

Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 80

bast

Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

von

Rolf Mayer
Oliver Reimann

unter Mitwirkung von

Volker Löwer
Verena Brettschneider
Isolde Los

IFB Consulting
Bischofsheim

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 80

bast

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.433/2006/ERB:
Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Projektbetreuung
Christof Sistenich

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86918-144-8

Bergisch Gladbach, September 2011

Print  kompensiert
Id-Nr. 1112455
www.bvdm-online.de

Kurzfassung – Abstract

Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung weitergehender Anforderungen an elektroakustische Anlagen in Straßentunneln unter Beachtung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Hierzu sind allgemeingültige Kriterien zu definieren, anhand derer eine elektroakustische Beschallungsanlage für Tunnel ausgelegt werden kann, ohne dass aufwändige schalltechnische Einzeluntersuchungen durchgeführt werden müssen.

Aus den bereits vorliegenden Projekten wurden Ergebnisse schalltechnischer Untersuchungen aus 19 Tunneln kategorisiert und vergleichend gegenübergestellt.

Es wurden folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

- Die Nachhallzeiten liegen im Bereich von 5 s bis 10 s, im mittleren Bereich und für tiefe Frequenzen ansteigend bis auf 27 s. Die Nachhallzeiten typischer Tunnel unterscheiden sich nur unwesentlich.
- Nachhallzeitmessungen sind daher nicht notwendig. Wichtig ist die Beurteilung der Primärstruktur eines Tunnels.
- Es gibt besondere Schallleitungseigenschaften von Tunnelröhren, die durch die Reflexionen entstehen. Diese Struktur zeichnet sich durch nützliche Schallreflexionen aus, die sich für eine Sprachverständlichkeit fördernde Unterstützung nutzen lassen.

Daraus lassen sich folgende akustische Anforderungen an einen für Tunnelbeschallungen geeigneten Lautsprecher formulieren:

- horizontale und vertikale Abstrahlwinkel von etwa jeweils 30 bis 35°,
- Rückwärtsdämpfung von $A_{\text{Rück}} \geq 30$ dB,
- Schalldruckpegel $L_{\text{pmax}} \geq 130$ dB (SPL),
- Übertragungsfrequenzgang 300 Hz bis 12.000 Hz.

Auf Grund dieser Erkenntnisse werden Versuche in einem zur Verfügung gestellten Testtunnel mit auf

dem Markt befindlichen Lautsprechersystemen durchgeführt, was zu folgenden Aussagen für die Konzeption einer Beschallungsanlage führt:

- Herkömmliche Lautsprecher, sind für eine Beschallung mit Sammelruf ungeeignet.
- Ein nach dem Prinzip des Grenzflächenhorns entwickelter Speziallautsprecher hatte geeignete akustische Eigenschaften.
- Die Lautsprecher müssen zeitlich angepasst werden.
- Eine Sprachverständlichkeit von mindestens $STI \geq 0,45$ ist anforderungsgerecht.

Bei Messungen in Tunneln, deren Beschallungsanlagen unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse ausgelegt wurden, werden Sprachverständlichkeitswerte mit im Mittel $STI = 0,52, 0,50$ und $0,49$ festgestellt.

Der Originalbericht enthält als Anhang „Generalisierte Muster-Ausschreibungs-Module für ein SLASS-Beschallungssystem – Erläuterungsbericht/Technische Vorbemerkungen/Leistungs-Positionstexte“. Dieser Anhang steht auf der Homepage der Bundesanstalt für Straßenwesen unter www.bast.de/Publikationen zum kostenlosen Download zur Verfügung.

Speaker systems and acoustic signalling in road tunnels

The aim of this research project is to develop more stringent requirements on electro-acoustic equipment in road tunnels in compliance with technical and economic feasibility. Universally valid criteria have to be defined through which a Public Address System (PA) for tunnels can be designed without the need of performing complicated and specific acoustic engineering studies. From already existing projects the results of 19 acoustical tunnel studies were categorized and compared.

The following key findings have been obtained:

- The reverberation times are in the range of 5 s to 10 s in the central region and increasing up to

27 s for low frequencies. The typical decay times of the tunnels differ only slightly.

- Consequently reverberation time measurements are not necessary, but it is important to assess the primary structure of a tunnel.
- There are special sound-transmission properties of tunnels caused by reflections. This structure is characterized by useful sound reflections that can be used for advancing intelligibility support.

From these findings acoustical requirements for speaker systems can be derived to be suitable for PA Systems in tunnels as follows:

- Horizontal and vertical coverage angle of approximately 30° to 35°.
- Front to back Rejection Ratio $A_{\text{Rück}} \geq 30$ dB.
- Sound Pressure-Level $L_{\text{pmax}} \geq 130$ dB (SPL).
- Frequency Response 300 Hz to 12 000 Hz.

Based on these findings experiments are performed in a test tunnel equipped with commercially available loudspeakers, which leads to the following statements concerning the design of a PA system:

- Conventional speakers are not suitable for PA Systems in tunnels with all-zone paging.
- A special horn-type-speaker based on the acoustic-mirroring principle showed sufficient acoustic properties.
- The signal of the speakers have to be aligned for arrival time.
- Intelligibility figures of at least $STI \geq 0,45$ comply with requirements.

Performing measurements in tunnels where the PA System had been designed based on the insights gained in this research project, speech intelligibility figures with an average of $STI = 0.52$, 0.50 and 0.40 could be verified.

The original report contains the appendix "Generalised sample tender module for a SLASS public address system – explanatory report / preliminary technical remarks / service position texts". This appendix is available for free download on the homepage of the Federal Highway Institute at www.bast.de/Publikationen.

Inhalt

1	Einleitung	9	2.5.2	Empfindlichkeit und Wirkungsgrad	21
1.1	Ausgangslage	9	2.5.3	Lautsprecher-Frequenzgang	22
1.2	Zielsetzung	9	2.5.4	Geometrische Eigenschaften	22
1.3	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung	10	2.5.5	Chemische Widerstandsfähigkeit ...	22
1.4	Ablauf	10	2.6	Elektroakustische Auslegungsprinzipien	22
2	Für Tunnelanlagen relevante raum- und elektroakustische Grundbegriffe	11	2.6.1	Pegel, Pegelverteilung und S/N-Abstand	23
2.1	Sprachverständlichkeit	11	2.6.2	Bandbreiten und Frequenzgänge ...	23
2.1.1	Berechnungs- und Messverfahren für die Sprachverständlichkeit: STI und andere	11	2.6.3	Optimierung des D/R-Verhältnisses	23
2.1.2	Abhängigkeiten der Sprachverständlichkeit	13	2.6.4	Minimierung von Laufzeitdifferenzen und Echoeffekten	23
2.1.3	Besonderheiten und Beschränkungen des STI-Messverfahrens	13	2.7	Tunnelakustik und -beschallung in der Literatur	24
2.1.3.1	Maskierung	13	3	Schalltechnische Einzeluntersuchungen in Straßentunnel 2003 – 2009	25
2.1.3.2	Abhängigkeit von einem linearen Frequenzgang	14	3.1	Übersicht und Vorbemerkungen zu betrachteten Straßentunnelprojekten	26
2.1.3.3	Systembedingte Unvollständigkeit der STI-Aussagekraft	15	3.2	Tunnel-Bauarten	26
2.2	Reflexionen und Nachhall	15	3.3	Elektroakustische Bestandsuntersuchungen an konventionellen Beschallungskonzepten	26
2.3	Bedingungen der Schallausbreitung im Tunnel	16	3.4	Raumakustische Bestands-Untersuchungen	27
2.3.1	1/r-Gesetz	16	3.5	Nachhallzeiten in Tunneln	27
2.3.2	Reflexionsstrukturen in Tunneln bzw. „Langräumen“	17	3.5.1	Wesentliche Ergebnisse	28
2.3.3	Pegel des Nachhallfelds in Tunneln bzw. „Langräumen“	19	3.5.2	Abhängigkeiten der Nachhallzeiten von Unterschieden zwischen den Tunnelbauarten	29
2.4	Störschall (Lärm)	19	3.5.3	Einflüsse der ermittelten Tunnelnachhallzeiten	30
2.4.1	Störschallpegel	19	3.6	Frühe Abklingzeiten (Early Decay – Times EDT)	31
2.4.2	Vereinfachte Berechnung von Störschall-Einflüssen auf die Verständlichkeit	19	3.7	Reflektogramme	32
2.4.3	Störschall-Spektren	20	3.8	Sprachverständlichkeit über die Entfernung	35
2.5	Lautsprechereigenschaften	20			
2.5.1	Bündelung Q, Abstrahlwinkel φ und Rückwärtsdämpfung A_R	20			

3.9	Signalpegel-Verlauf über Entfernung	36	5.5	Zeitlich synchronisierte Längsbeschallung, Mittenmontage der verschiedenen Lautsprecher	48
3.10	Störpegel	38	5.6	Darstellung der Sprachverständlichkeit und des Pegels über der Entfernung für die in Reihe angeordneten Lautsprecher	49
4	Die Ansätze neuerer Tunnelbeschallungskonzepte	39	5.6.1	Einfluss mehrerer aktiver Grenzflächenlautsprecher auf die Sprachverständlichkeit	51
4.1	Ziele	39	5.7	Gegenüberstellung abweichender Montagearten (mittig ↔ seitlich)	52
4.2	Anwendung der Grundprinzipien von Verständlichkeitsverbesserung	39	5.8	Auswirkung einer Querschnittsänderung	53
4.3	Konzept 1: Konventionelle elektroakustische Beschallung in Kombination mit umfangreicher raumakustischer Optimierung	39	5.9	Untersuchte Tunnel mit vollständigen Festinstallationen	53
4.4	Konzept 2: Sequenzielle Beschallungen	40	5.9.1	Untersuchte Tunnel	53
4.4.1	Untersuchung einer sequenziellen Beschallung	41	5.9.2	Untersuchungsergebnisse in den Tunneln mit SLASS-Beschallung	54
4.5	Konzept 3: Zeitlich synchronisierte Längsbeschallung (SLASS, „synchronized longitudinal announcement speaker system“)	42	5.9.2.1	Nachhallzeit RT 60	54
5	Untersuchung des SLASS-Lautsprecherkonzeptes	43	5.9.2.2	Sprachübertragungsindex STI	54
5.1	Voraussetzungen und Ziele der praktischen Untersuchungen	43	5.9.2.3	Einfluss von Fahrzeugen auf die Sprachverständlichkeit	55
5.2	Für Voruntersuchungen genutzter Testtunnel	44	5.9.2.4	Sprachverständlichkeit im Pkw	55
5.3	Messdurchführungen	44	6	Wesentliche Kennparameter für SLASS-Installationen	56
5.4	Einzel-Untersuchung verschiedener Lautsprechertypen	44	6.1	Vorbemerkungen	56
5.4.1	Untersuchte Lautsprechertypen	44	6.2	Notwendige Daten und Voruntersuchungen	56
5.4.1.1	Typ „Trichter“	44	6.3	Lautsprecher-Abstrahlwinkel und -Bündelung	56
5.4.1.2	Typ „Tunnelhorn“	44	6.4	Lautsprecher-Rückwärtsdämpfungen	57
5.4.1.3	Typ „Grenzflächenhorn“	45	6.5	Lautsprecherleistungen und Lautstärkepegel	57
5.4.2	Vergleich der Rückwärtsdämpfungen	45	6.6	Übertragungsbandbreite und Amplitudenfrequenzgänge	57
5.4.3	Schallpegelabfall über Entfernung	46	6.7	Lautsprecherpositionen und -ausrichtungen	57
5.4.4	Frequenzgänge	46	6.8	Minimierung von Schallfeld-Ausbreitungs- und Reflexionsstörungen	58
5.4.5	Darstellung der Sprachverständlichkeit und des Pegels über der Entfernung	48			

6.9	Signalverzögerungen	58
6.10	Zentralenaufbau und Überwachung	58
6.11	Leitungsnetz	59
6.12	Sprachkonserven und Sprechertraining	59
6.13	Bedienung	60
6.14	Lautsprecheranlagen-Parametrierungen	60
6.15	Wartungsarbeiten	61
7	Zusammenfassung	62
8	Weiterbestehende Fragestellungen	64
8.1	Lautstärke-Pegelanpassungen	64
Literatur	64

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Bereits in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) aus dem Jahr 1985 werden Lautsprecher als Möglichkeit vorgesehen, das Verhalten der Tunnelnutzer mit beeinflussen zu können. Die Bedeutung einer Notfallalarmierung bzw. von Notfalldurchsagen für die Selbstrettung der Nutzer wurde nicht zuletzt durch mehrere schwere Unglücke in Straßentunneln nochmals unterstrichen. Die Wirksamkeit dieser Anlagen bezüglich der gezielten Verhaltenslenkung von Personen hängt jedoch entscheidend von der Verständlichkeit der übermittelten Informationen ab. Bei der Auslegung der Anlagen ist somit eine höchstmögliche Verständlichkeit der übermittelten Sprachinformationen anzustreben.

Basierend auf den Vorgaben der RABT werden derzeit Lautsprecherinstallationen in Straßentunneln mit einem nicht unerheblichen Investitionsaufwand vorgenommen. Die RABT enthält dabei nur wenige Angaben über die zu erzielende Beschallungsqualität der Anlage sowie die herrschenden Bedingungen von Nachhall und Störschall. Um eine optimale Schallverteilung im Tunnel bei richtiger Positionierung der Beschallungssysteme zu erzielen, ist gemäß den RABT vor der Installation eine schalltechnische Untersuchung durchzuführen. Dies erfolgt objektspezifisch mittels Einzelgutachten.

Die Auslegung von Beschallungssystemen für Straßentunnel geschieht bisher häufig nur nach „Gefühl und Erfahrung“ und mit dem Ziel, Sammelrufe zu ermöglichen. Auch die Einbeziehung von Erfahrungen der Hersteller von Lautsprechersystemen ist nur begrenzt hilfreich, da sich diese mehr auf die Leistungsfähigkeit ihrer Systeme, weniger jedoch auf Möglichkeiten und Grenzen einer aus ihren Systemen zusammengesetzten Beschallungsanlage unter den Bedingungen in einem Straßentunnel beziehen. Zu überprüfen ist nach den RABT lediglich der erzielbare Schalldruckpegel, wodurch die Verständlichkeit einer Sprachalarmierung jedoch nicht gewährleistet werden kann.

Untersuchungen in den vom Forschungsnehmer betreuten Projekten zeigen, dass die Auslegung für Sammelrufe in den wenigsten Tunneln eine akzeptable Verständlichkeit zulässt. Aufgrund fehlender objektivierbarer Zielvorgaben für die zu erreichende Verständlichkeit kann der Nutzen der Installationen für den Tunnelnutzer im Ereignisfall daher nicht

genau beziffert werden. Dies hat in Einzelfällen schon zu der Diskussion geführt, ob der Einbau von Beschallungsanlagen in Tunneln im Hinblick auf ihren nur schwer zu belegenden Nutzen für den Tunnelnutzer nicht entbehrlich sein könnte.

1.2 Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung weitergehender Anforderungen an elektroakustische Anlagen in Straßentunneln unter Beachtung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Hierzu sind allgemeingültige Kriterien zu definieren, anhand derer eine elektroakustische Beschallungsanlage für Tunnel und bestimmte Ereignisszenarien ausgelegt werden kann, ohne dass aufwändige schalltechnische Einzeluntersuchungen durchgeführt werden müssen. Die Einflüsse wesentlicher Tunnelparameter sind zu erfassen, ihre Auswirkungen auf die Gestaltung und Auslegung der Beschallungsanlage sind im Hinblick auf die erzielbare Verständlichkeit ausreichend genau, aber trotzdem in der Praxis leicht nachvollziehbar zu beschreiben. Für den Tunnelnutzer ist sicherzustellen, dass er im Ereignisfall eine frühzeitige und verständliche Information erhält, um durch richtiges Verhalten insbesondere im Brandfall seine Selbstrettungsmöglichkeiten weiter zu verbessern.

Hierzu dienen folgende Zielsetzungen:

- Identifikation charakteristischer Einflussgrößen für eine optimierte Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit akustischer Signalisierungen und Durchsagen in Straßentunneln; Angaben über Nachhallzeiten, spezifische Schalleitungseigenschaften und Störgeräusche.
- Ableitung hieraus resultierender realisierbarer Anforderungen an die schalltechnische Auslegung von Tunneln sowie Tunnel-Beschallungsanlagen; Objektivierung einer mindestens zu erreichenden Sprachverständlichkeit.
- Zusammenstellung von Grundanforderungen an elektroakustische Beschallungsanlagen in Abhängigkeit von der akustischen Klassifizierung typischer Tunnelformen sowie Ereignisszenarien; Anordnung von Lautsprechersystemen, Signalprozessing.
- Erläuterung, wie von den Grundanforderungen abweichende objektspezifische Anforderungen Berücksichtigung finden können.

- Aufstellung von Empfehlungen zur Fortschreibung des Regelwerkes.

1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Wie oben bereits dargelegt, werden derzeit Beschallungsanlagen objektspezifisch in Form von Einzelgutachten dimensioniert. Durch die im Vorhaben erarbeiteten allgemeinen Anforderungen an elektroakustische Beschallungsanlagen wird eine deutliche Vereinfachung der Planung und Auslegung bei gleichzeitiger Optimierung von Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit erreicht. Hierdurch wird von einer deutlichen Verringerung des Aufwandes für objektspezifische Tunneluntersuchungen ausgegangen.

Im Hinblick auf zukünftig angestrebte zielgerichtete Ausschreibungen für elektroakustische Beschallungsanlagen wird durch die Forschungsergebnisse eine signifikante Kostensenkung infolge eines reduzierten Planungsaufwandes erwartet.

Durch die beabsichtigte Verwendung der Forschungsergebnisse als Grundlage weiterer Tunnelprojekte stehen abgesicherte Annahmen zu akustischen Randbedingungen sowie taugliche Beschallungskonzepte bereit. Mögliche Fehlplanungen bzw. Nachbesserungen könnten somit minimiert werden.

Die wissenschaftliche Bedeutung ist im Bereich der Beschreibung von Schallausbreitung in besonders langen Flachräumen mit engen Querschnitten zu sehen, obwohl über die Schallausbreitung in Flachräumen im Allgemeinen als auch über die Schallausbreitung in Tunneln im Speziellen mehrere Arbeiten existieren.

Die im Vorhaben abzuarbeitende Thematik umfasst dabei weniger die wissenschaftliche Beschreibung der Schallausbreitung, die jedoch als wichtige Randbedingung für die Dimensionierung elektroakustischer Einrichtungen herangezogen wird, sondern vielmehr die Entwicklung eines praktisch handhabbaren Konzepts für eine technische Lösung zur Übertragung verständlicher Durchsagen in Verkehrstunneln. Dabei steht eine elektroakustische Lösung unter Berücksichtigung der vorhandenen gebäudeakustischen Bedingungen im Fokus.

Die technische Bedeutung wird im Bereich der Entwicklung von besonders geeigneten Beschallungs-

konzepten für bestimmte Tunnelkategorien gesehen. In Abhängigkeit von der Definition weitergehender Anforderungen an elektroakustische Anlagen in Straßentunneln und den derzeit am Markt verfügbaren Produkten werden Impulse an die Industrie erwartet, die in weiter spezialisierten und damit besser geeigneten Produkten ihren Niederschlag finden könnten. Auch hinsichtlich der Prognose bzw. der Messung der Sprachverständlichkeit werden Einflüsse auf die Messtechnik sowie auch ein gewisses wissenschaftliches Interesse erwartet.

1.4 Ablauf

Im ersten Arbeitsschritt wurden die theoretischen Grundlagen sowie bereits veröffentlichte theoretische und praktische Ergebnisse anderer Forschungen und Untersuchungen zum Thema Tunnelbeschallungen mit den Erkenntnissen aus bereits vorliegenden Beratungs- und Planungs-Projekten des Forschungsnehmers abgeglichen.

Die Ergebnisse aus Untersuchungen in 19 Tunneln wurden kategorisiert und gegenübergestellt. Ziel war die Ableitung allgemeingültiger Zusammenhänge, die als Randbedingungen für die Dimensionierung geeigneter elektroakustischer Anlagen herangezogen werden können.

In einer ersten vergleichenden Untersuchung (Tunnel Nr. 11) wurde das im Tunnel installierte Beschallungssystem, welches den seinerzeitigen Stand der Technik im Hinblick auf gängige Tunnelbeschallungskonzepte darstellte, neuen Konzepten in Form von prinzipiellen Messaufbauten gegenübergestellt. Erste vorläufige Ergebnisse ließen darauf schließen, dass unter Verwendung neuer und im Hinblick auf die akustischen Gegebenheiten in Straßentunneln optimierter Lautsprechersysteme eine synchronisierte Längsbeschallung die Realisierung eines Sammelrufs im Tunnel mit ausreichender Sprachverständlichkeit ermöglicht.

Dieses Konzept, im Folgenden als SLASS-Beschallung (synchronised longitudinal announcement speaker system) bezeichnet, wurde mit theoretischen und messtechnischen Erkenntnissen belegt.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden kurzfristig einige Tunnel mit dem oben erwähnten Beschallungssystem ausgestattet. Hierdurch wurde es möglich, im Rahmen dieses Forschungsvorhaben messtechnische Untersuchungen in Tunneln mit einer SLASS-Beschallung durchzuführen. Aus den Er-

kenntnissen können nunmehr die Zielvorgaben für die Beurteilung von Beschallungsanlagen in Tunneln sowie allgemeine Regeln für deren Errichtung abgeleitet werden.

2 Für Tunnelanlagen relevante raum- und elektroakustische Grundbegriffe

In diesem Kapitel werden zugrunde liegende raum- und elektroakustische Begriffe und Prinzipien kurz erläutert und mit Hinweisen auf weiterführende Literatur belegt.

2.1 Sprachverständlichkeit

Das zentrale Merkmal der Sprachqualität ist die Sprachverständlichkeit. Das erreichte Maß des Verstehens gesprochener Sprache durch die Rezipienten ist das entscheidende Kriterium bei der (elektroakustischen) Sprachübertragung.

Für die Belange der Sprachübertragung in Tunnelanlagen haben andere Qualitätsmerkmale wie Natürlichkeit, Angenehmheit des Klangs und Höreranstrengung keine Bedeutung.

Die Maximierung von Sprachverständlichkeit ist ein zentrales Kriterium bei der Auslegung von Beschallungsanlagen (JACOB 2001, MAPP 1997, HARRISON 2003).

Die Benennung des Maßes der Sprachverständlichkeit kann spontan und subjektiv in einer realen Übertragungssituation durch einzelne Versuchspersonen erfolgen. Solche subjektiven Bewertungen führen zu einer direkten Aussage über die erreichte Verständlichkeit. Sie stellen bei einer ausreichend großen Anzahl von Befragten, geeigneter statistischer Auswertung und präziser Berücksichtigung von Randbedingungen (Störschall, Nachhallsituation, Pegel, Sprachmaterial etc.) die genaueste Art der Bestimmung dar – sind allerdings mit hohem Aufwand verbunden.

In der Praxis werden verschiedene subjektive Messverfahren mit Bewertungsskalen, Paarvergleichen und Größenschätzungen verwendet, die auch nach dem Einsatz von Reimtests, Einsilbern, mehrsilbigen Wörtern oder ganzen Sätzen unterschieden werden können (LAZARUS/SUST 2007, S. 437 ff.).

Eine viel einfacher handhabbare Ermittlung der Sprachverständlichkeit lässt sich realisieren über deren Vorhersage mittels Berechnung von so genannten Sprachindizes. Mit diesem objektiven Verfahren erhält man auf relativ leicht handhabbare Weise weitgehend reproduzierbare Angaben.

2.1.1 Berechnungs- und Messverfahren für die Sprachverständlichkeit: STI und andere

Die Bestimmung der Sprachverständlichkeit wird in beschallungstechnischen Projekten in der Regel durch Berechnung aus akustischen Parametern beziehungsweise durch so genannte objektive schalltechnische Messungen vorgenommen.

Alle Verfahren zur Sprachverständlichkeitsvorhersage werten akustische beziehungsweise übertragungstechnische Einflussgrößen aus, die die Sprachverständlichkeit des Nutzsignals stören. Sowohl die der Bewertung als auch die der Auswertung zugrunde liegenden Algorithmen unterscheiden sich bei den jeweiligen Verfahren voneinander.

Von den verschiedenen Verfahren gilt derzeit die Ermittlung des Sprachübertragungsindex (Speech Transmission Index – STI) als sehr genau (LAZARUS/SUST 2007, S. 303).

Das Verfahren wurde von HOUTGAST und STEENEKEN (HOUTGAST 1973) entwickelt und wertet nicht allein Langzeitspektren der Signale, sondern deren Hüllkurve aus. Das Verfahren ermittelt durch die Messung der Modulations-Übertragungsfunktionen (MTF) unmittelbar die Einflüsse aller auftretenden Störgrößen. Koeffizienten für Stimmfrequenz- und sprecherische Artikulations- und Modulationsfrequenzgruppen führen zu einer sprach- und ohrbezogenen Bewertungsfunktion.

Die Ergebnisse des Verfahrens sind Einzahl-Werte zwischen $STI = 0,0$ und $STI = 1,0$, wobei der Wert $1,0$ eine perfekte Übertragung ohne Verluste und Beeinträchtigungen beschreibt.

Das Verfahren ist normiert mit der DIN EN (IEC) 60268-16. Seine Anwendung wird neben anderen auch in der DIN EN 60849 für Elektroakustische Notfallwarnsysteme vorgeschlagen.

Andere bekannte Verfahren sind:

- SNR (Signal-to-Noise-Ratio, A-bewerteter Signal-Geräusch-Abstand): ein Verfahren, das das frequenzbewertete Verhältnis (A-Bewertung)

zwischen Sprachsignal und Störpegel als Kriterium heranzieht.

- AI (Artikulationsindex), SII (Speech Intelligibility Index; Sprachverständlichkeitsindex): Diese Verfahren ermitteln und bewerten ebenfalls den Störgeräuschabstand der Sprache zum Umgebungsgeschall, anders als beim SNR werden aber bandbezogen diskrete Bewertungen vorgenommen. Der AI wurde bereits 1947 durch FRENCH & STEINBERG bekannt gemacht, der SII enthält gewisse Verbesserungen des gleichen Prinzips und wurde 10 bis 15 Jahre später eingeführt.

Nachteile der SNR-, AI- und SII-Verfahren sind, dass jeweils nur Störungen durch Geräusche, nicht aber durch den Nachhall berücksichtigt werden. Hierdurch sind sie für Messungen z. B. im Bereich von Telefonanlagen etc. einsetzbar. Wegen der Vernachlässigung von raumakustischen Einflüssen werden sie jedoch für die Bewertung von Verständlichkeitsverhältnissen in Tunneln als nicht geeignet angesehen.

- ALCons (Articulation Loss of Consonants; Artikulationsverlust von Konsonanten): Hier werden vorrangig die Einflüsse des Raumes auf die Verständlichkeit berücksichtigt. Die Bewertungsgrößen sind die gemessene Nachhallzeit, der Abstand von der Schallquelle und die Anzahl der Schallquellen. Ergänzende Algorithmen beschreiben auch zusätzlich die Einflüsse von Störlärmpegeln. Es handelt sich nicht um ein unmittelbares Messverfahren, sondern um eine Methode zur Vorherbestimmung von Verständlichkeit in der Planungsphase. Über empirische Untersuchungen ließ sich eine Korrelation zu den Ergebnissen anderer Verfahren herstellen.

Beim ALCons liegt der Wertebereich zwischen ALCons = 0 % und ALCons = 100 %, wobei der Prozentwert 0 % eine perfekte Übertragung ohne Verluste und Beeinträchtigungen beschreibt. Er wird im Wesentlichen aus dem Verhältnis zwischen Direkt- und Diffusschall ermittelt.

Die Verfahren zur Sprachverständlichkeitsmessung führen unter unterschiedlichen Randbedingungen systembedingt zu abweichenden Ergebnissen, dennoch sind z. B. in der ISO 9921, ISO/TR 4870 und DIN EN 60849 Graphen zur Umrechnung der Werte ineinander veröffentlicht, sowie auch zur

Überführung in entsprechende Verständlichkeitsbewertungen durch subjektive Reim- und Satztests.

Die beschriebenen SNR-, AI und SII-Methoden sind wegen ihrer Vernachlässigung von raumakustischen Einflüssen auf Tunnel nicht anwendbar. Das ALCons-Verfahren hingegen ist nur bei Gültigkeit von klassischen raumakustisch-statistischen Modellen anwendbar, was ebenfalls auf Tunnel nicht zutrifft.

Die Auswahl für ein Messverfahren in diesem Vorhaben fiel daher auf die STI-Methode.

Die Vorteile der STI-Methode liegen in der Ermittlung und Auswertung der tatsächlichen Beeinträchtigungen der Hüllkurven von Nutzsignalen sowohl durch reale raumakustische Einflüsse als auch durch Umgebungsgeschallpegel. Dadurch können auch unter den akustisch irregulären Tunnelbedingungen, die noch nicht durch statistische Modelle beschrieben werden konnten, eine hohe Relevanz und Genauigkeit der Messungen erwartet werden.

Die STI-Messung und Bewertung wurden vom Forschungsnehmer bereits langjährig in seinen Beschallungsprojekten verwendet und haben sich durch ihre Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bewährt. Sie wurde, auch in allen bereits durchgeführten Tunnelprojekten erfolgreich eingesetzt.

Die Zuordnungen zu verbal beschreibbaren Verständlichkeitskategorien kann gemäß Tabelle 1 beurteilt werden (Angaben in STI-Indizes sowie dem jeweils empirisch zuordenbaren Cons-Wert in Prozent).

STI = 1,00 ... 0,74 ALCons = 0 % ... 3 %	exzellente Verständlichkeit
STI < 0,74 ... 0,60 ALCons ≥ 3 % ... 7 %	gute Verständlichkeit
STI < 0,60 ... 0,52 ALCons > 7 % ... 10 %	befriedigende Verständlichkeit
STI < 0,52 ... 0,45 ALCons > 10 % ... 15 %	ausreichende Verständlichkeit
STI < 0,45 ... 0,30 ALCons > 15 % ... 30 %	mangelhafte Verständlichkeit (ggf. noch hinreichend für sehr deutlich artikulierte primitive Informationen)
STI < 0,30 ALCons > 30 %	ungenügende Verständlichkeit (erheblich gestört, weitgehend unverständlich)

Tab. 1: Verständlichkeitsskala für Sprachverständlichkeitsindex STI und Artikulationsverlust von Konsonanten ALCons

2.1.2 Abhängigkeiten der Sprachverständlichkeit

Die zu erwartende Sprachverständlichkeit ist vorrangig von folgenden Einflussgrößen abhängig:

akustisch oder übertragungstechnisch

- vom Verhältnis des Sprach-Nutzsignalpegels zu den Störgeräuschen (Signal-Geräuschabstand S/N), auch unter Berücksichtigung der jeweiligen Frequenzspektren und zeitlichen Verläufe,
- von den linearen und nichtlinearen Verzerrungen des Übertragungsweges (Bandbreite, Linearität, Klirverzerrungen des Sprachsignals),
- von der Nachhallzeit des Raumes (beziehungsweise hier: der Tunnelröhre) (RT_{60}),
- vom Verhältnis des Direktschalldruckpegels zum Nachhallpegel (D/R),
- von frühen Reflexionsanteilen, die die Deutlichkeit des Direktschalls (D) unmittelbar unterstützen und diesem zugeordnet werden können (konstruktive frühe Reflexionen),
- von späten Reflexionsanteilen, die als Echoeffekte auftreten (destruktive späte Reflexionen mit besonderen zeitlichen Energiekonzentrationen),
- in allen Fällen auch abhängig vom speziellen Standort des Hörers (hier insbesondere: unmittelbar im Tunnelraum oder innerhalb des Fahrzeugs);

sprachlich und sprecherisch

- von der Sprechweise (Deutlichkeit, Artikulation, Betonungen, Sprechtempo etc.) der gesprochenen Informationen,
- von der Komplexität der gesprochenen Sprache in Zusammenhang mit der Sprachkompetenz des Hörers (Mutter- oder Zweitsprachler, Bildungsgrad),
- vom physischen Hörvermögen des Hörers (normal hörend oder schwerhörig),

ausführliche Betrachtungen hierzu siehe LAZARUS/SUST 2007.

Alle diese genannten Parameter der Sprachverständlichkeit sind unter dem Aspekt von Verkehrs-

tunneln die zentralen Gesichtspunkte dieses Forschungsvorhabens (das sich vorrangig auf die Übertragungstechnischen und akustischen Aspekte bezieht) und auch des parallel laufenden Forschungsprojekts „Verhaltensanweisungen bei Not-situationen in Straßentunneln“ (Schwerpunkt dort auf den sprachlichen, sprecherischen, psychoakustischen und psychologischen Aspekten) (FÄRBER & FÄRBER 2009).

Die genannten Parameter waren mit dem Ziel der Optimierung des Verständlichkeitspotenzials von Lautsprecheranlagen in Verkehrstunneln zu untersuchen.

2.1.3 Besonderheiten und Beschränkungen des STI-Messverfahrens

2.1.3.1 Maskierung

Mit der Ausgabe Januar 2004 wurde die Norm DIN EN 60268-16 „Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex“ um eine zusätzliche Eigenschaft erweitert.

Der zu verwendende Algorithmus beinhaltet jetzt die Funktion der Bewertung der „Maskierung“ von höheren Frequenzen durch tiefere Frequenzgruppen.

Der Maskierungsfaktor ist für Tunnelanwendungen von besonderer Bedeutung. Diese psychoakustische Eigenheit tritt bei sehr hohen Lautstärkepegeln in relevanter Weise auf: Etwa oberhalb von Pegeln $L_p > 90$ dB-SPL, die in Tunnelbeschallungen realisiert werden müssen, sinkt die Sprachverständlichkeit unter sonst gleich bleibenden Bedingungen ab.

Leistet eine Beschallungstechnik eine ausreichende Verständlichkeit von z. B. $STI = 0,50$, die bei einem moderaten Lautstärkepegel von 90 dB-SPL festgestellt wird, so wird demnach bei dem unter Verkehr notwendigen Pegel von 105 dB-SPL eine geringere Verständlichkeit nur von etwa $STI \approx 0,45$ erreicht. Der verwendete Gewichtungsfaktor weist also einen um etwa 10 % verminderten STI-Wert aus.

Diese Differenz deckt sich auch mit den subjektiven Erfahrungen, die im Rahmen dieses Vorhabens unmittelbar bei Probebeschallungen gewonnen werden konnten. Von Anwesenden wurden während der Beschallung mit extrem hohen Sprachpegeln

eher noch erheblichere Reduktionen der Verständlichkeit beschrieben, als sie durch das STI-Messverfahren nach DIN EN 60268-16 ausgewiesen wird.

Das heißt für die messtechnische Praxis, dass der verwendete Messpegel bei STI-Messungen zwingend präzise dokumentiert werden muss.

Zur Vergleichbarkeit von älteren und heutigen STI-Messungen sowie zur Konsistenz zwischen unterschiedlichen Messsystemen (die nur bei einigen Fabrikaten diese zusätzlichen neueren Bewertungskoeffizienten der Norm auch umgesetzt haben) empfiehlt es sich, Messungen bei Pegeln $L_p \leq 90$ dB-SPL durchzuführen.

Es bedeutet aber zugleich für die Auswertung von Messergebnissen, dass auf solche Art ermittelte STI-Werte nachträglich korrigiert werden müssen, wenn die zu erwartende Situation bei Maximalpegelbeschallung mit 105 dB eruiert werden muss!

Damit ergeben sich in Tunneln streng genommen pro Messpunkt 2 STI-Werte:

STI (90 dB-A) = Wert,

STI (105 dB-A) = Wert x ~ 0,90.

Da ein Großteil der Messungen noch nach dem alten Verfahren ohne Berücksichtigung der Maskierung durch Seitenbänder vorliegt, wurden die weiteren Messungen wegen der Vergleichbarkeit ebenfalls ohne Berücksichtigung der Maskierung durchgeführt.

2.1.3.2 Abhängigkeit von einem linearen Frequenzgang

Das STI-Verfahren gemäß DIN 60268-16 ermittelt im Rahmen der Messung wie oben beschrieben eine Matrize diskreter Modulations-Übertragungswerte (MTF-Matrize), die einzeln und unabhängig voneinander mit bestimmten frequenzabhängigen Koeffizienten bezüglich ihrer gehörmäßigen Bedeutung gewichtet und dann aufaddiert und gemittelt werden. Dabei lässt das Verfahren die möglichen pegelmäßigen Differenzen zwischen den einzelnen Frequenzgruppen außer Acht. Das Verfahren setzt stillschweigend voraus, dass alle diese Frequenzgruppen von dem „Channel under Test“ linear und gleichmäßig übertragen werden, sodass lediglich ermittelt wird, welche relativen MTF-Reduktionen innerhalb eines Bandes vorhanden sind. Die Absolutwerte der Bandpegel bleiben außerhalb der Bewertung.

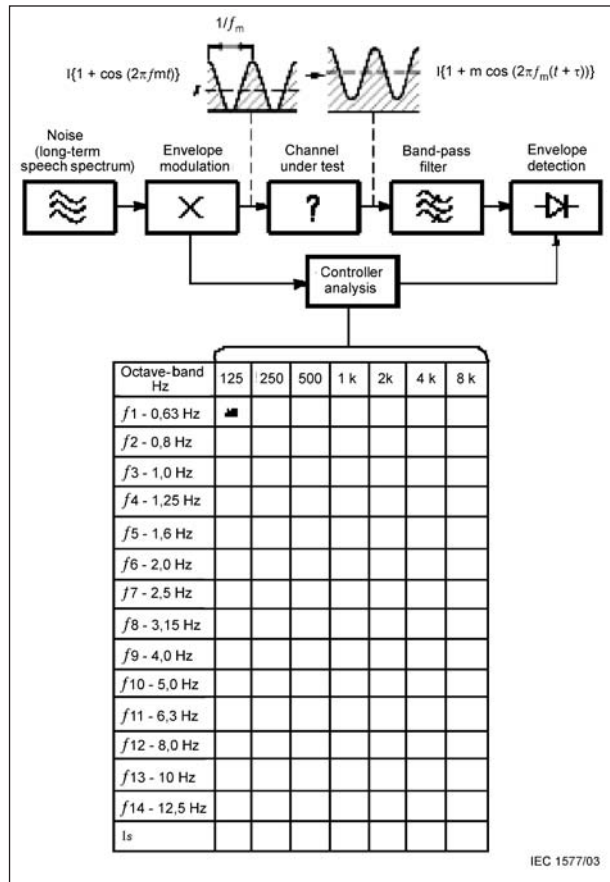


Bild 1: MTF-Matrizenauswertung gemäß Norm zur STI-Errechnung

Das hat aber eine gravierende systematische Auswirkung auf die Relevanz und Vergleichbarkeit von STI-Zahlenwerten:

Die STI-Ergebnisse haben nur dann Gültigkeit, wenn die untersuchte Beschallungsanlage einen ausreichend linearen Frequenzgang besitzt!

Vor Durchführung von STI-Messungen muss also eine vollständige übertragene Bandbreite von 125 Hz bis 8 kHz sichergestellt sein (oder alternativ konsequente vollständige Bandbegrenzungen, z. B. mit kompletter Eliminierung des 125-Hz-Bandes bei steilflankiger Hochpassfilterung).

In allen Fällen stark unlinearer Frequenzgänge, wie sie in der Beschallungspraxis häufig anzutreffen sind, liefern STI-Werte irrelevante Ergebnisse, die dann immer ein deutlich zu optimistisches Bild von der Sprachverständlichkeit solcher Anlagen zeichnen.

Dieses Phänomen ist in der Tunnelbeschallung regelmäßig bei Beschallungen mit einfachen Horntrichterlautsprechern anzutreffen, deren stark 1-kHz- oder 2-kHz-überbetonte und eingeschränkte

Übertragungsfrequenzgänge immer deutlich schlechtere Verständlichkeiten besitzen als aus (fälschlich ermittelten) STI-Messungen herausgelesen wird.

Jede beliebige STI-Messung kann daher immer nur auf der Basis eines hinreichend linearen Amplitudenfrequenzganges der untersuchten Anlage als gültig betrachtet werden, der mindestens die Anforderung erfüllt:

- $B = 250 \text{ Hz} \dots 8.000 \text{ Hz}$
(Toleranzgrenzen $\pm 3 \text{ dB}$ innerhalb des Bandes, Abfall an den Bandgrenzen bis -10 dB zulässig).

Der Frequenzgang ist grundsätzlich den Messergebnissen beizufügen! Erst in Kombination beider Angaben, also eines Diagramms eines Amplitudenfrequenzganges und des Einzahlwerts des STI, kann eine korrekte Einschätzung der zu erwartenden Sprachverständlichkeit vorgenommen werden.

Da dieser Zusammenhang wenig bekannt ist, werden aber häufig ungültige irrelevante STI-Ergebnisse dokumentiert, die ein unrichtiges Bild vom tatsächlichen Verständlichkeitspotenzial einer Anlage liefern.

2.1.3.3 Systembedingte Unvollständigkeit der STI-Aussagekraft

Eine grundsätzliche und systematische Einschränkung nicht allein des STI, sondern eines jeden objektiven Verfahrens ist die Tatsache, dass ausschließlich der Übertragungskanal untersucht wird.

Im Übertragungskanal wird keine „Sprachverständlichkeit“ an sich ermittelt, denn dazu ist naturgemäß immer auch die subjektive Aussage einer verstehenden Person als „Informations Senke“ notwendig.

Eine objektive Messung ermittelt vielmehr einen Zahlenwert für das Potenzial zum Erzielen einer entsprechenden Verständlichkeit. Daher ist ein STI-Wert auch nicht „eine erzielte Sprachverständlichkeit“, sondern ein Sprachübertragungs-Index.

2.2 Reflexionen und Nachhall

Alle Schallereignisse, die nicht im ungestörten Freifeld auftreten, sind durch Reflexionen der ausgesandten Schallenergie an Raumbegrenzungsflächen gekennzeichnet.

Abhängig von der geometrischen Struktur und dem Schallabsorptionsverhalten der Oberflächenmate-

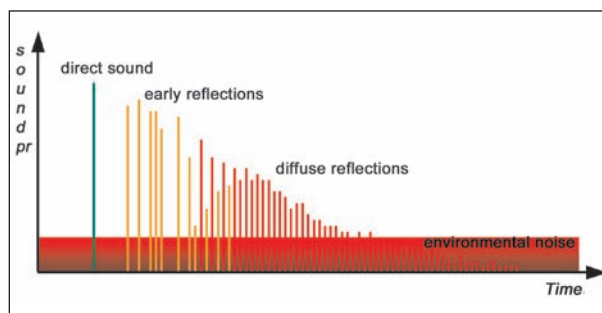


Bild 2: ETC Energie-Zeit-Diagramm, Zeitliche Struktur von Direktschall, frühen Reflexionen und Nachhall

rialien (Schallabsorptionskoeffizient α) treten dadurch am Empfängerort zeitlich nach dem Eintreffen des unreflektierten und ungestörten Direktschalls zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine Vielzahl von reflektierten Schallereignissen auf. Sie werden entsprechend ihrem zeitlichen Eintreffen nach kurzen Reflexionen, späten Reflexionen und dem Nachhall (der typischen dichten Folge einer großen Anzahl von späten Reflexionen) unterschieden (AHNERT/REICHARDT 1981).

Die vom jeweiligen Raum abhängigen Reflexionsmuster bestimmen zu wesentlichen Teilen die Verständlichkeit übertragener Sprachsignale. Reflektierte Anteile mit geringer zeitlicher Verzögerung zum Direktschall sind in der Regel nützlich für die Verständlichkeit, spätere Anteile und der Nachhall in der Regel eher schädlich.

Die Darstellung von Reflexionsstrukturen erfolgt in der Regel in Form von Impulsantworten oder aber logarithmierten Energie-Zeit-Diagrammen (Energy Time Curve; ETC). Sie lassen sich durch akustische Messung der Impulsantworten und in der Planung durch Simulation mittels Spiegelquellenverfahrens oder Ray-Tracing-Algorithmen bestimmen.

Das Nachhallfeld entsteht in „regulären“ Räumen innerhalb einer statistisch recht präzise bestimmbarer Verteilung der späteren Schallreflexionen mittlerer bis hoher Ordnung und hat diffusen Charakter.

Hier zeichnet sich das Nachhallfeld durch eine extreme Gleichmäßigkeit des Schallpegels an allen Orten aus, es ist im Idealfall vollkommen unabhängig vom Ort der Anregung.

Eine solche „reguläre“ Situation ist allerdings in Tunnelgeometrien nicht gegeben!

Die Nachhallzeit wird als RT_{60} -Wert in Sekunden angegeben und bezeichnet die Abfallzeit des Raumschallpegels um 60 dB nach Abschalten der anre-

genden Quelle. Sie kann messtechnisch oder durch Simulationen bestimmt werden. In regulären Räumen kann sie auch in guter Genauigkeit aus Rauminhalten V , Rauminnenfläche S und der mittleren Schallabsorption α_{mittel} nach bekannten Algorithmen berechnet werden (W. C. Sabinsche Nachhallformel und daraus abgeleitete Nachhallformeln).

Die Nachhallzeit ist in der bekannten ingenieurmäßigen Dimensionierung von Beschallungssystemen eine der wichtigsten Auslegungskriterien.

Auf Tunnelgeometrien sind die klassischen Berechnungsverfahren aber nicht hinreichend übertragbar!

Dort treten energetische und zeitliche Schallverteilungen auf, deren Strukturen mit vorhandenen mathematischen Modellen nicht verlässlich bestimmbar sind.

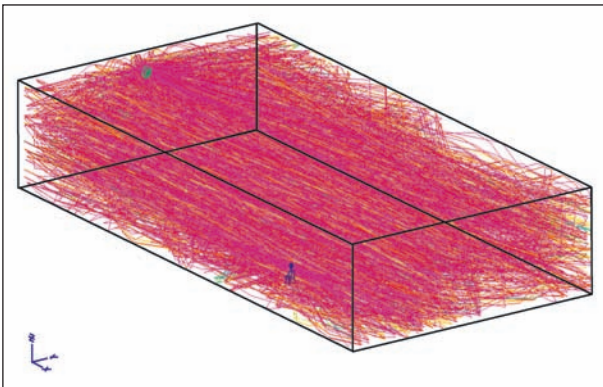


Bild 3: Simulierte Schallausbreitung im Raum (Strahlenmodell)

In vielen Fällen scheint zudem die Anfangs-Nachhallzeit (Early Decay Time) als Extrapolation des Anfangs-Abklingens auf -60 dB von erhöhter Bedeutung zu sein.

In Bezug auf den Störschall bestimmen die Anregungsenergien in Zusammenhang mit der Nachhallzeit (beziehungsweise den Reflexionseigenschaften der Rauminnenflächen) die Gesamtenergie des Störschallfelds, das sich wie der Nutzschall aus direkten und reflektierten Störschallenergieanteilen zusammensetzt.

2.3 Bedingungen der Schallausbreitung im Tunnel

2.3.1 1/r-Gesetz

Für den Schallpegelabfall des reinen Direktschalls über die Entfernung von der Schallquelle gelten im freien Schallfeld wie im Tunnel exakt die gleichen Gesetzmäßigkeiten:

Die Direktschallenergie nimmt im reziproken quadratischen Verhältnis mit der Entfernung ab (proportional $1/r^2$), das bedeutet für den Schalldruckverlauf das lineare reziproke Verhältnis:

Es gilt für den Direktschall unmittelbar das „1/r-Gesetz“, logarithmisch ausgedrückt also die bekannte Pegelabnahme um 6 dB mit jeder Verdoppelung.

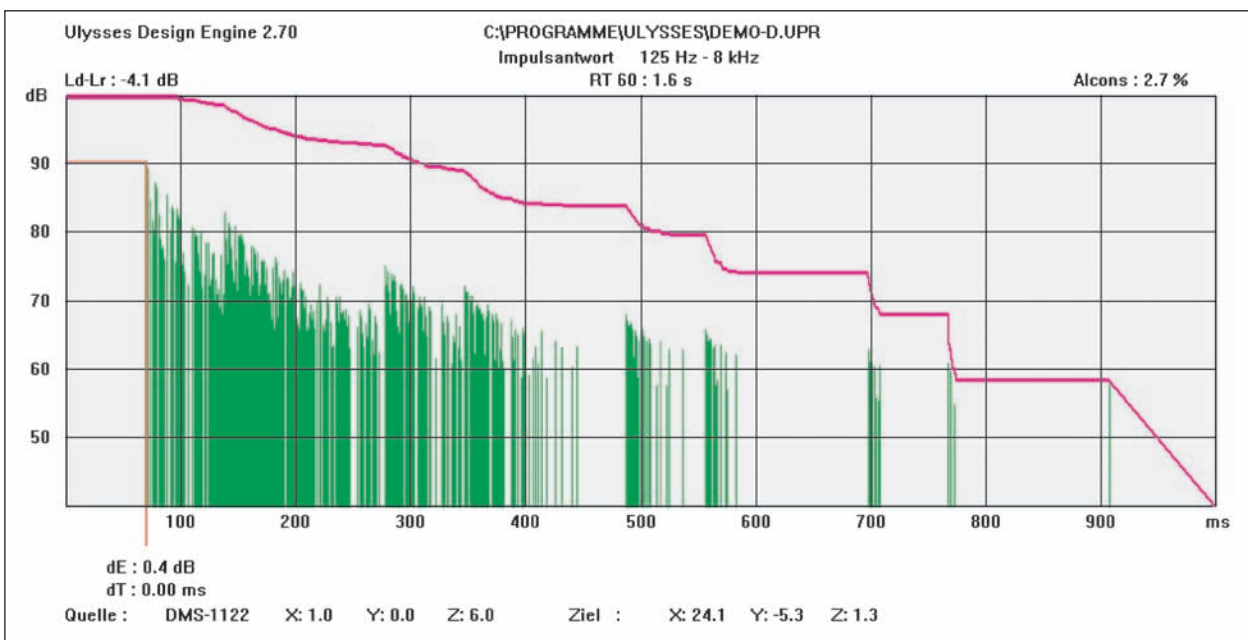


Bild 4: Simulierte Reflexionsfolge für einen Empfängerort (ETC – Energy Time Curve)

2.3.2 Reflexionsstrukturen in Tunneln bzw. „Langräumen“

Der von einer Schallquelle ausgesandte Schall gelangt entweder auf direktem Weg oder über Reflexionen zum Empfänger.

Durch die geometrischen Verhältnisse im Tunnel von kleiner Breite und Höhe zu großer Länge (Langraum) tritt eine Längsleitung auf.

Die Verhältnisse in Tunneln unterscheiden sich von typischen Standardräumen dadurch, dass die Reflexionsfolgen hier sehr „wohlgeordnet“ verlaufen (hier betrachtet unter Vernachlässigung von Diffusionseffekten):

Zuerst trifft (wie in allen Räumen) der Direktschall beim Empfänger ein, dann folgen mit geringer Verzögerung die Signalanteile, die vom Lautsprecher nur um wenige Grad außerhalb seiner Hauptachse abgestrahlt wurden und dann nach einmaliger Reflexion an der Wand eintreffen. Dann folgen in strenger Reihenfolge die 2-mal, 3-mal, ... n-mal reflektierten Anteile.

Sind Tunnelwand, Decke und Boden des Tunnels schallhart, wird dem reflektierten Schall hier jeweils nur sehr wenig Energie durch Absorption entzogen.

Der Pegel der reflektierten Schallanteile nimmt aber dennoch ab, nämlich nach der gleichen Gesetzmäßigkeit, die auch für den Direktschall gilt: Auch

für reflektierte Schallfelder gilt natürlich das $1/r$ - bzw. Abstandsgesetz.

Die nur einmal reflektierten Signale unterscheiden sich im Tunnel vom Direktschall wenig, denn

1. deren zurückgelegte Weglänge ist nur geringfügig größer,
2. sie wurden immer aus dem Hauptabstrahlbereich des Lautsprechers gesendet und haben deshalb ursprünglich annähernd gleiche spektrale Zusammensetzung.

Mit zunehmender Reflexionsordnung weicht die Beschaffenheit der Schallanteile immer stärker vom Direktschall ab, denn

3. deren zurückgelegte Weglänge und damit der Pegelabfall sind zunehmend größer,
4. deren spektrale Zusammensetzung ist durch ihren Ursprung aus den peripheren Abstrahlbereichen des Lautsprechers ggf. stärker eingeschränkt,
5. ihnen wurde durch wiederholte Reflexion an den Tunnelwänden durch die dort vorhandene – wenn auch jeweils nur geringe – Absorption in der Summe ein bedeutsamer Pegelanteil entzogen.

Diese wohlgeordnete zeitliche Folge von Reflexionen, deren Pegel und spektrale Qualität kontinuierlich abnehmen, macht im Tunnel einen Unterschied zu Standardräumen aus, in denen eine wesentlich chaotischere Zusammensetzung der Reflexionen auftritt

Durch die dort vorhandenen Rückwände wird Schall mehrfach hin- und zurückgeworfen, während

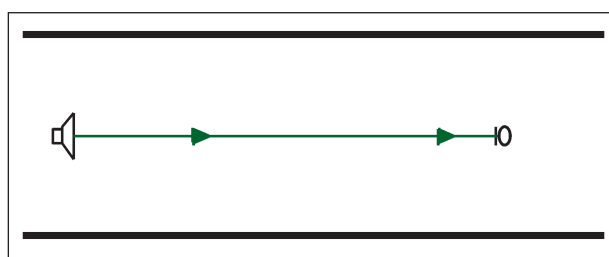


Bild 5: Reiner Direktschall (Strahlenmodell)

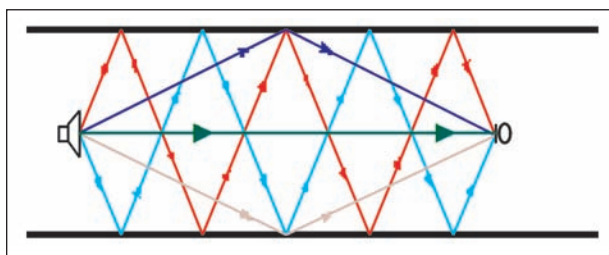


Bild 6: Prinzipielle Schallausbreitung mit Direktschall und Reflexionen. Dargestellt sind exemplarisch Direktschall, zwei Reflexionen 1. Ordnung und zwei Reflexionen 5. Ordnung

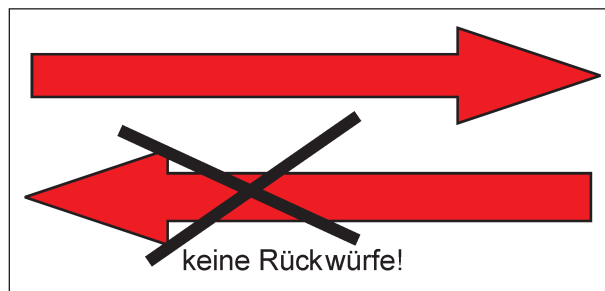


Bild 7: Gesamte Schallausbreitung nur in einer Tunnelrichtung („weg vom Lautsprecher“): wegen der offenen Röhre gibt es keine ausgeprägten Rückwürfe in Richtung des Lautsprechers (Ausnahmen: geometrische Besonderheiten wie Nischen, Versprünge etc.! Außerdem ist bei dieser Darstellung der auch auftretende Effekt diffuser Reflexionsanteile vernachlässigt!)

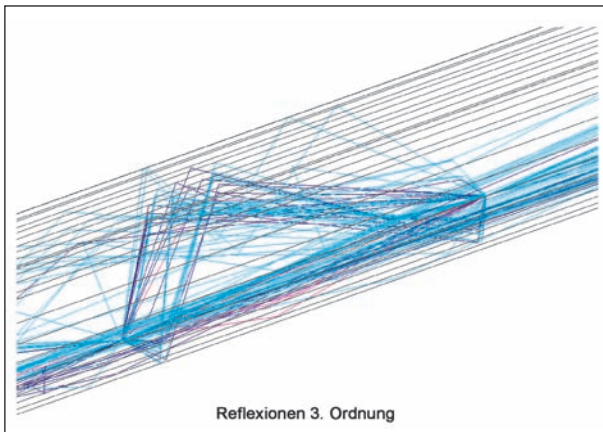


Bild 8: Beispiel für komplexe Reflexionspfade (Ausschnitt), berechnet mit Ulysses-Simulation

im Tunnel der Schall nach einmaligem Passieren der Empfängerposition in Richtung Tunnelöffnung „verschwindet“.

Mittels Simulationsprogrammen lassen sich Reflexionsfolgen und -pfade bis zu sehr hohen Ordnungen ermitteln (Bild 8).

Durch die beschriebenen Eigenschaften des Tunnels als Langraum kann eine streng von der Entfernung Schallquelle – Empfänger abhängige zeitliche Struktur der eintreffenden reflektierten Pegel (ETC) erwartet werden.

In einer Simulation lässt sich der Verlauf erkennen (s. Bild 9).

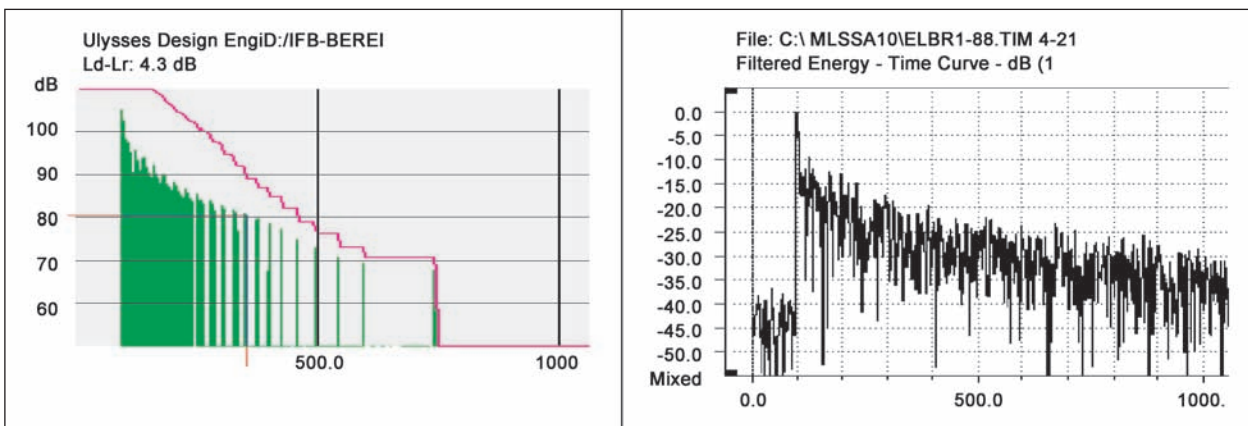


Bild 9: Simulierte und gemessene ETCs einer Tunnelschallausbreitung

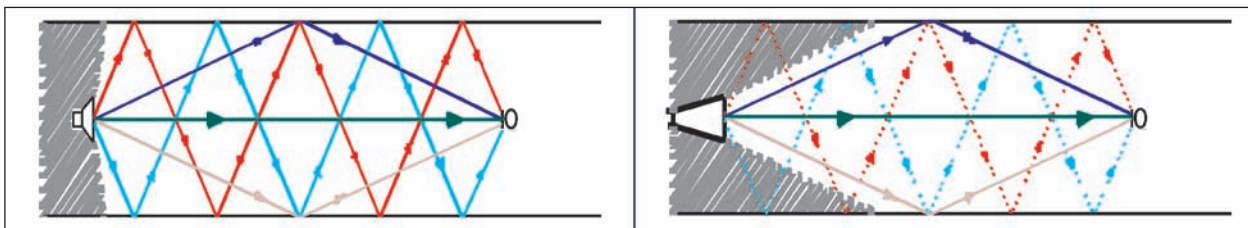


Bild 10: Reflexionen verursacht durch breit abstrahlenden Lautsprecher und engbündelnden Lautsprecher (Richtstrahler, rechts)

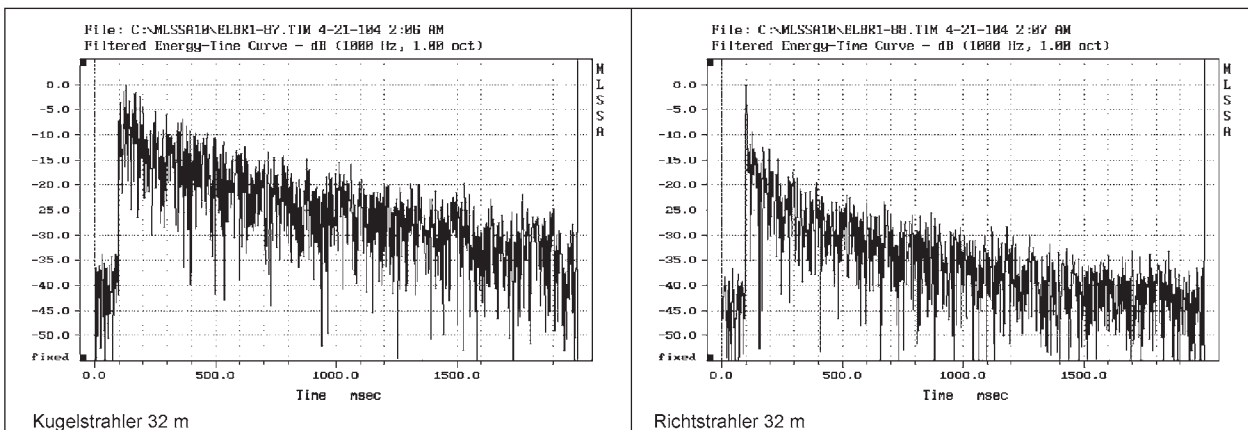


Bild 11: Gemessene Energie-Zeit-Diagramme Kugelstrahler und Richtstrahler

In der Konsequenz werden mit steigender Entfernung von der Quelle die Impulsantworten immer mehr an Schärfe verlieren – sie werden also zeitlich aufgeweitet, sozusagen „verschmiert“.

Diese „Verschmierung“ geht unmittelbar mit einem Undeutlich-Werden der enthaltenen Information einher.

Dieser Verwischungseffekt wird bei einer omnidirektionalen Schallquelle (Kugelstrahler) deutlich stärker ausgeprägt sein als bei einem längs der Mitteleachse des Tunnels abstrahlenden Richtstrahler.

Dieser Unterschied zwischen Kugel- und Richtstrahler lässt sich aus der Tatsache ableiten, dass der Richtstrahler im Gegensatz zur Kugel nur sehr wenig Schallenergie gegen die nahe liegenden Wände abstrahlt. Dadurch wird die Anzahl der an den Empfängerorten eintreffenden energiereichen Reflexionen erheblich reduziert (s. Bild 10).

Bei Messungen in Tunnelprojekten waren deutlich unterscheidbare Verläufe feststellbar (s. Bild 11).

2.3.3 Pegel des Nachhallfelds in Tunneln bzw. „Langräumen“

Von bekannten „regulären Verhältnissen“ und somit von der klassischen raumakustischen Theorie ist ein Tunnel mit seiner langgestreckten Geometrie weit entfernt. Ein Tunnel fällt in die Kategorie der Langräume, für die in der Literatur durchaus Angaben zu finden sind.

Abweichend von der klassischen Pegelberechnung des Nachhallfeldes nach Hopkins-Stryker (DAVIS + DAVIS 1989, S. 173 ff.) wird die Formel der Energieausbreitung mit einer delta-dB-Korrektur ergänzt (FASOLD/SONNTAG 1987, S. 113 f.; FASOLD/VERES 1998, S. 122 ff.).

Als Langräume werden Räume ab $L > 3 \times B$ bzw. $L > 3 \times H$ eingestuft.

Bei Tunneln ist aber zusätzlich zu beachten, dass es sich nicht nur um Langräume mit extremen Verhältnissen von Länge zu Breite bzw. Höhe handelt, sondern dass es auch keine geschlossenen Räume sind, da die Tunnelein- und -ausfahrten fehlenden Raumbegrenzungsflächen entsprechen.

Bisherige eigene Untersuchungen weisen auf zonal unterschiedliche Abfallstrukturen der Schalldruckpegel hin. In der Nähe von Schallquellen gelten annähernd noch Verhältnisse der klassischen

raumakustischen Theorie für diffus nachhallende Räume, in mittleren Entfernungen gibt es besondere Pegelabfall-Funktionen über der Entfernung mit mittleren Pegelreduktionen, in größeren Entfernungen scheint es Sprünge zu geben hin zu irregulär hohen Pegelabfällen, die über die Verhältnisse im freien Schallfeld hinausgehen. Diese Pegelverläufe über der Entfernung sind auch abhängig von der Abstrahlcharakteristik der Schallquelle.

2.4 Störschall (Lärm)

Zur Erzielung ausreichender Sprachverständlichkeit muss ein Sprachsignal im Verhältnis zu den Störgeräuschen einen erhöhten Pegel besitzen.

Um über eine zu erwartende Sprachverständlichkeit Aussagen treffen zu können, müssen also unbedingt auch immer die Eigenschaften des zu erwartenden Störschalls bekannt sein.

2.4.1 Störschallpegel

Störschallpegel treten in der Regel als Funktion des Verkehrsaufkommens in unterschiedlicher Stärke auf.

Sie können in Bezug auf ihre allgemeine Lautheit vereinfacht mit gehörberichtigten Bewertungskurven (A, C) über der Zeit erfasst werden, aussagekräftiger sind aber detailliertere Erfassungen in Oktav- und Terzbändern, um das Verhältnis zu den Pegelstrukturen der Nutzsignale herstellen zu können.

Die Angabe der Schalldruckwerte erfolgt in dB-SPL im Bereich ab der Wahrnehmungsschwelle (≈ 0 dB-SPL) bis zur Schmerzgrenze (≥ 130 dB-SPL).

In Tunneln müssen bei höherer Verkehrsbelastung Werte im Bereich oberhalb 90 dB-SPL erwartet werden, z. T. auch bis über 100 dB-SPL (s. FÄRBER & FÄRBER 2009).

2.4.2 Vereinfachte Berechnung von Störschall-Einflüssen auf die Verständlichkeit

Da Störgeräusche die erzielbare Verständlichkeit reduzieren, müssen deren Einflüsse bei der Auslegung der Beschallungsanlage berücksichtigt werden.

Mittels Näherungsberechnungen lassen sich diese Einflüsse recht praxisgerecht abschätzen.

So wird z. B. bei gleich lauten Nutz- und Störsignalen (also einem Nutz-/Störpegelverhältnis von $S/N = 0$ dB, vergleichbare Frequenzspektren vorausgesetzt) eine Minderung des Sprachübertragungsindex STI auf ungefähr die Hälfte (Faktor 0,5) des STI-Wertes im ruhigen Raum verursacht.

Die dem STI-Algorithmus zugrunde liegende Modulationstransfer-Formel lässt eine direkte entsprechende Umrechnung zu (DAVIS + DAVIS 1989, S. 250).

Das heißt, ein ohne merklichen Störpegel erzielbarer $STI = 0,70$ wird durch einen auftretenden Störpegel, der gleich groß dem Nutzsignal ist, halbiert auf einen $STI = 0,35$.

Es entspricht in vielen Fällen bewährter Praxis, einen $S/N = +10$ dB anzustreben.

Bei diesem Verhältnis ist das Nutzsignal 10 dB lauter als der Störlärm und es wird lediglich eine noch erträgliche Verschlechterung der Verständlichkeit (Minderung um rund 9 %) verursacht, ohne aber unrealistisch hohe Anforderungen an die Schallleistung der Lautsprecher zu stellen oder Zuhörer durch sehr hohe Pegel ungewünschtem Stress auszusetzen. (vgl. B & K Speech Transmission Meter Type 3361 Instruction Manual).

Im obigen Beispiel mit einem $STI = 0,70$ unter ideal ungestörten Verhältnissen würde also bei einem $S/N = 10$ dB ein $STI = 0,70 \cdot 0,91 = 0,64$ auftreten.

Während bei sehr hohen S/N -Verhältnissen praktisch keine Minderung der Verständlichkeit durch den Störschall auftritt, vermindern sich die erzielten

S/N (dB)	Erzielbarer STI
+15	0.97 x STI ohne Störschall
+10	0.91 x STI ohne Störschall
+7	0.83 x STI ohne Störschall
+5	0.76 x STI ohne Störschall
+3	0.67 x STI ohne Störschall
0	0.50 x STI ohne Störschall
-3	0.33 x STI ohne Störschall
-5	0.24 x STI ohne Störschall
-7	0.17 x STI ohne Störschall
-10	0.09 x STI ohne Störschall
-15	0.03 x STI ohne Störschall

Tab. 2: Einfluss des abnehmenden Signal-Geräuschabstandes (S/N) auf die Sprachverständlichkeit

Verständlichkeiten bei einem geringeren Verhältnis von Nutzsignal- zu Störsignalpegel $S/N = 15$ dB rechnerisch gemäß Tabelle 2.

2.4.3 Störschall-Spektren

Unterschiedliche Verursacher erzeugen Störgeräusche in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Die wesentlichen Störschalle in Tunnelanlagen werden von den (unterschiedlichen) Fahrzeugen und in veränderlichen Fahrsituationen erzeugt (Bergfahrt, Tal-fahrt mit beziehungsweise ohne Last, Fahrgeschwindigkeiten, Fahrbahnbeschaffenheit, Fahrzeuganzahl, ...) sowie von der Lüftungstechnik und Windgeräuschen. Die Frequenzspektren sollten bekannt sein, um das Maß der Verdeckungseffekte von Nutzschallen differenzierter beurteilen zu können.

Zu beachten sind auch frequenzabhängige Störschall-Dämpfungen, wie sie insbesondere innerhalb von Fahrzeugen auftreten.

2.5 Lautsprechereigenschaften

Die für die Auslegung von Lautsprecheranlagen wichtigsten technischen Lautsprecherparameter werden im Folgenden kurz benannt.

2.5.1 Bündelung Q, Abstrahlwinkel φ und Rückwärtsdämpfung A_R

Lautsprecher strahlen den Schall entweder als omnidirektionale Quellen kugelförmig und ungerichtet in alle Richtungen ($Q = 1$) oder aber mit einer oder mehreren Vorzugsrichtungen nur in eingegrenzte Bereiche auf der Kugeloberfläche.

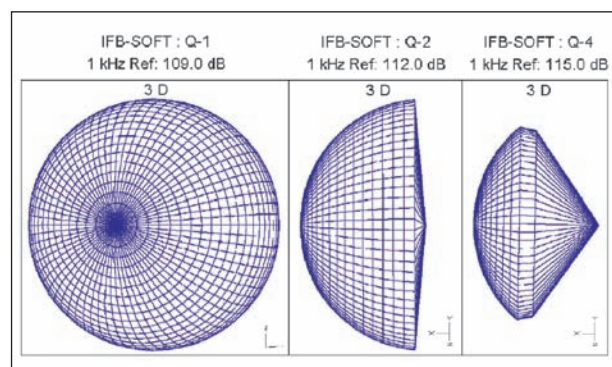


Bild 12: Beispiele für theoretische Bündelungen $Q = 1$, $Q = 2$, $Q = 4$

Je höher die Bündelung Q ($Q > 1$), desto mehr Schallenergie geht nur in den Vorzugsbereich gegenüber einer theoretisch ungerichteten Abstrahlung.

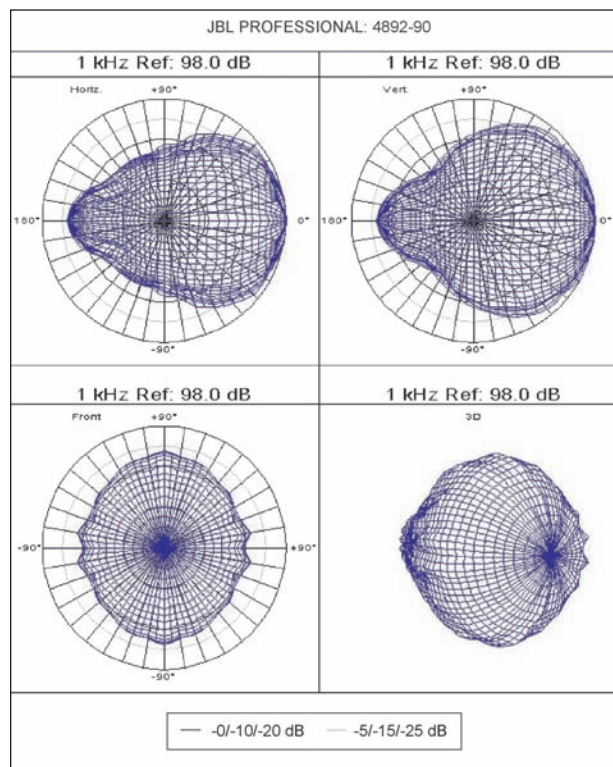


Bild 13: Beispiel für reales Abstrahlverhalten eines Lautsprechers in 3-D-Darstellung (hier 1 kHz)

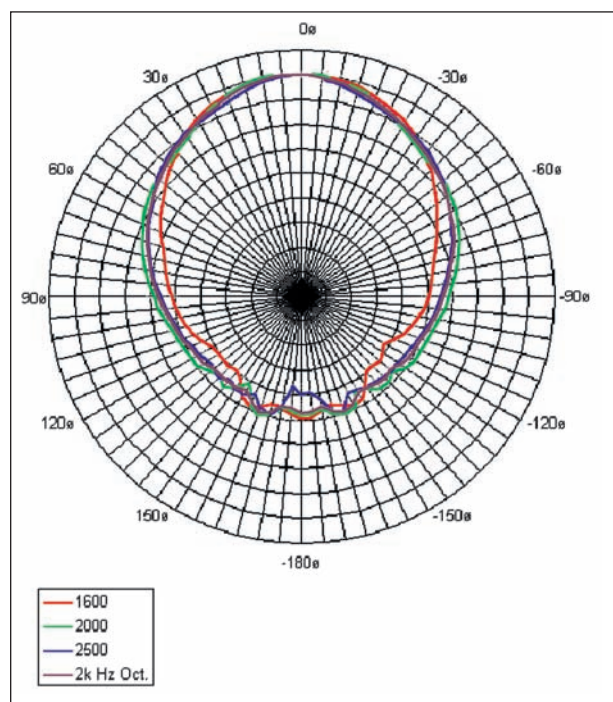


Bild 14: Ebenendarstellung des Abstrahlungsverhaltens für verschiedene Frequenzen

Der mit der Bündelung Q in Verbindung stehende Abstrahlwinkel f wird definitionsgemäß als der Winkelbereich bezeichnet, innerhalb dessen der Schalldruckpegel um nicht mehr als 6 dB gegenüber dem Maximum auf der Hauptstrahlachse abgefallen ist. Er wird in der Regel mit zwei Nominalwerten für die horizontale und vertikale Ebene benannt.

Ein weiteres Kriterium, das mit den beiden genannten Parametern verknüpft ist, ist die Rückwärtsdämpfung. Hier wird unmittelbar der Pegel des „nach hinten“ abgestrahlten Schalls zum Schalldruckpegel des gewünschten Schalls, des in Zielrichtung „nach vorn“ abgestrahlten, betrachtet:

$$A_R = L_{\text{Rück}} - L_{\text{Front}} \text{ [dB]}$$

Durch besondere akustische Phänomene der unterschiedlichen Lautsprecherbauarten bedingt, kann man nicht selbstverständlich davon ausgehen, dass ein Lautsprecher, der z. B. in nur sehr engem Winkel nach vorne abstrahlt, deshalb auch nach hinten praktisch nichts mehr sendet!

Daher ist diesem Parameter bei Beschallungskonzepten, wie der in diesem Bericht beschriebenen SLASS-Beschallung, hohe Beachtung zu schenken. Werte für die Rückwärtsdämpfung A_R sind zudem in Datenblättern zumeist nicht gesondert ausgewiesen, sondern müssen aus den Abstrahlungsdiagrammen ermittelt werden.

Bündelung, Abstrahlwinkel und Rückwärtsdämpfung sind bei Lautsprechern immer abhängig von der Frequenz – sie müssen in der Praxis also immer für verschiedene interessierende Frequenzbereiche gesondert betrachtet werden.

Typischerweise tendieren Lautsprecher mit abnehmender Frequenz zu ebenfalls abnehmender Bündelung und Rückwärtsdämpfung und sich aufweitenden Abstrahlwinkeln! Da für die Beschallung aber in der Praxis meist eher konstante, frequenzunabhängige Verhältnisse benötigt werden, ist bei Lautsprechern diese Frequenzabhängigkeit immer kritisch zu berücksichtigen und bei verschiedenen Typen aufmerksam zu vergleichen.

Ausführliche Betrachtungen siehe DAVIS + DAVIS 1989, S. 103 ff.

2.5.2 Empfindlichkeit und Wirkungsgrad

Die Umsetzung von elektrischer in akustische Energie geht mit großen Verlusten einher. Der Wirkungsgrad ϵ liegt in der Regel im Bereich bei etwa

$e = 1 \%$. Es gibt aber bestimmte Bauarten, die ein Vielfaches, ggf. auch bis zu 30 % umsetzen, sodass es sich um ein relevantes Designkriterium insbesondere unter ökonomischen Gesichtspunkten handelt (Verstärkerleistung, Leitungsquerschnitte!).

In Zusammenhang mit dem Wirkungsgrad und dem Abstrahlwinkel steht die Empfindlichkeit S , die als Wert für den Schalldruckpegel in dB-SPL in 1 m Abstand angegeben wird, bei Ansteuerung eines Lautsprechers mit 1 Watt elektrischer Leistung (z. B. $S = 99 \text{ dB (1 W, 1 m)}$).

2.5.3 Lautsprecher-Frequenzgang

Wesentlich ist, welchen Anteil des hörbaren Frequenzspektrums von 20 Hz bis 20.000 Hz ein Lautsprecher überträgt und in welcher Linearität. Ein idealer Lautsprecher würde die komplette Bandbreite linear ohne Pegelabweichungen übertragen – reale Lautsprecher sind je nach Bauart sehr unterschiedlich.

Am Markt verbreitete Trichterhornlautsprecher sind oft extrem laut, haben aber eine sehr eingeschränkte und unlineare Bandbreite – was nicht nur einen unnatürlichen Klang bewirkt, sondern vor allem im kritischen akustischen Umfeld unmittelbare Einschränkungen der Sprachverständlichkeit zur Folge hat.

Gerade in der Tunnelbeschallung darf der Faktor eines hinreichend breiten und linearen Frequenzganges daher keinesfalls unterbewertet werden (vgl. auch Bild 16).

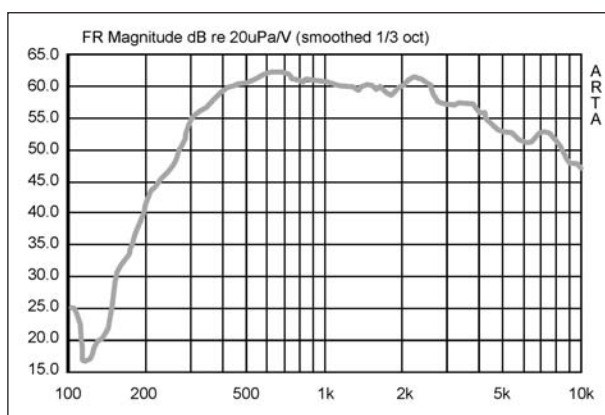


Bild 15: Bsp. Amplituden-Übertragungsfrequenzgang eines geeigneten linear und breitbandig 250 Hz ... 8 kHz abstrahlenden Tunnellautsprechers

2.5.4 Geometrische Eigenschaften

Wichtigster Aspekt verschiedener Bauarten ist die Abhängigkeit der Bündelungs- und Abstrahleigenschaften von der Größe.

Wegen der Verknüpfung von Bündelung Q und Schallwellenlänge λ darf ein Lautsprecher unabhängig von seiner Bauart gewisse Maße nicht unterschreiten, wenn Bündelung in relevanten tieferen Frequenzbereichen gefordert ist.

Z. B. liegt der Hauptenergiebereich menschlicher Sprache im Bereich von 500 Hz. Die zugehörige Wellenlänge beträgt $\lambda(500 \text{ Hz}) \approx 0,7 \text{ m}$. Daraus folgt zwangsläufig, dass Gehäusequerschnitte sich in ähnlichen Größenordnungen befinden müssen, um in diesem Bereich noch relevante Bündelungseigenschaften bewirken zu können!

Hier liegt unter anderem die Crux bei Tunnelbeschallungslautsprechern: Bisher eingesetzte Typen sind zumeist eher klein und besitzen daher wenig Bündelung in diesen unteren Frequenzbereichen. Geeignet bündelnde Lautsprecher passen hingegen nicht ohne weiteres in die begrenzten baulichen Gegebenheiten (= Deckenhöhen!). Hier sind offensichtlich die Hersteller gefragt, mittels Know-how geeignete Prinzipien und Kompromisse zu entwickeln, um beide Anforderungen praktikabel in Deckung zu bringen.

2.5.5 Chemische Widerstandsfähigkeit

Lautsprecherkomponenten sind in der Regel korrosionsanfällig, insbesondere für chemisch aggressive oder feuchte Umgebungen müssen Konstruktionen und Materialien vom Hersteller geeignet ausgewählt und geschützt werden.

2.6 Elektroakustische Auslegungsprinzipien

Um die Betrachtungen zu Tunnelbeschallungen bewerten zu können, sollen hier die wichtigsten beschallungstechnischen Auslegungsprinzipien für die Erzielung von guter Sprachverständlichkeit kurz dargestellt werden.

Ausführliche Betrachtungen siehe DAVIS + DAVIS 1989, S. 235 ff.

2.6.1 Pegel, Pegelverteilung und S/N-Abstand

Beschallungsanlagen müssen in der Lage sein, festzulegende minimal erforderliche Schalldruckpegel dauerhaft und ohne übermäßige Klirrvverzerrungen erreichen zu können.

Ziel ist die Erreichung eines hinreichenden Störgeräuschabstandes des Nutzsignals (S/N-Optimierung).

Diese Versorgungspegel sind innerhalb eines festzulegenden Toleranzbereichs zulässiger Pegelabweichungen über allen zu versorgenden Flächen einzuhalten.

Wichtigste Pegelgröße für Belange der Verständlichkeit ist die Summe des Direktschalls und der frühen Reflexionen in einem Zeitfenster von max. 30 ms.

Diese Abdeckungen müssen mittels heute üblicher Computersimulationen oder direkter Vor-Ort-Versuche präzise optimiert werden.

2.6.2 Bandbreiten und Frequenzgänge

Die Übertragung muss zur Sicherstellung der Verständlichkeit eine festzulegende Bandbreite am Empfangsort abdecken, die den sprachverständlichkeitsrelevanten Teil des Sprachbandes (ca. 250 Hz ... 8 kHz) ausreichend abdeckt.

FRENCH & STEINBERG stellten folgende Zusammenhänge zwischen Übertragungsbandbreite und Sprachverständlichkeit fest:

- Übertragungsbandbreite 250 Hz bis 1.515 Hz
– ca. 40 % potenzielle Verständlichkeit,
- Übertragungsbandbreite 250 Hz bis 3.680 Hz
– ca. 80 % potenzielle Verständlichkeit,
- Übertragungsbandbreite 250 Hz bis 7.000 Hz
– ca. 100 % potenzielle Verständlichkeit.

[FRENCH & STEINBERG 1947].

Bandbreitenbegrenzungen insbesondere der untersten Bänder sind in der Regel wünschenswert, da tiefere Frequenzen ($f < 200$ Hz) wenig Information beinhalten und stattdessen aber die höheren Frequenzen in der menschlichen Gehörwahrnehmung destruktiv verdecken.

Innerhalb dieser Bandbreite sollen die Frequenzgruppen in einer festzulegenden engen Toleranz linear übertragen werden.

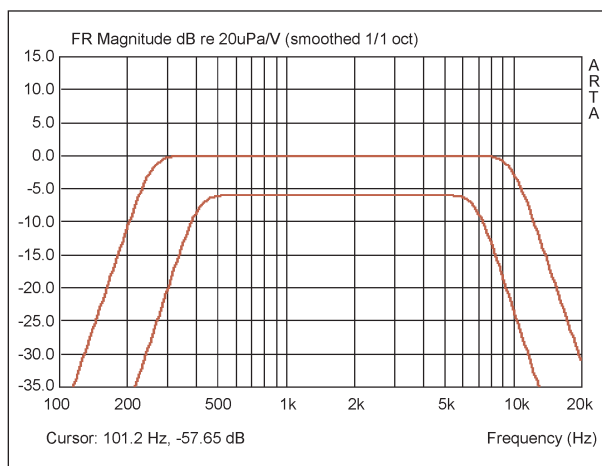


Bild 16: Toleranzband für Sollfrequenzgang

Übertragungen über 8 kHz hinausgehend bis zur Hörgrenze bei 20 kHz sorgen für höhere Natürlichkeit, was aber für Tunnelsprachdurchsagen keine Relevanz besitzt.

Zusätzliche gezielte elektronische Beeinflussungen der Frequenzgänge mittels zeitgemäßer Equalizersysteme sind zur Optimierung der Lautsprechereigenschaften und der Anpassung an die Nachhallfrequenzgänge in der Regel immer unbedingt erforderlich.

2.6.3 Optimierung des D/R-Verhältnisses

Für Verständlichkeit ist ein ausreichender Direktschallpegel im Verhältnis zum Nachhallpegel (D/R) notwendig.

Lautsprecherparameter und -anzahl sind in sprachverständlichkeitsrelevanten Projekten immer auf ein möglichst hohes D/R an allen Orten auszulegen. In diesem Zusammenhang sind vor allem immer die Abstrahleigenschaften der Lautsprecher, insbesondere deren Bündelung Q , von größter Bedeutung.

2.6.4 Minimierung von Laufzeitdifferenzen und Echoeffekten

Die Anordnung, Ausrichtung und elektrische Ansteuerung der Lautsprecher müssen immer unter Berücksichtigung der am Empfangsort auftretenden Überlagerungen von Wandreflexionen und abgestrahltem Schall verschiedener Lautsprecher erfolgen.

Überlagerungen und Echoeffekte müssen dabei so gering wie möglich gehalten werden. Bei unzurei-

chender Beachtung können Deutlichkeit und Verständlichkeit leiden.

Die Einflussmöglichkeiten sind einerseits die „richtigen“ Abstrahleigenschaften und Ausrichtungen der Lautsprecher, mittels derer die Reflexionen genau kontrolliert werden können, andererseits bei Beschallungen mit mehreren Lautsprechern eine durch elektronische Signalverzögerungen (Delay) mögliche präzise Synchronisierung von örtlich getrennt abgestrahlten Schallwellen.

2.7 Tunnelakustik und -beschallung in der Literatur

Sowohl zu raum- und elektroakustischen Grundbegriffen als auch zu den essenziellen beschallungstechnischen Auslegungskriterien für Veranstaltungsstätten aller Größenordnungen, für Studioräume und viele Arten öffentlicher Gebäude sowie für Freiluftarenen ist in den vergangenen Jahrzehnten eine geraume Anzahl an Fachbüchern und -artikeln veröffentlicht worden.

Diese lassen sich aber nur zum Teil auf die besonderen Verhältnisse von elektroakustischen Anlagen für Tunnel anwenden. Für den besonderen Fall der Tunnel-Sprachbeschallung findet sich nur spärliche Literatur. Für den europäischen Bereich lässt sich diese Tatsache damit erklären, dass es bisher nur wenige Regulierungen und Verordnungen zur Installation solcher Anlagen gab, sodass Lautsprecherinstallationen ohne übermäßige theoretische und planerische Intensität auf Grundlage von Standard-Auslegungsgrundsätzen erfolgt sind. Für den außereuropäischen Bereich kann Ähnliches angenommen werden.

Die besonderen Ausbreitungsbedingungen von Schall in diesen extremen „Langräumen“ machen aber besondere Betrachtungen notwendig.

Nach unseren Recherchen wurden bisher nur recht wenige intensivere Untersuchungen zu elektroakustischen Systemen und der Sprachverständlichkeit in Tunneln angestellt. Die meisten Publikationen finden sich unter Prof. Jian KANG, z.zt. Lehrstuhlinhaber an der Universität von Sheffield. Hier wurden wissenschaftliche Untersuchungen in Beijing und Hongkong, China, sowie in Cambridge und Sheffield, Großbritannien, auf theoretischer und z. T. auch praktischer Ebene durchgeführt, die in den vergangenen ca. 12 Jahren einige Veröffentlichungen nach sich gezogen haben, mit einem hervorzu-

hebenden komprimierten Standardwerk aus dem Jahr 2002 „Acoustics of Long Spaces – Theory and Design Practice“ (KANG 2002).

Dort wird ein umfangreicher Nachweis über die Nichteignung des Formelwerks der klassischen statistischen raumakustischen Theorie geführt. Es werden die bekannten Möglichkeiten raum- und elektroakustischer Simulation der Spiegelquellen-, Radiosity- und Ray-Tracing-Modelle gegenübergestellt und ein besonderes praktisch anwendbares Berechnungs- und Simulationsverfahren mit verbesserter Relevanz in Tunnelgeometrien vorgestellt („ACL“-Programm). Besonders hervorzuheben ist auch ein Kapitel über Dimensionierungsvarianten von unterschiedlichen Tunnelquerschnitten-, Absorptions-, Diffusions- und Lautsprecheranordnungen und deren Auswirkungen auf Schallpegelabnahme, Nachhall und Sprachverständlichkeit (KANG 2002, S. 87 ff.).

Eine weitere Publikation aus den Niederlanden (HUIJBEN 1999) wertet praktische Erfahrungen insbesondere aus zwei niederländischen Tunnelprojekten aus und beleuchtet vor allem die Störschall-Problematik in Hinblick auf die Lautsprecher-Nutzschallpegel intensiver, mit praktischen Hinweisen zu möglichen Optimierungen im Bereich der Lüftungsgeräusche.

Noch einige weitere Publikationen anderer Autoren zum Thema mit geringerer Relevanz seien hier nicht gesondert vorgestellt, sie werden aber unter „Literatur“ aufgeführt.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass mit existierenden elektroakustischen Simulationsverfahren aus den genannten Gründen keine endgültigen Aussagen über Sprachverständlichkeits-Verhältnisse ermittelt werden können.

Alle bekannten Simulationen arbeiten entweder mit den bekannten statistischen Formelwerken, die wie erörtert in Tunnelanlagen nicht gelten, oder verwenden für die Berechnung punktueller energetischer und zeitlicher Reflexionsstrukturen die Raytracing- und Spiegelquellenmodelle, die weder Beugungseffekte ausreichend berücksichtigen können noch die in tunnelakustischen Bedingungen vollkommen ungeklärten, aber bedeutsamen Diffusionseffekte, z. B. an den glatten Betonoberflächen.

Elektroakustische Simulationen auf heutigem Stand können daher in der Planungspraxis wertvolle Hinweise auf Einzelparameter liefern, wie z. B.

Direktschallpegelverteilungen und punktuell näherungsweise zu erwartende Reflexionsstrukturen. Die aus einer Vielzahl von akustischen Parametern abzuleitenden Aussagen über D/R-Verhältnisse und letztendlich die Verständlichkeit sind mit diesen Unsicherheiten noch nicht möglich.

Versuche, die heute ermittelbaren Ergebnisse für Sprachverständlichkeitswerte durch gewisse aus Erfahrungen gewonnenen Korrekturfaktoren zu ermitteln, ergeben ggf. Anhaltswerte, aber keinesfalls abgesicherte und verallgemeinerbare Aussagen.

3 Schalltechnische Einzeluntersuchungen in Straßentunnel 2003 – 2009

Tunnel Nr.	Profil	Länge = L (m)	Breite = B (m)	Höhe = H (m)	Q-Fläche circa (m ²)	Besonderheiten	Beschaltungstyp
Tunnel 01	Bergmännisch	2.200	16,5	8	130		sequenziell
Tunnel 02		630	14	8	110		konventionell
Tunnel 03		1.500	10	5,2	52		konventionell
Tunnel 04		2.530	10,5	5	53		konventionell
Tunnel 05		1.080	10,5	4,9	52		sequenziell
Tunnel 06		1.500	9,5	4,9	47		sequenziell
Tunnel 07	Bergmännisch	1.100	12	7	84		konventionell
Tunnel 08	Kasten	250 (2.100)	16,5	4,5	74	Einhausung mit teils Rippendecke	konventionell
Tunnel 09	Bergmännisch	1.080	10,5	4,9	52		sequenziell
Tunnel 10	Kasten	600	14	5	70	Kasten m. absorptiver Decke u. Seitenwänden (teilbelegt ca. 40 %)	sequenziell
Tunnel 11	Bergmännisch	1.300	14	6	84		sequenziell
Tunnel 12	Kasten	1.300	14	5	70		sequenziell
Tunnel 13	Kasten	2.900	8,9	4,5	40		konventionell
Tunnel 14	Bergmännisch	740	11	7	77		SLASS
Tunnel 15	Bergmännisch	680	9	6	54		SLASS
Tunnel 16	Bergmännisch	1.080	10	6,5	65		SLASS
Tunnel 17	Kasten	640	10	5,2	52		SLASS
Tunnel 18	Bergmännisch	1.724	12,5	7	88		konventionell
Tunnel 19	Kasten	540	16	5,8	93	Kasten komplett gerade	konventionell

Tab. 3: Geometrische Eigenschaften der in der vergleichenden Bewertung berücksichtigten Tunnel

3.1 Übersicht und Vorbemerkungen zu betrachteten Straßentunnelprojekten

Aus einer Anzahl deutscher Straßentunnelanlagen liegen schalltechnische Messungen vor, die vergleicht werden können. Die Daten wurden in Projektarbeiten in den Jahren 2003 bis 2009 ermittelt.

Da ein wesentlicher Teil dieser Projekte durch die jeweiligen Betreiber oder Installationsunternehmen beauftragt wurden, liegen die Rechte an ermittelten Daten bei den jeweiligen Auftraggebern und können deshalb hier nur in anonymisierter Form zur prinzipiellen Information wiedergegeben werden.

3.2 Tunnel-Bauarten

Die untersuchten Tunnel weisen Längen zwischen knapp 300 m bis gut 2.500 m und Querschnitte (B x H) im Bereich zwischen etwa 9 m x 4,5 m bis hin zu rund 17 m x 8 m in rechteckiger oder bergmännischer Bauweise auf.

Die Oberflächenmaterialien sind in der Regel schallhart, bei Tunnel 10 sind Decke und Teile der Wandkonstruktion (ca. 40 %) schallabsorbierend bekleidet.

Einige bestehende schallabsorbierende Verkleidungen von Tunnelportalen spielen bei den Betrachtungen keine Rolle, da im Portalbereich keine Untersuchungen stattfanden.

3.3 Elektroakustische Bestandsuntersuchungen an konventionellen Beschallungskonzepten

Da die Untersuchungen in den Tunneln in Tabelle 3 sich vorwiegend mit der Erfassung der raumakustischen Randbedingungen zur Dimensionierung von Beschallungsanlagen befassen, liegen nur von wenigen Tunneln Untersuchungen bestehender Beschallungsanlagen vor. Es wurden im Folgenden zwei Beispiele ausgewählt, für die objektive Messdaten der installierten Beschallungsanlage vorliegen.¹

Konventionelle Beschallungsanlagen, wie sie bis heute in Verkehrstunneln anzutreffen sind, sind zumeist mit Hornlautsprechern mit Druckkammertreibern ausgestattet. Diese Lautsprecherbauart besitzt

den Vorteil hoher akustischer Ausgangsleistung und großer Robustheit. Durch die Trichterbauart soll zudem eine Richtwirkung erreicht werden.

Die Lautsprecher sind zumeist entlang der Tunnelröhren im Decken- oder aber oberen Seitenwandbereich installiert, in gleich bleibenden Abständen mit typischen Montagerastern in Bereichen von etwa 8 m bis 40 m. Die Lautsprecher strahlen typischerweise schräg nach unten.

Selten sind Tunnel auch mit Deckeneinbaulautsprechern ausgestattet, die dann in geringeren Abständen von z. B. 4 m an der (oder in der) Deckenkonstruktion installiert sind und senkrecht nach unten strahlen.

Die Ansteuerung aller Lautsprecher erfolgt in allen konventionellen Beschallungen beim Sammelruf immer zeitgleich auf allen Lautsprechern der gesamten Tunnelröhre. (Entsprechend den Vorgaben der RABT sind die Lautsprecher im Regelfall auch in einzelnen Gruppen schaltbar, sodass anstelle eines Sammelrufs auch Einzelsegmente eines Tunnels separat beschallt werden können.)

Die akustischen Ergebnisse für die konventionellen Beschallungen können für den Sammelrufbetrieb pauschal wie folgt benannt werden:

Beschallungs-Lautstärkepegel

Die Lautsprecheranlagen erreichen in vielen Fällen (nicht immer) noch ausreichend hohe Beschallungs-Lautstärkepegel, was gleichbedeutend ist mit L_p (LSP) > 100 dB (A).

In diesen Fällen ist die notwendige Voraussetzung zur Übertönung des Verkehrslärms bei mittlerer Verkehrsdichte also gegeben.

Verständlichkeit

Die Lautsprecheransagen der konventionellen Systeme sind allerdings fast immer außerordentlich schwer verständlich, sehr oft bewegt sich die Sprachverständlichkeit im normalen Sammelrufbetrieb an der Grenze zur völligen Unverständlichkeit.

¹ Die Tunnel 14 bis 17 der Aufstellung wurden erst im Jahr 2009 hinzugenommen und sind nicht konventionell beschallt, sondern bereits mit Anlagen gemäß den Ergebnissen dieses Berichts ausgerüstet, die Tunnel 1, 11,12 besitzen sequenzielle Beschallungen. Auf diese wird ab dem Kapitel 4.4 eingegangen.

Einige Tunnel, zu denen objektive STI-Werte vorliegen, bestätigen diese subjektive Einschätzung:

Tunnel 13:

$STI_{\text{Mittelwert}} \approx 0,30 =$ mangelhaft (Grenzwert zum ungenügenden),

Tunnel 18:

$STI_{\text{Mittelwert}} \approx 0,25 =$ ungenügend,

Tunnel 19:

$STI_{\text{Mittelwert}} \approx 0,40 =$ mangelhaft

(vgl. auch HÖRBEISPIEL Nr. 01 im Anhang).

Diese erzielten Sprachverständlichkeiten konventioneller Beschallungsanlagen können in den meisten Fällen als unzureichend bezeichnet werden. Ein Sicherheitsgewinn kann aus dem Vorhandensein dieser Anlagen nur in geringerem Umfang abgeleitet werden. Für die Anlagen der Tunnel 13 und 18 kann eine Wirkung allein über die sirenenartige Aufmerksamkeitswirkung der zwar unverständlichen, aber ggf. extrem lauten Durchsagen erreicht werden. Im Tunnel 19 ist eine eingeschränkte Verständlichkeit noch gegeben. Dieser Tunnel besitzt die beste Sprachverständlichkeit, die für eine konventionelle Beschallung in einer raumakustisch nicht behandelten Tunnelröhre bisher ermittelt werden konnte.

Einige Betreiber versuchen, durch Beschränkung auf gezieltes Ansprechen nur weniger Lautsprechergruppen die Verständlichkeit in diesen geschalteten Segmenten zu verbessern, was in der Regel auch in gewissem Umfang funktioniert.

Allerdings ist das kein Sammelrufbetrieb als Gesamtalarmierung, die Leitwarte muss vielmehr einzelne anzusprechende Tunnelabschnitte manuell auswählen – was in Notsituationen in der Regel nicht praxisgerecht ist.

Es gibt sehr wenige positive Ausnahmen für die Funktion konventioneller Systeme: In Straßentunneln mit minimierten Nachhallzeiten (erreicht durch aufwändige schallabsorbierende Auskleidungen), die man sehr vereinzelt antrifft (einziges hier vorhandenes Beispiel: Tunnel 10; vgl. auch in Kapitel 3.5), können konventionelle Beschallungssysteme vollkommen ausreichende Sprachverständlichkeiten erreichen:

gemessen: Tunnel 10

$STI_{\text{Mittelwert}} \approx 0,65 =$ gut (!)

3.4 Raumakustische Bestands-Untersuchungen

Hierfür wurden in den im Rahmen der ersten Bestandsanalyse aufgeführten Tunneln Messungen mit einem Pentadodekaeder (streng kugelförmig abstrahlender Messlautsprecher) und einem breitbandig richtenden Hornstrahler durchgeführt.

Da in den meisten Tunneln hierfür der gleiche Pentadodekaeder und vergleichbare Hornlautsprecher verwendet wurden, sind vergleichende Schlüsse zur akustischen Ausgangslage von Verkehrstunneln aus den Messungen ableitbar.

Die Untersuchungen sollen einen Überblick über die Nachhallzeiten und besondere Schalleitungseigenschaften unterschiedlicher Tunnel geben.

Die Ziele sind im Allgemeinen die Ermittlung von sowohl akustischen Gemeinsamkeiten aller Tunnel als auch Unterschiede und deren Ursachen – und im Speziellen vor allem die Aufklärung der für Beschallungszwecke nutzbaren akustischen Besonderheiten von Tunnelröhren.

3.5 Nachhallzeiten in Tunneln

Die akustischen Grundlagen des Nachhalls sind weiter oben unter Kapitel 2.2 beleuchtet. Im Folgenden werden die Ergebnisse unserer Untersuchungen des Nachhallverhaltens in verschiedenen Straßentunneln dargestellt.

Im strengen Sinn definierter raumakustischer Begriffe handelt es sich beim reflektierten Schallfeld in Tunneln nicht um einen „Nachhall“, da keine diffusen statistisch beschreibbaren Vorgänge vorliegen, sondern um jeweils eine besondere Energieverteilung im Raum und über der Zeit.

Wegen der Ähnlichkeit dieses Vorgangs wird hier aber zur Vereinfachung und im Weiteren zumeist der Begriff „Nachhall“ beibehalten.

Eine Einschätzung zur Bedeutung der ermittelten Größenordnungen der Nachhallzeiten wird am Ende des Kapitels vorgenommen.

Die Nachhallzeiten der vorgestellten Straßentunneln wurden bei vielen Untersuchungen in standardisierten Messungen präzise ermittelt (in Anlehnung an DIN 3382 mit einem omnidirektional strahlenden Pentadodekaeder-Lautsprecher), zur umfangreicheren Orientierung wurden aber auch aus vorhan-

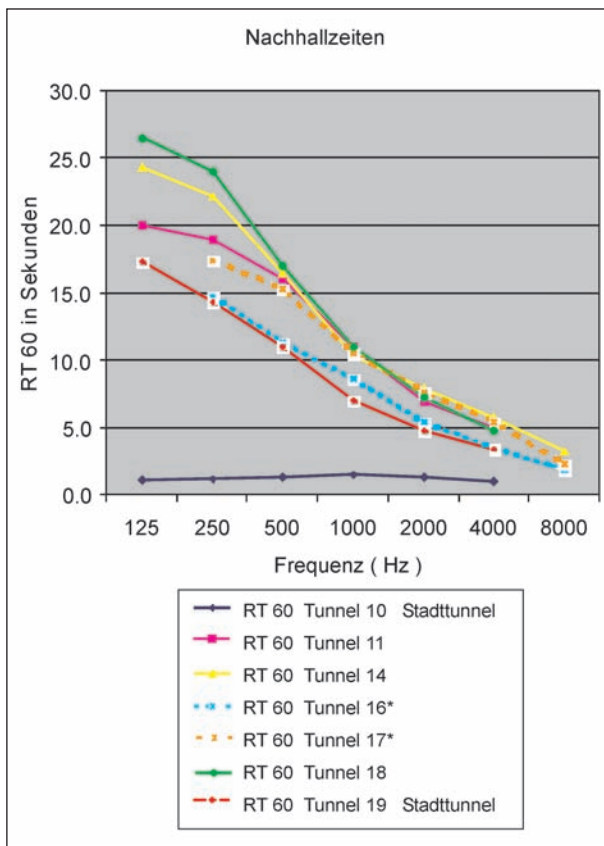


Bild 17: Nachhallzeiten

* improvisierte Messungen mit Bestandsanlage statt Pentadodekaeder

denen Messungen von Lautsprecheranlagen die Nachhallzeiten näherungsweise² bestimmt. Alle genannten Ergebnisse sind aber normgerechte Mittelungswerte aus jeweils mehreren Messpositionen mit unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und Messmikrofon.

3.5.1 Wesentliche Ergebnisse

Bis auf eine Ausnahme weisen alle gemessenen Straßentunnel extrem hohe Nachhallzeiten auf.

Die Werte liegen für die Mehrzahl der „typischen“ Tunnel (mit typisch schallharten Beton-, Fliesen-, Asphalt- und Brandschutzplatten-Oberflächen, ohne weitere schallabsorbierenden Materialien) im mittleren bis höheren Frequenzbereich (500 Hz bis

4.000 Hz) innerhalb eines recht konstanten Bereichs von

$$RT_{60} (\text{Ø } 500 \text{ Hz} - 4\text{-}000 \text{ Hz}) \approx 7 \text{ s} \dots 10 \text{ s.}$$

Bei Betrachtung des Verlaufs der Nachhallzeiten über der Frequenz erkennt man in allen Tunneln einen qualitativ annähernd vergleichbaren linearen Anstieg der Nachhallzeitverläufe zu tiefen Frequenzen hin, die sich näherungsweise mit einem Steigungskoeffizienten von etwa 1,5 pro Oktave beschreiben lassen.

Damit werden die Maxima in allen Tunneln jeweils im tiefsten (ausgewerteten) Oktavband erreicht:

Im 125-Hz-Band liegen die gemessenen Nachhallzeiten im Bereich von

$$RT_{60} (125 \text{ Hz}) \approx 17 \text{ s} \dots 27 \text{ s} (!).$$

Eine Ausnahme bildet lediglich Tunnel Nr. 10, der eine extrem niedrige Nachhallzeit im Mittel von nur gut 1 s besitzt. Ursache hierfür ist, völlig abweichend von der Gestaltung anderer typischer Tunnel, eine untypische, allerdings bei Stadttunneln gelegentlich anzutreffende, umfangreiche und wirksame schallabsorbierende Auskleidung im Bereich der Decke und der Seitenwände.

Erschwerend ist zusätzlich der in allen Tunneln auftretende Anstieg zu tiefen Frequenzen hin. Tieffrequente Nachhallanteile tragen in besonders destruktiver Weise zur gehörspezifischen so genannten „Maskierung“ von informationsrelevanten höheren Frequenzgruppen der Sprache bei!

Die langen Nachhallzeiten fördern auch die im Tunnel auftretenden sehr hohen Störschallpegel.

Es liegen damit in Tunneln sehr kritische akustische Voraussetzungen vor, die das Dimensionieren einer anforderungsgerechten Beschallungsanlage erschweren oder sogar infrage stellen.

Diese Feststellung liefert so zunächst auch eine plausible und pauschale Erklärung, weshalb bestehende Beschallungsanlagen in Tunneln zumeist – trotz nachgewiesener rein technischer Funktionsfähigkeit – keinerlei ausreichende Sprachverständlichkeit ermöglichen.

Die in allen Tunneln ohne ergänzende schallabsorbierende Bekleidung ermittelten hohen Nachhallzeitwerte liegen um Größenordnungen höher als die Werte, die in der allgemeinen raumakustischen Literatur und bisherigen planerischen Pra-

² Nachhallzeitmessungen mit Hornlautsprechern oder installierten Beschallungsanlagen führen zu abweichenden Ergebnissen mit nicht vollständiger Vergleichbarkeit, die dennoch beim Fehlen anderer Messungen zur Orientierung herangezogen werden können.

xis in typischen Räumen als beschallungstechnisch beherrschbar angesehen werden.

Wie im Rahmen der Untersuchungen festgestellt werden konnte, sind jedoch die allgemein bekannten Gesetzmäßigkeiten der raum- und elektroakustischen Berechnungsmodelle und Erfahrungen nur teilweise auf Tunnelröhren übertragbar. Die besonderen akustischen Schallausbreitungseigenschaften in den Röhren machen eine Neubewertung des Parameters „Nachhallzeit“ – der als die entscheidende Ausgangsbasis für Auslegungskriterien in der Beschallungstechnik angesehen wird – zumindest für den Tunnelbereich erforderlich.

Der Stellenwert der absoluten Tunnel-Nachhallzeit wurde bis dato offenkundig erheblich überschätzt.

Wenn heute mit den weiter unten dargestellten Prinzipien des SLASS-Konzepts beschallt wird, so sind die sprachverständlichkeitsstörenden Energieanteile des Nachhallfelds ganz erheblich geringer als nach klassischen statistischen Betrachtungsweisen erwartet werden müsste.

Diese Erkenntnis aus den Ergebnissen des Vorhabens wird hier schon vorab erwähnt, um keinen übermäßigen Fokus auf die Frage der Nachhallzeiten zu lenken. Die ermittelten Ursachen und Zusammenhänge stehen im Zusammenhang mit den in Tunneln auftretenden energiereichen frühen Reflexionsfolgen und werden bei der Beschreibung des SLASS-Konzeptes im Kapitel 4.5 dargestellt.

Die Notwendigkeit einer minutiösen Prognostizierung und Messung der Nachhallzeiten von Straßentunneln lässt sich auf Grundlage der aktuellen Erkenntnisse somit nicht belegen – lediglich fundierte Abschätzungen zur Klassifizierung im Sinne von „typisch hallig“, „deutlich bedämpft“ oder „stark bedämpft“ bleiben erforderlich.

Aussagekräftiger als die definierte Nachhallzeit sind eher die verwandte Early Decay Time (EDT – dt.: frühe Abklingzeit) und deren offenbar tunnel-spezifische Besonderheit der Plateaubildung über jeweils einen längeren zonalen Abschnitt (siehe Kapitel 3.6). Die EDT steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den zu berücksichtigenden Bedingungen für die Schallausbreitung und somit für die nützlichen frühen Reflexionen und ist damit ein Indikator für die erzielbare Sprachverständlichkeit.

Kritischer aber als die nicht zwingend zu untersuchenden hohen Nachhallzeiten sind nach jetzt erlangter Kenntnis andere raumakustische Eigenschaften der Tunnel: Genannt seien hier z. B. reflektierende Nothaltebucht-Schrägen und Versprünge zwischen Tunnelabschnitten mit unterschiedlichem Profil. Diese erzeugen stark destruktive Reflexionen. Auf die Auswirkungen und unbedingt notwendige planerische Berücksichtigung wird genauer in den Kapiteln 5.8 und 6.8 hingewiesen.

3.5.2 Abhängigkeiten der Nachhallzeiten von Unterschieden zwischen den Tunnelbauarten

Zur Vervollständigung der Auswertungen sollen im Folgenden kurz die Ergebnisse zu den untersuchten Abhängigkeiten der Nachhallzeiten von bestimmten Tunneleigenschaften herausgearbeitet werden – die Bedeutsamkeit dieser Betrachtungen ist für die zukünftige Praxis der Auslegungen von Beschallungssystemen jedoch deutlich geringfügiger als in der Vergangenheit angenommen wurde.

Weiterhin ist anzumerken, dass bisherige Deutungen zu den Abhängigkeiten nach heutiger Kenntnis auf Inkonsistenzen und Unzulänglichkeiten bei der Ermittlung bisheriger Messergebnisse beruhen.

Da in beliebigen anderen Bauwerken Nachhallzeiten mit $RT_{60} > 10$ s praktisch kaum vorkommen und daher Messungen in Zeitbereichen bis zu 30 s irrelevant waren, waren viele bewährte und auch bei früheren Tunnelmessungen benutzte Messsequenzen häufig zu kurz, um zutreffende Extrapolationen auf die realen Nachhallzeiten zuzulassen. Wegen der atypischen Energieausbreitungen wurden die Abweichungen ggf. auch von den ausführenden Messtechnikern subjektiv nicht richtig eingeschätzt. So lassen sich beispielsweise auch die in den RABT angegebenen extrem geringen Nachhallzeiten erklären.

Im Zuge weiterer Untersuchungen werden mittlerweile deutlich verlängerte und modifizierte Mess-Setups verwendet, nach deren Anwendung die Feststellungen über die realen Nachhallzeiten in den Tunneln erheblich nach oben korrigiert werden mussten. Es ergaben sich viel höhere Zeiten mit zugleich deutlich geringeren Varianzen zwischen den verschiedenen Tunneln.

Die Ergebnisse dieser neueren Messungen mit gültigen Ergebnissen sind im Bild 18 dargestellt.

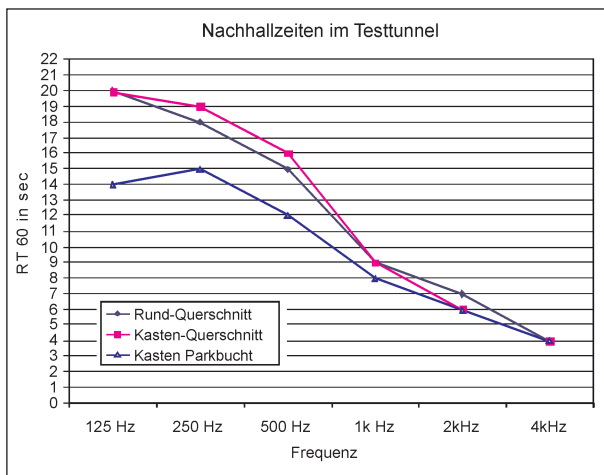


Bild 18: Ein direkter Vergleich von Kasten- und bergmännischem Profil bestätigte in diesem Tunnel Nr. 11 nochmals die Beobachtung, dass diese Profilunterschiede ohne Einfluss auf Nachhallzeiten sind

Mit den jetzt gesicherten Ergebnissen zeichnet sich folgendes Bild:

Es gibt keine herausstechenden Unterschiede zwischen Tunneln mit unterschiedlichen Querschnittsflächen, -profilen oder längen in puncto Nachhallverhalten. Primäre Strukturen haben offenbar keine signifikanten Einflüsse.

Die oben genannten

$$RT_{60} (\varnothing 500 \text{ Hz} - 4.000 \text{ Hz}) \approx 7 \text{ s} \dots 10 \text{ s} \\ \approx 8,5 \text{ s} [\pm 1,5 \text{ s}]$$

wie auch

$$RT_{60} (125 \text{ Hz}) \approx 17 \text{ s} \dots 27 \text{ s} \\ \approx 22 \text{ s} [\pm 5 \text{ s}]$$

gelten offenbar für alle „typischen“ Tunnel („typisch“ hier als Ausdruck für typische Röhrenbauarten ohne zusätzliche schallabsorbierende Verkleidungen), es sind keine nennenswerten Abhängigkeiten von Profilen und Längen erkennbar!

Erkennbar waren lediglich Abhängigkeiten

- vom Fahrbahnbelag: Die im Bild 17 gemessenen kürzeren Nachhallzeiten können recht eindeutig Tunneln mit Asphaltdecken zugeordnet werden und Tunneln mit längeren Nachhallzeiten denen mit komplett durchgängigen Betonoberflächen,
- von der Tunnellänge, wenn diese gering ist (< 600 m) und ein Tunnel zudem komplett gerade verläuft: In solchen Fällen wird ein Tunnel

ebenfalls im Bereich kürzerer Nachhallzeiten liegen (wie hier Tunnel Nr. 19),

- von Querschnittsänderungen und/oder Materialwechseln in den Röhren: Z. B. waren in einem untersuchten Tunnel (Tunnel 11) tieffrequente Nachhallanteile unmittelbar im lokalen Bereich einer Nothaltebucht reduziert (siehe Bild 18) – Ursache waren großflächige Stahl Tore, die durch akustische Transmission tieffrequente Absorptionen verursachen. Da Nachhallreduktionen grundsätzlich positiv zu bewerten sind, sind diese Effekte unkritisch, und so können derartige lokale Änderungen weitgehend vernachlässigt werden, Auswirkungen auf die Nachhall-Gesamtsituation einer Röhre sind nicht erkennbar.

Ausnahmen bilden ganz zweifellos Tunnel mit schallabsorbierenden Verkleidungen (wie hier Tunnel Nr. 10). Hier treten niedrigere Nachhallzeiten im typischen Bereich $RT_{60} < 4 \text{ s}$ auf (in Einzelfällen ggf. auch sehr niedrige mit $RT_{60} \leq 1 \text{ s}$).

3.5.3 Einflüsse der ermittelten Tunnelnachhallzeiten

Zum Thema Nachhallzeiten in Tunneln ist somit folgendes Fazit zu ziehen:

- Alle „typischen“ Tunnel besitzen sehr hohe Nachhallzeiten, diese sind ein Indiz für die dort vorhandene beschallungstechnisch schwer beherrschbare Situation,
- diese grundsätzlich sehr hohen Nachhallzeiten liegen in „typischen“ Tunneln innerhalb recht schmaler Toleranzen (annähernd unabhängig von der Bauform und Länge),
- die Minima dieser recht schmalen Toleranzfelder treten in Tunneln mit Asphaltdecken auf,
- die auftretenden Abweichungen zwischen diesen Nachhallzeiten typischer Tunnel sind als Dimensionierungsgröße für die Beschallungsanlagen von untergeordneter Bedeutung (siehe weiter unten im Kapitel 5.9.2.2),
- „untypische Tunnel“ (mit schallabsorbierender Ausstattung) haben geringere Nachhallzeiten und sind beschallungstechnisch weitgehend unkritisch.

Aus hohen Nachhallzeiten resultieren aber auch hohe Störlärmpegel in den Röhren.

Hier besteht ein linearer Zusammenhang, denn die ungedämpften Reflexionen der halligen Röhren lassen den Störlärm sich ungedämpft ausbreiten, mit dem Zusammenhang: doppelte Nachhallzeit → verdoppelter Störlärmpegel (+3 dB) bzw. halbierte Nachhallzeit → halber Störlärmpegel (-3 dB).

Damit bleibt eine Verringerung von Nachhallzeiten weiterhin eine nützliche Maßnahme, denn bei geringerem Störlärm können auch Durchsagen mit im gleichen Maße verringerter Lautstärke übertragen werden.

3.6 Frühe Abklingzeiten (Early Decay Times – EDT)

Die messtechnisch ermittelten EDT's zeigen, wie schnell die Energie unmittelbar nach der Aussendung abnimmt, noch bevor sich ein diffuses Nachhallfeld ausbildet.

Die EDT wird hier am Beispiel von Tunnel 13 dargestellt. Es zeigt über der Frequenz ähnliche relative Verläufe wie bei RT₆₀-Messungen, allerdings mit wesentlich kürzerer absoluter Abfallzeit.

Die Dauer der frühen Energieabnahme hat große Auswirkungen sowohl auf die subjektive Empfindung der Halligkeit als auch auf die Deutlichkeit und den Frequenzgang des Direktschallsignals.

Die EDT ist in geringerer Entfernung zur Schallquelle ausgeprägt kürzer als in größeren Abständen.

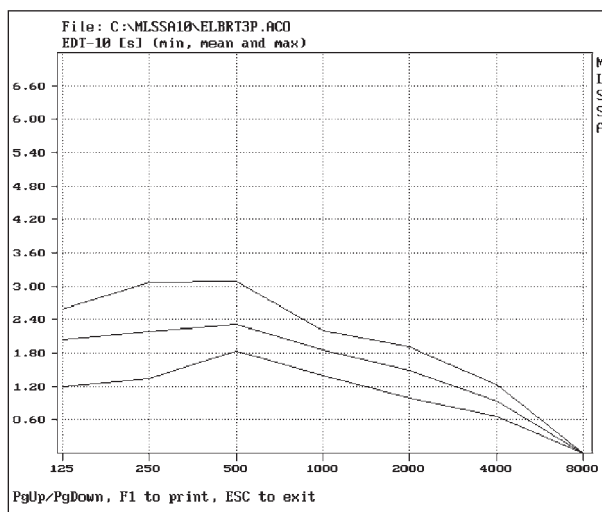


Bild 19: Mittelung über 12 Messpositionen im Bereich 2 m – 8 m vor dem Lautsprecher

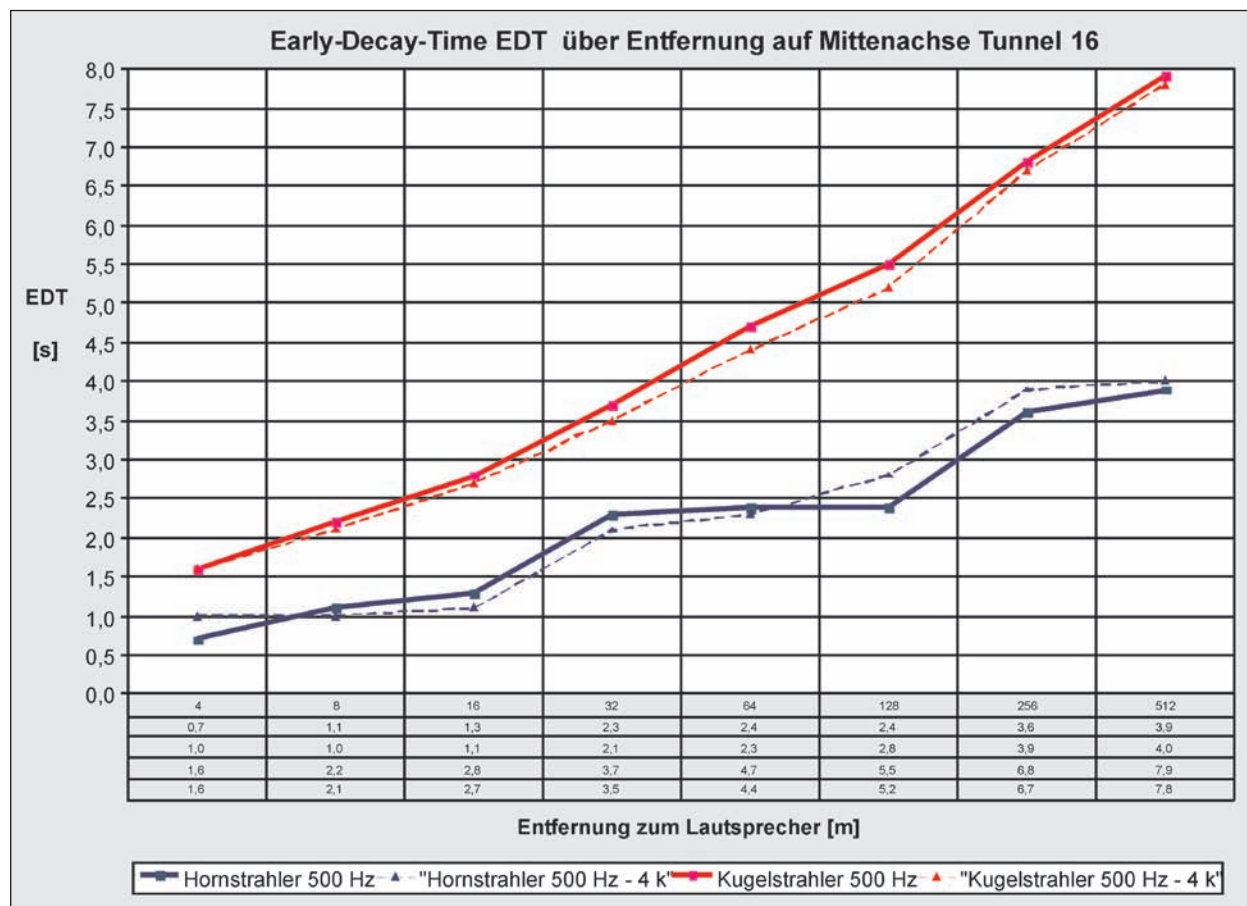


Bild 20: EDT-Messungen über die Entfernung in Tunnel 13, Anregung mit Kugel- und Hornstrahler

den – was auf die Tendenz zur deutlichen Verschlechterung der möglichen Sprachverständlichkeit bei zunehmender Entfernung hinweist.

Besonders hervorzuheben ist allerdings hier der Effekt, dass es einen erheblichen Unterschied zwischen den auftretenden EDT's bei Anregung mit omnidirektional strahlendem Pentadodekaeder-Lautsprecher und richtendem engabstrahlendem Hornlautsprecher gibt.

Die EDT's des richtenden Strahlers sind erheblich kürzer, sie betragen, abhängig von verschiedenen Entfernungen, nur etwa 50 % bis 70 % der EDT's des Pentadodekaeders.

Dabei steigen die EDT's des Pentadodekaeders kontinuierlich mit der Entfernung an, währenddessen sich für den Hornstrahler ein Plateaubereich im Bereich etwa zwischen 16 m bis 64 m einstellt.

In diesem Bereich ist über die gesamte Strecke eine sich nur wenig verändernde Deutlichkeit des Nutzsignals zu erwarten. Die geringe Dauer des EDT's gegenüber dem extrem langen eigentlichen Nachhall lässt in dieser Zone die Realisierbarkeit von akzeptablen Verständlichkeitswerten als möglich erscheinen.

Dieses Verhalten gibt einen weiter zu verfolgenden Hinweis darauf, dass mittels unterschiedlicher Abstrahlcharakteristiken von Lautsprechern Möglichkeiten zur gezielten Verbesserung der Sprachverständlichkeitsbedingungen durch Verkürzung der EDT's bestehen – trotz entfernungsunabhängig gleichartiger Nachhallzeiten RT_{60} .

Dieser Effekt ist die Ausgangsbasis zur Konzeptionierung einer Beschallungslösung, die auf engbündelnden längs durch die Tunnelröhre strahlenden Lautsprechern basiert.

Im Erfolgsfall soll auch bei höherer Anzahl von Lautsprechern durch Nutzung dieses Plateaufeffekts eine Beschallungsanlage aufgebaut werden können, deren EDT's sich trotz Nachhallzeiten von RT_{60} (\emptyset 500 bis 4 000 Hz) > 7 s in einem deutlich niedrigeren Wertebereich

$$EDT_{\text{soll}} \ll 7 \text{ s}$$

(Ziel ggf. $EDT \approx 3 \text{ s} \dots \text{max. } 5 \text{ s}$)

bewegen, was mit einer höheren Deutlichkeit bzw. Sprachverständlichkeit gleichzusetzen ist.

3.7 Reflektogramme

Aus den als logarithmierte Reflektogramme dargestellten Impulsantworten lässt sich die spezifische entfernungsabhängige Reflexionsstruktur im Tunnel sehr präzise beobachten. Die theoretische Betrachtung über die Impulsaufweitung („Verschmierung“) – die sich auch in den vorgenannten EDT-Veränderungen zeigt – lässt sich hier am Beispiel der Messung in Tunnel 15 ablesen (siehe Bild 21).

Hieraus geht hervor, dass in geringeren Entfernungen eine recht klare zeitliche Abgrenzung von Direktschall und Anfangsreflexionen gegenüber den späteren Reflexionen existiert, die sich dann in größerer Entfernung über einen größeren Zeitraum verwischen und zudem im Pegel relativ zu den späteren Reflexionen stark abfallen.

Die kritische Verwischungsgrenze ist in diesem speziellen Tunnel beim Kugelstrahler bereits bei 16 m erreicht, beim Richtstrahler hingegen erst bei 128 m.

Es wird davon ausgegangen, dass ein optimierter Richtstrahler für Tunnel in der Horizontalen sehr definiert so eng bündeln muss, dass einerseits ein Auftreffen relevanter Schallanteile auf die Tunnelwände erst in möglichst großer Entfernung vom Lautsprecher stattfindet, andererseits im Abstandsbereich hoher Schallpegel noch eine Versorgung der gesamten Tunnelbreite stattfindet.

Ein geeigneter horizontaler Abstrahlwinkel liegt voraussichtlich im Wertebereich bei $30 \dots 35^\circ$, basierend auf folgender Betrachtung: Es wird angenommen, dass eine Zone von etwa 50 m einen geeigneten Versorgungsbereich eines Lautsprechers darstellen könnte, was sich aus den ermittelten Plateaubereichen der EDT's und der Pegelkonstanz ableiten lässt. Soll sich am Ende einer solchen angenommenen 50-m-Zone maximal eine erste Reflexion (vgl. Bild 6) (oder alternativ auch eine zweite) dem Direktschallsignal mit nennenswertem Pegel aufsummieren, so setzt das ein Auftreffen des abgestrahlten Schalls nach der halben Weglänge voraus (wegen Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Damit ergibt sich für den Abstrahlwinkel bei Montage des Lautsprechers auf der Mittenachse des Tunnels und einer Tunnelbreite von 10 m:

Abstrahlwinkel (für 1 Reflexion)

$$= 2 * \text{arcustangens} (B/2/L/2)$$

$$= 2 * \text{arcustangens} (10 \text{ m}/2/50 \text{ m}/2)$$

$$= 22,6^\circ$$

Erweitert man die Bedingung auf eine 2. Reflexion, ergibt sich:

Abstrahlwinkel (für 2 Reflexionen)

$$= 2 * \arccos(B/2/L/3)$$

$$= 2 * \arccos(10 \text{ m}/2/50 \text{ m}/3)$$

$$= 33,4^\circ$$

Die Weglängen dieser Schallpfade betragen dann (Berechnung nach Pythagoras):

Direktschall

$$R_d = 50 \text{ m}$$

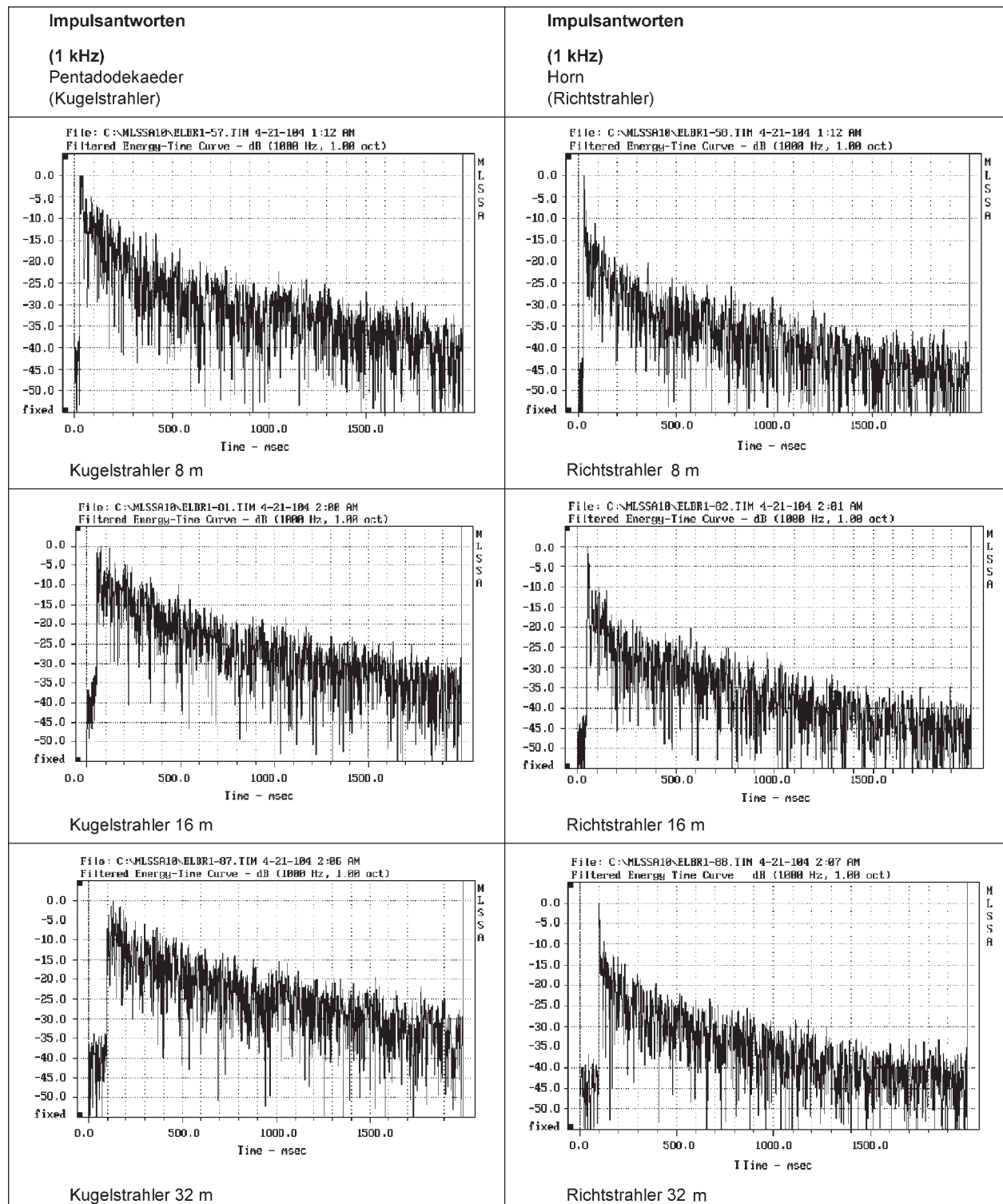


Bild 21: Energie-Zeit-Diagramme (Reflektogramme) in Tunnel 15 in verschiedenen Distanzen und im Unterschied Pentadodekaeder und Richtstrahler (Horn)

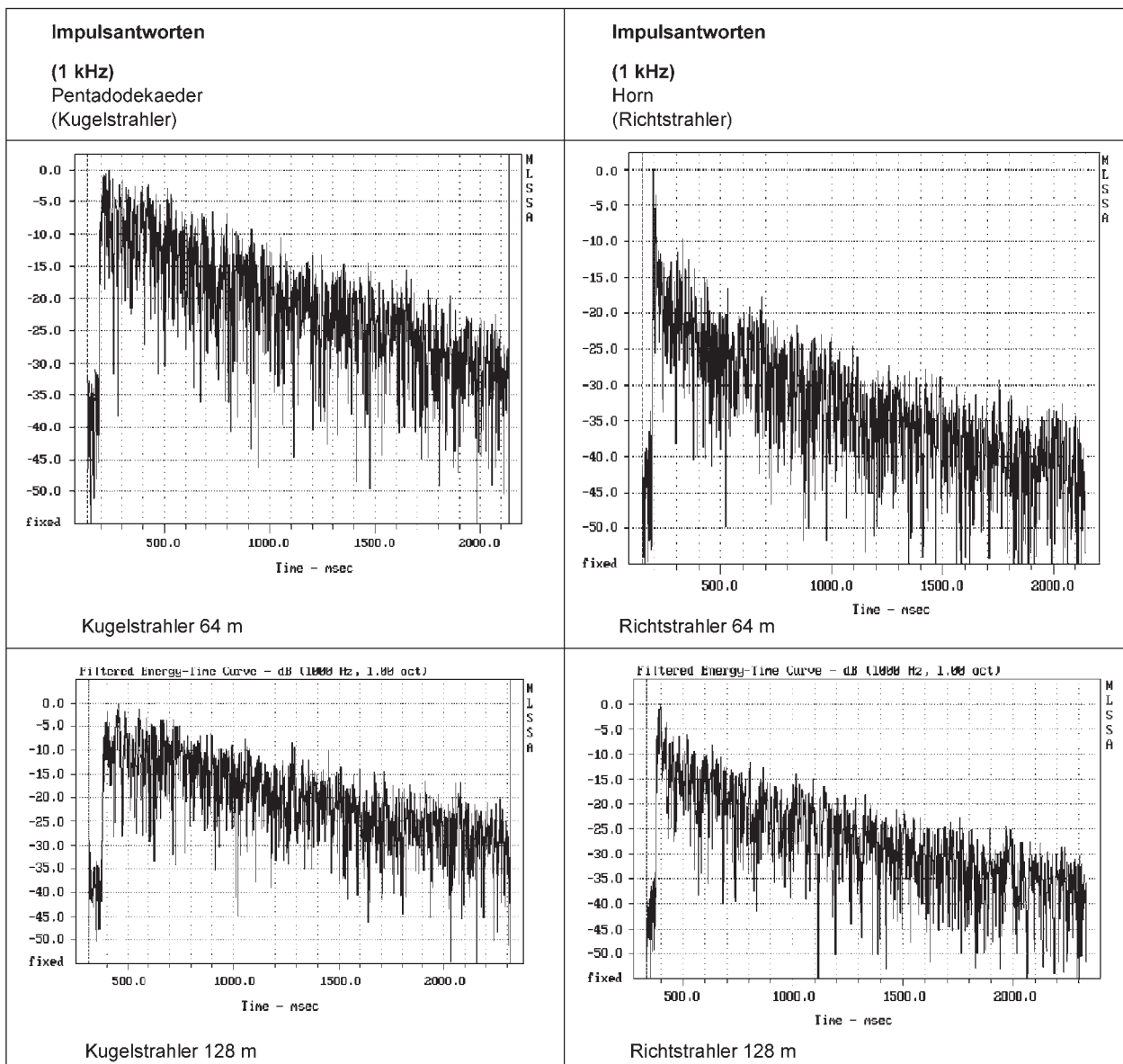


Bild 21: Fortsetzung

erste Reflexion

$$R_1 = 2 \cdot \text{Quadratwurzel} \left((B/2)^2 + (L/2)^2 \right) =$$

$$R_1 = 2 \cdot \text{Quadratwurzel} \left((10/2)^2 + (50/2)^2 \right) \approx 51 \text{ m}$$

$$\rightarrow \Delta t_1 \approx 1 \text{ m}$$

zweite Reflexion

$$R_1 = 4 \cdot \text{Quadratwurzel} \left((B/2)^2 + (L/4)^2 \right) =$$

$$R_1 = 4 \cdot \text{Quadratwurzel} \left((10/2)^2 + (50/4)^2 \right) \approx 54 \text{ m}$$

$$\rightarrow \Delta t_2 \approx 4 \text{ m}$$

Damit ergibt sich unter der Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit eine zeitliche Struktur des Direktschallsignals mit ein bis zwei frühen Reflexionen mit:

$$\Delta t_1 \approx 1 \text{ m} / 344 \text{ m/s} \approx 2,9 \text{ ms,}$$

$$\Delta t_2 \approx 4 \text{ m} / 344 \text{ m/s} \approx 11,6 \text{ ms.}$$

Ein nennenswerter Pegelabfall tritt für diese geringen Wegdifferenzen gemäß dem Abstandsgesetz und der geringen Wandabsorption nicht auf. Die Reflexionen erreichen die Empfangsposition also mit näherungsweise fast gleichem Schalldruck wie das Direktschallsignal.

Diese damit zu erwartende zeitliche und energetische Struktur von Direktschall und frühen Reflexionen ist günstig und bewirkt eine konstruktive Unterstützung des Direktschallsignals.

Ein Tunnellautsprecher mit einem horizontalen Abstrahlwinkel im Bereich zwischen 30 und 35° wäre auf Basis dieser Überlegungen also für die angestrebte Form der Tunnel-Längsleitung des Schalls sehr gut geeignet.

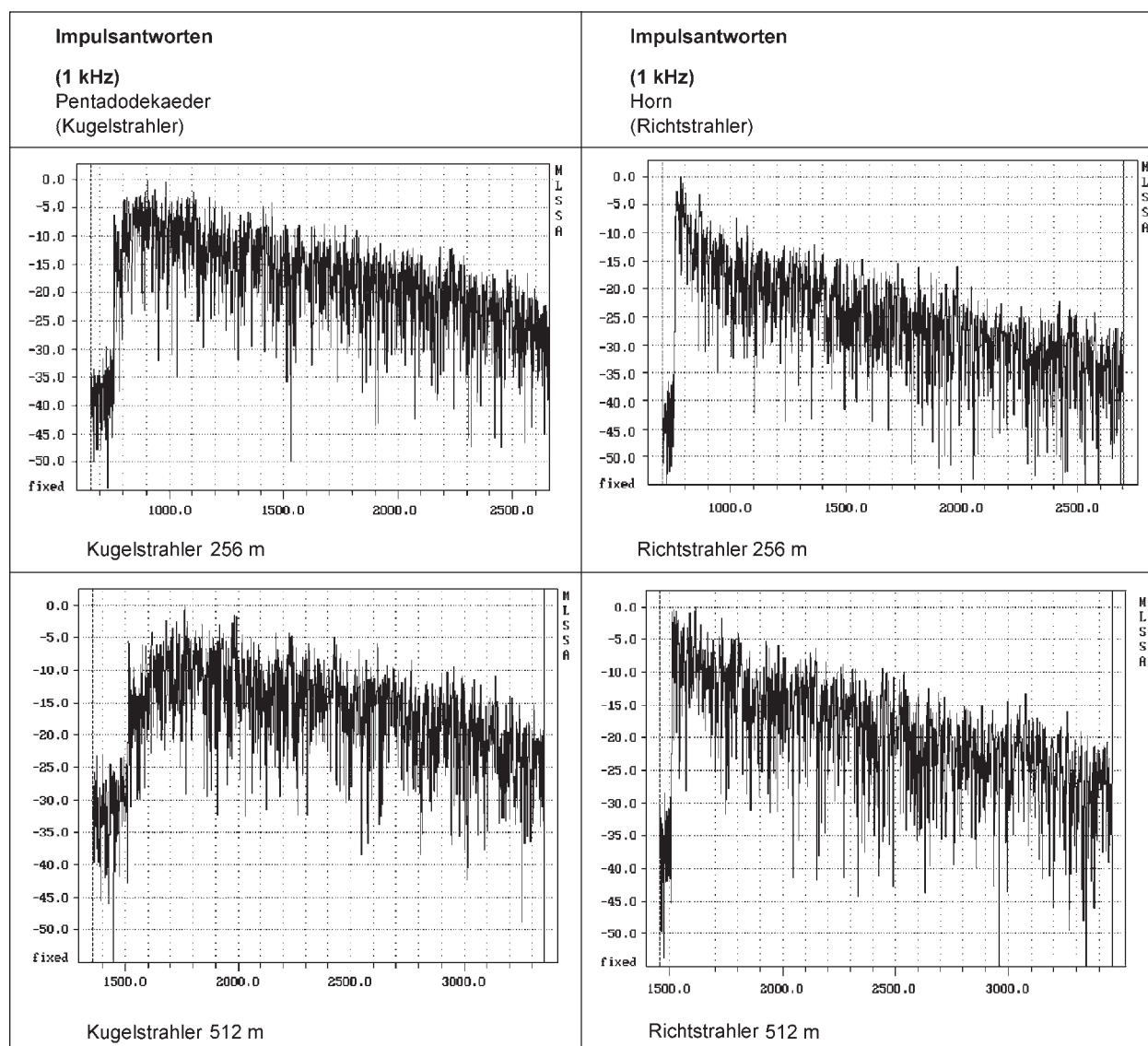


Bild 21: Fortsetzung

Für die Vertikale benötigt ein solcher Lautsprecher eine sehr spezielle Abstrahlwinkelform, um – vergleichbar zu den Anforderungen in der Horizontalen – möglichst spitzwinklig zu strahlen, andererseits aber weder die Tunneldecke zu treffen noch den Nahbereich unversorgt zu lassen. Voraussichtlich könnte hier eine asymmetrische Abstrahlung in einem ähnlichen Winkelbereich (um 33°) zum Ziel führen.

3.8 Sprachverständlichkeit über die Entfernung

Die in den Tunneln im Wechsel mit je einem Pentadodekaeder- und einem Hornlautsprecher durchgeführten experimentellen Messungen wurden unter dem Aspekt der jeweils erzielten Sprachverständlich-

keit ausgewertet. Bei allen Tunneln sind erhebliche Unterschiede zwischen der Anregung mit dem ungerichtet strahlenden Pentadodekaeder und der gebündelten Abstrahlung des Hornlautsprechers deutlich ersichtlich, wobei durch den Hornlautsprecher die wesentlich besseren Ergebnisse erreicht werden.

Alle experimentellen Hornlautsprecher-Beschallungen mit je einem Horn erreichten eine ausreichende Verständlichkeit mit $STI > 0,4 \dots 0,7$, selbst in großen Entfernungen.

Abstrahleigenschaften von Lautsprechern, speziell angepasst an Tunnel, waren ein wichtiger zu beachtender Aspekt der weiteren Untersuchungen.

Nach allen Erkenntnissen bieten ausschließlich stark und präzise bündelnde Hornlautsprecher eine Voraussetzung für sinnvolle weitere Betrachtungen.

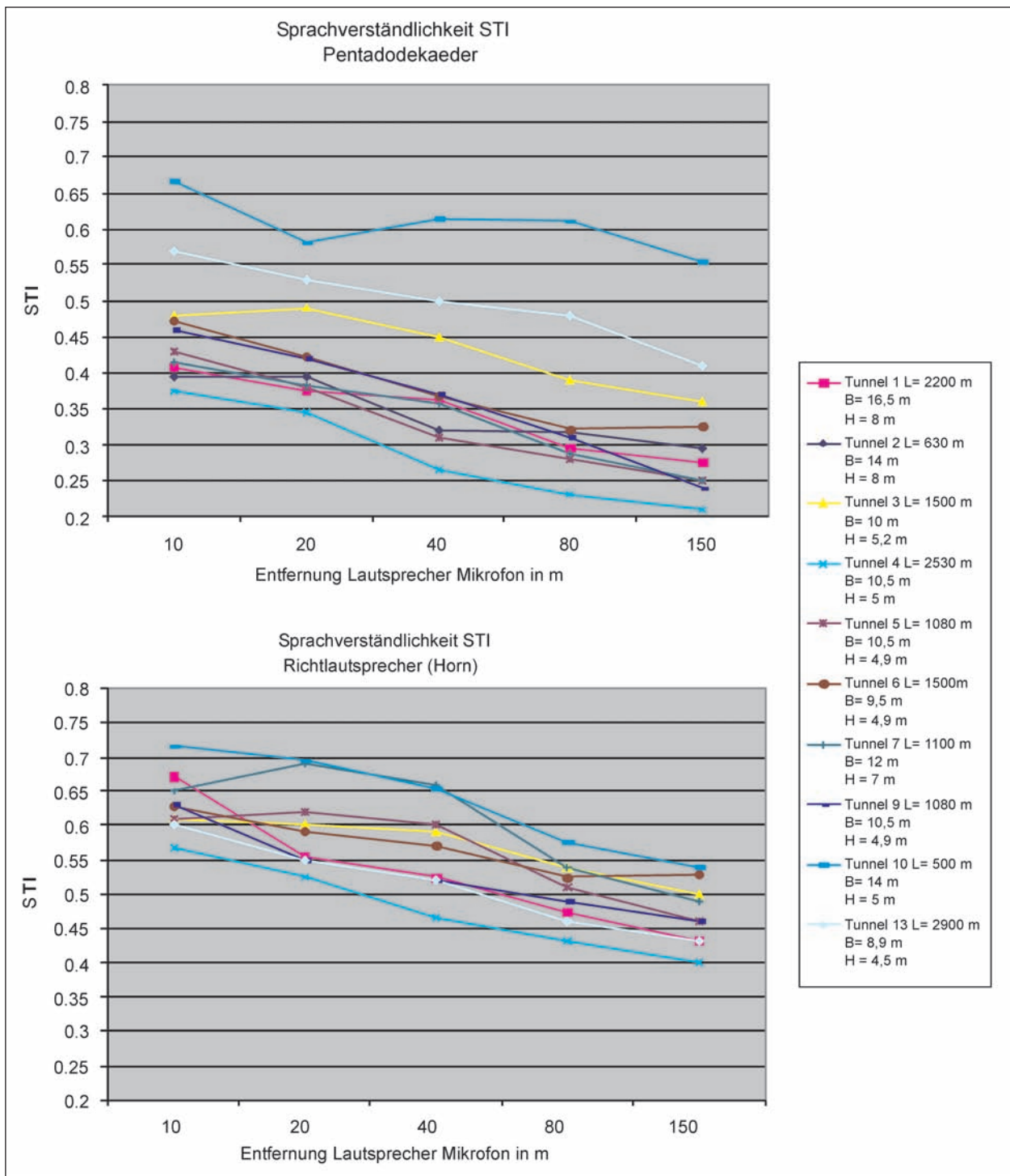


Bild 22: Sprachverständlichkeitsmessungen STI in verschiedenen Tunneln mit verschiedenen Messabständen zum Lautsprecher (oben: Pentadodekaeder, unten Hornlautsprecher)

3.9 Signalpegel-Verlauf über Entfernung

In allen untersuchten Tunneln wurden Messungen der Pegelabfälle (A-bewertet) bei Energieanregung mit rosa Rauschsignalen mit Pentadodekaeder- und mittels großen Hornlautsprechers hoher Bündelung vorgenommen.

Grundsätzlich sind alle Pegelabnahme-Strukturen bei einfacher Betrachtung wie zu erwarten zwischen den beiden Extrem-Verhältnissen „Freies Schallfeld“ (-6 dB/Entfernungs-Verdoppelung) und „diffus reflektierender Standardraum“ (konstanter Pegel außerhalb des Hallradius) angesiedelt.

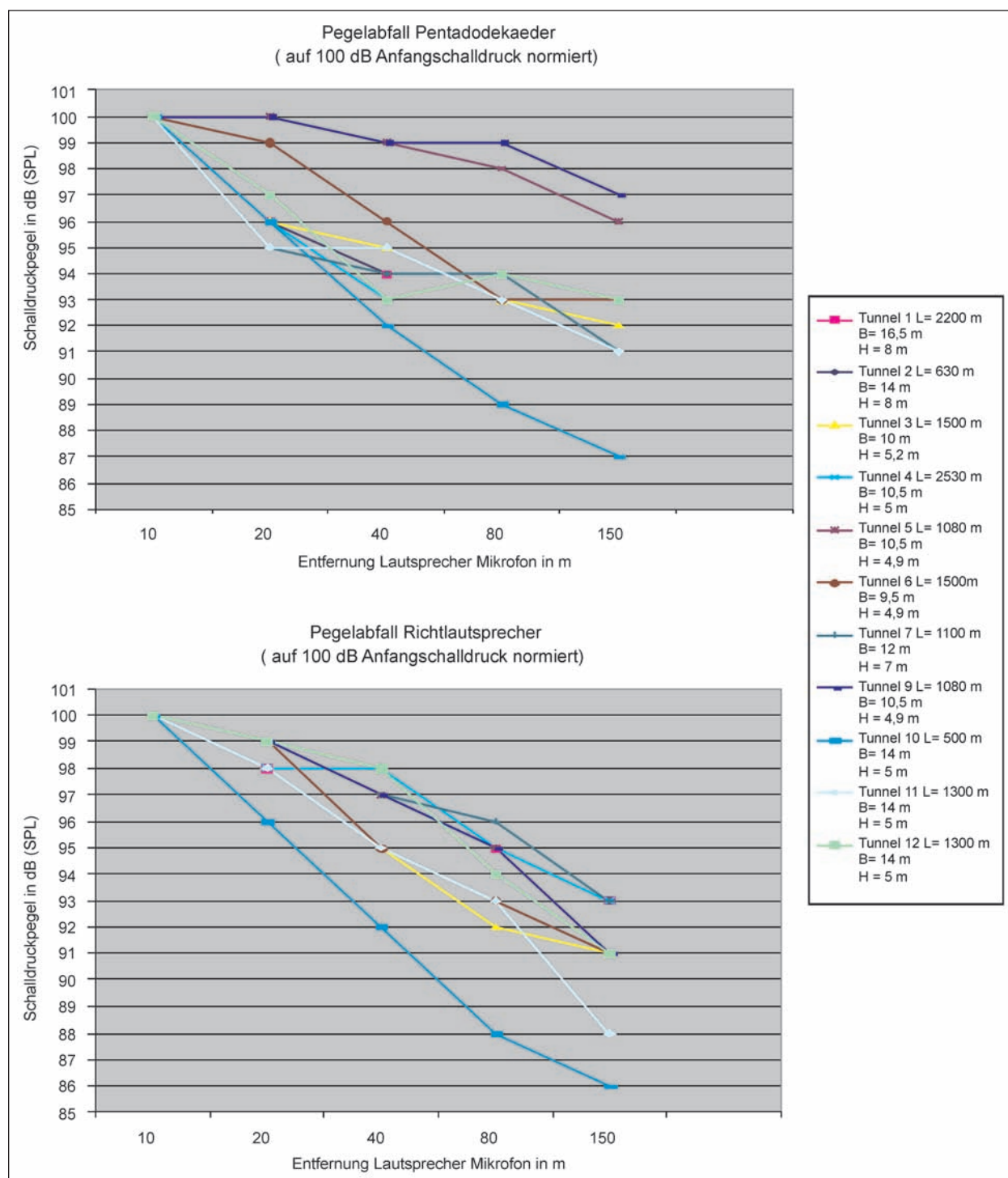


Bild 23: Pegelabfall-Messungen verschiedener Tunnel in verschiedenen Messabständen zum Lautsprecher (oben: Pentadodekaeder, unten Hornlautsprecher)

Unterschiede werden hier aber vor allem erneut deutlich zwischen der Situation der Beschallung bei kugelförmiger und gerichteter Abstrahlung:

Beim Kugellautsprecher fällt der Pegel mit etwa 2-3 dB pro Entfernungsverdoppelung in allen Tunneln in ähnlicher Weise ab; bei gerichteter Beschallung stellt sich hingegen nach einer Nahfeld-Zone mit

rund 3 - 6 dB Pegelabfall pro Verdoppelung des Abstandes in einer Vielzahl von Tunneln ein Plateaubereich mit über der Entfernung recht gleich bleibendem Pegel ein (Abfall 0 dB ... < 2 dB pro Verdoppelung). Ausnahmen scheinen hier lediglich die sehr breiten Tunnel zu bilden, in denen der Pegel wahrscheinlich durch die geringere Reflexionsdichte weiterhin mit 3 dB ... 6 dB abfällt.

Gerichtete Beschallung in angepasster Winkelabstrahlung kann hier voraussichtlich der Schlüssel zur Konstanzhaltung von Nutzpegeln über größere Streckenabschnitte sein. Dazu müssten für unterschiedlich breite Tunnel Lautsprecher mit angepasstem horizontalen Abstrahlverhalten eingesetzt werden.

Diese Annahme in Kombination mit den oben beschriebenen Beobachtungen zur Ausbildung von Plateaubereichen mit ungewöhnlich geringen EDT-Werten und den Reflektogrammstrukturen führte zur Konzeptionierung der später beschriebenen synchronisierten Tunnel-Längsbeschallung (SLASS), die darauf zu untersuchen war.

3.10 Störpegel

Messungen der Störpegel des fließenden Verkehrs im Tunnel 15 bei typisch hoher nachmittäglicher Berufsverkehrs-Belastung sind hier exemplarisch wiedergegeben. Der Tunnel wies zu diesem Zeitpunkt eine typische Mischung aus Pkw und Lastkraftwagen bei ungestörtem 80-km/h-Betrieb auf.

Diese Messung markiert für diesen Tunnel näherungsweise Worst-Case-Bedingungen, da im üblichen Betrieb keine wesentlich über die gemessenen Werte hinausgehenden Störpegel zu erwarten sind (siehe Tabelle 4).

Die gemessenen Pegel sind hoch, die höchsten Pegel treten bei tiefen Frequenzen auf und werden insbesondere von Lkw-Motoren erzeugt.

Die Störpegelsituation wurde für eine große Anzahl von Straßentunneln sehr detailliert im Rahmen des parallel laufenden Forschungsprojektes „Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln“ untersucht (FÄRBER & FÄRBER 2009).

Mit dessen Ergebnissen konnten die Messungen im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung be-

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	A-bewertet
Pegel (dB-SPL)	98	89	87	87	88	85	92 ... 95 dB(A)
Tunnel 15, Mittwoch, 17:15 Uhr		... 97	... 92	... 96	... 92	... 88	

Tab. 4: Beispiel einer Messung von Störpegel (in dB(A) mit Fast-Bewertung)

kräftigt werden. Darin wurden in 10 Tunneln mittlere Störpegel bei mittlerer bis hoher Verkehrsdichte im Bereich ermittelt von/bis

- mindestens 85,1 dB (A) (50-km/h-Stadtverkehrstunnel, 10 m breit),
- maximal 101,4 dB (A) (80-km/h-Autobahntunnel, sehr breit mit 3 Spuren, extrem hohe Verkehrsdichte).
- Die präzisen Spektralmessungen der Störlärm-eigenschaften weisen im Mittel der 10 Tunnel folgende wesentliche Verläufe auf:
- Pegelmaxima zwischen 50 ... 100 Hz (absolutes Maximum) sowie ein relatives Maximum bei 900 ... 1.100 Hz,
- Pegelminima im Bereich 300 ... 700 Hz.

Diese typischen Störlärmpegel im laufenden Verkehr haben für die Beschallungstechnik zur Konsequenz, dass die Lautsprecheranlagen Nutzsignalpegel erzeugen müssen, die um etwa 10 dB oberhalb dieser Störpegel sein müssen:

Also müssten die Anlagen theoretisch zwischen mindestens 95 dB (A) bis hin zu 111 dB (A) erzeugen können.

111 dB (A) sind als Beschallungspegel allerdings jenseits des Zumutbaren:

- Bei solchen Pegeln sind Gehörschäden möglich,
- vorrangig muss insbesondere eine Angst und Panik auslösende Wirkung erwartet werden,
- die Sprachverständlichkeit wird durch gehörbedingte Maskierungseffekte stark reduziert.

Daher wird im Folgenden ein maximaler Beschallungspegel von 105 dB (A) als zweckmäßig angesehen. Solche Pegel liegen im Bereich des technisch Anspruchsvollen, aber dennoch unproblematisch Realisierbaren.

Die Minima der Störpegel im Mitteltiefenbereich bei 300 Hz ... 700 Hz haben den zufälligen Vorteil, dass gerade hier die Energiemaxima von Sprache liegen, sodass in der Konsequenz ein vergleichsweise etwas günstigeres Störpegelverhältnis bei Sprachdurchsagen erwartet werden kann.

4 Die Ansätze neuerer Tunnelbeschallungskonzepte

4.1 Ziele

Für eine anforderungsgerechte elektroakustische Sprachübertragung in Tunnelröhren müssen 2 vorrangige Ziele verfolgt werden:

- Realisierung mindestens ausreichender Sprachverständlichkeit bei allen Adressaten (d. h. allen betroffenen Verkehrsteilnehmern),
- schnelle Übermittlung der gesamten erforderlichen Sprachinformation an alle Adressaten.

4.2 Anwendung der Grundprinzipien von Verständlichkeitsverbesserung

Bisherige Beschallungslösungen in Tunneln sind wegen zumeist mangelhafter bis ungenügender Durchsageverständlichkeit unbefriedigend, wie bereits in der Bestandsaufnahme weiter oben ausgeführt sogar oft unbrauchbar. Sie werden den gesetzten Aufgabenstellungen nicht gerecht.

Hauptursache der Probleme fehlender Sprachverständlichkeit sind die immensen unbedämpften Schallreflexionen an den schallharten Tunnelwänden und eine fehlende zeitliche Synchronisation der Lautsprecheransteuerung. Die verursachten Nachhallpegel und Echos erreichen die Ohren der Verkehrsteilnehmer in weitaus höherer Energiedichte als das eigentliche informationstragende Beschallungssignal – und verdecken es damit so sehr, dass es vom Adressaten nicht mehr verstanden wird.

Grundsätzliche Überlegungen zur Erhöhung der Verständlichkeit bei beschallungstechnischer Sprachübermittlung müssen daher darauf abzielen, alle schädlichen Schallreflexionen und Echos zu mindern und zugleich ein mögliches Maximum an informationstragendem Direktschall an den Zuhörerort zu transportieren. Jedoch müssen hierbei nicht alle Schallreflexionen zwingend als „feindlich“ betrachtet werden – ungedämpfte Reflexionen können durchaus auch hervorragend zur Verbesserung der Verständlichkeit beitragen. Voraussetzung ist allerdings, dass sie in ausreichend kurzen Zeitbereichen (als so genannte „frühe Reflexionen“) zusammen mit dem Direktschall beim Adressaten eintreffen.

Mit diesem Wissen können bestimmte Reflexionsstrukturen strategisch genutzt werden.

4.3 Konzept 1: Konventionelle elektroakustische Beschallung in Kombination mit umfangreicher raumakustischer Optimierung

Lautsprechersysteme mit exakt den gleichen Komponenten und gleicher Anordnung und Verschaltung wie bei oben beschriebenen konventionellen Tunnelbeschallungen werden in anderen Umgebungen – wie zum Beispiel Verwaltungsgebäuden oder Sportarenen – den gestellten Anforderungen mit hinreichender Verständlichkeit gerecht.

Der Grund dafür sind die dort herrschenden raumakustisch anderen Bedingungen: Nachhall und Echos treten dort wegen der ganz anderen Innenausbau-Eigenschaften und Geometrien in viel geringerem Maße auf.

Daher ist ein überlegenswertes Verbesserungskonzept die Änderung der raumakustischen Eigenschaften von Tunnelröhren. Beispiele wie der genannte „Tunnel Nr. 10“ oder auch andere Tunnel, wie zum Beispiel verschiedene im Münchner Stadtgebiet, zeigen, dass das technisch realisierbar ist, nämlich durch eine Tunnel-Innenausstattung mit schallabsorbierenden Wand- und Deckenverkleidungen. Geeignet dafür sind z. B. Plattenmodule, gefertigt aus Alu- oder Edelstahl-Lochblech mit Mineralwollhinterlegung oder Ziegelhohlsteine mit Mineralwolleinlagen.

Tatsächlich erreichen in derart gestalteten Tunneln ganz konventionelle Lautsprecheranlagen gute Verständlichkeit und können anforderungsgerecht eingesetzt werden.

Ein weiterer Vorteil solcher raumakustischen Ausrüstungen ist damit eine einhergehende erhebliche Reduzierung des gesamten Verkehrslärms sowohl innerhalb der Röhren als auch des emittierten Störlärms in die Umgebung.

Bekannte Nachteile schallabsorbierender Tunnelbekleidungen sind allerdings

- die hohen Installationskosten,
- die Notwendigkeit der regelmäßigen Reinigung,
- die Sichtverdeckung der Rohwände mit hieraus resultierendem erheblichem Aufwand bei der Durchführung regelmäßiger Bauwerksprüfungen,
- die im Laufe der Betriebszeit steigenden Rußablagerungen im Material.

Bei Anwendung dieses raumakustischen Konzepts können beschallungstechnische Anforderungen also ohne weiteres mit konventioneller Lautsprechertechnik erfüllt werden. Messungen in derartigen Tunneln weisen das auch objektiv nach (siehe Kapitel 3.3).

Die genannten Nachteile machen ein solches Konzept allerdings für eine Mehrzahl an Tunneln unpraktikabel, sodass dort stattdessen ausschließlich elektroakustische Lösungsansätze gefragt sind.

4.4 Konzept 2: Sequenzielle Beschallungen

Ein seit bereits etwa 2005 in der Ausstattungspraxis deutscher Straßentunnel bereits mehrfach angewendetes neues rein elektroakustisches Konzept zur Herstellung der notwendigen Sprachverständlichkeit trägt die Bezeichnung „sequenzielle Beschallung“.

Bei der sequenziellen Beschallung wird das oben erläuterte Prinzip der Verringerung von schädlichen Reflexionen unter Einsatz konventioneller Lautsprecher realisiert.

Die Grundlage dieses Konzepts bilden somit nicht die verwendeten Lautsprecher, sondern eine Betrachtung und entsprechende Steuerung der Schalleinstrahlungs-Logistik:

- Nur örtlich nahe liegende Lautsprecher übermitteln die beim Zuhörer benötigte Direktschallinformation.
- Weiter entfernt installierte Lautsprecher bewirken hingegen wegen der langen Laufzeit des von ihnen abgestrahlten Schalls schädliche Echoeffekte,
- zudem bewirken diese wegen der auf dem Wege bereits angeregten vielfachen Reflexionen an Wänden, Decke und Boden vielfache Echoeffekte und schädlichen Nachhall.

Daher wird bei einem sequenziellen Beschallungskonzept die Sprachinformation zunächst nur in einen begrenzten Abschnitt der Tunnelröhre über nur wenige Lautsprecher übertragen (deren Schallfelder zudem über Signal-Delays noch miteinander synchronisiert werden). Alle entfernteren Lautsprecher bleiben (bis auf weiteres) „stumm“.

Auf diese Weise erreicht man für diesen Abschnitt der Röhre tatsächlich eine Minimierung von Echos

und Nachhall und damit eine signifikante Steigerung der Verständlichkeit. Messungen weisen ein typisches Erreichen von Sprachverständlichkeits-Indizes im Bereich zwischen $STI = 0,45 \dots 0,55$ nach, was als ausreichende bis befriedigende Verständlichkeit gilt.

Um dennoch aber die gesamte Röhre – und nicht nur den beschriebenen begrenzten Abschnitt – im Sinne eines Sammelrufs zu versorgen, wird die Sprachinformation elektronisch zwischengespeichert und nach Abschluss der Übertragung in den ersten Abschnitt in einen weiteren Abschnitt gesendet.

Diese somit zeitversetzte Übertragung erreicht sukzessiv in mehreren Sequenzen die gesamte Röhre – es wird von einem „Quasi-Sammelruf“ gesprochen.

Bei längeren Tunnelröhren können ggf. auch räumlich weit auseinander liegende Segmente (mindestens 300 m ... 400 m), die sich akustisch nur noch geringfügig beeinflussen, während einer der Sequenzen zeitgleich versorgt werden.

Die Logistik der Zwischenspeicherung und zeitversetzten Durchschaltung erfolgt vollautomatisch in der ELA-Zentrale ohne Zutun des Leitwarten-Operators.

Mit diesem Konzept der sequenziellen Beschallung kann in „typischen“ (also raumakustisch unbehandelten) Tunneln bei sorgfältiger Dimensionierung in der Regel immer eine anforderungsgerechte Verständlichkeit mit $STI \geq 0,45$ erwartet werden.

Das Konzept war bis vor kurzem die einzige praktikable Möglichkeit zur Erzielung einer anforderungsgerechten Sprachverständlichkeit, solange nicht – wie im ersten Konzept beschrieben – drastisch in die extreme raumakustische Situation von Tunnelröhren eingegriffen wird.

Der große Nachteil des Konzepts ist aber die große Zeitspanne, die eine einzelne Durchsage benötigt, bis die gesamte Röhre erreicht ist.

Bei in der Praxis typisch bis zu $N = 3 \dots 4$ nacheinander zu beschallenden Tunnelsegmenten verlängern sich Sammelruf-Durchsagezeiten zum Teil auf kritisch lange Zeiträume – und sind dann kritisch bezüglich der notwendigen Reaktionszeiten, die zur Selbstrettung im Brandfall erforderlich sind.

Ein weiterer Nachteil ist die Irritation für die Personen, die sich zunächst außerhalb des aktuell mit einer Beschallungssequenz versorgten Segmentes

aufhalten. Die Schallanteile sind währenddessen in deren Segmenten komplett unverständlich wahrnehmbar.

Somit stellt eine sequenzielle Beschallung als Kompromisslösung wegen der hohen Verständlichkeit einen erheblichen Fortschritt gegenüber konventionellen Beschallungen dar – und zeichnet sich zugleich durch sehr kritische bestehende Nachteile aus.

4.4.1 Untersuchung einer sequenziellen Beschallung

Die Beschallungsanlage des Testtunnels Nr. 11 ist als eine sequenzielle Beschallung mit in Bild 24 dargestellten Lautsprecheranordnung aufgebaut.

Für die Beschallung der gesamten Röhre werden 13 dieser Anordnungen benötigt. Diese werden in 3 Sequenzen in Folge angesteuert (s. Bild 25).

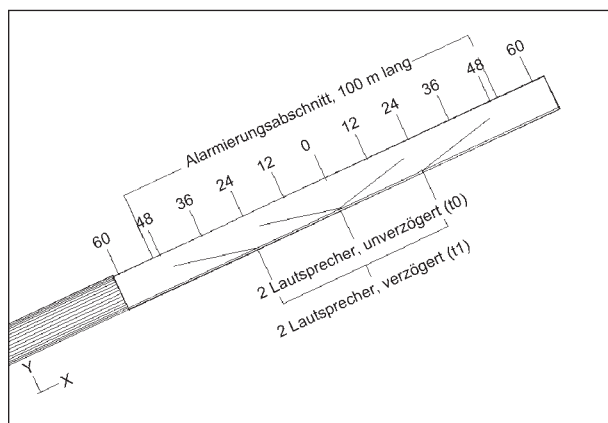


Bild 24: Lautsprecheranordnung der Beschallungsanlage des Testtunnels

Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt

1. Rufsequenz			
Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt

2. Rufsequenz			
Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt	Alarmierungs-Abschnitt

3. Rufsequenz			

Bild 25: Sequenzielle Ansteuerung für Quasi-Sammelruf

Messungen der Sprachverständlichkeit wurden mit einem Pegel von 100 bis 105 dB (SPL) durchgeführt, um die Maskierungseffekte bei hohen Schalldrücken zu berücksichtigen.

Die gemessenen Werte für die Sprachverständlichkeit lagen gemittelt für eine Einzelgruppe bei einem Wert von:

$$STI = 0,54$$

Für eine komplette Sequenz wurden folgende Werte gemessen:

$$STI = 0,50$$

Bei den Messungen wurde der Störpegelabstand nicht berücksichtigt. Wird ein S/N von 10 dB (SPL) vorausgesetzt, ist der gemessene Wert mit 0,91 zu bewerten. Damit ergibt sich für die komplette Sequenz:

$$STI = 0,46$$

Diese Werte entsprechen einer ausreichenden Sprachverständlichkeit.

Bei der subjektiven Beurteilung klangen die Durchsagen jedoch sehr nasal und ohne Präsenz (siehe Bild 28).

Am Frequenzgang ist deutlich zu sehen, dass die Wiedergabe von Frequenzen oberhalb 2.000 Hz deutlich eingeschränkt ist. Die Maxima liegen ca. 15 dB höher als die Eckpunkte des benötigten Frequenzbereichs.

Die gemessenen STI-Werte berücksichtigen systematisch nicht einen unlinearen Frequenzgang bei den Messungen. Die Voraussetzungen der Mes-

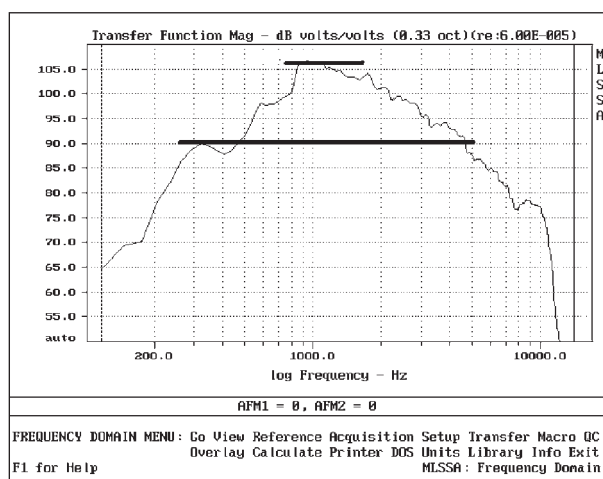


Bild 26: Frequenzgang der Beschallungsanlage des Testtunnels

sung sind damit ungeeignet, um einen gültigen STI-Wert zu bestimmen. Daher stimmt die hier subjektiv wahrgenommene recht mäßige Sprachverständlichkeit nicht mit den relativ guten STI-Messwerten überein (siehe Kapitel 2.1.2).

Es ist absolut erforderlich, einen Übertragungsfrequenzgang zu realisieren, der Frequenzen von 300 Hz bis 8.000 Hz linear reproduziert (siehe Bild 26).

4.5 Konzept 3: Zeitlich synchronisierte Längsbeschallung (SLASS, „synchronized longitudinal announcement speaker system“)

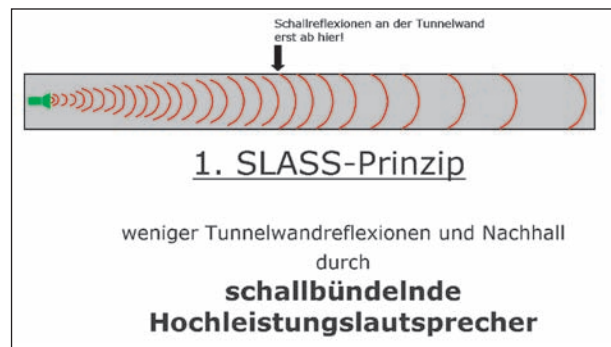
Um ein Konzept für einen echten Sammelruf mit hoher Verständlichkeit zu entwickeln, wurden folgende Vorüberlegungen angestellt:

Erforderlich sind

- eine sehr konsequente Nutzung aller bekannten verständlichkeitsfördernden akustischen Prinzipien,
- die Erlangung genauer Kenntnisse über die spezifischen Schallausbreitungsbedingungen in Tunnelröhren, die in intelligenter Weise genutzt werden müssten,
- die Entwicklung von Lautsprechern, die sowohl auf die notwendigen akustischen Anforderungen exakt abgestimmt als auch bautechnisch in Tunnelanlagen integrierbar sein müssen.

Die Konsequenz aus diesen Vorüberlegungen war die Abkehr von konventioneller Beschallung, die einzelne Tunnelabschnitte mit herkömmlichen Lautsprechern zu versorgen versucht, denn dabei werden als Randeffekt immer übermäßig viele Schallanteile direkt auf Wand- und Deckenflächen gelenkt, die dort alle erwähnten destruktiven Nachhall- und Echoeffekte verursachen.

Alle Überlegungen führten als Ergebnis zu der als SLASS-Konzept eingeführten Beschallungssystematik, deren auffallende Besonderheit eine gerichtete Schalleinstrahlung längs durch die Tunnelröhre ist.



Mittels eines über den gesamten Übertragungsbereich extrem eng abstrahlenden Lautsprechers mit hoher Schalleistung soll ein möglichst langer Abschnitt des Tunnels versorgt werden.

Wände und Decken sollen sich weitgehend außerhalb des Abstrahlwinkels befinden.

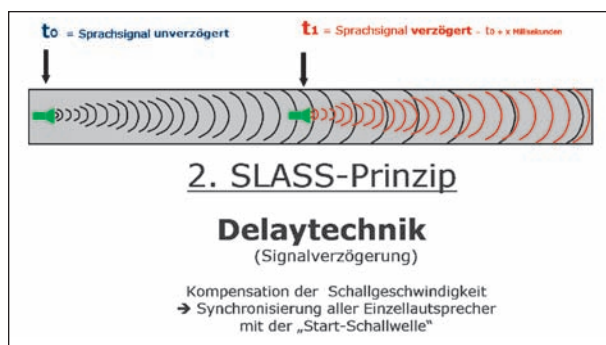
Dieses Prinzip soll die Anregung störender Reflexionen an den Tunnelwänden stark reduzieren, die bei klassischer Beschallung mit breit strahlenden oder geneigten Lautsprechern als stumpfwinklige Reflexionen in unmittelbarer Nähe der Lautsprecher in hoher Dichte auftreten.

Das physikalisch dennoch unvermeidliche Auftreten nennenswerter Schallenergieanteile auf die Tunnelwände soll erst in so großer Entfernung vom Lautsprecher erfolgen, dass die resultierenden sehr spitzen Ein- und Ausfallwinkel die Entstehung früher Reflexionen entlang der Tunnelröhre bewirken, die dann als „Schall-Paket“ zusammen mit dem Direktschall sowohl Verständlichkeit als auch Lautstärke konstruktiv erhöhen (siehe Bild 10).

Die Voruntersuchungen, die in den Kapiteln 3.6 bis 3.9. beschrieben werden, haben hinsichtlich der Schallpegelverläufe gezeigt, dass bei einer stark gebündelten Schallabstrahlung eine relativ lange Tunnelstrecke mit recht konstant bleibendem Schalldruckpegel und konzentrierten frühen Reflexionen versorgt werden kann („Plateaubereich“, siehe auch Bild 20). Nach dem Plateaubereich fällt jedoch der Pegel ungewöhnlich schnell ab!

Durch diesen Effekt scheint die Realisierbarkeit auch relativ langer Beschallungszonen mit sehr wenig destruktiven Reflexionen möglich. Zugleich kann dabei die Schallenergie in größerer Entfernung offenbar schneller abfallen als in klassischen Beschallungsmodellen und Raumgeometrien und wird damit in nachfolgenden Beschallungszonen nicht (wie sonst typisch) nennenswert stören.

Ab dem Punkt, an dem entweder Schallpegel oder aber Verständlichkeit unter ein vertretbares Maß abgefallen sind, sollte dann ein gleichartiger Lautsprecher den folgenden Tunnelabschnitt versorgen.



Durch einen elektronischen Laufzeitausgleich (Delay) ist dessen Schalleinstrahlung in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit mit dem Schallfeld des ersten Lautsprechers zu synchronisieren (da anderenfalls massive Echos entstünden).

In gleicher Weise ist mit allen Folgeabschnitten zu verfahren.

Auf diese Weise soll eine longitudinale Schalldurchstrahlung der gesamten Tunnelröhre durch eine fortlaufende und in den entsprechenden Abständen immer wieder zeitlich und pegelmäßig regenerierte Schallwellenfront erreicht werden.

Sehr kritisch ist bei diesem Konzept aber die Tatsache, dass es keine idealen Lautsprecher geben kann, die tatsächlich nur in den gewünschten Winkelbereich strahlen. In der Realität werden immer auch Schallenergieanteile in alle anderen Winkelbereiche abgestrahlt. Bezogen auf die rückwärtige Abstrahlung wird das gesamte Konzept dadurch massiv infrage gestellt: Rückwärtige Schallabstrahlung mit zudem verzögerten Signalen wird ab einer gewissen Größenordnung massive Echos generieren.

Das Konzept erfordert daher Lautsprecher mit sowohl eng gebündelter Schallabstrahlung in Hauptrichtung als auch zugleich allerhöchster Rückwärtsdämpfung für den gesamten abgestrahlten Frequenzbereich.

Außerdem müssen derartige Lautsprecher das gesamte Sprachfrequenzband linear wiedergeben (was bei vielen herkömmlichen Hochleistungslautsprechern nicht berücksichtigt ist und die Verständlichkeit beschränkt).

3. SLASS-Prinzip

Breitbandig lineare Übertragung
kompletter Sprachfrequenzbereich
250 Hz 8.000 Hz

Dieses grundsätzliche theoretische Konzept war auf seine praktische Realisierbarkeit und die tatsächliche Erzielung anforderungsgerechter Verständlichkeit zu untersuchen.

5 Untersuchung des SLASS-Lautsprecherkonzeptes

5.1 Voraussetzungen und Ziele der praktischen Untersuchungen

Auf Basis der in Kapitel 4 vorgenommenen Gegenüberstellung verschiedener Beschallungskonzepte werden die an eine Beschallungsanlage gestellten Anforderungen unter Beachtung insbesondere der

- Gleichzeitigkeit der Vermittlung von Informationen an alle Personen im Tunnel,
- Erzielung ausreichender Sprachverständlichkeit,
- Vermeidung bzw. Minimierung des Einsatzes schallabsorbierender Materialien im Regelfall

durch eine SLASS-Beschallung in besonderem Maße erfüllt. Lediglich dieses Konzept wird als geeignet gesehen, eine ausreichende Verständlichkeit von Durchsagen innerhalb kürzester Zeit mittels Sammelrufs im Tunnel sicherzustellen. Die sequenzielle Beschallung eines Tunnels ermöglicht zwar im jeweils aktiven Segment ebenfalls eine ausreichende Sprachverständlichkeit, kann jedoch in den nicht aktiven Segmenten die anzusprechenden Personen verunsichern. Auch führt bei einer sequenziellen Beschallung die abschnittsweise Informierung der Tunnelnutzer zu einer insgesamt längeren Dauer der Informationsvermittlung an alle Tunnelnutzer, die sich vor allem im Brandfall als nachteilig erweisen könnte.

Zur Realisierung einer SLASS-Beschallung waren zunächst die Eigenschaften verschiedener für dieses Konzept ggf. geeigneter Lautsprecher in ihren

wesentlichen Kennparametern zu untersuchen. In praxisnahen Versuchsanordnungen waren die in der Realität damit tatsächlich zu erwartenden Ergebnisse objektiv zu untersuchen und die kritischen Aspekte herauszuarbeiten.

Neben vertiefenden Einsichten in die Schallausbreitungsbedingungen in Tunnelröhren sollen alle Ergebnisse unter dem praktischen Aspekt der zukünftigen Anwendbarkeit von synchronisierten Längsbeschallungen ausgewertet werden.

Im Laufe der Vorbereitungsarbeiten ergab sich weiterhin die für eine vertiefende Untersuchung des SLASS-Konzeptes günstige Situation, dass bereits auf der Basis der Ergebnisse erster Voruntersuchungen bei mehreren laufenden Bauvorhaben die Lautsprecherplanungen auf das SLASS-Konzept geändert wurden.

Dadurch wurden die ersten vollständigen Installationen noch im Laufe des Frühjahrs und Sommers 2009 fertig gestellt und konnten noch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens inklusive vieler Randbedingungen untersucht und in die Auswertungen aufgenommen werden.

5.2 Für Voruntersuchungen genutzter Testtunnel

Umfangreichere Untersuchungen und Messungen wurden in Tunnel 11 (siehe Tabelle 3) durchgeführt. Der Tunnel hat zwei Röhren mit je einer Länge von circa 1,3 km, rund 14 m Breite und etwa 5,2 m Höhe.

Die Fahrbahn besteht aus Beton. Der Tunnel besitzt einen kürzeren „bergmännischen“ (runden) Abschnitt und einen längeren Abschnitt mit rechteckigem Querschnitt. Er besitzt zudem einige horizontale Ausbuchtungen als Nothaltenischen. Alle Oberflächenmaterialien sind Beton, Querschläge sind mit Metalltüren versehen.

5.3 Messdurchführungen

Zur Durchführung der schalltechnischen Messungen wurden folgende Hilfsmittel eingesetzt:

- MLSSA-Audio-Messsystem,
- MBH-Kugelmessmikrofon,
- Symmetrix-Vorverstärker SX202,
- Pentadodekaeder-Lautsprecher,
- Schallpegelmessgerät Kl. 2 IPG,

- Edirol-UA25-A/D-Wandler (für Audioaufnahmen).

Die Messungen wurden durch subjektive Beurteilungen und Audioaufnahmen ergänzt.

5.4 Einzel-Untersuchung verschiedener Lautsprechertypen

5.4.1 Untersuchte Lautsprechertypen

Es wurden in einem ersten Messdurchgang 3 verschiedene Lautsprecherbauarten untersucht. Alle sind prinzipiell unter praktischen Tunnelbedingungen einsetzbar.

Alle Lautsprecher wurden mittels einer Hebevorrichtung direkt unterhalb der Tunneldecke auf einer Höhe von etwa 5 m positioniert und ausgerichtet.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Verfügbarkeit wurden für mehrere unterschiedliche Prototypen des Typs „Grenzflächenhorn“ in einem späteren Messdurchlauf weitere vergleichende Messungen wesentlicher Parameter durchgeführt.

5.4.1.1 Typ „Trichter“

Kurzbeschreibung von Bild 27:

- Konventioneller Trichter-Hornlautsprecher mit Druckkammertreiber maximaler Baugröße und Leistungsfähigkeit aus typischem industriellem Beschallungs-Lautsprechersortiment,
- Austrittsöffnung rund mit Durchmesser ca. 40 cm, Tiefe ca. 50 cm,
- Empfindlichkeit bei 111 dB (SPL/1 W, 1 m), elektrische Belastbarkeit bei 100 Watt, Bündelung bis $DI > 13$ dB, rechnerisch erreichbarer Maximal-



Bild 27: Trichterlautsprecher

schalldruckpegel damit bei 131 dB (100 W/1 m).

5.4.1.2 Typ „Tunnelhorn“

Kurzbeschreibung von Bild 28:

- Neuentwicklung mit eng bündelndem großen Spezialhorn,
- Austrittsöffnung etwa 51 cm x 28 cm, Länge etwa 115 cm, mit gleichem Druckkammertreiber wie Typ „Trichter“,
- Empfindlichkeit bei 113 dB (SPL/1 W, 1 m), elektrische Belastbarkeit bei 100 Watt, rechnerisch erreichbarer Maximalschalldruckpegel damit bei 133 dB (100 W/1 m).

5.4.1.3 Typ „Grenzflächenhorn“

Kurzbeschreibung von Bild 29:

- Neuentwicklung mit eng bündelndem großen Grenzflächenhorn zur unmittelbaren Deckenmontage,



Bild 28: Tunnelhorn



Bild 29: Grenzflächenhorn

- Austrittsöffnung etwa 99 cm x 33 cm, Länge etwa 158 cm, mit großem Druckkammertreiber,
- Empfindlichkeit bei 116 dB (SPL/1 W, 1 m), elektrische Belastbarkeit bei 50 Watt, rechnerisch erreichbarer Maximalschalldruckpegel damit bei 133 dB (50 W/1 m).

5.4.2 Vergleich der Rückwärtsdämpfungen

Die Rückwärtsdämpfung ist einer der wichtigsten Parameter unter dem Aspekt einer zeitlich synchronisierten Längsbeschallung.

Messungen wurden am Typ „Tunnelhorn“ und „Grenzflächenhorn“ auf Ohrhöhe 1,7 m in jeweils 20 m Abstand direkt vor und direkt hinter dem unter der Tunneldecke befindlichen Lautsprecher im Testtunnel durchgeführt. Zum annähernden Vergleich des Trichterlautsprechers, der hier nicht gemessen wurde, wurden Datenblätter herangezogen.

Je größer die Rückwärtsdämpfung, desto besser werden die kritischen Echostörungen bei Längsbeschallungen reduziert.

Die mit Abstand höchsten Rückwärtsdämpfungen erzielt das Grenzflächenhorn, das Tunnelhorn besitzt etwa 5 dB geringere Werte, die erst ab 400 Hz wirksam werden. Die Werte für den Trichterlautsprecher sind in Größenordnungen des Tunnelhorns, aber vor allem im unteren Frequenzbereich etwas geringer.

Bei Gegenüberstellung dieser besonderen Praxiswerte zu denen von Lautsprecher-Labormessungen ist zu beachten, dass es sich hier um Resultate mit Einbeziehung des praktischen Einflusses typischer Tunnelreflexionen handelt. Labor-

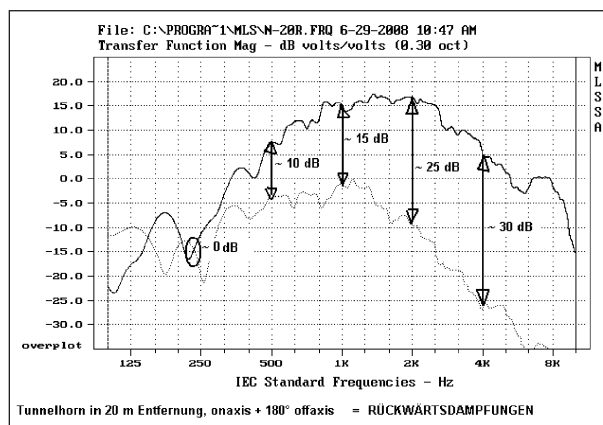


Bild 30: Rückwärtsdämpfung Tunnelflächenhorn, gemessen im Tunnel

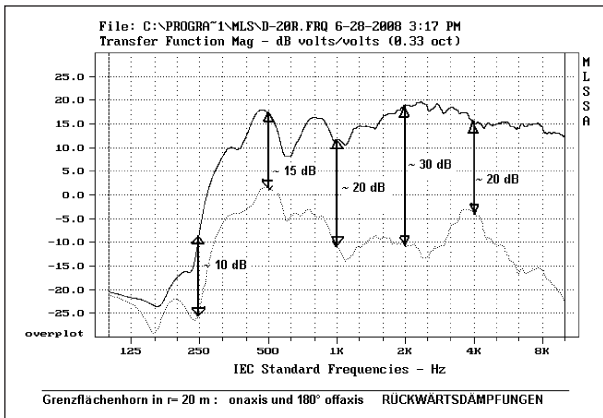


Bild 31: Rückwärtsdämpfung Grenzfächernhorn, gemessen unter Praxisbedingungen im Tunnel (KEINE reflexionsfreie Labormessung)

	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz
Tunnelhorn	Keine	≈ 10 dB	≈ 15 dB	≈ 25 dB	≈ 30 dB
Grenzflächen-Horn	≈ 10 dB	≈ 15 dB	≈ 20 dB	≈ 30 dB	≈ 20 dB
[Trichter] (ohne Messung nur aus Datenblatt abgeschätzt)	Keine	≈ 5 dB	≈ 15 dB	≈ 20 dB	≈ 25 dB

Tab. 5: In der Praxis erzielte Rückwärtsdämpfungen bei Messung im Tunnel (KEINE reflexionsfreie Labormessung)

messdaten der gleichen Lautsprecher müssen in der Regel höhere Rückwärtsdämpfungen ausweisen. Das ist bei Definition von Lautsprecherkennwerten an späterer Stelle zu berücksichtigen.

5.4.3 Schallpegelabfall über Entfernung

Bei Längsbeschallung ist der Schallpegelabfall von Interesse, sowohl für die Gleichmäßigkeit der Schallpegelversorgung eines zu versorgenden Flächenbereichs als auch hinsichtlich der gewünschten Abnahme außerhalb dieses Bereichs.

Ausgewertet wurden die Gesamtschallpegelabfälle, sowohl breitbandig als auch in einzelnen Oktaven.

Der bereits aus früheren Messungen bekannte Verlauf mit Plateaubereich mit relativ geringer Pegelabnahme von nur etwa 1 bis 2 dB/Entfernungsverdoppelung innerhalb einer mittleren Entfernung – hier bis etwa 100 m – konnte bestätigt werden und gilt für Tunnel- und Grenzflächenhorn (siehe auch Bild 23 und Bild 31).

In größerer Entfernung erfolgt ein steilerer Abfall mit > 6 dB/Verdoppelung, ähnlich dem Verlauf im Freifeld.

Auswirkungen für das Längsbeschallungskonzept:

Es sind offenbar Lautsprecherabstände im Bereich bis über $r > 40-60$ m realisierbar.

5.4.4 Frequenzgänge

Für eine verständliche Übertragung sollte ein linearer Frequenzgang

- im Bereich von etwa 400 Hz bis etwa 5 kHz übertragen werden (+/- 3 dB),
- insgesamt sollte die Übertragung ab etwa 300 Hz bis zu 8 kHz durchgeführt werden (etwas größere Abfälle auf rd. -10 dB zulässig)

(siehe Bild 16: Toleranzband für Sollfrequenzgang).

Bei den Frequenzgängen für den Trichterlautsprecher und das Tunnelhorn ist eine Überhöhung der Frequenzen zwischen 1.000 und 2.000 Hz von ca. +15 dB über den Eckpunkten des benötigten Frequenzbereichs deutlich zu erkennen.

Das Problem bei der Umsetzung des notwendigen linearisierten Sollfrequenzgangs ist, dass die gängigen Lautsprechersysteme die benötigten Schalldruckpegel von 105 dB (SPL) bei einer hierzu notwendigen starken Entzerrung durch elektronische Filter nicht mehr erreichen können.

Es sind aber Lautsprecher gefordert, die einen entsprechenden Frequenzgang bei den geforderten Schalldrücken erreichen, denn bei der kritischen Verständlichkeitsbedingung in Tunneln ist für die Beschallung eine Reduktion auf Telefonbandbreite (300 Hz-3,6 kHz) nicht tolerierbar, da hier zu viele Informationsanteile verloren gehen (verbleibend nur 80 % von 100 % Silbenverständlichkeit).

Beim verwendeten Grenzflächenhorn ist eine gute Korrespondenz mit dem Sollfrequenzgang zu erkennen.

Das Frequenz-Übertragungsverhalten des Grenzflächenhorns lässt deshalb im Vergleich die bessere Verständlichkeit erwarten.

In den Bild 32 bis 36 sind die Frequenzgänge der beiden Tunnellautsprecher mit Frequenzgangsentzerrung dargestellt.

Eine Frequenzgangsentzerrung beim Tunnelhorn – ohne den max. Schalldruck allzu weit zu senken und ohne hörbare Verzerrungen zu produzieren – ist nur bedingt möglich.

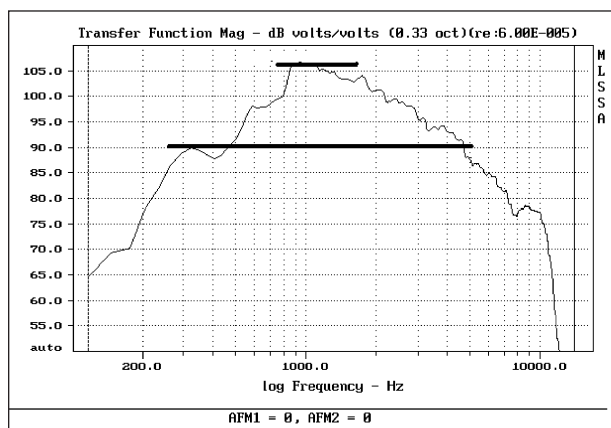


Bild 32: Frequenzgang Trichterlautsprecher

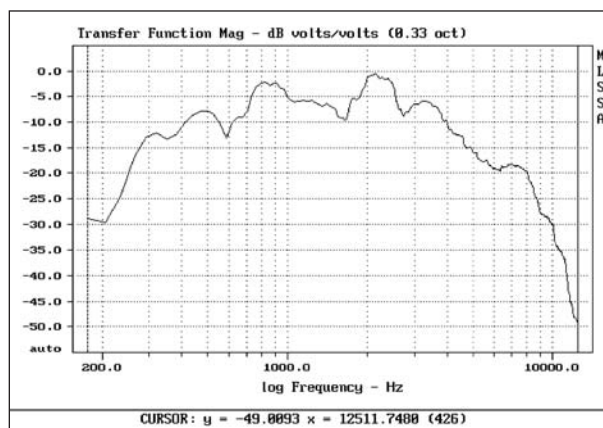


Bild 35: Frequenzgang Tunnelhorn mit EQ

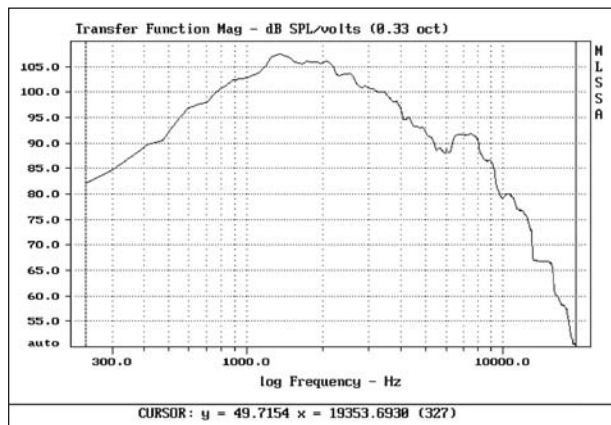


Bild 33: Frequenzgang Tunnelhorn

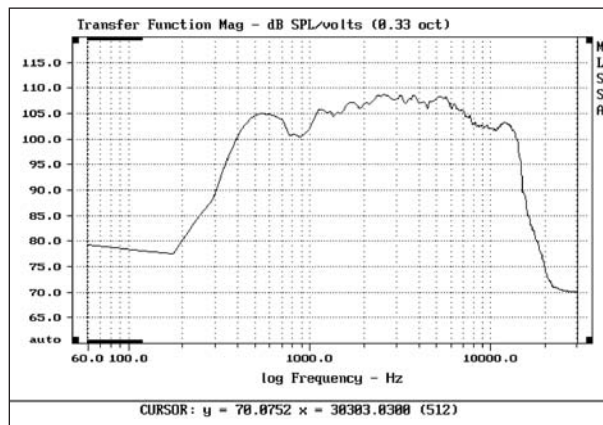


Bild 36: Frequenzgang Grenzflächenhorn mit EQ

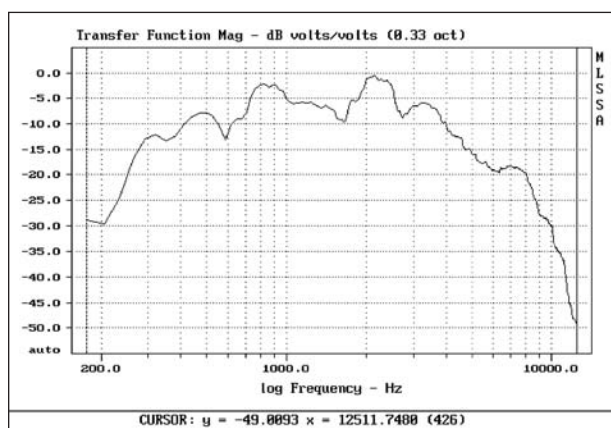


Bild 34: Frequenzgang Grenzflächenhorn

Der nutzbare Frequenzgang reicht nach einer vorgenommenen moderaten Entzerrung von 500 Hz bis ca. 5.000 Hz mit einer Überhöhung zwischen 1 kHz und 2 kHz, oberhalb 5.000 Hz fällt die Übertragung mit rund 10 dB/Oktave steil ab. Stärkere Equalisierungen sind hier kaum möglich, da der Lautsprecher dann bereits bei geringeren Lautstärkepegeln zu verzerren beginnt.

Diese Eigenschaft wird nach unserer Kenntnis im Wesentlichen durch die Art der Konstruktion des Druckkammertreibers hervorgerufen. Durch gezielte Nutzung von Resonanzen, die nur gering bedämpft werden, erzielen die Hersteller mit minimiertem Materialkostenaufwand hohe Schalldruckpegel, die aber nur entsprechend frequenzselektiv vorhanden sind. Breitbandiger arbeitende Druckkammertreiber erfordern vor allem Magnete mit höherer Flussdichte, was die Treiber dann aber signifikant verteuert.

Das Grenzflächenhorn hat bereits ohne EQ einen nutzbaren Frequenzgang von 500 bis 5.000 Hz. Das erklärt sich bereits bei Blick auf die Baugröße und die Masse des integrierten Druckkammertreibers, der unter anderem über einen starken Magneten verfügt.

Nach der elektronischen Entzerrung ist ein linearer Frequenzgang von 300 Hz bis 10.000 Hz nutzbar.

5.4.5 Darstellung der Sprachverständlichkeit und des Pegels über der Entfernung

Die Messungen wurden mit jeweils einem der zu testenden Lautsprecher durchgeführt. Die Lautsprecher wurden in einem Tunnelabschnitt ohne Querschnittsänderungen positioniert.

Der Verlauf zeigt wie erwartet deutlich bessere Werte für die Sprachverständlichkeit bei den Spezialhörnern. Dabei hat das deutlich größere und somit kontrollierter abstrahlende Grenzflächenhorn deutliche Vorteile gegenüber dem Tunnelhorn.

Hier sind starke Abweichungen bei den 3 untersuchten Lautsprechern erkennbar. Die erzielte Sprachverständlichkeit wird im ruhigen Tunnel vorrangig durch das Verhältnis vom informationstragenden Direktschall zum Nachhallfeld bestimmt. Ausschlaggebend sind insbesondere die unter-

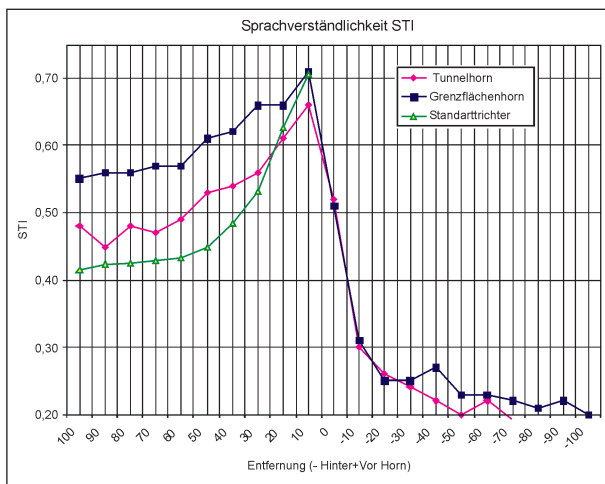


Bild 37: STI-Werte für einzeln gemessene Lautsprecher

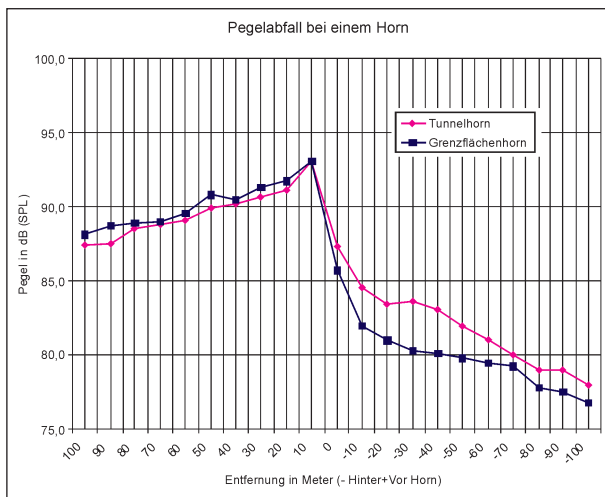


Bild 38: Pegelabfall für einzeln gemessene Lautsprecher (Breitbandig gemessen)

schiedlichen Bündelungsfähigkeiten der Lautsprecher.

Das Grenzflächenhorn erreicht hier bis zu einer Distanz von $r > 50$ m hohe Werte von $STI > 0,60$, das Tunnelhorn liegt hier bei $STI > 0,50$, ein konventionelles Trichterhorn erzielt etwa $STI > 0,45$.

Die Ergebnisse für das konventionelle Trichterhorn weisen auf eine Verwendbarkeit nur in geringeren Distanzen bzw. dichten Anordnungen hin, das Tunnelhorn stellt scheinbar einen Kompromiss dar.

Die tatsächlich zu erwartenden Verständlichkeiten können unmittelbar aus den praktischen Versuchen mit mehreren Lautsprechern abgeleitet werden.

Hier sind die in den vorhergehenden Abschnitten beleuchteten diskreten Parameter in Hinsicht auf die Sprachverständlichkeit gemeinsam zu betrachten:

Der Pegelabfall in Abstrahlrichtung ist bei Grenzflächen- und Tunnelhorn-Lautsprecher gleich. Die Unterschiede in der Rückwärtsdämpfung sind aber deutlich sichtbar. Der vom Grenzflächenhorn rückwärtig abgestrahlte Schall fällt deutlich steiler und damit besser ab.

Gerade bei den in der Praxis wichtigen Entfernungen von ca. 20 bis 50 m resultiert beim Grenzflächenhorn eine 3 bis 4 dB bessere Rückwärtsdämpfung. Das entspricht im Verhältnis zum Tunnelhorn etwa einer Halbierung (!) der rückwärts abgestrahlten Energie.

Dies lässt auf bessere Sprachverständlichkeit auch bei der angestrebten Anordnung von mehreren Lautsprechern schließen.

5.5 Zeitlich synchronisierte Längsbeschallung, Mittenmontage der verschiedenen Lautsprecher

Um die Machbarkeit einer solchen Anordnung messtechnisch zu überprüfen, wurde die Anordnung aus Bild 39 gewählt.

Es wurden 2 bis 3 Hornlautsprecher jeweils in der Fahrbahnmitte direkt unter der Decke platziert.

Die Lautsprecher wurden mit einer Leistung von je 50 Watt angesteuert, und für jeden Lautsprecher waren eine separate Signalverzögerung und Frequenzgangentzerrung vorhanden.

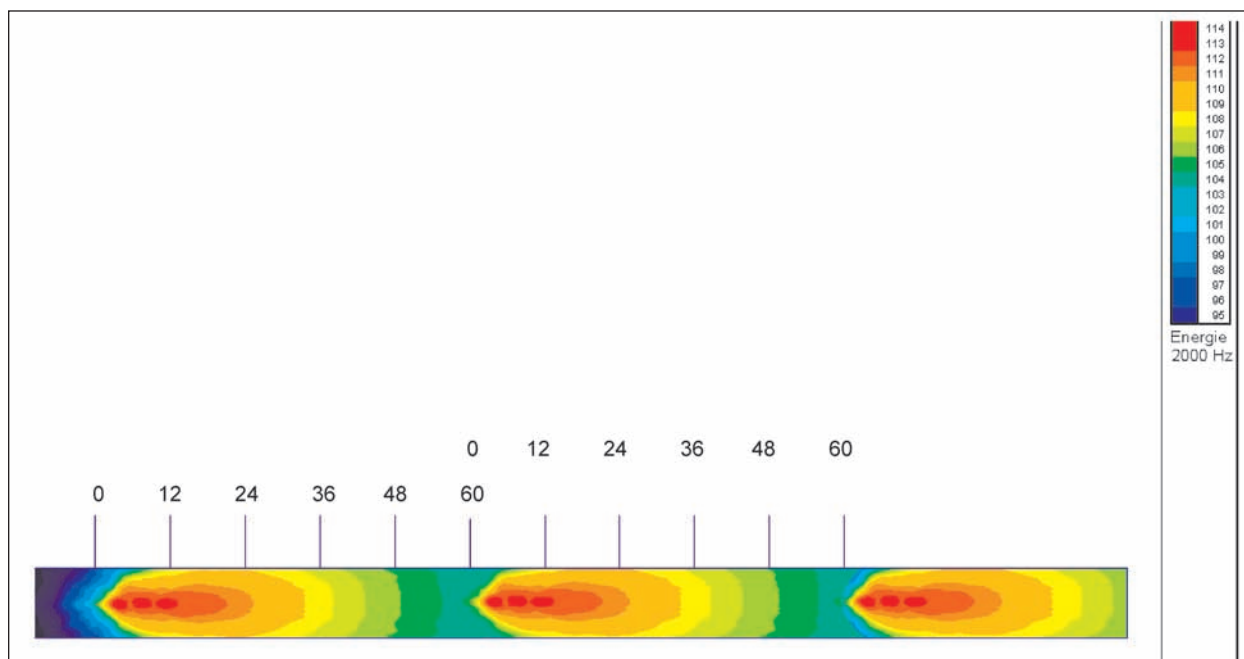


Bild 39: Lautsprecheranordnung in Draufsicht

Die dargestellten Diagramme für die Sprachverständlichkeit vergleichen Werte von Grenzflächen- und Tunnelhornanordnungen, gemessen bei Schalldruckpegeln zwischen 95 und 100 dB (SPL).

Die elektronischen Delays der Lautsprecher wurden zur Laufzeitanpassung durch direkte akustische Messungen exakt parametrisiert.

Diese Signalverzögerungen müssen für jeden Lautsprecher genau eingestellt werden: Schon geringe Fehleinstellungen führen in größeren Entfernungen zu einer Verschmierung der Wellenfront.

5.6 Darstellung der Sprachverständlichkeit und des Pegels über der Entfernung für die in Reihe angeordneten Lautsprecher

Es ist deutlich zu sehen, dass die Sprachverständlichkeit gegenüber dem Einsatz von nur einem Lautsprecher (Bild 37) deutlich sinkt, was zu erwarten ist. Dieser Effekt wirkt sich beim Grenzflächenhorn deutlich geringer aus als bei den anderen Lautsprechertypen.

Es ist hier ein direkter Zusammenhang mit den Bündelungseigenschaften der Lautsprecher festzustellen.

Deutlich zu sehen ist die Wirkung der Lautsprecherbündelung an den breitbandigen Impulsant-

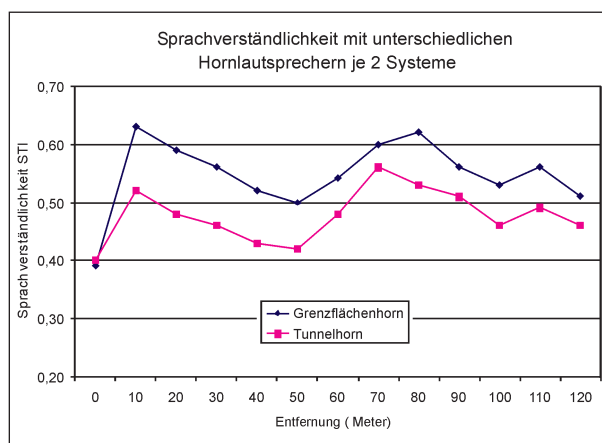


Bild 40: Vergleich der Sprachverständlichkeit Grenzflächenhorn und Tunnelhorn bei je 2 Lautsprechern im Abstand von 60 m

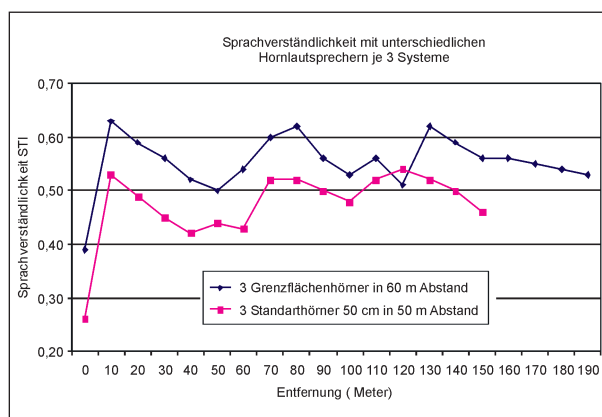


Bild 41: Vergleich der Sprachverständlichkeit von Grenzflächenhorn und Trichter bei je 3 Lautsprechern

worten in 150 m Entfernung vom jeweils ersten Lautsprecher.

Bei den Impulsantworten ist deutlich zu sehen, dass die Grenzflächenhörner die besten Bündelungseigenschaften haben und somit mit Abstand die geringste zeitliche Verschmierung des Impulses bewirken.

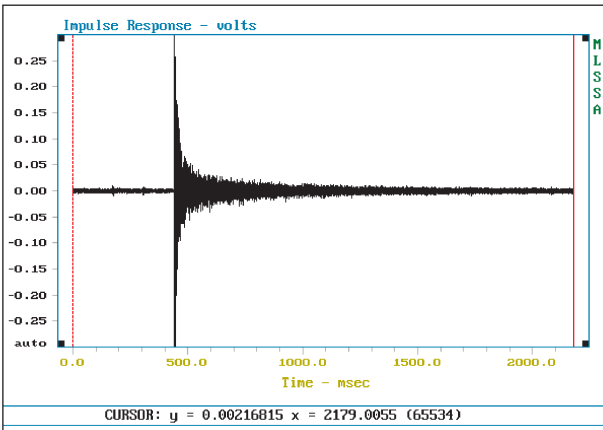


Bild 42: Impulsantwort Grenzflächenhorn in 150 m vom ersten Lautsprecher

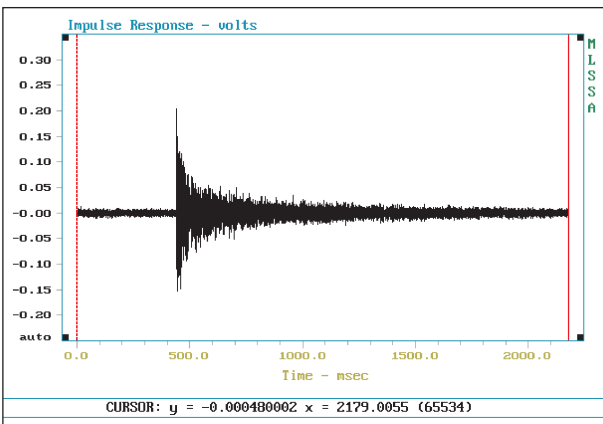


Bild 43: Impulsantwort Tunnelhorn in 150 m vom ersten Lautsprecher

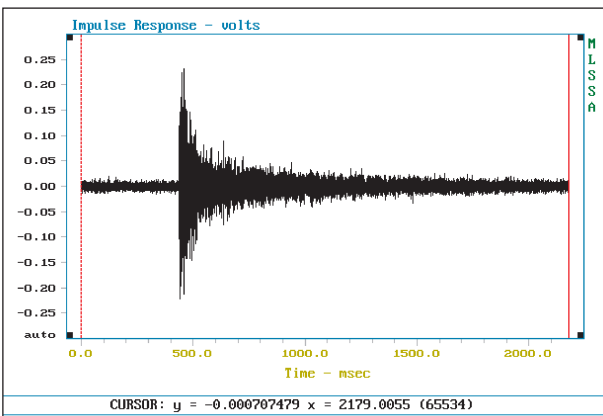


Bild 44: Impulsantwort Standard-Hornlautsprecher in 150 m vom ersten Lautsprecher

Die Darstellung der Standardtrichter ist aufgrund der Montageart nicht ganz mit den beiden anderen Lautsprechern zu vergleichen. Aufgrund der großen Bauhöhe von ca. 70 cm (montiert) ist eine tunnelmittige Montage selten möglich. Die Lautsprecher sind hier nicht in der Tunnelmitte, sondern seitlich installiert. Die Lautsprecher sind ca. 3° zur Tunnelmitte ausgerichtet.

Dabei ist zu beachten, dass die Standardhörner nicht mit einem Abstand von 60 m, sondern mit einem Abstand von 50 m installiert sind. Dies ist die max. Montagedistanz, in der diese Lautsprecher sinnvoll eingesetzt werden können.

Bei den durchgeführten Messungen im leeren Tunnel waren Störgeräusche zu vernachlässigen, da das S/N immer größer als 20 dB war.

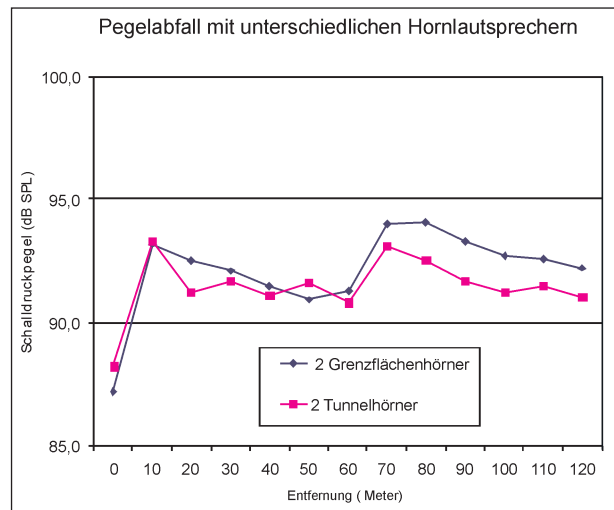


Bild 45: Pegelabfall bei Einsatz von je 2 Lautsprechern/Vergleich Grenzflächen- mit Tunnelhörnern

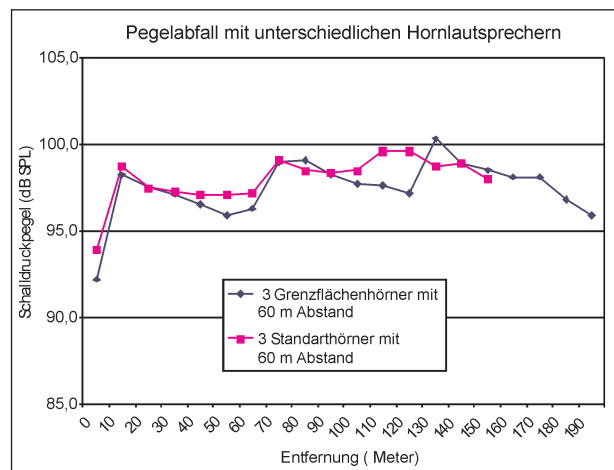


Bild 46: Pegelabfall bei Einsatz von je 3 Lautsprechern/Vergleich Grenzflächen- mit Standard-Hörnern

Als Mittelwert für die Sprachverständlichkeit mit den jeweils in Reihe angeordneten und synchronisierten Lautsprechern wurden folgende Werte ermittelt:

Grenzflächenhörner: STI = 0,56,

Tunnelhörner: STI = 0,53,

Standardtrichter: STI = 0,48.

Wird für die Betriebspraxis ein S/N von 10 dB vorausgesetzt, ist der gemessene Wert mit 0,91 zu bewerten.

Damit ergeben sich für die Praxis unter Verkehrslärm für die gemessenen Anordnungen rechnerisch folgende Werte:

Grenzflächenhörner: STI = 0,51,

Tunnelhörner: STI = 0,47,

Standardtrichter: STI = 0,43.

Aus dieser Aufstellung ist zu sehen, dass mit den Grenzflächenhörnern die in der DIN EN 60849 geforderten Werte von $STI \geq 0,50$ knapp erreicht werden können. Wird die bei dieser Norm geforderte Einbeziehung der Standardabweichungen (Mittelwert minus Standardabweichung) berücksichtigt, ist ein STI von 0,50 nicht mehr zu erreichen.

In Anbetracht der subjektiven Beurteilung der Sprachverständlichkeit durch Hörproben im Tunnel und unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der technischen Entwicklung wird ein Mindestwert für Straßentunnel von $STI = 0,45$ empfohlen. Im Verlauf der weiteren technischen Entwicklung sollten jedoch höhere Mindestwerte von bis zu $STI = 0,50$ angestrebt werden.

5.6.1 Einfluss mehrerer aktiver Grenzflächenlautsprecher auf die Sprachverständlichkeit

Bei einer späteren Untersuchung im Tunnel 14 wurde eine Messreihe zur Ermittlung der im Tunnel erreichbaren STI-Werte durchgeführt. Für die Untersuchung stand eine mit 15 Grenzflächenhörnern ausgestattete Tunnelröhre zur Verfügung. Bei der Untersuchung sollten die Auswirkungen von nacheinander zugeschalteten Lautsprechern auf einen singulären Messpunkt ermittelt werden. Die zu Grunde liegende Fragestellung dabei war, ob in Abhängigkeit von der Tunnellänge bzw. einer hierdurch ansteigenden Anzahl synchronisierter Laut-

sprecher Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit zu erwarten sind.

Bei den Messungen wurde zwischen den auf den Messpunkt hinstrahlenden („Frontschall“ erzeugend) und den vom Messpunkt wegstrahlenden Lautsprechern („Rückschall“ erzeugend) unterschieden.

Dazu wurde eine STI-Messung 30 m vor dem eingeschalteten Lautsprecher Nr. 10 durchgeführt. Dieser Messpunkt ist für alle weiteren Messungen identisch.

Für die „Frontschall-Messreihe“ wurden nacheinander die Lautsprecher 9+8+7+6+5 zugeschaltet und je eine Messung durchgeführt, um die Veränderungen des STI-Wertes am Messpunkt zu ermitteln.

In der „Rückschall-Messreihe“ wurden nacheinander die Lautsprecher 11+12+13+14+15 zugeschaltet, um die entsprechenden Veränderungen des STI-Wertes am Messpunkt zu ermitteln.

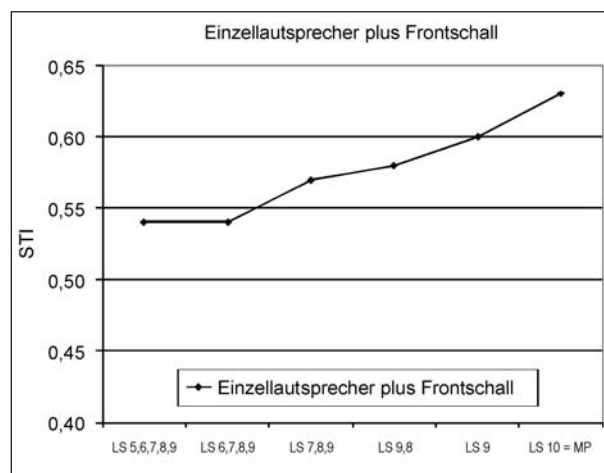


Bild 47: Messreihe „Frontschall“

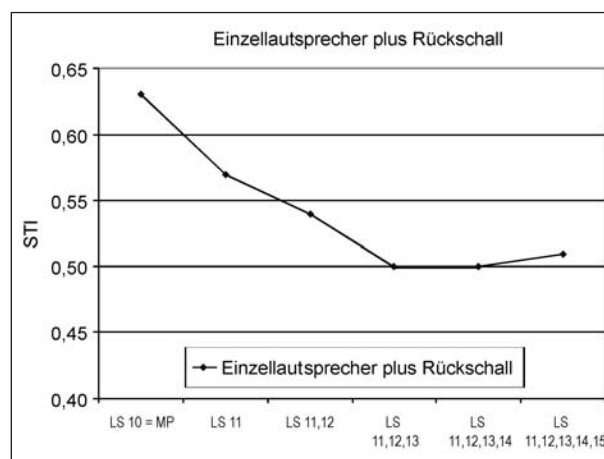


Bild 48: Messreihe „Rückschall“

Die abschließende Messung des STI, bei der alle Lautsprecher eingeschaltet sind, ergibt am Messpunkt ein STI von 0,53.

Aus den beiden Messreihen ist zu sehen, dass die Abnahme der STI-Werte nach 4 bis 5 Lautsprechern gegen einen Grenzwert läuft. Dabei ist die Störung durch den rückwärts abgestrahlten Schall stärker als durch den vorwärts abgestrahlten Schall.

Aus den Ergebnissen dieser Messreihen ist abzuleiten, dass bei Tunneln gleicher Bauart, die eine Länge von ca. 250 m überschreiten, die Tunnellänge und damit die Anzahl der installierten Lautsprecher keinen nachweisbaren Einfluss mehr auf die erreichbare Sprachverständlichkeit haben.

5.7 Gegenüberstellung abweichender Montagearten (mittig ↔ seitlich)

Aufgrund der begrenzten Höhe der Tunnelröhren ist die Montage der Lautsprecher mittig des Tunnels oft nicht möglich. Die Montage erfolgt dann seitlich unter der Tunneldecke.

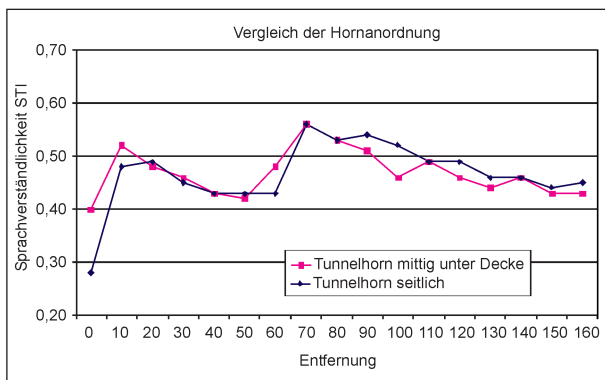


Bild 49: Vergleich STI bei unterschiedlicher Montage (beim Typ Tunnelhorn ermittelt)



Bild 50: Montage seitlich unter der Tunneldecke

Die Hörner wurden bei der seitlichen Montage mit ca. 3° zur Tunnelmitte angewinkelt. Die Lautsprecher wurden in beiden Fällen elektrisch in gleicher Weise wie bei dem Mitten-Betriebsfall angesteuert.

Der Verlauf der Sprachverständlichkeit ist sehr ähnlich. Bei der seitlichen Montage erscheint er eher gleichmäßiger.



Bild 51: Montage mittig unter der Tunneldecke

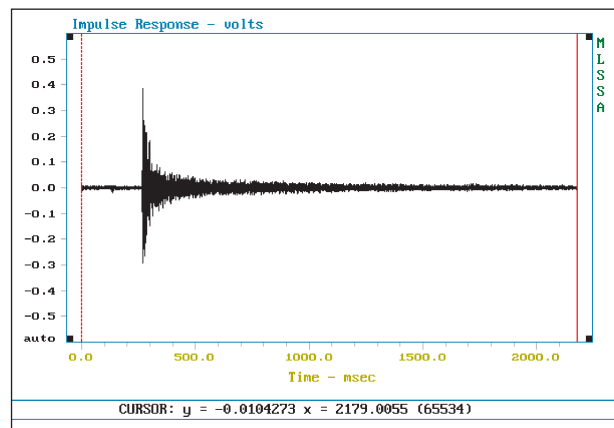


Bild 52: Impulsantwort seitliche Montage

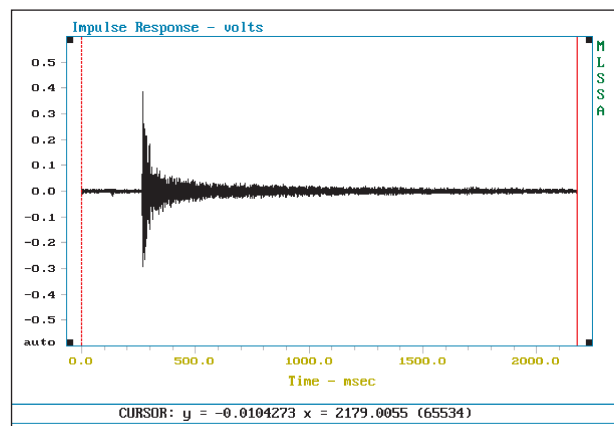


Bild 53: Impulsantwort mittige Montage

In den Impulsantworten bei einer Entfernung von 90 m vom ersten Horn lassen sich auch keine gravierenden Unterschiede feststellen.

Eine Erklärung für den geringen Unterschied bei der Impulsantwort ist die nahezu parallele Anordnung der Hörner zur Tunnelwand, bei der keine vermehrten destruktiven Reflexionen zu erwarten sind.

Als Mittelwert für die Sprachverständlichkeit wurden folgende Werte ermittelt:

mittige Montage: STI = 0,51,

seitliche Montage: STI = 0,52.

Die beiden Montagevarianten können als gleichwertig angesehen werden.

5.8 Auswirkung einer Querschnittsänderung

Um festzustellen, wie sich Querschnittsänderungen auf die Sprachverständlichkeit auswirken, wurde die gleiche Lautsprecheranordnung mit mittiger Montage von 2 Tunnelhörnern an unterschiedlichen Stellen im Tunnel aufgebaut.

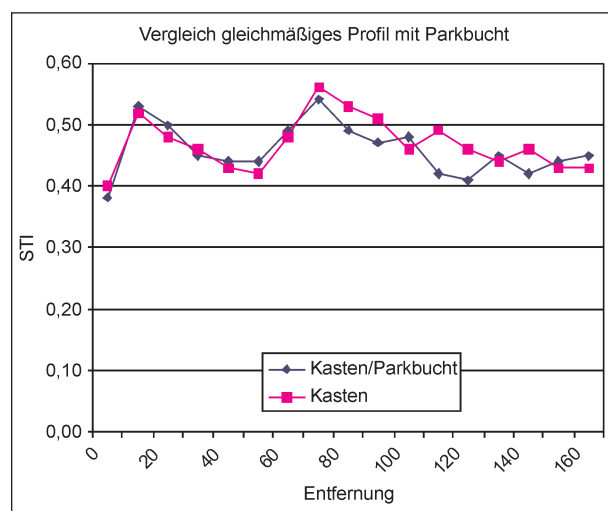


Bild 54: Vergleich Sprachverständlichkeit bei Einstrahlung in unterschiedliche Tunnelprofile

Die Messungen wurden miteinander verglichen.

Es ist zu sehen, dass während der ersten 70 m die Kurven nahezu identisch verlaufen.

Etwa 10 Meter hinter dem zweiten Horn, bei 70 m, beginnt die Nothaltebucht. Die Sprachverständlichkeit ist mit Beginn dieser Querschnittsänderung bei den STI-Werten deutlich schlechter als im ungestörten Tunnelprofil.

Eine Erklärung für diese Beeinträchtigungen sind die in den Parkbuchten bestehenden winkligen Wandgeometrien, die andersartige und unstrukturiertere Reflexionsmuster hervorrufen. Diese wirken sich tendenziell destruktiv auf die Verständlichkeit aus.

5.9 Untersuchte Tunnel mit vollständigen Festinstallationen

Das Konzept der SLASS-Beschallung ist im Rahmen der Vorüberlegungen in den Brennpunkt aller weiteren Fragestellungen geraten. Alle angestellten theoretischen Betrachtungen und praktischen Voruntersuchungen lassen einen Durchbruch der bisher prekären Sprachverständlichkeitssituation erwarten.

In diesem Kapitel werden die ersten Tunnel, in denen ein solches Beschallungssystem vollständig installiert wurde, messtechnisch untersucht und die in den vorgehenden Kapiteln aufgestellten Prognosen auf ihre Gültigkeit untersucht.

5.9.1 Untersuchte Tunnel

In den in Tabelle 6 aufgelisteten Tunneln wurden bis August 2009 SLAsSS-Beschallungsanlagen realisiert und im Rahmen des Forschungsberichts untersucht.

In allen hier vorgestellten Tunneln wurden Messungen mit gleichen Messgeräten und unter gleichen

Kennwerte der in der Auswertung berücksichtigten Tunnel						
Tunnel Nr.	Profil	Länge = L (m)	Breite = B (m)	Höhe = H (m)	Q-Fläche (m ²)	SLASS-Beschallung Anz. LS
Tunnel 14	Bergmännisch	740	11	7	77,0	15
Tunnel 15	Bergmännisch	680	9	6	54,0	13
Tunnel 16	Bergmännisch	1.080	10	6,5	65,0	21
Tunnel 17	Kasten	640	10	5,2	52,0	14

Tab. 6: Untersuchte Tunnel mit SLASS-Beschallung

Randbedingungen durchgeführt. Diese Ergebnisse werden vergleichend dargestellt.

Die Bedingungen waren jeweils ein leerer Tunnel ohne Verkehr und ohne aktivierte Lüfter. Untersuchungen mit abweichenden Randbedingungen werden gesondert hervorgehoben.

5.9.2 Untersuchungsergebnisse in den Tunneln mit SLASS-Beschallung

5.9.2.1 Nachhallzeit RT 60

Um darzustellen, in welchem Umfang die Ergebnisse für die Sprachverständlichkeit von der Nachhallzeit in den Tunneln abhängen, wird ein Diagramm mit den gemessenen Nachhallzeiten vorangestellt (s. Bild 55).

5.9.2.2 Sprachübertragungsindex STI

Die Sprachverständlichkeit wurde in den untersuchten Tunneln mit komplett aktivierter Lautsprecheranlage einer Röhre gemessen.

Die Bewertungsstrecke befand sich in allen Tunneln etwa 1/3 Tunnellänge vom Tunnelportal entfernt.

Die Lautsprecher hatten in allen Tunneln ca. 50 m Abstand voneinander. In den Tunneln 14 bis 16 waren die gleichen Lautsprecher wie bei den Untersuchungen in Tunnel 11 eingesetzt. Im Tunnel 17 wurde ein Grenzflächenhorn eines anderen Herstellers eingesetzt.

Die Lautsprecherfrequenzgänge waren für einen weitestgehend linearen Frequenzgang entzerrt und die Verzögerungszeiten für eine synchrone Wellenfront eingemessen.

Die Mittelwerte für den STI ergaben:

- STI (Tunnel 14) = 0,49,
- STI (Tunnel 15) = 0,51,
- STI (Tunnel 16) = 0,52,
- STI (Tunnel 17) = 0,51³.

Die in den Tunneln gemessenen Werte für den Sprachübertragungsindex STI stimmen mit den im

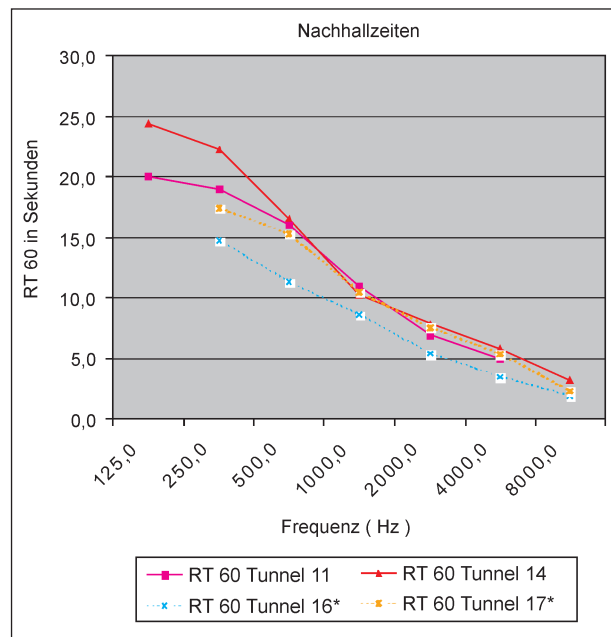


Bild 55: Nachhallzeit RT 60 der untersuchten Tunnel mit SLASS-Beschallung und des Testtunnels 11; *) gekennzeichnete Tunnel nicht DIN-gerecht mit installierten Lautsprechern gemessen, aber zur Orientierung mit aufgeführt

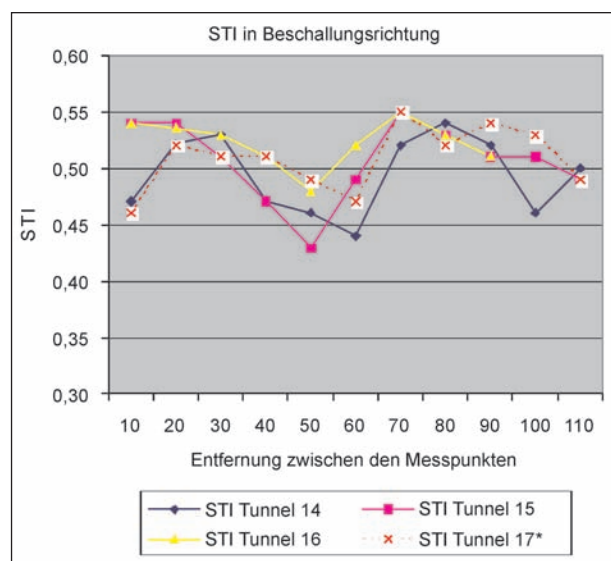


Bild 56: STI-Verlauf für verschiedene Tunnel mit festinstallierter SLASS-Beschallung

Rahmen der Voruntersuchungen prognostizierten Werten sehr gut überein.

In den mit SLASS-Beschallungen ausgestatteten Tunneln ist ein Sammelruf mit ausreichender bis befriedigender Sprachverständlichkeit zu realisieren. Es ist außerdem zu sehen, dass ein direkter Zusammenhang der STI-Werte mit der Tunnellänge und den im Tunnel gemessenen Nachhallzeiten nicht herzustellen ist (s. Bild 56).

³ Die Messungen in Tunnel 17 sind nicht mit denen der anderen Tunnel exakt vergleichbar, da nicht alle Lautsprecher angeschaltet waren. Dies war nicht möglich, da wegen eines Installationsfehlers die maximal einstellbare Signalverzögerung nur das exakte Einstellen von 6 Lautsprechern zuließ.

5.9.2.3 Einfluss von Fahrzeugen auf die Sprachverständlichkeit

Um die Auswirkungen von Fahrzeugen im Tunnel auf die Verständlichkeit von Durchsagen zu testen, wurde im Tunnel 14 eine Untersuchung bei stehendem Verkehr durchgeführt.

Bei dieser Untersuchung ging es nicht um die Beurteilung von Störschall auf die Sprachverständlichkeit, sondern um die Auswirkungen der Fahrzeugkörper auf die Schallausbreitung im Tunnel. Zu diesem Zweck wurde die Sprachverständlichkeit zunächst in der leeren Röhre und dann nach Bestückung mit einer Anzahl Fahrzeugen gemessen.

Bei den Messungen waren alle Lautsprecher angeschaltet, der Schalldruckpegel der Beschallungsanlage war auf 95 dB-SPL eingestellt.

Ergebnis

Bis auf einige Stellen, wo die Lautsprecher ganz offensichtlich durch die Fahrzeuge abgeschattet wurden

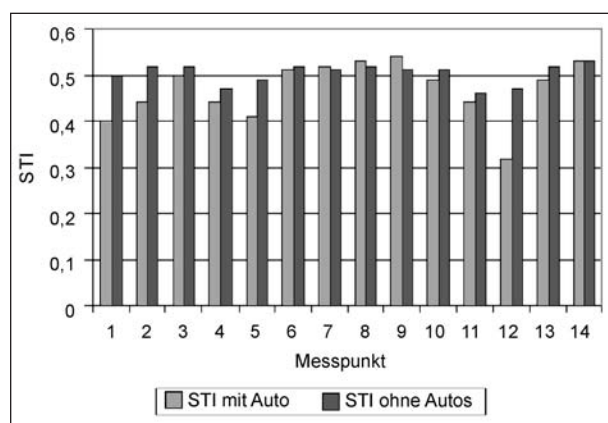


Bild 57: Vergleich STI mit und ohne Fahrzeuge

den (MP12, MP1), unterschieden sich die STI-Werte nur unwesentlich von denen im leeren Tunnel.

Die Auswirkungen der Fahrzeuge auf die Sprachverständlichkeit stellten sich als weitaus unkritischer heraus als ursprünglich angenommen wurde. An einigen Messpunkten ist der gemessene STI-Wert sogar aufgrund nützlicher Reflexionen etwas höher als ohne Fahrzeuge.

Damit konnte nachgewiesen werden, dass auch im praktischen Verkehrsbetrieb mit realer Fahrzeugbestückung für die Sprachverständlichkeit annähernd die gleichen Bedingungen gelten wie in einer leeren Röhre. Lediglich die unmittelbaren Abschattungen durch große Fahrzeugkörper (Lkw) erzeugen punktuell schlechtere Ergebnisse.

5.9.2.4 Sprachverständlichkeit im Pkw

Bei dieser Untersuchung geht es darum festzustellen, wie sich die Sprachverständlichkeit im Pkw mit geschlossenem und offenem Fenster im Vergleich zur Situation außerhalb des Fahrzeugs verhält. Der eingestellte Messpegel in der Tunnelröhre lag bei 95 dB (A):

- Messung im Fahrzeug VW Passat, alle Türen und Fenster geschlossen: STI = 0,54; SPL = 64 dB (A),
- Messung im Fahrzeug VW Passat, alle vier Türen offen: STI = 0,58; SPL = 85 dB (A),
- Abgleichmessung in der Röhre: STI = 0,53; SPL = 95 dB (A).

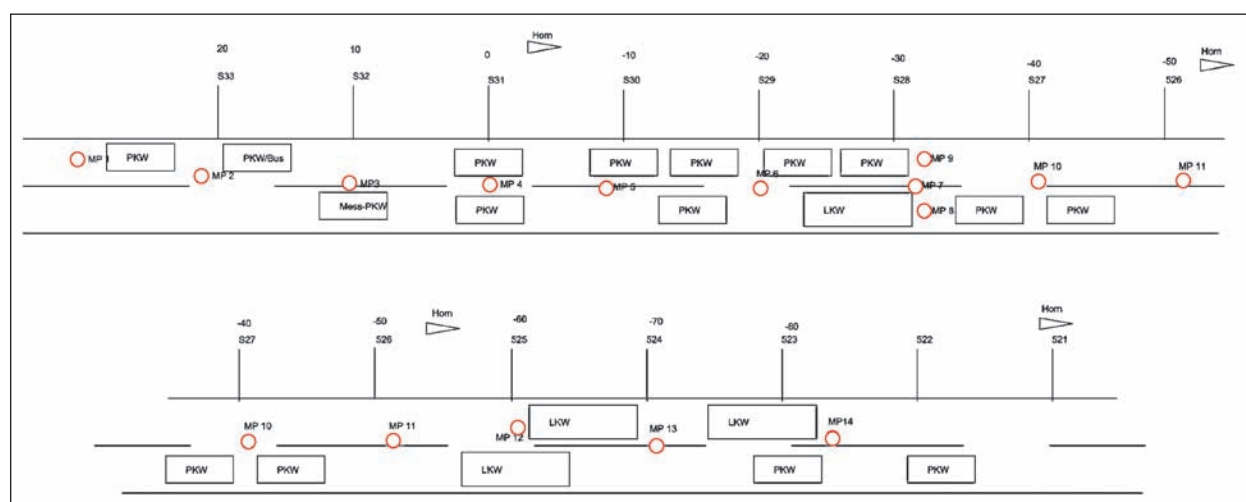


Bild 58: Anordnung der Fahrzeuge und Messpunkte im Tunnel

Die gemessenen STI-Werte sind im geschlossenen und im offenen Fahrzeug ähnlich wie im Tunnel direkt.

Diese Messergebnisse bestätigen den subjektiven Eindruck, dass sowohl in der freien Tunnelröhre als auch innerhalb eines Pkw eine ausreichende Verständlichkeit gegeben ist.

Darüber hinausgehend gibt es verschiedene Effekte bezüglich der sich unterscheidenden Frequenzgänge und Lautstärkepegel, die hier aber nicht weiter untersucht wurden.

6 Wesentliche Kennparameter für SLASS-Installationen

6.1 Vorbemerkungen

Eine anforderungsgerechte Tunnelbeschallung kann gemäß den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Konzepten und Untersuchungen erfolgreich nach dem Konzept einer synchronisierten Längsbeschallung/synchronised longitudinal announcement speaker system (SLASS) aufgebaut werden.

Nach allen jetzt vorliegenden Erkenntnissen kann erwartet werden, dass damit in beliebigen Tunnelsystemen grundsätzlich gute bis mindestens aber ausreichende Sprachverständlichkeiten erreicht werden können.

Das physikalische Grundkonzept und dessen messtechnisch geprüfte Ergebnisse wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln 4.5 und 5 ausführlich dargestellt.

In diesem Kapitel sollen – unmittelbar auf die zukünftige Planungspraxis abzielend – wichtigste Vorgehensweisen und technische Eckdaten dargestellt werden, die zur Realisierung einer solchen Lautsprecherinstallation bekannt sein müssen.

6.2 Notwendige Daten und Voruntersuchungen

Um eine SLASS-Beschallung auslegen zu können, müssen mindestens folgende Informationen vorliegen:

- Tunnelgrundrisse (mindestens etwa 1:250) und -schnitte (etwa 1:50),

- Platzierungen anderer technischer Einbauten innerhalb der Röhre und deren Geometrien (Lüfter, Verkehrszeichen, Leuchten etc.),
- mögliche Installationsorte für die Zentraltechnik,
- Fahrbahnbelag und Wand- und Deckenmaterialien (zur Abschätzung der zu erwartenden Nachhall-Kategorie),
- vollständige und präzise elektroakustische Kenndaten inklusive Simulationsdatensätzen für die vorgesehenen Lautsprecher; Daten müssen nachweislich unter verlässlichen Prüfbedingungen ermittelt sein.

Präzise akustische Voruntersuchungen zur Ermittlung von Nachhallzeiten etc. sind nicht notwendig.

6.3 Lautsprecher-Abstrahlwinkel und -Bündelung

Die eingesetzten Lautsprecher müssen enge Abstrahlwinkel in der horizontalen und vertikalen Ebene besitzen, einhergehend mit hohen Bündelungsmaßen. Die Abstrahlwinkel müssen mit der Tunnelbreite und -höhe korrespondieren, um längs durch die Röhre zu strahlen und dabei die Wandbereiche erst in größerem Abstand vom Montageort zu treffen.

Bewährt haben sich bisher bereits Lautsprecher mit

- etwa 30°-35° symmetrischer Abstrahlung in der Horizontalen und
- etwa 30°-35° asymmetrischer vertikaler Abstrahlung.
- Der notwendige Bündelungsfaktor liegt bei etwa $Q = 50$ (entsprechend $DI \approx 17$ dB).

Die Abstrahlwinkel könnten zur Optimierung ggf. noch präziser an unterschiedliche Tunnelbreiten und -höhen adaptiert werden.

Bisher erfolgreich verwendete Lautsprecher sind für eine Deckenmontage als Grenzflächenhörner konzipiert (eine geeignete Abstrahlcharakteristik wäre grundsätzlich auch für eine Montagepositionierung im obersten Wandbereich ebenso denkbar, es sind aber heute keine Lautsprecher mit einer dafür ausgelegten Abstrahlcharakteristik bekannt).

Von fundamentaler Bedeutung ist bei diesen genannten Lautsprecher-Abstrahlwinkeln, dass sie weitgehend frequenzunabhängig im gesamten Frequenz-Übertragungsbereich gelten müssen – eine nennenswerte Verschlechterung (hier: Verbreiterung der Winkel und Verringerung der Bündelung) bei tieferen Frequenzen ist nicht zulässig.

Im Rahmen der Untersuchungen im Tunnel Nr. 14 wurden Vergleichsmessungen unterschiedlicher Grenzflächenhörner, die für die SLASS-Beschallung konzipiert wurden, gemessen. Dabei wurden die gleichen Messwerte erzeugt wie bei der Vergleichsmessung in Tunnel 11.

6.4 Lautsprecher-Rückwärtsdämpfungen

Die Lautsprecher benötigen eine immense Rückwärtsdämpfung, da alle rückwärtig abgestrahlten Schallenergieanteile ausschließlich destruktive Wirkung besitzen und die Funktion des SLASS-Prinzips in Frage stellen.

Die erforderlichen Werte liegen bei Nutzung reproduzierbarer Daten aus reflexionsfreien Labormessungen bei mindestens

$AR \geq 30 \text{ dB}$.

Hier gilt wie im Vorigen die fundamentale Bedeutung der weitgehenden Frequenzunabhängigkeit im gesamten Frequenz-Übertragungsbereich.

6.5 Lautsprecherleistungen und Lautstärkepegel

Die Lautsprecher sollen einen Lautstärkepegel von

$L_p(\text{max}) \geq 105 \text{ dB (A)}$

in der gesamten Tunnelröhre auf Ohrhöhe erzeugen können.

Hierfür sind grundsätzlich Hochleistungslautsprecher erforderlich mit erzielbaren Schalldruckpegeln auf Hauptstrahlachse in 1 m Abstand im Bereich:

$L_p(\text{max}/1 \text{ m}) > 130 \text{ dB (SPL)}$ bis 140 dB (SPL) .

Die exakt notwendigen Kennparameter der Lautsprecher sind abhängig von Montageorten, Abständen und Tunnelgeometrien und in der Planungsphase festzulegen.

6.6 Übertragungsbandbreite und Amplitudenfrequenzgänge

Es muss das gesamte für die Verständlichkeit relevante Sprachband linear übertragen werden, das entspricht dem Frequenzbereich von 250 Hz ... 8 kHz.

Dieser soll (auf Ohrhöhe im Tunnel) in einem Toleranzfeld von nicht größer als $\pm 3 \text{ dB}$ liegen, zu den Bandgrenzen ist beidseitig ein Abfall um -10 dB zulässig.

Der Bereich unterhalb 250 Hz soll immer mit mindestens 24 dB/Oktave beschnitten sein.

Um diese Frequenzgänge im gesamten Versorgungsbereich zu gewährleisten, müssen die Lautsprecher auch außerhalb der Hauptstrahlachse adäquate Frequenzgänge realisieren, was vom geeigneten Abstrahlverhalten der Lautsprecher abhängig ist (vgl. auch Kapitel 6.3)!

Die genannten Frequenzgänge dürfen auch mit Hilfe einer zusätzlichen speziellen elektronischen Entzerrung (= Frequenzgangkorrektur) der Lautsprecher erreicht werden – allerdings ist in diesen Fällen zu gewährleisten, dass die o. g. Maximalpegel bei aktivierter Entzerrung realisiert und überprüft werden.

6.7 Lautsprecherpositionen und -ausrichtungen

Die Lautsprecher werden im Bereich der Tunneldecken installiert, im Regelfall im Bereich der Mittellängsachse mit typisch maximal $\pm 2,5 \text{ m}$ möglichem Versatz nach rechts oder links.

Auch ein stärkeres Versetzen in Richtung Tunnelseitenwand ist ggf. möglich, ist aber genau zu kontrollieren in Hinsicht auf anzupassende Winkelkorrekturen etc.

Der erste Lautsprecher wird in nächster Nähe eines Tunnelportals positioniert und strahlt in die Röhre. Nachfolgende weitere Lautsprecher folgen in gleichartigen Abständen im Bereich von je $r \approx 40 \text{ m} \dots 65 \text{ m}$, die geeigneten Abstände sind zur Erzielung der ausreichend gleichmäßigen Pegelversorgung unter Berücksichtigung der spezifischen Tunnelgeometrie mit Hilfe von elektroakustischer Simulation im Vorfeld zu ermitteln.

Grundsätzlich strahlen alle Lautsprecher in allen Fällen in einer Richtung, eine Beschallungsrichtung entgegen der Fahrtrichtung scheint dabei geringe Vorteile zu besitzen, sodass empfohlen wird, diese zu wählen, sofern nicht wichtigere Aspekte (z. B. Reflexionsflächen!! S. u.) dagegensprechen.

In (einröhrigen) Tunneln mit Gegenverkehr kann die Festlegung der Beschallungsrichtung ausschließlich unter dem Aspekt der Minimierung schädlicher Reflexionen an eventuellen Bauwerks- und Installationseinrichtungen geschehen, da die Verkehrsrichtung hier keinen Einfluss auf die Entscheidung hat.

In Sonderfällen kann auch eine Beschallungsanordnung von der Mitte einer Tunnelröhre ausgehend gewählt werden, bei der die Lautsprecher dann von dort ausgehend spiegelsymmetrisch in Richtung je eines Tunnelportals strahlen.

Die Lautsprecher werden in gleichen Abständen montiert, in der Praxis scheinen dabei aber Toleranzen von typisch ± 5 m zulässig.

Zulässige Toleranzen sollten vorrangig dazu genutzt werden, insbesondere Schallabschattungen und -reflexionen an Bauwerksversprüngen oder anderen technischen Einbauten so weit als möglich zu vermeiden oder zu minimieren.

6.8 Minimierung von Schallfeld-Ausbreitungs- und Reflexionsstörungen

Alle Oberflächengeometrien nennenswerter Größenordnung (näherungsweise: Breite oder Länge $\geq 0,5$ m), die von der in Tunnellängsrichtung parallel-glatten tunneltypischen Wand- und Deckenausrichtung abweichen, sollten unter dem Aspekt möglicher Schallrückwürfe betrachtet werden. Hier können in Bezug auf Lautsprecherpositionen entweder energiereiche diskrete verständlichkeitsmindernde Schallreflexionen verursacht werden oder aber bei größeren Flächenbereichen (z. B. in Nothaltebuchten) stärkere Nachhallanregungen.

Es sollte im Planungsprozess ein Fokus auf diese Effekte gerichtet werden, da erfahrungsgemäß zonal bedeutsame sehr kritische Verständlichkeitsminderungen auftreten können.

Soweit nicht – wie im vorherigen Abschnitt erwähnt – eine Vermeidung der Schallanstrahlung von Bauwerksversprüngen, schräggestellten Wandflächen

bei Nothaltebuchten, technischen Einbauten etc. durch strategisch geschickte Lautsprecherpositionierung erreicht werden kann, so empfiehlt es sich, diese kritischen Flächen entweder konstruktiv zu verändern oder hochschallabsorbierend zu verkleiden (Lochblech mit Mineralwollhinterlegung, Lochziegel, o. Ä.).

6.9 Signalverzögerungen

Das Prinzip der SLASS-Synchronisierung erfordert eine Einzelansteuerung aller Lautsprecher über je einen separaten Signalprozessorkanal pro Lautsprecher. Der Signalprozessor realisiert u. a. die individuell je Lautsprecher erforderliche Signalverzögerung („Delay“). Diese muss im Millisekunden-Raster messtechnisch im Zuge der Parametrierungen ermittelt und programmiert werden.

Je nach Länge des Tunnels sind erforderliche Delayzeiten von gut 1.000 ms bis zu einigen Sekunden (!), in sehr langen Tunneln bis in den Minutenbereich möglich (knapp 3 Sekunden pro Tunnelkilometer).

6.10 Zentralenaufbau und Überwachung

Die Elektroakustik-Zentrale(n) enthalten Vorverstärker, Signalprozessoren und Endverstärker inklusive der Funktionsüberwachungstechnik (Pilottonüberwachung, Lautsprecherlinienüberwachung), Havarie-Reserven und Notstromversorgung.

Die Funktionsüberwachung und Havarierungslogistik werden im Regelfall in Anlehnung an DIN 60849 (Elektroakustische Notfallwarnsysteme) und DIN VDE 0833-4 auszuführen sein.

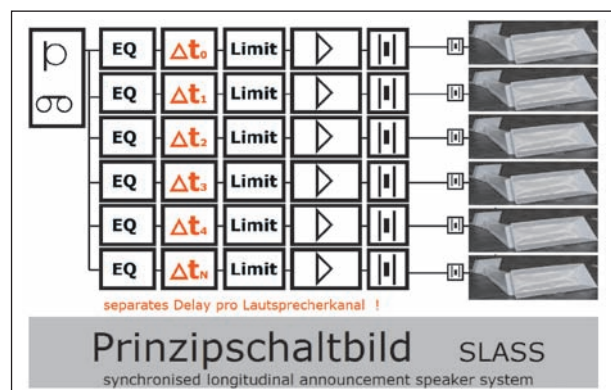


Bild 59: Prinzipieller Aufbau einer SLASS-Beschallung

Pro Lautsprecher werden ein separater Signalprozessorkanal und separater Endverstärker in 100-Volt-Technik benötigt.

Die Endverstärker müssen eine hinreichende Leistungsversorgung der Lautsprecher zur Erzielung der o. g. $L_p(\text{max}) \geq 105 \text{ dB (A)}$ gewährleisten, unter Berücksichtigung der Leitungs- und Übertragerverluste.

Die Signalprozessoren leisten im Wesentlichen die Frequenzgangentzerrung, Hochpassfilterung, Signalverzögerung (Delay) und den aktiven Lautsprecherschutz durch spezielle Limiterschaltungen.

Es wird in der Regel am wirtschaftlichsten sein, diese Zentralen möglichst dezentral zu verteilen und mittels redundanter LWL-Verbindungen zu vernetzen, um auf diese Weise die (Cu-)Leitungen vom Endverstärker zum jeweiligen Lautsprecher möglichst kurz zu halten.

Beim Einsatz von dezentraler Technik in den Notrufnischen (regelmäßiger Abstand von ca. 150 m) kann ggf. auf das schon vorhandene bzw. sowieso zu verlegende LWL-Kabel zurückgegriffen werden. Die Anzahl der Fasern muss den Anforderungen angepasst werden.

6.11 Leitungsnetz

Von den Zentralenstandorten ausgehend wird jeder Lautsprecher mit einer separaten Leitungsverbindung mit einem Endverstärkerkanal verbunden. Die Leitungsquerschnitte sind unter Beachtung der unterschiedlichen auftretenden Längen präzise zu dimensionieren, um die notwendigen Dämpfungsfaktoren ($A \approx Z_{\text{Lautsprecher}}/Z_{\text{Leitung}}$) mit $A \geq 20$ zu gewährleisten.

Verteilte Zentralenstandorte sind miteinander unter Berücksichtigung der notwendigen Redundanzen und des Funktionserhalts im Brandfall zu vernetzen.

Das Leitungsnetz sollte um NF-Leitungen (typisch CAT-7 oder vergleichbar) von den einzelnen Zentralenstandorten zu gleichmäßig über die Röhre verteilten Anschlusspunkten (ggf. in Notrufnischen integriert) ergänzt werden. Dies ist notwendig, um Test- und Messsignale für Wartungszwecke einspeisen zu können.

6.12 Sprachkonserven und Sprechertaining

Die potenziell mögliche gute Sprachverständlichkeit, die das SLASS-Konzept erlaubt, kann nur real wirksam werden, wenn zu übermittelnde Sprachinformationen sowohl inhaltlich (vgl. FÄRBER & FÄRBER 2009) als auch qualitativ geeignet sind, die notwendige Information tatsächlich zum Rezipienten im Tunnel verständlich zu übertragen.

Dazu ist im elektroakustischen Bereich eine angemessene Qualität der gespeicherten Sprachkonserven sicherzustellen. Diese sollten sprecherisch möglichst präzise an die speziellen akustischen Bedingungen und gemessenen STI's des Tunnels angepasst werden. Dazu sind z. B. erforderlich: geeignete Sprechpausen und angepasstes Sprechtempo, geeignete Artikulation und ein möglichst wirkungsvoller appellativer Tonfall, der aber keinesfalls Angst auslösend wirken sollte. Die Sprachkonserven sollten durch gleichmäßigen Maximalpegelverlauf und sachgerechtes Kompressionsverhältnis die Leistungskapazität der Beschallungsanlage maximal ausnutzen können. Ansagetexte sollten daher mit entsprechenden Vorgaben jeweils anforderungsgerecht durch ein entsprechend qualifiziertes Tonproduktionsunternehmen hergestellt werden.

Sofern zur Information der Verkehrsteilnehmer neben der Beschallung auch die Möglichkeit zur Information über Rundfunk (RDS-Aufschaltung) besteht, sollten die Sprachkonserven für Lautsprecher- und Rundfunkübertragung in gesonderter Weise produziert werden. Über Rundfunk können deutlich mehr und schneller gesprochene Anweisungen übermittelt werden.

Eine gleichzeitige Übertragung über Lautsprecher und Rundfunk ist nicht möglich, da die Delays der SLASS-Anlage extrem destruktive Echos zur Rundfunkübertragung erzeugen. Die Ansagen sind daher im zeitlichen Wechsel einzuspielen. Bei Live-Ansagen ist manuell anzuwählen, ob die Durchsage über die Lautsprecher oder über Rundfunk wiedergegeben werden soll. Alternativ kann eine dafür geeignete Zwischenspeicherungs-Logistik mit automatischer zeitversetzter Wiederholung über Lautsprecher und Rundfunk vorgesehen werden.

Für das Leitwartenpersonal sollte ein turnusgemäßes Training vorgesehen werden, das dessen Kompetenz zu einer vergleichbar wirkungsvollen

Live-Einsprache über die Mikrofon-Sprechstellen sicherstellt.

6.13 Bedienung

Für das Bedienpersonal in den Leitwarten sollte eine Lautstärkepegel-Auswahl bestehen, mit der die gespeicherten Ansagetexte wie auch die selbst vorgenommene Live-Einsprache über die Mikrofon-sprechstellen entweder in maximalem Pegel (≈ 105 dB (A)) in die Röhren eingespielt werden, oder aber mit einem moderat abgesenkten Pegel von zum Beispiel etwa 93 dB (A).

Die Auswahl sollte manuell in Abhängigkeit von der erkennbaren Verkehrssituation erfolgen:

- Bei fließendem Verkehr oder nicht klar erkennbarer Verkehrssituation ist zur Sicherstellung des ausreichenden S/N-Verhältnisses immer der Maximalpegel zu verwenden.
- Ist aber für den Bediener klar erkennbar, dass der Verkehr steht und deshalb von stark verringertem Lärmpegel in der Röhre ausgegangen werden muss⁴, so können mit der entsprechend verminderten Beschallungslautstärke eine deutlich verbesserte Verständlichkeit (vgl. Maskierungseffekt, in Kapitel 2.1.3.1.) und zusätzlich eine verringerte Schreck- und Stressbelastung der angesprochenen Personen bewirkt werden.
- Um dem Operator Hinweise auf die Pegelverhältnisse in der Tunnelröhre zu erleichtern, ist eine Kopplung mit der BMA sinnvoll. Bei automatischem Brandalarm werden automatisch die Lüfterprogramme gestartet. Zusätzlich kann man eine halbautomatische Kopplung über die Verkehrsdatenerfassung/Video vornehmen, so dass der Operator dann einen Schaltvorschlag bekommt, den dann annimmt oder überschreibt. Diese Methodik hat sich auch bei anderen Gewerken im Tunnel bewährt.

6.14 Lautsprecheranlagen-Parametrierungen

Am Ende einer jeden Lautsprecherinstallation müssen eine sorgfältige Funktionsprüfung und Parametrierung vorgenommen werden. Das ist eine grundsätzliche (und ebenso triviale) Feststellung. In der Praxis fast aller Festinstallationen in Bauwerken steht die Inbetriebnahme der komplexen und

relativ empfindlichen Lautsprecheranlagen allerdings immer annähernd an letzter Stelle in der Folge der Gewerke – und folglich kollidieren die InbetriebnahmeprozEDUREN regelmäßig mit dem Fertigstellungstermin.⁵

Da diese akustischen Arbeiten zudem naturgemäß in lärmfreier Umgebung stattfinden müssen – was in dieser Bauphase begreiflicherweise immer schwierig durchsetzbar ist –, werden sehr häufig unglückliche Kompromisse gemacht. Die Lautsprecheranlagen gehen demzufolge oft in einem improvisierten, dabei immer wieder auch schwerwiegend fehlerbehafteten Zustand in Betrieb.

Dass diese Gefahren auch in Tunnelbauprozessen in gleichem Maße gegeben sind, ist auf der Hand liegend.

Allerdings bergen diese Risiken in Tunneln nach einer unkorrekten Parametrierung erhöhte Gefahren:

- Die weiterhin ungeheuer kritische Sprachverständlichkeitssituation in Verkehrstunneln benötigt alles an möglicher Optimierung, um im Ernstfall möglichst vielen Verkehrsteilnehmern die nötige Information geben zu können,
- ein SLASS-System ist als eine Art „akustisches Eimerkettensystem“ wegen der aufwändigen und für jeden einzelnen Lautsprecher separat zu parametrierenden Synchronisierung besonders empfindlich gegen Fehlparametrierungen,
- nach Inbetriebnahme eines Straßentunnels sind sensible akustische Tests nur noch durch aufwändige Sperrungen zu realisieren; im laufenden Betrieb selbst sind Fehlfunktionen hingegen, solange kein Totalausfall vorliegt, kaum noch feststellbar und werden dann (auf womöglich tragische Weise) erst im Ernstfall auffällig.

Daher wird nachdrücklich darauf hingewiesen, dass für diese Parametrierungsarbeiten hinreichend große „Zeitschlitz“ geschaffen werden müssen und dass diese durch erfahrene Messtechniker geleistet werden müssen.

⁴ oder aber natürlich auch während Wartungsarbeiten in der gesperrten Röhre!

⁵ Es stellte sich heraus, dass die nach Plänen und theoretischen Berechnungen voreingestellten Zeiten am Ende des Tunnels stark von den durch Einmessung ermittelten Werten abwichen. Eine genaue Einmessung der Verzögerungszeiten ist unbedingt notwendig.

In SLASS-Anlagen sind folgende abschließende Inbetriebnahmetests und Einstellungen erforderlich und zu dokumentieren:

1. Funktionstest jedes einzelnen fertig installierten Lautsprechers auf Funktion, gleichen Pegel, gleichen Frequenzgang, gleiche Polarität,
2. Feststellung der korrekten Zuordnung jedes Lautsprechers zu dem ihm zugeordneten Kanal (!),
3. Einstellung eines optimierten Frequenzgangs (im Signalprozessor) für den verwendeten Lautsprechertyp mit messtechnischer, inklusive subjektiver Überprüfung (Sprachsignal) an einer Vielzahl von Messpunkten innerhalb seines Versorgungsbereiches (= Fahrbahnabschnitts) auf Ohrhöhe mit B (Direktschall) = 300 Hz ... 8.000 Hz (± 5 dB),
4. sukzessive messtechnische Überprüfung der Schallankunftszeit für jeden Lautsprecher in seinem Empfangsbereich und Einstellung einer exakten Signaldelayzeit (Genauigkeitsbereich ± 1 ms) zur präzisen Synchronisierung,
5. Einstellung eines exakt gleichen Lautstärkepegels für jeden einzelnen Lautsprecher in seinem Empfangsbereich mit $\Delta = \pm 1$ dB, dabei sollen die Lautsprecher immer im gleichen Abstand von ca. 25 bis 30 m gemessen werden,
6. messtechnische Überprüfung der Frequenzgänge bei aktivierter Gesamtanlage an mehreren Positionen der Röhre und Korrektur der Gesamtschallfrequenzgänge zur Maskierungsoptimierung,
7. Einpegelung auf Erzielung von 105 dB (A) bei Aktivierung der Gesamtanlage in einer maximalen Toleranz von -1 dB/+3 dB,
8. Parametrierung der Limiter zum Schutz gegen Lautsprecherüberlastung und gegen Überschreitung eines Maximalpegels,
9. subjektive Überprüfung der Gesamtfunktion (Sprachsignal aus dem Sprachspeicher und Live-Einsprache über die Sprechstellen), ggf. anschließende Feinkorrekturen zur Verständlichkeitsoptimierung. Dabei sind vor allem Anpassungen im unteren Frequenzbereich unter 300 Hz vorzunehmen,
10. Dokumentationsmessungen von STI und Pegel an mindestens 18 relevanten Messpunk-

ten in jeder Röhre und bei gleichem Tunnelprofil. Bei Tunnel mit wechselndem Profil ist eine Messreihe für jedes Profil erforderlich. Eine Messreihe soll in abständen von 10 m in Längsrichtung aufgenommen werden. Dabei sollen 10 Messungen, beginnend direkt unter einem Lautsprecher gemacht werden. Alle 20 m ist eine Messung mit 3 Punkten über den Röhrenquerschnitt sinnvoll,

11. Prüfung der subjektiven Verständlichkeitseindrücke durch mehrere Testpersonen (Sprachsignale),
12. Dokumentation a) aller Mess- und Testergebnisse, weiterhin b) Dokumentation aller vorgenommenen Einstellungen (bzw. Abspeicherung der Setups und Übergabe der Datensatzkopie in die Dokumentation).

Für die Anwendung des STI-Verfahrens nach DIN 60268-16 für die Sprachverständlichkeit wird nachdrücklich darauf hingewiesen, dass in der Dokumentation neben den STI-Werten immer auch der jeweils zugehörige Amplituden-Frequenzgang und der jeweils zugehörige Schalldruckpegel zu erfassen sind.

Nur mit diesen Zusatzinformationen gibt ein STI-Zahlenwert eine relevante Information über das Verständlichkeitspotenzial am Messort.

Die Gründe dafür sind, dass

- die STI-Messungen nur bei breitbandigen linearen Amplitudenfrequenzgängen gültig sein können, und dass
- bei normgerechter Messung immer auch die pegelabhängigen Maskierungseffekte berücksichtigt werden, somit also bei sehr hohen Schalldruckpegeln deutlich niedrigere Werte ermittelt werden als bei niedrigeren.

Es empfiehlt sich für die Praxis, STI-Messungen im Tunnel grundsätzlich bei ca. L_p -Mess = 90 dB (SPL) durchzuführen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

6.15 Wartungsarbeiten

Funktionstests sind im Rahmen der Wartung, Instandhaltung und/oder Reinigung des Tunnels durchzuführen.

Zur Durchführung von Funktionsprüfungen werden halbjährliche Intervalle vorgeschlagen, eine Über-

prüfung der Wiedergabespektren und realisierten Sprachverständlichkeitswerte der Anlage wird jährlich empfohlen.

7 Zusammenfassung

Untersuchungen zeigen, dass die Auslegung heute bestehender Tunnelbeschallungen selten eine akzeptable Verständlichkeit zulässt. Dies hat in Einzelfällen schon zu der Diskussion geführt, ob der Einbau von Beschallungsanlagen in Tunneln im Hinblick auf ihren nur schwer zu belegenden Nutzen für den Tunnelnutzer nicht entbehrlich sein könnte.

Die Bedeutung von Notfalldurchsagen für die Selbstrettung der Nutzer wurde aber nicht zuletzt durch mehrere schwere Unglücke in Straßentunneln nochmals unterstrichen, sodass der Thematik eine hohe Priorität zugeteilt werden muss. Eine Untersuchung der Möglichkeiten zur Sicherstellung verständlicher akustischer Sprachinformationen muss daher als unbedingt erstrebenswert angesehen werden.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erarbeitung weitergehender Anforderungen an elektroakustische Anlagen in Straßentunneln unter Beachtung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Hierzu waren allgemeingültige Kriterien zu definieren, anhand derer eine elektroakustische Beschallungsanlage für Tunnel und bestimmte Ereignisszenarien ausgelegt werden kann, ohne dass aufwändige schalltechnische Einzeluntersuchungen durchgeführt werden müssen. Die Einflüsse wesentlicher Tunnelparameter waren zu erfassen und ihre Auswirkungen auf die Erzielbarkeit von Sprachverständlichkeit ausreichend genau, aber trotzdem in der Praxis leicht nachvollziehbar zu beschreiben.

Dazu waren die wesentlichen Einflüsse der Tunnelparameter wie Querschnitt, Geometrie, Innenausbau und Länge zu erfassen und ihre Auswirkung auf die Gestaltung und Auslegung der Beschallungsanlage zu beschreiben.

Aus den bereits vorliegenden Projekten des Forschungsnehmers wurden Ergebnisse schalltechnischer Untersuchungen aus 19 Tunneln kategorisiert und vergleichend gegenübergestellt. Aus den vorliegenden Daten wurde versucht, allgemeingültige Zusammenhänge abzuleiten und als Randbe-

dingungen für die Dimensionierung geeigneter elektroakustischer Anlagen zu formulieren.

Es wurden folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

- Die Nachhallzeiten typischer Tunnel sind extrem lang und liegen im Bereich von 7 s ... 10 s, für tiefe Frequenzen ansteigend bis auf 27 s. Diese extrem langen Nachhallzeiten sind ein deutlicher Indikator für die grundsätzlich erschwerten akustischen Verhältnisse in Tunneln. Die Nachhallzeiten aller typischen Tunnel (ohne raumakustische Ausstattung) unterscheiden sich nur unwesentlich.
- Bisher in Tunneln eingesetzte Lautsprecheranlagen erreichen unter den typischen raumakustischen Bedingungen entweder keine anforderungsgerechten Sprachverständlichkeiten (sehr häufig gemessen: $STI \leq 0,30$ = ungenügend) oder erlauben keinen anforderungsgerechten Sammelruf.
- Die besonderen geometrischen Bedingungen von Tunneln haben zur Folge, dass andere raumakustische Parameter als die Nachhallzeit für die Dimensionierung von Beschallungsanlagen in den Vordergrund treten. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass die Bedeutung der Nachhallzeiten für Tunnel bisher erheblich überschätzt wurde. Die praktische Notwendigkeit zur minutiösen Prognostizierung und Messung der Nachhallzeiten von Straßentunneln lässt sich auf Grundlage dieser Erkenntnisse nicht belegen – lediglich fundierte Abschätzungen zur Klassifizierung im Sinne von „typisch hallig“, „deutlich bedämpft“ oder „stark bedämpft“ bleiben erforderlich.
- Es gibt besondere Schalleitungseigenschaften von Tunnelröhren, die durch die Struktur der Reflexionen entlang der Wand- und Deckenbereiche entstehen. Diese Struktur zeichnet sich durch so genannte frühe Schallreflexionen aus, die sich für eine effektive sprachverständlichkeitsfördernde Verstärkung des Direktschalls der Sprachsignale nutzen lassen. Dafür ist eine Beschallung mit eng abstrahlenden Lautsprechern streng in Längsrichtung eines Tunnels notwendig.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurden Versuche in einem zur Verfügung gestellten Testtunnel mit auf dem Markt befindlichen Lautsprechersystemen

durchgeführt, um zu untersuchen, ob sich die Interpretationen aus den raumakustischen Untersuchungen messtechnisch unter realistischen Bedingungen halten lassen. Bei der Auswahl der Testlautsprecher wurden neben den bei Tunnelbeschallungen üblichen Trichterlautsprechern spezielle Hornlautsprecher für Tunnelbeschallungen ausgewählt, die scheinbar für dieses Konzept geeignete Schallabstrahlungseigenschaften besitzen.

Dabei stellte sich heraus, dass mit einer Reihenanordnung von Lautsprechern, die die geeigneten Abstrahlungseigenschaften haben und entsprechend angesteuert werden, über lange Strecken ausreichend gute Sprachverständlichkeiten zu erreichen sind.

Dabei wurden folgende Erkenntnisse für die Konzeption einer solchen Beschallungsanlage gewonnen:

- Herkömmliche Lautsprecher, auch die häufig eingesetzten Trichterlautsprecher, sind für eine Längsbeschallung ungeeignet.
- Lautsprecher für das neue Beschallungskonzept müssen beim Einsatz in typischen Tunnelgeometrien horizontale und vertikale Abstrahlwinkel von etwa jeweils 30° - 35° , eine sehr hohe Rückwärtsdämpfung von $A_{\text{Rück}} \geq 30$ dB, hohe Schalldruckpegel $L_{\text{pmax}} \geq 130$ dB (SPL) und breitbandige Übertragungsfrequenzgänge aufweisen.
- Ein nach dem Prinzip des Grenzflächenhorns entwickelter Speziallautsprecher stellte sich als überlegen für eine Längsbeschallung heraus. Dieser besitzt neben allen anforderungsgerechten akustischen Eigenschaften auch geometrisch eine sehr gute Eignung für Tunnelbauwerke durch eine konstruktiv stark minimierte Bauhöhe.
- Die Lautsprecher müssen zeitlich unbedingt so angepasst werden, dass eine zeitlich kohärente Wellenfront längs durch den Tunnel läuft.
- Die genannten technischen Anforderungen bezüglich Schallbündelung, Rückwärtsdämpfung, Übertragungs-Frequenzgangs und Schallleistung sind sehr hoch, vor allem weil diese Eigenschaften über den gesamten abgestrahlten Frequenzbereich von 300 Hz bis 8.000 Hz nahezu konstant eingehalten werden müssen.
- Die hohen Störlärmpegel in Tunneln machen eine Zielgröße von $L_{\text{pmax}} = 105$ dB (SPL) für die zu erreichenden Beschallungspegel erforderlich.

- Eine Sprachverständlichkeit in Tunneln wird bei Sprachübertragungs-Indizes von mindestens $STI \geq 0,45$ als anforderungsgerecht angesehen, gemessen bei Schalldruckpegeln von $L_p \leq 95$ dB (SPL).
- Bei Maximalschalldruckpegel reduziert sich dieser genannte Mindest-Verständlichkeitswert um rund 10 % durch die auftretenden Maskierungsvorgänge im Gehör, sodass dann noch mindestens $STI \geq 0,40$ im Worst-Case erreicht werden können. Da die aktuelle Normierung der STI-Messung die Pegelabhängigkeit einbezieht, sind die verwendeten Messpegel immer zu dokumentieren.
- Mit den angestrebten Verständlichkeits-Kriterien wird grundsätzlich eine ausreichende Verständlichkeit erreicht werden, unter der Voraussetzung, dass auch speziell angepasste Sprachkonserven eingesetzt werden und Leitwarten-sprecher ein Training für eine angepasst verlangsamte Sprechweise erhalten.

Es galt jetzt zu verifizieren, ob die Ergebnisse der Voruntersuchungen auf die Beschallung eines kompletten Tunnels zu übertragen sind. Da das Konzept in mehreren laufenden Bauprojekten zeitnah umgesetzt wurde, war dies noch im Rahmen des Forschungsvorhabens möglich.

Die Messungen im ersten fertig gestellten Tunnel (Nr. 14) ergaben, dass die vorhergesagten Ergebnisse eintrafen. Die Sprachverständlichkeit, die dort gemessen wurde, war mit einem Mittelwert des Sprachübertragungsindex $STI = 0,49$ als gut ausreichend zu bewerten.

Messungen in weiteren 3 Tunneln, die in kurzer Folge fertig gestellt wurden, untermauerten die Ergebnisse: Auch hier wurden Sprachverständlichkeitswerte mit im Mittel $STI = 0,52, 0,50$ und $0,49$ festgestellt.

Die aufgrund von Schallmessungen im Tunnel unter Verkehr ermittelten notwendigen Maximalwerte von 105 dB (A) konnten mit den installierten Lautsprecheranlagen ebenfalls realisiert werden.

Damit wurden in allen gemessenen Tunneln die zuvor aufgestellten Mindestanforderungen für eine verständliche Beschallung übertroffen.

Mit dem hier untersuchten Konzept, nun bezeichnet als synchronisierte Längsbeschallung beziehungsweise synchronised longitudinal announcement

speaker system (SLASS), wird das Ziel erreicht, Sprache im Sammelruf mit anforderungsgerechter Verständlichkeit in einen Tunnel zu übertragen.

8 Weiterbestehende Fragestellungen

8.1 Lautstärke-Pegelanpassungen

In den Tunnelröhren herrschen dynamisch wechselnde Störlärmpegel, abhängig von der Verkehrssituation. Die übertragenen Beschallungslautstärken sind hingegen statisch und werden im Regelfall mit dem möglichen Maximalpegel von 105 dB (A) realisiert.

So wird auch bei Störlärm-Worst-Case-Bedingungen (bis circa $L_{\text{Stör}} \leq 95$ dB (A)) die Verständlichkeit gesichert.

Großer Nachteil der Maximalpegelübertragung ist aber, dass diese auch bei geringem Störpegel erfolgt.

So wird z. B. im Stau bei stehendem Verkehr wie auch in Notfallsituationen, in denen sich die Personen bereits außerhalb der Fahrzeuge befinden, eine weit überhöhte Lautstärke der Sprachansagen verwendet.

Die Nachteile sind in diesen Fällen

- eine unnötig verminderte Verständlichkeit der Durchsagen. Bei 105 dB (A) ist die Verständlichkeit gegenüber einem geringeren Pegel [von z. B. ggf. sinnvollen 93 dB (A)] reduziert. Grund ist der im Bericht erläuterte Maskierungseffekt,
- ein Erschrecken und unnötige zusätzliche Stressbelastung der Personen, denn 105 dB (A) werden erschreckend und „brüllend laut“ wahrgenommen.

Es wird derzeit empfohlen, die Leitwartentechniker anzuweisen, bei offenkundig stehendem Verkehr einen um 10 dB ... 15 dB reduzierten Beschallungspegel manuell zu schalten. Dabei können die unter Kapitel 6.13 erwähnten Hilfsmittel zur Beurteilung des Schalldruckpegels eingesetzt werden.

Für die Zukunft könnte eine Sicherheits- und Verständlichkeitsverbesserung darin bestehen, die Beschallungspegel automatisch an den aktuellen Störlärm anzupassen.

Eine geeignete Mess- und Regelungstechnik, die diese störlärmabhängige Lautstärkeregelung angepasst an die menschliche Gehörwahrnehmung mit der notwendigen Fehlerfreiheit und Sicherheit für den Betrieb im Tunnel realisiert, ist zurzeit am Markt nicht erhältlich und wären noch zu entwickeln.

Literatur

AHNERT, W., REICHARDT, W.: Grundlagen der Beschallungstechnik; Berlin (VEB Verlag Technik) 1981

ANGERER, K.; MIKURA, E.: Dokumentation österreichischer Straßentunnelbauten (zusammenfassender Bericht zu den Einzeldokumentationen, Auswertung und internationaler Vergleich für die Jahre 1989, 1990, 1991); Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Bundesstrassenverwaltung; Wien: Forschungsges. für das Verkehrs- und Strassenwesen im Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein; Wien 1995

CHAUDIÈRE, H. T.: Evaluation Open-Plan Acoustics; Paper presented at the 51. AES Convention, Los Angeles 1975

DAVIS, D., DAVIS, C.: Sound System Engineering; 2nd Edition; USA 1989 (Howard W. SAMS)

DIN EN 54-16; Brandmeldeanlagen – Komponenten für Sprachalarmierung in Brandmeldeanlagen – Teil 16: Sprachalarmzentralen; Juni 2008

*** DIN EN 54-24; Brandmeldeanlagen – Komponenten für Sprachalarmierung in Brandmeldeanlagen – Teil 24: Lautsprecher; Juni 2008

DIN VDE 0833-4; Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall – Teil 4: Festlegungen für Anlagen zur Sprachalarmierung im Brandfall; September 2007

DIN EN 60268-16; Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2003); Deutsche Fassung EN 60268-16 Januar 2004

DIN EN 60849/VDE 0828-1; Elektroakustische Notfallwarnsysteme; Mai 1999

- FÄRBER, B. & FÄRBER, B. (BAST): Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln; Endbericht des Forschungsprojekts FE 03.4062006/FGB; Bergisch Gladbach 2009
- FASOLD, W., VERES, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis; Berlin 1998 (Verlag für Bauwesen GmbH)
- FASOLD, W., SONNTAG, E., WINKLER, H.: Bau- und Raumakustik, Berlin 1987 (VEB Verlag für Bauwesen)
- HAACK, A.: Generelle Überlegungen zur Sicherheit in Verkehrstunneln; STUVA e. V.; Köln 2002
- HARRISON, M. F.: Calculating speech intelligibility for the design of public address systems at railway stations; Proceedings of the I MECH E Part F, Journal of Rail and Rapid Transit (Volume: 215); Bedfordshire 2003
- HOCTER, S. T.: Sound reflection into a cylindrical duct; Mathematical, Physical & Engineering Sciences (Vol. 456), 2003
- HOUTGAST T., STEENEKEN H. J. M.: The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility; Acustica (28 (1), pp. 66-73); 1973
- HUIJBEN, J. W.: Speech Transmission by Loudspeaker Systems in a Tunnel; Civil Engineering division of the Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Utrecht 1999; presented in Vernon, France 1999
- JACOB, K.: Understanding Speech Intelligibility and the Fire Alarm Code, National Fire Protection Association Congress, Anaheim 2001
- KANG, J.: A method for predicting acoustic indices in long enclosures; Applied Acoustics (vol. 51); 1997
- KANG, J.: Modelling of Train Noise in Underground Stations; Journal of Sound and Vibration (vol. 195); 1996
- KANG, J.: Improvement of the STI of multiple loudspeakers in long enclosures by architectural treatments; Applied Acoustics (vol. 47); 1996
- KANG, J.: Sound attenuation in long enclosures; Building and Environment (vol. 31); 1996
- KANG, J.: Acoustics in long enclosures with multiple sources; The Journal of the Acoustical Society of America (vol. 99); 1996
- KANG, J.: Acoustics of long underground spaces; Tunnelling and Underground Space Technology, (vol. 12); Oxford 1997
- KANG, J.: Acoustics of Long Spaces: Theory Design and Practice; London 2002 (Telford Publishing Ltd.)
- LAZARUS, H., SUST, C. A., STECKEL, R., KULKA, M., KURTZ, P.: Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation; Berlin, Heidelberg 2007 (Springer)
- MAPP, P.: Measuring and Assessing Speech Intelligibility; London 1997
- SUGIMOTO, N.; OGAWA, T.: Acoustic analysis of the pressure field in a tunnel generated by entry of a train; Mathematical, Physical & Engineering Sciences (Volume: 454), 1998
- Van der WERFF, J., BREUER, F.: Behaviour of loudspeaker sound in autotunnels; Peutz Associates B. V.; Nijmegen, Netherlands 1991; Paper presented at the 90th AES-Convention; Paris 1991
- YANG, L. N., SHIELD, B. M.: Development of a ray tracing computer model for the prediction of the sound field in long enclosures; Journal of Sound and Vibration; 2000 (Vol. 229); London 1999

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1999

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken
Krieger, Krause, Wiggenhauser € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Beschichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

2000

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Untergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerksprüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2001

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzzenhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Weschpfennig
€ 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahnplatten beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kuchler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städling, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50
- B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser € 15,00
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50
- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck € 14,50

- B 53: **Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen**
Tauscher € 14,50
- B 54: **Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähler € 12,50

2007

- B 55: **Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50
- B 56: **Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50
- B 57: **Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50
- B 58: **Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel**
Sistenich € 14,50

2008

- B 59: **Bandverzinkte Schutzplankenholme**
Schröder € 12,50
- B 60: **Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung - Bewehrung**
Schröder € 13,50
- B 61: **Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten**
Schröder, Staack € 13,00
- B 62: **Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff**
Eilers € 12,00
- B 63: **Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50
- B 64: **Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4**
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: **Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50
- B 66: **Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln**
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00
- B 67: **Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln**
Blosfeld € 17,50
- B 68: **Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50

- B 69: **Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln**
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: **Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen**
Tauscher € 14,50

2010

- B 71: **Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau**
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: **Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen**
Weschpfennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50
- B 73: **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00
- B 74: **Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk**
Müller € 14,00
- B 75: **Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand**
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

- B 76: **Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems**
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00
- B 77: **Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Euro-codes**
Teil 1: DIN-FB 101 "Einwirkung auf Brücken"
Teil 2: DIN-FB 102 "Betonbrücken"
Teil 3: DIN-FB 103 "Stahlbrücken"
Teil 4: DIN-FB 104 "Verbundbrücken"
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50
- B 78: **Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: **Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spannliedführung**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)
- B 80: **Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln**
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Komplettverzeichnis erhältlich.