

Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brand- bekämpfungsanlagen in Straßentunneln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 143

bast

Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brand- bekämpfungsanlagen in Straßentunneln

von

Andreas Mühlberger
Philipp Gast
Andreas Plab
Thomas Probst

Universität Regensburg
Lehrstuhl für Psychologie VII

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 143

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Zusammenfassender Bericht zu den Forschungsprojekten:

FE 15.0607/2014/ERB Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens von Tunnelnutzern bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage anhand von Realversuchen

FE 15.0563/2012/ERB Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

FE 89.0299/2014 Einfluss einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage (DLS) auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer

Fachbetreuung:

Anne Lehan

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-390-9

Bergisch Gladbach, April 2018

Kurzfassung – Abstract

Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

International und europäisch besteht zunehmend die Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Tunneln stationäre Brandbekämpfungsanlagen (BBA) als Ausstattungsmerkmal mit zu berücksichtigen. Das vorrangige Schutzziel, auf das der Einbau einer BBA hierbei abzielt, ist die Unterstützung der Fremdrerettung oder der Bauwerksschutz. Untersuchungen zu BBA fokussierten daher bislang mehr auf die Wirksamkeit dieser Anlagen, ihre Einbindung in die Tunnelsicherheitssysteme und ihre Wechselwirkung mit anderen technischen Systemen im Tunnel.

Der Einfluss einer aktivierten Anlage auf das menschliche Verhalten, speziell im Zuge der Selbstrettungsphase, ist demgegenüber in den Untersuchungen weitgehend unberücksichtigt geblieben.

Im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben sind nunmehr speziell diese Fragestellungen untersucht worden. Im Vorhaben FE 15.0563/2012/ERB „Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln“ beantworten die durchgeführten psychologischen Untersuchungen des menschlichen Verhaltens und Probandenversuche in virtueller Realität zuvor offene Fragen über das Verhalten des Nutzers bei einer aktivierten Anlage. Zur Einbeziehung auch haptischer Effekte wurden Realversuche in verschiedenen Tunnelumgebungen durchgeführt. Probandenversuche mit real aktivierten BBA sind Gegenstand zweier weiterer Forschungsvorhaben: FE 89.0299/2014 „Einfluss einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage (DLS) auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer“ und FE 15.0607/2014/ERB „Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens von Tunnelnutzern bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage anhand von Realversuchen“. Gegenstand der Vorhaben ist die Untersuchung des Verhaltens der Tunnelnutzer bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage vom Typ Druckluftschäum (DLS) und Wasserdampf (WN). Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse aus den drei Forschungsvorhaben bezogen auf das menschliche Verhalten zusammengefasst und vergleichend gegenübergestellt. Hiermit stehen nunmehr abgesicherte Aussagen

über den Einfluss einer aktivierten Anlage auf das menschliche Verhalten bei Aktivierung von BBA in einem Straßentunnel speziell im Hinblick auf die Selbstrettungsphase zur Verfügung.

Sowohl die Analyse des Verhaltens als auch die Befragungen liefern erste Anhaltspunkte dafür, dass die Aktivierung einer BBA in einem Straßentunnel das Verhalten der Tunnelnutzer eher nicht negativ beeinflusst, solange Teile der Infrastruktur des Tunnels auf die Aktivierung einer BBA abgestimmt werden. Dabei ist vor allem eine gut verständliche Durchsage wichtig, damit auch Personen im direkten Einflussbereich der BBA ihr Fahrzeug verlassen.

Der Bericht soll eine Hilfestellung bei der Einschätzung des Einflusses dieser Anlagen auf das menschliche Verhalten in Tunneln unter besonderer Berücksichtigung des Schutzziels Selbstrettung bieten.

Analysis of the human behaviour by using Fixed Fire Fighting Systems in road tunnels

Stationary Fixed Fire Fighting Systems (FFFS) are being more and more considered as an equipment feature for special requirements both for new and existing tunnels in Europe and beyond.

The primary protection objective aimed at installing a FFFS is the support of the rescue by emergency personnel or the structural protection of the building. So far, research on FFFS has focused more on the effectiveness of these facilities, their integration into tunnel safety systems and their interaction with other technical systems in tunnels. In contrast, the influence of an activated FFFS on human behavior, especially in the course of the self-rescue phase, has largely been disregarded in the investigations.

Several research projects have now specifically addressed these issues. In the project FE 15.0563/2012/ERB „Effectiveness of automatic Fixed Fire Fighting Systems in road tunnels“, psychological studies were conducted on human behavior and test subjects in virtual reality to answer previously open questions about the behavior of the user in case of an activated installation. In order to include haptic effects, real life experiments were carried out in different tunnel environments. Reactions of test subjects confronted with activated FFFS are the topic of two further research projects: FE

89.0299/2014 „Effect of automatic Fixed Fire Fighting Systems (DLS) on reaction- and flight behaviour of road users“ and FE 15.0607/2014/ERB „Analysis of the reaction and escape behavior of tunnel users by activated Fixed Fire Fighting System based on real tests“. The purpose of these projects is to investigate the behavior of the tunnel users in an activated FFFS of the type compressed air foam (DLS) and water mist (WN). The present report summarizes and compares the results of the three research projects related to human behavior. It provides reliable information on the influence of an activated facility on human behavior when activating FFFS in a road tunnel, especially with regard to the self-rescue phase.

Both, the behavioral analysis and the surveys provide initial evidence that activating a FFFS in a road tunnel tends not to adversely affect the behavior of tunnel users as long as relevant parts of the tunnel infrastructure are being adjusted to the FFFS activation appropriately. In doing so, a well comprehensible announcement indicating the FFFS activation is very important, so tunnel users finding themselves in the FFFS's immediate area of influence can understand the announcement and disembark their vehicle.

The report is intended to assist in assessing the impact of these facilities on human behavior in tunnels, with special reference to the protection target self-rescue.

Inhalt

Vorbemerkung	7	3.2.1 Psychometrische Fragebögen zur Befindlichkeit	18
1 Einleitung	7	3.2.2 Nachbefragung	19
1.1 Stand der Forschung	7	3.2.3 Verhaltensdaten	19
1.1.1 Brandbekämpfungsanlagen	7	3.3 Diskussion	22
1.1.2 Visuelle und auditive Wahrnehmung im Tunnel	8	3.3.1 Soziodemographische Variablen und psychometrische Fragebögen	22
1.1.3 Menschliches Verhalten im Ereignisfall im Tunnel	8	3.3.2 Nachbefragung	22
1.1.4 Fluchtverhalten im Tunnel	8	3.3.3 Verhaltensdaten	23
1.2 Zielsetzungen	9		
2 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA: Eine Untersuchung in Virtueller Realität	10	4 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA (Typ Wassernebel) in einem Realversuch	25
2.1 Methode	10	4.1 Methode	25
2.1.1 Probanden	10	4.1.1 Probanden	25
2.1.2 Simulationsgerät	10	4.1.2 Versuchstunnel	26
2.1.3 Unabhängige Variable und Fahrzenario	11	4.1.3 Versuchsablauf	26
2.1.4 Abhängige Variable	12	4.1.4 Verwendete Materialien	28
2.2 Ergebnisse	13	4.1.5 Unabhängige Variable, Abhängige Variable und Statistik	28
2.2.1 Nachbefragung	13	4.2 Ergebnisse	28
2.2.2 Verhaltensdaten	13	4.2.1 Psychometrische Fragebögen zur Befindlichkeit	28
3 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA (Typ Druckluftschäum) in einem Realversuch	14	4.2.2 Nachbefragung	29
3.1 Methode	14	4.2.3 Verhaltensdaten	32
3.1.1 Probanden	15	4.2.4 Deskriptive Darstellung der Aussagen der Probanden	33
3.1.2 Versuchstunnel	15	4.2.5 Probandenpaare	34
3.1.3 Versuchsablauf	15	4.3 Diskussion	35
3.1.4 Verwendete Materialien	17	4.3.1 Methodische Aspekte	35
3.1.5 Unabhängige Variable und Abhängige Variable	17	4.3.2 Einschätzung zum Tunnel	35
3.1.6 Statistik	18	4.3.3 Einschätzung zur BBA	36
3.2 Ergebnisse	18	4.3.4 Ausstiegsverhalten	37
		4.3.5 Evakuierungsziele und Abbruchkriterien	38
		5 Vergleiche	38

5.1	Vergleich des Verhaltens bei Wasserdnebel und Druckluftschaum . . .	38
5.2	Vergleich des Verhaltens bei Wasser- nebel in VR und in Realität.	40
6	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	42
6.1	Diskussion des Probandenverhaltens bei Wasserdnebel und Schaum	42
6.2	Stärken und Grenzen der Studien	44
6.3	Fazit	44
6.3.1	Akustische Evakuierungsdurchsage . .	44
6.3.2	Wissen zu Brandbekämpfungsanlagen	45
6.3.3	Einfluss der Brandbekämpfung- anlagen auf die Wahrnehmung	45
6.3.4	Einfluss der Brandbekämpfung- anlagen auf das Verhalten	45
6.4	Zusammenfassende Bewertung.	46
	Literatur.	46
	Bilder	48
	Tabellen.	49

Vorbemerkung

International und europäisch besteht zunehmend die Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Tunneln stationäre Brandbekämpfungsanlagen (BBA) als Ausstattungsmerkmal mit zu berücksichtigen.

Während Untersuchungen zu BBA bislang auf die Wirksamkeit dieser Anlagen, ihre Einbindung in die Tunnelsicherheitssysteme und ihre Wechselwirkung mit anderen technischen Systemen im Tunnel fokussieren, ist der Einfluss einer aktivierten Anlage auf das menschliche Verhalten, speziell im Zuge der Selbstrettungsphase, in den Untersuchungen weitgehend unberücksichtigt geblieben.

Im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben sind speziell diese Fragestellungen untersucht worden. Im Vorhaben FE 15.0563/2012/ERB Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln beantworten die durchgeführten psychologischen Untersuchungen des menschlichen Verhaltens und Probandenversuche in virtueller Realität zuvor offene Fragen über das Verhalten des Nutzers bei einer aktivierten Anlage. Aus diesen Untersuchungen lassen sich erste Erkenntnisse ableiten, ob und wie eine Brandbekämpfungsanlage die Selbstrettungsphase beeinflusst.

Eine in virtueller Realität erfolgende Versuchsdurchführung ermöglicht eine wirklichkeitsnahe Darstellung der bei einer Aktivierung einer BBA tatsächlich auftretenden visuellen und auditiven Effekte. Die Umsetzung der ebenfalls auftretenden haptischen Effekte, insbesondere von Nässe oder Kälte, ist jedoch in virtueller Realität nicht abbildbar. Zur Einbeziehung auch haptischer Effekte bietet es sich an, die Versuche in virtueller Realität durch Realversuche in verschiedenen Tunnelumgebungen zu ergänzen. Probandenversuche mit real aktivierten BBA sind Gegenstand zweier weiterer Forschungsvorhaben: FE 89.0299/2014 Einfluss einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage (DLS) auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer und FE 15.0607/2014/ERB Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens von Tunnelnutzern bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage anhand von Realversuchen. Gegenstand der Vorhaben ist die

Untersuchung des Verhaltens der Tunnelnutzer bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage vom Typ Druckluftschäum (DLS) und Wassernebel (WN).

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse aus den drei Forschungsvorhaben bezogen auf das menschliche Verhalten zusammengefasst und vergleichend gegenübergestellt. Hiermit stehen nunmehr abgesicherte Aussagen über den Einfluss einer aktivierten Anlage auf das menschliche Verhalten bei Aktivierung von BBA in einem Straßentunnel speziell im Hinblick auf die Selbstrettungsphase zur Verfügung.

Der Bericht soll eine Hilfestellung bei der Einschätzung des Einflusses dieser Anlagen auf das menschliche Verhalten in Tunneln unter besonderer Berücksichtigung des Schutzziels Selbstrettung bieten.

1 Einleitung

1.1 Stand der Forschung

1.1.1 Brandbekämpfungsanlagen

International und europäisch besteht zunehmend die Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Tunneln stationäre BBA als Ausstattungsmerkmal mit zu berücksichtigen. BBA dienen dazu, einen Fahrzeugbrand in einem Straßentunnel möglichst frühzeitig einzudämmen, um die Entwicklung eines Großbrandes zu verhindern. Während für Gebäude und Industrieanlagen der Einsatz automatischer BBA seit vielen Jahren technischer Standard ist, war die Haltung gegenüber einem Einsatz derartiger Systeme in Straßentunneln lange Zeit von der kritischen Position der PIARC geprägt, die bis 2008 deren Einsatz negativ bewertete [23].

In der jüngeren Vergangenheit fand jedoch eine dynamische Entwicklung sowohl im Hinblick auf die Entwicklung und Optimierung der Systeme für den Tunnelleinsatz als auch im Hinblick auf die Validierung ihrer Wirksamkeit im Rahmen von Großbrandversuchen statt. Diese Entwicklung wurde von in-

tensiver Forschungstätigkeit begleitet, z. B. auf europäischer Ebene durch UPTUN [31] und auf nationaler Ebene in Deutschland durch SOLIT und SOLIT2 [25], [26] sodass heute die generelle Wirksamkeit dieser Systeme im Sinne einer effizienten Brandeindämmung als nachgewiesen gilt und international anerkannt ist (siehe auch [11]). Als Löschmittel werden verwendet:

Wasser:

Die Löschwirkung des Wassers beruht überwiegend auf dem Kühleffekt. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser verbunden mit der hohen Verdampfungswärme wird dem Brand Wärme entzogen. Je nach Größe der eingebrachten Wassertropfen wird bei wasserbasierten Löschanlagen zwischen Wasser und WN unterschieden. Um die Löscheigenschaften des Wassers zu verbessern und nachteilige Effekte des Löschwassers zu minimieren, werden häufig Additive eingesetzt. Als Netzmittel werden üblicherweise Schaummittel in niedrigerer Dosierung (0,5 % – 1 %) verwendet. Die Mischung wird Netzwasser genannt. Bei Stoffen, die gefährlich mit Wasser reagieren, ist der Einsatz von Wasser als Löschmittel unzulässig (z. B. Kaliumhydroxid, Calciumoxid).

Schaum:

Löschschaum besteht aus Gasblasen, die in einen Flüssigkeitsfilm eingeschlossen sind. In Abhängigkeit der Verschäumungszahl (VZ) werden Schwertschaum mit VZ 4 – 20, niedriger Luftanteil, Mittelschaum mit VZ 20 – 200, hoher Luftanteil, und Leichtschaum mit VZ 200 – 1000, sehr hoher Luftanteil, klassifiziert. Bei Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln auf Schaumbasis kommt Schwertschaum bis Mittelschaum zum Einsatz. Die Löschwirkung von Schwertschaum beruht vorwiegend auf dem Kühl- und Trenneffekt. Die Löschwirkung von Mittelschaum beruht auf der Kühlwirkung und der Trennwirkung bezüglich der Reaktionspartner durch Abdeckung des Brandgutes. Je trockener der Schaum hergestellt wird, umso weiter verschiebt sich die Hauptlöschwirkung vom Kühl- zum Trenneffekt.

1.1.2 Visuelle und auditive Wahrnehmung im Tunnel

Ein wichtiger Aspekt bei der Evakuierung von Tunnelnutzern im Ereignisfall ist die Wahrnehmung relevanter Situationsaspekte und hierbei insbesondere die Beeinträchtigung bei der visuellen und auditiven Informationsaufnahme. Bisher ist wenig zum Einfluss einer aktivierten BBA auf die Wahrnehmung bekannt. Aus Studien zu Rauch im Tunnel weiß man jedoch, dass Tunnelwände einen wichtigen Orientierungspunkt bei schlechter Sicht bieten [7]. Boer hebt in seiner Studie die Bedeutung leicht verständlicher Evakuierungshinweise hervor, die allerdings möglicherweise durch die Verschlechterung der Sicht bei aktivierter BBA nicht mehr vollumfänglich genutzt werden können [3]. Auch auditive Hinweise spielen eine zentrale Rolle für Tunnelnutzer: So weisen Alarme oder Lärm auf eine mögliche Gefahrensituation hin. Außerdem kann in Gefahrensituationen durch klare laute Anweisungen ziel führendes Verhalten unterstützt werden [29]. Die mit einer Aktivierung einer BBA einhergehende Geräuschentwicklung könnte wichtige Durchsagen übertönen und sich somit negativ auf das Evakuierungsverhalten der Tunnelnutzer auswirken.

1.1.3 Menschliches Verhalten im Ereignisfall im Tunnel

Aus großen Brandereignissen, wie zum Beispiel dem Mont-Blanc Tunnelfeuer im Jahre 1999, ist bekannt, dass sich Tunnelnutzer in Notfallsituationen häufig nicht situationsgemäß verhalten. So waren 29 der 39 Unglücksoffer des Mont-Blanc Tunnelfeuers zum Zeitpunkt des Todes in ihren Fahrzeugen. Ähnliche Beobachtungen machte auch Dix [6], der den Tunnelunfall im Burnley Tunnel in Melbourne im Jahre 2009 untersuchte. Nach seinen Beobachtungen zeigten auch hier viele Personen problematisches Verhalten, indem sie zum Beispiel nach Einleitung der Selbstrettung zu ihren Fahrzeugen zurückkehrten oder sogar näher an die Unfallstelle heranfuhrten, um Fotos des Unfalls zu machen [6].

1.1.4 Fluchtverhalten im Tunnel

Allgemein kann man das Fluchtverhalten von Personen in mehrere Phasen untergliedern. Eine Präe-

vakuierungsphase, die alle Ereignisse vor dem Start der Flucht beinhaltet und mit der Entscheidung zur Flucht endet. Von besonderem Interesse ist die Dauer dieser Phase und welche Eigenschaften des Ereignisses dazu führen, ob und wann der Tunnelnutzer die Entscheidung zur Flucht trifft.

In der darauffolgenden Evakuierungsphase kann man zwischen einer Präbewegungsphase und einer Bewegungsphase unterscheiden. In der Präbewegungsphase sucht der Tunnelnutzer Informationen und wählt einen Fluchtweg aus. Die Bewegungsphase beinhaltet alle Verhaltensweisen, die vom Tunnelnutzer während der Flucht gezeigt werden, bis er ein Fluchtziel erreicht hat. Einen ähnlichen Ansatz hat Kuligowski [13] zu einem Modell zusammengefasst. Das Modell umfasst vier Phasen, wobei die ersten zwei Phasen der Präevakuierungsphase entsprechen, die dritte Phase der Präbewegungsphase und die vierte Phase der Bewegungsphase. In Phase 1 werden situative Hinweise wahrgenommen, die in Phase 2 interpretiert und bezüglich ihres Risikos bewertet werden. In Phase 3 wird eine Handlungsentscheidung getroffen, welche in Phase 4 durchgeführt wird.

Ein an der Universität Würzburg entwickeltes Modell zum Fluchtverhalten in Straßentunneln geht von der Annahme aus, dass Tunnelnutzer in Notfallsituationen entweder impulsives oder reflektives Verhalten zeigen (siehe [12]; [17]). Impulsives Verhalten ist dabei durch ein Weg von der Gefahr gekennzeichnet, wobei Eigenschaften der Umgebung, wie zum Beispiel Sicherheitstechnik, nicht beachtet werden. Die meisten Tunnelnutzer zeigen allerdings reflektives Verhalten. Reflektives Verhalten zeichnet sich durch eine Informationssuche aus, auf deren Grundlage eine Verhaltensalternative gewählt wird. Hierbei kann das Wissen der Personen über das richtige Verhalten in Notfallsituationen eine Rolle spielen. Ob eine Person reflektives oder impulsives Verhalten zeigt, ist einerseits von internen Faktoren der Person abhängig, aber auch von externen Faktoren wie der Sichtbarkeit des Rauches oder des Feuers. Einen solchen externen Faktor kann womöglich auch eine Brandbekämpfungsanlage darstellen und so die Art des Fluchtverhaltens der Tunnelnutzer verändern. Eine aktivierte Brandbekämpfungsanlage erschwert es, Informationen über

die Situation zu erhalten. Dadurch wird die Entscheidung, ob eine Flucht angemessen ist, erschwert.

1.2 Zielsetzungen

Auch wenn die generelle Wirksamkeit von eingebauten Brandbekämpfungsanlagen hinreichend bestätigt wurde, besteht Ungewissheit hinsichtlich der Wechselwirkung sowie insbesondere des Einflusses auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer. Insbesondere fehlen empirische Untersuchungen zum Einfluss von aktivierten Brandbekämpfungsanlagen auf das Erleben und das Reaktions- und Fluchtverhalten. Ziel mehrerer F&E-Vorhaben war daher, den Einfluss verschiedener BBA-Typen in Virtueller Realität (VR) und in realen Tunneln zu untersuchen.

Im Rahmen der einzelnen Projekte wurden dazu drei kontrollierte, randomisierte Studien durchgeführt, bei welchen die Probanden zufällig (randomisiert) in einer von zwei Bedingungen untersucht wurden. In einer Bedingung wurde nach Rauchentwicklung und Evakuierungsdurchsage im Tunnel eine BBA aktiviert, in der zweiten Bedingung (Kontrollbedingung) wurde keine BBA aktiviert. Durch dieses methodische Vorgehen können Unterschiede in der Bewertung und dem Verhalten der Probanden zwischen den beiden Gruppen recht gut auf die experimentelle Variation (Aktivierung der BBA) zurückgeführt werden.

Durch die Untersuchungen sollen Erkenntnisse gewonnen werden, ob und wie eine BBA die Wahrnehmung, das emotionale Erleben sowie das Verhalten der Nutzer im direkten Einflussbereich einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage und damit die Selbstrettungsphase beeinflusst. Aus den Erkenntnissen werden Annahmen über das Auftreten von Verhaltensweisen in realen Auslösesituationen abgeleitet und bewertet, ob eine aktivierte Brandbekämpfungsanlage in bestimmten Situationen potentiell negative Auswirkungen auf die Selbstrettung im Ereignisfall hat.

Außerdem wird auf die Fragestellung eingegangen, ob sich unterschiedliche BBA-Typen wie Druckluftschaum oder Hochdruckwassernebelanlage in ihrer

Wirkung auf die Verkehrsteilnehmer unterscheiden. Dieser Vergleich wird zwischen den zwei Studien in realen Tunneln mit jeweils unterschiedlicher Brandbekämpfungsanlage durchgeführt. Da dieser Vergleich über die Ergebnisse zweier Studien aus verschiedenen Projekten erfolgt, ist eine Randomisierung für diese Vergleiche nicht gegeben und die Ergebnisse sind daher mit größerer Zurückhaltung zu interpretieren.

2 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA: Eine Untersuchung in Virtueller Realität

2.1 Methode

Ziel dieser ersten Studie (siehe Teilprojektbericht zu 15.0563/2012/ERB: [19]) ist es, den Einfluss einer Brandbekämpfungsanlage (BBA) auf das Fluchtverhalten von Tunnelnutzern in Virtueller Realität zu untersuchen. Die Virtuelle Realität stellt eine hinsichtlich dieser Fragestellung einzigartige Möglichkeit dar, den Einfluss einer Brandbekämpfungsanlage für Tunnelnutzer erlebbar zu machen, ohne hohe Kosten zu verursachen oder die Probanden einer realen Gefahr auszusetzen [10] und auf die Verfügbarkeit eines realen Tunnels angewiesen zu sein. Es sollen möglichst viele Aspekte des Erlebens und Verhaltens erfasst werden, um eine umfassende Aussage über den Einfluss der Brandbekämpfungsanlage auf verschiedenen Ebenen treffen zu können. Als Brandbekämpfungsanlage wurde exemplarisch eine Hochdruckwassernebelanlage gewählt. Die Untersuchung des Nutzerverhaltens setzt sich aus einer Übungsphase und zwei Teiluntersuchungen (Fahrszenario und Fluchtszenario) zusammen. Dabei stehen die beiden Teilszenarien in einer zeitlichen Abfolge, so dass alle Probanden zuerst das Fahrszenario und dann das Fluchtszenario absolvieren.

2.1.1 Probanden

Insgesamt haben 50 Personen an der Untersuchung teilgenommen. Sie wurden aus dem Probanden-Pool des Lehrstuhls für Psychologie I (Leitung

Prof. Pauli) der Universität Würzburg rekrutiert und zufällig (randomisiert) auf zwei Gruppen mit jeweils 25 Probanden aufgeteilt. Im Schnitt waren die Probanden der Kontrollgruppe 26 Jahre und die Probanden der BBA-Gruppe 24 Jahre alt. Der Unterschied im Alter ist nicht signifikant. In der Kontrollgruppe waren 11 Frauen und 14 Männer, in der BBA-Gruppe 13 Frauen und 12 Männer. Ein Fisher's exakter Test ergab keinen bedeutsamen Unterschied im Geschlechterverhältnis zwischen den Gruppen. Die Teilnahme an der Untersuchung war freiwillig. Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro.

2.1.2 Simulationsgerät

PsyCAVE Simulationssystem

Es wurde ein hochimmersives Simulationssystem am Lehrstuhl für Psychologie I der Universität Würzburg genutzt, mit dem ein hohes Maß an Präsenzerleben in der Virtuellen Realität erzeugt wird. Die Szenarien wurden mittels der VR Simulationssoftware CyberSession (VTplus GmbH, Würzburg, Deutschland) gesteuert. Die visuelle Darbietung der Szene erfolgte auf einer 5-seitigen Cave Automatic Virtual Environment (CAVE, I Space by BARCO, Kuurne, Belgium) mit einer Größe von 4 x 3 x 3m (siehe Bild 1). Für die stereoskopische Darstellung wurden passive Infitec-Inferenzfilter (Infitec Premium, Infitec, Ulm, Germany) genutzt. Das Rendering erfolgte mit einer Modifikation (VrSessionmod 0.5) basierend auf der Source Engine SDK 2007 (Valve, Bellevue, Washington, USA) in Kombination mit der CS-Research 5.6 Software (VTplus, Würzburg, Germany; siehe www.cybersession.info). Die auditive Simulation wurde über ein am oberen CAVE-Rand montiertes 7.1 Surround Soundsystem (CANTON, Weilrod, Deutschland) dargeboten. Die Bewegungen und die Orientierung der Probanden wurden über ein aktives Infrarot-LED Trackingsystem (PhaseSpace Impulse, PhaseSpace Inc., San Leandro, CA, USA) erfasst und aufgezeichnet.

Bedienelemente

In der CAVE stehen zwei verschiedenen Bedienelemente zur Verfügung, damit der Proband sich sowohl zu Fuß als auch mit einem PKW in der virtuellen Welt bewegen kann. Während der Fahrsimulation sitzt

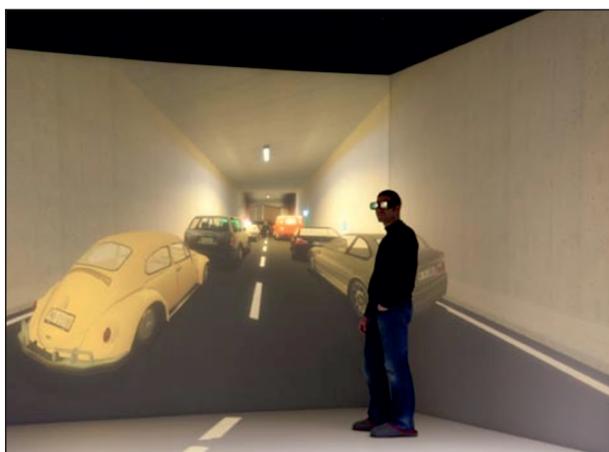


Bild 1: Cave mit Proband bei geöffneter CAVE-Tür



Bild 2: Bedienelemente der Fahrsimulation; Lenkrad und Gas- sowie Bremspedal in der CAVE

der Proband auf einem Autositz und kann ein Lenkrad und ein Gas- und Bremspedal (Playseat) verwenden, wie es in Fahrsimulationen benutzt wird (siehe Bild 2). Das Lenkrad wurde um zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten erweitert, um für das Szenario relevante Aktionen durchführen zu können. Man kann den Motor, das Radio und den Warnblinker ein- und ausschalten sowie die Tür des Fahrzeuges öffnen. All diese Interaktionen sind als Buttons, in verschiedenen Farben und mit Beschriftung, auf dem Lenkrad angebracht.

Während des anschließenden Fluchtszenarios befindet sich der Proband als Fußgänger in der virtuellen Realität und bewegt sich mithilfe eines Spielecontrollers (X-Box 360 Controller, Microsoft), der um einen Sensor für die Ausrichtung des Controllers – gemessen vom Trackingsystem der CAVE - erweitert wurde. Der Proband kann sich mithilfe des

Controllers in die Richtung bewegen, in die der Controller zeigt. Zusätzlich kann er mithilfe der Buttons des Controllers mit der virtuellen Welt interagieren: z. B. Steuerung von Licht und Blinker.

2.1.3 Unabhängige Variable und Fahrszenario

Während des Fahrszenarios sitzt der Proband auf dem Autositz (siehe Bild 2). Er befindet sich in der virtuellen Welt in einem PKW (VW Golf V). Der Proband startet die Fahrt vor dem Tunnel. Er folgt während seiner Fahrt durch den Tunnel einem Fahrzeug, das mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 80 km/h durch den Gegenverkehrstunnel mit Überholverbot fährt. Kurz vor Tunnelmeter 900 bremst das vorausfahrende Fahrzeug und hält hinter drei bereits stehenden Fahrzeugen. Der Proband hat die Aufgabe, ebenfalls zu bremsen und hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug und dadurch in einem Mindestabstand von 30 Metern vom Unfall entfernt zum Stehen zu kommen. Von seinem Haltepunkt aus sieht der Proband einen brennenden LKW mit starker Rauchentwicklung. Die Rauchentwicklung orientiert sich an Rauchdaten eines 30 Megawatt Brandes. Im Blickfeld des Probanden befindet sich außerdem ein Notausgang und diesem gegenüberliegend eine Notrufstation. Fünfzehn Sekunden nach dem Anhalten wird der Proband mittels einer Standard-Durchsage zum Verlassen des Tunnels durch den Notausgang aufgefordert (Alarmierung). Die Durchsage wird in regelmäßigen Abständen wiederholt. Zur Untersuchung der Fragestellung werden direkt nach der Durchsage zwei Bedingungen miteinander verglichen (Unabhängige Variable):

- a) In Gruppe A wird zur Eindämmung des Brandes eine BBA direkt nach der ersten Durchsage aktiviert.
- b) In Gruppe B wird die BBA nicht aktiviert und der Rauch breitet sich weiter aus.

Die beiden Szenarien unterscheiden sich nur hinsichtlich der Aktivierung der BBA und ihres Einflusses auf die Umwelt (Rauchentwicklung, Sichtverhältnisse, Verständlichkeit der Durchsagen, siehe Bild 3).

Die aktivierte BBA versprüht WN im Bereich des Unfalls, was visuell simuliert wird. Der Aktivierungs-

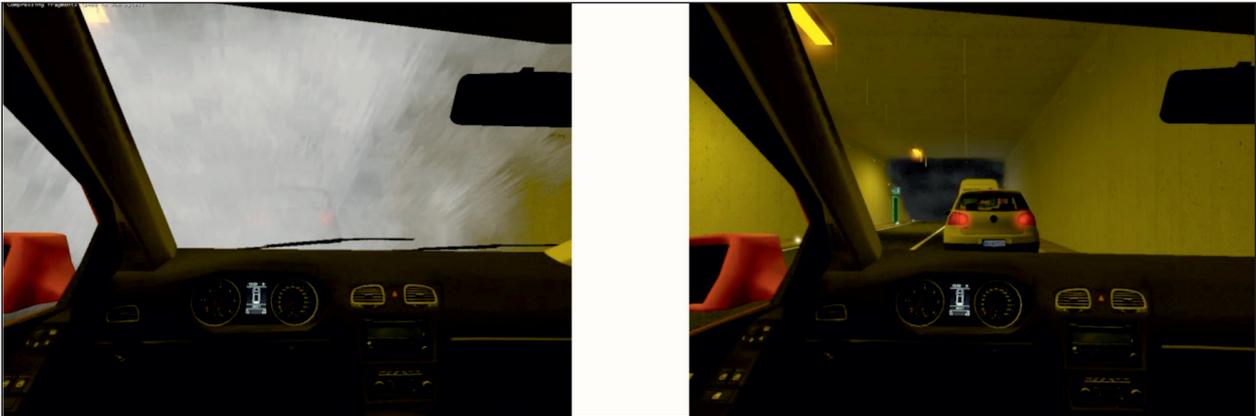


Bild 3: Sicht des Probanden direkt nach Ende der Durchsage in der Bedingung „mit BBA“ (links) und „ohne BBA“ (rechts)

bereich der BBA beträgt insgesamt 75 Meter. Von diesen 75 Metern befinden sich 50 Meter auf der Seite des Unfalls, auf welcher der Proband sich befindet. Dies bedeutet, dass sich alle Probanden, die höchstens 50 Meter vom Unfall entfernt anhalten, mit ihrem Fahrzeug im Einflussbereich der BBA befinden. Sobald die BBA aktiviert wird, unterdrückt sie die Rauchentwicklung des Brandes und es entsteht kein zusätzlicher virtueller Rauch.

In beiden Bedingungen haben die Probanden nach der Durchsage 60 Sekunden Zeit, das Fahrzeug durch Drücken eines Interaktionsbuttons zu verlassen, bevor der Durchgang beendet wird. Wenn der Proband durch Drücken eines Interaktionsbuttons mitgeteilt hat, dass er jetzt das Fahrzeug verlassen würde, wird ihm dies rückgemeldet. Er wird aber gebeten, noch sitzenzubleiben, bis die Simulation nach Ablauf der festgelegten Zeit beendet wird. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Probanden das Fluchtszenario mit demselben Wissenstand aus dem Fahrscenario beginnen. Nach einer kurzen Umbauphase von circa 2 Minuten, in der der Autositz und die Interaktionselemente für das Fahrscenario entfernt werden, schließt direkt das Fluchtszenario an.

Das Evakuierungsszenario entspricht visuell dem Fahrscenario, der Proband steht allerdings in der CAVE und befindet sich zu Beginn des Untersuchungsteils sozusagen zu Fuß im Abstand von 30 Metern zum Unfall-LKW direkt neben seinem Fahrzeug (Situation nach dem Aussteigen). Der Proband wird instruiert, dass sich dieses Szenario direkt an das vorherige Fahrscenario anschließt und er beim Start des Szenarios gerade das Fahrzeug verlassen hat.

Probanden, die im Fahrscenario die Aktivierung der BBA erlebt haben (BBA-Gruppe), erleben auch das Evakuierungsszenario mit aktivierter BBA. Ebenso erleben die Probanden, die die Aktivierung der BBA im Fahrscenario nicht erlebt haben, diese auch nicht im Fluchtszenario (Kontrollgruppe, KG). In beiden Gruppen endet der Versuch, sobald der Proband an der Notrufstation einen Notruf absetzt oder den Tunnel durch das Portal oder den Notausgang verlässt.

2.1.4 Abhängige Variable

Verhalten

Im Fahrscenario war die primäre Abhängige Variable, ob und mit welcher Latenz die Probanden ihr Fahrzeug verlassen. Im Evakuierungsszenario war die primäre Abhängige Variable das Verhalten der Probanden im Tunnel, insbesondere die Wahl des Evakuierungsziels. Zusätzlich wurden die Bewegungsprofile der Fluchtwege ausgewertet.

Selbstberichtetes Erleben

Zusätzlich zu den Verhaltensdaten wurde das subjektive Empfinden der Probanden mithilfe von Fragebögen erhoben, die zu Beginn und am Ende des Versuches ausgefüllt wurden. Außerdem erfolgte nach jeder Fahrt eine kurze Befragung direkt in der CAVE, bei der die Probanden ihre Einschätzungen verbal wiedergaben.

Nach der Untersuchung wurden alle Probanden mit dem selbstentwickelten Fragebogen zur Situation im Tunnel befragt. Mit diesem wurde erfasst, was die Probanden während des Versuchs wahrgenom-

men haben (Sicherheitstechnik, andere Fahrzeuge, ...) und wie sie die Situation erlebt haben. In der BBA-Gruppe waren diese Fragen um spezielle Fragen zur BBA erweitert [21].

Fragebögen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, umfassen: Mit dem State-Trait-Anxiety Inventory (STAI) [14]; [27] wurde sowohl die allgemeine Ängstlichkeit einer Person (Trait) als auch ihre momentane Angst (State) gemessen. Diese beiden Skalen werden jeweils mit 20 Fragen erfasst, die auf einer 4-stufigen Likert-Skala beantwortet werden. Mit dem Tunnelangstfragebogen (TAF) [18] wurde die spezifischer Ängstlichkeit beim Durchfahren eines Tunnels gemessen. Mithilfe des SAM wurde die Erregung, Valenz und Dominanz (Kontrolle) des Probanden erfasst. Die Einschätzung erfolgt jeweils auf einer 9-stufigen Skala. Die einzelnen Antwortmöglichkeiten werden dabei durch eine gezeichnete Person repräsentiert, die den jeweiligen Gefühlszustand ausdrückt.

Mittels Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) wurde potentiell auftretende Simulator Sickness erfasst [8].

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Nachbefragung

Wahrgenommene Sicherheitseinrichtung

Nach dem Ende des Versuchs wurden die Probanden gefragt, welche Sicherheitseinrichtungen sie im Straßentunnel wahrgenommen hatten. Dabei gaben fast alle Probanden an, dass sie den Notausgang (46 von 50) und die Fluchtwegkennzeichen (41 von 50) gesehen haben. Die Notrufstation wird von ca. 2/3 der Probanden gesehen (34 von 50) und auch an die Nothaltebucht, welche die Probanden während der Fahrt passierten, erinnern sich ca. 2/3 (33 von 50). Die Notgehwege werden nur von ca. der Hälfte der Probanden als solche erkannt (26 von 50).

Die beiden Versuchsgruppen unterschieden sich größtenteils nicht in der Anzahl der wahrgenommenen Sicherheitseinrichtungen. Nur die Fluchtwegkennzeichen wurden in der Bedingung mit aktivier-

ter BBA marginal signifikant häufiger gesehen als in der Bedingung ohne BBA. Dies mag dadurch begründet sein, dass sie für die Orientierung bei der Flucht in dieser Gruppe von größerer Bedeutung waren.

Einfluss der virtuellen wassernebelbasierten BBA

In der BBA Bedingung wurde der Einfluss der aktivierten BBA auf die Sichtverhältnisse im Fahrzeug von 20 der 25 Probanden (80 %) auf einer 5-stufigen Likert Skala als ziemlich oder sehr stark eingestuft. Außerhalb des Fahrzeugs wurde die Einschränkung noch von 3 Probanden als sehr stark und von 10 Probanden als ziemlich eingestuft (52 %). Als Gefahr wurde der Wassernebel nur von einer Minderheit von 32 % angesehen.

Zusätzlich wurden die Probanden gefragt, ob der Wassernebel ihre Entscheidung beeinflusst hat, das Fahrzeug zu verlassen. Dabei gaben 44 % der Probanden an, dass sie in ihrer Entscheidung vom Wassernebel beeinflusst wurden. Interessanterweise begründeten einige Probanden, die angaben, durch den Wassernebel in ihrem Verhalten beeinflusst worden zu sein, dies damit, dass sie im Wassernebel nichts mehr gesehen hätten und deshalb das Fahrzeug verlassen hätten. Andere stiegen zwar aus, gaben aber an, dass sie durch den Wassernebel verunsichert wurden, da die Situation unübersichtlich wurde. Probanden, die angaben nicht beeinflusst worden zu sein, erkannten die Situation als potenziell gefährlich und wollten das Fahrzeug aufgrund des Feuers und des Rauchs auf jeden Fall verlassen.

2.2.2 Verhaltensdaten

Alle Probanden sowohl der BBA Bedingung als auch der Kontrollbedingung ohne aktivierte BBA verließen kurz nach der ersten Evakuierungsdurchsage ihr Fahrzeug. Auch in den aufgesuchten Fluchtzielen unterschieden sich Probanden mit und ohne BBA nicht. Der Großteil der Probanden floh zum nächstgelegenen Notausgang. In der Bedingung mit BBA flohen 19 der 25 Probanden (76 %) zum nächstgelegenen Notausgang, in der Bedingung ohne BBA waren es 22 der 25 Probanden (88 %). Wenige Probanden suchten die Notrufstation

auf oder flohen in Richtung Portal zu den weiterentfernten Sicherheitseinrichtungen (Bild 4).

Die Probanden stiegen unter dem Einfluss einer BBA tendenziell etwas langsamer aus als Probanden ohne BBA. Auch wenn der Unterschied nur marginal signifikant ist und der Unterschied in der absoluten Dauer bis zur Flucht nur wenige Sekunden beträgt, entspricht die Effektstärke einem mittelgroßen Effekt. Dies könnte darauf hindeuten, dass hier die WN-Anlage einen Einfluss auf das Verhalten der Probanden hatte.

Die Auswertung der Fluchtwege ergab, dass Probanden mit aktivierter BBA eher an den Wänden des Tunnels entlang flohen, während die Proban-

den ohne BBA eher den direkten Weg zum Notausgang in der Tunnelmitte wählten (vgl. Bild 5).

Der Einfluss einer BBA auf die Sicherheit im Straßentunnel wurde durchgehend positiv eingeschätzt. Die BBA wurde von den meisten Probanden sehr positiv angenommen, was sich darin ausdrückt, dass 70 % der Probanden den Einbau von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunnel befürworteten. Unklar bleibt bei dem Versuch der Einfluss haptischer Reize wie Kälte und Nässe, die in der Virtuellen Realität nicht zu simulieren waren.

3 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA (Typ Druckluftschaum) in einem Realversuch

3.1 Methode

Ziel dieser zweiten Studie (siehe auch [20]) ist es, den Einfluss einer schaum-basierten Brandbekämpfungsanlage (BBA Typ DLS) auf das Erleben und Verhalten von Tunnelnutzern in einem Feldversuch

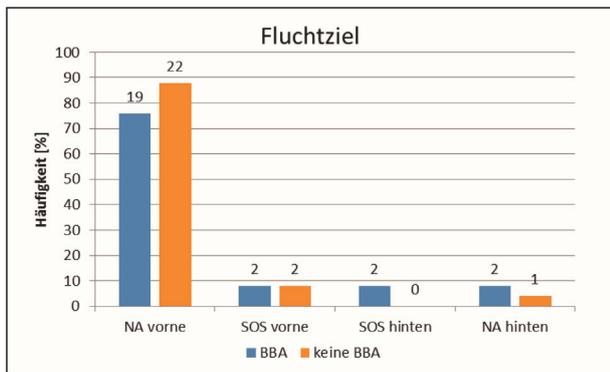


Bild 4: Fluchtziele der Probanden in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung

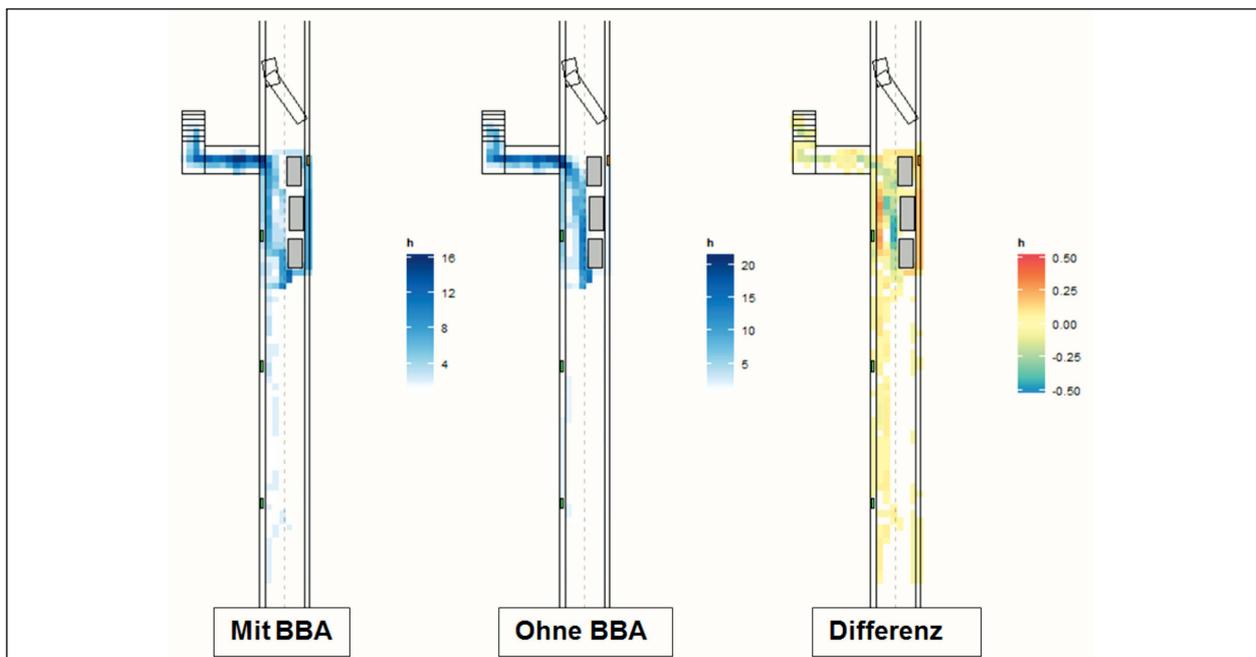


Bild 5: Häufigkeit, mit der Probanden bestimmte Tunnelabschnitte betreten. (Differenz zeigt die relative Häufigkeit, mit der Probanden einen Tunnelabschnitt betreten, in Abhängigkeit der Versuchsgruppe. Je roter der Bereich, umso häufiger waren Probanden aus der Versuchsgruppe mit BBA in diesem Bereich.

zu untersuchen. Das Erleben und Verhalten einer Gruppe von Probanden in einem simulierten Brandszenario mit aktivierter BBA wurde mit dem Erleben und Verhalten einer Kontrollgruppe ohne aktivierte BBA verglichen.

3.1.1 Probanden

Insgesamt nahmen 33 Personen an der Untersuchung teil. Diese wurden zufällig auf die beiden Experimentalbedingungen aufgeteilt. Eine Hälfte erlebte das Unfallszenario mit Rauchentwicklung ohne aktivierte BBA (Kontrollgruppe, KG), die andere Hälfte das gleiche Szenario mit aktivierter BBA (BBA-Gruppe). Aufgrund von technischen Schwierigkeiten mussten 3 Probanden aus der Auswertung ausgeschlossen werden. In die Auswertung gingen somit 30 Probanden ein. 16 Probanden mit BBA-Aktivierung (BBA-Gruppe: 8 Frauen, 8 Männer) und 14 Kontrollprobanden (KG: 7 Frauen, 7 Männer). Der jüngste Proband war 21 Jahre, der Älteste 64 Jahre alt. Im Schnitt waren die Probanden der Kontrollgruppe 38 Jahre alt und unterschieden sich damit nicht signifikant von der BBA-Gruppe, die durchschnittlich 36 Jahre alt waren.

Die Einschlusskriterien (mind. 21 Jahre alt, mindestens 3 Jahre gültiger Führerschein) und die Ausschlusskriterien (psychische oder körperliche Erkrankung, Tunnelangst, frühere traumatische Erlebnisse in Zusammenhang mit dem Straßenverkehr oder Tunneln, Schwangerschaft) zur Studienteilnahme wurden vorab in einem Telefonscreening geprüft. Die Teilnahme an der Untersuchung war freiwillig und alle Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 100 Euro, wobei vor dem Versuch nur eine Aufwandsentschädigung von 75 Euro zugesagt wurde.

3.1.2 Versuchstunnel

Die Studie wurde im Tunnel Jagdberg bei Jena im Zuge der BAB 4 durchgeführt. In diesem ist eine Brandbekämpfungsanlage (BBA, Typ Druckluftschaum DLS) installiert. Der Tunnel war zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht eröffnet, aber es war bereits die gesamte Sicherheitstechnik eingebaut, so dass der Tunnel ohne öffentlichen Verkehr

für die Durchführung der Untersuchung genutzt werden konnte. Der Tunnel ist ein Richtungsverkehrstunnel mit jeweils drei Fahrspuren. Die Untersuchung wurde in der Südröhre mit Einfahrt durch das Westportal durchgeführt.

3.1.3 Versuchsablauf

Die Probanden sollten zum Versuch feste Schuhe tragen und Ersatzschuhe sowie Ersatzsocken mitbringen. Den Probanden wurde mitgeteilt, dass sie diese Kleidungsstücke zur Untersuchung benötigen, weil der Versuch im noch nicht fertiggestellten Tunnel Jagdberg stattfindet und deswegen die Gefahr bestehe, die Kleidung aufgrund der baustellenüblichen Bedingungen zu verschmutzen. Tatsächlich sollten die Probanden diese Kleidungsstücke mitbringen, damit sie die eventuell durch den Schaum der BBA durchnässten Kleidungsstücke wechseln konnten, um potentielle gesundheitliche Beeinträchtigungen zu vermeiden.

Die Probanden wurden zu verschiedenen Zeiten am 11. und 12. September 2014 in Zweiergruppen in Jena abgeholt und zum Tunnel gefahren, wobei sich die 2 Probanden einer Zweiergruppe aufgrund der Vorauswahl hinsichtlich Alter und Geschlecht ähnlich waren. Vor der Abfahrt wurde der Führerschein der Probanden kontrolliert und ein Atem-Alkoholtest durchgeführt.

Nach Ankunft am Westportal des Tunnels wurden die Probanden von einem Versuchsleiter in ein Gebäude der Tunnelüberwachungsstelle geführt. Dort erhielten sie noch einmal die Probandeninformation. Dann erklärten sie schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme und bearbeiteten erste Fragebögen (State-Trait-Anxiety Inventar, Tunnelangstfragebogen, aktuelle Befindlichkeit, soziodemographische Angaben, siehe Kapitel 2.1.4). Die Probanden wurden darauf hingewiesen, dass sie, zusätzlich zu der Aufwandsentschädigung von 75 Euro, weitere 25 Euro bekämen, wenn sie sich während des Versuches so verhalten, wie sie es auch im alltäglichen Straßenverkehr tun würden. Dadurch sollten die Probanden zu einem realitätsnahen Verhalten motiviert werden. Danach teilte der Versuchsleiter die beiden Probanden per Zufall den beiden Versuchsgruppen zu, wobei jeweils ein Proband der Gruppe

mit aktivierter BBA und einer der Kontrollgruppe ohne BBA-Aktivierung zugeteilt wurde. Da die Probanden der BBA-Gruppe die Aktivierung der schaubasierten Brandbekämpfungsanlage erlebten und der Schaum Zeit zum Zersetzen braucht bzw. nach der Aktivierung das Szenario im Tunnel umgebaut werden musste, fuhr in jeder Zweiergruppe immer zuerst der KG-Proband und danach der BBA-Proband in den Tunnel. Bevor die Probanden zum Tunnel gingen, um den Versuch zu beginnen, erhielten sie eine wasserabweisende Jacke und eine wasserdichte Probandenhose, um potentielle gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Nässe des Schaumes zu vermeiden (vgl. Bild 6). Am Tunnel wurden die Probanden in das Untersuchungsfahrzeug eingewiesen. Erst, wenn alle Fragen des Probanden beantwortet waren, setzte ein Versuchsleiter dem Probanden eine Brille mit einer daran befestigten Kamera auf (vgl. Bild 6). Danach startete ein anderer Versuchsleiter die Kameras im Fahrzeug und ein weiterer Versuchsleiter setzte sich zum Probanden in das Untersuchungsfahrzeug (Rückbank). Die Probanden wurden instruiert, den Versuchsleiter zu ignorieren und nur im Notfall anzusprechen.

Die Probanden wurden daran erinnert, dass während des gesamten Versuches die StVO zu beachten ist. Sie wurden noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sie die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h nicht überschreiten dürfen und das Rechtsfahrgebot gilt. Wenn die Probanden keine weiteren Fragen hatten, vergewisserte sich der Versuchsleiter in der Betriebszentrale des Tunnels, dass die Tunnelröhre frei befahrbar ist und setzte sich mit den Versuchsleitern am Ereignis in Verbindung, damit diese sich auf das Aktivieren der Nebelmaschine vorbereiten konnten. Danach wurde der Proband gebeten, loszufahren. Im Tunnel wurden die Probanden mit einer nachgestellten Unfallsituation (zwei quergestellte Fahrzeuge, mit Warndreieck angekündigt) mit Rauchentwicklung (Nebelanlage, bedient von einem Versuchsleiter) konfrontiert (siehe Bild 7).

Der Schaum der BBA benötigt lange Zeit, um sich zu zersetzen. Deshalb wurde nach jeder Aktivierung der BBA die nachgestellte Unfallsituation an einer anderen Stelle im Tunnel aufgebaut. Da der Schaum aufgrund der Steigung des Tunnels in Richtung Ostportal abfloss, wurde die Unfallsituation nach jeder BBA-Aktivierung in Richtung West

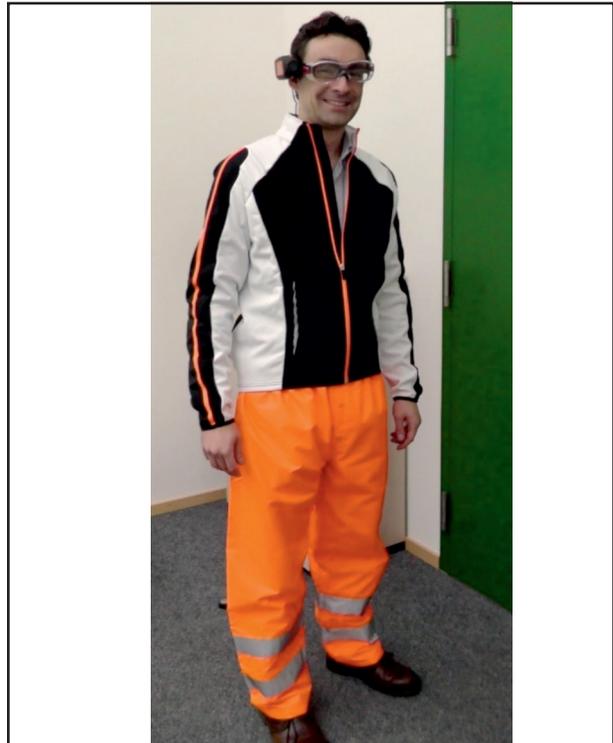


Bild 6: Proband in wasserabweisender Kleidung mit Schutzbrille und Kopfkamera



Bild 7: Unfallszenario bei Auslösung der BBA

portal verlegt. Die neuen Standorte waren ähnlich weit von den Sicherheitseinrichtungen im Tunnel entfernt. Am zweiten Tag der Untersuchung wurde erneut mit dem ersten Aktivierungsabschnitt begonnen. Der Schaum des Vortages hatte sich über Nacht zersetzt und war auf der Straße nicht mehr sichtbar.

Hielt ein Proband bereits außerhalb des Löschbereichs, der aktiviert werden sollte, an, wurde dies vom Versuchsleiter notiert und der Proband wurde aufgefordert, bis zum aufgebauten Warndreieck (ca. 25 Meter vor dem Unfall) weiterzufahren. Bei allen Probanden wurde mit dem Anhalten die in diesem Tunnel vorgesehene Evakuierungsdurchsage

für den Brandfall eingespielt: Achtung, Achtung! Feuer im Tunnel. Bitte fahren Sie sofort an den Fahrbahnrand. Bilden Sie eine Rettungsgasse. Lassen Sie den Zündschlüssel stecken und verlassen Sie jetzt sofort das Fahrzeug. Folgen Sie den grünen Hinweiszeichen, gehen Sie weg vom Rauch. Verlassen Sie den Tunnel durch die markierten Fluchttüren. Bitte helfen Sie anderen Personen. Bei den Probanden der Ereignisgruppe wurde während der Durchsage (zum Zeitpunkt: jetzt sofort) die BBA für 2 Minuten aktiviert. Die Probanden hatten ab Beginn der Durchsage 3 Minuten Zeit, zu reagieren. Im Untersuchungsfahrzeug lag auf dem Beifahrersitz eine Zeitung, die die Probanden nutzen konnten, um sich nach Aussteigen vor dem Schaum zu schützen. Je nach Reaktion des Probanden endete der Versuch bei Eintreten eines der folgenden Kriterien: Versuch, Notruf über Handy abzusetzen; Wenden des Fahrzeuges; Erreichen bestimmter Ziele: Notausgang, Notrufsäule, Ereignis; Verbleiben des Probanden im Fahrzeug für 3 Minuten; Aussteigen und Verbleiben des Probanden im Szenario für 3 Minuten.

Die Probanden wurden nach dem Versuch von einem Versuchsleiter zu aktuellen Gedanken und zur Situation befragt und durch die Nordröhre des Tunnels zurück zum Westportal gebracht.

Die Probanden wurden im Rahmen einer Nachbefragung zur erlebten Situation befragt. Zusätzlich füllten sie noch einmal Fragebögen aus (State-Version des State-Trait-Anxiety Inventory, Peritraumfragebogen). Weiter erhielten die Probanden eine Kontaktadresse, an die sie sich für noch auftretende Fragen oder bei problematischen Nachwirkungen wenden könnten. Sobald beide Probanden einer Zweiergruppe den Versuch durchgeführt hatten, erhielten sie ihre Aufwandsentschädigung von 100 Euro pro Person und wurden zurück nach Jena gefahren.

3.1.4 Verwendete Materialien

Schaummittel:

Es wurde das OneSeven Schaummittel Klasse B (FF) 1,0 % (Anwendungslösung) eingesetzt. Das Datenblatt gibt zu diesem Produkt von OneSeven an, dass es ein fluorfreies und polymerfreies sowie

zu 100 % synthetisches Schaummittel auf der Grundlage von Kohlenwasserstoff-Tensiden ist. Das Sicherheitsdatenblatt kennzeichnet das Produkt als unbedenklich. Die vorliegenden Untersuchungen des SynLab Hygieneinstituts führten zu dem Ergebnis, dass auch keine Reizungen der Schleimhäute durch dieses Produkt zu erwarten sind [30].

Videoaufzeichnung:

Es wurde eine wasserdichte HD119 Extrem Sport DV Action-Kamera (EagleEye Extreme HD, Chitec Electronics, China) verwendet, die an die Schutzbrille der Probanden angebracht wurde und somit auch die Kopfposition (und damit die Aufmerksamkeitsausrichtung) des Probanden erfasste. Zusätzliche Kameras wurden im Tunnel und im Fahrzeug angebracht. Die Aufzeichnungen der Überwachungskameras im Tunnel konnten zusätzlich ausgewertet werden.

Bewegungsmessung:

Zur Erfassung der Geschwindigkeiten wurden die Videoaufzeichnungen herangezogen und mithilfe der Sicherheitseinrichtung im Tunnel (vor allem Fluchtwegkennzeichen) die zurückgelegte Strecke, die Fluchtzeit sowie eine durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit ermittelt.

Fahrzeuge:

Als Testfahrzeug wurde ein von der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Verfügung gestelltes Fahrzeug verwendet. Dabei handelte sich um einen VW Passat Kombi mit Automatikgetriebe. Für das Unfallszenario wurde ein PKW (Golf V, Variant, Farbe Rot) sowie ein angemieteter Transporter (Typ Sprinter, Farbe Weiß mit Aufschrift) verwendet.

3.1.5 Unabhängige Variable und Abhängige Variable

Als unabhängige Variable diente – wie in der Untersuchung in Kapitel 2.1.3 – die Aktivierung der BBA. In der BBA-Gruppe wurde die BBA aktiviert, in der Kontrollgruppe nicht. Als abhängige Variable wurde analog zu der vorherigen Studie das Verhalten sowie das Erleben der Probanden erfasst. Primäre Abhängige Variablen beim Verhalten waren die Latenz, mit der die Probanden ihr Fahrzeug verlassen

und die Wahl des Evakuierungsziels. Bezüglich des Erlebens wurden die selbstentwickelten Fragebögen optimiert (siehe auch Projektbericht zu FE 15.0607/2014/ERB; [20]) und werden zusätzlich Ergebnisse zum State-Trait-Anxiety Inventory (STAI) ([14]; [27]) und Self-Assessment Manikin (SAM) [4] dargestellt (siehe Kapitel 2.1.4).

3.1.6 Statistik

Um zu untersuchen, ob und wie sich die BBA-Gruppe und die KG in den Fragebögen zum selbstberichteten Erleben und in Verhaltensmaßen unterscheiden, wurden bei wiederholt (vorher-nachher) erhobenen Instrumenten (z. B. State Version des STAI) Varianzanalysen mit Messwiederholung herangezogen. Um die Unterschiedlichkeit zwischen den Gruppen bei einmalig erhobenen Variablen zu untersuchen (z. B. Aussteigen aus Fahrzeug am Unfallort) wurden je nach Skalenniveau der Variablen t-Tests für unabhängige Stichproben oder Chi-Quadrat Tests berechnet. Die Hauptfrage zielt auf den Vergleich des Evakuierungsverhaltens zwischen den Gruppen ab.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Psychometrische Fragebögen zur Befindlichkeit

Nach der Tunnelfahrt schätzten die Probanden im Self-Assessment-Manikin (SAM) Aktivierung, Valenz und Kontrolle ein sowie im STAI die aktuelle Angst. Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Maße sind in Tabelle 1 dargestellt.

Fragebogen – Skala	BBA-Gruppe	Kontrollgruppe
SAM Aktivierung	2.81 (1.87)	3.79 (2.39)
SAM Valenz	2.31 (1.49)	2.14 (0.95)
SAM Kontrolle	6.81 (2.01)	7.07 (1.77)
STAI State	29.88 (7.55)	30.79 (6.48)

Anmerkung: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD, in Klammern) der nach der Tunnelfahrt erhobenen Fragebögen zur Befindlichkeit. SAM: Self-Assessment-Manikin (Skala von 1 bis 9), STAI: Spielberger State Trait Anxiety Inventory (Skala von 20 bis 80).

Tab. 1: Emotionales Befinden der Probanden

Die statistische Auswertung der Fragebögen mittels Varianzanalyse mit den Faktoren Zeit und Gruppe ergab nur für den Effekt Zeit bei der Skala Valenz des SAM ein signifikantes Ergebnis, das darauf hindeutet, dass die emotionale Befindlichkeit der Probanden nach der Untersuchung besser war als vor der Untersuchung.

3.2.2 Nachbefragung

Im Rahmen der als Interview durchgeführten Nachbefragung sollten die Probanden Einschätzungen zur Untersuchungssituation auf psychometrischen Skalen und zusätzlich offene Fragen in eigenen Worten beantworten (umfassende Darstellung im Schlussbericht zu FE FE 89.0299/2014, [20]).

Ratings zum Erleben der Untersuchungssituation

Die Gruppen unterschieden sich statistisch signifikant in den Items Wie gut haben Sie die Durchsage im Tunnel verstanden? (siehe Tabelle 2) und Wie sehr haben Sie daran geglaubt, dass Sie die Kompetenzen dazu haben, sich im Notfall aus dem Tunnel zu retten? (im Mittel BBA: 81; KG: 95 von 100). Die BBA-Gruppe erzielte in diesen Items geringere Werte als die Kontrollgruppe. Alle Ergebnisse zur Verhaltensbeeinflussung und Durchsagenverständlichkeit werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Erinnerung von Durchsageinhalten

Bezogen auf die Frage, welche Inhalte der Durchsage die Probanden erinnerten (freie Reproduktion), zeigten sich folgende Ergebnisse:

- 73.3 % (n = 22) Tunnel verlassen
- 56.7 % (n = 17) Auto verlassen
- 56.7 % (n = 17) Zum Notausgang begeben
- 53.3 % (n = 16) Anderen helfen
- 53.3 % (n = 16) Zündschlüssel stecken lassen
- 40.0 % (n = 12) Feuer im Tunnel
- 33.3 % (n = 10) Rettungsgasse bilden
- 26.7 % (n = 8) Rechts heranfahren
- 16.7 % (n = 5) Unfall im Tunnel
- 10.0 % (n = 3) Auto abstellen

Frage zu:	Kontrollgruppe		BBA-Gruppe	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Ähnlichkeit der Untersuchungssituation zur Realität	58.93	30.77	60.38	26.82
Beeinflussung des Verhaltens durch Motivation zum richtigen Verhalten	31.43	40.36	27.50	38.38
Beeinflussung des Verhaltens durch Bekleidung	13.21	20.90	12.82	26.14
Beeinflussung des Verhaltens durch Informationen zu festen Schuhen, Ersatzsocken bzw. Ersatzschuhen	7.50	15.29	11.67	30.34
Beeinflussung des Verhaltens durch Sichtbarkeit des Notausgangs	58.57	37.49	63.44	40.90
Beeinflussung des Verhaltens durch Durchsagen	68.57	32.96	69.38	32.55
Verständlichkeit der Durchsagen	90.71	11.24	59.06	38.95

Anmerkung: Skala für jedes Item reichte von 0 (gar nicht) bis 100 (sehr stark/sehr gut/sehr sicher/...). Angegeben sind Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD); Kontrollgruppe: n = 14; BBA-Gruppe: n = 16;

Tab. 2: Angaben zur Verhaltensbeeinflussung und Durchsagenverständlichkeit.

Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen zeigten sich bzgl. der freien Reproduktion nur bei dem Durchsageinhalt: Zum Notausgang begeben. Diesen erinnerten die Probanden der Kontrollgruppe häufiger als die Probanden der BBA-Gruppe (78.6 % vs. 37.5 %).

Bezogen auf die Durchsagen gaben 20 % der Probanden (BBA = 3; KG = 3) an, dass sie durch die Durchsageinhalte begeben Sie sich zum Notausgang vs. helfen Sie anderen Personen irritiert waren. 7 % der Probanden (n = 2) merkten an, dass sie sich in der Flucht durch den Durchsageinhalt Zündschlüssel stecken lassen als beeinträchtigt erlebt haben: Diese Probanden wussten nicht, ob sie ihre Flucht aus dem Tunnel fortsetzen sollten oder besser zurück zum Fahrzeug gehen sollten, um den Zündschlüssel ins Zündschloss zu stecken. Solche Probleme mit den Inhalten der Durchsagen wurden zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschiedlich häufig berichtet.

Erkennen und Annahmen zur Tunnelausstattung

Um die Wahrnehmung von Sicherheitseinrichtungen genauer zu betrachten, sollten die Probanden angeben, ob sie bestimmte vorgegebene Ausstattungselemente im Jagdbergtunnel gesehen haben (Wiedererkennen) und benennen, ob sie diese Elemente als grundsätzliche Ausstattung eines Stra-

ßentunnels ansehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Die Gruppen unterschieden sich nicht signifikant darin, ob sie bestimmte Ausstattungselemente zur grundsätzlichen Ausstattung eines Straßentunnels zählten. Die Frage, ob eine BBA zurzeit zur Standardausstattung eines Straßentunnels gehört, beantworteten 60 % (n = 18) mit Ja. Auch hier unterschieden sich die Gruppen nicht signifikant.

Einfluss der schaubasierten BBA

Die Ergebnisse zu den Fragen, die sich auf die schaubasierte BBA bezogen und somit nur den Probanden der BBA-Gruppe gestellt wurden, sind in Tabelle 4 dargestellt.

3.2.3 Verhaltensdaten

Ausstiegs- und Evakuierungsverhalten

Alle bis auf 2 Probanden verließen innerhalb von 3 Minuten das Fahrzeug. Beide Probanden, die das Fahrzeug nicht innerhalb von 3 Minuten verließen, waren in der Gruppe mit aktivierter BBA. Wenige Probanden (2) zeigten problematisches Verhalten. Ein Proband wendete sein Fahrzeug im Tunnel. Dieser Proband war aus der Gruppe mit aktivierter BBA und wendete auch im Einflussbereich der BBA.

	Wiedererkennen				Grundsätzliche Ausstattung			
	Kontrolle		BBA		Kontrolle		BBA	
	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>
Notausgang	100 %	14	100 %	16	100 %	14	100 %	16
Fluchtwegkennzeichen	100 %	14	100 %	16	86 %	12	100 %	16
Notrufstation	93 %	13	81 %	13	100 %	14	87 %	14
Feuerlöscher	21 %	3	44 %	7	86 %	12	63 %	10
Erste-Hilfe-Koffer	7 %	1	19 %	3	64 %	9	56 %	9
Pannenhilfskasten	86 %	12	87 %	14	93 %	13	87 %	14
Notgehwege	100 %	14	81 %	13	86 %	12	81 %	13
Düsen-BBA	7 %	1	19 %	3	21 %	6	50 %	8
Hydrant	29 %	4	13 %	2	57 %	8	38 %	6
Wechselverkehrszeichen	86 %	12	75 %	12	79 %	11	69 %	11
LED-Licht	21 %	3	31 %	5	7 %	1	25 %	4
Lüftung	7 %	1	6 %	1	14 %	2	6 %	1
Kamera	21 %	3	6 %	1	14 %	2	0 %	0

Anmerkung: Die Probanden sollten angeben, ob sie bestimmte vorgegebene Ausstattungselemente im Tunnel gesehen haben (Wiedererkennen), und benennen, ob sie diese Elemente zur grundsätzlichen Ausstattung eines Straßentunnels rechnen; Angegeben sind relative (*h*) und absolute Häufigkeiten (*n*); Kontrollgruppe: *n* = 14; BBA-Gruppe: *n* = 16.

Tab. 3: Wiedererkennen von Ausstattungselementen und Einschätzung als grundsätzliche Ausstattung.

Frage zu:	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
Gefühl, dass die aktivierte BBA eine Gefahr?	9.69	17.17	16
Hat die aktivierte BBA Entscheidung beeinflusst, ob Auto verlassen?	36.06	35.14	16
Wie sehr überrascht, als BBA aktiviert?	58.75	37.57	16
Wie sehr aktivierte BBA Sicht im Auto eingeschränkt?	95.45	8.20	11
Befürchtungen zu negativen Einflüssen des Schaumes?	8.44	14.11	16
Hat BBA Fluchtverhalten außerhalb des Autos behindert? ¹	22.86	31.85	14
Hat BBA Sicht außerhalb des Autos eingeschränkt?	31.43	33.19	14
Irritationen durch Schaum an Schleimhäuten?	0.71	2.67	14
Bei Durchsagen Informationen zur BBA gewünscht?	35.00	40.14	14

Anmerkung: Mittelwerte (*M*) und Standardabweichungen (*SD*) für Items der Nachbefragung. Zu diesen Fragen wurden nur Probanden der BBA-Gruppe befragt. 12 Probanden sind nicht ausgestiegen

Tab. 4: Angaben zur Wirkung der Brandbekämpfungsanlage auf die Probanden

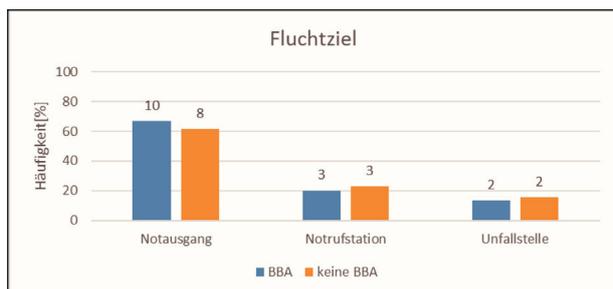


Bild 8: Prozentualer Anteil der Probanden der beiden Versuchsgruppen, die bestimmte Sicherheitseinrichtungen aufgesucht hatten.

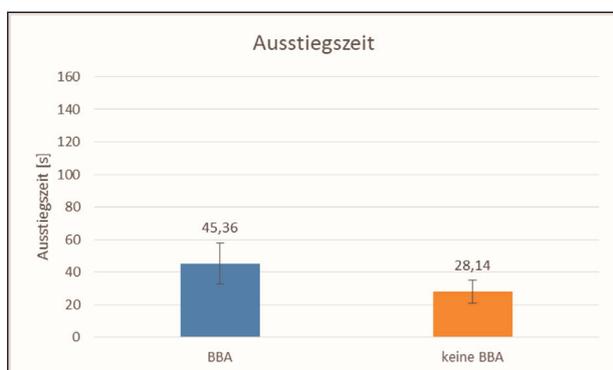


Bild 9: Durchschnittliche Zeit, die Probanden benötigten, um ihr Fahrzeug nach Beginn der Durchsage zu verlassen, aufgeteilt nach Versuchsgruppe.

In beiden Gruppen begaben sich die meisten Probanden zum nächstgelegenen erreichbaren Notausgang, 8 in der Kontrollgruppe und 10 in der BBA-Gruppe. Je ein Proband pro Gruppe kehrte zum PKW zurück, je 2 pro Gruppe suchten den Unfall auf und je 3 pro Gruppe begaben sich zur Notrufsäule (vgl. Bild 8). Die Probanden der beiden Versuchsgruppen unterschieden sich nicht in der Wahl ihres Fluchtziels. Bei einem Probanden wurde der Versuch abgebrochen, als er mit dem Handy die Polizei anrufen wollte.

Neben der Frage, ob die Probanden ihr Fahrzeug verließen, ist die Zeit, die die Probanden benötigten, um ihr Fahrzeug zu verlassen, nachdem die Durchsage im Tunnel aktiviert wurde, eine wichtige Variable. Für die Untersuchung wurden die beiden Probanden, die ihr Fahrzeug nicht innerhalb von 3 Minuten verlassen hatten, aus der Auswertung ausgeschlossen. Es findet sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen, (vgl. Bild 9).

Gehgeschwindigkeit

Die Evakuierungsgeschwindigkeit wurde mithilfe der Videos der Kopfkameras berechnet. Dabei wur-

den nur Probanden in die Auswertung aufgenommen, die mindestens 10 Meter weit gelaufen waren und die ein Fluchtziel erreicht haben. Bei den restlichen Probanden wurde aufgrund der durch die kurzen Wege und Zeiten entstehenden Ungenauigkeiten auf die Berechnung verzichtet. Drei Probanden aus der Gruppe mit aktivierter BBA und ein Proband aus der Kontrollgruppe wurden deshalb ausgeschlossen. Außerdem ausgeschlossen wurden die zwei Probanden, die länger als drei Minuten gebraucht hatten, ihr Fahrzeug zu verlassen.

Die Versuchsgruppen unterscheiden sich nicht in ihrer durchschnittlichen Evakuierungsgeschwindigkeit. Die Probanden der Gruppe mit aktivierter BBA gingen im Durchschnitt 1.86 m/s schnell, die der Gruppe ohne aktivierte BBA 1.60 m/s. In der visuellen Videoauswertung zeigt sich auch, dass sieben Probanden in der Gruppe mit aktivierter BBA aus dem Einflussbereich der BBA joggten oder sogar rannten. In der Kontrollgruppe rannten oder gingen nur zwei Probanden zügig. Die durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit über beide Versuchsgruppen betrug 1,73 m/s, was 6,23 km/h entspricht.

Anhalten vor der Unfallstelle

Um in den Einflussbereich der BBA zu kommen, mussten Probanden relativ nah an den Unfall heranfahren. Insgesamt hielten 25 der 30 Probanden vorher an und wurden vom Versuchsleiter im Fahrzeug aufgefordert, bis zu einem Warndreieck, das 25 Meter vor dem Unfall am rechten Fahrbahnrand stand, weiterzufahren. Das zeigt, dass die meisten Probanden in deutlich größerem Abstand zum Unfall angehalten hätten. Durchschnittlich hätten die Probanden ca. 161 Meter vor dem Ereignis angehalten, wobei die weiteste Entfernung, in der ein Proband bereits anhielt, ca. 500 Meter waren. Die Anzahl der Probanden, die zur Weiterfahrt aufgefordert wurden, sowie die Entfernung des ersten Anhaltens vor der Unfallstelle unterschied sich nicht zwischen den Gruppen.

3.3 Diskussion

3.3.1 Soziodemographische Variablen und psychometrische Fragebögen

Beide Gruppen sind in ihren soziodemographischen Variablen (z. B. Alter, Geschlecht) sowie in den Angaben bei den Fragebögen, die sie vor der Tunnelfahrt ausfüllen sollten, vergleichbar. Nach der Untersuchung war die Stimmung im Vergleich zu vor der Untersuchung positiver. Hierbei gab es keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Potentielle Unterschiede im Erleben oder Verhalten bei der Untersuchung können also nicht auf vorherige Gruppenunterschiede zurückgeführt werden.

3.3.2 Nachbefragung

Die Probanden schätzten das Szenario als mittelgradig ähnlich zu einer realen Situation ein. Einige Probanden bemerkten, dass die Realitätstreue der Situation hätte erhöht werden können, indem mehr Fahrzeuge im Tunnel gewesen wären bzw. eine höhere Geschwindigkeit erlaubt gewesen wäre. Die Gefährlichkeit der Untersuchungssituation wurde mittelstark eingeschätzt, wobei die meisten Probanden äußerten, dass sie solch eine Situation in der Realität als gefährlicher einstufen würden. Die Probanden erlebten zudem den Tunnel als so ausgestattet, dass man sich im Notfall retten kann, und verstanden größtenteils die Durchsagen. Die Durchsagen wurden von den Probanden aber auch kritisiert: So sei die Aufforderung, sich aus dem Tunnel zu retten, und die Aufforderung, anderen Personen zu helfen, widersprüchlich und die Stimme sei zu streng und blechern (Sie wünschten sich eine ruhigere und angenehmere Stimme). Die Probanden gaben auch an, dass ihr Verhalten etwas durch die Informationen, die ihnen vorab zur Untersuchung gegeben wurden (Bekleidung, Schuhe und Socken, Motivation zu richtigem Verhalten durch finanzielle Belohnung), beeinflusst wurde. Zur Bekleidung z. B. äußerten einige Probanden, dass die Brille mit der Kamera zu schwer und somit unangenehm zu tragen gewesen sei, andere gaben an, dass die Bekleidung sehr ungewohnt für eine Autofahrt sei und dass sie ohne die Bekleidung vor dem Aussteigen aus dem Fahrzeug eine Warnweste angezogen hätten. Zudem gaben Probanden an, dass die Motivation zum richtigen Verhalten für

sie ein Anreiz gewesen sei, alles richtig zu machen, weil sie an der zusätzlichen finanziellen Belohnung interessiert waren. Die Information, eine zusätzliche Aufwandsentschädigung in Abhängigkeit des Verhaltens auszuzahlen, wirkte also in der gewünschten Richtung. Möglichen Hemmungen, auszusteigen und sich dem Schaum auszusetzen, obwohl es sich nur um eine Übung handelte, konnte damit allem Anschein nach entgegengewirkt werden.

Die Probanden erwarteten, dass sich der Einbau einer BBA sehr positiv auf die Sicherheit in Straßentunneln auswirkt. Sie würden es begrüßen, wenn diese zur Standardausstattung von Straßentunneln gehörten. Die positiven Aspekte einer BBA waren demnach für die Probanden ersichtlich und für die Probanden aus der Gruppe mit aktivierter BBA überwogen sie auch die negativen Aspekte, die vielleicht während der Aktivierung erlebt wurden. Im freien Antworten wurde dazu angegeben, dass eine BBA Brände schneller löschen könne als die Feuerwehr, die Gefahren von Explosionen verhindern könne, aber auch, dass sie wegen der Gefahr einer Panik nur im Notfall ausgelöst werden solle. Die Probanden schätzten im Durchschnitt, dass in 50 % der Tunnel eine BBA eingebaut ist, wobei die meisten Probanden auch angaben, dass dies in neueren Tunneln häufiger der Fall sein dürfte als in älteren. Probanden überschätzten demnach die Anzahl von Tunneln, in denen eine BBA eingebaut ist, deutlich.

Nachbefragung spezifisch für BBA-Probanden

Bezüglich der untersuchten Brandbekämpfungsanlage zeigte sich, dass die Probanden der BBA-Gruppe die Durchsagen im Tunnel signifikant weniger gut erinnerten als die Probanden der Kontrollgruppe. Speziell bei der Erinnerung an den Durchsageinhalt Bitte begeben Sie sich zum Notausgang schnitt die BBA-Gruppe signifikant schlechter ab als die Kontrollgruppe. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass die Probanden der BBA-Gruppe signifikant weniger an ihre Kompetenzen glaubten, sich im Notfall aus dem Tunnel retten zu können, als die Probanden der Kontrollgruppe. Im freien Antworten gaben die Probanden der BBA-Gruppe an, dass die Durchsagen deutlich schlechter hörbar waren, sobald die Anlage aktiviert wurde und der Schaum im Tunnel verteilt wurde. Einige Probanden der BBA-Gruppe gaben an, dass sie wahrscheinlich

schneller aus dem Fahrzeug ausgestiegen wären, wenn sie die Durchsagen im Fahrzeug deutlicher gehört hätten. Drei der vier Probanden, die besonders lange warteten, bis sie ihr Fahrzeug verließen, gaben während oder nach dem Versuch an, dass sie die Durchsagen nicht verstanden hätten. Die Ergebnisse untermauern die Annahmen aus der Untersuchung in VR (siehe Kapitel 2), dass eine gut verständliche Durchsage ein wichtiger Faktor für ein zielführendes Evakuierungsverhalten ist. Anzumerken ist hier, dass in der vorliegenden Studie die aktivierte BBA die einzige relevante Geräuschquelle war. Die Verständlichkeit der Durchsage könnte in einem realen Brandereignis auch durch die Geräusche des Feuers und der anderen Verkehrsteilnehmer reduziert werden.

Bemerkenswerterweise erlebten die Probanden der BBA-Gruppe keine Irritationen durch den Schaum. Sie hatten das Gefühl, dass die BBA nur eine sehr geringe oder keine Gefahr für sie darstellt. Probanden der BBA-Gruppe äußerten in diesem Kontext, dass sie durch den Schaum kurzzeitig ihre Orientierung verloren hätten. Die BBA hat des Weiteren nach den Angaben der Probanden die Entscheidung beeinflusst, ob die Probanden das Fahrzeug verlassen. Der Mittelwert von durchschnittlich 36 auf einer Skala von 0 bis 100 legt hier eine eher schwache Beeinflussung nahe. Auch wenn die Probanden nur sehr geringe Angst und Irritationen angaben, so waren sie doch durch die BBA überrascht und die Überraschung war im Durchschnitt mittelstark ausgeprägt. Besonders der Knall bei Aktivierung der BBA und die ersten Sekunden des Zuschäumens hätten sie erschreckt. Auch wurde von einigen Probanden geäußert, dass es weniger überraschend wäre, wenn der Schaum erst einmal über einen kurzen Zeitraum in geringerer Menge eingesprüht würde, weil sie sich dann besser an die Situation anpassen könnten. Probanden werden demnach durch die BBA überrascht, obwohl die meisten Probanden davon ausgehen, dass Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln weit verbreitet sind. In der gegebenen Situation scheinen sie aber trotzdem nicht mit einer Aktivierung zu rechnen.

Bezüglich der Wirkung des Schaumes auf die Wahrnehmung ist eine sehr starke Beeinträchtigung der Sicht im Fahrzeug gegeben. Verglichen dazu war die Beeinträchtigung der Sicht außerhalb des Fahrzeuges geringer, aber auch deutlich reduziert. Außerhalb des Fahrzeuges erlebten die Probanden ihr Flucht-

verhalten durch die BBA signifikant eingeschränkt, der Mittelwert von 23 auf der Skala von 0 bis 100 spricht jedoch für eine eher geringe Einschränkung. Diese zeigt sich auch in den Gehgeschwindigkeiten und Fluchtzeiten. Probanden der Gruppe mit aktivierter BBA flohen nicht langsamer als Probanden der Gruppe ohne aktivierte BBA. Als Probleme berichteten Probanden z. B., dass der Schaum den Boden rutschig machen könnte und man beim Flüchten auf seine Schritte aufpassen müsse.

Signifikant von 0 unterschiedlich waren auch die Befürchtungen zu negativen Einflüssen des Schaumes, der Durchschnittswert von 8 spricht aber für sehr gering ausgeprägte Befürchtungen. Dieses Ergebnis ist interessant, da erwartet wurde, dass Schaum als Löschmittel von den Probanden eher als gesundheitsgefährdend eingeschätzt werden könnte. Einschränkend ist hier zu sagen, dass die befragten Probanden die Aktivierung der BBA bereits erlebt hatten und daher wussten, dass sie keine negativen Einflüsse erlebt hatten. Als Befürchtungen äußerte eine Versuchsperson z. B., dass der Schaum die Bekleidung beschädigen könnte, eine andere Person hätte Brennen in den Augen erwartet. Informationen in den Durchsagen zum Schaum hätten sich auch einige Probanden gewünscht (z. B. Achtung, Schaum kommt zur Brandbekämpfung), wobei andere Versuchspersonen auch angaben, dass dies zu viele Informationen wären und der Fokus der Durchsagen auf die Rettung aus dem Tunnel liegen sollte. Der Durchschnittswert von 35 (auf der Skala von 0 bis 100) legt eher einen gering ausgeprägten Wunsch nach mehr Informationen zur BBA in den Durchsagen nahe. Diese Aussage deckt sich mit dem Ergebnis, dass die meisten Probanden ihr Fahrzeug noch während der Aktivierung der BBA verließen. Die Aufforderung zur Flucht reichte demnach aus, damit die Probanden aussteigen. Weitere Informationen über die BBA waren in diesem Zusammenhang nicht notwendig.

3.3.3 Verhaltensdaten

Ausstiegsverhalten

Fast alle Probanden verließen während der Untersuchung in der festgelegten Zeit von 3 Minuten nach Beginn der Durchsage das Fahrzeug. In Über-

einstimmung mit den Versuchen in virtueller Realität zeigte sich, dass Probanden auch während einer aktivierten BBA ihr Fahrzeug verlassen, wenn sie durch eine Tunneldurchsage dazu aufgefordert werden. Zwei Probanden der Gruppe mit aktivierter BBA verließen das Fahrzeug jedoch nicht innerhalb der ersten 3 Minuten. Ein Grund dafür könnte, neben dem direkten Einfluss der BBA, auch eine schlechtere Verständlichkeit der Durchsage sein. Dies gaben Probanden der Gruppe mit aktivierter BBA nach dem Versuch im Vergleich zur Gruppe ohne aktivierte BBA an. Die beiden Probanden, die ihr Fahrzeug nicht innerhalb von 3 Minuten verließen, gaben beide schon während des Versuches an, dass sie die Durchsage nicht verstanden, wenn die BBA aktiviert war. Dies weist auf die Wichtigkeit einer gut verständlichen Durchsage hin, damit Probanden auch im Einflussbereich einer BBA ihr Fahrzeug verlassen. In der VR-Studie war die Durchsage für alle Probanden gut verständlich und hier verließen alle Probanden, auch mit aktivierter BBA, ihr Fahrzeug.

Die BBA stellt anscheinend nicht unbedingt für alle Probanden ein Hindernis dar, sondern vor allem für einzelne Personen. Die meisten Probanden zeigen ähnliches Ausstiegsverhalten wie die Kontrollgruppe. Im Folgenden sollen die 2 Probanden, die ihr Fahrzeug nicht innerhalb von 3 Minuten verließen, kurz genauer dargestellt werden.

Probanden, die das Fahrzeug nicht verließen

Beide Probanden waren männlich und in der Versuchsgruppe mit aktivierter BBA. Einer der beiden Probanden war der älteste Versuchsteilnehmer mit 64 Jahren. Der andere Proband war 24 Jahre alt. Das Problem der schlecht verständlichen Durchsage war demnach nicht nur bei älteren Probanden vorhanden, denn beide Probanden gaben an, dass sie die Durchsage nicht verstanden hatten.

Während der eine Proband kurz nach den 3 Minuten doch noch ausstieg, da er die Durchsage nach dem Ende der BBA-Aktivierung wieder verstand, wendete der andere Proband noch während der Aktivierung der BBA, kollidierte dabei beinahe mit der Tunnelwand und fuhr aus dem Einflussbereich heraus. Danach wurde der Versuch durch den Versuchsleiter abgebrochen.

Die beiden Probanden stellen zwei Einzelfälle dar, zeigen aber deutlich, dass manche Personen durch die Aktivierung der BBA überfordert werden können. Hier ist es wichtig, sicherzustellen, dass die Tunneldurchsage auch bei aktivierter BBA verständlich ist oder die BBA nicht aktiviert wird, bevor die Tunneldurchsage nicht mindestens einmal dargeboten wurde und Probanden sie verstehen konnten.

Fluchtziel

Die meisten Probanden suchten als Fluchtziel den nächstgelegenen erreichbaren Notausgang auf. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Erkenntnissen der Studie in Virtueller Realität, bei der auch die meisten Probanden den nächstgelegenen Notausgang aufgesucht hatten. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Probanden der Aufforderung, den Tunnel zu verlassen, nachkommen. Interessant dabei ist, dass sich Probanden in der Gruppe mit aktivierter BBA seltener daran erinnern, dass sie in der Durchsage dazu aufgefordert worden waren, einen Notausgang aufzusuchen. Trotzdem gingen nicht weniger Probanden mit aktivierter BBA zum Notausgang.

Gründe von Probanden, zum Ereignis zu gehen, waren der Wunsch, möglichen Unfallopfern zu helfen oder am Ereignis vorbeizugehen, da der nächstgelegene Notausgang hinter dem Ereignis lag. Das Leisten von erster Hilfe ist im simulierten Szenario nicht als falsches Verhalten anzusehen, da die Situation nicht so gefährlich wirkte, dass ein Aufsuchen des Ereignisses, um erste Hilfe zu leisten, eindeutig falsch gewesen wäre. Zum Beispiel war der verwendete Rauch weiß und es war kein offenes Feuer zu sehen.

Gehgeschwindigkeit

Zwischen den beiden Versuchsgruppen finden sich keine Unterschiede in der durchschnittlichen Fluchtgeschwindigkeit. Auch wenn beobachtet werden konnte, dass die Probanden im Aktivierungsbereich besonders schnell flüchteten, konnte dieser Effekt, wahrscheinlich aufgrund der relativ geringen Strecke im Aktivierungsbereich nicht in den Fluchtzeiten nachgewiesen werden. Da die meisten Probanden am hinteren Ende des Aktivierungsbereiches anhielten, konnte die Fluchtgeschwindigkeit im Aktivierungsbereich nicht gesondert untersucht werden. Vergleicht man immer die beiden Probanden

eines Probandenpaares, das an derselben Stelle im Tunnel zum Stehen kam, dann sind die Probanden mit aktivierter BBA in 5 von 7 Paaren schneller an ihrem Fluchtziel. Die Ergebnisse zeigen, dass Probanden durch die BBA nicht in ihrer Flucht verlangsamt werden, sondern eher kürzere Fluchtzeiten haben und gerade im direkten Einflussbereich der BBA teilweise zügiger laufen.

4 Reaktions- und Fluchtverhalten von Tunnelnutzern bei einer aktivierten BBA (Typ Wassernebel) in einem Realversuch

4.1 Methode

Es wurde eine kontrollierte und randomisierte empirische Studie in einem Tunnel durchgeführt [21], in dem eine Brandbekämpfungsanlage vom Typ Wassernebel (W/N) installiert ist (Citytunnel in Bregenz). Hierzu wurden die Probanden zufällig (randomisiert) zwei Bedingungen zugewiesen. Verglichen wurde das Erleben und Verhalten einer Gruppe von Probanden in einem simulierten Brandszenario (Rauchentwicklung) bei einer aktivierten BBA mit einer Kontrollgruppe ohne aktivierte BBA. Der Aufbau der Studie orientiert sich im Ablauf an der im Kapitel 3 dargestellten Felduntersuchung.

4.1.1 Probanden

Insgesamt nahmen 54 Probanden an der Untersuchung im Einzelsetting teil – 26 Personen ohne BBA-Auslösung (Kontrollgruppe) und 28 mit BBA-Auslösung (BBA-Gruppe). Die ungleiche Anzahl resultiert daraus, dass zwei Probanden nicht zur abgesprochenen Uhrzeit erschienen sind. Außerdem mussten zwei weitere Probanden wegen technischer Probleme (nicht aktive Rauchsimulationsanlage) ausgeschlossen werden. Das Alter unterschied sich zwischen den Gruppen nicht, beide Gruppe und lag im Mittel bei 47 Jahren. Auch bei den anderen demographischen Angaben der Stichprobe der Einzelfahrer ergaben sich keine signifi-

kanten Unterschiede zwischen den Gruppen – weder bei Geschlecht, Familienstand, noch bezüglich des höchsten Schulabschlusses.

In der Zusatzuntersuchung zum sozialen Einfluss nahmen insgesamt 12 weitere Probanden paarweise an der Untersuchung teil, 3 Paare mit aktivierter BBA und 3 Paare ohne aktivierte BBA. Die Probanden in der Kontrollgruppe waren mit im Schnitt 38 Jahren gegenüber der BBA-Gruppe mit einem Durchschnittsalter von 53 Jahren signifikant jünger.

Die Probanden wurden mithilfe von Aushängern und Anzeigen in Bregenz, Konstanz und Lindau rekrutiert. Die Ein- und Ausschlusskriterien, die finanzielle Entschädigung und die Akquise entsprechen den in Kapitel 3 dargestellten.

Nach einer Bestätigung der Teilnahme wurde den Probanden der genaue Untersuchungstermin genannt. Es wurden immer zwei Probanden gleichzeitig zu einem Untersuchungstermin einbestellt. Die zwei Probanden waren hinsichtlich ähnlichem Alter (± 5 Jahre Unterschied) und gleichem Geschlecht ausgewählt worden. Nach dem Bearbeiten der Fragebögen wurde per Zufall entschieden, welcher der Probanden der Kontrollgruppe ohne BBA-Aktivierung und welcher der Experimentalgruppe mit BBA-Aktivierung angehört. Der Proband der Kontrollgruppe wurde jeweils zuerst untersucht.

4.1.2 Versuchstunnel

Die Studie wurde im Citytunnel Bregenz, Österreich, durchgeführt. In diesem ist eine Brandbekämpfungsanlage vom Typ WN installiert. Der Tunnel war für die Durchführung der Untersuchung für zwei Nächte für den Verkehr gesperrt, so dass der Tunnel ohne öffentlichen Verkehr für die Durchführung der Untersuchung genutzt werden konnte. Der Tunnel ist ein Gegenverkehrstunnel mit jeweils einer Fahrspur pro Richtung. Die Untersuchung wurde mit Einfahrt durch das Südportal durchgeführt.

4.1.3 Versuchsablauf

Alle Probanden wurden per Telefonscreening ausgewählt und die Instruktionen entsprachen denen

aus der Untersuchung in Kapitel 3. Nur die Erklärung für die Notwendigkeit des Mitbringens von Ersatzkleidung war gegenüber der Untersuchung im Tunnel Jagdberg (siehe Kapitel 3.1.3) leicht angepasst. Den Probanden wurde mitgeteilt, dass sie diese Kleidungsstücke zur Untersuchung benötigen, weil diese während der Untersuchung aufgrund von Reinigungsarbeiten, die im Rahmen der Sperrungen des Tunnels durchgeführt würden, verschmutzt oder feucht werden könnten.

Für die Probanden war das Südportal des Citytunnels gut über das sekundäre Straßennetz erreichbar, weswegen sie am dortigen Betriebsgebäude der ASFINAG – im Gegensatz zur Untersuchung aus Kapitel 3 – selbstständig zum Untersuchungstermin eintrafen. Direkt nach der Ankunft am oberen Eingang des BZ Weidach am Südportal des Tunnels wurde mit einem Atemalkoholtestgerät ein Alkoholtest durchgeführt. Es wurde auch kontrolliert, ob die Probanden einen Führerschein besitzen. Nur Probanden, die ihren gültigen Führerschein bei sich hatten und nicht alkoholisiert waren, durften an der Untersuchung teilnehmen (alle). Danach lasen sie die Probandeninformation, füllten die Einverständniserklärungen aus und bearbeiteten die Fragebögen (State-Trait-Anxiety Inventory, Tunnelangstfragebogen, aktuelle Befindlichkeit, soziodemographische Angaben). Außerdem wurde die Dominanz durch die Personality Research Form [28] erhoben. Bei den als Paaren teilnehmenden Probanden übernahm der weniger dominante Partner als Fahrer die dominante Rolle und der stärker dominante Partner als Beifahrer die nicht-dominante Rolle.

Die Probanden wurden darauf hingewiesen, dass sie zusätzlich zu der angekündigten Aufwandsentschädigung von 75 Euro weitere 25 Euro bekämen, wenn sie sich während des Versuches so verhielten, wie sie es auch im Straßenverkehr außerhalb des Versuches täten. Dadurch sollten die Probanden motiviert werden, sich während des Versuches so zu verhalten, wie sie es auch im realen Ereignisfall tun würden. Danach wurde ausgelost, welche Person der Bedingung mit aktivierter BBA (BBA-Gruppe) und welche der Kontrollgruppe (KG) angehört. Da die Probanden der BBA-Gruppe die Aktivierung der wasserebelbasierten Brandbekämpfungsanlage erlebten und die Proban-

den-PKWs und anderes Equipment nach jedem Durchgang mit aktivierter BBA getrocknet werden mussten, fuhr immer zuerst der KG-Proband und danach der BBA-Proband in den Tunnel. Vor der Fahrt erhielten sie eine reflektierende wasserabweisende Jacke und eine reflektierende wasserdichte Probandenüberhose, um potentielle gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Nässe zu vermeiden. Die Probanden wurden darauf aufmerksam gemacht, dass diese Bekleidung zur besseren Auswertung der Videoaufnahmen sowie zu ihrer Sicherheit (Sichtbarkeit) im Tunnel notwendig sei. Zusätzlich erhielten die Probanden eine Schutzbrille, an der eine Kamera zur Erfassung des aktuellen Blickfeldes befestigt war. Das Vorgehen entspricht der in Kapitel 3 dargestellten Untersuchung.

Anschließend wurden die Probanden in die Untersuchungs-PKWs (Proband ohne BBA – PKW 1, VW Passat; Proband mit BBA – PKW 2, Audi A4) eingewiesen. Erst wenn alle Fragen des Probanden beantwortet waren, startete ein Versuchsleiter die Kameras im Fahrzeug und ein weiterer Versuchsleiter setzte sich zum Probanden in den Untersuchungs-PKW (Rückbank). Die Probanden wurden instruiert, den Versuchsleiter zu ignorieren und nur im Notfall anzusprechen.

Die Versuchsteilnehmer wurden nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass während der gesamten Untersuchung die StVO zu beachten ist und die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h nicht überschritten werden darf. Diese Geschwindigkeitsbegrenzung wurde auch auf den Wechselverkehrszeichen angezeigt. Wenn keine weiteren Fragen bestanden, vergewisserte sich der Versuchsleiter im Fahrzeug durch Rücksprache mit dem Versuchsleiter in der Tunnelzentrale, dass die Tunnelröhre frei befahrbar war, und bat danach den Probanden, loszufahren. Im Tunnel wurden die Probanden mit einer nachgestellten abgesicherten Unfallsituation (zwei quergestellte Fahrzeuge, eines davon ein Transporter, mit Warndreieck angekündigt) mit Rauchentwicklung (Nebelanlage, bedient von einem Versuchsleiter) konfrontiert. Zwischen den Durchgängen wurde mehrmals der komplette Tunnel durch Aktivierungen der BBA in den Kapiteln, die von den Probanden befahren wurden, befeuchtet, um möglichen Vermutungen bezüglich eines nassen



Bild 10: Situation im Tunnel, in dem Moment, in dem die BBA eingeschaltet wird. Das schwarze Fahrzeug ist das angekommene Probandenfahrzeug.

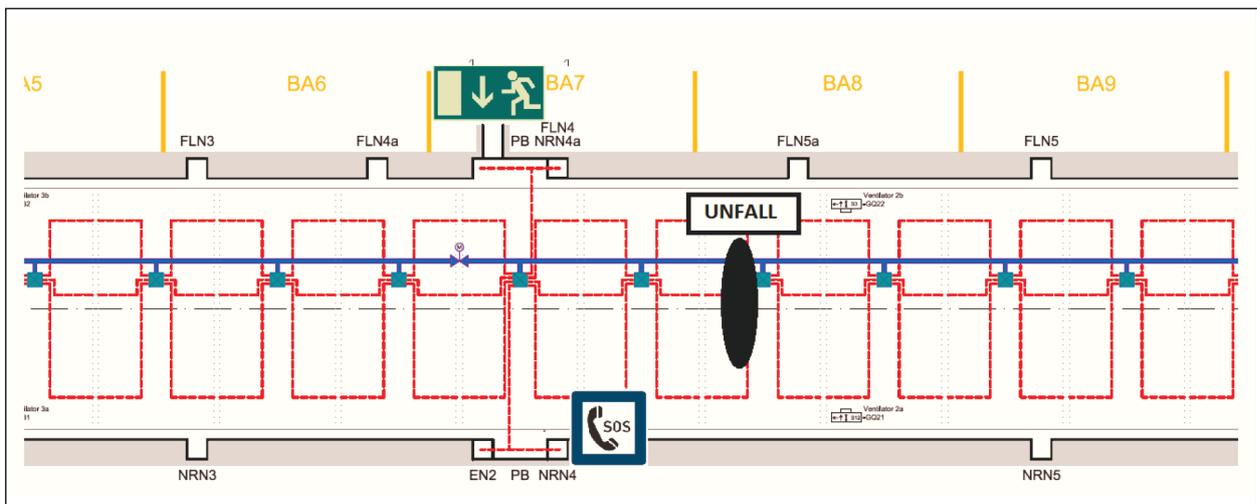


Bild 11: Tunnel-Längsschnitt.

Bereiches um den Unfall herum vorzubeugen. Das Unfallszenario ist in Bild 10 dargestellt.

Die Unfallsituation wurde 97 m hinter der einzigen im Tunnel vorhandenen Abstellnische mit Notausgang aufgebaut (vgl. Bild 11). Die Lage im Löschbereich 8 wurde ausgewählt, da sie in der Nähe des Notausgangs liegt und sich zwischen Notausgang und diesem Löschbereich eine Notrufstation befindet.

Probanden, die nicht im Einflussbereich der BBA anhielten, wurden vom Versuchsleiter angeleitet,

bis zu einem 10 m vor dem Unfallfahrzeug aufgestellten Warndreieck weiterzufahren. Damit befand sich ihr Fahrzeug im Einflussbereich der BBA. Bei allen 66 Probanden begann direkt nach dem Anhalten im Tunnel die Evakuierungsdurchsage. Diese war identisch mit der Durchsage der Untersuchung im Tunnel Jagdberg.

Im Citytunnel Bregenz waren - anders als im Tunnel Jagdberg - ältere Lautsprecher an den Portalen und an der Parkbucht beim Notausgang installiert. Deswegen wurden zum Zwecke der geplanten Untersu-

chung zusätzliche Lautsprecher des Typs Grenzflächenhorn nahe des Untersuchungsortes angebracht, durch die mit einer erheblichen Verbesserung der Sprachverständlichkeit (Sprachtransmissionsindex: STI von .80) zu rechnen war. Die Lautstärke betrug etwa 68 dB – je nach Abstand zum Lautsprecher und Akustik im Tunnel auch mehr. Wie bei der in Kapitel 2 dargestellten Untersuchung wurde bei den Probanden der BBA-Gruppe während der Durchsage (zum Zeitpunkt: jetzt sofort) die BBA für zwei Minuten aktiviert und die Probanden hatten ab Beginn der Durchsage 3 Minuten Zeit, zu reagieren. Analoges galt für die sechs getesteten Pärchen (3 BBA und 3 KG). Auch die Abbruchkriterien sowie das weitere Vorgehen entsprechen denen aus der Untersuchung in Kapitel 3.

4.1.4 Verwendete Materialien

Wasserdampf:

Genutzt wurde das bereits in den Tunnel eingebaute BBA-System der Firma Aquasys. Das Wasser wurde ohne das im Brandfall zugefügte Netzmittel eingebracht, da es im Zuge der Versuche vordergründig um die Sichtbarkeit im Wasserdampf ging und die Einbringung des Wasserdampfes mit Netzmitteln mit zusätzlichen Kosten verbunden gewesen wäre.

Fahrzeuge:

Als Testfahrzeuge wurden zwei gemietete PKWs verwendet – ein VW Passat und ein Audi A4, beide mit Schaltgetriebe. Für das Unfallszenario wurden analog zu 3.1.4 ein PKW (VW Golf Variant, Farbe Rot) sowie ein angemieteter Transporter (Typ Sprinter, Farbe Weiß mit Aufschrift) genutzt.

Andere Materialien:

sind die gleichen wie in der in Kapitel 3.1.4 dargestellten Studie im Tunnel Jagdberg.

4.1.5 Unabhängige Variable, Abhängige Variable und Statistik

Als Unabhängige Variable diente wie in den vorherigen Untersuchungen (siehe 2.1.3 und 3.1.3) die Aktivierung der BBA. In der BBA-Gruppe wurde die BBA aktiviert, in der Kontrollgruppe nicht. Als Ab-

hängige Variable wurde das Verhalten und Erleben wie in den vorherigen Untersuchungen mit den in Kapitel 3.1.5 dargestellten Instrumenten erfasst. Auch die Auswertung entspricht dem in Kapitel 3.1.6 dargestellten Vorgehen. Für die Auswertung der Probandenpaare wurden analoge Verfahren eingesetzt, wobei die Interpretation aufgrund der geringen Stichprobengröße vor allem deskriptiv vorgenommen wird.

4.2 Ergebnisse

Zunächst wird die Auswertung aller Einzelprobanden beschrieben. Danach erfolgt die Analyse der Paaruntersuchung.

4.2.1 Psychometrische Fragebögen zur Befindlichkeit

Nach der Tunnelfahrt schätzten die Probanden im Self-Assessment-Manikin (SAM) Aktivierung, Valenz und Kontrolle ein sowie im STAI die aktuelle Angst. Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Maße sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die statistische Auswertung der Fragebögen mittels Varianzanalyse mit den Faktoren Zeit und Gruppe ergab nur eine höhere Aktivierung und positivere

Fragebogen – Skala	BBA-Gruppe	Kontrollgruppe
SAM Aktivierung	3.30 (1.45)	2.40 (1.34)
SAM Valenz	3.37 (1.60)	2.40 (0.98)
SAM Kontrolle	6.33 (1.62)	7.02 (1.13)
STAI State	33.39 (7.34)	31.13 (6.13)

Anmerkung: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD, in Klammern) der nach der Tunnelfahrt erhobenen Fragebögen zur Befindlichkeit. SAM: Self-Assessment-Manikin (Skala von 1 bis 9), STAI: Spielberger State Trait Anxiety Inventory (Skala von 20 bis 80).

Tab. 5: Emotionales Befinden der Probanden

Valenz bei der BBA Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe bei der SAM Skala Aktivierung und der SAM Skala Valenz. Die Zustandsangst (STAI State) nahm im Verlaufe des Experiments signifikant ab.

4.2.2 Nachbefragung

Im Rahmen der als Interview durchgeführten Nachbefragung sollten die Probanden Einschätzungen zur Untersuchungssituation auf psychometrischen Skalen und zusätzlich offene Fragen in eigenen Worten beantworten [21]. Zuerst werden die Ergebnisse zu den Fragen präsentiert, die allen Probanden gestellt wurden. Danach werden die Ergebnisse der nur für die Probanden der BBA-Gruppe relevanten Fragen dargestellt.

Ratings zum Erleben der Untersuchungssituation

Zunächst werden die Ergebnisse zum Erleben der Untersuchungssituation dargestellt (siehe Tabelle 6). Die Fragen wurden auf einer Skala von 0 (gar nicht) bis 100 (sehr stark/sehr gut/sehr sicher/...) beantwortet. Die Probanden empfanden das Szenario als wenig belastend oder stressauslösend. Sie haben das Unfallszenario im Tunnel gut erkannt und waren recht überzeugt, zu wissen, was in einer solchen Situation zu tun ist. Die Gefährlichkeit des Unfallszenarios in der Untersuchungssituation wurde in beiden Gruppen als eher gering eingestuft. Ein äquivalentes Vorkommnis unter realen Bedingungen stuften die Probanden jedoch als relativ gefährlich ein. Die Probanden waren sowohl von einer guten Ausstattung des Testtunnels für die Selbstrettung im Notfall als auch von ihrer eigenen Selbstrettungskompetenz überzeugt. Die Probanden der BBA-Gruppe waren jedoch sowohl von der Tunnelausstattung als auch ihrer eigenen Selbstrettungskompetenz tendenziell etwas weniger überzeugt. Die empfundene Kontrolle über das Unfallszenario wurde von beiden Gruppen als mittel eingeschätzt.

Die Probanden schätzten sich als mittel bis gut informiert sowohl zur Sicherheitsausstattung in Tunneln als auch zum richtigen Verhalten in Tunneln ein. Bei beiden Items stuften sich die Probanden der BBA-Gruppe signifikant niedriger ein. Die Wirkung einer BBA auf die Sicherheit wurde sehr posi-

tiv bewertet, ebenso würden es die Probanden im Durchschnitt als sehr positiv ansehen, wenn eine BBA zur Standardausstattung von Straßentunneln gehören würde. Die Probanden schätzten sich im Mittel als sehr gute Autofahrer ein, die recht viel mit dem Fahrzeug fahren. Des Weiteren sind sie sehr gut mit dem Untersuchungs-PKW zurechtgekommen. Die Antworten zu den Fragen, wie stark das Verhalten der Probanden durch verschiedene Aspekte beeinflusst wurde, sind in Tabelle 6 dargestellt. Auch zeigt diese Tabelle die Verständlichkeit der Durchsagen für die BBA-Gruppe und die Kontrollgruppe.

Die Probanden empfanden die Situation in hohem Maße als realitätsnah. Laut Selbstbericht hat die Information zu den festen Schuhen, Ersatzsocken bzw. Ersatzschuhen und die Bekleidung das Verhalten der Probanden praktisch nicht beeinflusst. Auch die Information, zusätzliche 25 Euro zu erhalten, wenn man sich richtig, d.h. wie im alltäglichen Straßenverkehr, verhält, hat die Probanden laut ihrer Angaben nur sehr wenig beeinflusst. Den größten Einfluss von den in Tabelle 6 aufgelisteten Elementen hatten nach Angaben der Probanden die Sichtbarkeit des Notausgangs und die Durchsage zur Evakuierung. Die Durchsage wurde von der BBA-Gruppe signifikant schlechter verstanden als von der Kontrollgruppe.

Erinnerung von Durchsageinhalten

In einem Gedächtnistest wurde auch ermittelt, wie gut die Inhalte der Evakuierungsdurchsage erinnert werden konnten. In diesem Test sollten die Probanden frei die Inhalte der Durchsage reproduzieren. Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

- 25 % (n = 12) Tunnel verlassen
- 18 % (n = 9) Auto verlassen
- 16 % (n = 8) Zum Notausgang begeben
- 11 % (n = 5) Anderen helfen
- 18 % (n = 9) Zündschlüssel stecken lassen
- 6 % (n = 3) Feuer im Tunnel
- 16 % (n = 8) Rettungsgasse bilden
- 28 % (n = 14) Rechts heranfahren

- 0 % (n = 0) Unfall im Tunnel
- 11 % (n = 5) Auto abstellen

Unterschiede zwischen den Gruppen zeigten sich nur bzgl. der freien Erinnerung des Durchsageinhaltenes Tunnel verlassen – diesen erinnerten die Probanden der Kontrollgruppe mit 38 % häufiger als die der BBA-Gruppe mit 11 %.

Erkennen und Annahmen zur Tunnelausstattung

In einem weiteren Gedächtnistest sollten die Probanden angeben, ob sie bestimmte vorgegebene Ausstattungselemente im Citytunnel gesehen haben (recognition Test: Wiedererkennungstest). Zudem sollten sie angeben, ob sie diese Elemente zur grundsätzlichen Ausstattung eines Straßentunnels

Frage zu:	Kontrollgruppe		BBA-Gruppe	
	M	SD	M	SD
Ähnlichkeit der Untersuchungssituation zur Realität	76.96 ^a	21.36	77.22	24.66
Beeinflussung des Verhaltens durch Motivation zum richtigen Verhalten	17.50	29.08	14.26	30.21
Beeinflussung des Verhaltens durch Bekleidung	10.75	24.52	4.44	10.13
Beeinflussung des Verhaltens durch Informationen zu festen Schuhen, Ersatzsocken bzw. Ersatzschuhen	4.35 ^a	13.08	2.22	6.98
Beeinflussung des Verhaltens durch Sichtbarkeit des Notausgangs	32.29	42.83	25.93	39.93
Beeinflussung des Verhaltens durch Durchsagen	47.71	43.19	26.30	35.75
Verständlichkeit der Durchsagen	25.75	22.76	14.44	20.16

Anmerkung: Skala für jedes Item reichte von 0 (gar nicht) bis 100 (sehr stark/sehr gut/sehr sicher/...). Angegeben sind Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD); Kontrollgruppe: n = 24; BBA-Gruppe: n = 27; an = 23.

Tab. 6: Angaben zur Verhaltensbeeinflussung und Durchsagenverständlichkeit.

	Wiedererkennen				Grundsätzliche Ausstattung			
	Kontrolle		BBA		Kontrolle		BBA	
	h	n	h	n	h	n	h	n
Notausgang	50 %	12	56%	15	79 %	19	85 %	23
Fluchtwegkennzeichen	75 %	18	63 %	17	83 %	20	74 %	20
Notrufstation	50 %	12	41 %	11	79 %	19	74 %	20
Feuerlöscher	0 %	0	7 %	2	13 %	3	22 %	6
Erste-Hilfe-Koffer	0 %	0	4 %	1	4 %	1	7 %	2
Pannenhilfsbuch	67 %	16	30 %	8	67 %	16	41 %	11
Notgehwege	21 %	5	11 %	3	17 %	4	15 %	4
Düsen-BBA	17 %	4	33 %	9	21 %	5	22 %	6
Hydrant	0 %	0	0 %	0	4 %	1	4 %	1
Wechselverkehrszeichen	13 %	3	15 %	4	13 %	3	26 %	7
LED-Licht	13 %	3	19 %	5	8 %	2	15 %	4 ^a
Lüftung	4 %	1	0 %	0	4 %	1	12 %	3 ^a
Kamera	0 %	0	0 %	0	13 %	3	0 %	0 ^a

Anmerkung: Die Probanden sollten angeben, ob sie bestimmte vorgegebene Ausstattungselemente im Tunnel gesehen haben (Wiedererkennen), und benennen, ob sie diese Elemente zur grundsätzlichen Ausstattung eines Straßentunnels rechnen; Angegeben sind relative (h) und absolute Häufigkeiten (n); Kontrollgruppe: n = 24; BBA-Gruppe: n = 27; an = 26 aufgrund fehlender Angaben.

Tab. 7: Wiedererkennen von Ausstattungselementen und Einschätzung als grundsätzliche Ausstattung.

Frage zu:	M	SD	n
BBA als Gefahr	15.80	33.59	25
Einfluss der BBA auf die Entscheidung, das Fahrzeug zu verlassen	30.45	42.37	22
Überraschung durch BBA-Aktivierung	26.60	35.49	25
Negative Auswirkung durch Wassernebel ²	15.00	29.39	12
Befürchtungen zu Wassernebel	9.20	27.07	25
Durchsageninformationen zu BBA gewünscht	32.40	45.21	25
Behinderung des Fluchtverhaltens durch BBA ²	32.08	36.27	12
Sichteinschränkung...			
... im Fahrzeug durch BBA	58.06	42.47	18
... im Fahrzeug mit Scheibenwischer ¹	51.54	45.98	13
... außerhalb des Fahrzeuges ²	50.83	39.01	12

Anmerkung: Dargestellt sind Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD) und Häufigkeiten (n). Skala für jedes Item reichte von 0 (gar nicht) bis 100 (sehr stark/sehr gut/sehr sicher/...). Hier wurden nur die jeweils relevanten Probanden aus der BBA-Bedingung miteinbezogen. 1Nur Probanden, die auch den Scheibenwischer aktiviert haben. 2Nur Probanden, die das Fahrzeug verlassen haben und geflüchtet sind.

Tab. 8: Angaben zur Wirkung der Brandbekämpfungsanlage auf die Probanden

zählen. Die Probanden der Kontrollgruppe gaben signifikant häufiger an, die Pannenbucht im Citytunnel gesehen zu haben, Kontrolle: 67 % vs. BBA: 30 %. Es ergaben sich keine weiteren signifikanten Unterschiede. Insgesamt waren 59 % der Probanden der Meinung, eine BBA gehöre zur Standardausstattung eines Straßentunnels (vgl. Tabelle 7).

Einfluss der wassernebelbasierten BBA

Den Probanden der BBA-Gruppe wurden außerdem Fragen zum Erleben der BBA gestellt. Die BBA wurde kaum als Gefahr gesehen und es gab kaum Annahmen zu negativen Auswirkungen des Wassernebels. Die BBA schränkte die Sicht mittelstark ein, dies besserte sich nur wenig durch Einschalten der Scheibenwischer. Auch außerhalb des PKWs war die Sicht mittelstark eingeschränkt (vgl. Tabelle 8).

Es bestand im Schnitt ein eher schwacher Wunsch nach mehr BBA-Informationen in der Durchsage. Im offenen Antwortformat wurden vereinzelt Aussagen bezüglich möglicher Gefahren einer aktiven BBA hinsichtlich Sicht (kurz Sicht versperrt, könnte Sicht verschlechtern), Orientierung (Auto nicht wie-

derfinden), Nässe (evtl. ausrutschen, Aquaplaning) und Überraschungseffekt (abrupte Situation, beängstigend, Situation nicht im Griff) getroffen. Einige Probanden gaben auch an, dass sie wegen der BBA nicht aussteigen wollten:

- eher verhindert, auszusteigen
- wegen Wasser in Auto geblieben
- [...] wollte aussteigen, BBA an, sitzen geblieben
- sitzengeblieben, als Anlage losging, sonst Auto früher verlassen
- sitzen geblieben (weil Hörgerät nicht wasserdicht)
- Kurz überlegt, <<da draußen regnet es>>

Bezüglich der Wassernebelanlage wurden vereinzelt Befürchtungen zur verschlechterten Sicht geäußert. Zudem berichteten einige Probanden, sich unsicher gewesen zu sein, was bei aktivierter BBA zu tun sei. Eine Probandin gab als mögliche Sorgen Gase und Make-Up an. Außerdem wünschten sich Probanden eine verständliche klare Durchsage.

4.2.3 Verhaltensdaten

Ausstiegs- und Evakuierungsverhalten der Einzelpersonen

Wie in den vorherigen Kapiteln werden hier zunächst die Ergebnisse aus dem Test mit den einzelnen Fahrern dargestellt.

Bezüglich des Fluchtverhaltens verhielten sich die Probanden wie folgt: Insgesamt warteten 11 Probanden in der BBA-Bedingung und 1 Proband in der Kontrollbedingung die gesamte Testzeit von 3 Minuten im Fahrzeug. 2 Probanden der BBA-Gruppe und 1 Proband in der Kontrollgruppe versuchten, das Fahrzeug zu wenden, die restlichen Probanden verließen das Fahrzeug, wobei einer am Fahrzeug stehen blieb und die restliche Testzeit abwartete (vgl. Bild 12 zu den Abbruchkriterien der Probandentestläufe).

Im exakten Test nach Fisher ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen der BBA-Gruppe und der Kontrollgruppe, was das Verhalten Aussteigen innerhalb der drei Minuten betrifft: Verglichen wurden alle Probanden, die das Fahrzeug verlassen haben, mit allen Probanden, die im Fahrzeug sitzen geblieben sind. Probanden, die ihr Fahrzeug gewendet haben bzw. rückwärts gefahren sind, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Es zeigte sich, dass die Probanden der BBA-Gruppe signifikant häufiger ($n = 11$) die gesamten drei Minuten Testzeit ab der Durchsage im Fahrzeug sitzengelieben sind als Probanden der Kontrollgruppe ($n =$

1). Außerdem stiegen insgesamt 12 Probanden bereits vor dem Zeitpunkt, zu dem in der BBA-Gruppe die BBA aktiviert wurde, aus dem Fahrzeug aus (Frühaussteiger; vier in der Kontrollgruppe, acht in der BBA-Gruppe). Von diesen Probanden stiegen drei (einer in KG, zwei in BBA-Gruppe) sogar vor Beginn der Durchsage aus. Dies geschah unabhängig von der Bedingung (BBA oder Kontrolle).

Bei der Analyse der Ausstiegszeiten der Probanden, die ihr Fahrzeug verlassen haben, wurde ein t-Test für unabhängige Stichproben berechnet. Früh ausgestiegene Probanden wurden eingeschlossen, sitzen gebliebene ausgeschlossen. Eine Person wurde von der Auswertung aufgrund fehlender Kameradaten ausgeschlossen. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied in der mittleren Zeitspanne zwischen Beginn der Durchsage und dem Verlassen des Fahrzeuges (= Ausstiegszeit) (vgl. Bild 13).

Auch die Zeit zwischen dem Öffnen der Fahrertür und dem Aussteigen unterschied sich nicht signifikant zwischen BBA- und Kontrollgruppe und betrug im Schnitt 5.74 (SD = 9.40) Sekunden (vgl. Bild 14).

Vier Probanden (15 %, alle in der BBA-Gruppe) schlossen die Tür nach dem ersten Öffnen nochmals. Vier Probanden in der Kontrollgruppe (16 %) und fünf in der BBA-Gruppe (19 %) öffneten das Fenster, möglicherweise, um die Durchsage besser zu verstehen. Keiner der Tests auf Gruppenunterschiede wurde signifikant.

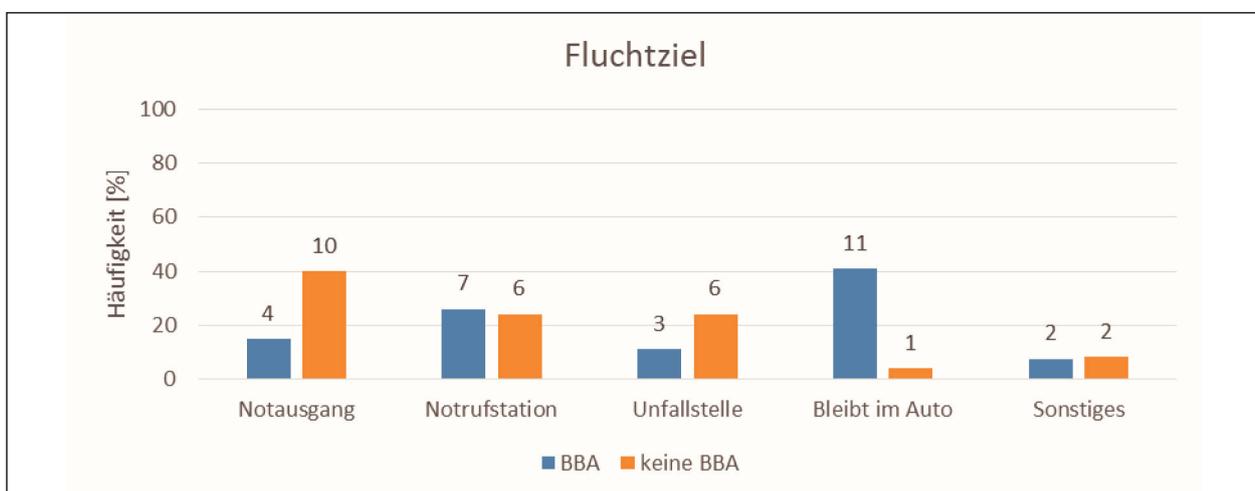


Bild 12: Häufigkeiten der verschiedenen Verhaltensweisen; Testfahrt wurde abgebrochen bzw. beendet, falls eine davon eintrat. Angabe der absoluten Anzahl n über den Balken. BBA: $n = 27$; keine BBA: $n = 25$.

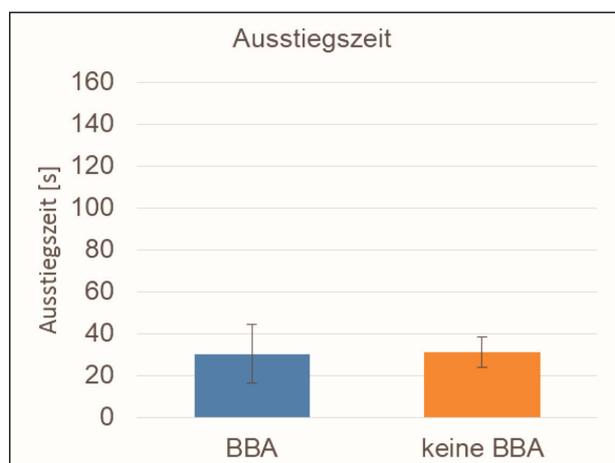


Bild 13: Mittlere Ausstiegszeiten der Gruppen in Sekunden mit Standardfehlern; BBA: n = 13, keine BBA: n = 22.

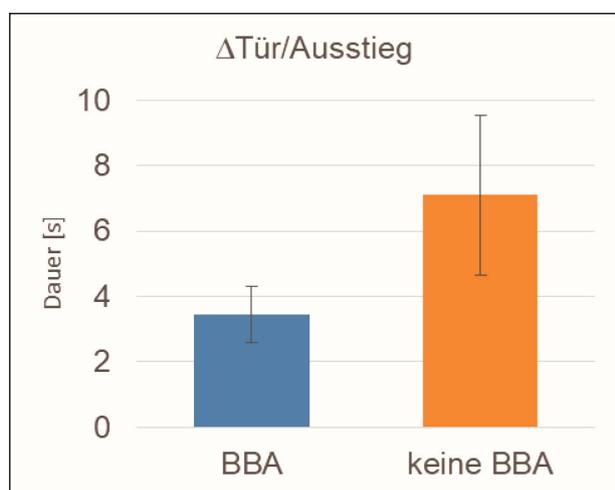


Bild 14: Mittlere Zeit zwischen Türöffnen und Aussteigen in Sekunden mit Standardfehlern; BBA: n = 13, keine BBA: n = 22.

Gehgeschwindigkeit

Bezüglich der Evakuierungsgeschwindigkeit über die gesamte Fluchtdauer ergab sich ein Trend für eine höhere Geschwindigkeit der BBA-Gruppe ($M = 1.90$ s, $SD = 0.63$) gegenüber der Kontrollgruppe ($M = 1.49$ s, $SD = 0.43$). Dieses Ergebnis basiert auf einer kleineren Stichprobe, da nur Personen einbezogen wurden, die ausgestiegen und zum Notausgang/zur Notrufsäule gegangen sind.

Anhalten vor der Unfallstelle

Auf der Fahrt in den Tunnel wollten zehn Probanden der BBA-Gruppe und sechs Probanden der Kontrollgruppe – vor dem Erreichen der finalen Halteposition bei der Unfallstelle – bereits beim ersten

Warndreieck (100 m davor) oder bei der Pannenburg anhalten und wurden deshalb aufgefordert, weiterzufahren. Weitere Probanden wurden deutlich langsamer oder fuhren nur sehr zögerlich weiter. All diese Probanden, insgesamt 16 BBA- und 23 Kontrollprobanden, wurden deshalb aufgefordert, weiter zur Unfallstelle zu fahren.

4.2.4 Deskriptive Darstellung der Aussagen der Probanden

Um weitere Einblicke in das Verhalten und Erleben der Probanden (VP) zu gewinnen, soll hier beschrieben werden, was Probanden sagten. In den Aussagen wird deutlich, dass die Durchsage allgemein sehr schlecht verstanden wurde:

VP 14: „Ganz schwer zu verstehen.“

VP 15: „Ich verstehe das nicht, was?“

VP 16: „Da habe ich jetzt aber nichts verstanden.“

VP 21: „Ich verstehe kein Wort da.“

VP 24: „Also diese Durchsagen sind sehr schlecht verständlich.“

Die schlechte Verständlichkeit löste auch Unbehagen aus und führte zu dem Wunsch, Informationen vom Versuchsleiter zu erhalten. Z. B. (VP 37) redet er ned mit mir? [Ich] bin leicht überfordert.

Einige Probanden äußerten Sorge um mögliche Insassen im fiktiven Unfall Fahrzeug:

VP 35: „Hallo, ist da jemand, hallo? Sind Sie verletzt?“

VP 36: „Hallo, ist da jemand verletzt?“

Außerdem wurden Fragen zum Fahrzeug oder zum Prozedere gestellt, wobei Versuchspersonen der Bitte, den Versuchsleiter (VL) im Fahrzeug zu ignorieren, nicht immer nachkamen. Andererseits wurde in vielen Fällen auch einfach laut gedacht. Zum Beispiel sagte eine Person:

(VP 46) So, jetzt würde ich rausgehen. (VL reagiert nicht), während andere den Versuchsleiter direkt fragen: (VP 45 Soll ich auch aussteigen? (VL reagiert nicht)

Andere technische Fragen oder Fragen zum Prozedere, die gestellt wurden, waren z. B.:

VP 50: „Soll ich den Motor laufen lassen?“

VP 28: „Einfach durchfahren, ganz normal?“

VP 18: „Die Warnblinkanlage, wo ist denn die?“

Der Versuchsleiter musste häufig dazu auffordern, nach dem ersten Warndreieck noch weiter an das zweite Warndreieck direkt am Unfall heranzufahren.

„Fahren Sie bitte bis zum 2. Warndreieck.“

4.2.5 Probandenpaare

Die Paare sollten aufgrund der kleinen Stichprobe vor allem deskriptiv betrachtet werden. Auffällig bei den paarweisen Untersuchungen war ein insgesamt höheres Aktivitätslevel. Unter anderem ließen sich Verhaltensweisen wie Rettungsversuche am fingierten Unfall oder Öffnen des Kofferraums und Aufstellen des Warndreiecks sowie Absprachen unter den Probanden beobachten. Bei einem Paar der BBA-Gruppe stiegen Fahrer und Beifahrer vor deren Aktivierung aus. Zu Beginn der Testfahrt ging es in den Konversationen meist um die Neuheit der Situation bzw. des Testfahrzeuges. Im Folgenden sind einige Beispielaussagen dazu aufgelistet:

Beifahrer (Paar 1): „Ich komm[e] mir vor wie ein Fahrlehrer.“

Fahrerin (Paar 1): „40 km/h ist scho[n] langsam.“

Fahrerin (Paar 2): „Wo ist denn da der Ganghebel?“

Beifahrer (Paar 1): „Selten hab[e] ich so wenig Verkehr gesehen.“

Beim ersten Erblicken und Annähern an die Unfallstelle richtete sich der Fokus meist auf das Szenario:

Fahrerin (Paar 1): „Hui, da vorne, schau!“

Beifahrer (Paar 1): „Schaut nach Unfall aus.“

Beifahrer (Paar 3): „Okay, der steht quer.“

Nach dem Anhalten an der Unfallstelle zeigten die Probanden verschiedene Reaktionen. Es kam zum Beispiel vor, dass die Absprache getroffen wurde, sich aufzuteilen – während der Fahrer am Unfall helfen sollte, wollte der Beifahrer Hilfe rufen.

Beifahrer (Paar 2): „[Vorname der Fahrerin], komm mit schauen, ich geh[e] Ding, ich geh[e] schauen wegen Ding, gehst du da [zur Unfallstelle], ich geh[e] schauen wegen Ding, ähm wegen Notruf absetzen.“

Beifahrer (Paar 5): „Ich schau[e] mal vorne, was da los ist, kannst du [ei]nen Notruf verständigen, da vorne is[t] [ei]ne Notrufsäule.“

Der Beifahrer von Paar 2 setzte tatsächlich einen Notruf ab.

Beifahrer (Paar 2): „Hallo, ich bin im Citytunnel, da ist ein Unfall passiert mit Rauch und zwei Fahrzeuge sind zusammengefahren.“

Stimme aus

Notrufstation: „Jawohl, ist in Ordnung, danke!“

Währenddessen versuchte die Fahrerin, am Unfall zu helfen, öffnete die Tür eines Fahrzeuges und fragt den Versuchsleiter, der dort versteckt war, um Kamera und Nebelmaschine zu bedienen, ob er verletzt sei.

Auf die BBA reagierten die Probanden teilweise erstaunt bezüglich ihrer Wirkung.

Fahrerin (Paar 4): „Oh Gott (Machte aus Versehen das Fenster auf).“

Beifahrer (Paar 4): „Scheibenwischer!“

Beifahrer (Paar 6): „Ganz schön viel Wasser, was verdampft so wie's aussieht.“

Keines der Paare blieb im Fahrzeug sitzen. Das beobachtete Evakuierungsverhalten bzw. die notierten Abbruchkriterien lassen sich Bild 15 entnehmen.

Auch bei den Paaren benötigten die Probanden in der BBA-Bedingung signifikant mehr Zeit, bis sie das Fahrzeug verließen (vgl. Bild 16). Jedoch verließen alle Probanden innerhalb der Testzeit von drei Minuten das Fahrzeug.

4.3 Diskussion

4.3.1 Methodische Aspekte

Das nachgestellte Unfallszenario wurde von den Probanden gut erkannt (mittlere Zustimmung von 81 auf einer Skala von 0 bis 100) und als relativ realistisch eingestuft (77 von 100). Die Gefährlichkeit der Untersuchungssituation wurde als schwach eingeschätzt (15 von 100), wobei die meisten Probanden äußerten, dass sie solch eine Situation im realen Ereignisfall als gefährlicher einstufen würden (73 von 100). Die Probanden gaben an, dass ihr Verhalten nur geringfügig durch die Informationen, die ihnen vorab zur Untersuchung gegeben wurden (Bekleidung: 7 von 100, Schuhe und Socken: 3 von 100, Motivation zu richtigem Verhalten durch finanzielle Belohnung: 16 von 100), beeinflusst wurde. Zur Bekleidung äußerten einige Probanden, dass die Brille mit der Kamera zu schwer und somit unan-

genehm zu tragen gewesen sei. Weiterhin gaben Probanden an, dass die Motivation zum richtigen Verhalten für sie kein Anreiz gewesen sei, da sie es als selbstverständlich empfänden, sich möglichst authentisch zu verhalten und zu einem guten Gelingen der Studie beizutragen. Gemäß den Ergebnissen scheint es insgesamt so zu sein, dass ein sinnvoller Kompromiss zwischen einer realen, aber dennoch ethisch vertretbaren Simulation gefunden wurde. Eventuell wäre das Szenario durch eine etwas handlichere Kopfkamera mit besserer Anbringung bezüglich Nutzerfreundlichkeit optimierbar.

4.3.2 Einschätzung zum Tunnel

Die Probanden erlebten den Tunnel als größtenteils so ausgestattet, dass man sich im Notfall retten

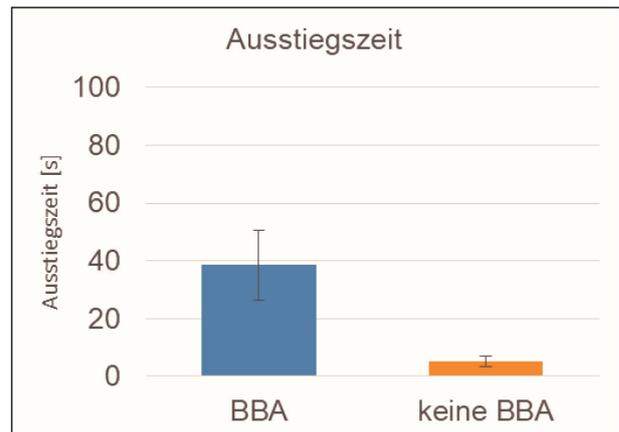


Bild 16: Durchschnittliche Ausstiegszeit der Probanden in der Paarsituation (n = 12).

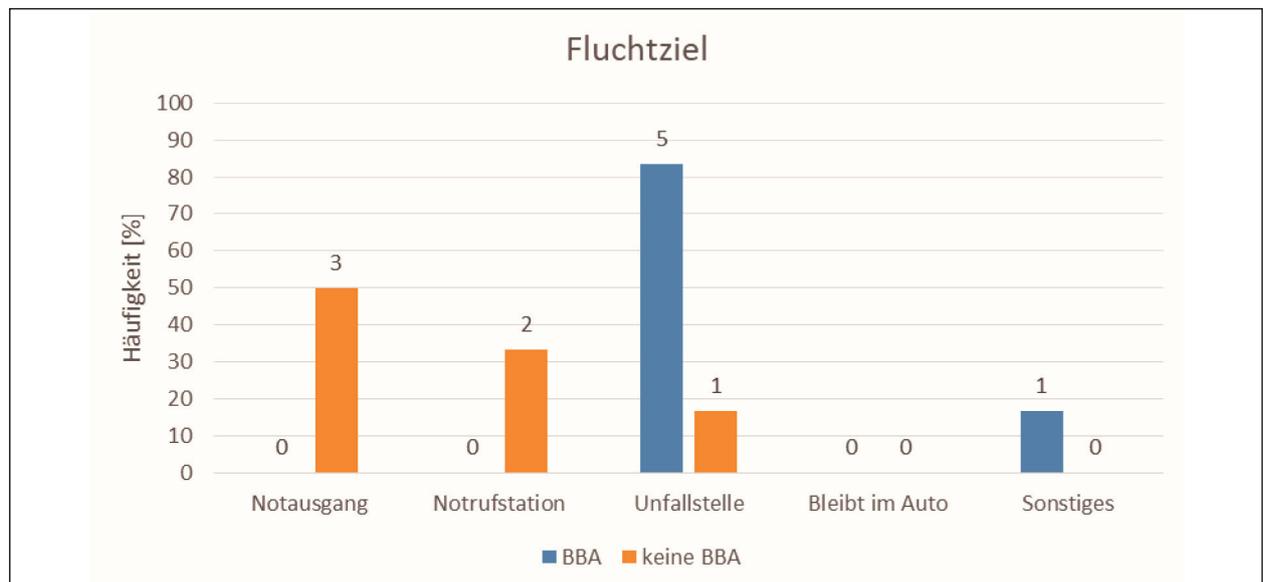


Bild 15: Evakuierungsziele der Probanden in der Paarsituation (n = 12).

kann (Zustimmung im Mittel 81 von 100), jedoch verstanden sie die Durchsagen kaum (20 von 100) – was stark mit dem Tunnel zusammenhängt: Bei der Voruntersuchung im Tunnel Jagdberg gaben die Probanden an, die Durchsagen wesentlich besser verstanden zu haben (74 von 100). Dementsprechend wurde in der aktuellen Untersuchung auch keine detaillierte Kritik zum Inhalt der Durchsagen geäußert, sondern lediglich zur Verständlichkeit allgemein. Bezüglich der untersuchten Brandbekämpfungsanlage zeigte sich, dass die Probanden der BBA-Gruppe die Durchsagen im Tunnel, analog zur Voruntersuchung, signifikant weniger gut verstanden als die Probanden der Kontrollgruppe (14 vs. 26 auf der Skala von 0 bis 100). In der BBA-Gruppe konnten außerdem nur wenige Durchsageninhalte frei erinnert werden. Insgesamt kann man schlussfolgern, dass die schlechte Verständlichkeit der Durchsagen ein Sicherheitsproblem darstellt, da auf diese Weise die meisten Probanden gar keine Handlungsanweisung erhalten. Dies könnte auch ein Grund dafür sein, dass eine weit- aus höhere Anzahl an Probanden - im Vergleich zu den Untersuchungen in VR und im Tunnel Jagdberg - das Fahrzeug nicht innerhalb der Testzeit verließ. Die Ergebnisse untermauern die Annahme, dass die Verständlichkeit der Durchsagen das Verhalten von Personen, die sich im Aktivierungsbereich einer BBA befinden, wesentlich beeinflusst. Anzumerken ist hier, dass in der vorliegenden Studie die BBA die einzige relevante zusätzliche Geräuschquelle war. Die Verständlichkeit der Durchsage könnte in einem realen Brandereignis durch die Geräusche des Feuers und der der anderen Verkehrsteilnehmer zusätzlich reduziert sein, auch wenn keine Brandbekämpfungsanlage aktiviert wird. Um die Verständlichkeit von Durchsagen zu erhöhen und somit das Evakuierungsverhalten der Verkehrsteilnehmer, welches im Ernstfall zentral für das Überleben sein kann, erfolgreicher zu steuern, sollten Maßnahmen zur Verbesserung der Verständlichkeit der Durchsagen unter Beachtung akustischer Besonderheiten von Tunneln in Erwägung gezogen werden.

4.3.3 Einschätzung zur BBA

Die Probanden erwarteten, dass sich der Einbau einer BBA sehr positiv (88 von 100) auf die Sicherheit in Straßentunneln auswirkt. Sie würden es sehr begrüßen (98 von 100), wenn diese zur Standardausstattung von Straßentunneln gehören würden. Die positiven Aspekte einer BBA waren demnach für die

Probanden ersichtlich. Wichtig bleibt hierbei zu erwähnen, dass die Probanden nicht zur Einschätzung der Kosten-Nutzen-Relation aufgefordert wurden. Bezüglich der Wirkweise einer BBA wurde in freien Antworten angegeben, dass durch eine BBA Brände schneller gelöscht werden können und die Gefahr von Explosionen und einer Ausbreitung des Feuers und deren Hitze verhindert werden könne. Sie sahen aber auch die Gefahr, dass die Aktivierung einer BBA Panik auslösen könne und eine BBA nur im Notfall aktiviert werden sollte, solange sich Personen im Tunnel aufhalten. Die Probanden schätzten im Durchschnitt, dass in 48 % der Tunnel eine BBA eingebaut sei, wobei die meisten Probanden auch angaben, dass dies in neueren Tunnel häufiger der Fall sein dürfte als in älteren. Probanden überschätzten demnach die Anzahl von Tunneln, in denen eine BBA eingebaut ist, deutlich – jedoch bezog sich die Frage auf Brandbekämpfungsanlagen in Deutschland, es handelte sich in Bregenz aber häufig um österreichische Probanden und in Österreich ist der Anteil an Tunneln mit BBA höher als in Deutschland. Allerdings liegt auch für österreichische Verhältnisse eine deutliche Überschätzung vor.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Studien in Virtueller Realität (VR) und im Tunnel Jagdberg. Auch dort wurde die BBA als stark positiv für die Tunnelsicherheit angesehen und die Anzahl der Tunnel mit BBA deutlich überschätzt.

Die Probanden in der vorliegenden Studie hatten das Gefühl, dass die BBA nur eine sehr geringe Gefahr (15 von 100) für sie darstellt. Probanden der BBA-Gruppe äußerten in diesem Kontext, dass durch die BBA die Sicht verschlechtert werde. Die BBA hat des Weiteren nach Angaben der Probanden die Entscheidung beeinflusst, ob die Probanden das Fahrzeug verlassen. Der Mittelwert von durchschnittlich 28 auf einer Skala von 0 bis 100 legt hier eine eher schwache Beeinflussung nahe. Auch wenn die Probanden nur sehr geringe Angst und Irritationen angaben, so waren sie doch durch die BBA überrascht, aber auch die Überraschung war tendenziell eher schwächer ausgeprägt (26 von 100). Im Vergleich erschreckte die Aktivierung der DLS-Anlage im Tunnel Jagdberg die Probanden wesentlich mehr (59 von 100). Probanden werden demnach durch die BBA mit Wasserdampf nur leicht überrascht. Dies könnte an der nassen Fahrbahn

im Versuchstunnel oder am Vorwissen der Probanden mit Wassersprinkleranlagen, die im Hochbau weit verbreitet sind, liegen.

Bezüglich der Wirkung des Wasserdampfes auf die Wahrnehmung ist eine mittelstarke Beeinträchtigung der Sicht im Fahrzeug gegeben (53 von 100), die sich kaum mit dem Scheibenwischer in den Griff bekommen ließ (45 von 100). Der Schaum beeinträchtigte die Sicht der Probanden im Fahrzeug im Tunnel Jagdberg erheblich mehr (95 von 100). Verglichen dazu war die Beeinträchtigung der Sicht außerhalb des Fahrzeuges im Tunnel Jagdberg relativ gering (31 von 100) und bei der WN-Anlage immer noch etwas höher (44 von 100). Außerhalb des Fahrzeuges erlebten die Probanden ihr Fluchtverhalten durch die BBA als eingeschränkt, der Mittelwert von 28 auf der Skala von 0 bis 100 spricht jedoch für eine eher geringe Einschränkung.

Praktisch nicht vorhanden waren Befürchtungen zu negativen Einflüssen des Wasserdampfes. Einige Versuchspersonen gaben an, dass in der Durchsage zu viele Informationen wären und der Fokus der Durchsagen auf der Rettung aus dem Tunnel liegen sollte. Bezüglich BBA gab es lediglich vereinzelte Wünsche nach Informationen zur deren Ungefährlichkeit. Der Durchschnittswert von 30 (auf der Skala von 0 bis 100) legt eher einen gering ausgeprägten Wunsch nach mehr Informationen zur BBA in den Durchsagen nahe. Die Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der VR-Studie und der Studie im Tunnel Jagdberg, die ebenfalls zeigten, dass die Probanden keine Gefahr in der BBA sahen. Der BBA-Typ scheint hier keinen Einfluss zu haben.

4.3.4 Ausstiegsverhalten

Nicht alle Probanden verließen während der Untersuchung in der festgelegten Zeit von drei Minuten nach Beginn der Durchsage das Fahrzeug. Im Gegensatz zu den Versuchen in Virtueller Realität und im Tunnel Jagdberg zeigte sich, dass über ein Drittel der Probanden während einer aktivierten BBA ihr Fahrzeug nicht verließen, obwohl sie durch eine Tunneldurchsage dazu aufgefordert wurden. Ein Grund dafür könnte, neben dem direkten Einfluss der BBA, auch in der deutlich schlechteren Ver-

ständlichkeit der Durchsage liegen. Die Probanden der Studie im Citytunnel Bregenz gaben eine schlechtere Verständlichkeit der Durchsage an als die Probanden der Studie im Tunnel Jagdberg und in der VR-Studie. Dies weist auf die Bedeutung einer gut verständlichen Durchsage hin, damit Probanden auch im Einflussbereich einer BBA ihr Fahrzeug verlassen. In der VR-Studie war die Durchsage für alle Probanden gut verständlich und hier verließen alle Probanden - auch mit aktivierter BBA - ihr Fahrzeug. Interessanterweise war aber die Verständlichkeit bei der Studie im Citytunnel Bregenz nicht nur für die BBA-Gruppe geringer, sondern auch die Probanden der Kontrollgruppe gaben eine geringere Verständlichkeit an. Bei der Kontrollgruppe sind aber fast alle Probanden aus ihrem Fahrzeug ausgestiegen. Möglicherweise hat hier die zusätzliche Möglichkeit, sich die Durchsage öfter anzuhören oder auch einfach die Türe zu öffnen, den Einfluss der geringeren Verständlichkeit reduziert.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass in der vorliegenden Studie die BBA die einzige relevante Lärmquelle darstellte. In einem realen Tunnelereignis wären wahrscheinlich noch mehr beeinträchtigende Geräusche dazu gekommen, welche die Verständlichkeit der Durchsage verringert hätten. Dies könnte zur Folge haben, dass noch mehr Tunnelnutzer ihr Fahrzeug nicht verlassen.

Als zusätzliche Möglichkeiten zur Optimierung der Evakuierungsaufforderung wären auch visuelle Informationen sowie die Nutzung aller weiteren Informationskanäle (Autoradio, Handy, etc.) vorstellbar. Aufgrund der sehr modernen Untersuchungs-PKWs mit hohem Maß an Technisierung, der Erfahrungen zur Nutzung des Radios in vorangegangenen Studien sowie der Neuheit der Fahrzeuge für die Probanden wurde in dieser Untersuchung darauf verzichtet, die Probanden zur Nutzung des Radios zu befragen. Außerdem wurde aufgrund der Standardisierung auf die Einspielung der Evakuierungsdurchsage im Radio verzichtet. In der Realität ist es jedoch durchaus sinnvoll, Durchsageinformationen über das Autoradio einzuspielen, da dieses viele Personen während der Fahrt einschalten [16]. Auch Handys könnten verwendet werden, um Tunnelnutzer zu informieren. Es ist also nicht zwingend nötig, die Lautsprecheranlagen zu verbessern, wenn si-

chergestellt werden kann, dass die Tunnelnutzer auf anderen Kanälen erreicht werden.

4.3.5 Evakuierungsziele und Abbruchkriterien

Insgesamt suchten die meisten Probanden den nächstgelegenen erreichbaren Notausgang auf. Die Ergebnisse dieser Studie unterscheiden sich jedoch von den Erkenntnissen der Studie im Tunnel Jagdberg und der Studie in Virtueller Realität darin, dass zwar auch die meisten Probanden den nächstgelegenen Notausgang aufgesucht haben, aber wesentlich mehr im Fahrzeug sitzen blieben (Bregenz: BBA-Gruppe: 41 %, KG: 4 %; Jagdberg: BBA-Gruppe: 13 %, KG: 0 %; VR: 0 %). Die Ergebnisse zeigen, dass nicht alle Probanden der Aufforderung der Durchsage zum Verlassen des Tunnels nachkommen.

Neun Probanden gingen zum Ereignis (Unfall). Der Grund dafür war der Wunsch, möglichen Unfallopfern zu helfen. Die Evakuierungsdurchsage könnte dazu beigetragen haben, da in dieser auch aufgefordert wurde, anderen zu helfen. Allerdings legt die schlechte Verständlichkeit der Durchsage einen solchen Zusammenhang eher nicht nahe. Das Annähern an den Unfall mit der Absicht, erste Hilfe zu leisten, ist im simulierten Szenario auch nicht als falsches Verhalten anzusehen, da die Situation so eingeschätzt werden konnte, dass das Leisten von erster Hilfe angemessen ist. Mögliche Hinweise hierfür könnte die Farbe des verwendeten Rauchs (weiß) gewesen sein.

Interessanterweise haben knapp 25 % der Probanden die Notrufstation aufgesucht. Die Motivation dahinter scheint zu sein, die Behörden informieren zu wollen. Dies ist bemerkenswert, da durch die aktivierte Durchsage eigentlich deutlich geworden sein sollte, dass die Hilfskräfte über das Ereignis informiert sind. Auch hat die Durchsage dazu aufgefordert, den Tunnel zu verlassen. Dieses Ergebnis entspricht dem aus den Studien im Tunnel Jagdberg und der VR-Studie, in denen 20 % beziehungsweise 12 % der Probanden die Notrufstationen aufsuchten. Dieses Ergebnis legt nahe, darüber nachzudenken, wie die Notausgänge gegenüber den Notrufstationen in einem solchen Szenario zusätz-

lich attraktiver gemacht werden könnten. Auch wenn in Einzelfällen berichtet wurde, dass in realen Tunnelbrandsituationen Probanden in Notrufkabinen überlebten, indem sie Kontakt mit den Operatoren in der Tunnelleitzentrale aufnahmen und diese die Lüftung entsprechend steuerten, muss es doch vorrangiges Ziel der Sicherheitsabläufe sein, Probanden im Brandfall mit massiver Rauchentwicklung möglichst zügig zum Verlassen des Tunnels über die Fluchtwege zu bewegen.

Bezüglich des Vergleichs der Einzel- und Paarsituation scheint die Anwesenheit des Partners dahingehend wirksam zu sein, dass Paare insgesamt aktiver waren, das Fahrzeug mit höherer Wahrscheinlichkeit verließen und sich als kompetenter bezüglich der Evakuierung erlebten. Kein Versuchsteilnehmer der Probandenpaare blieb im Fahrzeug sitzen. Insgesamt scheinen Partner als Mitfahrer in der Entscheidungsfindung zur Evakuierung also eine positive Rolle zu spielen.

5 Vergleiche

5.1 Vergleich des Verhaltens bei Wassernebel und Druckluftschaum

Ein Vergleich der beiden Stichproben Wassernebel (in Bregenz, Citytunnel) und Druckluftschaum (bei Jena, Tunnel Jagdberg) findet sich in Tabelle 9. Die Mittelwerte im Alter der Probanden liegen zwischen den Untersuchungen um ca. 10 Lebensjahre auseinander: WN-BBA- und WN-Kontrollgruppe 47 Jahre; DLS-Kontrollgruppe: 38 Jahre; DLS-BBA-Gruppe: 36 Jahre. Dadurch ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben der beiden Studien. Gruppen- oder Interaktionseffekte wurden nicht gefunden.

Die BBA-Gruppen unterscheiden sich außerdem bezüglich des Familienstandes, des höchsten Schulabschlusses und der derzeitigen Tätigkeit. In der Untersuchung mit Wassernebel waren mehr Personen verheiratet und weniger Probanden ledig, es hatten deutlich weniger Probanden Hochschulreife und mehr Probanden waren voll berufstätig

Variable		WNI		DLS					
		Kontrollgruppe		BBA-Gruppe		Kontrollgruppe		BBA-Gruppe	
		n	h	n	h	n	h	n	h
Geschlecht	Weiblich	11	44 %	11	41 %	7	50 %	8	50 %
	Männlich	14	56 %	16	59 %	7	50 %	8	50 %
Familienstand	Verheiratet	10	40 %	19	70 %	5	36 %	5	31 %
	Ledig, mit Partner lebend	5	20 %	2	7 %	4	29 %	5	31 %
	Ledig, allein lebend	4	16 %	4	15 %	4	29 %	6	38 %
	Geschieden, getrennt lebend	6	24 %	2	7 %	1	7 %	0	0 %
Höchster Schulabschluss	Hochschulreife	8	32 %	6	22 %	10	71 %	13	81 %
	Fachhochschulreife	1	4 %	3	11 %	1	7 %	2	13 %
	Mittlere Reife	7	28 %	9	33 %	3	21 %	1	6 %
	Volks-, Hauptschule	9	36 %	9	33 %	0	0 %	0	0 %
Derzeitige Tätigkeit	Voll berufstätig	20	80 %	13	48 %	6	43 %	5	31 %
	Teilzeitbeschäftigt	4	16 %	5	19 %	0	0 %	1	6 %
	In Ausbildung	0	0 %	1	4 %	6	43 %	8	50 %
	In Rente	3	12 %	6	22 %	2	14 %	1	6 %
	Arbeitslos	3	12 %	1	4 %	0	0 %	1	6 %
	Hausfrau	0	0 %	1	4 %	0	0 %	0	0 %

Angegeben sind absolute (n) und relative Häufigkeit (%).

Tab. 9: Stichprobenvergleich: Probanden im Citytunnel (BBA-Typ: WN) und Probanden im Tunnel Jagdberg (BBA-Typ: DLS)

und nur eine Person war in Ausbildung. In den Kontrollgruppen findet sich kein Unterschied der Stichproben bezüglich des Familienstandes, aber bei dem höchsten Schulabschluss (mehr Hochschulreife) und bei der derzeitigen Tätigkeit (mehr voll berufstätig).

Die Evakuierungsziele (vgl. Bild 17) unterscheiden sich zwischen den Stichproben in der BBA-Bedingung, aber nicht in der Kontrollbedingung. Schließt man die sitzenbleibenden Probanden für die Analyse des Fluchtziels aus, ergeben sich bezüglich der Wahl des Fluchtziels keine signifikanten Effekte mehr (vgl. Bild 17).

Bezüglich der Ausstiegsdauer findet sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungen oder den Versuchsgruppen und kein Interaktionseffekt, auch wenn deskriptiv bei der schaubasierten BBA in der BBA-Gruppe eine grö-

ßere Latenz bis zum Aussteigen zu sehen ist (vgl. Bild 18). Bei diesem Vergleich wurden zu früh ausgestiegene Probanden eingeschlossen und Probanden, die im Fahrzeug sitzen blieben ausgeschlossen.

Beim Vergleich der Fluchtgeschwindigkeiten findet sich kein signifikanter Gruppeneffekt, kein Unterschied zwischen den Untersuchungen und kein Interaktionseffekt (vgl. Bild 19).

Aus der Befragung der Probanden lässt sich schließen, dass die Probanden die Untersuchung in Bregenz mit Wasserdampf signifikant als weniger belastend empfanden. Auch die Situation mit Unfall und Rauch schätzten sie als weniger gefährlich ein. Dies war der Fall, obwohl die Situation in Bregenz (WN) als realistischer eingestuft wurde. Probanden der BBA-Gruppen waren eher überrascht vom Schaum als vom Wasserdampf und hatten im Fahrzeug eine stärker eingeschränkte Sicht. Allgemein gaben Pro

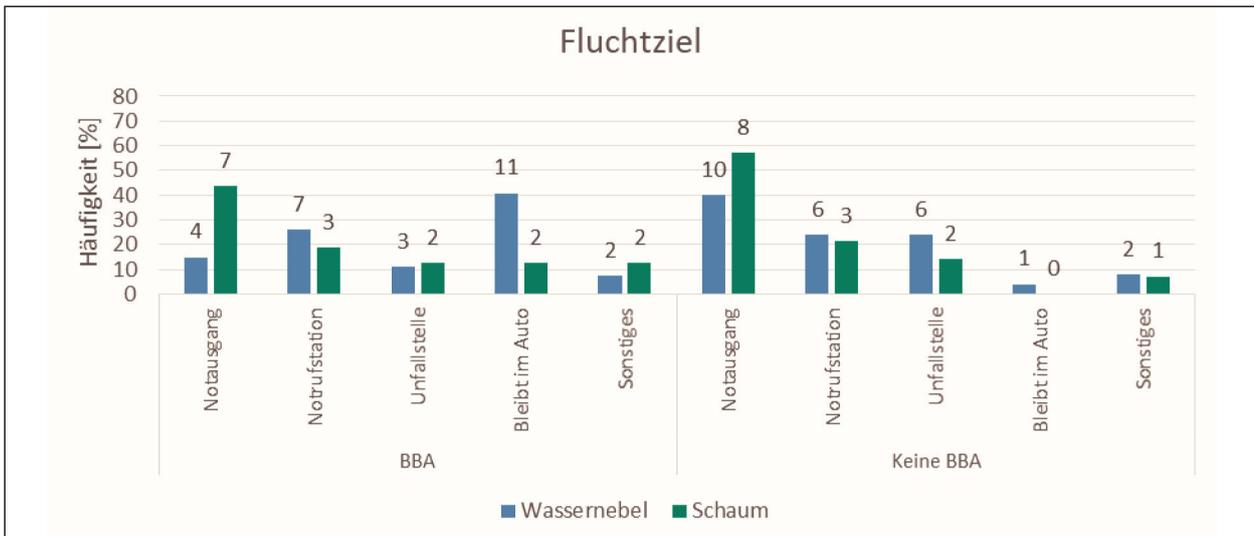


Bild 17: Evakuierungsziele in den verschiedenen Bedingungen bei Wassernebel (Bregenz) oder Druckluftschaum (Tunnel Jagdberg). Relative Häufigkeiten [%] der jeweiligen Stichproben mit absoluten Werten (n) über den Balken; WN: BBA: n = 27, keine BBA: n = 25; DLS: BBA: n = 16, keine BBA: n = 14.

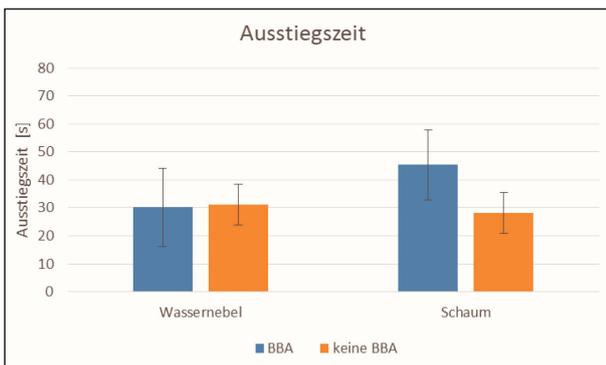


Bild 18: Mittlere Ausstiegszeiten der Gruppen (WN: links, DLS: rechts) in Sekunden mit Standardfehlern. Mit frühausestiegender, ohne sitzenbleibende Probanden; WN: BBA: n = 13, keine BBA: n = 22; DLS: BBA: n = 14, keine BBA: n = 14.

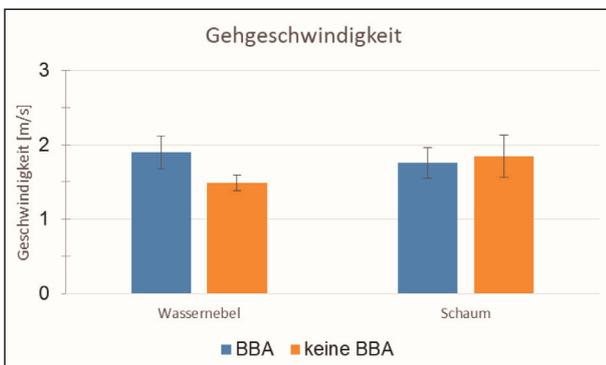


Bild 19: Gehgeschwindigkeiten der Gruppen (WN: links, DLS: rechts) in km/h mit Standardfehlern; WN: BBA: n = 7, keine BBA: n = 16; DLS: BBA: n = 12, keine BBA: n = 11, nur Probanden, die zu Notausgang/Notrufsäule evakuierten.

banden bei der Untersuchung mit DLS (Tunnel Jagdberg) eher an, dass ihr Verhalten von der Sicht-

barkeit eines Notausgangs beeinflusst wurde. Die Probanden in Bregenz haben die Durchsage signifikant und in hohem Maße schlechter verstanden. Deshalb waren sie möglicherweise auch weniger irritiert durch die Durchsageninhalte und erinnerten weniger Inhalte der Durchsage (vgl. Tabelle 10).

5.2 Vergleich des Verhaltens bei Wassernebel in VR und in Realität

Zwischen der Untersuchung in VR und der aktuellen Untersuchung gab es einige methodische Unterschiede. Die Erhebung in einem CAVE (VR) bot nicht die Möglichkeit, Kälte und Nässe zu simulieren, es wurde zwischen Autofahrt und Flucht zu Fuß pausiert und die Durchsage in VR war problemlos verständlich und auch deutlich kürzer. Dies führte dazu, dass in der VR-Untersuchung 100 % der Probanden aus dem Fahrzeug ausstiegen. In VR gab es auch nicht die Möglichkeit, zu wenden oder rückwärts zu fahren. Darüber hinaus wurden bezüglich der Nachbefragung andere Fragen und Fragen mit zur vorliegenden Untersuchung verschiedenen Antwortformaten gestellt. Trotz dieser methodischen Unterschiede soll explorativ die Wahl des Fluchtziels und die Ausstiegszeit miteinander verglichen werden.

Die Probanden der VR-Untersuchung (BBA: 25 Jahre; keine BBA: 26 Jahre) waren im Schnitt deutlich jünger als die Probanden in der Untersuchung in

	WN				DLS			
	BBA		Keine BBA		BBA		Keine BBA	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Wie belastend war das Ereignis für Sie?	13.52	13.99	15.63	18.73	26.06	20.51	37.14	30.36
Wie gefährlich war die Situation?	17.85	26.46	11.46	25.00	55.44	30.69	53.21	40.93
Wie ähnlich war Untersuchung zu realer Situation?	77.22	24.66	76.96	21.36	60.38	26.82	58.93	30.77
Wie sehr hat es Sie überrascht, als die BBA aktiviert wurde?	26.60	35.49			58.75	37.57		
Wie sehr hat die aktivierte BBA Ihre Sicht im Auto eingeschränkt?	58.06	42.47			95.45	8.20		
Wurde Ihr Verhalten durch Sichtbarkeit eines Notausgangs beeinflusst?	25.93	39.93	32.29	42.83	63.44	40.89	58.57	37.49
Wie gut haben Sie die Durchsage im Tunnel verstanden?	14.44	20.16	25.75	22.76	59.06	38.95	90.71	11.24

Anmerkung: Angegeben sind Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD)

Tab. 10: Nachbefragungssitems mit Unterschieden zwischen den Untersuchungen

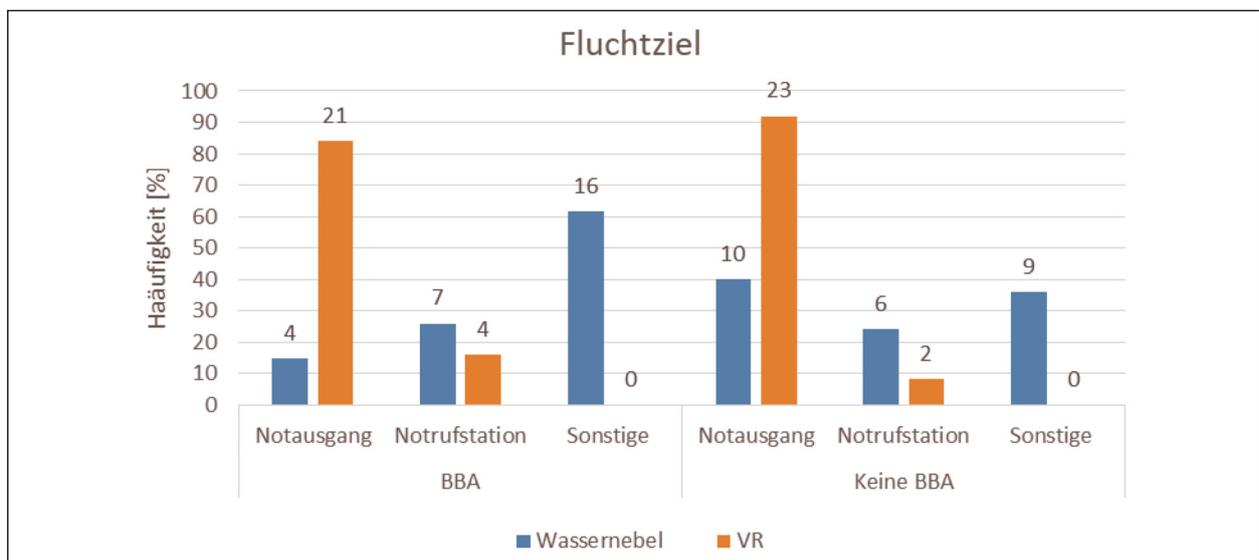


Bild 20: Fluchtziele der Probanden in den verschiedenen Bedingungen Real/VR. Relative Häufigkeiten [%] der jeweiligen Stichproben mit absoluten Werten als Beschriftung; Real: BBA: n = 27; keine BBA: n = 25; VR: BBA: n = 25; keine BBA: n = 25. Die sitzgebliebenen Probanden wurden zu Sonstige gezählt.

Bregenz (beide Gruppen 47 Jahre). Bezüglich der Geschlechterverteilung fanden sich keine Unterschiede zwischen den Stichproben. Jedoch handelte es sich aufgrund der studentischen Stichprobe bei der VR-Untersuchung um wesentlich mehr Probanden mit Hochschulreife. In der VR-Stichprobe hatten 2% (35% in Bregenz) einen Volks- oder Hauptschulabschluss, 3% (31% in Bregenz) mittlere Reife, 8%

(8% in Bregenz) die Fachhochschulreife und 85% (27% in Bregenz) die Hochschulreife.

Die Wahl der Fluchtziele unterscheidet sich zwischen den Untersuchungen signifikant in der BBA-Bedingung und in der Kontrollbedingung (real/VR, vgl. Bild 20). Mit frühauseitenden Probanden und Ausschluss der sitzgebliebenen Probanden

finden sich bezüglich der Wahl des Fluchtziels keine signifikanten Unterschiede. Da sich die zeitlichen Abläufe erheblich zwischen den Untersuchungen unterschieden, wird auf einen direkten Vergleich der Ausstiegszeiten sowie der Gehgeschwindigkeiten verzichtet.

6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

In diesen Probandenuntersuchungen wurde mittels Aktivierung einer virtuellen bzw. realen Brandbekämpfungsanlage (VR, DLS, WN) vergleichend untersucht, ob sich die Aktivierung einer BBA auf das Erleben und Verhalten von Tunnelnutzern auswirkt. Dazu erlebten in drei randomisierten und kontrollierten Untersuchungen je eine Gruppe von Probanden am Unfallort eine Aktivierung der BBA und eine Kontrollgruppe keine Aktivierung der BBA. Die Probanden der beiden Gruppen waren vor der Untersuchung hinsichtlich der erhobenen soziodemographischen Variablen vergleichbar, sodass die Ergebnisse nicht auf zufällige Gruppenunterschiede in diesen Variablen zurückgeführt werden können. Die Ergebnisse der drei Studien werden hier zunächst nochmals zusammenfassend dargestellt und anschließend die Ergebnisse der Studien verglichen. Für eine detaillierte Darstellung und Bewertung einzelner Ergebnisse der Studien wird auf die obigen Kapitel verwiesen.

Die Ergebnisse der VR Studie zeigen, dass eine BBA auch in einem virtuellen Szenario untersucht werden kann und die Probanden in der Lage sind, sich für die zu untersuchende Situation relevant zu verhalten. Die Vorteile der VR liegen in einem kontrollierten und detailliert auswertbaren Setting. Es wurde gezeigt, dass auch bei aktivierter BBA die Probanden ihr Fahrzeug innerhalb von 3 Minuten verlassen und überwiegend die Notausgänge aufsuchen, wozu sie durch eine Durchsage aufgefordert wurden. Die Verständlichkeit der Durchsage war dabei gut. Die aktivierte BBA wurde auch nicht als problematisch bewertet und aus den Angaben der Probanden lassen sich keine relevanten Probleme durch eine BBA für die Selbstrettung ableiten. Bei der Auswertung der Fluchtwege zeigte sich, dass die Probanden bei aktivierter BBA eher an den Wänden des Tunnels flüchten, was sowohl durch

eine leichtere Orientierung durch die dort angebrachten Fluchtwegekennzeichen als auch die besseren Sichtbedingungen durch weniger dichten Wasserdampf durch die Anordnung der Düsen gut zu erklären ist.

In der Studie im Tunnel Jagdberg wurde anhand einer realen BBA, Typ DLS, untersucht, wie sich Probanden in einer gestellten Unfallsituation mit Rauchentwicklung bei Aktivierung der BBA verhalten. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass auch hier die meisten Probanden nach der Evakuierungsdurchsage auch bei aktivierter BBA das Fahrzeug verlassen und den nächsten Notausgang aufsuchen. Die Sichtbedingungen werden hauptsächlich aus dem Fahrzeug hinaus drastisch reduziert, wenn kein Scheibenwischer genutzt wird. Der Dampf wird nicht als bedrohlich erlebt und hindert die Personen nicht an der Flucht.

Auch in der Studie im City-Tunnel Bregenz wurde anhand einer realen BBA, Typ WN, untersucht, wie sich Probanden in einer gestellten Unfallsituation mit Rauchentwicklung bei Aktivierung der BBA verhalten. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass auch hier die meisten Probanden nach der Evakuierungsdurchsage auch bei aktivierter BBA das Fahrzeug verlassen und den nächsten Notausgang aufsuchen. Die Sichtbedingungen waren sowohl aus dem Fahrzeug hinaus als auch außerhalb des Fahrzeugs reduziert. Der Wasserdampf wird nicht als bedrohlich erlebt und hindert die Personen nicht an der Flucht. Allerdings sind bei dieser Untersuchung einige Probanden bei aktivierter BBA im Fahrzeug sitzen geblieben. Dies wird hauptsächlich auf die geringe Verständlichkeit der Evakuierungsdurchsage zurückgeführt.

6.1 Diskussion des Probandenverhaltens bei Wasserdampf und Dampf

Nachdem in den obigen Kapiteln die Studien für sich und die Ergebnisse aus den Vergleichen mit kontrolliertem randomisiertem Design bewertet wurden, soll in diesem Kapitel der direkte Vergleich zwischen den Untersuchungen dargestellt und bewertet werden. Zwischen den verschiedenen BBA-Typen (DLS, WN) zeigten sich viele Ähnlichkeiten, allerdings auch einige Unterschiede bzgl. des menschlichen Verhaltens der Probanden. Bei der Bewertung dieser Vergleiche sind einige methodi-

sche Aspekte zu beachten, die hier zunächst erwähnt und diskutiert werden:

Insbesondere muss für die Vergleiche einschränkend angemerkt werden, dass diese nicht aufgrund von randomisierten und kontrollierten Erhebungen gezogen wurden und somit andere Variablen (z. B. die generell unterschiedliche Verständlichkeit der Durchsage bei dem Vergleich WN und DLS) für die gefundenen Unterschiede verantwortlich sein könnten.

Die unterschiedlich gute Verständlichkeit der Durchsagen, die allerdings nur bedingt mit dem BBA-Typ zusammenhängt, beeinflusste wahrscheinlich das Evakuierungsverhalten der Tunnelnutzer und könnte hauptsächlich dafür verantwortlich sein, dass beim Realversuch mit der WN-Anlage insgesamt 40% der Probanden ihr Fahrzeug nicht während der vorgesehenen Versuchszeit verließen.

Zu berücksichtigen sind auch nationale Unterschiede bei der Ausstattung von Straßentunneln mit Lautsprecheranlagen. Während in deutschen Straßentunneln (vgl. Tunnel Jagdberg, Grenzflächenhorn, alle 60 m) in der gesamten Tunnelröhre Lautsprecher angebracht werden, werden in österreichischen Straßentunneln (vgl. Citytunnel in Bregenz) standardmäßig nur in der Pannenbucht Lautsprecher angebracht. Außerdem handelt es sich beim Tunnel Jagdberg im Gegensatz zum Citytunnel um einen Neubautunnel mit modernerer Lautsprecheranlage. Etwaige Einflüsse auf das Verhalten in Folge der bei den Versuchen mit BBA vom Typ DLS bzw. WN unterschiedlichen Tunnelbauwerke und -geometrie sowie einzelne Ausstattungsmerkmale können nicht ausgeschlossen werden, waren jedoch durch das Versuchsdesign nicht nachweisbar.

Das höhere Durchschnittsalter der Probanden beim Realversuch mit Wassernebel in Bregenz im Vergleich zur Studie im Tunnel Jagdberg könnte möglicherweise bei der Sicht und der schlechter verstandenen Durchsage eine Rolle gespielt haben. Auf der einen Seite könnte ein älteres Probandenkollektiv einen höheren Erfahrungsschatz mitbringen, auf der anderen Seite verlangsamten sich mit steigendem Alter zunehmend kognitive Informationsverarbeitungsprozesse [2]; [24]. So vermindert sich beispielsweise die selektive Aufmerksamkeit, d.h. die

Fähigkeit, sich inmitten multipler Sinneseindrücke auf bestimmte Reize zu fokussieren und irrelevante Reize auszublenden [22]; [1]. In der Untersuchungssituation wurden die Probanden zeitgleich mit zahlreichen Eindrücken konfrontiert – BBA-Aktivierung, Handhabung des PKW, Durchsage verstehen – und darüber hinaus hallte die Durchsage sehr stark wider und stellte somit für sich bereits eine Herausforderung an die selektive Aufmerksamkeit dar. Mit zunehmender Verschlechterung von selektiver Aufmerksamkeit und Sensorik im Alter steigt die Schwierigkeit, sich bei Stimmendurcheinander (aufgrund des langen Nachhalls, andere Geräusche) auf eine Stimme zu konzentrieren [32]. Außerdem nehmen auch insgesamt die sensorischen Fähigkeiten ab: Visuelle und akustische Wahrnehmung verschlechtern sich im Alter [15], was dazu beigetragen haben könnte, dass beispielsweise die Durchsage in Bregenz schlecht verstanden wurde. Während sich die sensorischen Systeme im Laufe des Erwachsenenlebens kontinuierlich verschlechtern, gehen Studien von drastischen, nicht mit spezifischen Krankheitsbildern zusammenhängenden Veränderungen frühestens etwa ab dem 70. Lebensjahr aus [15]. Somit bleibt es auch fraglich, ob dies das Ausmaß des schlechteren Verstehens der Durchsage sowie die von der Jagdberguntersuchung verschiedene Bewertung der Sicht erklärt, da das Videomaterial gut darstellt, was Probanden gehört und gesehen haben und sich Unterschiede in Sicht und Verständlichkeit der Durchsage als nachvollziehbar erweisen. Das Alter korreliert nicht mit dem Verstehen der Durchsage und hängt nicht mit der Sicht außerhalb des Fahrzeuges zusammen. Jedoch empfanden die Probanden die Sicht im Fahrzeug mit zunehmendem Alter als schlechter, erkannten allerdings das Ereignis im Tunnel ein wenig besser.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen lassen sich aus dem Vergleich der Untersuchungen folgende Punkte ableiten:

Bezüglich der Einschränkungen der Sicht zeigte sich, dass eine schaubasierte BBA die Sicht aus dem Fahrzeug heraus in den Bereichen ohne Scheibenwischer mehr als bei einer Aktivierung einer WN-Anlage einschränkt. Mit Scheibenwischer und außerhalb des Fahrzeuges hingegen wurden die

Sichtverhältnisse als weniger beeinträchtigend von den Probanden wahrgenommen, mit einer Tendenz dahin, dass Schaum hier die Sicht weniger einschränkt als Wasserdampf.

Es zeigte sich auch, dass der Anlagentyp einen potentiellen Einfluss auf die Verständlichkeit der Durchsagen hat. Weil WN-Anlagen im Betrieb typischerweise lauter sind als Druckluftschäumen, könnten sie die Verständlichkeit von Durchsagen stärker reduzieren. Auf der anderen Seite könnten die schallschluckenden Effekte von Druckluftschäumen nicht nur positiv wirken, indem sie Hall reduzieren, sondern auch die beim Nutzer ankommende Lautstärke der Durchsagen reduzieren. Diese spezifischen Einflussfaktoren und ihre Wirkung auf die Evakuierung können auf Basis der vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht hinreichend bewertet werden. Allgemein lässt sich bezüglich der Verständlichkeit der Durchsagen festhalten, dass diese eine entscheidende Voraussetzung für ein effektives Evakuierungsverhalten darstellt.

Außerdem zeigt sich bei den Realversuchen, dass Probanden bei aktivierter BBA (WN und DLS) schneller laufen. Eventuell könnte dies darauf zurückzuführen sein, dass Probanden versuchen, möglichst zügig der Nässe und Kälte zu entkommen. Möglicherweise werden durch die aktivierte BBA auch das Gefährdungsbewusstsein und die Handlungsmotivation erhöht.

Über alle Studien hinweg zeigt sich außerdem eine hohe Akzeptanz einer BBA bei den Probanden sowie keine negativen Bewertungen oder Bedrohungsgefühle durch die Aktivierung einer BBA bei beiden BBA Typen.

6.2 Stärken und Grenzen der Studien

Die Untersuchungen basieren auf einer vergleichenden Betrachtung mit einem kontrollierten experimentellen Design und liefern aussagekräftige Ergebnisse für das Verhalten von Personen unter dem direkten Einfluss einer BBA. Sie ermöglichen außerdem einen Vergleich des Verhaltens zwischen Wasserdampf und Druckluftschäumen bzw. realem Wasserdampf und Wasserdampf in VR sowie Er-

kenntnisse bezüglich der Bedeutung gut verständlicher Instruktionen.

Eine Grenze der Studien liegt in der Tatsache, dass auch aus ethischen Gründen keine reale Gefährdungssituation realisiert wurde und somit die Generalisierung auf solche Situationen nur mit Vorsicht zu ziehen ist. Während die Ergebnisse innerhalb der einzelnen Studien zum Einfluss der BBA auf methodisch hochwertigen Vergleichen aufgrund von kontrollierten, randomisierten Versuchen beruhen, kann bei einem Vergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Studien aufgrund der fehlenden Randomisierung nicht ausgeschlossen werden, dass hier nicht untersuchte Faktoren für die gefundenen Unterschiede verantwortlich sind. So haben sich bei den Probanden (Alter) sowie den Versuchsbedingungen (z. B. Tunnelgeometrie, Tageszeit) aus pragmatischen Überlegungen Unterschiede ergeben, die die Ergebnisse beeinflussen könnten. Diese Unterschiede bei den Versuchsbedingungen wurden an den entsprechenden Stellen diskutiert.

Weiterhin war in den Studien das Verhalten von Probanden, die im unmittelbaren Einflussbereich der aktivierten BBA zum Halten gekommen sind Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf außerhalb dieses Bereichs ist nicht möglich. Es wurde das Verhalten von Probanden untersucht, die im einzigen Fahrzeug, das sich im Tunnel befand, direkt vor dem Unfall zum Halten kamen. In Realität wären mit hoher Wahrscheinlichkeit mehr Fahrzeuge im Tunnel und nur sehr wenige Nutzer wären in unmittelbarer Nähe des Unfalls. Gerade in vielbefahrenen Tunneln können sich sehr schnell lange Staus bilden, so dass sich nur ein eher geringer Teil der Tunnelnutzer im direkten Einflussbereich des Unfalls befindet.

6.3 Fazit

6.3.1 Akustische Evakuierungsdurchsage

In diesen Untersuchungen wurde eine in Tunneln übliche aktuelle Durchsage verwendet, um die Probanden zum Verlassen des Tunnels aufzufordern. Die Verständlichkeit der Durchsage wurde durch

die BBA reduziert und war für die Probanden – je nach Tunnel – unterschiedlich gut verständlich, wobei zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass aufgrund der Untersuchungsanordnung ein verhältnismäßig geringer Gesamtgeräuschpegel vorlag. Es erscheint wichtig, dass im realen Ereignis die Verhaltensaufforderung deutlich und klar verständlich ist, um das gewünschte Ziel der effektiven Selbstrettung zu erreichen, oder entsprechend andere Möglichkeiten vorhanden sein sollten, um Tunnelnutzer zu informieren.

Des Weiteren sollte die Durchsage zeitlich so früh wie möglich aktiviert werden. In dieser Untersuchung wurde die BBA aus methodischen Gründen während der Durchsage aktiviert, um den Einfluss der BBA an einer möglichst großen Stichprobe zu erfassen. Es zeigte sich, dass Probanden mit aktivierter BBA etwas länger im Fahrzeug sitzen blieben als Probanden ohne BBA. Diese Verzögerung ließe sich möglicherweise beheben, indem zwischen der Durchsage und der Aktivierung der BBA eine längere Zeitspanne eingeplant wird. Die Durchsage könnte zusätzlich genutzt werden, um Probanden auf die Aktivierung der BBA vorzubereiten.

6.3.2 Wissen zu Brandbekämpfungsanlagen

Die Ergebnisse der drei Studien zeigen, dass Personen über die Häufigkeit von BBA in deutschen Straßentunneln unzureichend informiert sind. Viele gehen davon aus, dass eine BBA zur Standardausrüstung von Straßentunneln gehört und alle Probanden überschätzten den prozentualen Anteil von Tunneln, in denen eine BBA eingebaut ist. Wir gehen davon aus, dass diese Überschätzung durch die häufige Präsenz einer BBA im Hochbau resultiert und das Wissen hierüber von den Probanden auf Straßentunnel übertragen wird.

Aufgrund dieser Ergebnisse sowie Untersuchungen, die einen positiven Einfluss von Vorinformationen auf das Evakuierungsverhalten belegen [9], sollten Informationen zur Wirkungsweise einer BBA in Tunnelinformationsbroschüren (z.B. [5]) aufgenommen werden. Dies wäre auch dann sinnvoll, wenn in Deutschland die Anzahl der mit einer fest eingebauten BBA ausgestatteten Tunnel gering

bleibt, da die Verkehrsteilnehmer mit einer solchen BBA auch in Nachbarländern konfrontiert werden können. Außerdem könnten Informationen auch in das Tunnelschulungsmodul in den Fahrschulen integriert werden.

Die Annahme, dass in vielen Tunneln eine BBA eingebaut ist, sowie die erfragte Meinung der Probanden sprechen auch für eine hohe Akzeptanz zum Einbau solcher Anlagen. Probanden sind der Meinung, dass eine BBA die Sicherheit in Straßentunneln erhöht, und sie stehen einem Einbau in Straßentunneln positiv gegenüber. Sollten in Zukunft häufiger Straßentunnel mit BBAs ausgestattet werden, so kann man davon ausgehen, dass der Großteil der Bevölkerung diesem Einbau positiv gegenübersteht. Während den Untersuchungen waren die Probanden dem Einfluss der Anlage direkt ausgesetzt. Unter der Annahme, dass unter diesen Umständen am ehesten negative Einstellungen bezüglich einer BBA auftreten, sind die Ergebnisse sehr robust dahingehend, dass eine positive Einschätzung vorgenommen wird. Man kann demnach davon ausgehen, dass die Akzeptanz einer BBA in der Gesamtbevölkerung bezüglich sicherheitstechnischer Aspekte sehr groß ist.

6.3.3 Einfluss der Brandbekämpfungsanlagen auf die Wahrnehmung

Die Sicht (visuelle Wahrnehmung) wird durch die aktivierte BBA außerhalb und aus dem Fahrzeug hinaus stark eingeschränkt, auch Scheibenwischer verbessern die Sicht je nach Anlagentyp unterschiedlich gut: Bei einer WN-Anlage scheint ein Scheibenwischer nur wenig zu nutzen. Im Gegensatz dazu lässt sich beim Einsatz von Druckluftschaum die Sicht aus dem Fahrzeug hinaus durch den Einsatz der Scheibenwischer deutlich verbessern und auch außerhalb des Fahrzeuges wird die Sicht durch den Druckluftschaum als weniger eingeschränkt eingeschätzt als bei Wasserdampf.

6.3.4 Einfluss der Brandbekämpfungsanlagen auf das Verhalten

Ein auffälliges Ergebnis der Untersuchung mit Wasserdampf ist die Tatsache, dass sich im Gegensatz

zu den beiden anderen Studien signifikante Unterschiede bzgl. des Reaktions- und Fluchtverhaltens zeigten: Bei aktivierter BBA blieben mehr Probanden im Fahrzeug sitzen. Lässt man diese Probanden aus dem Vergleich, findet sich kein Unterschied in der Fluchtdauer: Unabhängig von der Aktivierung der BBA verlassen die Probanden ihr Fahrzeug in etwa gleich schnell. Sowohl die Probanden mit Aktivierung als auch die ohne Aktivierung der BBA suchten als Fluchtziele die Sicherheitseinrichtungen (Notausgang, Notrufkabine) auf. Vereinzelt blieben jedoch auch am Fahrzeug stehen oder versuchten, das Fahrzeug zu wenden oder rückwärts zu fahren. Diese Einzelfälle sowie die Probanden, die nicht ausgestiegen sind, sollten in die Bewertung des Einsatzes von Brandbekämpfungsanlagen mit einfließen. Auch wenn keine Unterschiede zwischen den Gruppen auftraten, so ist die Wahl des Fluchtziels Notrufstation in über 20 % der Fälle erwähnenswert. Hier muss unabhängig von dem Einbau einer BBA überlegt werden, ob Maßnahmen zur Optimierung des Verhaltens ergriffen werden sollten.

6.4 Zusammenfassende Bewertung

Sowohl die Analyse des Verhaltens als auch die Befragungen konnten eine Reihe von Ansatzpunkten liefern, wie sich die Aktivierung einer BBA auf das menschliche Verhalten auswirken kann. Daraus ergeben sich wichtige Implikationen zur Optimierung der Sicherheitsinfrastruktur für Tunnelnutzer, die sich im Ereignisfall im direkten Einflussbereich des Ereignisses befinden und damit als erstes und am direktesten gefährdet sind. Die gefundenen Ergebnisse lassen erwarten, dass im Ereignisfall die Aktivierung einer BBA in einem Straßentunnel das Selbstrettungsverhalten der Tunnelnutzer nicht negativ beeinflusst, auch wenn die Anzahl an im Fahrzeug verbliebenen Probanden bei den Einzeltests im Zuge der WN-Aktivierung höher war als bei der Untersuchung in VR und der Untersuchung mit DLS. Von besonderer Bedeutung ist eine verständliche Durchsage, die Tunnelnutzer vor der Aktivierung der BBA zur Flucht auffordert. Es ist zu empfehlen, entsprechende Teile der Infrastruktur des Tunnels auf den Einsatz einer BBA abzustimmen. Insbesondere ist hier die Bedeutung verständlicher

Informationen und Verhaltensanweisungen für die Tunnelnutzer hervorzuheben.

Literatur

- BADDELEY, A. D., LOGIE, R., BRESSI, S., DELLA SALA, S., & SPINLER, H. (1991): Dementia and working memory, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38A, 603-618.
- BIRREN, J. E. (1974): Translations in gerontology – From lab to life: Psychophysiology and speed of response. *American Psychologist*, 29, 808 – 815.
- BOER, L. C. (2002). Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. Rapport TNO Human Factors.
- BRADLEY, M. M., & LANG, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25, 49 – 59.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesanstalt für Straßenwesen (2009). Sicherheit geht vor – Straßentunnel in Deutschland: Informationen für Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer. URL: http://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/B-bro-tunnelsicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- DIX, A. (2011). The Fatal Burnley Tunnel Crashes Melbourne, Victoria, Australia. Expert Report for the Victorian Coroner.
- FRIDOLF, K., RONCHI, E., NILSSON, D., & FRANTZICH, H. (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal*, 59, 8 – 21.
- KENNEDY, R. S., LANE, N. E., BERBAUM, K. S., & LILIENTHAL, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203 – 220.

- KINATEDER, M., PAULI, P., MÜLLER, M., KRIEGER, J., HEIMBECHER, F., RONNAU, I., BERGERHAUSEN, U., VOLLMANN, G., VOGT, P., & MÜHLBERGER, A. (2013). Human behaviour in severe tunnel accidents: Effects of information and behavioural training. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 17, 20 – 32.
- KINATEDER, M., RONCHI, E., NILSSON, D., KOBES, M., MÜLLER, M., PAULI, P., & MÜHLBERGER, A. (2014). Virtual reality for fire evacuation research. *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedC-SIS)*, 7 – 10.
- KOHL, B., LEUKER, R., KAMMERER, H., LEISMANN, F., GAST, P., MÜHLBERGER, A. (2014). Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln. Unveröffentlichter Projektbericht im Rahmen des Projekts: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln (FE 15.0563/2012/ERB). ILF Beratende Ingenieure, Linz, Österreich.
- KRETZ, T., MAYER, G., & MÜHLBERGER, A. (2011). Behaviour and Perception-based Pedestrian Evacuation Simulation. In R. D. Peacock, E. D. Kuligowski & J. D. Averill (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp. 827 – 832). Göttingen: Hogrefe.
- KULIGOWSKI, E. (2009). The process of human behavior in fires: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology
- LAUX, L. (1981). *Das State-Trait-Angstinventar: STAI; theoretische Grundlagen und Handanweisung: Beltz Test.*
- LINDENBERGER, U., GILBERG, R., PÖTTER, U., LITTLE, T. D., & BALTES, P. B. (2010). Stichprobenselektivität und Generalisierbarkeit der Ergebnisse in der Berliner Altersstudie (pp. 89 – 112). Berlin: Akademie Verlag.
- MAI, L. (2007). Radionutzung im Alltag. In *Praxiswissen Radio* (pp. 37 – 48). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- MAYER, G., PAULI, P., & MÜHLBERGER, A. (2014). Development of a microscopic pedestrian evacuation simulation taking into account behaviour and perception aspects. In K. Thoma, T. Leismann & I. Häring (Eds.), *Future Security 2014*. Berlin: Fraunhofer Verlag.
- MÜHLBERGER, A., & PAULI, P. (2000). Tunnelangstfragebogen (TAF) [Tunnel Anxiety Questionnaire: short-description and questionnaire]. Leibniz-Institute for Psychology Information (Eds.), Leibniz-Zentrum für Psychologische Information und Dokumentation (ZPID). Electronic test-archive.
- MÜHLBERGER, A., GAST, P., & PAULI, P. (2014). Probandenuntersuchung in Virtueller Realität im Rahmen des Projekts: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln, Teil 1 (FE 15.0563/2012/ERB). Unveröffentlichter Teilprojektbericht der Universität Regensburg im Auftrag der Bundesanstalt für Strassenwesen, Deutschland.
- MÜHLBERGER, A., GAST, P. & PROBST, T. (2015). Einfluss einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage (DLS) auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer (FE 89.0299/2014). Unveröffentlichter Projektbericht der Universität Regensburg im Auftrag der Bundesanstalt für Strassenwesen, Deutschland.
- MÜHLBERGER, A., PLAB, A. & PROBST, T. (2016). Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens von Tunnelnutzern bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage anhand von Realversuchen (FE 15.0607/2014/ERB). Unveröffentlichter Projektbericht der Universität Regensburg im Auftrag der Bundesanstalt für Strassenwesen, Deutschland.
- PERRY, R. J. & HODGES, J. R. (1999): Attention and executive deficits in Alzheimer's disease. A critical review. *Brain*, 122, 383 – 404
- PIARC (1999), Technical Committee on Road Tunnel, *Fire and smoke control in road tunnels* (05.05 B). 04.10.1999.

- SALTHOUSE, T. A. (1996): The progressing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103, 403 – 428
- SOLIT (2008), Safety of Life in Tunnels, Forschungsbericht SOLIT – Wassernebelanlagen in Strassentunneln. 2008.
- SOLIT² Forschungskonsortium (2012), SOLIT² Safety of Life in Tunnels. Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung am Beispiel von wasserbasierten Brandbekämpfungsanlagen. Eigenverlag: Köln.
- SPIELBERGER, C. D., GORSUCH, R. L., LUSHENE, R. E., VAGG, P. R., & JACOBS, G. A. (1970). STAI manual for the state-trait anxiety inventory. Palo Alto.
- STUMPF, H., ANGLEITNER, A., WIECK, T., JACKSON, D.N. & BELOCH-TILL, H. (1985). Deutsche Personality Research Form (PRF). Göttingen: Hogrefe.
- SUGIMAN, T., & MISUMI, J. (1988). Development of a new evacuation method for emergencies: Control of collective behavior by emergent small groups. *Journal of Applied Psychology*, 73, 3 – 10.
- Synlab (2014). Prüfbericht H1308-1893/002 D: Abwassertechnische, brandhygienische, biochemische, chemische und toxikologische Prüfung des Schaumlöschmittels ONE SEVEN KLASSE B (FF) 1.0% – 1 %-Lösung. Stollberg: Synlab Umweltinstitut GmbH.
- UPTUN (2007). Cost effective sustainable and innovative Upgrading Methods for Fire Safety in existing Tunnels (UPTUNE), R251 Engineering Guidance for Water Based Fire Fighting Systems for the Protection of Tunnels and Subsurface Facilities. 2007. Downloaded at fogtec-international.com/files/uptun-guideline-08_30.08.07.pdf, 15.8.2016.
- LEE, J.H. (2013). Age-Related Deficits in the Processing of Fundamental Frequency Differences for the Intelligibility of Competing Voices. *Journal of Audiology & Otology*, 17, 1 – 8.

Bilder

- Bild 1: Cave mit Proband bei geöffneter CAVE-Tür
- Bild 2: Bedienelemente der Fahrsimulation; Lenkrad und Gas- sowie Bremspedal in der CAVE
- Bild 3: Sicht des Probanden direkt nach Ende der Durchsage in der Bedingung „mit BBA“ (links) und „ohne BBA“ (rechts)
- Bild 4: Fluchtziele der Probanden in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung
- Bild 5: Häufigkeit, mit der Probanden bestimmte Tunnelabschnitte betraten. („Differenz“ zeigt die relative Häufigkeit, mit der Probanden einen Tunnelabschnitt betraten, in Abhängigkeit der Versuchsgruppe. Je roter der Bereich, umso häufiger waren Probanden aus der Versuchsgruppe „mit BBA“ in diesem Bereich.
- Bild 6: Proband in wasserabweisender Kleidung mit Schutzbrille und Kopfkamera
- Bild 7: Unfallszenario bei Auslösung der BBA
- Bild 8: Prozentualer Anteil der Probanden der beiden Versuchsgruppen, die bestimmte Sicherheitseinrichtungen aufgesucht hatten.
- Bild 9: Durchschnittliche Zeit, die Probanden benötigten, um ihr Fahrzeug nach Beginn der Durchsage zu verlassen, aufgeteilt nach Versuchsgruppe.
- Bild 10: Situation im Tunnel, in dem Moment, in dem die BBA eingeschaltet wird. Das schwarze Fahrzeug ist das angekommene Probandenfahrzeug.
- Bild 11: Tunnel-Längsschnitt.
- Bild 12: Häufigkeiten der verschiedenen Verhaltensweisen; Testfahrt wurde abgebrochen bzw. beendet, falls eine davon eintrat. Angabe der absoluten Anzahl n über den Balken. BBA: n = 27; keine BBA: n = 25.
- Bild 13: Mittlere Ausstiegszeiten der Gruppen in Sekunden mit Standardfehlern; BBA: n = 13, keine BBA: n = 22.

- Bild 14: Mittlere Zeit zwischen Türöffnen und Aussteigen in Sekunden mit Standardfehlern; BBA: n = 13, keine BBA: n = 22.
- Bild 15: Evakuierungsziele der Probanden in der Paarsituation (n = 12).
- Bild 16: Durchschnittliche Ausstiegszeit der Probanden in der Paarsituation (n = 12).
- Bild 17: Evakuierungsziele in den verschiedenen Bedingungen bei Wasserdampf (Bregenz) oder Druckluftschaum (Tunnel Jagdberg). Relative Häufigkeiten [%] der jeweiligen Stichproben mit absoluten Werten (n) über den Balken; WN: BBA: n = 27, keine BBA: n = 25; DLS: BBA: n = 16, keine BBA: n = 14.
- Bild 18: Mittlere Ausstiegszeiten der Gruppen (WN: links, DLS: rechts) in Sekunden mit Standardfehlern. Mit frühausestiegender, ohne sitzenbleibende Probanden; WN: BBA: n = 13, keine BBA: n = 22; DLS: BBA: n = 14, keine BBA: n = 14.
- Bild 19: Gehgeschwindigkeiten der Gruppen (WN: links, DLS: rechts) in km/h mit Standardfehlern; WN: BBA: n = 7, keine BBA: n = 16; DLS: BBA: n = 12, keine BBA: n = 11, nur Probanden, die zu Notausgang/Notrufsäule evakuierten.
- Bild 20: Fluchtziele der Probanden in den verschiedenen Bedingungen Real/VR. Relative Häufigkeiten [%] der jeweiligen Stichproben mit absoluten Werten als Beschriftung; Real: BBA: n = 27; keine BBA: n = 25; VR: BBA: n = 25; keine BBA: n = 25. Die sitzen gebliebenen Probanden wurden zu Sonstige gezählt.

Tabellen

- Tabelle 1: Emotionales Befinden der Probanden
- Tabelle 2: Angaben zur Verhaltensbeeinflussung und Durchsagenverständlichkeit
- Tabelle 3: Wiedererkennen von Ausstattungselementen und Einschätzung als grundsätzliche Ausstattung.
- Tabelle 4: Angaben zur Wirkung der Brandbekämpfungsanlage auf die Probanden
- Tabelle 5: Emotionales Befinden der Probanden
- Tabelle 6: Angaben zur Verhaltensbeeinflussung und Durchsagenverständlichkeit.
- Tabelle 7: Wiedererkennen von Ausstattungselementen und Einschätzung als grundsätzliche Ausstattung.
- Tabelle 8: Angaben zur Wirkung der Brandbekämpfungsanlage auf die Probanden
- Tabelle 9: Stichprobenvergleich: Probanden im Citytunnel (BBA-Typ: WN) und Probanden im Tunnel Jagdberg (BBA-Typ: DLS)
- Tabelle 10: Nachbefragungssitems mit Unterschieden zwischen den Untersuchungen

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2013

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis

Peter, Knief, Schreyer, Piazzola

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen

Friedrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

Borrmann, Fischer, Dori, Wild

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel

Robertson, Bronstein, Brummermann

€ 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken

Neumann, Rauert

€ 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

Hegger, Herbrand

€ 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken

Müller

€ 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke,

Fischer, Schneider

€ 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen

Placzek, Pohl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brennerberger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brennerberger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln

Schmidt, Simon, Guder, Juknat,

Hegemann, Dehn

€ 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**2016****B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**

Geißler, Krohn

€ 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**

Kuhlmann, Hubmann

€ 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden

Ungermann, Brune, Giese

€ 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen

Schmellekamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**2017****B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann

€ 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden,

Köhler, Kremkau

€ 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**

Moormann, Buhmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer,

Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**2018****B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst

€ 15,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de