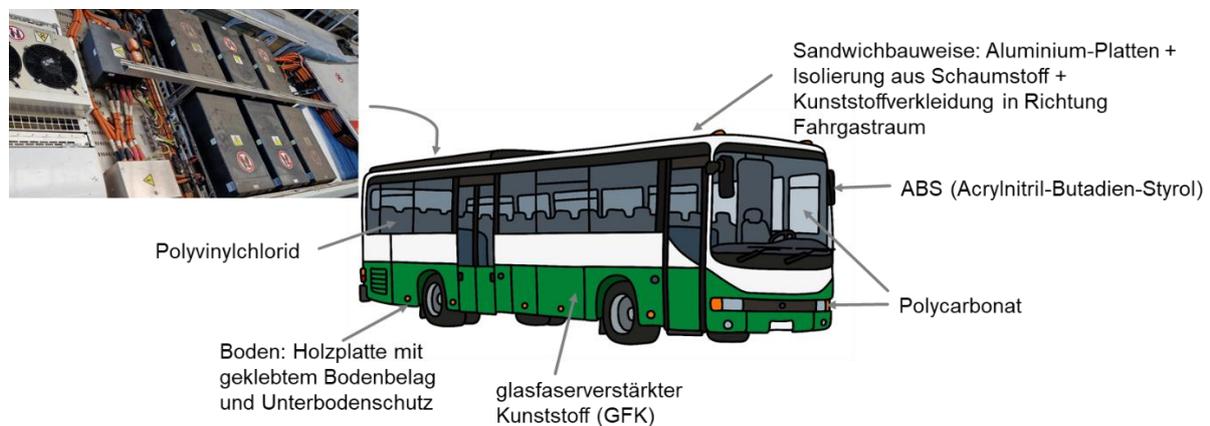


Abbildung 2: Typische Materialien im Bus und LIB auf dem Dach eines Elektrobusse. Foto: FOGTEC (Bus: 123RF)

Im Rahmen des SUVEREN_4_Depots-Projektes wurden gängige E-Busmodelle in Europa analysiert (siehe u. a. [5]). Es zeigte sich, dass E-Busse bisher vorwiegend für kurze Strecken und den Nahverkehr eingesetzt werden und ihre LIB durchschnittlich über eine Kapazität von 314 kWh verfügen. Die LIB befinden sich üblicherweise in einem Gehäuse und sind auf dem Dach (siehe Abbildung 2), im Unterbodenbereich oder im Heck verbaut. Gängige verwendete Zellchemien sind NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid), LTO (Lithium-Titanat) und LFP (Lithium-Eisen-Phosphat). Ferner wird bei E-Bussen oftmals eine Batteriekühlanlage eingebaut.

4. Brandrisiko und Auswirkungen von Bränden in Busdepots

4.1 Brandursachen

Für Dieselbusse und E-Busse sind zum Teil unterschiedliche Brandursachen relevant. Zu den Brandursachen, die bei allen Bussen möglich sind, gehören z. B. Defekte am 24-V-Bordnetz, Defekte an der mit fossilen Brennstoffen betriebenen Zusatzheizung (falls noch vorhanden) sowie Einwirkungen von außen.

Die Brandursachen bei Dieselbussen resultieren primär aus dem Dieselantrieb (z.B. undichte Einspritzleitungen der Kraftstoffversorgung), verschiedenen Nebenaggregaten wie dem Abgasturbolader und dem Abgasnachbehandlungssystem. Im Motorraum entstehen hohe Verbrennungstemperaturen, die in Kombination mit den vorliegenden Betriebsstoffen (Öl, Diesel) und Staub zu einem erhöhten Gefahrenpotenzial führen.

Bei E-Bussen besteht das höchste Brandrisiko während des Ladevorgangs, da sich die LIB dabei in einem elektrochemisch aktivierten Zustand befinden (Energiezufuhr). Dies ist ein Unterschied zu den Bussen mit konventionellem Antrieb, die sich nach dem Abstellen im Betriebshof in einem inaktiven Zustand befinden (kein Energietransfer). Zudem findet der Ladevorgang normalerweise unbeaufsichtigt statt. Das heißt, es ist kein Personal anwesend, das bei auftretenden Problemen sofort eingreifen könnte. Die Ursachen eines E-Bus-Brand sind zum einen in den LIB und zum anderen in der Ladeinfrastruktur zu finden:

- Brandursachen LIB: Fehler im Batteriemanagementsystem, Fertigungsfehler in der Batterie, Kurzschluss durch alterungsbedingte Dendritenbildung, fehlerhafte Kontaktierung, Beschädigungen der LIB durch Überladung, erhöhte Temperaturen oder mechanische Einwirkungen.
- Brandursachen Ladeinfrastruktur: elektrische Störungen, Überspannungen und Kurzschlüsse, Defekte beim Ladevorgang durch z. B. einer Quetschung von Ladekabeln, Alterung der elektronischen Komponenten der Ladestation, Sachbeschädigung der Ladestationen durch besondere Umgebungsbedingungen (z. B. Feuchtigkeit, extreme Temperaturen, Blitzeinschläge).

4.2 Brandverhalten von (E-)Bussen

Busse beinhalten unabhängig von ihrer Antriebsart signifikante Brandlasten, bedingt durch den hohen Anteil an brennbaren Kunststoffen (siehe Kapitel 3).

Bei E-Bussen ist von einer oder mehreren LIB statt eines Dieseltanks auszugehen. Die dadurch bedingte Erhöhung der Brandlast ist als vergleichsweise gering anzusehen. Die Gesamtbrandlast eines E-Busses unterscheidet sich also nicht signifikant von herkömmlichen Bussen. Für letztere

kann konservativ eine maximale Brandleistung von ca. 30 MW und für E-Busse eine maximale Brandleistung von rund 35 MW angenommen werden [6].

Typische Merkmale von Busbränden sind ein rascher Temperaturanstieg, eine sehr schnelle Brandausbreitung innerhalb des Busses und darüber hinaus das Entstehen großer Rauchmengen in kurzer Zeit sowie die Freisetzung großer Wärmemengen und daraus resultierend Temperaturen von örtlich über 1.000 °C [1].

Bei E-Bussen ist darüber hinaus das spezifische Brandverhalten von LIB zu berücksichtigen. Dem Brand einer LIB geht in der Regel ein thermisches Durchgehen (engl. *Thermal Runaway*, TR) voraus. Dabei führen selbstbeschleunigende exotherme Kettenreaktionen und interne Kurzschlüsse innerhalb einer LIB-Zelle zu einem starken Temperaturanstieg. Der TR kann sich schnell auf benachbarte Zellen und schließlich auf die gesamte Batterie ausbreiten. Durch die starke Erwärmung kommt es zu einem Platzen der Zellen und dem Ausströmen brennbarer Gase, die durch vorhandene Zündquellen, meist aus dem Inneren der Zellen, in Brand gesetzt werden können. Die Brandintensität ist am höchsten, wenn die LIB voll geladen sind [7].

Die TR-Reaktionen in den Zellen sind von außen nur schwer erkennbar und ihr Ende kann folglich nicht sicher bestimmt werden. Aus diesem Grund stellen verunfallte E-Busse ein besonderes Risiko dar, da sich die LIB noch Stunden oder sogar Tage nach einer Havarie unerwartet entzünden können.

Die Karosserie eines Busses erschwert bauartbedingt das Erreichen des Brandherdes mit Brandbekämpfungsmitteln. Das Erreichen von brennenden LIB wird zusätzlich durch das Batteriegehäuse erschwert und gestaltet sich besonders schwierig, wenn die LIB im Unterboden des Busses verbaut sind.

4.3 Brandszenario Busdepot und die Auswirkungen

Um den vorhandenen Platz bestmöglich auszunutzen, stehen die Fahrzeuge in Busdepots regelmäßig sehr eng nebeneinander. Der Mindestabstand („Mindestverkehrsweite“) zwischen den Bussen gemäß der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 1.8 „Verkehrswege“ beträgt 0,9 m. In der Praxis beträgt der Abstand zwischen den abgestellten Bussen (ohne Spiegel) rund 0,8 bis 1,4 m. Die engen Zwischenräume in Verbindung mit den geringen Brandschutzanforderungen an die verwendeten Materialien ermöglichen im Brandfall einen extrem schnellen Überschlag des Brands von einem auf das nächste Fahrzeug. Es sind jedoch insbesondere in Verbindung mit den Windbedingungen auch Brandübersprünge über größere Distanzen möglich.

In einem voll belegten Busdepot können Einsatzkräfte im Brandfall in der Regel u. a. wegen der extremen Temperaturentwicklung nur schwer wirksame Abwehrmaßnahmen durchführen. Aufgrund der hohen Brandlast und der schnellen Brandausbreitung ist dann bei einem Brand mit

einem Totalverlust der Halle bzw. des Brandabschnitts und aller darin abgestellten Busse zu rechnen, sofern keine automatische BBA vorhanden ist [1]. Bei solchen Großbränden entstehen hohe Temperaturen, die zum Versagen der Tragwerksstruktur führen können.

Neben den entstehenden finanziellen Schäden kann es zu längeren Ausfällen des Busbetriebes und Beeinträchtigungen des öffentlichen Verkehrs kommen. Hierbei spielen insbesondere die langen Wiederbeschaffungszeiten von Bussen eine wesentliche Rolle. Beim Betrieb von E-Bussen stellen die Wiederstellungszeiten für Ladeinfrastruktur eine weitere Komplikation dar.

Eine besondere Herausforderung aus brandschutztechnischer Sicht sind mehrgeschossige und unterirdische Busabstellanlagen. In den mehrgeschossigen Busdepots kann sich der Brand ohne geeignete Brandschutzmaßnahmen nicht nur in der Fläche, sondern auch von Etage zu Etage ausbreiten. Insbesondere unterirdische Busdepots sind für Löscharbeiten schwer zugänglich. Selbst wenn der Brand auf eine Etage begrenzt werden kann, so besteht dennoch die Gefahr, dass Busse aus den darüberliegenden Etagen erst dann wieder ausfahren können, wenn die Rampen nach einer Beschädigung wieder planmäßig befahrbar sind.

Ein Sonderfall sind Busdepots, die mit Apartments, Büros, Einzelhandel o. Ä. überbaut sind. Diese sind mit überbauten Tunneln vergleichbar. Nach NFPA 502 [8], Kapitel 8.4.1.1 sollen für solche Bauten Risikoanalysen erstellt werden, um Risiken und Schutzmaßnahmen abzuwägen. Die Bauelemente sollen so ausgelegt werden, dass Bauten über den Straßen und die darin befindlichen Personen vor Brandgefahren geschützt werden. Eine Kühlung und Brandbekämpfung durch eine BBA kann hier eine geeignete Schutzmöglichkeit darstellen.

4.4 Versicherungstechnische Aspekte

Ziel des Einsatzes einer BBA ist ferner, die Sachwerte in einem Depot zu schützen. Zu diesen gehören dem Wert nach in erster Linie die Busse selbst. Aber auch das Bauwerk und angrenzende Gebäude mit Bereichen wie Werkstätten, Lager, Transformatoren, Umrichtern, Ladestationen etc. können durch eine geeignete BBA sinnvoll geschützt werden. Dadurch können aufwendige bauliche Brandschutzmaßnahmen ganz oder teilweise substituiert werden.

Daneben kann durch den Einsatz einer BBA die Verfügbarkeit der Flotte und der Betriebseinrichtungen erhöht werden. Ausfallzeiten nach einem Brand und damit einhergehende Betriebsunterbrechungen sowie Einschränkungen durch notwendige Baumaßnahmen werden auf ein Minimum reduziert.

Für Versicherer ändern sich damit die Schadenerwartungswerte beim Einsatz einer BBA signifikant. Damit können neben Prämienangleichungen Reduzierungen der Anforderungen an betriebliche und bauliche Maßnahmen realisiert werden.

5. Brandversuche für die Absicherung von Busdepots

Im Rahmen des Forschungsprojektes SUVEREN_4_Depots führte das nach DIN EN ISO/IEC 17025 [9] akkreditierte Prüflabor Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH (IFAB) Brandversuche für Busdepots im realen Maßstab durch. Die Versuche wurden durch die TÜV SÜD Industrie Service GmbH (TÜV Süd) begleitet und beurteilt. Des Weiteren fand eine Beurteilung der Ergebnisse durch die Bergische Universität Wuppertal und die STUVA statt.

Das Ziel der Brandversuche war der Nachweis der Wirksamkeit einer BBA bei Bränden in Busdepots. Für die Durchführung der Brandversuche zum Erbringen des Nachweises der Eignung der BBA hat IFAB gemäß den Anforderungen der DIN EN 14972-1:2020 Annex A [10] ein Prüfkonzept erstellt.

Es wurde eine herstellereigenspezifische BBA in verschiedenen Systemkonfigurationen getestet. Die zu erfüllenden Schutzziele wurden wie folgt festgelegt:

- Verhinderung der Brandausbreitung von einem brennenden E-Bus auf benachbarte Busse,
- Minimierung der Auswirkungen des Brandes auf die Dachkonstruktion des Depots (Erhaltung der Integrität des Gebäudes),
- Ermöglichung eines wirksamen Löschangriffs durch die Feuerwehr.

Für diesen Zweck wurde ein Abschnitt eines Busdepots mit abgestellten Bussen vereinfacht nachgebildet. Dabei wurde ein konservativer Prüfansatz gewählt, der im Folgenden ausführlicher beschrieben ist.

5.1 Auswahl der Brandbekämpfungsanlage

Der erste Schritt bestand darin, das am besten geeignete Brandbekämpfungssystem auszuwählen. Im Rahmen des SUVEREN-Forschungsprojektes wurden umfangreiche Brandversuche mit LIB und Elektrofahrzeugen u. a. in Garagen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Brandbekämpfungsmittel getestet. Diese Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, dass ein besonders wirksamer Anlagentyp sogenannte Hochdruck-Wassernebel (HDWN)-Systeme sind. HDWN-Systeme arbeiten mit Drücken ab 35 bar. Die guten Kühleigenschaften von Wasser werden dabei besonders effektiv ausgenutzt, weil feinste Tropfen eine in Relation zur Wassermenge große Reaktionsoberfläche für den Wärmeübergang bilden. Durch den HDWN werden nicht nur die Oberflächen der Brandumgebung, sondern vor allem die heißen Brandgase gekühlt. Wärmestrahlung wird durch die homogen verteilten und sehr kleinen Tropfen sehr gut abgeschirmt. Gleichzeitig werden die Tröpfchen durch den hohen Druck an den Düsen ausreichend beschleunigt, um der Thermik und Windeffekten entgegenwirken zu können.

Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber Niederdruck-BBA, deren Tropfen stark von einer möglichen Luftströmung beeinflusst werden können [11].

HDWN-Systeme benötigen deutlich weniger Wasser als konventionelle Sprinklersysteme. Hierdurch können Rohrleitungen mit sehr kleinen Durchmessern verwendet werden, was wiederum zu einer geringeren statischen Belastung des Baukörpers führt. Daneben kann die HDWN-BBA dank ihrer kleinen Baugröße und niedrigem Gewicht einfacher in Bestandbauten integriert werden. Es entstehen geringere Mengen an (kontaminiertem) Löschwasser, welches bei einer ggf. geforderten Löschmittelrückhaltung aufgefangen werden müsste. Auch die Wasserbevorratung kann kleiner dimensioniert werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen und Überlegungen wurden HDWN-BBA als die aussichtsreichsten Systeme für die Absicherung von Busdepots bestimmt und in den Brandversuchen getestet.

5.2 Auslegung der Brandbekämpfungsanlage

Der nächste Schritt nach der Auswahl der BBA war eine an den Anwendungsfall angepasste Auslegung des Systems, die besondere Erfahrung und Expertise erfordert. Die gewählte Tropfenverteilung, Ausrichtung der Düsenaustrittsöffnungen, Positionierung und Abstände der Düsen zueinander sowie die Beschleunigung der Tröpfchen wurden so festgelegt, um die notwendige Wassermenge auszubringen, eine sinnvolle Wasserverteilung zu realisieren und den Wasserebel ausreichend stabil gegen Strömungseinflüsse wie die Thermik des Brandes und Winde auszubilden. Abbildung 3 zeigt ein schematisches Schaubild einer HDWN-BBA am Beispiel einer Busabstellung.

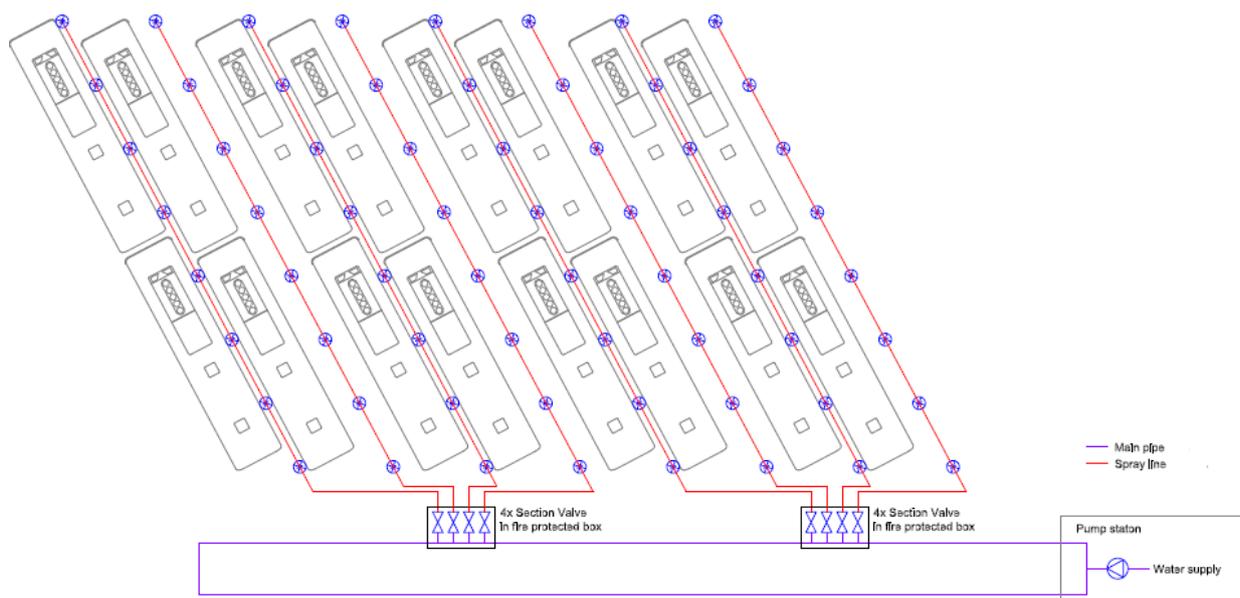


Abbildung 3: Schematisches Schaubild einer HDWN-BBA in einer Busabstellung.

5.3 Versuchsraum und Versuchsbedingungen

Die Brandversuche wurden in einem Raum mit einer Deckenhöhe von ca. 5,15 m durchgeführt.

Reale Busdepots sind im Betriebsfall gut belüftet. Um die realen Bedingungen in einem Depot nachzubilden (ggf. offenes Depot ohne Seitenwände oder offene Tore), wurde im Versuchsraum eine Ventilation über regelbare Ventilatoren sichergestellt (Strömungsgeschwindigkeit ca. 1 bis 2 m/s).

5.4 Busattrappe und Brandlasten

Reale Fahrzeuge und deren Materialien sind sehr hersteller- und modellspezifisch und somit für reproduzierbare und repräsentative Brandversuche wenig geeignet. Es wurden daher eine wiederverwendbare Busattrappe (Abmessungen 12,0 m x 2,5 m x 3,4 m) und Ersatzbrandlasten – definierte Mengen an Klasse-A- und -B-Brandlasten – verwendet (siehe Abbildung 4a). Diese repräsentieren die Brandlast eines realen Businnenraumes und garantieren eine sehr schnelle Brandausbreitung. Dabei handelt es sich um Brandlasten, wie sie für ähnliche Brandszenarien im Rahmen von standardisierten Zertifizierungs- und Zulassungsversuchen regelmäßig vorgesehen werden [12] [13]. Die Ersatzbrandlasten wurden entsprechend den räumlichen Gegebenheiten in realen Bussen in der Busattrappe positioniert.

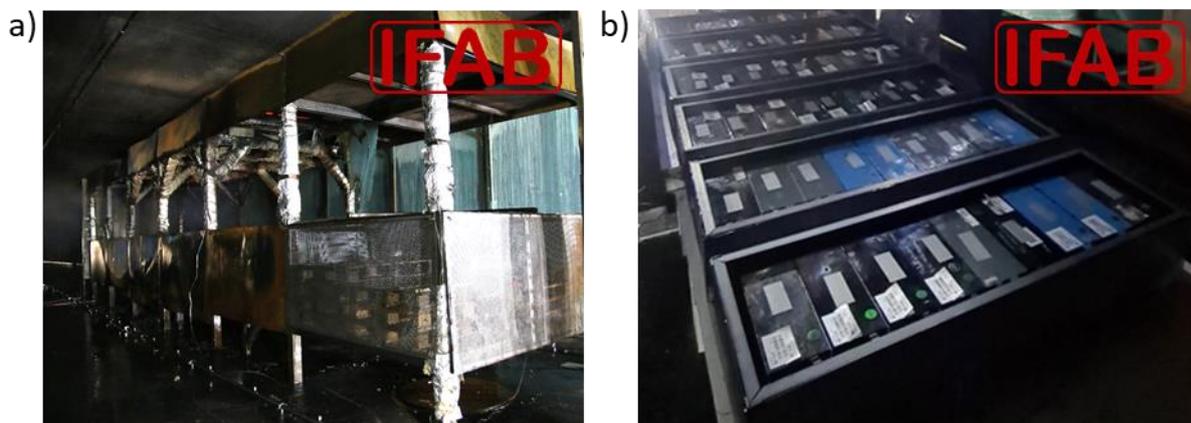


Abbildung 4: a) Mock-up des Busses, b) LIB-Brandlasten – Module wie sie in der Automobilindustrie eingesetzt werden.

Ferner wurden sechs Metall-Kästen in der Busattrappe positioniert. In diesen wurden LIB-Module, bestehend aus prismatischen NMC-Zellen, angeordnet (siehe Abbildung 4b). Alle Module waren zu mindestens 95 % aufgeladen. Die LIB wurden je nach Versuchsszenario entweder auf dem Dach oder im Unterboden positioniert. Die Anordnung im Unterboden ist besonders kritisch wegen der großen Menge an Brandlasten in direkter Nähe zum Innenraum und der erschwerten Erreichbarkeit der brennenden LIB durch das Löschmittel. Bei einer Anordnung auf dem Dach ist hingegen im Falle eines Brandes eine hohe thermische Belastung der Gebäudestruktur zu

erwarten. Die Anordnung im Heck ist mit der Anordnung im Unterboden vergleichbar, jedoch weniger kritisch und wurde deshalb nicht explizit betrachtet.

Neben, vor und hinter der Busattrappe wurden Zielbrandlasten aus Kunststoffplatten positioniert. Damit wurden die Seitenwände bzw. Fronten und Rückseiten von benachbarten Bussen realitätsnah nachgebildet (vgl. Abbildung 6 für die Ausführung der Zielbrandlasten).

5.5 Messkonzept und Versuchsdurchführung

An insgesamt 50 Messstellen wurden Temperaturen an der Decke des Versuchsraumes, an den Zielbrandlasten, an der Decke der Busattrappe und an den LIB gemessen. Gasmessungen erfolgten mittels eines Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers (FT-IR) und anderer Gassensoren. Zur visuellen Erfassung dienten IR- und Videokameras. Zur Beurteilung, ob es zu einer Auswaschung von Fluorwasserstoff (HF) durch die BBA kommt, wurden die entstehenden Brandgase in eine Carbonatpufferlösung eingeleitet und anschließend der Gehalt an gelösten Fluoridionen in der Pufferlösung mittels Ionenchromatographie (IC) bestimmt.

Der Versuchsablauf beinhaltete die folgenden Schritte:

1. Zündung der LIB und der Klasse-A- und Klasse-B-Brandlast mittels Heptan-Brandwannen³.
2. Verzögerte Aktivierung der BBA. Dies ist als konservativ zu bewerten, da in Realität ein Detektionssystem die BBA deutlich früher aktivieren würde. Abbildung 5 zeigt, dass der Brand eine signifikante Größe erreicht hat, bevor die BBA aktiviert wurde.
3. 60 min Wirkungszeit der BBA (Betriebszeit der Pumpen)
4. Deaktivierung der BBA und Ablöschen der Restbrände durch Feuerwehrpersonal
5. Untersuchung der Schäden.

³ Beide Brandlastbestandteile konnten getrennt voneinander gezündet werden.



Abbildung 5: Brandentwicklung vor der Aktivierung der BBA.

6. Ergebnisse der Brandversuche

Bei den Brandversuchen wurde eine sehr schnelle Brandentwicklung und -ausbreitung innerhalb des Busses festgestellt. Fast die gesamte Brandlast (vor allem die LIB) wurde jeweils durch den Brand verzehrt.

6.1 Zielbrandlasten

An den Zielbrandlasten waren keine Schädigungen festzustellen (Abbildung 6).



Abbildung 6: An den seitlichen Zielbrandlasten (benachbarter Bus) waren keine Beschädigungen festzustellen.

Abbildung 7 zeigt die an den seitlichen Zielbrandlasten gemessenen Temperaturen. Die Temperaturen an den Zielbrandlasten waren über den gesamten Versuchsverlauf niedrig (unter 70 °C).

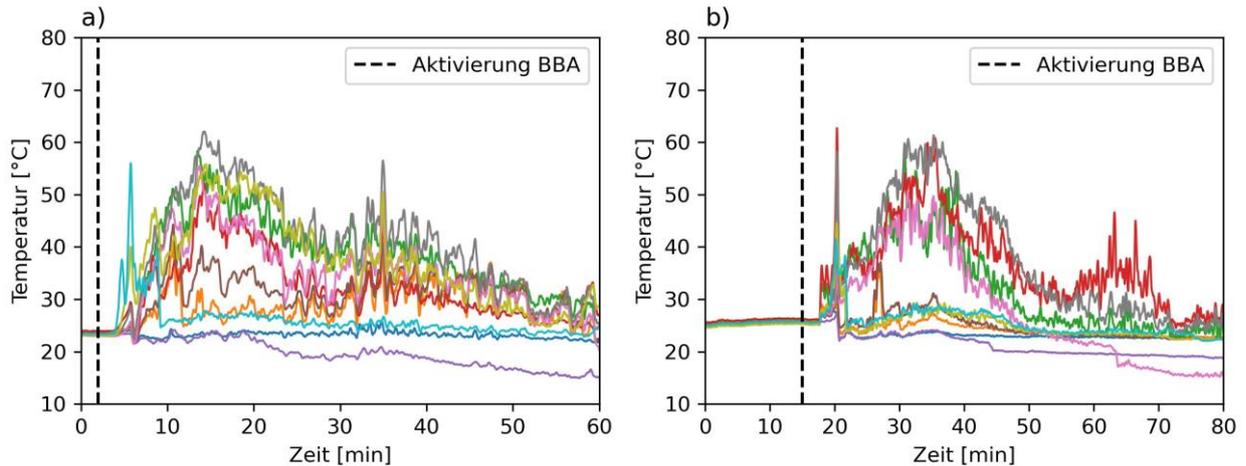


Abbildung 7: An den seitlichen Zielbrandlasten (benachbarter Bus) gemessene Temperaturen a) bei einem Versuch mit LIB im Unterboden und b) bei einem Versuch mit LIB auf dem Dach. Der Nullpunkt auf der x-Achse ist bei der Zündung der Ersatzbrandlast gesetzt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind nicht alle Thermoelemente dargestellt.

6.2 Temperatur an der Decke

Um den Schutz der Dachstruktur des Busdepots beurteilen zu können, wurden Temperaturen unter der Decke gemessen. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute thermische Kontrolle durch die BBA.

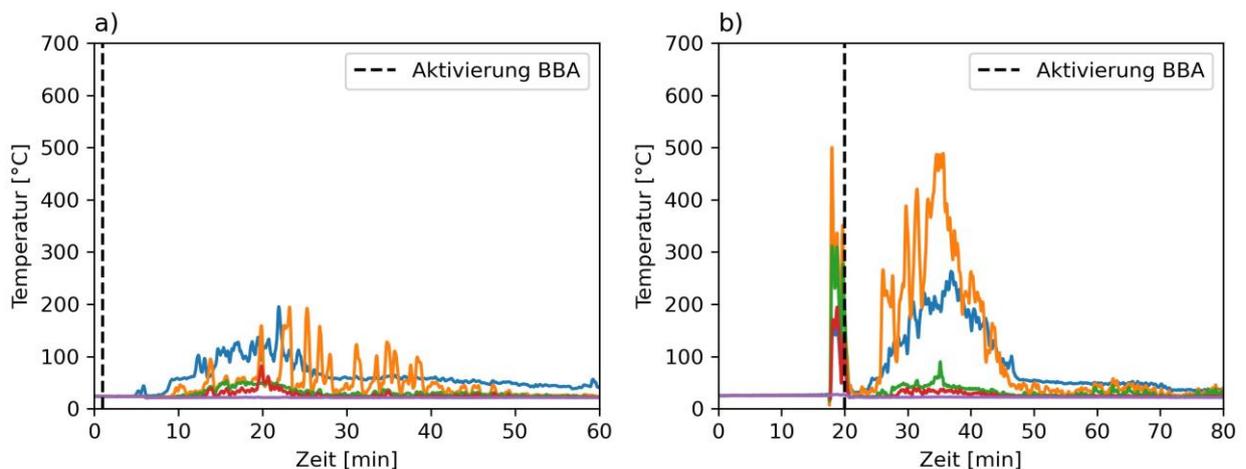


Abbildung 8: Unter der Decke mittig über dem Bus gemessene Temperaturen a) bei einem Versuch mit LIB im Unterbodenbereich und b) bei einem Versuch mit LIB auf dem Dach. Der Nullpunkt auf der x-Achse ist bei der Zündung der Ersatzbrandlast gesetzt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind nicht alle Thermoelemente dargestellt.

Alle Thermoelemente im Versuch mit LIB im Unterbodenbereich zeigten ausreichend niedrige Temperaturen, sodass die Schädigung einer Dachkonstruktion durch Wärmeeintrag ausgeschlossen werden kann (Abbildung 8 a). Im Versuch mit LIB auf dem Dach waren die Messwerte von 10 der 12 Thermoelemente dauerhaft unter 100 °C, siehe Abbildung 8 b. Zwei Thermoelemente zeigen für eine kurze Dauer eine erhöhte Temperatur (orange und blau in Abbildung 8 b). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flammen durch die vorherrschende

Luftströmung sehr nah an diese Messstelle herangetragen wurden. Diese kurzzeitige lokale Temperaturbelastung würde nicht zu bedeutenden Schäden der Dachkonstruktion führen, da die gemessenen Gastemperaturen nicht die Temperaturen im Bauteil repräsentieren. In der kurzen Zeitspanne, in der erhöhte Temperaturen vorlagen, ist ein kritischer Wärmeübertrag in die Konstruktion nicht zu erwarten. Der Bereich der erhöhten Temperaturen ist zudem lokal begrenzt.

6.3 Schadstoffkonzentrationen

Die bei den Brandversuchen entstehenden Gase wurden mittels FT-IR analysiert. Den größten Anteil bildeten die üblichen Verbrennungsprodukte Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Wasser. Dazu kamen zahlreiche weitere toxische und korrosive Gase wie flüchtige organische Verbindungen (VOC), saure Verbindungen (darunter das LIB-spezifische HF) und Stickoxide (Tabelle 1). Zu beachten ist dabei, dass es sich um eine Punktmessung an einer Ansaugstelle in Luftströmungsrichtung hinter dem Brandort handelte. Es konnten keine Aussagen zu den Gaskonzentrationen in anderen Bereichen des Raumes abgeleitet werden.

Tabelle 1: Mittels FT-IR gemessene Gase bei einem Brandversuch mit LIB auf dem Dach, Auswertung der maximal gemessenen Werte bis zu einer Versuchsdauer von 60 min. Gase, die in einer Konzentration von 2 ppm und weniger gemessen wurden, sind nicht aufgeführt.

| ≤ 50 ppm | ≤ 15 ppm | ≤ 6 ppm | ≤ 4 ppm | ≤ 3 ppm |
|----------|-----------------|-------------|----------|-----------------|
| Methan | NO | Propen | Benzol | SO ₂ |
| Ethen | NO ₂ | Acetaldehyd | HF | Phenol |
| | | n-Butan | HCl | Methanol |
| | | Essigsäure | Ammoniak | |
| | | Acetylen | | |
| | | Acrolein | | |

Die Auswertungen der ionenchromatographischen Messungen zeigen höhere HF-Konzentrationen, was vermutlich auf den unterschiedlichen Ort der Probennahme zurückzuführen ist. Außerdem handelte es sich um zwei verschiedene Brandversuche (IC: LIB im Unterbodenbereich, FT-IR: LIB auf dem Dach). Die gemessene HF-Menge reduzierte sich im Laufe des Versuches von ca. 59 ppm auf ca. 16 ppm, was auf eine teilweise Auswaschung des HF durch den Wassernebel hindeuten könnte. Solch eine Auswaschung reduziert die Auswirkungen der stark korrosiven Rauchgase auf das Bauwerk deutlich. Es ist dabei anzumerken, dass die Analyse des Auswascheffektes nur bei einem Versuch erfolgte und durch die Versuchsbedingungen erheblich erschwert wurde. Weiterführende Untersuchungen hierzu sind in Planung.

7. Schlussfolgerungen aus den Brandversuchen

Der in den Brandversuchen beobachtete Brandverlauf ist bezüglich der Ausbreitungsgeschwindigkeit und seiner Intensität vergleichbar mit realen Brandereignissen. Die Busattrappe ermöglichte reproduzierbare Testszenarien. Um den schlimmstmöglichen Fall abzubilden, hat das Forschungskonsortium einen konservativen Ansatz mit einer sehr späten Aktivierung der BBA und einem Ausbruch des Brands gleichzeitig an mehreren Stellen gewählt. Die zu erwartende Brandentwicklung ist in der Realität im Vergleich zu den gewählten Testszenarien weniger schnell und somit leichter zu beherrschen.

Im Rahmen der Versuchsserien konnte ferner festgestellt werden, dass eine Verdopplung der LIB-Brandlast sich vorwiegend durch eine Verlängerung der Branddauer auswirkte, während sich die gemessenen Temperaturen (bzw. die Brandleistung) nicht erhöhten. Daher sind die gewonnenen Ergebnisse auch auf E-Busse mit sehr unterschiedlichen LIB-Kapazitäten anwendbar.

Es wurde die NMC-Zellchemie für die Brandversuche gewählt, da diese sich durch eine höhere Brandintensität auszeichnet, als die anderen in Bussen möglicherweise eingesetzten Zellchemien. Die Ergebnisse sind daher als konservativ zu bewerten und repräsentieren auch Busse mit weniger kritischen Zellchemien.

Die Wirksamkeit der gewählten BBA konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Alle Schutzziele wurden erreicht. Die getestete Anlage war durch die ausgeprägte Kühlwirkung des Wassernebels in der Lage, eine Brandausbreitung auf benachbarte Busse bzw. die Zielbrandlasten zu verhindern (sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung).

IFAB und TÜV Süd bestätigten die Wirksamkeit des getesteten HDWN-Systems für die Anwendung in Busdepots. Je nach den definierten Schutzzielen können unterschiedliche HDWN-Systemkonfigurationen in Frage kommen.

8. Empfehlungen für die anlagentechnische Absicherung von Busdepots

Busdepots sind in der Regel Sonderbauten, für die gesonderte Brandschutzkonzepte zu erstellen sind. Da Brände in Busdepots oftmals inakzeptable finanzielle und gesellschaftliche (z. B. Ausfall von Bussen) Folgen mit sich bringen, sind effiziente Brandschutzmaßnahmen für den Betreiber unerlässlich. Sofern bauliche und organisatorische Maßnahmen nicht infrage kommen, wird die Installation von geeigneten BMA und BBA empfohlen. Bauliche und organisatorische Maßnahmen (z. B. größerer Abstand der Fahrzeuge zueinander, kleinere Brandabschnitte) sind nicht Bestandteil dieses White Papers und können der VDV-Schrift 825 [14] entnommen werden.

8.1 Branderkennung

Ein wichtiger Grund für die Notwendigkeit eines Detektionssystems in Busdepots ist eine frühestmögliche Warnung von anwesenden Personen und Alarmierung der Feuerwehr. Daneben erfolgt über diese Detektion die Aktivierung der BBA. Zusätzlich kann auch eine manuelle Aktivierung erfolgen. Da sich Brände in Busdepots durch eine hohe Intensität und eine schnelle Ausbreitung auszeichnen, ist eine frühzeitige automatische Aktivierung der BBA durch eine BMA von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Brandbekämpfung.

Die eingesetzte BMA sollte in der Lage sein, Brände in Fahrzeugen, Hallen, Ladeinfrastruktur, Werkstätten und Betriebsgebäuden zuverlässig zeitnah zu detektieren und zu lokalisieren. Dabei empfiehlt sich die Detektion von Rauch und/oder LIB-spezifischen Venting-Gasen. Es ist eine BMA zu wählen, welche auf die betriebsüblichen Abgase der Busse, Feinstaub und andere unter normalen Betriebsbedingungen in Busdepots vorkommende Luftverunreinigungen nicht reagiert, um unnötige Fehlalarme zu vermeiden.

Zudem ist eine geeignete Anlagentechnik zu wählen, die die Lokalisierung des Brandes und in der Folge die Aktivierung des oder der betroffenen Löschbereiche ermöglicht.

8.2 Brandbekämpfung

In Busdepots befinden sich bei voller Belegung sehr hohe Brandlasten. Durch Konvektion und Strahlung breitet sich ein Brand schnell auf benachbarte Busse und anschließend auf den gesamten Brandabschnitt aus. Sind E-Busse vorhanden, ist dabei auch das spezifische Brandverhalten von LIB zu berücksichtigen. Die eingesetzte BBA soll in der Lage sein, die Ausbreitung des Brands auf weitere Busse im Busdepot zu verhindern und das Tragwerk des Busdepots vor kritischem Wärmeeintrag zu schützen. Die Auslegung der BBA muss auf Grundlage von Brandversuchen im Realmaßstab erfolgen. Im Rahmen des Forschungsprojektes SUVEREN_4_Depots wurden hierfür entsprechende Versuchsanforderungen definiert.

Nach einer Analyse der Schadensszenarien in Busdepots und basierend auf Erkenntnissen aus früheren Brandversuchen u.a. im Rahmen des Projektes SUVEREN, wurden HDWN-BBA als die bevorzugte Technologie für den anlagentechnischen Schutz von Betriebshöfen festgelegt (siehe Kapitel 5.1 für eine detaillierte Erläuterung). In umfangreichen Brandversuchen konnte die bereits in früheren Untersuchungen gezeigte Wirksamkeit des HDWN bei LIB- und Fahrzeugbränden (vgl. Kapitel 5.1) bestätigt werden. In dem hier untersuchten Fall „Betriebshöfe“ hatte die eingesetzte Anlage eine deutlich größere Brandlast zu kontrollieren als in früheren Untersuchungen mit Pkw-Bränden. Dies wurde bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass eine HDWN-BBA bei Bränden in Busdepots sehr wirksam ist und

die Brandausbreitung auf andere Busse verhindern kann. Eine Löschung des Brandes im Bus ist nicht möglich.

Da der Wasserdampf ungefährlich für anwesende Personen ist, wird keine Vorwarnzeit für die Aktivierung der BBA benötigt und Einsatzkräfte können sich frei im Wasserdampf bewegen (Abbildung 9). Die hohe Kühlwirkung des HDWN ermöglicht eine sicherere Flucht anwesender Personen (z. B. Mitarbeiter) und erleichtert den Löschangriff der Feuerwehr.



Abbildung 9: Einsatzkräfte im Wasserdampf.

Der Wasserdampf entzieht dem Brand schnell und effizient die Energie und reduziert dadurch die Rauchgasemissionen. Zusätzlich werden Ruß und Schadstoffe zum Teil im Wasser gebunden. Auch batteriespezifische Venting-Gase wie Fluorverbindungen werden durch den Wasserdampf teilweise ausgewaschen. Die Reduzierung der Rauchgasmenge verringert die Kontamination des Gebäudes und der anderen Busse. Dadurch wird eine Schadenminimierung erzielt.

Da bei HDWN-BBA kein geschlossener Raum wie beispielsweise bei gasbasierten BBA erforderlich ist, können toxische und entzündliche Rauchgase sowie große Wärmemengen durch RWA und Tore unmittelbar aus dem Busdepot abgeleitet werden. Zugleich erübrigt sich durch die Verwendung der BBA z. B. die in einem Fall angedachte Ausführung des Depotdachs aus Planen, die im Brandfall wegbrennen sollen. Unter Einsatz der BBA können Depots geschlossen und mit einem massiven und wärmeisolierten Dach errichtet werden. Dies ermöglicht eine effizientere und energiesparendere Temperierung des Depots und Vorkonditionierung der Busse (heizen im Winter, kühlen im Sommer).

Nebenbereiche des Busdepots – z. B. Transformatoren, Kabelkanäle, Schaltanlagen, Umrichter, stationäre Energiespeicher – können ebenfalls durch HDWN-BBA unter Verwendung einer gemeinsamen Pumpenanlage abgesichert werden (Abbildung 10). Dies ist wichtig für die Kontinuität des gesamten Betriebes.



Abbildung 10: Beispiele für andere Bereiche, die sich durch die gleiche Art der BBA absichern lassen. Von links nach rechts: Transformatoren, Kabelkanäle, Schaltanlagen, stationäre Energiespeicher. Fotos: FOGTEC.

Erste Berechnungen haben gezeigt, dass in der Gesamtbetrachtung der Einsatz einer HDWN-BBA in Busdepots zu Kosteneinsparungen führen kann. Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Einsparungen lassen sich aber grundsätzlich erzielen bei der Reduzierung der Anzahl von Brandwänden, einer kleineren Löschwasserbevorratung und ggf. -rückhaltung (siehe Kapitel 5.1), dem Wegfall eines zusätzlichen Brandschutzes unter dem Dach des Depots etc. Daneben können Einsparungen im operativen Bereich wie bei der Temperierung des Depots bzw. der Busse und einfache bzw. flexiblere Zugänglichkeit und Nutzung der Depotflächen einen finanziellen Nutzen schaffen. Im Vordergrund dürften aber Überlegungen in Richtung des Schadenerwartungswertes im Brandfall hinsichtlich des eigentlichen Sachschadens, des Betriebsausfalls und der Kosten für Mieten von Ersatzfahrzeugen und Ersatzflächen stehen.

9. Vorgehen bei der Genehmigung eines Busdepots mit BBA

Bei der Planung und folgenden Genehmigung eines Busbetriebshofes sind die einschlägigen Richtlinien und gesetzlichen Anforderungen zu beachten. Daneben kommen zumeist Anforderungen der Versicherer in Betracht. Die behördlichen Anforderungen beschränken sich in der Regel auf den Schutz von Personal und der Einsatzkräfte sowie den Umgang mit kontaminiertem Löschwasser. In Deutschland ist regelmäßig ein Feuerwehrplan nach DIN 14095 [15] zu erstellen und mit der zuständigen Brandschutzstelle abzustimmen. Nach der DIN 14675-1 [16] ist ein Brandmeldekonzept zu erstellen.

Eine BBA, sofern Teil des Brandschutzkonzeptes, wäre nach einem anerkannten Regelwerk bzw. dem Stand der Technik zu errichten. Hierfür bieten sich einschlägige Richtlinien wie die EN 14972 oder die NFPA 750 [17] an. Besonders der SOLIT2-Leitfaden [13] kommt hier in Frage, da dieser ähnliche Anlagen für Tunnel und die Anforderungen an solche definiert. Die VDV-Schrift 825 [14] bietet weitere wertvolle Hinweise für die Einbettung einer BBA in ein Gesamtkonzept.

Eine BBA für Depots muss nach der EN 14972 [10] von einem nach ISO 17025 [9] akkreditiertem Prüflabor in Realbrandversuchen getestet und abgenommen werden. Entsprechende Nachweise sind für Planer, Behörden und Versicherer vorzuhalten. Eine Abnahme soll gemäß Baurecht durch einen Sachverständigen für BBA erfolgen.

10. Fazit

Effiziente Brandschutzkonzepte für Busdepots erfordern die Berücksichtigung der von neuen Bussen mit alternativen Antrieben ausgehenden Risiken. Um belastbare Empfehlungen für die anlagentechnische Absicherung von Busdepots geben zu können, wurden Brandversuche im Realmaßstab in Übereinstimmung mit den Anforderungen der EN 14972-1:2020 Annex A durchgeführt. Es wurden ein brennender E-Bus sowie unmittelbar angrenzende Busse nachgebildet. Als die am besten geeignete Brandbekämpfungstechnologie wurde eine Hochdruck-Wassernebel-BBA identifiziert. Die Wirksamkeit der getesteten HDWN-BBA wurde erfolgreich nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen, dass die effektive Kühlung durch den Wassernebel die Ausbreitung des Brandes auf benachbarte Busse verhindert, für einen Schutz des Gebäudes vor thermischer Einwirkung sorgt und die Arbeit der Feuerwehr erleichtert. Dabei ist eine frühzeitige Aktivierung der BBA durch ein geeignetes Detektionssystem erforderlich.

11. Literaturverzeichnis

- [1] VdS 0825:2023-03 (01), „ Brandschutz in Betriebshöfen für Linienbusse“.
- [2] [Online]. Available: <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/neue-erkenntnisse-zur-brandursache-im-busdepot-in-stuttgart-100.html>. [Zugriff am 17.08.2023].
- [3] [Online]. Available: <https://www.ddorf-aktuell.de/2021/07/30/duesseldorf-heerdt-technische-ursache-fuehrte-zum-brand-im-busdepot/>. [Zugriff am 17.08.2023].
- [4] DGUV, „Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden,“ 2020.
- [5] „Portfolio: All the electric buses on the european market,“ *Sustainable Bus*, Mai 2023.
- [6] H. Raza und S. Li, „The impact of battery electric bus fire on road tunnel,“ in *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, 2023, pp. 3280 - 3288.
- [7] H. Li, Q. Duan, C. Huang und Q. Wang, „Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with Li (Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ as cathode,“ *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 375, pp. 241 - 254, 2019.
- [8] NFPA 502, *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2023.

- [9] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017).
- [10] DIN EN 14972-1:2021-06, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Feinsprüh-Löschanlagen - Teil 1: Planung, Einbau, Inspektion und Wartung.
- [11] *Interne Versuchsdokumentation Windkanal, FOGTEC – Eurotunnel, 1999.*
- [12] IMO (International Maritime Organization), *Revised Guidelines for the approval of fixed water-based fire-fighting systems for ro-ro spaces and special category spaces, 2020.*
- [13] SOLIT² Consortium, *Engineering Guidance for a Comprehensive Evaluation of Tunnels with Fixed Fire Fighting Systems, 2012.*
- [14] *VDV-Schrift Nr. 825: Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben, 2023.*
- [15] DIN 14095:2007-05, Feuerwehrpläne für bauliche Anlagen.
- [16] DIN 14675-1:2020-01, Brandmeldeanlagen - Teil 1: Aufbau und Betrieb.
- [17] NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 2023.

Haftungsausschluss

Dieses White Paper wurden von den Autoren nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Es ist ausschließlich für Experten im Bereich des Brandschutzes gedacht. Der Leser hat jeweils seine eigenen Schlüsse für die Verwendung von Informationen, Hinweisen und Schlussfolgerungen in diesem White Paper zu ziehen und deren Eignung zu beurteilen. Die Herausgeber und die Autoren schließen jede Haftung für den Inhalt und Form dieser Publikation aus.

Impressum

Referenz: "SUVEREN_4_Depots "

Herausgeber / IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH

Autoren: Max Lakkonen, Rajko Rothe
Pankstraße 8, Haus A 13127 Berlin
Tel: +49 (0)30 – 643185 900
info@ifab-fire.com, www.ifab-fire.eu

Bergische Universität Wuppertal

Monique Glockmann, Katja Klicker, Univ.-Prof. Dr. Roland Goertz
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Chemische Sicherheit und Abwehrender Brandschutz
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut

Tim Oestreich
Abteilung Faseroptische Sensorsysteme
Arbeitsgruppe Batteriesensorik
Am Stollen 19H, 38640 Goslar
www.hhi.fraunhofer.de/

Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. – STUVA

Dipl.-Ing. Daniel Hahne, Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln
www.stuva.de

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV)

Wolfgang Reitmeier
Kamekestr. 37- 39, 50672 Köln

FOGTEC Brandschutz GmbH

Dr. Anda Šulce, Dirk Sprakel, Lara Bonn, Tim Usner
Schanzenstr. 19A, 51063 Köln
Tel.: +49 221 96223 0
contact@fogtec.com, www.fogtec.com

Version: 1.0

Stand: November 2023