



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Akustische Installationen im Strassentunnel

Installations acoustiques dans les tunnels routiers

Acoustical installations in road tunnels

Amstein + Walthert Progress AG

Lars Derek Mellert, MSc. Geographie Universität Zürich
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Scians GmbH

Walter F. Bischof, Dr. phil.
Marina Groner, Dr. phil
Daniel Stricker, Dr. phil.

**Forschungsprojekt VSS 2012/207 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2016

1551

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

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

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Akustische Installationen im Strassentunnel

Installations acoustiques dans les tunnels routiers

Acoustical installations in road tunnels

Amstein + Walthert Progress AG

Lars Derek Mellert, MSc. Geographie Universität Zürich
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Scians GmbH

Walter F. Bischof, Dr. phil.
Marina Groner, Dr. phil
Daniel Stricker, Dr. phil.

**Forschungsprojekt VSS 2012/207 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Urs Welte, Amstein + Walthert Progress AG

Mitglieder

Lars Derek Mellert, Amstein + Walthert Progress AG
Daniel Stricker, Scians GmbH
Marina Groner, Scians GmbH
Walter Bischof, Scians GmbH
Ralf Kaspar, g+m elektronik AG

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident

Christian Scholer

Mitglieder

Heinz Dudli
Arnd Rogner
Benoît Stempf
Christoph Lehmann
Markus Eisenlohr
Peter Köhli
Walter Steiner
Bruno Sudret

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ziele.....	14
1.2 Hypothese.....	16
1.3 Aufbau des Berichts	18
2 Grundlagen	19
2.1 Akustische Installationen im Strassentunnel	19
2.1.1 Signalisation	19
2.1.2 Information.....	21
2.2 Richtlinien und Normen.....	25
2.2.1 Schweiz	25
2.2.2 EU	25
3 Methodik	27
3.1 Definition der Wirksamkeit.....	27
3.1.1 Teilwirksamkeit "Technik"	27
3.1.2 Teilwirksamkeit "Betrieb"	29
3.1.3 Teilwirksamkeit "Selbstrettung".....	29
3.2 Akustische Signale.....	30
3.2.1 Signalisation	30
3.2.2 Information.....	31
3.3 LautsprecherAuswahl	31
3.4 Simulation.....	32
3.5 Experiment.....	36
3.5.1 Versuchsteilnehmer	37
3.5.2 Versuchsaufbau	37
3.5.3 Apparaturen	38
3.5.4 Stimuli.....	39
3.5.5 Versuchsablauf	39
3.5.6 Versuchsplan	41
3.5.7 Fragebogen	41
4 Resultate	43
4.1 Experiment.....	43
4.1.1 Akustische Signalisation.....	43
4.1.2 Informationsdurchsagen	49
4.1.3 Speech Transmission Index (STI).....	52
4.1.4 Fragebogen	53
4.2 Kosten-Wirksamkeit akustischer Installationen	55
4.2.1 Wirksamkeitsanalyse.....	55
4.2.2 Kostenanalyse	60
4.2.3 Gesamtbetrachtung.....	62
5 Schlussfolgerungen	63
5.1 Diskussion	63
5.2 Ausblick	66

Anhänge	69
Glossar	81
Literaturverzeichnis	83
Projektabschluss.....	87
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	91

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie bestätigt, dass sich bestimmte Lautsprechersysteme sowohl für eine wirksame akustische Führung als auch für eine verständliche Informationsübertragung in Strassentunnel eignen. Eine Analyse verschiedener Lautsprechertypen verdeutlicht, dass herkömmliche Systeme die technischen und betrieblichen Anforderungen gut erfüllen und im Vergleich zu spezifischen Systemlösungen eine bessere Kostenwirksamkeit aufweisen.

Für die Untersuchung wurden drei unterschiedliche Systemtypen einerseits hinsichtlich ihrer technischen und betrieblichen Eigenschaften im Rahmen von Expertenworkshops bewertet. Andererseits wurde die Wirksamkeit der Lautsprechersysteme in der Übertragung von gut interpretierbaren Signalen und Informationsdurchsagen experimentell mit rund 40 Versuchspersonen untersucht. Während dieses Experiments wurden den Probanden über Kopfhörer zahlreiche akustische Signale und Informationsdurchsagen zugetragen, die anhand der technischen Spezifikationen der Lautsprechersysteme mittels computergestützter Simulation für verschiedene Standorte in einem Tunnel auralisiert worden waren. Dabei wurde ein 300m langer Abschnitt zwischen zwei Notausgängen des Uetlibergtunnels simuliert. Anhand der Reaktionen der Versuchspersonen konnten schliesslich signifikante Ergebnisse abgeleitet werden, die eine empirische Aussage über die Wirksamkeit der betrachteten Systemtypen in der Selbstrettungsunterstützung ermöglichen.

Die Studie kommt zum Schluss, dass marktübliche Trichterlautsprechersysteme über den Notausgängen in Strassentunnel effektive Sicherheitseinrichtungen sind. Sie verbessern signifikant die Lokalisation der Notausgänge und ermöglichen auch mit einer minimalen Anzahl Lautsprecher und ohne Synchronisierung der Signalausendung ausreichend verständliche Informationsdurchsagen. Die Analysen bestätigen, dass allzu spezifisch ausgerichtete Systemtypen relativ hohe Lebenszykluskosten haben und sich überdies nur bedingt für beide Beschallungszwecke einsetzen lassen. Betrieblich einfache und robust gebaute Lautsprecher mit rechteckigen Trichteröffnungen sind ideale Kompromisse, die Wirksamkeitsvorteile und Qualitätseinbussen bei der Signalisation und Information in einem ausgewogenen Verhältnis vereinen.

Mit diesem Forschungsprojekt liegen nun neben den optimalen Führungssignalen und Informationsdurchsagen auch umfassende Kataloge vor, die Betreiber von Strassentunnel befähigen, Lautsprechersysteme aus technischer und betrieblicher Sicht zu spezifizieren und die Anforderungen gemäss dem beabsichtigten Beschallungszweck zu definieren. Nachdem mehrere Studien die signifikante Wirksamkeit von Lautsprechern in Strassentunnel experimentell verifiziert haben, wird nun empfohlen, einen geeigneten Nationalstrassentunnel mit dem kostenwirksamsten Lautsprechersystemtyp im Sinne eines Pilotprojektes auszurüsten und die postulierte Wirksamkeit zu validieren.

Résumé

La présente étude montre que certains systèmes de haut-parleurs sont adaptés aussi bien pour la diffusion d'un guidage acoustique que pour la transmission d'informations compréhensibles. L'analyse de divers types de haut-parleurs montre que des systèmes génériques satisfont bien aux exigences techniques et d'exploitation. En comparaison avec des solutions spécifiques, ils présentent un meilleur rapport coût-efficacité.

Trois systèmes différents du point de vue de leurs caractéristiques techniques et d'exploitation ont été évalués dans le cadre d'ateliers d'experts. De plus, l'efficacité des systèmes de haut-parleurs pour la transmission de signaux bien interprétables a été testée sur environ 40 personnes. Durant cette expérimentation, les sujets ont été soumis à de nombreux signaux acoustiques et messages par casque audio. Ces messages ont été générés par ordinateur, sur la base des spécifications techniques des systèmes de haut-parleurs, pour simuler l'ambiance sonore de divers emplacements dans un tunnel. Une section de 300m placée entre deux sorties de secours a été simulée à cet effet. Des résultats probants ont pu être établis sur la base des réactions des sujets testés. Ceux-ci permettent de se prononcer de manière empirique sur l'efficacité de l'aide à l'auto-évacuation des divers systèmes.

L'étude conclut que des haut-parleurs coniques à chambre de compression conventionnels, placés au-dessus des sorties de secours de tunnels routiers constituent de bonnes installations de sécurité. Ils améliorent significativement la localisation des sorties de secours et permettent la transmission de messages compréhensibles avec un minimum de haut-parleurs, sans synchronisation de signal. Les analyses confirment que des systèmes trop spécifiques présentent des coûts complets de cycle vie élevés; de plus ils sont peu appropriés pour la mise en œuvre des deux objectifs de diffusion (auto-évacuation et transmission de messages). Les haut-parleurs coniques de construction simple et robuste, avec ouvertures rectangulaires sont des compromis idéaux, équilibrant les avantages d'efficacité avec les pertes de qualité dans la signalisation et l'information.

Ce projet de recherche a permis la définition optimale des signaux de guidage et des messages d'information. De plus, un vaste catalogue est mis à disposition des exploitants de tunnels, leur permettant de spécifier des systèmes du point de vue technique et d'exploitation, ainsi que de définir les exigences relatives à l'objectif de diffusion recherché. Maintenant que plusieurs études ont vérifié de façon expérimentale l'efficacité significative de haut-parleurs dans les tunnels routiers, il est recommandé de lancer un projet pilote ayant pour but de valider ce postulat d'efficacité en équipant un tunnel des routes nationales avec le système de haut-parleurs présentant le meilleur rapport coût-efficacité.

Summary

This study supports that certain loudspeaker systems are suited both for effective acoustical guidance as well as intelligible speech transmission in road tunnels. An analysis of different types of loudspeaker systems shows that conventional horn loudspeaker systems meet technical and operational requirements sufficiently, while at the same time featuring a better cost-effectiveness than specific systems.

These findings were revealed by evaluating three different types of loudspeaker systems regarding their technical and operational characteristics. Furthermore, an experiment with 40 probands was conducted to analyse the loudspeakers' effectiveness of transmitting interpretable signals and intelligible speeches. The participants mounted headphones and randomly listened to numerous acoustical signals and speech transmissions which were simulated for all loudspeaker systems based on their technical specifications and for different locations in a road tunnel. A 300m section between two emergency exits of the Uetlibergtunnel was modelled for the simulation of the acoustics. Through analysing the decision-making process of the probands, significant results could be derived. They allow empirical statements about the effectiveness of the examined system types to improve self-evacuation.

The study concludes that conventional and commercially available horn loudspeaker systems mounted above emergency exits are indeed effective safety installations in two ways. Firstly, they significantly improve the localisation of escape routes through acoustical guidance. Additionally, they are also suited for transmitting sufficient intelligible speech transmission with a minimum number of loudspeakers; synchronising their activation according to particular propagation delays is not necessary. The findings confirm that overly designed systems exhibit high life-cycle costs and, moreover, only show limited practicability for a combined purpose of acoustical guidance and information. Simple and robust loudspeaker systems, both operationally and technically speaking, with rectangular horns prove to be ideal compromises for road tunnels that meld efficacy advantages and losses of signal quality in a well-balanced ratio.

Besides producing optimal signals and speech transmissions, this study compiles broad catalogues for specifying loud speaker systems for road tunnels from an operational and technical perspective. They ultimately enable operators of road tunnels to define their specific requirements according to the intended purpose. After having verified the effectiveness of loudspeakers in road tunnels with repeated experiments, it is now recommended to implement the findings. A real road tunnel needs to be equipped with the most cost-effective loudspeaker system so that the postulated effectiveness can be validated.

1 Einleitung

Mit dem früheren Forschungsprojekt "Akustische Führung im Strassentunnel" (vgl. [21]) konnte in einem Feldversuch mit 120 Versuchspersonen im Uetlibergtunnel aufgezeigt werden, dass signifikant mehr Personen zum näheren Notausgang flüchteten, wenn über den Notausgangstüren Lautsprecher installiert sind, die ein führendes Signal aussenden (vgl. Abbildung 1). Es wurde damals beobachtet, dass die herkömmlichen optischen Hilfsmittel wie Blitzlichter und Signalisationstafeln ihre unterstützende Funktion mit zunehmender Rauchdichte verlieren, durch die Lautsprecher aber unterstützt werden können.

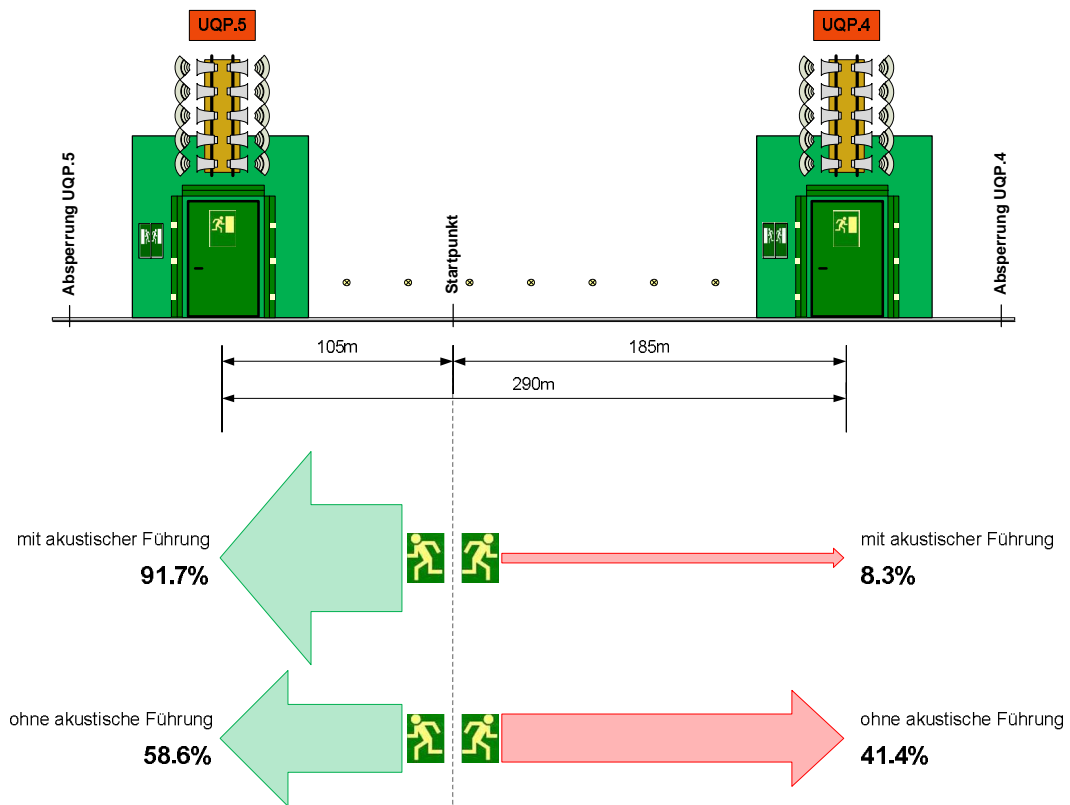


Abbildung 1 Fluchrichtung mit und ohne akustischer Führung

Die Lautsprecherkonstruktionen sowie die akustischen Signale, die während dieses früheren Feldversuches im Uetlibergtunnel zum Einsatz kamen, wurden eigens zu diesen Versuchszwecken entwickelt. Durch die vertikale Aneinanderreihung von fünf herkömmlichen Trichterlautsprechern im sogenannten *Line Array* konnte eine geeignete Schallabstrahlcharakteristik im schallharten Tunnelraum mit geringem Aufwand erzeugt werden. Es war jedoch von Anbeginn klar, dass diese provisorischen akustischen Installationen aus Praktikabilitätsgründen nicht als Systemlösung zu empfehlen sind. Ein praxistaugliches Lautsprechersystem für Strassentunnel muss neben dem Anspruch, einer optimalen Signalübertragung zu genügen, sowohl betrieblich handhabbar als auch technisch einfach und robust aufgebaut sein.

Die damalige Versuchsanlage im Uetlibergtunnel erfüllte lediglich das Anforderungskriterium der gut lokalisierbaren Signalausendung. Das Experiment konzentrierte sich allein auf die Grundsatzüberprüfung, dass akustische Installationen die Selbstrettung im Strassentunnel unterstützen, indem sie flüchtende Personen zum nächstmöglichen Notausgang hinlocken. Technische und betriebliche Anforderungserfüllungen von Lautsprechersystemen wurden zum damaligen Zeitpunkt nicht untersucht.

1.1 Ziele

Nachdem die signifikante Wirkung von akustischer Führung nachgewiesen war, stellte sich die Frage nach geeigneten Lautsprechersystemen. Insbesondere war unklar, ob Lautsprechersysteme, die sich zur akustischen Führung eignen, gleichzeitig für die verständliche Übertragung von Informationsdurchsagen in Strassentunnel eingesetzt werden können. Diese Fragestellung wurde als besonders interessant erachtet, weil mit dieser kombinierten Nutzung ein weiteres Potential von akustischen Installationen synergetisch genutzt werden könnte. Eine Herausforderung stellte derweil die Tatsache dar, dass sich die Konzepte der akustischen Signalisation und Information grundsätzlich unterscheiden.

Die wissenschaftliche Beantwortung dieser Frage war mit dem Feldversuch im Uetlibergtunnel nicht möglich und machte weitere Forschungsschritte erforderlich. Zum Zeitpunkt des ersten Feldversuches waren einerseits weder die technischen noch die betrieblichen Anforderungen an Lautsprecher in Strassentunneln definiert. Andererseits lagen keine wissenschaftlichen Simulationsmodelle vor, die das akustische Verhalten verschiedener Lautsprecher in Strassentunnel auf zweckmässige Weise, d.h. ohne aufwändige Feldversuche, vergleichbar machen konnten.

Diese wesentlichen Voraussetzungen mussten zuerst mit einer systematischen Vorgehensweise geschaffen werden. Erst dann würde die Vielfalt an möglichen Lösungen eingegrenzt und ein spezifisches Lautsprechersystem vorgeschlagen werden können, das einen zweckmässigen und vor allem wirtschaftlichen Einsatz gewährleistet.

In dieser Ausgangslage formten sich die folgenden Fragestellungen, die nun mit dem vorliegenden Forschungsprojekt beantwortet werden:

- Welche technischen und betrieblichen Anforderungen bestehen für Lautsprecher in schweizerischen Strassentunneln?
- Welche Anforderungen müssen durch Lautsprechersysteme in der Übertragung von akustischen Führungssignalen und Informationsdurchsagen erfüllt werden, damit sie die Selbstrettung wirksam unterstützen?
- Existieren Typen von Lautsprechersystemen, die sowohl für die akustische Signalisation als auch für eine verständliche Beschallung in Strassentunnel wirksam sind?
- Lohnen sich bestimmte Typen von Lautsprechersystemen aus Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen eher als andere?

Die alleinige Kenntnis, dass akustische Installationen die Selbstrettung signifikant verbessern können, reicht noch nicht aus. Bevor sich die Ausrüstung bzw. Nachrüstung von Strassentunneln mit akustischen Installationen wirtschaftlich lohnt, müssen deren technische und betriebliche Umsetzbarkeit aufgezeigt und das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis überprüft werden können. Gerade bei Sicherheitseinrichtungen, deren eigentlicher Zweck der Personenschutz im weiteren Sinne und die Unterstützung der Selbstrettung im engeren Sinne ist, stellt sich die wiederkehrende Frage nach dem Verhältnis der erreichten Wirksamkeit zu den aufgewendeten Kosten. Im vorliegenden Forschungsprojekt wird der Fokus deshalb zum Schluss spezifisch auf dieses Spannungsfeld gerichtet.

Aus diesen Gründen wurden für das vorliegende Forschungsprojekt die folgenden Projektziele identifiziert:

Tabelle 1 Projektziele

Nr.	Übergeordnetes Ziel	Teilziel
1	Definition der technischen, betrieblichen und selbstrettungsunterstützenden Anforderungskriterien für Lautsprecher Systeme in Strassentunneln	Definition des optimalen Lautsprechertyps hinsichtlich Effektivität und Wartbarkeit
		Definition des optimalen akustischen Signals (Signalton/Sprechdurchsage)
		Definition eines geeigneten Installationskonzeptes
2	Wirksamkeitsanalyse geeigneter Lautsprecher Systeme mit einem wissenschaftlichen Experiment und anschliessender Evaluation anhand der Anforderungskriterien	Aufzeigen der Auswirkungen auf den Betrieb und Unterhalt
		Empfehlungen bezüglich der Aktivierung (manuell/automatisch) sowie des Aktivierungszeitpunktes der akustischen Führung
		Nachweis der Integrationsmöglichkeiten in ein bestehendes Alarmkonzept und der Auswirkungen auf die Reflexmatrix
3	Empfehlung eines optimalen Lautsprechersystems aufgrund einer Kosten-Wirksamkeit-Analyse der untersuchten Systemtypen	Detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse für einen bestehenden Tunnel

Das Potential von Lautsprechern, Menschenleben zu retten hängt von sehr vielen verschiedenen, u.a. auch psychologischen oder sozialen Faktoren ab und ist deshalb schwierig im Sinne eines Risikosenkungspotentiales rechnerisch nachzuweisen. Die Sinnhaftigkeit solcher Betrachtungen wurde im Laufe des Projektes kritisch hinterfragt, mit dem Schluss, dass sie mit diesen Untersuchungen nicht weiter verfolgt wurden.

Aus ähnlichen Überlegungen wurde zudem auf die Analyse einer allfälligen Kompensationsfähigkeit von Lautsprechersystemen verzichtet. Bereits im Vorgängerprojekt wurde nämlich nachgewiesen, dass es sich bei akustischen Installationen um ergänzende Massnahmen handelt, die keine der bestehenden Sicherheitseinrichtungen ersetzen können. Im Feldversuch konnte damals klar aufgezeigt werden, dass sich die Probanden im verrauchten Tunnel zuerst nur mithilfe der akustischen Signale orientierten und ihnen mit zunehmender Nähe zu den Notausgängen die vorher wenig wirksamen optischen Signale zusätzliche Sicherheit boten. Die Kombination der optischen und akustischen Signalisationen beschleunigte die Flucht in wirksamer Weise. Die Analyse der Risikosenkungspotentiale verschiedener Sicherheitseinrichtungen im Vergleich zu akustischen Installationen erschien aus diesen Gründen deshalb weder praktikabel noch zweckmässig.

Neben grundsätzlichen Erkenntnissen über die verschiedenen Anforderungen an akustische Installationen in Strassentunneln sowie deren Wirksamkeit, können die Projektergebnisse für weitere spezifische Zwecke verwendet werden.

Die Erkenntnisse bieten einerseits eine interessante Grundlage für die Überprüfung der aktuell vorgeschriebenen Sicherheitsausrüstung in schweizerischen Strassentunneln. Das zusätzliche Wissen über die Wirksamkeit von Lautsprechern ermöglicht eine sachliche Diskussion der Vor- und Nachteile dieser neuartigen Sicherheitseinrichtung und erlaubt eine fundierte Herangehensweise an die Ausschöpfung bisher ungenutzter Potentiale in der Selbstrettungsunterstützung.

Andererseits leisten die experimentell hergeleiteten Forschungsergebnisse einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Sprachübertragungsqualität akustischer Signale in Strassentunneln sowie der subjektiven Sprachverständlichkeit. Sie können genutzt werden um die branchenüblichen, rechnerisch hergeleiteten Indizes der Sprachverständlichkeit von Evakuierungsanlagen zu relativieren.

In einem übergeordneten Sinne befähigen die Resultate dieses Forschungsprojektes Tunnelbetreiber, technische Spezifikationen für geeignete Lautsprechersysteme

abzuleiten und Anforderungskataloge für allfällige Ausrüstung- bzw. Nachrüstungsprojekte formulieren zu können.

1.2 Hypothese

Vor dem Hintergrund der Fragestellungen und der in Kapitel 1.1 aufgeführten Ziele 1, 2 und 3 wird mit der vorliegenden Studie die folgende Hypothese untersucht:

Der Einbau von akustischen Installationen über den Notausgängen lohnt sich aufgrund von Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen für Strassentunnel in der Schweiz.

Bei dieser Hypothese richtet sich das Augenmerk bewusst auf die Effektivität, d.h. auf den Zielerfüllungsgrad der betrachteten Lautsprecher Systeme. Um diese Hypothese überprüfen zu können, muss mit einer einheitlichen Methodik vorgegangen werden, die Lautsprecher Systeme nach dem Kriterium der Wirksamkeit unterscheiden lässt. Der Begriff der Wirksamkeit wird für das hiesige Projekt in Anlehnung an [37] wie folgt definiert:

Wirksamkeit - auch Effektivität - beschreibt den Grad der Zielerfüllung einer Alternative, wobei die Ziele den Anforderungen des Entscheidungsträgers entsprechen und durch diesen vorgegeben werden.

Die Begriffsdefinition verdeutlicht, dass zur Beschreibung der Wirksamkeit immer Zielvorgaben erforderlich sind. Diese müssen vom jeweiligen Entscheidungsträger mittels genauer Vorgabe der Anforderungen bestimmt werden, sodass die zu untersuchenden Alternativen - im vorliegenden Fall sind das verschiedene Lautsprecher Systeme - anhand ihrer Anforderungserfüllung einheitlich verglichen werden können.

In dieser Hinsicht ist der Begriff "Wirksamkeit" klar vom Begriff "Nutzen" abzugrenzen. Letzterer geht weiter, indem er sämtliche positiven und überdies monetarisierbaren Effekte einer Alternative umfasst. Weil der ultimative Nutzen von Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln die Rettung von Menschenleben ist, bleibt die Quantifizierung des Nutzens in Geldeinheiten ein nicht ganz unumstrittenes Thema. Obschon verschiedene anerkannte volks- und betriebswirtschaftliche Ansätze zur Monetarisierung von Menschenleben existieren, die für eine rationale Entscheidungsfindung sehr oft angebracht sind, wird im vorliegenden Forschungsprojekt diese Vorgehensweise nicht als zweckmässig erachtet. Das Potential von Lautsprechern, Menschenleben zu retten, ist sehr schwierig quantitativ zu bestimmen, weil akustische Installationen vor allem auf die Verhaltensbeeinflussung der Flüchtenden ausgerichtet sind und ihre Wirkung daher stark vom menschlichen Verhalten abhängt. Während sich beispielsweise der Nutzen einer Entrauchungsanlage in erster Linie auf die Reduktion der letalen Rauchgaskonzentration im Tunnel fokussiert und sich leichter quantifizieren lässt (Bsp. Absaugvolumen in m³), ist dieselbe Vorgehensweise im Falle von Lautsprecher Systemen wenig aussagekräftig. Die Gesamtbeurteilung der Wirksamkeit von akustischen Installationen anhand klar vorgegebener Anforderungskriterien erscheint deshalb für die vorliegende Untersuchung sinnvoller.

Typischerweise stellen Wirksamkeitsanalysen also reine Zielerfüllungsbetrachtungen dar ([37]). Ihr Fokus wird ausschliesslich auf den nicht-monetären Nutzwert einer Alternative gerichtet und die Kosten werden bewusst ausgeklammert. Es ist aber klar, dass möglichst tiefe Kosten ebenfalls als positiven Effekt definiert und dadurch als zusätzliches Nutzenkriterium (Bsp. Kosteneinsparungen) Eingang in die Wirksamkeitsbetrachtung finden können. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden die Lebenszykluskosten der untersuchten Lautsprecher Systeme jedoch gesondert betrachtet und erst zum Schluss der Wirksamkeit gegenübergestellt (vgl. Abbildung 2).

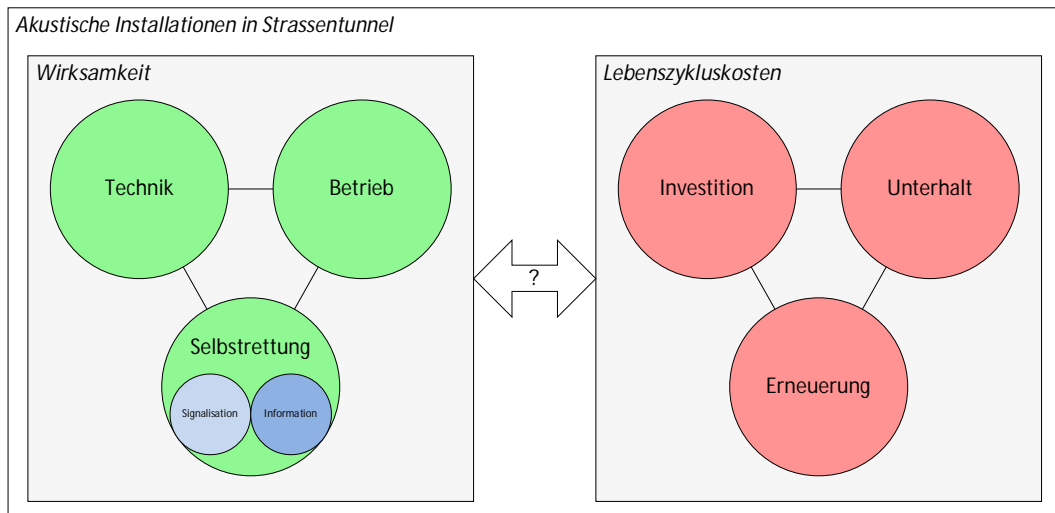


Abbildung 2 Fokus des Forschungsprojektes

Akustische Installationen in Strassentunneln sollen im Ereignisfall für die Führung und für die Information der Personen genutzt werden können. In dieser Untersuchung umfasst der Begriff der Wirksamkeit also explizit sowohl die Führung der Flüchtenden mittels Signalisation als auch die verständliche Information der Tunnelnutzer mittels gezielter Beschallung. Mit diesen beiden Prämissen wird untersucht, wie die betroffenen Personen einerseits möglichst wirksam zur Flucht bewogen und andererseits zur korrekten Fluchtwahlentscheidung beeinflusst werden können. Diese Ausrichtung des Forschungsfokus trägt dem Umstand Rechnung, dass erwiesenermassen viele Autofahrer kein Radio hören und deshalb im Ereignisfall auch nicht über diesen Informationskanal erreicht werden können. Die Erkenntnisse leisten damit ebenfalls einen Beitrag zur Verkürzung der Zeit vor der eigentlichen Selbstrettungsphase, der sogenannten "Pre-Evacuation-Time" (vgl. [11]; [28]).

Vorgehen zur Überprüfung der Hypothese

1) Damit die Wirksamkeit akustischer Installationen bestimmt werden kann, benötigt es, wie weiter oben erwähnt, eine Definition von Zielvorgaben. Als Grundlage der Wirksamkeitsanalyse werden deshalb in einem ersten Schritt zweckmässige technische, betriebliche und selbstrettungsunterstützende Wirksamkeitsziele hergeleitet und die zur Erfüllung erforderlichen Kriterien definiert. Damit die Erfüllungsgrade auf einer geeigneten Skala messbar und vergleichbar gemacht werden können, wird eine geeignete Methodik zur Operationalisierung der Wirksamkeiten gewählt.

2) Anhand der erarbeiteten Zielvorgaben werden in einem zweiten Schritt marktübliche Lautsprechersystemtypen ermittelt, die in der Lage sind, die Anforderungskriterien zu erfüllen. Obschon sie keine typische und auch keine praxistaugliche Lösung darstellt, wird die Versuchsanlage des Feldversuchs im Uetlibertunnel aus dem Jahre 2012 zu Vergleichszwecken in die Auswahl integriert.

3) In einem dritten Schritt werden über die Bestimmung des Zielerfüllungsgrades die Wirksamkeiten der ausgewählten Lautsprechersysteme ermittelt. Ein Teil der Wirksamkeiten kann im Rahmen einer Expertenbefragung eruiert werden; der andere Teil - namentlich die Wirksamkeit der Lautsprechersysteme bezüglich der Selbstrettungsunterstützung - muss in einem wissenschaftlichen Experiment mit Versuchspersonen aufgedeckt werden. Die Operationalisierung der analysierten Kriterien garantiert schlussendlich einen einheitlichen Vergleich aller Teilwirksamkeiten.

4) Für eine aussagekräftige Kosten-Wirksamkeits-Analyse müssen in einem vierten Schritt die Lebenszykluskosten der ausgewählten Lautsprechersysteme möglichst verlässlich bestimmt werden. Dabei werden die wesentlichen im Laufe der Lebensdauer anfallenden Kosten miteinbezogen und mit Methoden der Investitionsrechnung auf den

heutigen Gegenwartswert diskontiert. Dadurch können die Kosten der Lautsprecher Systeme auf einer soliden Grundlage vergleichbar gemacht werden.

5) Im letzten Schritt zur Überprüfung der Hypothese werden die ermittelten Wirksamkeiten den entsprechenden Kosten gegenübergestellt. Anhand dieser Gesamtbetrachtung werden umfassende Aussagen über die Kosten-Wirksamkeiten der untersuchten Lautsprechersysteme ermöglicht. In diesem Schritt wird somit beurteilt, ob sich ein bestimmtes Lautsprechersystem anhand des Verhältnisses zwischen Kosten und Wirksamkeit von den anderen abhebt und zur Installation in schweizerischen Strassentunneln empfohlen werden kann. Abbildung 3 illustriert das Vorgehen zur Hypothesenüberprüfung:

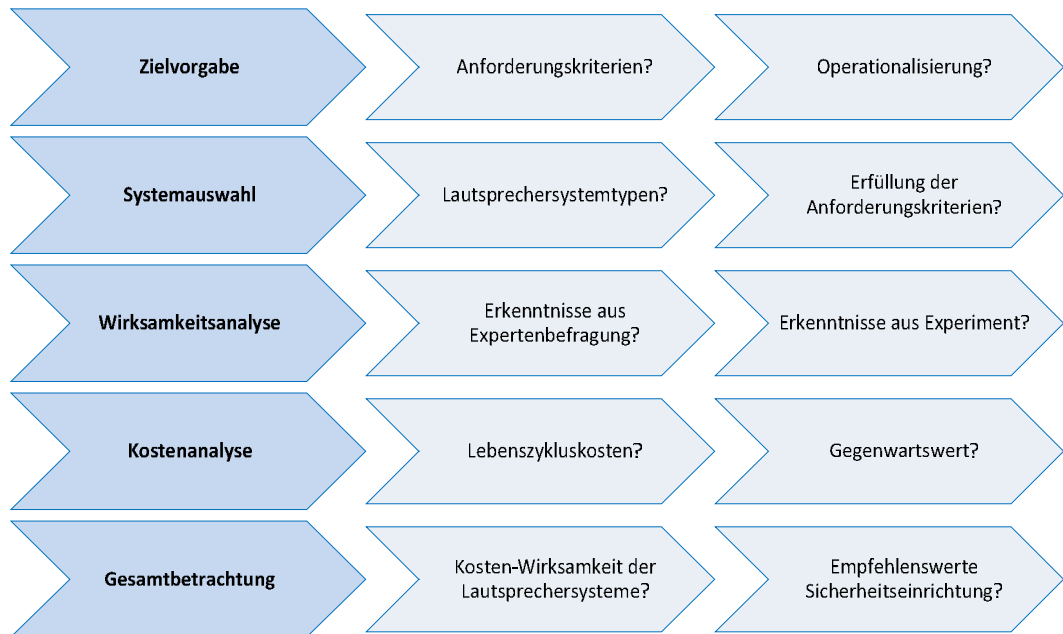


Abbildung 3 Vorgehen zur Hypothesenüberprüfung

1.3 Aufbau des Berichts

Der folgende Bericht gliedert sich in vier zentrale Teile, die alle aufeinander aufbauen und den Rahmen für den gesamten Bericht setzen. Zuerst werden theoretische Grundlagen über akustische Installationen im Strassentunnel vermittelt damit die Überlegungen der folgenden Kapitel nachvollzogen werden können. In Kapitel 2 werden deshalb die theoretischen Grundlagen über Lautsprechersysteme in Strassentunneln dargelegt sowie ein Überblick der Normen und Richtlinien für Sicherheitseinrichtungen generell geschaffen.

Kapitel 1 bildet den methodischen Teil, in dem die Vorgehensweise zur Ermittlung der Wirksamkeiten und Kosten beschrieben wird. Die dazu erforderlichen Methoden werden detailliert erläutert, damit eine nachvollziehbare Grundlage für die spätere Darlegung und Interpretation der Resultate geschaffen werden kann.

Darauf folgt der eigentliche Analyseteil in Kapitel 4. Darin richtet sich der Fokus auf die Resultate und Erkenntnisse des Forschungsprojektes, deren Beschreibung schrittweise und strukturiert erfolgt: zuerst werden die zentralen Ergebnisse des Experiments gemäss den definierten Zielen wiedergegeben bevor die Analysen der Lautsprechersysteme hinsichtlich ihrer Kosten-Wirksamkeit präsentiert werden.

Abschliessend werden in Kapitel 5 die Erkenntnisse im Gesamtkontext diskutiert und ein Ausblick auf weitere Handlungsmassnahmen unternommen.

2 Grundlagen

Die eingangs aufgestellte Hypothese konzentriert sich auf die Wirksamkeit akustischer Installationen. Damit diese Hypothese nachvollziehbar untersucht werden kann, müssen sowohl die neuesten Erkenntnisse über die Wirkungsweise solcher Sicherheitseinrichtungen als auch die aktuell geltenden Vorschriften für Strassentunnel berücksichtigt werden. Das folgende Kapitel vermittelt deshalb die theoretischen Grundlagen über Lautsprecher Systeme in Strassentunneln sowie einen Überblick der Normen und Richtlinien für Sicherheitseinrichtungen.

2.1 Akustische Installationen im Strassentunnel

Die Installation von Lautsprechern ist im Fahrraum von schweizerischen Nationalstrassentunneln nicht vorgesehen - weder zur Kennzeichnung von Fluchtwegen und Notausgängen noch zur Beschallung der Tunnelröhre (vgl. [3]; [30])¹. Im Gegensatz dazu stehen benachbarte Länder wie Österreich und Deutschland, die akustische Installationen als Bestandteil ihrer sicherheitstechnischen Grundausrüstung errichten und diese zu verschiedenen Zwecken in Strassentunneln auch einbauen (vgl. [14]; [25]). Die Bedeutung von Lautsprechersystemen im Ereignisfall wurde in diesen Ländern schon vor einiger Zeit erkannt. Dementsprechend ist die Erforschung ihrer Wirkungsweise fortgeschritten und grundsätzlich gut dokumentiert.

Akustische Anlagen in Strassentunneln bezwecken die Beeinflussung des menschlichen Verhaltens während Ereignissen und verfolgen dabei zwei unterschiedliche Ansätze: Signalisation zur optimalen Fluchtführung und Information zur korrekten Verhaltensanweisung.

2.1.1 Signalisation

Der Mensch nutzt akustische Reize unter anderem zur Lokalisation, d.h. zur Erkennung der Richtung und Distanz von Ereignissen. Dabei dienen dem menschlichen Gehör Laufzeitdifferenzen der Schallwellen sowie Unterschiede von Lautstärkepegeln in den beiden Ohren als Informationen. Auch in geschlossenen, reflektierenden und nachhallenden Räumen wie zum Beispiel einem Strassentunnel, in denen zahlreiche Reflexionen eines Signals die akustische Umgebung stark beeinträchtigen, ist der Mensch fähig, Signalquellen richtig zu lokalisieren. Gemäss dem *Gesetz der ersten Wellenfront* - dem sogenannten Präzedenz-Effekt - erkennt das menschliche Gehör die Schallquelle in der Richtung, aus der die ersten Schallwellen beim Ohr eintreffen; sämtliche später ankommenden Schallwellen werden dann ebenfalls dieser Richtung zugeordnet ([18]) (vgl. Abbildung 4).

Dieser komplexe psychoakustische Effekt bildet den Grundstein auf dem das Konzept der akustischen Signalisation von Notausgängen in Strassentunneln aufbaut. Unter erschwerten Sichtbedingungen, zum Beispiel aufgrund einer Rauchentwicklung während eines Ereignisfalles, verlieren optische Fluchtwegsignalisationen ihre Wirkung. Im extremsten Fall stehen den Flüchtenden die optischen Hilfsmittel nicht mehr zur Verfügung und sie müssen die optimale Fluchtrichtung vermuten. Oftmals folgen Menschen in solch kritischen Situationen ihrer Neigung, hin zu bekannten Personen und Orten zu flüchten. Im Strassentunnel impliziert dies, dass Betroffene eher in die Richtung fliehen, aus der sie gekommen sind, als sich nach vorn und unter Umständen zum näheren Notausgang zu begeben ([23]).

¹ Es sei darauf hingewiesen, dass in ursprünglichen Entwürfen der ASTRA Richtlinie 13010 ([3]) die Signalisation und Gestaltung der Notausgänge mittels akustischer Alarme vorgesehen war. Die akustische Kennzeichnung der Notausgänge wurde jedoch mit Inkrafttreten der Erstaussgabe im Jahre 2011 wieder verworfen und ist bis heute nicht vorgesehen.

Unter den gleichen Bedingungen, behalten akustische Signale ihre Wirkung bei und können von den Flüchtenden weiterhin zur Lokalisation der nächsten Fluchtwegmöglichkeit genutzt werden. Die akustische Signalisation hat demnach das Potential, die Selbstrettung im Ereignisfall ergänzend zu unterstützen wenn optische Signalisationen ihre Wirkung tendenziell verlieren; sie wird im vorliegenden Forschungsbericht wie folgt definiert:

Akustische Signalisation umschreibt die Kennzeichnung von optimalen Fluchtmöglichkeiten im Tunnelfahrraum durch Geräusche, seien es natürlich oder künstlich erzeugte, die zum Ziel haben, die Selbstrettung von Personen im Ereignisfall zu unterstützen.

Das erwähnte schweizerische Experiment aus dem Jahre 2012 ([21]) sowie vergleichbare Studien aus den Niederlanden ([6]), aus England ([38]; [39]) und Deutschland ([13]) belegen eindrücklich, dass akustische Signalisationen ein wirksames Mittel sind um flüchtenden Personen die nächste Sicherheitseinrichtung erkennbar zu machen und das Fluchtverhalten positiv zu beeinflussen.

Zur akustischen Signalisation der Fluchtwege müssen über den Notausgangstüren im Fahrraum Lautsprecher angebracht sein, die so positioniert sind, dass das akustische Signal in beide Längsrichtungen des Tunnels ausgesendet werden kann (vgl. Abbildung 4). Damit das oben beschriebene *Gesetz der ersten Wellenfront* ausgenutzt werden kann, ist das lockende Signal von allen Lautsprechern im Tunnel gleichzeitig auszusenden (in Abbildung 4 durch orange gefärbte Lautsprecher gekennzeichnet). Nur so kann gewährleistet werden, dass die Schallwellen des näheren Lautsprechers auch wirklich zuerst beim Flüchtenden ankommen (in Abbildung 4 ist dies die Schallwelle "links_{direkt}" des linken Lautsprechers). Aufgrund der daraus entstehenden Ankunftsunterschieden und Intensitätsunterschieden sämtlicher Schallwellen kann das menschliche Gehör schliesslich die nächste Schallquelle und damit den nächsten Notausgang lokalisieren.

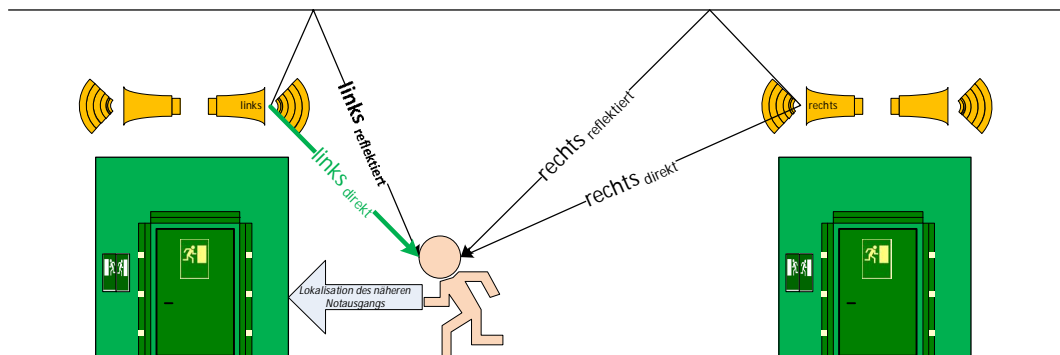


Abbildung 4 Bidirektionale Beschallung zur akustischen Signalisation

Bezüglich akustischer Installationen in Strassentunnel, welche die Signalisation von Fluchtwegen und Notausgängen zum Ziel haben, sind in der wissenschaftlichen Literatur nur sehr beschränkte Angaben über technische Anforderungen und Hinweise zur idealen Montage abzuleiten. Die bestehenden Installationen wurden immer objektspezifisch getestet und ausgerichtet, weshalb allgemeingültige Aussagen nur bedingt möglich sind. Fehlende technische Anforderungsdefinitionen in der wissenschaftlichen Literatur hängen aber auch damit zusammen, dass Lautsprecher in Strassentunneln, wenn sie denn installiert sind, eher zur Information der Personen im Tunnel als zur akustischen Signalisation von Notausgängen genutzt werden. Im Feldversuch aus dem Jahre 2012 im Uetlibergtunnel wurden die Lautsprechersysteme mittig über den Notausgangstüren auf einer Höhe von 2.5 m mit einem leichten Neigungswinkel von 3° nach unten direkt auf der Tunnelwand montiert. Mit diesem Installationskonzept wurden anforderungsgerechte Schallabstrahlcharakteristiken und signifikante Resultate erzielt, sodass diese Anordnung als zweckdienlich bezeichnet werden kann.

Über betriebliche Anforderungen an akustische Signalisationssysteme werden in der Literatur keine Angaben gemacht: Mögliche Auswirkungen von Lautsprechern im Tunnelraum auf den Betrieb und Unterhalt sind nicht dokumentiert; Ansätze zur Integration von Lautsprechersystemen in bestehende Alarmkonzepte sind nicht vorhanden; Interaktionen zwischen akustischen Installationen und übrigen Signalisationen der Sicherheitseinrichtungen werden nicht diskutiert. Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass zwar allgemeingültige Ansätze und Methoden aus der Psychoakustik ausreichend vorhanden sind, diese aber nicht ohne weitere Überprüfung für den spezifischen Fall von akustischen Installationen in Strassentunneln genutzt werden können. Das vorliegende Forschungsprojekt liefert diesbezüglich zentrale Grundlagen.

2.1.2 Information

Der weitaus verbreitetere Zweck von Lautsprechern im generellen Sinne betrifft die Übertragung von Sprachdurchsagen zur Information von Personen. Die akustischen Installationen können dabei sowohl während des Normalbetriebs zur reinen Informationsübermittlung (Bsp. "Zug A ist verspätet") als auch während Ereignisfällen zur Verhaltensbeeinflussung (Bsp. "Begeben Sie sich zum Notausgang") von Nutzergruppen eingesetzt werden. In Österreich und Deutschland sowie weiteren europäischen Ländern werden Lautsprechersysteme zu diesen Zwecken auch in Strassentunneln angebracht. In schweizerischen Nationalstrassentunneln sind akustische Installationen zur Beschallung des Fahrraums zurzeit für keinen dieser beiden Anwendungszwecke vorgesehen. Das Prinzip der Informationsübermittlung via Lautsprecher wird im vorliegenden Bericht folgendermassen definiert:

Akustische Information umfasst die Beschallung des Tunnelfahrraumes mit verständlichen Sprachdurchsagen, die zum Ziel haben, Personen zu informieren oder deren Verhalten im Ereignisfall situationsgerecht zu beeinflussen.

Die Übertragung verständlicher Sprachdurchsagen ist in begrenzten Räumen mit schallharten Oberflächen aufgrund der zeitlich abhängigen Charakteristik von Schallwellen eine grosse Herausforderung. Auf die direkten Schallwellen von der Quelle zum Empfänger folgen typischerweise frühe und schliesslich späte Reflexionen, die einen diffusen Klangeindruck hinterlassen. Während frühe Reflexionen eine gute Sprachverständlichkeit nicht beeinträchtigen, führen späte Reflexionen - der sogenannte Nachhall - im menschlichen Gehör zu einem Klangbild, das aus nicht lokalisierbaren Umgebungsgereuschen besteht ([8]).

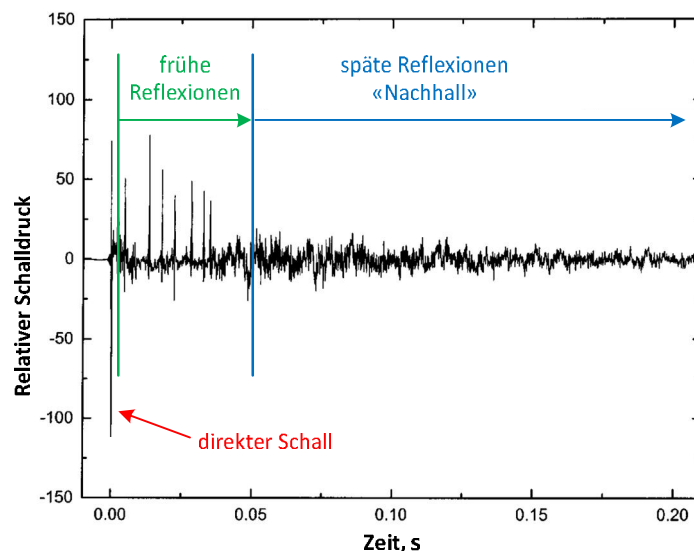


Abbildung 5 Zeitliche Struktur akustischer Schallwellen (eigene Darstellung nach [8])

Strassentunnel weisen im Vergleich zu ihrer Länge einen kleinen Querschnitt auf. Aufgrund dieser speziellen geometrischen Verhältnisse bilden Strassentunnel lange Räume, in denen sich Schallwellen entlang der beiden Längsrichtungen sehr gut ausbreiten können. Weil die Fahräume von Strassentunneln durchwegs aus schallharten Oberflächen bestehen, verlieren die Schallwellen während den zahlreichen Reflexionen zudem nur langsam an Energie und es dauert lange bis ein Signal diffundiert ist. Diese besonderen Schalleitungseigenschaften führen unter anderem zu den für Tunnel markanten Nachhallzeiten zwischen 7 und 10 Sekunden im mittleren Frequenzbereich, was sehr lang ist und die akustischen Verhältnisse für verständliche Sprachdurchsagen stark erschwert ([19]).

Zur Überwindung der schwierigen akustischen Verhältnisse besteht die Möglichkeit, die Raumakustik mittels umfangreicher Optimierungen, beispielsweise mit Dämpfungsmaterial physisch zu beeinflussen. Die Überdeckung der reflektierenden Oberflächen mit schallabsorbierenden Materialien stellt jedoch für Strassentunnel keine praktikable Lösung dar. Im Gegensatz dazu bieten spezifische Beschallungskonzepte, welche die Signalausendung gezielt steuern und die Längsgeometrie und Schalleitungseigenschaften von Tunnelräumen ausnutzen, einen vielversprechenderen Ansatz zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit.

Während bei der akustischen Signalisation absichtlich gegenläufige Schallwellenfronten erzeugt werden um die Lokalisation im Strassentunnel zu erleichtern, ist dies bei der Information zu vermeiden. Bei der Übermittlung von verständlichen Sprachdurchsagen ist es eine wichtige Voraussetzung, dass das Signal nur unidirektional in Längsrichtung ausgesendet wird. Damit wird verhindert, dass gegenläufige Schallwellenfronten aufeinander treffen, sich gegenseitig brechen und ein konfuses Klangbild mit schlechter Sprachverständlichkeit generieren (vgl. Abbildung 6).

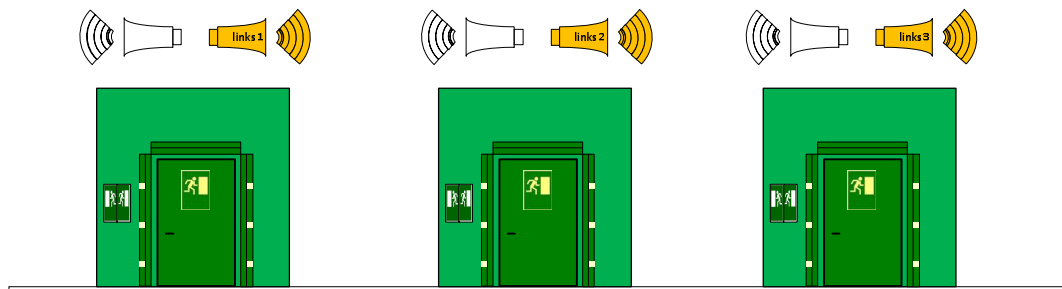


Abbildung 6 Unidirektionale Beschallung zur akustischen Information

Zur unidirektionalen Beschallung von Tunnelräumen bestehen drei unterschiedliche Beschallungskonzepte, die sich vorrangig in der Steuerung der Signalausendung unterscheiden ([19]; [20]):

- **Gleichzeitige Signalausendung aller Lautsprecher:** Bei diesem Konzept werden sämtliche im Tunnelraum angebrachten Lautsprecher gleichzeitig (t_0) für die Signalausendung in eine Längsrichtung aktiviert. Bei dieser konventionellen Beschallung entstehen mit der Zeit starke Reflexionen und Überlagerungen der Schallwellen, die eine gute Sprachverständlichkeit beeinträchtigen.

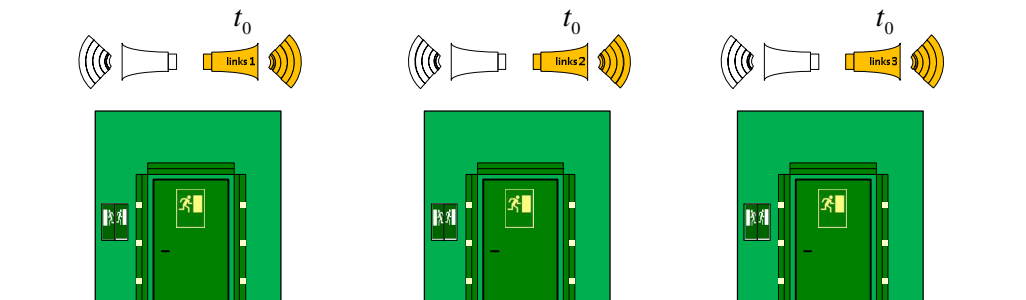


Abbildung 7 Gleichzeitige Beschallung (eigene Darstellung nach [19] und [20])

- Sequenzielle Beschallung mit Synchronisation der Lautsprecher:** Um allzu starke Reflexionen und Beeinträchtigungen zu verhindern wird in diesem Konzept der Tunnelraum in Abschnitte unterteilt (vgl. Abschnitt "A" und "B" in Abbildung 8), die sequenziell nacheinander beschallt werden. Bei dieser Vorgehensweise erfolgt die Aktivierung der Lautsprecher also abschnittsweise, wodurch die Sprachdurchsagen kontinuierlich durch den Tunnelraum getragen werden. Zusätzlich werden die Signale aus den Lautsprechern eines Abschnittes zeitverzögert ausgesendet indem die Aktivierung mit der Schallwellenausbreitung c^2 des vorhergehenden Lautsprechers synchronisiert wird ($t_{0+x/c}$).

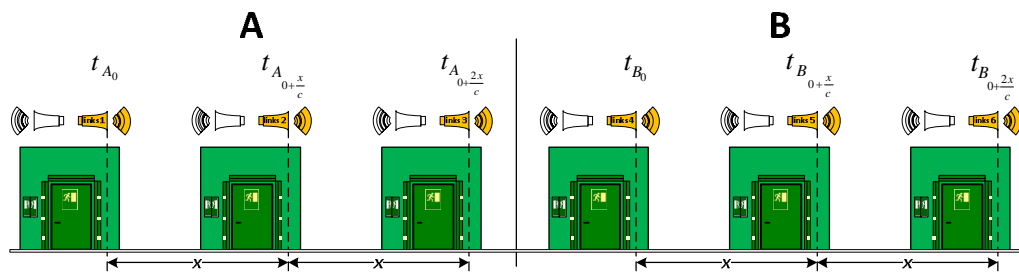


Abbildung 8 Sequenzielle Beschallung (eigene Darstellung nach [19] und [20])

- Synchronisierte Längsbeschallung:** Die entlang der Tunnelwand angebrachten Lautsprecher senden mit diesem Beschallungskonzept das akustische Signal zeitverzögert nicht sequentiell nach Abschnitten sondern über die gesamte Tunnellänge nacheinander aus. Dieser synchronisierten Längsbeschallung (synchronized longitudinal announcement speaker system, SLASS) liegt ein objektspezifisch berechneter Laufzeitausgleich zugrunde, der die aufeinanderfolgenden Lautsprecher mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schallfeldes des ersten Lautsprechers in Einklang bringt. Die abnehmenden Schalldrücke der jeweils vorhergehenden Schallwellen können somit mit jedem Lautsprecher kompensiert und eine reflexionsarme Längsbeschallung über die gesamte Tunnelröhre aufrechterhalten werden ([20]).

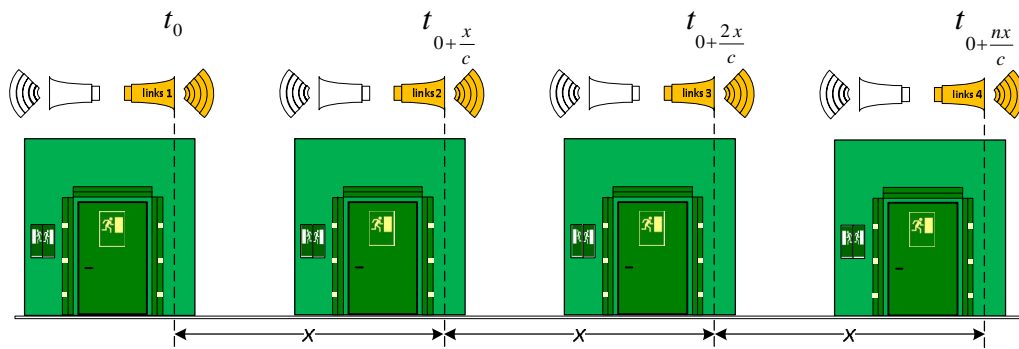


Abbildung 9 Synchronisierte Beschallung (eigene Darstellung nach [19] und [20])

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass durch den elektronischen Laufzeitausgleich der Aktivierung, konstante Schallwellenfronten innerhalb eines Abschnittes bzw. der gesamten Tunnelröhre generiert werden können. Die Sprachverständlichkeit verbessert sich dadurch im Vergleich zur gleichzeitigen Aktivierung aller Lautsprecher signifikant ([13]; [24]).

Die Qualität der Sprachverständlichkeit wird üblicherweise mit dem Sprachverständlichkeitsindex (Speech Transmission Index, STI) gemessen ([1]; [26]). Er

² Schallgeschwindigkeit in Luft $c = 343,2 \frac{m}{s}$

beschreibt das Verhältnis zwischen dem ausgesendeten Signal und dem Hintergrundgeräusch und kann mit den subjektiven Prädikaten "schlecht" bis "ausgezeichnet" beurteilt werden (vgl. *Tabelle 2*).

Tabelle 2 Sprachverständlichkeitsindex STI

STI	Beschreibung der Sprachverständlichkeit
0.75 - 1	ausgezeichnet
0.6 - 0.75	gut
0.45 - 0.6	angemessen
0.3 - 0.45	schwach
0 - 0.3	schlecht

Obschon der STI in der technischen Literatur oftmals als Mass für die Sprachverständlichkeit verwendet wird, weist der Index verschiedene Beschränkungen auf ([24]). So ist er einerseits abhängig von einem linearen Frequenzgang des Lautsprechers im Bereich zwischen 250Hz-8kHz, was nicht immer gewährleistet werden kann. Im Falle von Pegeldifferenzen zwischen einzelnen Frequenzbändern liefert der STI somit ein zu optimistisches Bild der Sprachverständlichkeit ([19]). Der STI als Mittel zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit kann hinterfragt werden, weil er lediglich ein Mass für die technischen Voraussetzungen bildet, die das Verstehen des übertragenen Sprachsignals ermöglichen ([22]). Die subjektiv durch das menschliche Gehör empfundene Verständlichkeit kann letztlich nur experimentell nachgewiesen werden. Das vorliegende Forschungsprojekt untersucht unter anderem diesen Zusammenhang zwischen dem rechnerisch hergeleiteten STI und der subjektiven Sprachverständlichkeit.

Neben den technischen Voraussetzungen müssen Sprachdurchsagen zudem bestimmte formale und inhaltliche Anforderungen erfüllen, damit sie ihren Zweck der korrekten Verhaltensanweisung während Ereignissen erfüllen ([13]). Um Fehlinterpretationen und falsches Verhalten der Flüchtenden zu verhindern, müssen Sprachdurchsagen während Ereignissen unbedingt spezifisch und in ihren Aussagen konsistent sein, sodass bei den betroffenen Tunnelnutzern keine Unklarheiten bezüglich der Situation hervorgerufen werden und kein Anlass zur Hinterfragung der Durchsagen verursacht wird. Die gesprochenen Informationen müssen genau sein und mit einer Bestimmtheit übertragen werden, damit die Flüchtenden der Informationsquelle einen autoritären Charakter beimessen und die Anweisungen entsprechend zweifellos befolgen. Die Aussagen müssen zudem unbedingt mit einem einfachen Wortschatz und klaren, ganzen Sätzen gemacht werden (nach [13] und [19]). Hinsichtlich des inhaltlichen Aufbaus sollten Sprachdurchsagen zur erfolgreichen Verhaltensbeeinflussung im Ereignisfall die folgenden Kriterien erfüllen:

Tabelle 3 Inhaltliche Anforderungen an Informationsdurchsagen

Anforderung	Beispiel
Angaben über die Informationsquelle	"Achtung, hier spricht die Polizei."
Angaben über die Lokalität der Gefahr	"Ein Fahrzeug brennt im Tunnel."
Angaben über die weiteren Schritte	"Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand, stellen Sie den Motor ab und lassen Sie den Schlüssel stecken. Steigen Sie sofort aus und laufen Sie zum nächsten Notausgang."
Angaben über die zur Verfügung stehende Zeit	"Sofort."
Angaben über die bevorstehende Gefahr	"Es besteht Lebensgefahr"

2.2 Richtlinien und Normen

2.2.1 Schweiz

Die Norm SIA 197/2 (2004) schreibt für die Projektierung von Strassentunnel vor, dass die für die Sicherheit der Nutzer wesentlichen Einrichtungen besonders zu kennzeichnen sind ([30]). Die Fluchtwege im Fahrraum sowie die Notausgänge sind gemäss dieser Norm mit optischen Signalisationen, d.h. mit Leittafeln für die optimale Fluchttrichtung und Distanzangaben bzw. Piktogrammen, Blitzlichtern und grünen Balken zu kennzeichnen. Die Richtlinie des Bundesamtes für Strassen ASTRA "Signalisierung der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln" ([3]) konkretisiert die Vorgaben, indem die genauen Anforderungen, Standorte und Anordnungen dieser optischen Signalisationen detailliert aufgeführt werden. Die ASTRA-Richtlinie "Türen und Tore in Strassentunnel" macht zur Signalisation der Notausgangstüren keine weiteren Angaben.

In den geltenden Normen und Richtlinien für Nationalstrassentunnel werden Lautsprecher weder zur Kennzeichnung von Fluchtwegen noch als akustisches Informationsmittel behandelt¹. Die im Tunnel verfügbaren Radiosender und Frequenzen sind die einzigen auf die akustische Wahrnehmung des Menschen ausgerichteten Kanäle, die sich aber ausschliesslich zur Information eignen und deshalb die Selbstrettung nur in einem beschränkten Masse unterstützen.

2.2.2 EU

Die europäische Richtlinie über die minimalen Sicherheitsanforderungen auf transeuropäischen Strassennetzen erwähnt akustische Installationen als mögliche Zusatzeinrichtungen, die in Strassentunneln mit einer Länge von mehr als 3 Kilometern anzubringen sind um die Tunnelnutzer im Ereignisfall beeinflussen zu können ([12]). Die rückwärtigen Sicherheitsräume, die den flüchtenden Tunnelnutzern als sicherer Wart- und Aufenthaltsraum dienen, sollen ebenfalls mit Lautsprechern ausgerüstet sein, damit den Flüchtenden die notwendigen Informationen akustisch zugetragen werden können. Abgesehen von ihrer möglichen Funktion als Kommunikations- und Informationsmittel werden akustische Installationen in dieser EU-Richtlinie aber nicht weiter erwähnt.

Wie bereits eingangs erwähnt, werden akustische Installationen in fachspezifischen Normen und Richtlinien Österreichs berücksichtigt. Die RVS-Richtlinie ([14]) betrachtet Lautsprecher als Bestandteil ihrer sicherheitstechnischen Grundausrüstung und schreibt diese zur Beschallung sowohl bestimmter Orte (Portalzonen und Pannenbuchten) des Tunnelfahrtraumes als auch der Querschläge und der Verbindungen ins Freie vor. Akustische Installationen gelten in Österreich gemäss dieser Richtlinie als wichtiges Element der Informationsanlagen in Strassentunnels. Ihre Wirkungsweise wird zudem in übergeordneten Risikoanalysen miteinbezogen.

In Deutschland sind Lautsprecher ebenfalls vorgeschriebener Bestandteil der standardmässigen Sicherheitseinrichtungen von Strassentunneln; sie werden in der RABT-Richtlinie unter den Kommunikationseinrichtungen aufgeführt (vgl. [25]). Sofern Tunnel videoüberwacht oder länger als 400 m sind, dann sind ebenfalls auch Lautsprecher im Tunnelfahrtraum und an den Tunnelportalen zur Verhaltensanweisung der Tunnelnutzer im Ereignisfall anzubringen. Die deutsche Richtlinie macht spezifische Angaben zu den Anforderungen, die Lautsprechersysteme zur verständlichen Übertragung von Sprachdurchsagen im Fahrraum zu erfüllen haben. So müssen Durchsagen unter anderem mindestens einen STI > 0.45 erreichen, wozu möglichst eng bündelnde Hornlautsprecher zur Grenzflächenmontage einzusetzen sind. Die Lautsprechersysteme müssen separat angesteuert und so angepasst werden können, dass mittels Signalverzögerung eine zeitliche synchronisierte Schallwellenfront längs durch den Tunnelraum generiert werden kann (vgl. Kapitel 2.1.2). Weitere technische oder betriebliche Anforderungen sind dieser Norm nicht abzuleiten.

Es kann somit festgestellt werden, dass in den Richtlinien der deutschsprachigen Nachbarländer der Schweiz akustische Installationen als Bestandteil der

Sicherheitsausrüstung von Strassentunneln begriffen werden, diese aber stets als Kommunikations- oder Informationsmittel zur Verhaltensbeeinflussung der Tunnelnutzer im Ereignisfall eingesetzt werden. Lautsprecher zur akustischen Signalisation der Fluchtwege und Notausgänge sind nicht vorgesehen, werden aber vereinzelt trotzdem eingesetzt (Bsp. Niederlande).

3 Methodik

Wie bereits in Kapitel 1.2 erläutert, ist die Wirksamkeit verschiedener Lautsprecher Systeme anhand einer spezifischen Vorgehensweise zu bestimmen, die sich grob zusammengefasst auf die drei Phasen *Auswahl*, *Analyse* und *Bewertung* beschränkt. Die dazu erforderlichen Methoden werden im folgenden Kapitel erläutert, damit eine nachvollziehbare Grundlage für die spätere Darlegung und Interpretation der Resultate in Kapitel 4 resp. Kapitel 5 geschaffen werden kann.

3.1 Definition der Wirksamkeit

Damit die Wirksamkeit akustischer Installationen bestimmt werden kann, benötigt es wie weiter oben erwähnt, eine Definition von Zielvorgaben, die durch Lautsprecher Systeme zu erfüllen sind. Als Grundlage der Gesamtwirksamkeitsanalyse werden deshalb zweckmässige technische, betriebliche und selbstrettungsunterstützende Teilwirksamkeitsziele hergeleitet und die zur Zielerfüllung erforderlichen Kriterien definiert. Diese technischen (Kapitel 3.1.1), betrieblichen (Kapitel 3.1.2) und selbstrettungsunterstützenden (Kapitel 3.1.3) Zielvorgaben werden im vorliegenden Forschungsprojekt unter den sogenannten "Teilwirksamkeiten" zusammengefasst (vgl. Abbildung 10). Alle Teilwirksamkeiten werden gleich gewichtet.

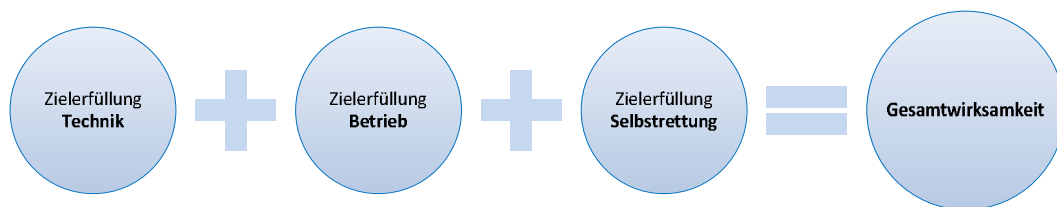


Abbildung 10 Definition der Wirksamkeit

Damit die unterschiedlichen Wirksamkeiten messbar und vergleichbar sind, werden die Zielerfüllungsgrade mit einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Notenskala von 1 bis 5 bewertet. Diese Operationalisierung wird auf alle Teilwirksamkeiten und damit auch auf die Gesamtwirksamkeit der Lautsprecher Systeme angewendet (vgl. Tabelle 4)

Tabelle 4 Operationalisierung der Wirksamkeit

Zielerfüllung	Notenwert
Sehr schlecht	1
Schlecht	2
Genügend	3
Gut	4
Sehr gut	5

3.1.1 Teilwirksamkeit "Technik"

Die speziellen Verhältnisse in Strassentunneln erfordern bestimmte technische Eigenschaften, die akustische Installationen aufweisen müssen, damit sie ihre bezweckte Funktion in wirksamer Weise erfüllen können. Im vorliegenden Forschungsprojekt wird diese technische Wirksamkeit definiert als:

Zu erfüllende technische Fähigkeiten oder Beschaffenheiten von akustischen Systemen, um die akustische Signalisation bzw. Information in Strassentunneln gewährleisten zu können.

Direkt im Tunnelraum angebrachte Lautsprecher müssen in erster Linie robust beschaffen sein, sodass sie den oftmals hohen Druckstossbelastungen standhalten können und dass sie während der regelmässigen Tunnelreinigungen nicht beschädigt werden. Die für Strassentunnel typischen Verunreinigungen dürfen die Funktion der Lautsprechersysteme genauso wenig beeinträchtigen wie die teilweise hohen Temperaturen und Temperaturschwankungen.

Weil sich Strassentunnel hinsichtlich ihres Querprofils (Rundprofil vs. Rechteckprofil) unterscheiden, ist es essentiell, dass akustische Installationen möglichst wenige Zusatzanforderungen an die Beschaffenheit der Befestigungsunterlage stellen. Die Lautsprecher müssen einfach an den Tunnelwänden montiert und ausgerichtet werden können, ohne dass weitere aufwändige Vorkehrungen erforderlich werden (Bsp. Befestigungsplatten zur Ausgleichung der Wandkrümmung).

Damit die Systeme sowohl zur akustischen Signalisation als auch zur Information eingesetzt werden können, müssen die Lautsprecher die entsprechenden Schallabstrahlcharakteristiken aufweisen. Das bedeutet, dass die Lautsprecherhörner die Signale zur optimalen Lokalisierung nicht zu stark gebündelt und zur verständlichen Übertragung von Sprachdurchsagen nicht zu stark gestreut aussenden dürfen. Die Systeme müssen zudem in der Lage sein, die nötigen Schalldrücke im geforderten Frequenzbereich möglichst linear und im Bedarfsfall auch laufzeitverzögert zu übertragen. Überdies haben die Systeme die einschlägigen technischen Normen zu erfüllen.

Die relevanten technischen Wirksamkeitsziele sind in Tabelle 5 aufgeführt:

Tabelle 5 Technische Wirksamkeit	
Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele
Robustheit	möglichst robustes Gehäuse (Bsp. Windlast, Tunnelreinigung etc.)
	möglichst robuste Halterung (Bsp. Windlast, Tunnelreinigung etc.)
	IP Schutzgrad mind. IP66
	Beständigkeit gegen Tunnelklima
Montageprozess	Beständigkeit gegen Temperaturen (übliche Betriebstemperatur)
	einfache Verstellbarkeit und Ausrichtungsmöglichkeit
Signalisation und Information	möglichst wenige Zusatzanforderungen (Bsp. Oberflächenbeschaffenheit, Tunnelwand etc.)
	Für Signalisation: gleichmässige Streuung des akustischen Signals möglich
Technische Daten	Für Information: stark gerichtete Schallabstrahlung möglich (entlang der Grenzfläche)
	Kennschalldruck (dB/W und m)
	Übertragbarer Frequenzbereich
Zuverlässigkeit	möglichst lineare Frequenzübertragung
	Erfüllung der aktuellen Normen
Zentrale	möglichst geringe Störungsanfälligkeit
	Anpassungsfähigkeit Verstärker auf Frequenzgang des Lautsprechers und der akustischen Umgebung
	Möglichkeit für Langzeit-Delay (max. Verzögerungszeit)
	Möglichkeit für Umschaltung auf Havarie-Verstärker

3.1.2 Teilwirksamkeit "Betrieb"

Als potentieller Bestandteil der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) müssen akustische Installationen ebenfalls durch das Fachpersonal des elektromechanischen Dienstes betrieben und instand gehalten werden können. In Anlehnung an die Richtlinien des ASTRA sind im Falle von Schäden und Störungen auch bei Lautsprechersystemen Sofortmassnahmen zur Gewährleistung der Betriebs- und Verkehrssicherheit einzuleiten und die Betriebsbereitschaft der akustischen Installationen über die Lebensdauer sicherzustellen ([2]; [4]). Die betrieblichen Anforderungsziele der Lautsprechersysteme in Strassentunneln werden demnach wie folgt definiert:

Zu erfüllende Fähigkeiten oder Beschaffenheiten von akustischen Systemen, um den reibungslosen Betrieb der akustische Signalisation bzw. Information in Strassentunneln durch das fachliche Personal gewährleisten zu können.

Weil akustische Installationen bis anhin nicht zur Grundausstattung der BSA zählen, müssen sie sich einfach in die bestehenden Systemlandschaften und die vorherrschenden betrieblichen Abläufe integrieren lassen. Geplante Prozessabläufe während Ereignisfällen sollen aufgrund der neuen akustischen Signalisations- und Informationsmittel nicht grundsätzlich geändert werden müssen. Es ist deshalb zentral, dass diese zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen ein minimales Störpotential für andere Systeme sowohl in technischer (Bsp. Beeinflussung der Leitsysteme) als auch in baulicher (Bsp. Veränderung der BSA-Anordnung im Tunnelraum) und betrieblicher Hinsicht (Bsp. Konflikt mit Tunnelreinigungsmaschine) aufweisen.

Das betriebliche Fachpersonal soll die Lautsprechersysteme im Bedarfsfall bedienen und instand halten können, ohne dass hierzu spezielles Fachwissen oder Spezialwerkzeuge nötig sind. Trotzdem muss die Verfügbarkeit von externem Fachsupport und systemspezifischen Ersatzteilen innert nützlicher Frist gewährleistet sein. Die Ziele der betrieblichen Wirksamkeit sind in Tabelle 6 zusammengefasst:

Tabelle 6 Betriebliche Wirksamkeit

Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele
Integrationsfähigkeit	möglichst einfache Integration in bestehende Systeme und Abläufe (Bsp. Alarmkonzept, Reflexmatrix etc.)
	möglichst geringes Störpotential mit betrieblichen Prozessen (Bsp. Tunnelreinigung etc.)
	möglichst geringes bauliches und physikalisches Störpotential mit anderen Systemen
	modularer Systemausbau möglich
Systembedienung	möglichst einfacher Betrieb des Gesamtsystems
Support und Ersatzteile	Verfügbarkeit von externem Support und Ersatzteilen innert nützlicher Fristen
Instandhaltbarkeit	möglichst wenig spezielles Wissen/Tools für Instandhaltung erforderlich
	Wartung durch betriebliches Fachpersonal möglich

3.1.3 Teilwirksamkeit "Selbstrettung"

Lautsprecher im Strassentunnel unterstützen die Selbstrettung. Sie eignen sich dabei sowohl für die akustische Signalisation der Fluchtwege als auch zur Information der Personen während eines Ereignisses. Weil diese beiden Einsatzzwecke ganz unterschiedliche Anforderungen an die akustischen Installationen stellen, kommen typischerweise je nach Einsatzzweck spezifische Lautsprechersysteme zur Anwendung. Im vorliegenden Forschungsprojekt wird nun untersucht, inwiefern beide Zwecke durch ein einziges System in effektiver Weise erfüllt werden können. Diese zusammengefasste

Wirksamkeit eines Lautsprechersystems zur Unterstützung der Selbstrettung wird deshalb wie folgt definiert:

Zu erfüllende Fähigkeiten oder Beschaffenheiten von akustischen Systemen, um die Selbstrettung bzw. Information von Personen in Strassentunneln zu unterstützen.

Wie bereits in Kapitel 1.2 erläutert, soll ein Lautsprechersystem in einem Strassentunnel je nach Bedarf für die Führung oder zur Information von Personen genutzt werden können. Diese synergetische Voraussetzung bedingt, dass die installierten Lautsprecher die Führungssignale zur Lokalisierung der optimalen Fluchtwege aber auch die Informationsdurchsagen in verständlicher Art und Weise aussenden können müssen. Sie sollen ein positives Fluchtverhalten bei den betroffenen Personen hervorrufen und keinesfalls Verwirrung stiften. Die betroffenen Personen sollen in ihrem Entscheidungsprozess unterstützt werden, sodass sich die Reaktionszeiten bis zur Wahl der nächsten Handlung im Ereignisfall verkürzen lassen. Die selbstrettungsunterstützenden Wirksamkeitsziele sind in Tabelle 7 definiert.

Tabelle 7 Selbstrettungsunterstützende Wirksamkeit

Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele
Signalisation	möglichst gute Lokalisierung und korrekte Fluchtrichtungswahl unterstützen
Information	möglichst gute Verständlichkeit der Informationsdurchsagen ermöglichen
Fluchtverhalten	möglichst positiver Effekt auf die Reaktionszeit bis zur Wahl des nächsten Notausgangs (möglichst schnelle und korrekte Fluchtrichtungswahl)

3.2 Akustische Signale

Lautsprecher erfüllen ihre Funktion nur dann anforderungsgerecht, wenn mit ihnen geeignete akustische Signale ausgestrahlt werden. Die Erkenntnisse des Uetlibergtunnel-Experiments aus dem Jahre 2012 deuteten auf qualitatives Optimierungspotential bei den akustischen Signalen hin. Ein wesentliches Ziel des nun vorliegenden Projektes bestand in der gezielten Verbesserung dieser bereits getesteten Signale, sodass konkrete und für Nationalstrassentunnel anwendbare Vorschläge sowohl für die akustische Signalisation als auch die Information vorliegen. So wurden sämtliche Signaltöne sowie alle gesprochenen Ansagen von einem spezialisierten Tonstudio überarbeitet bzw. mit professionellen Sprechern erneut aufgezeichnet. Alle Ansagen liegen in digitaler Form in den Landessprachen Deutsch, Französisch und Italienisch sowie in Englisch vor.

Diese verbesserten akustischen Signale bilden die zentrale Grundlage für die experimentelle Analyse der selbstrettungsunterstützenden Wirksamkeit der Lautsprechersysteme (vgl. Kapitel 3.5). Die folgenden Kapitel beschreiben Form und Inhalt dieser optimierten Signale.

3.2.1 Signalisation

Die akustischen Signale zur Lokalisierung der Notausgänge basieren auf dem Feldversuch im Uetlibergtunnel aus dem Jahre 2012 und bilden eine Kombination aus Aufmerksamkeitstönen und kurzer Sprachdurchsage (vgl. [21]). Dieses bereits damals gut zu ortende Führungssignal wurde im Hinblick auf die aktuelle Untersuchung noch einmal optimiert, sodass qualitative Mängel die Wirksamkeitsanalyse der Lautsprechersysteme nicht beeinflussen.

Ein Aufmerksamkeitston besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Zweiklängen, bestehend aus dem Terzintervall "C-E" (Grundfrequenz: 262 Hz bzw. 330 Hz) und dem Terzintervall "E-G" (Grundfrequenz: 330 Hz bzw. 392 Hz), die mit einer Pause von 200ms getrennt sind. Diese Abfolge wird zweimal abgespielt und von einer 1200ms dauernden Pause abgeschlossen, worauf eine kurze Sprechdurchsage folgt (vgl. Abbildung 11).

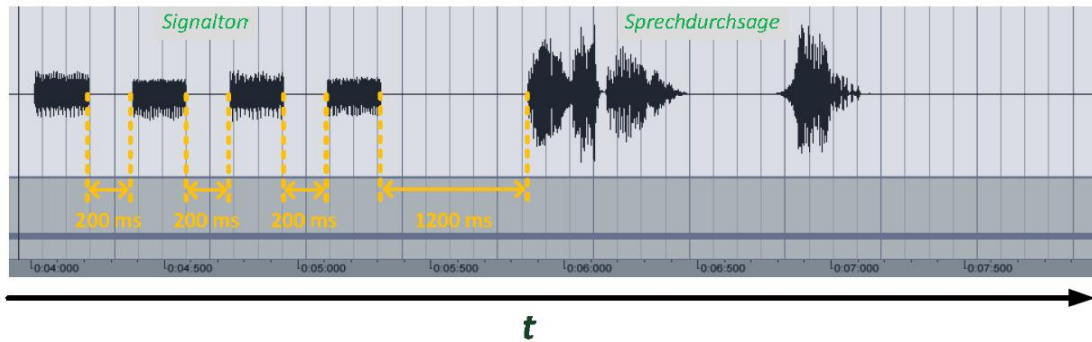


Abbildung 11 Aufbau des akustischen Führungssignals bestehend aus einer Kombination von Signaltönen und Durchsagen ([21])

Die Sprechdurchsage folgt jeweils auf die Signaltöne und wird durch eine freundlich aber dennoch bestimmt klingende männliche Stimme langsam gesprochen, sodass sich Personen zur Signalquelle hingezogen fühlen und nicht abgeschreckt werden. Das gesamte Führungssignal wird kontinuierlich wiederholt; die Pausen zwischen den Wiederholungsschleifen betragen ebenfalls 1200ms.

3.2.2 Information

Wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, müssen Informationsdurchsagen bestimmten formalen und inhaltlichen Anforderungen genügen, dass sie sich zur Verhaltensbeeinflussung im Ereignisfall eignen. Diese Anforderungskriterien berücksichtigend, wurde mit dem vorliegenden Forschungsprojekt die folgende Informationsdurchsage erstellt:

„Achtung, hier spricht die Polizei. Ein Fahrzeug brennt im Tunnel. Bitte fahren Sie an den Fahrbahnrand, stellen Sie den Motor ab, und lassen Sie den Schlüssel stecken. Steigen Sie sofort aus und laufen Sie zum nächsten Notausgang. Es besteht Lebensgefahr.“

Diese Ansage wird ebenfalls von einer freundlich aber autoritär klingenden Männerstimme gesprochen und dauert insgesamt 17.4 Sekunden.

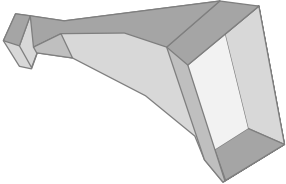
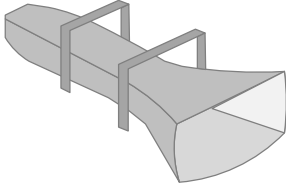
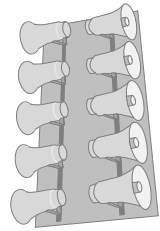
3.3 Lautsprecherauswahl

Anhand der in Kapitel 3.1 aufgeführten Wirksamkeitsziele wurden marktübliche Lautsprechersysteme ermittelt, welche die Anforderungskriterien erfüllen können. Obschon sie keine typische Lösung darstellt, wurde die Versuchsanlage aus dem früheren Feldversuch im Uetlibergtunnel zu Vergleichszwecken in die Auswahl miteinbezogen. Es soll damit überprüft werden, inwiefern sich das spezifisch für die akustische Signalisation konstruierte System ebenfalls zur Übertragung von verständlichen Informationsdurchsagen eignet.

Die folgenden Systemtypen³ wurden für die Wirksamkeitsanalysen ausgewählt:

³ Abgesehen von der Versuchsanlage "Trichterlautsprecher mit Line-Array" sind die untersuchten Lautsprechersysteme auf dem Markt erhältlich. Weil sich dieses Forschungsprojekt auf die Wirksamkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Systemtypen konzentriert und nicht auf Markenunterschiede, wird auf die Herstellerbezeichnung verzichtet. Die Analyse fokussiert deshalb auf anonymisierte Systemtypenbezeichnungen.

Table 8 Untersuchte Lautsprechersystemtypen

	Asymmetrisches Grenzflächenhorn	Alarm-Trichterlautsprecher	Trichterlautsprecher mit Line-Array
<i>Abkürzung</i>	ASG	AT	TLA
<i>Eigenschaft</i>	Asymmetrische Form mit rechteckiger Öffnung des Horns zur Erzeugung einer stark gerichteten Schallwelle entlang der Tunnelwand als Grenzfläche zwecks verständlicher Informationsdurchsagen in Tunneln	Rechteckige Hornöffnung zur speziellen Bündelung der Schallwellen zwecks verständlicher Alarmierung in Tunneln	Versuchsanlage mit signifikant positiver Wirkung auf die akustische Führung. Line-Array zur besseren Schallübertragung über grössere Distanzen ohne störende Reflexionen.
<i>Einsatzzweck</i>	Information	Information	Signalisation
<i>Hornöffnung</i>	ca. 990 x 330 mm	ca. 550 x 310 mm	ca. 210 x 210 mm (1 Horn) ⁴
<i>Hornlänge</i>	ca. 1580 mm	ca. 1160 mm	ca. 280 mm (1 Horn) ⁴
<i>Abbildung</i>			

Die Tatsache, dass die marktüblichen Lautsprechersysteme auf die Übermittlung von verständlichen Informationsdurchsagen ausgerichtet sind, verdeutlicht, dass dies der häufigste Einsatzzweck von Lautsprechern ist. Spezifische Systeme zur akustischen Signalisation in Strassentunneln oder in einem vergleichbaren Umfeld konnten nicht ausfindig gemacht werden.

3.4 Simulation

In diesem Forschungsprojekt wurde bewusst auf einen erneuten Feldversuch in einem realen Strassentunnel verzichtet. Damit die Wirksamkeit der Lautsprechersysteme dennoch wissenschaftlich untersucht werden konnte, wurden deren Schallabstrahlcharakteristiken und die verschiedenen Schallausbreitungen in einem Modelltunnel rechnerisch simuliert. Mit diesem Vorgehen konnten eine aufwändige Installation sämtlicher Lautsprechersysteme in einem realen Strassentunnel sowie die Organisation und Durchführung eines grossen Feldversuches auf eine pragmatische Art substituiert werden.

Die computerunterstützte Simulation der akustischen Verhältnisse im Tunnel diene dabei zwei zentralen Aspekten. Einerseits können mit dem aufgebauten Simulationsmodell verschiedene Lautsprechertypen einheitlich und im Vergleich zu einem Feldversuch in einem realen Tunnel mit verhältnismässig geringem Aufwand analysiert werden. Die sich daraus ergebenden akustischen Kenngrössen (Bsp. STI) lassen neben einem qualitativen auch einen quantitativen Vergleich zu und erleichtern somit die Evaluation.

Andererseits lieferte die Simulation die Grundlage für das spätere Experiment, mit dem die Wirkung der Lautsprechersysteme auf das Fluchtverhalten der Versuchspersonen ermittelt wurde. Anhand einer Auralisation wurde das Klangbild der Lautsprechersysteme im Modelltunnel erzeugt und die echofreien Signale (vgl. Kapitel 3.2) mittels eines Audiofiles wiedergeben. Dadurch wurde das Einspielen der Tonkonserven unter Tunnelbedingungen (d.h. mit Nachhall, Verzögerung etc.) nachgestellt. Im Experiment

⁴ Gesamtdimension (inkl. Befestigungsplatte): 1190 x 790 mm

wurden die Audiofiles den Probanden über Kopfhörer eingespielt und deren Verhalten und Entscheidungsfindung analysiert.

Software

Für die Simulationen wurde die Berechnungssoftware *CATT-Acoustic™ v9.0* verwendet⁵. Der Berechnungsansatz entspricht dem klassischen Ray-Tracing Verfahren. Dabei werden von der Schallquelle Schallstrahlen ausgesendet, an Oberflächen reflektiert und beim Empfänger ausgelesen.

Validierungsstrategie

Das Simulationsmodell wurde mit experimentellen Daten aus dem früheren Feldversuch im Uetlibergtunnel validiert. Der Uetlibergtunnel diente als Modelltunnel, wobei der Abschnitt des damaligen Versuches ebenfalls in *CATT-Acoustic™ v9.0* modelliert wurde (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 15).

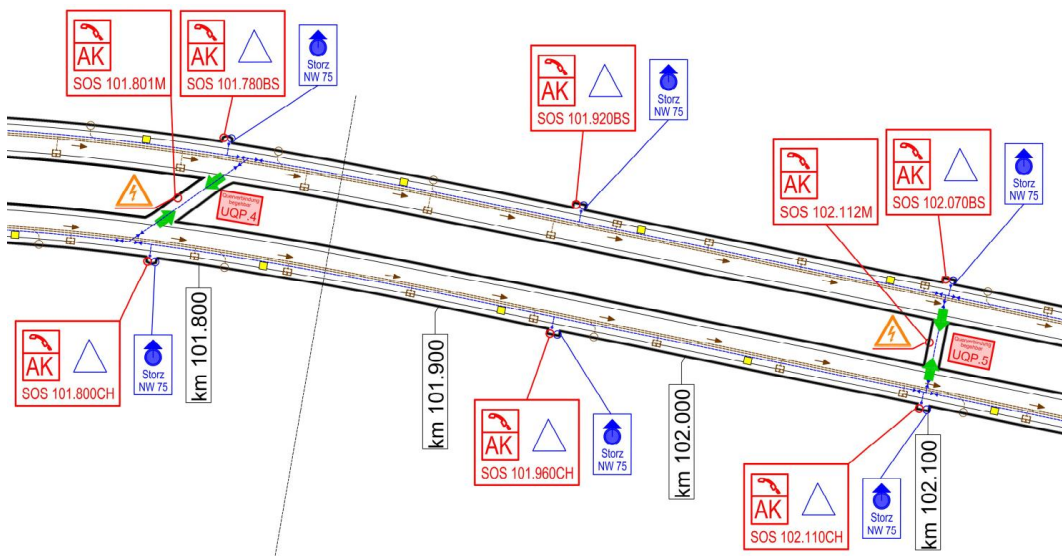


Abbildung 12 Simulierter Tunnelabschnitt des Uetlibergtunnels

Zur Validierung der Simulationen wurden die Messdaten der Versuchsanlage aus dem Jahre 2012 (Trichterlautsprecher mit Line-Array) als Referenz definiert. Die nun im Simulationsmodell berechneten STI-Werte der Versuchsanlage wurden mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Die damaligen Messdaten wurden in 25 m und 105 m Entfernung von den Schallquellen sowie in 1 m Abstand von der Tunnelwand und in einer Höhe von 1.7 m ab Boden erhoben. Die Umgebungsbedingungen im Modelltunnel wurden mit einer Lufttemperatur von 20 °C, mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer Luftdichte von 1.2 kg/m³ definiert. Die Tunnelwände, die Fahrbahn und die Tunneldecke wurden aufgrund ihrer schallharten Eigenschaft mit einem Absorptionskoeffizienten von 1-2 % in Abhängigkeit des Frequenzbandes beschrieben. Die Tunnelportale wurden ebenfalls als Wand modelliert; jedoch mit einem Absorptionskoeffizienten von 99 %, damit im Modell der Schall an den Öffnungen entweicht.

Die auf diese Weise simulierten Sprachverständlichkeiten der früheren Versuchsanlage an den verschiedenen Positionen im Modelltunnel zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen im realen Abschnitt des Uetlibergtunnels (vgl. Tabelle 9).

⁵ vgl. <http://www.catt.se/>

Tabelle 9 Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messdaten

Entfernung von Schallquelle	Messung STI	Simulation STI	Abweichung
25 m	0.48	0.5	+4 %
105 m	0.42	0.4	-5 %

Im Abstand von 105 m betrug der simulierte Schalldruckpegel 85 dB (Messwert: 84 dB); die berechnete Nachhallzeit betrug im Simulationsmodell ca. 8 Sekunden. Die Nachhallzeit konnte aufgrund fehlender Messdaten nicht validiert werden, wird im Vergleich mit Angaben aus der Literatur aber als plausibel erachtet.

Allfällige Abweichungen in der Simulation wurden durch Kalibrierung der Schallabsorptionskoeffizienten der Tunnelwände, Fahrbahn und Tunneldecke ausgeglichen. Dieses Vorgehen ist insofern zulässig, als dass für die Schallabsorptionskoeffizienten keine genauen Daten zur Verfügung standen und in einem ersten Schritt ein genereller Wert für schallharte Oberflächen verwendet wurde. Als Ergebnis dieses Vorgehens lag ein kalibriertes Modell vor, mit dem die akustischen Wirkungsweisen verschiedener Lautsprecherstypen untersucht werden konnte (vgl. Abbildung 13).

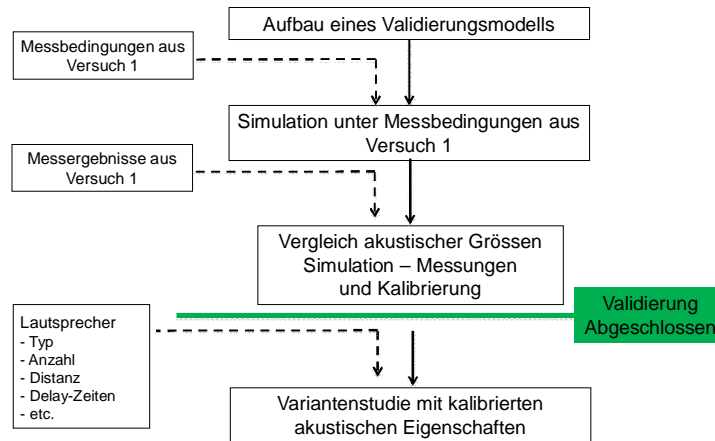


Abbildung 13 Validierungsstrategie im schrittweisen Ablauf

Modellaufbau

Das akustische Modell besteht grundsätzlich aus den folgenden Komponenten: das geometrische Modell, die Schallquellen und die Schallempfänger sowie die Vorgabe von akustischen Eigenschaften und Stoffdaten der Luft (vgl. Abbildung 14).

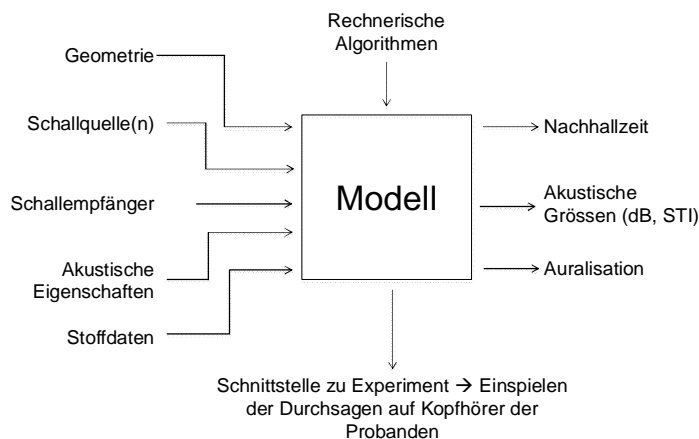


Abbildung 14 Schematischer Modellaufbau mit Eingangs- und Ausgangsgrössen

Das geometrische Modell gibt die räumlichen Bedingungen des betrachteten Abschnittes sowie die akustischen Eigenschaften der Wände im Uetlibergtunnel in generalisierter Weise wieder (vgl. Abbildung 15). Dadurch lässt sich dieses erarbeitete Tunnelmodell auch auf andere Tunnelobjekte anwenden bzw. anpassen. Die Nachhallzeit ist eine zentrale Grösse in der Berechnung und wird hauptsächlich über die obengenannten Inputgrössen bestimmt.

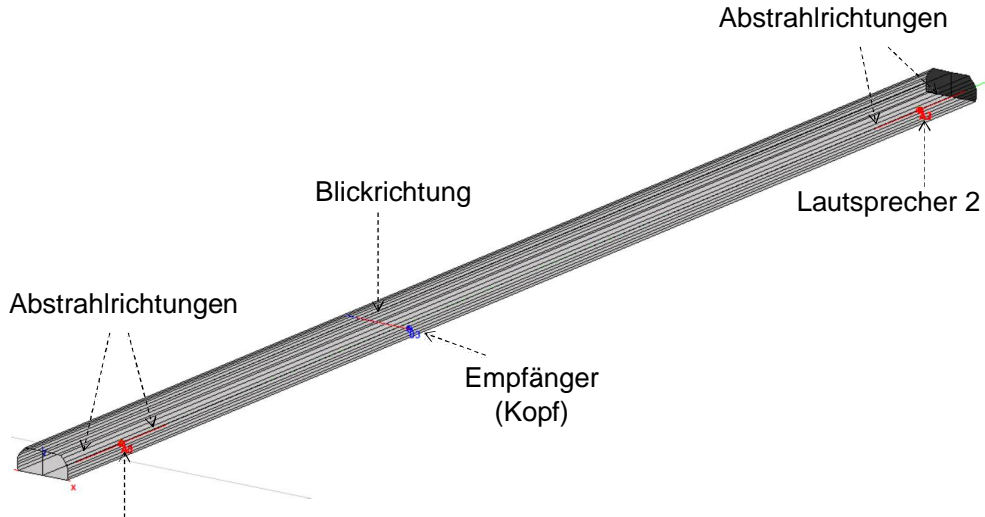


Abbildung 15 Tunnelmodell mit positionierten Schallquellen und Abstrahlrichtungen sowie Empfänger mit definierter Blickrichtung

Die Schallquellen können elektroakustischer (Lautsprecher) bzw. natürlicher Natur sein (Sprecher) oder aber auch als Störsignalquellen (Hintergrundgeräusch) definiert werden. Sämtliche Schallquellen gehen mittels einer Abstrahlcharakteristik (vgl. Abbildung 16), einer Abstrahlrichtung und einer räumlichen Position in das Modell ein.

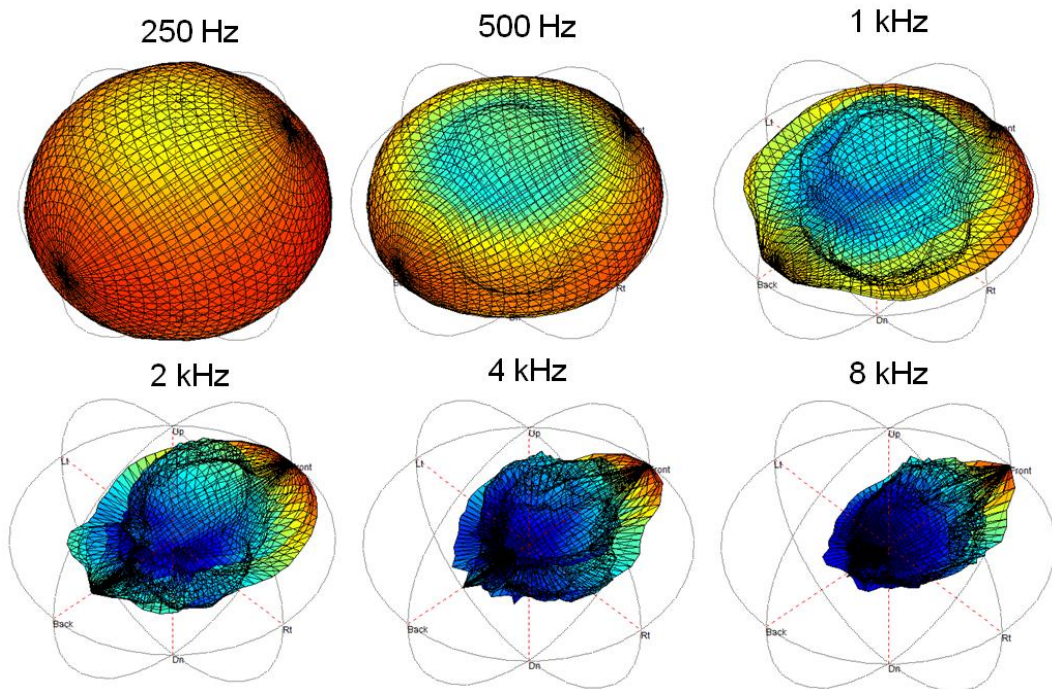


Abbildung 16 Dreidimensionale Darstellung der Abstrahlcharakteristik eines beispielhaften Lautsprechers für verschiedene Frequenzen

In der vorliegenden Studie nimmt die korrekte Modellierung der Abstrahlcharakteristik eine zentrale Bedeutung ein, weil diese den Unterschied zwischen einer guten und schlechten Verständlichkeit ausmachen kann. In der Tunnelbeschallungstechnik werden aufgrund der schallharten Oberflächen und der sich sehr schnell entwickelnden Reflexionen stark gebündelte Abstrahlcharakteristiken bevorzugt. Idealerweise liegen die dafür speziell konzipierten Lautsprecher eben auf der Wand, die eine Grenzfläche für die Schallwellen bildet und dadurch eine reflexionsfreie Führung des Schalls signifikant verlängert (vgl. Abbildung 17). Die ersten Reflexionen, welche mitunter für die Verschlechterung der Sprachverständlichkeit verantwortlich sind, treten somit erst beim Auftritt des Schalls auf der gegenüberliegenden Seite der Installation auf. Im Gegensatz dazu treten Reflexionen bei herkömmlichen Trichterlautsprechern bereits beim Verlassen des Schalls aus dem Horn auf. Der Schall ist mit Verlassen des Lautsprechers behaftet mit Reflexionen erster Ordnung was einen Verlust der maximal möglichen Sprachqualität zur Folge hat.

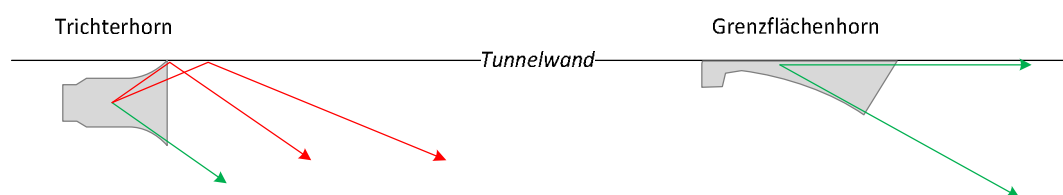


Abbildung 17 Abstrahlcharakteristik eines Trichterhorns mit Reflexionen sowie eines Grenzflächenhorns ohne Reflexionen

Der Schallempfänger wird im Simulationsmodell ebenfalls im Raum positioniert und mit einer Blickrichtung definiert. Die Bestimmung der Blickrichtung ist wichtig für die korrekte Lokalisierung der Schallquelle, welche in der vorliegenden Studie eine abhängige Variable ist, die experimentell untersucht wird. Das letzte Element der Modellierung sind die Stoffdaten der Luft, in der sich der Schall ausbreitet. Diese werden als homogen und konstant definiert.

Variantenstudie

Variiert wurden Lautsprechertypen, Aktivität der Lautsprecher (on/off) und die sich daraus ergebende Abstrahlrichtung sowie der Abstand der Empfänger relativ zu den Lautsprechern. Bewertungsparameter waren STI und Schalldruckpegel am Empfängerstandort. Für jede Variante wurde eine Auralisation erzeugt und die erstellten Sprachkonserven abgespielt. Um den realen Bedingungen während eines Ereignisses im Tunnel gerecht zu werden, wurde der Auralisation ein Hintergrundgeräuschpegel hinterlegt, wie er typischerweise bei einem Stau in einem Strassentunnel auftritt. Der Schalldruckpegel des Hintergrundgeräusches wurde auf 82 dB eingestellt, d.h. 10 dB tiefer als jener des Lautsprechersystems. Dies unter der Annahme, dass die Beschallungsanlage während eines Staus, im Mittel und über den gesamten Tunnel rund 92 dB erzeugt. In verschiedenen Studien wurde gezeigt, dass dieser Wert nicht wesentlich überschritten werden darf. Der Grund dafür liegt darin, dass bei höheren Pegeln Gehörschäden sowie Angst- und Panikreaktionen zu erwarten sind. Darüber hinaus nimmt die Sprachverständlichkeit mit zunehmenden Pegeln durch Maskierungseffekte deutlich ab.

3.5 Experiment

Die Wirksamkeit der ausgewählten Lautsprechersysteme in der Übertragung von gut interpretierbaren Signalen und Informationsdurchsagen sollte mit diesem Forschungsprojekt experimentell untersucht werden. Ausgehend davon, mussten Experimente mit Versuchspersonen geplant und organisiert werden, die wissenschaftlichen Standards genügen. Anhand der Reaktionen der Versuchspersonen sollte empirisch abgeleitet werden können, inwiefern sich die betrachteten Systemtypen

unterscheiden und ob die Probanden auf die ausgesendeten Signale unterschiedlich reagieren.

Die akustischen Signale für die Signalisation (vgl. Kapitel 3.2.1) und die Informationsdurchsagen (vgl. Kapitel 3.2.2) wurden dazu anhand der technischen Spezifikationen der Lautsprechersysteme mittels Simulation für verschiedene Standorte im Tunnelraum auralisiert (vgl. 3.4). Die Signale wurden anschliessend den Versuchspersonen über Kopfhörer zugetragen.

Die empirische Untersuchung konzentrierte sich auf vier Aspekte:

- die **relative Wirksamkeit** von drei verschiedenen Lautsprechersystemtypen (vgl. Tabelle 8)
- die **Verständlichkeit von Informationsdurchsagen** an verschiedenen Positionen zwischen zwei Notausgängen
- die **Wirksamkeit von Führungssignalen** an verschiedenen Positionen zwischen zwei Notausgängen
- die empirische **Validierung** des simulierten **STI**

3.5.1 Versuchsteilnehmer

Rekrutierung

Die Versuchsteilnehmer wurden durch Anzeigen an der Universität Bern und durch persönliche Kontakte rekrutiert. Es beteiligten sich insgesamt 38 Personen am Experiment. Alle Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme am Experiment mit CHF 20 entschädigt.

Die Daten von zwei Teilnehmern mussten eliminiert werden, da die Analyse ihrer Daten zeigte, dass sie die Instruktionen offensichtlich nicht verstanden und Antworten auf dem Zufallsniveau abgegeben hatten. Somit basieren die Resultate auf den Daten von 36 Teilnehmern.

Alter und Geschlecht

Die Teilnehmer variierten im Alter von 12 bis 78 Jahren, mit einem Mittelwert von 31 Jahren. Von den Teilnehmern waren 18 männlich und 18 weiblich.

3.5.2 Versuchsaufbau

Im Experiment wurde ein 300m langer Tunnelabschnitt simuliert, der an den beiden Enden von zwei Notausgängen begrenzt war und die Situation im Uetlibergtunnel zwischen den Notausgängen UQP.4 und UQP.5 in Fahrtrichtung Basel nachbildete (vgl. Abbildung 12).

In diesem simulierten Modelltunnel waren über jedem Notausgang zwei Lautsprecherquellen mit Abstrahlung nach links und rechts montiert (d.h. insgesamt vier Quellen). Den Teilnehmern wurden die Informationsdurchsagen und Führungssignale an vier Positionen zwischen den beiden Notausgängen über die Kopfhörer zugespielt: 60m, 120m, 180m und 240m vom linken Notausgang betrachtet - entsprechend 240m, 180m, 120m, und 60m vom rechten Notausgang betrachtet (vgl. Abbildung 18).

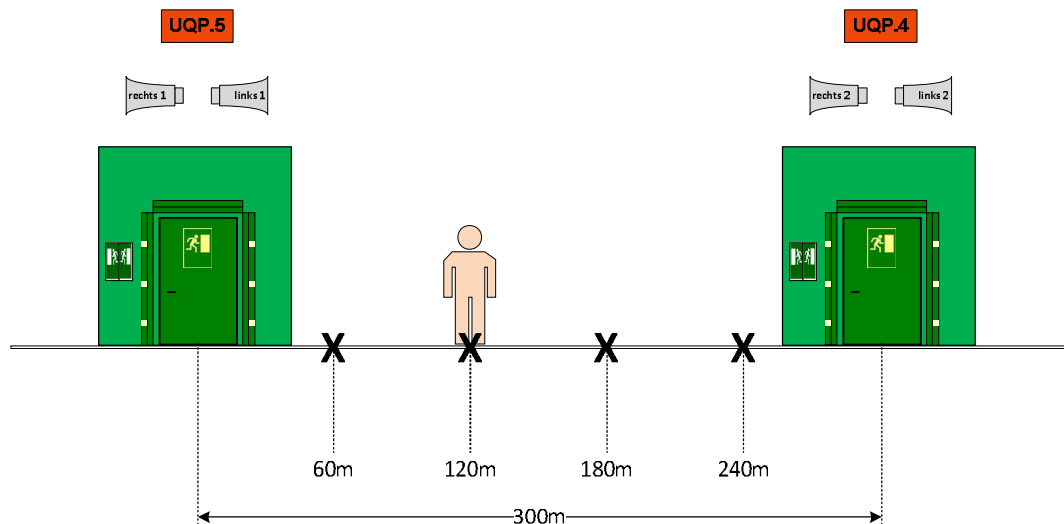


Abbildung 18 Schema der simulierten Situation im Abschnitt des Modelltunnels

3.5.3 Apparaturen

Das Experiment wurde von einem eigens für diese Studie entwickelten Python-Programm auf einem Laptop gesteuert (vgl. Abbildung 19). Die simulierten akustischen Signale und Informationsdurchsagen wurden den Versuchspersonen über einen Stereokopfhörer der Marke *Sennheiser HD 600* präsentiert. Die Teilnehmer gaben ihre Urteile sowohl in verbaler Form als auch mittels zwei Drucktasten ab. Die verbal mitgeteilten Einschätzungen der Versuchspersonen wurden vom Versuchsleiter via Tastatur eingegeben, während die Antworten mittels Drucktasten durch eine Phidget-Schnittstelle⁶ auf den Computer übertragen wurden.

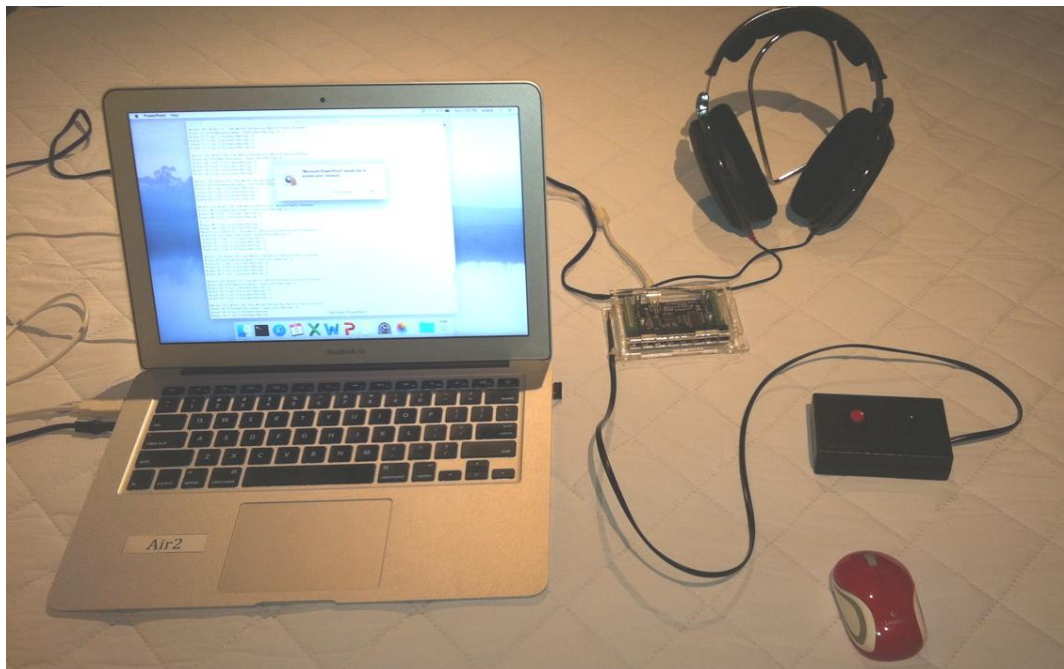


Abbildung 19 Komponenten der experimentellen Apparatur mit Laptop, Kopfhörer, Phidget-Schnittstelle und Drucktasten

⁶ vgl. <http://www.phidgets.com>

3.5.4 Stimuli

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen akustischen Signale für die Signalisation und Information wurden für das Experiment an den verschiedenen Positionen im Modelltunnel simuliert und mit einem Hintergrundgeräusch überlagert, das in einem realen Tunnel aufgenommen worden war. Der Signal-Rausch-Abstand von Signal zu Hintergrundgeräusch bewegte sich je nach Zeitpunkt und Bedingung im Bereich zwischen 4dB und 7.8dB.

Jeder Versuchsdurchgang begann mit dem alleinigen Hintergrundgeräusch, dessen Dauer zufällig im Bereich zwischen 2 bis 4 Sekunden variierte. Danach folgte das eigentliche akustische Signal, das wiederum vom alleinigen Hintergrundgeräusch gefolgt war (vgl. Abbildung 20).

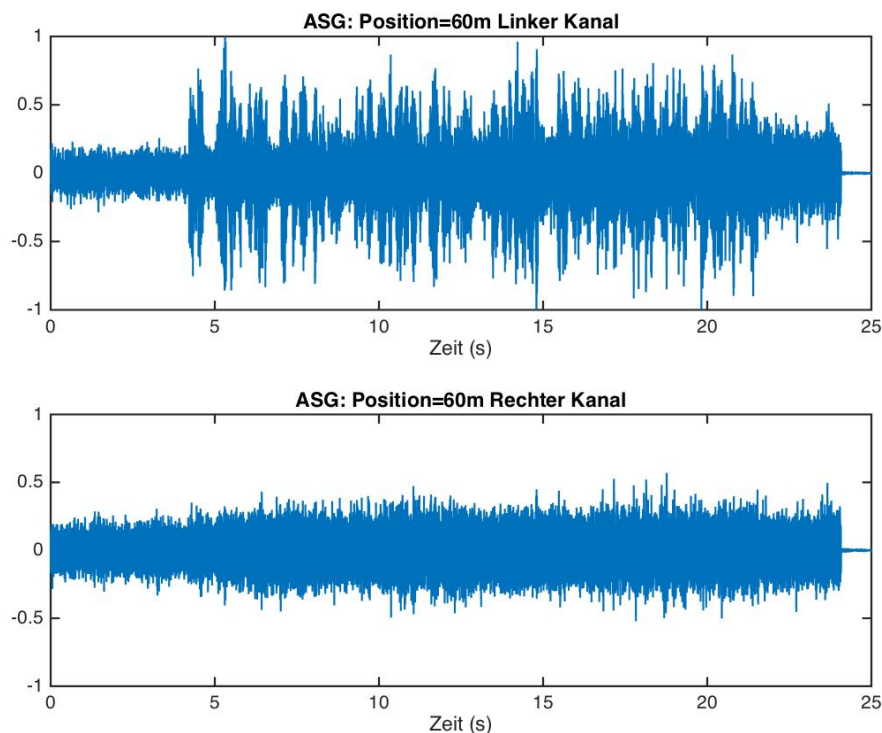


Abbildung 20 Beispiel eines Stimulus (Informationsdurchsage)

3.5.5 Versuchsablauf

Die Versuche wurden entweder in einem Raum der scians GmbH oder in einem Versuchsraum des Psychologischen Instituts der Universität Bern durchgeführt. Ein Versuch lief jeweils in den strukturierten Phasen *Einverständniserklärung*, *Instruktion* und *Durchführung* ab.

Einverständniserklärung

Im ersten Teil mussten die Teilnehmer die Einverständniserklärung lesen und unterschreiben. Diese enthielt eine Beschreibung des Ziels der Studie, eine kurze Schilderung des Experimentablaufs, eine Erklärung der Rechte der Teilnehmer, sowie die Einverständniserklärung mittels persönlicher Unterschrift (vgl. Anhang I.1).

Instruktion

Wenn die Versuchspersonen mit der Teilnahme am Experiment einverstanden waren, wurde ihnen eine detaillierte, schriftliche Beschreibung des Experimentablaufs vorgelegt (vgl. Anhang I.2). Nachdem die Probanden die Instruktionen gelesen hatten, konnten sie allfällige Unklarheiten mit den anwesenden Versuchsleitern mündlich besprechen.

Anschliessend wurde der eigentliche Teil des Experiments durchgeführt, in dem den Teilnehmern sowohl Versuchsdurchgänge mit Führungssignalen als auch mit Informationsdurchsagen präsentiert wurden.

Durchführung: Akustische Signalisation

In den Versuchsdurchgängen zur akustischen Signalisation mussten die Teilnehmer entscheiden, ob sie aufgrund des Führungssignals zum nächsten Notausgang nach links oder rechts gehen würden. Mit Druck auf die linke Drucktaste gaben sie an, dass sie nach links gehen würden, mit Druck auf die rechte Drucktaste, dass sie nach rechts gehen würden. Die Reaktionszeit vom Beginn des Führungssignals bis zum Drücken einer der beiden Tasten wurde gemessen.

Die Teilnehmer wurden vorgängig während der Instruktion darauf aufmerksam gemacht, dass sie die Beurteilungen möglichst zuverlässig machen sollten. Es wurde damit betont, dass es wichtiger war, richtig zu reagieren als schnell zu reagieren. Sobald die Teilnehmer eine Drucktaste betätigten, wurde das akustische Signal langsam abgebrochen, d.h. die Amplitude wurde über einen Zeitraum von 3 Sekunden auf null reduziert.

Anschliessend mussten die Teilnehmer beurteilen, wie weit der nähere Lautsprecher - und damit auch der optimale Notausgang - von Ihnen entfernt war. Um eine konsistente Beurteilung zu ermöglichen, hatten die Teilnehmer eine Tabelle mit einer Erklärung der Skalenwerte vor sich (vgl. Tabelle 10). Die Teilnehmer gaben die Beurteilung wiederum mündlich ab, die dann vom Versuchsleiter in den Computer eingegeben wurde.

Tabelle 10 Beschreibung der Relation zwischen Skalenwerten Entfernung

Skalenwert	Entfernung zum näheren Lautsprecher/Notausgang
1	Sehr nahe
2	Nahe
3	Mittelmässig
4	Weit
5	Sehr weit

Während des Experimentes wurden den Versuchspersonen 12 verschiedene akustische Signalisationen zugespielt. Diese Anzahl ergab sich aus der Kombination von drei Lautsprechersystemtypen, die an vier Positionen im Tunnel (60m, 120m, 180m, und 240m vom linken Notausgang) untersucht wurden.

Tabelle 11 Versuchsdurchgänge mit Führungssignalen pro Experiment

Lautsprechersystemtyp	Stimuli an den Positionen			
	60m	120m	180m	240m
Asymmetrisches Grenzflächenhorn (ASG)	60m	120m	180m	240m
Alarm-Trichterlautsprecher (AT)	60m	120m	180m	240m
Trichterlautsprecher mit Line-Array (TLA)	60m	120m	180m	240m

Durchführung: Informationsdurchsagen

In Versuchsdurchgängen mit Informationsdurchsagen mussten die Teilnehmer die Verständlichkeit der soeben gehörten Durchsage auf einer Skala von 1-5 beurteilen. Um eine konsistente Beurteilung zu ermöglichen, hatten die Teilnehmer eine Tabelle mit einer Erklärung der Skalenwerte vor sich (vgl. Tabelle 12). Die Teilnehmer gaben die

Beurteilung mündlich ab, die dann von den Versuchsleitern in den Computer eingegeben wurde.

Tabelle 12 Beschreibung der Relation zwischen Skalenwerten und Verständlichkeit

Skalenwert	Subjektive Sprachverständlichkeit
1	Sehr schlecht
2	Schlecht
3	Mittelmässig
4	Gut
5	Sehr gut

Während des Experimentes wurden den Versuchspersonen 24 verschiedene Informationsdurchsagen zugespielt. Diese Anzahl ergab sich aus der Kombination von drei Lautsprecherstypen, die an vier Positionen im Tunnel (60m, 120m, 180m, und 240m vom linken Notausgang) und aus zwei Bestrahlungsrichtungen (von links, von rechts) untersucht wurden.

Tabelle 13 Versuchsdurchgänge mit Informationsdurchsagen pro Experiment

Lautsprecherstyp	Stimuli von links an den Positionen				Stimuli von rechts an den Positionen			
	60m	120m	180m	240m	60m	120m	180m	240m
Asymmetrisches Grenzflächenhorn (ASG)	60m	120m	180m	240m	60m	120m	180m	240m
Alarm-Trichterlautsprecher (AT)	60m	120m	180m	240m	60m	120m	180m	240m
Trichterlautsprecher mit Line-Array (TLA)	60m	120m	180m	240m	60m	120m	180m	240m

3.5.6 Versuchsplan

Für jede Versuchsperson bestand das Experiment aus 24 Blöcken. In jedem Block wurde eine der 24 Informationsdurchsagen präsentiert, gefolgt von allen 12 Führungssignalen. Damit beinhaltete das Experiment insgesamt 24 Versuchsdurchgänge mit Informationsdurchsagen und 288 Versuchsdurchgänge mit Führungssignalen. Die Reihenfolge von Informationsdurchsagen und Führungssignalen war vollständig randomisiert und über die Teilnehmer balanciert, um systematische Fehler auszuschliessen.

Zu Beginn des Experiments wurde ein zufällig gewählter Block präsentiert, um die Teilnehmer mit dem Ablauf des Experiments vertraut zu machen. Wenn eine Versuchsperson am Ende dieses Warmup-Blocks noch Unklarheiten zum Experiment hatte, wurde ein zweiter Warmup-Block durchgeführt. Die in den Warmup-Blöcken abgegebenen Antworten wurden nicht in die Datenanalyse einbezogen.

3.5.7 Fragebogen

Am Schluss des Experiments beantworteten die Versuchsteilnehmer einen kurzen Fragebogen, der Fragen zum Experiment sowie einige Fragen zum Allgemeinwissen über Notfälle in Strassentunneln umfasste (vgl. I.3).

4 Resultate

Nach den theoretischen und methodischen Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln 2 und 1 richtet sich der Fokus im Folgenden auf die Resultate und Erkenntnisse des Forschungsprojektes. Die Beschreibung erfolgt dabei schrittweise und strukturiert: zuerst werden die zentralen Ergebnisse des Experiments gemäss den definierten Zielen wiedergegeben (Kapitel 4.1) bevor die Analysen der Lautsprecher Systeme hinsichtlich ihrer Kosten-Wirksamkeit präsentiert werden (Kapitel 4.2).

4.1 Experiment

Gemäss den vordefinierten Experimentzielen (vgl. Kapitel 3.5) wurden die Daten der Versuchsteilnehmer im Hinblick auf die Wirksamkeit der Führungssignale sowie auf die Verständlichkeit der Informationsdurchsagen analysiert. Die zentrale Frage war, ob sich dabei Unterschiede zwischen den drei Lautsprechersystemtypen zeigten. Weiter konnte der STI, der als technisches Mass für die Qualität der Sprachübertragung verwendet wird, mit der subjektiv empfundenen Verständlichkeit verglichen werden.

4.1.1 Akustische Signalisation

Für die akustische Signalisation wurde eine bidirektionale Beschallung simuliert, d.h. die akustischen Führungssignale wurden von allen Lautsprecherquellen über den Notausgängen gleichzeitig in beide Richtungen ausgestrahlt (vgl. Abbildung 21).

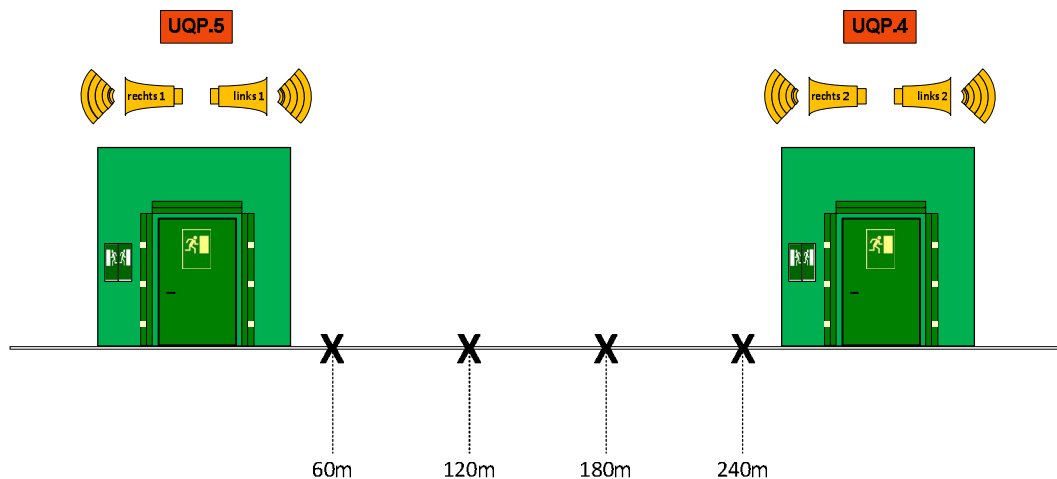


Abbildung 21 Experimentelle Situation während der akustischen Signalisation

Die Versuchsteilnehmer mussten entscheiden, ob sie aufgrund des gehörten Führungssignals nach links oder rechts laufen würden. Die Wirksamkeit der Führungssignale wurde einerseits anhand der Fähigkeit der Personen, den näheren Notausgang zu wählen und andererseits über die Reaktionszeit bis zu ihrer Entscheidung bestimmt. Zusätzlich schätzten die Teilnehmer die Distanz zum gewählten Notausgang. Die Daten wurden statistisch analysiert in Abhängigkeit des Lautsprechersystems und der Position der Teilnehmer zwischen den Notausgängen.

Korrekte Wahl des näheren Notausgangs

Die statistische Analyse erfolgte mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit wiederholten Messungen mit den Faktoren "Lautsprecher" und "Position". Die Analyse ergab sowohl statistisch signifikante Effekte für den Faktor "Lautsprecher" ($F_{(2,70)}=23.5$,

$p < 0.001$) und den Faktor "Position" ($F_{(3,105)} = 9.90$, $p < 0.001$) als auch für die Interaktion zwischen "Lautsprecher" und "Position" ($F_{(6,210)} = 5.66$, $p < 0.001$).⁷

Der Einfluss der untersuchten Lautsprechersysteme auf die korrekte Wahl des Notausgangs ist in Abbildung 22 illustriert. Alle drei Lautsprechersystemtypen zeigten eine sehr hohe Wirksamkeit: in 95-99% aller Fälle hatten sich die Versuchsteilnehmer für den näheren Notausgang entschieden.

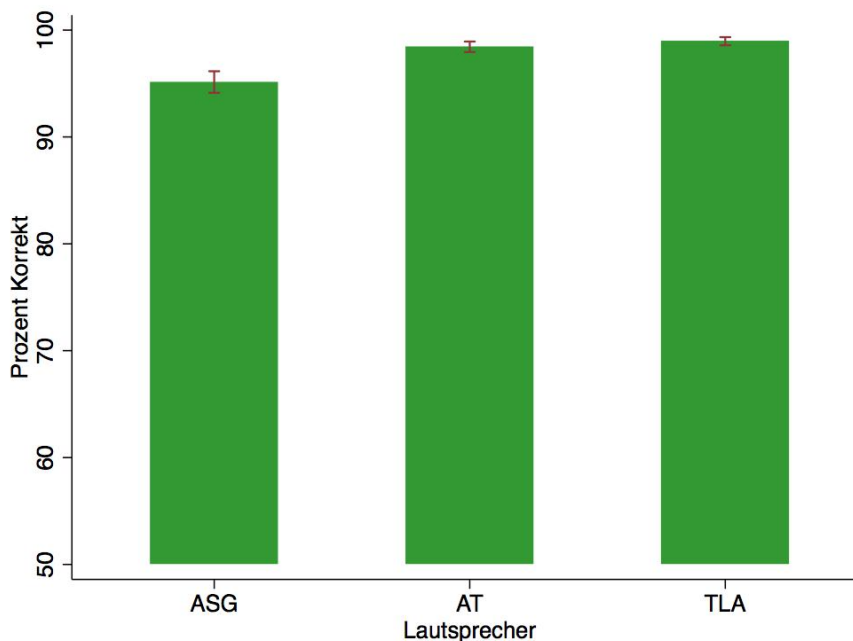


Abbildung 22 Einfluss der Lautsprechersysteme auf die korrekte Wahl

Gemäss den statistischen Paarvergleichen zwischen den Lautsprechersystemen unterscheiden sich AT (Alarm-Trichterlautsprecher) und TLA (Trichterlautsprecher mit Line-Array) nicht signifikant ($p = 0.44$). Beide zeigen aber eine signifikant bessere Wirksamkeit als das spezifisch auf Informationsdurchsagen ausgerichtete ASG (Asymmetrisches Grenzflächenhorn) ($p < 0.001$).

Der Effekt der Position auf die korrekte Wahl des Notausgangs ist in Abbildung 23 illustriert. Die Resultate verdeutlichen, dass nahe bei den Notausgängen (Positionen 60m und 240m) die korrekte Richtung fast immer gewählt wird, dies aber mit zunehmender Entfernung (Positionen 120m und 180m) immer weniger häufig eintritt. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert, sind für eine korrekte Lokalisierung einer Schallquelle Laufzeitdifferenzen und Intensitätsdifferenzen der verschiedenen Schallwellen massgebende Informationen für das menschliche Gehör. Weil sich diese Differenzen der gegen die Mitte zwischen zwei Schallquellen kontinuierlich verkleinern sind die von links und von rechts kommenden Schallwellen für das menschliche Gehör etwas schwieriger zu unterscheiden. Das in Abbildung 23 dargestellte Resultat war somit zu erwarten.

⁷ $F_{(v1,v2)}$ = F-Wert für $v1$ Zählerfreiheitsgrade und $v2$ Nennerfreiheitsgrade; p = Signifikanzwert ($1 - \alpha$). Mit einem F-Test wird überprüft, ob sich die Varianzen zweier Stichproben signifikant unterscheiden oder nicht. Übersteigt der berechnete F-Wert den zum gewählten Signifikanzniveau gehörenden kritischen Signifikanzwert p , kann die Nullhypothese verworfen werden ([31]).

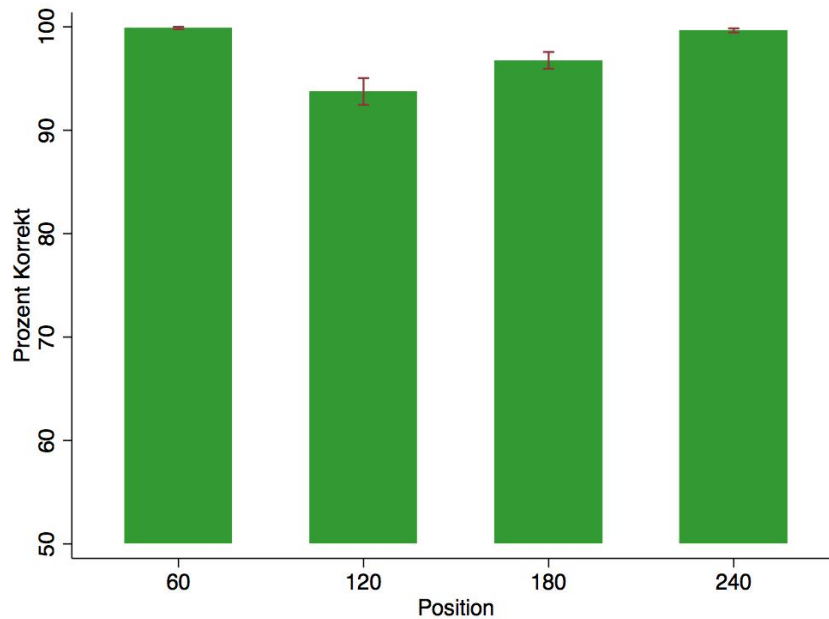


Abbildung 23 Einfluss der Position auf die korrekte Wahl

Die statistisch signifikante Interaktion zwischen den Faktoren "Lautsprecher" und "Position" bedeutet, dass die Abhängigkeit der Wahl des näheren Notausgangs von der Position nicht für alle Lautsprechersysteme gleich stark ist. Das heisst: mit zunehmender Entfernung eignen sich nicht alle Lautsprechersysteme gleich gut für die Signalisation des korrekten Notausgangs.

Abbildung 24 illustriert diese unterschiedlichen Muster. Während das zu Versuchszwecken entwickelte System TLA an allen Position eine sehr hohe Wirksamkeit zur Lokalisierung des näheren Notausgangs aufweist, treten beim System ASG bei zunehmenden Entfernungen vermehrt Fehlentscheidungen der Versuchspersonen auf.

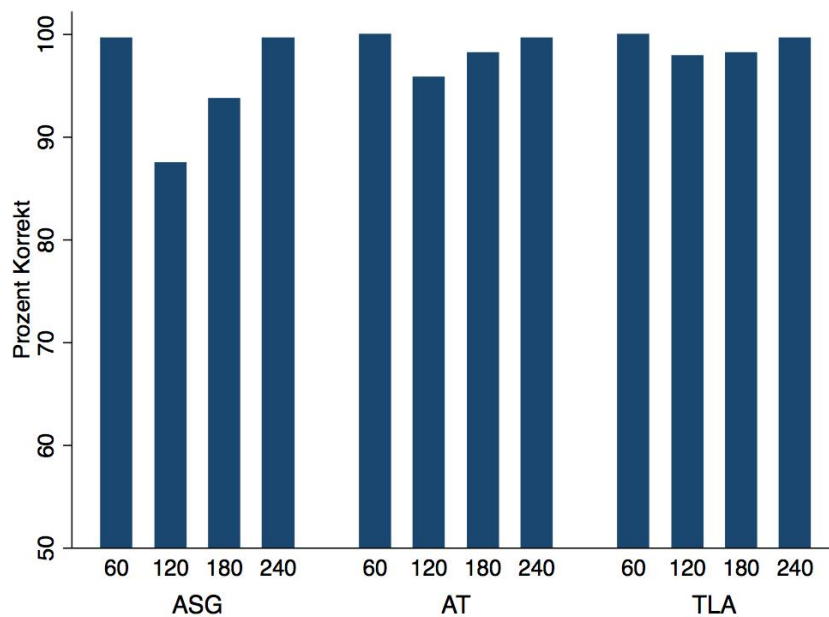


Abbildung 24 Einfluss von Lautsprecher und Position auf die korrekte Wahl

Zusammenfassend ergibt sich, dass alle drei untersuchten Lautsprechersysteme eine hohe Wirksamkeit in der Führung zum näheren Notausgang aufweisen. Gleichzeitig kann aber festgestellt werden, dass die Wirksamkeit des Lautsprechersystems ASG signifikant geringer ist als diejenige von AT und TLA.

Reaktionszeit

Die Zeit zwischen dem Beginn der Führungssignale und dem Entscheid der Teilnehmer über die Richtung (Reaktionszeit) ist ein wichtiger Indikator für die Sicherheit, mit der eine Person ihren Entscheid fällt. Kurze Reaktionszeiten deuten grundsätzlich auf sichere Entscheide hin und damit auf eine gute Lokalisierung des näheren Notausgangs; lange Reaktionszeiten lassen Unschlüssigkeit der Versuchspersonen und eine nicht eindeutige Signalisation durch die Lautsprechersysteme vermuten.

Die statistische Analyse der Reaktionszeiten erfolgte mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit wiederholten Messungen mit den Faktoren "Lautsprecher" und "Position". Die Analyse ergab statistisch signifikante Effekte sowohl für den Faktor "Lautsprecher" ($F_{(2,70)}=14.8, p<0.001$) und für den Faktor "Position" ($F_{(3,105)}=40.2, p<0.001$) als auch für die Interaktion zwischen "Lautsprecher" und "Position" ($F_{(6,210)}=6.20, p<0.001$).

Der Einfluss der Lautsprechersysteme auf die Reaktionszeit ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Resultate zeigen, dass die durchschnittliche Reaktionszeit für das Lautsprechersystem AT am kürzesten ist, gefolgt vom System TLA. Die längste durchschnittliche Reaktionszeit ergab sich für das auf verständliche Informationsdurchsagen spezialisierte System ASG.

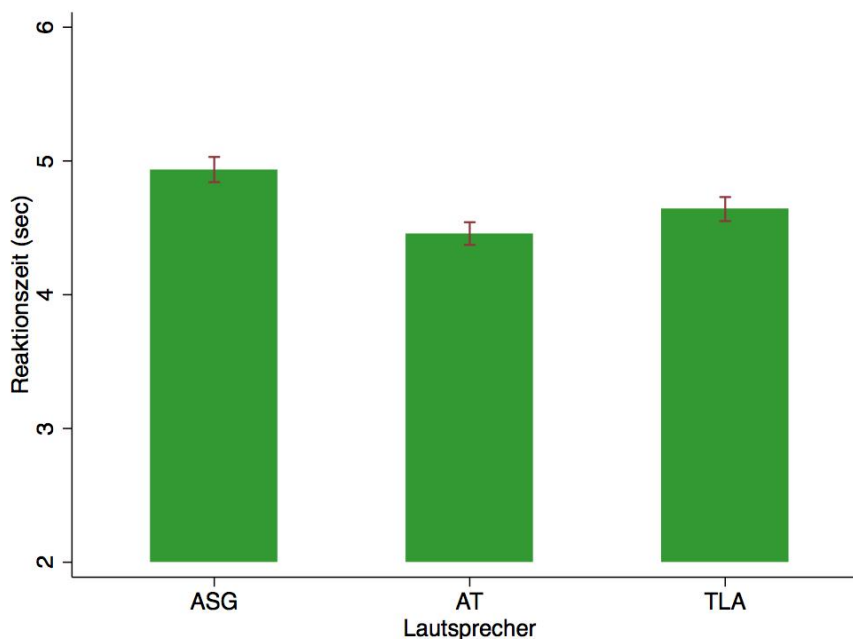


Abbildung 25 Einfluss von Lautsprecher auf die Reaktionszeit

Die statistische Analyse der Unterschiede zwischen den Lautsprechern mittels Paarvergleichen zeigt, dass die Reaktionszeiten von AT und TLA sich nicht signifikant unterscheiden ($p=0.212$), während ASG zu signifikant längeren Reaktionszeiten als AT ($p<0.001$) und als TLA ($p<0.05$) führt.

Der Einfluss der Position auf die Reaktionszeit ist in Abbildung 26 illustriert. Die durchschnittliche Reaktionszeit an den Positionen 60m und 240m ist bei allen Lautsprechersystemen signifikant kürzer als an den beiden Positionen 120m und 180m. An diesen beiden Positionen sind die Zeit- und Intensitätsdifferenzen zwischen den von

links- und rechtskommenden Schallwellen geringer als bei 60m und 240m, was zu einer grösseren Unsicherheit bezüglich der einzuschlagenden Richtung und auch zu weniger korrekten Entscheidungen führt.

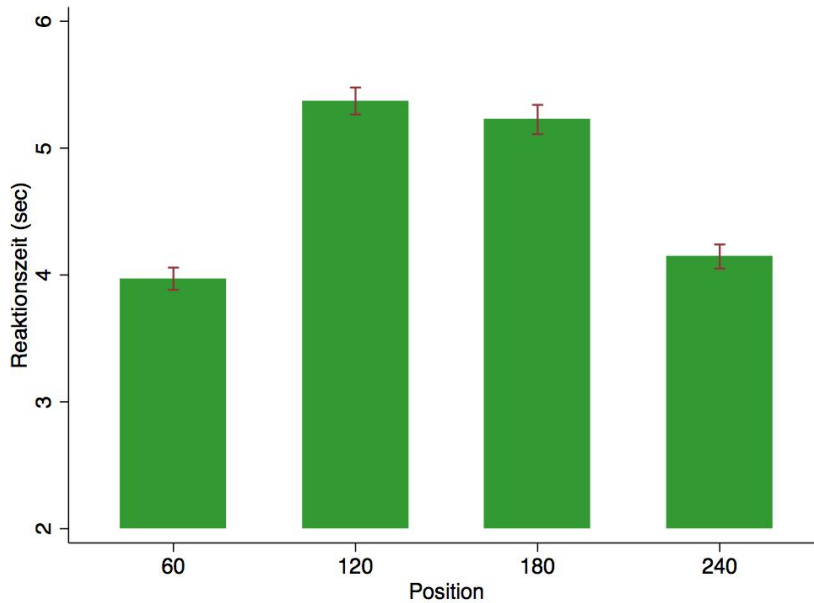


Abbildung 26 Einfluss der Position auf die Reaktionszeit

Wie auch schon bei der korrekten Wahl des näheren Notausgangs ergibt sich auch bei den Reaktionszeiten eine signifikante Interaktion zwischen den Lautsprechersystemen und der Position der Teilnehmer zwischen den Notausgängen (vgl. Abbildung 27). Die auffällig geringere Wirksamkeit des Lautsprechers ASG in der Signalisation des näheren Notausgangs bei der Position 120m wird hier bestätigt durch die längste durchschnittliche Reaktionszeit der Versuchspersonen. Für die Teilnehmer war es offenbar an den Positionen 120m und 180m schwieriger, sich für eine Richtung zu entscheiden, wenn die Führungssignale von ASG ausgestrahlt wurden, als wenn sie von AT oder TLA ausgestrahlt wurden.

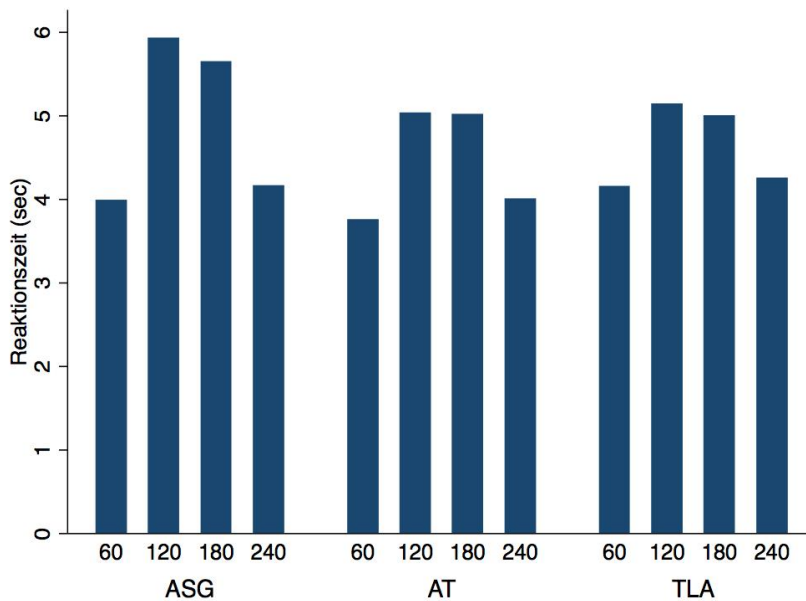


Abbildung 27 Einfluss von Lautsprecher und Position auf die Reaktionszeit

Wie bereits erwähnt, zeigen alle drei Lautsprechersysteme grundsätzlich eine hohe Wirksamkeit zur Signalisation des näheren Notausgangs, obschon das System ASG zu statistisch signifikant schlechteren Resultaten führt als die Systeme AT und TLA. Diese Unterschiede manifestieren sich auch in der Sicherheit und Bestimmtheit, mit der die Teilnehmer ihren Entscheid fällen. Die Gründe für die geringere Wirksamkeit des Systems ASG sind aufgrund dieser Analysen nicht eindeutig ersichtlich.

Die Wahl des korrekten Notausganges und die Reaktionszeiten zeigen einen engen Zusammenhang: Die Wahrscheinlichkeit korrekter Entscheidungen ist bei kurzen Reaktionszeiten höher als bei langen Reaktionszeiten. Eine statistische Analyse zeigt, dass die durchschnittliche Reaktionszeit der richtigen Entscheidungen mit 4.64 Sekunden bedeutend kürzer ist als die der falschen Entscheidungen mit 6.21 Sekunden. Dieser Unterschied ist statistisch hoch signifikant ($p < 0.001$). Der Zusammenhang ist auch aus Abbildung 23 und Abbildung 26 ersichtlich. Nahe bei den Notausgängen wird fast immer die korrekte Richtung gewählt und die Reaktionszeiten sind kürzer als an den Positionen, die weiter entfernt von den Notausgängen liegen und an denen auch mehr Fehler bei der Richtungswahl gemacht werden.

Distanzschätzung

Die Versuchsteilnehmer schätzten die Distanz zum gewählten Notausgang auf einer Skala von 1 (sehr nahe) bis 5 (sehr weit) ein (vgl. Tabelle 10). Die statistische Analyse der Daten bestand aus einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit den Faktoren "Lautsprecher" und "Position". Neben statistisch signifikanten Effekten für die Faktoren "Lautsprecher" und "Position" ergab sich auch eine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren (alle $p < 0.001$) (vgl. Abbildung 28).

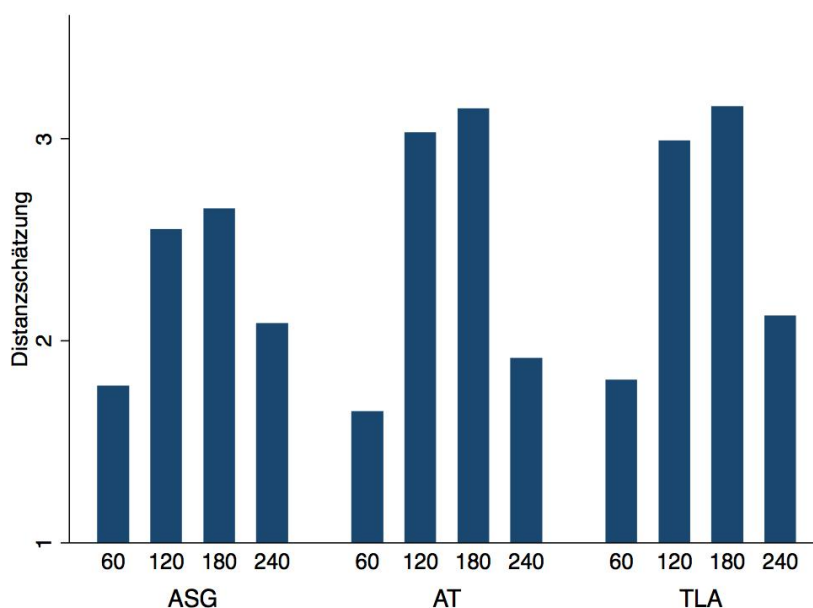


Abbildung 28 Einfluss von Lautsprecher und Position auf die geschätzte Distanz zum nächsten Notausgang

Die durchschnittlichen Schätzungen bewegen sich zwischen "nahe" und "mittelmässig". Das Lautsprechersystem ASG führte zu signifikant geringeren Schätzwerten an den Positionen 120m und 180m als die beiden anderen Systeme. Die tatsächliche Distanz zum näheren Notausgang ist an den Positionen 120m und 180m doppelt so gross wie an den Positionen 60m und 240m. Vergleicht man dieses Verhältnis mit dem Verhältnis in den Schätzungen, so führen die Lautsprechersysteme AT und TLA zu realistischeren Schätzungen der Distanzen.

4.1.2 Informationsdurchsagen

Für die Informationsdurchsagen wurde eine unidirektionale Beschallung ohne Laufzeitverzögerung simuliert, d.h. die Informationsdurchsagen wurden von allen Lautsprecherquellen über den Notausgängen gleichzeitig entweder nach links oder nach rechts ausgestrahlt (vgl. Abbildung 29).

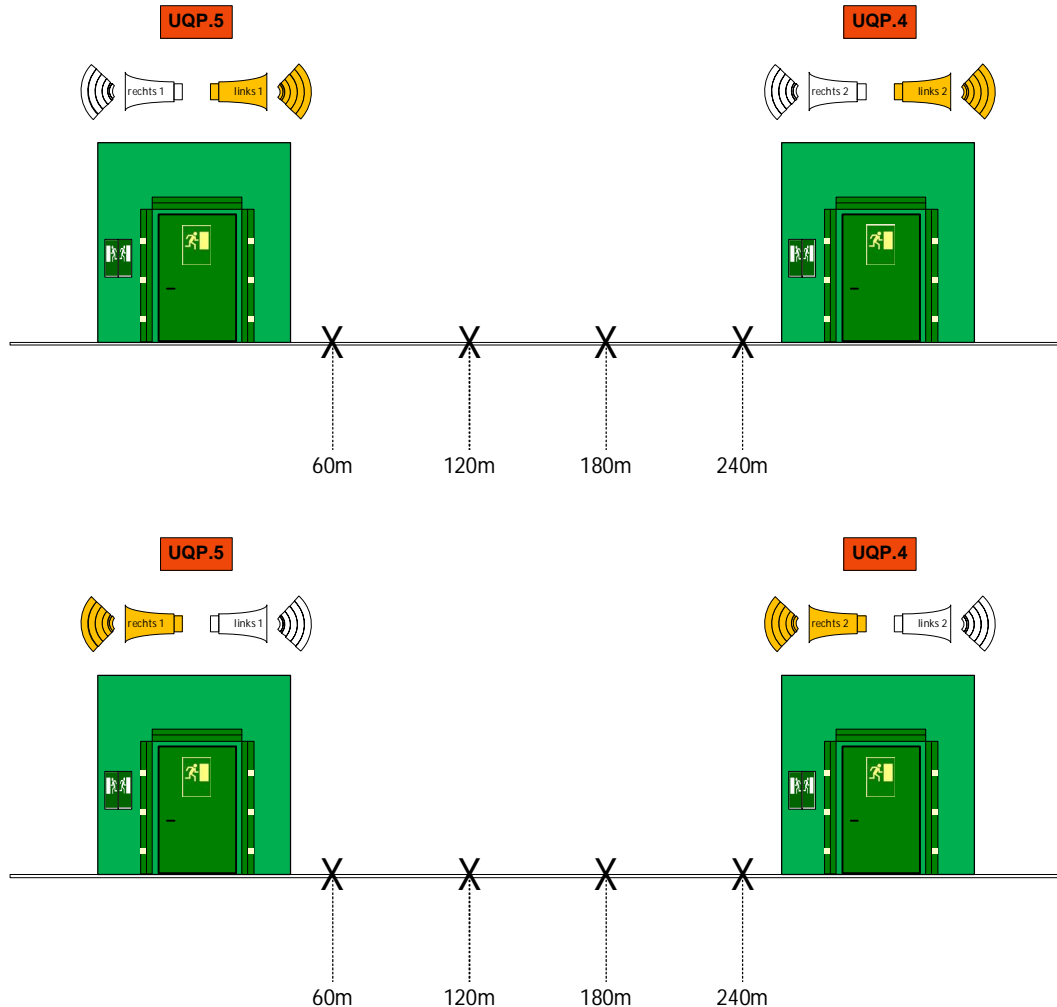


Abbildung 29 Experimentelle Situation während den Informationsdurchsagen (Oben: Beschallung von links. Unten: Beschallung von rechts)

Die Versuchsteilnehmer mussten die Verständlichkeit der Informationsdurchsagen auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) beurteilen (vgl. Tabelle 12). Die Einschätzungen waren für die drei Lautsprechersysteme an den vier Positionen im Tunnel und für die zwei Beschallungsrichtungen erhoben worden (vgl. Abbildung 29). Statistische Analysen der Verständlichkeitsdaten erfolgten mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit wiederholten Messungen, wobei der Einfluss der Faktoren "Lautsprecher", "Position" und "Beschallungsrichtung" auf die Verständlichkeit untersucht wurde.

Die statistische Analyse des Faktors "Lautsprecher" ergab einen hoch signifikanten Unterschied⁷ zwischen den Lautsprechersystemen ($F_{(2,70)}=27.1, p<0.001$). Wie Abbildung 30 mit den über alle Faktoren gemittelten Daten für die drei Lautsprechersysteme zeigt, ergibt sich die beste Verständlichkeit für das System ASG gefolgt von System AT. Die schlechteste Verständlichkeit erzielte das zu Versuchszwecken spezifisch auf die akustische Signalisation konzipierte System TLA. Statistische Paarvergleiche zwischen den Lautsprechersystemen zeigen, dass sich ASG und AT nicht signifikant unterscheiden ($p=0.056$); beiden weisen aber einen signifikanten Unterschied zu TLA auf ($p<0.001$).

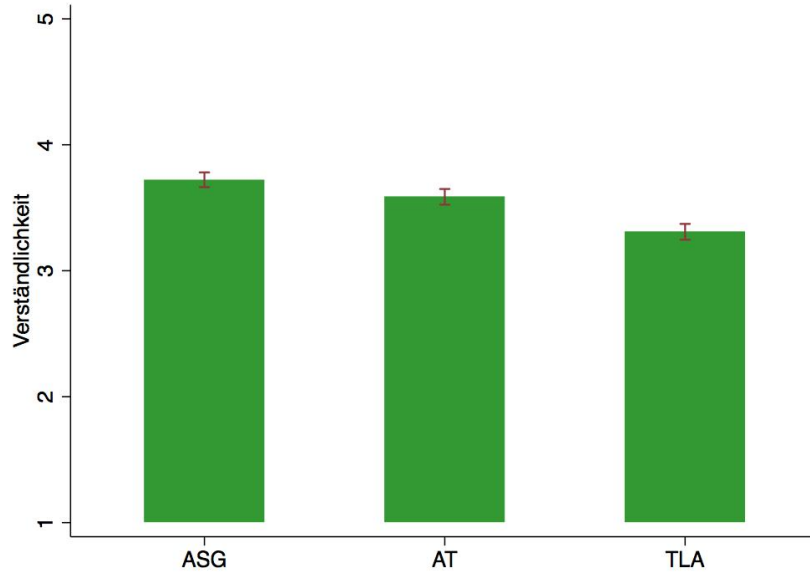


Abbildung 30 Durchschnittliche Verständlichkeit der Lautsprechersysteme

Die statistische Analyse ergab weiter eine hochsignifikante Interaktion ($p < 0.001$) zwischen der Position der Versuchsperson im Tunnel und der Richtung der Beschallung sowie deren Einfluss auf die Verständlichkeit. Die über die Lautsprechersysteme gemittelten Werte zeigen, dass die Verständlichkeit mit zunehmender Distanz vom Lautsprecher abnimmt. Diese Tatsache gilt für beide Beschallungsrichtungen (vgl. Abbildung 31).

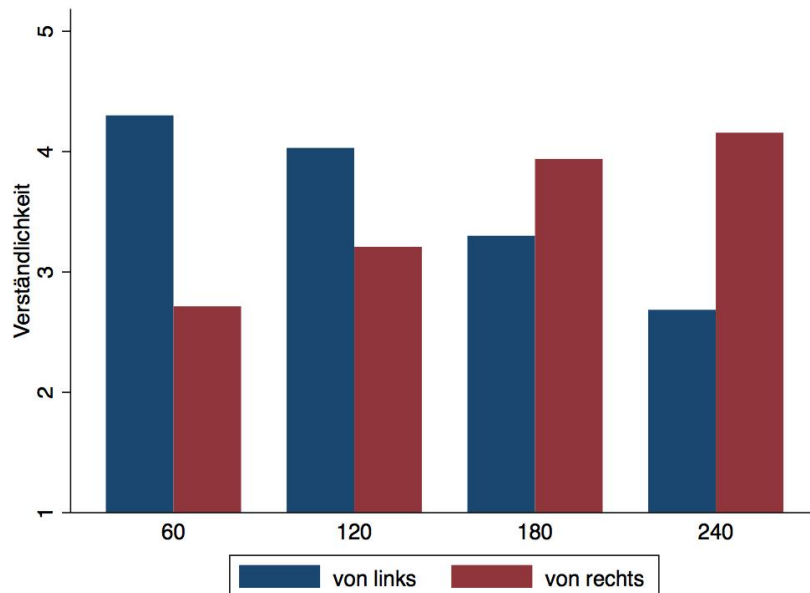


Abbildung 31 Interaktion von Position und Beschallungsrichtung und deren Einfluss auf die Verständlichkeit

Eigentlich würde man bei einer gleichzeitigen Aktivierung aller Lautsprecher eine andere Verteilung der Verständlichkeitseinschätzung erwarten. Personen, die sich an der Position 240m befinden und von links mit Informationsdurchsagen beschallt werden, hören nämlich ebenfalls die Lautsprecherquelle über dem rechten Notausgang, der sich in nur 60m Entfernung befindet. Personen an diesen Positionen müssten demnach die

Verständlichkeit wieder zunehmend besser einschätzen als in der Mitte zwischen den beiden Notausgängen - die Folge wäre eine U-förmige Funktion der Verständlichkeitseinschätzung. Der Lautsprecher vom rechten Notausgang strahlt von der Versuchsperson weg, sein Rückschall erreicht aber die Versuchsperson dennoch und zwar zeitlich früher und mit grösserer Energie als der Lautsprecher vom linken Notausgang (vgl. Abbildung 32).

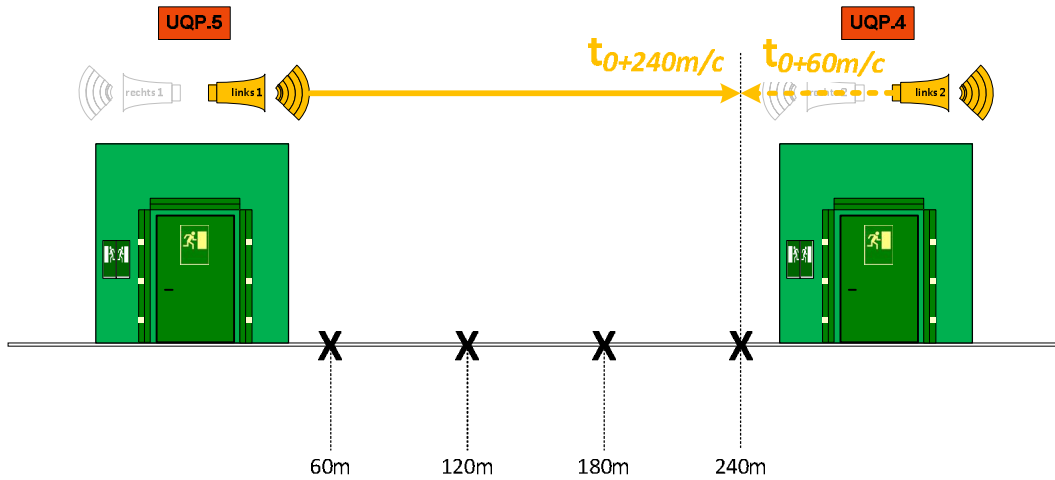


Abbildung 32 Vermischung der Signale bei gleichzeitiger Beschallung

Diese zeitlich verzögerte Vermischung der Signale bei gleichzeitiger Beschallung führt bei den Versuchspersonen zu einem diffusen Klangeindruck und deshalb zur fast halbierten Verständlichkeit an den äussersten Positionen (240m mit Beschallung von links; Position 60m mit Beschallung von rechts). Dieses Problem kann durch eine sequenzielle Beschallung mit synchronisierten Lautsprechern verhindert werden, sodass die Verständlichkeit im Tunnelraum gleichverteilt ist (vgl. Kapitel 3.2.2). Dieser interaktive Einfluss von Beschallungsrichtung und Position der Person auf die Verständlichkeit findet sich bei allen drei Lautsprechersystemen, wie Abbildung 33 zeigt.

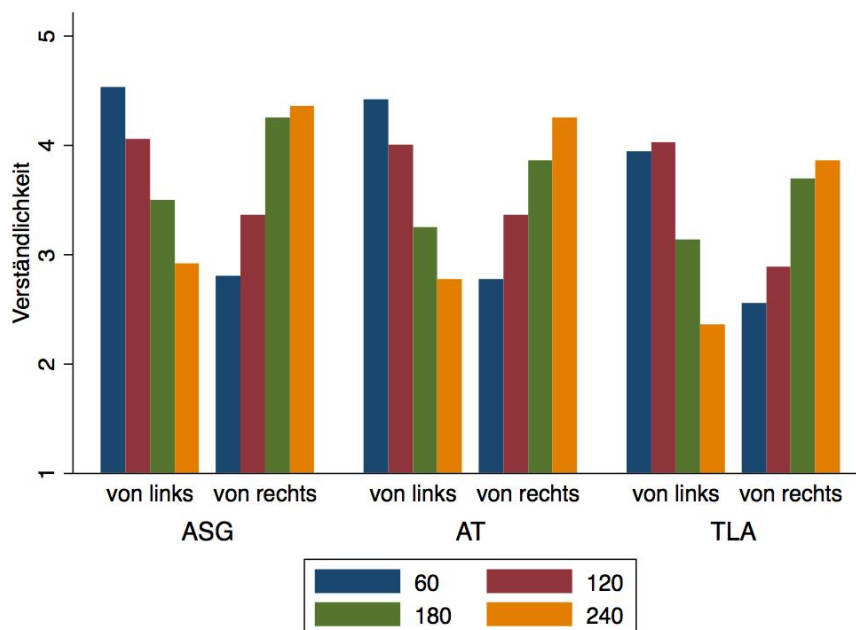


Abbildung 33 Verständlichkeit der Informationsdurchsagen in Abhängigkeit von Lautsprecher, Beschallungsrichtung und Position im Strassentunnel

Zusammenfassend ergibt die Analyse der Verständlichkeit ein eindeutiges Bild: Die Lautsprechersysteme ASG und AT führten in den Versuchen zu einer signifikant besseren Verständlichkeit als das Lautsprechersystem TLA. Dieses Resultat kann auf die für Tunnel optimierte Abstrahlcharakteristik von ASG und AT zurückgeführt werden, die spezifisch auf verständliche Informationsdurchsagen abzielt. Die Verständlichkeit nahm mit zunehmender Distanz von der Schallquelle ab und erreichte ein Minimum, wenn sich die Person 60m von einem Notausgang befand, aber vom andern Notausgang her beschallt wurde. Dieser tiefste Wert der Verständlichkeit lässt sich auch nach Aussagen von Teilnehmern auf die Vermischung der Signale der zeitgleich über allen Notausgängen agierenden Lautsprecher zurückführen. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die simulierten Verständlichkeitswerte einem *Worst-Case-Ansatz* entspringen, der eine minimale Anzahl von Lautsprechern im Tunnelraum und ausschliesslich über den Notausgangstüren vorsieht. Die Verständlichkeit der Sprachdurchsagen im Untersuchungsfall können durch eine synchronisierte Längsbeschallung markant verbessert werden (vgl. Abbildung 9).

4.1.3 Speech Transmission Index (STI)

Der STI ist ein wichtiger Indikator für die Verständlichkeit von Sprachdurchsagen und war deshalb eine zentrale Grösse in der akustischen Simulation der Informationstexte im Modelltunnel. Weil der STI ein rechnerisch hergeleitetes Mass für die Verständlichkeit eines übertragenen Signals ist, wird oftmals kritisiert, dass der Index nur bedingt mit der subjektiv empfundenen Sprachverständlichkeit übereinstimmt, die letztlich nur experimentell nachgewiesen werden kann (vgl. Kapitel 2.1.2).

Aus diesem Grund wurde mit den Experimenten ebenfalls untersucht, inwieweit es möglich ist, mit dem rechnerischen STI die subjektive Verständlichkeit von Informationsdurchsagen vorherzusagen. Dieser Zusammenhang zwischen STI und Verständlichkeit ist in Abbildung 34 illustriert. In der Tat zeigt sich, dass es zwischen diesen beiden Grössen eine positive Korrelation gibt: die Sprachdurchsagen werden von den Versuchspersonen verständlicher eingeschätzt, wenn sie mit einem höheren STI simuliert wurden. Obschon die subjektive Verständlichkeit mit zunehmendem STI steigt, kann sie aufgrund des berechneten STI nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden, weil die Vorhersage dieses Zusammenhangs mit grossen Fehlern behaftet ist (vgl. die grossen Standardfehler des Mittelwertes in Abbildung 34). Dies ist auch der Grund dafür, dass die Korrelation zwischen STI und Verständlichkeit schwach ist ($r=0.509$) ist und dass damit der STI nur gerade 26% der Varianz der Verständlichkeit erklärt.

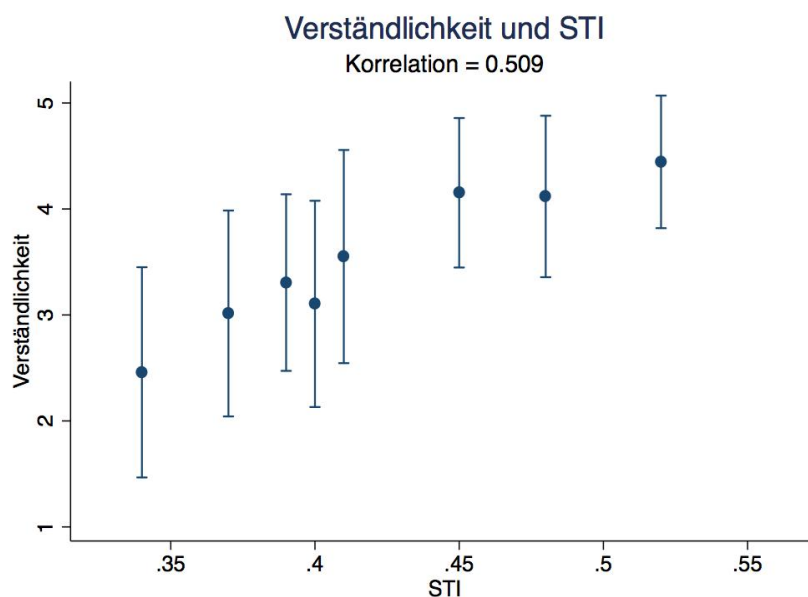


Abbildung 34 Zusammenhang zwischen STI und Verständlichkeit

Zusammenfassend zeigt sich, dass der STI wohl eine gute Grundlage für die Berechnung der Sprachtransmission bilden kann, dass aber die subjektive Verständlichkeit in Tunnelsegmenten stark von weiteren Faktoren, u.a. dem menschlichen Gehör abhängt.

4.1.4 Fragebogen

Die Teilnehmer beantworteten nach den einzelnen Experimenten jeweils einen kurzen Fragenbogen mit offenen Fragen zum Experiment und zum allgemeinen Verhalten bei Notfällen in Strassentunneln. Die Resultate der Befragung sind in den folgenden Diagrammen wiedergegeben:

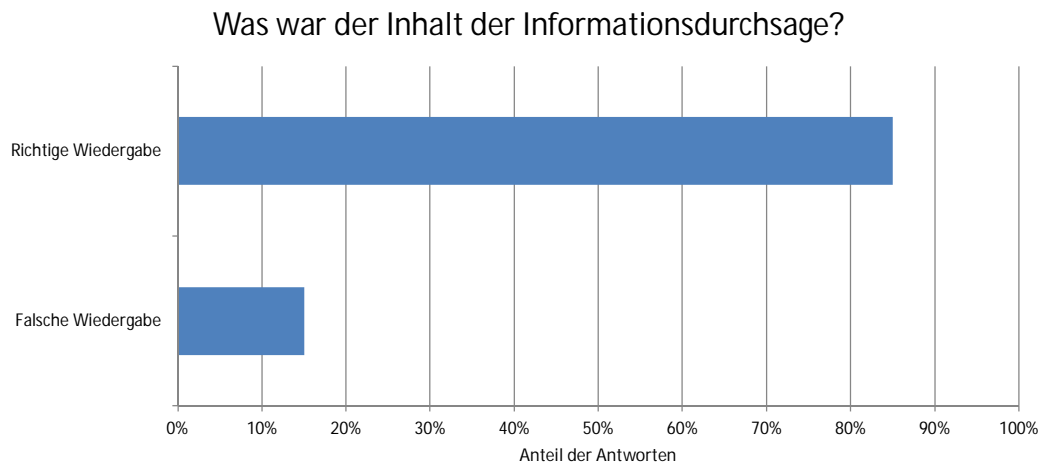


Abbildung 35 Beantwortung der Frage 1

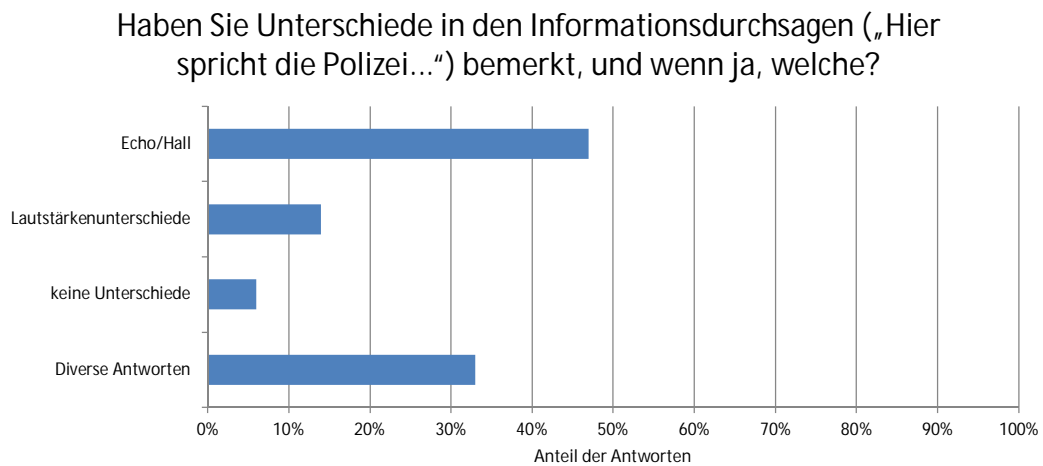


Abbildung 36 Beantwortung der Frage 2

Welche Informationen der Führungsansagen („Ausgang hier...“) haben sie benutzt, um zu entscheiden wo der nähere Notausgang zu finden ist?

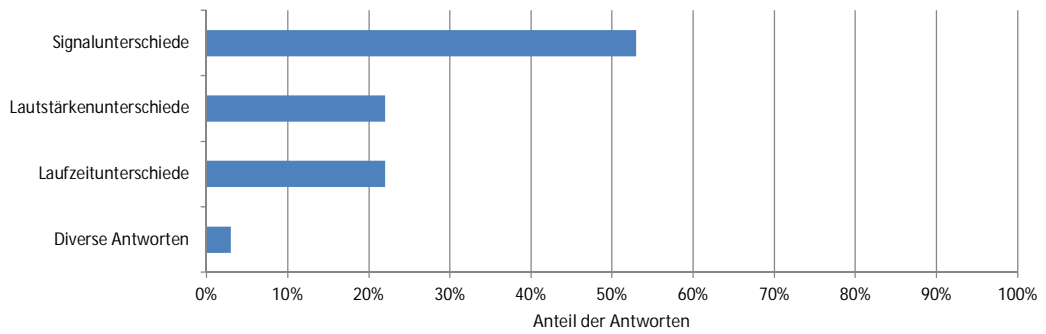


Abbildung 37 Beantwortung der Frage 3

Wie ist der Weg zu den Notausgängen in Strassentunneln signalisiert?

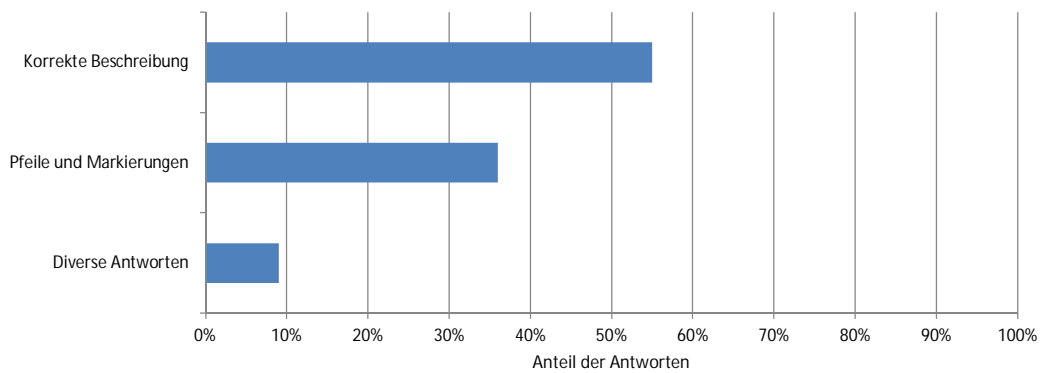


Abbildung 38 Beantwortung der Frage 4

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

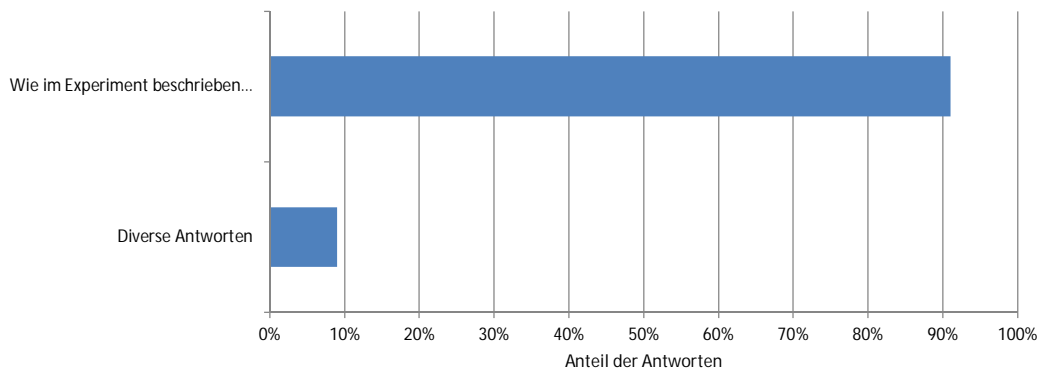


Abbildung 39 Beantwortung der Frage 5

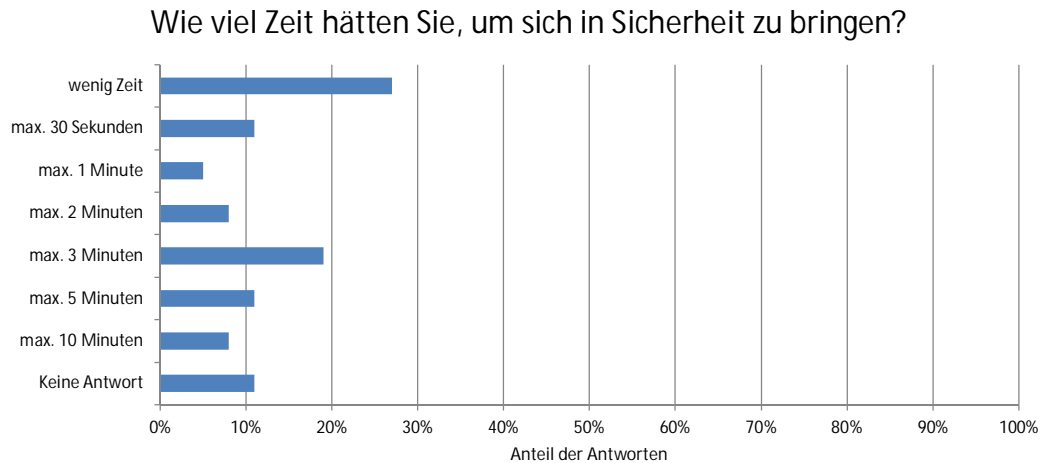


Abbildung 40 Beantwortung der Frage 6

Zusammenfassend zeigen die Resultate der Fragebogenanalyse, dass die Teilnehmer die Informationsdurchsagen verstanden, aber grosse Unterschiede in der Verständlichkeit feststellten. Im Weiteren zeigte sich, dass die Teilnehmer Unterschiede in den Führungssignalen feststellten. Schliesslich zeigte sich, dass die Teilnehmer wohl das Verhalten bei einem Brandfall im Strassentunnel verstanden, aber unrealistische Ansichten über die Zeit zur Rettung hatten.

4.2 Kosten-Wirksamkeit akustischer Installationen

Anhand der in Kapitel 3.1 definierten Zielvorgaben für akustische Installationen in Strassentunneln wurden die drei ausgewählten Lautsprechersysteme hinsichtlich ihrer Zielerfüllungsgrade analysiert. Während die Erfüllungsgrade der technischen und betrieblichen Ziele im Rahmen von Expertenbefragungen evaluiert wurden, diente das wissenschaftliche Experiment zur Bestimmung, ob die Lautsprechersysteme die Selbstrettung wirksam unterstützen. Mit der Gegenüberstellung der Wirksamkeit der Lautsprechersysteme und ihren entsprechenden Lebenszykluskosten wurden die Systeme schliesslich im Vergleich zueinander bewertet. Die Resultate dieser Wirksamkeitsuntersuchungen sowie die Lebenszyklusbetrachtungen und die Gesamtbewertungen sind in den folgenden Kapiteln 4.2.1 resp. 4.2.2 und 4.2.3 aufgeführt.

4.2.1 Wirksamkeitsanalyse

Die einzelnen Wirksamkeitsziele der folgenden Analysen orientieren sich an den speziellen Bedingungen und den Anforderungen, wie sie in Strassentunnel anzutreffen sind. Die Zielerfüllungsgrade der Lautsprechersysteme wurden in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) bewertet (vgl. Tabelle 4). Sämtliche Wirksamkeitsziele wurden gleich gewichtet.

Teilwirksamkeit Technik

Die verschiedenen Lautsprechersysteme wurden bezüglich ihrer technischen Fähigkeiten und Beschaffenheiten gemeinsam mit Experten der Akustikbranche analysiert (vgl. Abbildung 41). Die detaillierten Bewertungsergebnisse sind in Tabelle in Anhang II.1 aufgeführt.

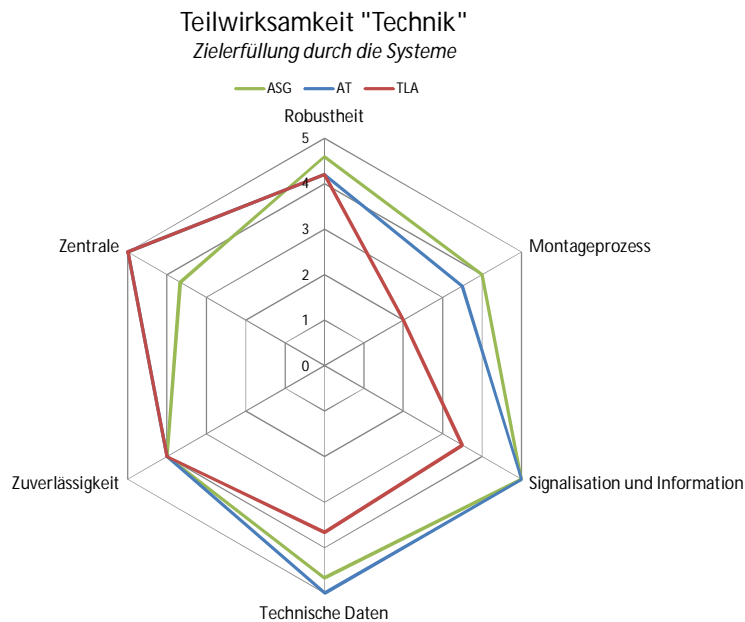


Abbildung 41 Analyse der technischen Wirksamkeit

Wie erwartet, fällt das zu Versuchszwecken konzipierte Lautsprechersystem TLA im Vergleich mit den anderen Systemen in technischer Hinsicht ab. Gründe dafür sind in erster Linie der aufwändige und umständliche Montageprozess des Line-Arrays, die einseitige Spezialisierung des Systems auf die akustische Führung und ein begrenzter Frequenzbereich der Lautsprecher. Während bei den anderen beiden Systemen max. zwei Lautsprecherhörner über den Notausgängen montiert werden müssen (nach links und nach rechts ausgerichtet) sind es beim TLA zehn einzelne Lautsprecher, deren Befestigungswinkel genau aufeinander abgestimmt sein müssen, ansonsten die beabsichtigten Abstrahlcharakteristiken nicht erreicht werden können. Diese Tatsache führt zu einem langwierigen Montageprozess und zudem zu einer erhöhten Störungsanfälligkeit des Systems, weil die einzelnen Lautsprecherhörner durch äussere Einflüsse leicht verstellt werden können und damit die Funktion des Systems beeinträchtigt wird. Diese Bedingungen können in einer Versuchssituation akzeptiert werden - für den Einsatz in einem realen Strassentunnel stellen sie jedoch einen nicht vernachlässigbaren Nachteil dar.

Das für verständliche Informationsdurchsagen konzipierte System ASG stellt aufgrund seiner asymmetrischen Hornöffnungsform spezifische Zusatzanforderungen an die Beschaffenheit der Befestigungsunterlage. Damit dieses System seine beabsichtigte Wirkung der stark gerichteten Schallabstrahlung entfalten kann, muss es bündig auf die vorgesehene Grenzfläche, in diesem Fall die Tunnelwand, angebracht werden können. Weil Strassentunnel unterschiedliche Querschnittsprofile aufweisen und selten einfach nur gerade, rechteckige Räume bilden, stellen diese Anforderungen technische Einschränkungen dar, die aber mit zusätzlichen Massnahmen fallspezifisch gelöst werden können. Weil es sich bei akustischen Installationen um Notfallwarnsysteme handelt, muss gewährleistet sein, dass sie im Ereignisfall auch einsatzfähig sind. Um diesen uneingeschränkten Betrieb der Anlage garantieren zu können, werden üblicherweise redundante und völlig unabhängige Verstärker - sogenannte Havarie-Verstärker - in die Systeme integriert, auf die im Notfall automatisch zurückgegriffen werden kann. Die Zentrale des Systems ASG bietet im Vergleich zu den anderen beiden Systemen zurzeit keine Möglichkeit für eine Umschaltung auf einen solchen Havarie-Verstärker. Aus diesem Grund sowie aufgrund der Tatsache, dass Verstärker proprietäre Systeme sind, die nicht ohne weiteres substituiert werden können, wurde dieses System in der Bewertung als vergleichsweise weniger ausfallsicher beurteilt.

Weil es sich gut für beide Beschallungszwecke einsetzen lässt und gesamthaft gesehen die technischen Wirksamkeitsziele gut bis sehr gut erfüllt, wurde das System AT von den Experten am besten bewertet.

Teilwirksamkeit Betrieb

Die verschiedenen Lautsprechersysteme wurden bezüglich ihrer betrieblichen Eigenschaften ebenfalls gemeinsam mit Experten der Akustikbranche sowie des Tunnelbetriebs analysiert (vgl. Abbildung 42). Die detaillierten Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 2 in Anhang II.2 aufgeführt.

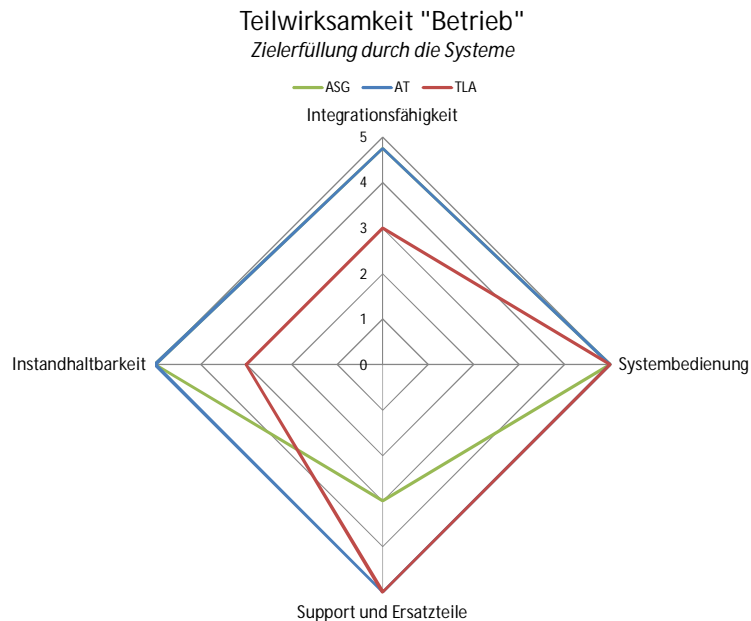


Abbildung 42 Analyse der betrieblichen Wirksamkeit

Es ist klar, dass sich die Versuchsanlage TLA auch hinsichtlich ihrer betrieblichen Eigenschaften von den beiden anderen Lautsprechersystemen deutlich unterscheidet und sich nicht ohne weiteres in die bestehende Systemlandschaft und Abläufe integrieren lässt. Weil dieses System, bedingt durch die zahlreichen Trichterlautsprecher im Line-Array über den Notausgängen viel Platz benötigt, weist es ein vergleichsweise grosses bauliches und physikalisches Störpotential auf (Bsp. negative Interaktion mit bestehenden Signalisationen) und beeinträchtigt zudem die Tunnelreinigung in ihren gewohnten Abläufen. Die Reinigungsmaschinen können nicht einfach über die justierten Lautsprecher-Arrays hinwegfahren, ohne dass diese verstellt würden; eine Nachjustierung der akustischen Installationen wäre nach jeder Reinigung erforderlich. Weil diese Einstellungen von Fachspezialisten ausgeführt werden müssen, wird die Instandhaltbarkeit dieses Systems relativ gering bewertet.

Die Verfügbarkeit von externem Support und Ersatzteilen kann in der Schweiz innert nützlicher Fristen zurzeit nicht ausreichend garantiert werden, was aus betrieblicher Sicht im Vergleich zu den beiden anderen Systemen nachteilig beurteilt werden muss.

Abgesehen davon erfüllen die beiden Systeme ASG und AT die betrieblichen Anforderungen grundsätzlich sehr gut. Dies erstaunt aber nicht weiter, da diese Systeme speziell für Tunnelanwendungen oder vergleichbare Situationen konzipiert und damit auch auf die besonderen betrieblichen Bedingungen und Anforderungen ausgerichtet wurden.

Teilwirksamkeit Selbstrettung

Für die Bewertung der Lautsprecherstypen hinsichtlich ihrer Fähigkeit die Selbstrettung zu unterstützen, wurden ihre Wirksamkeiten in der Übertragung sowohl von eindeutigen akustischen Führungssignalen als auch von verständlichen Informationsdurchsagen untersucht und ihr Effekt auf das menschliche Fluchtverhalten analysiert. Dazu wurden die drei Aspekte "Korrektheit der Wahl des Notausgangs", "Verständlichkeit" und "Reaktionszeit" untersucht (vgl. Tabelle 14). Der vierte Aspekt "durchschnittliche Distanzschätzungen" wurde nicht in die Bewertung aufgenommen, da kein Zusammenhang zwischen Lautsprecherqualität und Distanzschätzung postuliert werden kann. Die detaillierten Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 3 in Anhang II.3 aufgeführt.

Tabelle 14 Selbstrettungsunterstützende Zielerfüllung der Lautsprechersysteme

	ASG	AT	TLA
Korrektheit	95.1%	98.4%	99.0%
Verständlichkeit ⁸	3.72	3.59	3.31
Reaktionszeit	4.94s	4.46s	4.64s

Die drei Aspekte "Korrektheit", "Verständlichkeit" und "Reaktionszeit" wurden ebenfalls gemäss Tabelle 4 in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) bewertet, wobei darauf geachtet wurde, dass keiner der Aspekte einen anderen durch Mittelwert und Streuung dominiert. Es wurden die folgenden Schritte zur Operationalisierung unternommen:

- **Korrektheit:** Mit allen Lautsprechern und an allen Positionen trafen die Versuchsteilnehmer in den meisten Fällen die richtige Entscheidung. An den Positionen 60m und 240m waren die Entscheidungen praktisch perfekt; an den Positionen 120m und 180m war der Prozentsatz korrekter Antworten etwas tiefer. Für Entscheidungen auf dem Rateniveau 50% (quasi Zufallsentscheidungen) wurde der Notenwert 1 gegeben, für perfekte Entscheidungen der Notenwert 5, dazwischen wurde linear interpoliert.
- **Verständlichkeit:** Die Verständlichkeit der Informationsdurchsagen wurde von den Teilnehmern auf einer Skala von 1-5 beurteilt und konnte somit direkt in das Bewertungsschema übernommen werden.
- **Reaktionszeit:** Die durchschnittlichen Reaktionszeiten der Versuchsteilnehmer bewegten sich im Bereich von 3-6 Sekunden. Die durchschnittliche Reaktionszeit von 4.68 Sekunden wurde mit der Note 3 bewertet; mit jeder Änderung des Lautsprecher-Durchschnitts um eine Sekunde wurde der Notenwert um einen Punkt angepasst.

⁸ Die Verständlichkeit der Informationsdurchsagen wurde von den Teilnehmern auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) beurteilt.

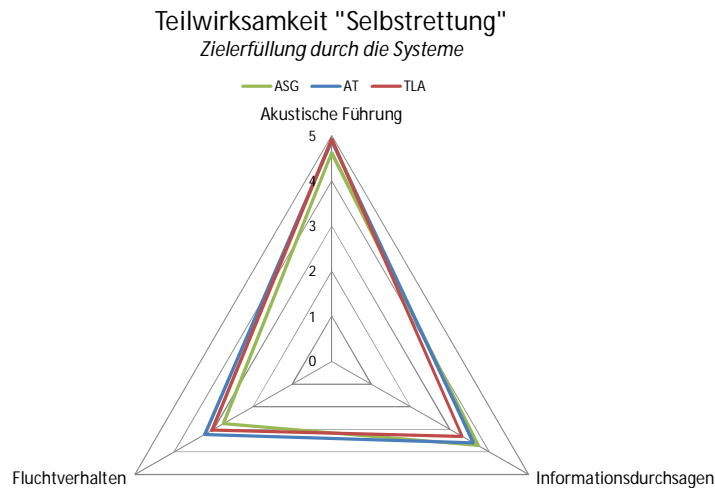


Abbildung 43 Analyse der selbstrettungsunterstützenden Wirksamkeit

Obschon sich die experimentell hergeleiteten Ergebnisse auf den ersten Blick ähneln, sind die aufgedeckten Unterschiede dennoch statistisch signifikant. Im Hinblick auf die Verständlichkeit der Informationsdurchsagen weist das System ASG mit seinem Grenzflächenhorn klar den besten Wert auf, gefolgt vom System AT und dem Versuchssystem TLA, dessen Wert statistisch signifikant von den beiden andern abfällt. Mit dem Experiment konnte nachgewiesen werden, dass sich stark gerichtete Lautsprecherhörner in der Tat signifikant besser zur Übertragung von verständlichen Informationsdurchsagen in Strassentunnel eignen als Hörner, die eine gleichmässige Streuung der Schallwellen erzeugen.

Im Hinblick auf die Wirksamkeit der akustischen Führungssignale findet sich bei der korrekten Wahl des näheren Notausgangs der beste Wert beim System TLA; in diesem Punkt fällt die Wirksamkeit des Grenzflächenhornsystems ASG signifikant von den beiden andern ab. Die stark gerichtete Aussendung der Schallwellen entlang der Grenzfläche durch das System ASG unterstützten die Versuchspersonen signifikant weniger gut für die Lokalisation des nächsten Notausgangs. Es muss aber festgehalten werden, dass grundsätzlich alle untersuchten Systeme eine sehr gute Fluchtrichtungswahl unterstützen und damit eine sehr gute akustische Führung von Flüchtenden ermöglichen.

Bei der Reaktionszeit, die ein Indikator für die subjektive Sicherheit der Entscheidung und das Fluchtverhalten darstellt, weist das System AT mit seinen robusten Trichterlautsprechern die grösste Wirksamkeit auf. Akustische Signale, die durch dieses System in einem Strassentunnel übertragen werden, verursachen bei Personen am wenigsten Verwirrung, sodass sie in durchschnittlich weniger als 5 Sekunden eine überzeugte und vor allem korrekte Entscheidung über die Richtung des nächsten Notausgangs treffen können. Es kann wiederum festgestellt werden, dass auch in diesem Bezug das Grenzflächenhornsystem ASG im Vergleich zu den anderen beiden Systemen eine signifikant tiefere Wirksamkeit aufweist. Die stark gerichtete Schallabstrahlcharakteristik erzeugt zu wenige helfende Reflexionen, als dass sich Personen ähnlich schnell für eine Fluchtrichtung entscheiden können, wie bei den anderen beiden Systemen.

Gesamtwirksamkeit

Die Gesamtbewertung der Wirksamkeit der verschiedenen Lautsprechersysteme ergibt sich schliesslich aus dem Durchschnitt der drei gleich gewichteten Teilwirksamkeiten (vgl. Abbildung 44). Die detaillierten Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 4 in Anhang II.4 aufgeführt.

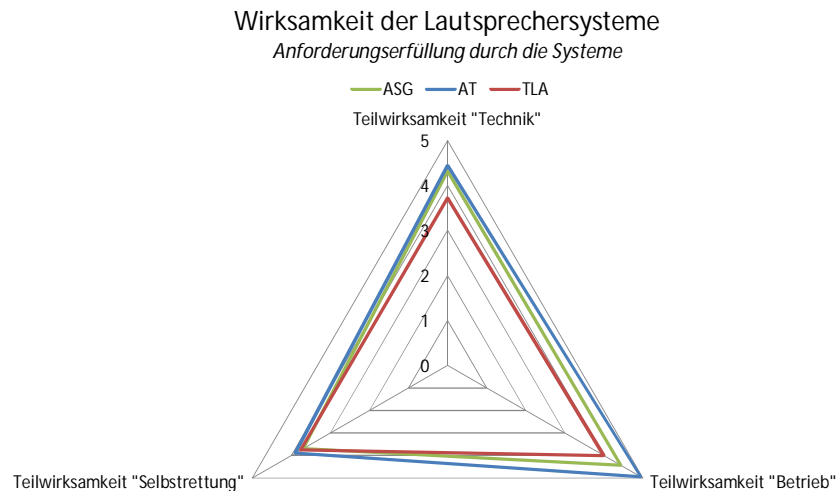


Abbildung 44 Analyse der Gesamtwirksamkeit

Die Analyse der Gesamtwirksamkeit illustriert, dass sich die Lautsprechersysteme am deutlichsten in ihrer betrieblichen und technischen Wirksamkeit unterscheiden. Während sich das zu Versuchszwecken konzipierte System TLA mit seiner umständlichen Lautsprecheranordnung im Line-Array kaum in die betrieblichen Abläufe eines realen Strassentunnels integrieren lässt und wenig geeignet für die speziellen Tunnelbedingungen ist, zeichnet sich das robuste Tunnelhorn AT gerade in dieser Hinsicht aus.

Die untersuchten Lautsprechersysteme eignen sich alle in unterschiedlicher Weise um die Selbstrettung zu unterstützen: Die Versuchsanlage TLA eignet sich beinahe perfekt zur Signalisation des nächsten Notausgangs, das System ASG mit seinen stark gerichteten Grenzflächenhörnern ermöglicht signifikant besser verständliche Informationsdurchsagen in einem Strassentunnel als alle anderen Systeme; und das System AT vereint diese beiden Aspekte in einem optimalen Verhältnisse. Wenn ein Lautsprechersystem beide Anforderungen, gute Verständlichkeit der Informationsdurchsagen und wirksame Führung zum näheren Notausgang, erfüllen muss, so ist dieses System AT eindeutig die wirksamste Alternative (vgl. Gesamtbewertung in Tabelle 4 in Anhang II.4).

4.2.2 Kostenanalyse

Auf Basis des Modelltunnels wurden die relevanten Kosten der Lautsprechersysteme mittels Expertenschätzung anhand der erforderlichen Anlagenkomponenten, also mit einem *Bottom-Up-Ansatz* bestimmt. Bei den angesetzten Kosten handelt es sich um modelltunnelbezogene Expertenschätzungen, die mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$ zu interpretieren sind. Damit sich die Angaben verallgemeinern lassen, werden die Kostenschätzungen pro Tunnelkilometer angegeben.

Abbildung 45 illustriert, dass das System ASG aufgrund seiner speziellen Grenzflächenhörner und seiner vergleichsweise teuren Zentrale rund 60% höhere Anschaffungskosten pro Kilometer Strassentunnel hat (CHF 92'748) als das wenig praxistaugliche Versuchssystem TLA (CHF 56'906) und das System AT (CHF 58'033).

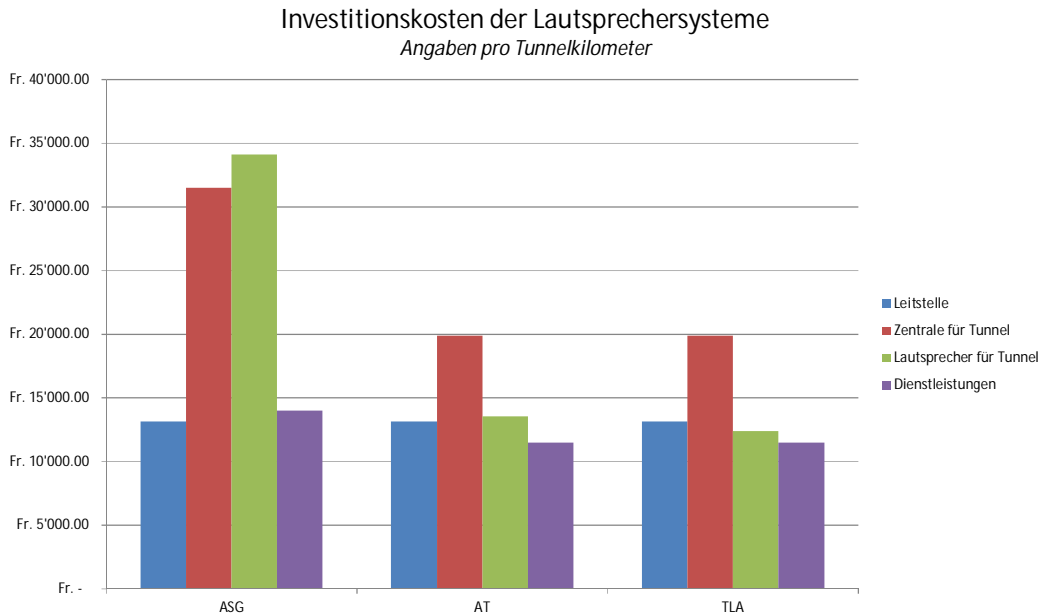


Abbildung 45 Geschätzte Investitionskosten pro Kilometer

Für einen Vergleich der Lebenszykluskosten wurden die über die Lebensdauer eines Lautsprechersystems anfallenden Kosten (Investitions-, Unterhalts- und Erneuerungskosten) zusammengefasst und mit Methoden der Investitionsrechnung auf den heutigen Gegenwartswert diskontiert. Dadurch können die Kosten der Lautsprechersysteme auf einer einheitlichen Grundlage verglichen werden. Für diese Betrachtungen wurde bei allen Systemen eine Lebensdauer von 15 Jahren und gemäss Empfehlung des VSS ein Diskontsatz von 2% angenommen ([32]; [33]).

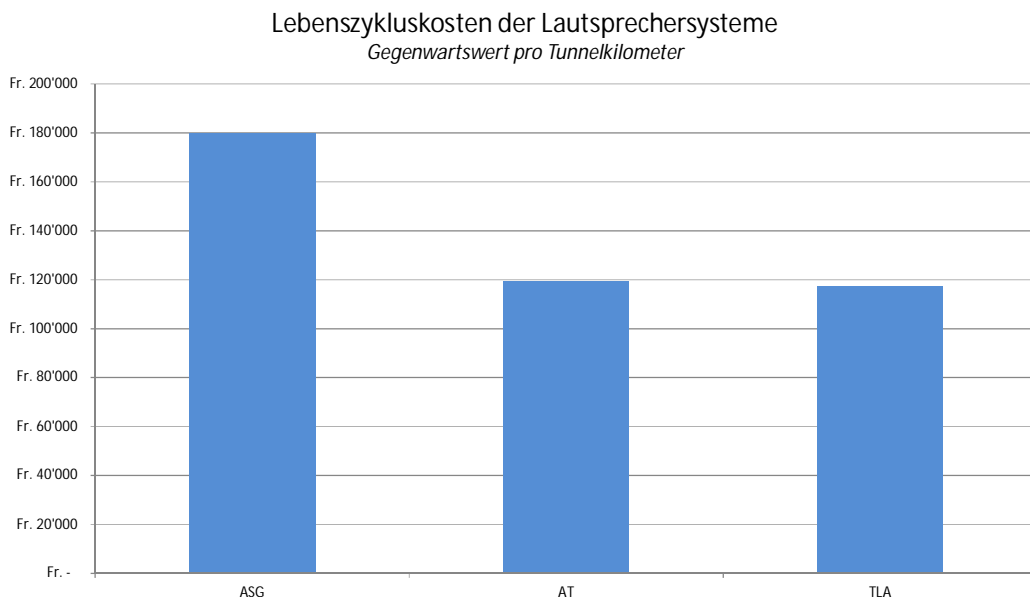


Abbildung 46 Vergleich der Lebenszykluskosten

Abbildung 46 illustriert das wiederum das System ASG die vergleichsweise höchsten Lebenszykluskosten aufweist. Diese Tatsache rührt daher, dass akustische Installationen tendenziell unterhaltsarme Systeme sind und nur geringe jährliche Unterhaltskosten verursachen (Bsp. Funktionstest), weshalb es v.a. die Investitionskosten der Systeme sind, die die Lebenszykluskosten bestimmen. Über einen Betrachtungszeitraum von 15

Jahren variieren die gesamthaften Kosten der Systeme pro Tunnelkilometer zwischen CHF 179'673 (ASG), CHF 119'226 (AT) und CHF 117'264 (TLA).

4.2.3 Gesamtbetrachtung

Im letzten Untersuchungsschritt werden die Ergebnisse der Wirksamkeitsanalyse den Lebenszykluskosten gegenübergestellt. Dieser Vergleich ermöglicht eine Aussage über die erreichte Wirksamkeit der Lautsprechersysteme pro investierte Geldeinheit. Die Steigung der Funktionen in Abbildung 47 zeigt auf, bei welchen Systemen die Wirksamkeit günstiger erreicht werden kann: je steiler die Funktion, desto kostenwirksamer ist die Alternative.

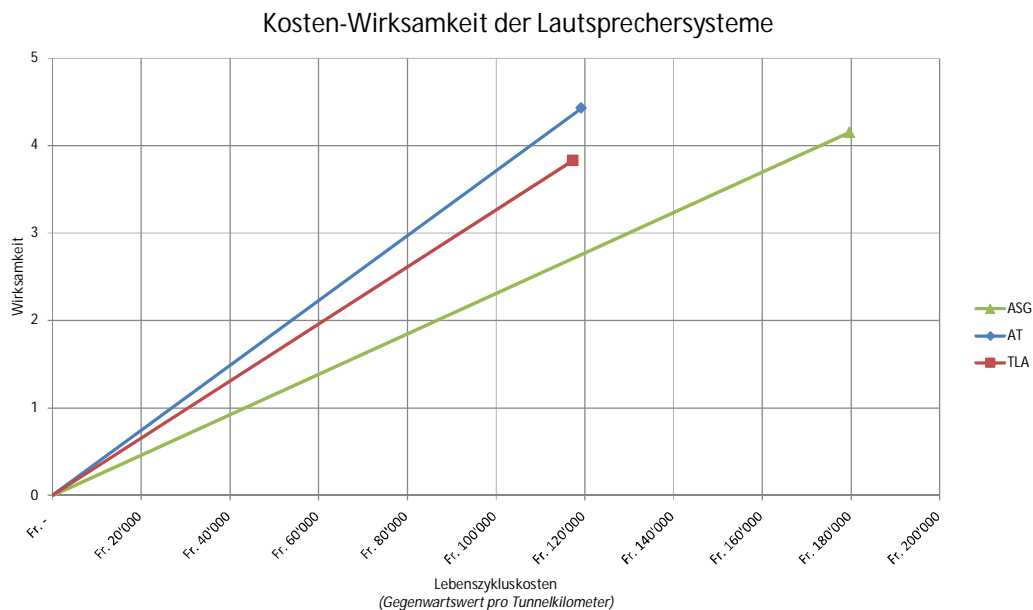


Abbildung 47 Kosten-Wirksamkeit der Lautsprechersysteme

Eine solche Darstellung der Kostenwirksamkeit erlaubt eine Kategorisierung und damit eine objektive Unterscheidung der verschiedenen Lautsprechersysteme:

- das **Grenzflächenhornsystem ASG** weist im Vergleich mit den beiden anderen Systemen klar zu hohe Lebenszykluskosten auf für die erreichte Wirksamkeit
- das **Alarmtrichterlautsprechersystem AT** erreicht mit den gleichen Lebenszykluskosten wie das simple Versuchssystem TLA die grösste Wirksamkeit und kann objektiv als das am besten geeignete System für die Anforderungserfüllung bezeichnet werden
- das **Versuchssystem TLA** weist aufgrund seines experimentellen Charakters verschiedene technische und betriebliche Wirksamkeitsmängel auf und erreicht in der Gesamtbetrachtung trotz seiner nachweislich sehr guten Fähigkeit akustisch zu führen, die tiefste Wirksamkeitsbewertung

5 Schlussfolgerungen

Dass sich akustische Signalisationen zur Unterstützung der Selbstrettung sehr gut eignen, konnte bereits mit einem früheren Feldversuch auf eindrückliche Weise nachgewiesen werden. Dass sich zum diesem Zweck bestimmte Systemtypen kostenwirksamer einsetzen lassen als andere, wurde nun mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wissenschaftlich dargelegt.

Die folgenden Abschnitte des Kapitels 5.1 fassen die wichtigsten Erkenntnisse im Hinblick auf die eingangs aufgeworfenen Fragestellungen zusammen. Anhand der erreichten Projektziele wird in Kapitel 5.2 ein Ausblick auf mögliche weitere Schritte zur optimalen Nutzung der hier vorgetragenen Ergebnisse unternommen.

5.1 Diskussion

Die Konsequenzen eines Ereignisses in einem Strassentunnel hängen stark vom Verhalten der betroffenen Personen ab. Wenn die Tunnelnutzer rechtzeitig und zweckmässig über das Ereignis informiert und zum korrekten Verhalten aufgefordert oder in der Selbstrettung unterstützt werden können, so ist es möglich, das Risiko zu minimieren. Die dafür vorgeschriebenen optischen Hilfsmittel in Strassentunnel sind unter bestimmten Umständen entweder nicht geeignet (Bsp. Information über ein Ereignis und Aufforderung zur Flucht) oder verlieren ihre Wirksamkeit (Bsp. Rauch).

Akustische Installationen über den Notausgängen in Strassentunneln sind effektive Mittel zur Unterstützung der Selbstrettung in Ereignisfällen - sie eignen sich sowohl zur wirksamen Führung zum nächsten Fluchort als auch zur Übermittlung von ausreichend verständlichen Sprachdurchsagen. Die Aktivierung der Lautsprecher sollte je nach Zweck unterschiedlich gehandhabt werden und nicht an zusätzliche Detektionssysteme geknüpft sein: Lautsprecher zur Signalisation der Notausgänge im Strassentunnel weisen denselben Einsatzzweck auf wie herkömmliche optische Signalisationen. Ihre Aktivierung im Ereignisfall soll deshalb identisch gesteuert werden, d.h. automatisch und gleichzeitig mit den optischen Signalisationen aufgrund der vordefinierten Quellen gemäss Reflexmatrix. Akustische Signalisationen unterstützen ebenfalls wie optische Signalisationen die Selbstrettung, weshalb sie während eines Ereignisses in jedem Falle auf die nächste Fluchtmöglichkeit hinweisen müssen. Weil die definitive Entscheidung über die zu wählende Fluchtrichtung (möglicherweise auch in Richtung des Ereignisorts) immer bei den Flüchtenden liegen soll, ist eine ereignisortsabhängige Steuerung der Lautsprecher nicht empfehlenswert. Im Gegensatz dazu sollen Lautsprecher zur Übertragung von Sprachdurchsagen nicht automatisch aufgrund von vordefinierten Ereignissen aktiviert werden. Das Risiko von falschen oder nicht auf das Ereignis angepassten Informationsinhalten ist dabei zu gross. Für den Einsatzzweck der akustischen Information sind deshalb immer objektspezifische Textaufzeichnungen in enger Koordination mit den örtlichen Einsatzkräften zu produzieren. Die Anweisungen zur ereignisbezogenen Aktivierung oder allfällige Direkteinsprechungen durch das Betriebspersonal sind in jedem Falle genau zu definieren.

Tabelle 15 Aktivierung der akustischen Installationen nach Einsatzzweck

Einsatzzweck	Automatisch	Manuell	Bemerkung
Signalisation	X		<ul style="list-style-type: none"> Analog zu optischen Signalisationen (anhand der objektspezifischen Reflexmatrix) keine ereignisortsabhängige Steuerung
Information		X	<ul style="list-style-type: none"> Ereignisbezogene und objektspezifische Textaufzeichnungen erstellen Anweisungen zur Aktivierung durch Betriebspersonal definieren

Weil die Zahl der BSA-Komponenten in Strassentunneln aus technischen und betrieblichen Gründen möglichst tief gehalten werden sollte, wurde in diesem Projekt die Bedingung aufgestellt, dass Lautsprecher nur über den Notausgängen installiert werden. Es ist aber klar, dass mit zunehmender Lautsprecheranzahl im Tunnelraum und einer fein synchronisierten Steuerung der Signalausendung die Verständlichkeit von Sprachdurchsagen markant verbessert werden kann. Mit der einschränkenden Prämisse der möglichst geringen Lautsprecheranzahl sollte jedoch sichergestellt werden, dass die Wirksamkeit der Systeme unter widrigen Umständen untersucht wird und damit allgemeingültige Aussagen mit einem *Worst-Case-Ansatz* abgeleitet werden können.

Mit dem hier vorliegenden Forschungsprojekt konnte in einer systematischen und auf wissenschaftlichen Grundsätzen basierender Vorgehensweise nachgewiesen werden, dass in der Schweiz marktübliche Lautsprechersysteme erhältlich sind, welche die Anforderungen kostenwirksam erfüllen. Die dabei erlangten zentralen Ergebnisse und Erkenntnisse sollen im Folgenden anhand der in Kapitel 1.1 erwähnten Forschungsfragen diskutiert werden.

Welche technischen und betrieblichen Anforderungen bestehen für Lautsprecher in schweizerischen Strassentunneln?

Die zu erfüllenden technischen und betrieblichen Eigenschaften fokussieren im Wesentlichen auf robuste und zuverlässige, einfach zu montierende und sich gut in die bestehenden Systeme und Betriebsabläufe integrierende Lautsprechersysteme. Der gemeinsam mit Fachexperten hergeleitete Anforderungskatalog für akustische Installationen befähigt Tunnelbetreiber zur Formulierung von Spezifikationen für allfällige Ausrüstungs- oder Nachrüstungsprojekte; dieser ist in Anhang II zusammengefasst.

Welche Anforderungen müssen durch Lautsprechersysteme in der Übertragung von akustischen Führungssignalen und Informationsdurchsagen erfüllt werden, damit sie die Selbstrettung wirksam unterstützen?

Die Fähigkeit mit einer minimalen Anzahl von Signalquellen eine korrekte Fluchtrichtungswahl zu unterstützen sowie verständliche Sprachdurchsagen zur Information der Tunnelnutzer übertragen zu können, sind die beiden zentralen Anforderungen. Die ausgesendeten Signale, welcher Art auch immer, müssen unmissverständlich interpretiert werden können - die Ermöglichung einer schnellen Reaktionszeit ist die dritte Anforderung, die erfüllt werden muss, damit sich akustische Installationen in Strassentunneln lohnen.

Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass Personen die nächsten Notausgänge akustisch je nach Lautsprechersystemtyp bis zu 98% korrekt bestimmen können und die Verständlichkeit von Informationsdurchsagen mit einem STI von 0.5 subjektiv als "genügend" eingeschätzt wird um innerhalb von 5 Sekunden eine richtige Entscheidung treffen zu können. Diese Resultate validieren die Erkenntnisse aus dem früheren Feldversuch im Uetlibergtunnel (vgl. [21]).

Der in den Experimenten maximal simulierte STI von 0.5 genügte, dass die Versuchspersonen den Inhalt der Informationsdurchsagen verstehen und wiedergeben konnten. Diesbezüglich kann festgehalten werden, dass der STI zwar eine gute Grundlage für die Berechnung der Sprachtransmission bildet, dass aber die subjektive Verständlichkeit in Strassentunnel stark von weiteren Faktoren abhängt.

Existieren Typen von Lautsprechersystemen, die sowohl für die akustische Signalisation als auch für eine verständliche Beschallung in Strassentunneln wirksam sind?

Prinzipiell eignen sich alle Systeme für eine gute bis sehr gute akustische Signalisation der Notausgänge und für die Übertragung von ausreichend verständlichen Sprachdurchsagen. Es konnten aber dennoch statistisch signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Lautsprechertypen aufgezeigt werden.

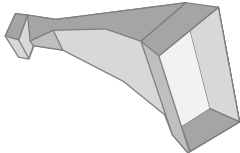
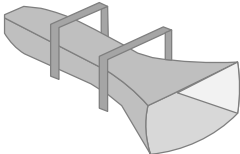
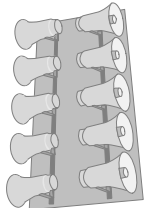
Die durchgeführten Experimente bestätigen, dass sich allzu spezifisch ausgerichtete Systemtypen nur bedingt für beide Beschallungszwecke einsetzen lassen: stark gerichtete Abstrahlcharakteristiken erzeugen für das menschliche Gehör zu wenig

Reflexionen für eine optimale Lokalisierung der Notausgänge; konzentrische Schallausbreitungen erzeugen im Gegensatz zu viele Reflexionen und sind damit einer guten Sprachverständlichkeit abträglich. Systeme, wie der untersuchte Alarmtrichterlautsprechertyp AT sind ideale Kompromisse, die Wirksamkeitsvorteile und Qualitätseinbussen bei der Signalisation und Information in einem ausgewogenen Verhältnis vereinen.

Lohnen sich bestimmte Typen von Lautsprechersystemen aus Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen eher als andere?

Unter der Annahme, dass akustische Installationen in Strassentunnel nur dann eingebaut werden sollen, wenn sie nachweislich eine gesamthaft "gute" Wirksamkeit aufweisen (Note 4) und möglichst tiefe Lebenszykluskosten haben, dann können die untersuchten Lautsprechersysteme gemäss Tabelle 16 kategorisiert werden:

Tabelle 16 Kategorisierung der Lautsprechersystemtypen

Abkürzung	Bezeichnung	Abbildung	Kategorisierung
ASG	Asymmetrisches Grenzflächenhorn		"zu kostenintensiv"
AT	Alarm-Trichterlautsprecher		"optimal"
TLA	Trichterlautsprecher mit Line-Array		"zu wenig wirksam"

Die Unterschiede der Wirksamkeiten und Lebenszykluskosten zeigen somit klar auf, dass das System AT mit seinen robusten Alarmtrichterlautsprechern für einen Einbau in Strassentunnel zu empfehlen ist. Im Gegensatz zum kostenintensiven Grenzflächenhornsystem und zum billigen aber kaum praxistauglichen Line-Array-System vereint es alle Anforderungen in einem optimalen Verhältnis.

Tabelle 17 Zielbeurteilung

Teilziel	Ergebnis/Beurteilung
Definition des optimalen Lautsprechertyps hinsichtlich Effektivität und Wartbarkeit	Definitionen und Anforderungskatalog liegen vor, vgl. Kapitel 2 und 3.1
Definition des optimalen akustischen Signals (Signalton/Sprechdurchsage)	
Definition eines geeigneten Installationskonzeptes	
Aufzeigen der Auswirkungen auf den Betrieb und Unterhalt	Wirksamkeitsanalyse liegt vor, vgl. Kapitel 4.2.1 und Anhang II
Empfehlungen bezüglich der Aktivierung (manuell/automatisch) sowie des Aktivierungszeitpunktes der akustischen Führung	Empfehlungen liegen aufgrund der Erkenntnisse der Experimente vor, vgl. Kapitel 5.1
Nachweis der Integrationsmöglichkeiten in ein bestehendes Alarmkonzept und der Auswirkungen auf die Reflexmatrix	
Detaillierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse für einen bestehenden Tunnel	Analyse und Empfehlung liegt vor, vgl. Kapitel 4.2.3 und 5.1

5.2 Ausblick

Die Erkenntnisse aus dem früheren Feldversuch sowie die nun vorliegenden Forschungsergebnisse befähigen Betreiber von Strassentunnel Lautsprechersysteme aus technischer und betrieblicher Sicht zu spezifizieren und die Anforderungen gemäss dem beabsichtigten Beschallungszweck zu definieren. Aus Sicht der Forschungsstelle wird nun angeraten, die Erkenntnisse der bisherigen Forschungstätigkeiten des VSS zu diesem Thema in einem letzten Schritt in die Praxis umzusetzen.

Es wird daher empfohlen, einen Nationalstrassentunnel mit dem kostenwirksamsten Lautsprechersystemtyp im Sinne eines Pilotprojektes auszurüsten und die postulierte Wirksamkeit zu validieren. Weil akustische Installationen Sicherheitseinrichtungen sind, die nur während bestimmten und typischerweise nicht sehr häufigen Ereignissen eingesetzt werden, muss die Wirksamkeitsvalidierung mit einer Begleituntersuchung über einen längeren Zeitraum erfolgen. Die folgenden Ziele sollen damit erreicht werden:

- **Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse** in die Praxis anhand der bisherigen VSS-Forschungsarbeiten
- **Validierung** der bisherigen Erkenntnisse mittels Begleituntersuchung und anhand eines konkreten Validierungsplanes
- Allfällige Optimierung der Systeme und Überführung in die Anforderung der einschlägigen **Bestimmungen und Richtlinien**

Bei der Durchführung der Begleituntersuchung bestehen verschiedene spezielle Herausforderungen, die mit einem klar definierten Vorgehenskonzept und in enger Zusammenarbeit mit den betroffenen Ereignisdiensten bearbeitet werden müssen. Ein spezifisch zu erarbeitender Validierungsplan muss mindestens die folgenden Punkte klar beschreiben:

- **Tunnelobjekt:** Ein geeignetes Tunnelobjekt muss für das Pilotprojekt bestimmt werden. Die folgenden Kriterien dienen der Wahl eines geeigneten Objektes:
 - *Länge:* Idealerweise verfügt das Tunnelobjekt über eine mittlere Länge, sodass es genügend lang für mehrere Notausgänge und genügend kurz für nicht zu hohe Investitionskosten ist.
 - *Verkehrsaufkommen/Ereignishäufigkeit:* Das untersuchte Tunnelobjekt muss stark frequentiert sein, sodass eine möglichst grosse Wahrscheinlichkeit für Ereignisse besteht, in denen akustische Installationen eingesetzt werden (d.h. möglichst viele Validierungsfälle).
 - *Lage:* Eine erfolgreiche Umsetzung eines solchen Pilotprojektes sowie der Wirksamkeitsvalidierung sind nur mit starker Beteiligung und Mitarbeit der betroffenen Ereignisdienste und des entsprechenden Betreibers möglich. Das Tunnelobjekt sollte aus diesen Gründen an einer zentralen Lage sein, sodass die räumliche Nähe zu den Ereignisdiensten und dem Betreiber vorausgesetzt werden kann.
- **Beschallungszweck:** Es muss klar definiert sein, ob die akustischen Installationen der Signalisation von Sicherheitseinrichtungen oder der Information der Tunnelnutzer dient. In Anlehnung an das vorliegende Forschungsprojekt sowie zur Gewährleistung möglichst zahlreicher Validierungsfälle, wird empfohlen, den Beschallungszweck sowohl für die Signalisation als auch für die Information zu definieren.
- **Validierungsziel und Beobachtungszeitraum:** Mit dem Pilotprojekt soll geklärt werden, ob sich akustische Installationen in der Praxis gemäss den postulierten Wirksamkeiten auszeichnen. Die Eignung dieser Sicherheitseinrichtung soll bezogen auf ihren Einsatzzweck an realen Ereignissen überprüft werden. Für eine erfolgreiche

Projektumsetzung ist deshalb die Definition einer klaren Validierungsstrategie mit der Angabe eines angemessenen Beobachtungszeitraumes zwingend.

- **Validierungsereignisse und Kriterien für die Bewertung:** Die Ereignisse, in denen die Lautsprecher Systeme eingesetzt werden sollen sowie die entsprechenden Zwecke müssen detailliert definiert werden (Bsp. Informationsdurchsagen während bestimmten Stauereignissen; Signalisation der Fluchtwege und Informationsdurchsagen während Unfall- und Brandereignissen). Die Validierungsereignisse müssen anschliessend mit geeigneten Kriterien beurteilt und die Wirksamkeit des Lautsprechersystems einheitlich bewertet werden (Bsp. anhand des Verständlichkeitsindex, der Akzeptanz und subjektiven Verständlichkeit der akustischen Signale)
- **Methoden und Werkzeuge der Validierung:** Damit die Validierungsereignisse während des gesamten Beobachtungszeitraumes einheitlich untersucht werden können, sind methodische Vorgehensweisen und geeignete Werkzeuge zu definieren, die eine Bewertung überhaupt ermöglichen (Bsp. systematische STI-Messungen, Befragung der Tunnelnutzer, Analyse der Einsatzhäufigkeit, Befragung der Ereignisdienste und Betreiber)
- **Anforderungen an das Validierungsergebnis:** Form und Inhalt der Validierungsergebnisse müssen von Beginn an klar definiert sein, damit sich die verschiedenen Resultate während des gesamten Beobachtungszeitraumes vergleichen lassen.

Die Validierung der Wirksamkeit unter realen Bedingungen und in enger Zusammenarbeit mit den betroffenen Ereignisdiensten und Betreibern ist eine wichtige Aufgabe zur Gewährleistung, dass akustische Installationen sämtlichen Anforderungen gerecht werden und die beabsichtigten Zwecke wirksam erfüllen. Sie ist vor dem Hintergrund der bisherigen Forschungstätigkeiten zu empfehlen.

Anhänge

I	Experiment	71
I.1	Einverständniserklärung	71
I.2	Instruktion	72
I.3	Fragebogen.....	73
II	Wirksamkeitsanalyse	75
II.1	Teilwirksamkeit "Technik"	75
II.2	Teilwirksamkeit "Betrieb"	76
II.3	Teilwirksamkeit "Selbstrettung".....	77
II.4	Gesamtwirksamkeit	78
III	Kostenanalyse.....	79
III.1	Lebenszykluskosten	79

I Experiment

I.1 Einverständniserklärung

Experiment: Verständlichkeit von Ansagen in Strassentunnels

Es wird zur Zeit geplant, bei Notfällen (z.B. Bränden) in Strassentunneln Ansagen über Lautsprecher zu machen, um die Autofahrer so effizient wie möglich zu den Notausgängen zu leiten. Ziel dieser Studie ist es, die Verständlichkeit solcher Ansagen zu messen. Diese Studie wird in Zusammenarbeit zwischen der Ingenieurfirma Amstein und Walthert Progress AG in Zürich und der scians GmbH in Bern durchgeführt.

In diesem Experiment werden Sie Ansagen über einen Kopfhörer anhören. In einigen Fällen werden Sie gebeten, die Verständlichkeit von Informations-durchsagen zu beurteilen. In anderen Fällen, werden Sie gebeten aufgrund von Führungsinformationen rasch zu entscheiden, ob der nähere Notausgang links oder rechts ist und wie weit Sie die Distanz zum nächsten Notausgang schätzen.

Mit der Teilnahme an dieser Studie helfen Sie, zukünftige Rettungssysteme zu verbessern und damit möglicherweise Menschenleben zu retten. Die Teilnahme an dieser Studie ist mit keinen Risiken verbunden. Die Teilnahme ist freiwillig und Sie haben das Recht, jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Zustimmung zur Teilnahme zu widerrufen und das Experiment abzubrechen, ohne dass Ihnen dadurch Nachteile entstehen.

Ihre Daten in dieser Studie werden vertraulich behandelt, d.h. die Resultate werden nur in zusammenfassender Form veröffentlicht, die es nicht erlauben, Rückschlüsse auf Ihre persönlichen Leistungen zu ziehen.

Wenn Sie weitere Fragen oder Beschwerden zu dieser Studie haben, wenden Sie sich bitte an ein Mitglied der scians Geschäftsleitung (Dr. Marina Groner marina.groner@psy.unibe.ch, Prof. Dr. Rudolf Groner rgroner@psy.unibe.ch, Dr. Daniel Stricker daniel.stricker@scians.ch oder Prof. Walter F. Bischof wfb@scians.ch).

Mit Ihrer Unterschrift bestätigen Sie, dass Sie den Text der Einverständniserklärung gelesen und verstanden haben, dass Sie Fragen zur Studie stellen konnten, dass diese in befriedigender Weise beantwortet wurden, und dass Sie auf der Grundlage der erhaltenen Informationen freiwillig an der Studie teilnehmen.

Sie erhalten eine Kopie dieser Einverständniserklärung.

	TeilnehmerIn	VersuchsleiterIn
Name	_____	_____
Unterschrift	_____	_____

I.2 Instruktion

Es wird zur Zeit geplant, bei Notfällen (z.B. Bränden) in Strassentunnels Ansagen über Lautsprecher zu machen, um die Autofahrer so effizient wie möglich zu den Notausgängen zu leiten. Die Lautsprecher sind über den Notausgängen montiert. Ziel dieser Studie ist es, die Verständlichkeit solcher Ansagen zu messen.

In diesem Experiment werden Sie Ansagen über einen Kopfhörer anhören. Der Versuchsleiter sagt Ihnen immer, wie sie auf die Ansagen reagieren sollen.

In Versuchsdurchgängen mit Informationsdurchsagen müssen (mündlich) Sie die Verständlichkeit der Durchsage auf einer Skala von 1-5 beurteilen. Eine Beurteilung von 1 bedeutet, dass die Verständlichkeit der Durchsage sehr schlecht war, eine Beurteilung von 5 bedeutet, dass die Verständlichkeit der Durchsage sehr gut war.

In Versuchsdurchgängen mit Führungsinformationen müssen Sie rasch aber zuverlässig entscheiden, ob Sie nach links oder rechts gehen würden. Mit dem schwarzen Knopf geben Sie an, dass Sie nach links gehen würden, mit dem roten Knopf, dass Sie nach rechts gehen würden. Die Reaktionszeit auf Ihren Knopfdruck wird gemessen. Anschliessend müssen Sie noch (mündlich) beurteilen, wie weit der nähere Lautsprecher von Ihnen entfernt ist. Eine Beurteilung von 1 bedeutet, dass der nähere Lautsprecher sehr nahe ist, eine Beurteilung von 5 bedeutet, dass der nähere Lautsprecher weit weg ist.

Es ist wichtig, dass Sie die Beurteilungen möglichst zuverlässig machen. Sobald Sie einen der Knöpfe drücken, wird das Sprechsignal langsam abgebrochen. Es ist daher wichtig, dass Sie nicht zu früh drücken! Sollten Sie einmal einen falschen Knopf drücken oder eine falsche Beurteilung abgeben, teilen Sie es der Versuchsleiterin sofort mit. Sie kann es notieren, und die Daten können nachträglich korrigiert werden.

Haben Sie noch Fragen?

I.3 Fragebogen

Bitte beantworten Sie abschliessend die folgenden Fragen:

Ihre Initialen:

Geschlecht: Mann Frau

Alter: Jahre

1) Was war der Inhalt der Informationsdurchsage? (Wird vom VL am Ende des ersten Blocks gefragt)

2) Haben Sie Unterschiede in den Informationsdurchsagen („Hier spricht die Polizei ...“) bemerkt, und wenn ja, welche?

3) Welche Informationen der Führungsansagen („Ausgang hier ...“) haben sie benutzt, um zu entscheiden wo der nähere Notausgang zu finden ist?

4) Wie ist der Weg zu den Notausgängen in Strassentunneln signalisiert?

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

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

7) Haben Sie allgemeine Bemerkungen zum Experiment?

II Wirksamkeitsanalyse

II.1 Teilwirksamkeit "Technik"

Die Zielerfüllung der Lautsprechersysteme wurde in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) im Rahmen von Expertenbefragungen bewertet.

Table 1 Technische Zielerfüllung der Lautsprechersysteme

Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele	ASG	AT	TLA
Robustheit	möglichst robustes Gehäuse (Bsp. Windlast, Tunnelreinigung etc.)	5	3	3
	möglichst robuste Halterung (Bsp. Windlast, Tunnelreinigung etc.)	5	5	5
	IP Schutzgrad mind. IP66	5	5	5
	Beständigkeit gegen Tunnelklima	5	5	5
	Beständigkeit gegen Temperaturen (übliche Betriebstemperatur)	3	3	3
Montageprozess	einfache Verstellbarkeit und Ausrichtungsmöglichkeit	5	3	2
	möglichst wenige Zusatzanforderungen (Bsp. Oberflächenbeschaffenheit, Tunnelwand etc.)	3	4	2
Signalisation und Information	Für Signalisation: gleichmässige Streuung des akustischen Signals möglich	5	5	5
	Für Information: stark gerichtete Schallabstrahlung möglich (entlang der Grenzfläche)	5	5	2
Technische Daten	Kenschalldruck (dB/W und m)	5	5	5
	Übertragbarer Frequenzbereich	5	5	3
	möglichst lineare Frequenzübertragung	4	5	3
Zuverlässigkeit	Erfüllung der aktuellen Normen	4	4	5
	möglichst geringe Störungsanfälligkeit	4	4	3
Zentrale	Anpassungsfähigkeit Verstärker auf Frequenzgang des Lautsprechers und der akustischen Umgebung	5	5	5
	Möglichkeit für Langzeit-Delay (max. Verzögerungszeit)	5	5	5
	Möglichkeit für Umschaltung auf Havarie-Verstärker	1	5	5
Gesamtbewertung		4.3	4.5	3.7

II.2 Teilwirksamkeit "Betrieb"

Die Zielerfüllung der Lautsprechersysteme wurde in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) im Rahmen von Expertenbefragungen bewertet.

Tabelle 2 Betriebliche Zielerfüllung der Lautsprechersysteme

Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele	ASG	AT	TLA
Integrationsfähigkeit	möglichst einfache Integration in bestehende Systeme und Abläufe (Bsp. Alarmkonzept, Reflexmatrix etc.)	4	5	5
	möglichst geringes Störpotential mit betrieblichen Prozessen (Bsp. Tunnelreinigung etc.)	5	5	1
	möglichst geringes bauliches und physikalisches Störpotential mit anderen Systemen	5	4	1
	modularer Systemausbau möglich	5	5	5
Systembedienung	möglichst einfacher Betrieb des Gesamtsystems	5	5	5
Support und Ersatzteile	Verfügbarkeit von externem Support und Ersatzteilen innert nützlicher Fristen	3	5	5
Instandhaltbarkeit	möglichst wenig spezielles Wissen/Tools für Instandhaltung erforderlich	5	5	3
	Wartung durch betriebliches Fachpersonal möglich	5	5	3
Gesamtbewertung		4.4	4.9	4.0

II.3 Teilwirksamkeit "Selbstrettung"

Die Zielerfüllung der Lautsprechersysteme wurde in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) bewertet. Die Ergebnisse wurden experimentell hergeleitet und sind statistisch signifikant.

Tabelle 3 Selbstrettungsunterstützende Zielerfüllung der Lautsprechersysteme (mit Rohwerten in Klammern)

Wirksamkeitsziel	Beschreibung der Ziele	ASG	AT	TLA
Akustische Führung	möglichst gute Lokalisierung und korrekte Fluchrichtungswahl unterstützen	4.61 (95.1%)	4.88 (98.4%)	4.92 (99.0%)
Informationsdurchsagen	möglichst gute Verständlichkeit der Informationsdurchsagen ermöglichen	3.72 (3.72)	3.59 (3.59)	3.31 (3.31)
Fluchtverhalten	möglichst positiver Effekt auf die Reaktionszeit bis zur Wahl des nächsten Notausgangs (möglichst schnelle und korrekte Fluchrichtungswahl)	2.74 (4.94s)	3.22 (4.46s)	3.04 (4.64s)
Gesamtbewertung		3.69	3.89	3.75

II.4 Gesamtwirksamkeit

Die Zielerfüllung der Lautsprechersysteme wurde in einem einheitlichen Bewertungsschema auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) - 5 (sehr gut) bewertet. Die Ergebnisse wurden sowohl im Rahmen von Expertenbefragungen als auch experimentell hergeleitet.

Tabelle 4 Gesamtwirksamkeit der Lautsprechersysteme

Teilwirksamkeit	Wirksamkeitsziel	ASG	AT	TLA
Technik	Robustheit	4.6	4.2	4.2
	Montageprozess	4.0	3.5	2.0
	Signalisation und Information	5.0	5.0	3.5
	Technische Daten	4.7	5.0	3.7
	Zuverlässigkeit	4.0	4.0	4.0
	Zentrale	3.7	5.0	5.0
Betrieb	Integrationsfähigkeit	4.8	4.8	3.0
	Systembedienung	5.0	5.0	5.0
	Support und Ersatzteile	3.0	5.0	5.0
	Instandhaltbarkeit	5.0	5.0	3.0
Selbstrettung	Akustische Führung	4.6	4.9	4.9
	Informationsdurchsagen	3.7	3.6	3.3
	Fluchtverhalten	2.7	3.2	3.0
Gesamtbewertung		4.2	4.4	3.8

III Kostenanalyse

III.1 Lebenszykluskosten

Für den Vergleich der Lebenszykluskosten der Lautsprechersysteme wurden die über die Lebensdauer anfallenden Kosten (Investitions-, Unterhalts- und Erneuerungskosten) bestimmt und zusammengefasst. Mit Methoden der Investitionsrechnung wurden sie auf den heutigen Gegenwartswert diskontiert, was einen Vergleich der Kosten auf einer einheitlichen Grundlage ermöglicht. Für diese Betrachtungen wurde bei allen Systemen eine Lebensdauer von 15 Jahren und gemäss Empfehlung des VSS ein Diskontsatz von 2% angenommen ([32]; [33]). Die Resultate sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5 Lebenszykluskosten der Lautsprechersysteme

Variable Parameter	Jahr															
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Lebensdauer in Jahren	15															
Ausgangsjahr	2016															
Diskontsatz	4%															
Nutzungsjahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zinsfaktor	1	0.861538462	0.924556213	0.888896359	0.854804191	0.821927107	0.790314526	0.758917813	0.7306890205	0.702586736	0.675564169	0.649680932	0.62469705	0.600574086	0.577475083	0.555264503
AT	Fr. 59'533.00	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87	Fr. 5'368.87
Investitionskosten	Fr. 59'033.00															
Unterhaltungskosten	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00
Erneuerungskosten	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87	Fr. 3'868.87
TLA	Fr. 58'406.00	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73	Fr. 5'293.73
Investitionskosten	Fr. 56'906.00															
Unterhaltungskosten	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00
Erneuerungskosten	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73	Fr. 3'793.73
ASG	Fr. 94'248.00	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20	Fr. 7'683.20
Investitionskosten	Fr. 92'748.00															
Unterhaltungskosten	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00	Fr. 1'500.00
Erneuerungskosten	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20	Fr. 6'183.20
Gegenwartswert der Kosten Kg																
AT	Fr. 119'226	Fr. 5'162	Fr. 4'964	Fr. 4'773	Fr. 4'589	Fr. 4'413	Fr. 4'243	Fr. 4'080	Fr. 3'923	Fr. 3'772	Fr. 3'627	Fr. 3'488	Fr. 3'353	Fr. 3'224	Fr. 3'100	Fr. 2'981
TLA	Fr. 117'264	Fr. 5'090	Fr. 4'894	Fr. 4'706	Fr. 4'525	Fr. 4'351	Fr. 4'184	Fr. 4'023	Fr. 3'868	Fr. 3'719	Fr. 3'576	Fr. 3'439	Fr. 3'306	Fr. 3'179	Fr. 3'057	Fr. 2'939
ASG	Fr. 179'673	Fr. 7'388	Fr. 7'104	Fr. 6'830	Fr. 6'568	Fr. 6'315	Fr. 6'072	Fr. 5'839	Fr. 5'614	Fr. 5'398	Fr. 5'190	Fr. 4'991	Fr. 4'799	Fr. 4'614	Fr. 4'437	Fr. 4'266

Glossar

Begriff	Bedeutung
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
Diskontsatz	Zinssatz, mit dem zukünftige Geldeinheiten mathematisch auf einen Vergleichszeitpunkt abgezinst werden. Üblicherweise entspricht der Diskontsatz der sozialen Zeitpräferenzrate, die die Bereitschaft von Konsumenten ausdrückt, auf sofortigen Konsum zu verzichten, wenn als Gegenleistung die Aussicht auf mehr Konsum zu einem späteren Zeitpunkt besteht.
Effektivität	Auch Wirksamkeit. Sie beschreibt den Grad der Zielerfüllung einer Alternative, wobei die Ziele den Anforderungen des Entscheidungsträgers entsprechen und durch diesen vorgegeben werden.
Effizienz	Auch Wirtschaftlichkeit. Im allgemeinen Sinne die Gegenüberstellung von Aufwand und Ertrag einer Sache und erlaubt Aussagen über den Ressourcenumgang. Sie bestimmt sich durch den Quotienten aus der Summe aller Nutzen zur Summe aller Kosten.
Erneuerungskosten	Jährlich zurückgestellte finanzielle Beträge um eine technische Anlage nach Ablauf ihrer Lebensdauer erneuern zu können.
Investitionskosten	Sämtliche Kosten, die zur Beschaffung und zur Aufnahme der vorgesehenen Nutzung einer funktionstüchtigen Anlage anfallen. Sie umfassen neben den Kosten der eigentlichen technischen Anlage auch alle der Inbetriebnahme vorgelagerten Kosten, die ab dem Entscheidungszeitpunkt für die Anlage entstehen.
Lebenszykluskosten	Summe der Kosten für die Anschaffung, den Betrieb, die Instandhaltung und die Ausscheidung einer Anlage.
SLASS	<i>Synchronized Longitudinal Announcement Speaker System</i> . Synchronisierung von in Längsrichtung aufeinanderfolgenden Lautsprechern anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schallfeldes des ersten Lautsprechers.
STI	<i>Speech Transmission Index</i> . Index zur Angabe der Sprachverständlichkeit anhand des Verhältnisses zwischen dem ausgesendeten Signal und dem Hintergrundgeräusch
Unterhaltskosten	Sämtliche Kosten, die durch Aktivitäten zur Erhaltung des Sollzustandes einer funktionstüchtigen Anlage anfallen.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

- [1] Ahnert, W., Feistel, S. (2010): Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen. In: Möser, M. (Hrsg.): Messtechnik der Akustik. Springer Verlag, Heidelberg, 115-184.
- [2] ASTRA (2011): Betrieb NS - Teilprodukt elektromechanischer Dienst (BSA). Erläuterungen, Indikatoren und Standards. Richtlinie, ASTRA 16240. V2.99. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bundesamt für Strassen, ASTRA, Bern.
- [3] ASTRA (2011): Signalisation der Sicherheitseinrichtung. Richtlinie, ASTRA 13010. V2.06. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bundesamt für Strassen, ASTRA, Bern.
- [4] ASTRA (2013): Minimale Anforderungen an den Betrieb - Strassentunnel. Leitfaden Operative Sicherheit Betrieb. Dokumentation, ASTRA 86053. V1.10. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bundesamt für Strassen, ASTRA, Bern.
- [5] Boer, L. C. (2002): Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. TNO Report TM-02-C034, TNO Human Factors, Soesterberg.
- [6] Boer, L. C., van Wijngaarden, S. J. (2004): Directional sound evacuation from smoke-filled tunnels. Proceedings from the first international Symposium, Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Prague, 33-41. <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/ovion/doc/safety/prague/boer.pdf> Zugriff: 2.11.2010.
- [7] Boer, L. C., Withington, D. J. (2004): Auditory guidance in a smoke-filled tunnel. Ergonomics, 47(10), 1131-1140.
- [8] Bradley, J. S., Sato, H., Picard, M. (2003): On the importance of early reflections for speech in rooms. Journal of the Acoustical Society of America, 113(6), 3233-3244.
- [9] Brandt, R. (2014): On the four elements of tunnel safety: Fire, Air, Water and Earth. Conference Paper, 7th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz.
- [10] CETU (2010): Signalisation et dispositions d'accompagnement de l'auto-évacuation des usagers dans les tunnels routiers. Les documents d'information. Centre d'Études des Tunnels, Bron. http://www.cetu.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_Doc_info_AEV_2010-10-15_cle0765fa_cle57299f.pdf Zugriff: 31.8.2011
- [11] Chu, G., Sun, J., Wang, Q., Chen, S. (2006): Simulation study on the effect of pre-evacuation time and exit width on evacuation. Chinese Science Bulletin, 51(11), 1381-1388.
- [12] Europäische Union (2004): Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European road network. PE-CONS 3669/04, Brüssel.
- [13] Färber, B., Färber, B. (2010): Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Strassentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, bast. Mensch und Sicherheit, Heft M 212. Bergisch Gladbach, Deutschland.
- [14] FSV (2010): Tunnel, Tunnelausrüstung, Betrieb und Sicherheit. RVS 09.02.22.

- [15] Huijben, J. W. (1999): Speech transmission by loudspeaker systems in a tunnel. International Conference on Fire Security in Hazardous Enclosed Spaces, Vernon, France.
- [16] Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., Post, J. G. (2010): Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 45, 1-11.
- [17] Lellig, C., Feurer, A., Schönenberger, A., Groner, M. (2010): Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen? Forschungsauftrag FGU 2008/002 auf Antrag der Fachgruppe für Untertagbau (FGU). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bundesamt für Strassen, ASTRA, Bern.
- [18] Litovsky, R. Y., Colburn, H. S., Yost, W. A., Guzman, S. J. (1999): The precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4), 1663-1654.
- [19] Mayer, R., Reimann, O. (2011): Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Strassentunnel. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, bast. Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 80. Bergisch Gladbach, Deutschland.
- [20] Mayer, R., Reimann, O., Sistenich, C. (2012): Klare Ansagen für Verkehrsteilnehmer: Neue Chancen zur sicheren Sprachalarmierung in Tunneln. *Tunnel* 2/2012, 40-46.
- [21] Mellert, L. D., Welte, U., Groner, M., Stricker, D. (2012): Akustische Führung im Strassentunnel. Forschungsauftrag VSS 2010/203 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, Bundesamt für Strassen, ASTRA, Bern.
- [22] Morimoto, M., Sato, H., Kobayashi, M. (2004): Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3), 1607-1613.
- [23] Nilsson, D., Johansson, M., Frantzich, H. (2009): Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. *Fire Safety Journal*, 44, 458-468.
- [24] Patrick, P. (2011): Practical considerations for designing road tunnel public address systems. *Proceedings of Acoustics 2011*, 99-106.
- [25] RABT (2006): Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, e.V., Köln.
- [26] Ridley, P., Spearritt, D. (2011): Evaluation of speech transmission in a road tunnel. *Proceedings of Acoustics 2011*, 137-144.
- [27] Ronchi, E., Nilsson, D. (2013): Interim Report: Traffic Information Signs, Colour Scheme of Emergency Exit Portals and Acoustic Systems for Road Tunnel Emergency Evacuations. Report 7039. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Sweden.
- [28] Shields, T. J. (2005): Human behaviour in tunnel fires. In: Beard, A., Carvel, R. (Hrsg.): *Handbook of tunnel fire safety*. London, 324-342.
- [29] Shields, T. J. (2005): Human behaviour in tunnel fires. In: Beard, A., Carvel, R. (Hrsg.): *Handbook of tunnel fire safety*. London, 324-342.
- [30] SIA (2004): Projektierung Tunnel. Strassentunnel. SIA 197/2, SN 505 197/2, Zürich.

- [31] Storrer, H. H. (1995): Einführung in die mathematische Behandlung der Naturwissenschaften II. Birkhäuser Skripten Band 8, Birkhäuser Verlag, Basel.
- [32] VSS (2006a): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Diskontsatz. Schweizer Norm SN 641 821. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- [33] VSS (2006b): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Grundnorm. Schweizer Norm SN 641 820. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- [34] VSS (2008): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassen. Schweizer Norm SN 641 826. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- [35] VSS (2009a): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Externe Kosten. Schweizer Norm SN 641 828. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- [36] VSS (2009b): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Zeitkosten im Personenverkehr. Schweizer Norm SN 641 822a. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- [37] Westermann, G. (2012): Kosten-Nutzen-Analyse. Einführung und Fallstudien. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin.
- [38] Withington, D. (2003): Directional sound evacuation. An improved system for way guidance. Lloyds List Fire Science & Fire Investigation Workshop. http://www.systemsensor.com/ep/pdf/exitpoint_directional_sound_evacuation.pdf Zugriff: 2.11.2010.
- [39] Withington, D. (o. J.): The use of directional sound to aid aircraft evacuation. http://www.soundalert.com/pdfs/int_air_fire_and_cabin_crew_conf.pdf Zugriff: 2.11.2010.
- [40] Woodson, W. E., Tillman, B., Tillman, P. (1992): Human factors design handbook. Information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use. McGraw-Hill Inc., New York
- [41] Yokoyama, S., Tachibana, H., Sakamoto, S., Tazawa, S. (2006): Subjective experiment on speech-rate of emergency evacuation announcement in a tunnel. Euronoise 2006, Tampere, Finland, http://www.acoust.iis.u-tokyo.ac.jp/publication/2006papers/2006_Euronoise_yokoyama.pdf , Zugriff: 18.08.2015

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 10.12.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2012/207

Projekttitel: Akustische Installationen im Strassentunnel

Enddatum: 31.12.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die vorliegende Studie bestätigt, dass sich bestimmte Lautsprecher Systeme sowohl für eine wirksame akustische Führung als auch für eine verständliche Informationsübertragung in Strassentunnel eignen. Eine Analyse verschiedener Lautsprechertypen verdeutlicht, dass herkömmliche Systeme die technischen und betrieblichen Anforderungen gut erfüllen und im Vergleich zu spezifischen Systemlösungen eine bessere Kostenwirksamkeit aufweisen.

Für die Untersuchung wurden unterschiedliche Systemtypen einerseits hinsichtlich ihrer technischen und betrieblichen Eigenschaften im Rahmen von Expertenworkshops bewertet. Andererseits wurde die Wirksamkeit der Lautsprechersysteme in der Übertragung von gut interpretierbaren Signalen und Informationsdurchsagen experimentell mit rund 40 Versuchspersonen untersucht. Während dieses Experiments wurden den Probanden über Kopfhörer zahlreiche akustische Signale und Informationsdurchsagen zugetragen, die anhand der technischen Spezifikationen der Lautsprechersysteme mittels computergestützter Simulation für verschiedene Standorte in einem Tunnel auralsiert worden waren. Dabei wurde ein 300m langer Abschnitt zwischen zwei Notausgängen des Uetlibergtunnels simuliert. Anhand der Reaktionen der Versuchspersonen konnten schliesslich signifikante Ergebnisse abgeleitet werden, die eine empirische Aussage über die Wirksamkeit der betrachteten Systemtypen in der Selbstrettungsunterstützung ermöglichen.

Die Studie kommt zum Schluss, dass marktübliche Trichterlautsprechersysteme über den Notausgängen in Strassentunnel effektive Sicherheitseinrichtungen sind, die die Lokalisation der Notausgänge signifikant verbessern auch mit einer minimalen Anzahl Lautsprecher und ohne Synchronisierung der Signalausendung ausreichend verständliche Informationsdurchsagen ermöglichen. Die Analysen bestätigen, dass allzu spezifisch ausgerichtete Systemtypen relativ hohe Lebenszykluskosten haben und sich überdies nur bedingt für beide Beschallungszwecke einsetzen lassen. Betrieblich einfache und robust gebaute Lautsprecher mit rechteckigen Trichteröffnungen sind ideale Kompromisse, die Wirksamkeitsvorteile und Qualitätseinbussen bei der Signalisation und Information in einem ausgewogenen Verhältnis vereinen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die aufgeworfenen Fragestellungen wurden mit diesem Forschungsprojekt systematisch und mit einer wissenschaftlichen Vorgehensweise beantwortet. Die folgenden Projektziele wurden dabei erreicht:

- * Definition des optimalen Lautsprechertyps hinsichtlich Effektivität und Wartbarkeit
- * Definition des optimalen akustischen Signals (Signalton/Sprechdurchsage)
- * Definition eines geeigneten Installationskonzeptes
- * Aufzeigen der Auswirkungen auf den Betrieb und Unterhalt
- * Empfehlungen bezüglich der Aktivierung (manuell/automatisch) sowie des Aktivierungszeitpunktes der akustischen Führung
- * Nachweis der Integrationsmöglichkeiten in ein bestehendes Alarmkonzept und der Auswirkungen auf die Reflexmatrix
- * Detaillierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse für einen bestehenden Tunnel

Das Risikosenkungspotential hängt von sehr vielen verschiedenen, u.a. auch psychologischen oder sozialen Faktoren ab und ist deshalb schwierig rechnerisch nachzuweisen. Die Sinnhaftigkeit solcher Betrachtungen sowie die Frage nach der Kompensationsfähigkeit wurden im Laufe des Projektes kritisch hinterfragt, mit dem Schluss, dass die folgenden Ziele nicht weiter verfolgt wurden:

- * Aufzeigen des Risikosenkungspotentials eines Lautsprechersystems
- * Diskussion der Kompensationsfähigkeit in Bezug auf andere Sicherheitsmassnahmen

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit diesem Forschungsprojekt liegen nun neben den optimalen Führungssignalen und Informationsdurchsagen umfassende Kataloge vor, die Betreiber von Strassentunnel befähigen, Lautsprechersysteme aus technischer und betrieblicher Sicht zu spezifizieren und die Anforderungen gemäss dem beabsichtigten Beschallungszweck zu definieren.

Nachdem mehrere Studien die signifikante Wirksamkeit von Lautsprechern in Strassentunnel experimentell nachgewiesen haben, wird nun empfohlen, einen geeigneten Nationalstrassentunnel mit dem kostenwirksamsten Lautsprechersystemtyp im Sinne eines Pilotprojektes auszurüsten und die postulierte Wirksamkeit zu validieren. Weil akustische Installationen Sicherheitseinrichtungen sind, die nur während bestimmten und typischerweise nicht sehr häufigen Ereignissen eingesetzt werden, muss die Wirksamkeitsvalidierung mit einer Langzeitstudie erfolgen.

Publikationen:

Mellert, L. D., Welte, U., Bischof, W. F., Groner, M., Stricker, D. (2016): Akustische Installationen im Strassentunnel. Forschungsprojekt VSS 2012/207 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Welte Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walther Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen der frühzeitig geplanten BK-Sitzungen wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojektes sowie die Ressourcensituation (Budget und Termine) transparent präsentiert und anschliessend protokolliert. Während den Diskussionen hatten die Mitglieder der BK die Möglichkeit, Anmerkungen einzubringen sowie auf allfälligen Anpassungsbedarf hinzuweisen. Die Planung und Durchführung der Experimente und Analysen wurde dadurch optimiert.

Die Auralisation der Signale aufgrund der rechnerischen Simulationen sowie die erfolgreiche Planung und Durchführung der Experimente und die Zusammenstellung der Ergebnisse werden von der BK positiv beurteilt.

Umsetzung:

Die angewandten Methoden zur Untersuchung der Hypothese waren angemessen und vermochten alle Fragestellungen zu beantworten. Sämtliche gesetzten Meilensteine wurden dabei fristgerecht erreicht und der BK an den entsprechenden Terminen präsentiert. Der Schlussbericht führt den Leser systematisch durch die theoretischen Grundlagen der Studie und ermöglicht aufgrund der detaillierten Beschreibung des Versuchsaufbaus die Reproduzierbarkeit der Experimente. Die statistischen Auswertungen erfolgten nach wissenschaftlichen Grundsätzen und werden im Bericht in verständlicher Art und Weise interpretiert. Der Bezug zwischen den Ergebnissen und den Forschungsfragen wird zum Schluss erneut hergestellt.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der weitergehende Forschungsbedarf ergibt sich direkt aus der postulierten Kostenwirksamkeit des optimalen Lautsprechersystems. Es wird empfohlen, einen geeigneten Nationalstrassentunnel mit dem kostenwirksamsten Lautsprechersystemtyp im Sinne eines Pilotprojektes auszurüsten sowie die Wirksamkeit zu validieren und mit einer Langzeitstudie systematisch zu untersuchen.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Scholer Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: Scholer Projektpartner GmbH Frick

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauphosphat in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausphal mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarrer Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektiertungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrpsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorerkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009