



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Akustische Führung im Strassentunnel

Acoustical guidance in road tunnels

Guidage acoustique dans les tunnels routiers

Amstein + Walthert Progress AG

Lars Derek Mellert, MSc. Geographie Universität Zürich

Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Universität Bern, Institut für Psychologie

Marina Groner, Dr. phil.

Daniel Stricker, Dr. phil.

**Forschungsauftrag VSS 2010/203 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Akustische Führung im Strassentunnel

Acoustical guidance in road tunnels

Guidage acoustique dans les tunnels routiers

Amstein + Walthert Progress AG

Lars Derek Mellert, MSc. Geographie Universität Zürich

Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Universität Bern, Institut für Psychologie

Marina Groner, Dr. phil.

Daniel Stricker, Dr. phil.

**Forschungsauftrag VSS 2010/203 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

März 2012

1360

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Urs Welte, Amstein + Walthert Progress AG

Mitglieder

Lars Derek Mellert, Amstein + Walthert Progress AG
Marina Groner, Universität Bern, Institut für Psychologie
Daniel Stricker, Universität Bern, Institut für Psychologie
Hans Meier, Baudirektion Kanton Zürich

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident

Christian Scholer

Mitglieder

Heinz Dudli
Christian Gammeter
Peter Köhli
Christoph Lehmann
Arnd Rogner
Walter Steiner
Benoît Stempfeli

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Einleitung	13
1.1	Hypothese.....	14
1.2	Aufbau der Arbeit	16
2	Grundlagen	19
2.1	Verhalten und Wahrnehmung in komplexen Situationen	19
2.2	Akustische Führung	21
2.3	Akustik im Tunnel.....	23
2.4	Anforderungen der Richtlinien	24
3	Methodik	27
3.1	Versuchsaufbau	27
3.1.1	Installationen.....	27
3.1.2	Versuchsanordnung	31
3.1.3	Teilnehmer.....	34
3.2	Versuchsablauf	37
3.2.1	Gruppe A: Ohne akustische Führung.....	39
3.2.2	Gruppe B: Mit Signalton, Mit Durchsagentext	39
3.2.3	Gruppe C: Ohne akustische Führung	39
4	Resultate und Analyse	41
4.1	Fluchtverhalten	41
4.2	Weitere Erkenntnisse	44
4.3	Erkenntnisse aus dem Fragebogen	48
5	Schlussfolgerung	55
5.1	Diskussion	55
5.2	Ausblick	59
	Anhänge	63
	Abkürzungen	75
	Literatur	77
	Projektabschluss	80
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	83

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie bestätigt, dass akustische Führung in Strassentunneln die Selbstrettung während Ereignisfällen unterstützt. Eine Analyse des Fluchtverhaltens von Personen in einem verrauchten Tunnel hat ergeben, dass sich über 91% der Flüchtenden zum optimalen Notausgang führen lassen, wenn akustische Signale den Weg weisen. Ohne akustische Führung flüchten lediglich 59% der Personen in die Richtung des nächst gelegenen Notausgangs.

Die hochsignifikante Beziehung konnte durch ein Experiment mit 80 Versuchspersonen nachgewiesen werden. Dieses wurde im Uetlibergtunnel, einem der neusten Tunnel auf den Schweizer Nationalstrassen, durchgeführt. Nach dem Transport in den mit harmlosem Rauch gefüllten Tunnel wurden die Versuchspersonen einzeln losgeschickt mit der Aufforderung, die Tunnelröhre schnellstmöglich über den nächsten Notausgang zu verlassen. Sie wurden dabei weder über das genaue Verhalten instruiert, noch wurden sie über die zur Verfügung stehende Sicherheitsausrüstung aufgeklärt. Die akustische Führung setzte sich zusammen aus einer Sequenz von zwei Signaltönen, welche die Aufmerksamkeit auf sich ziehen, gefolgt von der Sprechdurchsage "Ausgang hier".

Die Studie kommt zum Schluss, dass eine effizientere Selbstevakuierung erreicht werden kann, wenn die herkömmlichen Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln durch Lautsprecher über den Notausgängen ergänzt werden. Die menschliche Tendenz zur Flucht hin zu bekannten Orten kann damit gezielt beeinflusst werden. Evakuierende sind fähig ihre Abneigung gegenüber einer Flucht nach Vorn in das Unbekannte zu überwinden, wenn ihnen klare Informationen über den Ort des nächsten Notausgangs zugestellt werden. Die Wirksamkeit der üblichen optischen Signalisationen der Sicherheitseinrichtung (Bsp. Blitzlichter, Informationstafeln an den Tunnelwänden) beschränkte sich aufgrund des Rauches auf wenige Meter.

Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass Personen, die irrtümlicherweise entlang der falschen Tunnelwand flüchten, ermutigt werden können, die verrauchte Fahrbahn zu überqueren, wenn akustische Signale auf die Notausgangstüren hinweisen. Akustische Führung ist daher geeignet, das menschliche Verhalten in komplexen Situationen zu beeinflussen.

Im Weiteren wurden Schwächen in der Ausgestaltung der Notausgangstüren entdeckt. Bei der Mehrheit der Personen, die an den Abschränkungen des Versuchsraumes aufgegriffen wurden, misslang die Selbstrettung nicht weil sie an den Notausgängen vorbeigelaufen wären, sondern weil sie diese nicht öffnen konnten. Ein aus Sicherheitsgründen künstlich erzeugter Überdruck in den Querschlägen verhinderte eine leichte Öffnung der Flügeltüren. Diese Schwierigkeit limitiert die Effektivität der meisten Selbstrettungsmassnahmen und führt unweigerlich zu gefährlichen Verzögerungen in Situationen, in denen Zeit der kritische Faktor ist.

Résumé

Cette étude montre qu'en cas d'urgence, l'auto-évacuation dans un tunnel routier est améliorée grâce à un guidage acoustique. Une analyse des comportements de fuite de personnes dans un tunnel rempli de fumée a montré que 91% des personnes sont guidées vers la sortie de secours la plus proche à l'aide de signaux acoustiques, alors que sans cette aide, seulement 59% des personnes trouvent la sortie optimale.

Cette relation très significative a été établie lors d'une expérimentation menée avec 80 personnes dans le tunnel du Uetliberg, un des tunnels routiers les plus récents des routes nationales Suisses. Après avoir été transportées au sein d'une section de tunnel enfumée, les personnes testées ont été envoyées dans le tunnel une par une, avec pour mission de rejoindre la sortie de secours la plus proche. Les sujets testés n'ont préalablement ni été instruits quant au comportement optimal, ni été informées quant aux équipements de sécurité présents. Le guidage acoustique était composé de d'une séquence de deux signaux sonores attrayants, suivis de l'annonce "Sortie ici".

L'étude vient à la conclusion que l'auto-évacuation est plus efficace lorsque les installations classiques de sécurité sont complétées par des haut-parleurs placés au dessus des portes de sortie de secours. La tendance naturelle de fuite vers un point connu peut ainsi être positivement influencée : les évacuants ont plus de facilité à surmonter leur aversion à fuir dans une direction inconnue lorsqu'une information claire sur l'emplacement de la prochaine sortie de secours leur est mise à disposition. Ceci est particulièrement le cas lorsque l'efficacité des équipements habituels de sécurité (par exemple des flashes lumineux ou des panneaux d'information fixés au mur du tunnel) est limitée, du fait de l'intense fumée, à quelques mètres.

De plus, il a pu être observé, que des personnes qui se déplaçaient le long du mauvais mur, étaient encouragées à traverser la voie de circulation lorsque les signaux acoustiques étaient activés. Le guidage acoustique est de ce fait adapté pour influencer le comportement humain dans des situations complexes.

Il a été constaté en outre, des faiblesses dans la conception des portes de sortie de secours. Des personnes ont été récupérées en dehors de la zone de test, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas trouvé de sortie de secours. Dans la plupart des cas, ceci n'est pas du au fait qu'elles n'ont pas trouvé la porte, mais au fait qu'elles n'ont pas pu ouvrir la porte. En effet, les galeries latérales de secours sont placées en surpression et empêchent une ouverture facile des portes. Cette difficulté limite l'efficacité des mesures d'auto-évacuation et conduit inévitablement à des retards, dans des situations où le temps est le facteur critique.

Summary

This study supports, that acoustical guidance in road tunnels improves self evacuation in emergencies. An analysis of flight behaviours of people enclosed in a smoke-filled tunnel shows, that over 91% of the people can be guided to the nearest emergency exit with the help of acoustic signals. Without acoustical guidance, only 59% of the people evacuate towards the optimal emergency exit.

This highly significant relation was revealed by an experiment with 80 probands conducted in the Uetlibergtunnel, one of the latest road tunnels in Switzerland. After being driven into the smoke-filled tunnel, the participants were released separately and told to evacuate through the next possible emergency exit. They were neither instructed on how to behave nor were they informed about the available safety equipment. The actual acoustical guidance consisted of a succession of two attracting signal tones followed by the speech announcement "exit here".

This study concludes that a more efficient self evacuation can be achieved by combining the conventional safety equipment installed in road tunnels with sound beacons above the emergency exit doors. They are suited to deal with people's tendency to evacuate towards familiar places. Evacuees are willing to overcome their reluctance to escape forward into the unknown, if clear information about the location of the nearest emergency exit can be provided. The usual guidance methods such as light beacons and information plaques at the walls, aiming solely at the visual senses, proved to be effective only within a certain, often severely limited visibility range.

Additionally it was made clear, that people evacuating unknowingly along the wrong side wall of the tunnel, can be encouraged to cross the smoke filled tunnel if sound beacons mark the means of escape. Acoustical guidance renders security, and is therefore capable of influencing human response in complex situations.

Furthermore, weaknesses in the design of the emergency exit doors were detected. It was ascertained, that the majority of the people gathered at the barrier of the experiment space, failed to use the emergency exits not because they could not find them, but because they could not open the push mechanism of the doors. Hyperbaric pressure in the safety rooms prevented an easy opening. These circumstances tend to limit the effectiveness of most guidance methods, resulting in dangerous delays when time is the critical factor.

1 Einleitung

Unfallereignisse in Tunneln mit grossem Schadensausmass haben gezeigt, wie wichtig eine effiziente Selbstrettung ist. Sie haben aber auch verdeutlicht, dass es eine absolute Sicherheit in Strassentunneln nicht gibt. Die erforderlichen baulichen, technischen und organisatorischen Sicherheitsmassnahmen müssen unter anderem mittels Modellen (vgl. Kumar, 2004) laufend überprüft und den sich verändernden Umständen angepasst werden.

Die EU-Richtlinie 2004/45/EG (Europäische Union, 2004) sieht deshalb vor, dass in den europäischen Strassentunneln ein Mindestmass an Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer garantiert werden muss. Einerseits soll dies durch die Verhinderung von Schadenereignissen mit einer potentiellen Gefährdung für Menschenleben erreicht werden. Andererseits sollen die möglichen Konsequenzen von kritischen Ereignissen so reduziert werden, dass nicht nur grosse Materialschäden verhindert werden, sondern auch den Verkehrsteilnehmern die Evakuation und den Rettungskräften ein effizienter Einsatz ermöglicht wird. Da sich das Risiko aus dem Produkt dieser beiden Grössen - Schadenswahrscheinlichkeit und Schadensausmass – ergibt, wird der Schadensprävention sowie der Schadensminderung eine gleich hohe Bedeutung beigemessen.

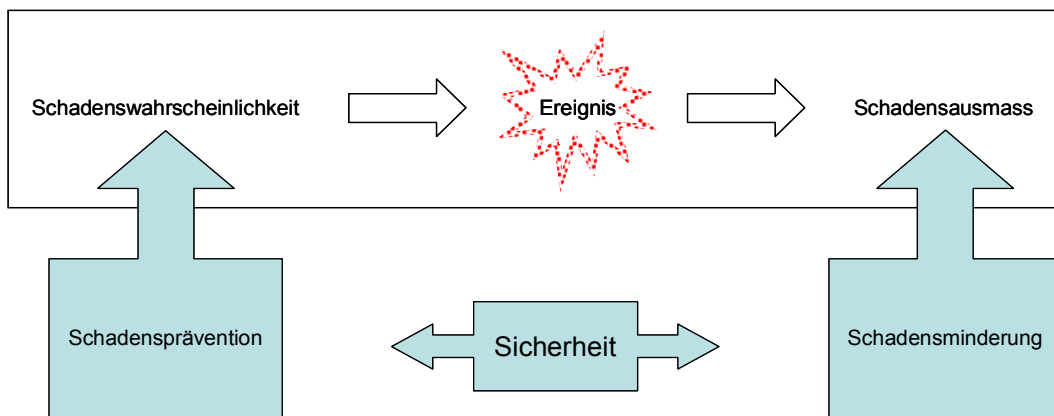


Abbildung 1 Möglichkeiten der Risikoreduktion

Die Einflussfaktoren, welche die Sicherheit in Strassentunneln wesentlich beeinflussen, können in vier Gruppen zusammengefasst werden (ASTRA, 2000). Abbildung 2 zeigt exemplarisch wie unterschiedlich stark sich das Verhalten der Verkehrsteilnehmer, der operative Betrieb des Tunnels, die Auslegung der Infrastruktur sowie der Zustand der Fahrzeuge auf die Tunnelsicherheit einwirken.

Obschon Analysen belegen, dass Unfallereignisse meistens eine Verkettung mehrerer unsicherer Umstände sind und selten auf einen einzigen Fehler zurückzuführen sind, kann bei einem Grossteil menschliches Fehlverhalten entdeckt werden (Hofinger, 2008; PIARC, 2008; Wehner *et al.*, 2006; Reason, 1990). Der Schlussbericht des ASTRA (Bundesamt für Strassen) (2000) kommt zu ebendiesem Schluss, dass das menschliche Verhalten als der zentrale Faktor bei Schadensereignissen im Tunnel anzusehen ist und deshalb so gut als möglich positiv zu beeinflussen ist. Ein gezielter Ausbau der technischen Infrastruktur ist eine der Möglichkeiten, Einfluss auf das Verhalten der Menschen zu nehmen (Lellig *et al.*, 2010; Badke-Schaub *et al.*, 2008; Fahlbruch *et al.*, 2008).

Dabei wird der Fokus nicht nur auf die Schadensprävention sondern ebenfalls auf die Schadensminderung gerichtet. Das menschliche Verhalten spielt auch während der Ereignisbewältigung, also nach dem eigentlichen Schadenereignis, eine zentrale Rolle (vgl. Martens, 2008).

Ist ein Ereignis einmal eingetreten, dann ist für die Verkehrsteilnehmer von entscheidenden

der Bedeutung, dass die zur Verfügung stehenden Hilfsmittel zur Selbstrettung schnellstmöglich genutzt werden können. Dazu müssen Löscheinrichtungen und Notrufsäulen, vor allem aber Fluchtwege unmissverständlich signalisiert sein. Notausgänge müssen im Ereignisfall unbedingt sichtbar bleiben oder speziell lokalisierbar gemacht werden, da menschliches Fehlverhalten aufgrund verwirrender oder nicht mehr sichtbarer Signalisation verheerende Folgen haben kann. Die sicherheitsrelevanten Elemente der Infrastruktur, die sogenannte BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstung), muss dementsprechend sinnvoll dem menschlichen Verhalten angepasst werden. Die vorliegende Studie zur Erhöhung der Tunnelsicherheit setzt im Rahmen der Schadensminderung im Schnittbereich "Mensch – Infrastruktur" an (vgl. Abbildung 2).

Schadensminderung

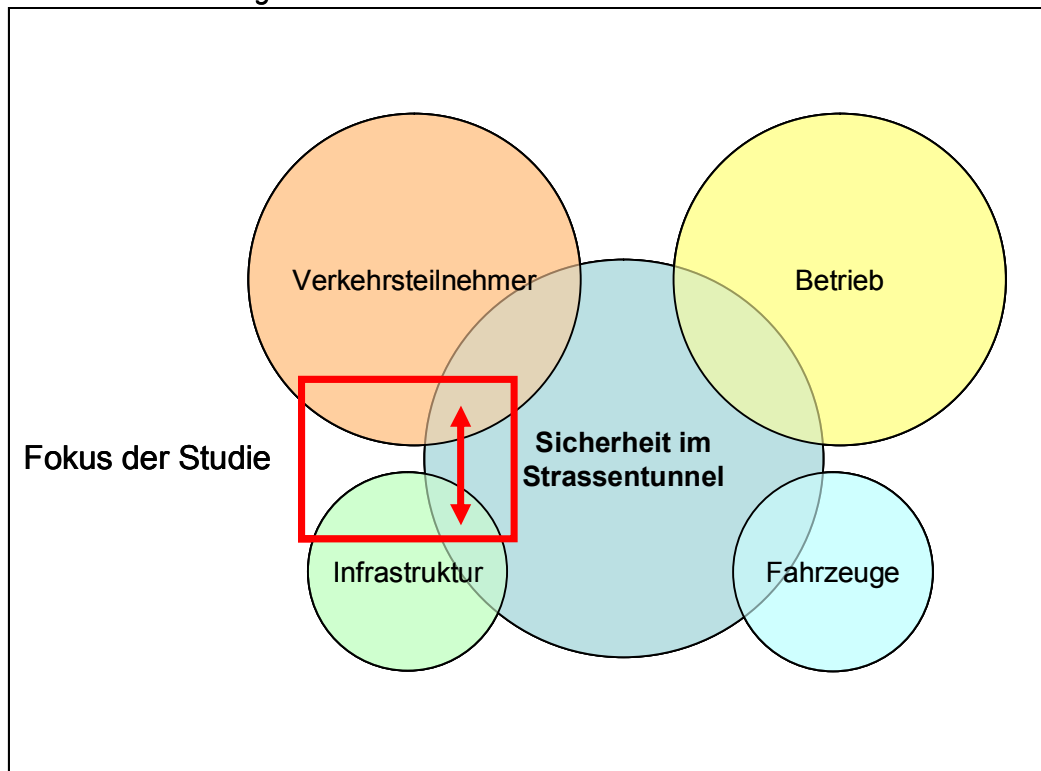


Abbildung 2 Einflussfaktoren für die Tunnelsicherheit (eigene Darstellung nach ASTRA, 2000)

1.1 Hypothese

Aufgrund der beschränkten Flucht- und Rettungsmöglichkeiten für die Verkehrsteilnehmer ist es wichtig, dass die Selbstevakuierung in Strassentunneln so gut als möglich unterstützt wird. Dabei wird hauptsächlich auf optische (Bsp. Lichtsignalisation) sowie haptische (Bsp. Handläufe) Hilfsmittel zurückgegriffen. Die Schweizer Richtlinie für die Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln (ASTRA, 2011) beschreibt im Detail nur, dass optische Belange wie Notausgänge und Fluchtwege mit Lichtsignalen, Blitzlichtern und Beschriftungstafeln zu signalisieren sind.

Verschiedene Länder unterstützen jedoch die herkömmlichen Hilfsmittel indem sie zusätzlich zu den optischen Reizen auch akustische Reize bereitstellen. Hierfür werden Lautsprecheranlagen im Tunnel eingebaut, wobei unterschiedliche Zielsetzungen den Einbau initiieren. Einerseits können Lautsprecher für die Information der Verkehrsteilnehmer benutzt sowie dazu eingesetzt werden, die Fahrzeuginsassen im Ereignisfall zum Verlassen der Fahrzeuge aufzufordern. Andererseits dienen Lautsprecher der Signalisation der Fluchtwege mit dem Zweck, die effizientere Nutzung der Notausgänge und damit die Evakuierung des Tunnels zu beschleunigen. In der Schweiz wurden bisher nur vereinzelt Lautsprecheranlagen in Querschlägen, technischen Zentralen und Fluchtstollen ein-

gesetzt.

Versuche in den Niederlanden (Boer & van Wijngaarden, 2004), England (Withington, 2003; Withington, o. J.) und Deutschland (Färber & Färber, 2010) haben gezeigt, dass die Ortung von Notausgängen bei schlechten Sichtverhältnissen verbessert werden kann, wenn akustische Hinweise verwendet werden.

Wie bereits weiter oben erwähnt, sind die Notausgänge in Schweizer Tunneln gemäss neuster Anforderung lediglich mit lichttechnischen Hilfsmitteln speziell zu beleuchten und zu kennzeichnen. Durch den Vergleich dieser gültigen Richtlinie mit den Erkenntnissen aus der aktuellen Forschung, ergeben sich aus Schweizer Sicht eine Reihe neuer Fragestellungen:

- Eignen sich akustische Signale für die Führung der Verkehrsteilnehmer während eines Ereignisses im Tunnel?
- Lassen sich die Flüchtenden einfacher zum optimalen Notausgang leiten?
- Kann die Selbstrettung der Verkehrsteilnehmer dadurch beschleunigt werden?
- Wie wirksam ist das Gesamtsystem aus visueller und akustischer Führung?
- Welche Signale eignen sich für die akustische Führung?
- Sind die akustischen Verhältnisse im Tunnel geeignet für eine wirksame akustische Führung?
- Ist die Ergänzung der bestehenden BSA durch akustische Führungsanlagen sinnvoll und effizient umsetzbar?

Aufgrund dieser Fragestellungen wird folgende Hypothese aufgestellt, die mit der vorliegenden Studie untersucht werden soll:

***Akustische Führung unterstützt die Selbstrettung
während eines Ereignisses im Strassentunnel***

Bei den obigen Fragestellungen sowie der Hypothese richtet sich das Augenmerk bewusst auf die Führung der Verkehrsteilnehmer und nicht auf deren Warnung. Es soll nicht überprüft werden, wie die Fahrzeuginsassen möglichst schnell über die Gefahr informiert und aus den Fahrzeugen gelockt werden können. Vielmehr baut die Hypothese auf der Annahme, dass sich die Fahrzeuginsassen bereits aus dem Fahrzeug auf die Flucht zum Notausgang begeben haben und sich im Tunnelraum befinden. Möglichkeiten für die Verkürzung der Zeit vor der tatsächlichen Selbstrettung, die sogenannte "Pre-Evacuation Activity Time" (PEAT) (vgl. Shields, 2005), werden somit mit der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

Um eine klare Aussage machen zu können, wurde die Hypothese mit einem Experiment mit Versuchspersonen unter möglichst realen Bedingungen getestet. Der Feldversuch wurde im Frühling 2011 im Uetlibergtunnel im Kanton Zürich durchgeführt. Nach dem Transport in den rauchgefüllten Tunnel wurden die Versuchspersonen einzeln losgeschickt und aufgefordert, den nächsten Notausgang so schnell wie möglich zu finden und sich in Sicherheit zu bringen. Dabei wurden die Versuchspersonen weder über das korrekte Verhalten noch über die zur Verfügung stehenden Hilfsmittel informiert.

Um den genauen Effekt der akustischen Führung diskutieren zu können, wurden drei verschiedene Szenarien getestet, die sich in den Sichtverhältnissen sowie durch die Fluchtwegsignalisation unterschieden. Das eingesetzte akustische Signal bestand aus zwei aufeinanderfolgenden attraktiven Signaltönen und der anschliessenden, leicht verständlichen Durchsage "Ausgang hier". Der Durchsagetext wurde in Deutsch, Englisch und Französisch abgespielt.

Tabelle 1 Drei Szenarien

Szenario A	Szenario B	Szenario C
Ohne akustische Führung	Mit akustischer Führung	Ohne akustische Führung
Schwache Verrauchung	Starke Verrauchung	Starke Verrauchung

Damit das Gesamtsystem aus visueller und akustischer Führung untersucht werden konnte, wurden die bereits bestehenden optischen Fluchtwegsignalisationen (Brandnotbeleuchtung, Blitzlichter etc.) im Tunnel, wie für einen Ereignisfall vorgesehen, aktiviert.

Neben allgemeinen Erkenntnissen bezüglich des Fluchtverhaltens von Personen sowie der akustischen Schwierigkeiten in Tunneln, können die Resultate für spezifische Zwecke verwendet werden. Insbesondere bietet die vorliegende Studie eine fundierte Grundlage für die Diskussion der momentan vorgeschriebenen Sicherheitsausrüstung in Schweizer Strassentunneln. Das zusätzliche Wissen über das Zusammenspiel von optischen und akustischen Signalisationen sowie deren Auswirkungen auf eine effiziente Selbstrettung lässt sich bei der Planung und Realisierung der BSA in Strassentunneln direkt umsetzen. In diesem Sinne leistet die hier vorliegende Studie einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit in Strassentunneln.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit lässt sich in drei grössere, aufeinander aufbauende Teile gliedern. Als erstes werden theoretische Überlegungen vermittelt (Kapitel 2), damit eine verständliche Grundlage für die anschliessenden Kapitel geschaffen werden kann. Nach einem methodischen Teil (Kapitel 3) in welchem der Aufbau des Feldversuches erläutert wird, folgt ein Abschnitt der sich der vertieften Analyse der Resultate widmet (Kapitel 4). Die wesentlichen Erkenntnisse werden dabei mithilfe von Grafiken visualisiert. Dadurch soll das Verständnis der teilweise komplexen Zusammenhänge erleichtert werden.

Kapitel 2 diskutiert generelle theoretische Grundlagen und liefert wesentliche Definitionen, wobei Kapitel 2.1 genau erklärt was unter den Begriffen "menschliches Verhalten", "kritische Situation" und "Wahrnehmung" zu verstehen ist. Kapitel 2.2 leitet eine mögliche Definition für die akustische Führung her und beschreibt allgemeine Kriterien für die Beurteilung von akustischen Evakuationssignalen. Die aktuelle Forschung und einige prominente, vergleichbare Studien dienen dabei als Diskussionsgrundlage. Die akustischen Schwierigkeiten im Tunnel werden in Kapitel 2.3 erläutert, bevor in Kapitel 2.4 die spezifischen Anforderungen der Richtlinien aus Nachbarländern hinterfragt werden, die eine Form von akustischer Führung im Tunnel vorsehen.

Kapitel 3 beschreibt detailliert die Untersuchungsmethodik damit die Reproduzierbarkeit des Feldversuches gewährleistet ist. Der Aufbau des Experimentes mit seinen Installationen, Einrichtungen und Anordnungen wird zuerst in Kapitel 3.1 thematisiert; Kapitel 3.2 gibt dann die genaue Abfolge der unterschiedlichen Szenarien wieder. Die verschiedenen Analysen des Feldversuches sind jeweils vor dem Hintergrund dieser Beschreibungen zu verstehen.

Kapitel 4 widmet sich detailliert den einzelnen Erkenntnissen und wertet ihre Aussagekraft statistisch aus bevor sie in Verbindung zueinander gebracht werden. Dabei dienen drei verschiedene Quellen als Grundlage: Während Kapitel 4.1 Erkenntnisse direkt aus den Messungen analysiert, wird Kapitel 4.2 Raum für die Erwähnung weiterer, während des Experimentes gemachter Beobachtungen geboten. Die ausgewerteten Fragebogen die im Anschluss an den Feldversuch von den Versuchspersonen ausgefüllt wurden, werden schliesslich in Kapitel 4.3 analysiert.

In Kapitel 5 werden die wichtigsten Schlussfolgerungen noch einmal zusammengefasst,

in einen grösseren Zusammenhang gebracht und zu Empfehlungen formuliert. Zum Schluss werden in einem Ausblick weitere, direkt aus der vorliegenden Studie erwachsende Forschungsfragen aufgeworfen.

2 Grundlagen

Die zu überprüfende Hypothese befindet sich im komplexen Schnittbereich Mensch-Infrastruktur (vgl. Abbildung 2). Aufgrund dieser Voraussetzung sind klare Begrifflichkeiten und Definitionen zu schaffen und in Bezug zu einander zu stellen. Die folgenden Unterkapitel widmen sich daher dem Aufbau eines möglichst verständlichen theoretischen Grundgerüsts und definieren einerseits die wesentlichen Begriffe. Andererseits geben sie einen Überblick der aktuellen Forschung sowie der bisher getätigten Bestrebungen und Anforderungen der Richtlinien. Die Analysen der späteren Kapitel sind jeweils vor dem Hintergrund dieser theoretischen Grundlagen zu verstehen.

2.1 Verhalten und Wahrnehmung in komplexen Situationen

Fahrzeuglenker fahren im Vergleich zur offenen Strecke sehr viel weniger durch Tunnel. Es muss also davon ausgegangen werden, dass Fahrzeuglenker über wenig Erfahrung mit kritischen Situationen und Evakuationen in Tunneln verfügen. Untersuchungen von Tunnelbränden haben gezeigt, dass das Verhalten der Tunnelnutzer in komplexen Situationen sehr stark variiert (Färber & Färber, 2010). Die tatsächliche Situation während eines Ereignisfalles in einem Tunnel entspricht selten der idealtypischen Annahme, dass der Verkehr sofort stoppt und sich alle betroffenen Verkehrsteilnehmer unmittelbar zum nächsten Notausgang begeben (vgl. Lellig *et al.*, 2010; Gandit *et al.*, 2009). So wird von Personen berichtet, die inaktiv in den Fahrzeugen sitzen bleiben, weil sie ihren Besitz nicht leichtfertig aufgeben wollen (Boer, 2002), oder aussteigen und sich als Zuschauer in die Gefahrenzone begeben, weil sie die Situation falsch einschätzen. Es gibt aber auch Fälle, in denen Personen versuchen mit ihrem Fahrzeug im Tunnel zu wenden und dadurch den Einsatz von Rettungsfahrzeugen erschweren. Die entscheidende Beobachtung ist, dass sich Personen nicht sofort in Sicherheit bringen, da sie die unmittelbare Gefahr des Ereignisfalles nicht wahrnehmen (CETU, 2010; Shields & Boyce, 2004), oder weil sie die bekannten Sicherheitseinrichtungen nicht automatisch zu benutzen wissen (Gandit *et al.*, 2009) oder deren Signalisation nicht verstehen (Benthorn & Frantzich, 1999). Studien der niederländischen Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Forschung TNO (vgl. Boer, 2002), sowie Erkenntnisse aus dem französischen AC-TEURS-Projekt aus den Jahren 2003-2006 (vgl. Noizet *et al.*, 2003) belegen eindrücklich, wie die Entscheidungsfindung von Personen während eines Tunnelereignisses beeinträchtigt wird.

Erfolgreiche Evakuationen aus kritischen Situationen werden daher wesentlich durch das menschliche Verhalten beeinflusst. Letzteres wird nach Kobes *et al.* (2010) definiert. Menschliches Verhalten bedeutet:

Handlungen, die Menschen aufgrund ihrer Situationswahrnehmung, ihrer Handlungsabsicht sowie ihrer vorgängigen Überlegungen ausführen (Kobes *et al.*, 2010, S. 2).

Diese Definition verdeutlicht, dass sämtliche Situationen die massgeblich vom menschlichen Verhalten beeinflusst werden, unterschiedliche Folgen haben können. Nicht nur die Wahrnehmung einer Situation sondern auch die Handlungsabsicht und die Überlegungen von Personen sind subjektiv geprägt und daher schwer fassbar. Evakuationen aus kritischen Situationen sind daher durch Sicherheitseinrichtung so intuitiv wie möglich zu gestalten.

In der vorliegenden Arbeit wird unter einer "kritischen Situation" sowie einem "Ereignisfall" eine komplexe Situation verstanden, die sich nach Hacker & von der Weth (2008, S. 83) wie folgt definieren lässt:

Komplexe Situationen sind:

- umfangreich, weil sie aus verschiedenen Variablen bestehen.
- vernetzt, da sich die Variablen gegenseitig und in unterschiedlichen Richtungen beeinflussen.
- intransparent, da der Problemlöser unter den Zeitrestriktionen nicht alle notwendigen Informationen kennt und unsicher handeln muss.
- dynamisch, da sie sich ohne Zutun des Problemlösers verändern.

Befinden sich Tunnelnutzer in einer solchen komplexen Situation, ist es deshalb ausserordentlich wichtig, dass sie möglichst schnell zum richtigen Verhalten bewegt werden können. Zentral dabei ist die klare und eindeutige Signalisation der Sicherheitseinrichtungen. Dies wird umso wichtiger, weil sich Menschen während Evakuationen in ihrer Wahl des Fluchtweges oftmals nicht rational verhalten (Martens, 2008). Während sich Tunnelnutzer unter normalen Umständen vor allem auf ihr bestehendes Wissen über Tunnel aber auch auf ihre momentane Wahrnehmung der Umwelt verlassen, stört eine plötzlich eintretende Krisensituation diese mentalen Prozesse. Zeitdruck, Stress und ein beschränktes Wissen über Tunnelrisiken führen dann zu unangemessenen Verhaltensweisen und erschweren eine sofortige, reibungslose Evakuation. Die Verkehrsteilnehmer handeln in solchen Situationen nicht reflexartig, sondern sehen sich ungewohnten und komplexen Entscheidungen gegenübergestellt (Noizet & Mourey, 2005; Noizet *et al.*, 2003). Tatsache ist, dass viele Schadensereignisse mit menschlichem Fehlverhalten während einer kritischen Situation, auf mangelndes Situationsbewusstsein zurückgeführt werden können (Schaub, 2008). Diese Momente der Ungewissheit sind zu vermeiden und rechtfertigen den Einbau von Signalisations- und Führungsanlagen, welche auf die menschliche Wahrnehmung abgestimmt sind. Wahrnehmung wird in der vorliegenden Studie nach Schaub (2008) definiert:

Wahrnehmung ist die Transformation physikalischer oder chemischer Reize (Daten) in psychisch verarbeitete Information, also der Übergang vom physikalischen über das physiologische zum psychologischen Medium, um die Information als Wissen für die Handlungssteuerung zu nutzen. (Schaub, 2008, S. 61)

Weil es sich dabei um eine Transformation von Reizen handelt, müssen die psychologischen und physiologischen Eigenschaften des Menschen bei der Planung von Signalisationsanlagen unbedingt berücksichtigt werden. Die bestehenden optischen Hilfsmittel wie zum Beispiel Piktogramme an den Tunnelwänden oder die grüne Leuchtmarkierung an den Notausgängen sind bereits so ausgelegt, dass sie farblich dem optimalen spektralen Wahrnehmungsbereich des Menschen entsprechen (Färber & Färber, 2010; PIARC, 2008). Diese Anpassungen an den Menschen erleichtern das Auffinden der Sicherheitseinrichtungen auch bei schlechter Sicht.

Wenn sich die Sicht im Tunnel aufgrund eines Brandereignis mit starker Rauchentwicklung aber auf wenige Meter reduziert, dann verlieren die optischen Signalisationen schnell ihre Wirkung. Die Fahrzeuginsassen wissen bei schlechter Sicht nicht in welcher Richtung der nächste Notausgang liegt und stehen damit vor einer ungewissen und ungewohnten Entscheidung. Boer & Withington (2004) beschreiben in ihrer Studie wie eine ungenügende Sicht im Tunnel ein Grund sein kann, dass Personen aufgrund ihrer Unsicherheit im Auto verbleiben und die Entwicklung der Situation abwarten¹. Weitere Untersuchungen mit Versuchspersonen haben gezeigt, dass beleuchtete Notausgangstafeln in verrauchter Umgebung lediglich bis auf 1.5 Meter gesehen und richtig interpretiert werden können (Martens, 2008). Es darf nicht vergessen werden, dass bei diesen Versuchen der reizende und toxische Effekt von realistischem Rauch vernachlässigt wurde.

¹ Nach dem Brand im Gotthardstrassentunnel vom 24. Oktober 2001, wurden 4 der insgesamt 11 Todesopfer aus ihrem Fahrzeug geborgen, das sie nicht verlassen hatten.

Unter realistischen Bedingungen wird dadurch das menschliche Sehvermögen noch einmal reduziert.

2.2 Akustische Führung

Unter diesen Umständen liegt die Schlussfolgerung nahe, die visuellen Signalisationen der Sicherheitseinrichtungen durch akustische Hilfsmittel zu unterstützen. Wenn nämlich ein Brandereignis mit Rauchentwicklung die Sichtbarkeit beeinflusst und dadurch die Effektivität der optischen Führung reduziert, dann bleiben den Tunnelnutzern in diesem Falle immer noch die akustischen Signale, die ihnen die optimale Fluchtrichtung weisen.

Wie bereits weiter oben angedeutet, werden Brandereignisse von Menschen als sehr stressvoll wahrgenommen und beeinflussen deren Entscheidungsfindung wesentlich (Ozel, 2001). Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass Menschen in kritischen Situationen die Neigung haben, zu bekannten Personen und vertrauten Orten zu flüchten. Während eines Brandereignisses im Tunnel bedeutet dies, dass die Tunnelnutzer eher in die Richtung flüchten aus der sie hergekommen sind, als dass sie sich nach vorn begeben (Nilsson *et al.*, 2009). Diese Tendenz zur Flucht zurück bedeutet, dass Menschen unbewusst einen eventuell längeren Fluchtweg in Kauf nehmen, weil sie sich instinktiv aus der Gefahrenzone bringen wollen. Unter starker Rauchentwicklung mit toxischen Gasen kann dieses Verhalten drastische Konsequenzen haben. Die akustische Signalisation von Fluchtwegen soll deshalb die Flüchtenden sofort und eindringlich auf die nächste Fluchtmöglichkeit aufmerksam machen, auch wenn sich diese von der instinktiven Fluchtrichtung unterscheidet.

Die wesentlichen Gedanken und Absichten der Signalisation von Sicherheitseinrichtungen in Tunneln werden hier aufgenommen und zusammengeführt um eine Definition für akustische Führung herleiten zu können. In der vorliegenden Arbeit wird darunter Folgendes verstanden:

Akustische Führung bezeichnet die Kennzeichnung von Fluchtmöglichkeiten durch Geräusche, seien dies natürliche oder künstlich erzeugte Töne oder Sprechdurchsagen. Sie hat zum Ziel, die Selbstretung von Personen in komplexen Situationen zu unterstützen.

An dieser Stelle sei bewusst darauf hingewiesen, dass die akustische Führung nicht ausschliesslich in Situationen mit schlechter Sicht (Bsp. Brandentwicklung) eingesetzt werden kann. Auch in Ereignisfällen mit unbehinderten Sichtverhältnissen haben akustische Signale das Potential, Notausgänge und Fluchtmöglichkeiten schneller erkennbar zu machen (vgl. Lellig *et al.* 2010). Durch die ständige Kenntlichmachung der Notausgänge kann den Tunnelnutzern nämlich eher begreifbar gemacht werden, dass sie ihre Passivität überwinden, ihr Fahrzeug verlassen und sich auf den nächsten Fluchtweg begeben müssen (Martens, 2008).

In einem engeren Sinne wird in dieser Forschungsarbeit unter akustischer Führung, das Hinlocken der Flüchtenden zu den Notausgängen verstanden. Es liegt hierbei die Annahme zugrunde, dass die Personen bereits auf der Flucht sind und nicht erst noch aus dem Fahrzeug getrieben werden müssen. Die Fragestellung sowie die Anforderungen an die Versuchsbedingungen würden sich dadurch ändern; sie werden mit dieser Studie nicht untersucht.

Akustische Führung im engeren Sinne bezeichnet die Hinlockung von Personen zur nächsten Fluchtmöglichkeit.

Tatsächlich belegen verschiedene Verhaltensstudien, dass sich die Mehrheit der Personen in einem verrauchten Raum durch akustische Signale zum näheren Fluchtweg führen lassen (vgl. Färber & Färber, 2010; Boer & van Wijngaarden, 2004; Withington, 2003;

Boer, 2002). Dabei wird die Wirksamkeit verschiedener akustischer Signale sowie von Kombinationen aus Tönen und Durchsagen untersucht. Die Studien weisen darauf hin, dass die Art des akustischen Signals von grosser Bedeutung ist und darüber entscheidet, ob Flüchtende das Signal richtig interpretieren und den Notausgang finden. Insbesondere sollten die akustischen Signale mit den folgenden Kriterien bewertet werden (Boer, 2002; Woodson *et al.*, 1992):

- **Hörbarkeit:** Die Lautsprecher müssen auch vor lauten Hintergrundgeräuschen (Bsp. Lüftung, Verkehr etc.) hörbar sein. Damit sich die Führungssignale genügend vom Umgebungsgeräusch abheben, sollten sie sich mindestens 10 dB über der vorherrschenden Geräuschkulisse befinden.
- **Aufmerksamkeit:** Das akustische Führungssignal muss die Aufmerksamkeit der Flüchtenden erregen. Dazu sollte ein markantes und vor allem unerwartetes Signal eingesetzt werden. Es ist vorteilhaft wenn die akustische Führung mehrstufig erfolgt. Mit einem plötzlich einsetzenden Alarmsignal muss zuerst die Aufmerksamkeit der Personen gewonnen werden, bevor eine prägnante und unmissverständliche Sprachinstruktion durchgegeben wird. Komplexe Töne sind geeigneter als einzelne Töne, da sie unnatürlich und daher auffälliger sind.
- **Attraktivität:** Die akustische Führung beabsichtigt, möglichst viele Personen in möglichst kurzer Zeit zum optimalen Notausgang zu leiten. Dazu ist es wichtig, dass die akustischen Signale attraktiv und für die Flüchtenden intuitiv verständlich sind. Geräuschähnliche Signaltöne (Bsp. Weisses Rauschen) eignen sich nicht um flüchtende Personen anzuziehen, weil diese zu wenig selbsterklärend sind und teilweise sogar abstossend wirken können (vgl. Boer & van Wijngaarden, 2004).
- **Lokalisierung:** Damit sich die Flüchtenden schnellstmöglich auf den optimalen Fluchtweg begeben können, muss die Geräuschquelle über den Notausgängen leicht lokalisierbar sein. Je nach Standort der Personen sowie der spezifischen Umgebungsbedingungen kann die Lokalisierung des Signals jedoch unterschiedlich schwer ausfallen. Die Akustik im Tunnel ist aufgrund der schallharten Oberflächen der Betonwände und des Asphalts, als sehr schwierig einzuschätzen. Nebst der Zusammensetzung des akustischen Signals spielen deshalb die eingesetzten Lautsprecher eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Die durchgeführten Verhaltensstudien zeigen vielversprechende Resultate. Boer (2002) diskutiert in seinen Untersuchungen, dass Lautsprecheranlagen über den Notausgängen zwar geeignet sind, Menschen in der Selbstrettung zu unterstützen. Er unterstreicht jedoch die Wichtigkeit der Vorinformation der Personen. Die akustische Führung war im verrauchten Tunnel am effektivsten, wenn die Probanden Kenntnis von den Lautsprechern über den Notausgängen und deren Zweck hatten. Die Personen wussten, dass das ausgesandte weisse Rauschen auf die sich darunter befindenden Notausgänge weisen würde, und begaben sich sofort in diese Richtung. Personen ohne dieses Vorwissen konnten jedoch das ausgesandte Geräusch nicht richtig interpretieren und flüchteten bevorzugt in die Richtung woher sie gekommen waren und begaben sich somit nicht direkt zum nächsten Notausgang.

Im Bericht von Withington (2003) wird demonstriert, wie sich Personen durch einen einfach zu interpretierbaren Signalton mit guter Lokalisierbarkeit, schneller aus einer komplexen Situation evakuieren lassen. Die sehr hohe Erfolgsquote von über 90% ist jedoch dadurch zu erklären, dass die Versuchsteilnehmer ebenfalls über die vorhandenen Lautsprecheranlagen und deren Zweck Bescheid wussten. Sobald die Probanden nämlich darüber informiert wurden, dass zwar Lautsprecher ihnen den Weg weisen würden, nicht jedoch dass sich diese über den Notausgängen befinden, sank die Erfolgsquote drastisch (vgl. Boer & van Wijngaarden, 2004). Die kleinere Erfolgsquote konnte direkt mit der geringeren Information der Personen in Verbindung gebracht werden.

Boer & van Wijngaarden (2004) beschreiben die Entwicklung eines neuartigen Geräu-

ches und erreichen eine sehr gute akustische Führung von Personen in einem verrauchten Tunnel. Durch die Kombination von zwei aufeinanderfolgenden attraktiven Signaltönen und einer anschliessenden Durchsage liess sich die akustische Führung durch die Versuchspersonen einfach lokalisieren und interpretieren. Ohne vorgängige Instruktion, konnten 87% der Probanden den Tunnelraum durch den nächsten Notausgang verlassen. Dieser hohe Anteil sowie die Tatsache, dass die Versuchspersonen überzeugter und schneller flüchteten, unterstreicht die sicherheitsfördernde Wirkung der akustischen Führung.

Die neusten Untersuchungen durch Färber & Färber (2010) veranschaulichen mit einem interessanten Ansatz, wie Menschen effizient aus einem verrauchten Tunnel geführt werden können. Den publizierten Ergebnissen liegt die Annahme zugrunde, dass Menschen nur durch einen entspannenden und völlig tunnelfremden Ton zu den Notausgängen gelockt werden können. Mittels Vorstudien bestimmten die Autoren Klänge aus der Natur sowie künstlich erzeugte Geräusche (Bsp. Vogelstimmen, Musik, menschliche Stimmen mit gesprochenem und gesungenen Text) als geeignet. Tatsächlich konnte nachgewiesen werden, dass die Mehrheit der Probanden ein von einer weiblichen Altstimme, getragenes und in der Rufterz gesungenes "Hierher", im Wechsel mit dem Lockgesang des Rotkehlchens das mit einem leichten weissen Rauschen hinterlegt ist, am besten geortet werden konnte. Zudem wurde diese Signalkombination von den Versuchsteilnehmern im richtigen Sinne interpretiert und als angenehm klingend bewertet. Die Autoren betonen, dass eine solche akustische Führung mit vergleichsweise geringem Aufwand in Tunneln umgesetzt werden könnte und daher entscheidend zur Erhöhung der Tunnelsicherheit beiträgt.

2.3 Akustik im Tunnel

Die akustischen Verhältnisse im Tunnel sind sehr anspruchsvoll. Durch die spezielle Bauweise sind sämtliche Oberflächen in einer Tunnelröhre glatt und schallhart. Die Schallenergie eines ausgesandten akustischen Signals wird an den Betonwänden sowie am Asphalt reflektiert und kann sich beinahe ungehindert fortpflanzen. Da diese schallharten Reflexionen kaum gedämpft werden, können sich im Tunnel akustische Überlagerungen mit verwirrender Wirkung bilden (vgl. Huijben, 1999).

Damit die akustische Führung die Tunnelnutzer zu den optimalen Fluchtwegen hinzulocken vermag, müssen die Lautsprecher über den Notausgängen platziert werden. Die technische Umsetzung der Lautsprecheranlagen kann dabei je nach Absicht variieren. Grundsätzlich können zwei unterschiedliche Konzepte unterschieden werden: Beschallung und Signalisierung.

Bei der Beschallung von Räumen wird hauptsächlich das Ziel verfolgt, Sprachübertragungen der menschlichen Wahrnehmung zugänglich zu machen. Die dazu erforderliche hohe Sprachverständlichkeit wird mit dem sogenannten Sprachverständlichkeitsindex (STI) gemessen (Ahnert & Feistel, 2010). Er gibt das Verhältnis zwischen dem ausgesandten Nutzsignal und dem Hintergrundgeräusch an und lässt sich mit subjektiven Qualitätsprädikaten beurteilen (Tabelle 2).

Tabelle 2 Beurteilung der STI-Werte

Beurteilung	Speech Transmission Index (STI)
Ausgezeichnet	0.75 – 1
Gut	0.6 – 0.75
Angemessen	0.45 – 0.6
Schwach	0.3 – 0.45
Schlecht	0 – 0.3

Die schwierige Raumakustik in Tunneln kann einerseits mit der Installation von Absorptionsmaterial überwunden werden. Dies wird jedoch als unpraktisch und teuer eingeschätzt. Eine gute Sprachübertragungsqualität kann jedoch auch durch den Einsatz von stark gerichteten Lautsprechern erreicht werden. Die Bündelung der Schallwellen führt zu einer Fokussierung des akustischen Signals wodurch sich ein ungestörter Übertragungsweg verlängern lässt. Bei der sogenannten synchronisierten Längsbeschallung werden die entlang der Tunnelröhre angebrachten Lautsprecher in Laufrichtung mit einer zeitlichen Verzögerung geschaltet. Durch ein exaktes Ausgleichen der Schalllaufzeitverzögerung kann ein störendes Echo eliminiert und deutliche Verbesserungen der Sprachverständlichkeit erreichen werden (Färber & Färber, 2010).

Bei der Signalisierung von Notausgängen bietet sich das verzögerte Aussenden von Tönen jedoch nicht an weil keine eindeutige Laufrichtung für das akustische Signal definiert werden kann. Damit Personen die sich zwischen zwei Notausgängen befinden, aufgrund des akustischen Signals den näheren Fluchtweg lokalisieren können, müssen über den Notausgangstüren jeweils zwei Lautsprecher angebracht werden. Diese müssen in entgegengesetzte Richtungen strahlen. Wenn die verschiedenen Lautsprecher entlang des Tunnels verzögert erklingen, könnte dies bei den Personen Verwirrung auslösen und die Effektivität der akustischen Führung mindern. Für den in dieser Studie zu untersuchenden Effekt der akustischen Führung durch Signalisierung der Notausgänge, müssen die Lautsprecher simultan geschaltet werden.

2.4 Anforderungen der Richtlinien

Die Schweizer Norm SN 197/2 (SIA, 2004) schreibt vor, dass die für die Sicherheit der Tunnelnutzer wesentlichen Sicherheitseinrichtung besonders zu kennzeichnen sind. Die detaillierten Angaben sind in den spezifischen Richtlinien zu entnehmen.

Die Richtlinie des ASTRA über die Signalisation der Sicherheitseinrichtungen (ASTRA, 2011) regelt vertieft die Grundsätze wie Sicherheitseinrichtungen im Ereignisfall für die Verkehrsteilnehmer sichtbar gemacht werden müssen. Während sie die Kohärenz und Vereinheitlichung der mehrheitlich optischen Signalisation bezweckt, werden akustische Möglichkeiten in der Richtlinie nur marginal geregelt. Einzig die Radio-Verkehrsinformation ist auf die akustische Wahrnehmung des Menschen ausgerichtet. Über die korrekte Frequenz des Radios (sofern das Radio eingestellt ist) können die Verkehrsinsassen vom Tunnelbetreiber über die aktuelle Situation informiert und aufgefordert werden, das Fahrzeug zu verlassen und sich zu den Notausgängen zu begeben. Eine direkte Führung zum nächsten Fluchtweg ist damit aber nicht möglich. Die in der Literatur geforderten akustischen Hilfsmittel zur Signalisation des Fluchtweges werden in den Schweizer Normen und Richtlinien nicht berücksichtigt (vgl. Lellig *et al.*, 2010).

In Österreich umfassen die in den Tunneln anzubringenden Informationsanlagen bereits akustische Mittel. In der RVS-Richtlinie der österreichischen Forschungsgesellschaft Strasse, Schiene, Verkehr (FSV) wird neben der üblichen Tunnelfunkanlage auch eine Beschallungsanlage vorgesehen (FSV, 2010). Diese besteht aus in den Tunnelwänden eingebauten Verstärkern und dazugehörigen Lautsprecherkombinationen. Die Beschallungsanlage ist sowohl direkt im Fahrraum, als auch bei den Notrufstellen in den Querschlägen und den Verbindungen ins Freie anzubringen. Die Richtlinie schreibt vor, dass eine Lautsprecherkombination eine Bemessung haben muss, dass damit ein Schalldruckpegel von mindestens 110 dB(A) in drei Meter Entfernung im Bereich von 1 bis 4 kHz erreicht werden kann. Zudem soll eine Sprachverständlichkeit von mindestens 0,7 auf der allgemeinen Verständlichkeitsskala (common intelligibility scale, CIS) erreicht werden². Eine flächendeckende Beschallung der Tunnelröhren ist jedoch nicht vorgesehen. Die Unterstützung der Fluchtwegorientierung wird auch in Österreich nur mit optischen Hilfsmitteln vorgesehen.

In Deutschland sind videoüberwachte Tunnel mit Lautsprechern im Tunnel und an den Tunnelportalen auszurüsten (RABT, 2006). Damit soll ebenfalls die Information der Ver-

² CIS = 1 + log(STI)

kehrsteilnehmer gewährleistet werden, wobei die Lautsprecheranlagen so ausgerichtet werden müssen, dass eine gute Verständlichkeit der Durchsagen unter langsam fahrendem Verkehr und bei offenem Fahrzeugfenster erreicht wird. Die Standorte der Lautsprecher werden nicht festgelegt. Die deutsche Richtlinie geht im Vergleich zur schweizerischen und österreichischen tiefer und definiert weitere zu beachtende Punkte die vor der Installation durch schalltechnische Untersuchungen zu prüfen sind (Bsp. Störschallpegel, Nachhallzeiten, etc.). Die Richtlinie sieht zudem vor, dass die Verkehrsteilnehmer durch akustische Signale auf eine bevorstehende Durchsage aufmerksam gemacht werden sollen. Aber auch in Deutschland sind Lautsprecheranlagen nach dem aktuellen Stand der Richtlinien nur für die Information der Tunnelnutzer und nicht für deren Führung im Ereignisfall gedacht.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass in Nachbarländern Lautsprecheranlagen für Tunnel vorgesehen sind, diese aber stets für die Information der Tunnelnutzer ausgerichtet sind. Eine akustische Führung im Sinne einer lockenden, akustischen Signalisierung der Notausgänge wird im Moment noch nicht umgesetzt.

3 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die angewandte Methodik mit der die eingangs aufgestellte Hypothese untersucht wurde. Ziel war, aufzeigen zu können, inwiefern die Selbstrettung von Tunnelnutzern während eines Ereignisfalles durch akustische Führung unterstützt werden kann. Abgesehen von Literaturrecherchen, konzentrierte sich die Untersuchungsmethodik auf zwei Grundpfeilern.

Einerseits sollte ein Experiment mit Versuchspersonen Daten über die Wirksamkeit von Lautsprecheranlagen in Tunneln liefern. Die Durchführung verschiedener Szenarien war Bedingung für eine vertiefte Diskussion des Effektes. Andererseits diente ein Fragebogen, der nach dem Experiment an die Versuchsteilnehmer ausgeteilt wurde, der Ermittlung der subjektiven Wahrnehmung der Situation. Beide Ansätze wurden statistisch ausgewertet und bilden die Grundlage für die in Kapitel 4 aufgeführten Erkenntnisse. Das Experiment wurde von der Ethikkommission der philosophisch-humanwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern bewilligt.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben den genauen Aufbau des Experimentes und informieren über die angebrachten Installationen, über die genaue Versuchsanordnung im Tunnel sowie über die Zusammensetzung der Versuchspersonen. Zum Schluss wird auf den Ablauf der einzelnen Szenarios eingegangen.

3.1 Versuchsaufbau

Das Experiment bedurfte einer langen Vorbereitungszeit, da neben einem geeigneten Tunnelobjekt in der Schweiz, auch angemessene Installationen angebracht und freiwillige Versuchsteilnehmer rekrutiert werden mussten.

Für den Feldversuch wurde vom kantonalen Tiefbauamt Zürich der Uetlibergtunnel zur Verfügung gestellt. Der 4.42 km lange Tunnel wurde im Jahr 2009 fertig gestellt und verfügt über sicherheitstechnisch aktuelle BSA-Anlagen. Daher und aufgrund seiner zentralen Lage sowie der grossräumigen Unterkunstmöglichkeiten in der Lüftungszentrale Reppischtal wurde er für dieses Experiment ausgewählt. Der Uetlibergtunnel verzeichnet eine durchschnittliche Steigung von 1.6% in Fahrtrichtung Basel; der durchschnittliche Tagesverkehr (DTV) beläuft sich auf rund 60'000 Fahrzeuge.

In der Nacht des Versuches wurde die Tunnelröhre in Fahrtrichtung Basel am 19. Mai 2011 von 20:30-24:00 Uhr für den Verkehr gesperrt. Während dieses Zeitfensters hatte der Auf- und Abbau der Installationen wie auch die Durchführung des Versuchs zu erfolgen.

Die folgenden drei Unterkapitel geben einen detaillierten Überblick des Versuchsaufbaus.

3.1.1 Installationen

Lautsprecher

Für den Versuch mussten Lautsprecher beschafft werden, die oberhalb der Notausgänge platziert werden konnten und in der Lage waren, die Tunnelröhre optimal zu beschallen. Aufgrund der Voraussetzung, dass die akustische Führung auch unter einem kostengünstigen Aspekt zu untersuchen ist, wurden bewusst keine speziellen Tunnellautsprecher (geeignet für eine optimal verständliche Sprachübertragung in Tunneln) eingesetzt. Die Lautsprecher mussten wetterfest und deren Konstruktion so stabil sein, dass sie für die regelmässigen Tunnelreinigungen montiert bleiben können. Für die definitive Auswahl wurden vorgängig zum Experiment, verschiedene Trichter-Lautsprecher getestet.

Aufgrund der Anforderungen wurde für das vorliegende Experiment schliesslich der Trichterlautsprecher GM-8617 der Firma g+m elektronik ag verwendet (vgl. Anhang I).

Die Lautsprecherkonstruktion über den Notausgängen mussten einen geringen Öffnungswinkel aufweisen, um das akustische Signal möglichst direkt, ohne störende Reflexionen übertragen zu können. Die Beschallung einer räumlich begrenzten Fläche kann erreicht werden, indem mehrere Lautsprecher vertikal übereinander aneinander gereiht werden. Vorgängige Tests im Uetlibergtunnel haben gezeigt, dass mit diesem sogenannten *Line-Array-Verhalten* der Lautsprecher, akustische Signale über grössere Distanzen ohne allzu störende Reflexionen übertragen werden konnten. Die genaue Anzahl, die Abstände zwischen den Lautsprechern sowie deren Abstrahlwinkel mussten ebenfalls durch Versuche ermittelt werden.



Abbildung 3 Aufbau der Lautsprechersysteme

Die definitive Installation bestand schliesslich aus einer Holzplatte auf der zwei Lautsprechersysteme mittels eines verstellbaren Schienensystems angebracht wurden. Ein Lautsprechersystem bestand aus jeweils fünf Trichterlautsprechern die einen leichten Neigungswinkel von 3° nach unten aufwies. Die beiden Systeme zeigten in entgegengesetzte Richtungen entlang der Fahrbahn, wobei ein System jeweils gegen den benachbarten akustisch markierten Notausgang strahlte (vgl. Abbildung 8). Die Montage der Lautsprecherplatten erfolgte direkt über den beiden betroffenen Notausgangstüren auf einer Höhe zwischen 2.5 m (Unterkante) und 3.7 m (Oberkante).

Akustische Signale

Die akustischen Signale bestanden aus Signaltönen und einer mehrsprachigen Durchsage.

Der eingesetzte Signaltönen basierte auf den Untersuchungen von Boer & van Wijngaarden (2004) und Färber & Färber (2010) und bestand aus zwei aufeinanderfolgenden komplexen Zweiklängen. Die Sequenz setzte sich aus den Terzabfolgen C-E (Grundfrequenz: 262 Hz bzw. 330 Hz) sowie E-G (Grundfrequenz: 330 Hz bzw. 392 Hz) zusammen. Die beiden Zweiklänge trennten eine Pause von 200 ms. Diese Abfolge wurde immer zweimal abgespielt und von einer 1200 ms dauernden Pause abgeschlossen (vgl. Abbildung 4).

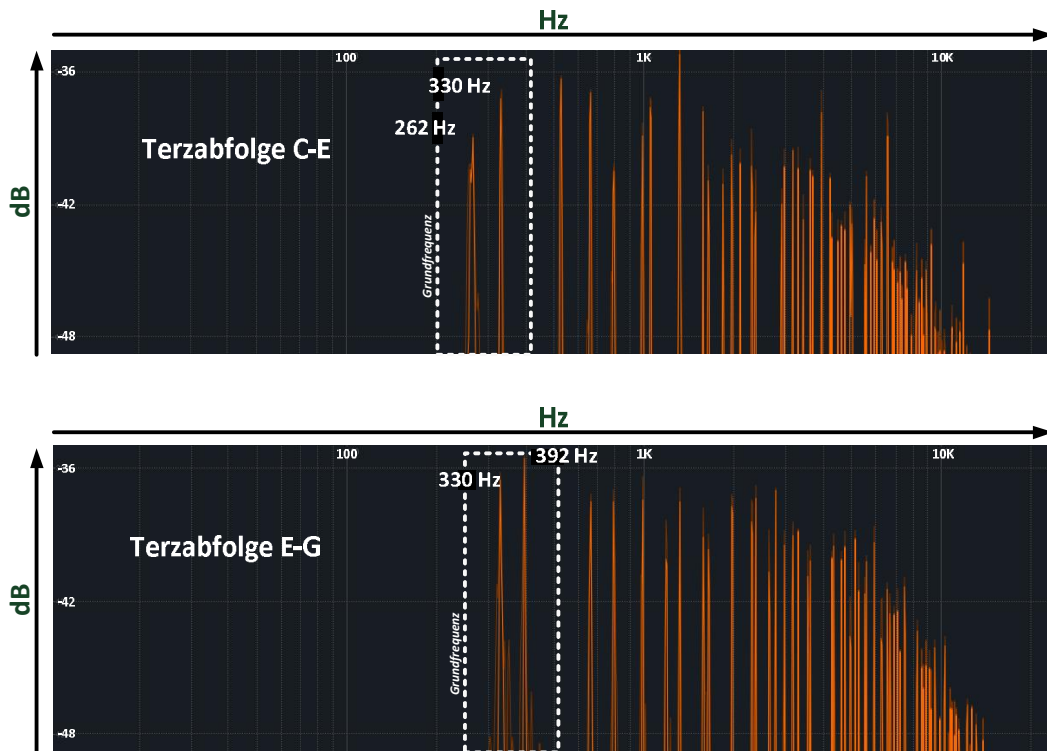


Abbildung 4 Grundfrequenz des Signaltons

Die Sprechdurchsage wurde durch eine langsam und angenehm klingende männliche Stimme übertragen. Es wurde darauf geachtet, dass die zu übermittelnde Nachricht so prägnant wie möglich den vorhandenen Fluchtweg signalisiert und sich die Personen dorthin gelockt fühlen. Die Sprechdurchsage lautete schlussendlich "Ausgang hier" und wurde zusätzlich in Englisch und Französisch abgespielt ("Exit here", "Sortie ici"). Die Durchsagen folgten jeweils nach den Signalton-Sequenzen, nach einer Pause von 1200 ms; die Pausen zwischen den verschiedensprachigen Texten betragen ebenfalls 1200 ms (vgl. Abbildung 5). Diese Kombination wurde anschliessend in einer Endlosschleife repetiert.

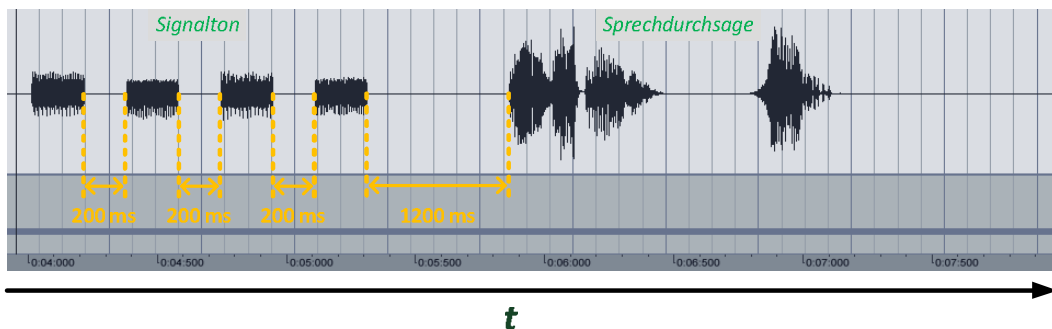


Abbildung 5 Aufbau des akustischen Führungssignals: Kombination Signalton-Durchsage

Der akustische Grundpegel während des Versuchs betrug ca. 75 dB. Das vorherrschende Hintergrundgeräusch bestand hauptsächlich aus einem weit entfernten Summen der Strahlventilatoren an den beiden Tunnelportalen. Damit sich das akustische Signal genügend vom Umgebungsgeräusch unterscheiden lässt, musste es sich mindestens 10 dB von ihm unterscheiden.

Der durchschnittliche Schallpegel des akustischen Signals betrug schliesslich in einem Meter Distanz zur Quelle zwischen 87 dB und 90 dB, wobei die Sprachdurchsage leicht weniger stark als der Signalton zu hören war. In einer Distanz von 100 m konnte ein Schalldruckpegel zwischen 83 dB und 86 dB gemessen werden. Die Verständlichkeits-

messungen ergaben einen STI von 0.48 in 25 m Entfernung zur Schallquelle, bzw. 0.42 in 105 m Entfernung³. Bei den Messungen wurde der Effekt des künstlichen Rauchs auf die Schallgeschwindigkeit und das Dämpfungsverhalten der Luft vernachlässigt.

Die Lautsprecher sowie die Signaltöne und Durchsagen wurden von einer zentralen Schaltungseinheit gesteuert, die sich ausserhalb des Versuchsraumes befand.

Rauchmaschinen

Für die Verrauchung des Versuchsraumes im Tunnel wurden vier Nebelmaschinen der Marke Power Fog 2500 eingesetzt. Um eine optimale Rauchausbreitung zu erreichen, wurden die Maschinen unterhalb des begrenzten Versuchsraumes positioniert. Dadurch konnte die natürliche Kaminwirkung (aufgrund der schwachen Steigung von 1.6%) ausgenutzt werden, um den Nebel auf den Versuchsraum hinzutragen.

Die Rauchmaschinen produzierten einen künstlichen, für den Menschen nicht-toxischen, weissen Theaternebel auf Mineralöl-Basis.

Da die Windverhältnisse im Tunnel leicht änderten, musste die Rauchsäule zusätzlich zum natürlichen Kamineffekt mit den Strahlventilatoren an den beiden Tunnelportalen kontrolliert werden. Die Rauchsäule bewegte sich schliesslich mit der lokalen Windgeschwindigkeit von ca. 0.5 m/s durch den Versuchsraum. Eine konstant homogene Verrauchung zu erreichen, erwies sich als sehr schwierig. Die Sichtweite schwankte dadurch zu Beginn des Experiments zwischen 0.5 m und wenigen Metern. Während den späteren Szenarien konnte die Sicht jedoch konstant auf 0.5 m-1.5 m gehalten werden.

Obschon die Versuchsteilnehmer darauf aufmerksam gemacht wurden, dass der künstlich erzeugte Nebel harmlos ist, wurden sie mit einfachen Atemschutzmasken ausgerüstet. Es war ihnen freigestellt sie zu gebrauchen.

Vortest

Einen Monat vor dem eigentlichen Experiment konnte der Versuchsraum im Uetlibergtunnel im Rahmen einer periodischen Tunnelreinigung begangen werden. Dabei wurden die Lautsprechersysteme über den Notausgängen montiert und soweit wie möglich für den Versuch vorbereitet. Die Installationen wurden für den Zeitraum bis zum eigentlichen Experiment hängen gelassen. Die akustischen Signale und die Verrauchung der Tunnelröhre wurden getestet und für die Versuchsbedingungen festgehalten.

³ Der Startpunkt der Versuchspersonen lag 105 m vom nächsten Notausgang entfernt.

3.1.2 Versuchsanordnung

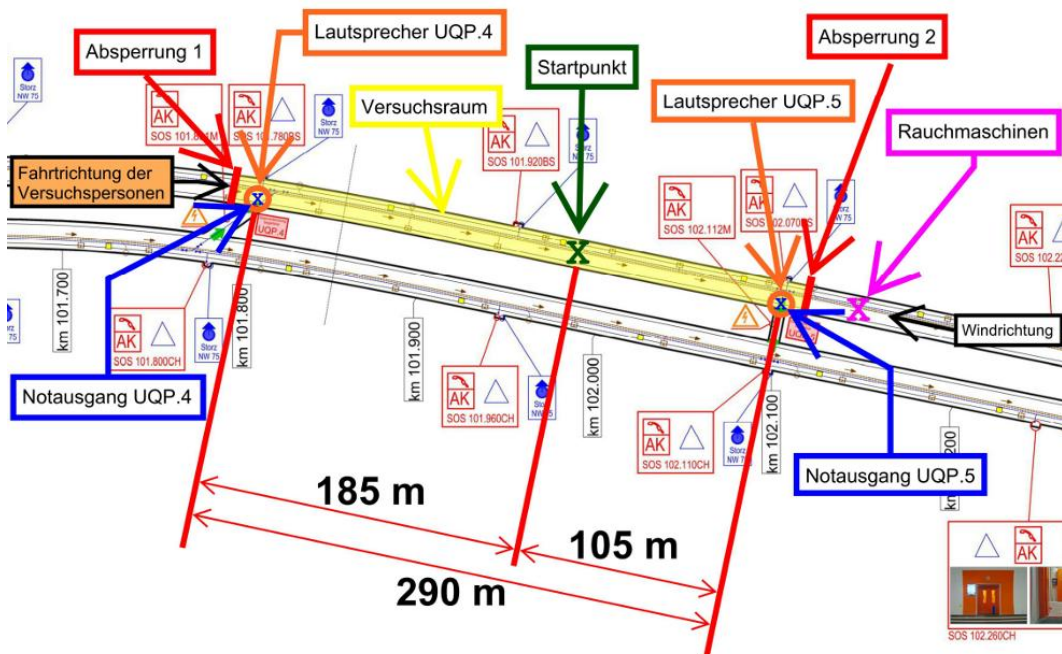


Abbildung 6 Versuchsraum

Notausgänge

Abbildung 6 illustriert die Gesamtsituation in der Tunnelröhre. Für das Experiment wurden die beiden Notausgänge UQP.4 und UQP.5 gewählt. Der Abstand zwischen den beiden Fluchttüren betrug 290 m. Die hinter den Notausgängen liegenden Querverbindungen in die gegenüberliegende Tunnelröhre dienten während den Szenarioversuchen als Aufenthaltsraum für die Versuchspersonen die das Experiment bereits durchlaufen hatten. Die Türen am anderen Ende der Querverbindungen die den Zugang auf die gegenüberliegende Fahrbahn (Fahrtrichtung Chur) ermöglichen, durften nicht geöffnet werden und wurden deshalb während des ganzen Experiments von Versuchshelfern bewacht und entsprechend gesichert. Über beiden Notausgangstüren wurden die Lautsprechersysteme gemäss den Angaben in Kapitel 3.1.1 angebracht.

Tabelle 3 Angaben zum Standort der Notausgänge

UQP.4	UQP.5	Distanz zwischen den Notausgängen
km 101.780 BS	km 102.070 BS	290 m

Das Öffnungsprinzip der Notausgangstüren bestand aus Flügeltüren, die sich in Fluchtrichtung aufstossen liessen und gemäss der Richtlinie für Türen in Strassentunneln ausgelegt sind (vgl. ASTRA, 2009).

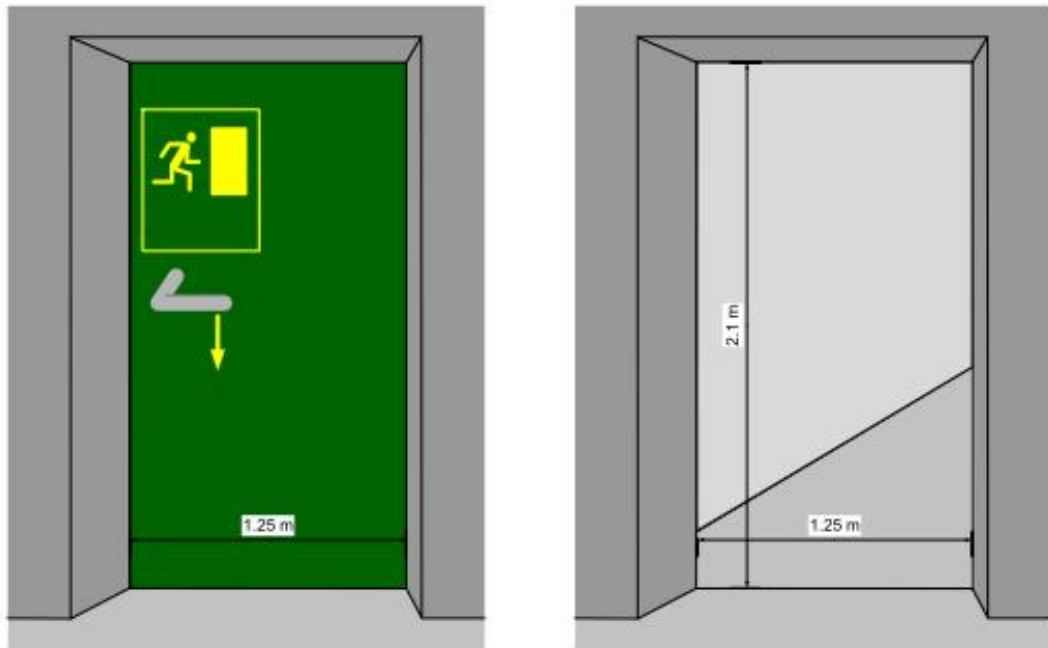


Abbildung 7 Abmessungen der Notausgangstüren, Typ Flügeltür (ASTRA, 2009)

Startpunkt

Zu Beginn jedes Szenarioversuches wurden die entsprechenden Versuchspersonen von Westen her zu einem genau vordefinierten Startpunkt in der Tunnelröhre gefahren (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 14). Der Transport erfolgte erst, wenn der Versuchsraum anforderungsgemäss verraucht war; dadurch sollte verhindert werden, dass sich die Versuchspersonen die durchfahrene Umgebung einprägen konnten.

Der Startpunkt für die Versuchspersonen durfte nicht genau in der Mitte zwischen den beiden Notausgängen UQP.4 und UQP.5 liegen. Aus der Versuchsanordnung musste sich ein "optimaler Fluchtweg" sowie ein "optimaler Notausgang" ableiten lassen. Der Startpunkt wurde deshalb so festgelegt, dass er sich ungefähr 1/3 der Distanz zwischen den Notausgängen näher zu einem der beiden Notausgänge befand. Analog zu Boer & van Wijngaarden (2004), wo die beiden möglichen Fluchtdistanzen in einem Verhältnis von 0.36:0.64 ausgelegt wurden, sollte aus Gründen der Vergleichbarkeit der Resultate, auch in diesem Versuch dieses Verhältnis gewählt werden.

Es musste angenommen werden, dass die Versuchspersonen in den verschiedenen Szenarioversuchen die Tendenz haben werden, hin zu bekannten Orten zu flüchten (vgl. Nilsson *et al.*, 2009). In diesem Versuch würde das die Richtung sein, in welcher der Transport der Versuchspersonen zum Startpunkt erfolgt war: von Westen her, vorbei an Notausgang UQP.4. Läge der Startpunkt näher zu UQP.4, würde dieser nicht nur in der präferierten Fluchtrichtung liegen, sondern würde auch ein lauterer akustisches Signal an die Versuchspersonen senden. Es bestünde somit die Wahrscheinlichkeit, dass das Fluchtverhalten der Versuchspersonen nicht hauptsächlich durch die akustische Führung, sondern auch wesentlich durch einen ungünstigen Versuchsaufbau beeinflusst würde. Eine statistisch genaue Aussage über die Wirksamkeit der akustischen Führung wäre nicht mehr möglich.

Um diese Koinzidenz (lautes Signal und Rücklauff Tendenz) zu vermeiden, musste der Startpunkt so gewählt werden, dass er näher zum "optimalen Notausgang" UQP.5 lag. Schlussendlich wurde der Startpunkt für das Experiment so definiert, dass der nähere Notausgang 105 m entfernt in Fahrtrichtung lag; für den anderen mussten 185 m zurückgegangen werden (vgl. Abbildung 6, Abbildung 8).

Tabelle 4 Angaben zum Standort des Startpunktes

Startpunkt	Distanz zu UQP.4	Distanz zu UQP. 5
km 101.965 BS	185 m	105 m

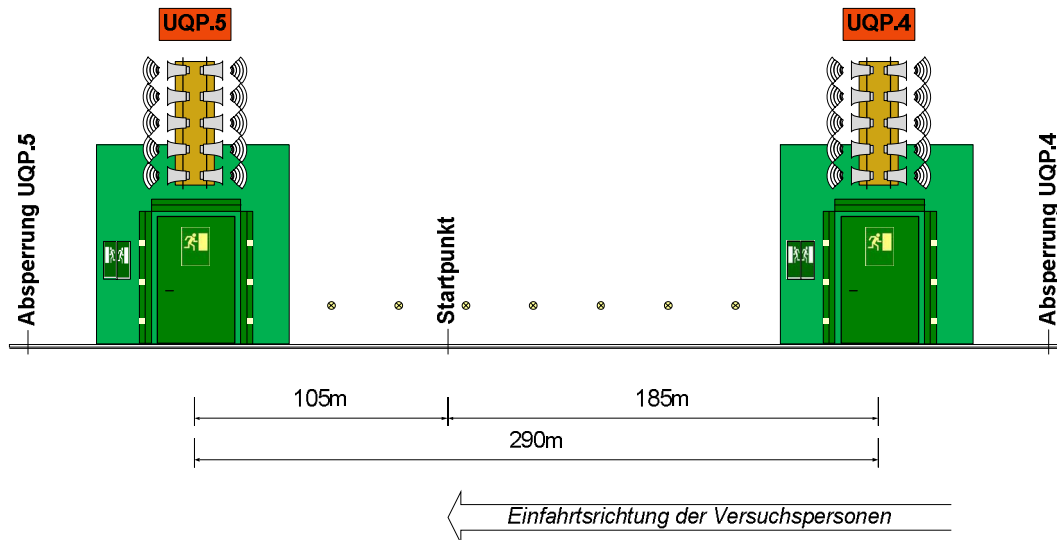


Abbildung 8 Anordnung der Lautsprechersysteme im Versuchsraum

Absperrungen

Die Absperrungen hinderten die Versuchspersonen, den Versuchsraum zu verlassen. Damit die Absperrungen jedoch nicht als visuelle Hilfe für die Versuchspersonen beim Auffinden der Notausgänge dienten, wurden sie jeweils mindestens 25 m vom nächsten Notausgang aufgestellt.

Tabelle 5 Angaben zur Absperrung 1, UQP.4

Absperrung 1, UQP.4	Distanz zum nächsten Notausgang UQP.4
km 101.740 BS	40 m

Da die Rauchmaschinen gerade hinter der Absperrung 2 positioniert wurden, war die Verrauchung in diesem Tunnelsegment sehr dicht und homogen verteilt. Die Absperrung konnte deshalb näher beim Notausgang aufgestellt werden, ohne dass sie aus der Distanz erkennbar gewesen wäre.

Tabelle 6 Angaben zur Absperrung 2, UQP.5

Absperrung 2, UQP.5	Distanz zum nächsten Notausgang UQP.5
km 102.098 BS	28 m

Szenarien und Gruppenbildung

Während des Versuchs sollten vier verschiedene Szenarien durchgeführt werden. Die Absicht war, drei verschiedene Arten von akustischer Führung zu testen: mit einem Signalton, mit einer Sprechdurchsage sowie eine Kombination von beidem. Für die anschließende statistische Auswertung musste ebenfalls ein Kontrollscenario ohne akustische Führung geplant werden.

Aus zeitlichen Gründen konnten jedoch am Versuchsabend nur drei Tests durchgeführt werden, wobei das Kontrollscenario aufgrund ungenügender Rauchentwicklung zur Sicherheit wiederholt wurde. Die untersuchte akustische Führung bestand aus der Kombination von Signalton und Sprechdurchsage.

Tabelle 7 zeigt die tatsächlich durchgeführten Gruppentests, welche schliesslich die Grundlage für die in Kapitel 4 vorgestellten Analysen bilden.

Tabelle 7 Getestete Szenarien

	Ohne Signalton	Mit Signalton
Ohne Durchsage	Gruppe A / Gruppe C	
Mit Durchsage		Gruppe B

BSA-Anlagen

Während allen Szenarien wurden ausser der Lüftung, sämtliche für einen Ereignisfall vorgesehenen Reflexe der BSA im Tunnel simuliert. Das bedeutet, dass die Durchgangsbeleuchtung auf 100% hochgefahren und die Brandnotbeleuchtung an den Tunnelwänden sowie die Blitzlichter um die Notausgänge aktiviert wurden. Dadurch sollte für die Versuchspersonen eine möglichst realitätsnahe Situation erzeugt werden.

Die lokalen Klappen der Absauglüftung an der Tunneldecke wurden bewusst geschlossen gehalten, da es sonst unmöglich gewesen wäre, eine konstante Verrauchung aufrecht zu erhalten.

3.1.3 Teilnehmer

Rekrutierung

Die Versuchspersonen wurden durch eine externe Firma rekrutiert. Sie wurden vorgängig nicht über den genauen Versuchablauf informiert. Bei der Rekrutierung wurde ihnen lediglich mitgeteilt, dass es sich um einen Evakuationsversuch in einem künstlich verrauchten Tunnel handelt.

Statistische Verteilung der Versuchspersonen

Insgesamt wurden über 100 Personen für den Versuchstag rekrutiert. Aufgrund der Änderung der Szenarienabfolge sowie der Zeitknappheit haben schlussendlich 80 Personen aktiv am Experiment teilgenommen. Die Verteilung der Grundgesamtheit $N = 80$ auf die drei Gruppen ist in Tabelle 8 illustriert.

Tabelle 8 Anzahl Versuchspersonen pro Gruppe

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C
n = 27	n = 24	n = 29

Abbildung 9 zeigt die Verteilung des Geschlechts über die Gruppen. Um zu überprüfen, ob sich eine Abhängigkeit zwischen dem Geschlecht und der Gruppenzugehörigkeit zeigt, wurde ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Es konnte damit kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem Geschlecht der Versuchspersonen festgestellt werden ($\chi^2 = 0.676$; $df = 2$; $p = 0.713$)⁴.

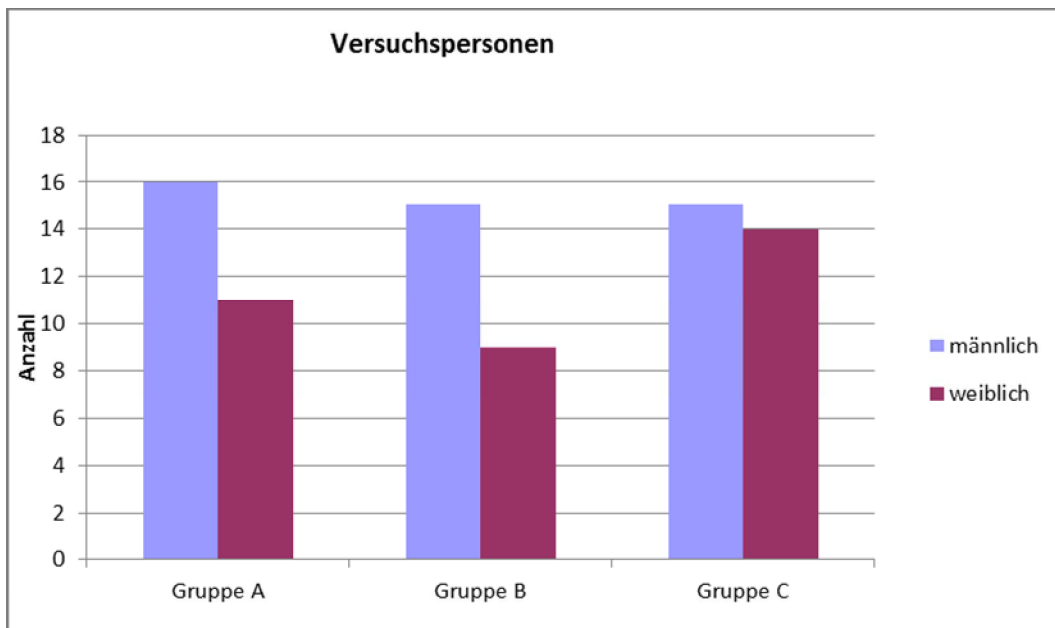


Abbildung 9 Verteilung des Geschlechts der Versuchspersonen

In Abbildung 10 ist das Durchschnittsalter der Versuchspersonen pro Szenariogruppe illustriert. Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit dem Alter als abhängige Variable und der Gruppenzugehörigkeit als dreistufigen Faktor verdeutlicht, dass sich die Gruppenmittelwerte statistisch nicht voneinander unterscheiden ($F_{(2,77)} = 0.616$, $p = 0.542$)⁵.

⁴ χ^2 = Chi-Quadrat-Wert; df = Anzahl Freiheitsgrade; p = Signifikanzwert (1- α). Ein Chi-Quadrat-Test analysiert, ob beobachtete Werte mit den zu erwarteten Werten übereinstimmen. Der statistische Test geht davon aus, dass die Grundgesamtheit der Stichprobe einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung χ^2 folgt. Übersteigt der berechnete Chi-Quadrat-Wert den zum gewählten Signifikanzniveau gehörenden kritischen Signifikanzwert p , kann die Nullhypothese verworfen werden: die beiden untersuchten Merkmale sind dann abhängig voneinander (Storrer, 1995).

⁵ $F_{(v_1, v_2)}$ = F-Wert für v_1 Zählerfreiheitsgrade und v_2 Nennerfreiheitsgrade; p = Signifikanzwert (1- α). Mit einem F-Test wird überprüft, ob sich die Varianzen zweier Stichproben signifikant unterscheiden oder nicht.

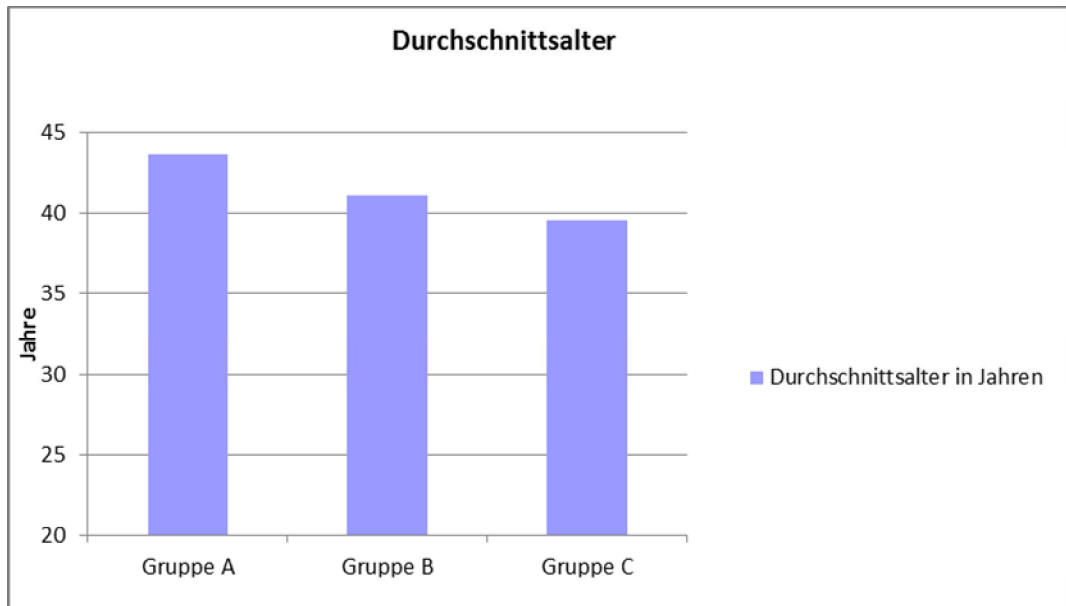


Abbildung 10 Durchschnittsalter der Versuchspersonen

Bezüglich der individuellen Fahrerfahrung wurden drei verschiedene Analysen gemacht. Anhand eines ausgewerteten Fragebogens kann die Anzahl Jahre des Führerausweisbesitzes (Abbildung 11), die Anzahl selbst gefahrener (Abbildung 12) sowie als Beifahrer gemachter (Abbildung 13) Kilometer pro Jahr angegeben werden. Die statistische Auswertung ergibt, dass sich für alle drei Variablen keine signifikanten Mittelwertsunterschiede ergeben (Führerausweisbesitz in Jahren: $F_{(2,60)} = 2.336$, $p = 0.105$; Anzahl Kilometer pro Jahr (als Lenker): $F_{(2,58)} = 1.441$, $p = 0.245$; Anzahl Kilometer pro Jahr (als Beifahrer): $F_{(2,56)} = 0.887$, $p = 0.418$).

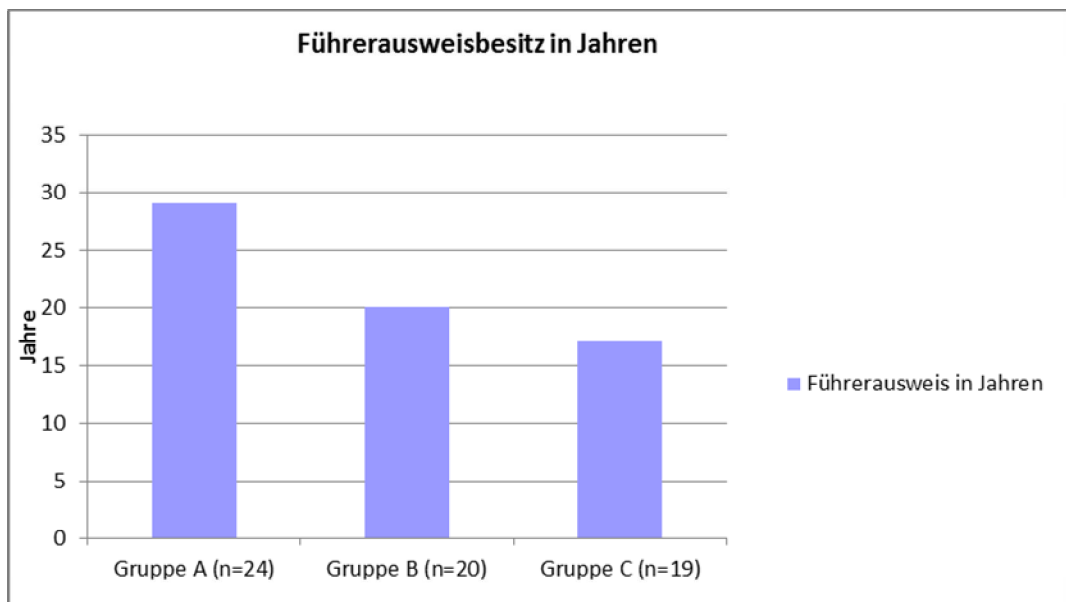


Abbildung 11 Anzahl Jahre des Führerausweisbesitzes

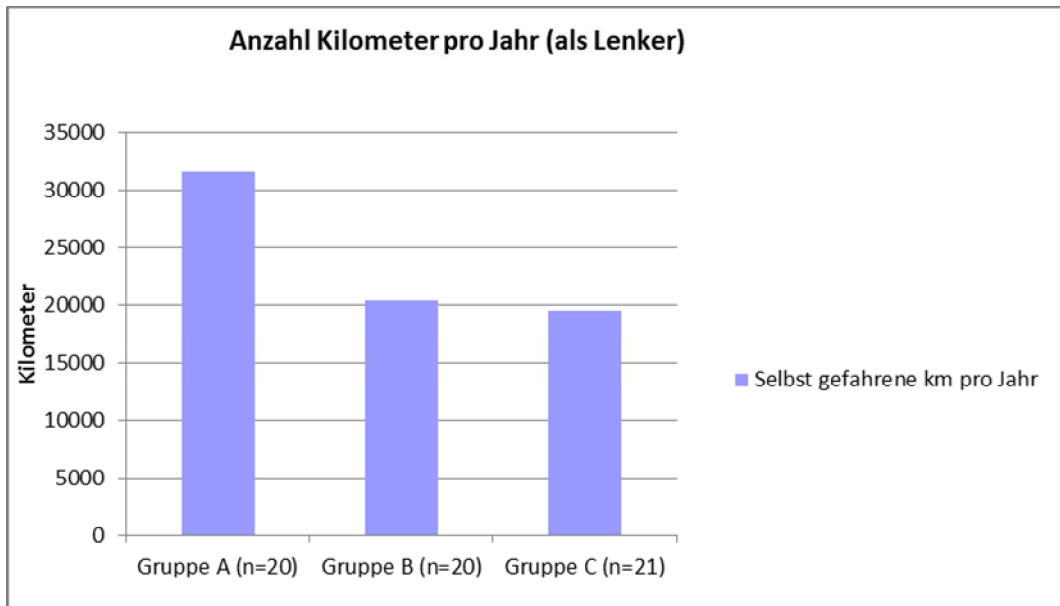


Abbildung 12 Anzahl Kilometer pro Jahr (als Lenker)

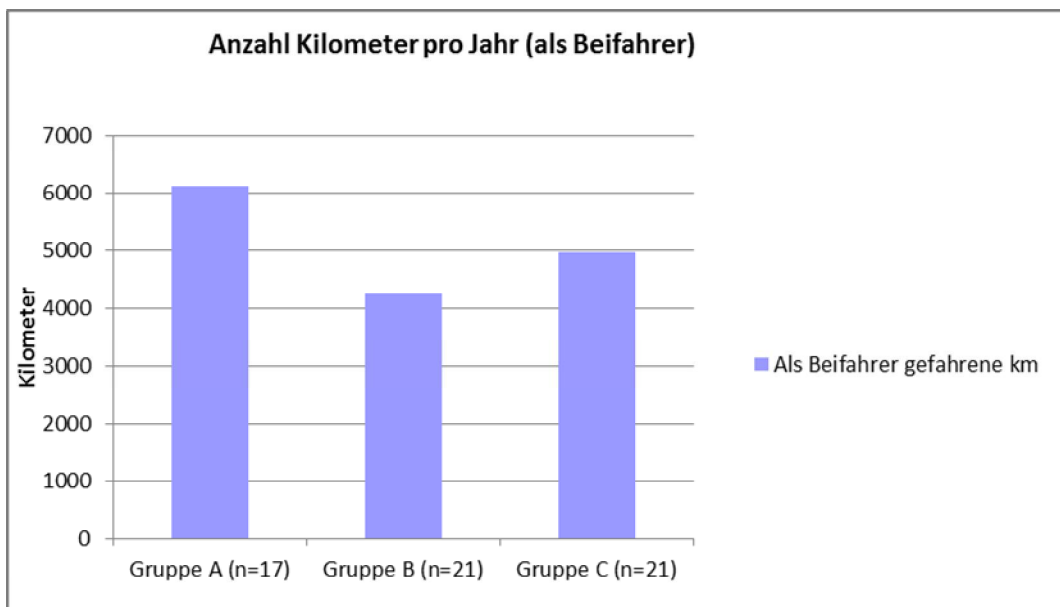


Abbildung 13 Anzahl Kilometer pro Jahr (als Beifahrer)

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Anzahl der zugrundeliegenden Fragebogen nicht mit der Anzahl Versuchspersonen übereinstimmt. Dies rührt daher, dass nicht alle Versuchspersonen den ausgehändigten Fragebogen an die Versuchsleiter retourniert haben.

3.2 Versuchsablauf

Am Abend des 19. Mai 2011 sammelten sich die Versuchsteilnehmer in der Lüftungszentrale Reppischtal, die während des ganzen Experimentes als Aufenthaltsraum diente. Nach der Ankunft wurde den Versuchspersonen eine eindeutig zuweisbare Versuchsnummer auf die Hand geschrieben, welche die spätere statistische Auswertung ermöglichte. Danach hatten sich die Versuchspersonen an ihre vordefinierten Gruppenstandorte zu begeben, wo ihnen folgende Informationen zugetragen wurden:

"Wir werden Sie jetzt in vier Gruppen einteilen und Sie mit einer Nummer kennzeichnen. Die erste Gruppe wird dann um ca. 21.15h mit dem Lift in den Tunnel hinunterfahren. Dort wird Sie ein Bus in einen Abschnitt des Tunnels bringen, der mit harmlosem weissem Rauch gefüllt ist. Nachdem der Bus angehalten hat, wird eine Person nach der andern den Bus verlassen. Ihre Aufgabe ist es, einzeln einen Notausgang zu finden. Denken Sie daran, dass sich auf beiden Seiten des Tunnels entlang der Tunnelwand ein Gehsteig befindet. Sie sollten nicht darüber stolpern."

Falls Sie die Orientierung verlieren, sich nicht mehr getrauen, weiterzugehen oder Hilfe benötigen, rufen Sie mit Ihrem Handy die Notfallnummer an, die sich auf dem ausgehängten Zettel befindet. Beim Notausgang werden Sie von einem Versuchsleiter empfangen und später per Bus wieder zum Lift zurückgefahren. Es kann niemand verloren gehen. Falls Sie nicht innerhalb einer vernünftigen Frist bei einem Notausgang eintreffen, werden wir Sie finden."

Gleichzeitig wurden die Personen darauf aufmerksam gemacht, dass sie jederzeit das Recht haben, ohne Angaben von Gründen, das Experiment abzubrechen und dass ihre Daten absolut anonym verarbeitet werden.

Währenddessen wurde der Versuchsraum in der Tunnelröhre eingerichtet und die Installationen angebracht. Sobald die Verrauchung als genügend erachtet wurde, begann die Verschiebung der ersten Versuchsgruppe vom Aufenthaltsraum in der Lüftungszentrale zur Fahrbahn im Tunnel. Dort angekommen, wurden sie von einem Versuchsleiter in einen Bus geleitet und zum 530 m entfernten Startpunkt im bereits verrauchten Versuchsraum gefahren.

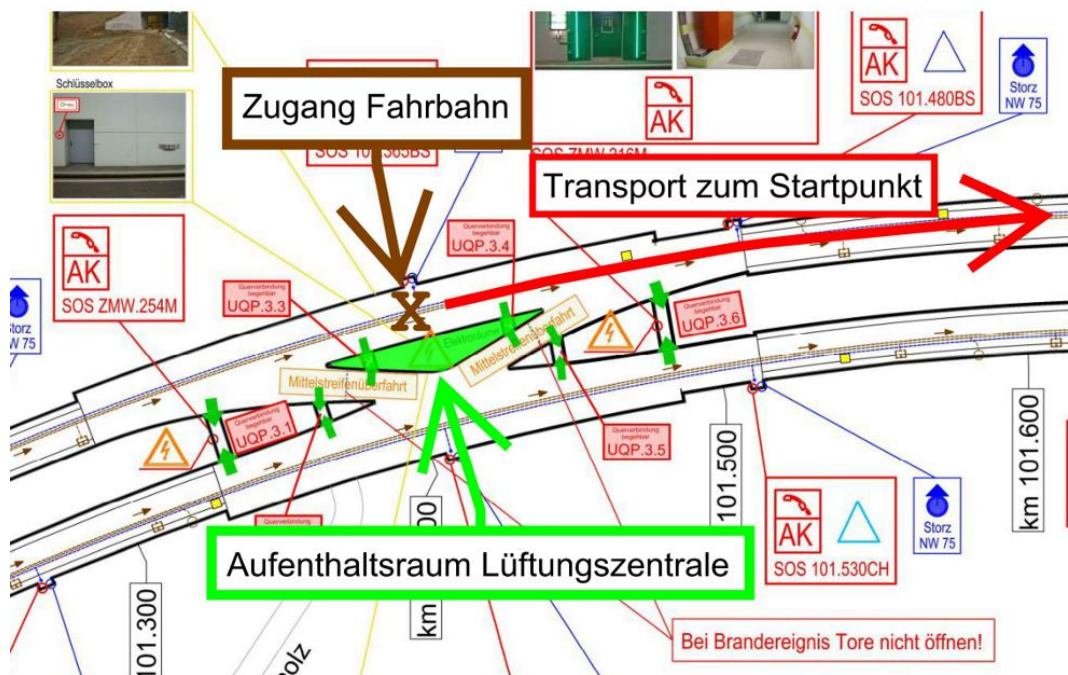


Abbildung 14 Zugang zur Fahrbahn und Transport zum Startpunkt

Sobald sich der Bus mit den Teilnehmern am Startpunkt positioniert hatte, wurden die Versuchspersonen einzeln im Abstand von jeweils 30 Sekunden in die verrauchte Umgebung entlassen. Die Nummer sowie die Startzeit der Versuchsperson wurden notiert. Nachdem die Versuchspersonen entweder in einem Notausgang oder an einer Absperung angekommen waren, wurden deren Nummer und Ankunftszeit wiederum notiert.

Zwei Minuten nach dem Verlassen der letzten Versuchsperson, teilten die Versuchsleiter an den verschiedenen Standorten die Anzahl der dort angekommenen Personen per Funk

an den Koordinator mit. Wenn alle Versuchspersonen registriert werden konnten, wurde das Szenario beendet und die Personen zurück in die Lüftungszentrale gebracht.

Falls noch nicht alle Personen ein Ziel erreicht hatten, waren weitere drei Minuten abzuwarten bevor das Szenario definitiv abgebrochen wurde.

3.2.1 Gruppe A: Ohne akustische Führung

Die Personen der ersten Versuchsgruppe mussten die Notausgänge ohne akustische Führung finden.

Während dieser ersten Kontrollgruppe konnte keine optimale Rauchdichte aufrecht erhalten werden. Zu Beginn des Experimentes konnte die Windgeschwindigkeit im Tunnel mit den Strahlventilatoren an den Portalen noch nicht genügend kontrolliert werden. Sie betrug mehr als die während des Vortests hergeleiteten 0.5 m/s. Dadurch entstand eine sehr heterogene Rauchdichte die an einigen Stellen die Sicht auf ein Minimum von knapp einem Meter beschränkte, an anderen Stellen aber eine beinahe ungehinderte Sicht über die ganze Tunnelbreite zuließ.

Als die Versuchspersonen mit dem Bus zum Startpunkt gefahren wurden, konnten zeitweise die Fluchtwegsignalisationen an den Tunnelwänden aus dem Fahrzeug gesehen werden. Personen die sich diese Angaben eingepägt hatten, konnten sich beim Betreten der Tunnelröhre einfacher orientieren.

Natürlich kann hier angefügt werden, dass eine Verdunkelung der Fahrzeugfenster die Vorbefasstheit der Personen verhindert hätte. Es muss aber betont werden, dass dadurch die ungünstigen Versuchsbedingungen nicht hätten verbessert werden können. Die Sichtverhältnisse schwankten wegen der sich schnell ändernden Rauchdichte beträchtlich, sodass die einen Versuchspersonen beim Betreten des Tunnels ungehindert die Distanzangaben zum nächsten Notausgang lesen konnten, während sich die anderen in dichtem Rauch wiederfanden.

Aufgrund dieser ungleichen Versuchsbedingungen wird das Kontrollscenario der Gruppe A bei den meisten Analysen in Kapitel 4 ausgeschlossen.

3.2.2 Gruppe B: Mit Signalton, Mit Durchsagentext

Für die Gruppe B wurde die akustische Führung über den Notausgängen eingeschaltet. Das akustische Signal setzte sich aus der Kombination eines Signaltons und einer Sprechdurchsage zusammen (vgl. 3.1.1).

Die Verrauchung während dieses zweiten Szenarios konnte optimal aufgebaut werden. Vor dem Transport der Versuchspersonen zum Startpunkt wurde die Rauchverteilung im gesamten Untersuchungsraum überprüft. Erst nachdem die Rauchdichte als genügend stark und homogen verteilt angesehen wurde, konnte der Transport stattfinden.

Durch den gezielten Einsatz der Strahlventilatoren an den beiden Tunnelportalen war es möglich, den Rauch für die ganze Versuchsdauer so zu kontrollieren, dass die Versuchsbedingungen für alle Versuchspersonen der Gruppe B gleich waren. Die Sichtweite betrug während des ganzen Szenarios ca. 1 m.

3.2.3 Gruppe C: Ohne akustische Führung

Da die Versuchsbedingungen der Gruppe A nicht mit denen der Gruppe B vergleichbar waren, wurde das Kontrollscenario wiederholt. Die Teilnehmer in der Gruppe C mussten den optimalen Notausgang wiederum ohne akustische Führung, nur mit den zur Verfügung stehenden visuellen Hilfsmitteln finden.

Die Rauchdichte konnte auch in diesem Gruppentest während der Versuchsdauer konstant dicht gehalten werden. Sie betrug auch diesmal ungefähr 1 m.

Während den beiden vorangegangenen Szenarien fiel auf, dass sich die Notausgangstüren von den Versuchspersonen sehr schwer öffnen liessen. Durch die Versuchsleiter hinter den Türen wurde festgestellt, dass viele Personen die Türfallen der Notausgänge mehrmals betätigten, aber aufgrund des hohen Öffnungsdruckes wieder von der Tür abliessen. Daraufhin wurden die Versuchsbedingungen für die letzte Gruppe C insofern verändert, als dass eine provisorische Unterstützung an der Türe angebracht wurde, die ein leichteres Öffnen ermöglichte.

4 Resultate und Analyse

Nach den theoretischen und methodischen Kapiteln dieser Studie, wird in den folgenden Abschnitten die Aufmerksamkeit auf die eigentlichen Resultate der Untersuchungen gerichtet. Die Erkenntnisse werden in drei separaten Teilen vorgestellt.

Zuerst dienen die direkt anhand der verschiedenen Gruppen erhobenen Messdaten als Grundlage für die Diskussion des Fluchtverhaltens. Zum besseren Verständnis werden die Analysen in Form von Grafiken visualisiert, wobei bei allen Befunden die statistischen Signifikanztests kurz wiedergegeben werden. Als nächstes wird aufgezeigt wie weitere, während dem Versuch gemachte Beobachtungen eine erfolgreiche Selbstevakuierung beeinflussen können. Abschliessend werden die ausgewerteten Antworten der Versuchsteilnehmer in Bezug auf die experimentelle Situation und das allgemeine Sicherheitsgefühl vorgestellt.

4.1 Fluchtverhalten

Für die folgenden Analysen werden nur die Ergebnisse der Gruppen B und C berücksichtigt, da die Versuchsbedingungen (die Rauchdichte) nur bei diesen beiden Gruppen direkt vergleichbar sind.

Ankunftsort

In Tabelle 9 ist aufgezeigt wie sich die Ankunftsorte der Versuchspersonen unterscheiden, je nachdem welcher Gruppe sie angehörten. Die Mitglieder der Gruppe B wurden durch die akustische Führung über den Notausgängen unterstützt; die Gruppe C war die Kontrollgruppe und hatte die Notausgänge ohne akustische Führung zu finden.

Tabelle 9 Zusammenhang zwischen Gruppenzugehörigkeit und Ankunftsort

		Ankunftsort im Tunnel				Gesamt	
		Optimaler Notausgang		Absperrung			
		Absperrung UQP.5	Notausgang UQP.5	Notausgang UQP.4	Absperrung UQP.4		
Gruppe B	Mit akustischer Führung	Beobachtet	11	11	2	0	24
	%		45.8%	45.8%	8.3%	0%	100%
Gruppe C	Ohne akustische Führung	Beobachtet	0	17	10	2	29
	%		0%	58.6%	34.5%	6.9%	100%
Gesamt		Beobachtet	11	28	12	2	53
	%		20.8%	52.8%	22.6%	3.8%	100%

Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass die Häufigkeiten der verschiedenen Kombinationen ungleich verteilt sind. Mit akustischer Führung sind nur 2 Personen zum weiter entfernten Notausgang geflüchtet, während dies in der Gruppe C 10 Versuchspersonen taten. Es fällt aber auf, dass beide Personen die trotz akustischer Führung in die falsche Richtung geflohen sind, schliesslich doch noch einen Notausgang finden und sich in Sicherheit begeben konnten. Dies ist in der Gruppe ohne akustische Führung nicht der Fall. Von den 12 Personen die sich auf den weiter entfernten Weg zu UQP.4 begaben, sind 2 Personen an der Fluchtmöglichkeit vorbei gegangen und erst 40 Meter weiter an der Abstrahlung aufgefangen worden.

Mit akustischer Führung konnten 11 Personen durch den optimalen Notausgang UQP.5 den Tunnelraum verlassen, während 11 weitere Personen erst an der 28 m entfernten Absperrung definitiv registriert werden konnten. Die Begründung für diese Verteilung liegt in der klemmenden Notausgangstüre UQP.5. Nachträgliche Befragungen haben ergeben, dass mindestens 8 Personen die an der Absperrung UQP.5 aufgefangen wurden, zuerst beim Notausgang UQP.5 waren. Da sie Schwierigkeiten hatten diese zu öffnen, begaben sie sich weiter auf der Suche nach einer anderen Fluchtmöglichkeit und kamen dadurch zur Absperrung. Dieser Türeffekt wird in der Gruppe C deutlich sichtbar. Aufgrund der Erleichterung des Türmechanismus, konnten alle 17 Personen die den Notausgang UQP.5 fanden, diesen auch betreten.

In einem nächsten Schritt muss abgeklärt werden, ob die aufgedeckten Unterschiede tatsächlich statistisch signifikant sind. Es soll schliesslich behauptet werden können, dass es einen Zusammenhang gibt zwischen akustischer Führung und dem Ankunftsort im Tunnel. Dafür wird ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Der Test erlaubt die Entscheidung, ob sich Variablen unabhängig voneinander verhalten, oder ob sie in einem Zusammenhang zueinander stehen. Die folgende Nullhypothese wird dabei getestet:

H₀: Der Ankunftsort ist unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit

Der Test ergibt, dass die aufgestellte Hypothese auf einem Signifikanzniveau $\alpha = 0.001$ verworfen werden kann; es gibt einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem Fluchttort der Versuchspersonen ($\chi^2 = 19.319$; $df = 3$; $p < 0.001$).

Fluchtrichtung

Da mit der Erleichterung des Türmechanismus nach der Gruppe B die Versuchsbedingungen leicht verändert wurden, verlieren die obigen detaillierten Auswertungen nach Ankunftsort an Aussagekraft. Um dennoch eine Aussage über die Wirksamkeit der akustischen Führung zu machen, werden in einem weiteren Schritt nur die gewählten Fluchtrichtungen der Versuchspersonen in Betracht gezogen. Es wird im Folgenden also nicht mehr nach Fluchtweg und Absperrung unterschieden, sondern nur noch nach Fluchtrichtung UQP.4 und UQP.5 (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10 Zusammenhang zwischen Gruppenzugehörigkeit und Fluchtrichtung

			Fluchtrichtung im Tunnel		
			Optimale Fluchtrichtung		
			Richtung UQP.5	Richtung UQP.4	Gesamt
Gruppe B	Mit akustischer Führung	Beobachtet	22	2	24
		%	91.7%	8.3%	100%
Gruppe C	Ohne akustische Führung	Beobachtet	17	12	29
		%	58.6%	41.4%	100%
Gesamt	Beobachtet		39	14	53
	%		73.6%	26.4%	100%

Diese neuen Betrachtungen verdeutlichen den unterstützenden Effekt der akustischen Führung. Über 91% der Personen in einem verrauchten Tunnel können in die Richtung des näheren Notausgangs geführt werden, wenn dieser durch akustische Signale kenntlich gemacht wird. Ohne akustische Führung begeben sich lediglich knapp 59% auf den optimalen Fluchweg.

Durch die Visualisierung in Abbildung 15 wird zudem ersichtlich, dass in der Gruppe C die Differenz zwischen den beiden möglichen Fluchtrichtungen relativ viel kleiner ist als in der Gruppe A (17.2% vs. 83.4%). Dies deutet darauf hin, dass sich Personen eher zufällig für eine Fluchtrichtung entscheiden wenn die Sicht im Tunnel auf ein Minimum reduziert ist und keine akustischen Signale den optimalen Weg weisen. Finden sich hingegen Personen in einer verrauchten Umgebung wieder in der akustische Hilfsmittel eingesetzt sind, wird ihnen die Entscheidung für eine einzuschlagende Fluchtrichtung erleichtert. Die Personen begeben sich schneller auf den Weg zum näher klingenden Locksignal.

Daten der Gruppe A sind in Abbildung 15 nicht berücksichtigt. Dass mehr Personen der Gruppe A in Richtung UQP.5 gegangen sind, kann auch darauf zurück geführt werden, dass sie wegen der geringen Rauchdichte die Distanzangaben auf den Hinweistafeln leicht wahrnehmen konnten. Ein Rückschluss auf die Wirksamkeit der akustischen Führung wird dadurch verunmöglicht.

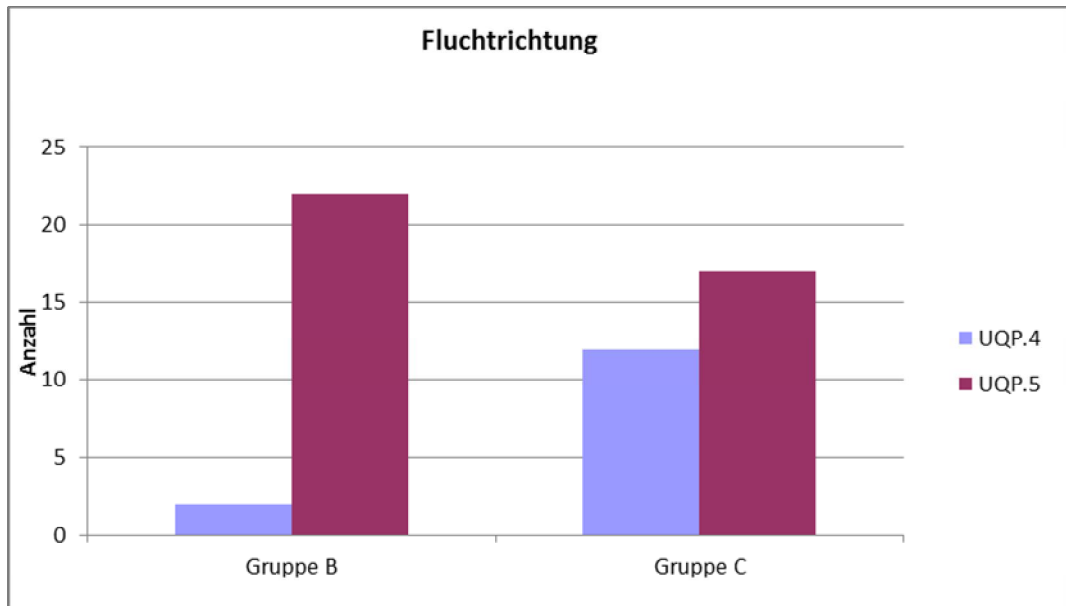


Abbildung 15 Anzahl Personen und deren Fluchtrichtung

Es ist selbsterklärend, dass durch diese übergeordnete Betrachtung keine Aussage gemacht werden kann, ob die Personen den optimalen Notausgang schliesslich auch durchschreiten oder ob sie an ihm vorbeilaufen. Ein Vergleich mit Tabelle 9 sowie den nachträglichen Befragungen zeigt jedoch klar, dass mit akustischer Führung sämtliche Versuchspersonen die sich in die optimale Fluchtrichtung begaben, denn Notausgang auch fanden. Abbildung 15 ist somit vor diesem Hintergrund zu interpretieren.

Auch für diese Analysen wurde ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Die Nullhypothese

H₀: Die Fluchtrichtung ist unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit

kann ebenfalls verworfen werden. Es gibt einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und der Fluchtrichtung der Versuchspersonen ($\chi^2 = 7.378$; $df = 1$; $p = 0.007$).

Es stellt sich die Frage, ob sich Mann und Frau in der Wahl der Fluchtrichtung unterscheiden. Um zu überprüfen, ob das obige signifikante Ergebnis bezüglich der Fluchtrichtung vom Geschlecht der Versuchspersonen abhängt, wurde ein multivariater Test durchgeführt. Eine Log-lineare Analyse⁶ ergab keinen signifikanten dreifachen Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit, des Geschlechts und der Wahl der Fluchtrichtung ($\chi^2 = 2.629$; $df = 2$; $p = 0.269$).

4.2 Weitere Erkenntnisse

Wie bereits oben angedeutet, konnten während des Experimentes weitere Beobachtungen gemacht werden, die aufgrund des Versuchsaufbaus nicht erwartet wurden.

Türproblematik

In Kapitel 3.2.3 wurde erklärt, wie die Versuchsbedingungen für die Kontrollgruppe C leicht verändert wurde. Während den vorangegangenen Gruppentests wurde offensichtlich, dass viele Versuchspersonen Mühe hatten die Notausgangstüre aufzustossen. Es scheint, dass der Überdruck in den Querverbindungen in Kombination mit dem Öffnungsdruck der Notausgangstüren ein für die Versuchsteilnehmer unerwartet schweres Öffnen

⁶ Eine Log-lineare Analyse ist eine Erweiterung des zweidimensionalen Chi-Quadrat-Tests (Kontingenztafel) und prüft, ob zwischen mehr als zwei nominalskalierten Variablen ein Zusammenhang besteht.

der Türen bewirkte.

Gemäss der Richtlinie für die Lüftung der Sicherheitsstollen (ASTRA, 2008) sind bei zweiröhriigen Strassentunneln die Türen der Querverbindungen so auszulegen, dass ein Rauchübertrag in die benachbarte Tunnelröhre minimiert wird. In Sonderfällen sind dafür mechanische Lüftungen in den Querverbindungen nötig, die für einen permanenten Überdruck gegenüber den Fahrbahnen sorgen. Die Lüftungen in den Querverbindungen des Uetlibergtunnel sind richtlinienkonform ausgelegt und sorgen im Durchschnitt für jeweils ca. 50 Pa Überdruck.

Weiter schreibt die Richtlinie für Türen in Strassentunneln vor, dass die Notausgangstüren mit einer maximalen Öffnungskraft von 120 N geöffnet werden können müssen (ASTRA, 2009). Die Öffnungskraft darf diesen Wert nicht überschreiten, auch wenn der Betriebsdruck der Lüftungen aufgrund eines Ereignisfalles im Tunnel steigt.

Die Personen, welche Schwierigkeiten beim Öffnen der Notausgangstüre UQP.5 hatten, konnten nicht ordnungsgemäss für diesen Ankunftsort erfasst werden. Um Klarheit über das genaue Fluchtverhalten der Personen zu erhalten wurde der Öffnungsmechanismus erleichtert. Dadurch sollte in der Gruppe C erreicht werden, dass alle Personen die zur optimalen Tür UQP.5 gelangten, auch dort registriert werden konnten. Als Erleichterung wurde ein kleines Metallstück in den Türrahmen gelegt, welches verhinderte, dass die Türe ins Schloss fiel. Der schmale Öffnungsspalt der Tür führte zu einem Druckausgleich und ermöglichte somit eine leichte Türöffnung für die Mitglieder der Gruppe C.

Nachfolgend werden die Kommentare der Versuchsteilnehmer in Bezug auf die Türproblematik analysiert. Abbildung 16 illustriert die Anzahl der Personen, die während des gesamten Experimentes Probleme bei der Türöffnung gemeldet haben.

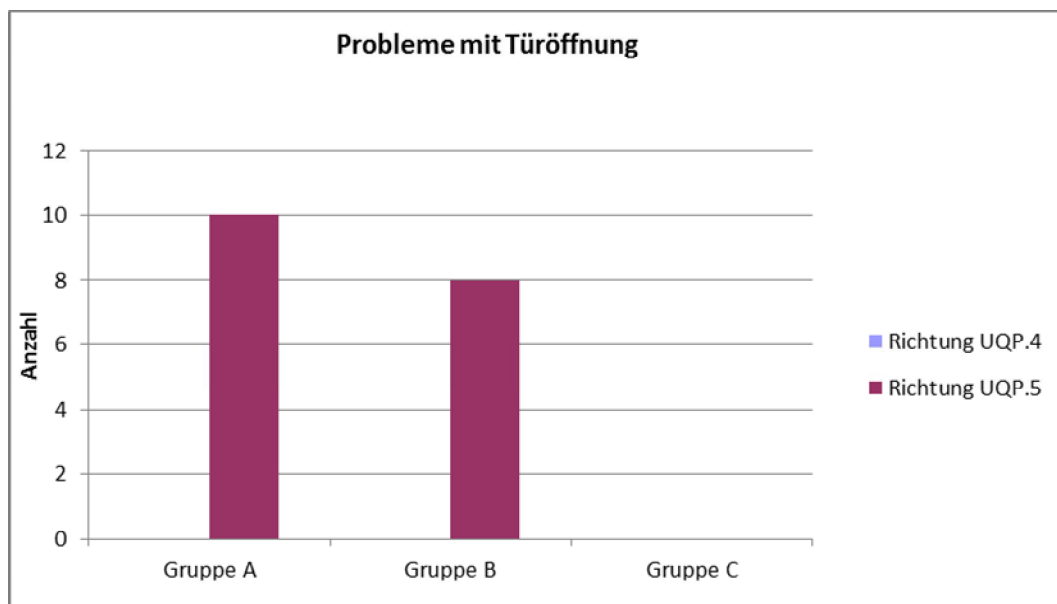


Abbildung 16 Anzahl gemeldeter Schwierigkeiten bei der Türöffnung pro Gruppe

Es fällt sofort auf, dass mit der angebrachten Erleichterung an der Notausgangstür, die Anzahl der Problemmeldungen auf null sinkt. Dies bestätigt das frühere Argument, dass in der Gruppe B die klemmende Tür der Hauptgrund war für das Weitergehen der Versuchspersonen bis zur Absperrung UQP.5.

Ebenfalls ersichtlich ist, dass Probleme nur beim Notausgang UQP.5 auftauchten; die Personen die in Richtung des weiter entfernten Notausganges UQP.4 flüchteten bekundeten keine Schwierigkeiten.

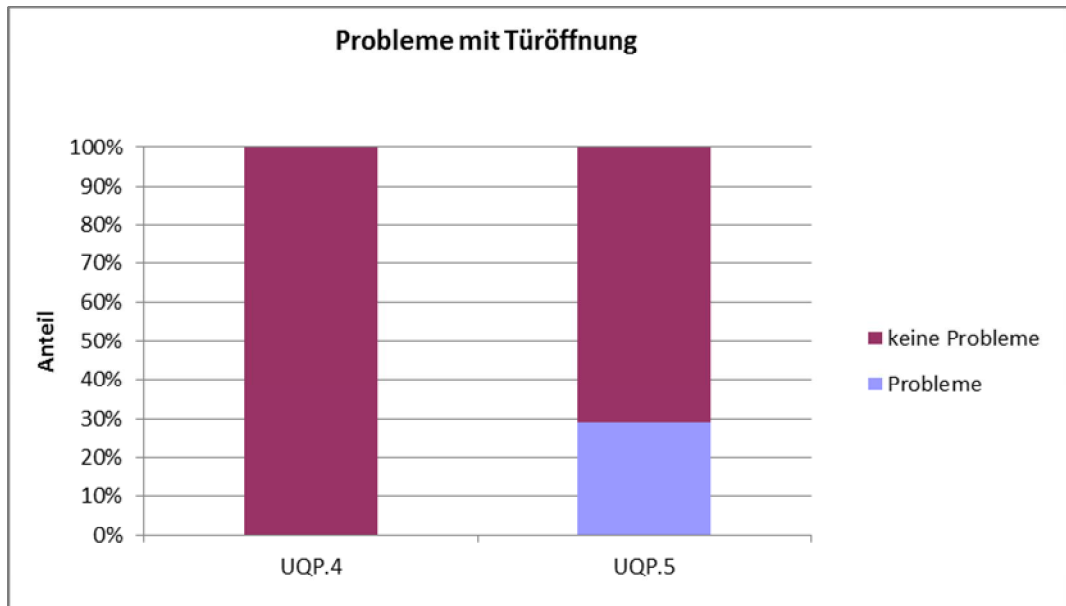


Abbildung 17 Anteil der gescheiterten Öffnungsversuche pro Notausgang

Abbildung 17 illustriert, dass die 18 Personen die während des gesamten Experimentes in Richtung des Notausgangs UQP.4 geflüchtet sind, keinerlei Probleme mit der Tür bekundeten. Ein weiterer Erklärungsgrund für diese einseitige Problematik liegt im Versuchsaufbau. Die akustische Schaltzentrale mit der die verschiedenen Lautsprecher Systeme angesteuert werden konnten, wurde unmittelbar nach der Absperrung UQP.5, bei den Rauchmaschinen eingerichtet. Da der nötige Strom aus dem Querschlag UQP.5 bezogen wurde, musste ein Netzkabel durch den Türspalt bis hin zur Schaltzentrale verlegt werden. Aufgrund seiner Keilwirkung erschwerte dieses Kabel zusätzlich zur aufzuwendenden grossen Öffnungskraft und zum vorherrschenden Überdruck im Querschlag, das Öffnen der Tür. Im Notausgang UQP.4 fehlte ein solches Netzkabel.

Abschliessend muss jedoch festgehalten werden, dass ein allein auf das Netzkabel ausgerichteter Erklärungsversuch für die Türproblematik zu kurz greifen würde. Nachträgliche Abklärungen haben ergeben, dass sich auch die Notausgangstüre UQP.4 nur mit grosser Kraftaufwendung öffnen liess. Das Netzkabel in Ausgang UQP.5 war aber ein zusätzlich erschwerender Faktor der dazu führte, dass viele Versuchspersonen den Versuch nach einer gewissen Zeit aufgaben und lieber nach einem anderen Fluchtweg suchten.

Fluchtgeschwindigkeit

Da die Start- und Ankunftszeit der Versuchspersonen zusammen mit der persönlichen Versuchsnummer der Personen notiert wurden, lassen sich auch Angaben über deren Fortbewegungszeiten machen. Für die Untersuchung der Fluchtgeschwindigkeit der Versuchspersonen wird das erste Szenario der Gruppe A ebenfalls integriert und mit den Szenarien B und C verglichen.

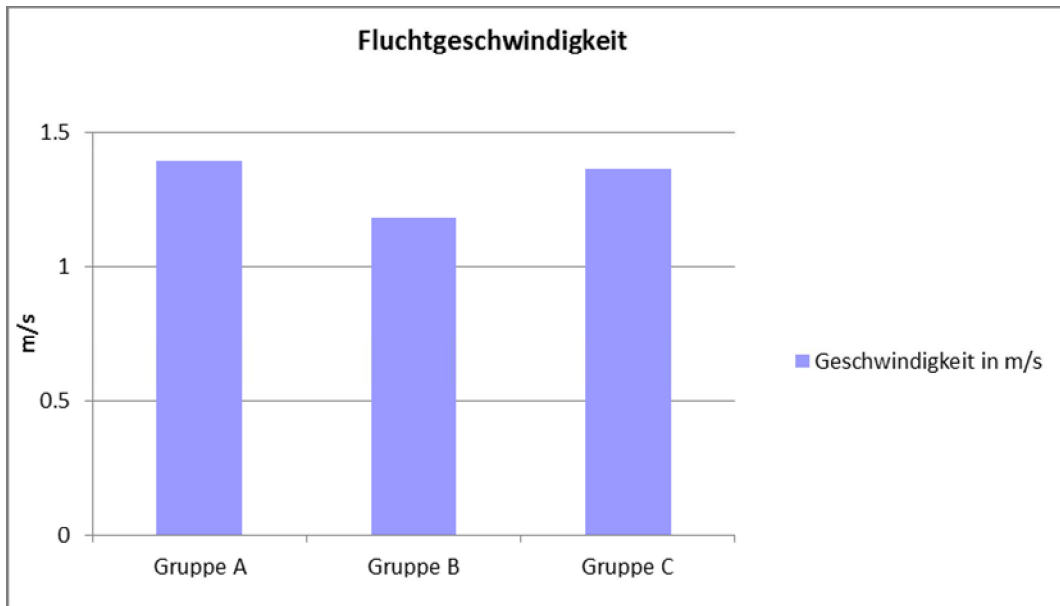


Abbildung 18 Durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit in m/s, aufgeteilt nach Gruppen

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um die tatsächliche Fortbewegungsgeschwindigkeit der Versuchspersonen handelt, sondern vielmehr um Durchschnittswerte, oder noch eher um deren Aufenthaltsdauer im Tunnelraum. Personen die den Notausgang aufgrund der akustischen Führung schnell auffinden konnten, jedoch viel Zeit mit dem Öffnungsversuch versäumten, weisen dementsprechend eine lange Aufenthaltszeit im Tunnel auf. Aber auch Personen, die auf Umwegen zum korrekten Notausgang gelangten, weisen in dieser Statistik eine langsame Fluchtgeschwindigkeit auf, auch wenn sie sich während ihrer Suche schnell fortbewegten. Der geringe Unterschied zwischen der Gruppe B und der Gruppe C deutet jedoch darauf hin, dass sich die Fluchtgeschwindigkeit von Personen in starker Verrauchung durch akustische Hilfsmittel nicht beeinflussen lässt. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass die schlechte Sicht aufgrund des Rauches der limitierende Faktor für die Fluchtgeschwindigkeit ist.

Dieser Befund deckt sich mit anderen Studien. Boer (2002) erwähnt in seiner Studie ebenfalls, dass sich alle Versuchsteilnehmer ungefähr gleich schnell durch den Rauch bewegten, unabhängig davon, ob akustische Führung vorhanden war oder nicht.

Tatsächlich hat in der vorliegenden Studie eine einfaktorielle Varianzanalyse keine signifikanten Unterschiede in der Fluchtgeschwindigkeit zwischen den drei Gruppen ergeben ($F_{(2,74)} = 2.303$, $p = 0.107$). Es fällt aber dennoch auf, dass die Gruppe B die langsamste Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist. Um dies zu klären wurde die Analyse erweitert und zusätzlich nach dem Ankunftsort der Versuchspersonen unterschieden. Abbildung 19 zeigt die durchschnittliche Geschwindigkeit separat für die drei Gruppen sowie die Ankunftsorte der Versuchspersonen.

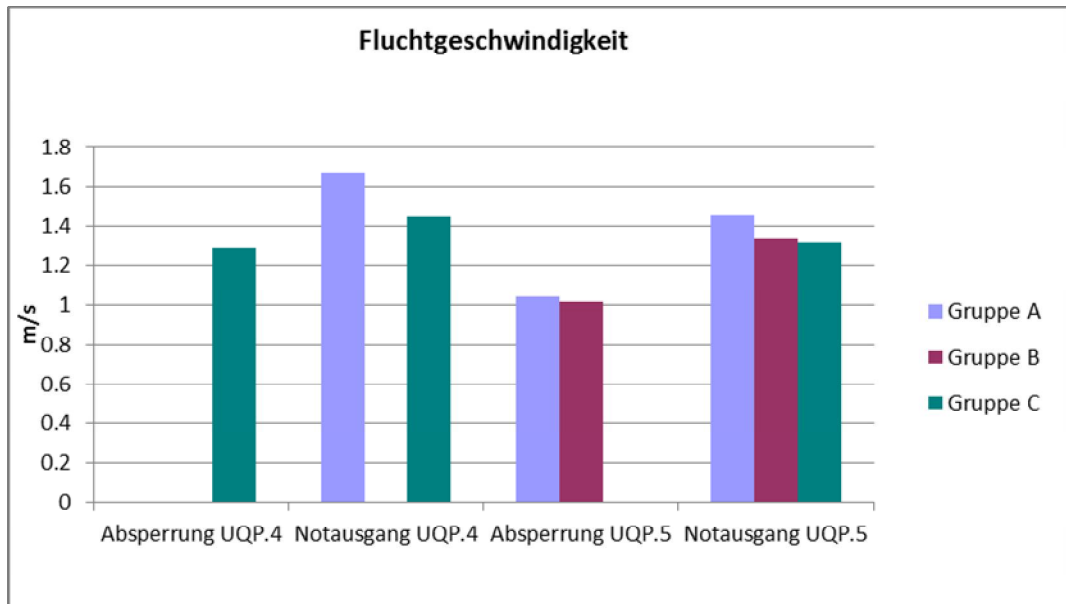


Abbildung 19 Durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit in m/s, aufgeteilt nach Ankunftsort

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse zeigt, dass auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen vorhanden sind ($F_{(2,69)} = 1.022$, $p = 0.365$). Es wird jedoch offensichtlich, dass der neu hinzugefügte Faktor "Ankunftsort" signifikant wird ($F_{(3,69)} = 4.594$, $p = 0.005$).

Die langsamsten Geschwindigkeiten weisen Personen der Gruppen A und B auf, die in Richtung der Absperrung UQP.5 geflüchtet sind. Diese Tatsache deutet auf den Türeffekt hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Personen während der Evakuierung vergeblich bemüht haben, die Notausgangstüre UQP.5 zu öffnen und deshalb viel Zeit verloren haben. Der Unterschied zwischen ihrer Start- und Ankunftszeit vergrößerte sich dadurch und die Verrechnung mit der Fluchtdistanz ergibt schliesslich einen kleinen Geschwindigkeitswert.

Die Türproblematik kann also auch unabhängig von den Befragungen, anhand der Analyse der Fluchtgeschwindigkeiten sichtbar gemacht werden.

4.3 Erkenntnisse aus dem Fragebogen

Den Versuchsteilnehmern wurden im Anschluss an das Experiment mehrere Fragen in Bezug auf die experimentelle Situation und Sicherheitsgefühl gestellt. In den nächsten Abschnitten werden die daraus gezogenen Erkenntnisse diskutiert.

Experimentelle Situation

Als erstes sollte überprüft werden, ob die simulierte kritische Situation von den Versuchspersonen auch als solche wahrgenommen wurde.

Tabelle 11 Häufigkeitsverteilung – Experimentelle Situation**Ich habe die experimentelle Situation gar nicht ernst nehmen können (n=80)**

	Häufigkeit	Prozent	Kumulierte Prozent
Stimmt überhaupt nicht	23	28.8	28.8
Stimmt eher nicht	21	26.3	55.0
Mitte	19	23.8	78.8
Stimmt eher	13	16.3	95.0
Stimmt völlig	4	5.0	100

Es ist klar, dass eine absolut realistische Situation allein aus ethischen Gründen nicht mit Versuchspersonen getestet werden kann. Dies war aber auch nicht das Ziel der Untersuchung. Um eine Aussage über den Effekt der akustischen Führung machen zu können, reicht es aus, wenn die Sicht auf ein Minimum reduziert wird, sodass die einzige Variable die akustische Führung bleibt.

Es fällt aber dennoch auf, dass mehr als die Hälfte der Teilnehmer die experimentelle Situation trotz fehlendem giftigen Rauch und Verkehrschaos im Tunnelraum ernst nehmen konnten.

Verunsicherung

Ein wesentlicher Faktor, der eine erfolgreiche Selbstrettung aus kritischen Situationen verhindern kann, ist die Verunsicherung der Personen. Wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, können komplexe Situationen Menschen in der Masse verunsichern, dass sie nicht mehr rational handeln. Es ist deshalb interessant herauszufinden, ob die künstlich herbeigeführte Selbstrettungssituation für die Versuchspersonen auch irritierend wirkte.

Tabelle 12 Häufigkeitsverteilung – Verunsicherung**Die Situation im verrauchten Tunnel hat mich verunsichert (n=80)**

	Häufigkeit	Prozent	Kumulierte Prozent
Stimmt überhaupt nicht	35	43.8	43.8
Stimmt eher nicht	22	27.5	71.3
Mitte	9	11.3	82.5
Stimmt eher	12	15.0	97.5
Stimmt völlig	2	2.5	100

Tabelle 13 macht deutlich, dass sich die Teilnehmer während des Experimentes kaum verunsichert fühlten. Dies scheint im ersten Moment erstaunlich, lässt sich aber mit der Vorinformation der Personen erklären. Die Versuchspersonen wussten im Vorfeld zwar nicht, dass akustische Führung getestet würde, wohl aber, dass sie sich in einen mit künstlichem Theaterrauch gefüllten Tunnel begeben werden und das ganze Experiment überwacht werden wird. Insofern wussten sie ungefähr, was auf sie zukommen wird und dass die experimentelle Situation für sie ungefährlich sein wird. Es ist davon auszugehen, dass ein wirkliches Brandereignis im Tunnel mit starker Rauchentwicklung die Personen

in einen stressvollen Gefühlszustand versetzt, der Verunsicherung auslösen wird (vgl. Nilsson *et al.*, 2009).

Es ist erwähnenswert, dass sich die drei Gruppen in Bezug auf die gefühlte Verunsicherung im verrauchten Tunnel signifikant unterscheiden ($F_{(2,77)} = 7.683$, $p = 0.001$). Tabelle 13 zeigt die jeweiligen Gruppenmittelwerte für den Grad der Verunsicherung, wobei die Antworten anhand einer Ordinalskala geordnet werden: die Antwort "Stimmt überhaupt nicht" wurde mit "1", die Antwort "Stimmt völlig" mit "5" kodiert.

Tabelle 13 Mittlere Verunsicherung im Tunnel

	N	Mittelwert	Standardfehler des Mittelwerts
Gruppe A	27	1.44	0.111
Gruppe B	24	2.08	0.255
Gruppe C	29	2.59	0.241

Die Gruppen A und C unterscheiden sich signifikant voneinander; die Gruppe B liegt dazwischen und unterscheidet sich nicht signifikant von den anderen beiden Gruppen.

Gruppe A und Gruppe C waren zwar beide Kontrollgruppen, hatten jedoch unterschiedliche Rauchverhältnisse. Während sich im Szenario A die Verrauchung sehr heterogen und schwach zeigte, war sie im Szenario C sehr dicht und gleichmässig verteilt. Die Resultate lassen also darauf schliessen, dass vor allem der Grad der Verrauchung ein Gefühl der Verunsicherung hervorruft.

Orientierung

Es stellt sich die Frage, ob sich die Versuchspersonen leicht fiel, sich im verrauchten Tunnel zu orientieren.

Tabelle 14 Häufigkeitsverteilung – Orientierung

Es fiel mir leicht, mich auf dem Weg vom Bus zum Notausgang zu orientieren (n=80)			
	Häufigkeit	Prozent	Kumulierte Prozent
Stimmt überhaupt nicht	3	3.8	3.8
Stimmt eher nicht	1	1.3	5.0
Mitte	8	10.0	15.0
Stimmt eher	13	16.3	31.3
Stimmt völlig	55	68.8	100

Die Mehrheit der Versuchspersonen war der Ansicht, dass eine Orientierung im Tunnel einfach war. Es ist erstaunlich, dass mit einer genaueren Analyse der Antworten keine signifikanten Gruppenunterschiede festgestellt werden konnten. Das bedeutet, dass den Personen während des Szenarios C (starke Verrauchung, ohne akustische Führung) die Orientierung ebenso einfach fiel wie jenen während den Szenarien A (schwache Verrauchung, ohne akustische Führung) und B (starke Verrauchung, mit akustischer Führung).

Angstgefühl

Das menschliche Verhalten in kritischen Situationen kann nicht nur durch Verunsicherung sondern auch durch subjektive Angst wesentlich beeinflusst werden. Es war jedoch nicht klar, wie die Versuchspersonen auf die experimentelle Situation reagieren würden und ob sie für gewisse Teilnehmer angstausslösend sein kann.

Tabelle 15 Häufigkeitsverteilung – Angstgefühl

Im Tunnel hatte ich Angst (n=80)			
	Häufigkeit	Prozent	Kumulierte Prozent
Stimmt überhaupt nicht	61	76.3	76.3
Stimmt eher nicht	12	15.0	91.3
Mitte	2	2.5	93.8
Stimmt eher	3	3.8	97.5
Stimmt völlig	2	2.5	100

Auch Tabelle 15 belegt, dass der für die vorliegende Studie nötige Versuchsaufbau kaum genutzt werden kann, um das menschliche Verhalten während Brandereignissen zu untersuchen. Über 90% der Versuchsteilnehmer behaupteten anschliessend, keine Angst gefühlt zu haben. Diese Reaktionen, wie auch die Angaben über die subjektive Verunsicherung sind wahrscheinlich auf das experimentell bedingte Vorwissen der Versuchspersonen zurückzuführen. Tatsächlich stehen Personen während eines realen Ereignisses unter hohem Stress, was zu Beeinträchtigungen von Wahrnehmung und kognitiven Fähigkeiten und damit zu Angst- bzw. Panikgefühlen führen kann. Unangepasstes Verhalten kann die Folge davon sein.

Vorwissen

Eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Selbstrettung ist, dass Tunnelnutzer über das Vorhandensein der Sicherheitseinrichtungen Bescheid wissen. Nach den katastrophalen Tunnelereignissen in den letzten 10 Jahren, wurden grosse Bestrebungen unternommen, das Wissen der Tunnelnutzer zu verbessern (vgl. PIARC, 2008; Martens, 2008). Wie in Färber & Färber (2010) erläutert, variiert das Vorwissen von Tunnelnutzern über die Sicherheitsvorrichtungen in Tunneln stark. Aus diesem Grund wurden die Versuchspersonen nach dem Experiment auch nach deren Vorwissen gefragt, und ob sie bereits vor dem Experiment gewusst hätten, wie die Notausgänge zu finden seien.

Tabelle 16 Häufigkeitsverteilung – Vorwissen

Schon vor dem Experiment wusste ich, wie ich am besten den Notausgang finden würde (n=78)			
	Häufigkeit	Prozent	Kumulierte Prozent
Stimmt überhaupt nicht	10	12.8	12.8
Stimmt eher nicht	10	12.8	25.6
Mitte	15	19.2	44.9
Stimmt eher	16	20.5	64.4
Stimmt völlig	27	34.6	100

Rund zwei Drittel der Teilnehmer geben an, schon im Vorfeld gewusst zu haben, wie sich die Notausgänge finden liessen. Aufgrund der Tatsache, dass Selbstevakuierungen auch für häufige Tunnelnutzer sehr seltene Ereignisse sind, kann dieses Resultat berechtigterweise hinterfragt werden. Es muss zudem in Betracht gezogen werden, dass sich einige Teilnehmer nach ihrer Anmeldung zum Experiment über Evakuationsmöglichkeiten und Sicherheitseinrichtungen in Tunneln informierten und deshalb so geantwortet haben.

Einschätzung eines Brandereignisses

Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass das menschliche Verhalten in kritischen Situationen sehr oft von falschem Glauben und unzureichender Einschätzung geprägt wird. So wurden die Versuchspersonen zum Schluss des Fragebogens noch gebeten, einerseits die Temperatur im Tunnel nach 4 Minuten Brandereignis sowie die zur Verfügung stehende Zeit für eine erfolgreiche Selbstrettung zu schätzen.

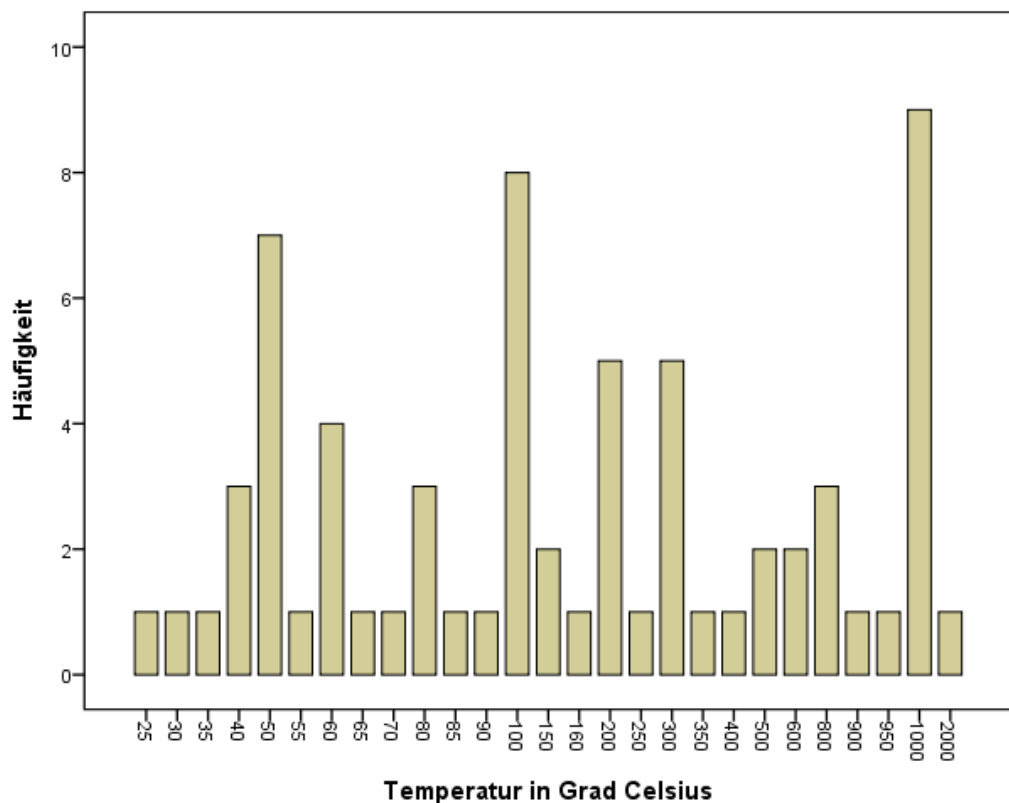


Abbildung 20 Häufigkeitsverteilung der geschätzten Temperatur

Auf den ersten Blick fällt die sehr grosse Streuung der Antworten auf, wobei nur wenige Antworten im realistischen Bereich zwischen 800 und 1300 Grad Celsius liegen (vgl. Ingason & Wickström, 2006; SIA Zürich, 2004; Modic, 2003). Es stellt sich nun die Frage, ob die Antworten abhängig vom Geschlecht der Versuchspersonen sind.

Tabelle 17 Geschätzte Temperatur 4 Minuten nach Brandbeginn

	N	Mittelwert	Standardabweichung des Mittelwerts
männlich	39	275.38 °C	51.939 °C
weiblich	29	443.97 °C	88.867 °C

Tabelle 17 zeigt, dass die Temperatur im Tunnel vier Minuten nach der Brandentstehung allgemein viel zu tief eingeschätzt wird. Ein t-Test für unabhängige Stichproben bestätigt

jedoch, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden kann ($t_{(66)} = -1.638$, $p = 0.108$). Die männlichen Versuchspersonen unterschätzen die maximale Temperatur im Tunnel im gleichen Masse wie die weiblichen.

Die verfügbare Zeit für eine sichere Selbstevakuierung wird allgemein realistisch unter 5 Minuten eingeschätzt (vgl. Abbildung 21).

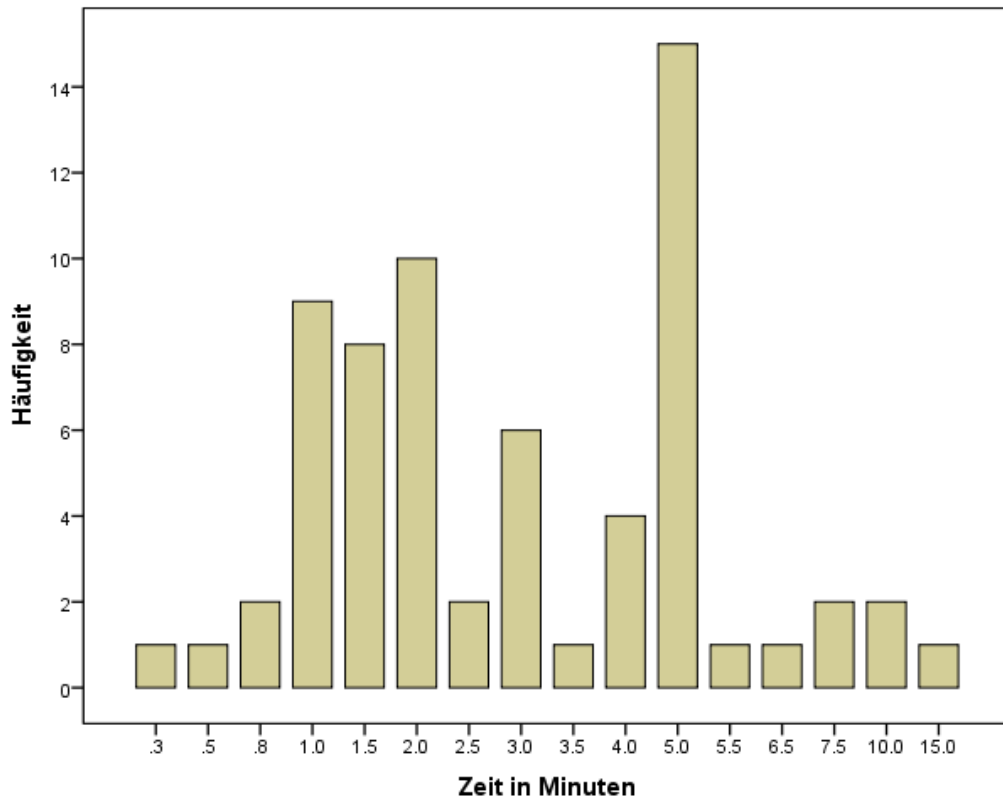


Abbildung 21 Häufigkeitsverteilung der zur Verfügung stehenden Evakuationszeit

Es darf jedoch bezweifelt werden, ob die Antworten der Versuchspersonen so dicht bei einander lägen, wenn in der vorherigen Frage nach der Temperatur nicht ein offensichtlich relevanter Zeitraum von vier Minuten angegeben worden wäre. In diesem Falle wäre der Streubereich sicherlich breiter.

In Tabelle 18 wird erneut untersucht, ob sich die Einschätzungen der männlichen Teilnehmer von jenen der weiblichen unterscheiden.

Tabelle 18 Geschätzte Zeit um sich in Sicherheit bringen zu können

	N	Mittelwert	Standardabweichung des Mittelwerts
männlich	37	2.805 min	0.3645 min
weiblich	29	4.103 min	0.5433 min

Diese genauere Analyse weist darauf hin, dass die Antworten tatsächlich geschlechtsabhängig sind ($t_{(64)} = -2.051$, $p = 0.044$). Männer schätzen die verfügbare Zeit signifikant kürzer ein als die weiblichen Teilnehmer.

Die vorliegenden Befunde decken sich im Groben mit weiteren Studien bezüglich der Risikowahrnehmung von Tunnelnutzern (vgl. Gandit *et al.*, 2009).

5 Schlussfolgerung

Die Fragestellung, ob akustische Führung die Selbstrettung während eines Ereignisfalles im Strassentunnel unterstützt, kann mit einem Ja beantwortet werden.

Es wurde aufgezeigt, dass mehr Personen zum näheren Notausgang flüchten, wenn über den Notausgangstüren Lautsprecher installiert sind die ein lockendes Signal aussenden. Diese Tatsache gewinnt umso mehr an Bedeutung, als dass die herkömmlichen optischen Hilfsmittel wie Blitzlichter und Signalisationstafeln ihre unterstützende Funktion mit zunehmender Rauchdichte verlieren.

Die folgenden Abschnitte in Kapitel 5.1 fassen die prominentesten Feststellungen noch einmal zusammen. Die Diskussion der wesentlichen Erkenntnisse folgt dem Aufbau der gesamten Studie und beleuchtet zuerst die eingesetzten Lautsprechersysteme sowie das akustische Signal. Anschliessend wird der Effekt der akustischen Führung auf die Flucht-richtung von Personen diskutiert, bevor der Fokus zum Schluss auf die eher unerwartete Problematik der strengen Türöffnung gerichtet wird.

Aus diesen zentralen Schlussfolgerungen werden in Kapitel 5.2 ein Blick in die Zukunft gemacht und spezifische Fragestellungen für weiterführende Forschungen aufgeworfen.

5.1 Diskussion

Lautsprecher

Die eingesetzten Lautsprechersysteme haben sich bewährt. Die erste wichtige Voraussetzung für die Wahl der Lautsprecher war, dass sie der groben und aggressiven Tunnelumgebung standhalten können. Die Lautsprechersysteme wurden für den Vortest über den Notausgängen installiert und bis zum eigentlichen Experiment hängen gelassen. Während diesem Monat waren die Lautsprechersysteme den realen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Nach diesem Zeitraum konnte festgestellt werden, dass sich die Winkeleinstellungen durch die starken Luftstösse im Tunnel nicht verändert hatten. In Anbetracht der sehr einfachen Installationen, ist dies positiv zu bewerten. Es verdeutlicht, dass den technischen Anforderungen an Lautsprecherkonstruktionen für die akustische Führung auch unter geringem Aufwand und mit einfachen Mitteln nachgekommen werden kann.

Da eine allfällige Bestückung eines Tunnels eine grosse Anzahl an Lautsprechern bedingen würde, müssten diese in einer zweiten Voraussetzung kostengünstig sein. Die äusserst robusten Trichterlautsprecher erfüllten auch dieses Kriterium, ohne dass weitere wichtige Eigenschaften, wie Belastbarkeit, Frequenzbereich oder Reichweite eingebüsst worden wäre.

Das angewandte *Line-Array* der Lautsprecher hat sich für den Zweck der akustischen Führung im Strassentunnel bewährt. Durch die vertikale Aneinanderreihung von fünf Lautsprechern konnte die Beschallung einer räumlich begrenzten Fläche genügend gesteuert werden, sodass allzu störende Reflexionen vermieden wurden. Zwischen den beiden Notausgängen wurde ein STI von 0.42, bzw. ein Schalldruckpegel zwischen 83 dB und 86 dB gemessen, was unter den schwierigen akustischen Bedingungen im Tunnel als befriedigend eingestuft werden kann.

Akustische Führung

Akustische Führung optimiert die Selbstrettung von Personen in komplexen Situationen. Mit dem getesteten Signal liessen sich unter stark reduzierten Sichtverhältnissen über 91% der Personen zum optimalen Fluchtort leiten. Die Kombination aus Tonabfolge und Sprechdurchsage erwies sich für die Versuchspersonen als klar verständlich. Die in Kapitel 2.2 eingeführten Kriterien werden im Folgenden für eine genauere Diskussion des getesteten akustischen Führungssignals herangezogen.

Das Signal wurde während des Versuchs so gesteuert, dass es sich im gesamten Versuchsraum stets mindestens 10 dB vom vorherrschenden Grundpegel im Tunnel abhob. Die **Hörbarkeit** des akustischen Signals war dadurch an jeder Stelle zwischen den Notausgängen ausreichend gewährleistet. Das ausgesandte Signal war klar als solches zu erkennen und wurde von den Versuchspersonen nicht als Teil des Hintergrundgeräusches verwechselt. Es muss an dieser Stelle darauf hingedeutet werden, dass der Grundpegel während eines Ereignisfalles aufgrund der Fahrzeuge und der Lüftung höher liegen wird als in diesem Experiment. Damit die Hörbarkeit aber auch in diesem Fall gewährleistet werden kann, müssen die Lautsprecher so gesteuert werden, dass sie das Signal mindestens 10 dB über dem Geräuschniveau aussenden, jedoch 110 dB nicht überschreiten. Ein Signal dieser Lautstärke überschreitet die menschliche Schmerzgrenze und verliert daher seine lockende Wirkung.

Die Versuchspersonen wurden auf das akustische Signal genügend aufmerksam. Die akustische Führung die durch die Signalkombination mehrstufig und markant gestaltet wurde, erregte die **Aufmerksamkeit** der Flüchtenden. Beim Betreten des Tunnelraums konnte deren Achtsamkeit durch die prägnante Tonabfolge gewonnen werden, bevor die unmissverständliche Sprachinstruktion auf die Notausgänge hinwies. Es zeigte sich, dass die komplexe Tonabfolge aufgrund ihres unnatürlichen Charakters im Tunnel unerwartet klingt und deshalb aufmerksamkeitsregend ist.

Die Terzabfolgen sowie die anschliessende Sprechdurchsage wirkten auf die Versuchspersonen anziehend. Um in einem verrauchten Raum bei möglichst vielen Personen ein Evakuationsverhalten auslösen zu können, darf das ausgesandte Signal auf keinen Fall abstossend wirken. Die **Attraktivität** der akustischen Führung wurde erzeugt, indem die Terzabfolgen des Signaltons sowie die langsam sprechende Männerstimme einen angenehmen und vor allem anziehenden Eindruck bei den Flüchtenden hinterliessen. Durch den prägnanten Informationstext war der semantische Gehalt der akustischen Führung gewährleistet; die Personen wussten intuitiv, dass sie sich auf das Signal hin bewegen mussten um zu den Notausgängen zu gelangen.

Die **Lokalisierung** des akustischen Signals erwies sich auch in grösserer Entfernung zur Geräuschquelle als möglich. Je nach Standort fiel sie sogar sehr leicht aus. Genau in der Mitte zwischen zwei Notausgängen waren die Signale der beiden entgegengesetzten Fluchttüren jedoch nicht eindeutig voneinander unterscheidbar. Überlagerungen und Reflexionen der Schallwellen erzeugten eine verwirrende Geräuschkulisse die eine Lokalisierung der beiden Signale erschwerten. Einige Meter vom Mittelpunkt entfernt war die Lokalisierung der näheren Geräuschquelle wieder möglich. Die Wahl der gerichteten Lautsprecher in einer vertikalen Anordnung erwies sich als vorteilhaft, da sie das Signal beinahe ungestört über eine weite Strecke aussenden konnten und dadurch die Lokalisierbarkeit auch in grösserer Reichweite ermöglicht wurde.

Aufgrund des knappen Zeitfensters war es nicht möglich, weitere akustische Signale zu testen. Es können deshalb keine Aussagen über die Wirksamkeit von Tonabfolgen ohne Sprechdurchsagen bzw. von Sprechdurchsagen ohne Tonabfolgen gemacht werden. Weitere Studien sind diesbezüglich nötig.

Die Versuchspersonen hatten die Tendenz, nachdem sie in der Fahrbahnmitte den verrauchten Versuchsraum betreten hatten, die Tunnelwand aufzusuchen und sich an ihr tastend fortzubewegen. Die Personen scheuten sich die vermeintlich sichere Wand zu verlassen und auf der offenen Fahrbahn durch den Rauch zu flüchten. Notausgangstüren in Strassentunneln sind gemäss Richtlinie in regelmässigen Abständen auf nur einer Seite anzubringen. Dies birgt die Gefahr, dass Flüchtende im verrauchten Tunnel die Notausgänge verpassen weil sie sich auf der falschen Fahrbahnseite befinden. Es hat sich nun gezeigt, dass durch den Einsatz einer akustischen Führung den Personen bewusst wird, dass sie sich auf der falschen Seite befinden und sie die Fahrbahn überqueren müssen, um zu den Fluchtwegen zu gelangen. Gerade weil die Beobachtung gemacht werden konnte, dass die herkömmlichen, optischen Fluchtwegsignalisationen bei starker Verrauchung ihre Effektivität verlieren, gewinnen akustische Hilfsmittel umso mehr an Bedeutung.

Es muss aber dennoch unbedingt betont werden, dass die akustische Führung die optischen Signalisierungen nicht substituiert. Erst die Kombination beider Signalisationen wurde von den Versuchspersonen als besonders effektiv eingeschätzt. Während dem Szenario B nutzten die Versuchspersonen in einem ersten Schritt vor allem die akustische Führung um in die optimale Richtung zu flüchten. Ab einer gewissen Nähe zum Notausgang konnten sie dann schliesslich auch die Blitzlichter erkennen die ihnen zusätzlich den Weg wiesen. Keine Person gab an, sich ausschliesslich an den Lautsprechern orientiert zu haben.

Durch das Experiment wurde klar, dass Personen in einer verrauchten Umgebung den instinktiven Fluchttrieb hin zu bekannten Orten durchaus überwinden können. Wenn akustische Signale auf den nächsten Fluchtweg hinweisen, dann lassen sich die Flüchtenden auch zu einer Flucht nach vorn, also in die Richtung des Unbekannten bewegen.

Personen die sich plötzlich in einem verrauchten Raum wiederfinden, flüchten in über 41% der Fälle zurück in die Richtung aus der sie hergekommen sind. Sie wissen dabei nicht, dass dies ein ungünstiger Fluchtweg ist und sie eine viel längere Strecke durch die feindliche Umgebung zu bewältigen haben. Mit dem Einsatz von akustischer Führung kann diese Tendenz auf 8% reduziert werden. Die signifikante Mehrheit von über 91% der Personen realisiert, dass sich die nächste Möglichkeit den Tunnelraum zu verlassen, vor ihnen befindet. Dieses Wissen reicht aus, um Personen zur Flucht in eine zwar unbekante, aber optimale Richtung zu bewegen.

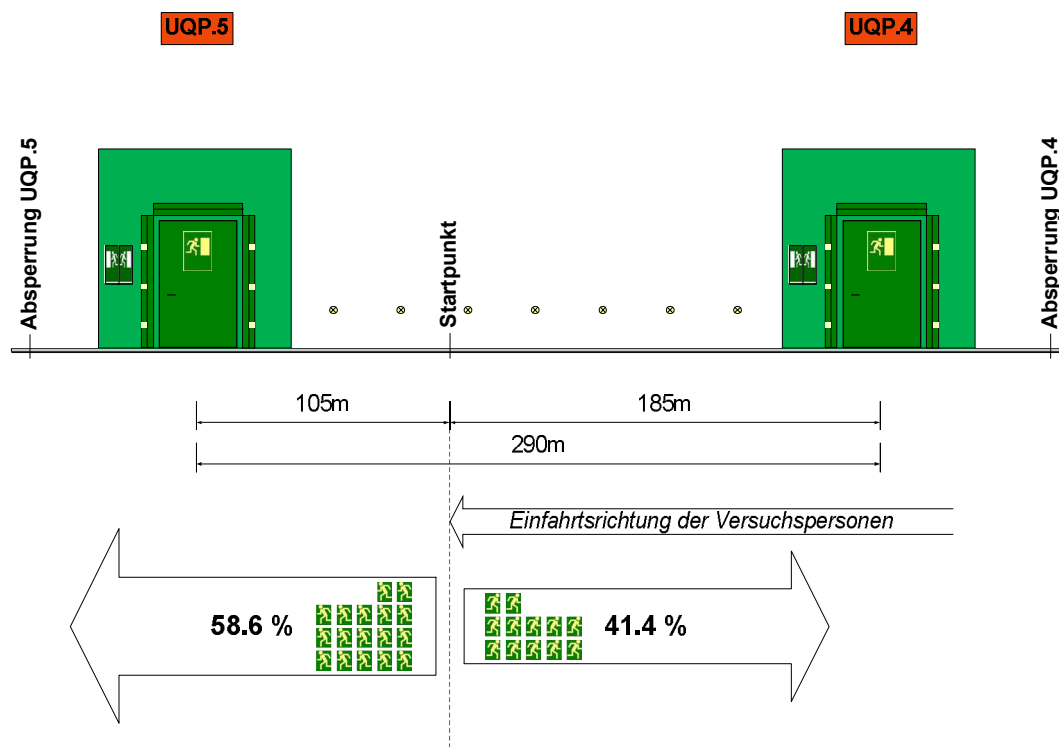


Abbildung 22 Fluchtrichtung ohne akustische Führung

Lautsprecher über den Notausgängen erleichtern somit die Entscheidung für die einzuschlagende Fluchtrichtung. Die Tatsache, dass über 91% der Personen in die optimale Fluchtrichtung gelockt werden können, zeigt, dass akustische Führung die Möglichkeit hat, das menschliche Verhalten in komplexen Situationen positiv zu beeinflussen. Durch das Hinweisen auf den optimalen Fluchtweg wird die komplexe Situation transparenter gestaltet, sodass die Flüchtenden sicherer handeln können.

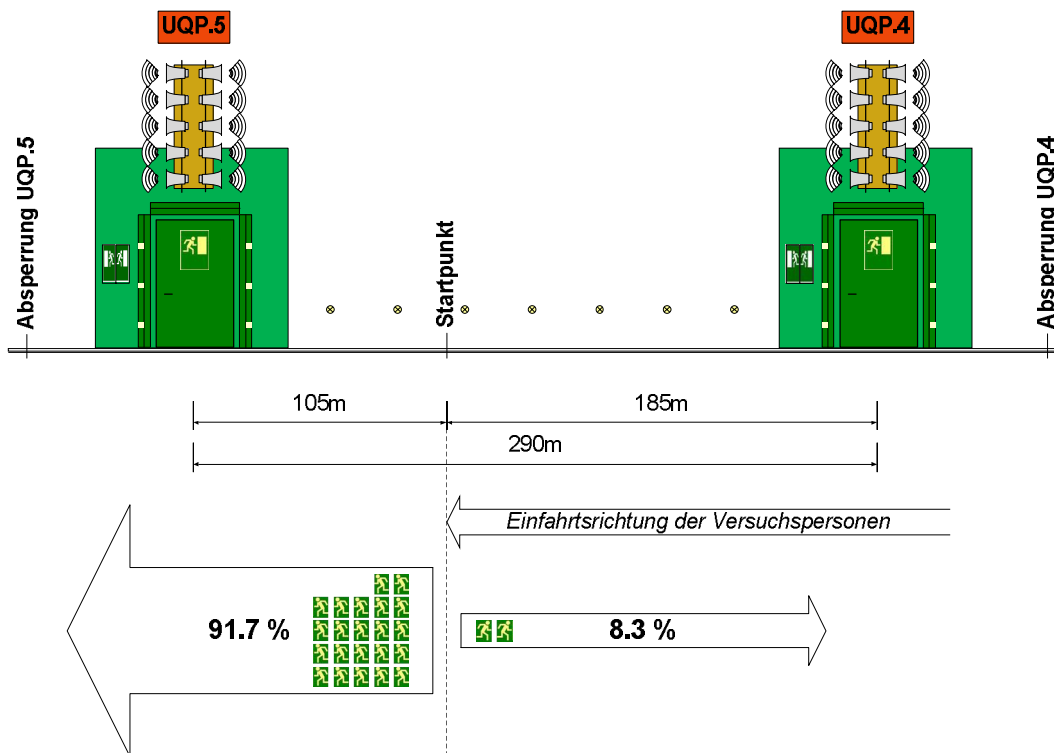


Abbildung 23 Fluchtrichtung mit akustischer Führung

Türöffnung

Die Feststellung, dass Versuchspersonen die Notausgangstüren auffinden aber nicht öffnen konnten, kam unerwartet. Der vorherrschende Überdruck in den Querstellen im Zusammenspiel mit einem verkeilenden Netzkabel, erschwerte die Türöffnung. Es muss aber betont werden, dass auch ohne das Kabel die Notausgangstüren im Uetlibergtunnel nur unter grossem Kraftaufwand aufgestossen werden konnten und so für ältere und schwächere Versuchspersonen zu einem Hindernis wurden.

Allgemein konnte die Beobachtung gemacht werden, dass sich die Versuchspersonen auf dem Fluchweg oftmals zu Zweiergruppen zusammenfügten. Insbesondere vor dem optimalen Notausgang UQP.5 bildeten sich aufgrund der Türproblematik jeweils grössere Gruppen. Diese wuchsen an bis eine genügend starke Versuchsperson zur Gruppe stiess und die Tür für alle öffnen konnte. Im Querschlag angekommen gaben viele Versuchspersonen an, geglaubt zu haben, dass die schwierige Türöffnung bewusst ins Experiment integriert worden war, um die Reaktion der Personen zu untersuchen. Aus diesem Grund lässt sich argumentieren, dass einige Personen aufgrund der vermuteten Versuchsbedingungen schnell wieder vom Öffnungsversuch abliessen und sich in unmittelbarer Nähe nach weiteren Fluchtmöglichkeiten suchten. Es bleibt unklar, ob die Personen im Ereignisfall länger versucht hätten die Tür zu öffnen.

Es steht aber ausser Diskussion, dass der Öffnungsmechanismus der Fluchttüren so ausgelegt werden muss, damit sie von Personen jederzeit geöffnet werden können. Diesbezüglich besteht jedoch in den aktuell gültigen Normen und Richtlinien ein Widerspruch.

Während die Norm SIA 197/2 (SIA Zürich, 2004) Flügeltüren als Regel vorsieht und Schiebetüren nur in begründeten Fällen erlaubt, bestimmt die ASTRA Richtlinie für Türen und Tore in Strassentunneln (ASTRA, 2009) Schiebetüren als den Regelfall. Flügeltüren sind gemäss ASTRA nur in Ausnahmefällen erlaubt und müssen mit lüftungstechnischen Berechnungen belegt werden. Diese Diskrepanz zwischen den Richtlinien und Normen kann zu Unsicherheiten in der Auslegung von Strassentunneln führen und muss beseitigt werden.

Fluchtwegsignalisationen haben zum Ziel, die Selbstrettung der vor Ort betroffenen Menschen auf dem schnellsten Weg zu ermöglichen. Es ist dabei selbstverständlich, dass die Signalisation nicht nur das Auffinden sondern auch die tatsächliche Benutzung der Fluchtmöglichkeiten bezweckt. Die vorliegende Studie hat verdeutlicht, dass die Wirksamkeit aller Fluchtwegsignalisationen stark eingeschränkt wird, wenn die Flüchtenden die Notausgänge zwar finden können, jedoch Mühe beim Betreten der Fluchtwege haben. Dieser Umstand wird besonders prekär, wenn die Zeit zum kritischen Faktor wird. In diesem Sinne, weist die vorgefundene Türproblematik auf eine zentrale Voraussetzung hin: Eine erfolgreiche Evakuierung kann erst erfolgen, wenn sämtliche Sicherheitseinrichtungen ihren vorgesehenen Zweck einwandfrei erfüllen.

Die besonderen Bedingungen in Strassentunneln stellen spezifische technische Anforderungen an Türen, die aber unbedingt auch den Faktor Mensch einbeziehen müssen. Eine einfache und intuitiv verständliche Bedienbarkeit der Notausgangstüren muss die Tunnelnutzer im Ereignisfall unterstützen, sich spontan richtig zu verhalten. Die klemmende Tür während des Experimentes wirkte dem klar entgegen.

Die Richtlinie für Türen im Tunnel sieht eine maximale Öffnungskraft von 120 N vor, sie lässt aber Freiraum für allfällige Massnahmen zur Reduktion der Öffnungskraft. Die tatsächliche Öffnungskraft die während des Experimentes von den Versuchspersonen aufgewendet werden musste, konnte nicht gemessen werden. Es ist aber davon auszugehen, dass eine einfache und funktionssichere Öffnungshilfe zu einer zahlenmässig erfolgreicherer Evakuierung durch den Notausgang UQP.5 geführt hätte. Weitere Studien sind auch diesbezüglich nötig.

Die vorliegende Datenlage ist jedoch zu unsicher, als dass eine gründlich Analyse der Türproblematik gemacht werden könnte. Erklärungsversuche können erst durch weitere spezifische Abklärungen unternommen werden. Folgestudien werden bestimmt interessante Schlussfolgerungen zulassen.

5.2 Ausblick

Die allgemeine Tunnelsicherheit wird wesentlich durch das individuelle menschliche Verhalten beeinflusst. Gerade die Selbstrettung während eines Ereignisfalles kann für die betroffenen Tunnelnutzer eine grosse Herausforderung darstellen; sie muss daher möglichst einfach und intuitiv verständlich gestaltet werden. Wenn die Flüchtenden mit den eingesetzten Signalisationen optimal geführt werden können, wird die Situation weniger komplex und das menschliche Verhalten variiert weniger stark. Die Relevanz des menschlichen Faktors in der Betrachtung von technischen Systemen wird seit Langem betont und hat nichts von seiner Bedeutung verloren (vgl. Manzey, 2008). Eine stärkere Integration dieses "Human-Factor-Ansatzes" wird auch bei der Planung der Sicherheitsausrüstung von Strassentunneln in der Schweiz empfohlen.

Lellig *et al.* (2010) haben gezeigt, dass das menschliche Verhalten in Strassentunneln vor allem über gezielte Systemanpassungen beeinflusst werden sollte. Massnahmen wie zum Beispiel ein spezifisches "Tunneltraining" für Fahrschüler sind diesbezüglich zu wenig effizient. Die Autoren definieren die folgenden Systemanpassungen bei denen Regelungsbedarf besteht und daher vertieft untersucht werden müssen:

- Information der Nutzer im Tunnel
- Signalisation des Fluchtwegs
- Klare Regelung für Notausgangstüren
- Klare Regelung für Tunnelsperrungen

Die vorliegende Studie hat nun die beiden ersten Punkte aufgegriffen und verdeutlicht, dass die Tunnelsicherheit erhöht werden kann, wenn visuelle Fluchtwegsignalisationen mit akustischen ergänzt werden. Dieser vielversprechende Ansatz sollte weiterverfolgt werden.

Nachdem die signifikante Wirkung von akustischer Führung nachgewiesen werden konnte, wird nun in einem weiteren Schritt empfohlen, die genauen Anforderungskriterien an Lautsprecher zu definieren. Die Geräuschkulisse sowie die akustischen Verhältnisse in Schweizer Strassentunneln müssen genauer untersucht werden, damit die Vielfalt an möglichen Lösungen eingegrenzt und ein spezifisches Lautsprechersystem vorgeschlagen werden kann.

Während diesem nächsten Untersuchungsschritt muss ein besonderer Fokus auf die Umsetzbarkeit in der Schweiz gerichtet werden. Die alleinige Behauptung, dass die akustische Signalisierung der Notausgänge die Selbstrettung signifikant verbessert reicht noch nicht aus. Eine einfache technische Umsetzbarkeit sowie das Risikosenkungspotential diese Sicherheitsmassnahme müssen ebenfalls nachgewiesen werden, bevor sich die Ausrüstung für Schweizer Tunnel lohnen kann.

Der Frage nach dem optimalen Signal kann ebenfalls noch einmal nachgegangen werden, da im Moment nur die unterstützende Wirkung einer Kombination aus Signalton und Sprechdurchsage bewiesen ist. Es ist nämlich vorstellbar, dass der alleinige Einsatz von Tonsignalen technisch einfacher umzusetzen ist als Sprechdurchsagen, die hohen Ansprüche an die Verständlichkeit zu erfüllen haben. Unklar ist aber weiterhin, wie effizient die Selbstrettung verläuft wenn nur Tonsignale oder nur Sprechdurchsagen den Weg weisen. Aus diesem Grund soll überprüft werden, ob die akustische Signalisation der Notausgänge nur mit Tonsignalen respektive Sprechdurchsagen vergleichbare Resultate erbringt.

Vor einem Einsatz von Sprechdurchsagen muss einerseits deren akustische, andererseits deren inhaltliche Verständlichkeit einwandfrei sei. Hierzu müssen in einem weiteren Schritt Sprachverständlichkeitsmessungen durchgeführt und standardisierte Sprechdurchsagen entwickelt werden. Damit die akustische Führung die Tunnelnutzer in der Selbstrettung auch unterstützt, sind zudem ein sinnvoller Informationsgehalt der Durchsagen sowie die Übertragungssprachen zu definieren. Gerade der letzte Punkt ist in der mehrsprachigen Schweiz von grosser Bedeutung.

Der Gedanke der akustischen Führung wie er in der vorliegenden Studie verfolgt wurde, kann weiter ausgedehnt werden. Im Moment wird mit der akustischen Signalisation der Notausgänge lediglich die Zeit der tatsächlichen Evakuation verkürzt. Über den wichtigen Zeitraum vor der Selbstrettung, die sogenannte "Pre-Evacuation Activity Time" (PEAT) wurde keine Aussage gemacht. Jedoch gerade dieses Zeitfenster, in welchem die Tunnelnutzer die Gefahr des Ereignisses bewerten und sich zwischen verschiedenen Handlungsoptionen zu entscheiden haben, muss möglichst kurz gehalten werden. Je kürzer die PEAT, desto mehr Zeit steht den Flüchtenden für die Evakuation zur Verfügung. Die Verkehrsteilnehmer müssen deshalb in ihrer Entscheidungsfindung dahingehend unterstützt werden, dass sie hemmende Faktoren wie Objektverbundenheit oder Gruppenverhalten überwinden und sich auf die sofortige Flucht hin zu den Notausgängen begeben. Dazu müssen den Autoinsassen angemessene Anreize zugetragen werden. Mit akustischen Mitteln ist dies möglich, da auf diesem Weg konkrete Handlungsanweisungen mit dem angemessenen Informationsgehalt an die Tunnelnutzer übermittelt werden können. Bei dieser Ausweitung der Fragestellung stellt sich die Schwierigkeit, dass die akustische Führung und die akustische Information der Tunnelnutzer unterschiedliche Herausforderungen an Lautsprechersysteme stellen. Während erstere vor allem aus lockenden und intuitiv begreifbaren Geräuschen aufgebaut sein kann, muss letztere hohe Ansprüche an die Verständlichkeit der ausgesandten Sprechdurchsagen erfüllen. Die theoretischen Überlegungen sind in diesem Falle erneut experimentell zu untersuchen.

Die eher unerwartet aufgedeckten Schwierigkeiten bei der Öffnung der Notausgangstüren müssen allgemein untersucht werden. Schwer zu öffnende Türen limitieren die Effektivität der meisten Selbstrettungsmassnahmen und führen unweigerlich zu gefährlichen Verzögerungen in Situationen, in denen Zeit der kritische Faktor ist. Insbesondere zwei Ansatzpunkte stehen dabei im Zentrum der Diskussion, die Auswirkungen auf bestehende Richtlinien hat: die Lüftung von Querverbindungen sowie der Öffnungsmechanismus von Notausgangstüren.

Unumstritten bleibt, dass Querverbindungen im Ereignisfall aus Sicherheitsgründen mit einem Überdruck gegenüber der Fahrbahn versehen werden müssen. Es ist nun aber unter dem Human-Factor-Aspekt zu untersuchen, ab welchem Druckunterschied die erforderliche Öffnungskraft so gross wird, dass Personen unter Stress den Öffnungsversuch aufgeben; eine Situation die unbedingt vermieden werden muss. Es empfiehlt sich daher zudem ein kritischer Vergleich möglicher Massnahmen zur Reduktion der Öffnungskraft. Dadurch ist es möglich, bestimmte einfache und funktionssichere Massnahmen zu empfehlen, die den Anforderungen in der ASTRA Richtlinie für Türen und Tore entsprechen (vgl. ASTRA, 2009).

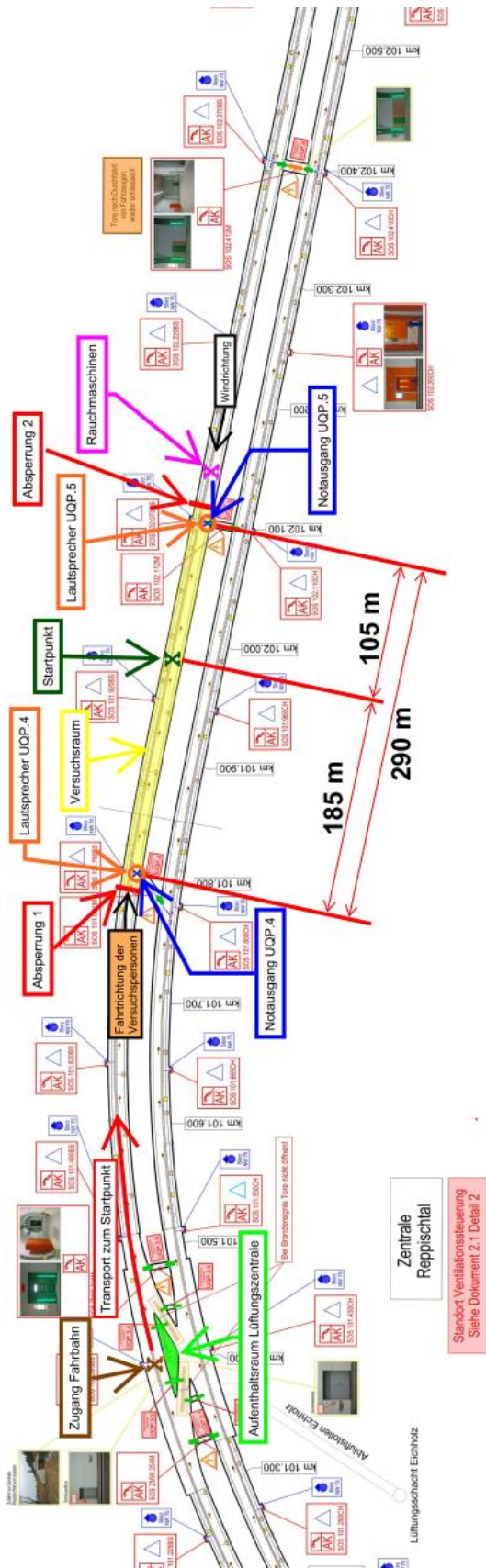
Der aktuell bestehende Widerspruch in den gültigen Schweizer Normen und Richtlinien muss behoben werden. Das grundsätzliche Öffnungsprinzip sollte vereinheitlicht werden, und zwar so, dass sich Verkehrsteilnehmer im Ereignisfall tatsächlich spontan richtig verhalten. Ob dies nun Flügel- oder Schiebetüren sind, bleibt Gegenstand der Forschung. Für die zugrunde liegenden Untersuchungen ist ein Einbezug des Human-Factor-Ansatzes ebenfalls essentiell. Es bleibt zu überprüfen, welcher Öffnungsmechanismus den menschlichen Erwartungen an eine Notausgangstüre entspricht und auch in kritischen Situationen kein Hindernis für Menschen unter Stress darstellt. Die sehr breite theoretische Wissensbasis soll als Grundlage für praxisorientierte Experimente genutzt werden, um die aufgestellten Hypothesen überprüfen zu können und die sicherheitstechnische Systemgestaltung stärker auf den Menschen auszurichten.

Bei all diesen Betrachtungen wird deutlich, dass der Mensch und der Tunnel keine voneinander getrennten Einheiten darstellen, die mit unterschiedlichen Betrachtungsweisen untersucht werden können. Bei der Ausgestaltung von Strassentunneln ist deshalb zukünftig vermehrt darauf zu achten, dass das bestehende Wissen sowie neue Erkenntnisse aus der Human-Factors-Forschung miteinbezogen werden.

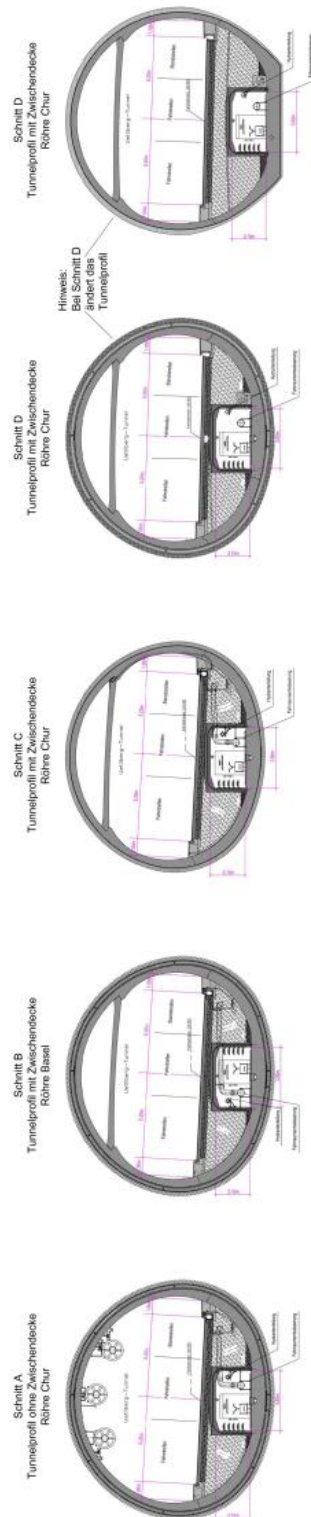
Anhänge

I	Uetlibergtunnel: Versuchsanordnung	65
II	Statistische Auswertungen	67
III	Datenblatt Lautsprecher	71
IV	Fragebogen	73

I Uetlibergtunnel: Versuchsanordnung



t.c



II Statistische Auswertungen

In Tabelle 19 ist aufgezeigt wie sich die Ankunftsorte der Versuchspersonen unterscheiden, je nachdem welcher Gruppe sie angehörten. Die Mitglieder der Gruppe B wurden durch die akustische Führung über den Notausgängen unterstützt; die Gruppe C war die Kontrollgruppe und hatte die Notausgänge ohne akustische Führung zu finden.

Tabelle 20 illustriert die detaillierte Analyse des Zusammenhanges zwischen Gruppenzugehörigkeit und Fluchtrichtung.

Die Resultate sind in Kontingenztafeln dargestellt. Diese geben die tatsächlich beobachtete Häufigkeit von Kombinationen mehrerer Merkmalsausprägungen an. Für die einzelnen Merkmalskombinationen werden in Tabelle 19 und Tabelle 20 zusätzlich zum Beobachtungswert auch der jeweilige Erwartungswert illustriert, der sich aus den Randhäufigkeiten und dem Gesamttotal berechnen lässt (vgl. Storrer, 1995).

II.1.1 Gruppzugehörigkeit und Ankunftsort

Tabelle 19 Gruppzugehörigkeit und Ankunftsort – Detaillierte Auswertung

		Ankunftsort im Tunnel				Gesamt	
		<i>Optimaler Notausgang</i>					
		Absperrung UQP.5	Notausgang UQP.5	Notausgang UQP.4	Absperrung UQP.4		
Gruppe B	Mit akustischer Führung	Beobachtet	11	11	2	0	24
		Erwartet	5.0	12.7	5.4	0.9	24.0
		%	45.8%	45.8%	8.3%	0%	100%
		Std. Res.	2.7	-0.5	-1.5	-1.0	
Gruppe C	Ohne akustische Führung	Beobachtet	0	17	10	2	29
		Erwartet	6.0	15.3	6.6	1.1	29.0
		%	0%	58.6%	34.5%	6.9%	100%
		Std. Res.	-2.5	0.4	1.3	0.9	
Gesamt		Beobachtet	11	28	12	2	53
		Erwartet	11.0	28.0	12.0	2.0	53.0
		%	20.8%	52.8%	22.6%	3.8%	100%

II.1.2 Gruppenzugehörigkeit und Fluchtrichtung

Tabelle 20 Gruppenzugehörigkeit und Fluchtrichtung – Detaillierte Auswertung

		Fluchtrichtung im Tunnel			
		<i>Optimale Fluchtrichtung</i>			
		Richtung UQP.5	Richtung UQP.4	Gesamt	
Gruppe B	Mit akustischer Führung	Beobachtet	22	2	24
		Erwartet	17.7	6.3	24.0
		%	91.7%	8.3%	100%
		Std. Res.	1.0	-1.7	
Gruppe C	Ohne akustische Führung	Beobachtet	17	12	29
		Erwartet	21.3	7.7	29.0
		%	58.6%	41.4%	100%
		Std. Res.	-0.9	1.6	
Gesamt		Beobachtet	39	14	53
		Erwartet	39.0	14.0	53.0
		%	73.6%	26.4%	100%

III Datenblatt Lautsprecher

Trichterlautsprecher Haut-parleur à chambre de compression		Hoornluidspreker Horn loudspeaker		GM-8617 GM-8617
Werkzeug: - Schraubenschlüssel Gr.13 - Abisolier-Werkzeug	Outils: - Clé à fourche no.13 - Pince à dénuder	Gereedschap: - Moersleutel Gr.13 - Striptang	Tools: - Spanner no.13 - Isolation removing tool	
Anschlusskabel: schwarz = 0V (-) rot = 100V (+)	Câble de raccordement: noire = 0V (-) rouge = 100V (+)	Aansluitkabel: zwart = 0V (-) rood = 100V (+)	Connecting cable: black = 0V (-) red = 100V (+)	
Technische Daten	Caractéristiques techniques	Technische gegevens	Technical specifications	
Lautsprecher-System: Frequenzbereich: Schalldruck (1W/1m): Max. Schalldruck (bei 1m): Anpassung an 100 V: Impedanz an 100 V:	Haut-parleur: Bande passante: Sensibilité (1W à 1m): Niveau sonore maximum (à 1m): Adaptation en ligne 100 V: Impédance sur transformateur:	Systeem: Frequentiebereik: Geluidsdruk (1Watt/1Meter): Max. geluidsdruk (1m): Aanpassing aan 100 V: Transformator impedantie:	Loudspeaker: Frequency response: Sensitivity (1W at 1m): Max. sound level (at 1m): Adaptation on 100 V line: Transformer impedance:	1-Weg/1voie/1-Weg/1way 500 - 5500 Hz (-10dB) 108 dB 119 dB (15W) 15 / 7.5 / 3.75 / 1.9 W 667 / 1333 / 2667 / 5332 Ohm
Leistung niederohmig: Impedanz niederohmig: Abstrahlwinkel bei -6dB: Dimensionen (Ø x T): Gewicht:	Puissance efficace maximum: Impédance directe: Angle d'ouverture à -6dB: Dimensions (Ø x P): Poids:	Vermogen (RMS): Impedantie excl. trafo: Openingshoek (-6dB): Afmeting (Ø x D): Gewicht:	Maximum nominal power: Nominal impedance: Coverage angle at -6dB: Dimensions (Ø x D): Weight:	15 W 8 Ohm 120° (1kHz) 210 x 275 mm 2.0 kg
g-m elektronik ag CH-9245 Oberbüren T +41 (0)71 955 90 10 F +41 (0)71 955 90 20		Tochterfirmen im Ausland: g-m elektroakustik GmbH D-64646 Heppenheim g-m électronique S.A.R.L. F-21202 Beaune g-m audio-technologie B.V. NL-4824 AT Breda		
www.gm-elektronik.ch		adm@gm-elektronik.ch		

IV Fragebogen

Bitte beantworten Sie abschliessend die folgenden Fragen:

Ihre Versuchsnummer:

Geschlecht: Mann Frau

Alter: Jahre

Führerausweis: ja nein Falls ja, seit wann:

Selbst gefahrene km pro Jahr:

Als BeifahrerIn gefahrene km pro Jahr:

Bitte geben Sie nun auf einer Skala von 1 bis 5 an, wie sehr Sie den folgenden vier Aussagen zustimmen:

	Stimmt überhaupt nicht			Stimmt völlig	
Die Situation im verrauchten Tunnel hat mich verunsichert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es fiel mir leicht, mich auf dem Weg vom Bus zum Notausgang zu orientieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im Tunnel hatte ich Angst	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schon vor dem Experiment wusste ich, wie ich am besten den Notausgang finden würde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich habe die experimentelle Situation im Tunnel gar nicht ernst nehmen können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Nun noch einige offene Fragen:

1) Welche Informationen haben Sie zur Orientierung benutzt, um den Notausgang zu finden?

2) Wie ist der Weg zu den Notausgängen in Tunneln signalisiert?

3) Wie würden Sie sich in einem Brandfall in einem Strassentunnel verhalten?

4) Nehmen Sie an, ein Personenwagen beginnt in einem Tunnel zu brennen.

a) Wie hoch schätzen Sie die Temperatur nach 4 Minuten ein?

b) Wie viel Zeit hätten Sie, um sich in Sicherheit zu bringen?

5) Haben Sie allgemeine Bemerkungen zum Experiment?

Bitte geben Sie den ausgefüllten Fragebogen einem Versuchsleiter. Sie erhalten dann die Entschädigung von Fr. 100.

Wenn Sie über die Resultate der Studie informiert werden möchten, geben Sie uns bitte auf dem zusätzlichen Blatt Ihre e-Mail- oder Postadresse an.

Wir danken Ihnen nochmals herzlich für die Teilnahme am Experiment!

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
CIS	Common Intelligibility Scale
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
PEAT	Pre-Evacuation Activity Time
STI	Speech Transmission Index

Literatur

Ahnert, W., Feistel, S. (2010): Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen. In: Möser, M. (Hrsg.): Messtechnik der Akustik. Springer Verlag, Heidelberg, 115-184.

ASTRA (2000): ASTRA Tunnel Task Force. Schlussbericht.

ASTRA (2008): Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln. Richtlinie, ASTRA 13002, Bern.

ASTRA (2009): Türen und Tore in Strassentunneln. Richtlinie, ASTRA 13011, Bern.

ASTRA (2011): Signalisation der Sicherheitseinrichtung. Richtlinie, ASTRA 13010, Bern.

Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (2008): Human Factors. In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (Hrsg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 3-18.

Benthorn, L., Frantzych, H. (1999): Managing evacuation people from facilities during a fire emergency. *Facilities*, **17**(9/10), 325-330.

Boer, L. C. (2002): Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. TNO Report TM-02-C034, TNO Human Factors, Soesterberg.

Boer, L. C., van Wijngaarden, S. J. (2004): Directional sound evacuation from smoke-filled tunnels. Proceedings from the first international Symposium, Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Prague, 33-41. <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/ovion/doc/safety/prague/boer.pdf> Zugriff: 2.11.2010.

Boer, L. C., Withington, D. J. (2004): Auditory guidance in a smoke-filled tunnel. *Ergonomics*, **47**(10), 1131-1140.

CETU (2010): Signalisation et dispositions d'accompagnement de l'auto-évacuation des usagers dans les tunnels routiers. Les documents d'information. Centre d'Études des Tunnels, Bron. http://www.cetu.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_Doc_info_AEV_2010-10-15_cle0765fa_cle57299f.pdf Zugriff: 31.8.2011

Europäische Union (2004): Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European road network. PE-CONS 3669/04, Brüssel.

Fahlbruch, B., Schöbel, M., Domeinski, J. (2008): Sicherheit. In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (Hrsg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 19-35.

Färber, B., Färber, B. (2010): Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Strassentunneln. Mensch und Sicherheit, Heft M 212. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, bast, Bergisch Gladbach, Deutschland.

FSV (2010): Tunnel, Tunnelausrüstung, Betrieb und Sicherheit. RVS 09.02.22.

Gandit, M., Kouabenan, D. R., Caroly, S. (2009): Road-tunnel fires: Risk perception and management strategies among users. *Safety Science*, **47**, 105-114.

Hacker, W., von der Weth, R. (2008): Denken, Entscheiden, Handeln. In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (Hrsg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 77-93.

Hofinger, G. (2008): Fehler und Unfälle. In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (eds.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 36-55.

Huijben, J. W. (1999): Speech transmission by loudspeaker systems in a tunnel. International Conference on Fire Security in Hazardous Enclosed Spaces, Vernon, France.

Ingason, H., Wickström, U. (2006): The international FORUM of fire research directors: A position paper on future actions for improving road tunnel fire safety. *Fire Safety Journal*, **41**, 111-114.

Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., Post, J. G. (2010): Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, **45**, 1-11.

Kumar, S. (2004): Recent achievements in modelling the transport of smoke and toxic gases in tunnel fires. Proceedings from the first international Symposium, Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Prague, 97-105. <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/ovion/doc/safety/prague/SK.pdf> Zugriff: 17.11.2010.

Lellig, C., Feurer, A., Schönenberger, A., Groner, M. (2010): Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen? Forschungsauftrag FGU 2008/002 auf Antrag der Fachgruppe für Untertagbau (FGU). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bern.

Manzey, D. (2008): Systemgestaltung und Automatisierung. In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (Hrsg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 307-324.

Martens, M. (2008): Human factors aspects in tunnels: Tunnel user behaviour and tunnel operators. UPTUN Workpackage 3, Human Response, D33. <http://www.uptun.net/upload/documents/finalreports/UPTUN%20WP3%20D33%20Human%20factors%20user%20and%20operator.pdf> Zugriff: 2.11.2010.

Modic, J. (2003): Fire simulation in road tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, **18**(5), 525-530.

Nilsson, D., Johansson, M., Frantzich, H. (2009): Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. *Fire Safety Journal*, **44**, 458-468.

Noizet, A. S., Dedale, A., Richard, F. (2003): ACTEURS: Improving understanding of road tunnel users with view to enhancing safety. 5th International Conference: Safety in road and rail tunnels, Marseille, France.

Noizet, A. S., Mourey, F. (2005): Crisis situation in tunnels: What kind of behaviours can we expect from drivers? Some results from the French Acteurs Project. 3rd International Conference, Traffic and Safety in Road Tunnels, Hamburg, Germany.

Ozel, F. (2001): Time pressure and stress as a factor during emergency stress. *Safety Science*, **38**(2), 95-107.

PIARC (2008): Human factors and road tunnel safety regarding users. Technical committee C3.3, Road Tunnel Operation. http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/5/3251,2008R17WEB.pdf Zugriff: 2.11.2010.

PIARC (2008): Human factors guideline for safer road infrastructure. Technical committee C3.1, Road Safety. http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/5/3240,2008R18WEB.pdf Zugriff: 2.11.2010.

RABT (2006): Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, e.V., Köln.

Reason, J. (1990): Human error. 18th printing 2007, Cambridge University Press, New York, USA.

Schaub, H. (2008): Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und "Situation Awareness" (SA). In: Badke-Schaub, P., Hofinger, G., Lauche, K. (Hrsg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 59-76.

Shields, T. J. (2005): Human behaviour in tunnel fires. In: Beard, A., Carvel, R. (Hrsg.): handbook of tunnel fire safety. London, 324-342.

Shields, T. J., Boyce, K. E. (2004): Towards Developing an Understanding of Human Behaviour in Fire in Tunnels. In: Proceedings 3rd International Symposium on Human Behaviour in Fire - Public Fire Safety - Professionals in Partnership, Interscience Communications, 215-228.

SIA Zürich (2004): Projektierung Tunnel. Strassentunnel. SIA 197/2, SN 505 197/2, Zürich.

Storrer, H. H. (1995): Einführung in die mathematische Behandlung der Naturwissenschaften II. Birkhäuser Skripten Band 8, Birkhäuser Verlag, Basel.

Wehner, T., Mehl, K., Dieckmann, P. (2006): Handlungsfehler und Fehlerprävention. In: Kleinbeck, U., Schmidt, K. H. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie. Band Arbeitspsychologie. Hogrefe Verlag, Göttingen, 785-819.

Withington, D. (2003): Directional sound evacuation. An improved system for way guidance. Lloyds List Fire Science & Fire Investigation Workshop.
http://www.systemsensor.com/ep/pdf/exitpoint_directional_sound_evacuation.pdf Zugriff: 2.11.2010.

Withington, D. (o. J.): The use of directional sound to aid aircraft evacuation.
http://www.soundalert.com/pdfs/int_air_fire_and_cabin_crew_conf.pdf Zugriff: 2.11.2010.

Woodson, W. E., Tillman, B., Tillman, P. (1992): Human factors design handbook. Information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use. McGraw-Hill Inc., New York.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Formular Nr. 3: Projektabschluss

Strassen, Brücken, Tunnel

erstellt / geändert am: 7. Dezember 2011

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2010/203
 Projekttitel: Akustische Führung im Strassentunnel
 Enddatum: 31. Dezember 2011

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die vorliegende Studie bestätigt, dass akustische Führung in Strassentunneln die Selbstrettung während Ereignisfällen unterstützt. Eine Analyse des Fluchtverhaltens von Personen in einem verrauchten Tunnel hat ergeben, dass sich über 91% der Flüchtenden zum optimalen Notausgang führen lassen, wenn akustische Signale den Weg weisen. Ohne akustische Führung flüchten lediglich 59% der Personen in die Richtung des nächst gelegenen Notausgangs.

Die experimentelle Studie kommt zum Schluss, dass eine effizientere Selbstevakuierung erreicht werden kann, wenn die herkömmlichen Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln durch Lautsprecher über den Notausgängen ergänzt werden. Die menschliche Tendenz zur Flucht hin zu bekannten Orten kann damit gezielt beeinflusst werden. Evakuierende sind fähig ihre Abneigung gegenüber einer Flucht nach Vorn in das Unbekannte zu überwinden, wenn ihnen klare Informationen über den Ort des nächsten Notausgangs zugestellt werden. Die Wirksamkeit der üblichen optischen Signalisationen der Sicherheitseinrichtung (Bsp. Blitzlichter, Informationstafeln an den Tunnelwänden) beschränkte sich aufgrund des Rauches auf wenige Meter.

Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass Personen, die irrtümlicherweise entlang der falschen Tunnelwand flüchten, ermutigt werden können, die verrauchte Fahrbahn zu überqueren, wenn akustische Signale auf die Notausgangstüren hinweisen. Akustische Führung ist daher geeignet, das menschliche Verhalten in komplexen Situationen zu beeinflussen.

Im Weiteren wurden Schwächen in der Ausgestaltung der Notausgangstüren entdeckt. Bei der Mehrheit der Personen, die an den Abschränkungen des Versuchsraumes aufgegriffen wurden, misslang die Selbstrettung nicht weil sie an den Notausgängen vorbeigelaufen wären, sondern weil sie diese nicht öffnen konnten. Ein aus Sicherheitsgründen künstlich erzeugter Überdruck in den Querschlägen verhinderte eine leichte Öffnung der Flügeltüren. Diese Schwierigkeit limitiert die Effektivität der meisten Selbstrettungsmassnahmen und führt unweigerlich zu gefährlichen Verzögerungen in Situationen, in denen Zeit der kritische Faktor ist.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die zu Beginn des Projektes aufgeworfenen Fragestellungen konnten mit dieser Studie beantwortet, die Hypothese mit grosser Signifikanz bestätigt werden. Die folgenden Ziele wurden erreicht:

- Die Erfahrungen aus Nachbarländern konnten für einen erfolgreichen Einsatz in Schweizer Strassentunneln genutzt werden.
- Bereits durchgeführte internationalen Feldstudien konnten mit diesem Experiment verifiziert werden.
- Die erforderliche Ausrüstung für die erfolgreiche Umsetzung von akustischer Führung in Strassentunneln wurde experimentell getestet und festgehalten.
- Die technischen Anforderungen sowie die akustischen Herausforderungen für eine effektive akustische Führung wurden untersucht und definiert.
- Die durch diese experimentelle Studie gewonnen Erkenntnisse bilden eine fundierte Ausgangslage für die Diskussion über den Einsatz von akustischer Führung in Schweizer Strassentunneln.

Aus zeitlichen Gründen konnten während der Tunnelsperre nicht alle geplanten Szenarien getestet werden. Dadurch wurde das Ziel, den Unterschied der Wirksamkeit zwischen Signaltönen und Sprechdurchsagen aufzuzeigen, nicht erreicht. Weiterführende Studien werden hierfür empfohlen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Nachdem die signifikante Wirkung von akustischer Führung nachgewiesen werden konnte, wird nun in einem weiteren Schritt empfohlen, die genauen Anforderungskriterien an Lautsprecher zu definieren. Die Geräuschkulisse sowie die akustischen Verhältnisse in Schweizer Strassentunneln müssen genauer untersucht werden, damit die Vielfalt an möglichen Lösungen eingegrenzt und ein spezifisches Lautsprechersystem vorgeschlagen werden kann. Neben diesen technischen Aspekten sollte der Fokus zudem auf betriebliche Herausforderungen ausgerichtet und danach gefragt werden, wie sich Lautsprechersysteme praktisch mit dem bestehenden Betrieb (Bsp. Unterhalt, Reinigung etc.) vereinbaren lassen.

Die eher unerwartet aufgedeckten Schwierigkeiten bei der Öffnung der Notausgangstüren müssen allgemein untersucht werden. Schwer zu öffnende Türen limitieren die Effektivität der meisten Selbstrettungsmassnahmen und führen unweigerlich zu gefährlichen Verzögerungen in Situationen, in denen Zeit der kritische Faktor ist. Insbesondere zwei Ansatzpunkte stehen dabei im Zentrum der Diskussion, die Auswirkungen auf bestehende Richtlinien haben: die Lüftung von Querverbindungen sowie der Öffnungsmechanismus von Notausgangstüren.

Bei all diesen Betrachtungen wird deutlich, dass der Mensch und der Tunnel keine voneinander getrennten Einheiten darstellen, die mit unterschiedlichen Betrachtungsweisen untersucht werden können. Bei der Ausgestaltung von Strassentunneln ist deshalb zukünftig vermehrt darauf zu achten, dass das bestehende Wissen sowie neue Erkenntnisse aus der Human-Factors-Forschung miteinbezogen werden.

Publikationen:

Mellert, L. D., Welte, U., Groner, M., Stricker, D. (2012): Akustische Führung im Strassentunnel. Forschungsauftrag VSS 2010/203 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute, Bundesamt für Strassen, Bern.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Welte

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen der regulären EK-Sitzungen wurde jeweils der akute Stand des Forschungsprojektes präsentiert. Während den nachfolgenden Diskussionen hatten die Mitglieder der Begleitkommission die Möglichkeit, Anmerkungen sowie allfälligen Anpassungsbedarf einzubringen. Die Planung des Experimentes wurde dadurch optimiert.

Die erfolgreiche Durchführung des Feldversuches, die statistischen Auswertungen sowie die anschliessende Zusammenstellung der Forschungsergebnisse wurden von der Begleitkommission positiv beurteilt.

Umsetzung:

Abgesehen von zwei Szenarien die nicht getestet werden konnten, wurden sämtliche geplanten Meilensteine durch eine zielgerichtete Vorgehensweise erreicht. Die angewandten Methoden für die Untersuchung der Forschungshypothese waren angemessen und vermochten die aufgeworfenen Fragestellungen zu beantworten. Der Schlussbericht führt den Leser in die wesentlichen Grundlagen der Human-Factors-Forschung ein und ermöglicht aufgrund der detaillierten Beschreibung des Versuchsaufbaus die Reproduzierbarkeit des gesamten Experimentes. Die statistischen Auswertungen erfolgten nach wissenschaftlichen Grundsätzen und werden im Bericht in verständlicher Art und Weise interpretiert. Der Bezug zwischen den erhobenen Daten und den Forschungsfragen wird zum Schluss hergestellt.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der weitergehende Forschungsbedarf ergibt sich aus dem aufgedeckten positiven Zusammenhang zwischen der akustischen Führung und einer erfolgreichen Selbstevakuierung. Technische Möglichkeiten müssen in einem nächsten Schritt auf ihre einfache und zweckmässige Umsetzbarkeit geprüft werden. Im Weiteren bieten die Türproblematik sowie die für eine schnelle Selbstrettung essentielle Verkürzung der PEAT (Pre-Evacuation Activity Time) Forschungsthemen im Schnittbereich Mensch-Technik, die weiterverfolgt werden sollten. Das bestehende Wissen sowie neue Erkenntnisse aus der Human-Factors-Forschung müssen stärker miteinbezogen werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsarbeit hat keinen direkten Einfluss auf das Normenwerk. Die Klärung der aufgezeigten Diskrepanzen (bezüglich der Türöffnungsmechanismen) zwischen der Norm SIA 197/2 und der ASTRA-Richtlinie wird jedoch empfohlen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Scholer

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: Scholer Projektpartner GmbH, Frick

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen <i>Functional requirements for traffic collection systems relating to traffic lights</i> <i>Exigences fonctionnelles en matière de systèmes de détection du trafic en rapport avec les installations de feux de circulation</i>	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen <i>Profil géométrique type pour tous les types de véhicules</i> <i>Standard profile of cross sections for all vehicle types</i>	2010
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts <i>Validierung des CRS-Oedometers mittels intakter Proben</i> <i>Validation of Constant Rate of Strain oedometer on intact samples</i>	2010
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit <i>Coûts horaires du trafic des personnes:</i> <i>Dépendance de la perception et de la distance</i> <i>Willingness to pay in passenger transportation:</i> <i>Perception and distance dependence</i>	2008
1286	VSS 2000/338	Verkehrssqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung <i>Niveau de service et capacité pour les routes à deux voies sans séparation des sens de circulation</i> <i>Level of Service and capacity for undivided two-lane streets</i>	2010
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure: ponts à culées intégrales <i>Tragwerk-Baugrund Interaktion:</i> <i>Brücken mit Integralen Widerlagern</i> <i>Soil-Structure interaction:</i> <i>bridges with integral abutments</i>	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz <i>La circulation du point de vue des enfants:</i> <i>Les trajets scolaires des élèves du primaire en Suisse</i> <i>Traffic and children: Primary school children's routes to school in Switzerland</i>	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement <i>Coordination entre information de trafic individuelle et gestion de trafic</i> <i>Coordination between individual traffic information and traffic management</i>	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen <i>Essais de gonflement de longue durée sur roches anhydrites</i> <i>Long-term swelling tests on anhydritic rock</i>	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet <i>Entretien des infrastructures routières dans les zones bâties: caractéristiques et conséquences</i> <i>Special features and consequences of road facility maintenance in built-over areas</i>	2009
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeurückhaltesysteme <i>Control of effectiveness of road restraint systems</i> <i>Contrôle de l'efficacité des dispositifs de retenue de véhicules</i>	2011
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel <i>Détection d'incidents dans les tunnels routiers</i> <i>Incident Detection in Road Tunnels</i>	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen <i>Prévision de gel et de brouillard pour les routes</i> <i>Prediction of frost and fog for roads</i>	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten <i>Principes pour la quantification des effets des déficits de la sécurité</i> <i>Basis for the quantification of the effects of safety deficits</i>	2011
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen <i>Alternatives aux passages pour piétons dans les zones 30</i> <i>Alternatives to zebra crossings in 30km/h zones</i>	2010
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation <i>Energy extraction from urban tunnels, evaluation of systems</i> <i>Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains; évaluation de systèmes</i>	2010
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau <i>Analyse inverse pour la construction routière</i> <i>Inverse analysis in Road Geotechnics</i>	2011
1311	VSS 2000/543	Viabilite des projets et des Installations annexes Kontrolle der Befahrbarkeit von Strassen und Nebenanlagen <i>Viability of road projects and secondary facilities</i>	2010
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement <i>Standadisation des données de trafic pour gestion intermodale du trafic</i> <i>Standardised traffic data for intermodal traffic management</i>	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum <i>Standards for mobility supply in peripheral regions</i> <i>Standards pour l'offre de mobilité dans l'espace périphérique</i>	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpines</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011