

## Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln

FA 3.406

Forschungsstelle: Universität der Bundeswehr München, Institut für Arbeitswissenschaft, Neubiberg (Prof. Dr. B. Färber)

Bearbeiter: Färber, B. / Färber, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: November 2009

### 1 Zielsetzung

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.

### 2 Vorhandene Situation

#### 2.1 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 analysierten 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.

#### 2.2 Verhalten bei Bränden

Eine Analyse des Verhaltens von Fahrzeuginsassen bei Tunnelbränden zeigt ein breites Spektrum von Verhaltensweisen auf: 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 rückwärtsfahrend – hier wird bevorzugt der Weg, den der Nutzer gekommen ist, eingeschlagen. Berichtet wird auch von Fahrern, die ihr brennendes Fahrzeug noch aus der Gefahrenzone zu bringen versuchen oder Löschversuche starten, von Tunnelmitarbeitern und Polizisten, die beherzt und besonnen eingreifen.

#### 2.3 Internetbefragung

Mittels einer Internetbefragung wurden, neben Einstellungen und Ängsten, vor allem Wissensinhalte bei Notsituationen in Tunneln erhoben. Die Wissensfragen umfassten sowohl die Ausstattung von Tunneln (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.

Neben vielen Details erfahren wir aus dieser Umfrage, dass 16 %, wenn im Tunnel nur Feuer und Rauch zu sehen ist, im Fahrzeug bleiben würden, 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. (Anmerkung: Ein Handy muss erst geortet werden, das Notruftelefon übermittelt seine Position sofort).

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.

#### 2.4 Defizite und Interventionen

Das theoretische Wissen über Sicherheitseinrichtungen in Tunneln 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 Pannenbucht 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.

### 3 Akustische Parameter von Tunneln

Um die Möglichkeiten akustischer Informationen auszuloten, muss 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 müssen daher außerhalb dieser Frequenzen liegen.

#### 3.1 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 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).

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 mit Rauch gefüllten Tunnels versetzt. Sodann werden sie einzeln in den Versuchsraum geführt, der mit Lkw-Lärm (92 dB(A)) 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 % 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, gelbgrüne 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 Raums veranlasst.

### 4 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.

Für Tunnel mit neuartigen Hornlautsprechern und synchronisierter Längsbeschallung (SLASS) kann mehr Information vorgesehen werden, ebenfalls für Radio-Einsprachen.

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.

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 wurden Verkehrslärm und die Geräusche eines Strahlventilators als Hintergrundgeräusch (80 bzw. 78 dB (A)) eingespielt.

Folgende Signale werden zusätzlich zu Sprachdurchsagen 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, Rufferz), im Wechsel mit dem Lockgesang des Rotkehlchens, das mit weißem Rauschen hinterlegt ist. Ebenfalls empfehlenswert ist die Sequenz "Der Notausgang ist hier" – "Rotkehlchen mit weißem Rauschen hinterlegt" – "Please, exit here".

Diese Signalkombinationen sind sehr gut zu orten, werden im richtigen Sinne interpretiert und positiv beurteilt.

## 5 Zusammenwirken der einzelnen Warnungen und Informationen

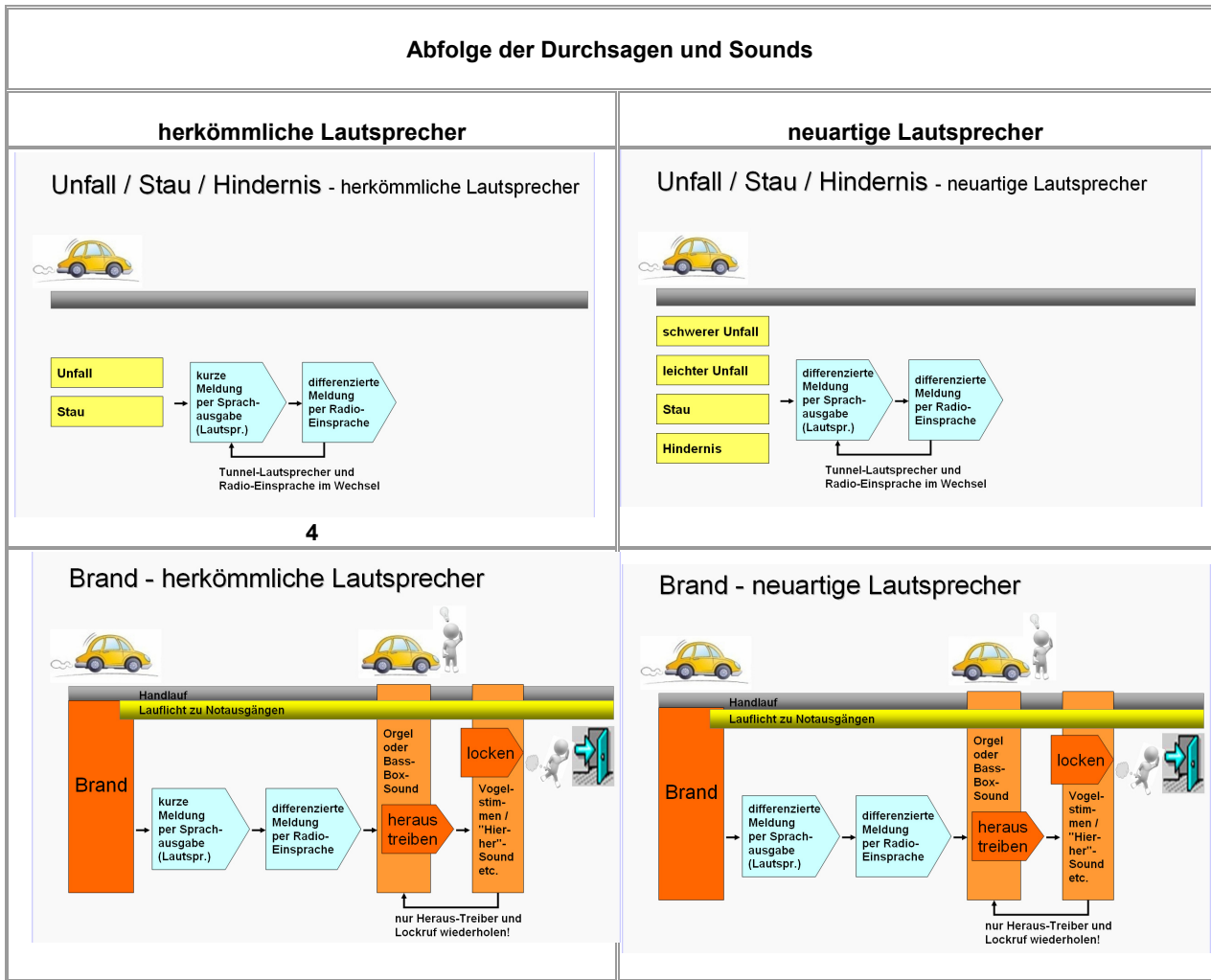
Die im Rahmen der Studie entwickelten Sprachdurchsagen per Lautsprecher oder Radio sowie die optischen, akustischen und haptischen Signale müssen hierarchisch aufeinander abgestimmt werden.

Bei allen Störfällen kommen Sprachdurchsagen per Lautsprecher und über das Radio zum Einsatz. Je nach Ausstattung des Tunnels mit Lautsprechern (herkömmliche/neuartige) werden die kurzen bzw. ausführlichen Lautsprecher-Durchsagen verwendet. Lautsprecher-Durchsagen und Radio-Einsprachen müssen abwechselnd erfolgen, beginnend mit den Lautsprecher-Durchsagen (siehe Bild).

Um gegenseitige Störungen der Durchsagen und Hinweise zu vermeiden, ist im Falle eines Brands folgende Abfolge empfehlenswert (siehe Bild):

- Durchsage per Lautsprecher (je nach Lautsprecher-ausstattung 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 weißen Rauschen hinterlegt ist. Alternativ kann die Sequenz "Der Notausgang ist hier" – "Rotkehlchen mit weißem Rauschen hinterlegt" – "Please, exit here" verwendet werden.
- 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 des Notausgangs Lauflicht und Dioden-Laser-Modul, gerichtet auf den Türgriff des Notausgangs - als Querungshilfe durch den Raum.
- Grundausrüstung: 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.



## 6 Umsetzung der Erkenntnisse

Die hier gefundenen Erkenntnisse zur Verbesserung der Sicherheit bei Störfällen in Tunneln können mit vergleichsweise geringem Aufwand umgesetzt werden. So sollten bundesweit einheitliche Sprachausgaben erzeugt und abgespeichert werden. Das Abspielen kann nach der vorgelegten Matrix mit verschiedenen Eskalationsstufen erfolgen und erleichtert dem Betreiber im Notfall die Entscheidung. 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, wurde 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 kann 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 – 100 m 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. Sie bietet sich vor allem beim Neubau oder der Renovierung von Tunneln an.