

Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 212



bast

Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln

von

Brigitte Färber
Berthold Färber

Universität der Bundeswehr
Institut für Arbeitswissenschaft
München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 212

bast

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt Fe 03.406/2006/FGB:
Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln

Projektbetreuung

Hardy Holte

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9315
ISBN 978-3-86918-072-4

Bergisch Gladbach, Dezember 2010

Kurzfassung – Abstract

Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln

Das Forschungsprojekt "Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln" hat zum Ziel, Straßenverkehrstunnel sicherer zu gestalten und Verkehrsteilnehmer bei Störungen schnell und sicher zum richtigen Verhalten anzuleiten. Als Ausgangsbasis diente eine Internetbefragung mit 423 Personen aller Altersgruppen über den Wissensstand der Nutzer (Ausstattung von Tunneln, Verhalten). So würden beispielsweise 16 % der Befragten im Fahrzeug bleiben, wenn im Tunnel nur Feuer und Rauch zu sehen sind, 19 % wissen nicht, was zu tun ist. Die Zeit, die bei einem Brand zur Evakuierung zur Verfügung steht, wird von 42 % der Befragten überschätzt. Wie auch eine Analyse des Verhaltens bei früheren Tunnelbränden zeigt, unterschätzen die Betroffenen die Dramatik der Situation und erleben das Fahrzeug als Schutzraum. Sie bleiben daher bei Feuer und Rauch zu lange im Fahrzeug sitzen.

Eine Umfrage unter Tunnelbetreibern gibt den aktuellen sicherheitstechnischen Stand und Art und Umfang der Notfallpläne wieder. Lärmmessungen in ausgewählten Tunneln zeigen die Möglichkeiten akustischer Informationen auf.

In einer Serie von Experimenten wurden wesentliche Gestaltungsfragen geklärt:

Optische/haptische Möglichkeiten: Um zu prüfen, wie Personen aus einer verrauchten Umgebung schnellstmöglich evakuiert werden können, werden in einer Bunkeranlage (mit Theaterrauch und Lärm-Beschallung, $n = 54$) verschiedene Leitmöglichkeiten experimentell untersucht: Lauflichter, Dioden-Laser-Modul, Handlauf sowie eine Kombination daraus. Wenn zum Auffinden des Notausgangs ein Queren des Tunnels erforderlich ist, eignet sich besonders eine Kombination aus optischen und haptischen Hilfen.

Akustische Möglichkeiten: Im Rahmen der Studie wurden sowohl Sprachdurchsagen per Lautsprecher für herkömmliche (schlecht verständliche) sowie für neuartige Hornlautsprecher (wegen geringeren Echos besser zu verstehen) für Radio-Durchsagen als auch akustische Signale für extreme Störfälle entwickelt. Die Sprachausgaben sind kurz gefasst und entsprechen den Erkenntnissen der Psychoakustik und Linguistik.

Bei Tunnelbränden ist es sinnvoll, die Sprachausgaben durch akustische Signale in Form spezifischer „Sounds“ zu ergänzen oder zu ersetzen, die gut lokalisierbar und in ihrer Wirkung selbsterklärend sind, die Fahrzeuginsassen zum schnellen Verlassen des Fahrzeugs veranlassen und das Auffinden der Notausgänge erleichtern.

In einer Versuchsserie (Bunkeranlage, Verkehrslärm 80 dB A, Geräusche Strahlventilator 78 dB A) mit je 40 Per-

sonen aller Altersgruppen wurden zahlreiche „lockende“ und „treibende Sounds“ verglichen. Als „lockende“ Sounds, die die Probanden zum Ausgang leiten sollen, wurden u. a. verschiedene Vogelstimmen, Musikinstrumente, eine Singstimme („Hier her“), eine Sprechstimme (z. B. „Please, exit here“; „Der Notausgang ist hier“) und weißes Rauschen erprobt.

Die aversiven Signale, die Personen zum Verlassen des Fahrzeugs und des Tunnels veranlassen sollen, wurden mit einer Orgelpfeife mit ca. 7 Hz sowie mit einer Bassbox (Frequenzgang von ca. 25-100 Hz) erzeugt. Außerdem wurden weitere Signale, z. B. eine Feueralarm-Sirene, erprobt.

Um in einer Notfallsituation im Tunnel Menschen dazu zu bewegen, aus ihrem Fahrzeug auszusteigen und zu flüchten, eignet sich entweder der Bass-Sound „Sägezahn“ (Periode 10 auf 50 Hz) oder ein dunkler Ton aus der Orgelpfeife (7 Hz). Die tiefen Frequenzen werden mehr im Bauchraum gefühlt als gehört und als sehr unangenehm empfunden. Bei diesen Sounds sind die meisten richtigen Interpretationen zu verzeichnen und die Emotionen, die geweckt werden, eignen sich dazu, Menschen aus dem Tunnel zu treiben. Um Personen in der Geräuschkulisse eines Tunnels zu einem Notausgang zu locken, ist, entgegen den bisherigen Aussagen in der Literatur, das weiße Rauschen (ohne Zusatz) nicht zu empfehlen. Vielmehr eignet sich der Song „Hier her“ (weibliche Altstimme, getragen, Rufferz), im Wechsel mit dem Lockgesang des Rotkehlchens, das mit weißen Rauschen hinterlegt ist. Ebenfalls empfehlenswert ist die Sequenz „Der Notausgang ist hier“ – „Rotkehlchen mit weißen Rauschen hinterlegt“ – „Please, exit here“. Diese Signalkombinationen sind sehr gut zu orten, werden im richtigen Sinne interpretiert und positiv beurteilt.

Die verschiedenen Systeme müssen hierarchisch aufeinander abgestimmt eingesetzt werden, wobei das entsprechende Stör- bzw. Notfall-Szenario zu beachten ist (siehe Kapitel 13). Die in dieser Studie gefundenen Erkenntnisse sind mit vergleichsweise geringem Aufwand in die Praxis umzusetzen und gut geeignet, die Sicherheit bei Störfällen in Tunnel deutlich zu verbessern.

Der Originalbericht enthält umfangreiche Anhänge. Diese sind Verhaltensempfehlungen verschiedener Institutionen bei Brand im Tunnel (ANH. A), Internetbefragung zur Tunnelsicherheit und Informationsblatt für die Teilnehmer (ANH. B, C), Beispiel eines Alarm- und Gefahrenabwehrplanes (ANH. D), Optisch-haptischer Versuch, Details (ANH. E), Akustischer Versuch, verwendete Signale, Signal-Ortung, Reaktionen und Reaktionszeiten (ANH. F) sowie bereits vorliegende Sprachausgaben aus verschiedenen Tunneln Deutschlands (ANH. G). Auf den Abdruck dieser Anlagen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anhänge im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten

Motivating correct behaviour in road tunnels during emergency situations

The research project “Motivating correct behaviour in road tunnels during emergency situations” aims to increase the safety of road tunnels and to instruct motorists in safe behavior in the event of emergencies or disturbances. The study was based on an internet survey which assessed motorists’ current knowledge base (e.g., regarding tunnel fixtures, behavior) and which was completed by 423 respondents of all ages. Results showed, for example, that 16% of respondents would stay inside their cars if they saw fire and smoke, whilst 19% admitted to not knowing what to do in such a situation. The time available for evacuation in the event of a fire was overestimated by 42%. A behavioral analysis of previous tunnel-fire incidents showed that the individuals involved underestimated the intensity of the situation and perceived the vehicle as a safe harbor. They thus tended to remain inside their cars for too long in the event of fire and smoke.

A survey among tunnel conductors revealed current safety standards as well as the nature and scope of emergency planning. Noise measurements in selected tunnels demonstrated the potential of acoustic information in emergency situations.

In a series of experiments, fundamental design aspects for emergency evacuation were resolved:

Visual/haptic means: In order to ascertain how people can be evacuated from a smoke-filled environment as quickly as possible, different guidance methods were experimentally tested in an underground bunker (using theatrical smoke and noise, n=54): guidance lights, diode laser modules, railings, as well as a combination thereof. If it is necessary to cross the tunnel in order to find the emergency exit, combinations of visual and haptic devices are particularly well-suited.

Acoustic means: Speech announcements were developed using traditional loudspeakers (poor transmission quality), as well as modern loudspeakers (enhanced transmission quality due to reduced echo interference). Radio announcements for emergency situations as well as acoustic signals for extreme situations were designed.

The speech announcements were brief and conformed to current psychoacoustic and linguistic principles. In the event of tunnel fires, speech announcements should be complemented or replaced by acoustic signals in the form of specific sounds which can be easily located, are self-explicable, which motivate motorists to immediately leave their vehicles, and which help them find emergency exits.

In a series of experiments (underground bunker, traffic noise 80 dB A, fan noise 78 dB A), each of which was based on a sample of 40 participants of all ages, the effects of numerous “attractive” and “aversive” sounds

were compared. Different bird songs, musical instruments, a singing voice (e.g. “Hier her.” – English: Come here.), a speaking voice (e.g. “Please exit here.”, “Der Notausgang ist hier.” – English: The emergency exit is here.) and white noise were tested as “attractive” sounds designed to lead participants to the exit.

On the other hand, “aversive” sounds designed to motivate people to leave their vehicles and the tunnel were created, e.g. an organ pipe (ca. 7 Hz) as well as a subwoofer speaker (frequency of ca. 25-200 Hz). Further signals, such as e.g. a fire alarm siren, were additionally tested.

The bass sound “saw tooth” (period 10 to 50 Hz) or a low organ pipe sound (7 Hz) prove suitable for encouraging motorists to vacate their cars and flee in an emergency situation in a tunnel. Lower frequencies are felt in the stomach area rather than heard and are perceived to be highly uncomfortable. Most participants correctly interpreted these sounds and the emotions that they evoke help encourage people to leave the tunnel. Contrary to previous literature, pure white noise cannot be recommended for use in leading people to the exits. Better suited for this task is a voice singing “Hier her.” (English: Come here. Female alto voice, sostenuto, minor third), alternated with the mating song of a robin and supplemented with white noise. A sequence of signals consisting of the speech announcement “Der Notausgang ist hier.” (English: The emergency exit is here.), the robin song supplemented with white noise, and the speech announcement “Please exit here.” can also be recommended. These signal combinations can be localized very well, are correctly interpreted and are judged positively.

The different systems must be hierarchically attuned to one another, with the specific nature of the emergency being taken into account (see Chapter 13). The insights gained from this study can be implemented in real-life situations with relatively little effort and are well-suited for significantly improving safety in the event of emergencies in tunnels.

The original report contains numerous appendices. These are the conduct recommendations made by various institutions in the event of a fire in the tunnel (Appendix A), an internet survey on tunnel safety and an information sheet for participants (Appendices B and C), an example of an alarm and hazard-prevention plan (Appendix D), an optic/haptic trial with details (Appendix E), an acoustic trial, the signals used, signal location, responses and response times (Appendix F) and the documentation already available about the various tunnels in Germany in other languages (Appendix G). These appendices have not been included in this publication. They are available from the Federal Highway Research Institute and may be viewed there. References to the appendices in the body of the text have been retained for the information of the reader.

Inhalt

1	Ausgangslage	9	5.2	Ergebnisse der Befragung von Tunnelbetreibern	34
2	Analyse des Verhaltens von Fahrzeuginsassen bei Tunnelbränden	9	6	Welche Lärmbedingungen treffen wir im Tunnel an?	38
2.1	Einige Beispiele	9	6.1	Vorgehensweise bei der Messung	39
2.2	Fazit aus Unfallanalysen von SHIELDS	12	6.2	Datenanalyse	40
2.3	Weitere Berichte über das Verhalten bei Bränden (generell)	12	7	Wahrnehmung von optischen Signalen	44
3	Welches Verhalten wäre „richtig“?	14	7.1	Grundbegriffe der menschlichen Wahrnehmung und der Lichttechnik ...	44
3.1	Ablauf eines Brandes	14	7.1.1	Rezeptortypen des menschlichen Auges	44
3.2	Richtiges Verhalten im Brandfall-Literatur	15	7.1.2	Die Adaptation	44
3.3	Erkenntnisse aus Simulationen	18	7.1.3	Der Kontrast	45
3.4	Optimales Verhalten generell und bei einem Brand im Tunnel	20	7.1.4	Die Farbwahrnehmung	45
4	Welches Wissen ist bei den Tunnelnutzern vorhanden?	21	7.1.5	Zuordnung von Farbe und Bedeutung	46
4.1	Frühere Umfragen	21	7.1.6	Lichttechnische Begriffe	46
4.2	Eigene Datenerhebung – Internetbefragung von Tunnelnutzern	22	7.1.7	Lampen und ihre Wirkung im Tunnel	47
4.2.1	Erstellung des Fragebogens und Übermittlungsmodalitäten	22	7.2	Kennzeichnung des Auswegs	48
4.2.2	Beschreibung der Stichprobe	23	7.2.1	Symbole zur Kennzeichnung	48
4.2.3	Allgemeines Wissen der Befragten ...	24	7.2.2	Gestaltung von Notausgängen	48
4.2.4	Gefühle im Tunnel	25	7.3	Rauch	51
4.2.5	Wie soll man sich im Tunnel verhalten?	26	7.3.1	Theoretische Überlegungen	51
4.2.6	Brand im Tunnel	28	7.3.2	Bisherige experimentelle Untersuchungen	55
4.2.7	Zusammenfassung der Umfrage-Ergebnisse	31	7.3.3	Rauchverteilung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit	58
4.2.8	Konsequenzen	31	7.3.4	Diskussion	58
5	Welche Einrichtungen sind vorhanden?	33	7.3.5	Schwerpunkte für Versuche	59
5.1	Fragebogen an die Tunnelbetreiber ...	34	8	Haptische Wahrnehmung	60
			9	Optisch-haptischer Versuch	61
			9.1	Zielsetzung	61
			9.2	Versuchsplanung	62

9.3	Versuchsteilnehmer	62	11.4.1	Versuchsaufbau für Versuchsteil 1 (beide Versuche)	80
9.4	Versuchsaufbau	62	11.4.2	Versuchsaufbau für Versuchsteil 2 (beide Versuche)	83
9.5	Versuchsdurchführung	66	11.5	Ergebnisse	87
9.6	Ergebnisse	66	11.5.1	Unterschiede zwischen den Probanden	87
9.6.1	Unterschiede zwischen den Probanden	66	11.5.2	Unterschiede zwischen den Signalen	87
9.6.2	Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen	67	11.5.3	Ortung der „lockenden“ Signale	88
9.6.3	Unterschiede in der Körper- haltung	68	11.5.4	Interpretation der „lockenden“ Signale	89
9.6.4	Wie fühlen sich die Probanden in den verschiedenen Versuchs- bedingungen?	70	11.5.5	Interpretation der „heraus- treibenden“ Signale	91
9.6.5	Zusammenfassung und Schluss- folgerungen	70	11.5.6	Zusammenfassung der akustischen Versuche und Folgerungen	93
10	Wahrnehmung von akustischen Signalen	71	12	Sprachausgaben	94
10.1	Grundlagen der akustischen Wahrnehmung	72	12.1	Vor- und Nachteile von Sprachausgaben	94
10.1.1	Hörbereich	72	12.2	Wie werden Sprachausgaben erzeugt, gespeichert, aus- gegeben?	94
10.1.2	Hochtonverlust im Alter	72	12.3	Aspekte der Psychoakustik	95
10.1.3	Schallortung und Richtungshören ...	72	12.4	Meldungen – Generelles	96
10.2	Ton-Signal oder Sprache?	74	12.5	Sprachausgaben – typische Beispiele	98
10.3	Psychologische Komponenten	74	13	Zusammenfassung	102
10.3.1	Aufmerksamkeit	74	14	Literatur	108
10.3.2	Dringlichkeit	74			
10.3.3	Situationskompatibilität	75			
10.3.4	Maskierung und Verdeckung	75			
10.3.5	Intuitive Verständlichkeit der Bedeutung von Sound	76			
10.4	Neue Technologie – als Hilfsmittel?	78			
10.5	Schlussfolgerungen aus den bisher vorliegenden Studien	79			
11	Akustische Versuche	79			
11.1	Zielsetzung	79			
11.2	Versuchsplanung	79			
11.3	Versuchsteilnehmer	80			
11.4	Versuchsaufbau	80			

Danksagung

An den umfangreichen Befragungen und Labor-experimenten waren viele beteiligt. Wir danken sehr herzlich:

- Stefan Walter, Cand.-Ing.
(Assistenz bei der Internetumfrage und beim optisch-haptischen Versuch),
- Christopher Bayfield, Cand.-Ing.
(Assistenz beim ersten akustischen Versuch),
- Stefan Neerfeld, Cand.-Ing.
(Assistenz beim zweiten akustischen Versuch),
- Christopher Herr, Cand.-Ing.
(Lärm-Messungen in den Straßentunneln),
- Torsten Wobus, Cand.-Ing.
(Versuchsraumausstattung),
- Dr. habil. Michael Popp
(Versuchsaufbau, Programmierung),
- Verena Nitsch, Dipl. Psych.
(Abstract),
- Prof. Dr.-Ing. Helmut Fleischer
(Beratung bei akustischen Messungen),
- Georg Weishaupt
Chef der Meisterwerkstätte für Orgelbau (Konzeption einer Orgelpfeife, Bau eines speziellen Orgelkopfes),
- unseren universitätseigenen Schreiner- und Malerwerkstätten (Bau der Orgelpfeife, Anstrich),
- den Sängern und Musikern, die uns bei den Sound-Aufnahmen unterstützt haben, namentlich Renate Glaser, Ditmar Bachmann & Katharina Singer,
- allen, die unsere Umfrage auf ihrer Homepage geschaltet haben,
- den Tunnelbetreibern und Tunnelverantwortlichen, die an der Befragung teilgenommen und Unterlagen zur Verfügung gestellt haben
- und – last, but not least – den Mitgliedern des Betreuerkreises für Anregungen, Literatur, Herstellung von Kontakten usw.

Großer Dank gebührt auch all unseren Befragungs- und Versuchsteilnehmern!

1 Ausgangslage

Peter HEHLEN, Direktor der Schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung, schreibt, Tunnelanlagen seien sicherer als offene Autobahnstrecken (Vorwort zu SALVISBERG, ALLENBACH, CAVEGN, HUBACHER & SIEGRIST, 2004).

SALVISBERG et al. (2004) begründen dies mit einer Unfallstatistik, die für die freie Strecke eine Unfallrate von 0,47 und für Tunnel eine Unfallrate von 0,35 Unfällen pro 1 Mio. Kilometer ausweisen (Daten der bfu, Schweiz, von 1992-1999). Allerdings sei die Folgeschwere eines Unfalls im Tunnel höher: Sie betrage im Tunnel 2,8, auf freier Strecke 2,7 Getötete pro 100 Verunfallten (Daten von 1992-2002).

Diese Aussage wird von ROBATSCH & NUSSBAUMER (2005) für Österreichs Straßen bestätigt. Auch sie finden heraus, dass das Risiko für einen Unfall im Tunnel geringer sei als auf Freilandstrecken. Wenn es jedoch zu einem Unfall komme, sei das Risiko, dabei getötet zu werden, doppelt so hoch wie auf der Autobahn.

Im Bericht der United Nations (2001) wird die geringere Unfallzahl auf das Fehlen ungünstiger Wetterbedingungen wie Schnee, Eis, Wind und Regen zurückgeführt.

SALVISBERG et al. (2004) berechnen sogar für längere Tunnel ein geringeres Unfallrisiko – ist ein Tunnel doppelt so lang wie ein anderer, so würden die Unfallzahlen nur um den Faktor 1,68 und die Verunfalltenzahlen um den Faktor 1,8 steigen, und nicht um den Faktor 2, wie zu vermuten wäre (a. a. O., S. 71).

Wenn die Statistik eine solch klare Sprache spricht und die Chancen, gut durch den Tunnel zu kommen, recht hoch sind, woher rührt dann das mulmige Gefühl, das viele befällt, wenn sie durch längere Tunnel fahren müssen? Betrifft es hauptsächlich Menschen, die an Klaustrophobie leiden, also Angst vor geschlossenen und engen Räumen (z. B. Lift, Flugzeug, Tunnel) haben? Die Zunahme von Internetforen und Fernsehsendungen zu diesem Thema lässt vermuten, dass nicht nur Klaustrophobe von diesem Problem betroffen sind (siehe z. B. Forum wer-weiss-was, Sendung Rasthaus im SWR).

Liegt es an der Beeinträchtigung der Sichtweiten durch Wände und Decken oder den erheblichen Auswirkungen eines Zwischenfalls gegenüber der freien Strecke (BALTZER, 2000)?

Oder rührt das Gefühl nur von Schlagzeilen, wie „Tod in der Glutwolke“ oder „Flammenhöhle mit 1000 Grad“, mit denen Tageszeitungen aufmachen (RZ, 1999)? Sind es Berichte von Opfern, von denen nur Asche blieb, die nicht einmal mehr identifiziert werden konnten, da Goldzähne und Eheringe in der Hitze geschmolzen waren (BLUM, 1999)?

Zunächst ist festzuhalten, dass Sicherheit – vor allem subjektive Sicherheit nicht mit einem Verweis auf statistische Daten erzeugt werden kann. So ist beispielsweise Flugangst viel häufiger als die Angst, Auto zu fahren, obwohl statistisch die Autofahrt zum Flughafen die weitaus größere Gefährdung darstellt. Aufgrund der Dramatik der Ereignisse eines Flugzeugabsturzes oder Tunnelbrands ist die erlebte Bedrohung jedoch viel höher.

Weiterhin sind Fahrten durch Tunnel sehr viel seltener als Fahrten auf freier Strecke, sodass hier auf einen geringeren Erfahrungshintergrund bezüglich des Verhaltens bei Störungen zurückgegriffen werden kann.

Schließlich muss man nicht an Klaustrophobie leiden, um sich in einem schlecht beleuchteten Tunnel vorzustellen, dass bei einem Störfall die Fluchtmöglichkeiten deutlich eingeschränkt sind.

Unabhängig von Statistiken ist es daher sinnvoll, Tunnel sicherer zu gestalten, um Störungen zu vermeiden bzw. im Störfall negative Folgen für die Betroffenen zu minimieren. Ziel dieses Forschungsprojekts ist daher, Verkehrsteilnehmer bei Unfällen und Störungen in Tunnel schnell und sicher zum richtigen Verhalten anzuleiten. Dazu werden vor allem das Wissen und Verhalten der Nutzer ermittelt, daraus Lösungsansätze abgeleitet und experimentell untersucht.

2 Analyse des Verhaltens von Fahrzeuginsassen bei Tunnelbränden

2.1 Einige Beispiele

Eine sehr detaillierte Untersuchung von HAACK, SCHREYER, MEYEROLTMANN & BEYER (2000) analysierte 29 Brände in Straßentunnel im In- und Ausland. Interessant für unsere Thematik ist vor allem das Verhalten der Tunnelnutzer:

Sitzenbleiber:

Das folgende Tunnel-Ereignis zeichnet sich durch „Nicht-Handeln“ aus: Im Caldecott-Tunnel (Oakland, Kalifornien, 1982) hielt ein angetrunkener Pkw-Fahrer auf dem linkem Fahrstreifen. Als ein Bus einen Benzin-Tanklastzug überholen wollte, kam es zum Zusammenstoß, Benzin lief aus und entzündete sich. Innerhalb von 3 Minuten nach dem Zusammenstoß füllte sich der Tunnel mit 150 Grad heißem Rauch. Dennoch blieben die Leute in ihren Fahrzeugen sitzen und wurden vom Rauch eingeschlossen. Im Bericht von HAACK et al. (2000, S. 79 ff.) wird lediglich der hohe Sachschaden erwähnt, jedoch nicht, ob es zu Verletzungen oder Toten kam.

Die Autoren führen das Verharren der Fahrzeuginsassen in ihren Fahrzeugen auf die fehlende Kennzeichnung der Fluchtwege zu den Nachbarröhren zurück.

Gaffer:

Im Ekeberg-Tunnel (Oslo, Norwegen, 1996) entstand ein Brand durch die Unbedarftheit eines Busfahrers: Der Busfahrer bemerkte das Austropfen von Kraftstoff aus dem Motor-/Getriebebereich seines Gelenkbuses, weshalb er ihn zum Betriebshof bringen wollte. Unglücklicherweise wählte er dazu die Route durch den o. g. Tunnel, wo er dann Flammen aus dem Motorraum lodern sah und den Bus 500 m innerhalb des Tunnels abstellte. In einer Entfernung von 50 bis 100 Metern versammelten sich Schaulustige, um das „Schauspiel“ zu betrachten. Nach einer heftigen Explosion füllte sich der Tunnel mit Rauch- und Brandgasen. 8 Feuerwehrleute, die keinen Atemschutz trugen, erlitten Rauchvergiftungen (HAACK et al., 2000, S. 88 ff.).

Das Verhalten der „Zuschauer“ war völlig unbedarft – hier ist ein großes Wissensdefizit über die Gefährlichkeit von Feuer und Rauch zu verzeichnen.

Flüchtende:

Im Pfänder-Tunnel (Österreich, 1995) geriet ein Pkw-Fahrer auf die Gegenfahrbahn und prallte auf ein Sattelkraftfahrzeug, welches schleuderte, seinerseits auf die Gegenfahrbahn geriet und mit einem Kleinbus mit Wohnanhänger zusammenstieß. Der Kleinbus fing sofort Feuer und setzte die anderen Fahrzeuge in Brand. Automatische Brandmelder sprachen an, in der Tunnelzentrale wurde das rechnergesteuerte Brandprogramm gestartet. Der Tunnel war auf eine Strecke von 1.070 Metern ver-

raucht. Flüchtende Personen und Bergungsmannschaften wurden von der Rauchwolke eingeholt, konnten aber gerettet werden. Der Rauch war so dicht, dass Feuerwehrleute selbst mit einem speziellen Rüstfahrzeug nur auf folgende Weise vordringen konnten: Der Fahrer streifte mit dem Reifen an der Gehsteigkante entlang, seine Kollegen gingen vor dem Fahrzeug her (um niemanden zu überfahren), teils in gebückter Haltung, teils am Boden kriechend, doch konnten sie nicht einmal auf diese Weise den Mittelstreifen finden. Einer prallte im Rauch gegen einen abgestellten Lkw, insgesamt war es schwierig, zwischen den abgestellten Fahrzeugen hindurch zu kommen. Die Feuerlösch-Nische am Brandort musste ertastet werden um dort einen Wasserschieber zu öffnen. Die Löscharbeiten wurden durch die Hitze stark behindert. Der Sachschaden war beträchtlich. Durch den Unfall waren 3 Todesopfer zu beklagen (Insassen des Kleinbusses), die anderen Tunnelnutzer (Unfallbeteiligte und die Insassen weiterer 60 im Tunnel befindlicher Fahrzeuge) blieben unverletzt (HAACK et al., 2000, S. 85 ff.).

Die Unfallbeteiligten flüchteten zu Fuß – und retteten auf diese Weise ihr Leben. Wie die anderen Tunnelnutzer evakuiert wurden, ist nicht beschrieben.

Selbsthilfe der Tunnelnutzer:

Besonders interessant ist das Verhalten der Tunnelnutzer bei einem Brand im Nihonzaka-Tunnel (Japan, 1979). In diesem Röhrentunnel mit ca. 2 km Länge war durch einen Auffahrunfall, an dem 4 Lkw und 2 Pkw beteiligt waren, ein Brand entstanden: Treibstoff, Neopren nebst Lösungsmitteln und Äther entzündeten sich. Eine Sprühflutanlage wurde durch Feuermelder automatisch ausgelöst. Tunnelnutzer versuchten, das Feuer selbst zu löschen: Sie rollten die an Hydranten angeschlossenen Schlauchleitungen der Notfallbox aus. Um die Löschwasserversorgung zu aktivieren, muss normalerweise ein Hebel umgelegt werden. Es war jedoch nicht bekannt, dass bei dieser Anlage ein weiterer Knopf gedrückt hätte werden müssen – so konnte das Löschwasser nicht in Gang gebracht werden. Trotz eines Hinweises am Tunnelportal führen weitere Fahrzeuge in den Tunnel ein. Neben beträchtlichen Schäden am Tunnel, 173 zerstörten Fahrzeugen, waren vor allem 7 Tote und 2 Verletzte zu verzeichnen (HAACK et al. 2000, S. 76 ff.).

Die Selbsthilfe der Tunnelnutzer war im Grunde vorbildlich. Aus diesem Ereignis ist abzuleiten, dass Einrichtungen, wie die Löschwasserversorgung, so

einfach und intuitiv zu bedienen sein müssen, dass jeder Laie sie betätigen kann – und zwar ohne Bedienungsanleitung –, da im Notfall zum Studieren einer Anleitung keine Zeit bleibt und eventuell auch die Sicht fehlt.

Fahrer versucht, Fahrzeug aus Gefahrenzone zu bringen:

Im Gotthard-Tunnel (Schweiz, 1994) war das Rad eines Lastwagens in Brand geraten. Der Lkw-Fahrer versuchte, aus dem Tunnel zu fahren, dies gelang jedoch nicht, da der Motor an Leistung verlor. Der Fahrer versuchte, mit Hilfe seines Bordfeuerlöschers und des Feuerlöschers eines zu Hilfe eilenden anderen Fahrers den Brand zu löschen, leider ebenfalls erfolglos. Obwohl die Feuerwehr 11 Minuten nach dem Notruf vor Ort war, entstand ein Vollbrand mit einer Verrauchung über ca. 1.700 m Länge. Der Rauchpfropfen pendelte hin und her. Die Tunnel-Schutzräume wurden kaum benutzt. Zu Personenschäden finden sich keine Angaben (HAACK et al., 2000, S. 82 ff.).

Das Verhalten des Fahrers war vorbildlich: Er versuchte zunächst, den Lkw aus der Gefahrenzone zu bringen, dann zu löschen.

Polizisten (zufällig anwesend) und Tunnelmitarbeiter evakuieren:

Bei einem Brand im zweiröhrigen, 2.500 m langen Holland-Tunnel (New York, USA, 1949) gerieten vom Laster fallende Schwefelkohlenstoff-Fässer in Brand. Polizisten, die zufällig durch den Tunnel fuhren, meldeten den Brand und halfen anschließend Tunnelnutzern bei der Flucht in die Nord-Röhre des Tunnels. Auch das Tunnelpersonal half sofort bei der Evakuierung, indem es Personen zu Fuß aus dem Tunnel führte und nicht brennende Fahrzeuge aus dem Tunnel herausfuhr. Der Sachschaden bei diesem Brand war zwar beträchtlich (am Tunnel selbst, 10 Lkw incl. Ladung, 13 Pkw), jedoch waren keine Todesopfer zu beklagen. 66 Personen erlitten Rauchvergiftungen (HAACK et al., 2000, S. 72 ff.).

Bei diesem Brand verhütete das Eingreifen der Polizisten und der Tunnelmitarbeiter eine größere Katastrophe. Dies spricht für kompetentes Personal vor Ort.

Tunnelpersonal evakuiert:

Im Gotthard-Tunnel (Schweiz, 1997) geriet ein Pkw-Transporter (Ladung: 8 neue Pkw) einen Kilo-

meter vor dem Ausfahrtportal in Brand. Der Fahrer forderte in der Notrufstation Hilfe an, die sofort anliefe. Der Brand und die Rauchausbreitung verliefen relativ langsam. Bereits 3 Minuten nach dem Notruf waren Tunnelhelfer vor Ort, die Pkw-Fahrer anwies, zu wenden und hinauszufahren. Lkw-Fahrer wollten ihre Fahrzeuge nicht verlassen und suchten die Schutzräume nicht auf. Man musste sie auffordern und zum nächsten Schutzraum bringen. Insgesamt wurden 60 Personen in die Schutzräume gebracht. Lediglich eine Person erlitt eine Rauchvergiftung (HAACK et al., 2000, S. 90 ff.).

Durch den raschen Eingriff der Tunnelhelfer konnte größerer Schaden verhindert werden.

Löschversuche:

Im Mont-Blanc-Tunnel (Frankreich/Italien) ereigneten sich zwischen 1965 und 1999 17 Lkw-Brände, die meisten wurden von den Fahrern selbst gelöscht, fünfmal musste die Feuerwehr löschen. Bei 4 von diesen 5 Brandereignissen war die Ursache ein überhitzter Motor (Höhenunterschiede).

Der Brand im Jahre 1999 geriet völlig außer Kontrolle: Er entstand unterhalb der Fahrerkabine eines Sattelzuges (beladen mit 9 t Margarine und 12 t Mehl). Der Fahrer versuchte, den Brand zu löschen, was jedoch fehlschlug. Bereits 2 bis 4 Minuten nach Eingang der Brandmeldung waren 1.200 Meter im Tunnel so stark verraucht, dass die Feuerwehr des Tunnelbetreibers anhalten musste, die Feuerwehr aus Chamonix wurde schon 2.700 Meter vor dem brennenden Fahrzeug vom Rauch eingeschlossen (15 Min. nach Ausbruch des Brandes), 41 Min. danach musste ein Löschfahrzeug bereits in einer Entfernung von 4.800 Metern stoppen. Da die Lüftung auf volle Zuluft gestellt war, kam es zu Feuerübersprüngen über Strecken von 300 m. Auf der französischen Seite brannten 26 Fahrzeuge (davon 15 Lkw), der Abstand vom Feuer betrug 100 m, die Länge der Kolonne 500 m. Auf der italienischen Seite brannten 8 Lkw, der Abstand zum Brandort betrug 290 m. Die Pkw konnten wenden und aus dem Tunnel herausfahren. Neben sehr hohem Sachschaden sind vor allem die vielen Opfer zu beklagen: Von den 39 Toten wurden 29 in Kraftfahrzeugen gefunden, 2 in einem Schutzraum (er bot nur für 2 Stunden Schutz, der Brand dauerte 53 Stunden) (HAACK et al., 2000, S. 93 ff.).

Der Unglücksfahrer verhielt sich richtig, er versuchte zu löschen. Die katastrophalen Auswirkungen

des Brandes sind auf eine Reihe von Faktoren zurückzuführen (z. B. inkompatible Atemschutzgeräte und Schlauchanschlüsse). Interessant ist, dass sich Pkw-Fahrer durch Wenden retten konnten – eine Verhaltensweise, von der üblicherweise abgeraten wird, die hier jedoch offensichtlich unkritisch war, da die Ampeln an den Einfahrten des Tunnels auf Rot standen und eine Seite auch durch eine Schranke geschlossen war, sodass keine Fahrzeuge mehr in den Tunnel einfahren konnten.

Problem: Baustelle im Tunnel:

Im Tauern-Tunnel (Österreich, 1999) führte Unachtsamkeit an einer Baustelle zu einem folgenschweren Unfall: Die Ampel vor der Baustelle, 800 Meter vor dem Nordportal, zeigte Rot, ein Lkw (Ladung: Lackfarben) und 4 Pkw warteten. Der Fahrer eines Sattelschleppers erkannte zu spät, dass die Fahrzeuge standen, und fuhr auf. Die Fahrzeuge gerieten sofort in Brand, das Feuer griff auf die folgenden Fahrzeuge über. Wegen dichten Qualms, großer Hitze und Explosionen konnte die Feuerwehr erst ca. 7 Stunden später zum Brandereignis vordringen. Über die Verhaltensweisen der Personen im Tunnel wird nichts berichtet. Es gab 12 Tote und 57 Verletzte (HAACK et al., 2000, S. 97 ff.).

Fazit aus den Unglücksanalysen HAACK et al.:

In den umfangreichen Untersuchungen von HAACK et al. (2000) an 29 Straßentunneln in verschiedensten Ländern der Welt kristallisierte sich heraus, dass in 62 % der Fälle Fahrzeugdefekte und in 34 % der Fälle Auffahrunfälle die Ursache für den Brand waren (a. a. O., S. 113).

Als großes Problem zeigte sich die unzureichende Lüftung in 48 % der Tunnel (a. a. O., S. 115).

In 14 % der Fälle gab es Probleme mit dem Fluchtweg (S. 119). Bei den Rettungs- und Löscharbeiten behinderten vor allem schlechte Sicht bzw. verrauchte Tunnelanlagen (41 %). Probleme ergaben sich bei der Löschwasserversorgung (24 %), mit dem Atemschutz (17 %) und mit dem Funk (14 %).

Betrachtet man den Verhaltensaspekt, so spannen die aufgezeigten Beispiele einen weiten Fächer aus:

- Von Tunnelnutzern, die einfach im Fahrzeug sitzen bleiben, die als Zuschauer herbei eilen oder zu Fuß oder rückwärts fahrend flüchten, wird berichtet,

- von Fahrern, die ihr Fahrzeug noch aus der Gefahrenzone zu bringen versuchen, die Löscharbeiten starten,
- von Tunnelmitarbeitern und Polizisten, die beherzt und besonnen eingreifen.

2.2 Fazit aus Unfallanalysen von SHIELDS

SHIELDS (2005) untersuchte 19 Brände in Bahn- und Straßentunnel bezüglich menschlicher Faktoren und hält folgende Beobachtungen fest:

- Auch wenn eine Notfallsituation angezeigt wird, wird weiter in den Tunnel eingefahren – bis dies physikalisch verhindert wird.
- Fahrer wollen zu ihrem Ziel gelangen – dieser Wunsch kann die Wahrnehmung eines Risikos eintrüben.
- Die Menschen nehmen oft nicht wahr, dass sie sich in unmittelbarer Gefahr befinden, deshalb bringen sie sich auch nicht sofort in Sicherheit.
- Sie wollen ihr Eigentum/ihr Fahrzeug nicht zurücklassen.
- Ein Tunnel ist eine komplexe Umgebung – man kann nicht davon ausgehen, dass der Benutzer damit vertraut ist (nach SHIELDS, 2005, S. 329).

2.3 Weitere Berichte über das Verhalten bei Bränden (generell)

In ihrer Literaturrecherche stoßen STEINAUER, ZIMMERMANN, MAYER, SCHAUERTE, MANNES, MÜHLBERGER, HÜNNERKOPF, WIESER, PÖTZL, MÜLLER, PAULI, BALTZER & RIEPE (2007) auf folgende Analysen:

CANTER, der 20 Jahre lang Brandunglücke analysiert habe, sei immer wieder auf das gleiche Schema gestoßen (in seiner Publikation von 1990):

- 1. Interpretationsphase: erste Hinweise (Geruch, Lärm, Alarm, ...), oft unklar und mehrdeutig. Oft werde der Ernst der Lage nicht erkannt.
- 2. Vorbereitungsphase: Der Betroffene suche nach weiteren Informationen, kontaktiere umstehende Personen, usw.

- 3. Aktionsphase: Die Flucht werde angetreten (verheerende Brände sind dann schon außer Kontrolle geraten).

WOOD berichtete 1999 von einer Analyse von 952 Brandfällen: Danach würden sehr viele der ersten Reaktionen eine geeignete Aktivität darstellen, nur 5 % der Betroffenen würden so handeln, dass sich – nach WOOD – die Gefahr erhöhe. „Erste Handlungen waren löschen, Feuerwehr rufen, Feuer ‘untersuchen’, Gefahr minimieren, Raum verlassen oder andere anweisen, zu flüchten“ (STEINAUER et al., 2007, S. 17).

WOOD konnte folgende gruppenspezifische Verhaltensmuster erkennen:

- „Je öfter jemand an Brandübungen teilgenommen hat, desto eher trifft er Evakuierungsmaßnahmen oder löst Brandalarm aus.
- Menschen, die schon einmal einen Brand erlebt haben, würden zuerst löschen, aber nicht als Erster den Raum verlassen.
- Frauen scheinen eher als Männer sofort zu warnen und zu evakuieren, während Männer versuchen, sich dem Feuer zu stellen.
- Mit höherem Alter nimmt die Bereitschaft zu, das Feuer zu bestreiten“ (a. a. O., 2007, S. 17).

SIME berichtet (1999), viele Menschen würden „in Notsituationen bezüglich der Wahl des Fluchtwegs nicht rational handeln. Sie suchen nicht den nächsten Notausgang auf, sondern richten sich nach bekannten Anhaltspunkten, gehen bekannte Wege oder orientieren sich an anderen Personen. Gruppenbildung geschieht sehr schnell in Notsituationen und Personen einer Gruppe sind meist darauf bedacht, diese zusammenzuhalten. Egoistisches Verhalten ist nach SIME in Extremsituationen selten zu beobachten“ (a. a. O., 2007, S. 17).

STEINAUER et al. (2007) ziehen folgende Schlüsse: „Die Untersuchungen von typischen Notsituationen durch die Experten haben gezeigt, dass sich immer wieder bestimmte Muster in Verhaltensabläufen zeigen. Aus wahrnehmungs- und emotionspsychologischer Sicht sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Eine Notsituation erzeugt bei den beteiligten Personen Angst und Stress. Die emotionale Reaktion auf eine bestimmte Situation hängt eng zusammen mit der kognitiven Bewertung dieser

Situation und wirkt auch auf die Einleitung von Handlungsmaßnahmen.

- Der Ablauf einer Notsituation ist immer verbunden mit der Wahrnehmung durch die beteiligten Personen. Nur wenn eine Situation schnell genug als gefährlich erkannt wird, können Entscheidungen getroffen und notwendige Maßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden. Oft stehen den betroffenen Personen uneindeutige Informationen zur Verfügung bzw. es werden Informationen falsch interpretiert, wodurch die Entscheidungsfindung beeinträchtigt wird.
- Menschen besitzen eine begrenzte Arbeitsgedächtniskapazität. Da eine Gefahrensituation immer sehr viel kognitive Anstrengung erfordert, besteht eine große Wahrscheinlichkeit für eine kognitive Überlastung (‘cognitive overload’) und ... falsche Entscheidungen“ (a. a. O., 2007, S. 18).

PROULX (2002) definiert drei Hauptgründe, weshalb die Entscheidungsfindung während eines Brandes grundsätzlich verschieden zum normalen Entscheidungsverhalten ist:

- Bei einem Brand steht wesentlich mehr auf dem Spiel, möglicherweise ist die Konsequenz, ob man selbst oder andere Personen mit dem Leben davonkommen oder nicht.
- Die für die Entscheidung zur Verfügung stehende Zeit ist begrenzt.
- Die Informationen, die als Basis für die Entscheidung dienen, sind vieldeutig, unvollständig und ungewöhnlich. Es ist auch meist nicht möglich, sachgerechte Information zu bekommen (PROULX, 2002, S. 1).

Als Ergebnisse des französischen ACTEURS-Projekts nennen NOIZET & MOUREY (2005), neben den o. g. Punkten, einen hohen Stressfaktor und sehr geringes Wissen über das tatsächliche Risiko und angemessenes Verhalten in einer technischen Umgebung. Sie gehen deshalb davon aus, dass in einer Krisensituation im Tunnel die meisten Personen nicht in einen Reflex-Modus übergehen. Mentale Prozesse sind „zerrissen“ und werden durch Stress behindert.

WORM zitiert aus einer Literaturstudie der Universität Groningen aus dem Jahre 1999 und nennt, neben einigen bereits oben besprochenen Punkten, noch weitere:

- „Die Gefahren, die Rauch, Hitze und toxische Stoffe mit sich bringen, sind den Verkehrsteilnehmern nicht zur Genüge bekannt. ...
- Wenn Menschen sich dazu durchringen, die Flucht zu ergreifen, versuchen sie das zumeist über den Weg, den sie gekommen sind, evtl. sogar in ihrem Fahrzeug.
- Fluchtwege werden oftmals nicht als solche erkannt (Unwissen oder Unklarheit)“ (WORM, 2002, S. 5).

Weitere Details stellt er aus der Literatur zusammen:

- „Ein Brand wird längst nicht immer sofort entdeckt. ...
- Regelmäßig stellt sich heraus, dass die vorhandenen Feuerlöscher überhaupt nicht benutzt wurden. ...
- Informationen über Brand werden längst nicht immer sofort mitgeteilt. Man wartet erst einmal ab“ (WORM, 2002, S. 5).

NILSSON (2006) analysiert, wann ein Gebäude im Falle eines Feuers für Personen, die sich darin aufhalten, als „sicher“ gelten könne. Dies sei der Fall, wenn die notwendige Zeit, das Gebäude zu verlassen (ASET = available safe escape time) länger sei als die benötigte Zeit (RSET = required safe escape time). Für die Berechnung werde oft ein einfaches 3-Phasen-Modell verwendet:

- Phase 1: Entdeckung und Alarm,
- Phase 2: Pre-movement, d. h. von dem Moment, ab dem die Person die Information über das Feuer erhält (z. B. durch den Alarm), bis zu dem Zeitpunkt, an dem sie beginnt, sich Richtung Ausgang zu bewegen.
- Phase 3: Flucht.

NILSSON zeigt, dass soziale Einflüsse bei Phase zwei eine große Rolle spielen. Er zitiert ein Experiment von LATANÉ & DARLEY aus dem Jahre 1970 mit männlichen Studenten, die in einem Raum einen Fraggbogen auszufüllen hatten, dann wurde Rauch eingeleitet. Ist die Person alleine im Raum, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie flüchtet, größer und sie flüchtet schneller. Bei 3 Personen im Raum dauert es länger, bis sie reagieren, und die Wahrscheinlichkeit, dass sie flüchten, ist viel geringer. Sind zwei passive Personen mit einer Versuchsperson

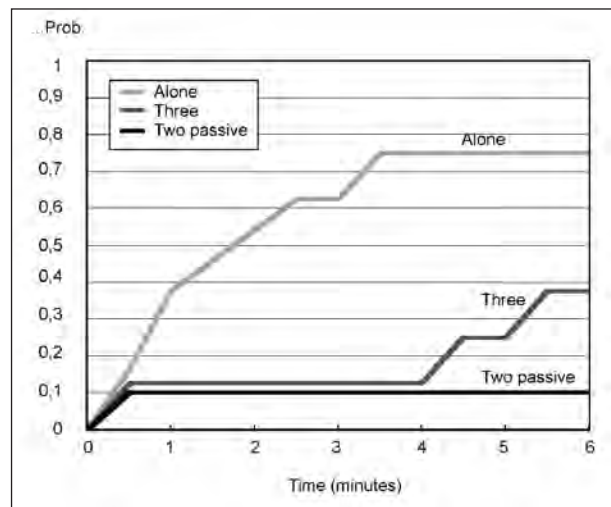


Bild 2.1: Gezeigt wird die Phase 2, Pre-movement, Erläuterungen siehe Text, nach den Ergebnissen von LATANÉ & DARLEY, 1970 (aus: NILSSON, 2006)

son im Raum, so ist die Wahrscheinlichkeit der Flucht sehr gering. Bild 2.1 zeigt die Daten.

3 Welches Verhalten wäre „richtig“?

3.1 Ablauf eines Brandes

Um „richtiges Verhalten“ bei einem Tunnelbrand zu definieren, ist es zunächst erforderlich, den Hergang des Ereignisses zu analysieren. WORM (2002) zeigt dazu die in Bild 3.1 dargestellte Grafik.

Dieser Ablauf der Brandentwicklung gilt generell, also auch für Tunnelbrände.

Wenn ein Brand ausbricht, entsteht nicht nur Hitze, sondern auch Rauch, der toxische Stoffe enthält. Diese Faktoren werden im Laufe der Zeit lebensbedrohlich. Ab einem bestimmten Punkt ist eine Evakuierung nicht mehr möglich, es ist daher nötig, eine Reaktion so früh wie möglich auszulösen. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch zwischen einem „normalen“ Brand und einem Brand im Tunnel, wie die Grafik von IFA-TUNNEL (2006) sehr anschaulich zeigt.

Wie Bild 3.2 zeigt, ist die Brandzone beim Tunnelbrand ausgedehnter als beim normalen Brand. An Löscharbeiten ist bei Temperaturen über 400 °C nicht mehr zu denken. Wesentlich ausgedehnter ist jedoch beim Tunnelbrand die Rauchzone – hier sind Rettungs- und Löschaktionen möglich.

Besonders dramatisch wird es, wenn ein Lkw brennt (vgl. Bild 3.3).

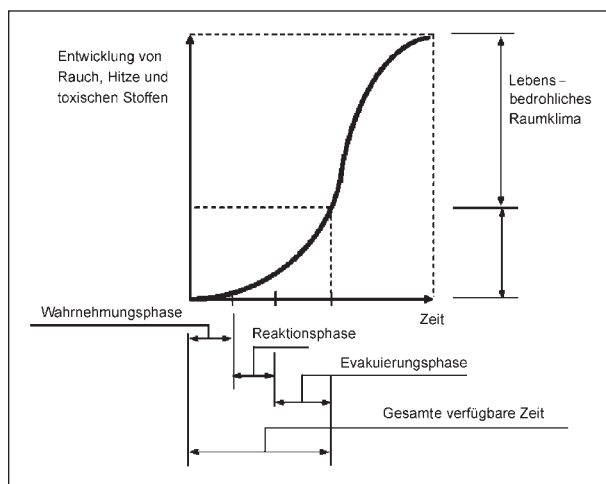


Bild 3.1: Brandentwicklung (aus: WORM, 2002, Folie 9 der Power Point-Präsentation)

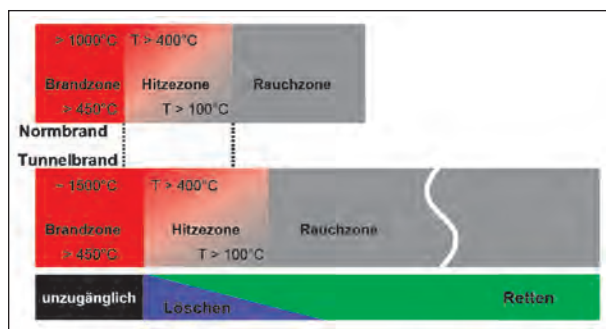


Bild 3.2: Vergleich zwischen einem normalen Brand und dem Brand im Tunnel (aus: IFA-TUNNEL, 2006, S. 15)

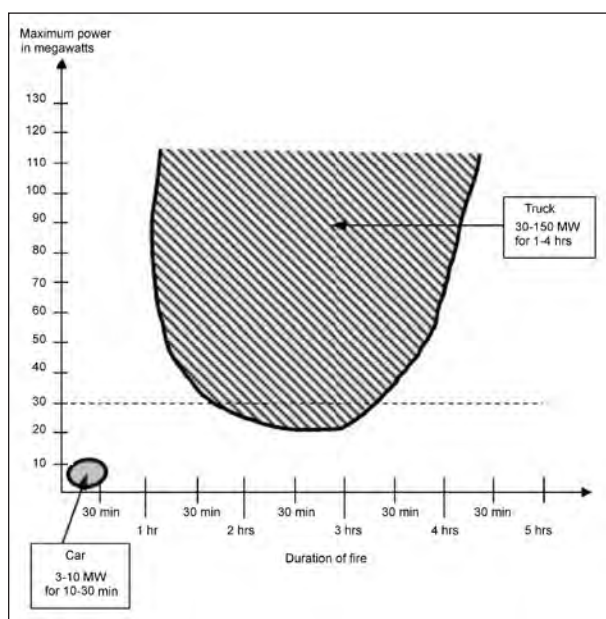


Bild 3.3: Brandlast eines Pkw/eines Lkw. Maximale Energie in Megawatt und Dauer des Brandes (aus: United Nations, 2001, S. 19, nach: MAREC, 2000)

Während ein Personenkraftwagen, wie Tests in Finnland zeigten, 2,5 bis 5 Megawatt Hitze ent-

wickeln kann, sind es bei einem Bus 20 MW, bei einem Lkw 20-30 MW und bei einem Tanker, beladen mit 50 m³ Treibstoff, 300 MW. Die Beispiele stammen vom PIARC Committee (1999), vgl. United Nations (2001).

3.2 Richtiges Verhalten im Brandfall – Literatur

Zwischenzeitlich sind viele Empfehlungen von einschlägigen Behörden, Automobil-Clubs und der Feuerwehr herausgegeben worden. Hier sollen nur einige Beispiele aufgezeigt werden. Neben der unterschiedlichen Ausführlichkeit der Empfehlungen ist vor allen Dingen die Abfolge der Verhaltensweisen sehr unterschiedlich, eine Analyse ist in Anhang A dargestellt.

Eine äußerst knappe Version von Handlungsanweisungen gibt die schweizerische SFWM (Stützpunkt-Feuerwehr Muttenz), wie Bild 3.4 zeigt.

Etwas ausführlicher sind die Instruktionen des BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) in der Broschüre „Sicherheit geht vor – Straßentunnel in Deutschland“ (2004):

Hier soll man bei einem Brand im Tunnel: „Wenn möglich, Fahrzeug aus dem Tunnel herausfahren.

Wenn nicht möglich:

- Fahrzeug seitlich abstellen.
- Motor abschalten und Fahrzeug unverzüglich verlassen.
- Brandalarm an Notrufstation auslösen.
- Wenn möglich, Erste Hilfe leisten.
- Brand mit Feuerlöscher aus der Notrufstation löschen.

Wenn Brand nicht zu löschen ist, unverzüglich zum Notausgang flüchten.

Nicht betroffene Verkehrsteilnehmer:

- Nicht wenden oder rückwärts fahren.
- Lautsprecherdurchsagen und Verkehrshinweise im Radio befolgen.
- Bei Feuer und Rauch zum Notausgang flüchten; Autoschlüssel stecken lassen“.

(BMVBW, 2004, S. 14).

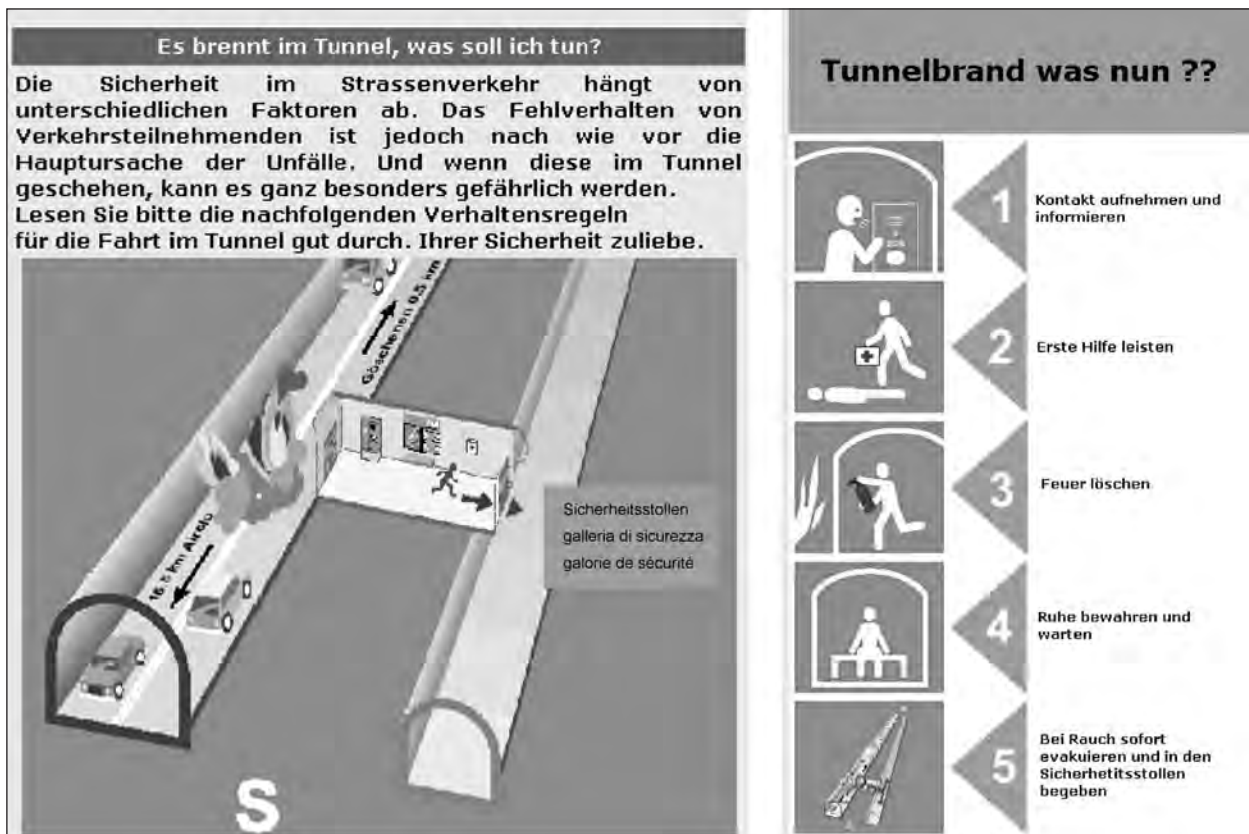


Bild 3.4: Eine Verhaltensanweisung in 5 Punkten (SFWM, o. J.)

Ein ähnlicher Text findet sich bei EGGER im „Handbook of tunnel fire safety“ (2005, S. 348 f.).

Der ADAC (2007) gibt für eine Reihe von Situationen (Normalfall, Stau, Panne, Unfall, Brand) Tipps, um sicher durch den Tunnel zu gelangen. Hier interessiert die Brandsituation:

Bei Feuer im eigenen Fahrzeug:

- Warnblinker einschalten.
- Wenn möglich, das Fahrzeug aus dem Tunnel herausfahren. Dabei niemals wenden oder rückwärts fahren.
- Wenn nicht möglich, Fahrzeug in einer Pannenbucht, auf dem Standstreifen oder am rechten Fahrbahnrand abstellen.
- Motor abstellen, Zündschlüssel stecken lassen.
- Rettungskräfte informieren. Dafür möglichst den Notruf und nicht das Handy benutzen.
- Feuer nur im Anfangsstadium selbst löschen. Wenn Feuer nicht löschar, vom Feuer weg den Tunnel schnell über die Notausgänge verlassen.
- Verletzten Personen helfen.

Bei Feuer im fremden Fahrzeug:

- Warnblinker einschalten.
- Großen Sicherheitsabstand zum brennenden Fahrzeug halten.
- Fahrzeug in einer Pannenbucht, auf dem Seitenstreifen oder so nah wie möglich am rechten Fahrbahnrand abstellen.
- Niemals wenden oder rückwärts fahren.
- Motor abstellen, Zündschlüssel stecken lassen.
- Rettungskräfte informieren. Dafür möglichst den Notruf und nicht das Handy benutzen.
- Feuer nur im Anfangsstadium selbst löschen. Wenn Feuer nicht löschar, vom Feuer weg den Tunnel schnell über die Notausgänge verlassen.
- Verletzten Personen helfen.

In allen Fällen Anweisungen und Informationen des Tunnelpersonals beachten!

Niemals vergessen: Feuer und Rauch können tödlich sein!

Rette Dein Leben und nicht Dein Auto!“ (ADAC, 2007).

Ähnliche Hinweise sind auf den Homepages von Automobilclubs wie ÖAMTC (der Österreichische Automobil-, Motorrad- und Touring Club, 2006, 2007), ARBÖ (Auto-, Motor-, und Radfahrerbund Österreichs, 2006, 2007) und AvD (Automobilclub von Deutschland, o. J.) zu finden.

Ministerien oder Behörden, etwa das BMVBW, die BASt in Deutschland (2003, 2004), das schweizerische BAREGG (o. J.) oder das österreichische BM.I (Bundesministerium für Inneres, o. J.) verteilen Broschüren, das Schweizerische Bundesamt für Strassen, ASTRA, empfiehlt eine Informationskampagne (2000).

Der DFV (Deutscher Feuerwehr Verband) schreibt in seinen Fachempfehlungen zum Brandschutz in Tunnelanlagen (2000), dass der Selbstrettung im Brandfalle eine zentrale Bedeutung zukomme: „Die Feuerwehr ist nicht in der Lage, im Brandfall die Rettung der Vielzahl von Personen sicherzustellen“ (a. a. O., S. 2). Zur Brandbekämpfung heißt es: „Aussicht auf eine wirkungsvolle Brandbekämpfung ist nur gegeben, wenn die Feuerwehr frühzeitig – mit Eingreifzeiten unter 5 Minuten an jeder Stelle des Tunnels – in der Brandentstehungsphase eingreifen kann.“ Sollte die Feuerwehr deutlich längere Eingreifzeiten haben, sei der Einsatz von automatischen Löschanlagen zu erwägen (a. a. O., S. 5).

Der Fernseh-Sender 3sat (2000) empfiehlt, bei Rauchentwicklung oder Brand im Tunnel die Fahrzeug-Lüftung auf Umluft zu stellen. Einerseits erscheint dies sinnvoll, da aus Wohnungsbränden bekannt ist, dass 80 Prozent aller Brandopfer am giftigen Brandrauch ersticken (feuer-und-rauch.de, 2007). Andererseits ist zu fragen, ob es bei der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit noch sinnvoll ist, Bedienelemente im Fahrzeug zu betätigen – oder ob besser gleich die Flucht zum nächsten Notausgang angetreten wird.

Die zur Verfügung stehende Zeit wird in den Informationsbroschüren und Homepages, außer in der Fachempfehlung des DFV (2000), nicht thematisiert. Lediglich bei feuer-und-rauch.de findet sich der Hinweis, der sich auf Hausbrand bezieht (s. Bild 3.5).

Den österreichischen Brandschutzkatalog zeigt Bild 3.6 über die angenommene Temperaturentwicklung bei einem Tunnelbrand, wobei folgende Quellen herangezogen werden: (1) DIN-ISO-F Feuer als allgemeine Branddefinition, als Tunnelfeuer nicht anwendbar; (2) Hydrocarbonfeuer in den Staaten



Bild 3.5: Zeitlicher Hinweis für die Fluchtzeit bei einem Hausbrand (aus: Feuer und Rauch, 2007, S. 2)

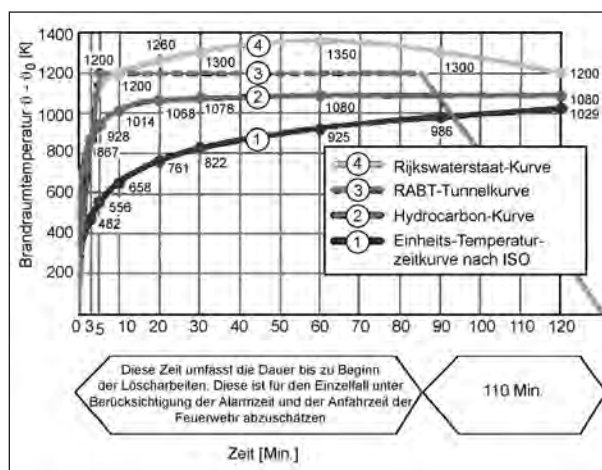


Bild 3.6: Annahmen über den Verlauf eines Brandes, Temperatur in Grad Celsius/Zeit (aus: Der Österreichische Brandschutzkatalog, 2003, S. 16)

Nordeuropas, auch Industriefeuer genannt; (3) RABT-Feuer in Deutschland; (4) RWS-Feuer (Rijkswaterstaat-Feuerdefinition) in den Niederlanden (a. a. O., 2003, S. 16).

Verhaltensempfehlungen, kritisch betrachtet:

Anhang A stellt nun eine Reihe von Verhaltensempfehlungen nebeneinander, die von einschlägigen Behörden, Automobil-Clubs und der Feuerwehr herausgegeben wurden. Hier und aus den vorhergehenden Beispielen wird das Dilemma deutlich, in welchem sich Ratgeber befinden: Will man kurz und bündig informieren, so werden wichtige Aspekte weggelassen – siehe Bild 3.4., das Informationsblatt der SFWM (Stützpunkt-Feuerwehr Muttenz). Aspekte, wie die Warnblinkanlage einzuschalten und damit den nachfolgenden Verkehr zu warnen, fehlen. Die Empfehlung, das brennende Fahrzeug nach Möglichkeit noch aus dem Tunnel hinaus zu

fahren, wird ebenfalls nicht bei allen Ratgebern aufgeführt, ebenso wie der Tipp, zum Vordermann einen sehr großen Abstand zu halten.

Falls angehalten werden muss, reichen die Ratschläge von „Fahrzeug stehen lassen“, ohne konkrete Anweisung, wo, bis zu sehr genauen Instruktionen („in der Pannenbucht“, „am Seitenstreifen“, „möglichst nah am Fahrbahnrand“, ...). Dass der Motor abgestellt werden soll, wird relativ häufig erwähnt, ebenso wie das Steckenlassen des Schlüssels.

Für das Auslösen des Feueralarms wird meist die nächste Notrufstation empfohlen. Die Instruktionen für Löschversuche sind z. T. recht konkret („Feuerlöscher aus Notrufstation“, „Feuer nur im Anfangsstadium selbst löschen“).

Bei der Beschreibung des Fluchtverhaltens sind große Unterschiede festzustellen: Sie reichen von allgemein gehaltenen Äußerungen wie „rasch vom Ereignis weggehen“ bis zu detaillierten Beschreibungen wie „Tunnel vom Feuer weg über Notausgänge verlassen“.

Nahezu alle Empfehlungen raten, in keinem Falle zu wenden oder rückwärts zu fahren. Dies ist diskussionswürdig, denn in der Katastrophe von 1999 konnte sich eine Reihe von Pkw-Fahrern durch Wenden und Zurückfahren aus dem Mont-Blanc-Tunnel retten.

Auf Lautsprecherdurchsagen und Tunnelpersonal wird nur in wenigen Fällen verwiesen.

3.3 Erkenntnisse aus Simulationen

Computer-Simulation eines Tunnel-Unglücks:

Von KÖNIG (2005) wurde eine Simulationssoftware namens TFS (Tunnel-Flucht-Simulation) entwickelt, mit welcher es möglich sei, „die Anzahl der Tunnelnutzer, die sich im Brandfall nicht selbst in sichere Bereiche retten können, zuverlässig abzuschätzen“ (KÖNIG, 2005, S. 81).

Als Eingangsdaten werden dabei verwendet:

- Ein Modelltunnel mit 600 m Länge, 6 m Höhe und 9 m Breite, zwei Fahrspuren mit 3,5 m Breite und beiderseits Notgehwegen mit 1 m Breite, angenommene Geschwindigkeiten zwischen 70 und 110 km/h, Anteile von 90 % Pkw und 10 % Lkw.

- Bezüglich der Personen wurde bei Pkw ein Besetzungsgrad von 1,3 Personen, bei Lkw 1,05 Personen angenommen. 25 % von ihnen würden sich sportlich bewegen (Jüngere), 10 Prozent langsam (Senioren mit geringer Fluchtgeschwindigkeit) und 65 % nach „Standard“, wovon der Autor normale körperliche Verfassung bei durchschnittlichem Alter versteht.
- Als Sicherheitseinrichtungen werden eine Fluchtwegkennzeichnung beidseitig im Abstand von 25 Metern, ein Notausgang in der Mitte des Tunnels und ein Lüfter mit spezifischer Charakteristik angenommen.
- Die Parameter Fluchtweglänge, Rauchausbreitung und Entschlossenheit zur Flucht werden als unscharfe Mengen (entsprechend der Fuzzy-Logik) in zwei bzw. drei Kategorien (gering, mittel, hoch) definiert. Diese drei Parameter fließen ein in die Regel-Definition des Fuzzy-Reglers zur Abbildung des Entscheidungsverhaltens, ob ein Notausgang benutzt wird, oder nicht (siehe Bild 3.7):

KÖNIG wählte für die Simulation 3 Szenarien aus, wobei bei einer Tunnellänge von 600 Metern in Szenario 1 der Brandherd bei 450 m, in Szenario 2 bei 300 m und in Szenario 3 bei 150 m vom Tunnelanfang liegt. Zum Verständnis der Ergebnisse ist es wichtig zu erfahren, dass am Ende des Tunnels auf jeder Fahrspur ein Fahrzeug angehalten wird, das brennende Fahrzeug somit auf einen Stau auffährt (rechte Spur). Dieser Stau löst sich offenbar auch während der Dauer der Simulation nicht auf, sodass Fahrzeuge, die sich vor dem Brandherd befinden und normalerweise hinausfahren könnten, ebenfalls blockiert sind.

Die Simulation ergibt, dass sich bei

- Szenario 1 (Brand bei 450 Metern im Tunnel) 75 % der Leute selbst retten könnten,
- Szenario 2 (Brand bei 300 Metern im Tunnel) 68 %,
- Szenario 3 (Brand bei 150 Metern im Tunnel) 62 %.

„Dies lässt sich mit der hohen Rauchausbreitungsgeschwindigkeit von 6 m/s (Bemessungswert der RABT 2003 für die Branddetektion) begründen, durch die flüchtende Personen, die sich in Fahrtrichtung vor dem Brandherd befanden, besonders schnell durch den Rauch eingeholt wurden“ (a. a. O., S. 79).

UND			=
Rauchab-stand	Fluchtweg-länge	Entschlos-senheitsmaß	Benutzung Notausgang
gering	niedrig	hoch	ja
		mittel	ja
		niedrig	nein
	mittel	hoch	ja
		mittel	nein
		niedrig	nein
	hoch	hoch	nein
		mittel	nein
		niedrig	nein
groß	niedrig	hoch	ja
		mittel	ja
		niedrig	ja
	mittel	hoch	ja
		mittel	ja
		niedrig	nein
	hoch	hoch	ja
		mittel	ja
		niedrig	nein

Bild 3.7: Wird ein Notausgang benutzt? Regel-Definition für einen Fuzzy-Regler (nach KÖNIG, 2005, S. 77)

Obwohl das Programm von KÖNIG sehr viele Parameter berücksichtigt, ist doch manches stark vereinfacht. So wird z. B. die Wahrnehmungskomponente darauf reduziert, ob ein Objekt sichtbar war, oder nicht (S. 53). Implizit wird hier davon ausgegangen, dass ein Notausgang benutzt wird, wenn er sichtbar war – eine diskussionswürdige Annahme.

Experiment in virtueller Umgebung:

GAMBERINI, COTTONE, SPAGNOLLI, VAROTTO & MANTOVANI (2003) experimentierten in einer virtuellen Umgebung. Sie simulierten eine Bibliothek, in der sich ein Proband zunächst umsehen sollte, dann brach ein Feuer aus, dem es zu entkommen galt. 84 Studenten, die Hälfte männlich bzw. weiblich, im Alter von 19 bis 24 Jahren, sollten auf einem Bedienelement auf „vorwärts“ bzw. „rückwärts“ drücken.

Bild 3.8 zeigt die Sicht des Teilnehmers (unten) und den Probanden mit dem Head-mounted Display und dem Bedienelement (oben).

Der Vorwärtsknopf wurde bei der normalen Besichtigung signifikant häufiger gedrückt als in der Not-



Bild 3.8: Teilnehmer mit Versuchsanordnung (oben) und Sicht eines Teilnehmers in der virtuellen Realität (unten) (aus: GAMBERINI et al., 2003, S. 847)

fallsituation ($p = .001$). In der Notfallsituation ist es genau umgekehrt, der Rückwärtsknopf wurde häufiger gedrückt. In der Notfallsituation wurden beide Richtungen länger gedrückt ($p = .001$). Hier stießen die Teilnehmer auch signifikant öfter mit Gegenständen (Stühlen, Tischen, ...) zusammen, wobei anzumerken ist, dass sie die Gegenstände nur virtuell sahen, also keine taktile oder akustische Rückmeldung erhielten. Lange Bewegungen, während derer die Teilnehmer die Richtung festlegten, ohne anzuhalten, ließen die Autoren ebenfalls zu dem

Schluss kommen, dass die Teilnehmer versuchten, den Ausgang so schnell wie möglich zu erreichen.

Aus dem unterschiedlichen „Verhalten“ bei Besichtigung der Bibliothek und der Flucht im Brandfall sahen die Autoren die Validität der VE bestätigt. Ihrer Ansicht nach könne man daher die virtuelle Realität für Forschung und Verhaltenstraining verwenden.

3.4 Optimales Verhalten generell und bei einem Brand im Tunnel

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen (Kapitel 2 und 3) wurde das optimale Verhalten generell und bei einem Brand im Tunnel abgeleitet. Dabei wurden StVO, RABT und die Brandschutzordnung gemäß DIN 14096 berücksichtigt. Für die Teilnehmer unserer Internetbefragung (siehe Kapitel 4) wurde daraus ein Informationsblatt entwickelt, das in Anhang C vollständig abgedruckt ist.

Wie soll man sich im Straßen-Tunnel verhalten?

- Wenn die Ampel vor dem Tunnel auf „Rot“ steht, darf nicht mehr in den Tunnel eingefahren werden (siehe Wechsellichtzeichen, StVO, § 37).
- Bei Stau darf weder im Tunnel gewendet noch rückwärts gefahren werden (gem. StVO, § 18). Die Gefahr eines Unfalls mit extremen Folgen ist zu hoch.
- Wenn man durch einen Tunnel fährt, sollte der Verkehrs-Sender eingestellt werden. Ein Empfang ist in den neueren Tunneln möglich, ältere Tunnel werden z. T. nachgerüstet (vgl. RABT, 2006, S. 38). An manchen Tunnel-Portalen ist die Empfangsfrequenz angegeben.
- Bereits bei der Durchfahrt und vor allem bei Stau sollte ein möglichst großer Abstand zu den Vorfahrenden gehalten werden.
- Wenn der Verkehr im Tunnel steht, muss der Motor sofort abgestellt werden, da das Belüftungssystem sonst überlastet wird.
- Neuere (längere) Tunnel sind mit Videoüberwachung und Lautsprechern ausgestattet (RABT, 2006). Ältere Tunnel werden z. T. nachgerüstet. Auf die Lautsprecherdurchsagen ist zu achten.
- Im Notfall darf im Tunnel angehalten werden, nach Möglichkeit rechts in der Pannebucht

(siehe Zeichen 328 StVO) oder am rechten Rand. Die Mitte ist für Rettungsfahrzeuge frei zu halten (vgl. RABT, 2006; StVO).

- In längeren Tunneln sind im Abstand von 150 Metern Notruf-Stationen untergebracht, die mit dem Zeichen „Notruf-Telefon“ gekennzeichnet sind (vgl. RABT, 2006).

Wie soll man sich bei einem Brand im Tunnel verhalten?

- Auch wenn der Tunnel durch ein brennendes Fahrzeug blockiert ist, ist es verboten zu wenden oder rückwärts zu fahren. Allerdings sind Fälle bekannt, in denen sich dieses Verhalten als lebensrettende Maßnahme erwies. Falls keine Fahrzeuge mehr in den Tunnel einfahren (Sperrung), ist diese Verhaltensweise in Erwägung zu ziehen.
- Wenn das eigene Fahrzeug brennt, sollte man versuchen, damit noch aus dem Tunnel hinauszufahren.
- Falls vor einem im Tunnel ein Fahrzeug brennt, an dem man nicht vorbeifahren kann, sollte man in sehr großem Abstand in der Pannebucht oder am seitlichen Rand anhalten. In der Mitte ist eine Rettungsgasse frei zu halten.
- Wie viel Zeit steht einem Tunnelnutzer zur Verfügung, um zu flüchten, wenn unmittelbar vor ihm im Tunnel ein Fahrzeug in Flammen steht? In der einschlägigen Literatur finden sich für Tunnel keine Zeitangaben, bei einem Feuer im Haus bleiben einem aber nur ca. 3 Minuten (Feuer & Rauch, 2007, S. 2).
- Ist bei einem Brand im Tunnel die Durchfahrt blockiert, so soll man zuerst versuchen, das Feuer selbst zu löschen, jedoch nur, wenn das Feuer noch nicht zu groß ist, es sich also nur um einen Entstehungsbrand handelt. Feuerlöscher gibt es bei jeder Notruf-Station, in neueren, längeren Tunneln mindestens alle 150 Meter (RABT, 2006). Auch die Notausgänge sind mit Notruf-Station und damit auch mit Feuerlöschern versehen. Notausgänge oder Ähnliches gibt es in neueren, längeren Tunneln mindestens alle 300 Meter (RABT, 2006).
- Ein größer werdendes Feuer kann man nicht mehr selbst bekämpfen. Hier ist es besser, an der nächsten erreichbaren Notruf-Station einen Notruf abzusetzen. Sobald die Tür der Notruf-

Station geöffnet wird, wird der Standort festgestellt und an die Überwachungsstelle übermittelt.

- Sieht man vor sich im Tunnel Feuer und Rauch, so ist das Fahrzeug kein sicherer Ort, an dem man bleiben könnte. Es ist auch nicht sinnvoll, auf Polizei, Feuerwehr oder andere Helfer zu warten, man muss sich selbst so schnell wie möglich in Sicherheit bringen.
- Wird das Fahrzeug bei einer Flucht aus dem Tunnel stehen gelassen, so muss der Zündschlüssel im Schloss und das Fahrzeug unvergeschlossen bleiben, damit die Rettungskräfte das Fahrzeug notfalls bewegen können.
- Wertgegenstände und Ausweise sollten nur mitgenommen werden, wenn sie griffbereit sind. Alle anderen Gegenstände sind in jedem Fall liegen zu lassen.
- Für die Benachrichtigung der Feuerwehr wird in der Literatur das Notruf-Telefon dem Handy vorgezogen, da mit seiner Betätigung automatisch der Standort bestimmt wird, während die genaue Position des Handys in der Regel erst geortet werden müsste.
- Bei einem Brand ist der Rauch gefährlicher als das Feuer. Es gilt der Satz: Brand-Tote sind Rauch-Tote! Ein brennender Pkw setzt ca. 100.000 Kubikmeter Rauchgas frei (Feuer & Rauch, 2007).
- Rauchgase sammeln sich anfangs oben an der Decke.
- Bei einem Brand im Tunnel kann es mehr als 1.000 Grad heiß werden.
- Bei einer Flucht aus dem Tunnel ist es wichtig, vom Rauch weg zu flüchten.
- Flüchtende sollen in der Regel den nächsten Notausgang (vom Rauch weg) nehmen. Falls das Ende des Tunnels bereits sichtbar ist und vom Rauch weg führt, kann man auch am Fahrbahnrand zum Tunnel-Ende laufen.
- Wenn man Verletzte sieht, soll man, wenn möglich, Erste Hilfe leisten.
- Ebenso sollte man herumirrenden Personen/Kindern helfen, falls möglich.

4 Welches Wissen ist bei den Tunnelnutzern vorhanden?

4.1 Frühere Umfragen

Aus dem Jahre 1999 stammt eine Meinungsumfrage, bei der 200 Personen zum Thema Feuer & Rauch befragt wurden (FVLR, 1999).

Auch wenn viele der Befragten angaben, die richtigen Schritte zur Brandbekämpfung nicht zu kennen, ist das Wissen über die Todesursache bei Bränden als gut zu bezeichnen: 84 % nannten Erstickten aufgrund starker Rauchvergiftung als die häufigste Todesursache.

Auch die befragten Berufsfeuerwehrlaute (n = 98) sahen Rauch als wesentliches Problem bei der Lokalisierung des Brandherds und dem Zugang zu den Angriffswegen.

Während sich die FVLR-Umfrage generell auf Brandereignisse bezieht, zielt die so genannte DEKRA-Umfrage, durchgeführt vom Institut ITEM (2002), explizit auf Tunnel ab. Allerdings befasst sie sich nicht mit dem Wissensstand der Befragten, sondern mit den Gefühlen – sie soll daher nur kurz erwähnt werden. Befragt wurden 1.317 Personen, davon 29 % Frauen und 71 % Männer. Die Autofahrer wurden befragt, als sie ihr Fahrzeug zur DEKRA-Kfz-Prüfstelle brachten. Die Fragen konnten mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden.

24,6 % der Befragten gaben an, Angst zu haben, wenn sie mit dem Auto durch einen Tunnel fahren. Allerdings fühlen sich 50,2 % bei der Fahrt durch den Tunnel sicher. 40,8 % gaben an, nach Möglichkeit längere Tunnel zu meiden. 16,5 % hielten Autotunnel für ausreichend gesichert durch Fluchtwege, Ausweichbuchten, Beleuchtung und Belüftung. 63,2 % fürchteten sich vor einem Stau im Tunnel. 95,1 meinten, es solle mehr für die Sicherheit im Autotunnel getan werden, 54,7 % gaben an, zur Zahlung einer Gebühr für mehr Sicherheit im Tunnel bereit zu sein.

WORM (2002) berichtet über eine Studie des TNO, bei der 115 Verkehrsteilnehmer an einer Tankstelle in der Nähe einer Tunneleinfahrt befragt wurden, um zu erfahren, über welches Wissen die Fahrer bezüglich der Sicherheitsvorrichtungen in Tunneln verfügen und wie sie sich im Brandfall verhalten würden.

Folgende Vorrichtungen wurden von den Befragten hier spontan benannt:

- Notausgänge von 82 %,
- Feuerlöscher von 69 %,
- Telefone/Notrufsäulen von 57 %,
- Fluchtweg-Piktogramme von 6 %.
- 20 % konnten keine Vorrichtungen benennen.

Die Befragten gaben an, sich im Brandfall wie folgt zu verhalten:

- 81 % sagen, sie würden versuchen zu flüchten,
- 6 % würden im Auto warten,
- 5 % würden die Notrufnummer wählen,
- 4 % geben an, sie würden versuchen zu löschen.

GATSCHA, SMUC, SCHREDER, PRANTL, CHRIST, GROTE, LACKNER, FRÜHWIRTH, PISKERNIK & MOSER (2004) führten nach Befahrung der Tunnelkette Klaus in Österreich mit 69 Autofahrern im Alter zwischen 19 und 77 Jahren, davon ca. 2/3 Männer, eine Befragung durch. Die Probanden sollten u. a. angeben, an welche Sicherheitseinrichtungen für den Notfall sie sich erinnern konnten, wobei keine Antwortmöglichkeiten vorgegeben wurden, sondern die spontanen Äußerungen protokolliert wurden.

Bild 4.1 zeigt die Antworthäufigkeiten. Bei diesen Befragten wurden am häufigsten die Notrufeinrichtungen genannt (91 %), gefolgt von der Pannennische (80 %), der Fluchttür (68 %), der Kilometerangabe zum nächsten Ausgang (58 %).

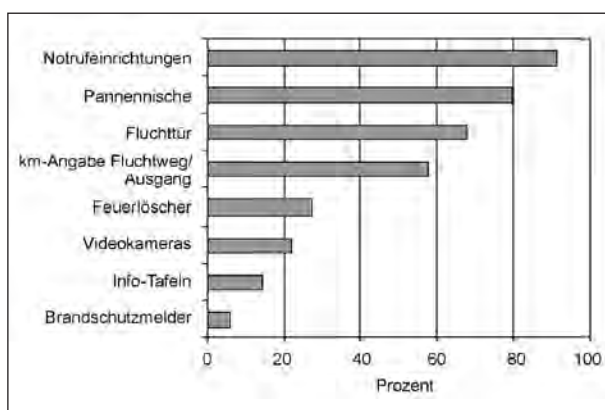


Bild 4.1: Welche Sicherheitseinrichtungen konnten die Versuchsteilnehmer nach Durchfahrung der Tunnelkette Klaus spontan erinnern? Hier: Antworthäufigkeiten in % (aus: GATSCHA et al., 2004, S. 68)

4.2 Eigene Datenerhebung – Internetbefragung von Tunnelnutzern

Obwohl bereits zahlreiche Berichte zu Störungen im Tunnel vorliegen, in welchen auch Verhaltensweisen der Nutzer angesprochen werden, erscheint es sinnvoll, eine eigene Befragung von Autofahrern durchzuführen. Diese Befragung soll neben Einstellungen und Ängsten vor allem Wissen über richtiges Verhalten erfassen. Durch eine aktuelle Befragung mit einer großen Stichprobe können zudem Vergleiche gezogen werden, ob und in welcher Richtung sich Einstellungen bezüglich der Nutzung von Tunnel verändert haben.

4.2.1 Erstellung des Fragebogens und Übermittlungsmodalitäten

Aus den bisherigen Analysen von Tunnelbränden, den Verhaltensempfehlungen verschiedener Institutionen (siehe Kapitel 3) und eigenen Überlegungen wurde nun ein Fragenkatalog zusammengestellt, der sich mit folgenden Bereichen befasst:

- Fahrercharakteristika (Alter, Führerscheinalter, Geschlecht, Fahrleistung pro Jahr, Autobahnnutzung, Häufigkeit der Tunnelnutzung, Unfallbeteiligung).
- Kenntnisstand zu wichtigen Zeichen im Tunnel.
- Emotionen bei der Durchfahrt eines Tunnels.
- Kenntnisstand zu Verhalten bei Brand im Tunnel.

Der Fragebogen ist in Anhang B vollständig abgedruckt.

Um eine möglichst große Anzahl von Personen zu erreichen, wurde der Fragebogen so konstruiert, dass er über das Internet beantwortet werden konnte.

Als Hilfsmittel zur Konstruktion diente der Adobe LiveCycle TM Designer 7.0, der im Softwarepaket Adobe Acrobat 7.0 Professional enthalten ist. Für Nutzer, die nicht die erforderliche Software auf ihrem Rechner hatten, wurde auf der IfA-Instituts-Homepage ein aktueller Adobe Reader zum Download bereitgestellt.

Der Fragebogen wurde auf verschiedenen Homepages und in Foren publiziert:

- IfA, Institut für Arbeitswissenschaft der Universität BW München,

- ZVS, Zeitschrift für Verkehrssicherheit,
- Zeitschrift „Gute Fahrt“ (Homepage und Heft Nr. 6, 2007, S. 65),
- diverse Automobil-Foren (z. B. BMW-Forum, Motor-Talk, Volkstreff.).

Außerdem wurde der Link an Hochschulen, Firmen und Instituten per E-Mail verbreitet.

Um auch Personen zu erreichen, die nicht mit dem Internet vertraut sind, wurden ca. 50 Exemplare des Bogens ausgedruckt und verteilt.

Die Beantwortung des Fragebogens erforderte einen Zeitaufwand von ca. 10 Minuten. Um die Teilnehmer zu motivieren, wurden folgende Preise ausgelost:

- 20 Feuerlöscher für das Auto,
- 20 Warnwesten.

Der bearbeitete Bogen konnte von den Befragten per „Klick“ an eine speziell für diese Befragung eingerichtete E-Mail-Adresse an unserem Institut geschickt werden. Es war aber ebenso möglich, den Bogen auszudrucken und einzusenden oder abzugeben.

4.2.2 Beschreibung der Stichprobe

Nach Aussonderung doppelt abgeschickter Bögen umfasst die Stichprobe 423 Personen, von ihnen sind 72 % Männer und 28 % Frauen.

Von den Probanden sind

- 25 % jünger als 25 Jahre,
- 41 % zwischen 25 und 39 Jahre alt,
- 31 % zwischen 40 und 65 Jahre alt,
- 3 % älter als 65 Jahre.

Den Führerschein besitzen von den Befragten

- 2 % kürzer als 2 Jahre,
- 8 % zwischen 3 und 4 Jahren,
- 33 % zwischen 5 und 10 Jahren,
- 56 % länger als 10 Jahre.

Sowohl die Altersverteilung als auch die Verteilung des Führerscheinalters zeigen, dass es gelungen ist, mit der Umfrage einen guten Querschnitt der Fahrerpopulation zu erreichen.

Was die Jahreskilometerleistung der Befragten betrifft, so fahren

- 2 % bis zu 10.000 km/Jahr,
- 35 % 10.000 bis 20.000 km/Jahr,
- 25 % 20.000 bis 30.000 km/Jahr und
- 16 % mehr als 30.000 km/Jahr.

Bild 4.2 zeigt den Anteil, der davon auf Autobahnen gefahren wird. Vom Wenig-Fahrer bis zum ausgesprochenen Viel-Fahrer ist somit alles vertreten.

Wie Bild 4.3 verdeutlicht, fährt etwa ein Zehntel der Befragten sehr oft durch längere Tunnel, 1/3 gelegentlich und etwa die Hälfte (53 %) selten.

Nur 12 % geben an, im Tunnel schon einmal einen Unfall gesehen zu haben. Bild 4.4 zeigt, welche Art von Unfällen die Befragten dabei erlebt haben.

Lediglich 6 Befragte (dies sind 1,4 %) waren bereits selbst in einen Unfall im Tunnel verwickelt: Bei einem fing der Vorderreifen an zu brennen, da er falsch ausgewuchtet war. Er konnte jedoch langsam aus dem Tunnel hinausfahren und dann einen

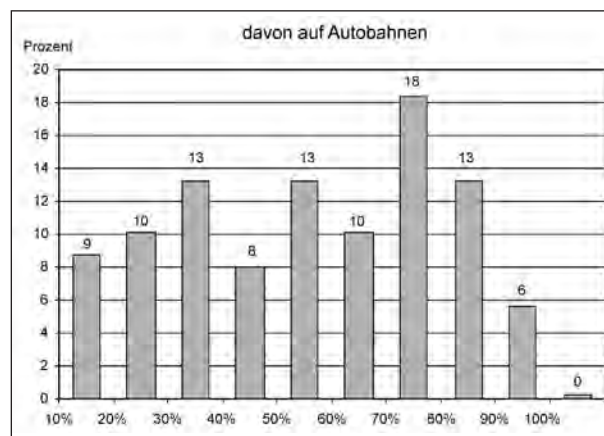


Bild 4.2: Prozentsatz der Jahreskilometerleistung, der auf Autobahnen gefahren wird

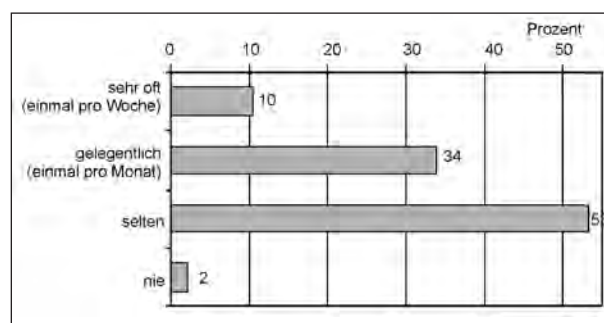


Bild 4.3: Häufigkeit der Fahrt durch einen Tunnel, der länger als 400 Meter ist

Notruf absetzen. Ein anderer Nutzer war ins Schleudern gekommen, auf die Gegenfahrbahn geraten – konnte jedoch wieder auf die richtige Spur zurück und weiterfahren. Interessant ist auch noch

Haben Sie bei einer Fahrt durch den Tunnel schon einmal einen Unfall gesehen?	Anzahl	Prozent
nein	369	87,2
ja, nämlich:		
Auffahrunfall, zwei beteiligte Fahrzeuge	36	8,5
Auffahrunfall, mehr als zwei beteiligte Fahrzeuge	1	0,2
Fahrzeug mit Gegenverkehr zusammengestoßen	1	0,2
Fahrzeug an Leitplanke geprallt	1	0,2
Fahrzeug gegen Wand gefahren	3	0,7
Fahrzeug hat sich überschlagen	1	0,2
Autobrand	2	0,5
sonstige	5	1,2
keine Antwort	4	1,0
Summe	423	100

Bild 4.4: Art der Unfälle, die die Befragten im Tunnel gesehen haben

der Fall eines Fahrers, der zu einem Auffahrunfall hinzu kam, zwar selbst noch rechtzeitig bremsen konnte, jedoch von einem nachfolgenden Fahrzeug gerammt wurde. Hier haben wir es also mit fehlender Aufmerksamkeit und eventuell mit zu geringen Sicherheitsabständen zu tun.

4.2.3 Allgemeines Wissen der Befragten

Mit einigen besonders wichtigen bzw. interessanten Schildern wird der Wissensstand der Befragten erfasst. Bild 4.5 zeigt sowohl die Schilder als auch den Prozentsatz richtiger Antworten. Die Fragen waren offen formuliert („Was bedeutet dieses Zeichen?“). Die Probanden hatten ein Schriftfeld zur Verfügung.

Als „richtig“ wurden etwa bei Zeichen 327 StVO die Antworten „Tunnel“, „Tunneleinfahrt“, „Achtung, Tunnel“ etc. gewertet. Als „teilweise richtig“ wurden z. B. beim Zeichen 328 StVO Antworten wie „Parkbucht“, „Ausbuchtung“ gewertet, da hier zwar in die richtige Richtung gedacht wurde, jedoch nicht der Kern der Sache getroffen wurde (Bucht für den Notfall).

Aus Bild 4.5 wird deutlich, dass die Symbole für Tunnel, Feuerlöscher, Notruftelefon und Notaus-

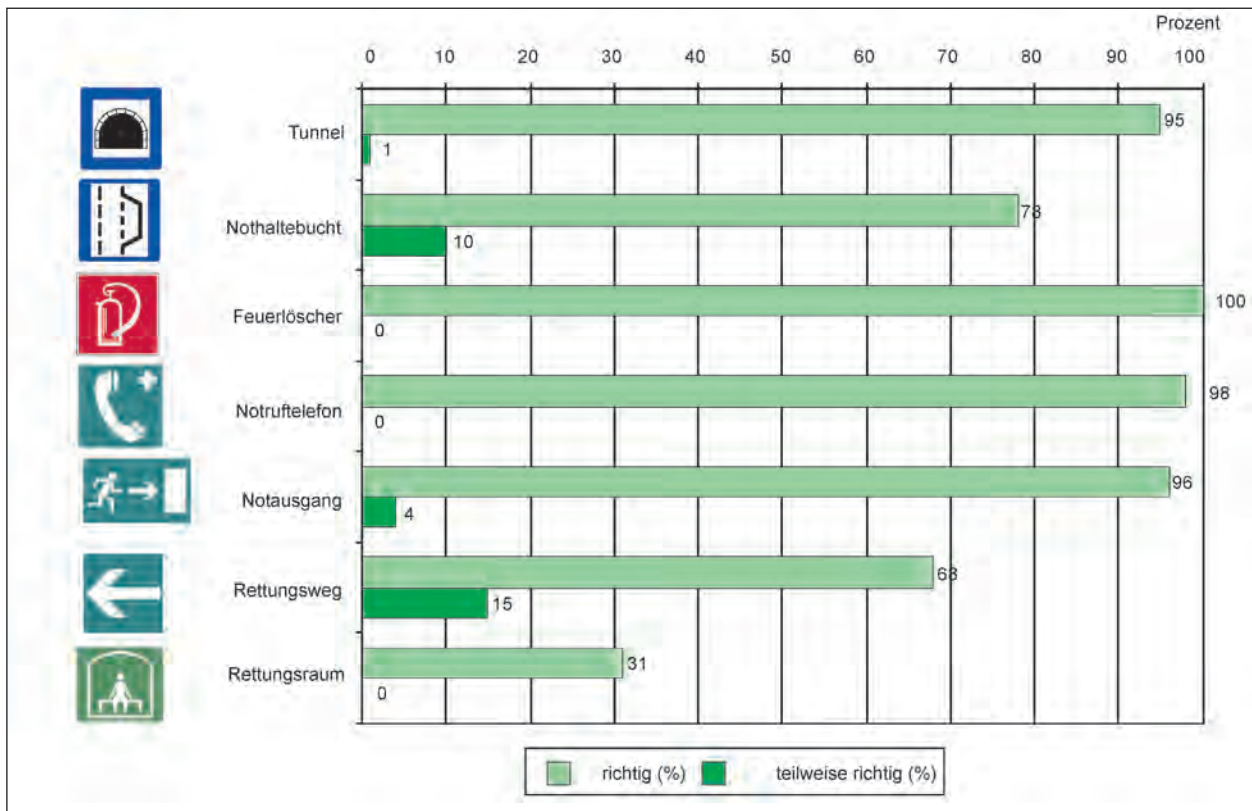


Bild 4.5: Prozentsatz richtiger bzw. teilweise richtiger Antworten bei den Schildern „Tunnel“ Z 327 StVO; „Nothalte- und Pannenbucht“ Z 328 StVO; „Feuerlöscher“ Z F 05; „Notruf-Telefon“ Z E 07; „Notausgang/Rettungsweg nach rechts“ Z E 10; „in dieser Richtung liegt der nächste Notausgang/Rettungsweg“ Z E 01; „hier warten“; SFWM Schweiz

gang recht gut bekannt sind. Bei der Nothaltebuch und der Richtungsanzeige für den Rettungsweg sind sich nur ca. 2/3 der Befragten sicher. Mit dem Rettungsraum-Zeichen aus der Schweiz konnten nur 31 % der Befragten etwas Sinnvolles verbinden.

4.2.4 Gefühle im Tunnel

Welche Gefühle verbinden die Befragungsteilnehmer mit der Fahrt durch einen längeren Tunnel?

Bild 4.6 zeigt deutlich, dass die Fahrt durch den Tunnel bei sehr vielen Nutzern mit Angst und Unsicherheit verbunden ist – auch wenn sie mit Attributen wie „gelegentlich“ und „ein bisschen“ verbunden werden. Dies ist beachtlich, denn welcher Autofahrer möchte schon als „Angsthase“ gelten?

Die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen Tunnelangst und dem Erleben eines Unfalls besteht, lässt sich wie folgt beantworten: Wir ordnen die Personen in zwei Gruppen: Gruppe 1 hat keinen Unfall im Tunnel gesehen, Gruppe 2 hat einen gesehen. Vergleicht man nun die Antworthäufigkeiten der beiden Gruppen bezüglich ihrer Angst im Tunnel („immer“, „gelegentlich“, „nie“), so zeigt ein Chi-Quadrat-Test keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ($\chi^2 = 1,38 < \chi^2_{0,05;2} = 5,99$).

Demzufolge besteht kein Zusammenhang zwischen Tunnelangst und Unfallerleben im Tunnel.

Zum Vergleich: In der DEKRA-Untersuchung, durchgeführt vom Institut ITEM (2002), räumten 24,6 % Angst ein – möglicherweise ist der geringe-

re Prozentsatz durch die Person des Interviewers bedingt.

In unserer Befragung wurde das Gefühl der Enge von mehr als der Hälfte der Befragten eingeräumt.

Die Furcht vor einem Stau wurde von 56 % der Befragten bejaht (in der DEKRA-Umfrage: 63,2 %).

Auf die Frage, weshalb Stau in einem längeren Tunnel gefürchtet werde, schrieben die Teilnehmer Folgendes:

- 24 %: Abgase, schlechte Luft,
- 29 %: Unfallgefahr, Unberechenbarkeit anderer,
- 12 %: Brand, Feuer,
- 7 %: ungünstige Fluchtwege, „nicht hinauszu- kommen“,
- 4 %: Enge.

Folgende Antworten erhalten wir auf die Frage, ab welcher Länge des Tunnels der Befragte sich unwohl fühle:

- 6 %: Gefühl bei jedem Tunnel vorhanden, unabhängig von der Länge,
- 1 %: ab 100 m Länge,
- 6 %: ab 500 m Länge,
- 18 %: ab 1.000 m Länge,
- 25 %: ab 1.500 m Länge,
- 44 %: in keinem Tunnel.

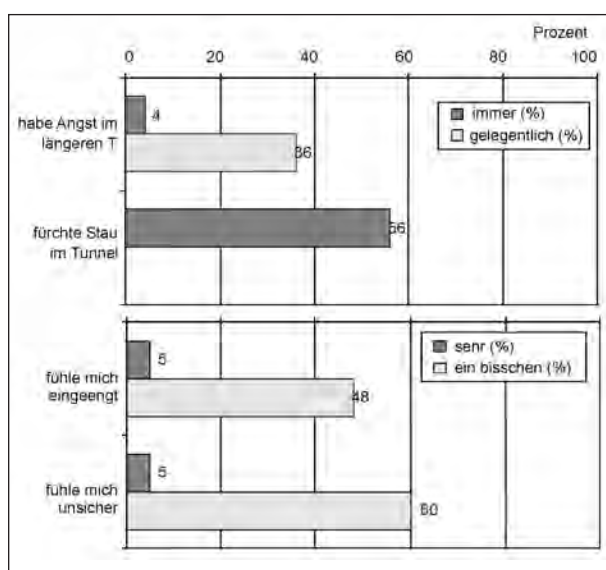


Bild 4.6: Gefühle der Befragten im (längeren) Tunnel. Angaben in Prozent

Für 6 % ist das Gefühl bei jedem Tunnel vorhanden, unabhängig von der Länge, während sodann der Prozentsatz der Zustimmung mit steigender Länge zunimmt: Bei einer Länge von 1.000 Metern sind es schon dreimal so viele wie bei 500 Metern, die sich unwohl fühlen, usw.

Bei der Frage, ob sie sich vor Antritt einer Urlaubsfahrt über den Sicherheitsstandard der Tunnel, durch die die Fahrt führt, informieren würden, geben

- 4 % „ja, immer“ an und
- 24 % „ja, wenn ich daran denke“.

Um die Befragten in die Situation der letzten längeren Tunnel-Durchfahrt zu versetzen, wurde gefragt, ob sie sich noch an den Namen des zuletzt gefahrenen längeren Tunnels erinnern würden.

Ca. 35 % konnten diesen Tunnel benennen.

Im zuletzt gefahrenen Tunnel wurden Beleuchtung und Belüftung von 45 % als ausreichend eingeschätzt. Der Anteil der kritischen Stimmen ist hier gering. Etwa 1/4 antwortete mit „es ging so“, sieht also noch Verbesserungspotenzial. 23 % haben nicht darauf geachtet.

Interessant ist, dass die Fahrer stärker auf Beleuchtung und Belüftung achteten als auf Ausweichbuchten und Fluchtwege. Hier sagen 39 %, sie hätten nicht darauf geachtet. 27 % fanden die Anzahl von Ausweichbuchten und Fluchtwegen im zuletzt gefahrenen Tunnel als ausreichend, 9 % als nicht ausreichend, 1/4 meinte, „es ging so“.

Die Frage, ob man für die Sicherheit im Auto-Tunnel mehr tun müsse, verneinten 12 %.

72 % vertraten die Ansicht, man müsse „mehr“ tun, 14 % meinten sogar, man müsse „viel mehr“ tun. Damit sind 84 % der Ansicht, an Tunneln sollten Verbesserungen im Sinne der Sicherheit vorgenommen werden. (Zum Vergleich: Bei der DEKRA-Umfrage waren 95,1 % der Ansicht, man müsse mehr tun).

Die Befragten hatten die Möglichkeit, in einem Feld einzutragen, welche Maßnahmen man ergreifen müsste. Hier folgen die Vorschläge, nach Themen geordnet:

- 38 % fordern bauliche Maßnahmen (z. B. Belüftung, Beleuchtung, mehr Fluchtwege und bessere Kennzeichnung, breitere Fahrbahnen).
- 15 % schlagen europaweite Standards und deren Einhaltung vor. Ältere Tunnel sollten entsprechend nachgerüstet werden, wobei z. B. die Forderungen der ADAC-Tunneltests zu berücksichtigen seien.
- 7 % fordern zwei Röhren als Pflicht.
- 6 % wünschen Informationen über richtiges Verhalten, etwa bereits in der Fahrschule oder in allgemeinen Bekanntmachungen.
- 1 % schlägt vor, rechtzeitig vor einem Stau im Tunnel zu warnen, damit eine Umfahrung möglich werde.

Die Frage „Wären Sie bereit, für mehr Sicherheit im Tunnel eine Gebühr zu bezahlen“ beantworteten

- 42 % mit „ja“ (Anmerkung: Bei der DEKRA-Umfrage waren es 54,7 % Befürworter),

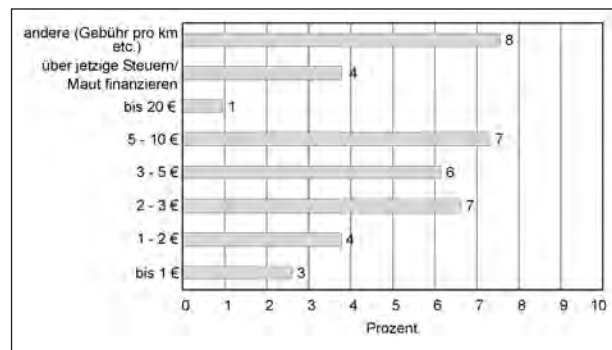


Bild 4.7: Wie viel würden Personen, die bereit sind, für mehr Sicherheit im Tunnel eine Gebühr zu bezahlen (42 % der Befragten), pro Durchfahrt investieren? (Angaben in Prozent)

- 56 % mit „nein“.

Bild 4.7 zeigt, wie viel die Zahlungsfreudigen pro Durchfahrt bezahlen würden (Eintrag in einem Schriftfeld, keinerlei Vorgaben).

Etwa die Hälfte der Zahlungswilligen gibt Beträge zwischen 1 Euro und 5 Euro ein. 7 % der Befragten geben sogar an, zwischen 5 und 10 Euro bezahlen zu wollen. 4 % vertreten die Ansicht, die Tunnel-Sicherheit müsse über Steuern und Maut finanziert werden, während 8 % andere Vorschläge unterbreiten, etwa die Gebühr pro Kilometer zu erheben o. Ä.

4.2.5 Wie soll man sich im Tunnel verhalten?

In diesem Befragungsabschnitt geht es um allgemeine Verhaltensweisen innerhalb des Tunnels, insbesondere bei Stau.

Die Frage, ob man, wenn die Ampel vor dem Tunnel auf „Rot“ stehe, noch in den Tunnel hineinfahren dürfe, wird von 98 % der Befragten mit „nein“ beantwortet.

Bild 4.8 zeigt, ob man nach Ansicht der Befragten bei Stau im Tunnel wenden bzw. rückwärts fahren dürfe. Niemand vertritt die Meinung, dies sei generell erlaubt. Wenn es jedoch sein müsste, halten 3 Prozent wenden und 7 % Rückwärtsfahren für vertretbar.

Die Frage, ob man, wenn man durch einen Tunnel fährt, den Verkehrssender einstellen sollte, wird von

- 74 % mit „ja“ beantwortet,
- 22 % sind der Ansicht, dies bringe nichts, da kein Empfang bestehe,
- 3 % antworten mit „nein“.

Bei der Fahrt durch den Tunnel achten 65 % der Befragten auf etwas ganz besonders. Die freien Antworten wurden von uns Themenbereichen zugeordnet:

- Bei 21 % beziehen sich die Antworten auf sich selbst oder das eigene Fahrzeug, z. B. wird die Sonnenbrille abgenommen, das Radio eingeschaltet, das Abblendlicht aktiviert, man bemüht sich, die Geschwindigkeit konstant zu halten, in der Spur zu bleiben.
- 33 % achten besonders auf andere Fahrzeuge, etwa auf ausreichend Abstand, die Überholvorgänge anderer Fahrzeuge, deren Bremslichter, den Verkehr/Gegenverkehr, auf Lkw.
- 14 % nennen Eigenschaften des Tunnels im allgemeinen, etwa die Beleuchtung, die Belüftung, die Fahrspuren, die Länge bis zum Erreichen des Ausgangs.
- 23 % führen Punkte auf, die im kritischen Falle relevant werden könnten, z. B. Rauch, Angaben zur Fluchtrichtung, Notausgangs-/Notfall-Beschilderung.

Wenn sich der Verkehr im Tunnel staut, halten

- 9 % einen kurzen Abstand zum Vorausfahrenden,
- 62 % einen mittleren Abstand und
- 29 % einen großen Abstand.

In diesem Punkt ist es dringend erforderlich, Aufklärungsarbeit zu leisten.

Kommt der Verkehr zum Stillstand, so

- lassen 7 % den Motor laufen,

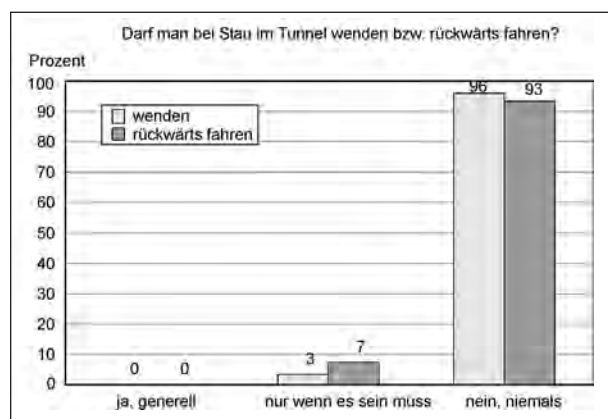


Bild 4.8: Verhalten bei Stau im Tunnel – ist Wenden/Rückwärtsfahren erlaubt? (Angaben in Prozent)

- 92 % stellen ihn ab.

Die überwiegende Mehrzahl der Befragten gibt somit die richtige Verhaltensweise an.

Die Frage „Kann es im Tunnel Lautsprecher-Durchsagen geben?“ wird wie folgt beantwortet:

- 15 % sagen „nein“,
- 78 % „ja, in manchen Tunneln“,
- 5 % „ja, in jedem Tunnel“.

Ob man im Tunnel anhalten dürfe, beantworten

- 5 % mit „nein, niemals“,
- 93 % „ja, aber nur im Notfall“,
- 2 % „ja, generell“.

Falls die Frage mit „ja“ beantwortet wurde, sollte in einem Schriftfeld eingetragen werden, wo man anhalten dürfe:

- 62 % schreiben: in einer Haltebucht/Nothaltebucht/Pannenbucht,
- 7 % auf besonderen Flächen (nicht näher bezeichnet),
- 3 % auf dem Seitenstreifen.

Damit wird deutlich, dass 65 bis 72 % der Befragten konkrete Vorstellungen haben, wo sie im Tunnel anhalten könnten.

Bild 4.9 zeigt, welche Antwort-Alternative die Befragten anklicken, wenn nach dem Abstand der Notruf-Stationen in längeren Tunneln gefragt wird.

Gemäß RABT (2006) soll der Abstand in neueren Tunnel 150 Meter betragen.

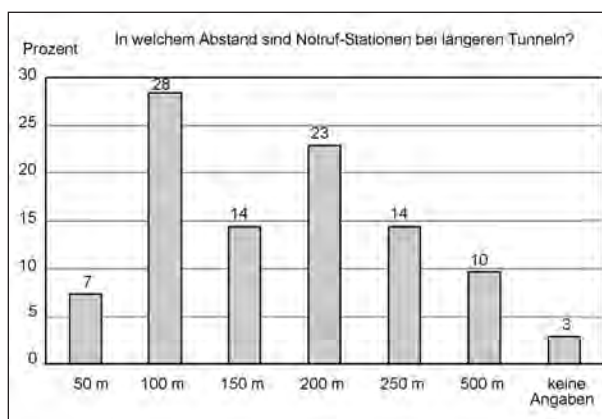


Bild 4.9: Abstand der Notruf-Stationen in längeren Tunneln – nach Ansicht der Befragten (Angaben in Prozent)

Somit sind 35 % der Befragten der Meinung, die Notrufstationen stünden dichter, als dies in neueren Tunnel der Fall ist. 47 % rechnen mit längeren Abständen, als die gegenwärtige Richtlinie vorsieht.

4.2.6 Brand im Tunnel

Dieses Kapitel soll den Wissenstand der Teilnehmer zum richtigen Verhalten im Tunnel in einem Brandfall erfassen.

Bild 4.10 stellt die Antworten auf die Frage dar, ob, wenn der Tunnel durch einen Brand blockiert sei, Wenden bzw. Rückwärtsfahren erlaubt sei.

Während bei Stau 96 bzw. 93 % der Befragten der Meinung waren, man dürfe niemals wenden oder rückwärts fahren, schrumpft die Menge der Nein-Antworten für den Fall eines Brandes auf 61 bzw. 53 Prozent. 9 % vertreten die Ansicht, im Brand-Fall sei wenden oder Rückwärtsfahren generell erlaubt, 29 bzw. 37 % halten es im Notfall für vertretbar.

Die Frage „Wenn das eigene Fahrzeug brennt, soll man dann versuchen, noch aus dem Tunnel hinauszufahren?“, wird wie folgt beantwortet:

- 64 % meinen, wenn es irgendwie ginge, solle man vorwärts aus dem Tunnel fahren,
- 8 % meinen, rückwärts,
- 42 % sind der Ansicht, man bleibe besser stehen.

Bei dieser Frage waren Mehrfachnennungen möglich, es konnte also auch „vorwärts“ und „rückwärts“ angeklickt werden.

Wenn vor einem im Tunnel ein Fahrzeug brennt und man nicht vorbei fahren kann, wo ist in diesem Falle anzuhalten? Bild 4.11 zeigt die Antworten.

Nur 4 % wählen eine ungeeignete Lösung, die Antworten der anderen Befragten sind – je nach Situation – akzeptabel.

Ist bei einem Brand im Tunnel die Durchfahrt blockiert, geben

- 7 % an, in jedem Fall zuerst selbst zu versuchen, das Feuer zu löschen.
- 57 % meinen, sie würden einen Löschversuch wagen, wenn das Feuer noch nicht groß ist.
- 35 % halten es für sinnvoller, lieber gleich die Feuerwehr zu rufen.

Ob es bei jedem Notausgang einen Feuerlöscher gäbe,

- wissen 49 % nicht.
- 30 % sind sich sicher, bei jedem Notausgang Feuerlöscher vorzufinden,
- 16 % denken, dies sei nur bei neuen Tunneln der Fall,
- und 4 % sagen „nein“ – nicht jeder Notausgang sei mit Feuerlöschern ausgestattet.

Nach der RABT (2006) müssen an jedem Notausgang und an jeder Notrufsäule zwei Feuerlöscher angebracht sein. Ältere Tunnel werden, zumindest in Deutschland, entsprechend nachgerüstet.

Wenn man vor sich im Tunnel nur Rauch und Feuer sieht, soll man dann im Fahrzeug bleiben? Auf diese Frage antworten

- 16 % mit „ja“ (15 % der Männer, 17 % der Frauen),

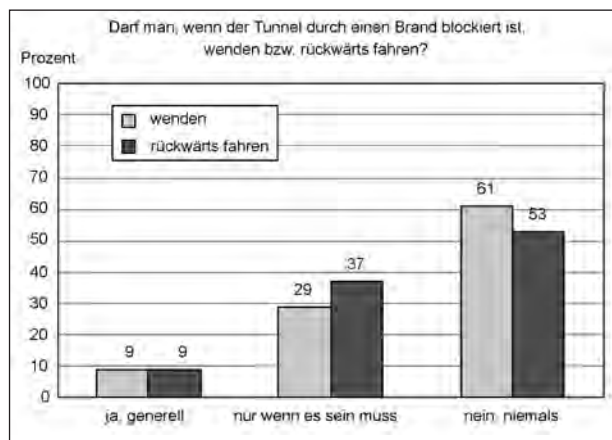


Bild 4.10: Verhalten, wenn der Tunnel durch einen Brand blockiert ist: Ist Wenden bzw. Rückwärtsfahren erlaubt? (Angaben in Prozent)

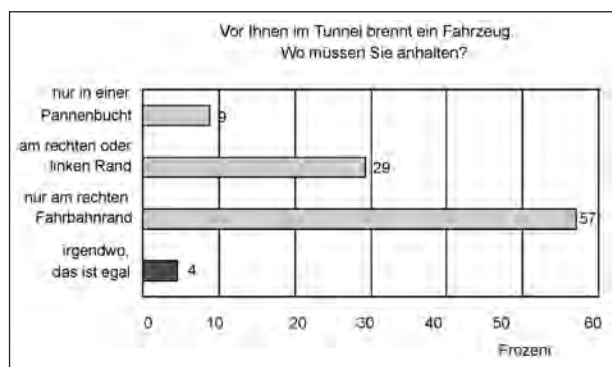


Bild 4.11: Verhalten, wenn der Tunnel durch einen Brand blockiert ist: Wo muss man anhalten? (Angaben in Prozent)

- 19 % mit „weiß nicht“ (16 % der Männer, 27 % der Frauen) und
- 65 % mit „nein“ (69 % der Männer, 56 % der Frauen).

Mindestens ein Drittel der Befragten ist somit im Notfall in akuter Gefahr, da sie entweder im Fahrzeug ersticken oder zu lange mit dem Evakuieren warten würden.

Wenn es direkt vor einem im Tunnel brennt, geben 96 % der Befragten an, sich selbst in Sicherheit zu bringen.

Nur 2 % würden auf Polizei und Feuerwehr warten, weitere 2 % wissen nicht, was zu tun ist.

Bild 4.12 zeigt die Antworten auf die Frage, wie viel Zeit man habe, um zu flüchten, wenn unmittelbar vor einem im Tunnel ein Fahrzeug in Flammen steht.

Bezüglich der Zeiten, die für eine Flucht aus einem Tunnel bleiben, gibt es unterschiedliche Ansichten, da die Rettungszeiten vom Tunnelquerschnitt, der Lüftung und Brandentwicklung abhängen. Aus Kapitel 3.2 ist bekannt, dass bei einem Hausbrand 3 Minuten als maximale Zeit zum Flüchten bleiben. Setzen wir diesen Zeitrahmen hier, mit aller gebotenen Vorsicht, an, so liegen 58 % der Befragten mit ihrer Schätzung sozusagen im „grünen Bereich“. Die anderen würden im Falle eines Brandes vermutlich zu viel Zeit vergeuden, da sie die Dringlichkeit der Flucht falsch einschätzen. Hier besteht ein deutliches Informationsdefizit.

Würde der Fahrer, wenn er das Fahrzeug verließ, Wertgegenstände und Ausweise mitnehmen? Bild 4.13 zeigt die Antworten.

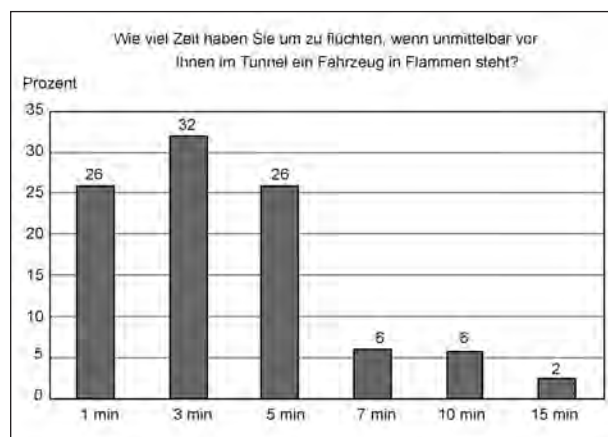


Bild 4.12: Wieviel Zeit bleibt zum flüchten? (Angaben in Prozent)

84 % würden sich richtig verhalten: Sie würden die Wertgegenstände und Ausweise entweder liegen lassen oder sie nur mitnehmen, wenn sie griffbereit wären. Die anderen würden möglicherweise ihr Leben gefährden.

Bei einer Flucht aus dem Tunnel unter Zurücklassung des Fahrzeugs würden

- 8 % das Fahrzeug absperren,
- 32 % das Fahrzeug offen lassen, jedoch den Schlüssel mitnehmen,
- 59 % den Schlüssel im Zündschloss stecken lassen.

In 40 % der Fälle könnten somit Helfer die Fahrzeuge gar nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen aus dem Weg räumen.

Auf die Frage, ob man die Feuerwehr mit dem Handy oder dem Notruf-Telefon benachrichtigen solle, antworten

- 58 % mit dem Notruf-Telefon,
- 2 % mit dem Handy,
- 40 %, das ist egal.

Da Anrufe, die über das Notruf-Telefon im Tunnel hereinkommen, zumindest bei neuen Tunneln sofort, einschließlich einer Standorterkennung, an die überwachende Stelle übertragen werden, ist diese Wahl im Sinne eines raschen Informationsflusses sehr günstig. 58 % der Befragten geben an, mit dem Notruf-Telefon anrufen zu wollen.

40 % sind der Ansicht, man könne mit dem Notruf-Telefon oder dem Handy anrufen. Nun muss beim Notruf per Handy das Gerät zunächst geortet werden, falls der Anrufer keine genauen Angaben zum Namen des Tunnels und dem exakten Standort dort geben kann. Diese Ortung ist zwar meist prinzipiell möglich, kann aber kostbare Zeit vergeuden. Da

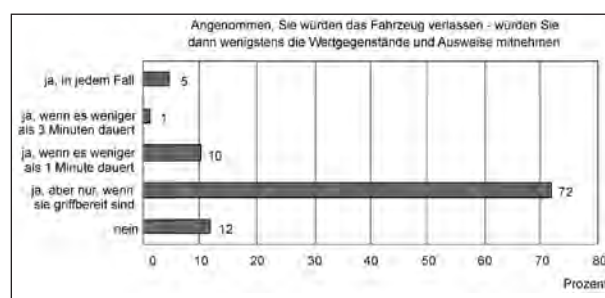


Bild 4.13: Würden Sie Wertgegenstände mitnehmen? (Angaben in Prozent)

der Handy-Anruf bei der Polizei oder der Feuerwehr eingehen wird, muss von dort aus auch noch die Tunnelleitstelle informiert werden, um alle erforderlichen Maßnahmen einzuleiten, wie Sperrung des Tunnels, Veränderung der Lüftung, Entsenden der betriebsbereiten Feuerwehr oder der zuständigen Wehr usw.

Was ist im Tunnel gefährlicher, der Rauch oder das Feuer? Auf diese Frage antworten

- 80 %: Der Rauch ist gefährlicher,
- 17 %: beides zusammen,
- 2 %: weiß nicht.

Wie der FVLR (2007) feststellt, sterben 80 % aller Brandopfer nicht an Verbrennungen, sondern sie ersticken am giftigen Brandrauch. Diese Zahl gilt für Wohnungsbrände, für Katastrophen größeren Ausmaßes dürfte sie noch höher liegen. Der FVLR nennt hier als Beispiel den Brand im Düsseldorfer Flughafen 1996, wo alle 17 Todesopfer einer Rauchvergiftung erlagen.

Die Antworten der Probanden deuten einen guten Informationsstand an.

Die Frage, wo sich die Rauchgase sammeln, wird wie folgt beantwortet:

- 65 %: oben an der Decke,
- 20 %: unten am Fußboden,
- 7 %: mitten im Raum,
- 8 %: weiß nicht.

Damit ist etwa 2/3 der Befragten klar, dass sich die Rauchgase zunächst oben an der Decke sammeln. Da es jedoch im Tunnel auch zu Verwirbelungen, ja sogar hin- und herpendelnden Rauchpfropfen (durch Luftströmungen, Hitze, Belüftung, ...) kommen kann, ist die Frage zwar prinzipiell, jedoch nicht für den Einzelfall zu beantworten.

Die überwiegende Mehrheit der Befragten hat eine recht gute Vorstellung davon, wie heiß es bei einem Brand im Tunnel werden kann:

- 52 % meinen, mehr als 1.000 Grad (dies ist die richtige Antwort),
- 15 %: 1.000 Grad,
- 10 %: 800 Grad,
- 5 %: 400 Grad,

- 2 %: 200 Grad,
- 1 %: 100 Grad.

Allerdings haben 16 % keine Vorstellung davon und kreuzen „ich weiß nicht“ an.

Nach der Richtung, in die man flüchten sollte, befragt, geben

- 90 % an: vom Rauch weg,
- 3 %: zum Rauch hin,
- 6 % wissen es nicht.

9 von 10 Teilnehmern würde sich somit richtig verhalten.

Bei der Frage „Wenn man aus dem Tunnel flüchtet, soll man dann den Notausgang nehmen oder an der Fahrspur entlang laufen?“ konnten verschiedene Antwortalternativen parallel angeklickt werden.

- 91 % wählen den Notausgang,
- 20 % die Fahrspur, wenn man das Ende des Tunnels bereits sieht,
- 1 % in jedem Fall die Fahrspur,
- 1 % weiß nicht, was zu tun ist.

Den Notausgang zu wählen ist sicherlich die beste Wahl – 91 % geben an, sich so zu entscheiden. Wenn das Ende des Tunnels bereits in Sicht ist (und man bewegt sich vom Rauch weg), ist die Flucht an der Fahrspur entlang sicherlich auch eine gute Entscheidung. Jeder Fünfte nennt diese Alternative.

Die Frage, ob Erste Hilfe zu leisten sei, wenn man Verletzte sehe, wird von

- 94 % mit ja, falls möglich, beantwortet,
- 5 % denken, es sei besser, dies den Rettungskräften zu überlassen und sich selbst in Sicherheit zu bringen.

Herumirrenden Personen würden 98 % helfen, falls möglich.

77 % der Befragten wünschen die Zusendung von Informationsmaterial, obwohl dazu die E-Mail-Adresse eingetragen werden muss und der Antwortbogen nicht mehr anonym verschickt werden kann. Dies zeigt das hohe Interesse am richtigen Verhalten im Tunnel.

4.2.7 Zusammenfassung der Umfrage-Ergebnisse

Mit 423 Personen aller Altersgruppen, meist sehr umfangreicher und langjähriger Fahrpraxis, ist es gelungen, eine repräsentative Stichprobe zu gewinnen.

Der allgemeine Wissensstand der Befragten zu Schildern im Tunnel ist teilweise recht gut, etwa beim Zeichen für den Feuerlöscher, das Notruftelefon, den Notausgang und das Tunnelzeichen an sich (korrekt antworten 95 bis 100 % der Befragten). Nicht so gut bekannt ist das Zeichen für die Nothaltebucht und die Richtungsangabe für den Notausgang/Rettungsweg (68 bis 78 % richtige Antworten). Nur 31 % können mit dem Zeichen für Rettungsraum (Schweiz) etwas anfangen.

Eine Fahrt durch den Tunnel wird zumindest gelegentlich von 40 % der Befragten mit dem Gefühl der Angst verbunden. Einen Stau fürchten 56 %. Das Gefühl der Enge und der Unsicherheit stellt sich bei mehr als der Hälfte der Befragten ein, mit zunehmender Länge eines Tunnels fühlt sich ein Großteil der Befragten unwohl.

Daher verwundert es nicht, wenn 84 % die Ansicht vertreten, man müsse mehr für die Sicherheit im Tunnel tun. Am häufigsten werden Verbesserungen an Belüftung und Beleuchtung gewünscht, weiterhin mehr Fluchtwege und eine bessere Kennzeichnung.

Für ein Mehr an Sicherheit geben 42 % der Befragten an, eine Gebühr bezahlen zu wollen, wobei die Hälfte Beträge zwischen 1 und 5 Euro nennt.

Manche Verhaltensweisen, die für Tunnel gelten, sind gut bekannt, so etwa das Verbot, zu wenden oder rückwärts zu fahren, bei Stillstand den Motor abzustellen, das Anhalten nur im Notfall (92 bis 96 % der Antworten).

Weniger gut bekannt ist die Anweisung, im Tunnel den Verkehrsfunk einzustellen, auf Durchsagen im Tunnel zu achten und nur seitlich anzuhalten (72 bis 78 %).

Nur etwa 1/3 weiß, dass bei Stau im Tunnel ein großer Abstand zum Vordermann eingehalten werden muss.

Bei einem Brandfall im Tunnel wissen fast alle Tunnelnutzer, dass sie das Fahrzeug in einer Pannebucht oder am Rand abstellen müssen. Allerdings sind in diesem Falle nur noch 38 bzw. 46 % der

Meinung, man dürfe nicht wenden oder rückwärts fahren.

Sollte das eigene Fahrzeug brennen, so geben etwa 2/3 an, sie würden versuchen, das Fahrzeug noch aus dem Tunnel zu fahren.

Ist der Tunnel durch einen Brand blockiert, so geben 64 % an, einen Löschversuch starten zu wollen, zumindest wenn das Feuer noch nicht groß sei. Jedoch weiß mehr als die Hälfte der Befragten nicht, dass es an jedem Notausgang Feuerlöscher gibt.

16 % würden, wenn im Tunnel nur Feuer und Rauch zu sehen sind, im Fahrzeug bleiben, 19 % wissen nicht, was zu tun ist. Die Zeit, die bei einem Brand zur Evakuierung zur Verfügung steht, wird von 42 % der Befragten überschätzt.

Bei einer Flucht würden 40 % die Fahrzeugschlüssel mitnehmen.

Zur Benachrichtigung der Feuerwehr halten 58 % das Notruf-Telefon für geeignet, 40 % sind der Ansicht, man könne das Notruf-Telefon oder das Handy verwenden.

80 % wissen, dass der Rauch gefährlicher ist als das Feuer, 90 %, dass man vom Rauch weg flüchten muss. Doch nur 65 % sind darüber informiert, dass sich die Rauchgase zunächst oben an der Decke sammeln. 16 % wissen nicht, welche Temperaturen bei einem Brand im Tunnel entstehen können.

Fast alle Befragten geben an, über den Notausgang zu flüchten, oder, falls man das Ende des Tunnels bereits sehen könne, über die Fahrspur.

77 % der Befragten wünschen die Zusendung von Informationsmaterial, woraus nicht nur auf ein großes Informationsbedürfnis, sondern auf einen hohen Unsicherheitsfaktor zu schließen ist.

4.2.8 Konsequenzen

Das theoretische Wissen über Sicherheitseinrichtungen in Tunnel sowie das richtige Verhalten bei Störungsfällen kann aufgrund der Befragung als weitgehend gut eingestuft werden. Zwei Bereiche sind im Bewusstsein der Nutzer zu wenig ausgeprägt:

- die Notwendigkeit, das Fahrzeug zu verlassen,
- die Dringlichkeit der Reaktion speziell bei Bränden.

Rekapituliert man noch einmal wesentliche Ergebnisse der Beschreibung von Verhaltensweisen bei Störfällen und die entsprechenden Konsequenzen, so sind interessante Parallelen zu ziehen:

- Bei frühzeitigem Eingreifen durch Nutzer oder Mitarbeiter konnte die Situation meist unter Kontrolle gebracht werden (vgl. Kapitel 2.1).
- Das subjektive Sicherheitsempfinden im eigenen Fahrzeug war teilweise verhängnisvoll.

Setzt man die Ergebnisse unserer Befragung sowie die Beschreibung des konkreten Verhaltens bei Unfällen und Bränden (siehe Kapitel 3) in Beziehung, so werden folgende Schwerpunkte deutlich:

- Der Übergang von der leichten, beherrschbaren zur schweren Störung, bei der nur noch Flucht hilft, muss deutlich gemacht werden. Ziel muss

zunächst sein, dass Betroffene kleinere Störungen (z. B. Motorprobleme, die aber eine langsame Weiterfahrt noch ermöglichen) selbst beheben, durch Aufsuchen der Pannenhilfsstelle oder Ausfahren aus dem Tunnel.

- Wird die Situation kritisch, hat durch entsprechende Maßnahmen und Warnungen eine schnelle Räumung des Tunnels zu erfolgen. Hierfür müssen adäquate optische und akustische Signale eingesetzt werden.

In kritischen Situationen kommt der Aufforderung, das Auto zu verlassen, eine besondere Bedeutung zu. Auch hierfür müssen entsprechende Signale entwickelt werden.

Es gilt somit, zwei Signalarten zu entwickeln:

- Warnungen bei kleineren Störfällen,

Tunnel Serial Number	Single tube or Tube Number 1														
	Country	Tube Name(s)	Current status (in operation, under construction)	Year of opening	Length	Type of traffic under normal operation (1-way, 2-way, changing)	Number of lanes	Carriageway width (between kerbs)	Tunnel width (between sidewalls)	Authorised gauge	Maximum gradient (%)	Ventilation (natural longitudinal, semi-transverse, transverse, other)	Lighting (Yes, No)	Special safety features	Number of lanes outside the tunnel
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
123	DE	Rennsteigtunnel	UC	2003	7916	1-way	2	7,5	9,5	4,5	2	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	2
124	DE	Königsheiner Berge	OP	1999	3300	1-way	2	7,5	9,5	4,5	1	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	2
125	DE	Elbtunnel 4. Röhre	UC	2003	3100	1-way	2	9,5	10,63	4,5	4	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	4
126	DE	Elbtunnel Röhre 1-3	OP	1975	2653	changing	2	7,5	9	4,5	4	S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q	4
127	DE	Engelbergbasistunnel	OP	2000	2310	1-way	3	13,5	15,5	4,5	1	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	3
128	DE	Tunnel Britz	OP	2000	1700	1-way	3	13,5	14,5	4,5	4	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	3
129	DE	Tunnel Allach	OP	1995	1400	1-way	3	14	16,1	4,5					
130	DE	Grenzt. Füssen	OP	1999	1270	1-way	2	8	10,5	4,5	2	LONG	Yes		
131	DE	Tunnel Nollinger Berg	UC	2002	1342	2-way	2	7,5	9,5	4,5		LONG	Yes	C	
132	DE	Flughafen Düsseldorf	OP	1992	1070	1-way	3	12,55	17,25	4,5	0	LONG	Yes	O,K,H,G,Q	
133	DE	Hochwaldtunnel	UC	2001	1050	1-way	2	7,5	9,5	4,5	1	LONG	Yes		
134	DE	Universität Düsseldorf	OP	1963	1026	1-way	2	11	13,6	4,5	0	LONG	Yes	O,H,G,Q	
135	DE	Ruhrschnellweg Essen	OP	1970	1005	1-way	2	8	10,7	4,5	2	TR	Yes	O,H,G,Q	
136	DE	Saukopftunnel	OP	1999	2715	2-way	2	7,5	9,5	4,5	2	S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q	2
137	DE	Tunnel Farchent	OP	2000	2326	1-way	2	7,5	9,5	4,5	1	LONG	Yes		
138	DE	Rheinufer Düsseldorf	OP	1993	1926,5	1-way	2	8,3	9,7	4,5	7	LONG	Yes		
139	DE	Weserauentunnel	UC	2002	1730	1-way	2	7,5	9,5	4,5	1				
140	DE	Wesertunnel	UC	2002	1636	1-way	2	7,5	9,5	4,5	5	LONG	Yes		
141	DE	Kappelberg, Fellbach	OP	2002	1565	1-way	2	10	12,15	4,5	3	LONG	Yes	O,K,H,G,Q	
142	DE	Wamoei Dortmund	OP	1994	1420	1-way	2	11	13,5	4,5	4	LONG	Yes		
143	DE	Ursulabergtunnel	UC	2001	1180	2-way	2					LONG	Yes		
144	DE	Tunnel Döggingen	UC	2002	1170	1-way	2	7,5	9,5	4,5		LONG			
145	DE	Kappler Tunnel	UC	2002	1187	1-way	2	7,5	9,5	4,5		LONG			
146	DE	Tunnel Grotzingen	OP	1999	1108										
147	DE	Macheltstunnel Baden-Baden	OP	1990	2518	2-way	2	7,5	9,5	4,5	6	S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q	
148	DE	Heslach, Stuttgart	OP	1991	2290	2-way	2	7,5	10,4	4,5	4	S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
149	DE	Kirchberg, Schitach	OP	1991	1640	2-way	2	7,5	9,5	4,5	1	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
150	DE	Reiherberg, Wolfbach	OP	1993	1257	2-way	2	7,5	9,5	4,5	4	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
151	DE	Feuerbach, Stuttgart	OP	1995	1175	2-way	2	7,5	9,5	4,5	3	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
152	DE	Hugenwald, Waldkirch	OP	1985	1135	2-way	2	8,5	11	4,5	2	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
153	DE	Sommerberg, Hausach	OP	1995	1085	2-way	2	7,5	9,5	4,5	4	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
154	DE	Tunnel Gernsbach	OP	1998	1527	2-way	2					S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q,I	
155	DE	Burgenwaldtunnel	OP	1997	1435	1-way	2	7,5	9,5	4,5	1	LONG	Yes	O,K,H,G,Q	
156	DE	Wattkopf	OP		1950	2-way	2					S/T	Yes	C,O,K,H,G,Q	
157	DE	Mestertunnel	OP		1684	2-way	2					LONG	Yes	O,K,H,G,Q	
158	DE	NW-Umgebung Rastatt	OP		1020	2-way	2					LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	
159	DE	Tiergartentunnel	UC	2005	2400	1-way	2	7,5	9,5	4,5	4	LONG	Yes	C,O,K,H,G,Q	
160	DE	Kiesbergtunnel	OP	1970	1052	1-way	2	7,5	10	4,5		LONG	Yes	O,H,G,Q, nrGQ	

Bild 5.1: Die ECE-Liste enthält 38 deutsche Tunnel, die länger als 1.000 m sind (aus: ECE, 2001, S. 4 f.)

- Notfall-Warnungen, die ein sofortiges Verlassen der Tunnel auf dem hierfür besten Weg garantieren.

5 Welche Einrichtungen sind vorhanden?

Von Seiten der ECE (Economic Commission for Europe) gibt es aus dem Jahre 2001 eine Erhebung, die eine Bestandsaufnahme für europäische Tunnel mit einer Länge von mehr als 1.000 Metern enthält. Folgende Punkte sind erfasst:

1. Name des Tunnels,
2. momentaner Betriebsstatus (in Betrieb, in Bau),
3. Jahr der Eröffnung,
4. Länge,
5. Art des Verkehrs (eine/zwei Fahrtrichtung(en), wechselnde Fahrtrichtungen),

6. Anzahl der Spuren,
7. Fahrbahnbreite (zwischen den Seitenstreifen, Bordsteinen),
8. Tunnelbreite (zwischen den Seitenwänden),
9. zulässige Spurbreite,
10. maximale Steigung (%),
11. Art der Belüftung (natürlich, längs, quer, ...),
12. Beleuchtung (ja, nein),
13. spezielle Sicherheitseinrichtungen,
14. Anzahl der Wege außerhalb des Tunnels.

Insgesamt enthält die ECE-Tabelle 671 Tunnel in Europa, die länger als 1 Kilometer sind. Bild 5.1 zeigt einen Ausschnitt, die Daten der 38 längeren deutschen Tunnel betreffend.

Zur besseren Übersicht sind sie in Bild 5.2 nach Länge sortiert (oben) und das Alter ist eingetragen (unten), soweit angegeben.

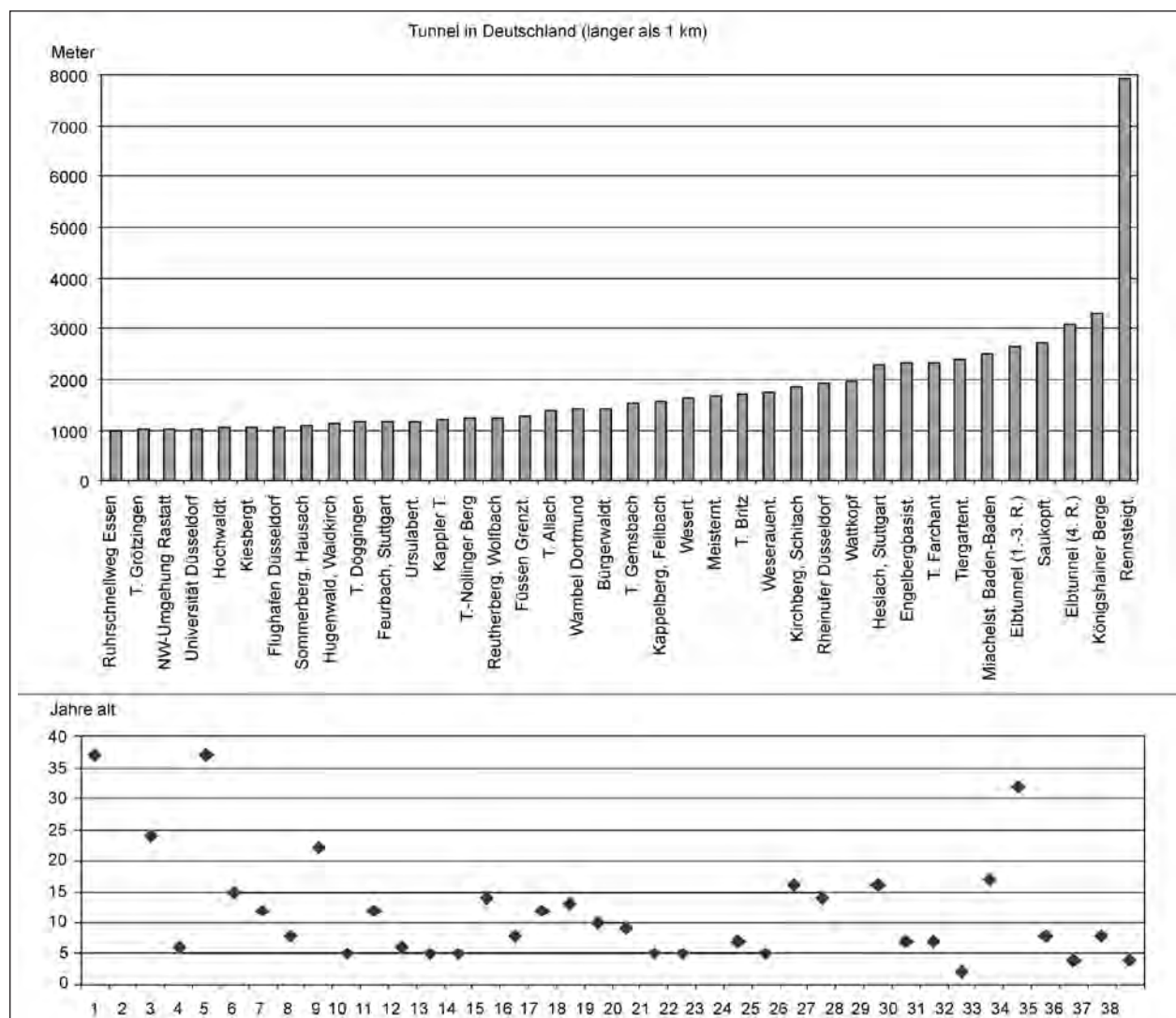


Bild 5.2: Länge und Alter der deutschen Tunnel gemäß ECE (2001), wobei nur Tunnel, die länger als 1.000 Meter sind, aufgenommen wurden

Demnach sind von den 38 längeren deutschen Tunneln

- 9 Tunnel 1 bis 5 Jahre alt,
- 11 Tunnel 6 bis 10 Jahre alt,
- 10 Tunnel 11 bis 20 Jahre alt,
- 5 Tunnel 21 bis 37 Jahre alt,

für 3 Tunnel sind keine Angaben enthalten.

Um einen Überblick über die aktuelle Situation von Sicherheitseinrichtungen und Sicherheitskonzepten deutscher Tunnel zu bekommen, wurde ein Fragebogen, der eine Reihe von Details erfasst, in der Bearbeitung jedoch nicht zu viel Zeit erfordert, entwickelt.

5.1 Fragebogen an die Tunnelbetreiber

Ausgehend von der Überlegung, dass bei den Betreibern von Tunnel ein umfangreiches Wissen vorhanden ist, das es zu nutzen gilt, werden Fachleute aller Bundesländer und verschiedener großer Städte angeschrieben und gebeten, einen kurzen Fragebogen für jeweils 1-2 interessante Tunnel in ihrem Gebiet zu beantworten. Mit „interessant“, so in den Erläuterungen, seien vor allem längere Tunnel gemeint, in denen sich schon kritische Situationen (z. B. Brand, schwerer Unfall, ...) ereignet hätten. Die Ansprechpartner werden von der BAST benannt.

5.2 Ergebnisse der Befragung von Tunnelbetreibern

Nahezu alle Bundesländer beteiligen sich an der Beantwortung des Fragebogens. Die Erhebung kann also als repräsentativer Querschnitt (Stand 06/2007) über den Ausstattungszustand von Tunnel in Deutschland betrachtet werden. Die detaillierten Ergebnisse liegen als gesonderter Bericht bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor.

Ein Teil der 18 Tunnel, für die die Bögen beantwortet wurden, ist noch recht neu, manche der Tunnel sind schon sehr viele Jahre in Nutzung. Das Alter schwankt zwischen einem und 32 Jahren. Auch die Länge ist höchst unterschiedlich. Sie reicht von 122 bis zu fast 7.916 Metern.

Die meisten Tunnel verfügen über 2 Röhren.

Gegenverkehr ohne Trennwand zwischen den Richtungen ist nur in vier der Tunnel zu verzeich-

nen. Bei etwa 1/3 entspricht die Tunnelform einem Bogen, bei 2/3 ist die Form rechteckig (siehe Bild 5.3).

Rettungs- und Notfallstrategien:

Auf die Frage nach den aktuellen Rettungs- und Notfallstrategien bei Unfällen, Brand oder Rauch antworten

- 11 der Betreiber (= 61 %), man verfüge über einen Alarm- und Gefahrenabwehrplan (AGAP), siehe dazu ein Beispiel in Anhang D.
- Je einmal werden ein Notfallplan bzw. Handlungsanweisungen genannt,
- in einem Falle wird die Vorgehensweise beschrieben: Sperrung eines Fahrstreifens oder einer Röhre, der Nachbarröhre (halbautomatisierter Katastrophenfall), evtl. komplette Sperrung durch ein Not-Halt-Programm (Elbtunnel mit 4 Röhren).
- In 3 Fällen (= 17 %) wird nur von Einsatzplänen der Polizei bzw. der Feuerwehr berichtet, in 5 Fällen kommen diese noch zum AGAP hinzu.

Einrichtungen für den Notfall:

- 10 der Tunnel (= 56 %) verfügen über Pannengebühren, meist jedoch nur eine bis drei Buchten. Bei den Tunneln ohne Pannengebühren sind nicht nur kürzere, sondern auch sehr lange Tunnel vertreten.
- 11 Tunnel verfügen über Notausgänge, 3 über Notausstiege bzw. Treppen.
- 9 Tunnel sind versehen mit Querschlägen, Notübergängen bzw. Überfahrten in die Nachbarröhre.

Anmerkung: Die RABT 2006 sieht bei einer Tunnellänge von mehr als 400 Metern Notausgänge in Abständen von weniger als 300 Metern vor und Notrufstationen in Abständen von weniger als 150 Metern (RABT, 2006, S. 35 f.). Jede Notrufstation ist mit zwei Handfeuerlöschern auszustatten (a. a. O., S. 39). Bis auf drei Ausnahmen verfügen alle Tunnel der Erhebung über Notrufstationen gemäß RABT.

Da nur die Gesamtzahl der Handfeuerlöcher und manuellen Brandmeldeeinrichtungen, nicht aber ihre Verteilung im Tunnel erfragt wurde, kann hier nur die Relation zur Tunnellänge betrachtet werden. Die durchschnittliche Ausstattungsichte von



Bild 5.3: Tunnel, für die Befragungsergebnisse vorliegen – Beispiele

Handfeuerlöschern liegt bei etwa 70 m, wobei einzelne Tunnel eine deutlich höhere Ausstattungsichte (ca. 20 m) aufweisen.

Gleiches gilt für die Verteilung der manuellen Brandmeldeeinrichtungen. Hier ist die Schwankungsbreite groß, von 40 m bis zu 530 m.

Alle Tunnel, für die Befragungsergebnisse vorliegen (ausgenommen der sehr kurze Utbremer Tunnel), verfügen über automatische Brandmeldeeinrichtungen. Vier von ihnen sind auch mit CO-Mess-einrichtungen und Apparaturen zur Messung der Sichttrübung ausgestattet (Tunnel Allach, Aubing, Elbtunnel, neuer und alter Teil).

Anmerkung: Gemäß RABT 2006 sind ab einer Tunnellänge von 400 Metern bzw. bei Tunneln mit mechanischer Lüftung automatische Brandmeldeeinrichtungen vorzusehen (RABT, 2006, S. 39).

Videoüberwachung:

Mit Ausnahme von zwei Tunneln (Pellinger Berg, Stauffer, beide 10 Jahre alt, Länge 596 bzw. 1.038 Meter) verfügen alle befragten Anlagen über Videoüberwachung.

Anmerkung: Die RABT 2006 sieht für Tunnel, die länger als 400 Meter sind bzw. eine große Lkw-Fahrleistung (≥ 4.000 Lkw x km/Röhre und Tag) aufweisen, unterirdische Zu- und Abfahrten haben, Videoüberwachung vor.

Da es sowohl in den Baulichkeiten der Tunnel als auch in der technischen Funktionalität der Kameras (statisch/schwenkbar, Auflösung) sehr große Unterschiede gibt, kann die in Bild 5.4 gezeigte Relation nur als grobes Kriterium gesehen werden. Danach ist, bis auf wenige Ausnahmen (Britz-Tunnel), die Kamera-Dichte recht hoch.

In den 16 Tunneln mit Videoüberwachung werden die Aufnahmen

- in 2 Fällen nur im Ereignisfall,
- in 9 Fällen (= 56 %) von einer Person,

- in 3 Fällen von zwei Personen,
- in zwei Fällen von drei Personen gleichzeitig überwacht.

Häufig sind verschiedene Stellen für die Beobachtung zuständig, etwa die Tunnelzentrale, die Autobahnmeisterei, die Verkehrsrechnerzentrale, die Feuerwehr, die Polizei.

Empfang von Radiosendern/Möglichkeit der Einsprache:

Über die Möglichkeit der Einsprache in Radiosender verfügen 11 der 18 Tunnel, dies entspricht 61 %.

Anmerkung: Die RABT 2006 fordert den Empfang mindestens eines UKW-Senders mit Verkehrsfunkennung.

Einrichtungen zur Sperrung des Tunnels:

Alle Anlagen, mit Ausnahme des sehr kurzen Utbremer Tunnels, verfügen über Signalanlagen, um im Ereignisfall die Einfahrt in den Tunnel zu stoppen.

Anmerkung: Die RABT 2006 sieht für alle Tunnel eine Lichtzeichenanlage als Mindestausstattung vor (RABT, 2006, S. 28 f.). Sperrschranken werden der Grundausstattung zugeordnet (a. a. O., 2006, S. 29).

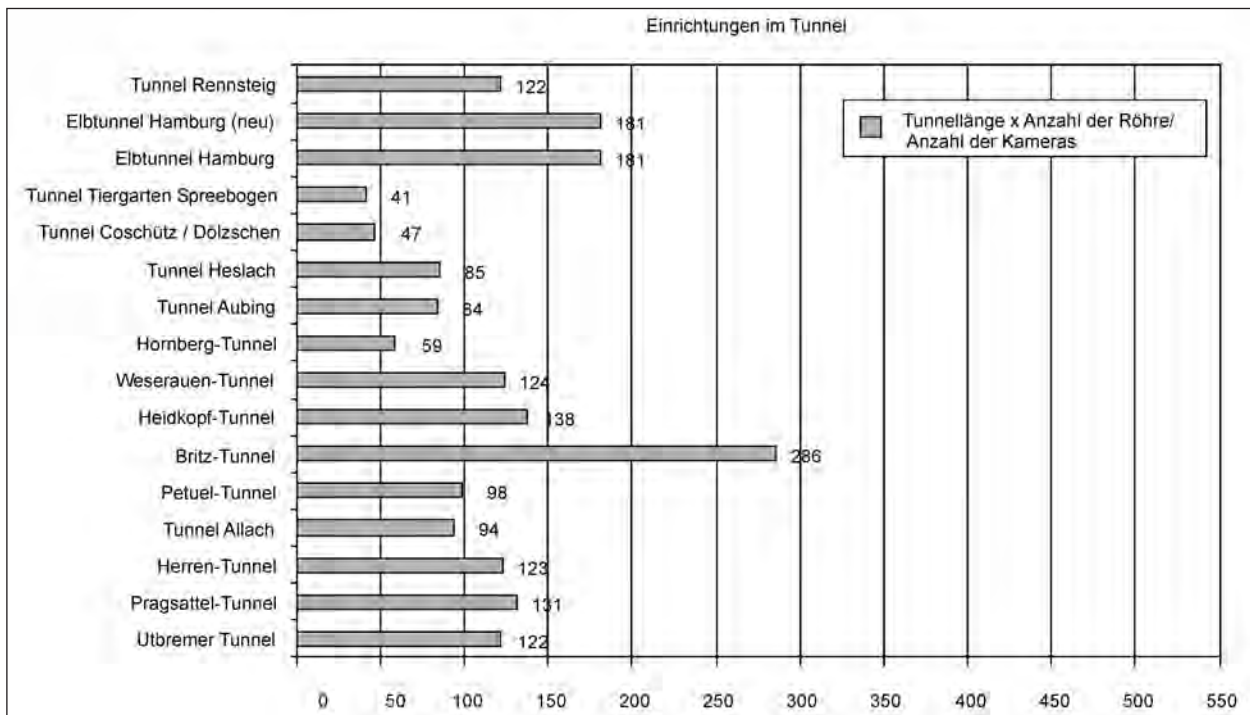


Bild 5.4: Anzahl der Kameras im Tunnel, bezogen auf Tunnellänge x Anzahl der Röhren

Lautsprecher:

Vier Tunnel verfügen nicht über Lautsprecher (Utbremer, 122 m; Pellingner Berg, 596 m; Staufer, 1.038 m; Britz, 1.713 m lang).

Die anderen Betreiber geben Lautsprecher an, wobei die Angaben oft sehr schwer zu vergleichen sind. Um eine Richtgröße über die Ausstattungsdichte zu gewinnen, wurde die Tunnellänge zur Anzahl der Lautsprecher in Beziehung gesetzt (gefragt waren Lautsprecher pro Fahrtrichtung). Bild 5.5 zeigt die Relation. Gemäß RABT 2006 sind videoüberwachte Tunnel mit Lautsprechern auszurüsten, mit denen verständliche Durchsagen von der Tunnelwarte aus getätigt werden können.

Von den 14 Tunneln, die über Lautsprecher verfügen, gibt es bei 6 Textvorlagen für einen Sprecher (43 %). Zusätzlich existieren in diesen Anlagen auch fertige Sprachkonserven für Durchsagen (Ausnahme: Pragsattel).

Die 57 Prozent, die keine Textvorlage für einen Sprecher haben, verfügen alle über Sprachkonserven.

Die Sprachkonserven sind

- in 5 Fällen in deutscher Sprache,
- in 6 Fällen deutsch und englisch,
- in 2 Fällen deutsch, englisch und französisch,

- in einem Falle deutsch, englisch, französisch und tschechisch.

Auf die Frage, inwieweit die Durchsagen für die Autofahrer verständlich seien (schwierige Akustik im Tunnel), antworteten

- 3: ja, bei der Abnahme, bei der Wartung sei dies kontrolliert worden.
- 5: ja, Durchsage ist verständlich,
- 1: ist nicht überall verständlich,
- 2: ist schwer verständlich,
- 1: ist nicht verständlich bei fließendem Verkehr, bei Stau könnte sie evtl. verständlich sein,
- 1: Verhalten der Person wird über Kamera beobachtet, so ist zu erkennen, ob Durchsage verständlich war.
- 1: keine Kontrolle.

Zusammenfassung:

Insgesamt zeigt sich, dass der Ausbildungsstand der Tunnel nicht schlecht ist, wobei der Streubereich groß ist: In der Erhebung sind somit von neuen bis zu relativ alten Tunnel alle Facetten vertreten, wobei auch ältere Tunnel sehr gut ausgerüstet sein können. Das Alter eines Tunnels sagt somit wenig über seinen Sicherheitszustand aus.

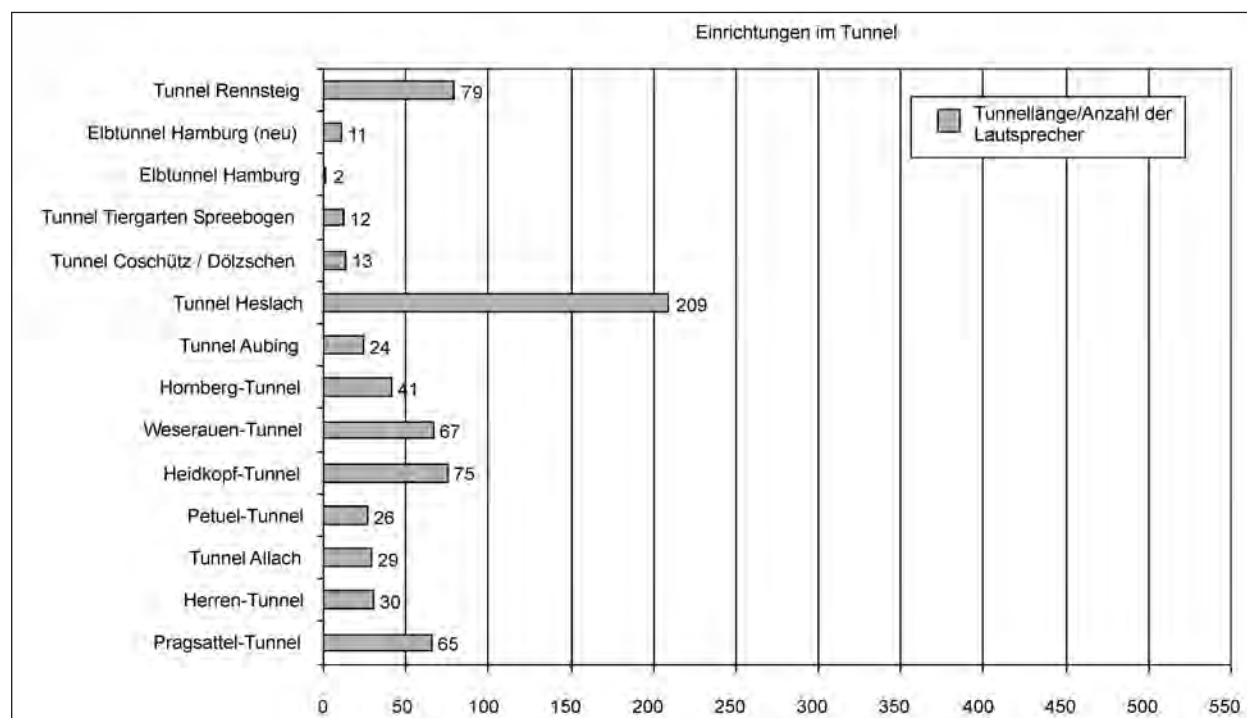


Bild 5.5: Anzahl der Lautsprecher im Tunnel, bezogen auf Tunnellänge pro Fahrtrichtung

6.1 Vorgehensweise bei der Messung

Zur Messung des Ist-Zustandes wurden in 10 unterschiedlichen Tunnel die Geräuschkulissen digital und unkomprimiert aufgezeichnet (32 Messungen) und als WAVE-Dateien gespeichert. Die Aufnahmen erfolgten durch einen digitalen 2-Kanal-Recorder, wobei ein Mikrofon mit speziellem Windschutz Verwendung fand.

Außerdem wurden mit Hilfe eines Schalldruckpegelmessers von Brüel & Kjaer der jeweils maximale dB A-Wert und der Mittelungspegel gemessen.

Die Aufnahme erfolgte aus dem stehenden Pkw, von der Standspur bzw. der Nothaltebucht, bei Stau

auch von der normalen Fahrspur aus. Wie MEHRA (2002) betont, spielt die Messposition eine wichtige Rolle, weshalb die Messungen in der Mitte des Tunnels vorgenommen wurden.

Die Verkehrsdichte (VD) wurde auf einer 5-stufigen Skala eingeschätzt, wobei

- „1“ eine sehr niedrige,
- „2“ eine niedrige,
- „3“ eine mittlere,
- „4“ eine hohe Verkehrsdichte und
- „5“ Stau bedeutet.

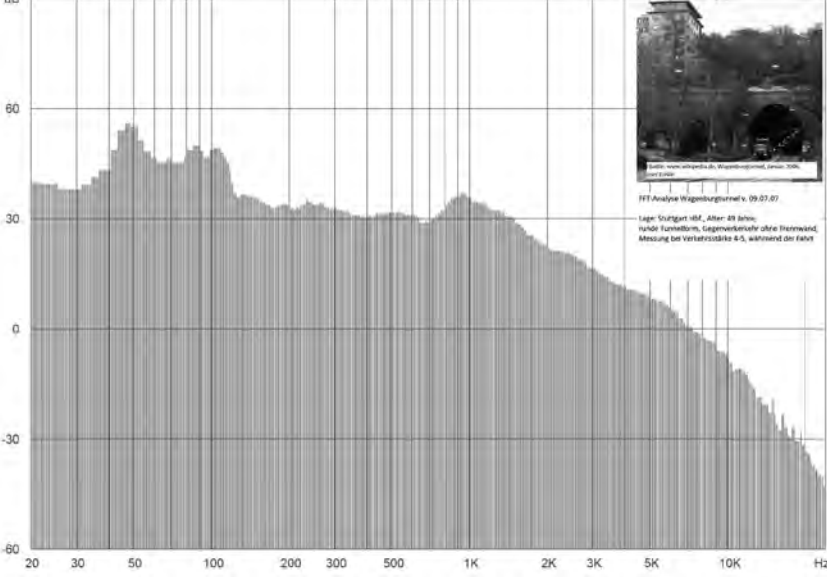
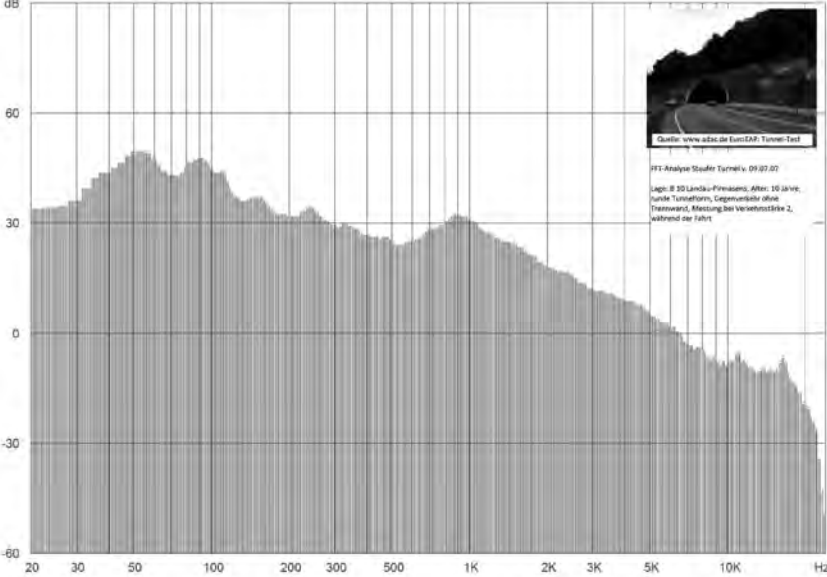
Tunnel, Beschreibung	FFT-Diagramm, Abbildung
<p>Wagenburg-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 Röhre - Gegenverkehr - runde Form - 824 m lang - 1958 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hohe VD – Stau (4-5) - L_p Mittel: 85,1 dB A - L_p Maximal: 90,2 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - \max_{absolut}: ca. 50 Hz - \max_{lokal}: ca. 75 Hz - \min_{lokal}: ca. 550 Hz - \max_{lokal}: ca. 950 Hz. 	 <p>Quelle: www.wagenburg.de, Eisenbahnmuseum, 09/07/07</p> <p>FFT-Analyse Wagenburgtunnel v. 09/07/07</p> <p>Lage: Stuttgart -Stf., Alter: 49 Jahre, runde Tunnelform, Gegenverkehr ohne Fremdwind, Messung bei Verkehrsdichte 4-5, während der Fahrt</p>
<p>Staufer-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 Röhre - Gegenverkehr - runde Form - 1.038 m lang - 1991 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - niedrige VD (2 + Lkw) - L_p Mittel: 90,3 dB A - L_p Maximal: 96,2 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - \max_{absolut}: ca. 55 Hz - \max_{lokal}: ca. 70 Hz - \min_{lokal}: ca. 550 Hz - \max_{lokal}: ca. 900 Hz. 	 <p>Quelle: www.a2ta.de EuroSAT Tunnel-Test</p> <p>FFT-Analyse Staufer Tunnel v. 09/07/07</p> <p>Lage: B 50 Lindau - Pirmasens, Alter: 10 Jahre, runde Tunnelform, Gegenverkehr ohne Fremdwind, Messung bei Verkehrsdichte 2, während der Fahrt</p>

Bild 6.1: Messwerte für 10 ausgewählte Tunnel

6.2 Datenanalyse

Die Daten werden per Fast Fourier Transformation (FFT) analysiert. Das Verfahren erlaubt, Signale, die über die Zeit gemessen wurden (Schalldruckpegel), in Frequenzanteile und Amplituden zu überführen. Damit erhält man direkte Informationen über die Lautstärke in den einzelnen Frequenzbändern.

Die aufgenommenen WAVE-Dateien wurden mit dem Programm „Spectrum Analyzer pro 4.5“ von PAS-Products analysiert. Die folgenden Darstellungen verwenden die logarithmische Form, da bei ihr der niederfrequente Bereich (bis 1 kHz) deutlicher dargestellt werden kann.

Bild 6.1 fasst die Daten, die Ergebnisse der Schalldruckpegelmessung und die FFT-Analysen der 10 untersuchten Tunnel zusammen, wobei von den Messungen jeweils die mit der höchsten Verkehrsdichte verwendet wurde. Zunächst sind die Tunnel mit runder Form dargestellt, sortiert nach dem maximalen dBA-Wert. Es folgen die Tunnel in eckiger Form. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass weder die Verkehrsdichte, die während der Messung zwischen mittel und hoch lag, noch die Form des Tunnels beim dBA-Wert eine entscheidende Rolle spielten. Der niedrigste Mittelwert des Schalldruckpegels (L_p ; L = level, p = pressure) lag bei 85,1 dB A (Wagenburgtunnel, runde Form, VD 4-5), der

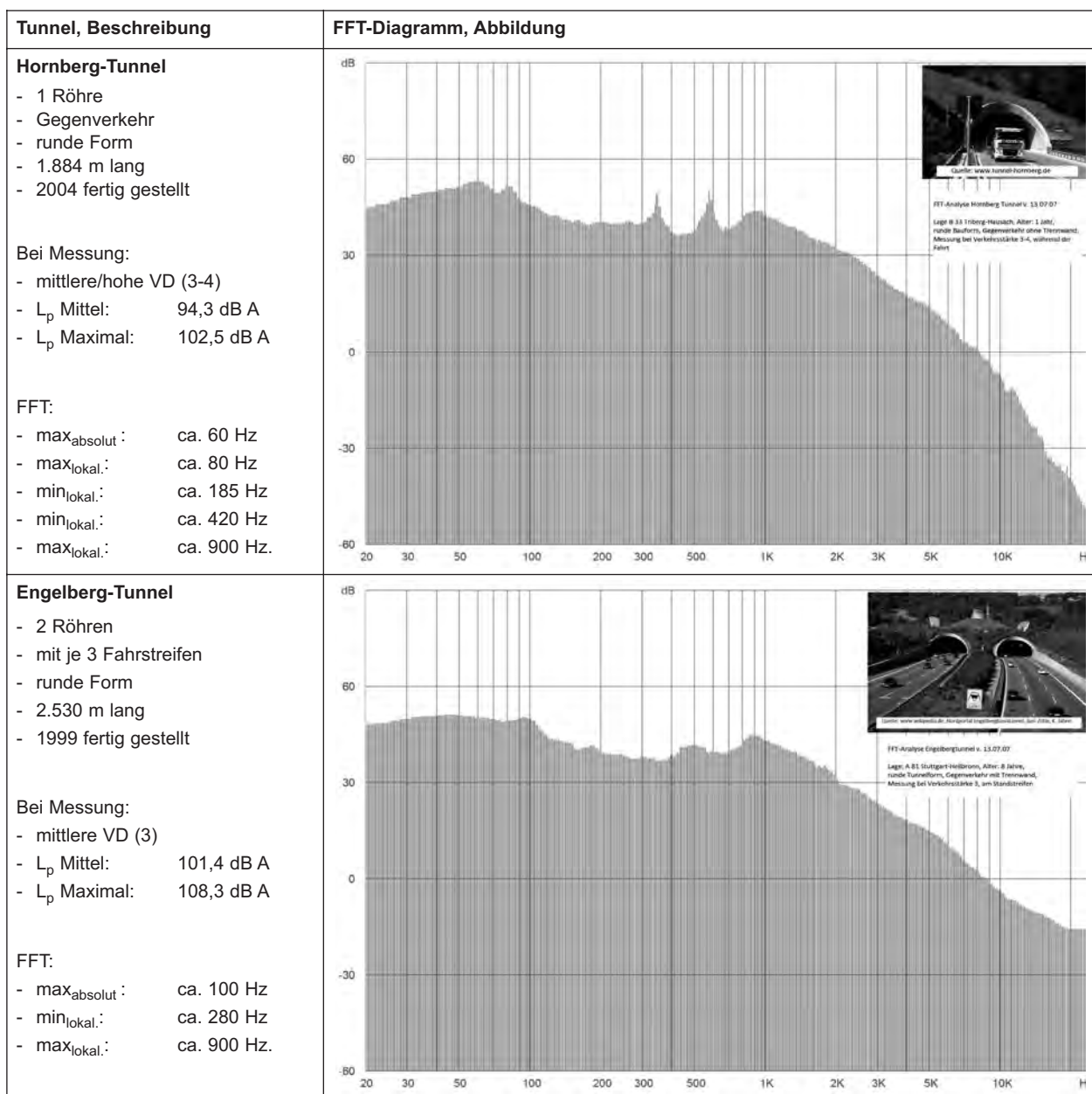


Bild 6.1: Fortsetzung

höchste bei 101,4 dB A (Engelberg-Tunnel, runde Form, VD 3).

Bei den FFT-Diagrammen ist die Ordinate eher als qualitative, denn als quantitative Größe zu bezeichnen, da das aufgezeichnete Signal von der Kalibrierung während der Messung abhängt. Hier musste ein Mittelweg zwischen Übersteuerung und zu geringem Eingangssignal gefunden werden. Auf die Frequenzanalyse hat dies jedoch keinen großen qualitativen Einfluss, da die Frequenzanteile selbst eine wichtige Rolle spielen, nicht aber ihre quantitativen Ausmaße.

Vergleicht man die Bilder der FFT, so ist ein charakteristischer Verlauf zu entdecken. Jede Messung weist ein absolutes Maximum auf, das je nach Beschaffenheit des Tunnels zwischen 50 und 100 Hz liegt, der Median beträgt 60 Hz (Mittelwert: 66 Hz). Auch lokale Minima sind deutlich zu erkennen, sie liegen um 550 Hz herum (Median). Es schließt sich ein lokales Maximum an, das zwischen 700 und 1.000 Hz liegt und einen Median von 900 Hz aufweist (Mittelwert: 910 Hz). Danach fallen die Werte deutlich ab.

In Bild 6.2 sind die absoluten Maxima, die lokalen Minima und das lokale Maximum der besprochenen Messungen dargestellt (Sortierkriterium: lokale Mi-

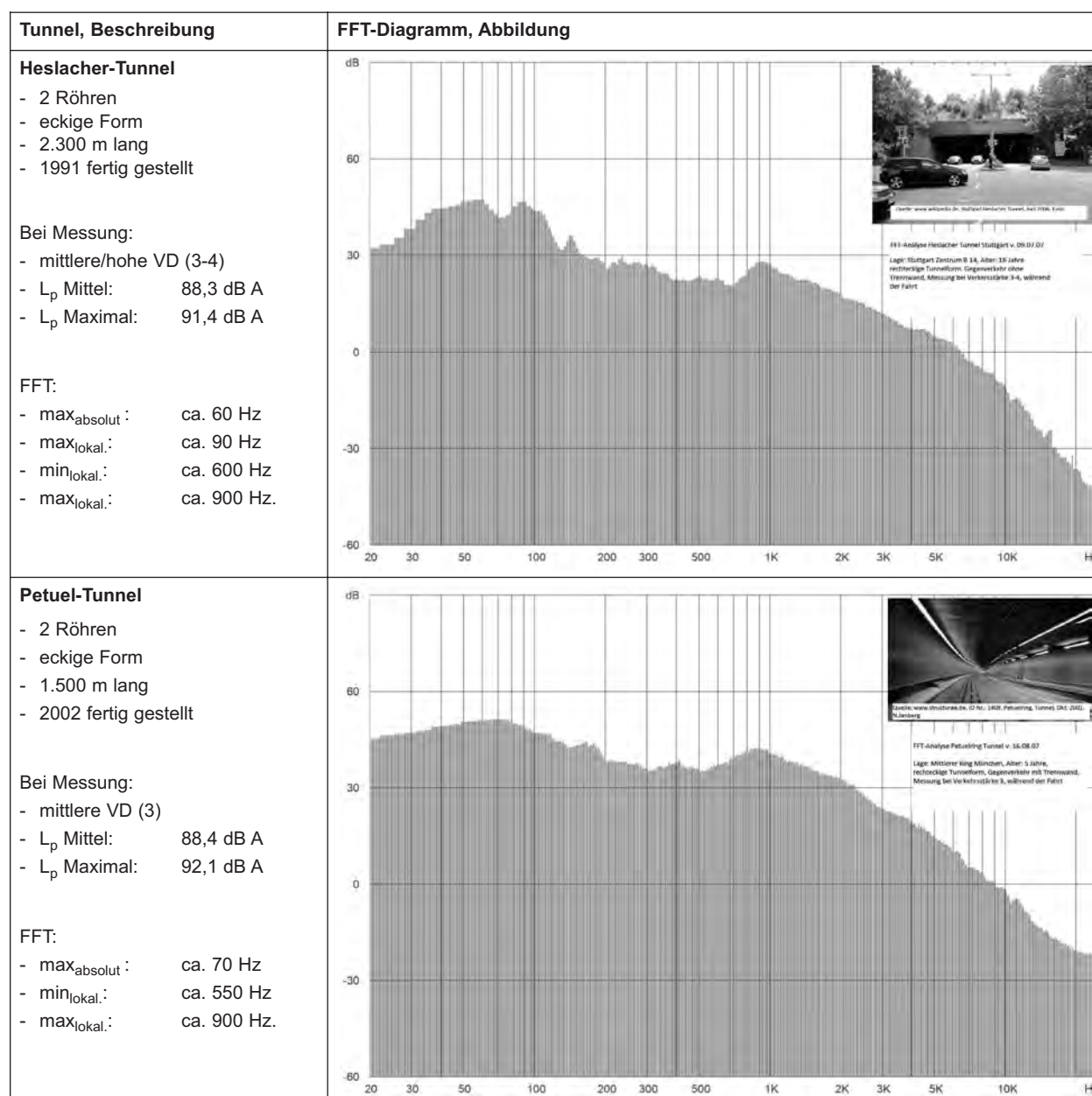


Bild 6.1: Fortsetzung

Tunnel, Beschreibung	FFT-Diagramm, Abbildung
<p>Bad Godesberg-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 Röhren - mit je 2 Fahrstreifen - eckige Form - 2.000 m lang - 1999 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mittlere VD (3) - L_p Mittel: 88,2 dB A - L_p Maximal: 94,3 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - \max_{absolut}: ca. 60 Hz - \min_{lokal}: ca. 550 Hz - \max_{lokal}: ca. 1.000 Hz. 	<p>FFT-Analyse Bad Godesberg-Tunnel v. 07.07.07</p> <p>Lage: 89 Bonn-Bad Godesberg, Alter: 8 Jahre, Gegenverkehr mit Trennwand, lockere Bauform, Messung bei Verkehrslärme 3, während der Fahrt</p>
<p>Weserauen-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 Röhren - mit je 2 Fahrstreifen - eckige Form - 1.730 m lang - 2002 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mittlere VD (3) - L_p Mittel: 92,1 dB A - L_p Maximal: 98,4 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - \max_{absolut}: ca. 90 Hz - \min_{lokal}: ca. 400 Hz - \max_{lokal}: ca. 950 Hz. 	<p>FFT-Analyse Weserauentunnel v. 14.07.07</p> <p>Lage: 8 65a Porta Westfalica-Minden, Alter: 8 Jahre, lockere Bauform, Gegenverkehr mit Trennwand, Messung bei Verkehrslärme 3, während der Fahrt</p>

Bild 6.1: Fortsetzung

nima), in Bild 6.3 ist eine FFT-Form skizziert, die den markanten Frequenzverlauf, über alle Messungen betrachtet, zeigt. Insbesondere die auftretenden lokalen Minima sind von Interesse. Es besteht die Hoffnung, akustische Warnsignale zu finden, die trotz des Verkehrslärms wahrgenommen werden können. Die Wahrscheinlichkeit, mit Hilfe eines Signals durch den Lärm zu dringen, dürfte im Bereich lokaler Minima höher sein, da hier das Warnsignal nicht völlig vom Verkehrsgeräusch überdeckt wird.

Tunnel, Beschreibung	FFT-Diagramm, Abbildung
<p>Aubinger-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 Röhren - eckige Form - 1.935 m lang - 2006 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mittlere/hohe VD (3-4) - L_p Mittel: 94,3 dB A - L_p Maximal: 101,3 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $max_{absolut}$: ca. 50 Hz - max_{lokal}: ca. 90 Hz - min_{lokal}: ca. 700 Hz - max_{lokal}: ca. 1.000 Hz. 	
<p>Allacher-Tunnel</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 Röhren - mit je 3 Fahrstreifen - eckige Form - 1.030 m lang - 1998 fertig gestellt <p>Bei Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mittlere VD (3) - L_p Mittel: 95,6 dB A - L_p Maximal: 103,4 dB A <p>FFT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $max_{absolut}$: ca. 65 Hz - min_{lokal}: ca. 440 Hz - max_{lokal}: ca. 700 Hz. 	

Bild 6.1: Fortsetzung

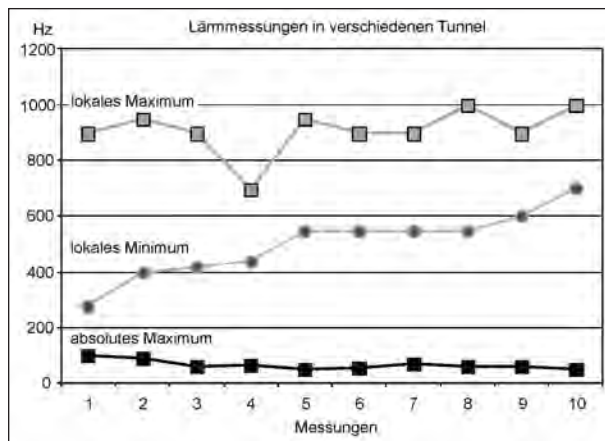


Bild 6.2: Maxima und Minima der vorher dargestellten FFT-Analysen

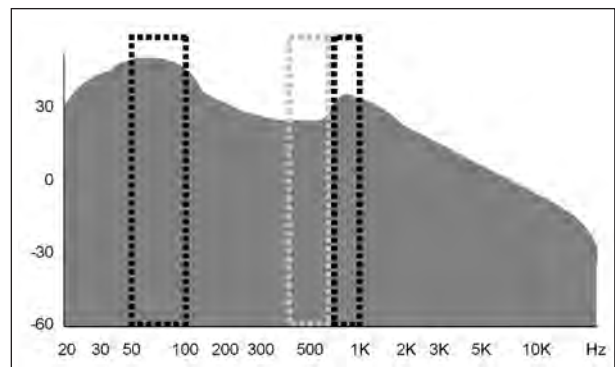


Bild 6.3: Skizze einer typischen FFT, über alle Tunnel, mit lokalen Maxima und Minima

7 Wahrnehmung von optischen Signalen

Das Ziel, im Ereignisfall den Tunnel schnellstmöglich zu verlassen, ohne eine Panik auszulösen, kann theoretisch mit Hilfe optischer, haptischer und/oder akustischer Signale erreicht werden.

In diesem Kapitel ist zu klären, unter welchen Umständen optische Signale sinnvoll und einsetzbar sind. Zu beachten ist dabei, dass die Beleuchtung der Tunnel sehr unterschiedlich ist. Entsprechend den Richtlinien (RABT, 2006) hängt das Beleuchtungsniveau langer Tunnel von folgenden Parametern ab: Verkehrsstärke, Verkehrsart und Verkehrszusammensetzung, dem Vorhandensein von Ein- und Ausfahrten innerhalb des Tunnels, dem Verhältnis von Wandleuchtdichte zu Fahrbahnleuchtdichte, der visuellen Führung und dem Fahrkomfort. Jedem dieser 5 Parameter wird ein Gewicht zugeordnet, die Gewichte werden summiert und bilden wiederum eine Beleuchtungskategorie. Weiterhin wird zwischen Einsichtstrecke und Innenstrecke unterschieden, zwischen beiden Abschnitten, auf der Übergangsstrecke, wird das Leuchtdichtenniveau von der Einsicht- auf die Innenstrecke herabgesenkt (RABT, 2006, S. 16 ff.).

Wie müssen die Signale beschaffen sein, damit sie optimal an den Benutzer übermittelt werden können? Betrachten wir zunächst einige grundlegende Funktionsweisen der visuellen Wahrnehmung des Menschen sowie einige lichttechnische Begriffe, um die Randbedingungen für die signalübermittelnde Funktion besser einordnen zu können.

7.1 Grundbegriffe der menschlichen Wahrnehmung und der Lichttechnik

7.1.1 Rezeptortypen des menschlichen Auges

Tagesehen (photopisches Sehen) erfolgt mit den Zapfen, die vor allem im Bereich des zentralen Sehfelds, der sog. Fovea, gehäuft auftreten. Die Gesamtzahl der Zapfen im menschlichen Auge beträgt ca. 5 Millionen.

Nachtsehen (skotopisches Sehen) erfolgt mit Hilfe der Stäbchen. Sie sind zudem für die Wahrnehmung von Bewegung verantwortlich und in der Peripherie des Auges vermehrt vertreten (Gesamtzahl 120 Millionen).

Beim Dämmerungssehen (mesopisches Sehen) sind sowohl Zapfen als auch Stäbchen aktiv.

Als durchschnittliche Adaptationsleuchtdichte ergeben sich Werte beim

- skotopischen Sehen (Nacht):
< 0,01 cd/m²,
- mesopischen Sehen (Übergangsbereich):
0,01 bis 1 cd/m²,
- photopischen Sehen (Tag):
> 1 cd/m².

Bei beleuchteten Tunnel befindet sich der Fahrer im Bereich des photopischen Sehens – allerdings mit deutlich reduzierter Helligkeit, mit der Notwendigkeit der Dunkeladaptation. Durch die Rauchentwicklung bei Bränden sinkt die Beleuchtung sehr schnell ab, sodass dann nur noch skotopisches Sehen möglich ist.

7.1.2 Die Adaptation

Unter Adaptation versteht man die Anpassung des Auges an Helligkeit oder Dunkelheit, genauer gesagt, an geänderte Leuchtdichteverhältnisse. In Bild 7.1 ist der Verlauf der Dunkeladaptation für Zapfen und Stäbchen dargestellt: Ist das Auge zunächst an Helligkeit gewöhnt, und misst man dann die Unter-

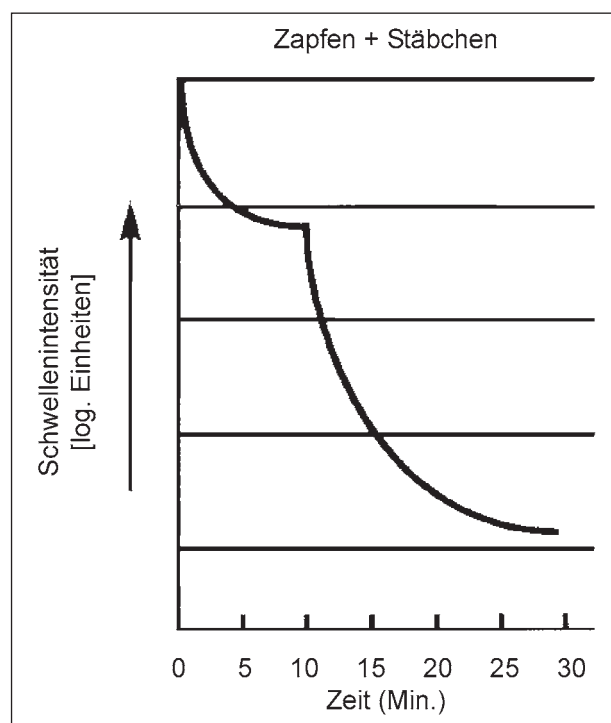


Bild 7.1: Zeitverlauf der Dunkeladaptation für Zapfen und Stäbchen (aus: LACHENMAYR, 1995, S. 9)

schiedsschwelle, d. h. die Leuchtdichtedifferenz zwischen einem Reiz und seinem Umfeld, die nötig ist, damit der Reiz eben wahrgenommen werden kann, so zeigt die Kurve einen Knick nach ca. 8-10 Minuten (Adaptation der Zapfen), um dann nochmals steil abzufallen (Adaptation der Stäbchen).

Die höchste Empfindlichkeit der Stäbchen ist erst nach 40-50 Minuten erreicht.

Die Beleuchtung der Tunnel gewinnt unter diesem Aspekt besondere Bedeutung. Bei normalen Tunnelnfahrten kann das Auge nicht vollkommen dunkel adaptieren. Bei größeren Leuchtdichteunterschieden außerhalb und innerhalb des Tunnels kommt es zu reduzierter Sichtbarkeit. Bei plötzlich auftretenden Störungen (Rauchentwicklung innerhalb weniger Minuten) kann das Auffinden von Fluchtwegen deutlich erschwert sein.

7.1.3 Der Kontrast

Leuchtdichtekontrast ist das Verhältnis zwischen der Differenz der Leuchtdichte eines Objekts oder Zeichens in Relation zur Leuchtdichte des Umfelds (CAKIR, HART & STEWART, 1980). Es gibt mehrere Definitionen von Kontrast (K), die diesen Zusammenhang beschreiben. Die häufigsten sind:

$$(K) = (L_o - L_u)/L_u$$

$$(K) = (L_o - L_u)/(L_o + L_u)$$

wobei: L_o = Leuchtdichte des Objekts (cd/m^2),

L_u = Leuchtdichte des Umfelds (cd/m^2).

Ausreichender Kontrast ist ein wichtiger Faktor für gute Wahrnehmung.

Die Kontrastempfindung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, beispielsweise Leuchtdichte, Farbe, Größe und Dauer des Reizes sowie die Leuchtdichte der Umgebung.

Sollen Schrift und Zeichen auf Schildern, etwa zur Kennzeichnung eines Fluchtweges, gut zu erkennen sein, so müssen sie sich klar vom Hintergrund abheben. Beispielsweise bieten schwarze Zeichen, Umrandungen o. Ä. den besten Kontrast bei weißem Hintergrund, weiße Zeichen bei schwarzem Hintergrund, weitere Vergleiche sind in Bild 7.2 dargestellt.

Um gute Lesbarkeit zu garantieren, werden von WOODSON (1981, S. 493), abhängig vom Beleuchtungsniveau, die in Bild 7.2 aufgelisteten Kon-

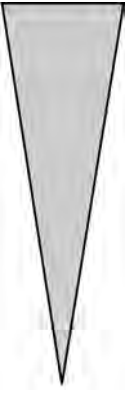


Beleuchtung	visuelle Effizienz	Farbe von Buchstaben/Zeichen	Farbe des Hintergrunds
Durchschnittliches oder höheres Beleuchtungsniveau		Schwarz	Weiß
		Schwarz	Gelb
		Weiß	Schwarz
		Dunkelblau	Weiß
		Weiß	Dunkelrot, Grün, Braun
		Schwarz	Orange
		Dunkelgrün, Rot	Weiß
		Weiß	Dunkelgrau
Niedriges Beleuchtungsniveau		Schwarz	Weiß
		Weiß	Schwarz
		Schwarz	Gelb
		Dunkelblau	Weiß
		Schwarz	Orange
Dunkeladaptation erforderlich		Weiß	Schwarz
		Gelb	Schwarz
		Orange	Schwarz
		Rot	Schwarz
		Blau, Grün	Schwarz

Bild 7.2: Empfohlene Kontraste von Buchstaben bzw. Zeichen und Hintergrund, absteigend geordnet nach visueller Effizienz (nach Daten von: WOODSON, 1981, S. 493)

traste empfohlen, wobei die visuelle Effizienz in der Liste von oben nach unten geringer wird. Leider wird in WOODSONs Daten grüner Hintergrund bei niedrigem Beleuchtungsniveau oder gar dunkel adaptiertem Auge nicht erwähnt.

7.1.4 Die Farbwahrnehmung

Der Eindruck, der sich einstellt, wenn wir von „Farbe“ sprechen, wird von drei farbmtrischen Parametern hervorgerufen, die in der Wahrnehmung zu einem Gesamteindruck kombiniert werden:

- dem Farbton,
- der Farbsättigung,
- der Farbhelligkeit.

Die Wahrnehmung von Farbe hängt davon ab, ob das Auge an Helligkeit oder Dunkelheit adaptiert ist, wie Bild 7.3 zeigt.

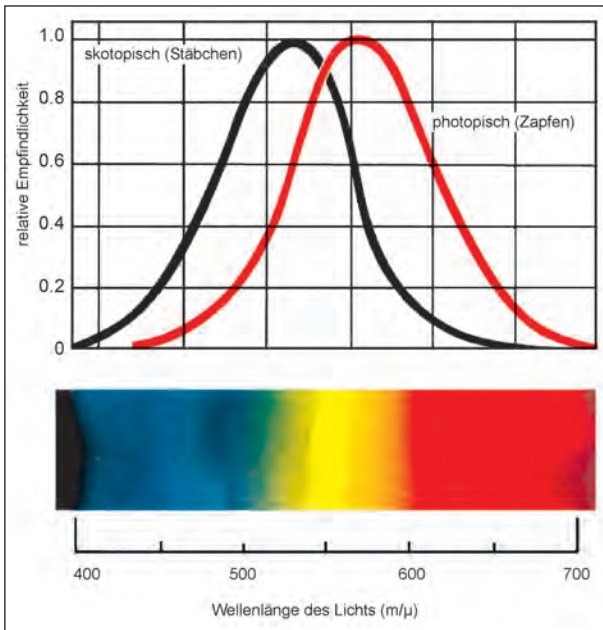


Bild 7.3: Spektrale Empfindlichkeit des Auges bei Dunkeladaptation (schwarze Kurve) und Helladaptation (rote Kurve) (aus: GREGORY, 1972, S. 83)

Die maximale Empfindlichkeit des helladaptierten Auges (rote Linie) liegt bei 555 Nanometer, dies entspricht einem Gelb, das einen Stich ins Grüne aufweist. Augen, die an Dunkelheit gewöhnt sind, haben ihre beste Wahrnehmungsfähigkeit bei etwa 518 Nanometer, was einem Grün mit Stich ins Gelbe entspricht. Beim Schnittpunkt der beiden Kurven liegt das Optimum für beide Adaptationszustände, 534 Nanometer entsprechen einem gelblichen Grün.

FRIELING (1981) beschreibt das Gelbgrün (bei 555 Nanometern) als hellste Stelle des mit gleicher Intensität aller Teile strahlenden Spektrums für das Tagessehen. Für das Nachtsehen gilt seiner Aussage nach ein bläuliches Grün (506 bis 510 Nanometer) als hellste Farbempfindung. „In der Dämmerung – wenn alle Farben, auch das intensivste Rot, schon zu reinen Grauwerten herabsinken – halten sich die blaugrünen Töne noch am längsten als Farbeindruck und vor allem als die hellsten im Farbkreis“ (FRIELING, 1981, S. 92).

In der Fluchtwegkennzeichnung wird als Grundfarbe ein sattes Grün verwendet. Aus Bild 7.3 können wir schließen, dass diese Farbe bei dunkeladaptiertem Auge gut zu sehen ist.

7.1.5 Zuordnung von Farbe und Bedeutung

Im motorisierten Straßenverkehr hat sich eine Reihe von Zuordnungen ergeben. So bedeutet

(Sicherheits-) Farbe	Bedeutung	Hinweise – Angaben
Rot	Verbotszeichen	Gefährliches Verhalten
	Gefahr – Alarm	Halt, Stillstand, Not-Ausschalt-Einrichtungen, Evakuierung (Notbremsen, Alarmmelder)
	Material u. Ausrüstung zur Brandbekämpfung, z. B. Feuerlöscher	Kennzeichnung und Standort
Gelb und Orange	Warnzeichen	Achtung, Vorsicht, Überprüfung. Im Straßenverkehr auch für Vorrangstraßen und Umleitung. Orange und Gelb für „gefährliche Stoffe“, z. B. Gefahrgüter, gefährliche Maschinenteile oder explosiver Inhalt
Blau	Gebots- und Richtzeichen	Besonderes Verhalten oder Tätigkeit. Verpflichtung zum Tragen einer persönlichen Schutzausrüstung
Grün	Erste-Hilfe- und Rettungszeichen	Türen, Ausgänge, Wege, Betriebsmittel, Stationen, Räume
	Gefahrlosigkeit	Rückkehr zum Normalzustand

Bild 7.4: Farbliche Symbolik bei Hinweis- und Verkehrsschildern (aus: STADLER, 2007)

etwa Rot bei Ampeln, Schildern und Anzeigen im Fahrzeug „Halt“, „Stopp“, „Gefahr“, während Grün so viel wie „alles in Ordnung“, „weiterfahren“ signalisiert. Hinweise sind blau markiert, ebenso wie die Autobahnbeschilderung in Deutschland und im Fahrzeuginnenraum das Fernlicht. Zusatzzeichen halten sich im neutralen Weiß, Gelb ist der Wegweisung im Sekundärnetz vorbehalten.

In Bild 7.4 ist die inzwischen übliche Farbcodierung dargestellt.

Weiß ist ohne spezifische Bedeutung, es wird verwendet, wenn die anderen Farben nicht zweifelsfrei zugeordnet werden können (CHARWAT, 1992).

7.1.6 Lichttechnische Begriffe

Lichtstrom:

Lichtstrom Φ bezeichnet die von einer Lichtquelle in den gesamten Raum abgegebene Strahlungsleistung, also unabhängig vom Winkel der Betrachtung. Die Maßeinheit ist Lumen (lm).

Leuchtdichte:

Für den Helligkeitseindruck entscheidend ist die Leuchtdichte (L). Ausgehend vom Lichtstrom (Φ) wird die in einem bestimmten Raumwinkel auftretende Lichtmenge bestimmt. Die Einheit ist Cande-

la/m^2 (cd/m^2). Andere, gleichwertige Einheiten sind Stilb (sb) und nits.

Die mittlere Leuchtdichte in der natürlichen Umwelt liegt zwischen $10^{-6} cd/m^2$ (bewölkter Nachthimmel) und $10^7 cd/m^2$ (Sonnenschein mit hell reflektierenden Flächen).

Lichtschwächung durch Rauch:

Rauch führt zu einer deutlichen Verringerung der Sichtbarkeit von Objekten. Als Maß für die Stärke der Sichtbeeinträchtigung durch Rauch dient der Lichtschwächungskoeffizient k .

Die Definition des Lichtschwächungskoeffizienten k lautet:

$k =$ natürlicher Logarithmus der Zahl 10 proportional zur optischen Dichte OD.

$$k = \ln(10) \times OD$$

Optische Dichte (OD):

Die Optische Dichte (OD) entspricht dem Logarithmus des Lichttransmissionsgrades einer 1 Meter dicken Rauchsicht.

Mit zunehmender Rauchdichte steigt der Wert von k :

- $k = 1 m^{-1}$ entspricht mittlerer Rauchdichte,

- $k = 4 m^{-1}$ bedeutet starke Verringerung der Sichtbarkeit bei hoher Rauchdichte.

Je nach Art des Rauchs kommt der Absorption bzw. der Streuung des Lichts eine höhere Bedeutung zu, wie EBERBACH, KABOTH, SCHROLL, SMITS & JÄGER (2007) darstellen:

Die Absorptionskomponente wird k_a , die Streukomponente mit k_s bezeichnet.

Bei weißem Rauch ist der Absorptionsanteil gering, der Streuanteil hoch, d. h.

$$k_a/k = 20 \% \text{ und } k_s/k = 80 \%$$

Bei schwarzem Rauch sind die Verhältnisse umgekehrt mit einem hohen Absorptions- und einem geringen Streuanteil ($k_a/k = 80 \%$ und $k_s/k = 20 \%$). Bei grauem Rauch sind Streu- und Absorptionsanteil ausgeglichen ($k_a/k = 50 \%$ und $k_s/k = 50 \%$), (vgl. EBERBACH et al., 2007, S. 30).

7.1.7 Lampen und ihre Wirkung im Tunnel

Da bei der Einfahrt in Tunnel die Adaptation des Auges an Dunkelheit sehr lange dauert, werden Tunnel beleuchtet. Bei der Tunnelbeleuchtung und der optischen Kennzeichnung von Fluchtwegen müssen die Lichtausbeute und die Lebensdauer von Lampen berücksichtigt werden. Bild 7.5 zeigt Beispiele für die Lichtausbeute verschiedener Lampentechnologien.

Leuchtmittel	Leistung	Lumen	Lumen/1Watt
Natriumdampf Lampe (Niederdruck)	55 W	ca. 8.000 Lumen (oranges Licht)	ca. 145
Halogenmetaldampf Lampe (HCl)	70 W	ca. 6.600 Lumen	ca. 94
Quecksilberdampf Lampe (HQL)	125 W	ca. 5.000 Lumen	ca. 40
Leuchtstoffröhre Lumilux ecoplus daylight	36 W (1,20 m lang)	ca. 3.250 Lumen	ca. 90
Kompaktleuchtstoffröhre (Osram Dulux)	36 W	ca. 2.900 Lumen	ca. 81
gewöhnliche Glühlampe	100 W	ca. 1.350 Lumen	ca. 13,5
Edison 20 W High Power Led (EPBW-4E00)	20 W	ca. 1.000 Lumen	ca. 50
12-V-Halogenlampe	50 W	ca. 900 bis 1.200 Lumen	ca. 18-24
gewöhnliche Glühlampe	60 W	ca. 730 Lumen	ca. 12
gewöhnliche Energiesparlampe	11 W	ca. 600 Lumen	ca. 54
Seoul LED (Z-LED P4)	1,12 W, 3,5 W	ca. 100 Lumen; 240 Lumen	ca. 100
Hochleistung LED weiß	5 W	ca. 100 Lumen	ca. 24
Lumileds Luxeon LED	1 W	ca. 45 Lumen	ca. 45
Leuchtdiode 80° Power Led 5 mm 14.000 mcd)	0,34 W	ca. 18 Lumen	ca. 52,3
Leuchtdiode 15° Ultrabright 5 mm 22.000 mcd)	0,11 W	ca. 1,2 lm (Candela x Steradian)	ca. 10,9

Bild 7.5: Helligkeit verschiedener Lichtquellen (aus: [http://de.wikipedia.org/wiki/Lumen_\(Einheit\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Lumen_(Einheit)))

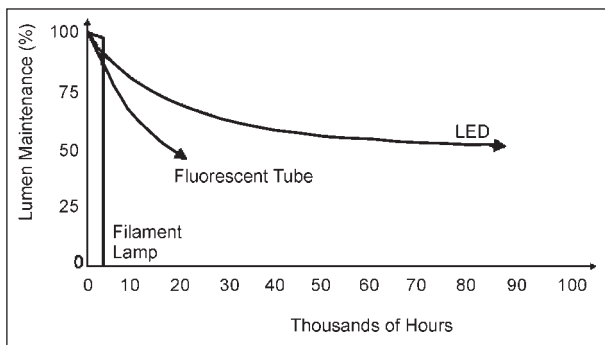


Bild 7.6: Vergleich des Lichtstroms verschiedener Lampenarten über die Zeit (aus: HARWOOD, 2007, Fig. 1)

HARWOOD (2007) empfiehlt zur Beleuchtung der Fluchtwegkennzeichnung LEDs, da nun neben der Farbe grün auch die Farbe weiß mit entsprechender Leistung und vor allem langer Lebensdauer zur Verfügung stünde (vgl. Bild 7.6.).

7.2 Kennzeichnung des Auswegs

Wie können nun die Eigenheiten der menschlichen Wahrnehmung dazu genutzt werden, Personen im Ereignisfall schnellstmöglich den Weg zu Notruf- und Löscheinrichtungen bzw. aus dem Tunnel hinauszuweisen?

Hier sind zunächst die Symbole zur Kennzeichnung zu nennen, das Leitsystem zum Notausgang hin und die Gestaltung des Notausgangs selbst.

7.2.1 Symbole zur Kennzeichnung

Üblicherweise werden zur Kennzeichnung von Fluchtwegen, Notfallsystemen und Notausgängen grafische Symbole, sog. Piktogramme, verwendet. Sie bieten gegenüber Schriften folgende Vorteile:

- Die gewünschte Information wird schneller übermittelt, allerdings nur, wenn das Piktogramm bekannt ist.
- Ein Zeichen benötigt weniger Platz als ein Schriftfeld – bei gleichem Platzangebot kann das Zeichen somit größer dargestellt werden, was seine Wahrnehmbarkeit erhöht.
- Es ist nicht sprachgebunden, kann also von In- und Ausländern gleichermaßen verstanden werden.

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Symbole bekannt sind. So fand bereits HEARD (1974) in einer Untersuchung über 15 Piktogramme, durch-

geführt in vier Ländern, eine Variationsbreite der richtigen Antworten zwischen 26 und 93 Prozent.

Wie sieht es nun mit den einschlägigen Symbolen für den Notfall im Tunnel aus?

Unsere Internetumfrage zeigt einen sehr hohen Bekanntheitsgrad des Feuerlöscher-Symbols (100 %), des Notruftelefons (98 %) und des Notausgangs (96 %).

Bei den Zeichen für Nothaltebucht und der Richtungsanzeige für den Rettungsweg sind sich hingegen nur 2/3 der Befragten sicher.

Hier müsste man entweder den Bekanntheitsgrad der Zeichen durch entsprechende Information erhöhen oder andere Möglichkeiten der Darstellung finden (z. B. Lauflichter anstelle von Pfeilen).

SCHAUERTE (2003) analysiert die neueren Richtlinien für Notausgang-Piktogramme in den Ländern Deutschland, Österreich, Schweiz, Frankreich und Norwegen. Zur Ausführung stellt sie fest, dass die Piktogramme in Deutschland, Österreich und Norwegen zukünftig hinterleuchtet werden sollen, während die Schweiz die RAL-Farbe 6029 und nachleuchtende Ausführung vorschreibt. In der Schweiz sind 4 verschiedene Größen der Piktogramme vorgesehen, von 35 x 50 cm bis zu 90 x 125 cm (siehe Bild 7.7 unten rechts), Norwegen gibt als Minimum 40 x 40 cm vor. Als Position der Piktogramme nennt SCHAUERTE für Deutschland: über der Türe, unter der Blitzleuchte, rechtwinklig zur Fahrbahn; für Österreich: über oder neben der Türe; für die Schweiz: seitlich von jeder Fluchttür und für Norwegen: rechtwinklig zur Fahrbahn (vgl. SCHAUERTE, 2003, S. 33).

Die neue RABT (2006) verfügt über die Kennzeichnung von Notausgängen lediglich hinterleuchtete Rettungszeichen, zwischen Blitzleuchte und Türe. Über Größe und Farbe des Zeichens sind keine konkreten Angaben vorhanden.

Genauere Angaben sind über die Kennzeichnung des Fluchtweges zu finden: Das Flucht- und Pfeilsymbol soll hinterleuchtet sein, 2 bis 3 Zentimeter aus der Tunnelwand herausragen, grün strahlen, 30 x 30 cm messen und mit seiner Unterkante in einer Höhe von 1-1,2 Meter über dem Notgehweg montiert sein.

7.2.2 Gestaltung von Notausgängen

SCHAUERTE (2003) recherchiert für den Abstand von Notausgängen große Unterschiede in europäi-



Bild 7.7: Oben: Fluchtwegkennzeichnung (reflektierend, nachleuchtend, alle 50 m) und Gestaltung eines Notausgangs im Montblanc-Tunnel; unten links: Notausgang (Querschlag) im Gamsentunnel, Schweiz (aus: STEINAUER et al., 2007, S. 55 f.). Unten rechts: Fluchtwegkennzeichnung und Notausgang in der Schweizer Galleria Mappo-Morettina (aus: http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_...)

schen Ländern: In Österreich und Norwegen soll er kleiner als 250 Meter sein, in Deutschland und der Schweiz kleiner als 300 Meter und für Frankreich werden zwei Werte genannt: < 200 m in der Stadt, < 400 m auf dem Lande (a. a. O., 2003, S. 33).

Für die lichte Öffnung des Notausgangs findet sie folgende Werte: Deutschland 1 x 2 Meter, Österreich 1 x 2,2 m, Frankreich 1,4 x 2,2 m (a. a. O., 2003, S. 33).

STEINAUER et al. (2007) zeigen eine Reihe von Gestaltungsbeispielen für Notausgänge, beispielsweise den Montblanc-Tunnel, einen Tunnel mit Gegenverkehr, einer Fahrspur je Richtung, Nothaltebuchten alle 600 m und alle 300 m Notausgänge, siehe Bild 7.7.

STEINAUER et al. (2007) definieren folgende Anforderungen an die Gestaltung eines Notausgangs: Im Normalfall, also bei einer Durchfahrt durch den Tunnel, sollen Notausgänge folgende Kriterien erfüllen:

- „Erkennbarkeit aus spitzem Beobachtungswinkel,
- eindeutige Identifizierbarkeit als Notausgang,
- Abhebung von anderen Sicherheitseinrichtungen,
- Einprägung des Aussehens für ein Auffinden im Ereignisfall,
- einladende Gestaltung,
- keine Ablenkung der Kraftfahrer,
- einheitliche Gestaltung in allen Tunneln,
- ähnliche Gestaltungsmerkmale in Europa (Wiedererkennung),
- Funktionserhalt unter Bedingungen im Tunnel (Druckbelastung, Tunnelluft etc.),
- Wartungsarm“ (a. a. O., 2007, S. 61).

Im Ereignisfall, also in einer Notsituation, bei Brand, wenn der Notausgang aufgesucht werden muss:

- „Erkennbarkeit von jeder Stelle im Tunnel,
- Abhebung von anderen Sicherheitseinrichtungen,
- Wiedererkennung aus der Vorbeifahrt,
- hoher Aufforderungscharakter,
- Auffindbarkeit unter Verrauchung,
- einfacher und eindeutiger Öffnungsmechanismus,
- barrierefreie Bedienbarkeit (Sprache, körperliche Einschränkungen etc.)“ (a. a. O., 2007, S. 61).

In einer Simulationsstudie unter den Bedingungen virtueller Realität (Sitz mit Lenkrad, Gas- und Bremspedal, Head Mounted Display, in das VR eingespielt wird, Kopfhörer, Head-Tracking-System) testeten STEINAUER et al. verschiedene Varianten:

- selbstleuchtende Kontur um die Notausgangstür,
- Beleuchtung der Tür mit punktuellen oder flächigen Elementen,
- selbstleuchtender Handlauf als haptisches Element, ca. 10 Meter lang an der Tunnelwand im Bereich des Notausgangs.

Die Stichprobe besteht aus 19 Personen, die im Tunnel ängstlich sind, 2 Männern und 17 Frauen (mittleres Alter von 50 Jahren), sowie 45 Personen, die nicht Tunnel-ängstlich sind, 20 Männern und 25 Frauen (mittleres Alter 35 Jahre), das Altersspektrum der Stichprobe reicht von 21 bis 61 Jahren.

Die Hypothese, Notausgänge mit umlaufendem, beleuchtetem Rahmen würden während einer Tunneldurchfahrt besser wahrgenommen und erinnert als solche ohne Beleuchtung, kann statistisch nicht für alle Probanden belegt werden, es sei nur ein Trend erkennbar.

Die Vermutung, Personen, die eine hohe Ängstlichkeit im Tunnel zeigen, würden während der Tunnelfahrt Notausgänge schlechter verarbeiten und sich deshalb schlechter an deren Lokalisierung erinnern, konnten die Autoren hingegen überwiegend bestätigen.

Die Probanden, die per Joystick „fliehen“ sollten, suchten in einer Notfallsituation eher bei Notaus-

gängen mit grüner Beleuchtung, als bei Ausgängen mit weißer Beleuchtung Schutz; sehr selten flohen sie zu Notausgängen ohne Beleuchtung ($p < .001$). Bei simuliertem Rauch ist dieser Effekt noch deutlicher ($p < .001$). Die Reaktionszeiten sind jedoch nicht unterschiedlich.

Zwischen Personen mit hoher Tunnelangst und solchen ohne Angst sind keine Unterschiede bei der Wahl des Notausgangs (verschiedene Typen) zu verzeichnen.

Tunnel-ängstliche Personen erleben während der simulierten Tunnelfahrt deutliche Angst – dieser Effekt wird mit $p < .001$ signifikant.

Der grün beleuchtete Notausgang erregte mehr initiale Aufmerksamkeit ($p = .025$). 81 % der Probanden wählten nach dem Versuch die grün beleuchtete Variante als am attraktivsten.

Weiterhin führten STEINAUER et al. (2007) eine Befragung mit 307 Messebesuchern durch, die vorher einen realen Tunnel mit einer der unten dargestellten Gestaltungsvarianten durchfahren hatten (vgl. Bild 7.8).

Der Notausgang in Version (1) wird von 21 % gesehen, die Tür mit grünem Rahmen (2) von 25 % und die Tür mit grüner Umrandung und Leuchtrahmen (3) von 42 %.

Auch andere Sicherheitseinrichtungen profitieren, zumindest teilweise, vom Anstrich bzw. vom Leuchtrahmen:

- Fluchttür sehen bei (1) 8 %, bei (2) 15 %, bei (3) 32 %.
- Fluchtweg-Kennzeichnung sehen bei (1) 10 %, bei (2) 11 %, bei (3) 21 %.
- Notrufnischen/-telefon/SOS sehen bei (1) 6 %, bei (2) 7 %, bei (3) 8 %.

STEINAUER et al. fassen das Ergebnis der Befragung wie folgt zusammen: „In der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass eine Gestaltung der Notausgänge mit einem umlaufenden grünen selbstleuchtenden Rahmen zu einer erheblich verbesserten Erkennung und Erinnerung der Fluchttüren bei den Tunnelnutzern führt. Positiv wirkte sich der Effekt auch auf die anderen Sicherheitseinrichtungen wie Fluchtwegkennzeichnung und Notrufnischen aus, die in einem Ereignisfall von den Personen im Tunnel ohne Zeitverlust genutzt werden müssen. Darüber hinaus war auch

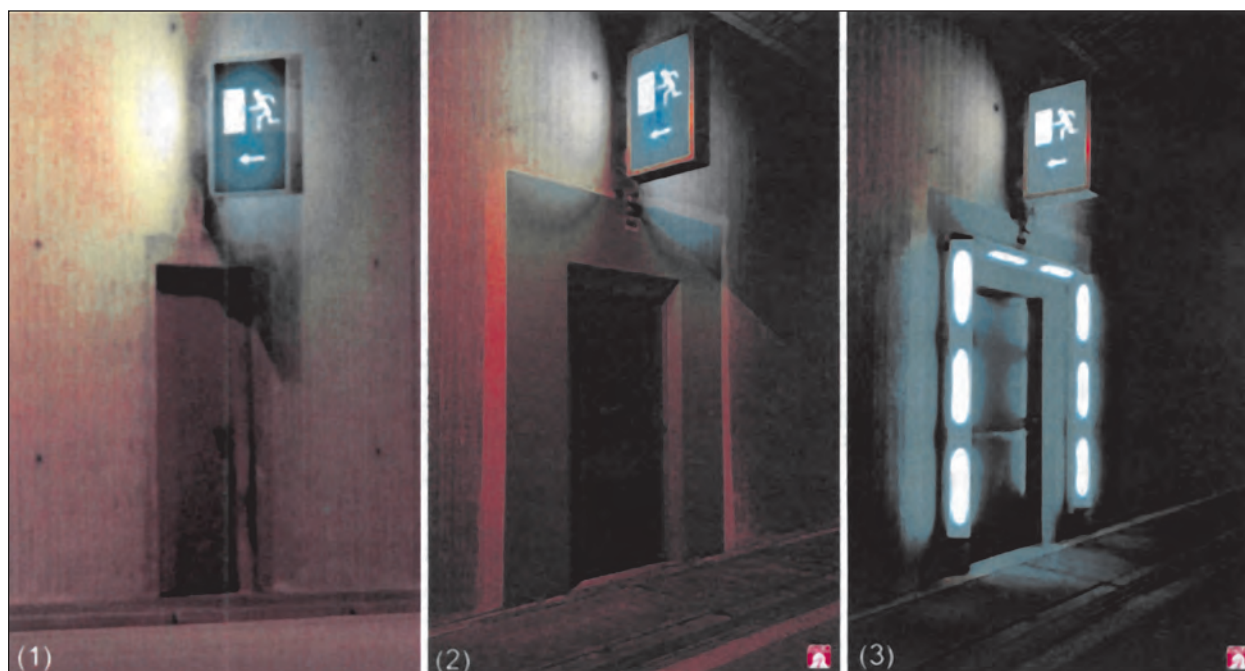


Bild 7.8: Eine dieser Varianten des Notausgangs sahen die Kraftfahrer vor der Befragung: (1) Ausgangszustand, (2) Tür mit Umrandung in RAL 6018, (3) Tür mit Umrandung in RAL 6018 mit zusätzlichem Leuchtrahmen (aus: STEINAUER et al., 2007, S. 105)

das subjektive Sicherheitsempfinden bei der Variante mit selbstleuchtendem Rahmen am höchsten” (a. a. O., 2007, S. 116).

Fazit

STEINAUER fand, allerdings nur in einer Simulations-Studie, die Bevorzugung grün beleuchteter Notausgänge – gegenüber weiß beleuchteten.

Doch selbst diese grün beleuchteten Ausgänge werden in der Realität nur von 42 % der Autofahrer beim „Durchfahren“ wahrgenommen.

7.3 Rauch

7.3.1 Theoretische Überlegungen

Ein extremes Problem für die Evakuierung in Tunnel stellt der Rauch dar.

EBERBACH, KABOTH, SCHROLL, SMITS & JÄGER (2007) formulieren das Ziel: „Die Brand-Notbeleuchtung soll sicherstellen, dass alle durch einen Brand gefährdeten Verkehrsteilnehmer in der kurzen Zeitdauer, die zur Selbstrettung zur Verfügung steht, den Tunnel verlassen können” (a. a. O., 2007, S. 3).

Da nach Aussage der Autoren experimentelle Befunde zur Sicht bei Rauch im Tunnel fehlen, greifen

sie auf theoretische Modelle zum Strahlungstransport und zur Sichtbarkeit in trüben Medien zurück:

„Das Licht wird beim Durchdringen einer Rauchschicht durch Absorption und Streuung an den Rauchpartikeln geschwächt. Während das absorbierte Licht für den weiteren Strahlungstransport verloren ist, nimmt ein Teil des gestreuten Lichts in Form einer Überlagerungskomponente weiterhin am Strahlungstransport teil. Die Lichtschwächung bei Rauch, der optisch als trübes Medium zu betrachten ist, erfolgt nach dem Gesetz von Bouguer-Lambert exponentiell abfallend mit zunehmender Dichte und Dicke der zu durchdringenden Rauchschicht” (a. a. O., 2005, Kurzbericht, S. 3).

„Die Sicht bei Rauch im Tunnel wird anschaulich durch die Sichtweite beschrieben. Sie entspricht der Beobachtungsentfernung, bei der ein jeweils vorgegebenes Sehobjekt gerade im Rauch wahrgenommen werden kann. Das ist dann der Fall, wenn der Kontrast, unter dem das Sehobjekt gegen seinen Hintergrund erscheint, gerade den Wert der erforderlichen Kontrastschwelle annimmt.

Unter rauchfreien Bedingungen wird die Kontrastschwelle maßgebend vom Sehwinkel, unter dem ein Sehobjekt erscheint, und von der Leuchtdichte, auf die das Auge adaptiert ist, bestimmt. Mit zunehmender Rauchdichte werden die Augen so gereizt, dass zur Wahrnehmung von Sehobjekten höhere



Bild 7.9: Brandrauch vermindert die Sichtbarkeit von Sicherheitszeichen (aus: BIESKE, 2003, S. 3)

Kontrastschwellen erforderlich sind“ (a. a. O., 2005, Kurzbericht, S. 3).

EBERBACH et al. (2007) fassen die Erkenntnisse zur Sicht bei Rauch, die sich aus theoretischen Überlegungen ergeben, wie folgt zusammen: „Schon ab mäßigen Rauchdichten wird die mittlere Umfeld-Leuchtdichte, auf die ein Beobachter bei Rauch im Tunnel adaptiert, ausschließlich von der Streu-Leuchtdichte des Rauchs bestimmt. Die Streu-Leuchtdichte von weißem Rauch entspricht etwa der mittleren Tunnelröhren-Leuchtdichte im rauchfreien Zustand. Bei grauem Rauch geht die Streu-Leuchtdichte auf $1/3$ und bei schwarzem Rauch auf $1/10$ der Tunnelröhren-Leuchtdichte im rauchfreien Zustand zurück.“

Sowohl die Detektions-Sichtweite als auch die Identifikations-Sichtweite von Sehobjekten sinken mit zunehmender Rauchdichte exponentiell, jedoch unterschiedlich stark. Die Detektions-Sichtweite von Rettungszeichen- und Orientierungsleuchten ist in weißem Rauch bei sehr geringer Dichte um

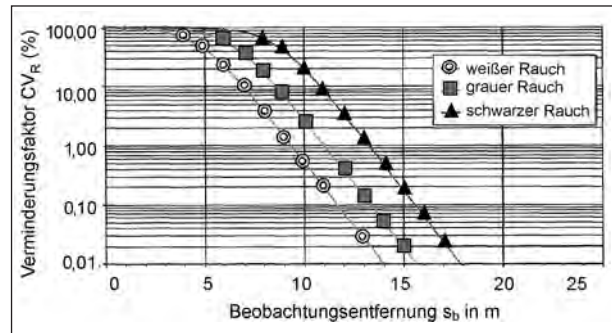


Bild 7.10: Am Beispiel einer Rettungszeichen-Leuchte wird, bei mittlerer Rauchdichte ($k = 1 \text{ m}^{-1}$) die Kontrastminderung CV_R für verschiedene Raucharten als Funktion der Beobachtung-Entfernung s_b dargestellt (nach: EBERBACH et al., 2007, S. 20)

17 %, bei mittlerer Dichte um 25 % und bei sehr starker Dichte um 29 % kürzer als in schwarzem Rauch“ (a. a. O., 2005, S. 40).

Weiter führen die Autoren aus, dass sich die Lichtstärke als maßgebende lichttechnische Kenngröße für die Durchdringung des Rauchs erwiesen habe. Steigere man die Lichtstärke um das 10fache, so könne man einen Sichtweiten-Gewinn von 20 % erreichen. Hier würden bereits die Grenzen der Verbesserung aufgezeigt (a. a. O., S. 40).

Die Autoren berechnen beispielsweise für die Leuchten der Rettungszeichen unter den Empfehlungen der RABT 2003, also einer Leuchtstärke von ca. 9 cd (in Blickrichtung), bei einer diagonalen Blickrichtung die in Bild 7.11 dargestellten Werte.

Ist bei schwarzem Rauch mit sehr geringer Rauchdichte die Rettungszeichen-Leuchte aus der Beispiel-Rechnung noch aus einer Entfernung von 42 Metern zu erkennen, so ist dies bei sehr starkem schwarzem Rauch nur noch in 3,1 Meter Entfernung möglich.

Bei der Identifikation sind die Entfernungen sogar noch geringer: Sie betragen 14 Meter bei sehr schwachem schwarzem Rauch und 2,7 Meter bei sehr starkem schwarzem Rauch.

Prinzipiell gilt: Die Identifikations-Sichtweite liegt unter der Detektions-Sichtweite. Bei schwachem Rauch ist der Unterschied deutlich, bei starkem Rauch nähern sich die Werte an.

Für Orientierungsleuchten, gemäß der Brand-Notleuchte RABT 2003, errechnen EBERBACH et al. die in Bild 7.12 gezeigten Begrenzungen für die frontale bzw. seitliche Blickrichtung.

Rauchart		weiß	grau	schwarz	weiß	grau	schwarz
k_a/k		20 %	50 %	80 %	20 %	50 %	80 %
k_s/k		80 %	50 %	20 %	80 %	50 %	20 %
Rauchdichte	k/m^{-1}	Detektions-Sichtweite			Identifikations-Sichtweite		
		von RZ-Leuchten, ($\varepsilon = 60^\circ$, $I_\varepsilon = 9$ cd)			von RZ-Leuchten, ($\varepsilon = 60^\circ$, $I_\varepsilon = 9$ cd)		
sehr gering	0,25	35 m	38 m	42 m	20 m	19 m	14 m
gering	0,5	18 m	20 m	23 m	12 m	13 m	10 m
mittel	1	9,0 m	10,5 m	12 m	7 m	7,6 m	7,8 m
stark	2	4,6 m	5,3 m	6,2 m	4 m	4,3 m	4,8 m
sehr stark	4	2,2 m	2,7 m	3,1 m	2,1 m	2,4 m	2,7 m

Bild 7.11: Detektions- und Identifikations-Sichtweiten von Rettungszeichen-Leuchten (RZ) wie in RABT 2003 empfohlen, unter diagonalen Blickrichtung bei verschiedenen Rauchdichten (aus: EBERBACH et al., 2007, S. 30)

Rauchart		weiß	schwarz	weiß	schwarz
k_a/k		20 %	80 %	20 %	80 %
k_s/k		80 %	20 %	80 %	20 %
Blickrichtung		Frontal ($\varepsilon = 0^\circ$, $I_\varepsilon = 175$ cd)		Seitlich ($\varepsilon = 87^\circ$, $I_\varepsilon = 88$ cd)	
Rauchdichte	k/m^{-1}	Detektions-Sichtweite von Orientierungsleuchten (halbspärlich)			
sehr gering	0,25	47 m	54 m	42 m	49 m
gering	0,5	25 m	29 m	23 m	27 m
mittel	1	13 m	15 m	12 m	14 m
stark	2	6,3 m	8,0 m	6,1 m	7,6 m
sehr stark	4	3,1 m	4,0 m	3,1 m	4,0 m

Bild 7.12: Detektions-Sichtweite von Orientierungs-Leuchten, wie in RABT 2003 empfohlen, unter frontaler und seitlicher Blickrichtung bei verschiedenen Rauchdichten (aus: EBERBACH et al., 2007, S. 31)

Fazit: „Die Rauchdichte bzw. der Licht-Schwächungskoeffizient k von Rauch bestimmt maßgeblich die Sichtweite von Rettungszeichen- und Orientierungsleuchten. Eine Verdopplung von k bewirkt eine Einbuße von 50 % bei der Detektions-Sichtweite.

Demgegenüber hat die Rauchart bzw. der Absorptions- oder Streuanteil des Licht-Schwächungskoeffizienten k_a/k oder k_s/k einen geringeren Einfluss auf die Sichtweite von Rettungszeichen- oder Orientierungsleuchten. ... Schon bei mäßigen Rauchdichten ($k > 0,4$ m^{-1}) ist nicht mehr sichergestellt, dass eine 25 m entfernte Rettungsleuchte visuell wahrgenommen werden kann.

Um eine Rettungsleuchte noch bei grauem Rauch mittlerer Dichte ($k = 1$ m^{-1}) stets detektieren zu können, müsste ihr Abstand von 25 m auf 10 m verkürzt werden. Zur sicheren Identifikation des Rettungszeichens müsste ihr Abstand hierbei sogar auf 7 m verkürzt werden.

Bei extrem starker Rauchdichte ($k = 4$ m^{-1}) ist eine Detektion von Rettungszeichen-Leuchten in schwarzem Rauch erst bei 3 m und in weißem Rauch sogar erst bei 2 m gegeben“ (a. a. O., 2005, S. 106).

Eine Verdopplung der Leuchtdichte führe sowohl bei Orientierungsleuchten mit variabler Leuchflächen-Größe, als auch bei Rettungszeichen-Leuchten mit vorgegebener Leuchflächen-Größe lediglich zu einem Gewinn von 4 % an Detektions-Sichtweite (vgl. S. 106).

EBERBACH et al. (2007) empfehlen, die von ihnen errechneten Sichtweiten zur Festlegung von Mindestabständen bei der Anordnung der Komponenten der Brand-Notbeleuchtung zu verwenden, um ihre Wahrnehmbarkeit zumindest bei mittlerer Rauchdichte sicher zu stellen.

Für sehr starke Rauchdichte halten sie den Aufwand, der zur Sichtweiten-Verbesserung der

Leuchten mittels Lichtstärke-Steigerung erforderlich wäre, nicht mehr für vertretbar. „Für diesen Fall bieten sich Lichtketten-artige Alternativen zur Fluchtwegleitung an, die bei Lichtpunktabständen unter 50 cm schon mit Lichtstärken von 1,4 cd auskommen“ (a. a. O., 2005, Kurzbericht, S. 5).

Die Autoren geben folgende Hinweise zur Ausführung und Anordnung:

Die Rettungszeichen-Leuchte solle planparallel zur Tunnelwand, an der der Fluchtweg verläuft, ausgerichtet werden, die frontale Leuchtfläche mit dem Rettungszeichen weise damit in Querrichtung zur Tunnelachse. Wird bei Sanierungen eine Wandaufbau-Version verwendet, so sollen die hervorstehenden Seitenteile der Lampe ebenfalls als Leuchtflächen gestaltet werden. Für Wandeinbau-Versionen empfehlen sie, die Lampe zu teilen und zwei Leuchtflächen, die um 30 Grad gegen die Wand geneigt sind, zu verwenden. In jedem Falle sollen Lichtstärkewerte ≥ 9 cd geliefert werden (vgl. EBERBACH et al., 2007, S. 43).

Bei der Orientierungsleuchte sei man in den Gestaltungsmöglichkeiten weitgehend frei, wichtig sei nur, dass eine Lichtstärke von ca. 88 cd erreicht werde.

Für LED-Markierungssysteme, die aus Bodenhöhe vom rechten Fahrbahnrand in einem Erhebungswinkel von $1^\circ \dots 3^\circ$ gegen die Fahrtrichtung abstrahlen, wird für den Brandfall empfohlen: Die LED-Markierungssysteme sollen in einem Winkelbereich bis zu 90° nach beiden Seiten abstrahlen, also in und gegen die Fahrtrichtung des Kfz-Verkehrs. „Um den Flüchtenden den Eindruck zu vermitteln, dass die LED-Markierungssysteme Komponenten des Selbstrettungskonzepts sind, sollte ihre Farbgestaltung in Anlehnung an die normativen Vorgaben zur Rettungszeichen-Leuchte erfolgen. Beispielsweise könnte die LED-Lichtfarbe im für die Flüchtenden relevanten Ausstrahlungsbereich der grünen Sicherheitsfarbe entsprechend gewählt werden“ (a. a. O., 2005, S. 65 f.).

Für extrem dichten Rauch ($k > 2 \text{ m}^{-1}$) ziehen EBERBACH et al. (2007) Lichterketten, „wie sie von der Weihnachtsdekoration her bekannt sind“, in Erwägung. Die Lichterketten sollten in einem grün durchscheinenden Plastikschauch eingebettet sein und in Handhöhe (70-80 cm) über dem Boden an der Tunnelwand neben dem Fluchtweg angebracht werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Lichtelementen sollte zwischen 25-50 cm liegen.

„Die empfohlene Fluchtrichtung könnte durch eine Laufschtaltung signalisiert werden“ (a. a. O., 2007, S. 44).

JENSEN (1998) betont, bei starkem Rauch sei nicht die Leistung oder Leuchtdichte einer Lichtquelle entscheidend, sondern der Sicht-Abstand.

Ein photo-lumineszierender Streifen im Abstand von 0,5 Metern zum Auge sei besser sichtbar als das kraftvollste Leuchtmittel bei 1,5 Metern Entfernung.

JENSEN empfiehlt für öffentliche Gebäude und Industrieanlagen ein einfaches Wegfindungssystem: ein taktiles Hand-Leitsystem oder photo-lumineszierende Markierung oder beides. Entscheidende Faktoren seien kontinuierliche Markierungen in weniger als einem Meter über dem Boden, einfach, unabhängig vom Strom, mit langer Lebenszeit, geringem Wartungsbedarf und niedrigen Kosten.

Punktförmige Lichtquellen, die in Abständen auftreten, wie die konventionelle Notbeleuchtung, seien generell nicht bei Rauchbedingungen geeignet. Ein weltweit üblicher Sichtabstand von 30 Metern für Rettungszeichen könnte nur bei Rauchdichten von $OD 0,1 \text{ m}^{-1}$ hilfreich sein. Ein Abstand von 7 Metern könnte bis zu einer Rauchdichte von $OD 0,8$ bis 1 m^{-1} genügen (nach JENSEN, 1998).

SOUND-ALERT (2007) berichtet über eine Untersuchung des BRE, Building Research Establishment, in Watford, England. Hier habe sich gezeigt, wie sich die Sichtbarkeit verschiedener Typen von Notausgangs-Schildern bei weißem Theaterrauch verschiedener Dichte verändere. Keine dieser Technologien sei bei mehr als 1,5 Metern in dichtem Rauch ($Optical Density 3 \text{ m}^{-1}$) sichtbar. Bei $OD 1 \text{ m}^{-1}$ sei die beste Technologie, das LED-Piktogramm, bei 4 Metern Abstand sichtbar gewesen, während bei photo-lumineszierenden Zeichen der Abstand etwa 1 Meter betragen habe.

Fazit

Die theoretischen Überlegungen zeigen, dass bei starkem Rauch die Sichtbarkeit von Rettungszeichen drastisch sinkt. Um eine lenkende Wirkung zu erzielen, müssten die Zeichen im Abstand von wenigen Metern angebracht werden. Von EBERBACH et al. wird daher eine Art „Lichterkette“ vorgeschlagen.

7.3.2 Bisherige experimentelle Untersuchungen

Frühe Untersuchungen:

FRANTZICH & NILSSON (2004) berichten über einige der frühesten Untersuchungen zur Evakuierung bei Rauch: So experimentierte JIN im Jahre 1976 mit rauchgefüllten Gängen und fand heraus, dass die Leute umso langsamer gehen, je mehr Rauch im Gang ist, d. h., je geringer die Sichtbarkeit ist. JIN fand ein ähnliches Verhalten wie bei Dunkelheit: Die Personen gehen an der Wand entlang, berühren sie, damit sie die Orientierung nicht verlieren. JIN & YAMADA (1985) untersuchten ein Wegleitsystem: eine Reihe von Lichtern, die in einer Sequenz aufleuchten, um Bewegung zu vermitteln. Sie folgerten, dass dies ein kraftvolles Hilfsmittel sei, um Leute bei Rauch zu evakuieren, wenn der Abstand zwischen den Lichtern weniger als 1 Meter war. Das Abstandsminimum zwischen den Lichtern, das die Autoren testeten, war 0,5 Meter.

Weiterhin wird von einem Experiment berichtet, das PAULSEN (1994) auf einer Fähre durchführte. Er zeigte, dass bei Rauch kontinuierliche Markierungen besser sind als die üblichen Zeichen, wobei kontinuierliche taktile Markierungen, kontinuierliche visuelle Markierungen und Zeichen untersucht wurden. PAULSEN schlägt vor, kontinuierliche visuelle Zeichen zu verwenden, wenn mit einem Extinktions-Koeffizienten zwischen $0,2$ und $3,5 \text{ m}^{-1}$ ($0,1 \text{ m}^{-1} < OD < 1,5 \text{ m}^{-1}$) während der Evakuierung zu rechnen sei. Übersteige dieser Koeffizient $3,5 \text{ m}^{-1}$ ($OD > 1,5 \text{ m}^{-1}$), so ist nach PAULSEN Ansicht das taktile Wegleitsystem günstiger.

Erkennung von Rettungswegzeichen bei Rauch:

BIESKE (2003) befasst sich in einem normalen Gebäude mit den Erkennungsweiten verschiedener




Sicherheitszeichen		
elektrisch betriebene Systeme		lichtspeichernde Systeme
hinterleuchtete Sicherheitszeichen (interne Lichtquelle)	beleuchtete Sicherheitszeichen (externe Lichtquelle)	nachleuchtende Sicherheitszeichen (externe Lichtquelle zur Anregung)
		
HLKL	BL	NL

Bild 7.13: Systematik der von BIESKE untersuchten Sicherheitszeichen (a. a. O., 2003, S. 5)

Arten von Sicherheitszeichen, wie in Bild 7.13 dargestellt.

An diesem Versuch nehmen 100 Probanden im Alter zwischen 21 und 70 Jahren teil. Untersucht wurde, mittels Fragebogenerhebung, die Sichtbarkeit (Kriterium: Pfeil gerade erkannt) bei geringer Sichttrübung ($0,7 \text{ m}^{-1}$), mittlerer Sichttrübung ($1,4 \text{ m}^{-1}$) und hoher Sichttrübung ($2,3 \text{ m}^{-1}$).

Bild 7.14 zeigt, dass bereits bei geringen Schwächungskoeffizienten der Sichttrübung die Erkennungsweite gegenüber der klaren Umgebung drastisch abnimmt und exponentiell mit dem Anstieg des Schwächungskoeffizienten k sinkt.

Zur Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe stellt BIESKE fest: Brandrauch könne aufgrund seiner spektralen Eigenschaften Farbverschiebungen verursachen. Die Wahrnehmung der Sicherheitsfarbe sei dann durch Streulichtüberlagerung herabgesetzt. Dies bewirke eine Verschiebung des Farb-Ortes in Richtung unbunt (a. a. O., 2003, S. 12).

BIESKE stellt bei der Beobachtung der Probanden auf dem Weg durch den Rettungsgang Folgendes

Sicherheitszeichen	Erkennungsweite nach BGR 216	relative Erkennungsweite bei Sichttrübung		
		$k = 0,7 \text{ m}^{-1}$	$k = 1,4 \text{ m}^{-1}$	$k = 2,3 \text{ m}^{-1}$
HLKL (ohne Zusatzbeleuchtung)	18 m	63,8 %	38,9 %	21,1 %
HLGR (ohne Zusatzbeleuchtung)	28 m	41,1 %	25,0 %	13,6 %
BL (separat beleuchtet) (ohne Zusatzbeleuchtung)	20 m	47,5 %	30,0 %	17,5 %
BL (unter der Leuchte bei Notbeleuchtung)	20 m	30,7 %	15,1 %	6,1 %
BL (hinter der Leuchte bei Notbeleuchtung)	20 m	18,7 %	12,4 %	7,3 %
NL (ohne Zusatzbeleuchtung)	20 m	27,5 %	19,0 %	10,0 %
HLKL	Hinterleuchtetes Sicherheitszeichen	90 x 200		
HLGR	Hinterleuchtetes Sicherheitszeichen	140 x 280		
BL	Beleuchtetes Sicherheitszeichen	200 x 400		
NL	Nachleuchtendes Sicherheitszeichen	200 x 400 300/45		

Bild 7.14: Relative Erkennungsweite verschiedener Sicherheitszeichen, bezogen auf die Erkennungsweite nach DIN EN 1838 in Abhängigkeit vom Schwächungskoeffizienten k (aus: BIESKE, 2003, S. 7)

fest: Während sich die Probanden bei klarer Sicht anhand der über Kopf montierten Sicherheitszeichen vorausschauend orientierten, „werden bei eingeschränkter Sicht Orientierungspunkte eher im Bodenbereich und in der unmittelbaren Umgebung gesucht“ (a. a. O., 2003, S. 12).

Von WRIGHT, COOK & WEBBER (o. J.) stammt eine Untersuchung, bei der mit 20 Probanden im Alter von 19 bis 63 Jahren (Durchschnittsalter: 36,5 Jahre) vier Notausgangszeichen mit grafischen Symbolen und zwei Arten von Notausgangs-Markierungen untersucht wurden. Zwei der Notausgangszeichen waren von innen durch eine fluoreszierende Lampe beleuchtet, das Zeichen war elektro-lumineszierend. Der Hintergrund war grün, das Symbol weiß. Bei den anderen beiden Zeichen wurden LEDs verwendet, wobei grüne LEDs das Symbol formten. Bild 7.15 zeigt ein Beispiel. Die Türmarkierungen bestanden entweder aus grünen LEDs oder waren elektro-lumineszierend.

Verglichen wurden normales Licht (130-190 Lux), kein Licht, und Notbeleuchtung über Kopf (1-2 Lux). Der Versuchsgang wurde mit Rauch gefüllt, sodass eine OD (optische Dichte) von 0,8 bis $1,4 \text{ m}^{-1}$ entstand. Die Probanden sollten in Einzelversuchen den Gang entlang gehen, bis sie das Zeichen sahen, und dort stehen bleiben. Jede Person beurteilte 15 verschiedene Versuchsbedingungen.

In Bild 7.16 wird die durchschnittliche optische Dichte beschrieben: Je höher die Zahl, desto dichter kann der Rauch sein, bei dem in einem festen Abstand das Zeichen wahrgenommen werden kann. Anders ausgedrückt kann für eine definierte Rauchdichte der Abstand zwischen Person und Zeichen bis zur genannten Zahl zunehmen, ehe das Zeichen nicht mehr gesehen wird.

Zwischen der Bedingung ohne Licht und der Notbeleuchtung (0,1 bis fast 40 Lux in einer Höhe von 2 Metern über dem Boden) ist bei klarer Sicht kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar, deshalb werden die Ergebnisse für Notbeleuchtung nicht weiter berücksichtigt. Da, bedingt durch den Rauch, bei normaler Beleuchtung mehr Streulicht entsteht, ist die Sichtbarkeit der Rettungszeichen reduziert.

Bei einer Rauchdichte von etwa 1 m^{-1} zeigte die vorliegende Untersuchung, dass das fluoreszierende Zeichen (mit einer mittleren Luminanz von über 1.000 cd/m^2 im weißen Bereich) fast die



Bild 7.15: LED-Zeichen, jeder Punkt ist ein 5 mm 260 mcd grünes LED (aus: WRIGHT, COOK & WEBBER, o. J.)

untersuchtes Zeichen	Beleuchtung-überkopf	
	keine	normale
LED Zeichen 2 (190 x 410 x 45 mm, grafisches Symbol 260 mcd grüne LEDs, gesamt 94 LEDs)	5,8	4,2
LED Zeichen 1 (115 x 240 x 18 mm, grafisches Symbol: 140 mcd grüne LEDs, insgesamt 111 LEDs)	5,5	4,0
Fluoreszierendes Zeichen (weiße Box, 194 x 424 x 105 mm, grüner Hintergrund 164 mm hoch)	5,3	3,4
Elektro-fluoreszierendes Zeichen (grüner Hintergrund 150 x 210 mm)	3,8	2,2
LED Türmarkierung (um die Türe herum, also 2 m x 86 cm, 35 mcd grüne LEDs)	4,2	2,9
Elektro-lumineszierende Türmarkierung (vertikaler Streifen rechts, 22 mm breit)	3,7	2,3

Bild 7.16: Durchschnittliche optische Dichte (nach Daten von WRIGHT, COOK & WEBBER, o. J.)

gleichen Ergebnisse wie das LED-Zeichen (mit etwa 100 LEDs, jedes mit 140 bis 260 mcd) bringt. Das dunklere elektro-lumineszierende Zeichen (weniger als 50 cd/m^2) konnte durch den Rauch nicht so gut gesehen werden.

Bei den Türmarkierungen schnitten die LEDs besser ab.

Auffälligkeit von Notausgängen:

STEINAUER et al. finden in ihrer Untersuchung zur Gestaltung von Notausgängen, dass der beleuchtete Ausgang, speziell der grün beleuchtete, bei Ver Rauchung (gegenüber dem Standard- bzw. dem weiß beleuchteten Ausgang) bevorzugt wird ($p < .001$) (a. a. O., 2007, S. 93). Bild 7.17 zeigt die Anzahl der Entscheidungen, bei maximal 24 möglichen.

Rauch im Tunnel – Verhalten von Versuchsteilnehmern:

FRANTZICH & NILSSON (2004) berichten über einen Versuch, an dem 46 Studenten, 30 Männer und 16 Frauen, im Alter von 18 bis 29 Jahren teilnehmen. Das Experiment fand in einem 37 Meter langen, 5 Meter breiten und 2,5 bis 2,7 Meter hohen Tunnel statt. Es waren zwei Notausgänge mit einer Breite von jeweils 0,9 Metern verfügbar. Im Tunnel standen 6 Fahrzeuge, in den Tunnel wurden Rauch und Essigsäure-Brandgas eingeleitet.

Im Experiment werden drei Systeme verglichen:

- Orange Blinklichter an den Türen oben, die sich in ca. 1,9 Meter Höhe über dem Boden befinden. Die Lampen blinken gleichzeitig mit einer Frequenz von 1 Hz.
- Reihe von blinkenden Lichtern, aus LEDs an jeder Seite der Türe. Sie blinken in Richtung auf die Türe. Die Reihe ist etwa 3,7 Meter lang und ca. 1,2 Meter über dem Boden montiert.

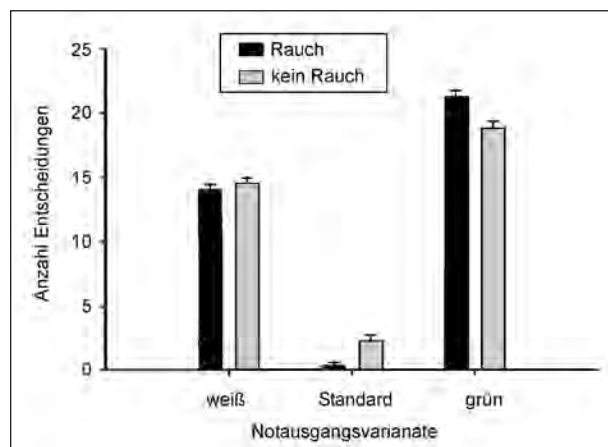


Bild 7.17: Entscheidung für eine Notausgangsvariante im Versuch mit VR-Umgebung bei Notausgängen ohne, mit weißer bzw. grüner Beleuchtung, mit und ohne Ver Rauchung (aus: STEINAUER et al., 2007, S. 92)

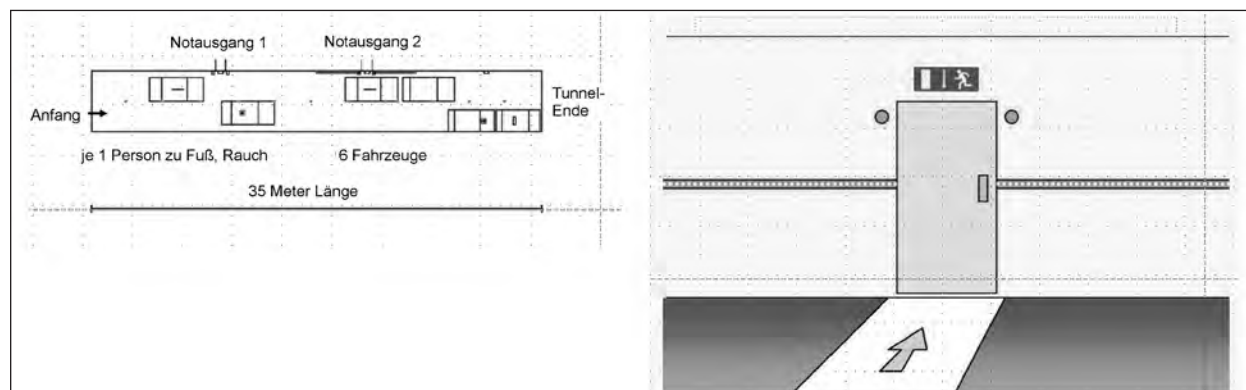


Bild 7.18: Überblick über die Versuchssituation beim Experiment von FRANTZICH & NILSSON (aus FRANTZICH & NILSSON, 2004, S. 230 f.)

- Boden-Markierungen, die wie ein weißer Teppich aussehen, von einer Breite von 1,2 Meter, von der rechten zur linken Tunnelseite. Auf dem „Teppich“ sind kleine graue Pfeile.

Bild 7.18 zeigt den Versuchsaufbau. Zu Beginn des Versuchs wurde ein Film vorgeführt und dann folgende Instruktion erteilt: „Sie sind in einen Tunnel gefahren und haben Ihr Fahrzeug angehalten. Es ist Rauch im Tunnel und deshalb müssen Sie hinaus. Handeln Sie wie in einer realistischen Situation.“

Die Versuchsteilnehmer wurden einzeln in den Tunnel geschickt, jeder Teilnehmer lernte nur eine der o. g. Bedingungen kennen. Nachdem der Proband den Tunnel verlassen hatte, sollte er Fragebogen ausfüllen und wurde interviewt.

Folgende Ergebnisse werden berichtet:

- 80 % der Teilnehmer gehen an der Wand entlang, 63 % bleiben an der Wand, an der sie begonnen haben, entlang zu laufen. Wenn die Wand verlassen wird, dann um zum Notausgang hinaus zu gehen (dies tun 15 %).
- Insgesamt benutzen 22 % aller Versuchsteilnehmer den Notausgang. Im Fragebogen geben jedoch 38 % an, sie hätten die Zeichen für den Notausgang gesehen. Das bedeutet, dass nur 59 % der Personen, die die Notausgang-Zeichen gesehen haben, auch zum Notausgang hinaus gehen!
- Die blinkenden Lichter oben an der Türe sehen 6 von 14 Teilnehmern, d. h. 42 %. Jedoch nur 3 der 6 Personen gehen zum Notausgang hinaus.
- In der Versuchsbedingung mit der blinkenden Lichter-Reihe waren 16 Teilnehmer. Nur 6 von

ihnen, d. h. 38 %, geben an, die Lichter-Reihe gesehen zu haben. Niemand geht jedoch bei diesem Notausgang hinaus.

- Die weißen Markierungen am Boden werden von niemandem gesehen.

Fazit

Ab einer gewissen Rauchdichte sind Zeichen nicht mehr wahrzunehmen. Durch verschiedene Arten von Sicherheitszeichen (hinterleuchtet besser als beleuchtet, LED besser als fluoreszierend) kann die Sichtbarkeit bei Rauch verbessert werden.

Die Untersuchung von FRANTZICH & NILSSON (2004) zeigte klar, wo das Problem liegt: Selbst wenn der Notausgang gesehen wird, wird er nicht von allen genutzt.

7.3.3 Rauchverteilung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit

Über die Ausbreitung des Rauchs im Tunnel gibt es eine Vielzahl von Simulationsstudien. Es würde jedoch zu weit führen, die Studien hier vorzustellen. Für unsere Fragestellung ist letztlich entscheidend, wie momentan die Ausbreitung des Rauchs erfolgt und welche Ziele in diesem Bereich verfolgt werden. WEHNER & REINKE (2003) geben hier eine anschauliche Übersicht.

Aus Bild 7.19 ist zu erkennen, dass bei allen Konzepten eine Sichtbarkeit von Zeichen eher im unteren Bereich der Tunnel gegeben ist.

Auf die Zukunft gerichtet nennen WEHNER & REINKE (2003) u. a. folgende Ziele:

- Möglichst frühzeitige und zuverlässige Detektion im Brandfall.
- Steuerung der Lüftung in Abhängigkeit von der Ereignisphase (Konzepte für unterschiedliche Szenarien).
- Frühzeitige und vollständige Kontrolle über die Luftbewegung (Begrenzung der Luftgeschwindigkeit in der Selbstrettungsphase, Rauchabfuhr in der Rettungs- und Brandbekämpfungsphase).
- Möglichst brandnah und konzentriert den Rauch absaugen (steuerbare Rauchklappen, Wirbelstromabsaugung).
- Separate Flucht- und Rettungstollen belüften.

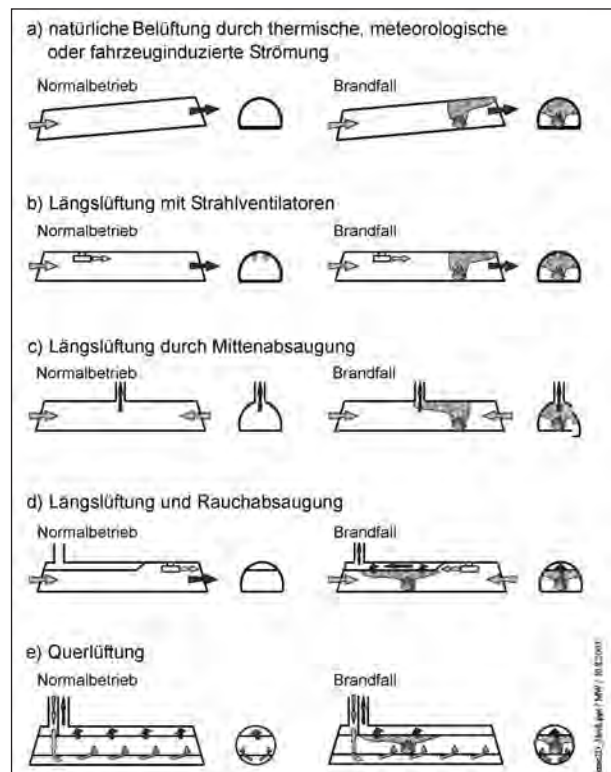


Bild 7.19: Wesentliche Belüftungs- und Entrauchungskonzepte bei Tunnel mit (a) natürlicher Belüftung, (b) Längslüftung mit Strahlventilatoren, (c) Längslüftung durch Mittenabsaugung, (d) Längslüftung und Rauchabsaugung im Brandfall, (e) Querlüftung (aus: WEHNER & REINKE, 2003, S. 11)

- Zunehmende Komplexität der Steuerung (Vernetzung von Teilsystemen, Einrichtungen wie Klappen, Türen und Toren, dynamischer Fluchtweg-Signalisation).
- Mit Hilfe der Steuerung möglichst automatischer Ereignisablauf für verschiedene Szenarien.
- Einsatz von Rauchschürzen, Vorhängen und Toren in den Tunnelstrecken.

Fazit

Hilfsmittel, die ein Entkommen erleichtern, sind eher im unteren Bereich der Seitenwand sichtbar.

Den Fluchtweg dynamisch anzuzeigen ist in jedem Falle sinnvoll, unabhängig von der Realisierbarkeit der anderen Hilfsmittel.

7.3.4 Diskussion

Die Literaturlauswertung zeigt, dass in vielen Bereichen wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zur Gestaltung von Noteinrichtungen vorliegen.

Dies umfasst die Wahrnehmung und den Bedeutungsgehalt von Farben: Hier ist auf guten Kontrast zu achten, etwa Weiß oder Gelb auf Schwarz, und die Sichtbarkeit der Farbe auch bei mesopischem bzw. skotopischem Sehen. Folgt man GREGORY, so wäre gelb-grüne Farbe (555 Nanometer) am besten geeignet, nach FRIELING wäre es beim skotopischen Sehen ein bläuliches Grün. Da der Farbe Grün die Bedeutung von (erster) Hilfe zugeordnet wird, ist sie eine gute Wahl. Kommt jedoch Rauch als Bedingung hinzu, so erfolgt eine Verschiebung der Farben in Richtung „unbunt“, sodass der Farbe insgesamt zwar eine wichtige, jedoch nicht die entscheidende Rolle zukommt.

Die Kennzeichnung von Fluchtwegen in den Farben Grün/Weiß unter Verwendung von Piktogrammen ist üblich. Piktogramme sind – wie die eigene Umfrage zeigt – so weit bekannt, dass ihr Einsatz sinnvoll ist.

Bezüglich der Frage der optimalen Leuchtmittel zur Kennzeichnung der Fluchtwege (Hinterleuchtung, LED oder reflektierend) gibt es verschiedene Bewertungen: Hinterleuchtete Zeichen weisen die höchsten Leuchtdichten auf, LEDs haben eine beinahe unbegrenzte Lebensdauer, während reflektierende Zeichen vom Stromnetz unabhängig funktionieren.

Die Identifikationssichtweiten betragen bei Rauch mittlerer Dichte nur ca. 7 Meter, bei starkem Rauch nur noch 2 bis 3 Meter, wobei die Art des Rauchs (weiß, grau, schwarz) eine untergeordnete Rolle spielt. Die Sichtbarkeit der Rettungszeichen kann durch höhere Leuchtstärken unter Rauchbedingungen nur geringfügig gesteigert werden. Zu hohe Leuchtstärken beeinträchtigen zudem die Wahrnehmung anderer Signale im Normalbetrieb (z. B. andere Fahrzeuge und deren Bremslichter).

Eine allgemeine Beleuchtung der Notausgänge ist diskussionswürdig: Einerseits werden Notausgänge mit selbstleuchtendem grünem Rahmen in einer Simulation eher „aufgesucht“, als weiß umrandete oder nicht beleuchtete.

Andererseits, so STEINAUER et al., sei die allgemeine Beleuchtung eher ungünstig, da bei Rauch durch das Streulicht die Sichtbarkeit der Kennzeichnung „Notausgang“ beeinträchtigt werde.

Der (bisher nicht experimentell untersuchte) Vorschlag von EBERBACH et al. (2007), eine Art Lichtkette in Handhöhe an der Wand entlang oder Lichtpunkte im Boden der Fahrbahn anzubringen,

könnte hilfreich sein, da die Lichtpunkte unter Rauchbedingungen länger sichtbar wären (der Rauch steigt zunächst nach oben). Im Normalbetrieb stellen die Lichtpunkte am Boden eine optische Führung für die Autofahrer dar.

Allerdings mussten FRANTZICH & NILSSON feststellen, dass ihre Probanden Licht-Markierungen an der Wand nur in ca. 1/3 der Fälle wahrnahmen – jedoch keine Verhaltenskonsequenz zogen. Zeichen am Boden, hier allerdings nur reflektierende, wurden überhaupt nicht wahrgenommen.

Ebenso liegen bezüglich der Beeinträchtigung dieser Zeichen durch Verschmutzung keine Erkenntnisse vor.

7.3.5 Schwerpunkte für Versuche

Aufgrund der bisherigen Erhebungen, Literaturanalysen und Überlegungen ergeben sich folgende Schwerpunkte für Experimente:

Wie ist das gewichtige Problem zu lösen, durch entsprechende Signale den Nutzern den Übergang von einer leichten zu einer dramatischen Störung deutlich zu machen?

Wie die Berichte zeigten, verharren Krafffahrer auch bei einem großen Brand, der nur wenige Minuten zur Flucht lässt, zu lange in ihren Fahrzeugen. Hier muss durch geeignete optische/akustische Signale eine schnelle Räumung des Tunnels erreicht werden.

Wenn sich Personen zur Flucht entscheiden oder dazu aufgefordert werden, bewegen sie sich eher entlang der Wand (vor allem bei Rauchentwicklung). Um sie zum nächsten Notausgang zu leiten, erscheint eine optische/haptische Führung Erfolg versprechend. Dies kann in Form eines Handlaufs mit integrierten Lauflichtern erfolgen, die zum Notausgang führen, müsste aber experimentell erprobt werden.

Notausgänge wurden in mehreren Studien nicht genutzt. Ziel ist daher, die Personen nicht nur zu den Notausgängen zu leiten, sondern sie auch zum Verlassen des Tunnels über den Notausgang zu veranlassen.

Dazu wird, neben optischen Signalen, auch die Eignung akustischer Signale (Töne und Sprache) experimentell untersucht. Um eine realistische Ausgangslage zu gewinnen, wird die Geräuschkulisse aus Tunneln verwendet.

8 Haptische Wahrnehmung

Der Begriff „Haptik“ geht auf die griechische Sprache zurück, in der „haptiesthai“ ergreifen, anfassen, berühren bedeutet (vgl. GRUNWALD, 2001). Nach GIBSON (1966) subsumiert der Begriff sowohl die taktilen als auch die propriozeptiven Sinne, wobei der Begriff „taktil“ ursprünglich nur für passive Berührung verwendet wurde und „propriozeptiv“ Rezeptoren anspricht, die durch Körperbewegung und körperliche Leistung stimuliert werden (vgl. SCHUMANN, 1994, S. 18 f.).

Einfacher formuliert geht es um das aktive oder passive Erfühlen von Oberflächen, Formen, Konturen usw.

Rezeptoren in der Haut ermöglichen das Erkennen von Berührung, Druck und Vibration. Empfindungen entstehen in der äußeren Schicht der Haut, der Epidermis (Oberhaut) und der Dermis (Lederhaut). Hier ist der Sitz verschiedener Rezeptoren, etwa der Merkel-Zellen, der Meissner-, Ruffini- und der Pacini-Körperchen. Sie sind, wie Bild 8.1 zeigt, verschieden ausgeformt und von Nervenfasern umgeben (vgl. GOLDSTEIN, 2002, S. 530).

Die Unterschiede dieser Rezeptoren (physikalische Eigenschaften, Ort in der Haut und Größe der rezeptiven Felder) bewirken, dass die mit ihnen verknüpften Nervenfasern optimal auf verschiedene Arten von Reizen ansprechen. Sie erzeugen damit die verschiedenen Empfindungen der Hautsinne (vgl. GOLDSTEIN, 2002).

Setzt man die Haut Vibrationsreizen aus, so gehen aus Untersuchungen von BOLANOWSKI et al. (1988) die in Bild 8.2 dargestellten Ergebnisse hervor.

In sich teilweise überschneidenden Bereichen wird somit ein Spektrum von 0,3 bis mehr als 500 Hz abgedeckt.

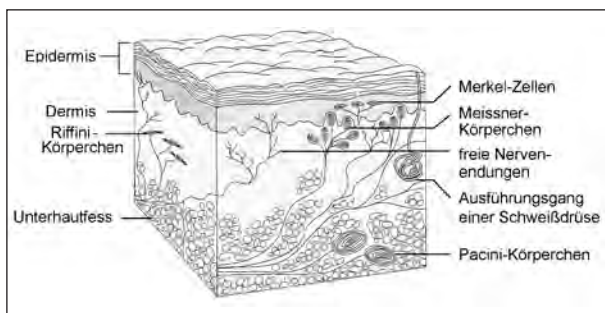


Bild 8.1: Schichten der menschlichen Haut und einige ihrer Rezeptoren (aus: GOLDSTEIN, 2002, S. 531)

Während GOLDSTEIN nur jeweils eine Art der Wahrnehmung pro Rezeptorstruktur benennt, weisen BEYER & WEISS (2001) auf Überlappungen hin. Bild 8.3 zeigt dies in grafischer Form.

Sie betonen, dass „bei der Gewinnung von Informationen über mechanische Reize und Reizänderungen ... sensible Nervenendigungen, die auf das Aufspüren mechanischer Ereignisse spezialisiert sind und deshalb als Mechanorezeptoren ... bezeichnet werden“, eine Schlüsselrolle spielen (a. a. O., S. 25).

„Die Nervenfasern, die an den Rezeptoren in der Haut entspringen, werden zu den peripheren Nerven gebündelt. Sie treten über die Hinterwurzel in das Rückenmark ein. Nach ihrem Eintritt in das Rückenmark ziehen die afferenten Nervenfasern in zwei Bahnen das Rückenmark hinauf“, wie Bild 8.4 verdeutlicht (GOLDSTEIN, 2002, S. 539).

Die Qualität des taktilen Auflösungsvermögens hängt von der Zahl und der Beschaffenheit der Mechanorezeptoren ab, aber auch, wie BIRBAUMER & SCHMIDT (2006) betonen, „von der durch häufige Benutzung bedingten Vergrößerung der zugehörigen Analysatoren in Kortex und Thalamus“ (S. 323).

Über das beste taktile Auflösungsvermögen verfügt die Zungenspitze mit einer simultanen Raumschwelle (dies bezeichnet den Mindestabstand, der

Rezeptorstruktur	Wahrnehmung	optimale Frequenzen
Merkel-Zellen	Druck	0,3-3 Hz
Meissner-Körperchen	Zittern	3-40 Hz
Ruffini-Körperchen	Summen	15-400 Hz
Pacini-Körperchen	Vibration	10 > 500 Hz

Bild 8.2: Ergebnisse zur taktilen Wahrnehmung von BOLANOWSKI et al. (aus: GOLDSTEIN, 2002, S. 532)

Rezeptor/Empfindung	Spannung	Druck	Berührung	Vibration
Merkel-Zellen		●————●		
Meissner-Körperchen	●————●			
Ruffini-Körperchen			●————●	
Pacini-Körperchen				●————●

Bild 8.3: Vermittelte Empfindung (nach: BEYER & WEISS, 2001, S. 29)

für zwei deutlich trennbare Empfindungen nötig ist) von 1 mm, an zweiter Stelle liegt die Fingerspitze mit einer simultanen Raumschwelle von 2 mm, gefolgt von den Lippen (4 mm) (vgl. KEIDEL, 1970).

In Bild 8.5 sind die simultanen Raumschwellen für den gesamten Körper dargestellt: Je kleiner der Balken ausfällt, desto höher die Sensibilität an dieser Körperstelle.

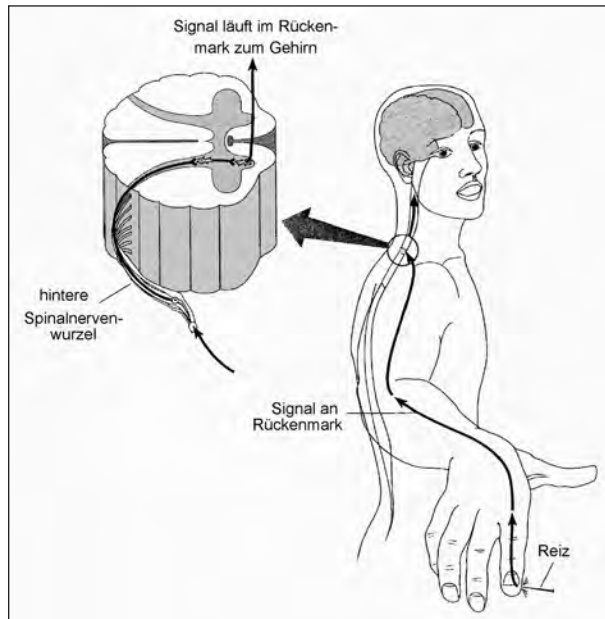


Bild 8.4: Die neuronale Bahn von den Hautrezeptoren zum Rückenmark und zum Gehirn (aus: GOLDSTEIN, 2002, S. 539)

Bei den von uns geplanten Versuchen ist auch eine Variante vorgesehen, bei der mit einem Handlauf experimentiert wird.

Hier soll sich zeigen, ob die Probanden mittels haptischer Wahrnehmung (also zunächst ohne spezifische visuelle oder akustische Unterstützung) in der Lage sind, den Handlauf zu ertasten und ihn als Leiteinrichtung zu erkennen. Der Tastsinn als Fähigkeit, Form und Beschaffenheit eines Körpers ohne visuelle Hilfe wahrzunehmen, bietet dafür sehr gute Voraussetzungen. Wie wir aus Bild 8.5 ersehen können, müssten die Finger bzw. die ganze Hand für diese Aufgabe eigentlich sehr gut geeignet sein.

9 Optisch-haptischer Versuch

9.1 Zielsetzung

Mit diesem Experiment soll eine Lösung für folgende, in der Literatur referierten Probleme gefunden werden:

Wie kann man Abhilfe schaffen, wenn bei einem Brand im Tunnel die Flucht so spät angetreten wird, dass durch die Verrauchung des Tunnels die Sichtbarkeit der üblichen Fluchtwegkennzeichnung zu gering ist?

Wie kann man Personen, die sich auf dem Weg aus dem Tunnel befinden, und „immer an der Wand ent-

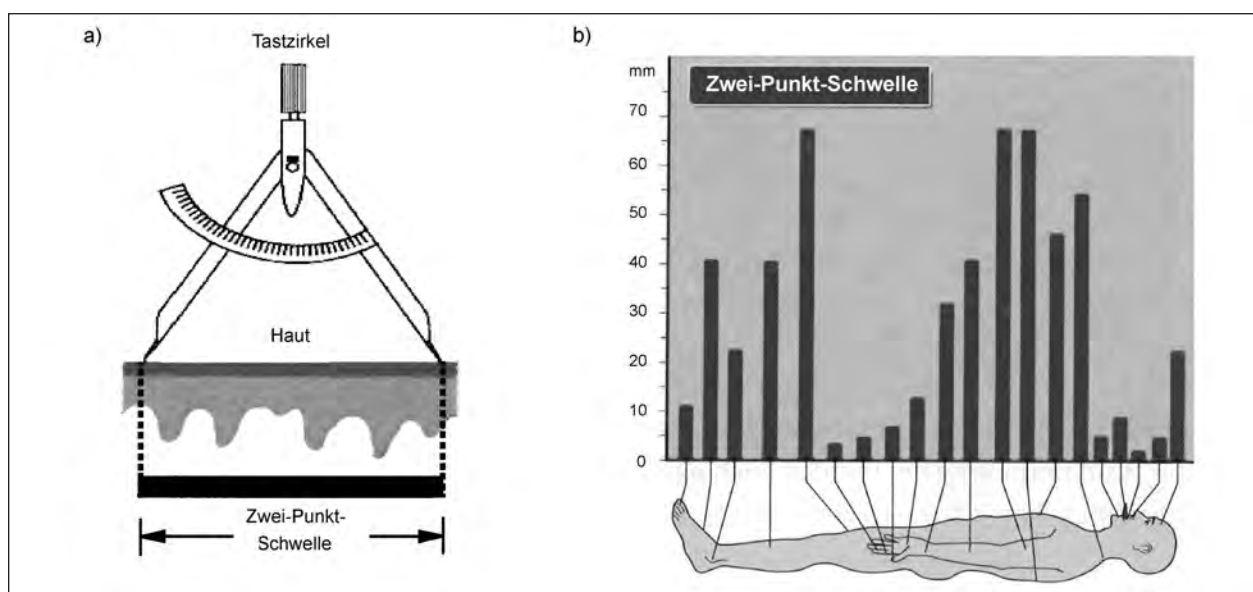


Bild 8.5: Simultane Raumschwellen des Erwachsenen

- Abstand zweier abgestumpfter Zirkelspitzen, bei denen die Reizpunkte gerade noch als getrennt wahrgenommen werden können
- Verteilung der simultanen Raumschwelle der Haut an verschiedenen Körperstellen des Menschen (aus: BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 323)

lang" laufen, zum Notausgang auf der gegenüberliegenden Seite leiten? Wie kann man sie zur Nutzung dieses Notausgangs bewegen? (Problemschilderung siehe FRANTZICH & NILSSON, 2004).

Erprobt werden Möglichkeiten, durch optische und/oder haptische Signale Personen bei einem Brand im Tunnel

- zum Auffinden eines Notausgangs zu bringen,
- einen eventuell erforderlichen Seitenwechsel auszulösen und
- zur Nutzung des Notausgangs zu veranlassen.

9.2 Versuchsplanung

In verrauchter Raumumgebung werden mit unabhängigen Stichproben drei Bedingungen getestet:

- Optische Bedingung: Mit Hilfe eines fluoreszierenden Bandes sollen Personen an der Wand entlang zu einem „Lauflicht“ gelangen, diesem folgen und durch einen Laserstrahl, der in das Pulsieren des „Lauflichtes“ eingebettet ist, zum Ausgang an der gegenüberliegenden Wand geführt werden.
- Haptische Bedingung: Die Personen sollen entlang eines Handlaufs, dessen Anfang und Ende nur durch ein fluoreszierendes Band markiert sind, zum Laserstrahl gelangen, der zum Ausgang an der gegenüberliegenden Wand weist.
- Kombination aus optischer und haptischer Bedingung: Auch hier ist der Handlauf montiert, Anfang und Ende sind gekennzeichnet. Folgen die

optisch	„Lauflicht“: • fluoreszierendes Band bis zu LEDs • 7 LEDs „laufen“ • Laser pulst Richtung Ausgang
haptisch	„Handlauf“: • Handlauf (an Anfang und Ende markiert) • Laser pulst Richtung Ausgang
optisch + haptisch	„Lauflicht“ + Handlauf“: • Handlauf (an Anfang und Ende markiert) • 7 LEDs „laufen“ • Laser pulst Richtung Ausgang

Bild 9.1: Optisch-haptischer Versuch im Überblick

Personen dem Handlauf, so gelangen sie zum „Lauflicht“ und letztlich zum Laserstrahl, der sie auf die gegenüberliegende Wandseite führt.

9.3 Versuchsteilnehmer

Insgesamt nehmen 54 Probanden, 27 Männer und 27 Frauen, am Versuch teil. Sie werden gleichmäßig über die drei Versuchsbedingungen verteilt. Jede Person lernt nur eine Versuchsbedingung kennen.

Bei den Altersgruppen orientierten wir uns an der aktuellen Bevölkerungsstatistik (vgl. DeStatis, 2006), weshalb sich die Stichprobe aus 12 jüngeren Personen (18-25 Jahre), 24 Probanden mittleren Alters (26-45 Jahre) und 18 Älteren (46-65 Jahre) zusammensetzt.

Bild 9.2 zeigt die Altersverteilung, das Durchschnittsalter der jeweiligen Gruppe, den Führerscheinbesitz und die Jahreskilometerleistung.

Bei der Gesamtstichprobe reicht die Spanne des Führerscheinbesitzes von 2 bis zu 50 Jahren, die Jahreskilometerleistung von 0 bis 60.000 km/Jahr und die Tunnelnutzung von selten (bei 53 %) über gelegentlich (bei 31 %) bis zu häufig (bei 7 %). Ein bestimmtes Maß an Fahrpraxis war jedoch kein Teilnahmekriterium, da jeder, Fahrer wie Beifahrer, in eine Notsituation im Tunnel kommen kann.

Schwangere und Personen mit Atembeschwerden sind aus Sicherheitsgründen vom Versuch ausgeschlossen. Die Teilnehmer wurden gebeten, sportliche Kleidung und festes Schuhwerk zu tragen.

9.4 Versuchsaufbau

Räumlichkeiten:

Für diesen Versuch steht eine Bunkeranlage zur Verfügung. Herzstück ist ein langer Gang, schwarz gestrichen und so verschließbar, dass er mit Theaternebel gefüllt werden kann. Die Schallcharakteris-

Gruppe	Alter (Jahre)	Alter im Mittel	Fahrerlaubnis (Mittel)	km/Jahr (Mittel)
Jüngere	18-25 J.	23,1 J.	seit 5 J.	18.800 km/J.
Mittlere	26-45 J.	32,7 J.	seit 14 J.	17.800 km/J.
Ältere	46-65 J.	52,8 J.	seit 32 J.	16.700 km/J.

Bild 9.2: Versuchsteilnehmer

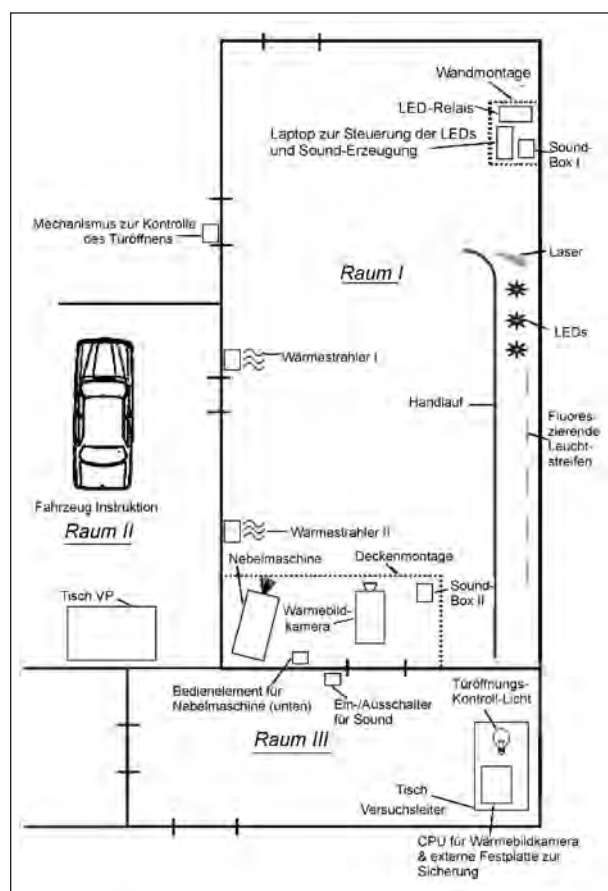


Bild 9.3: Überblick über den Versuchsaufbau. Raum I mit Nebelmaschine, Wärmebildkamera, Wärmestrahlern, Soundboxen, Handlauf, LEDs und Laser mit zugehöriger Steuerung, Türöffnungsmechanismus. Raum II mit Fahrzeug zur Instruktion. Raum III mit Kontrollbildschirm der Wärmebildkamera für den Versuchsleiter, Türöffnungskontrolle, Sound-Fernbedienung und Protokollbögen

tik dieses Raumes ist der eines Tunnels sehr ähnlich. Im ebenfalls geschwärtzten Nachbarraum befindet sich eine Fahrzeugkabine, in der die Instruktion des Probanden stattfindet. In einem weiteren Raum ist die Versuchssteuerung untergebracht. Bild 9.3 gibt einen Überblick.

Optischer Versuchsaufbau:

In der ersten Versuchsbedingung, der „optischen“, soll geklärt werden, ob es trotz Verrauchung möglich ist, durch optische Hilfsmittel Probanden in eine bestimmte Richtung zu leiten und zur Querung des Raums zu bewegen.

Dazu war es zunächst wichtig, ein optisches Medium zu finden, mit dem sich „Bewegung“ darstellen lässt. In der Erprobung war zunächst eine handelsübliche LED-Lauflichtanzeige, die Zeichen in Gelb, Orange, Rot und Grün darstellen konnte. Sie

war frei programmierbar, wobei die Zeichen auf 7 Pixel in der Höhe limitiert waren. Programmiert wurden Pfeile, Punkte, sogar „Strichmännchen“. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Laufgeschwindigkeit der Lichtleiste zu gering war, die Symbole nur in gleichmäßiger Bewegung, nicht aber „springend“ angezeigt werden konnten, wobei sich kein Mitzieh-Effekt einstellte. Die Entscheidung fiel daher auf eine selbst konzipierte Lösung.

Ein weiteres Problem der handelsüblichen Lauflichtleisten ist die mangelnde Lichtintensität. Sie waren nicht in der Lage, Rauch optisch zu durchdringen.

Optimalerweise sollte das Licht trotz Rauchs erkennbar sein. Die Lösung, die nach einer Vielzahl von Vorversuchen gefunden wurde, ist im Folgenden dargestellt. Sie besteht aus fluoreszierenden Leuchtstreifen, LEDs und Laser samt Steuerung.

Alle optischen Hilfsmittel werden in einer Höhe von einem Meter, gemessen vom Boden, an der Wand montiert. Diese Höhe hatte sich in Vorversuchen bewährt, da sich, trotz Verrauchung, niemand in gebückter Haltung bewegte.

Vom Startpunkt aus kann der Versuchsteilnehmer in der optischen Versuchsbedingung nur sehr schwach die fluoreszierenden Leuchtstreifen (je 2,5 x 15 cm, Abstand zwischen den Streifen 15 cm) erkennen. Die Streifen werden jeweils vor Versuchsbeginn ca. 5 Sekunden lang mit einer Schwarzlichtröhre aufgeladen.

Folgt der Proband den Leuchtstreifen, so trifft er auf ein „Lauflicht“: 7 LEDs und ein Laser werden mit der Taktung von 1/16 Sekunde angesteuert: D. h., das erste LED leuchtet 1/16 sec, geht aus, das nächste LED leuchtet 1/16 sec, geht aus, usw. Am Schluss pulst der Laser. Erst dann beginnt ein neuer Durchlauf mit der ersten LED. Dadurch entsteht eine Scheinbewegung Richtung Ausgang.

Die 7 LEDs sind in kürzer werdenden Abständen (anfangs 50, am Ende 20 cm) montiert. Die Leuchtstärke der LEDs beträgt 700 Mikrocandela bei 2,4 V und 30 mA. Sie haben einen Durchmesser von 5 mm, die Wellenlänge des emittierten Lichts beträgt 555 nm. Diese gelb-grüne Farbe ist unter allen Beleuchtungsbedingungen gut wahrzunehmen (vgl. Kapitel 7).

Den Abschluss bildet ein Dioden-Laser-Modul vom Typ LFD 532-5-3 (12 x 60). Die optische Aus-

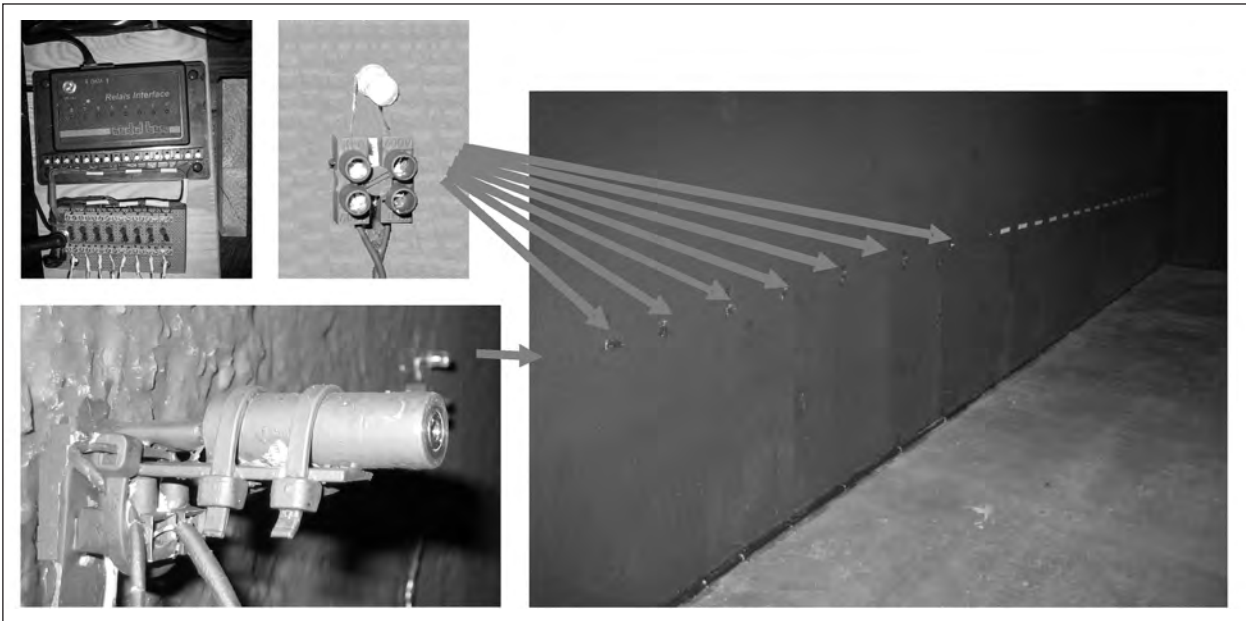


Bild 9.4: Optischer Versuchsaufbau (hier noch ohne Rauch):

- fluoreszierendes Band bis zu den LEDs (Bild rechts, rechte Seite),
- 7 LEDs „laufen“ (Bild rechts, linke Seite (Pfeile) und Detail oben Mitte),
- Laser pulst Richtung Ausgang (Bild links unten),
- Steuerung der LEDs und des Lasers durch ein Relais (Bild oben links)

gangsleistung des Lasers beträgt 5 mW, er sendet grünliches Licht mit einer Wellenlänge von 532 nm aus. Der erzeugte Lichtstrahl hat einen Durchmesser von 3 mm und ist genau auf den Türgriff des Notausgangs gerichtet.

(Anmerkung: Erprobt wurde auch ein Laser, dessen Lichtstrahl nicht punktförmig wie der oben beschriebene war, sondern einen Winkel beschrieb. Diese Laser hatte jedoch, wider Erwarten, nicht die leitende Wirkung.)

Die sieben LEDs und der Laser werden über ein Relais angesteuert. Es sendet 8 Byte und schaltet die einzelnen Bits in der Taktfrequenz 1/16 sec ein oder aus. Der Laser wird nach dem 7. LED geschaltet. Das Relais ist kaskadierbar, d. h., weitere Relais zur Steuerung zusätzlicher LEDs wären möglich. Die Steuerung des Relais erfolgt über PC.

Bild 9.4 zeigt den optischen Versuchsaufbau, allerdings noch ohne Rauch.

Haptischer Versuchsaufbau:

Bei dieser Versuchsvariante werden die fluoreszierenden Leuchtbänder und die LEDs von der Wand entfernt. Stattdessen wird ein Handlauf montiert. Er ist 8 Meter lang, hat einen Durchmesser von 28 mm und weist einen Wandabstand von 70 mm auf, sodass man gut mit der Hand entlangstreichen kann.

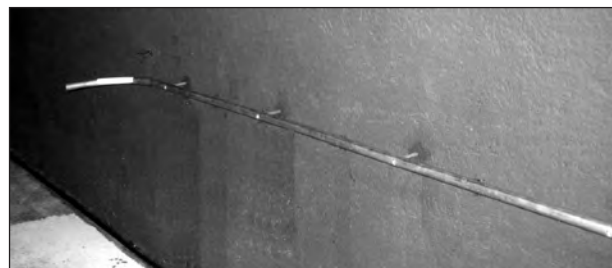


Bild 9.5: Haptischer Versuchsaufbau (hier noch ohne Rauch):

- Handlauf, am Ende gebogen, Anfang und Ende mit fluoreszierender Leuchtfolie gekennzeichnet,
- Laser pulst Richtung Ausgang

Die Montagehöhe beträgt 90 cm über dem Fußboden.

Anmerkung 1: In Vorversuchen war der Handlauf in einer Höhe von 60 cm über dem Boden montiert, da man ursprünglich dachte, die Probanden würden sich, um dem Rauch zu entkommen, in gebückter Haltung fortbewegen. Diese Annahme war jedoch nicht zutreffend, sodass das haptische Hilfsmittel von niemandem ertastet wurde.

Anmerkung 2: Selbstverständlich wäre auch eine dickere Ausführung des Handlaufs möglich. Wir experimentierten mit Kupferrohr, da es sich leicht biegen lässt und wenig Platz benötigt, sodass der Handlauf auch in engen Tunneln angebracht werden könnte.

Der Handlauf wurde am Ende mit einem 90-Grad-Bogen versehen, der ca. 30 cm in Richtung des Notausgangs weist.

Folgt eine Person dem Handlauf, so wird sie durch den Bogen sanft in Richtung Notausgang gedreht. Anfang und Ende des Handlaufs sind mit fluoreszierender Leuchtfolie markiert.

Am Ende des Handlaufs befindet sich der Laser, der, wie in der vorhergehenden Versuchsbedingung beschrieben, alle 1/16 Sekunden einen Lichtstrahl Richtung Notausgang schickt.

Versuchsaufbau für die Kombination aus Optik und Haptik:

In dieser Versuchsbedingung werden die optische und die haptische Versuchsbedingung kombiniert: Neben dem Handlauf sind die LEDs und der Laser aktiviert, wie oben beschrieben.

Notausgang:

Die Kennzeichnung des Notausgangs ist bei allen drei Versuchsbedingungen gleich: Ein fluoreszierendes Notausgangs-Schild (25 x 20 cm) ist direkt über dem Türgriff in einer Höhe von 1,40 m angebracht. Der Türgriff selbst ist mit fluoreszierendem Band markiert. Auf diesen Griff zielt der Laserstrahl.

Bewusst wurde auf eine stärkere Markierung des Notausgangs verzichtet, da hier nicht die farbliche Kodierung bzw. Gestaltung von Notausgängen untersucht werden sollte.

Öffnet der Proband die Notausgangs-Tür, so wird über einen Schalter ein Stromkreis geschlossen. Dadurch erhält der Versuchsleiter ein optisches Signal, sodass er, neben der Wärmebildkamera, noch eine zusätzliche Rückmeldung über die Benutzung des Notausgangs erhält.

Nebelmaschine:

Der Versuchsraum ist mit einer Nebelmaschine ausgerüstet. Es handelt sich um eine ANTARI Z-3000 II mit einer Leistung von 3.000 W und einem Ausstoßvolumen von 1.400 m³/Min. Befüllt wird sie mit Nebelfluid. Der Nebel wirkt wie Rauch, zumal er vor schwarz gestrichenen Wänden steht. Das Atmen der Nebel-Luft ist nicht besonders angenehm, jedoch nicht gesundheitsgefährdend. Die Rauchdichte wird so ausgelegt, dass die LEDs vom Startpunkt aus nicht mehr sichtbar sind.

Zwei in Wadenhöhe montierte Wärmestrahler sorgen dafür, dass der Raum vom Fußboden bis in eine Höhe von ca. 40 cm rauchfrei bleibt. Theoretisch könnten die Versuchsteilnehmer am Boden kriechen, ohne den Rauch einatmen zu müssen. Doch bereits in den Vorversuchen zeigte sich, dass sich die Probanden in aufrechter Haltung bewegen.

Wärmebildkamera:

Um das Verhalten der Probanden im vernebelten Raum filmen zu können, wurde die Wärmebildkamera CEDIP JADE II verwendet. Sie wird mit der Software von InfraTec betrieben. Die Kamera kann Bilder bis zu einer Frequenz von 100 Hz liefern, da



Bild 9.6: Beobachtung des Probanden mit Hilfe der Wärmebildkamera

jedoch bereits 10 Hz eine gute Aufnahmequalität gewährleisten und die Speicherkapazität deutlich kleiner ist, entschieden wir uns für diese Einstellung. Die Daten wurden auf einem Rechner mit Intel-Pentium-III-Prozessor mit 1.200 MHz und einem Arbeitsspeicher von 512 MB RAM aufgenommen und verarbeitet. Die Programme laufen unter WINDOWS 2000. Zur Aufnahme wird IRBIS online/process, zur Verarbeitung die Infrarot-Thermografie-Software IRBIS professional 2.2 verwendet. Der Rechner steht im Versuchssteuerraum, sodass der Versuchsleiter den Probanden ständig „im Blick“ hat und notfalls eingreifen könnte.

Hintergrundgeräusche:

Als Geräuschkulisse wird das Leerlauf-Geräusch eines MAN TGA (Lkw) verwendet. Dabei wird ein Geräuschpegel von ca. 92 dB eingestellt. Das Niveau wird regelmäßig mit Hilfe eines Präzisions-Impulsschallpegelmessers vom Typ 2233 von Brüel & Kjaer kontrolliert. Die Beschallung erfolgt von zwei Seiten. Auf diese Weise soll eine stressbeladene Situation erzeugt werden.

9.5 Versuchsdurchführung

Aufgabe des Probanden:

Im Einzelversuch wird jeder Proband in den dunklen Versuchsnebenraum geführt und nimmt dort in einem Fahrzeug Platz (Phase der Dunkeladaptation). Er soll sich nun vorstellen, in einen Tunnel eingefahren zu sein. „Sie merken, dass in diesem Tunnel etwas nicht stimmt. Sie hören eine Durchsage, doch den Text verstehen Sie nicht ganz, denn es hallt sehr stark im Tunnel. Die normale Beleuchtung ist ausgefallen. Es ist dunkel. Sie bemerken, dass der Tunnel mit Rauch vernebelt ist. Der Rauch wird immer dichter. Wagen Sie sich in diese Situation?“ Vier Personen brechen an dieser Stelle den Versuch ab, sie trauen sich nicht in den Versuchsraum.

Den anderen Probanden wird weiter erläutert: „Es ist also dunkel. Der Tunnel ist voller Rauch. Vor Ihnen stehen Fahrzeuge, es gibt kein Durchkommen. Hinter Ihnen stehen Fahrzeuge, sodass Sie auch nicht rückwärts herausfahren können. Im Tunnel ist es sehr heiß und stickig. Sie fühlen, dass Sie heraus müssen. Sie entscheiden sich, Ihr Fahrzeug zu verlassen. Nun müssen Sie einen Notausgang finden.“ Die Versuchsperson wird nun gebeten, eine Spezialbrille aufzusetzen, die ihr die Sicht völlig nimmt. Der Versuchsleiter bringt sie in den Versuchsraum, dreht

sie mehrfach um die eigene Achse. Sobald der Proband Verkehrslärm hört, darf er die Brille abnehmen (Bewegung über Wärmebildkamera erfasst, Beginn der Zeitmessung) und mit der Suche nach dem Notausgang beginnen. Das Öffnen der Notausgangstür (Aufleuchten der Kontrolllampe beim Versuchsleiter) beendet die Zeitmessung.

Befragung:

Nach Auffinden des Notausgangs, oder, falls dieser nicht gefunden wird, nach Abbruch durch den Versuchsleiter, wird der Proband befragt,

- wie er mit Rauch und Dunkelheit im Versuchsraum zurechtkam,
- wie er sich im Versuch fühlte (fünfstufiges semantisches Differenzial mit den Adjektivpaaren unsicher/sicher; unbelastet/belastet; gut orientiert/schlecht orientiert; verloren/geborgen),
- ob er etwas gesehen/getastet habe, und wenn ja, was,
- wie er sich bewegt habe (am Boden entlang/aufrecht; lange Schritte/kurze Schritte; Hände nach unten/Hände zur Seite).

Ergänzt wird die Befragung durch eine statistische Erhebung.

9.6 Ergebnisse

9.6.1 Unterschiede zwischen den Probanden

Zunächst sollen für die drei Altersgruppen, unabhängig von den Versuchsbedingungen, die Zeiten bis zur Öffnung des Notausgangs verglichen werden.

Altersgruppen	davon	Mittel	Min.	Max.
18-25 Jahre	alle Jüngeren	68 sec	24 sec	187 sec
	die Leiteinrichtung nutzen	41 sec	24 sec	67 sec
	die Leiteinrichtung nicht nutzen	122 sec	37 sec	187 sec
26-45 Jahre	alle Mittleren	52 sec	18 sec	107 sec
	die Leiteinrichtung nutzen	44 sec	18 sec	98 sec
älter als 46 Jahre	alle Älteren	58 sec	20 sec	118 sec
	die Leiteinrichtung nutzen	50 sec	20 sec	118 sec
	die Leiteinrichtung nicht nutzen	103 sec	101 sec	106 sec

Bild 9.7: Zeit bis zur Türöffnung – Altersgruppen

Bild 9.7 zeigt die Mittelwerte für die Altersgruppen, daneben Minima und Maxima. Weiterhin ist noch unterschieden, ob die Personen dieser Gruppe die jeweilige Leiteinrichtung nutzten oder nicht.

Die Nutzer der Leiteinrichtung waren bei jeder Altersgruppe im Mittel schneller als die Nicht-Nutzer, die Unterschiede sind sehr hoch. Ein Signifikanztest ist wegen der geringen Anzahl von Nicht-Nutzern nicht sinnvoll.

Ein Vergleich der Zeiten der Nutzer zwischen den Altersgruppen erbringt keine statistisch bedeutsamen Unterschiede (einfaktorielle Varianzanalyse, $\alpha = 0,05$).

9.6.2 Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen

Auswertung der Laufwege und der Zeit bis zum Erreichen des Notausgangs:

Herzstück der Auswertung sind die Videoaufnahmen der Wärmebildkamera, mit deren Hilfe sich die Wege nachvollziehen lassen, die jeder Proband auf der Suche nach dem Notausgang zurückgelegt hat. Diese Laufweg-Analyse und die Zeitmessung werden nun für die drei Versuchsbedingungen verglichen. Bild 9.8 zeigt die Ergebnisse im Überblick, Bild 9.9 fasst die wichtigsten Punkte zusammen. (Details siehe Anhang E).

Optische Bedingung:

Die Analyse der Wärmebildaufnahmen zeigt: In der optischen Bedingung erreichen nur 55 Prozent der Probanden den Notausgang aufgrund der Nutzung der Leiteinrichtung, die hier aus dem fluoreszieren-

den Band, dem Lauflicht und dem Laser besteht. Der Zeitbedarf beträgt im Mittel 43 Sekunden und ist damit sehr kurz. 28 Prozent folgen zwar dem Lauflicht, nicht aber dem Laser (in der Grafik als „teilweise Nutzung“ bezeichnet).

Haptische Bedingung:

Die Videoanalyse ergibt Folgendes: Die haptische Versuchsbedingung, bestehend aus Handlauf und Laser, führt bei 67 Prozent der Fälle zum Auffinden des Notausgangs, allerdings ist der Zeitbedarf hier deutlich höher: Er beträgt 63 Sekunden und ist somit fast um die Hälfte länger als in der optischen Bedingung. Etwa die Hälfte der Versuchspersonen bedient sich von Anfang an des Handlaufs, manche greifen erst gegen Ende der Strecke zu und werden so durch den Bogen Richtung Notausgang gedreht. Manche tasten auch an der Wand entlang und werden letztlich durch den Laser zum Notausgang geführt.

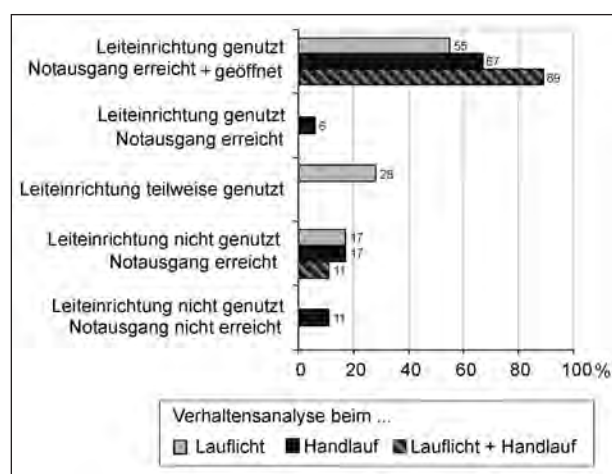


Bild 9.8: Verhaltensanalyse bei den Versuchsbedingungen „optisch“, „haptisch“, „optisch + haptisch“

Leiteinrichtung	Prozent	Zeit		
		Mittel	Min.	Max.
Optische Bedingung <ul style="list-style-type: none"> fluoreszierendes Band bis zu LEDs, Lauflicht mit 7 LEDs, Laser pulst Richtung Ausgang 	55 %	43 sec	20 sec	118 sec
Haptische Bedingung <ul style="list-style-type: none"> Handlauf, an Anfang und Ende markiert, Laser pulst Richtung Ausgang 	67 %	63 sec	24 sec	98 sec
Kombination aus Optik + Haptik <ul style="list-style-type: none"> Handlauf, an Anfang und Ende markiert, Lauflicht mit 7 LEDs, Laser pulst Richtung Ausgang 	89 %	41 sec	18 sec	84 sec

Bild 9.9: Laufweg-Analyse und Zeitmessung Personen, die die Leiteinrichtung nutzen, den Notausgang erreichen und die Tür öffnen

Kombination aus Optik und Haptik:

Die Kombination aus Optik und Haptik zeigt, nach Analyse der Wärmebildkamera-Aufnahmen, die höchste Erfolgsquote: 89 Prozent der Probanden erreichen und nutzen den Notausgang, und dies in durchschnittlich 41 Sekunden. Der Handlauf wird von 56 % von Beginn an genutzt, 6 % fassen gegen Ende an. Die anderen orientieren sich an Lauflicht und Laser.

Statistische Vergleiche:

Ein Vergleich der Zeiten bis zum Öffnen der Notausgangstüre zwischen den drei Bedingungen (optisch/haptisch/optisch + haptisch; nur für Personen, die die Leiteinrichtung nutzen) zeigt keinen signifikanten Unterschied (einfaktorielle Varianzanalyse, $\alpha = 0,05$).

Vergleicht man hingegen die drei Bedingungen hinsichtlich der erfolgreichen Nutzung des Notausgangs (vgl. Bild 9.8, 1. Zeile), so ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den drei Leiteinrichtungen (χ^2 -Test, $\alpha = 0,05$).

Fazit aus der Laufweg-Analyse:

Die besten Ergebnisse werden mit einer Kombination aus optischer und haptischer Leiteinrichtung erzielt, sowohl, was das Erreichen des Notausgangs (sign.), als auch, was die dazu benötigte Zeit (nicht sign.) betrifft. Besonders wichtig ist, dass die Versuchsteilnehmer mit Hilfe des gebogenen Handlauf-Endes und des Laserstrahls zum Queren des Raums bewegt werden konnten.

9.6.3 Unterschiede in der Körperhaltung

Video-Auswertung der Körperhaltung:

Die Auswertung der Videos zeigt interessante Unterschiede:

- Während bei der optischen Versuchsbedingung meist die Hand an der Wand entlang tastet, der Blick sich dann zum Laserstrahl wendet und diesem folgt,
- wendet sich der Proband in der haptischen Bedingung zum Handlauf und lässt die Hand daran entlang streifen.
- In der kombinierten Bedingung streift die Hand am Handlauf entlang, doch ist hier auch zu merken, wie sich die Aufmerksamkeit auf die optischen Hilfen richtet.

Bild 9.10 zeigt typische Wärmebild-Aufnahmen der drei Versuchsbedingungen

Befragungsergebnisse zur Körperhaltung:

Obwohl der Bunker mit Rauch gefüllt war und nur in Bodennähe mit Hilfe von Ventilatoren die Luft einigermaßen rauchfrei gehalten wurde, gingen alle Probanden in aufrechter Haltung durch den Versuch – wie die Video-Analyse eindeutig zeigt. Niemand robbt am Boden entlang oder geht auch nur in die Knie, obwohl das Wissen um bessere Luftverhältnisse im unteren Bereich vorhanden ist (vgl. Internetbefragung, Kapitel 4).

In der Befragung nach dem Versuch geben jedoch einzelne Teilnehmer an, sich „gebückt“ bzw. „am Boden entlang“ fortbewegt zu haben. Die Mehrheit räumt jedoch den „aufrechten Gang“ ein.

Die Schrittlänge wird meist mit „kurz“ beschrieben, in der Kombinationsbedingung wird allerdings von 39 % normale Schrittlänge angegeben – ein Zeichen des sich sicher Fühlens.

Die Handhaltung wird mit „nach vorne“ bzw. „zur Seite“ beschrieben.



Bild 9.10: Typische Körperhaltung bei den Versuchsbedingungen „optisch“, „haptisch“, „optisch + haptisch“

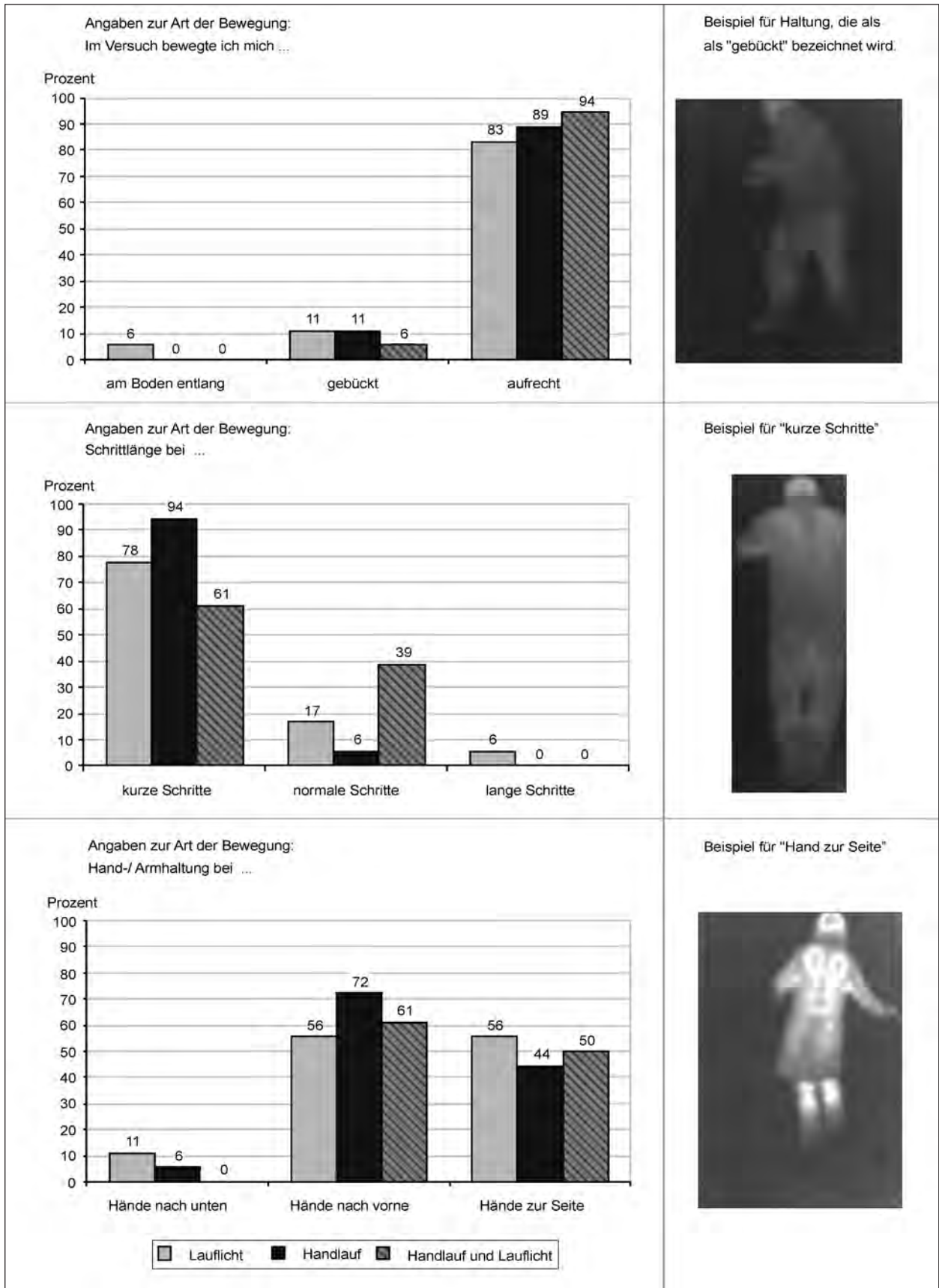


Bild 9.11: Befragungsergebnisse zur Fortbewegung bei den Versuchsbedingungen „optisch“, „haptisch“, „optisch + haptisch“

9.6.4 Wie fühlen sich die Probanden in den verschiedenen Versuchsbedingungen?

Nach dem Versuch wurden die Probanden gebeten, auf einer 5-stufigen Rating-Skala ihre Empfindungen bezüglich der Adjektivpaare

- unsicher – sicher,
- unbelastet – belastet,
- gut orientiert – schlecht orientiert,
- verloren – geborgen

anzukreuzen. In Bild 9.12 sind die Mediane dargestellt. In puncto Sicherheit liegen die Mediane in der neutralen Mitte (alle drei Bedingungen haben hier den Wert 3, die Punkte wurden nur wegen der besseren Sichtbarkeit nebeneinander gezeichnet). Auch bei „Belastung“ und „Geborgenheit“ liegen die Werte nahe beieinander, nehmen den Median von 3, 2,5 oder 3,5 an. Die Orientiertheit bildet eine Ausnahme: Die Probanden in der Kombination aus Optik und Haptik fühlen sich besser orientiert (Median 2) als die anderen (Median 3,5 und 4).

9.6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Eine besondere Herausforderung stellt die Gestaltung einer Leiteinrichtung dar, wenn zum Erreichen der Notausgänge die Tunnelseite gewechselt werden muss. Erkenntnisse zur Gestaltung von Notfalleinrichtungen, die unter diesen Randbedingungen günstig sind, lassen sich auf andere, weniger komplexe Situationen übertragen. Ziel war daher, auf der Basis wahrnehmungsphysiologischer Grundlagen und einer Reihe von Vorversuchen einen Versuchsaufbau zu konzipieren und zu konstruieren, der Versuchsteilnehmer in einem verrauchten Raum dazu bringt, optischen und haptischen Leiteinrichtungen zu folgen, die ursprünglich gewählte Wand zu verlassen, den Raum zu queren und einen Notausgang auf der gegenüberliegenden Seite zu öffnen.

Die besten Ergebnisse erzielt eine Kombination aus optischen und haptischen Hilfen:

- Die Probanden fühlen sich hier nicht nur am besten orientiert,
- sie machen z. T. auch Schritte in normaler Länge,
- die Zeit bis zum Erreichen des Notausgangs ist hier besonders kurz und

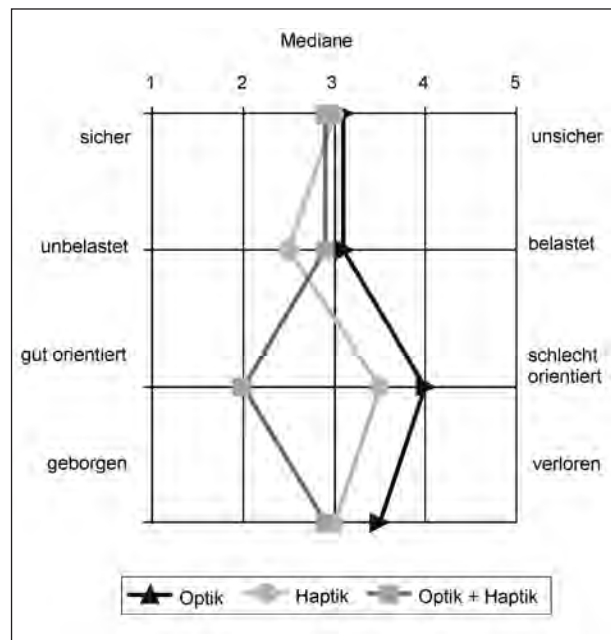


Bild 9.12: Eigenschaften, die den drei Versuchsbedingungen zugewiesen werden – Mediane

- die Erfolgsquote beim Finden und Nutzen des Notausgangs liegt mit 89 Prozent am höchsten.

Erreicht wurde dieses positive Ergebnis durch drei Komponenten:

- einen Handlauf, der an Anfang und Ende mit einer fluoreszierenden Folie markiert ist und am Ende eine 90-Grad-Biegung Richtung Notausgang aufweist,
- einen Lauflicht mit 7 LEDs (LED-Durchmesser 5 mm, gelb-grüne Farbe, Wellenlänge des emittierten Lichts 555 nm), deren Abstand zum Ende hin kürzer wird (anfangs 50 cm, am Ende 20 cm), und
- abschließend ein Dioden-Laser-Modul (Durchmesser von 3 mm, 5 mW, grünes Licht, 532 nm), gerichtet auf den Türgriff des Notausgangs.

Die sieben LEDs und der Laser werden über ein Relais mit einer Taktfrequenz von 1/16 sec angesteuert. Es brennt jeweils nur ein LED und am Ende der Laser, dann beginnt der Umlauf von vorne. Dadurch entsteht eine Scheinbewegung in Richtung Notausgang, die offensichtlich einen Mitzieh-Effekt auslöst und die Probanden zum Queren des Raumes veranlasst.

Die Ergebnisse der Vorversuche und des Hauptversuchs zeigen auf, wie bedeutsam einzelne Gestaltungsparameter sind.

Zunächst wurde – wegen der besseren Sichtbarkeit – mit einem Dauerlaser experimentiert. Der wirkt aber wie eine Barriere und verleitet nicht zum Queren. Die Bedingung „nur Haptik“, d. h. die ausschließliche Verwendung eines Handlaufs mit einem gepulsten Laser war vor allem als „sparsame“ Version, z. B. für ältere Alpentunnel erprobt worden.

Aus den Ergebnissen wird aber deutlich, dass nur die Kombination aus optischen Signalen in Form eines Lauflichts in Verbindung mit dem optischen und haptischen Hinweis zum Queren der Tunnelseite den erwünschten Effekt erzielt.

Selbstverständlich ist es möglich, die hier getesteten Varianten in der Umsetzung noch aufwändiger auszulegen, etwa indem

- der gesamte Handlauf oder die Wand dahinter mit fluoreszierendem Band markiert wird,
- mehrere Reihen von Lauflichtern eingesetzt werden, um die Sichtbarkeit zu erhöhen, wobei die Taktung von 1/16 sec zu beachten ist (Erzeugung einer Scheinbewegung),
- mehrere gepulste Laser in Richtung auf den Notausgang weisen, wobei auch hier unbedingt die Synchronisierung mit dem Lauflicht zu beachten ist.

Die Ergebnisse zeigen aber, dass mit einfachen und kostengünstigen Mitteln die gewünschten Effekte erzielt werden können.

10 Wahrnehmung von akustischen Signalen

Während die Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln optische Belange, etwa die Beleuchtung des Tunnels, verkehrstechnische Beschilderung, Kennzeichnung der Fluchtwege usw., bespricht, ist zur Akustik in Tunneln keine Aussage zu finden (RABT, 2006). Über die Ausprägung des Lärms an sich und die Möglichkeit, durch bauliche Ausführungen den Geräuschpegel im Tunnel einzudämmen, wird nicht gesprochen.

Die Akustik im Tunnel ist als sehr schwierig einzuschätzen, da durch die Bauweise der Lärm an den Wänden reflektiert und damit verstärkt wird.

In diesem Kapitel soll dargestellt werden, ob akustische Signale, seien es Töne, Klangfolgen, Soundsequenzen, Sprachausgaben, trotz der schwierigen akustischen Bedingungen im Ereignisfall zur raschen Evakuierung von Personen aus dem Tunnel eingesetzt werden können. Dabei sind zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen, die anhand von grund-

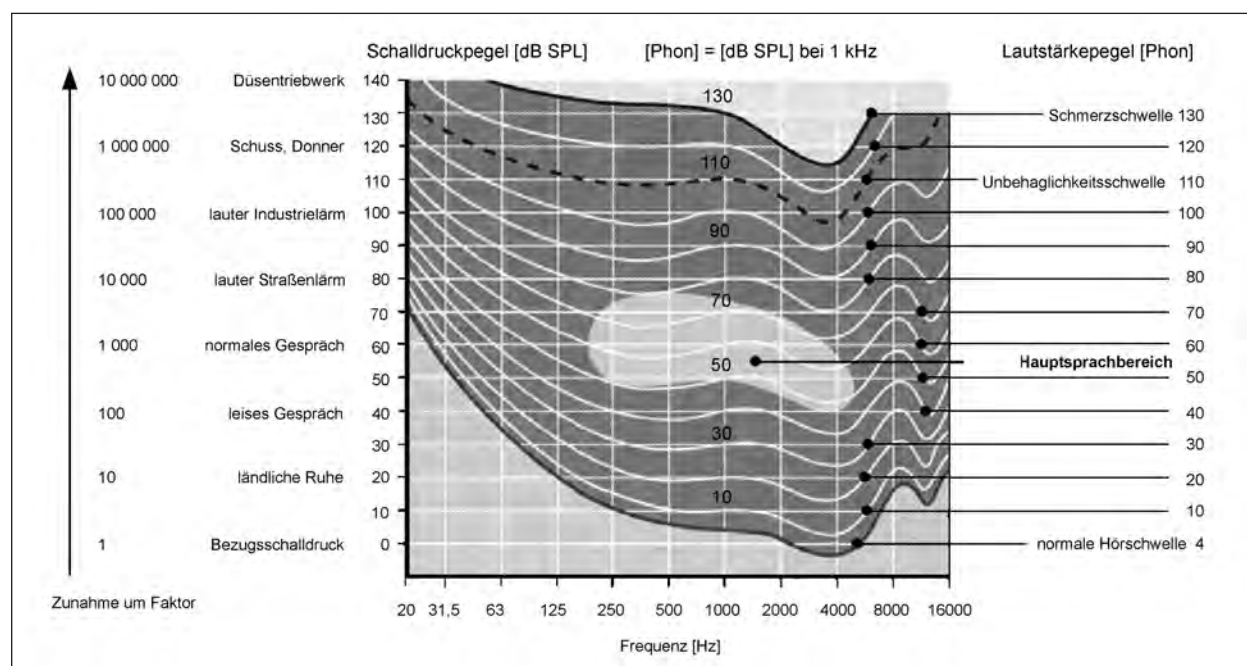


Bild 10.1: Kurven gleicher Lautstärkepegel (Isophone) nach DIN 45630. Die Hörschwelle (unterste schwarze Kurve) hängt stark von der Schallfrequenz ab. Die oberste schwarze Kurve zeigt die Schmerzschwelle, bei einem Lautstärkepegel über 130 Phon. Der Hauptsprachbereich ist hellgrau gezeichnet (aus: BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 418)

legenden Studien anderer Autoren eingegrenzt werden sollen.

10.1 Grundlagen der akustischen Wahrnehmung

10.1.1 Hörbereich

„Wenn Luft(druck)wellen von einer Frequenz zwischen 20 und 16.000 Hz (Hertz = Schwingungen pro Sekunde ...) in einer gewissen Mindestdruckstärke auf unsere Ohren treffen, erregen sie Sensoren im Innenohr und lösen damit im Gehirn eine Schallempfindung aus. Luftdruckwellen dieses Frequenzbereichs werden daher Schall(druck)wellen genannt. Je höher die Schallwellenfrequenz, desto höher der Ton. Schall unter 20 Hz (Infraschall) und über 16.000 Hz (Ultraschall) lösen keine Erregung in unseren Innenohrrezeptoren aus. ... Schallwellen können sich nicht nur in der Luft, sondern auch als Körperschall in festen und flüssigen Körpern ausbreiten“ (BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 416).

Bei einem Ton enthält ein Schallereignis nur eine einzige Sinusschwingung einer bestimmten Frequenz. Sind mehrere Frequenzen vertreten, wird von Klang gesprochen. Bei einem Geräusch enthält ein Schallereignis praktisch alle Frequenzen des Hörbereichs.

„Das Ohr ist im Bereich von 2.000 bis 5.000 Hz am empfindlichsten. ... Besonders im Bereich der tiefen Töne (Basstöne), also der sehr niedrigen Schallfrequenzen, liegen die Hörschwellen um 20-60 dB über denen bei 2.000 Hz“ (a. a. O., S. 417 f.).

Im Tonstudio macht man sich die Eigenheiten des menschlichen Gehörs zunutze. So spricht die Internetseite Musik, Magie und Medizin – Sound Design II (2008) von Magischen Frequenzen: Ein sehr tiefer Bass (Sub-Bass) zwischen 16 und 60 Hz werde oft mehr gefühlt als gehört, vergleichbar dem Donner in der Ferne. Diese Frequenzen, in geringer Dosierung, würden der Musik Kraft verleihen, ein Zuviel davon lasse sie jedoch schlammig wirken.

Und weiter finden wir dort unter dem Stichwort „binaural Beats“: „7-8 Hz, 10 Hz und 40 Hz entsprechen biologischen Rhythmen, mit denen wir mühelos in Resonanz treten. Zwar können wir Frequenzen unter 20 Hz nicht hören, doch mit speziellen Rhythmen, Klangtechniken und Frequenzanhebungen lassen sie sich in den hörbaren Bereich übertragen und unauffällig in Musik einbinden“

(aus: www.mu.sikmagieundmedizin.com/standard_seiten/psychoakustik.html).

10.1.2 Hochttonverlust im Alter

„Mit zunehmendem Alter lässt vor allem die Fähigkeit, hohe Frequenzen wahrzunehmen, nach. ... Dieser Hochttonverlust ist zunächst moderat und nimmt dann mit zunehmendem Lebensalter stark zu“ (HELLBRÜCK, 1993, S. 151 f.). Bild 10.2 zeigt den Verlauf.

Will man die in Bild 10.2 dargestellten Probleme berücksichtigen, so sollte für Signale eine Frequenz gewählt werden, die nicht in den (möglichen) Bereich des Hörverlustes Schwerhöriger oder Älterer fällt. Da der Hörverlust bei hohen Frequenzen beginnt, müssen eher niedrige Frequenzen gewählt werden.

10.1.3 Schallortung und Richtungshören

Zu Schallortung und Richtungshören stellen BIRBAUMER & SCHMIDT (2006) fest: „Eine Schallquelle im Raum wird beide Ohren reizen. Experimente mit Kopfhörern haben gezeigt, dass über die Richtung, aus der der Schall kommt, aufgrund von Zeit- und Intensitätsunterschieden des Hörens der beiden Ohren entschieden wird“ (a. a. O., S. 420).

HELLBRÜCK (1993) referiert, dass dieser Effekt bereits 1948 von CREMER als „Gesetz der ersten Wellenfront“ bezeichnet wurde.

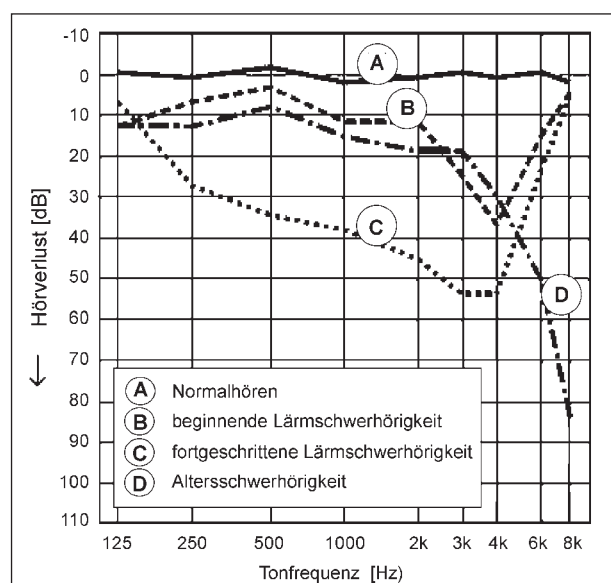


Bild 10.2: Kurve A zeigt den Normalhörenden, Kurve B die beginnende und Kurve C die fortgeschrittene Lärmschwerhörigkeit. In Kurve D ist die Altersschwerhörigkeit dargestellt (aus SCHIERZ & KRUEGER, 2002, S. 50)

„Die Frage, wie weit sich die Schallquelle vom Hörer entfernt befindet und ob sie vor oder hinter ihm liegt, wird dagegen durch die Klangfärbung entschieden, die der Schall durch Resonanzen und Reflektionen an Kopf und Ohrmuscheln erfährt“ (BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 420).

WOODSON berichtet, Geräusche, die von links oder rechts, oben oder unten kommen, könnten gut lokalisiert werden. Komme das Geräusch von vorne oder von hinten, so sei die Lokalisierung weniger genau (WOODSON, 1981, S. 844).

Wichtig für eine Lokalisierung sei die Frequenz. So werde die geringste Genauigkeit zwischen 2.000 und 4.000 Hz erzielt. In den anderen Bereichen sei die Lokalisierungsleistung relativ konstant (a. a. O., S. 844).

CATCHPOLE, McKEOWN & WITHINGTON (2004) teilen die Ergebnisse von CAELLI & PORTER (1980) mit, die feststellten, dass Sirenen, etwa eines Krankenwagens, schlecht lokalisiert werden können. Sie vergleichen „aufschwingende“ und „abschwingende“ Klänge und verschiedene Arten von Rauschen. Basierend auf diesen Versuchen (mit 18 Probanden im Alter von 20 bis 50 Jahren) empfehlen sie, Klänge mit weißem Rauschen zu hinterlegen. Diese Art von Sound könne schneller und genauer lokalisiert werden als Klänge allein oder Klänge, die mit anderen Arten des Rauschens hinterlegt wurden (vgl. CATCHPOLE, McKEOWN & WITHINGTON, 2004). Bild 10.3 zeigt einige Details.

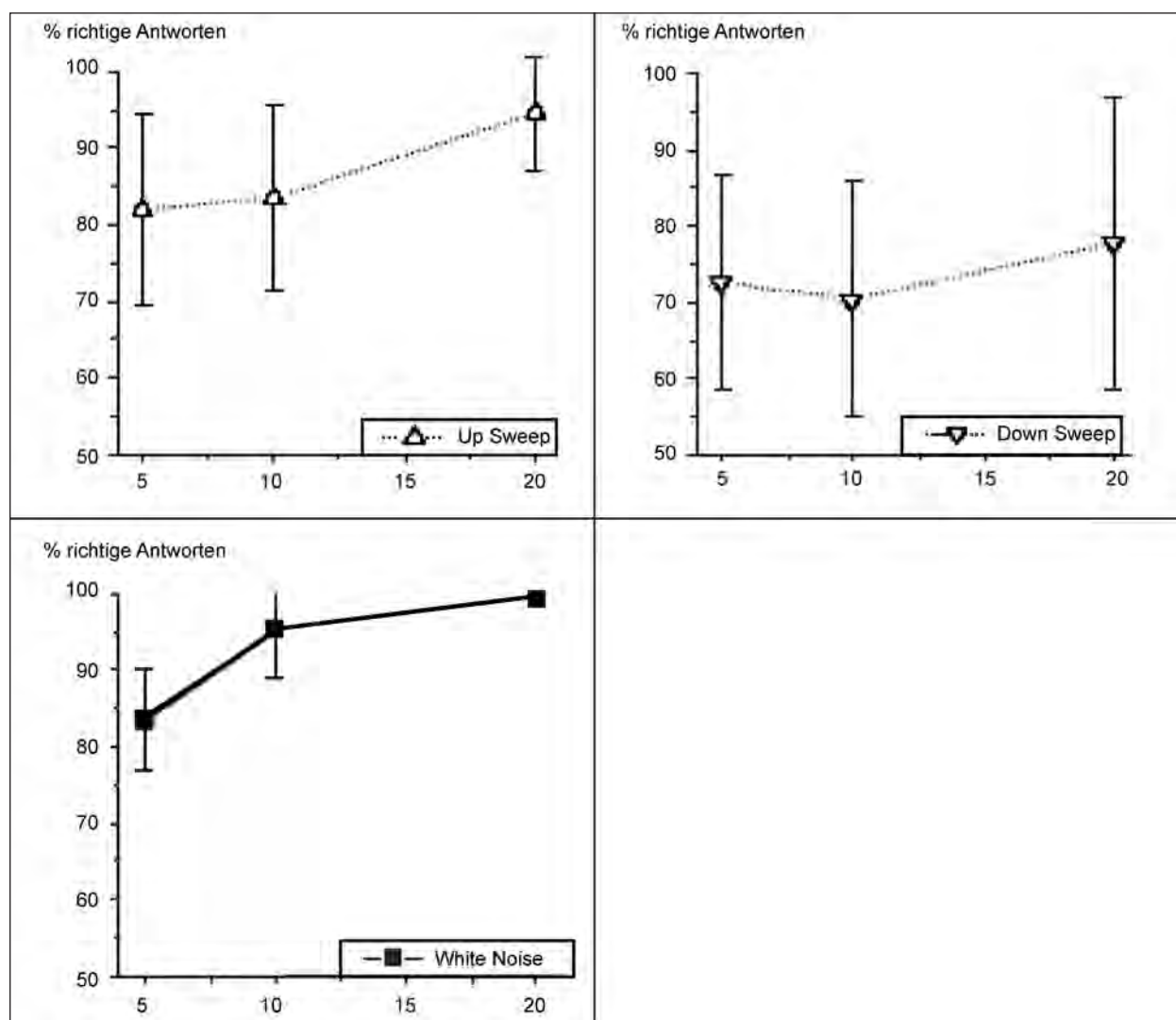


Bild 10.3: Prozentsatz korrekter Antworten bei „weißem Rauschen“ (white noise), „aufschwingendem“ (up sweep) und „abschwingendem Klang“ (down sweep), bei jeweils 5 Darbietungen je Bedingung. Variiert wurde jeweils die Position des Stimulus (links bzw. rechts vom Zentrum, mit 5, 10 oder 20 Grad Verschiebung). (Aus: CATCHPOLE, McKEOWN & WITHINGTON, 2004, S. 755)

BOER & WITHINGTON (2004) zitieren MAKOUS & MIDDLEBROOKS (1990), die die Meinung vertreten, man könne Geräusche mit einer Genauigkeit von 5 Grad lokalisieren, wenn der Sound einen großen Bereich an Frequenzen umfasse. Reine Töne, einfache Tonkombinationen oder schmalbandiger Sound könnten, nach Meinung der Autoren, nicht lokalisiert werden. Das läge an den Reizen, die an das Gehirn übermittelt werden. Die Genauigkeit von 5 Grad sei zwar geringer als bei räumlicher Sicht, genüge jedoch, wenn es um Überlebensfragen gehe (a. a. O., S. 1132 f.).

10.2 Ton-Signal oder Sprache?

WOODSON (1981) empfiehlt Töne bzw. Klänge als Signal, wenn

- eine schnelle Reaktion erforderlich ist,
- verbale Erklärungen und Anweisungen nicht nötig sind, um die Bedeutung des Signals zu erkennen,
- die Bedeutung des Signals bekannt ist,
- Aufmerksamkeit für eine Nachricht erzeugt werden soll,
- Lärmbedingungen das Verstehen gesprochener Sprache verhindern,
- Sprachkanäle überfordert sind.

Gesprochene Mitteilungen empfiehlt er hingegen, wenn

- die Hörer die Signale nicht kennen,
- mehr Flexibilität in der Mitteilung erforderlich ist,
- Missverständnisse vermieden werden sollen,
- die Quelle der Information erkannt werden soll,
- die Umgebung so stressig ist, dass der Hörer die Bedeutung des Tons vergisst (WOODSON, 1981, S. 558).

10.3 Psychologische Komponenten

10.3.1 Aufmerksamkeit

Um auditive Aufmerksamkeit zu erzielen, empfiehlt WOODSON (1981)

- ein markantes Signal, das man gut von anderen unterscheiden kann. Damit es sich gut von an-

deren Geräuschen abhebt, sollte es unwahrscheinlich sein.

- Zur Alarmierung sollte mehrstufig vorgegangen werden, z. B. zunächst ein plötzlich einsetzender (Initial-)Ton, dann ein kritisches Signal, gefolgt von einer Sprachinstruktion, falls sie dafür geeignet ist.
- Durch das Alarmsignal soll die Aufmerksamkeit in den ersten 0,5 Sekunden fokussiert werden, die erforderlichen Informationen sollen innerhalb von 2,5 Sekunden übermittelt werden.
- Das Signal sollte mindestens 10 dB über dem Geräusch-Niveau der Umgebung liegen. Allerdings sollte es nicht lauter als 110 dB sein (a. a. O., S. 562).
- Die Frequenz des Signals soll sich auf einen Bereich zwischen 250 und 2.500 Hz konzentrieren, Komponenten unter 2.000 Hz sorgen für gute Erkennbarkeit (a. a. O., S. 559).
- Warngeräusche bei starkem Umgebungslärm sollten sich auf ein enges Frequenzband konzentrieren, das ein Signal-to-Noise-Verhältnis von 5:1 erreicht. Die Signalstärke am Ohr sollte ca. 300 mW betragen (a. a. O., S.561).

10.3.2 Dringlichkeit

ARRABITO, MONDOR & KENT untersuchten die Dringlichkeit von Signalen, die als Warnung in einem Helikopter eingesetzt werden sollen (n = 25 Piloten und 50 andere Personen, 18 bis 52 Jahre alt). Dabei wurde von ca. 80 % der Probanden der ELT-Alarm, eine multi-frequenzielle, intermittierende Sirene, als „am dringendsten“ wahrgenommen. An zweiter Stelle (53 %) liegt das Signal „Low Rotor“, ein kontinuierliches „Whoop“ mit niedriger Tonhöhe. Im Gegensatz zu den anderen Signalen hatten diese beiden multiple Frequenzkomponenten, deren Intensität in regelmäßiger Art und Weise moduliert war, was ihnen eine sirenenartige Qualität gab (vgl. Bild 10.4). Allerdings fand der Test in einem ruhigen Raum mit einem Geräuschpegel unter 50 dB (A) statt, der Alarm wurde über Kopfhörer mit einer „komfortablen“ Lautstärke von 76 dB (A) eingespielt (vgl. ARRABITO, MONDOR & KENT, 2004).

Weitere Experimente zur Dringlichkeit von Signalen stammen von HAAS & EDWORTHY (1996). Hier werden Lautsprecher nahe dem rechten Ohr der Probanden positioniert und drei Grundfrequenzen

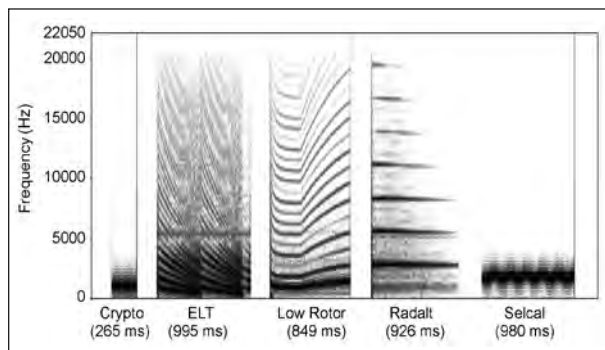


Bild 10.4: Analyse von Helikopter-Alarm-Signalen. Am dringlichsten wird „ELT“ eingestuft, gefolgt von „Low Rotor“ (aus ARRABITO, MONDOR & KENT, 2004, S. 825)

untersucht (n = 30 Studenten). Die Grundfrequenz von 200 Hz enthält noch weitere Anteile (400, 600, 800 und 1.000 Hz), ebenso die Grundfrequenz mit 500 Hz (1.000, 1.500, 2.000 und 2.500 Hz) und die mit 800 Hz (1.600, 2.400, 3.200 und 4.000 Hz). Auch die Intervalle zwischen den Impulsen wurden variiert: 0, 250 und 500 ms. Die wahrgenommene Dringlichkeit nimmt zu, je höher die Grundfrequenz liegt (die höchste hier: 800 Hz) und das Intervall zwischen den Impulsen abnimmt (hier: 0 ms) (vgl. HAAS & EDWORTHY, 1996).

Auch von BURT, BARTOLOME, BURDETTE & COMSTOCK (1995) wurden Signale auf ihre Dringlichkeit untersucht. Probanden waren 6 Studenten im Alter von 20 bis 30 Jahren. Die Signale wurden mit 75 dB (A) bei einem Lärmpegel von 50 dB (A) präsentiert. Als besonders dringlich wurde ein Signal mit zufälligen harmonischen Folgen und einer Grundfrequenz von 146,8 Hz gewählt, als weniger dringlich wurden Stimuli mit einer Grundfrequenz von 523,3 Hz, 10 % unregelmäßigen bzw. regulären harmonischen Folgen eingestuft. (Anmerkung: Die Frequenz von 146,8 Hz entspricht im Deutschen der Note d, auch kleines d genannt (engl. D3). 523,3 Hz entsprechen der Note c“, zweigestrichenes c, im Englischen C5.)

CATCHPOLE et al. (2004) vergleichen „aufschwingende“ und „abschwingende“ Klänge und verschiedene Arten von Rauschen. Der „aufschwingende“ Klang wird dabei als besonders dringlich empfunden (CATCHPOLE, McKEOWN & WITHINGTON, 2004).

10.3.3 Situationskompatibilität

Das Signal soll kompatibel zur Situation sein. Dabei ist zu beachten, dass

- eine gesprochene Nachricht leicht durch andere gesprochene Nachrichten verdeckt wird,
- ein spezifischer Ton leicht durch andere ähnliche Signale (Töne) und
- jedes akustische Signal durch häufige, extrem laute und schlagartige Geräusche maskiert werden kann.
- Allerdings sollen Signale, die der allgemeinen Konvention nach für andere reserviert sind (z. B. für die Feuerwehr, die Polizei), nicht verwendet werden (WOODSON, 1981, S. 560 f.).

WOODSON empfiehlt, Extrembereiche zu vermeiden. Sowohl die Tonstufe als auch die Lautstärke, sollten im mittleren Bereich des Hörvermögens liegen (a. a. O., S. 561).

Bei unbekanntem bzw. schwer zu durchdringendem Umgebungslärm biete sich die Verwendung einer Frequenz an, die durch das gesamte Spektrum läuft. Außerdem soll das Auditive mit optischen Signalen kombiniert werden (a. a. O., S. 561).

10.3.4 Maskierung und Verdeckung

Geräusche, etwa von Fahrzeugen, können dazu führen, dass beispielsweise ein Sprecher nicht mehr verstanden wird oder Töne nicht mehr wahrgenommen werden. Man nennt dies Maskierung oder Verdeckung. Erst eine entsprechende Steigerung der Lautstärke kann im Normalfall Abhilfe schaffen.

Um Effekte der Verdeckung quantitativ genau angeben zu können, wird die sog. Mithörschwelle gemessen. Sie gibt den Schalldruckpegel eines Testschalls (z. B. sinusförmiger Testton) an, den dieser haben muss, um neben dem Störschall gerade noch wahrgenommen, also mitgehört, zu werden (vgl. BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006, S. 420).

SUST & LAZARUS (2003) diskutieren die Norm ISO 9921-1, die 1996 überarbeitet wurde: Sie bemängeln, die Sprachverständlichkeit auf Qualitätsskalen sei erst nachträglich einbezogen und damit nicht ausreichend dokumentiert worden. Ihren eigenen Untersuchungsergebnissen zufolge (mit 4 Sprechern), bei denen es um Lärm in der Schule ging, müsste das Signal-Geräusch-Verhältnis größer sein als in der Norm angegeben (siehe Bild 10.5).

Bewertung	ISO 9921		SUST & LAZARUS	
	STI	Signal-Geräusch-Verhältnis in dB	STI	Signal-Geräusch-Verhältnis in dB
excellent	> 0,75	ab 7,5	> 0,95	ab 13
good	0,6 bis 0,75	3 bis 7,5	0,7 bis 0,95	6 bis 13
fair	0,45 bis 0,6	-1,5 bis 3	0,5 bis 0,7	0 bis 7
poor	0,32 bis 0,45	-6 bis -1,5	0,3 bis 0,5	-6 bis 0
bad	< 0,32	unter -6	< 0,3	unter -6

Bild 10.5: Zuordnung der Qualitätsskala zu Sprachverständlichkeitsmaßen und Signal-Geräusch-Verhältnissen auf der Basis von ISO 9921 und den Ergebnissen von SUST & LAZARUS (2003, S. 194), wobei: STI = Speech Transmission Index, Grad der Sprachübertragung

Eine Simulator-Studie von BELZ, ROBINSON & CASALI (1999) zur Vermeidung von Seiten- und Auffahrunfällen vergleicht Displays, konventionelle Warntöne und sog. „auditive Icons“. 24 Lkw-Fahrer im Alter von 19 bis 51 Jahren nehmen am Versuch teil. Die konventionellen Warntöne für die Auffahr-Warnung vorne bestehen aus reinen Tönen mit 500, 1.000, 2.000 und 3.000 Hz, die gleichzeitig für 0,35 Sekunden erklingen. Für die Seiten-Warnung wird ein 500-Hz-Ton mit Sägezahn-Charakteristik verwendet. Das auditive Icon bestand vorne aus dem Quietschen von Reifen und seitlich aus einem langen Hup-Signal. Obwohl die Warnsignale durch Lkw-Fahrgeräusche stark maskiert wurden, führten Reifen-Quietschen und Hup-Signal zu schnelleren Reaktionen (122 ms schneller) als die konventionelle Warnung. Durch visuelle Displays konnte die Reaktionszeit nicht reduziert werden.

ROBINSON & CASALI (1995) stellten sich und ihren 12 Probanden (18 bis 73 Jahre alt) die Frage, ob normal hörende bzw. Personen mit einem merklichen Hörverlust (45 bis 50 dB HL = hearing level) den Rückwärts-Fahr-Alarm eines Caterpillars hören können, selbst wenn sie Kopfhörer tragen. Die Autoren stellen fest, dass dies sogar bei einem geringen Abstand zwischen Signal und Rauschen (0 dB) der Fall ist.

10.3.5 Intuitive Verständlichkeit der Bedeutung von Sound

BOER & WITHINGTON (2004) untersuchten die Frage, ob ein bestimmtes Sound-Ereignis intuitiv richtig verstanden werde. In einem mit Theater-rauch gefüllten Tunnel (Sichtweite 0,5 bis 5 Meter),

dem Benelux-Tunnel in Rotterdam mit zwei Spuren, Notausgängen in jeweils 100 Metern Abstand, wurde eine Teststrecke von 200 Metern abgesteckt. Der Rauch wurde aus Süd-Richtung eingeblasen. Je zwei Notausgänge lagen in Nord-Richtung, einer in Süd-Richtung. Über den Notausgängen waren jeweils zwei Lautsprecher, Rückseite an Rückseite, in einem Winkel von 10 Grad zur Wand, montiert. Als Sound wurde weißes Rauschen (random noise) mit einer Frequenz von 5 Hz pulsierend und einem Verhältnis von Signal zu Pause von 3:1 verwendet. Der Frequenzbereich umfasste 100 bis 16.000 Hz, die Lautstärke betrug in einem Abstand von 25 Metern 78 bis 84 dB (A). Der Sound wurde als schnelle Sequenz schlagartiger Geräusche wahrgenommen, ähnlich einer Dampfmaschine.

Den 97 Probanden im Alter zwischen 15 und 70 Jahren wurde vor Versuchsbeginn gesagt, dass sie mit einem Bus in einen Tunnel gebracht würden, der mit Rauch gefüllt sei, der Rauch aber harmlos sei. Getestet würde die Evakuierung bei Feuer und Rauch. Sie sollten zu Fuß flüchten, um Sicherheit oder einen schützenden Ort zu finden. Dabei sollte nicht auf andere geachtet werden. Das Feuer sei eine Imitation, das Ganze ein Spiel. Die Probanden sollten sich vorstellen, es handle sich um giftigen Rauch, und ihre persönliche Sicherheit beachten. Sie sollten nicht in Panik geraten und ruhig bleiben. Der Versuch würde höchstens 30 Minuten dauern. Die Teilnehmer wurden im Abstand von 40 Sekunden aus dem Bus entlassen.

Es gab drei verschiedene Instruktionen, eine für jeweils 1/3 der Probanden. Als Minimum erfuhren sie die o. g. Punkte. Bei der zweiten Instruktionsversion wurde hinzugefügt, der Tunnel sei mit Lautsprechern ausgestattet, die bei der Orientierung helfen würden. Man solle auf die Lautsprecher hören. In der dritten Version erfuhren die Probanden zusätzlich, dass die Lautsprecher über den Notausgängen angebracht seien und es ihre Aufgabe wäre, auf die Lautsprecher zu hören und zu den Notausgängen zu gehen.

Bild 10.6 verdeutlicht die Ergebnisse dieses Experiments. Die Notausgänge Nr. 6, 7 und 8 werden nur von insgesamt 35 % (1 + 13 + 21) der Probanden gefunden. 65 % der Teilnehmer werden von Helfern im Tunnel abgefangen, da sie an den Notausgängen vorbei gegangen sind. Eigentlich sollten die Personen vom Rauch weglaufen, jedoch gehen 52 % der Probanden in die Richtung, aus der der Rauch kommt!

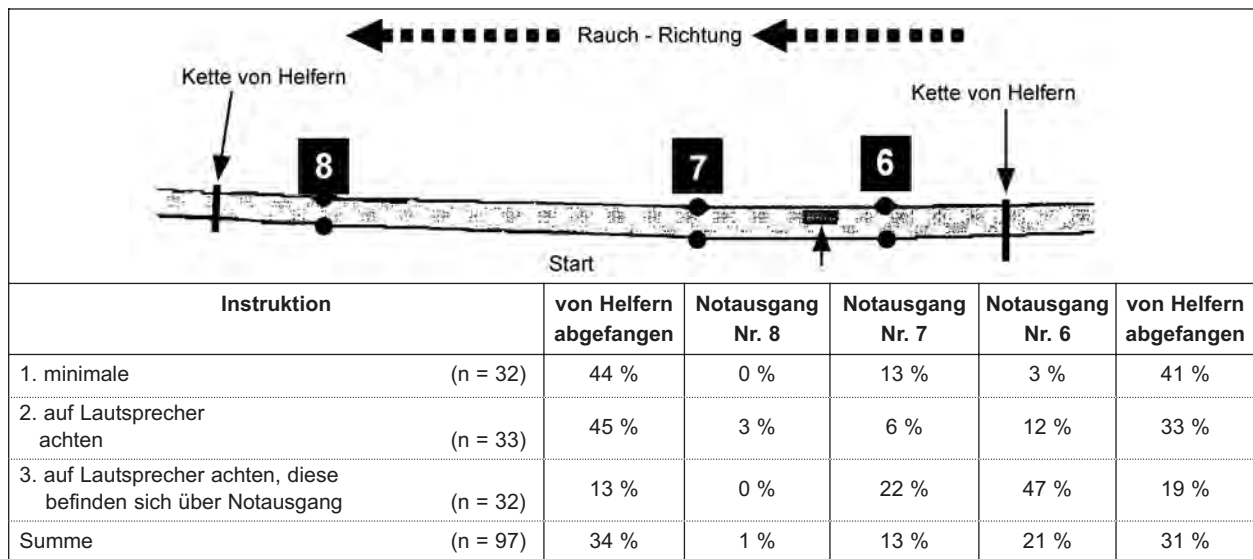


Bild 10.6: Wer läuft wohin? Rechts und links sind Helfer, Nr. 6, 7 und 8 bezeichnen Notausgänge (nach den Ergebnissen von BOER & WITHINGTON, 2004, S. 1138, Bild S. 1135)

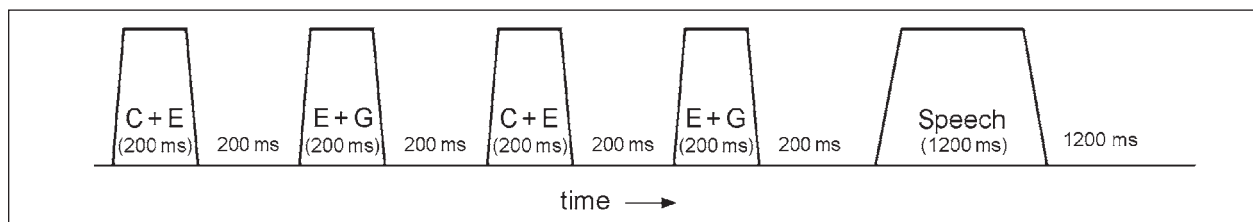


Bild 10.7: Sog. TNO-Sound, Dinnerglocke mit zwei harmonischen Tönen, die wiederholt werden, und Sprachausgabe „Exit here“. Die Zeitachse zeigt 50 % Stille, dann die Sounds, die alle 4 Sekunden wiederholt werden. Die Buchstaben benennen die Töne auf der Tonleiter (aus BOER & van WIJNGAARDEN, 2004, p. 35)

Der vom Startpunkt aus gesehen nächstgelegene Notausgang, Nr. 6, wird von 47 % der Gruppe mit der umfangreichsten Instruktion (3.) aufgesucht, allerdings laufen diese Leute in die falsche Richtung (zu der Rauchquelle hin). Immerhin laufen 22 Prozent dieser Gruppe in die richtige Richtung zum nächsten Notausgang (Nr. 7).

Signifikanztests zeigen Unterschiede zwischen den Instruktionsbedingungen 1 und 3 sowie zwischen den Bedingungen 2 und 3.

Aufgrund der wenig überzeugenden Ergebnisse schlagen die Autoren vor, den Sound mit Sprachfragmenten wie „Exit here“ zu ergänzen.

Leider gibt es bei diesem Experiment keine Kontrollbedingung, also eine Versuchsbedingung, bei der nichts erklärt wird – wie dies im Ereignisfall vermutlich sein wird.

BOER & van WIJNGAARDEN (2004), ebenso wie Van WIJNGAARDEN, BRONKHORST & BOER (2005), berichten nun über ein weiteres Experiment. Die Bedingungen waren wie oben beschrie-

ben, nur wurde ein neuer Sound erprobt, siehe Bild 10.7. Verwendet wird eine glockenspielartige Sequenz von zwei harmonischen Zwei-Ton-Komplexen, die mit den Tönen C und E beginnt (Grundfrequenz 262 und 330 Hz), 200 ms dauert, gefolgt von einer Pause (200 ms) und den Tönen E und G (Grundfrequenz 330 und 392 Hz), Pause etc. Anschließend folgen die gesprochene Nachricht „Exit here“ und eine Pause von 1.200 ms.

Bei diesem Experiment weisen die Lautsprecher eine kugelförmige Richtcharakteristik auf. 75 Probanden werden mit der Instruktion (1) aus dem Bus geschickt. Nun erreichen immerhin 86 % den Notausgang. Alle, außer einem Probanden, gingen in Fahrtrichtung. Nicht erwähnt wird in den beiden o. g. Publikationen, dass die Probanden, der früheren Beschreibung nach, auf den Rauch zugingen, was im Ereignisfall präkäre Folgen haben dürfte.

Berichtet wird, dass es für die Versuchsteilnehmer schwierig war, die Wand, für die sie sich entschieden hatten, zu verlassen und die Fahrbahn zu überqueren, um zum Lautsprecher und damit zum Not-

Instruktion	von Helfern abgefangen	Notausgang Nr. 8	Notausgang Nr. 7	Notausgang Nr. 6	von Helfern abgefangen
1. minimale (n = 75)	0 %	-0 %	1 %	85 %	13 %

Bild 10.8: Wer läuft wohin? Ergebnisse mit dem TNO-Sound (aus: BOER & van WIJNGAARDEN, 2004, S. 38)

ausgang zu kommen. Vorgeschlagen wird ein großer Pfeil, der die Wand entlang verläuft und zum Ausgang zeigt. Nicht beantwortet wird die Frage, wie dieser Pfeil bei Rauch gesehen werden soll.

10.4 Neue Technologie – als Hilfsmittel?

Neue Software:

Das Fraunhofer Institut Digitale Medientechnologie, IDMT, Ilmenau (2005) hat in Zusammenarbeit mit den Bregenzer Festspielen und der LAWO AG einen Richtungsmischer für Echtzeit-Anwendungen entwickelt. Dabei macht man sich die Funktionsweise des Richtungshörens zunutze: Die erste Schallwelle, die beim Hörer eintrifft, entscheidet über die wahrgenommene Richtung. Verwendet man Richtungslautsprecher und schaltet weitere Lautsprecher hinzu, die um ca. 10 bis 100 Millisekunden zeitverzögert sind und einen entsprechend abstrahlenden Schallpegel besitzen, so kann man in einem Bereich den Eindruck entstehen lassen, der Ton komme direkt von einer bestimmten Position (bei den Bregenzer Festspielen: vom Solisten). Bewegt sich die Schallquelle, so wandert der Ton mit. Mit der neu entwickelten Software des Richtungsmischers wird eine gleichzeitige Bewegung von 32 Schallquellen in Echtzeit über die bestimmten Richtungsgebiete ermöglicht. Die Bedienung erfolgt mit einem Richtungsmischpult, allerdings ist dazu ein Tonmeister erforderlich.

Der Informationsdienst Wissenschaft teilte 2008 mit, die Firma Iosono und das Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie hätten eine völlig neue Technologie entwickelt. Man müsse nun nicht mehr, um den Sound zu „bewegen“, von einem Kanal (mono und stereo) zum nächsten „springen“, sondern der Raum sei gefüllt mit Sound. Man könne die Sound-Ereignisse sich bewegen lassen, zum Ohr des Zuhörers, durch seinen Kopf hindurch, durch den Raum, sogar direkt hinter der Wand.

Es wäre überlegenswert, ob ein derartiges System für Evakuierungen von Personen in Tunnel in Be-

tracht kommt. Zu klären wäre, ob man damit beispielsweise Personen, die evakuiert werden müssen, gezielt zum richtigen Ausgang leiten kann. Es müssten vorprogrammierte Tools für einzelne Tunnelabschnitte zur Verfügung stehen, die Nutzung einfach und die Bedienfreundlichkeit extrem hoch sein. Sollte zur Bedienung des Systems ein Tonmeister erforderlich sein, wird der Einsatz eines derartigen Systems aus ökonomischen Gründen unrealistisch.

Neuartige Lautsprecher:

MAYER & REIMANN (2008) berichten über Tests mit neu entwickelten Hornlautsprechern. Für herkömmliche Lautsprecher stellten sie in 12 gemessenen Tunneln mit schallharter Oberfläche (Beton, Fliesen, Asphalt, Brandschutzplatten) im unteren bis mittleren Frequenzbereich (125 Hz-500 kHz) Nachhallzeiten innerhalb eines recht konstanten Bereichs von 6-8 Sekunden, mit Extremwerten bei knapp 5 bzw. 10 Sekunden, fest (MAYER & REIMANN, 2008, S. 22). Sprachübertragungen seien unter diesen Bedingungen weitestgehend ausgeschlossen. In einem Projekt der BAST wurde das Konzept der synchronisierten Längsbeschallung (SLASS = synchronised longitudinal announcement speaker system) zur Sammelrufbeschallung einer gesamten Tunnelröhre entwickelt (REIMANN & LÖWER, 2009). Moderne Grenzflächenhörer arbeiten mit hohem Schalldruck und bündeln den Schall so, dass er möglichst spät an der Tunnelwand „anstößt“. Um die gesamte Tunnellänge zu versorgen, wird ca. alle 35 bis 70 Meter ein weiterer Lautsprecher benötigt. Um Echos zu vermeiden, wird eine präzise elektronische Verzögerung des abgestrahlten Schallsignals bei Lautsprecher n + 1 eingesetzt, wie Bild 10.9 zeigt.

Die Autoren berichten von einer deutlichen Verbesserung der Sprachverständlichkeit – gemessen mit Hilfe des Sprachverständlichkeitsindex STI (nach LAZARUS & SUST, 2007).

So hätten, bis auf eine Ausnahme, alle Hornlautsprecher (je 1 Horn) mit STI > 0,4...0,6 eine ausreichende Verständlichkeit erreicht – allerdings in Abwesenheit jeglichen Störlärms (MAYER & REI-

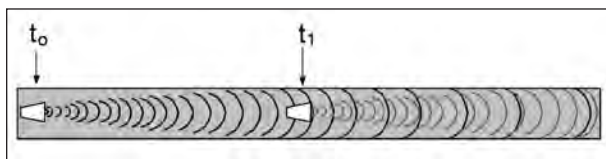


Bild 10.9: Schallbündelnde Hochleistungslautsprecher mit Signalverzögerung, wobei:
 t_0 = Sprachsignal unverzögert
 t_1 = Sprachsignal verzögert = $t_0 + x$ ms
 (nach: REIMANN & LÖWER, 2009, S. 81)

MANN, 2008. S. 27). Nach Angaben der SZon (2009) seien Fachleute vom Test im Hohentwiel-Tunnel zufrieden gewesen.

10.5 Schlussfolgerungen aus den bisher vorliegenden Studien

Die Berücksichtigung der grundlegenden Erkenntnisse über akustische Wahrnehmung und die Ergebnisse angewandter Forschung zeigen, dass die Suche nach einem optimalen Signal viele Parameter berücksichtigen muss und noch nicht abgeschlossen ist.

Bezüglich der physikalischen Eigenschaften sollte das akustische Signal im Bereich von 2.000 bis 4.000 Hz liegen, hier ist das Ohr am empfindlichsten und der Hochtonverlust im Alter berücksichtigt. Jedoch ist gerade für diesen Bereich die Lokalisierung schwierig.

Vergrößert man den Bereich und verwendet beispielsweise weißes Rauschen, das in Laborversuchen gut zu orten war, so steht man dem Problem gegenüber, dass der semantische Gehalt fehlt, um ein Flucht- oder Evakuierungsverhalten auszulösen.

Die Signale müssen einen positiven Signal-Störgeräusch-Abstand haben, unter Berücksichtigung des Lärmspektrums und der Halligkeit im Tunnel. Zu diesem Bereich lassen sich in der Literatur keine zufrieden stellenden Antworten finden.

Obwohl Frequenzen unter 20 Hz nicht hörbar sind, können sie trotzdem wahrgenommen (vgl. Kapitel 8 „Haptische Wahrnehmung“) und möglicherweise für die Verhaltenssteuerung eingesetzt werden.

Auch bezüglich der Frage, ob Töne oder Sprache zu verwenden sind, gibt es keine eindeutigen Ergebnisse. Mit Sprache kann mehr Information übermittelt werden, jedoch nur, wenn die verwendete Sprache verstanden wird (akustisch und seman-

tisch, vgl. Kapitel 12 „Sprachausgaben“). Töne haben nicht nur den Vorteil der Sprachfreiheit, sie können möglicherweise unter den schwierigen Hörbedingungen im Tunnel besser gehört und geortet werden.

Ziel eines Experiments ist daher, akustische Signale zu finden, die unter Berücksichtigung möglichst vieler Aspekte optimal wirken.

11 Akustische Versuche

11.1 Zielsetzung

Die Experimente zur Akustik verfolgen zwei Ziele: Zum einen geht es um die in Kapitel 2 beschriebene Problematik der „Sitzenbleiber“: Sie unterschätzen die Dramatik einer Situation und erleben ihr Fahrzeug als „Schutzraum“. Die Konsequenz aus dieser Einstellung ist, dass die Flucht zu spät angetreten wird, etwa wenn der Tunnel bereits verrauchert und die Sichtbarkeit der Fluchtwegkennzeichnung zu gering ist (vgl. EBERBACH et al., 2007; BIESKE, 2003). Zudem können akustische Signale bei schlechter Sicht die optischen Fluchtsymbole unterstützen oder im Extremfall ersetzen.

Es stellt sich somit die Frage: Gibt es bei einem gravierenden Ereignis im Tunnel, etwa einem Brand, adäquate Mittel, Personen zum schnellen Verlassen ihres Fahrzeugs zu bewegen und sie zum Notausgang zu locken?

Gesucht wird daher

- das beste akustische Signal, das die Fahrzeuginsassen zum Verlassen des Fahrzeugs veranlasst, und
- das beste akustische Signal, das Personen zum Notausgang lockt.

11.2 Versuchsplanung

Zum einen sollte eine Reihe neuartiger Sounds untersucht werden. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden in einem zweiten Versuch herkömmliche Sprachinstruktionen analysiert. Beide akustischen Versuche sind in Aufbau und Ablauf identisch gestaltet und gliedern sich in zwei Teile:

- Im ersten Teil hat die Testperson die Aufgabe zu entscheiden, aus welcher Richtung ein Signal kommt. Dazu werden, parallel zu typischem

Tunnellärm, unterschiedliche „positive“ Signale aus verschiedenen Richtungen des Raumes eingespielt (jeder Sound aus jeweils 4 Richtungen, sortiert nach Latin Square, Reihenfolge für jeden Probanden anders gemischt). Gemessen werden die Qualität der Ortung sowie die Zeit, die zur Reaktion benötigt wird. Die Darbietung eines Signals endet, sobald der Proband die Entscheidungstaste drückt.

- Im zweiten Versuchsteil werden dem Probanden Signale zur Bewertung vorgespielt: „positive“ Signale, von denen angenommen wird, dass sie eine Person zum Notausgang locken könnten, und „aversive“, die zum Verlassen des Fahrzeugs auffordern sollen. Auch hier ist die Reihenfolge der Signale von Person zu Person verschieden. Die Darbietungszeit beträgt 8 Sekunden. Gefragt wird nach der Bedeutung eines Sounds, der Handlungskonsequenz und den Eigenschaften (Fragebogen). Die Mimik des Probanden wird aufgezeichnet.

11.3 Versuchsteilnehmer

Der erste Versuch wird mit insgesamt 40 Probanden, der zweite mit 36 Probanden, jeweils 50 % Männer und 50 % Frauen, durchgeführt. In etwa der Alterspyramide folgend, setzt sich die Stichprobe zusammen aus 8 jüngeren Probanden, 16 Probanden der mittleren Altersgruppe und 16 (bzw. 12) älteren Probanden.

Bild 11.1 zeigt die Altersverteilung, das Durchschnittsalter der jeweiligen Gruppe, den Führerscheinbesitz und die Jahreskilometerleistung der Probanden des 1. Versuchs. Die Kenngrößen der 2. Gruppe sind nahezu identisch.

Betrachtet man die Stichproben insgesamt, so reichen die Spanne des Führerscheinbesitzes von 2 bis zu 48 Jahren, die Jahreskilometerleistung von 0 bis 50.000 km/Jahr und die Tunnelnutzung von sel-

Gruppe	Alter (Jahre)	Alter im Mittel	Fahrerlaubnis (Mittel)	km/Jahr (Mittel)
Jüngere	18-25 J.	22,3 J.	seit 5 J.	14.000 km/J.
Mittlere	26-45 J.	32,3 J.	seit 14 Jahren	19.400 km/J.
Ältere	46-65 J.	54,0 J.	seit 32 Jahren	13.300 km/J.

Bild 11.1: Versuchsteilnehmer

ten (bei 40 %) über gelegentlich (bei 40 %) bis zu häufig (bei 20 %).

11.4 Versuchsaufbau

11.4.1 Versuchsaufbau für Versuchsteil 1 (beide Versuche)

Sounds:

Bei unserer Suche nach „lockenden“ Sounds gingen wir davon aus, dass sich Personen im Tunnel in einer Gefahrensituation befinden. Was könnte sie zum Notausgang locken? Es sollten Geräusche sein, die nicht mit dem Tunnel selbst in Verbindung gebracht werden, wohl aber mit Sicherheit und Entspannung. Theoretisch sind in der Natur vorkommende und künstlich erzeugte Geräusche denkbar. Aufgrund von Vorüberlegungen und der Ergebnisse in Kapitel 10 wurden Vogelstimmen, Musik, die menschliche Stimme in verschiedenen Stimmlagen mit gesprochenem oder gesungenem Text in die engere Wahl gezogen.

Nun ist es keineswegs so, dass ein Sound, der ohne Hintergrundgeräusche geeignet erscheint, sich in der Lärmumgebung (siehe Hintergrundgeräusche) und der Halligkeit eines Tunnels bewährt. Anhand einer Serie von Vorversuchen und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Lärmmessungen (Kapitel 6.2) wurden die Sounds eingegrenzt.

Aus den Gesängen verschiedener Vögel erwiesen sich die komplexen Melodien der Amsel, der Singdrossel und des Rotkehlchens den einfach strukturierten Gesängen, etwa des Sperlings bzw. der Mehlschwalbe, überlegen, sowohl was die Hörbarkeit unter Lärmbedingungen als auch das Orten der Sound-Quelle betraf.

Bei Musikinstrumenten fiel zunächst das Augenmerk auf Streichinstrumente (Geige, Cello) und auf Blasinstrumente (Flöte, Trompete, Klarinette etc.). Doch sowohl die hell wie auch die dunkel klingenden Instrumente erwiesen sich als nicht gut zu orten. Lediglich die Oboe mit ihrem durchdringenden Klang konnte in die engere Wahl gezogen werden. Dabei war eine Folge von vier aufsteigenden Tönen der Rufferz (zwei Töne, absteigend) überlegen (ähnlich den Ergebnissen von CATCHPOLE, McKEOWN & WITHINGTON, 2004). Natürliche Geräusche, etwa ein Wasserfall oder Meeresrauschen, bewährten sich nicht – sie gingen im Lärm unter.

Um Sprachausgaben, also gesprochene Mitteilungen, zu prüfen, wurden die Tunnelbetreiber, soweit sie über dieses Medium verfügen, um Aufnahmen gebeten. Wir erhielten Proben aus NRW, Thüringen, Bayern (Allacher und Petuel Tunnel) und Baden-Württemberg (Hornberg Tunnel). Am besten war eine sehr professionell klingende Frauenstimme in mittlerer Stimmlage zu orten. Bei langen Instruktionen gab es jedoch Schwierigkeiten durch den Hall. Eigene Aufnahmen zeigten, dass zwei Wörter (Exit here) zur Identifikation zu kurz, drei Wörter (Please, exit here) jedoch gut zu lokalisieren waren. Auch hier zeigte sich eine dunkle Frauenstimme einer hellen Stimme überlegen.

Weiterhin wurde mit gesungenen Instruktionen experimentiert. Eine weibliche Alt-Stimme konnte besser geortet werden als ein Sopran. Bewährt hat sich hier der Text „Hier her“, gesungen in der Rufterz. Als Terz wird in der Musik ein Intervall bezeichnet, das drei Tonstufen einer Tonleiter umspannt, z. B. c-e. In einfachen Kinderliedern oder Melodien wird gerne die Rufterz, auch Kuckucksterz genannt, verwendet (Klangbeispiel: Der Anfang des Liedes: „Kuckuck, Kuckuck, ruft's aus dem Wald“, die Noten c'-a).

Da CATCHPOLE et al. (2004) angeben, weißes Rauschen sei besonders gut zu orten, wird auch dieser Sound verwendet. Wir vermuten jedoch, dass weißem Rauschen der semantische Gehalt fehlt, mit dem wir dieses lockende Signal ausstatten wollen. Es wird daher das weiße Rauschen allein und in Kombination mit Vogelstimmen getestet, um zu prüfen, inwieweit die Aussage unter den Lärmbedingungen eines Tunnels zutreffend ist.

Im ersten Signal-Ortungs-Versuch wurden aufgrund der Vorüberlegungen und -versuche folgende Sounds verwendet:

- Vogelstimme Singdrossel,
- Vogelstimmen Amsel und Singdrossel zusammengemischt,
- weißes Rauschen,
- Amsel und Singdrossel, hinterlegt mit weißem Rauschen,
- Vogelstimme Rotkehlchen, hinterlegt mit weißem Rauschen,
- Musikinstrument Oboe, vier Töne in aufsteigender Folge,
- Singstimme (weibliche Alt-Stimme, getragen, Rufterz) „Hier her“,

- Sprechstimme (weibliche Alt-Stimme, dezidierte Sprechweise) „Please, exit here“.

Im zweiten Versuch zur Signal-Ortung sollten verstärkt Sprachausgaben untersucht werden. Eine weibliche Alt-Stimme sprach in langsamer Sprechweise

- „Der Notausgang ist hier“,
- „Der Ausgang ist hier“,
- „Notausgang hier“,
- „Please, exit here“ (wie in Versuch 1),
- Vogelstimme Rotkehlchen, hinterlegt mit weißem Rauschen (wie in Versuch 1),
- Vogelstimme Rotkehlchen.

Die beiden Signale, die aus Versuch 1 wiederholt wurden, sollten als Referenz dienen. Alle Signale des zweiten Versuchs wurden mit Hilfe der Software „Audacity“ mit einem Echo von 0,4 und einer Dämpfung von 0,4 bearbeitet. Damit klingen die Signale wie in einem Tunnel.

Hintergrundgeräusche:

Die Geräuschkulisse, die bei einem Unglücksfall im Tunnel vorzufinden ist, ist nicht bekannt. Wir gehen daher vom „worst case“ aus und nehmen an, dass sowohl Lkw-Lärm zu hören ist und außerdem Strahlventilatoren zur Belüftung laufen.

In Kapitel 6, wo die Lärmbedingungen im Tunnel untersucht wurden, stellten wir mittlere Schalldruckpegel von 85,1 bis zu 95,6 dB (A) fest. Diese Lautstärke wäre jedoch bei einem länger dauernden Versuch für unsere Probanden unzumutbar gewesen, weshalb Lkw-Lärm mit gerade noch erträglichen 80 dB (A) und Strahlventilatoren mit ca. 78 dB (A) (gemäß Herstellerangaben) Verwendung fanden. Es werden reale Geräusche eingespielt, die von MAN bzw. Witt & Sohn zur Verfügung gestellt wurden.

Im Gegensatz zu bisher vorliegenden Studien werden also Signale auf der Basis realer Hintergrundgeräusche untersucht.

Raumaufteilung:

Ein großer Bunkerraum, der in seiner Halligkeit der Schallcharakteristik eines Tunnels sehr ähnlich ist, wurde an Wänden und Decke schwarz gestrichen. So wird schon allein durch die äußere Umgebung

ein Gefühl erzeugt, das den Bedingungen bei einem Notfall im Tunnel ähnlich ist.

Der Proband sitzt bei Versuchsteil 1 (Ortung der Sounds) in der Mitte des Raumes, vor ihm befindet sich eine spezielle Tastatur (siehe Bild 11.3), die schwach beleuchtet ist. Ansonsten ist es dunkel im Raum.

Platzierung der Lautsprecher:

In den vier Ecken des Raumes ist jeweils ein baugleicher Lautsprecher montiert. Über jeweils einen dieser Lautsprecher werden in zufälliger Abfolge Sounds eingespielt. Jeder Sound wird jeweils einmal aus jeder Box gespielt. Sowohl für die Abfolge der Signale als auch für die Reihenfolge der Lautsprecher, aus denen das Signal zu hören war, wurden Abfolgen nach der „Latin Square“-Methode angelegt (vgl. WAGENAAR, 1969), ineinander verwoben, sodass jede Person eine andere Abfolge erhielt und Versuchseffekte vermieden wurden.

Um die Aufgabe für die Versuchsteilnehmer weniger durchschaubar zu gestalten, sind an den Wänden links und rechts ebenfalls Boxen angebracht, die jedoch inaktiv sind.

Bild 11.2 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsraums.

Aufgabe des Probanden:

Der Versuchsteilnehmer wird dahingehend instruiert, dass er nun die realen Geräusche aus einem Tunnel hört, etwa Fahrzeuglärm und das Brummen der Lüftungs-Ventilatoren. Er soll, sobald er einen Sound hört, der nichts mit den normalen Geräuschen zu tun hat, bestimmen, woher der Klang kommt, und die entsprechende Taste auf der Tastatur drücken. Dies soll so schnell wie möglich erfolgen. Ist sich der Proband nicht sicher, woher der Sound kommt, soll er die Taste drücken, die ihm am ehesten passend erscheint.

Der Sound wird so lange abgespielt, bis der Versuchsteilnehmer eine Taste drückt.

Die Versuchsperson erfährt, dass für jede Person die Sounds neu sortiert werden, sodass es durchaus vorkommen könne, dass sie eine Taste häufig, eine andere gar nicht brauche.

Tastatur:

Die Tastatur besteht aus acht kreisförmig angeordneten Tasten. Die vier Seiten sind, entsprechend der Sichtweise des Versuchsteilnehmers mit vorne/hinten, links/rechts beschriftet, die Ecken sind durch Pfeile gekennzeichnet (siehe Bild 11.3). Bei jedem Tastendruck werden die Wahl des Probanden und seine Reaktionszeit gespeichert.



Bild 11.2: Schematische Darstellung des Versuchs-Bunkers



Bild 11.3: Versuchsteilnehmer mit Reaktionstastatur, links für das Foto beleuchtet, rechts realer Eindruck. Die Tastatur ist zur sicheren Bedienbarkeit beschriftet. Je nach Richtung, aus der der Proband den Sound gehört hat, drückt er die entsprechende Taste

Versuchssteuerung:

Die Sounds sind als mp3-Dateien auf einem Rechner gespeichert.

Die Abfolge variiert für jeden Probanden nach Latin Square, sie ist in einem Programm abgelegt und wird, sobald die Reaktion auf das vorhergehende Signal vorliegt, zur Ausgabe freigegeben. Der Versuchsleiter schaltet nun, vom Versuchssteuer-Raum aus, auf dem Mischpult die gewünschte Richtungsbox ein und startet das nächste Signal. Der Sound wird abgespielt, bis der Proband eine Antworttaste (siehe Tastatur) drückt. Es besteht somit immer die Gelegenheit, das Signal so lange, wie erforderlich zu hören. Im Programm wird gespeichert, welche Taste gedrückt wurde und wie lange die Versuchsperson für die Reaktion benötigte.

Die Hintergrundgeräusche (Lkw im Stand mit 80 dB (A) und Strahlventilator mit 78 dB) werden von anderen unabhängigen Quellen abgespielt.

Befragung:

Im Anschluss an die Ortungsaufgabe wurde der Proband gefragt,

- ob bei allen Sounds die Richtung, aus der sie kamen, gleich gut zu erkennen war,
- ob es einen Sound gab, an den er sich besonders erinnert,

- ob die Aufgabe einfach oder schwierig, spannend oder langweilig war.

11.4.2 Versuchsaufbau für Versuchsteil 2 (beide Versuche)

Sounds:

Im zweiten Teil des Versuchs geht es um die Einschätzung,

- was der Sound bedeuten könnte,
- was man am liebsten tun würde, wenn man ihn hört und
- um eine Charakterisierung des Gehörten.

Dazu wurden zwei Arten von Sounds ausgewählt: Positive, die den Weg zum Ausgang weisen (Überlegungen und Auswahl siehe Teil 1), und aversive, die im Ereignisfall Menschen aus dem Tunnel treiben sollen.

Zum „Heraustreiben“ scheint ein Feueralarm geeignet zu sein, da die Bedeutung dieses Signals allen Personen bekannt sein müsste. Verschiedene Versionen wurden auf der Basis der Hintergrundgeräusche getestet, ein tiefes Signal erwies sich als am besten.

Im Weiteren wurde eine Serie von Sounds überprüft, etwa Acrylglas-Bohrer, Metallsäge, rosa Rauschen, Silvesterheuler, Sirenentöne usw.

Sie klangen zwar unangenehm, konnten aber in Vorversuchen und nach Experteneinschätzungen den gewünschten Effekt („ich muss hier raus“) nicht erzeugen. Gesucht wurden daher möglichst tiefe Töne.

Als besonders geeignet in der Geräuschumgebung erwiesen sich Schwingungen, die durch einen Funktionsgenerator erzeugt wurden, in der Kurvenform Dreieck (mit einer konstanten Periode von 26 Hz) und Sägezahn (Veränderung der Periode = Sweep von 10 auf 50 Hz), während Sinus- und Rechteck-Signale eher „harmlos“ klangen. Dabei wurden die tiefstmöglichen Einstellungen verwendet.

Bild 11.4 zeigt die ausgewählten Kurvenformen.

Die Ausgabe des Dreiecks- und des Sägezahn-Sounds erfolgt über einen Bass-Lautsprecher (siehe technischer Aufbau).

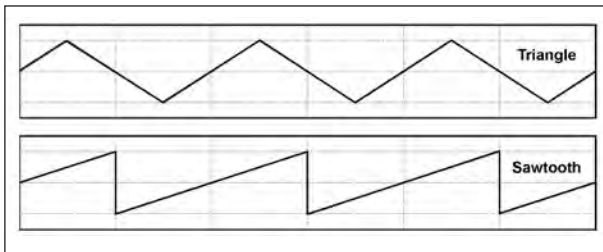


Bild 11.4: Mit Hilfe des Funktionsgenerators erzeugte Sounds „Dreieck“ und „Sägezahn“ (aus: WIKIPEDIA, 2008)

Weiterhin soll mit einem speziellen Sound experimentiert werden: Auf der Suche nach Tönen, die der Mensch eigentlich gar nicht mehr hören, wohl aber fühlen kann, entstand die Idee, eine Orgelpfeife zu bauen, die diesem Kriterium entspricht. So wurde, mit ca. 7-8 Hz, die vermutlich tiefste Orgelpfeife Deutschlands erbaut (siehe technischer Aufbau).

Zusammenfassend ist festzuhalten:

Im ersten Einschätzungsversuch kamen vier Sounds zum Einsatz, deren Bedeutung sein sollte, das Fahrzeug und den Tunnel zu verlassen:

- Feuersirene,
- ein Dreiecks-Signal über die Bass-Box,
- ein Sägezahn-Signal über die Bass-Box,
- Ton aus einer Orgelpfeife mit ca. 7 bis 8 Hz.

Außerdem wurden fünf Sounds mit der Bedeutung „Hier ist der Ausgang“ verwendet:

- Vogelstimmen Amsel und Singdrossel zusammengemischt,
- weißes Rauschen,
- Musikinstrument Oboe, vier Töne in aufsteigender Folge,
- Singstimme (weibliche Alt-Stimme, getragen, Rufterz) „Hier her“,
- Sprechstimme (weibliche Alt-Stimme, dezidierte Sprechweise) „Please, exit here“.

Im zweiten Einschätzungsversuch ließen wir folgende Sounds zum Auffinden des Notausgangs beurteilen:

- „Der Notausgang ist hier“,
- „Der Ausgang ist hier“,
- „Notausgang hier“,

- „Please, exit here“,
- Vogelstimme Rotkehlchen.

Die Charakteristika der Signale als Fourier-Transformationen zeigt Anhang F.

Hintergrundgeräusche:

Die Geräuschkulisse entspricht der in Versuchsteil 1. Sie startet jeweils kurz vor Beginn des Sounds und wird nach seiner Beendigung auch wieder gestoppt, damit der Proband den Fragebogen in Ruhe beantworten kann.

Technischer Aufbau:

Die positiven Signale und die Feuersirene wurden über die vier in Versuchsteil 1 beschriebenen Lautsprecher dargeboten.

Das Dreieck- und das Sägezahn-Signal werden über eine Bass-Box ausgegeben, die einen Frequenzgang von 37 Hz bis 125 Hz und einen maximalen Schalldruck von 139 dB aufweist. Sie ist damit in der Lage, extrem tiefe Töne zu erzeugen.

Besonders aufwändig war der Bau der Orgelpfeife: Um einen Orgelton zu erzeugen, wird Luft in eine Pfeife geblasen. Die Luft – im Sprachgebrauch der Orgelbauer wird von „Wind“ gesprochen – gelangt durch den Windkanal über den Windladen in die Pfeife (vgl. KLOTZ, 1960; JAKOB, 1971). Der Pfeifenkopf ist eine Spezialanfertigung des Orgelbauers Georg Weishaupt, der Resonator wurde durch uns konzipiert und von unseren Werkstätten gebaut. Er ist ca. 10,6 Meter lang, misst innen 45 x 45 cm und ist gedackt, d. h. mit einem Deckel versehen, sodass ein Ton entsteht, der einer doppelt so langen Pfeife entspricht. Auf diese Weise kann ein Ton mit 7-8 Hz erzeugt werden. Dieser Ton äußert sich als dumpfes Grollen, ähnlich einem Erdbeben, und ist eher zu fühlen als zu hören.

Die Windzufuhr erfolgt über ein extrem starkes Gebläse, das einen Volumenstrom von 27,5 m³/Min. und einen Gesamtdruck von 3.000 Pa erzeugt.

Bild 11.5 zeigt den Versuchsaufbau. Der Proband sitzt in einem Fahrzeug. Vor sich hat er das Klemmbrett mit Fragebogen. Die Beleuchtung im Fahrzeug ist die einzige Lichtquelle im Raum. Die Mimik des Fahrers wird mit Hilfe einer USB-Kamera aufgezeichnet, die Übertragung erfolgt mittels Kabels und USB-Port-Replikators auf den Bildschirm des

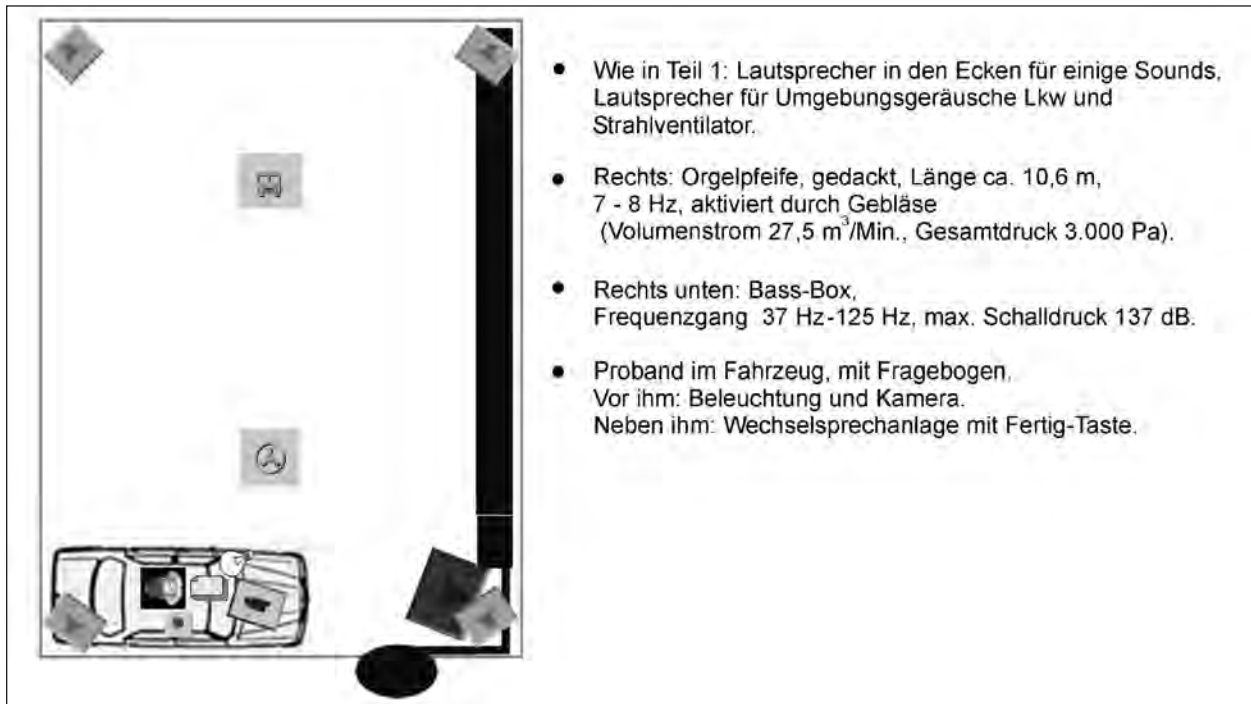


Bild 11.5: Schematische Darstellung des Versuchs-Bunkers



Orgelpfeife im Versuchsraum, schwarz gestrichen, daher unauffällig



Orgelpfeife während des Aufbaus und in der Erprobung

Bild 11.6: Orgelpfeife

Versuchsleiters. Die Filme wurden per MS Movie Maker für die spätere Analyse gespeichert.

Neben dem Probanden befindet sich die Wechselsprechanlage, die die Kommunikation mit dem Ver-

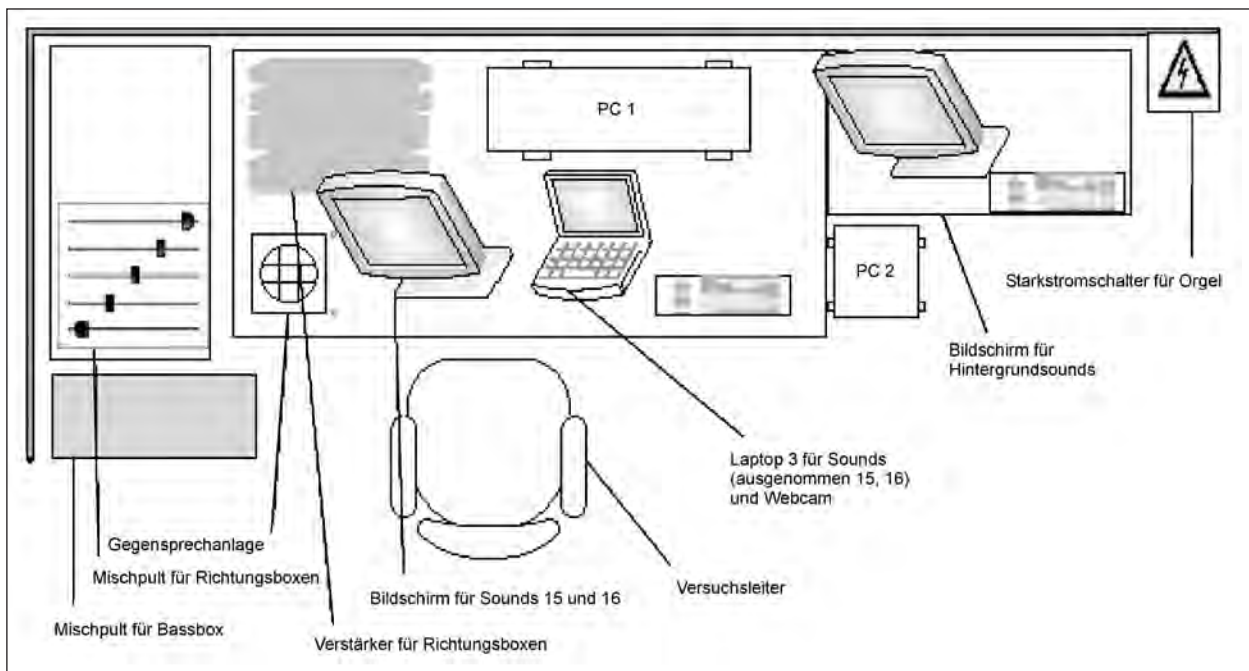


Bild 11.7: Versuchssteerraum: Mischpulte für Richtungsboxen und Bassbox, Gegensprechanlage, Verstärker, Bildschirme zum Aktivieren der Sounds, des Hintergrundgeräusches und zur Webcamkontrolle, PCs mit Tastaturen etc. und Starkstromschalter für das Orgelgebläse

suchsleiter im Bedarfsfall ermöglicht. Nachdem der Proband die Einschätzung des Sounds vorgenommen hat, drückt er die Fertig-Taste.

Der Versuchsleiter startet dann zunächst die Geräuschkulisse, dann den nächsten Sound (Reihenfolge nach Latin Square, für jeden Probanden verschieden). Die Darbietungszeit eines Sounds beträgt 8 Sekunden für Sounds, die aus den kleinen Boxen abgespielt werden und 13 Sekunden für Sounds aus der Bass-Box.

Instruktion und Befragung:

Die Versuchsperson wird gebeten, sich zum zweiten Teil des Versuchs in das Fahrzeug zu setzen. Sie soll sich vorstellen, mit Ihrem Fahrzeug in ein Tunnel eingefahren zu sein. „Sie merken, dass in diesem Tunnel etwas nicht stimmt. Sie hören eine Durchsage, doch den Text verstehen Sie nicht ganz, denn es hallt sehr stark im Tunnel. Die normale Beleuchtung ist ausgefallen. Es ist dunkel. Sie bemerken, dass es im Tunnel rauchig wird. Der Rauch wird immer dichter. Vor Ihnen stehen Fahrzeuge, es gibt kein Durchkommen. Hinter Ihnen stehen Fahrzeuge, sodass Sie auch nicht rückwärts heraus fahren können.“

Der Proband erfährt, dass er nun wieder den Verkehrslärm hört und dazu einen Sound, den er beurteilen sollte.

Bei jedem Sound wird der Versuchsteilnehmer zunächst gefragt, ob er etwas gehört oder gefühlt habe. Falls ja, soll er angeben,

- was der Sound in der beschriebenen Situation bedeutet,
- was er am liebsten getan hätte, als er den Sound hörte.

Anschließend soll er mit Hilfe eines semantischen Differenzials den Sound auf einer fünfstufigen Skala einschätzen. Folgende bipolare Adjektivpaare sind einzustufen:

- anlockend – abstoßend,
- Angst auslösend – Sicherheit vermittelnd,
- wichtig – unwichtig,
- entspannt – dringend,
- negativ – positiv,
- unheimlich – vertraut.

Nach Beendigung der Einschätzung drückt der Versuchsteilnehmer die Fertig-Taste auf der Gegensprechanlage und bekommt Lärm und den nächsten Sound eingespielt.

11.5 Ergebnisse

11.5.1 Unterschiede zwischen den Probanden

Wie in Kapitel 11.3 beschrieben, nahmen am ersten akustischen Versuch 40 Probanden verschiedener Altersgruppen teil. Bild 11.9 zeigt die mittlere Reaktionszeit jedes Probanden und die zugehörige Standardabweichung beim Signal-Ortungsversuch (alle Reaktionen).

Es lässt sich erkennen, dass es in jeder der Altersgruppen schnell reagierende Personen gibt. Bei den älteren Probanden treten jedoch mittlere Reaktionszeiten, die länger als drei Sekunden sind, häufiger auf.

Bild 11.8 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten beim Signal-Ortungsversuch.

		Mittelwert	σ
Altersgruppen	Probanden 18-25 Jahre	2,22 sec	1,34
	Probanden 26-45 Jahre	2,20 sec	1,09
	Probanden älter als 46 J.	3,20 sec	1,71
Geschlecht	Männer	2,71 sec	1,66
	Frauen	2,52 sec	1,31
Probanden	alle	2,62 sec	1,50

Bild 11.8: Reaktionszeiten beim ersten Signal-Ortungsversuch (Mittelwerte und Standardabweichungen)

such. Dabei wurde nicht berücksichtigt, ob die Reaktion richtig oder falsch war. Von ca. 1.300 Entscheidungen wichen 4,6 % der Reaktionszeiten mehr als das Zweifache der Standardabweichung vom Mittelwert der jeweiligen Person ab. Da die Messung nicht durch solche Extremwerte verfälscht werden sollte, wurden diese Messwerte in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Im Mittel benötigen die Versuchspersonen 2,6 Sekunden für eine Reaktion. Personen unter 45 Jahre sind etwas schneller, die über 46 sind etwas langsamer. Beim zweiten Signal-Ortungsversuch betrug der mittlere Gesamtwert 3,16 sec ($\sigma = 0,85$), die Reaktionszeiten sind hier also etwas länger. Dies ist erklärlich, da das Reizmaterial hier einen höheren semantischen Gehalt aufweist als beim ersten Versuch und die Probanden hören wollten, was da gesagt wird.

11.5.2 Unterschiede zwischen den Signalen

Besondere Erinnerung:

Direkt nachdem der Proband die Signal-Ortungsaufgabe (Versuchsteil 1) beendet hatte, wurde er gefragt, ob es einen Sound gab, an den er sich besonders erinnere.

Beim ersten akustischen Versuch lauten die Nennungen:

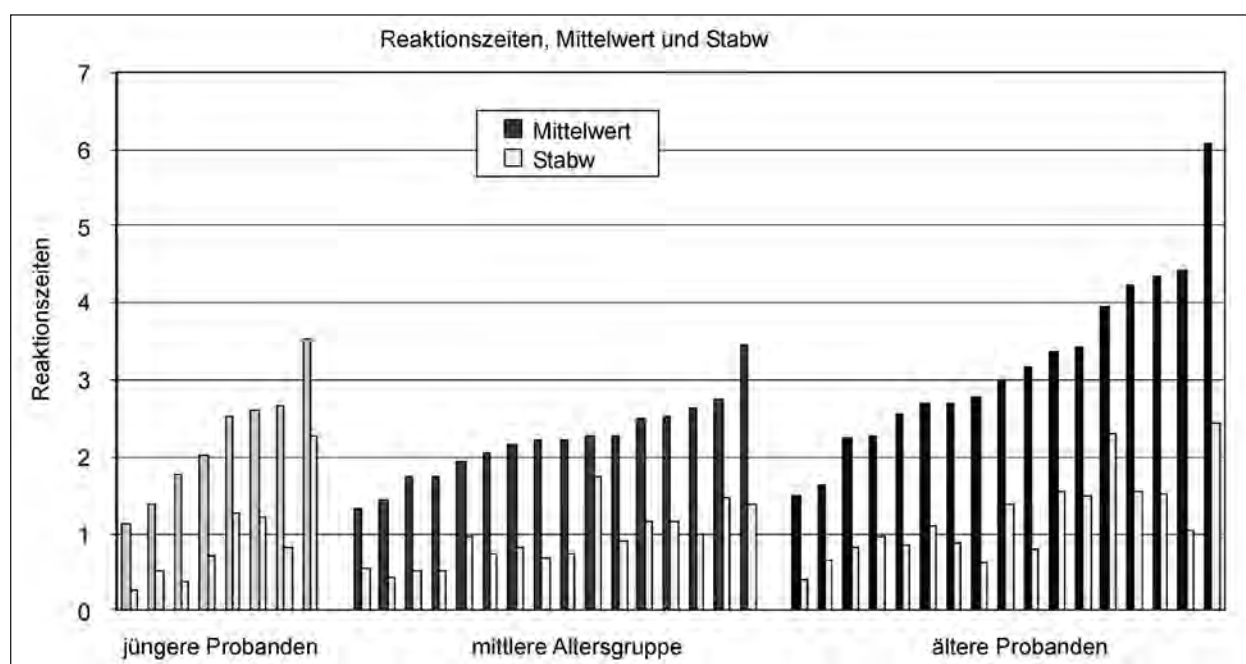


Bild 11.9: Signal-Ortungsversuch. Mittlere Reaktionszeit der Probanden (dunklere Farbe), rechts daneben jeweils die Standardabweichung. Jüngere: 18-25 Jahre, Mittlere: 26-45 Jahre, Ältere: älter als 46 Jahre

- 59 % erinnerten sich besonders an Vogelstimmen,
- 34 % an „Hier her“, die gesungene Instruktion,
- 17 % an das Musikinstrument Oboe und
- 2 % an die Sprachmeldung „Please, exit here“.

Im zweiten akustischen Versuch fanden besonders gut:

- 42 % die Vogelstimmen,
- jeweils 3 % den „Notausgang“ bzw. „Please, exit here“, und
- 56 % fanden nichts besonders gut.

11.5.3 Ortung der „lockenden“ Signale

Reaktionen und Reaktionszeiten:

Bild 11.11 zeigt Reaktionen und Reaktionszeiten der untersuchten Signale. Dabei wurde unterschieden, ob

- die Soundquelle absolut korrekt geortet wurde, d. h. in der Ecke, in der die Box installiert war (= richtig, vgl. Bild 11.10),
- die Soundquelle in etwa richtig geortet wurde, d. h. entweder 45 Grad nach rechts oder nach links verschoben (= r in 90°, vgl. Bild 11.10),
- eine andere Taste gedrückt wurde, die außerhalb dieses Bereichs lag (= falsch).

Falsche Reaktionen sind in der Grafik nicht dargestellt.

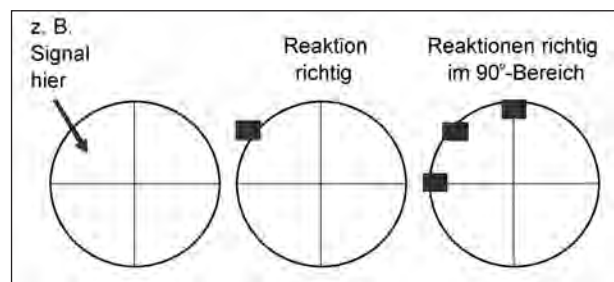


Bild 11.10: Demonstration von Signal und Reaktion

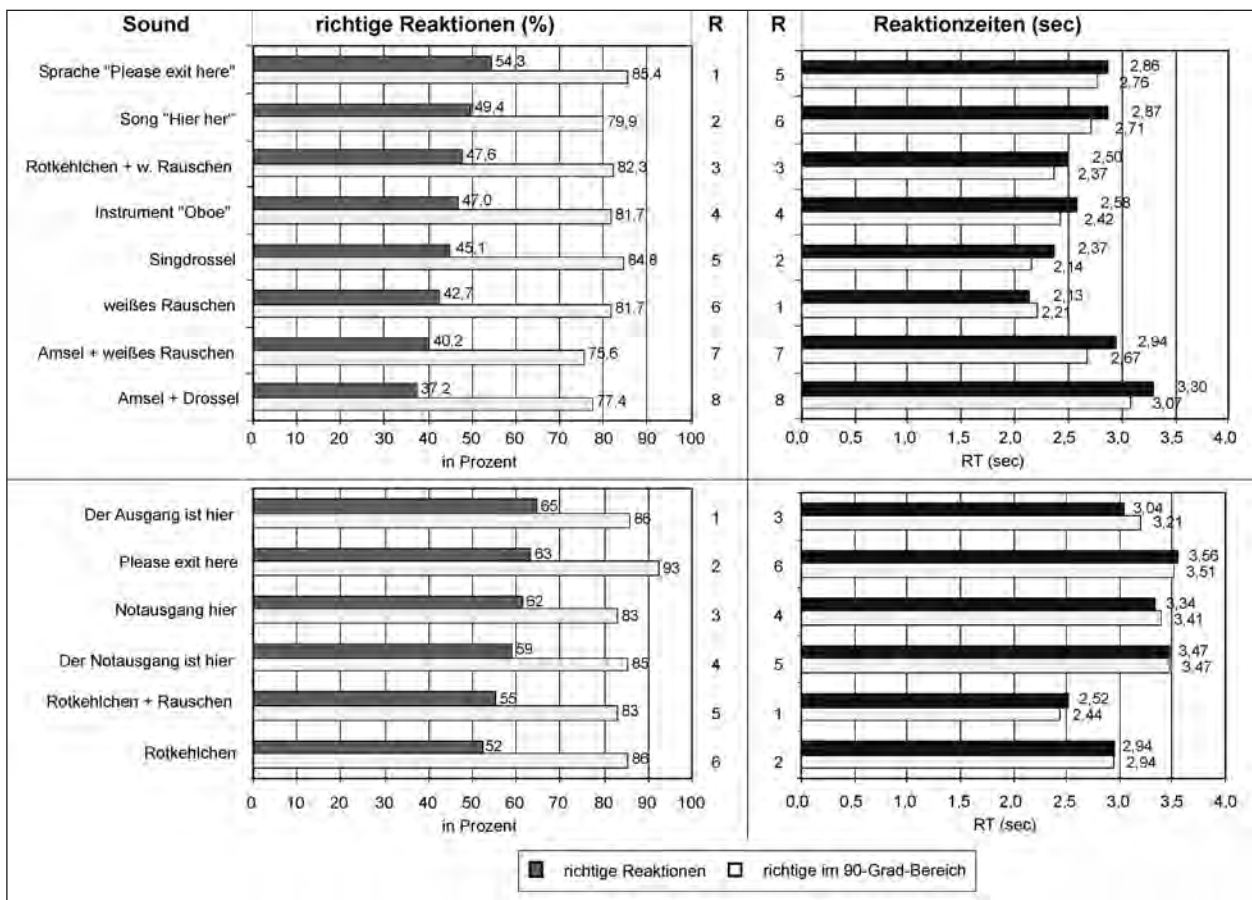


Bild 11.11: Signal-Ortungsversuche, oben Versuch 1, unten Versuch 2.

Links: richtige Reaktionen auf die verschiedenen Sounds (über alle Richtungen) in Prozent.

Rechts: Reaktionszeiten, in Sekunden.

Die Spalte R zeigt den Rang, den ein Sound einnimmt (links: Reaktionen, rechts: Zeiten), z. B. die meisten richtigen Reaktionen/die schnellste Reaktion = Rang 1

In Bild 11.11 sind die Sounds nach der Häufigkeit vollkommen richtiger Reaktionen geordnet.

Detaillierte Ergebnisse sind im Anhang F enthalten.

Vergleicht man die beobachteten richtigen Reaktionen mit den erwarteten unter der Annahme der Gleichverteilung mit Hilfe des χ^2 -Tests, so zeigen sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Sounds (beim 1. Experiment: χ^2 -Wert von 4,5; beim zweiten: 2,3).

Gleiches gilt, wenn die Reaktionen im 90-Grad-Bereich als Grundlage verwendet werden (χ^2 -Wert von 1,0 bzw. 1,4).

Obwohl die Anzahl richtiger Reaktionen bei den verschiedenen Signalen, statistisch gesehen, nicht verschieden ist, kann man an dieser Stelle allerdings einwenden, dass es im Ernstfall einen großen Unterschied bedeutet, ob 54 Prozent in die richtige Richtung laufen oder nur 37 %.

Besonders überraschend an den Ergebnissen im ersten akustischen Versuch ist, dass die Sprachsequenz „Please, exit here“ mit 54 % richtigen Reaktionen zu so guten Ortungsergebnissen führt. Das in der Literatur präferierte weiße Rauschen hingegen kann nur 43 % richtige Reaktionen verbuchen.

Die Hoffnung, ein Signal zu finden, das alle Probanden fast immer richtig orten, verbunden mit sehr schnellen Reaktionszeiten, hat sich nicht erfüllt. Vielmehr treffen wir auf ein Geschwindigkeits-/Genauigkeits-Dilemma: Im ersten akustischen Versuch finden wir die kürzesten Reaktionszeiten beim weißen Rauschen (2,1/2,2 s) und der Singdrossel (2,4/2,1s), jedoch liegen diese Signale bei den richtigen Ortungs-Reaktionen am unteren Ende. Die „Sieger“ bei den richtigen Reaktionen, Sprache „Please, exit here“ und Song „Hier her“, liegen hingegen bei den Reaktionszeiten am unteren Ende (fast 3 Sekunden). Rotkehlchen und Oboe nehmen, was Genauigkeit und Schnelligkeit betrifft, den 3. bzw. 4. Platz ein.

Beim zweiten akustischen Versuch fällt auf, dass die Ergebnisse der Sprachsequenzen, sowohl was die richtige Ortung als auch die Reaktionszeiten betrifft, relativ nahe beieinander liegen (65-59 % richtige; RT zwischen 3,6 und 3 Sekunden).

Beim Rotkehlchen, mit oder ohne weißes Rauschen, finden wir die kürzesten Reaktionszeiten (mit w.R.: 2,5/2,4 sec; ohne 2,9 sec), doch besteht hier wieder das bekannte Geschwindigkeits-/Ge-

nauigkeitsdilemma: Die Signale liegen bezüglich der richtigen Reaktionen am unteren Ende (55 bzw. 52 %). Interessant ist, dass das weiße Rauschen nur eine kleine Verbesserung bringt (3 % mehr richtige Ortung; 0,4 Sekunden Zeitdifferenz).

Die meisten richtigen Ortungs-Reaktionen konnten wir bei „Der Ausgang ist hier“ (65 %) und „Please, exit here“ (63 %) finden. Ersteres weist eine Reaktionszeit von 3 Sekunden auf, liegt also innerhalb dieses Experiments auf Platz 3.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Versuche, so sind bei „Rotkehlchen, hinterlegt mit weißem Rauschen“, dem Referenzmaß, die Reaktionszeiten nahezu identisch, ebenso die Ortungsergebnisse im 90-Grad-Bereich. Was die richtigen Ortungs-Reaktionen betrifft, so sind im zweiten Versuch um 7,5 % mehr richtige zu verzeichnen, was möglicherweise durch das hinterlegte Echo bedingt ist. „Please, exit here“ schneidet beim zweiten Experiment bei der Ortung deutlich besser ab (um 9 %), allerdings sind nun auch die Reaktionszeiten länger (2,9/3,6 sec).

11.5.4 Interpretation der „lockenden“ Signale

Welche Sounds werden richtig interpretiert?

Im 2. Teil des Versuches beantwortete jeder Proband nach jedem Sound einen Fragebogen, in dem eingetragen wurde,

- ob er etwas gehört oder gefühlt hat und, falls ja,
- was der Sound in der beschriebenen Situation bedeuten könnte und
- was er am liebsten getan hätte, als er den Sound hörte.

Sicher identifiziert wurden im ersten akustischen Versuch der Sound „Hier her“ und die Oboe. Jeweils einmal (2,5 %) wurden die Vogelstimmen und die Sprachsequenz „Please, exit here“ nicht gehört. Das weiße Rauschen wurde in 7,3 % der Fälle nicht wahrgenommen. Im zweiten Versuch wurden alle Signale sicher erkannt.

Bild 11.12 stellt die Daten der beiden Versuche grafisch dar, Anhang F, 3. Teil, enthält eine detaillierte Tabelle.

In Versuch 1 erreichen der Sound „Hier her“ und die Sprachsequenz „Please, exit here“ mit mehr als 50 % vollkommen richtiger Interpretationen und

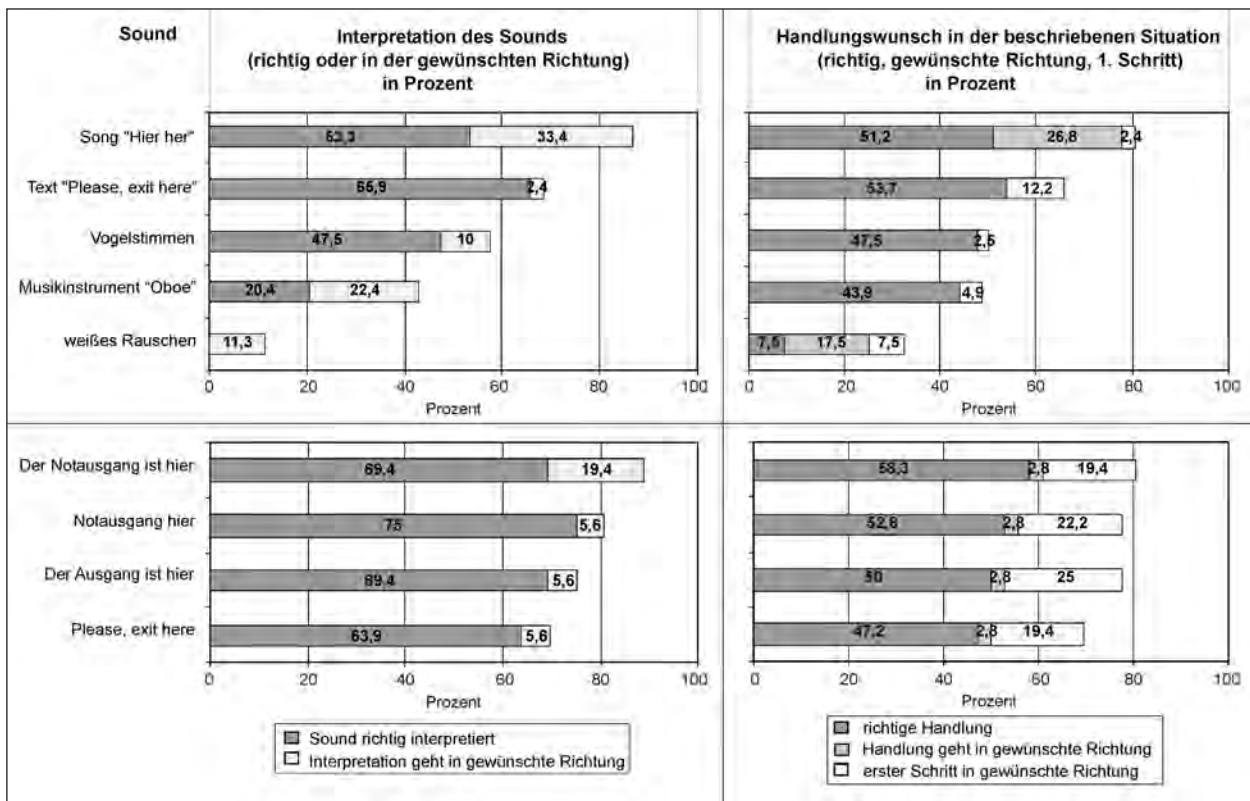


Bild 11.12: Signal-Bewertung. In wie vielen Fällen wurden Sounds richtig interpretiert bzw. geht die Interpretation in die gewünschte Richtung (linke Seite)? In wie vielen Fällen war die beschriebene Handlung richtig, geht die Handlung in die gewünschte Richtung bzw. stellt einen ersten Schritt in die gewünschte Richtung dar (rechte Seite)?

Handlungsabsichten die besten Werte. Bezieht man die Interpretation in die gewünschte Richtung mit ein, so bringt „Hier her“ mehr als 80 %, „Please, exit here“ etwa 65 % erwünschter Handlungen. Allerdings ergibt sich bei „Please, exit here“ das Problem, dass „please“ von 15 % der Probanden als „links“ interpretiert wurde. „Please“ wegzulassen stellt jedoch auch keine Lösung dar, da „Exit here“ in den Vorversuchen wesentlich schlechtere Ortungsergebnisse erbrachte als „Please, exit here“.

Sowohl Vogelstimmen als auch Oboe schnitten mit ca. 50 % richtigen Handlungsabsichten vergleichsweise gut ab, obwohl sie keine semantische Kodierung beinhalten. Das weiße Rauschen zeigte die schwächsten Ergebnisse.

In Versuch 2 liegen die Ergebnisse sehr nahe beieinander. Die Sprachsequenz „Notausgang hier“ wird in 75 % der Fälle richtig interpretiert und der Handlungswunsch ist in 53 % korrekt. „Der Notausgang ist hier“ liegt, was die Interpretation betrifft, mit 69 % an zweiter Stelle, beim Handlungswunsch sogar an erster (58 % absolut richtig). Der Text „Please, exit here“ liegt an letzter Stelle. Die Ergebnisse bei diesem Item sind denen des ersten Versuchs sehr ähnlich.

Bild 11.13 zeigt die Auswertung des semantischen Differenzials, also welche Eigenschaften die Versuchsteilnehmer den Sounds zuweisen.

In Versuch 1 erhalten die Vogelstimmen die positivste Rückmeldung. Sie werden als sehr anlockend, deutlich Sicherheit vermittelnd, sehr positiv, vertraut und entspannt empfunden. Die Sprachsequenz „Please, exit here“ vermittelt Sicherheit, wirkt positiv und wichtig. Die Oboe wirkt wichtig und ein bisschen anlockend, ansonsten liegen die Urteile in der neutralen Mitte. Der Sound „Hier her“ wird als wichtig und etwas anlockend empfunden, aber auch als unheimlich und dringend. Das weiße Rauschen wirkt Angst auslösend und negativ, ansonsten bewegen sich die Meinungen in der neutralen Mitte.

In Versuch 2 sind so positive Beurteilungen wie beim Vogelgezwitscher in Versuch 1 nicht zu verzeichnen. Die Sprachsequenz „Der Ausgang ist hier“ vermittelt etwas Sicherheit und wirkt eher positiv, ansonsten scharen sich die Bewertungen doch sehr stark um die neutrale Mitte. Lediglich „Notausgang hier“ wird als etwas dringend empfunden. Als sehr wichtig werden fast alle Items angesehen.

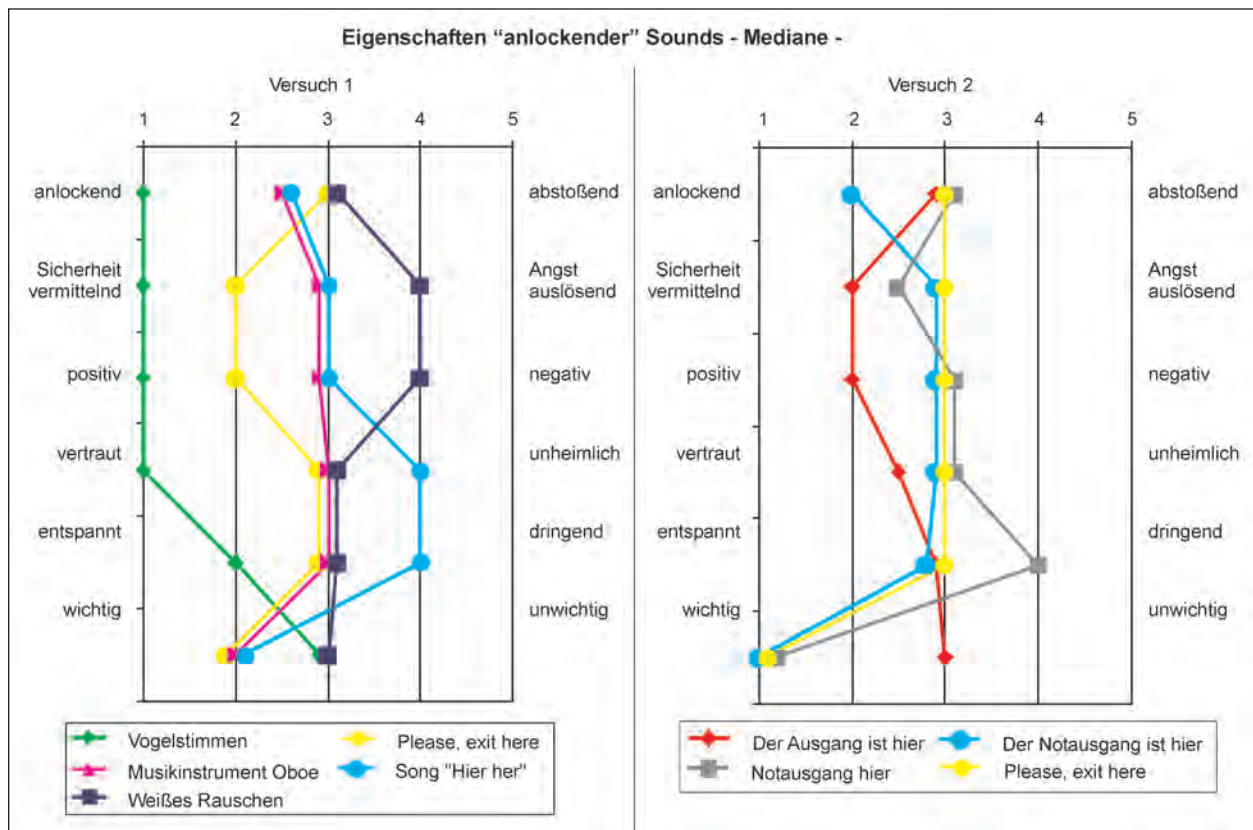


Bild 11.13: Signal-Bewertung. Welche Eigenschaften werden den Sounds zugeordnet? Dargestellt sind die Mediane. Gleiche Werte sind, der Sichtbarkeit wegen, leicht versetzt dargestellt

Fazit zu den „lockenden“ Signalen:

Das weiße Rauschen allein ist nicht zu empfehlen.

In Versuch 1 fällt die Entscheidung zwischen der Sprachsequenz „Please, exit here“ und dem Song „Hier her“ schwer. Wir verzeichnen hier die meisten richtigen Interpretationen des Sounds und die meisten richtigen Handlungsabsichten. Je nachdem, wie weit man den Begriff „richtig“ fasst, ist der Text oder der Song im Vorteil. Beim Text ergab sich das Problem, dass „please“ in der Lärmumgebung des Tunnels manchmal mit „links“ verwechselt wurde. Allerdings vermittelte die Sprache mehr Sicherheit und wirkte positiver als der Song.

Aufgrund seiner extrem anlockenden und positiven Wirkung sollte daher in jedem Falle eine Kombination aus der Vogelstimme Rotkehlchen, das mit leichtem weißem Rauschen hinterlegt ist, und der Sprache oder dem Song verwendet werden.

Diese Signalkombination ist sehr gut zu orten, wird im richtigen Sinne interpretiert und wird positiv beurteilt.

In Versuch 2, in dem verschiedene Sprachsequenzen verglichen werden sollten, fanden wir sehr

große Ähnlichkeiten, sowohl was die richtige Ortung als auch, was die Reaktionszeiten betrifft. Am besten schnitt hier die Sequenz „Der Ausgang ist hier“ ab.

Setzt man den geäußerten Handlungswunsch als Kriterium an, so liegt „Der Notausgang ist hier“ vorne, dies gilt auch für die Interpretation (richtig interpretiert + Interpretation in die gewünschte Richtung).

Nach den Eigenschaften, die den Sprachsequenzen zugeschrieben werden, würde man wohl „Der Ausgang ist hier“ wählen – läge das Item in puncto Wichtigkeit nicht in der neutralen Mitte. „Der Notausgang ist hier“ wirkt sowohl etwas anlockend als auch sehr wichtig.

So wird man bezüglich der Sprachsequenzen „Der Notausgang ist hier“ empfehlen.

11.5.5 Interpretation der „heraustreibenden“ Signale

Welche Sounds werden richtig interpretiert?

Alle „aversiven“ Sounds wurden sicher identifiziert.

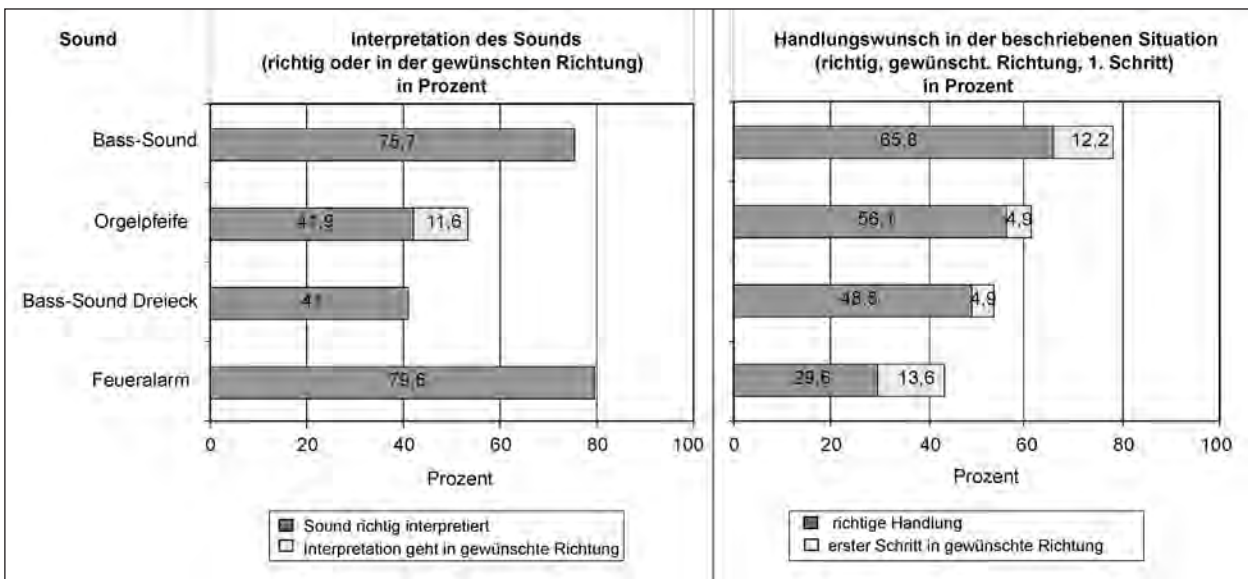


Bild 11.14: Signal-Bewertung. In wie vielen Fällen wurden Sounds richtig interpretiert/bzw. geht die Interpretation in die gewünschte Richtung (linke Seite)? In wie vielen Fällen war die beschriebene Handlung richtig, geht die Handlung in die gewünschte Richtung, bzw. stellt einen ersten Schritt in die gewünschte Richtung dar (rechte Seite)?

In Anhang F sind die Ergebnisse der Sound-Bedeutung und der angestrebten Handlung im Detail zusammengestellt, dort sind auch die Antworten markiert, die in die gewünschte Richtung gehen.

Bild 11.14 stellt den Sachverhalt grafisch dar.

Obwohl der Feueralarm von 80 % richtig interpretiert wurde, äußern nur 30 %, im weiteren Sinne 43 % der Probanden eine erfolgversprechende Handlungsstrategie.

Der Bass-Sound „Sägezahn“, der seine Periode über die Gesamtdauer von 10 auf 50 Hz verändert, bringt 76 % richtiger Interpretationen, während der Bass-Sound „Dreieck“, der konstant bei 26 Hz liegt, nur in 41 % der Fälle richtig interpretiert wird. Hinsichtlich der beschriebenen Handlungen ist der Bass-Sound „Sägezahn“ mit 78 % Richtigen der „Sieger“, beim Bass-Sound „Dreieck“ sind nur 54 % richtige Handlungen beschrieben.

Die Orgelpfeife liegt bezüglich der richtigen Interpretation mit 54 % an 3. Stelle, bei der beschriebenen Handlung jedoch an 2. Stelle (61 %).

Bild 11.15 zeigt die Eigenschaften, die den Sounds zugewiesen werden (Auswertung: Mediane).

Die Orgelpfeife und der Bass-Sound „Sägezahn“ werden als sehr abstoßend, sehr Angst auslösend, sehr negativ, sehr unheimlich, sehr dringend und (sehr) wichtig erlebt. Der Bass-Sound „Dreieck“

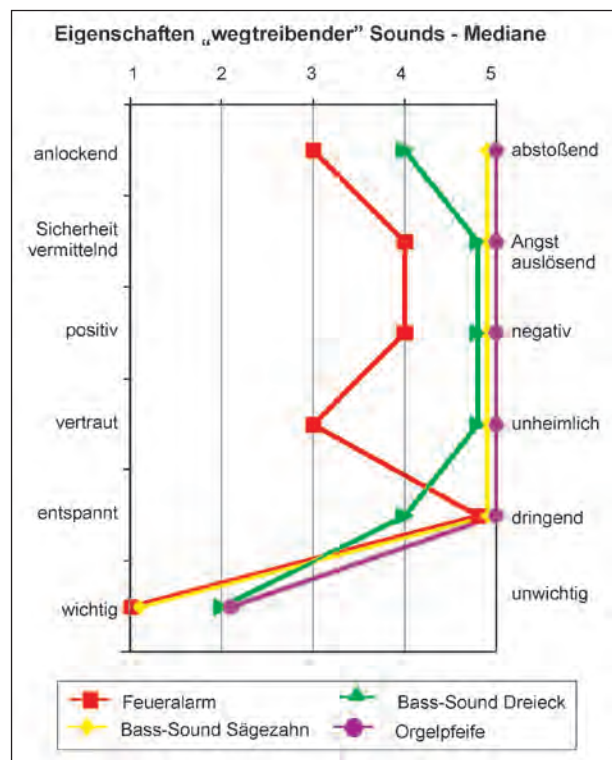


Bild 11.15: Signal-Bewertung. Welche Eigenschaften werden den Sounds zugeordnet? Dargestellt sind die Mediane. Gleiche Werte sind, der Sichtbarkeit wegen, leicht versetzt dargestellt

wirkt nicht ganz so abstoßend und dringend, ist aber ansonsten sehr ähnlich in der Beurteilung. Der Feueralarm wird als sehr wichtig, sehr dringend, als negativ und Angst auslösend beschrieben, ansonsten liegen die Urteile in der neutralen Mitte.

Fazit zu den „heraus treibenden“ Signalen:

Will man Personen dazu veranlassen, im Notfall einen Tunnel zu verlassen, so ist entweder der Bass-Sound „Sägezahn“ oder die Orgelpfeife zu empfehlen. Hier sind die meisten richtigen Interpretationen zu verzeichnen und die Emotionen, die geweckt werden, eignen sich dazu, Menschen aus dem Tunnel zu treiben.

11.5.6 Zusammenfassung der akustischen Versuche und Folgerungen**Sound zum Hinaustreiben:**

Um in einer Notfallsituation im Tunnel Menschen dazu zu bewegen, aus ihrem Fahrzeug auszusteigen und zu flüchten, eignet sich entweder der Bass-Sound „Sägezahn“ (Periode 10 auf 50 Hz) oder ein dunkler Ton aus der Orgelpfeife (7-8 Hz). Hier sind die meisten richtigen Interpretationen zu verzeichnen und die Emotionen, die geweckt werden, eignen sich dazu, Menschen aus dem Tunnel zu treiben.

Zum Notausgang locken:

Um Personen in der turbulenten Geräuschkulisse eines Tunnels zu einem Notausgang zu locken, ist, entgegen den bisherigen Aussagen in der Literatur, das weiße Rauschen (ohne Zusatz) nicht zu empfehlen.

Vielmehr eignet sich der Sound „Hier her“ (weibliche Altstimme, getragen, Ruffertz), im Wechsel mit dem Lockgesang des Rotkehlchens, das mit leichtem weißem Rauschen hinterlegt ist.

Diese Signalkombination ist sehr gut zu orten, wird im richtigen Sinne interpretiert und positiv beurteilt. Vorteil dieser Kombination wäre, dass sie hohen „Neuigkeitscharakter“ aufweist und auch mit einer einfachen Lautsprecher-Anlage realisierbar ist.

Eine Alternative stellt eine Folge von Sprachausgaben und Vogelgezwitscher dar, etwa in der Reihenfolge:

„Der Notausgang ist hier“ – Vogelstimme Rotkehlchen, die mit leichtem weißem Rauschen hinterlegt ist – „Please, exit here“.

Mit dieser Kombination sind sehr gute Ortung und Interpretation im erwünschten Sinne sichergestellt.

Durch die Kombination mit der Vogelstimme erhalten wir ein „neues“ Signal, dem die Aufmerksamkeit

gewiss ist und das nicht nur von deutsch- und englischsprachigen Nutzern verstanden wird. Allerdings dürfte die Anforderung an die Lautsprecher-Anlage über den Notausgängen hier größer sein.

Technische Realisierung:

Für die lockenden Signale sind Lautsprecher über den Notausgängen erforderlich.

Das Minimum an erforderlicher Qualität für die Lautsprecher – für beide Vorschläge an lockenden Signalen – sollte von einem Akustiker festgelegt werden.

Für den hinaustreibenden Sound werden groß dimensionierte Bassboxen benötigt. Nach Auskunft der Firma Neumann & Müller, München (Spezialist für Veranstaltungstechnik) wird, je nach Tunnelgröße und -länge, alle 60 bis 100 Meter eine Box benötigt, um gleichmäßige Lautstärke zu garantieren. (Anmerkung zum Vergleich: Bei einem Rockkonzert in der Olympiahalle München werden 2 x 3 Boxen der verwendeten Art aufgestellt. Das Fassungsvermögen der Olympiahalle beträgt 14.000 Plätze bei unbestuhlter Arena, umbauter Raum: 427.400 m³.) Die Boxen sind so auszurichten, dass der Schall sich ungehindert ausbreiten kann.

Bei einem Tunnel-Neubau würde sich der Bau einer oder mehrerer Orgelpfeife(n) anbieten: Kommt es nicht auf die Schönheit des Klangs einer Pfeife an, so kann der Pfeifenkörper aus Beton gefertigt werden. Es ist nur wichtig, dass die Innenseite absolut glatt ist, um die Schwingungen nicht zu bremsen.

Eine Orgelpfeife hat den Vorteil, dass sie umso besser funktioniert, je mehr Raum man ihr gibt. Ein Pfeifenkörper muss nicht, wie man es von Kirchen kennt, stehend montiert sein, er kann auch liegen oder an der Decke befestigt sein, wobei jedoch das hohe Gewicht zu berücksichtigen ist. Von der Akustik her wäre z. B. eine Lage auf der Mitteltrennwand günstig. Der Schall könnte sich dann nach beiden Seiten ausdehnen. Der Pfeifenkörper kann auch um die Ecke geführt werden.

Da eine Orgel in der Lage ist, selbst die größten Kathedralen der Welt, etwa den Petersdom in Rom (überbaute Fläche von 15.000 m², fasst 60.000 Menschen) oder Notre-Dame de la Paix in Yamoussoukro, Elfenbeinküste (überbaute Fläche 30.000 m², fasst 18.000 Menschen), klanglich zu durchdringen, dürfte sie selbst mit großen Tunneln keine Probleme haben. Zudem ist der Wartungsaufwand sehr gering.

12 Sprachausgaben

Der technische Stand der Sprachspeicherung eröffnet Möglichkeiten, Informationen so aufzubereiten, abzuspeichern und darzubieten, dass sie im Bedarfsfall abgerufen werden können. Um größtmögliche Verständlichkeit und Akzeptanz beim potenziellen Nutzer zu erreichen, sollte eine Reihe psychoakustischer und gestalterischer Kriterien Berücksichtigung finden, die im Folgenden angesprochen werden. Dabei sind die akustischen Besonderheiten des Tunnels im Auge zu behalten.

12.1 Vor- und Nachteile von Sprachausgaben

Sprachausgaben im Tunnel weisen Vorteile, aber auch Nachteile auf:

- Tunnel sind ein extrem schallharter Raum – daher ist eine Reihe von Punkten zu berücksichtigen – siehe unten. Es ist zu empfehlen, Sprachproben in realer Tunnel-Umgebung auf Verständlichkeit zu testen.
- Der Inhalt einer Sprachausgabe ist nur Personen zugänglich, die die gespeicherte Sprache (z. B. Deutsch, Englisch, Französisch) verstehen. Verfügt der Hörer nicht über Kenntnisse der entsprechenden Sprache, so geben ihm Sprachausgaben keine Hilfestellung. Von den 82 Millionen Einwohnern in Deutschland sind nach Angaben des Statistischen Bundesamtes viele anderer Staatsangehörigkeit, wie Bild 12.1 zeigt. Über ihre Sprachkenntnisse ist zwar nichts bekannt, doch ist zumindest bei einem Teil von mangelhaften Kenntnissen auszugehen. Kommt noch die schwierige Verständnissituation in der schallharten Umgebung des Tunnels hinzu, so ist die Wahrscheinlichkeit, eine Durchsage in einer nicht geläufigen Sprache zu verstehen, gering.
- Noch schwieriger stellt sich die Situation für Touristen, Durchreisende und ausländische Lieferfahrzeuge dar.
- Für Gehörlose oder schwerhörige Personen sind akustische Informationen keine Hilfe.
- Sprachausgaben, soweit sie verständlich sind, bieten die Möglichkeit, dem Tunnelnutzer gezielt Hinweise zu geben, was er unternehmen soll.
- Bei optimaler Gestaltung bietet Sprache gute Chancen zur gezielten Informationsübermittlung.

Staatsangehörigkeit	Insgesamt
Türkei	1.738.831
Italien	534.657
Polen	361.696
Serbien und Montenegro	316.823
Griechenland	303.761
Kroatien	227.510
Russische Föderation	187.514
Österreich	175.653
Bosnien und Herzegowina	157.094
Ukraine	128.950
Niederlande	123.466
Portugal	115.028
Spanien	106.819
Frankreich	104.085
Vereinigte Staaten	99.265
Vereinigtes Königreich	96.507
Vietnam	83.076
China	75.733

Bild 12.1: Staatsangehörigkeit der ausländischen Bevölkerung in Deutschland 12'2006 (aus: www.destatis.de, 2007)

- Theoretisch können sehr viele verschiedene Meldungen bereitgehalten werden, um Durchsagen für alle denkbaren Ereignisse zur Verfügung zu haben. Allerdings ist bei einem großen Zeichenvorrat die Auswahl umfangreich und damit die Wahrscheinlichkeit der Fehlbedienung eines Operators sehr hoch, zumal in einer Situation, die stressbehaftet ist. Man wird sich daher auf die wichtigsten Ereignisse beschränken.

Manches spricht für Sprachausgaben, jedoch nur, wenn sie optimal gestaltet sind. Im Folgenden sollen daher die Kriterien für optimale Gestaltung besprochen werden.

12.2 Wie werden Sprachausgaben erzeugt, gespeichert, ausgegeben?

Erzeugung und Speicherung:

Durch den Einsatz der Mikroelektronik ist die technische Realisierung von Sprachausgaben inzwischen unproblematisch.

Ausgangspunkt sollte wegen der besseren Verständlichkeit nicht die synthetische, sondern die natürliche Sprache eines besonders geschulten Sprechers sein (siehe „Aspekte der Psychoakustik“). Je nach verwendeter Methode kann die Sprache analog, d. h. ihrem Schwingungsverlauf entsprechend, oder digital bzw. digital komprimiert gespeichert werden. Die Verwendung digitalisierter Aufnahmen stellt eine Zerlegung und Umrechnung von Schwingungen in „Nullen“ und „Einsen“, also Rechenwerte, dar. Mittels eines Digital-Analog-Wandlers kann dann aus dem Rechenwert wieder ein hörbarer Ton gewonnen werden (vgl. JAHNKE, 2003).

Man kann einzelne Wörter, oder eine gesamte Sprachausgabe, sozusagen im Paket, abspeichern. Diese Dateien werden dann auf dem Rechner der Tunnel-Leitzentrale bereitgestellt. Für den Operateur ist es wegen der erhöhten Verwechslungsgefahr in Stresssituationen günstiger, wenn einige wenige Sprachausgaben als „Gesamtpaket“ zur Verfügung stehen.

Ausgabe:

Je nach Ereignisfall kann entweder automatisch (z. B. durch ein Signal des Rauchdetektors/ des Brandmeldekabels) oder durch einen Operator eine bestimmte Sprachausgabe aktiviert werden. Die Ausgabe der Sprachdatei erfolgt über die Lautsprecher im Tunnel. In manchen Tunneln ist auch schon das Einsprechen in Radiosender möglich. Vgl. hierzu POSCHMANN, FELDGES, KOCHS, ARETZ, PÖGEL, BALTZER & ZUMBROICH (2007).

Allerdings müssen Sprachausgaben für die Tunnellautsprecher wesentlich langsamer gesprochen werden als Texte für Radiosender.

Technische Zuverlässigkeit:

Sowohl die Messwertaufnehmer als auch Schnittstellen, die den Alarm bzw. die Sprachausgabe auslösen, müssen dem Kriterium höchster technischer Zuverlässigkeit entsprechen, ebenso wie die Hitzebeständigkeit von Leitungen und Lautsprechern. Zur technischen Zuverlässigkeit gehört auch die korrekte Zuordnung von Sprachausgaben zum Ereignis.

12.3 Aspekte der Psychoakustik

Akustische Wahrnehmung und Sprachverständnis:

Die normale akustische Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen liegt zwischen 20 und 20.000 Hertz. Mit zunehmendem Alter ist jedoch ein Absinken der oberen Hörgrenze festzustellen. Sie liegt bei einem 50-Jährigen um 12.000, bei einem 70-Jährigen um 6.000 Hertz (STEVENS & WARSHOFSKY, 1980).

Zum Vergleich: Analoge Telefone nutzen 300 bis 3.400 Hertz, also eine Bandbreite von 3,1 kHz.

Sprachliche Meldungen im Tunnel sind gleichbedeutend mit „Hören unter sehr erschwerten Bedingungen“. So ist mit Verdeckungseffekten durch die Geräusche des eigenen Fahrzeugs und den Lärm fremder Pkw und Lkw zu rechnen. Kommen noch Sirenen von Rettungsfahrzeugen und das Brummen der Lüftungs-Ventilatoren hinzu, so steigt der Lärmpegel erheblich an. In der schallharten Umgebung im Tunnel macht sich dies besonders unangenehm bemerkbar.

Daher sollte, falls im Tunnel Radioempfang möglich ist und die Möglichkeit des Einspielens in Radiosender besteht, dieser Übermittlungsweg zusätzlich genutzt werden.

Wie eingangs dargestellt, sinkt das Sprachverständnis mit zunehmendem Alter, besonders unter anstrengenden Hörbedingungen. Allerdings, so stellt CORSO (1977) fest, kann man mit einer Reduzierung der Sprachgeschwindigkeit noch bei 70-Jährigen 100-prozentiges Verständnis erreichen. Für normale Räume hält er eine etwas langsamere Sprachgeschwindigkeit als die eines Nachrichtensprechers (Wortrate von maximal 140 Wörtern pro Minute) für ausreichend – diese Wortrate muss sicherlich für den Tunnel extrem reduziert werden. Als Wert schätzen wir 20 Wörter pro Minute.

PLOMP & MIMPEN (1979), die die Geräuschkulisse normaler Räume untersuchen, stellen in Bezug auf Ältere Folgendes fest: Geräuschpegel in Räumen für Ältere müssen um 5 bis 10 dB niedriger sein als für normal hörende Personen. Im Umkehrschluss würde dies bedeuten, dass eine Durchsage um diesen Betrag lauter sein müsste, um auch noch von älteren Personen verstanden zu werden.

Bandbreite und Verständlichkeit:

Je nach technischer Realisierung kann das Frequenzspektrum von Sprachausgaben (im Vergleich

zur natürlichen Sprache) eingeschränkt sein. Die Verständlichkeit wird mit Hilfe eines Index bestimmt, der ein objektives, jedoch künstliches Maß darstellt. Bestimmt wird er anhand sog. „Logatome“, also sinnleerer Silben. FRENCH & STEINBERG konnten schon 1947 für normale Umgebungsbedingungen zeigen, dass der Verständlichkeitsindex von der verwendeten Frequenz abhängt: So liegt er unter 40 % bei Frequenzen zwischen 250 und 1.515 Hz, um 80 % bei etwa 250-3.680 Hz und um 100 % bei 250-7.000 Hz (vgl. FRENCH & STEINBERG, 1947, S. 104/105).

Sätze sind besser verständlich als isolierte Wörter und Silben. Wie FRENCH & STEINBERG zeigten, erreichen sie bereits bei einem Verständlichkeitsindex von 40 % den maximalen Wert – dies gilt für Umfeldbedingungen ohne Störgeräusche.

Die Versuchsbedingungen, die EGAN & WIENER (1946) realisierten, dürften näher an die Situation im Tunnel heranreichen: Bei zweiseitig eingegrenztem Frequenzspektrum des Signals und ungefiltertem Störgeräusch mit einem Frequenzumfang von 100-8.000 Hz ergibt sich, auch bei geringem Abstand zwischen Signal und Rauschen, ein höherer Verständlichkeitsindex bei Bändern zwischen 130-9.200 bzw. 340-3.900 Hz, verglichen mit schmalen Bändern, z. B. 550-2.500 oder 870-1.500 Hertz (Mittelfrequenz jeweils 1.100 Hz). Je weiter das Frequenzband nach oben oder unten ausgedehnt werden kann, desto besser ist demnach die Verständlichkeit.

Anforderungen an die Stimmqualität des Sprechers:

Wie eine Untersuchung von GORA & ROTHBAUER (1980) zeigt, ist natürliche Sprache besser verständlich als Sprache, die auf Syntheseverfahren basiert.

Vor allem unter ungünstigen Hörbedingungen (z. B. starken Umgebungsgeräuschen) erlangt die Qualität des Sprechers große Bedeutung.

McCORMICK (1964) fasst die Charakteristika gut verständlicher Sprecher zusammen:

- Gut verständliche Sprecher zeigen, im Vergleich zu schlecht verständlichen, eine längere durchschnittliche Silbendauer (gemessen in Sekunden).
- Die besser verständliche Gruppe zeigt eine größere Intensität, wobei unter Intensität das

Charakteristikum der Sprache verstanden wird, welches das Gefühl der Lautstärke produziert.

- Bei den besser verständlichen Sprechern ist der Anteil der Sprechzeit an der Gesamtzeit länger, ihre Pausenzeiten sind kürzer.
- Ihre Variabilität in der Tonhöhe, bezogen auf die fundamentalen Vokalfrequenzen, ist stärker.

McCORMICK weist darauf hin, dass Sprecher, die für schlechtere Übertragungsbedingungen trainiert werden, mit relativ stetiger Intensität sprechen, also bezüglich der Intensität nicht stark variieren.

Zum Geschlecht des Sprechers: Da die Tonlage eines Sprechers (Median der Frequenzen) keine entscheidende Variable für die Güte der Verständlichkeit darstellt, kann unter diesem Gesichtspunkt sowohl eine Männer- als auch eine Frauenstimme verwendet werden. Da Männern (immer noch) mehr Technikkompetenz zugeschrieben wird (vgl. DÖGE, 2002), könnte es sein, dass in kritischen Situationen die Instruktion einer männlichen Stimme eher befolgt wird.

Lautstärkeregelung:

Es ist erforderlich, die Grundlautstärke entsprechend den Umgebungsgeräuschen zu erfassen (Lärm durch Pkw und Lkw, Geräusche der Strahlventilatoren etc.). Ist die Zusammensetzung des maskierenden Geräusches unbekannt, so empfehlen BIRBAUMER & SCHMIDT (2006), mindestens 10 dB über die Grundlautstärke zu gehen. Nur so ist die Verständlichkeit wahrscheinlich.

12.4 Meldungen – Generelles

Welche Meldungen kommen in Frage?

Meldungen sind nur für gravierende Störungen vorzusehen. Sie betreffen die Themen:

- Stau im Tunnel, Verkehr stockt bzw. steht.
- Unfall im Tunnel, Verkehr stockt bzw. steht.
- Brand im Tunnel, Verkehr fließt bzw. steht.

Häufigkeit der Darbietung einer Meldung:

Es ist sinnvoll, die Meldungen so oft zu wiederholen, bis alle Personen im Tunnel der entsprechenden Aufforderung nachgekommen sind.

Soweit möglich, ist das Verhalten der Personen im Tunnel auf den Bildschirmen in der Tunnel-Zentrale zu beobachten, um im Bedarfsfall entsprechende Instruktionen geben zu können (z. B. Rettungsgasse frei halten).

Sprache:

Zunächst sollte die Meldung in der Landessprache ausgegeben werden (hier: Deutsch), anschließend in Englisch und weiteren verfügbaren Sprachen. In den Grenzregionen sind entsprechende fremdsprachige Versionen zu empfehlen, z. B. Italienisch, Französisch, Niederländisch, Dänisch, Polnisch, Tschechisch.

Inhaltliche und sprachliche Gestaltung der Meldungen:

Um die Aufmerksamkeit der Personen im Tunnel zu erlangen und sie kognitiv auf die Ausgabe einer Meldung einzustimmen, ist ein Vorwarnreiz günstig (FÄRBER & FÄRBER, 1984). Theoretisch kann er aus einem oder mehreren Tönen, einem Wort oder einer Wortsequenz oder einer Kombination aus Ton und Wort bestehen.

Kriterien für die optimale Gestaltung von Meldungen:

Meldungen, deren Inhalt nicht verständlich ist, stiften nur Verwirrung. Gute Verständlichkeit kann durch die Berücksichtigung folgender Kriterien erreicht werden:

- Verwendung eines einfachen Wortschatzes und geläufiger Wörter: Auf weniger bekannte Wörter, komplizierte Fachausdrücke und Fremdwörter muss verzichtet werden. Entscheidend ist nicht die absolut korrekte Formulierung im technischen Vokabular des Tunnel-Spezialisten, sondern die gute Verständlichkeit für den Laien. So ist beispielsweise das Wort „Querschlag“ für den Normalbürger unbekannt – es ist eine Beschreibung erforderlich, dass damit die Tür zur anderen Fahrtrichtung in der mittleren Tunnelwand gemeint ist.
- Verwendung vollständiger Sätze: Unter normalen Bedingungen gilt, dass Sätze wesentlich besser verständlich sind als einzelne Wörter und etwas besser verständlich als Statements, z. B. „Bitte verlassen Sie den Tunnel“ ist besser zu verstehen als „Tunnel verlassen“. Welche Rolle die Halligkeit der Tunnel hierbei jedoch spielt, muss noch geprüft werden.

- Kurze Sätze sind günstig: Soweit dies inhaltlich zu rechtfertigen ist, sollten die Sprachausgaben aus 5- bis 6-Wort-Sätzen aufgebaut sein. Nebensätze sind zu vermeiden, da sie sich erschwerend auf das Verständnis der Meldung auswirken.
- Sätze mit Funktionswörtern beginnen: Als Funktionswörter werden z. B. bestimmte oder unbestimmte Artikel bezeichnet. Sie dienen der Strukturierung des Satzes und stehen im Sprachgebrauch an vorderster Stelle. Sie erhöhen die Redundanz eines Satzes und sind daher für die Verständlichkeit von großer Bedeutung. Beispiel: Satzbeginn mit „Der ...“, „Ein ...“ etc.
- Einfache Satzstruktur: Als günstig hat sich der Satzaufbau nach der Regel „Subjekt – Prädikat – Objekt“ (SPO) erwiesen. „Zerrissene“ Verben sollten vermieden werden. Beispiel: „Ein Fahrzeug brennt“, anstelle von „Es ist ein Fahrzeug in Brand geraten“.
- Anweisungen einfach und eindeutig gestalten: Je einfacher, gebräuchlicher und eindeutiger die Sprachinformation abgefasst ist, desto schneller wird der Prozess der Sprachwahrnehmung und des Verständnisses ablaufen. Besondere Bedeutung erlangt dies in kritischen, informationsüberfrachteten Momenten, in denen der Tunnelnutzer zu situationsangepasstem Verhalten veranlasst werden soll.
- Negationen und passiv formulierte Sätze vermeiden: Negativ oder passiv formulierte Sätze sind schwieriger zu verstehen.
- Möglichkeit zum Kennenlernen bieten: Personen können einen bekannten Sprecher bereits nach etwa ein bis zwei Silben identifizieren und somit gut zuordnen. Diese Fähigkeit sollte man nutzen, indem man einen Tunnel-Notfall-Sprecher mit einer charakteristischen Stimme einsetzt. Die Stimme sollte durch Probedurchsagen über Funk und Fernsehen europaweit bekannt gemacht werden. Weiterhin wäre es ein großer Gewinn, wenn alle Mitteilungen den Autofahrern von vornherein bekannt wären. Denkbar wäre hier eine „Trainingsseite“ via Internet, Fernsehspots u. Ä.

Handlungsanweisungen:

Das akustische Medium der Sprachausgabe bietet sich geradezu an, Handlungsanweisungen zu

geben. Allerdings muss der Text wegen des starken Halls in Tunneln sehr langsam gesprochen werden. So dauert beispielsweise die im Tunnel Aubing/Petuelntunnel verwendete Sequenz „Achtung, eine wichtige Durchsage. Im Tunnel ist ein Brand ausgebrochen“ mit 10 Wörtern bzw. 20 Silben je nach Sprecher 21 bis 23 Sekunden.

Handlungsanweisungen sollten somit auf Situationen beschränkt werden, in denen sie wirklich erforderlich sind – sie führen sonst zu Akzeptanzproblemen seitens der Benutzer. Als Basis, in welchen Fällen Information erforderlich ist, können einerseits die Ergebnisse der in Kapitel 4.2 beschriebenen Internetbefragung verwendet werden, andererseits die bei den Versuchen gewonnenen Fakten.

Handlungshilfen sollten also die Zustandsmeldung ergänzen, wenn bei den Tunnelnutzern Wissensdefizite festgestellt wurden und die Information für die Sicherheit der Tunnelnutzer entscheidend ist. Beispielsweise könnten die Tunnelnutzer aufgefordert werden, sich bei Rauchbildung am Boden entlang zu bewegen.

12.5 Sprachausgaben – typische Beispiele

Der Anhang G enthält bereits vorliegende Sprachausgaben aus verschiedenen Tunneln Deutschlands. Um diese Texte zu erhalten, wurden Betreiber angeschrieben, die an der Befragung zur Tunnelsicherheit, siehe 1. Zwischenbericht, Kapitel 5, teilgenommen und dort angegeben hatten, über Textvorlagen oder Sprachkonserven zu verfügen.

Diese bislang verwendeten Sprachdurchsagen weisen eine große Heterogenität auf und sind bezüglich Verständlichkeit und Eindeutigkeit oft nicht optimal.

Neue Meldungen:

Daher wurden neue Meldungen formuliert, sie basieren auf

- theoretischen Kriterien, wie sie die Psycholinguistik für eine optimale Gestaltung nahelegt,
- den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Befragungen zum Verhalten bei Störungen und eigenen Experimenten sowie

- technischen Randbedingungen und Erfordernissen.

Tunnel-Ausstattung:

Aufgrund der technischen Randbedingungen wird unterschieden zwischen

- Tunnel mit herkömmlicher Lautsprechertechnologie und
- Tunnel mit neuartigen Hornlautsprechern und synchronisierter Längsbeschallung (SLASS), vgl. REIMANN & LÖWER, 2009.

Durchsagen für herkömmliche Lautsprecher:

Die Akustik in Tunnel lässt mit herkömmlicher Lautsprechertechnik nur extrem kurze Durchsagen zu, wobei bereits hier die Möglichkeit der Sprachübertragung angezweifelt wird (MAYER & REIMANN, 2008). Längere und differenziertere Sprachdurchsagen bleiben unverständlich und sind daher nutzlos. Für diese technische Ausstattung schlagen wir daher vor, nur zwei Arten von Störfällen zu unterscheiden und die in Bild 12 dargestellten Sprachanweisungen vorzusehen.

Durchsagen für neue Lautsprecher und Radio-Einsprache:

Es ist jedoch davon auszugehen, dass künftig durch Verwendung entsprechender Lautsprecher und Technologie die Verständlichkeit der Sprachdurchsagen deutlich gesteigert werden kann.

Additiv sind Durchsagen über das Radio sinnvoll und möglich. Für differenziertere Durchsagen per Lautsprecher und für Radiodurchsagen sollen in Abhängigkeit vom Störfall einheitliche Phrasen verwendet werden.

Zunächst wurde eine Matrix erstellt, die für die jeweilige Störung eine Situationsanalyse vornimmt (siehe Bild 12.3).

Ereignis	Durchsage per Lautsprecher
Stau/Unfall	< Gong> Achtung! Unfall – Bitte Motor ausschalten. Bleiben Sie im Fahrzeug sitzen.
Brand	< Gong> Achtung! Brand! Laufen Sie sofort zum Notausgang.

Bild 12.2: Sprachausgaben für Tunnel mit herkömmlichen Lautsprechern

Situationsanalyse	Maßnahmen	Zeichen	Sprachausgabe Nr. an	
			vF	Σ
Hindernis auf der Fahrbahn (z. B. Fahrzeug) – ein Fahrstreifen pro Richtung				
Verkehr fließt, stockt, oder steht	• Geschwindigkeit im Tunnel und der Zufahrt reduzieren	⊖		
	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		01 02 03	11
	• Durchsage über Radio			21
Hindernis auf der Fahrbahn – zwei oder mehr Fahrstreifen pro Richtung				
Verkehr fließt oder stockt	• Geschwindigkeit im Tunnel und der Zufahrt reduzieren	⊖		
	• blockierten Fahrstreifen sperren (blinkender Pfeil)	↔		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		01 02 03	11
	• Durchsage über Radio			21
Verkehr steht	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		01 02 03	11
	• Durchsage über Radio			21
Stau				
Verkehr stockt	• Geschwindigkeit im Tunnel und der Zufahrt reduzieren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher			12
	• Durchsage über Radio			22
Verkehr steht	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher			13
	• Durchsage über Radio			23
leichter Unfall				
Verkehr fließt oder stockt	• Geschwindigkeit im Tunnel und der Zufahrt reduzieren	⊖		
	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		01 02 03	14
	• Durchsage über Radio			24
Verkehr steht	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		01 02 03	15
	• Durchsage über Radio			25
schwerer Unfall				
Verkehr stockt oder steht	• Geschwindigkeit reduzieren	⊖		
	• betroffene Fahrtrichtung des Tunnels sperren	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher		04	15
	• Durchsage über Radio			25

Bild 12.3: Matrix zu Störungen, Situationsanalysen, Maßnahmen, Zeichen und Sprachdurchsagen bei Ereignissen im Tunnel

Situationsanalyse	Maßnahmen	Zeichen	Sprachausgabe Nr. an	
			vF	Σ
Brand				
Verkehr fließt	• Fahrstreifen zusammenführen (bei mehr als einem Fahrstreifen pro Richtung)	⊕		
	• Tunnel sperren (beide Fahrtrichtungen)	⊖		
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher ⇒ Fahrzeuge aus dem Tunnel fahren		01 02 03	16
	• Durchsage über Radio ⇒ Fahrzeuge aus dem Tunnel fahren			26
Verkehr stockt oder steht	• Tunnel sperren (beide Fahrtrichtungen)	⊖		
	• Durchsage/Notfall-Töne über Lautsprecher ⇒ Fahrzeuge verlassen, Insassen evakuieren			17
	• Durchsage über Radio ⇒ Fahrzeuge verlassen, Insassen evakuieren			27
Nach dem Ereignis				
Verkehr normal	• Beschränkungen aufheben			
	• Durchsage über Tunnel-Lautsprecher			18
	• Durchsage über Radio			28
Zeichenerklärung: Sprachausgabe Nummer: siehe die folgenden Sprachausgaben-Texte vF: Information für das verursachende Fahrzeug Σ: Information an alle Personen im Tunnel ⊕: Anzeige der Geschwindigkeit (falls Anzeigemöglichkeit vorhanden) ⊖: Sperrung durch Licht-Signalanlage und/oder Schranke ↙ oder ↘: blinkendes Zeichen „Spurwechsel“ (falls Anzeigemöglichkeit vorhanden)				

Bild 12.3: Fortsetzung

Als Situationen kommen infrage:

- Hindernis auf der Fahrbahn,
- Stau,
- leichter bzw. schwerer Unfall und
- Brand.

Soweit erforderlich umfasst die Matrix unterschiedliche Maßnahmen für Tunnel mit einem oder mehreren Fahrstreifen pro Richtung. In der Praxis wird daher in Abhängigkeit von der Bauart des Tunnels nur eine Teilmenge der Sprachdurchsagen zum Einsatz kommen.

Für die jeweilige Situation wird zunächst unterschieden, ob der Verkehr noch fließt, stockt oder bereits steht. In den meisten Fällen ist es nicht von Bedeutung, ob der Verkehr noch fließt oder bereits stockt, da die Störung in jedem Falle zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit führt und Gegenmaßnahmen erfordert.

In der folgenden Spalte der Matrix sind Maßnahmen angesprochen:

Sie regeln durch Zeichen oder Verkehrseinrichtungen den Verkehrsfluss im Tunnel bzw. verhindern die weitere Zufahrt.

Beispiele: Beschränkung der Geschwindigkeit durch Zeichen 274 (zulässige Höchstgeschwindigkeit); Sperrung durch eine Schranke oder Signalanlage; Aufforderung zum Spurwechsel durch blinkende Pfeile.

Die Spalte mit den Sprachdurchsagen enthält die Nummern, die auf die jeweiligen Sprachkonserven verweisen und mit diesen verknüpft sind.

Die Sprachdurchsagen an alle Tunnelnutzer (gekennzeichnet durch das Σ-Symbol) werden mit der Wahl der Störungsnummer automatisch ausgegeben. In der Abbildung der Sprachdurchsagen beginnt ihre Nummer mit 1, siehe Bild 12.4.

Optional kann der Tunnelbetreiber in bestimmten Situationen die Insassen des verursachenden Fahrzeugs (Spalte gekennzeichnet durch vF) direkt ansprechen. Die entsprechenden Phrasen sind in der letzten Spalte vermerkt. In der Abbildung der Sprachdurchsagen beginnt ihre Nummer mit 0 (siehe Bild 12.4).

Sprachdurchsagen an verursachendes Fahrzeug	
Nr. 01	< Gong> Achtung! Bitte fahren Sie Ihr Fahrzeug aus dem Tunnel.
Nr. 02	[falls Nothaltebucht vorhanden]: < Gong> Achtung! Bitte fahren Sie Ihr Fahrzeug in die Nothaltebucht.
Nr. 03	[falls ausreichend breiter Seitenstreifen vorhanden]: < Gong> Achtung! Bitte fahren Sie Ihr Fahrzeug auf den Seitenstreifen.
Nr. 04	(Unfall, schwer): < Gong> Achtung! Bitte bleiben Sie ruhig. Hilfe ist unterwegs.
Sprachdurchsagen an alle Tunnelnutzer	
Nr. 11	(Hindernis): < Gong> Achtung! Ein Hindernis liegt auf der Fahrbahn. Bitte fahren Sie langsam. Halten Sie großen Abstand. Überholen Sie nicht [bei zwei Fahrstreifen/Richtung].
Nr. 12	(Stau, Verk. fließt): < Gong> Achtung! Der Verkehr staut sich im Tunnel. Halten Sie großen Abstand. Bitte fahren Sie langsam. Überholen Sie nicht [bei zwei Fahrstreifen/Richtung].
Nr. 13	(Stau, Verk. steht): < Gong> Achtung! Der Verkehr staut sich im Tunnel. Halten Sie großen Abstand. Bitte den Motor ausschalten. Bitte bleiben Sie im Fahrzeug sitzen.
Nr. 14	(leichter Unfall, Verk. stockt): < Gong> Achtung! Der Verkehr staut sich im Tunnel. Ein Unfall ist passiert. Halten Sie großen Abstand. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Bitte fahren Sie langsam weiter. Überholen Sie nicht.
Nr. 15	(Unfall, andere Fälle): < Gong> Achtung! Der Verkehr staut sich im Tunnel. Ein Unfall ist passiert. Halten Sie großen Abstand. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Bitte den Motor ausschalten. Bitte bleiben Sie im Fahrzeug sitzen.
Nr. 16	(Brand, Verk. fließt): < Gong> Achtung! Ein Fahrzeug brennt im Tunnel. Schließen Sie die Fenster. Halten Sie großen Abstand. Bitte fahren Sie auf die rechte [linke] Fahrspur. Bitte fahren Sie langsam weiter. Überholen Sie nicht. Fahren Sie zügig am brennenden Fahrzeug vorbei. Die Feuerwehr ist unterwegs.
Nr. 17	(Brand, Verk. steht): < Gong> Achtung! Ein Fahrzeug brennt im Tunnel. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Den Motor ausschalten. Den Schlüssel stecken lassen. Bitte sofort aussteigen und zum Notausgang laufen. Vom Rauch weglaufen. Andere Menschen mitnehmen. Es besteht Lebensgefahr. Folgen Sie dem grünen Symbol.
Nr. 18	< Gong> Achtung! Die Störung ist behoben. Gute Fahrt.

Bild 12.4: Sprachdurchsagen für Tunnel-Lautsprecher*) bei Ereignissen im Tunnel

*) technische Voraussetzung: Tunnel mit neuartigen Hornlautsprechern und synchronisierter Längsbeschallung

Die Nummer der entsprechenden Meldung für die Radio-Einsprache beginnt mit 2 (siehe Bild 12.5).

Das Ziel der hier vorgeschlagenen Sprachausgaben ist es, die Meldungen zu vereinheitlichen und auf eine überschaubare Anzahl zu begrenzen. Dies erleichtert dem Bedienpersonal die Auswahl im Ereignisfall. Im Falle einer Störung muss der Betreiber eine einzige Taste drücken, um die gesamte Kette von Durchsagen auszulösen. Einheitliche Sprachdurchsagen bieten zudem allen Interessierten die Möglichkeit des Kennenlernens und erhöhen damit die Wahrscheinlichkeit des Verstehens, wie oben besprochen.

Wie Sprachdurchsagen per Lautsprecher bzw. Radio-Einsprache mit den in dieser Studie ent-

wickelten optischen und akustischen Signalen abgestimmt werden können, wird in Kapitel 13 besprochen.

Nr. 21	<p>(Hindernis):</p> <p>< Gong> Sie hören eine Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Ein Fahrzeug [ein großer Gegenstand] ist liegen geblieben und blockiert die Fahrbahn im Tunnel. Fahren Sie am rechten [linken] Fahrbahnrand. Fahren Sie langsam. Halten Sie großen Abstand. Überholen Sie nicht. Wir melden, wenn die Gefahr vorüber ist.</p> <p>(Anmerkung: Statt „Tunnel XY“ den Namen des Tunnels einfügen. Statt „Strecke zwischen A und B“ die Strecke genau bezeichnen, A und B sollen Ortsnamen oder Ausfahrten bezeichnen.)</p>
Nr. 22	<p>(Stau, Verk. stockt):</p> <p>< Gong> Sie hören eine Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Der Verkehr staut sich im Tunnel XY. Bitte fahren Sie langsam. Halten Sie großen Abstand. Nicht überholen. Wir melden, wenn die Gefahr vorüber ist.</p>
Nr. 23	<p>(Stau, Verk. steht):</p> <p>< Gong> Sie hören eine Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Der Verkehr staut sich im Tunnel XY. Halten Sie großen Abstand zu den Fahrzeugen vor Ihnen. Den Motor bitte ausschalten. Bitte bleiben Sie im Fahrzeug sitzen. Achten Sie auf weitere Durchsagen. Wir melden, wenn die Gefahr vorüber ist.</p>
Nr. 24	<p>(leichter Unfall, Verk. stockt):</p> <p>< Gong> Sie hören eine Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Der Verkehr staut sich im Tunnel XY wegen eines Unfalls. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Die Mitte für Rettungsfahrzeuge frei halten. Bitte fahren Sie langsam. Halten Sie großen Abstand. Nicht überholen. Achten Sie auf weitere Durchsagen. Wir melden, wenn die Gefahr vorüber ist.</p>
Nr. 25	<p>(Unfall, andere Fälle):</p> <p>< Gong> Sie hören eine Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Der Verkehr staut sich im Tunnel XY wegen eines Unfalls. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Die Mitte für Rettungsfahrzeuge frei halten. Halten Sie großen Abstand. Den Motor bitte ausschalten. Bitte bleiben Sie im Fahrzeug sitzen. Achten Sie auf weitere Durchsagen. Wir melden, wenn die Gefahr vorüber ist.</p>
Nr. 26	<p>(Brand, Verk. fließt):</p> <p>< Gong> Achtung, Autofahrer! Sie hören eine dringende Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Der Verkehr staut sich im Tunnel XY. Ein Fahrzeug brennt. Schließen Sie die Fenster. Bitte fahren Sie auf die rechte [linke] Fahrspur. Die andere Spur für die Feuerwehr frei lassen. Bitte fahren Sie langsam weiter. Halten Sie großen Abstand. Nicht überholen. Fahren Sie zügig am brennenden Fahrzeug vorbei. Die Feuerwehr ist unterwegs. Achten Sie auf weitere Durchsagen.</p>
Nr. 27	<p>(Brand, Verk. steht):</p> <p>< Gong> Achtung, Autofahrer! Sie hören eine dringende Meldung für alle Autofahrer, die sich im Tunnel XY auf der Strecke zwischen A und B befinden: Ein Fahrzeug brennt im Tunnel. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand. Die Mitte für die Feuerwehr frei halten. Halten Sie großen Abstand. Den Motor ausschalten. Den Schlüssel stecken lassen. Es besteht Lebensgefahr! Bitte sofort aussteigen. Sofort vom Rauch weg zum nächsten Notausgang laufen. Andere Menschen mitnehmen. Folgen Sie dem grünen Symbol. Verlassen Sie den Tunnel so schnell wie möglich.</p>
Nr. 28	<p>< Gong> Achtung! Die Störung im Tunnel XY ist behoben. Wir wünschen Ihnen eine gute Fahrt.</p>

Bild 12.5: Sprachausgaben für die Einsprache in Radiosender bei Ereignissen im Tunnel

13 Zusammenfassung

Verhalten bei Bränden:

Zunächst wurde das Verhalten von Fahrzeuginsassen bei Tunnelbränden analysiert. Dabei kristallisierte sich heraus, dass die Verhaltensaspekte ein

breites Spektrum zeigen: Tunnelnutzer, die einfach im Fahrzeug sitzen bleiben, solche, die als Zuschauer herbeieilen – hier wird die Gefahr nicht als solche wahrgenommen. Andere flüchten zu Fuß oder rückwärts fahrend – hier wird bevorzugt der Weg, den der Nutzer gekommen ist, eingeschlagen. Berichtet wird auch von Fahrern, die ihr bren-

nendes Fahrzeug noch aus der Gefahrenzone zu bringen versuchen oder Löschversuche starten, von Tunnelmitarbeitern und Polizisten, die beherzt und besonnen eingreifen.

Empfehlungen:

Empfehlungen verschiedener Institutionen zum „richtigen“ Verhalten im Brandfalle werden verglichen und optimales Verhalten generell und bei einem Brand im Tunnel formuliert (vgl. Kapitel 3.4 und Anhang C).

Internetbefragung:

Mittels einer Internetbefragung wurden, neben Einstellungen und Ängsten, vor allem Wissensinhalte bei Notsituationen in Tunnel erhoben. Die Wissensfragen umfassen sowohl die Ausstattung von Tunnel (Bedeutung von Piktogrammen für Notausgänge, Rettungswege etc.) als auch das richtige Verhalten bei Unfällen oder Bränden.

Mit 423 Personen aller Altersgruppen ist es gelungen, eine repräsentative Stichprobe zu gewinnen.

Der allgemeine Wissensstand der Befragten zu Schildern im Tunnel ist teilweise recht gut, etwa bei Zeichen für Feuerlöscher, Notruftelefon, Notausgang und Tunnel (korrekt antworten 95 bis 100 % der Befragten). Nicht so gut bekannt ist das Zeichen für die Nothaltebucht und die Richtungsangabe für den Notausgang bzw. den Rettungsweg (68 bis 78 % richtige Antworten). Nur 31 % interpretieren das Zeichen für Rettungsraum (Schweiz) richtig.

Eine Fahrt durch den Tunnel wird zumindest gelegentlich von 40 % der Befragten mit dem Gefühl der Angst verbunden. Einen Stau fürchten 56 %. Das Gefühl der Enge und der Unsicherheit stellt sich bei mehr als der Hälfte der Befragten ein, mit zunehmender Länge eines Tunnels fühlt sich ein Großteil der Befragten unwohl.

Daher verwundert es nicht, wenn 84 % die Ansicht vertreten, man müsse mehr für die Sicherheit im Tunnel tun. Am häufigsten werden Verbesserungen an Belüftung und Beleuchtung gewünscht, weiterhin mehr Fluchtwege und eine bessere Kennzeichnung.

Für ein Mehr an Sicherheit geben 42 % der Befragten an, eine Gebühr bezahlen zu wollen, wobei die Hälfte Beträge zwischen 1 und 5 Euro nennt.

Manche Verhaltensweisen, die für Tunnel gelten, sind gut bekannt: so etwa das Verbot, zu wenden oder rückwärts zu fahren, bei Stillstand den Motor abzustellen, das Anhalten nur im Notfall (92 bis 96 Prozent der Antworten).

Weniger gut bekannt ist die Anweisung, im Tunnel den Verkehrsfunk einzustellen, auf Durchsagen zu achten und nur seitlich anzuhalten (72 bis 78 %).

Nur etwa 1/3 weiß, dass bei Stau im Tunnel ein großer Abstand zum Vordermann eingehalten werden muss.

Bei einem Brandfall im Tunnel wissen fast alle Tunnelnutzer, dass sie das Fahrzeug in einer Pannebucht oder am Rand abstellen müssen. Allerdings sind in diesem Falle nur noch 38 bzw. 46 % der Meinung, man dürfe nicht wenden oder rückwärts fahren.

Sollte das eigene Fahrzeug brennen, so geben etwa 2/3 an, sie würden versuchen, das Fahrzeug noch aus dem Tunnel zu fahren.

Ist der Tunnel durch einen Brand blockiert, so geben 64 % an, einen Löschversuch starten zu wollen, zumindest wenn das Feuer noch nicht groß sei. Jedoch weiß mehr als die Hälfte der Befragten nicht, dass es an jedem Notausgang Feuerlöscher gibt.

16 % würden, wenn im Tunnel nur Feuer und Rauch zu sehen sind, im Fahrzeug bleiben, 19 % wissen nicht, was zu tun ist. Die Zeit, die bei einem Brand zur Evakuierung zur Verfügung steht, wird von 42 % der Befragten überschätzt.

Bei einer Flucht würden 40 % die Fahrzeugschlüssel mitnehmen.

Zur Benachrichtigung der Feuerwehr halten 58 % das Notruf-Telefon für geeignet, 40 % sind der Ansicht, man könne das Notruf-Telefon oder das Handy verwenden.

80 % wissen, dass der Rauch gefährlicher ist als das Feuer, 90 %, dass man vom Rauch weg flüchten muss. Doch nur 65 % sind darüber informiert, dass sich die Rauchgase zunächst oben an der Decke sammeln. 16 % wissen nicht, welche Temperaturen bei einem Brand im Tunnel entstehen können.

Fast alle Befragten geben an, über den Notausgang zu flüchten, oder, falls man das Ende des Tunnels bereits sehen könne, über die Fahrspur.

77 % der Befragten wünschen die Zusendung von Informationsmaterial, woraus nicht nur auf ein großes Informationsbedürfnis, sondern auf einen hohen Unsicherheitsfaktor zu schließen ist.

Defizite und Interventionen:

Das theoretische Wissen über Sicherheitseinrichtungen in Tunnel sowie über das richtige Verhalten bei Störfällen kann aufgrund der Befragungsergebnisse als weitgehend gut eingestuft werden. Allerdings sind zwei Bereiche im Bewusstsein der Nutzer zu wenig ausgeprägt:

- die Dringlichkeit der Reaktion speziell bei Bränden und
- die Notwendigkeit, das Fahrzeug zu verlassen.

Analysen der Verhaltensweisen bei Störfällen und die entsprechenden Konsequenzen zeigen die Problematik dieser Einschätzungen auf:

- Bei frühzeitigem Eingreifen durch Nutzer oder Mitarbeiter konnte die Situation bei Störungen meist unter Kontrolle gebracht werden.
- Das subjektive Sicherheitsempfinden im eigenen Fahrzeug war teilweise verhängnisvoll.

Setzt man die Ergebnisse der Befragung sowie die Beschreibung des konkreten Verhaltens bei Unfällen und Bränden in Beziehung, so werden folgende Schwerpunkte zur Intervention deutlich:

- Der Übergang von der leichten, beherrschbaren zur schweren Störung, bei der nur noch Flucht hilft, muss deutlich gemacht werden. Ziel muss zunächst sein, dass Betroffene kleinere Störungen (z. B. Motorprobleme, die aber eine langsame Weiterfahrt noch ermöglichen) selbst beheben, durch Aufsuchen der Pannenhilfe oder Ausfahren aus dem Tunnel.
- Wird die Situation kritisch, hat durch entsprechende Maßnahmen und Warnungen eine schnelle Räumung des Tunnels zu erfolgen. Hierfür müssen adäquate optische und akustische Signale eingesetzt werden.

In kritischen Situationen kommt der Aufforderung, das Auto zu verlassen, eine besondere Bedeutung zu. Auch hierfür müssen entsprechende Signale entwickelt werden.

Es galt somit, eine gestufte Warnstrategie mit verschiedenen Signalarten, abgestimmt auf die einzelnen Vorkommnisse, zu entwickeln.

Ausbauzustand von Tunneln in Deutschland:

Um einen Eindruck zu erhalten, welcher sicherheitstechnische Stand und welche Notfallpläne bereits vorliegen, wurde eine Umfrage unter Tunnelbetreibern durchgeführt. Die untersuchten Tunnel decken ein breites Spektrum bezüglich der Länge und des Alters ab.

Bezüglich der Ausstattung (z. B. Kameras, Lautsprecher, Tonkonserven für Durchsagen) kann kein spezifischer Zusammenhang zwischen Baujahr, Tunnellänge oder Art des Tunnels (mit oder ohne Gegenverkehr) hergestellt werden. Mit Ausnahme von zwei Tunneln verfügen alle befragten Anlagen über Videoüberwachung. Über die Möglichkeit der Einsprache in Radiosender verfügen 11 der 18 Tunnel, dies entspricht 61 %. Aus der Nennung der geplanten Veränderungen lässt sich ablesen, dass die Tunnelbetreiber bemüht sind, den Sicherheitsstandard weiter zu verbessern.

Akustische Parameter von Tunnel:

Um die Möglichkeiten akustischer Informationen auszuloten, müssen sowohl der Lärmpegel, als auch das Lärmspektrum im Tunnel berücksichtigt werden. Messungen in 10 Tunneln und eine Fourier-Analyse der Daten zeigen über alle Tunnel Maxima bei 50 bis 100 Hz sowie bei ca. 1.000 Hz. Die akustischen Signale sollten daher außerhalb dieser Frequenzen liegen.

Gestaltung optischer Signale:

Zur Gestaltung optischer Signale werden zunächst Grundlagen der Wahrnehmung und Lichttechnik erläutert. Eine Recherche bisher vorliegender Ergebnisse zur Gestaltung optischer Notfalleinrichtungen weist folgende Ergebnisse auf:

Bezüglich der Frage der optimalen Leuchtmittel zur Kennzeichnung der Fluchtwege (Hinterleuchtung, LED oder reflektierend) gibt es verschiedene Bewertungskriterien: Hinterleuchtete Zeichen weisen die höchsten Leuchtdichten auf, LEDs haben eine beinahe unbegrenzte Lebensdauer, während reflektierende Zeichen vom Stromnetz unabhängig funktionieren.

Die Kennzeichnung von Fluchtwegen in den Farben Grün/Weiß unter Verwendung von Piktogrammen ist üblich. Doch selbst diese grün beleuchteten Ausgänge werden in der Realität nur von 42 % der Autofahrer beim „Durchfahren“ wahrgenommen.

Notausgänge wurden in mehreren Studien zwar wahrgenommen, aber nicht genutzt.

Die Beeinträchtigung der Sichtbarkeit durch Rauch stellt ein wesentliches Problem dar. Die Identifikations-sichtweiten betragen bei Rauch mittlerer Dichte nur ca. 7 Meter, bei starkem Rauch nur noch 2 bis 3 Meter, wobei die Art des Rauchs (weiß, grau, schwarz) eine untergeordnete Rolle spielt. Die Sichtbarkeit der Rettungszeichen kann durch höhere Leuchtstärken unter Rauchbedingungen nur geringfügig gesteigert werden. Zu hohe Leuchtstärken beeinträchtigen zudem die Wahrnehmung anderer Signale im Normalbetrieb (z. B. andere Fahrzeuge und deren Bremslichter).

Auf der Basis der vorliegenden Erkenntnisse wird mit einer Versuchsreihe zunächst die Verbesserung optischer Leiteinrichtungen untersucht. Die Versuche gehen von den Randbedingungen aus, dass sich Personen, die sich zur Flucht entscheiden oder dazu aufgefordert werden, entlang der Wand bewegen. Die eigentliche Gestaltung der Notausgänge wird nicht untersucht, denn hierzu liegen gesonderte Untersuchungen vor. Jedoch soll das Hinführen zum Notausgang optimiert werden. Wegen der schlechten Sichtbedingungen wird auch noch der Einsatz eines Handlaufs als haptische Leiteinrichtung untersucht.

In einer Bunkeranlage mit schwarz gestrichenen Wänden, die mit Theaterrauch gefüllt ist, werden Lauflichter, ein Handlauf sowie eine Kombination aus beiden bezüglich ihrer Wirkung verglichen. Der Notausgang, den die Personen finden müssen, befindet sich an der gegenüberliegenden Wand, um einen Wechsel der Wand erforderlich zu machen. Der Hinweis zum Seitenwechsel erfolgt über eine Biegung des Handlaufs und/oder einen pulsierenden Laser, der die Frequenz des Lauflichts aufnimmt. 54 Probanden, 27 Männer und 27 Frauen aller Altersgruppen, nehmen am Versuch teil. Sie werden in ein Fahrzeug gesetzt und dort in die Situation eines Rauch gefüllten Tunnels versetzt. Sodann werden sie einzeln in den Versuchsraum geführt, der mit Lkw-Lärm (92 dB) beschallt wird. Die Bewegungen der Personen werden mit einer Wärmebildkamera aufgezeichnet. Zudem wird die Zeit bis zum Erreichen des Notausgangs und des Öffnens der Notausgangstür erfasst.

Die besten Ergebnisse erzielt eine Kombination aus optischen und haptischen Hilfen:

- Die Probanden fühlen sich hier nicht nur am besten orientiert,
- sie machen z. T. auch Schritte in normaler Länge,
- die Zeit bis zum Erreichen des Notausgangs ist hier besonders kurz und
- die Erfolgsquote beim Finden und Nutzen des Notausgangs liegt mit 89 Prozent am höchsten.

Erreicht wurde dieses positive Ergebnis durch drei Komponenten:

- einen Handlauf, der an Anfang und Ende mit einer fluoreszierenden Folie markiert ist und am Ende eine 90-Grad-Biegung Richtung Notausgang aufweist,
- ein Lauflicht mit 7 LEDs (Durchmesser 5 mm, gelb-grüne Farbe, Wellenlänge des emittierten Lichts 555 nm), deren Abstand zum Ende hin kürzer wird (anfangs 50, am Ende 20 cm), und
- abschließend ein Dioden-Laser-Modul, gerichtet auf den Türgriff des Notausgangs.

Die sieben LEDs und der Laser werden über ein Relais mit einer Taktfrequenz von 1/16 sec angesteuert. Es brennt jeweils nur ein LED und am Ende der Laser, dann beginnt der Umlauf von vorne. Dadurch entsteht eine Scheinbewegung in Richtung Notausgang, die offensichtlich einen Mitzieh-Effekt auslöst und die Probanden zum Queren des Raumes veranlasst.

Akustische Informationen:

Akustische Informationen greifen an mehreren Ebenen an. Sie sollen zum einen über Störfälle informieren, zum anderen in kritischen Situationen die Nutzer zum schnellen Verlassen des Fahrzeugs veranlassen und zu den Notausgängen leiten.

Will man Information durch Sprachausgaben übermitteln, so ist nicht nur die Qualität der Sprachausgabe, sondern insbesondere auch die technische Ausstattung eines Tunnels von größter Wichtigkeit. Bei herkömmlichen Lautsprechern ist kaum etwas zu verstehen, weshalb für diesen Fall zwei extrem kurze Durchsagen konzipiert wurden (siehe Bild 12.2).

Für Tunnel mit neuartigen Hornlautsprechern und synchronisierter Längsbeschallung (SLASS) kann mehr Information vorgesehen werden, ebenfalls für Radioeinsprachen.

Daher wurden, ausgehend von Stör- und Notfallszenarien, Sprachausgaben konzipiert, die kurz gefasst sind und den Erkenntnissen der Psychoakustik und Linguistik entsprechen. Sie berücksichtigen die Art der Störung (z. B. Hindernis auf der Fahrbahn, Unfall, Brand), die Auswirkungen auf den Verkehr (fließt, stockt, steht) und die Anzahl der Fahrspuren. Diese Sprachausgaben könnten als einheitliche Konserven für alle Tunnel eingesetzt werden (Lautsprecherdurchsagen siehe Bild 12.4, Radiodurchsagen siehe Bild 12.5).

Beispiel: Hindernis auf der Fahrbahn, zwei Fahrstreifen pro Richtung, Verkehr fließt oder stockt. Durchsage: „< Gong> Achtung! Ein Hindernis liegt auf der Fahrbahn. Bitte fahren Sie langsam. Halten Sie großen Abstand. Überholen Sie nicht.“

Bei gravierenden Stör- oder Notfällen ist es sinnvoll, die Sprachausgaben durch akustische Signale in Form von spezifischen „Sounds“ zu ergänzen oder zu ersetzen. Sie sollen die Autofahrer zum schnellen Verlassen des Fahrzeugs und zum Aufsuchen der Notausgänge veranlassen. Die „Sounds“ müssen das Frequenzspektrum der Störgeräusche in Tunnel bei Notfällen berücksichtigen, gut lokalisierbar und in ihrer Wirkung selbsterklärend sein.

In einer Versuchsserie mit 40 Personen aller Altersgruppen wurden zahlreiche „lockende“ und „treibende“ Sounds verglichen. Als „lockende“ Sounds, die die Probanden zum Ausgang leiten sollen, wurden u. a. verschiedene Vogelstimmen, Musikinstrumente (z. B. Oboe), eine Singstimme (z. B. „Hier her“), eine Sprechstimme (z. B. „Please, exit here“) und weißes Rauschen erprobt.

Die aversiven Signale, die Personen zum Verlassen des Fahrzeugs und des Tunnels veranlassen sollen, wurden mit einer Orgelpfeife mit ca. 7 Hz sowie mit einer Bassbox mit einem Frequenzgang von ca. 25-100 Hz erzeugt. Außerdem wurden Feueralarm-Sirenen und andere Sounds erprobt.

Um eine realitätsnahe Versuchsumgebung zu schaffen, fanden die Versuche in einem Bunker statt. Die Personen befanden sich allein im Versuchsraum bzw. in einem dort aufgebauten Fahrzeug, es wurde Verkehrslärm und die Geräusche eines Strahlventilators als Hintergrundgeräusch (80 bzw. 78 dB A) eingespielt.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Kriterien werden folgende Signale empfohlen: Um in einer

Notfallsituation im Tunnel Menschen dazu zu bewegen, aus ihrem Fahrzeug auszusteigen und zu flüchten, eignet sich entweder der Bass-Sound „Sägezahn“ (Periode 10 auf 50 Hz) oder ein dunkler Ton aus der Orgelpfeife (7-8 Hz). Letzterer wird mehr im Bauchraum gefühlt als gehört. Beide werden als sehr unangenehm empfunden. Hier sind die meisten richtigen Interpretationen zu verzeichnen und die Emotionen, die geweckt werden, eignen sich dazu, Menschen aus dem Tunnel zu treiben.

Um Personen in der Geräuschkulisse eines Tunnels zu einem Notausgang zu locken, ist, entgegen den bisherigen Aussagen in der Literatur, das weiße Rauschen (ohne Zusatz) nicht zu empfehlen.

Vielmehr eignet sich der Sound „Hier her“ (weibliche Altstimme, getragen, Ruffert), im Wechsel mit dem Lockgesang des Rotkehlchens, das mit weißen Rauschen hinterlegt ist. Ebenfalls empfehlenswert ist die Sequenz „Der Notausgang ist hier“ – „Rotkehlchen mit weißen Rauschen hinterlegt“ – „Please, exit here“.

Diese Signalkombinationen sind sehr gut zu orten, werden im richtigen Sinne interpretiert und positiv beurteilt.

Zusammenwirken der einzelnen Warnungen und Informationen:

Im Rahmen der Studie wurden sowohl Sprachdurchsagen per Lautsprecher oder Radio als auch optische, haptische und akustische Signale für extreme Störfälle entwickelt. Die verschiedenen Systeme müssen hierarchisch aufeinander abgestimmt eingesetzt werden.

Bei allen Störfällen kommen Sprachdurchsagen per Lautsprecher und über das Radio zum Einsatz. Je nach Ausstattung des Tunnels mit Lautsprechern werden die kurzen bzw. ausführlichen Lautsprecher-Durchsagen verwendet.

Lautsprecher-Durchsagen und Radio-Durchsagen müssen abwechselnd erfolgen, beginnend mit den Lautsprecher-Durchsagen (siehe Bild 13.1).

Abfolge der Durchsagen bei Brand (siehe auch Bild 13.1):

Um gegenseitige Störungen der Durchsagen und Hinweise zu vermeiden, ist im Falle eines Brandes folgende Abfolge empfehlenswert:

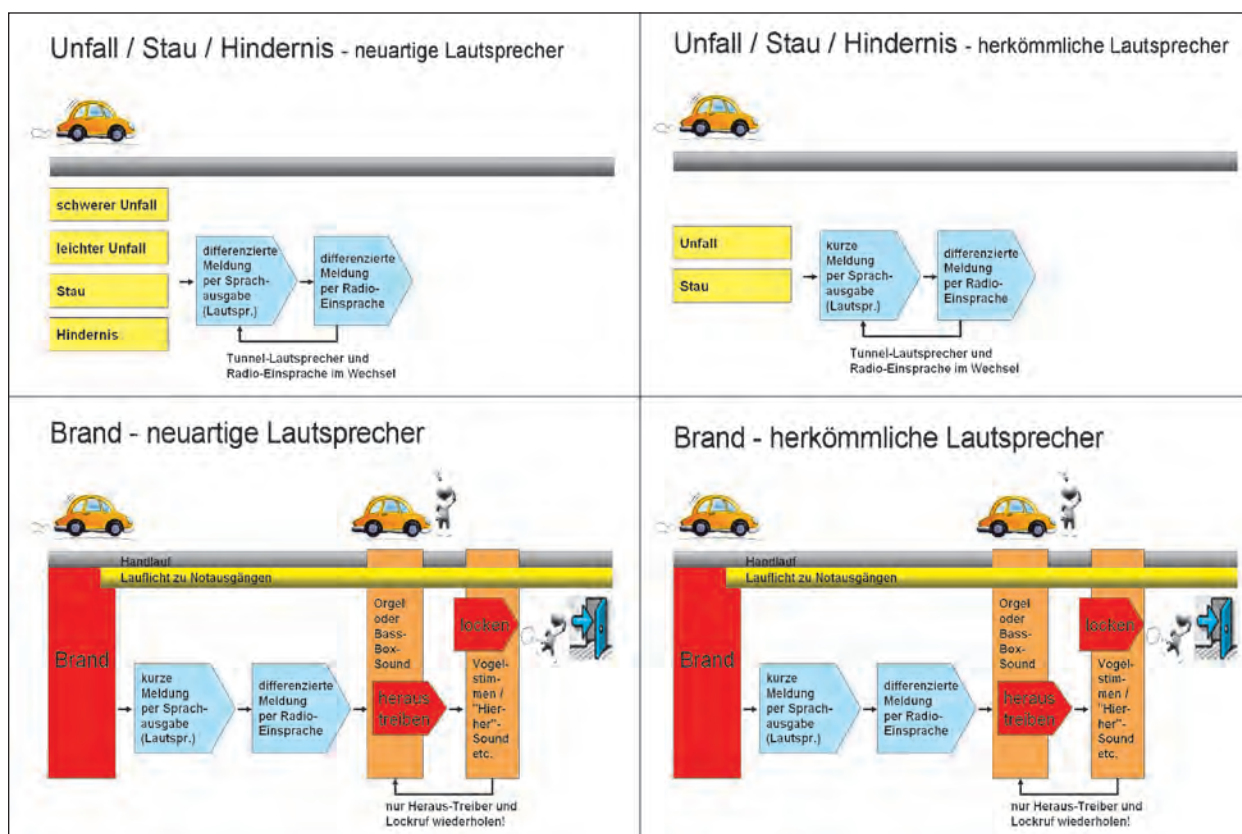


Bild 13.1: Zusammenspiel der einzelnen Komponenten für Tunnel mit neuartigen bzw. herkömmlichen Lautsprechern

- Durchsage per Lautsprecher (je nach Lautsprecherausstattung kurz oder differenziert). Diese Durchsage soll die Aufmerksamkeit erregen.
 - Durchsage per Radio-Einsprache (differenziert). Per Radio-Durchsage kann in gut verständlicher Form Information übermittelt werden.
 - Zum Heraustreiben aus dem Fahrzeug und dem Tunnel: aversive, tiefe Töne, z. B. Bass-Sound Sägezahn (Periode 10 auf 50 Hz) oder Orgelpfeife mit 7-8 Hz.
 - Zum Anlocken an die Notausgänge gesungenes „Hier her“ (weibliche, getragene Altstimme) im Wechsel mit Lockgesang des Rotkehlchens, das mit leichtem weißem Rauschen hinterlegt ist. Lautsprecher, extra für diesen Sound, über der Notausgangtüre erleichtern das Auffinden. Hierfür können kostengünstige, normale Lautsprecher verwendet werden.
 - Danach im Wechsel „Heraustreiben“ und „Anlocken“ – keine Radio-Durchsagen mehr, da sonst die Gefahr besteht, dass die Personen zu lange im Fahrzeug verharren).
 - Parallel dazu (von Anfang an) Aktivierung des Lauflichts Richtung Notausgang (LEDs, gelbgrün, auf der Wand gegenüber dem Notausgang Lauflicht und Dioden-Laser-Modul, gerichtet auf den Türgriff des Notausgangs – als Querungshilfe durch den Raum.
 - Grundausstattung: Handlauf, Anfang und Ende mit fluoreszierender Folie markiert, am Ende eine 90-Grad-Biegung Richtung Notausgang.
- Die Maximal-Ausstattung geht also davon aus, dass neben den Lautsprechern für Durchsagen auch Lautsprecher über den Notausgängen angebracht sind sowie die Möglichkeit zur Erzeugung extrem tiefer Töne besteht.
- Umsetzung der Erkenntnisse:**
Die hier gefundenen Erkenntnisse zur Verbesserung der Sicherheit bei Störfällen in Tunnel können mit vergleichsweise geringem Aufwand umgesetzt werden.
- So sollten einheitliche Sprachausgaben einmal erzeugt und abgespeichert werden. Das Abspielen kann nach der vorgelegten Matrix mit verschiedenen Eskalationsstufen erfolgen. Durch die Vereinheitlichung werden nicht nur die Kosten für den einzelnen Betreiber reduziert, sondern es besteht die

Möglichkeit, im Rahmen von Aufklärungskampagnen den Nutzer mit den einzelnen Sprachausgaben vertraut zu machen.

Die optimale Verteilung und Ausrichtung der Lautsprecher, die eine gute Verständlichkeit unter den schwierigen akustischen Verhältnissen im Tunnel ermöglicht, wurden in einem anderen Projekt bearbeitet. Um auch akustische Ortungs-Hinweise auf Notausgänge zu geben, sollten Lautsprecher über den Notausgängen platziert werden.

Die Verbesserung der optischen Leiteinrichtung mit LEDs sowie der Hinweis zur Querung mittels eines Handlaufs können im Rahmen von kleineren Renovierungsarbeiten einfach durchgeführt werden.

Die in der Literatur diskutierte Problematik, dass Notausgänge zwar prinzipiell gesehen, aber nicht genutzt werden, kann nach den nunmehr vorliegenden Erkenntnissen vermieden werden.

Die Verwendung sehr tiefer Töne zur Erzeugung des Wunsches, das Fahrzeug und den Tunnel schnell zu verlassen, stellt sicher ein Novum dar. Sie ist geeignet, in besonders schweren Notfällen (Brand) das häufig genannte Problem, nämlich zu langes Verharren im Fahrzeug, zu beseitigen. Unter den Gesichtspunkten „Sprachfreiheit“, den schwierigen akustischen Bedingungen im Notfall und der Dringlichkeit zu handeln stellen diese Signale eine wesentliche Verbesserung gegenüber Durchsagen dar. Zur technischen Realisierung müssten entweder Bassboxen im Abstand von 60 bis 100 Metern montiert werden oder die Erzeugung solcher tiefer Töne erfolgt durch eine Orgelpfeife. Sie kann mit einer Betonkonstruktion und einem Gebläse realisiert werden. Diese Konstruktion ist kostengünstig und dauerhaft und bietet sich vor allem beim Neubau oder der Renovierung von Tunnel an.

14 Literatur

- ADAC, Allgemeiner deutscher Automobil-Club (2006): EU-Richtlinie: Start in Deutschland. www.adac.de
- ADAC, Allgemeiner deutscher Automobil-Club (2007): Tipps: Sicher durch den Tunnel. www.adac.de/Tests/Mobilität_und_Reise/Tunnel
- ARBÖ, Auto-, Motor- und Radfahrerbund Österreichs (2006): Brand im Tunnel – nur keine Panik (24.10.2006)
- ARBÖ, Auto-, Motor- und Radfahrerbund Österreichs (2007): Massenkarambolagen im Tunnel – ein Albtraum (19.1.2007)
- ARBÖ, Auto-, Motor- und Radfahrerbund Österreichs (2007): Tipps für das Verhalten bei Feuer im Tunnel
- ARRABITO, G. R., MONDOR T. A. & KENT K. (2004): Judging the urgency of non-verbal auditory alarms: a case study. *Ergonomics*, 2004, Vol. 47, No. 8, pp. 821-840
- ASTRA, Bundesamt für Strassen, Schweiz (2000): Tunnel Task Force, Schlussbericht
- AvD, Automobilclub von Deutschland (o. J.): AvD-Ratgeber: Merkblatt – Sicher durch den Tunnel. (www.avd.de/hilfe/dat_tunnel_merkblatt.htm)
- BALTZER, W. (2000): Sicherheit in Straßentunneln. In: HAACK et al. (2000): Brandschutz in Verkehrstunneln. Forschungsauftrag FE 82.166/1999/B3 der Bundesanstalt für Straßenwesen. Anhang zum Schlussbericht. S. 38-51
- BAREGG-Info, siehe BEUSCH, E.
- BEARD, A. & CARVEL, R. (2005): The handbook of tunnel fire safety. London: Thomas Telford
- BELZ, S. M., ROBINSON, G. S. & CASALI, J. G. (1999): A new class of auditory warning signals for complex systems: Auditory icons. *Human Factors*, Vol. 41, No. 4, 1999, pp. 608-618
- BEYER, L. & WEISS, T. (2001): Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In: GRUNDWALD M. & BEYER L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel: Birkhäuser Verlag. S. 25-38
- BEUSCH, E. (o. J.): BAREGG-Info – Verhalten bei Stau und Brand. Hrsg. Baudepartment des Kantons Aargau, Schweiz. www.baregg.ch
- BIESKE, K. (2003): Sicherheitsleitsysteme in Rauchsituationen. Paper. TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
- BIRBAUMER, N. & SCHMIDT, R. F. (2006): Biologische Psychologie. Heidelberg: Springer Medizin Verlag
- BLAUERT, J., siehe Wikipedia

- BLUM, W. (1999): Inferno im Tunnel. Nach dem Brand im Montblanc werden neue Systeme der Sicherheit gefordert. *Die Zeit*, 12.5.1999, S. 41. Hamburg
- BMI, Bundesministerium für Inneres (o. J.): Brandschutzratgeber. Erstellt in Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Bundesfeuerwehrverband
- BMVBW, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen & BAST, Bundesanstalt für Straßenwesen (2004): Sicherheit geht vor – Straßentunnel in Deutschland
- BMVBW, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2003): Richtiges Verhalten im Straßentunnel
- BOER, L. C. & van WIJNGAARDEN, S. J. (2004): Directional Sound evacuation from smoke-filled tunnels. *Safe & reliable tunnels. Innovative European achievements. First international symposium, Prague, 2004*, pp. 33-41
- BOER, L. C. & WITHINGTON, D. J. (2004): Auditory guidance in a smoke-filled tunnel. *Ergonomics*, Vol. 47, No. 10, pp. 1131-1140. Taylor & Francis
- BOLANOWSKI, S. J., GESCHIEDER, G. A., VERRILLO, R. T. & CHECKOSKY, C. M. (1988): Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *Journal of Acoustical Society of America*. 84, pp. 1680-1694
- Brandschutzordnung gemäß DIN 14096
- BURT, J. L., BARTOLOME, D. S., BURDETTE, D. W. & COMSTOCK, J. R. (1995): A psychological evaluation of the perceived urgency of auditory warning signals. *Ergonomics*, 1995, Vol. 38, No. 11, pp. 2327-2340
- CATCHPOLE, K. R., McKEOWN, J. D. & WITHINGTON, D. J. (2004): Localizable auditory warning pulses. *Ergonomics*, 2004, Vol. 47, No. 7, pp. 748-771. Taylor & Francis
- CAKIR, A., HART, D. J. & STEWART, T. F. (1980): *Bildschirmarbeitsplätze*. Berlin: Springer
- CHALOUPEK, C. & RISSER, R. (1999): Visuelle Orientierung im Straßenverkehr – Optimierung von Verkehrseinrichtungen. Teil A: Feldstudie. Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr (Hrsg.). *Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen*, Band 96. S. 1-69. Wien
- CHARWAT, H. J. (1992): *Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation*. München: R. Oldenbourg-Verlag
- CHRISTIE, A. & HIRST, G. (1965): Legibility of signs with green backgrounds. *Traffic engineering and control*. March 1965, pp. 672-675
- COHEN, A. S. (1986): Möglichkeiten und Grenzen visueller Wahrnehmung im Straßenverkehr, Unfall- und Sicherheitsforschung, Heft 57. Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- CORSO, J. F. (1977): Auditory perception and communication. In: BIRREN, J. E. & SCHAIK, W. K. (Eds.): *Handbook of the psychology of aging*. New York: Van Nostrand Reinhold
- DEKRA (2002): siehe ITEM
- Der Österreichische Brandschutzkatalog (2003): *Baulicher Brandschutz. Brandschutz in Tunnelbauwerken und unterirdischen Verkehrsanlagen*
- DeSTATIS: siehe Statistisches Bundesamt
- DFV, Deutscher Feuerwehr Verband (2000): *Brandschutz in Tunnelanlagen. Fachempfehlung Nr. 1/2000*, April 2000
- DÖGE, P. (2002): Zwischen „Scientific Warrior“ und „Mathematischem Mann“ – Technik und Wissenschaft im Spiegel kritischer Männerforschung. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. Nr. 2, 11. Jg., S. 32-36
- DORNHÖFER, S. M. & PANNASCH, S. (2000): Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Online-Registrierung von Blickbewegungsparametern. Technische Universität Dresden, FR Psychologie, Paper
- 3sat (2000): Richtiges Verhalten im Tunnel – Einige Regeln für den Katastrophenfall. Sendung am 21.6.2000. www.3sat.de/nano/bstuecke/07912/index.html
- DUKE-ELDER S. (1968): *The physiology of the eye and of vision. System of Ophthalmology*, Vol. 4. London: H. K. Kimpton
- EBERBACH, K., KABOTH, N., SCHROLL, B., SMITS, J. & JÄGER, D. (2007): Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Anforderungen an die Ausführung. *Forschung*

- Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft Nr. 975. Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- ECE, Economic commission for Europe/transport division (2001): Tunnels questionnaire – tubes. 4 Dec. 2001. www.unece.org/trans/doc/questionnaires/ac7/Quest-ReplyPartB2Tunnel2.pdf
- EGAN, J. P. & WIENER, F. M. (1946): On the intelligibility of bands of speech in noise. *The journal of the acoustical society of America*, Vol. 18, 2, pp. 435 ff.
- EGGER, M. (2005): Recommended behaviour for road tunnel users. In: BEARD, A. & CARVEL, R.: *The handbook of tunnel fire safety*. pp. 343-353. London: Thomas Telford
- EXIT POINT (2004): Directional Sounder. System Sensor. <http://www.systemsensor.com/exitpoint/>
- FÄRBER, B. C. & FÄRBER, B. A. (1984): Grundlagen und Möglichkeiten der Nutzung sprachlicher Informationssysteme im Kraftfahrzeug. Hauptstudie. Frankfurt a. M.: FAT Schriftenreihe Nr. 39
- FÄRBER, B. C. & FÄRBER, B. A. (1984): Sprachausgaben im Kraftfahrzeug – Handbuch für Anwender. FAT Schriftenreihe Nr. 40, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Frankfurt a. M.
- FÄRBER, B. C. & FÄRBER, B. A. (1988): Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen – Empirische Ergebnisse. Forschungsvereinigung Automobiltechnik, FAT-Schriftenreihe Nr. 74, Frankfurt a. M., Henrich-Verlag
- FÄRBER, B. C., FÄRBER, B. A., SIEGENER, W. & SÜTHER, B. (2007): AWeWis – Aufnahme von Wegweisungsinformationen im Straßenverkehr. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Heft 979. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- FEUER und RAUCH (2007): Feuer in der Wohnung. www.feuer-und-rauch.de
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006): RABT, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln: FGSV-Verlag
- FRANTZICH, H. & NILSSON, D. (2004): Evacuation experiments in a smoke filled tunnel. *Proceedings of the 3rd international symposium on human behaviour in fire*, Belfast, UK, 2004, pp. 229-238
- Fraunhofer, Institut Digitale Medientechnologie, IDMT, Ilmenau (2005): Richtungsmischer. file:///E:/1-2007-Tunnel/2-Tunnel-Lit/fraunhofer-richtungsmischer.htm
- FRENCH, N. R. & STEINBERG, J. C. (1947): Factors governing the intelligibility of speech sounds. *The journal of the acoustical society of America*, Vol. 19, 1, pp. 90-119
- FRIELING, H. (1981): *Mensch und Farbe*. Göttingen: Muster-Schmidt-Verlag
- FVLR, Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e. V. (1999): *Rauchschutz: Recht und Meinung, Meinungsumfragen*. Detmold. http://www.fvlr.de/rau_umfragen.htm
- FVLR, Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e. V. (2007): *Gefahrenquelle No. 1: Rauch*. Detmold. <http://www.feuer-und-rauch.de/gefahr.html>
- GAMBERINI, L., COTTONE, P., SPAGNOLLI, A., VAROTTO, D. & MANTOVANI, G. (2003): Responding to a fire emergency in a virtual environment: different patterns of action for different situations. *Ergonomics*, Vol. 46, No. 8, pp. 842-858
- GATSCHA, M., SMUC, M., SCHREDER, G., PRANTL, S., CHRIST, R., GROTE, V., LACKNER, H., FRÜHWIRTH, M., PISKERNIK, L. & MOSER, M. (2004): Analyse von Tunnelgestaltungselementen II. Befahrung der Tunnelkette Klaus: Fahrverhaltensanalyse mit SAF, Belastungsmessung mittels HeartMan, Befragung und psychologische Testung der Versuchspersonen. Bericht des Kuratoriums für Verkehrssicherheit. Im Auftrag der Österreichischen Autobahnen und Schnellstrassen Gesellschaft m. b. H. (ÖSAG). Wien
- GIBSON, J. J. (1966): *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin Company
- GOLDSTEIN, E. B. (1997): *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag

- GORA, E. & ROTHBAUER, G. (1980): Stimmwarnsysteme in Luftfahrzeugen – Literaturrecherche zum Stand der Forschung. Berichte aus dem Institut für Psychologie und Erziehungswissenschaften der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Psychologie, Band 6. München
- GRAMBERG-DANIELSEN, B. (1984): Ophthalmologie und Verkehrsmedizin. In: WAGNER, H.-J. (Ed.): Verkehrsmedizin. S. 154-185. Berlin: Springer-Verlag
- GREGORY, R. L. (1972): Auge und Gehirn. Frankfurt a. M.: Fischer-TB-Verlag
- GRUNWALD, M. (2001): Begriffsbestimmungen zwischen Psychologie und Physiologie. In: GRUNWALD, M. & BEYER, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. S. 1-14. Basel: Birkhäuser Verlag
- HAACK, A., SCHREYER, J., MEYEROLTMANN, W. & BEYER, S. (STUVA/STUVAtec) (2000): Brandschutz in Verkehrstunneln. Forschungsauftrag FE 82.166/1999/B3 der Bundesanstalt für Straßenwesen. Schlussbericht
- HAAS, E. C. & EDWORTHY, J. (1996): Designing urgency into auditory warnings using pitch, speed and loudness. *Computing & control engineering journal*, August, 1996, pp. 193-198
- HARTMANN, E. (1977): Physiologisch-optische Probleme des nächtlichen Straßenverkehrs. *Zeitschrift für Verkehrsrecht*, Jg. 22, 11, S. 343-349
- HARTMANN, E. (1984): Sichtverhältnisse bei Tag und Nacht. ADAC-Schriftenreihe Straßenverkehr, Band 29, S. 171-183
- HARWOOD, I. (2007): Why use LEDs in an exit sign? *LEDs Magazine*, Sept. 2004. (www.ledsmagazine.com/features/...)
- HdE, Handbuch der Ergonomie, mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien (1980). Verein deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) (Ed.). Düsseldorf: VDI-Verlag
- HEARD, E. A. (1974): Symbol Study – 1972, SAE-Paper, No. 740304
- HEHLEN, P. (2004), siehe SALVISBERG et al.
- HEHLMANN, W. (1968): Wörterbuch der Psychologie. Stuttgart: Kröner-Verlag
- HELLBRÜCK, J. (1993): Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie. Göttingen: Hogrefe-Verlag
- HOFMAN, P. M., van RISWICK, J. G. & van OPSTAL, A. J. (1998): Relearning sound localization with new ears. *Nature Neuroscience*, 1998, Vol. 1, No. 5, pp. 417-421
- HOUTMANS, M. J. & SANDERS, A. F. (1984): Perception of signals presented in the periphery of the visual field. *Acta Psychologica*, 55, pp. 143-155
- IFA Tunnel (2006): Übungstunnel für Ereignisdienste. Powerpoint
- Informationsdienst Wissenschaft e. V. (2008): Neues IOSONO spatial audio workstation plugin – exklusive für Nuendo 4. <http://idw-online.de/pages/de/news260626>
- IOSONO (o. J.): The Isosno sound difference. <http://www.iosono-sound.com/index.html>
- ITEM, Institut für Meinungsforschung und Publizistik (2002): DEKRA-Umfrage. Frage des Monats „Angst im Tunnel?“. Interner Bericht
- JAHNKE, T. (2003): Harmonielehre am Computer. SEMIK-Projekt. SCHUMACHER, F. (Hrsg.): FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht. München-Grünwald
- JAKOB, F. (1971): Die Orgel. Orgelbau und Orgelspiel von der Antike bis zur Gegenwart. Bern: Hallwag-Verlag
- JENSEN, G. (1998): Wayfinding in heavy smoke: Decisive factors and safety products. Findings related to full scale tests. Paper. IGP AS, InterConsult Group – ICG, 1st May 1998
- JIN, T. & YAMADA, T. (1985): Experimental study of human behaviour in smoke filled corridors. *Fire safety science – Proceedings of the first international symposium*, NIST, USA, 511-519
- JIN, T. (1976): Visibility through smoke. Report of Fire Research Institute of Japan. No. 42, pp. 12-18
- KEIDEL, W. (1970): Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie. Stuttgart: Thieme-Verlag
- KLOTE, J. & MILKE, J. (2002): Principles of smoke management. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE, Atlanta GA

- KLOTZ, H. (1960): Das Buch von der Orgel. Über Wissen und Aufbau des Orgelwerkes, Orgelpflege und Orgelspiel. Kassel: Bärenreiter-Verlag
- KÖNIG, C. (2005): Simulationsentwicklung – Fluchtverhalten im Brandfall von Nutzern im Straßentunnel. Diplomarbeit an der RWTH Aachen
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2006): Neue Impulse für E-Call – ein Aktionsplan. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel
- LACHENMAYR, B. J. (1995): Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr. Aachen: Shaker
- LAZARUS, H., SUST, C., STECKEL, R., KULKA, M. & KURTZ, P. (2007): Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. Berlin: Springer
- MAYER, R. & REIMANN, O. (2008): Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln. Erster Zwischenbericht des Forschungsvorhabens FE 15.0433/2006/ERB der Bundesanstalt für Straßenwesen
- MAREC, M. (2000): La Sécurité dans les tunnels routiers. T.E.C., Transport environnement circulation. Vol. 159, pp. 16-25
- MARTIN, K. D. (1999): Sound-source recognition: A theory and computational model. Doctoral thesis at the Massachusetts Institute of Technology
- McCORMICK, E. J. (1964): Human factors engineering. New York: McGraw-Hill
- MEHRA, S. R. (2002): Schallabstrahlung von Tunnelportalen. IBP-Mitteilung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Nr. 403, 29 (2002). Stuttgart
- Musik, Magie und Medizin – Sound Design II (2008): Sound Design, biologische Frequenzen, 2. Teil. Siehe: www.musikmagieundmedizin.com/standard_seiten/sounddesign2.html
- NILSSON, D. (2006): Fires and human behaviour – studies of pre-movement, movement and exit choice. Presentation in the transportation & traffic science colloquium, TU Dresden 22.5.2006, Abstract & PowerPoint
- NOIZET, A. & 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. 18-20 May 2005, Hamburg
- ÖAMTC, Der Österreichische Automobil-, Motorrad- und Touring Club (2006): Experte gibt Tipps für richtiges Verhalten. ÖAMTC-Öffentlichkeitsarbeit, www.OTS.at
- ÖAMTC, Der Österreichische Automobil-, Motorrad- und Touring Club (2007): Sicher durch den Tunnel. <http://www.oeamtc.at/netautor/pages/resshp/anwendg/1012623.html>
- O'CONNOR, D. J. (2005): Directional sound. NFPA, National Fire Protection Association, USA. NFPA Journal, 2005, May/June, pp. 52-56
- PAULSEN, T. (1994): The effect of escape route information on mobility and way finding under smoke logged conditions. Fire safety science – proceedings of the fourth international symposium, Ottawa, Canada, 693-704
- PIARC, Committee on road tunnels (1999): Fire and Smoke control in road tunnels. C5
- POLS, L. C. (1976): Hearing, speech and auditory displays. In: MORAAL, J., KRAISS, K.-F. & BERNOTAT, R. (Eds.) (1976): Introduction to human engineering. Köln: Verlag TÜV Rheinland
- PLOMP, R. & MIMPEN, A. M. (1979): Speech-reception threshold for sentences as a function of age and noise level. The Journal of the Acoustical Society of America, 66 (5), pp. 1333-1342
- POSCHMANN, M., FELDGES, M., KOCHS, A., ARETZ, C., PÖGEL, E., BALTZER, W. & ZUMBROICH, M. (2007): Zukünftige Kommunikationstechniken und Integration von Straßentunneln im Bereich der TLS. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 955. (Hrsg.): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- POSPIL, P. & BRANDT, R. (2004): Smoke control in road tunnels. Paper
- PROULX, G. (2002): Cool under fire. NRCC (National Research Council Canada), IRC (Institute for Research in Construction), NRCC-45404. Fire protection engineering. No. 16, pp. 33-35

- RABT Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (2006). (Hrsg.): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln: FGSV-Verlag
- REIMANN, O. & LÖWER, V. (2009): Akustische Auslegung von Straßentunneln. In: BAST & Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Sicherheit und Schutz von Straßentunneln – Aktuelle Fragestellungen und Entwicklungen. Symposium 16. Juni 2009, S. 79-84
- ROBATSCH, K. & NUSSBAUMER, C. (2005): Sicherheitsvergleich von Tunnels. Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, BMVIT (Hrsg.): Bundesstraßenverwaltung, Wien, Österreich
- ROBINSON, G. S. & CASALI, J. G. (1995): Audibility of reverse alarms under hearing protectors for normal and hearing-impaired listeners. *Ergonomics*, 1995, Vol. 38, No. 11, pp. 2281-2299
- RZ, Rhein-Zeitung (1999): Tod in der Glutwolke/Flammenhölle mit 1.000 Grad. *rhein-zeitung.de/on/99/06/29*
- SALVISBERG, U., ALLENBACH, R., CAVEGN, M., HUBACHER, M. & SIEGRIST, S. (2004): Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes. *bfu-Report Nr. 51*. (Hrsg.): Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung *bfu*. Liebefeld, CH: Lang
- SCHAUERTE, M. (2003): Untersuchung der Erkennbarkeit von Sicherheitseinrichtungen in Straßentunneln. Diplomarbeit an der FH Aachen + RWTH Aachen
- SCHIERZ C. & KRUEGER H. (2002): *Physiologie II: Sinnesorgane*. Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich
- SCHMIDTKE, H. & GRAF HOYOS, C. (1970): *Psychologische Aspekte der Arbeitsgestaltung in Mensch-Maschine-Systemen*. Handbuch der Psychologie, Band 9, *Betriebspsychologie*. Göttingen: Hogrefe-Verlag
- SCHÖBER, H. (1957): *Das Sehen*. Band I. Leipzig: VEB Fachbuchverlag
- SCHUMANN, J. (1994): On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control. Münster: Waxmann
- SENGPIEL, E. (o. J.): Die Bedeutung der Blauertischen Bänder für die Tonaufnahme. Vorlesung an der Universität der Künste, Berlin
- SFWM, Stützpunkt-Feuerwehr Muttenz, Schweiz (o. J.): Es brennt im Tunnel, was soll ich tun? sfwm.ch/infos/Feuer/tunnelbrand/pages/index.htm
- SHIELDS, J. (2005): Human behaviour in tunnel fires. In: BEARD A. & CARVEL R.: *The handbook of tunnel fire safety*. pp. 323-342. London: Thomas Telford
- Sound Alert (2007): Directional sound evacuation. <http://www.soundalert.com/way-finding.htm>
- STADLER, M. (2007): Vom bunten Schilderwald. Die Farbsymbolik von Hinweis- und Verkehrsschildern. www.farbenundleben.de/kultur/schilder.htm
- Statistisches Bundesamt (2007): Bevölkerung. In: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Bevoelkerung/Aktuell,templateId=renderPrint.psm>
- Statistisches Bundesamt (2006): Verkehr – Verkehrsunfälle. Fachserie 8, Reihe 7. *DeSTATIS*. Wiesbaden
- STEINAUER, B., ZIMMERMANN, U., MAYER, G., SCHAUERTE, M., MANNES, F., MÜHLBERGER, A., HÜNNERKOPF, M., WIESER, M., PÖTZL, A., MÜLLER, M., PAULI, P., BALTZER, W. & RIEPE, W. (2007): Gestaltung von Notausgängen in Straßentunneln. Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, vertreten durch: Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 03.390/2005/FGB, Schlussbericht
- STEVENS, S. S. & WARSHOFSKY, F. (1980/3): *Schall und Gehör*. Reinbek: Rowohlt-TB-Verlag
- STUVA/STUVAtec (2000): siehe HAACK, A. et al. (2000)
- StVO, Straßenverkehrsordnung (2007)
- SULLIVAN, H. T. & HÄKKINEN, M. T. (2006): Disaster preparedness for vulnerable populations: Determining effective strategies for communicating risk, warning, and response. *Proceedings of the third annual magrann research conference: The future of disasters in a globalizing world*. 21.-22. April 2006

- SUST, C. A. & LAZARUS, H. (2003): Die Wirkung von Lärm auf das Verständnis gesprochener Sprache. In: SCHICK, A. et al. (Hrsg.): Hören in Schulen. Ergebnisse des 9. Oldenburger Symposiums zur Psychologischen Akustik. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg
- SWR (2007): Tunnelangst. Ohne Probleme durch den Berg
- SZon (Schwäbische Zeitung online) (2009): Hohentwiel-Tunnel erhält neuartiges Lautsprecher-System. http://www.szon.de/lokales/trossingen/region/200905060448.html?_from=rss
- TETZNER, D., SIPPEL, M., FOIT, W. & WIRTZ, S. (1998): Numerical simulation of fires in tunnels and application to a realistic tunnel geometry. Safety in road and rail tunnels, Nice, 9-11 March, 1998
- TIEFENSEE, W. (2006): Neue Schilder machen Tunnel sicherer. BMVBS. 13.3.2006. Nr. 078/2006. <http://www.bmvbs.de/-,302.952631/Tiefensee>.
- United Nations (2001): Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels. Final report. Economic and Social Council. TRANS/AC 7/9
- United Nations (2002): Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels – Addendum 1. Economic and Social Council. TRANS/AC 7/9/Add.1
- US Census (2005): 2003 American community survey summary tables (P058) <http://www.census.gov>
- van NES, F. L., (1984): Perceptual limits in man-machine communication. In: Van DOORN, A. J., van de GRIND, W. A. & KOENDERINK, J. J. (Eds.): Limits in perception. Utrecht: VNU Science Press
- van WIJNGAARDEN, S. J., BRONKHORST, A. W. & BOER, L. C. (2005): Auditory evacuation beacons. Journal of the audio engineering society, Vol. 53, No. 1/2, 2005. pp. 44-53
- VdS Schadensverhütung (2005): Grafische Symbole für Feuerwehrpläne sowie Flucht- und Rettungspläne (auf CD). Köln
- WAGENAAR, W. A. (1969): Note on the construction of digram-balanced Latin Squares. Psychological Bulletin, 1969, Vol. 72, No. 6, pp. 384-386
- WALRAVEN, J. (1985): The colours are not on the display: A survey of non-veridical perceptions that may turn up on a colour display. In: Displays: Concepts and applications, January, 35-42
- WDR-Fernsehen, Servicezeit: Verkehr, Sendung vom 11. Mai 2004, 7. Sinn: Wahrnehmung bei Tunnelfahrten. www.wdr.de/tv/service/verkehr/inhalt/20040511/b_6.phtml?dr.
- WEHNER, M. & REINKE, P. (2003): Stand und aktuelle Entwicklung bei der Lüftung und Entrauchung von Straßen- und Bahntunneln in Mitteleuropa. STUVA-Tagung '03, Westfalenhalle Dortmund, 8.-11. Dezember 2003
- WESTHEIMER, G. (1986): The eye as an optical instrument. In: BOFF, K. R., KAUFMAN, L. & THOMAS, J. P. (Eds.): Handbook of perception and human performance, Vol. I, Sensory processes and perception. New York: John Wiley & Sons
- WHO, World Health Organization (2005): Disability, including preventions, management and rehabilitation: Report by the secretariat. Fifty-eighth world health assembly
- Wikipedia (2007): Blauertsche Bänder. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Akustik_RichtungsBaender.jpg
- WIKIPEDIA (2008): Funktionsgenerator. <http://de.wikipedia.org/wiki/Funktionsgenerator>
- WOODSON W. E. (1981): Human factors design handbook. Information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use. New York: McGraw Hill
- WOODSON W. E. & CONOVER D. W. (1964): Human engineering guide for equipment designers. Berkeley: University of California Press
- WORM Evert (2002): Tunnelsicherheit: Menschliches Verhalten als Einflussfaktor in Tunnelsicherheit. Vortrag und PowerPoint. RWS, Rijkswaterstaat, NL. Centre for Tunnel Safety/Civil Engineering Division
- WRIGHT, M. S., COOK, G. K. & WEBBER, G. M. B. (o. J.): Visibility of four exit signs and two exit door markings in smoke as gauged by twenty

people. Paper. Research group for inclusive environments, Department of Construction Management & Engineering, The University of Reading, Reading, Berkshire. RG6 6AW, UK

WURTZ, R. H., GOLDBERG, M. E. & ROBINSON, D. L. (1982): Optischer Reiz und visuelle Aufmerksamkeit. Spektrum der Wissenschaft. August. S. 92-101

Links

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/testjahr_2008/slideshow/slide_14.asp?ComponentID=215021&SourcePageID=0. Dort: Fluchtwegkennzeichnung und Notausgang im Schweizer Mappo-Morettina

http://www.adac.de/Tests/Mobilitaet_und_Reise/Tunnel/Tunnel-Lernspiel/default.asp?ComponentID=93612&SourcePageID=143604&teaserTitle=Tunnel%2DLernspiel&teaserURL=%2FTests%2FMobilitaet%5Fund%5FReise%2FTunnel%2Ftestjahr%5F2006%2Fdefault%2Easp&location=teaser&referer=%2FTests%2FMobilitaet%5Fund%5FReise%2FTunnel%2Ftestjahr%5F2006%2Fdefault%2Easp

<http://www.cybermindnl.com/>

www.wer-weiss-was.de/theme52/article28373.html

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Mensch und Sicherheit“

2003

- M 148: **Moderne Verkehrssicherheitstechnologie – Fahrdaten-speicher und Junge Fahrer**
Heinzmann, Schade € 13,50
- M 149: **Auswirkungen neuer Informationstechnologien auf das Fahrverhalten**
Färber, Färber € 16,00
- M 150: **Benzodiazepine: Konzentrationen, Wirkprofile und Fahr-tüchtigkeit**
Lutz, Strohbeck-Kühner, Aderjan, Mattern € 25,50
- M 151: **Aggressionen im Straßenverkehr**
Maag, Krüger, Breuer, Benmimoun, Neunzig, Ehmanns € 20,00
- M 152: **Kongressbericht 2003 der Deutschen Gesellschaft für Ver-kehrsmmedizin e. V.** € 22,00
- M 153: **Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bun-desautobahnen**
Pöppel-Decker, Schep#ers, Koßmann € 13,00
- M 154: **Begleitetes Fahren ab 17 – Vorschlag zu einem fahrpra-xisbezogenen Maßnahmenansatz zur Verringerung des Unfallri-sikos junger Fahranfängerinnen und Fahranfänger in Deutschland**
Projektgruppe „Begleitetes Fahren“ € 12,50

2004

- M 155: **Prognosemöglichkeiten zur Wirkung von Verkehrssicher-heitsmaßnahmen anhand des Verkehrszentralregisters**
Schade, Heinzmann € 17,50
- M 156: **Unfallgeschehen mit schweren Lkw über 12 t**
Assing € 14,00
- M 157: **Verkehrserziehung in der Sekundarstufe**
Weishaupt, Berger, Saul, Schimunek, Grimm, Pleßmann,
Zügenrucker € 17,50
- M 158: **Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr**
Schmidt-Clausen, Freiding € 11,50
- M 159: **Risikogruppen im VZR als Basis für eine Prämiendif-ferenzierung in der Kfz-Haftpflicht**
Heinzmann, Schade € 13,00
- M 160: **Risikoorientierte Prämiendifferenzierung in der Kfz-Haft-pflichtversicherung – Erfahrungen und Perspektiven**
Ewers(t), Growitsch, Wein, Schwarze, Schwintowski € 15,50
- M 161: **Sicher fahren in Europa – 5. Symposium** € 19,00
- M 162: **Verkehrsteilnahme und -erleben im Straßenverkehr bei Krankheit und Medikamenteneinnahme**
Holte, Albrecht € 13,50
- M 163: **Referenzdatenbank Rettungsdienst Deutschland**
Kill, Andrä-Welker € 13,50
- M 164: **Kinder im Straßenverkehr**
Funk, Wasilewski, Eilenberger, Zimmermann € 19,50

2005

- M 165: **Förderung der Verkehrssicherheit durch differenzierte An-sprache junger Fahrerinnen und Fahrer**
Hoppe, Tekaas, Woltring € 18,50
- M 166: **Förderung des Helmtragens Rad fahrender Kinder und Jugendlicher – Analyse der Einflussfaktoren der Fahrradhelmnut-zung und ihrer altersbezogenen Veränderung**
Schreckenber, Schlittmeier, Ziesenitz € 16,00
- M 167: **Fahrausbildung für Behinderte**
Zawatzky, Dorsch, Langfeldt, Lempp, Mischau € 19,00
- M 168: **Optimierung der Fahrerlaubnisprüfung – Ein Reformvor-schlag für die theoretische Fahrerlaubnisprüfung**
Bönninger, Sturzbecher € 22,00
- M 169: **Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel**
Debus, Heller, Wille, Dütschke, Normann, Placke,
Wallentowitz, Neunzig, Benmimoun € 17,00
- M 170: **Integratives Konzept zur Senkung der Unfallrate junger Fahrerinnen und Fahrer – Evaluation des Modellversuchs im Land Niedersachsen**
Stiensmeier-Pelster € 15,00
- M 171: **Kongressbericht 2005 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e. V. – 33. Jahrestagung** € 29,50
- M 172: **Das Unfallgeschehen bei Nacht**
Lerner, Albrecht, Evers € 17,50
- M 173: **Kolloquium „Mobilitäts-/Verkehrserziehung in der Sekundar-stufe“** € 15,00
- M 174: **Verhaltensbezogene Ursachen schwerer Lkw-Unfälle**
Evers, Auerbach € 13,50

2006

- M 175: **Untersuchungen zur Entdeckung der Drogenfahrt in Deutschland**
Iwersen-Bergmann, Kauert € 18,50
- M 176: **Lokale Kinderverkehrssicherheitsmaßnahmen und -pro-gramme im europäischen Ausland**
Funk, Faßmann, Zimmermann, unter Mitarbeit von Wasilewski,
Eilenberger € 15,00
- M 177: **Mobile Verkehrserziehung junger Fahranfänger**
Krampe, Großmann € 15,50
- M 178: **Fehlerhafte Nutzung von Kinderschutzsystemen in Pkw**
Fastenmeier, Lehnig € 15,00
- M 179: **Geschlechtsspezifische Interventionen in der Unfallprä-vention**
Kleinert, Hartmann-Tews, Combrink, Allmer, Jüngling,
Lobinger € 17,50
- M 180: **Wirksamkeit des Ausbildungspraktikums für Fahrlehrer-anfänger**
Friedrich, Brünken, Debus, Leutner, Müller € 17,00
- M 181: **Rennspiele am Computer: Implikationen für die Ver-kehrssicherheitsarbeit – Zum Einfluss von Computerspielen mit Fahrzeugbezug auf das Fahrverhalten junger Fahrer**
Vorderer, Klimmt € 23,00
- M 182: **Cannabis und Verkehrssicherheit – Mangelnde Fahreig-nung nach Cannabiskonsum: Leistungsdefizite, psychologische Indikatoren und analytischer Nachweis**
Müller, Topic, Huston, Strohbeck-Kühner, Lutz,
Skopp, Aderjan € 23,50
- M 183: **Hindernisse für grenzüberschreitende Rettungsein-sätze**
Pohl-Meuthen, Schäfer, Gerigk, Moecke,
Schlechtriemen € 17,50

2007

- M 184: Verkehrssicherheitsbotschaften für Senioren – Nutzung der Kommunikationspotenziale im allgemeinmedizinischen Behandlungsaltag
Kocherscheid, Rietz, Poppelreuter, Riest, Müller, Rudinger, Engin € 18,50
- M 185: 1st FERSI Scientific Road Safety Research-Conference
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden € 24,00
- M 186: Assessment of Road Safety Measures
Erstellt im Rahmen des EU-Projektes ROSEBUD (Road Safety and Environmental Benefit-Cost and Cost-Effectiveness Analysis for Use in Decision-Making) € 16,00
- M 187: Fahrerlaubnisbesitz in Deutschland
Kalinowska, Kloas, Kuhfeld € 15,50
- M 188: Leistungen des Rettungsdienstes 2004/05 – Analyse des Leistungsniveaus im Rettungsdienst für die Jahre 2004 und 2005
Schmiedel, Behrendt € 15,50
- M 189: Verkehrssicherheitsberatung älterer Verkehrsteilnehmer – Handbuch für Ärzte
Henning € 15,00
- M 190: Potenziale zur Verringerung des Unfallgeschehens an Haltestellen des ÖPNV/ÖPSV
Baier, Benthaus, Klemp, Schäfer, Maier, Enke, Schüller € 16,00
- M 191: ADAC/BAST-Symposium "Sicher fahren in Europa" – Referate des Symposiums vom 13. Oktober 2006 in Baden-Baden
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 24,00

2008

- M 192: Kinderunfallatlas
Neumann-Opitz, Bartz, Leipnitz € 14,50
- M 193: Alterstypisches Verkehrsrisiko
Schade, Heinzmann € 14,50
- M 194: Wirkungsanalyse und Bewertung der neuen Regelungen im Rahmen der Fahrerlaubnis auf Probe
Debus, Leutner, Brünken, Skottke, Biermann € 14,50
- M 195: Kongressbericht 2007 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin (DGVM e.V.) – zugleich 50-jähriges Jubiläum der Fachgesellschaft DGVM – 34. Jahrestag € 28,00
- M 196: Psychologische Rehabilitations- und Therapiemaßnahmen für verkehrsauffällige Kraftfahrer
Follmann, Heinrich, Corvo, Mühlensiep, Zimmermann, Klipp, Bornewasser, Glitsch, Dünkel € 18,50
- M 197: Aus- und Weiterbildung von Lkw- und Busfahrern zur Verbesserung der Verkehrssicherheit
Frühauf, Roth, Schygulla € 15,50
- M 198: Fahreignung neurologischer Patienten – Untersuchung am Beispiel der hepatischen Enzephalopathie
Knoche € 15,00

2009

- M 199: Maßnahmen zur Verbesserung der visuellen Orientierungsleistung bei Fahranfängern
Müsseler, Debus, Huestegge, Anders, Skottke € 13,50
- M 200: Entwicklung der Anzahl Schwerverletzter infolge von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland
Liefering € 13,50
- M 201: Bedeutung der Fahrpraxis für den Kompetenzerwerb beim Fahrenlernen
Grattenthaler, Krüger, Schoch € 20,00

- M 202: Computergestützte Medien und Fahrsimulatoren in Fahrausbildung, Fahrerweiterbildung und Fahrerlaubnisprüfung
Weiß, Bannert, Petzoldt, Krems € 16,00
- M 203: Testverfahren zur psychometrischen Leistungsprüfung der Fahreignung
Poschadel, Falkenstein, Pappachan, Poll, Willmes von Hinckeldey € 16,50
- M 204: Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern
Evers € 21,00
- M 205: Das Verkehrsquiz – Evaluationsinstrumente zur Erreichung von Standards in der Verkehrs-/Mobilitätserziehung der Sekundarstufe
Heidemann, Hufgard, Sindern, Riek, Rudinger € 16,50

2010

- M 206: Profile im Straßenverkehr verunglückter Kinder und Jugendlicher
Holte € 18,50
- M 207: ADAC/BAST-Symposium "Sicher fahren in Europa"
nur als CD erhältlich € 24,00
- M 208: Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland
Baum, Kranz, Westerkamp € 18,00
- M 209: Unfallgeschehen auf Landstraßen – Eine Auswertung der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik
Heinrich, Pöppel-Decker, Schönebeck, Ullitsch € 17,50
- M 210: Entwicklung und Evaluation eines Screening-Tests zur Erfassung der Fahrkompetenz älterer Kraftfahrer (SCREEMO)
Engin, Kocherscheid, Feldmann, Rudinger € 20,50
- M 211: Alkoholverbot für Fahranfänger
Holte, Assing, Pöppel-Decker, Schönebeck € 14,50
- M 212: Verhaltensweisen bei Notsituationen in Straßentunneln
Färber, Färber € 19,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.