

Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

FA 15.563

Forschungsstellen: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA), Köln
ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH, Linz
Universität Regensburg, Institut für Psychologie, Lehrstuhl für Klinische Psychologie und Psychotherapie (Prof. Dr. A. Mühlberger)

Bearbeiter: Mühlberger, A. / Pauli, P.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2014

1 Aufgabenstellung

Automatische Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Straßentunneln finden derzeit nur außerhalb Europas, speziell in Australien und Japan, breite Anwendung. Dort existieren bereits seit geraumer Zeit nationale Vorschriften, welche die Installation von BBA grundsätzlich fordern. Ungeachtet der indifferenten Vorschriftenlage besteht weltweit erkennbar eine Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl für neue als auch für bestehende Tunnel zunehmend BBA als mögliches Ausstattungsmerkmal mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Regelwerke geben diesbezüglich jedoch bis dato keine Hinweise, wie mit der Thematik BBA in Straßentunneln speziell im Hinblick auf mögliche Kompensationsmöglichkeiten umzugehen ist. Aus deutscher Sicht bestand daher die Notwendigkeit einer unabhängigen Untersuchung, um die zukünftige Bedeutung dieser Anlagen bei der Ausstattung von Tunneln im Bereich der Bundesfernstraßen einschätzen zu können.

Ziel des Projekts war die Erarbeitung erster abgesicherter Aussagen zur Wirksamkeit von Brandbekämpfungsanlagen beim Einsatz in Straßentunneln in Abhängigkeit von den verschiedenen Systemtypen sowie die Erarbeitung abgesicherter Entscheidungsgrundlagen, die seitens des Bauasträgers bei der Abwägung des Einsatzes dieser Anlagen herangezogen werden können. Neben technischen Gesichtspunkten sollten auch die möglichen Einflüsse auf das menschliche Verhalten berücksichtigt werden. Offene und zu untersuchende Fragen waren dabei insbesondere, ob und wie durch die Anlagen insbesondere das vordringlich einzuhaltende Schutzziel der Selbstrettung beeinflusst wird, welches Verhalten des Nutzers bei einer aktivierten Anlage zu erwarten ist und wie BBA in risikoanalytische Modelle zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln einbezogen werden können.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Grundlagenforschung

Im Zuge der Ausarbeitung des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Grundlagenstudien durchgeführt. Um die Unterschiede der in der Praxis zum Einsatz kommenden BBA vergleichen zu können, wurden zunächst die allgemeinen physikalischen und technischen Grundlagen von Verbrennungsvorgängen sowie die daraus abgeleiteten Löschrategien erarbeitet. Anschließend wurden wahrnehmungs- und emotionspsycholo-

gische Grundlagen zusammengestellt, welche die Basis von Probandenversuchen bilden. Ebenfalls als Grundlage für die weitere Bearbeitung gelten die zum Zeitpunkt der Bearbeitung für den Einsatz von BBA in Straßentunneln gültigen Leitlinien und Regelwerke beziehungsweise die in der Vergangenheit durchgeführten Brandversuche und die daraus gewonnenen Erkenntnisse. Erfahrungen aus der Praxis vervollständigen die Betrachtung: dabei wurden sowohl die wenigen realen Brandereignisse mit Einsatz einer BBA analysiert als auch die Inhalte der durchgeführten Expertenbefragungen interpretiert.

2.2 Beurteilung der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelnutzer

Die Auswirkungen einer BBA auf die Tunnelnutzer, im Speziellen der Einfluss der Aktivierung einer BBA auf das Erleben und Fluchtverhalten, wurden mittels Probandenversuchen in virtueller Versuchsumgebung untersucht. In der Versuchsanordnung wurden zwei Probandengruppen mit einem realistischen Brandszenario in einem Tunnel konfrontiert (siehe Bild 1), wobei bei einer Versuchsgruppe zusätzlich zur Rauchausbreitung auch die Aktivierung einer Wasserebelanlage simuliert wurde.

Zusätzlich wurde das Verhalten von Probanden untersucht, die außerhalb des Einflussbereichs der BBA zum Stehen kommen. Ziel war die Erhebung von Verhaltensdaten bezüglich Fluchtziel und Zeitdauer bis zum Verlassen des Fahrzeugs im Vergleich zu den Probanden, die im Wirkungsbereich der aktivierten BBA zum Stehen kommen.

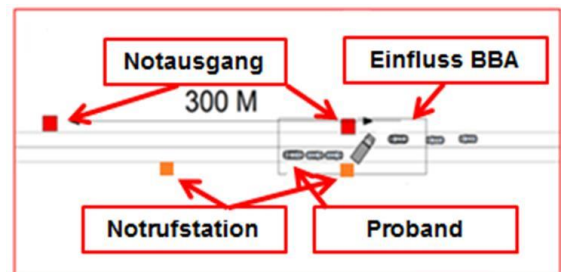


Bild 1: Schematische Darstellung des Brandszenarios im Tunnel

Im Speziellen bestand der Versuchsablauf aus einer Vorbefragung (Fragebogen), einem Fahrzenario hinter einem Lenkrad (Versuchsteil A), einem Fluchtszenario zu Fuß (Versuchsteil B) und einer Endbefragung (Fragebogen). Durch die Kombination von Verhaltensdaten aus beiden Versuchsteilen und den Fragebogendaten lässt sich ein umfassendes Bild über das Verhalten und Erleben der Probanden geben. Dieses ermöglicht es, Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Verhalten und Erleben der Versuchsgruppen aufzuzeigen und Rückschlüsse auf den Einfluss der Aktivierung einer BBA auf Tunnelnutzer zu zeigen, die sich in dem Aktivierungsbereich aufhalten.

2.3 Beurteilung der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen

Als Grundlage für die weitere Bearbeitung wurden verschiedene Tunneltypen definiert. Hierzu wurden ein Gegenverkehrs-

und ein Richtungsverkehrstunnel mit jeweils 1 200 m Länge herangezogen, welche gemäß RABT ausgestattet sind und bei denen zwei unterschiedliche Lüftungssysteme eingesetzt werden können. Neben der Verkehrsart wurde bei den beiden modellierten Tunneltypen bei der Verkehrsstärke (20 000 beziehungsweise 70 000 Fz/Tag), bei den Stautunden pro Jahr im Tunnel (30 beziehungsweise 500 h) und bei der Lüftungsauslegung (30 MW beziehungsweise 100 MW) variiert.

Um mögliche Kompensationsmaßnahmen bei dem Einsatz von BBA bewerten zu können, wurden Untervarianten zu den beiden Tunneltypen mit Variationen (1) des Notausgangsabstands (200/300/400 m), (2) des Lüftungssystems (Rauchabsaugung/mechanische Längslüftung) und (3) der Bemessungsbrandleistung (100/30/5 MW) gebildet. Die modellierten Tunneltypen und deren Untervarianten wurden im Zuge der risikobasierten Wirkungsbeurteilung mit und ohne Aktivierung der BBA untersucht.

Zusätzlich wurde zu Vergleichszwecken für jeden der drei BBA-Typen eine Konzeptionierung der Anlage durchgeführt. Die Dimensionierung der Bestandteile und die Definition von Parametern (zum Beispiel Applikationsrate) basieren auf den im Rahmen der Interviews erhaltenen Herstellerangaben und auf den für diese Anlagen üblichen Standardwerten.

Neben einer Analyse der Wirksamkeit von BBA auf Basis von analytischen Überlegungen, Ergebnissen von Brandversuchen und der relativ begrenzten praktischen Erfahrungen, erfolgte eine Beurteilung der Wirksamkeit auch auf Basis systematischer Analysen mithilfe von Simulationen und Modellrechnungen. Der Fokus war dabei auf das Schutzziel Personenschutz gerichtet.

Basis der risikoanalytischen Bewertung war das Forschungsprojekt FE 03.0378/2004/FRB "Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln" und das in diesem Forschungsvorhaben definierte Risikomodell. Dieses Risikomodell wurde für die Zwecke des gegenständlichen Forschungsvorhabens in einigen Punkten und hinsichtlich einiger Parameter modifiziert, um die im Rahmen des gegenständlichen Projekts untersuchten Aspekte realitätsnäher abbilden zu können.

Des Weiteren wurde die Wirkung einer BBA in das Rauchausbreitungsmodell integriert. Dabei wurde grundsätzlich zwischen der Nah- und der Fernwirkung auf den Brand unterschieden, wobei die Nahwirkung den Einfluss auf die Pyrolyse und damit die Brandrate betrifft und die Fernwirkung die Temperatur und Verrauchung (Rauchschichtung) im Tunnelquerschnitt. Basierend auf der Auswertung von Daten aus Großbrandversuchen wurden modifizierte Brandkurven für Modellbrände bei Aktivierung einer BBA hergeleitet. Dabei wurden die Versuchsergebnisse für abgedeckte Feststoffbrände als relevanter Ereignistyp herangezogen. Auf Basis dieser Daten wurde angenommen, dass bei diesem Ereignistyp bei einer Aktivierung vier Minuten nach Beginn der Brandentwicklung die maximale Wärmefreisetzung um 50 % reduziert wird. Die Fernwirkung einer BBA wurde in FDS (Fire Dynamics Simulator) modelliert, wobei die wesentlichen Düsenparameter (wie die Verteilungsfunktion der Tröpfchengröße, das Sprühmuster der Düsen und die Durchflussrate) in das Modell implementiert wurden.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Beurteilung der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelnutzer

Hinsichtlich der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelnutzer können folgende Schlussfolgerungen zusammengefasst werden:

- Befragte Versuchsteilnehmer (Probanden) stehen dem Einbau einer BBA im Straßentunnel überwiegend positiv gegenüber. BBA sind bekannt aus dem Hochbau und werden daher mehrheitlich als Standardausrüstung im Tunnel erwartet. Ein Einbau im Straßentunnel wird großteils (64 %) befürwortet.
- Zwischen den beiden Probandengruppen (mit beziehungsweise ohne Aktivierung der BBA) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Zeitdauer zum Verlassen des Fahrzeugs sowie des Verhaltens bei der anschließenden Flucht zum Notausgang. Alle Probanden verlassen das Fahrzeug und suchen anschließend die nächstgelegenen Sicherheitseinrichtungen auf. Dabei müssen Aspekte, die maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten der Tunnelnutzer haben, wie die grundsätzliche Information über die Aktivierung einer BBA, die akustische Aufforderung zur Flucht und eine gut sichtbare visuelle Fluchtwegkennzeichnung, besonders berücksichtigt werden.
- Probanden, die sich außerhalb des Wirkungsbereichs der BBA befinden, flüchten nicht in den Wassernebel hinein zu den nächstgelegenen Sicherheitseinrichtungen, sondern suchen weiter entfernte Sicherheitseinrichtungen entgegengesetzt zum Ereignisort in Richtung Einfahrtsportal auf.

Grundsätzlich sprechen die Ergebnisse aus den Probandenversuchen, also aus Sicht des menschlichen Erlebens und Verhaltens, eher für als gegen den Einbau einer BBA, solange Teile der Infrastruktur des Tunnels (insbesondere Lautsprecherdurchsagen, Zeitablauf der Aktivierung usw.) auf die Aktivierung einer BBA abgestimmt werden.

3.2 Beurteilung der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen

Aus den im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wirksamkeit von BBA ziehen:

- Der Aktivierungszeitpunkt der BBA bezogen auf die Phase der Brandentwicklung hat wesentlichen Einfluss auf deren Wirksamkeit, speziell in Bezug auf den Personenschutz.
- BBA können die Brandentwicklung und Temperaturen bei einem Brand in einem Tunnel sehr wirkungsvoll reduzieren.
- Für den Personenschutz sind jedoch vor allem die Rauchgaswirkungen auf den menschlichen Organismus von entscheidender Bedeutung. Diesbezüglich

gehen von einer BBA positive wie negative Wirkungen aus: Einerseits erfolgt eine Reduktion der Schadstoffproduktion durch die Eindämmung der Brandentwicklung (Verringerung der HRR), andererseits wird durch den durch Aktivierung der Anlage ausgelösten vertikalen Impuls eine vertikale Durchmischung der Brandgase ausgelöst, die die infolge der Rauchschichtung im Firstbereich befindlichen höheren Rauchgaskonzentrationen in untere Bereiche des Tunnelquerschnitts befördert und damit in den Bereich, in dem sich Personen aufhalten.

- Bei dem Tunneltyp mit mechanischer Lüftung konnte in den Simulationen eine hohe Wirksamkeit von BBA dargestellt werden. Bei dem Tunneltyp mit Rauchabsaugung kann bei Aktivierung der BBA die Wirksamkeit der Lüftung durch den eingebrachten Impuls beeinträchtigt werden.
- Grundsätzlich wird die Möglichkeit von Kompensation (zum Beispiel eine Verringerung der Notausgangsabstände, der Ersatz einer Rauchabsaugung durch eine mechanische Längslüftung oder eine Verringerung der Lüftungsauslegung) durch den Einsatz einer BBA durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt. Der Umfang der jeweiligen Kompensation sollte jedoch im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Rahmenbedingungen anhand einer detaillierten Risikoanalyse geklärt werden.
- Die durchgeführten Simulationsrechnungen zeigen, dass bezüglich des Personenschutzes eine Vielzahl von Parametern in einem komplexen Wechselspiel zusammenwirkt und daher pauschale Aussagen nur bedingt möglich sind. Die Ergebnisse zeigen klare Tendenzen hinsichtlich der Wirksamkeit von BBA auf, die Aussagekraft ist jedoch mit weiteren Modellierungen, Modellszenarien und Sensitivitätsanalysen zu festigen.

gaskomponenten im Tunnel, die für die Bewertung der Effekte auf den Menschen aber von hoher Bedeutung sind. Dies trifft gleichermaßen für die eher ungünstige Wirkung einer BBA im Zusammenhang mit einer Rauchgasabsaugung zu.

Im Hinblick auf das menschliche Verhalten liefert die durchgeführte Untersuchung eine Reihe von Ansatzpunkten, wie sich die Aktivierung einer BBA auf das menschliche Verhalten auswirken kann. Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Befragungen anhand von Fragebogen und aus den Versuchen in virtueller Realität geben einen ersten Einblick in das Verhalten und Erleben der Probanden auf eine aktivierte BBA. Die Generalisierung der Untersuchungsergebnisse wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass nur eine relativ geringe Anzahl an Szenarien untersucht und dass die haptischen Wirkungen einer BBA, wie zum Beispiel Kälte oder Nässe, nicht modelliert werden konnten.

4 Folgerungen für die Praxis

Grundsätzlich liefert das vorliegende Forschungsvorhaben eine Basis, auf der eine Bewertung der Wirksamkeit von BBA ermöglicht wird. Diese Untersuchung hat bestätigt, dass der Einsatz von BBA als optionales Sicherheitssystem in einem Straßentunnel unter bestimmten Voraussetzungen herangezogen werden kann. Die Frage der Kompensationsmöglichkeiten anderer Sicherheitssysteme kann lediglich im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Rahmenbedingungen anhand einer detaillierten Analyse geklärt werden. Weiters spielen bei der Frage der Kompensation neben Wirksamkeits- auch Wirtschaftlichkeitsaspekte eine wesentliche Rolle.

Im Hinblick auf eine vertiefende Bewertung der Wirksamkeit spezifischer Anlagen wäre es zweckmäßig, die sehr sensitiven Zusammenhänge von Brandentwicklung – Strömungsentwicklung im Tunnel – Aktivierungszeitpunkt der BBA mit weiteren Parameterstudien vertieft zu analysieren.

Bisher wenig beleuchtet wurden – im Gegensatz zu den Temperaturwirkungen – auch die Effekte einer BBA auf die Verteilung und Konzentration von gesundheitsschädlichen Rauch-