



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Schallreflexionen an Kunstbau- ten im Strassenbereich

Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art

Noise reflections on structures in the street

Basler & Hofmann AG
Ingenieure, Planer und Berater
8133 Esslingen

Markus Weber
Peter Angst
Stefanie Rüttener

EMPA
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
8600 Dübendorf

Kurt Heutschi

**Forschungsauftrag VSS 2006/204 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen-
und Verkehrsfachleute (VSS)**

November 2012

1386

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

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

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

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

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

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Schallreflexionen an Kunstbau- ten im Strassenbereich

Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art

Noise reflections on structures in the street

Basler & Hofmann AG
Ingenieure, Planer und Berater
8133 Esslingen

Markus Weber
Peter Angst
Stefanie Rüttener

EMPA
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
8600 Dübendorf

Kurt Heutschi

Forschungsauftrag VSS 2006/204 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen-
und Verkehrsfachleute (VSS)

November 2012

1386

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Markus Weber Basler & Hofmann

Mitglieder

Kurt Heutschi EMPA

Peter Angst Basler & Hofmann

Stefanie Rüttener Basler & Hofmann

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident

Martin Stauber

Mitglieder

Didier Racine

Frank Larghi

Gregor Schgvanin (bis 1.2011)

Irene Schlachter (ab 2.2011)

Maria Balmer

Markus Ringger

Thomas Stern

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	10
	Summary	13
1	Einleitung	15
2	Ziele der Forschungsarbeit	16
3	Vorgehen	17
4	Literaturauswertung	18
5	Fallbeispiel Unterführung	21
5.1	Situation	21
5.2	Messungen	21
5.3	Berechnungen	22
5.3.1	Berechnungen ohne absorbierende Massnahmen	22
5.3.2	Berechnungen mit absorbierenden Massnahmen	22
5.3.3	Berechnungen mit teilweise absorbierenden Wänden	23
5.4	Vergleich der Messungen mit den Berechnungen	24
6	Alternative Berechnungsmethoden zum Spiegelquellenverfahren	25
6.1	Berechnung mit Fresnelzonen	25
6.2	Berechnung der Reflexionen über Flächenquellen	25
6.3	Vergleich der Modellresultate	26
6.4	Anwendungsbereich und Grenzen der Flächenquellen	27
7	Ausweitung auf unterschiedliche Bauwerksformen	28
7.1	Typische Querschnitte	28
7.2	Berechnungspunkte	29
7.3	Resultate	29
7.4	Beurteilung der Resultate	31
7.4.1	Galeriequerschnitte	31
7.4.2	Brückenquerschnitt	31
7.4.3	Trogquerschnitte	32
7.4.4	Offener Querschnitt	32
7.5	Erkenntnisse aus den Berechnungen in den Querschnitten	33
8	Reflexionsmodell auf Basis des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals	34
9	Einsatz von Berechnungs- resp. Massstabsmodellen	35
9.1	Übersicht über die Modelle	35
9.2	Kriterien zum Einsatz der Modelle	35
9.3	Einsatzbereiche	36
10	Anwendungsbeispiele	38
10.1	Beispiel 1: Lärmschutzwand auf gegenüberliegender Seite	39
10.2	Beispiel 2: Stützmauer und Lärmschutzwand	41
10.3	Beispiel 3: Reflektion an Brückenuntersicht	43

Anhänge.....	46
Abkürzungen	89
Literaturverzeichnis.....	91
Projektabschluss	93
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	96

Zusammenfassung

In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden vermehrt komplexe Strassenbauwerke, wie Über- und Unterführungen, Galerien, etc. auch in Siedlungsnähe erstellt. Erfahrungen haben nun gezeigt, dass bei diesen Bauwerken mit der herkömmlichen Methode zur Berechnung der Reflexionen grobe Fehleinschätzungen entstehen können.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist deshalb, Antworten auf die folgenden Fragestellungen zu erarbeiten:

- Welche Modelle resp. Berechnungsansätze stehen zur Verfügung?
- In welchen Situationen und mit welchen Modellen kann welche Genauigkeit erreicht werden resp. sind welche Fehler zu befürchten?
- Welche Berechnungsmethoden/Messungen sind in einer konkreten Situation anzuwenden, damit die Resultate für eine Beurteilung ausreichen?

Die Literaturstudie über dieses Themengebiet zeigte, dass bei komplexen Ausbreitungsbedingungen und mehrfachen Reflexionen das Spiegelquellen-Modell in vielen Fällen nicht zu genügen vermag. Teilweise wurden neue spezifische Modelle unter Verwendung von Flächenquellen, Streuanteilen bei Reflexionen, Flächenquellen etc. entwickelt.

Um die Eigenschaften des Spiegelquellen-Modells, eines um die Fresnelzonen erweiterten Spiegelquellen-Modells und eines Modells mit Flächenquellen zu testen, wurde ein Modell einer Unterführung im Massstab 1:32 gebaut und die Immissionen - mit den entsprechenden Lärmquellen und Messinstrumenten - gemessen. Der Vergleich mit dem Spiegelquellen-Modell zeigt:

- Die beste Übereinstimmung mit den Messungen wird erreicht, wenn nur die 1. Reflexion berücksichtigt wird.
- Die Abweichungen betragen bis 2.4 dB. Sie sind weitgehend durch die geometrisch exakt definierte Lage der Schallausbreitungsstrahlen erklärbar, zum Teil auch durch die fehlenden höheren Reflexionsordnungen.

Es wurden auch Messungen und Berechnungen für eine Teilauskleidung der Rampe mit absorbierendem Material durchgeführt. Es ergab sich folgendes Fazit:

- Die absorbierende Fläche sollte mindestens die Hälfte der Wandfläche umfassen.
- Die absorbierende Verkleidung sollte im oberen Bereich der Wand liegen.
- Absorbierende Verkleidungen im tieferen Rampenbereich sind effizienter als im oberen flachen Bereich.

Ein Vergleich mit den alternativen Modellen "Fresnelzone" und "Flächenquellen" ergaben:

- Beide Modelle liefern gute Resultate und liegen gesamthaft näher bei den Modellmessungen als die Berechnungen mit dem Spiegelquellen-Ansatz.
- Die Stärke der Berechnung mit Fresnelzonen liegt vor allem bei der Ermittlung der Reflexionen an begrenzten Flächen, die Stärke der Berechnung mit Flächenquellen bei der Quantifizierung der Mehrfachreflexionen.

Eine Ausweitung dieser Resultate auf andere Situationen beschränkt sich aus praktischen Gründen jeweils auf die Querschnitte. Untersucht wurden die Immissionen aus 8 typischen Querschnitten (Stützmauern, Galerien, Brücken, Tröge) auf 3 Empfangspunkte in verschiedenen Höhen (2 m, 5 m und 8 m ü.B.) in 37.5 m Distanz zur Strassenachse.

Als Vergleichsbasis wurden die Immissionen mit dem wellentheoretischen Ansatz berechnet. Der Vergleich mit den Resultaten der Berechnungen mit Spiegelquellen-Ansatz (Reflexionen 1. Ordnung, Reflexionen bis zur 3. Ordnung) und mit dem Flächenmodell ergaben:

- Es treten teils grosse Abweichungen von bis zu 6 dB auf.
- Keines der angewendeten Modelle liefert durchgehend zuverlässige Resultate.
- Bei der Spiegelquellen-Methode spielen Zufälligkeiten bei der geometrischen Ausbreitung eine wichtige Rolle. Bei der Berücksichtigung der Reflexionen nur bis zur 1. Ordnung werden die Immissionen generell unterschätzt.
- Die zuverlässigsten Resultate für die beiden oberen Empfangspunkte 5 m und 8 m über Boden liefert das Flächenquellenmodell; hingegen treten hier beim untersten Empfangspunkt in 2 m Höhe – möglicherweise wegen zu tiefer Berücksichtigung der Hinderniswirkung – stärkere Abweichungen auf.
- Es fällt auf, dass mit dem Spiegelquellen-Modell auch bei häufig auftretenden "einfachen" Querschnitten wie einem Trogquerschnitt erhebliche Fehleinschätzungen entstehen können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die geprüften Modelle Einschränkungen im Anwendungsbereich resp. in der Berechnungsgenauigkeit unterliegen. Dennoch können bei einem kombinierten Einsatz und einer kritischen Beurteilung der Resultate mindestens die folgenden Beurteilungsfaktoren abgeschätzt werden:

- Unsicherheit beim Abschätzen der Reflexionen
- Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel

Aufgrund der Bewertung dieser Kriterien ist im Einzelfall zu entscheiden, ob detailliertere Untersuchungen nötig sind für eine ausreichende Beurteilung:

- Berechnung nach wellentheoretischem Ansatz im 2D-Raum
- Reflexionsmodell auf Basis des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals
- Messungen an Massstabmodellen oder in der Realität

Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel	klein	mittel	gross
klein	STL-86+ genügend		STL-86+ mit ergänzenden Überlegungen zur Eingrenzung der Unsicherheit ev.
mittel		Situation genauer prüfen - Aufteilung Quellen - Mehrfachreflexionen - Flächenquellen - Fresnelzonen ev.	
gross			Einsatz komplexer Rechenmodelle (Kirchhoff-Helmholtz) oder Massstabsmodelle prüfen

Anwendungsbereich Berechnungsmodelle

Résumé

Dans les années passées, de plus en plus de structures routières complexes ont été réalisées près des zones résidentielles. Comme des passages surélevés ou des souterrains, des galeries, etc. L'expérience a montré que pour ces structures les méthodes de calcul de réflexion spéculaire peuvent entraîner de grosses erreurs.

Le but de ce travail de recherche est de trouver les réponses aux questions suivantes :

- Quel modèle respectivement quel approche de calcul est à disposition?
- Dans quelle situation et avec quel modèle de calcul on atteindra quelle exactitude et quelle erreur possible?
- Quelle méthode de calcul / mesure est à appliquer dans une situation concrète afin que le résultat soit suffisant pour un jugement?

L'étude de la littérature à ce sujet montre que dans les situations complexes de propagation et de réflexion multiple le modèle de réflexion spéculaire est, dans beaucoup de cas, insuffisant. Parfois des modèles nouveaux et spécifiques de réflexions diffuses sont développés.

Pour tester le modèle de calcul, il a été construit un vrai modèle de passage souterrain à l'échelle 1 :32 . Les émissions ont été mesurées et calculées avec différents modèles : un avec réflexion normale, un avec prise en considération de l'effet Fresnel et finalement un avec source diffuse. La comparaison montre :

- La meilleure concordance avec la mesure est obtenue lorsque seulement la première réflexion est prise en compte.
- Les différences entre la mesure et le calcul atteignent 2.4 dB. Ces différences peuvent être expliquées par la géométrie de la position exacte du rayon de propagation du son et parfois aussi par le manque de réflexion multiple.

Des mesures et des calculs ont aussi été faits pour le matériel absorbant sur une partie de la rampe. Il en résulte :

- Au minimum la moitié de la paroi doit être absorbante
- La partie absorbante doit se trouver dans la partie supérieure de la paroi verticale
- La partie absorbante est plus efficace lorsqu'elle se trouve où la rampe est profonde

La comparaison entre le modèle « Fresnel » et « source diffuse » montre :

- Les deux modèles donnent de bons résultats. Ces derniers sont plus proches de la mesure que ceux calculé avec la réflexion spéculaire.
- Le calcul avec « Fresnel » donne de bons résultats dans la situation où la zone de réflexion est petite, le calcul avec les zones source est favorable lorsque la réflexion multiple peut avoir une grande influence sur le résultat.

Une extension de ces résultats pour d'autres situations est pour des raisons pratiques restreintes à une section transversale. Il a été testé 8 sections typiques (parois latérales, galerie, pont, parois de protection). L'émission a été calculée pour 3 hauteurs différentes (2, 5 et 8 m) pour un point situé à 37.5 m de la route.

Sur des bases de comparaison l'immission est calculée avec la théorie des ondes. La comparaison entre le résultat du calcul et la réflexion spéculaire (réflexion de 1er ordre, réflexion de 3ème ordre) et avec le modèle de source diffuse montre:

- Il y a de grosses différences jusqu'à 6 dB.
- Aucun des modèles testés ne donnent de bons résultats dans toutes les situations
- La propagation avec la réflexion spéculaire peut donner de grosses différences selon la géométrie de la situation. En considérant seulement la première réflexion le résultat a tendance à être trop bas.
- Le modèle donne des résultats pour les points à la hauteur de 5m et 8m. Mais pour le point à 2m il y a de grosses différences de résultats, influencé par le calcul de l'effet barrière.
- Dans une situation simple, par exemple dans laquelle on a des parois sur les 2 côtés, le calcul avec un modèle de réflexion spéculaire peut engendrer des grosses erreurs.

Les recherches ont montré que le modèle testé contient des restrictions dans son application ou dans le calcul. Néanmoins sur la base de ce modèle et avec un jugement critique sur les résultats on peut évaluer les facteurs suivants :

- Incertitude sur l'évaluation de la réflexion
- Influence de la réflexion sur le niveau total d'immission

Sur la base de ces critères, dans chaque situation il faut décider si une investigation de détail est nécessaire pour un jugement suffisant :

- Calcul avec un modèle à éléments finis
- Calcul avec le modèle de réflexion basé sur les intégrales Kirchhoff-Helmholtz
- Mesures dans un modèle à l'échelle ou dans une situation réelle

L'incertitude sur l'évaluation de la réflexion l'influence de la réflexion sur le niveau total d'immission	L'incertitude sur l'évaluation de la réflexion		
	petite	moyenne	grosse
petite	STL-86+ suffisant		STL-86+ avec considérations pour limiter l'incertitude
moyenne		Prouver la situation - Division des sources - réflexions multiples - sources diffuses - Fresnel	
grosse			Application des modèles complex (Kirchhoff-Helmholtz) ou modèles à l'échelle

ev.

Domaine d'application des modèles

Summary

In the past years have been realized more and more artificial structures for streets, as elevated and undergrade crossings, galleries etc. near residential areas. It has grown the experience that for these artificial structures with the calculation method with the regular reflection heavy error can occur.

Target of this research project is to find answers on the following questions:

- Which method and which calculation approach is available?
- In which situation and with which calculation model you can reach which accuracy or which errors can occur?
- Which calculation method / measurements have to be applied in real situations for sufficient results for appraisal?

The study of literature in this field has shown that for complex propagation conditions and multiple reflections the model with regular reflections is in a lot of cases not sufficient. There have been developed specific models with different source and reflection models.

For proving the calculation methods it has been built a real model of an undergrade crossing in the scale 1:32. The immissions have been measured in the model and calculated with different models: A model with regular reflections (for simple and multiple reflections), a model with consideration of the Fresnel effect, and a model with area sources. The comparison shows:

- The best accord with the measurement results for the regular reflections you get, if you calculate only with the first reflection.
- The differences between measurement and calculation go up to 2.4 dB. These differences can be explicated with the exact geometrical position of the noise propagation rays, partly also with the lack of multiple reflections.

They have been made also measurements and calculations for a partly absorbent structure. The results are:

- Minimum the half part of the lateral wall should be absorbent
- The absorbent part should be placed in the higher part of the lateral wall.
- Absorbent areas are more efficient there where the ramp is deep.

The comparison with the alternative models "Fresnel" and "area source" has shown:

- The results of both models are very exact. They are closer to the measurement values then the calculation results with regular reflections.
- The calculation with "Fresnel" give good results in situation with small reflecting areas, the calculation with area sources is then favourably, when multiple reflections can have an important influence on the result.

An extension of these results on other situations is for practical reasons restricted on 2 dimensions. There has been proved 8 typical situations (lateral walls, galleries bridges, walls at both sides). The immissions have been calculated for 3 levels over ground (2 m, 5 m and 8 m) for a point in 37.5 m distance to the street.

The base for the comparison have been calculations with a finite element model. The comparison with the results of calculations with regular reflections (simple and multiple reflections) and the area source model shows:

- There are big differences up to 6 dB.
- Not any of the proved models gives accurate results in every situation.
- The propagation with regular reflections can give big differences depending on the exact geometry of the situation. With considering only the first reflection the results are by trend to low.
- The most accurate results for the receiving points on the level of 5 m and 8 m gives the area source model. But at the receiving point on the level 2 m they are serious differences between the results, may be influenced by the calculations of the barrier effect.
- It is interesting, that also in simple situations, for example with walls on both sides, with a calculation with regular reflections can be made heavy errors.

The investigations have shown that the proved models have restrictions in the application or in the calculation accuracy. Nevertheless can on the base of these models and a critical appraisal of the results the following factors be estimated:

- Uncertainty in estimating of reflections
- Influence of the reflections on the total immission level

On base of these criteria is in every case to decide if detailed investigations are necessary for the appraisal:

- Calculation with finite element models
- Calculation with a reflection model based on Kirchhoff-Helmholtz
- Measuring in a scale model or in the real situation

uncertainty in estimating reflections Influence of reflections on the total immission level	small	middle	big
small	STL-86+ sufficient		STL-86+ in addition with considerations for bordering the uncertainty
middle		Prove situation - dividing sources - multiple reflections - area sources - Fresnel	
big			Application of complex calculation models (Kirchhof-Helmholz) or scale models

ev.

Application of models

1 Einleitung

In Situationen in schwach bis mittelbebautem Gelände sind Reflexionen in der Regel ohne grosse Bedeutung. Zudem können sie mit dem Spiegelquellen-Ansatz genügend genau berechnet werden.

Bei komplexen Situationen hingegen, wie sie bei Kunstbauten vor allem im städtischen Bereich je länger je mehr entstehen, hat sich gezeigt, dass mit der herkömmlichen Berechnung mittels Spiegelquellenansatz die Immissionen und vor allem die Reflexionen oft grob falsch eingeschätzt werden.

Um in diesem Bereich mehr Klarheit zu schaffen und zu zeigen, welche weiteren Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen und in welchen Fällen sie eingesetzt werden sollten, wurde diese Forschungsarbeit gestartet. Die Resultate der Forschung erlauben es, Situationen schrittweise bezüglich möglicher Reflexionen einzuschätzen und zu erkennen, welche zusätzlichen Methoden erforderlich sind, um ausreichend aussagekräftige Resultate zu erhalten. Es zeigt sich auch, in welchen Situationen welches Modell welche Schwächen aufweist und keine zuverlässigen Resultate liefert.

Darüber hinaus lassen sich aus den angestellten Untersuchungen weitere Schlüsse ziehen. Insbesondere die Messungen am Massstabsmodell der Unterführung erlauben konkrete Aussagen zur Wirkung von absorbierenden Auskleidungen resp. Teilauskleidungen dieser häufig auftretenden Situation. Ebenso zeigen die Berechnungen in den verschiedenen Querschnitten, mit welchen Fehlern je nach eingesetztem Berechnungsmodell gerechnet werden muss.

2 Ziele der Forschungsarbeit

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, zu der Schallausbreitung bei möglichst vielen der komplexen Bauwerke und Situationen, Aussagen zu machen. Es sollen auch Hinweise und Hilfsmittel für eine möglichst genaue Berechnung erarbeitet werden.

Vorerst werden jene Situationen gesucht, in denen mit dem Spiegelquellenverfahren nur ungenaue und nicht der Realität entsprechende Berechnungen angestellt werden können. In diesen Situationen soll unter Beizug anderer Berechnungsansätze nach Erklärungen für die Abweichungen der Berechnungsergebnisse von der Realität gesucht werden.

Aus den Resultaten dieser Untersuchungen werden Hinweise und Hilfsmittel herausgearbeitet, die helfen sollen, die Situationen zu erkennen, in denen mit den herkömmlichen Spiegelquellen-Verfahren keine realistischen Resultate zu erwarten sind. Zudem soll mit den erarbeiteten Modellansätzen eine bessere Abschätzung der Immissionen in diesen Situationen möglich sein.

3 Vorgehen

Es wurde ein Vorgehen gewählt, bei dem zuerst an einem ausgewählten Beispiel, einer Unterführung, mit verschiedenen Methoden die Genauigkeit und die Abweichungen der Prognosen geprüft werden. In einem zweiten Schritt wurden dann die Erkenntnisse aus diesem Fallbeispiel auf eine breite Palette von möglichen Situationen angewendet, um daraus allgemeine und umsetzbare Erkenntnisse für die Schallausbreitung bei komplexen Bauwerken zu erhalten. Mit den einzelnen Schritten wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- **Literaturlauswertung**
Die Auswertung der bisher auf diesem resp. verwandten Gebieten getätigten Arbeiten soll vor allem zeigen, mit welchen methodischen Ansätzen in vergleichbaren Situationen gearbeitet wurde und welche Resultate dabei erzielt worden sind.
- **Fallbeispiel Unterführung**
Für dieses ausgewählte Beispiel, ein in der Praxis häufig vorkommendes Bauwerk, wurden an einem Massstabsmodell Messungen durchgeführt. Das Massstabsmodell wurde gewählt, da sich keine realen Situationen finden lassen, bei denen nicht eine Vielzahl von örtlichen Parametern die Resultate so beeinflussen würden, dass sich daraus kaum verlässliche, auf allgemeine Situationen übertragbare Resultate ergeben würden. Dieses Fallbeispiel wurde auch rechnerisch in einem Modell nachgebildet und die Resultate mit den Messungen verglichen. Aus den Diskrepanzen konnte auf die Schwächen der Ausbreitungsberechnung nach dem Spiegelquellen-Verfahren geschlossen werden.
- **Ansätze für Rechenmethoden**
Es wurde versucht, mit anderen Ansätzen für die Schallausbreitung die Abweichungen der Messungen von den Resultaten der herkömmlichen Ausbreitungsberechnung zu erklären. Dabei wurden zwei Ansätze gewählt: Die Berechnung mit Fresnelzonen und die Berechnung der Reflexionen über Flächenquellen mit Richtcharakteristik.
- **Ausweitung auf allgemeine Situationen**
Die Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel und den geprüften Rechenmethoden wurden nun auf eine breite Palette von Situationen angewandt. Dabei wurden die Situationen im Querschnitt mit einem wellentheoretischen Modell berechnet und geprüft, mit welchen Ausbreitungsberechnungen diese Resultate am besten nachgebildet werden konnten.
- **Hinweise Berechnung/Abschätzung der Lärmimmissionen in komplexen Situationen**
Aus den Berechnungen wurde ersichtlich, dass mit dem Spiegelquellenmodell in komplexen Situationen die Berechnungsergebnisse häufig stark von der effektiven Schallbelastung abweichen können. Es wurden Methoden und Kriterien erarbeitet, in welchen Fällen der Einsatz komplexerer Ermittlungsverfahren angezeigt ist.
- **Anwendungsbeispiele und Hilfsmittel**
Bei 3 Anwendungsbeispielen wurde gezeigt, wie diese einzustufen sind und mit welchen Hilfsmitteln/Berechnungen man zu diesen Einstufungen gelangt.

4 Literaturlauswertung

Zum Forschungsthema "Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich" liegen keine Untersuchungen vor, die genau und umfassend dieses Thema abdecken. In verschiedenen Spezialbereichen, die sich teilweise mit dem vorliegenden Forschungsthema überlappen, liegen aber wertvolle Untersuchungen vor, die bezüglich Methodik und Daten wichtige Grundlagen der vorliegenden Arbeit bilden können. Verwertbare Forschungsarbeiten liegen in den folgenden Bereichen vor:

Immissionsberechnungen innerhalb von Strassenschluchten

Im Bereich der Lärmforschung in Strassenschluchten liegt eine umfangreiche Literatur vor, die auch für die vorliegende Forschungsarbeit interessante Impulse und Datengrundlagen liefern kann. Eines der Hauptforschungsgebiete in diesem Bereich ist die Ausbreitung innerhalb der Strassenschluchten selbst. Im Wesentlichen werden drei Ausbreitungswege untersucht: der Direktschall, der über Spiegelquellen reflektierte Schall und die diffuse Schallausbreitung. Es sind vor allem Rechenmodelle erarbeitet worden [9], deren Resultate auch durch Messungen überprüft worden sind [12]. Es sind teilweise sehr umfangreiche und umfassende Modelle erarbeitet worden [29, 27]. In wenigen Forschungsarbeiten sind direkt anwendbare Modelle enthalten, die eine einfache Berechnungsmethode enthalten [14]. In einer Forschungsarbeit [23] wurde auch untersucht, wie sich die Annahme der seitlichen Begrenzung als diffus streuende oder spiegelnd reflektierende Flächen auswirkt. Es zeigte sich, dass diffuse Reflexionen günstiger sind und zu niedrigeren Immissionspegeln führen.

In einer der Forschungsarbeiten [20] wurde die Schallausbreitung mit einem optischen Verfahren untersucht.

Eine der Fragen, die sich bei diesen Berechnungsmodellen stellt, ist die Aufteilung der Reflexionen in geometrische und in diffuse Reflexionen. Dazu liegen zwei Untersuchungen vor. Die eine prüft den Einfluss der Fassadenstruktur auf die Ausbreitung [31], die andere ermittelt den Anteil der diffusen Reflexionen für verschiedene Fassadenstrukturen [21]. Für die geprüften Strukturen ergeben sich Werte von $\alpha = 0.10 - 0.15$ für den Diffusanteil. Eine andere Arbeit geht von einem Wert von $\alpha = 0.2$ aus [12].

Eine Untersuchung befasst sich mit dem Einfluss der Orientierung der Bauten auf den Immissionspegel [5]. Es zeigt sich, dass der Einfluss minimal ist und sich mit einer Schrägstellung der Bauten keine spürbare Senkung der Immissionen erreichen lässt.

Ein weiteres Modell erlaubt die Abschätzung der Immissionen im städtischen, überbauten Raum [26]. Es basiert auf analytischen Berechnungen des Direktschalls und der Mehrfachreflexionen. Resultate liegen für den Strassen- und den Kreuzungsbereich vor.

Immissionsberechnungen ausserhalb von parallelen Lärmschutzwänden

Ein weiterer Forschungsbereich befasst sich mit den Immissionen ausserhalb von parallelen Lärmschutzwänden, vor allem im Schattenbereich dieser Wände. Zwei Forschungsarbeiten untersuchen den Einfluss der Diffusität auf die Immissionen [7, 8]. Bei der einen Untersuchung wurden auch Modellmessungen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen vorgenommen [8]. Eine weitere Arbeit [4] überprüfte den Einfluss der Mehrfachreflexionen anhand von zahlreichen Messresultaten aus Feld- und Modellmessungen [4].

Eine weitere Forschungsarbeit befasste sich mit parallelen Lärmschutzwänden innerhalb von Strassenschluchten resp. einseitig mit hohen Gebäuden bebauten Strassen [30]. Mit einem Strahlenausbreitungsmodell wurde der Einfluss der Mehrfachreflexionen ermittelt.

Eine weitere Arbeit befasste sich mit dem Einfluss von Lücken in LSW bei sich überlappenden Lärmschutzwänden [13]. Die Untersuchung basiert auf Spiegelquellen.

Untersucht wurde auch die Dämpfung durch die Bebauung [11]. Es wurde die Dämpfung in Abhängigkeit der Bebauungsdichte ermittelt. Diese Werte sind vor allem im Bereich grossflächiger Untersuchungen, weniger aber im Einzelfall von Interesse.

Immissionen im Bereich von Strassentunnelportalen

Die vorliegenden Untersuchungen zur Schallabstrahlung von Tunnelportalen beruhen vor allem auf geometrischen Ansätzen. Nach den Untersuchungen [1,2] wird der Immissionspegel anhand von Spiegelquellen unter Berücksichtigung der Luftdämpfung und der Streuverluste bei den Reflexionen berechnet. Dabei übernimmt [2] den Modellansatz von [1] und weitet ihn auf Tunnelgalerien aus. Beide Untersuchungen überprüfen die Berechnungsergebnisse mit Messungen.

Eine Untersuchung [3] dient vor allem dem Einbau der Wirkung des Portallärms in ein Berechnungsmodell. Dazu wird eine Ersatzquelle im Tunnelportal berechnet. Die Modellberechnungen basieren auf drei Lärmquellen resp. Ausbreitungswegen: Dem Direktschall (sichtbarer Bereich im Tunnel), dem gebeugten Schall aus dem nicht mehr sichtbaren Bereich des Tunnels und den Reflexionen. Die Lärmquelle im Tunnel wird mit 500 Punktquellen nachgebildet.

Eine weitere Untersuchung an Tunnelportalen beschränkt sich weitgehend auf Messungen an 3 innerstädtischen Tunnelportalen. Die Messungen ergaben im Tunnel Schallpegelerhöhungen von 2.5 – 5.0 dB und im Bereich des Tunnelportals Erhöhungen bis 8 – 10 dB. Befragungen bezüglich Lärmbelastung ergaben keine eindeutige Korrelation zur Lärmbelastung.

Immissionen im Bereich von Galerien

Über Galerien liegen verhältnismässig wenig Untersuchungen vor. Die Untersuchungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Messungen an Modellen [6, 10, 34] oder an konkret ausgeführten Bauwerken [35]. Daraus ergibt sich umfangreiches Datenmaterial. Insbesondere die Untersuchung [6] hat eine ganze Anzahl Varianten gemessen, sowohl hinsichtlich Geometrie (Galeriewand, Galeriedecke) wie auch bezüglich der akustischen Eigenschaften (reflektierend, absorbierend). Im Modell wurden auf der nicht abgeschirmten Seite Pegelerhöhungen von 2 - 3 dB bei reflektierendem und 0 - 1 dB bei absorbierendem Galerieinneren im Vergleich zur offenen Streckenführung gemessen [6]. Am ausgeführten Bauwerk wurden auf der offenen Seite Pegelerhöhungen gegenüber der Freifeldausbreitung von 5 - 6 dB gemessen [35].

Nur bei zwei Untersuchungen wurde versucht, ein Berechnungsmodell für die Immissionen aus Galerien zu entwickeln. Die Untersuchung [35] versucht über einen Zuschlag für die Galerie die Immissionen korrekt zu berechnen. Es ergibt sich allerdings nur eine mässige Übereinstimmung. Eine andere Untersuchung geht von den Lärmimmissionen im Tunnel-Portalbereich aus und weitet das Modell auf Galerien aus [2].

Immissionen bei Schallreflexionen an Kunstbauten im Bahnbereich

Die Schallreflexionen bei Bahnen unterscheiden sich von denen der Strassen vor allem dadurch, dass Fahrzeuge resp. Bahnwagen verglichen mit den baulichen Strukturen meist erheblich grösser sind als im Strassenverkehr. Dadurch sind Mehrfachreflexionen zwischen Wänden und Fahrzeugen und auch die Abschirmwirkung durch die Fahrzeuge von Bedeutung. Es liegt eine Untersuchung [16] vor, in der ein semiempirisches Modell für Tunnelportale von Bahnen erarbeitet wurde. Eine weitere Studie [17] untersucht die Ausbreitung von Bahnlärm in verschiedenen Typen von Einschnitten mit einem wellentheoretischen Ansatz und mit einem Modell, das die diffusen Anteile aus den Mehrfachreflexionen mit Ersatzquellen am Wagendach nachbildet. Da bei beiden Modellen die Mehrfachreflexionen resp. die dadurch entstehenden diffusen Schallfelder von Bedeutung sind, ist die Übertragbarkeit auf den Strassenverkehrslärm sehr eingeschränkt.

Fazit

Die bisherigen Untersuchungen in diesem Gebiet zeigen, dass bei komplexen Ausbreitungsbedingungen und mehrfachen Reflexionen das Spiegelquellen-Modell in vielen Fällen nicht zu genügen vermag. Teilweise wurden neue spezifische Berechnungsmodelle unter Verwendung von Flächenquellen, Streuanteilen bei Reflexionen, diffuse Schallfelder etc. entwickelt.

5 Fallbeispiel Unterführung

5.1 Situation

Als Ausgangsbasis wurde ein Fallbeispiel gewählt, dass in der Praxis häufig vorkommt, eine Unterführung. Dieses umfasst verschiedene, bezüglich Reflexionen wichtige Situationen, wie Mehrfachreflexionen an weitgehend parallelen Wänden, Portalsituationen, etc.

Da sich in der Realität keine Situation finden lässt, bei der nicht örtliche Besonderheiten die Resultate wesentlich beeinflussen und eine exakte rechnerische Nachbildung verhindern, wurde für die Messung ein Massstabsmodell gewählt. Das Modell wurde im Massstab 1:32 gebaut. Gemessen wurden die Immissionen an insgesamt 19 Punkten. Diese 19 Empfangspunkte wurden in zwei Querschnitten senkrecht zur Unterführung und in einer Linie parallel zur Unterführung angeordnet. In den Querschnitten wurde im Abstand von 4 m, 8 m und 16 m, jeweils in 2 und 5 m Höhe gemessen (Massangaben im Originalmassstab). Die Messpunkte parallel zur Unterführung wurden in einem Abstand von 8 m zur Unterführung in 2 m Höhe und einem gegenseitigen Abstand von 12 m gewählt.

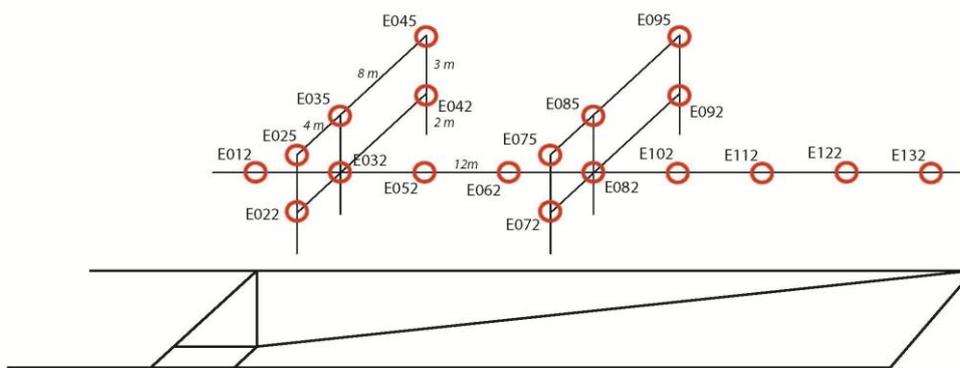


Abbildung 5.1.1: Anordnung Messpunkte Unterführung (Die Abmessungen der Unterführung sind im Anhang 2 dokumentiert.)

5.2 Messungen

Die Methodik der Modellmessungen ist im Anhang 3 beschrieben.

Es wurden Messungen mit und ohne Brückenüberführung sowie mit drei Varianten von absorbierenden Massnahmen (alle mit Brückenüberführung) durchgeführt. Es ergeben sich zusammengefasst die folgenden Resultate (Detailresultate im Anhang 3):

- Der Vergleich zwischen den Messungen mit bzw. ohne Brückenüberführung ergab nur geringfügige Zunahmen der Immissionspegel im Bereich der Brückenüberführung.
- Absorbierend verkleidete Wände senkten die Immissionspegel um bis zu 8 dB. Bis auf wenige Punkte im Bereich, in dem der Trog niedrig ist, liegen die Reduktionswerte über 5 dB.
- Eine zusätzliche absorbierende Verkleidung der Brückenuntersicht ergab keine erkennbaren Auswirkungen auf die Immissionen.
- Eine teilweise Verkleidung der Wände im oberen Bereich auf nur 50 % der Gesamtfläche zeigt ziemlich genau die halbe Wirkung der Gesamtverkleidung.

Die Messungen zeigen die Wirksamkeit einer absorbierenden Verkleidung, aber auch, dass eine zusätzliche Verkleidung der Brückenuntersicht keine Wirkung ergibt.

5.3 Berechnungen

Für die Berechnungen wurde das Massstabsmodell im Programm CadnaA nachgebildet. Eine leichte Änderung gegenüber dem Massstabsmodell ergab sich dadurch, dass keine leicht geneigten reflektierenden Wände gebildet werden können (3D-Reflektoren können Reflexionen nur bis zur 1. Ordnung rechnen) und für die Berechnung mit senkrechten Wänden in der Unterführung gerechnet wurde.

Es wurden Berechnungen mit und ohne absorbierende Stützmauern sowie verschiedenen Varianten von teilweise verkleideten Stützmauern vorgenommen. Die Berechnungen wurden unter Berücksichtigung verschiedener Reflexionsordnungen durchgeführt. Die detaillierten Resultate dieser Berechnungen sind in den Anhängen aufgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse daraus sind:

5.3.1 Berechnungen ohne absorbierende Massnahmen

Die Berechnungen wurden mit der 1., 2., 3. und 6. Reflexionsordnung vorgenommen. Es ergaben sich folgende Resultate:

- Die Immissionen erhöhen sich an den meisten Punkten mit Zunahme der Reflexionsordnung kontinuierlich.
- Die grösste Zunahme erfolgt mit über 10 dB dort, wo der Trog am tiefsten ist, die geringste mit 1 dB dort, wo der Trog am wenigsten tief ist.
- Bei zwei Punkten, E025 und E075, nehmen die Immissionen ab der 1. Reflexionsordnung nicht mehr zu. Bei einigen weiteren Punkten ist dies ab der 2. oder 3. Reflexionsordnung der Fall.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Punkten zeigen, dass sich das exakte geometrische Spiegelquellen-Verfahren mit punkt- resp. liniengenau definierten Quellen und Empfangspunkten teilweise zu zufälligen Resultaten führen kann.

5.3.2 Berechnungen mit absorbierenden Massnahmen

Es wurden die gleichen Berechnungen durchgeführt wie ohne absorbierende Massnahmen. Es ergaben sich die folgenden Resultate:

- Die Schallpegel vermindern sich gegenüber dem Zustand ohne absorbierende Massnahmen um 1 – 7 dB (Reflexionen 1. Ordnung), resp. 1 – 10 dB (Reflexionen bis zur 6. Ordnung).
- Die stärksten Schallpegelvermindierungen ergeben sich bei E022, die geringsten bei E132 (1. Reflexionsordnung).
- Ab der 1. Reflexionsordnung erfolgen nur noch geringfügige Zunahmen der Immissionspegel.

Die Berechnungen zeigen, dass die absorbierende Verkleidung der Wände eine wirksame Massnahme ist und Mehrfachreflexionen weitgehend verhindert werden.

5.3.3 Berechnungen mit teilweise absorbierenden Wänden

Zusätzlich zu den Berechnungen der Rampe mit vollflächiger absorbierender Verkleidung wurden auch verschiedene Varianten mit teilweiser absorbierender Auskleidung untersucht. Die Berechnungen wurden für folgende Auskleidungen durchgeführt:

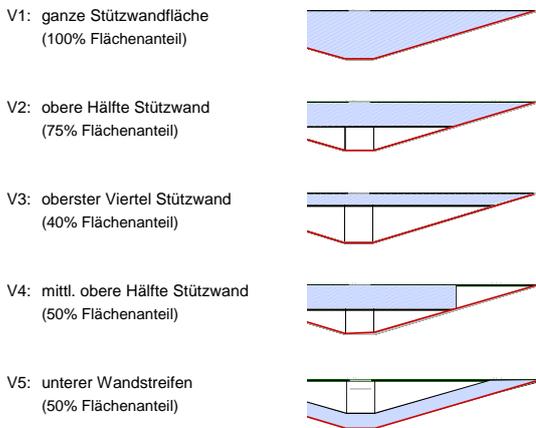


Abbildung 5.3.3.1: Varianten mit teilweiser absorbierender Wandverkleidung

Die Berechnungen erfolgten für alle Varianten jeweils für einseitige Verkleidung (auf der gegenüberliegenden Seite) und beidseitige Verkleidung. Die Berechnungen sind mit Berücksichtigung der Reflexionen bis zur 6. Ordnung durchgeführt worden. Für die Variante V4 konnten zudem die Berechnungsergebnisse mit den Messresultaten am Massstabmodell verglichen werden. Es ergaben sich die folgenden Resultate:

- Der Vergleich der Berechnung und der Messung für eine Variante (V4) zeigt, dass sich gesamthaft eine gute Übereinstimmung ergibt, auch wenn bei einzelnen Empfangspunkten Abweichungen auftreten, die sich nicht restlos erklären lassen.
- Die Verkleidung der gegenüberliegenden Seite genügt. Eine beidseitige Verkleidung bringt (bei lärmempfindlichen Bauten nur auf einer Seite der Rampe) keine spürbare Verbesserung.
- Bei 100%-Verkleidung der Rampe liegt die Schallminderung etwa bei 6 dB. Bei einer Verkleidung mit 50 % - 70 % (V4 und V2) ist dieser Wert etwa 1 – 2 dB geringer. Die Effizienz liegt damit für diese 3 Varianten in einem ähnlichen Bereich.
- Kleine Teilverkleidungen unten wie oben bringen nur sehr wenig Nutzen. Die Veränderungen liegen praktisch im nicht wahrnehmbaren Bereich.
- Dort wo der Kanal tief ist, ist die Absorption effizienter. Dies zeigt der Vergleich der Varianten V2 und V4.

Fazit

- Die absorbierende Fläche sollte 50 – 100 % der Fläche umfassen. Kleinere Flächen bringen zu wenig Nutzen.
- Verkleidungen sollten im oberen Bereich der Wand liegen (vertikale Anordnung).
- Verkleidungen im tieferen Rampenbereich sind effizienter als im oberen flacheren Bereich (horizontale Anordnung).
- Die absorbierende Verkleidung auf der gegenüberliegenden Strassenseite einer lärmempfindlichen Nutzung genügt. Die beidseitige Verkleidung bringt (bei einseitiger lärmempfindlicher Nutzung) keine spürbare Erhöhung der Schallminderung.

5.4 Vergleich der Messungen mit den Berechnungen

Vergleicht man die Messungen mit den Berechnungen, so ergeben sich die folgenden Differenzen:

Zustand ohne Absorption

- Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ergibt sich, wenn nur die 1. Reflexionsordnung berücksichtigt wird.
- Die Differenzen liegen bei maximal 2.4 dB. Die Messwerte liegen mehrheitlich tiefer als die berechneten Werte.
- Eindeutig tiefer (1.0 – 2.3 dB) liegen die Messwerte im niedrigen Trogbereich.
- Ebenfalls deutlich tiefer liegen die Messwerte bei den Punkten, die dem Trog am nächsten liegen.
- Bei den weiter entfernten Punkten liegen bei den oberen Punkten (5 m) die Messwerte tiefer als die Berechnungswerte und bei den tieferen (2 m) die Messwerte höher als die Berechnungswerte.

Zustand mit Absorption

- Die Messwerte liegen generell deutlich tiefer als die berechneten Werte.
- Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt im niedrigen Trogbereich und bei den Punkten, die dem Trog am nächsten liegen.
- Bei den am weitesten entfernten Punkten ist wieder der gleiche Effekt zu sehen wie beim Zustand ohne Absorption: Bei den oberen Punkten liegen die Messwerte tiefer als die berechneten und bei den unteren Punkten höher.

Schlussfolgerungen

Der Vergleich der Messungen mit den Berechnungen führt zu folgenden Schlüssen:

- Dass mit Berücksichtigung nur der 1. Reflexionsordnung die beste Übereinstimmung erreicht wurde, lässt darauf schliessen, dass die Werte des Direktschalls und/oder der 1. Reflexion bei der Berechnung überschätzt werden (da in der Realität selbstverständlich Reflexionen höherer Ordnung auftreten).
- Die Abweichungen im niedrigen Trogbereich sind wohl darauf zurückzuführen, dass die Reflexionen an den niedrigen Stützmauern mit dem Spiegelquellen-Verfahren überschätzt werden.
- Es wird vermutet, dass die Abweichungen in den Querschnitten – die höheren berechneten Werte bei den vorne liegenden Punkten und die unterschiedlichen Abweichungen bei den am weitesten entfernten Punkten je nach Höhenlage – auf das Spiegelquellen-Verfahren mit seinen exakt definierten Ausbreitungswegen zurückzuführen sind.

6 Alternative Berechnungsmethoden zum Spiegelquellenverfahren

Anhand von geeigneten alternativen Berechnungsansätzen sollen die aufgetretenen Differenzen erklärt und Hilfsmittel für eine realistischere Berechnung geschaffen werden. Diese Berechnungsmethoden sollen exemplarisch am Fallbeispiel Unterführung ausgetestet werden, um dann in einem weiteren Schritt auch in anderen komplexeren Systemen angewendet zu werden.

Um die Schwächen des exakten Spiegelquellen-Verfahrens auszugleichen, bieten sich zwei Modellansätze an:

- Berechnung der Immissionen unter Berücksichtigung der Fresnelzonen
- Berechnung der Reflexionen über eine Flächenquelle mit Richtcharakteristik

6.1 Berechnung mit Fresnelzonen

Die rechnerische Modellierung der Reflexionen an den glatten seitlichen Begrenzungsflächen des Einschnitts kann in erster Näherung mit dem Spiegelquellenansatz erfolgen. Eine bedeutende Schwierigkeit entsteht allerdings durch die relativ kleinen Abmessungen in vertikaler Richtung. Dies führt dazu, dass der geometrisch konstruierte Reflexionspunkt oftmals nicht auf der reflektierenden Fläche liegt. Üblicherweise wird in diesem Fall der Beitrag der Reflexion ignoriert. Rund um die obere Wandkante des Einschnitts entsteht eine Unstetigkeit, indem ein Reflexionspunkt knapp darunter eine zählbare Reflexion erbringt, während ein Reflexionspunkt knapp darüber keinen Reflexionsbeitrag liefert. In der Norm ISO9613-2 wird die „Reflexion Ein/Aus“ Bedingung etwas anders formuliert, indem das Vorhandensein einer frequenzabhängigen Mindestfläche geprüft wird.

Die wesentlichen Schwierigkeiten des Spiegelquellenverfahrens bei endlichen Reflektorflächen lassen sich durch Einführung einer Fresnelzonenbetrachtung ausräumen. Durch Konstruktion einer Fresnelzone lässt sich jener Bereich in der Reflektorebene ermitteln, der wesentlich zur Reflexion beiträgt. Die Grösse dieses Bereichs ist frequenzabhängig in dem Sinne, dass tiefe Frequenzen grössere Flächen ergeben. Durch Ermittlung des durch den Reflektor tatsächlich abgedeckten Flächenanteils an der Fresnelzone kann schliesslich eine Gewichtung des Spiegelquellenbeitrags abgeleitet werden.

6.2 Berechnung der Reflexionen über Flächenquellen

Mit einem quasi raumakustischen Ansatz wurden die Reflexionen über Flächenquellen berechnet. Dafür wurde die Stützmauer in Teilflächen von 5 x 1 m aufgeteilt und für jedes dieser Teilstücke die von der Quelle einfallende Energie summiert. Für die Abstrahlung wurden verschiedene Richtcharakteristiken gewählt: Gleichmässig, sinusförmig und sinusquadratförmig. Es zeigte sich aber, dass die Richtcharakteristik einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Resultate hat. Die Berechnungen und Vergleiche beschränken sich deshalb auf eine cosinusförmige Richtcharakteristik.

6.3 Vergleich der Modellresultate

In den folgenden Darstellungen sind die Differenzen zwischen den Messresultaten und den Berechnungsergebnissen von 3 Berechnungsmodellen mit verschiedenen Ansätzen ersichtlich:

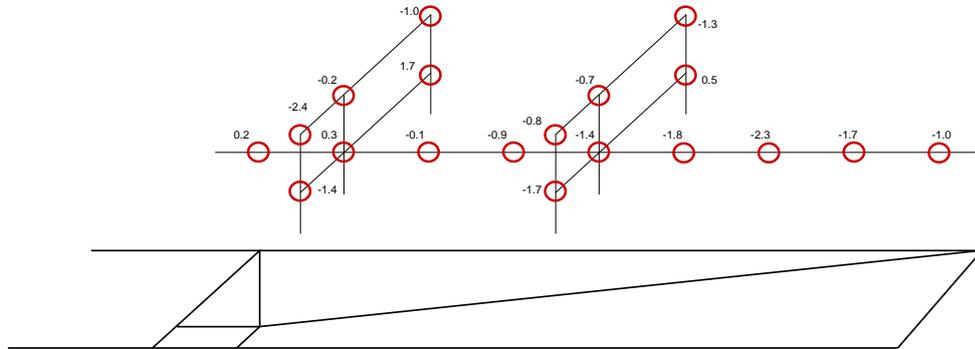


Abbildung 6.3.1: Abweichungen Modellmessungen von Berechnungen mit einem Spiegelquellen-Modell (berechnet mit CadnaA, 1. Reflexionsgrad berücksichtigt)

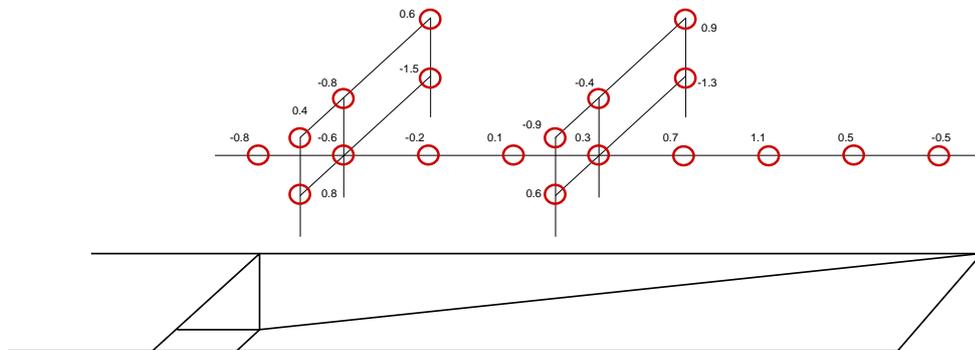


Abbildung 6.3.2: Abweichungen Modellmessungen von den Berechnungen mit Fresnelzonen (vgl. Anhang 5)

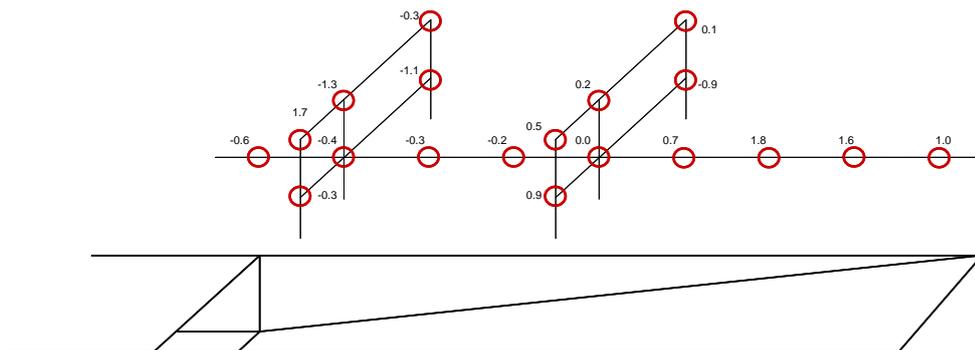


Abbildung 6.3.3: Abweichungen der Modellmessungen von den Berechnungen mit Flächenquellen (vgl. Anhang 6)

Der Vergleich der Resultate ergibt:

- Die alternativen Modellansätze "Fresnelzonen" und "Flächenquellen" liegen näher bei den Messresultaten als die CadnaA-Berechnung mit der Spiegelquellen-Methode.
- Bei beiden Modellansätzen liegt die mittlere Abweichung bei 0.7 dB gegenüber 1.1 dB mit der Spiegelquellen-Methode
- Die Berechnung mit Flächenquellen ergibt im tiefen Trogbereich die besten Resultate und ist im oberen Rampenbereich eher schlechter.
- Das Modell mit den Fresnelzonen liefert bei den vorderen und höher gelegenen Punkten die besten Resultate.

Schlussfolgerungen

- Sowohl der Ansatz mit den Fresnelzonen wie auch der Ansatz mit den Flächenquellen liefern gute Resultate, die näher bei den Modellmessungen liegen, als die Berechnungen mit CadnaA.
- Die Stärke der Berechnung mit Fresnelzonen liegt vor allem bei Reflexionen an begrenzten Flächen, die Stärke der Berechnung mit Flächenquellen im Bereich von Mehrfachreflexionen.
- Damit stehen uns für die Beurteilung von Reflexionen bei komplexen Bauwerken neben dem reinen Spiegelquellen-Verfahren zwei weitere Modelle für die Berechnung der Immissionen zur Verfügung.

6.4 Anwendungsbereich und Grenzen der Flächenquellen

Das Modell mit den Flächenquellen hat beim Beispiel der Unterführung eine gute Übereinstimmung mit den Messresultaten gezeigt. Die Empfangspunkte lagen bei diesem Beispiel im Nahbereich. Durch die Abmessungen der Unterführung und die Nähe der Empfangspunkte war praktisch eine "raumakustische Situation" gegeben.

Etwas anders stellt sich die Situation bei kleineren reflektierenden Flächen und grösseren Distanzen dar. Während bei Reflexionen mit dem Spiegelquellenverfahren die gesamte Energie gebündelt in einem begrenzten Empfangsbereich auftrifft, streuen Flächenquellen, auch unter Berücksichtigung der cosinusförmigen Abstrahlungscharakteristik, sehr stark.

Eine Beispielsrechnung in einem Querschnitt mit einem Reflektor von 4 m in einer Höhe von 5 m, 10 m, 20 m und 40 m über Boden zeigt, dass direkt unter dem Reflektor die Immissionen bei Annahme einer Flächenquelle bei 5 m Höhe des Reflektors ca. 9 und bei 40 m ca. 17 dB unter dem Wert liegen, der sich bei einer Spiegelquelle ergeben würde. Vergleicht man die Differenzen in den verschiedenen Abständen, ergibt sich bei der Verdopplung der Distanz eine Zunahme um ca. 3 dB (vgl. Anhang 9).

Berücksichtigt man die Fresnelzonen, ergeben sich bereits leicht seitlich, ca. 8 – 12 m vom Reflektor weg, aber recht gute Übereinstimmungen zwischen dem Ansatz der Spiegelquelle und dem Ansatz mit Flächenquelle. In grösserer Entfernung fallen Immissionen nach dem Spiegelquellenansatz vollständig weg, während die Flächenquellenmethode immer noch Immissionen ergibt.

7 Ausweitung auf unterschiedliche Bauwerksformen

In einem 1. Schritt ist mit Messungen an einem Massstabsmodell einer Unterführung ein konkretes Beispiel 3-dimensional gemessen und berechnet worden. Für die Ausweitung auf andere Bauformen wird die Untersuchung aus praktischen Gründen auf zwei Dimensionen reduziert: Damit kann die Immissionssituation realitätsnah mit einem auf der Wellentheorie basierenden Modell berechnet und mit anderen Berechnungsmethoden verglichen werden. 3-dimensionale auf der Wellentheorie basierende Modelle stehen noch nicht zur Verfügung.

7.1 Typische Querschnitte

Es wurden für insgesamt 8 Typen von Querschnitten Berechnungen durchgeführt: 4 teilweise offene Galeriequerschnitte, 1 Brückenquerschnitt (Brücke über der Strasse) 2 Trogquerschnitte und 1 offener Querschnitt.

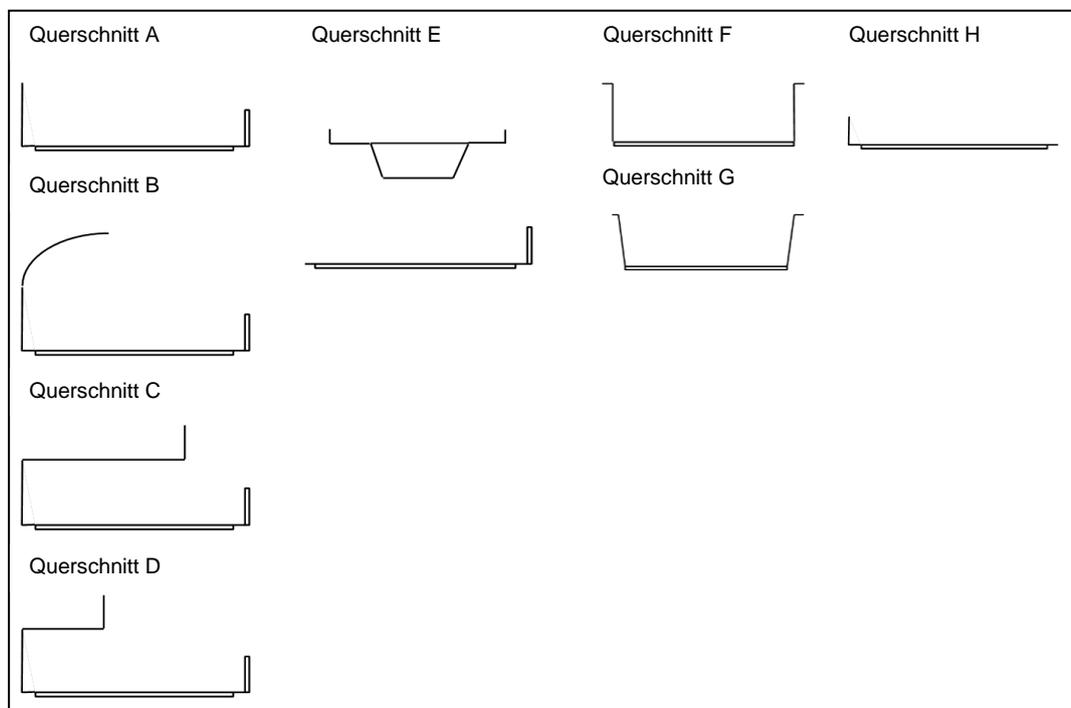


Abbildung 7.1.1: zusätzlich untersuchte Querschnittsformen

7.2 Berechnungspunkte

Berechnet wurden die Immissionen für 3 Punkte in 37.5 m Abstand zur Lärmquelle, in 2, 5 und 8 m über Boden.

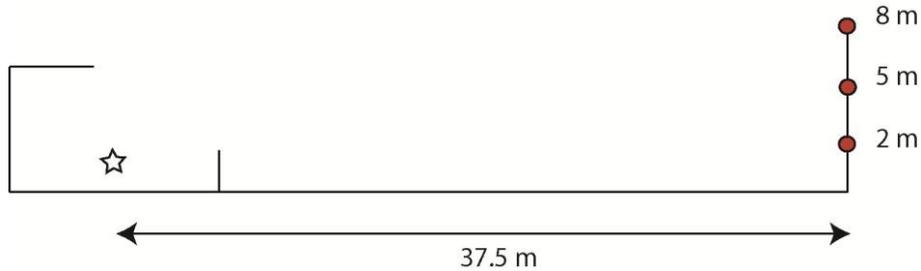


Abbildung 7.2.1: Lage der Berechnungspunkte für zusätzliche Querschnittsformen

7.3 Resultate

Die Basis-Berechnung erfolgte mit einem wellentheoretischen Modell. Daneben wurden die Berechnungen mit dem Spiegelquellenansatz mit Reflexionen der 1. und der 3. Ordnung sowie mit dem Ansatz der Flächenquellen vorgenommen.

Beim Flächenquellenansatz wurde für die Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen ein erhöhter Emissionswert angenommen. Diese Zunahme wurde auf 3 - 6 dB geschätzt.

Damit ergeben sich im Vergleich zu den Berechnungen mit dem wellentheoretischen Modell die folgenden Abweichungen:

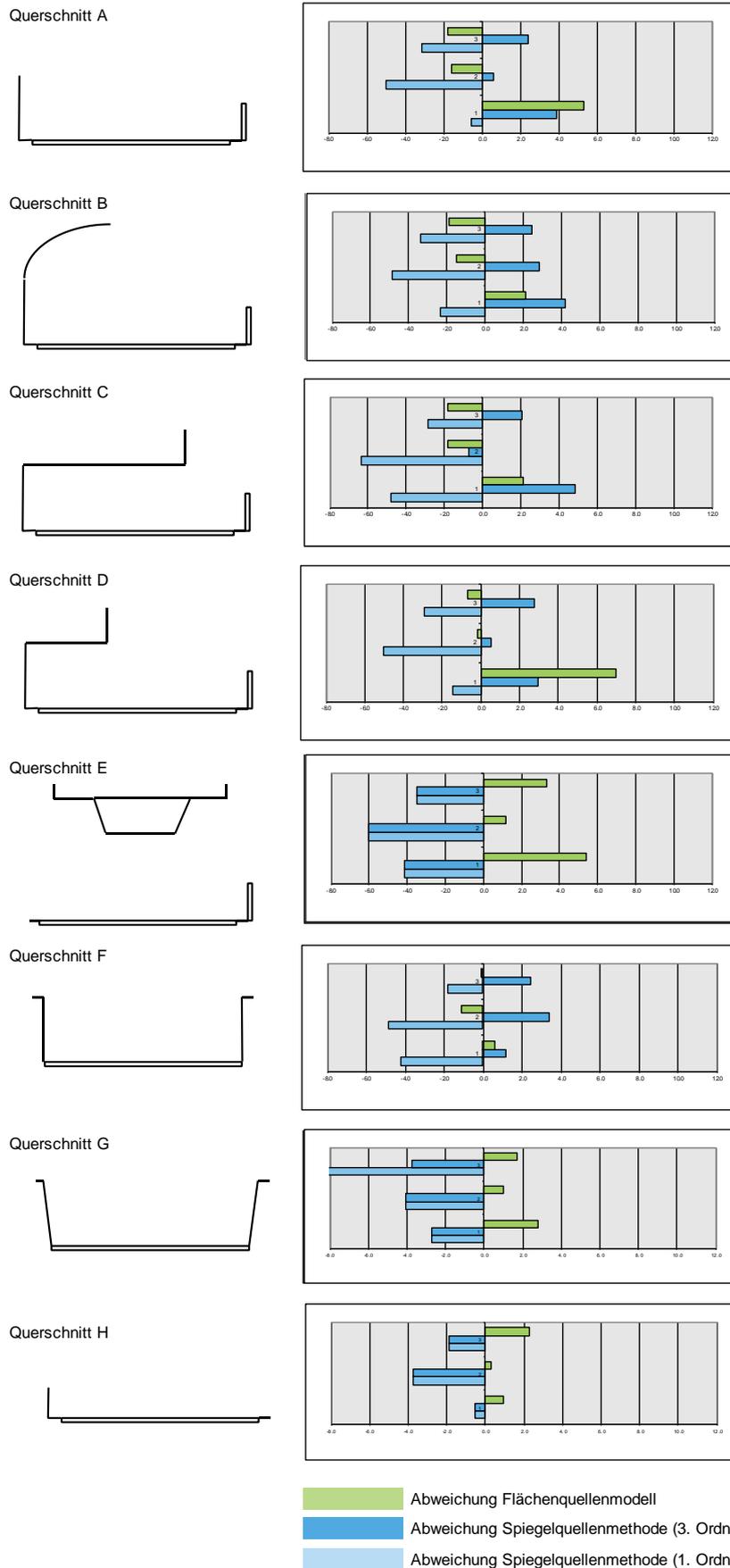


Abbildung 7.3.1: zusätzliche Querschnittsformen – Abweichungen zu wellentheoretischen Modell

7.4 Beurteilung der Resultate

7.4.1 Galeriequerschnitte

Spiegelquellen-Methode 1. Ordnung

Bei Berechnung nach dem Spiegelquellenverfahren werden die Immissionen deutlich unterschätzt. Interessanterweise ist die Höhenverteilung bei allen 4 Querschnitten ähnlich:

- In der Mitte werden die Immissionen immer am deutlichsten unterschätzt (5 – 6 dB).
- Beim oberen Empfangspunkt werden die Immissionen bei allen 4 Querschnitten konstant um ca. 3 dB unterschätzt.
- Am untersten Empfangspunkt in 2 m Höhe über Boden variieren die Immissionen je nach Querschnitt relativ stark.

Spiegelquellen-Methode bis zur 3. Ordnung

Bei der Berechnung nach der Spiegelquellenmethode mit Berücksichtigung der Reflexionen bis zur 3. Ordnung werden die Immissionen tendenziell überschätzt:

- Im obersten Empfangspunkt konstant über alle Querschnitte um 2 – 3 dB, im untersten Empfangspunkt auf 2 m Höhe um 3 – 5 dB
- Beim mittleren Empfangspunkt liegen die Immissionen mit Ausnahme von Querschnitt B nahe dem mit dem wellentheoretischen Modell berechneten Wert.

Flächenquellen-Modell

Beim Flächenmodell liegen die Werte in den beiden oberen Empfangspunkten tendenziell leicht unter den mit dem wellentheoretischen Modell berechneten Werten, beim untersten Empfangspunkt hingegen deutlich darüber.

- Bei den oberen beiden Empfangspunkten werden die Immissionen um 0 bis maximal 2 dB unterschätzt.
- Beim untersten Empfangspunkt werden die Immissionen um 2- 7 dB unterschätzt.

Fazit

Keines der angewendeten Modelle liefert zuverlässige Resultate. Bei der Spiegelquellen-Methode 1. und 3. Ordnung spielen Zufälligkeiten der geometrischen Ausbreitung eine wichtige Rolle. Es erstaunt deshalb auch nicht, dass bei Berücksichtigung nur der 1. Reflexion die Immissionen massiv unterschätzt werden.

Die zuverlässigsten Resultate für die beiden oberen Empfangspunkte liefert das Flächenmodell. Hingegen werden die Immissionen hier beim untersten Empfangspunkt in 2 m Höhe über Boden stark überschätzt. Dies ist möglicherweise auf eine zu tiefe Berücksichtigung der Hinderniswirkung in der Berechnung zurückzuführen.

7.4.2 Brückenquerschnitt

Spiegelquellen-Methode 1. und 3. Ordnung

Das Spiegelquellen-Verfahren versagt in der vorliegenden Situation. Da aus geometrischen Gründen auch bei Berücksichtigung der 3. Reflexionsordnung noch keine Reflexionen die Empfangspunkte erreichen, wird in beiden Fällen die Immission nur aus dem (gebeugten) Direktschall berechnet und liegt entsprechend zu tief. Diese Unterschätzung würde noch deutlicher ausfallen, wenn die Lärmschutzwand seitlich der Strasse höher wäre und den Direktschall noch stärker abschirmen würde.

Flächenquellen-Modell

Beim Flächenmodell werden die Immissionswerte überschätzt. Dies könnte daran liegen, dass bei den relativ kleinen Flächenquellen keine Reduktion der Emissionen eingerechnet

net ist, wie sie sich aus der Berücksichtigung von Fresnelzonen ergeben müssten.

Fazit

Keiner der 3 Berechnungsansätze mag in der vorliegenden Form vollständig befriedigen. Beim Spiegelquellen-Verfahren können die Immissionen massiv unterschätzt werden, da mit der Berechnung nach Spiegelquellenmethode effektiv keine Reflexionen bei den Empfangspunkten auftreten würden. Mit dem Flächenquellenmodell hingegen erreichen die Reflexionen die Empfangspunkte, mit den vorliegenden Modellparametern werden die Reflexionen aber überschätzt.

7.4.3 Trogquerschnitte

Spiegelquellen-Methode 1. Ordnung

Bei der Spiegelquellen-Methode 1. Ordnung werden die Immissionen bei beiden Querschnitten und in allen 3 Höhen deutlich unterschätzt, beim obersten Empfangspunkt gar um 8 dB.

Spiegelquellen-Methode bis zur 3. Ordnung

Hier sind die Unterschiede zwischen den beiden Varianten, die sich geometrisch nur wenig unterscheiden, gross. Während sich bei den senkrechten Wänden die Immissionen praktisch fokussieren, werden sie bei leicht geneigten Wänden (vermeintlich) vollständig nach oben abgestrahlt. Daraus ergibt sich mit dieser Methode eine deutliche Überschätzung der Immissionen bei senkrechten und eine ebenso deutliche Unterschätzung der Reflexionen bei geneigten Wänden.

Flächenquellen-Modell

Mit dem Modell der Flächenquelle lassen sich die Immissionen bei senkrechten Wänden sehr gut voraussagen, bei schrägen Wänden werden sie leicht überschätzt.

Fazit

Die Berechnungen in den beiden Trogquerschnitten zeigen, dass die Spiegelquellenmethode bei parallelen oder leicht geneigten Wänden zu groben Abweichungen führen kann. Diese Abweichungen resultieren aus den exakt geometrischen Ausbreitungsbedingungen, die in einzelnen Fällen zu Fokussierungen oder eben auch zu Schallschatten führen können.

Die Methode mit den Flächenquellen hingegen liefert relativ zuverlässige Resultate bei beiden Varianten. Die Schrägstellung der Wände hat bei diesem Berechnungsverfahren nur einen geringen Einfluss.

7.4.4 Offener Querschnitt

Spiegelquellenmethode 1. und 3. Ordnung

Die Resultate sind die Gleichen, da nur Reflexionen 1. Ordnung auftreten.

Beim Empfangspunkt auf 2 m Höhe stimmen die Resultate gut mit jenen der wellentheoretischen Berechnung überein, auf 5 m und 8 m Höhe hingegen werden die Immissionen deutlich überschätzt.

Flächenquellen-Modell

Mit der Berechnung mit Flächenquellen sind bei den unteren beiden Empfangspunkten die Resultate sehr nahe bei denen mit dem wellentheoretischen Ansatz. Beim obersten Punkt werden die Immissionen überschätzt.

Fazit

Dieses einfache Beispiel zeigt sehr gut die Stärken und die Schwächen der Modellansätze auf:

- Bei den oberen beiden Empfangspunkten entfallen wegen der Geometrie der Ausbreitung beim Spiegelquellenmodell die Reflexionen, obwohl tatsächlich Reflexionen vorhanden sind (was sich auch aus dem Fresnel-Prinzip ableiten liesse).
- Die Überschätzung beim obersten Punkt durch die Flächenquelle ist in erster Linie auf die Berücksichtigung der Strasse als Reflexionsquelle zurückzuführen.

7.5 Erkenntnisse aus den Berechnungen in den Querschnitten

Mit keinem der benutzten Verfahren lässt sich die Immissionsbelastung annähernd genau vorhersagen.

Nicht ganz überraschend weist das Spiegelquellen-Verfahren bei komplexen Situationen erhebliche Mängel auf:

- Berechnungen mit der Spiegelquellen-Methode 1. und 3. Ordnung weisen durch die exakt geometrische Ausbreitung viele Zufälligkeiten auf.
- Bei den Galeriequerschnitten liegen die richtigen Werte gemäss wellentheoretischem Modell meist etwa in der Mitte zwischen Berechnung der Reflexionen bis zur 1. und bis zur 3. Ordnung. Eine Regel lässt sich aber daraus nicht ableiten.
- Dass die Berechnung mit der Spiegelquellen-Methode 1. Ordnung auch in relativ einfachen Querschnitten, wie QS A, F und G versagt und mit 8 dB sogar die höchste Abweichung ergibt, erstaunt.
- Die Spiegelquellen-Methode reagiert sehr sensitiv auf parallele resp. leicht geneigte Trogsituationen und kann bei entsprechenden Berechnungen zu grob falschen Resultaten führen.

Auch das Flächenmodell weist Schwächen auf:

- Die Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen durch einen Zuschlag zum Emissionswert ist noch wenig fundiert.
- Die Immissionen bei den untersten Punkten werden bei der Mehrzahl der Querschnitte, in Einzelfällen sogar deutlich, überschätzt. Bei den oberen Empfangspunkten ergibt sich aber eine gute Übereinstimmung und die Abweichung liegt in der Regel unter 2 dB.
- Beim Brückenquerschnitt liefert der Flächenansatz zu hohe Immissionen. Hier müsste noch eine Differenzierung des Modellansatzes erfolgen.

Die genaueste Berechnung liefert das wellentheoretische Modell, da damit die physikalische Situation korrekt abgebildet wird.

Wird in einem ersten Schritt auf eine wellentheoretische Berechnung verzichtet, kann jedoch mit den 3 Methoden (Spiegelquellen 1. und 3. Ordnung sowie Flächenquellen) eine Abschätzung des Bereichs vorgenommen werden, in dem der zu erwartende Immissionspegel liegt. Aus der obenstehenden Abbildung ist klar ersichtlich, dass bei allen Querschnitten und auf allen Empfangshöhen der Wert der Berechnung mit dem wellentheoretischen Modell zwischen den Ergebnissen der anderen 3 Berechnungsmethoden liegt. Die Breite dieses Bereichs mag dabei die Unsicherheit bei der Berechnung wiedergeben.

8 Reflexionsmodell auf Basis des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Reflexionen beruht auf dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral. Diese Berechnungsmethode basiert auf der Wellentheorie und ist eine auch im 3-dimensionalen Raum ausführbare Rechenmethode. Sie ist heute das genaueste Berechnungsmodell.

Die Grundlagen für diese Berechnungsmethode sind im Anhang 8 beigefügt.

9 Einsatz von Berechnungs- resp. Massstabsmodellen

9.1 Übersicht über die Modelle

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die bei einfachen Situationen verwendeten Berechnungsmodelle, die auf der Spiegelquellenmethode basieren, in komplexeren Situationen oft versagen. Dies kann bereits bei häufig vorkommenden einfachen Situationen, wie Trogkonstruktionen oder beidseitigen Lärmschutzwänden der Fall sein.

Auf der anderen Seite stehen verschieden genaue, aber auch unterschiedlich aufwendige Verfahren zur Bestimmung der Immissionen zur Verfügung. Sie können folgendermassen aufgelistet werden:

- Einfache Hand- resp. Tabellenrechnung auf Basis STL-86+ im Querschnitt
- 3-dimensionale Berechnung auf Basis eines Geländemodells mit Reflexionen 1. Ordnung (STL-86+)
- 3-dimensionale Berechnung auf Basis eines Geländemodells mit Berücksichtigung Reflexionen höherer Ordnung
- Flächenquellen 2-dimensional und 3-dimensional
- Wellentheoretische Berechnung in der 2-dimensionalen Ebene
- Reflexionsberechnungen auf Basis der Kirchhoff-Helmholtz-Gleichung
- Messungen im Massstabsmodell

9.2 Kriterien zum Einsatz der Modelle

Grundsätzlich gibt es 3 Kriterien, die den Einsatz des passenden Modelles bestimmen:

- **Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel**
Je kleiner der Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel ist, desto weniger genau müssen diese ermittelt werden. Dies trifft vor allem dann zu, wenn ohnehin der Direkt-schall dominierend ist oder keine wesentlichen Reflexionen erwartet werden.
- **Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen**
Die Berechnungen in den Querschnitten haben gezeigt, dass sich mit den einfacheren Modellen auf Spiegelquellenbasis und Flächenquellenbasis der Bereich abschätzen lässt, in dem die Reflexionen mit grosser Sicherheit liegen. Je grösser dieser Bereich, je grösser die Unsicherheit und der Bedarf nach einer zuverlässigeren Berechnung oder Messung. Dabei spielt auch eine Rolle, ob mit dem Unsicherheitsbereich Belastungsgrenzwerte je nachdem über- oder unterschritten werden.
- **Absoluter Wert der Immissionen**
Der absolute Wert der Immissionen liefert ein weiteres Indiz zum Einsatz der Modelle. Es ist in der Regel für die Beurteilung nicht so zentral, wie die beiden ersten Kriterien, da nach dem Vorsorgeprinzip grundsätzlich unabhängig von den Belastungsgrenzwerten der Lärm zu reduzieren ist, wo störende Immissionen auftreten. Im Einzelfall kann aber auch dieses Kriterium wichtig sein, etwa bei Immissionen im Bereich der Belastungsgrenzwerte oder bei sehr tiefen Immissionen.

9.3 Einsatzbereiche

Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel \ Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen	klein	mittel	gross
klein	STL-86+ genügend		STL-86+ mit ergänzenden Überlegungen zur Eingrenzung der Unsicherheit ev.
mittel		Situation genauer prüfen - Aufteilung Quellen - Mehrfachreflexionen - Flächenquellen - Fresnelzonen ev.	
gross			Einsatz komplexer Rechenmodelle (Kirchhof-Helmholz) oder Massstabsmodelle prüfen

Abbildung 9.3.1: Einsatzbereich der Modelle

Die obenstehende Figur zeigt den Einsatz der Modelle in Abhängigkeit der 3 Kriterien auf. Generell kann herausgelesen werden:

- Ist die Unsicherheit beim Abschätzen der Reflexionen klein, ist STL-86+ genügend.
- Ist der Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel klein, ist STL-86+ genügend.

Liegen jedoch die Einstufungen für beide Kriterien im mittleren oder im oberen Bereich der Skala, sind vertiefte Abklärungen erforderlich.

Die Einstufungen können wie folgt festgelegt werden:

Unsicherheit beim Abschätzen der Reflexionen

In einfachen Situationen ohne erkennbaren Einfluss von Mehrfachreflexionen ist die Unsicherheit in der Regel gering. Bei komplexeren Situation empfiehlt sich, die Reflexionen auf verschiedene Arten zu ermitteln, z.B. mittels Spiegelquellen-Verfahren (möglichst 1. und 3. Ordnung der Reflexionen) und mittels Flächenquellen (im Querschnitt). Je nach Differenzen zwischen den Berechnungen wird die Unsicherheit wie folgt eingestuft:

Klein	bis 3 dB
Mittel	3 – 6 dB
Gross	grösser 6 dB

Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel

Die Einstufung des Einflusses der Reflexionen auf den Gesamtpegel wird wie folgt vorgenommen:

Klein	Reflexionen mehr als 3 dB tiefer als Direktschall
Mittel	Reflexionen 0 – 3 dB tiefer als Direktschall
Gross	Reflexionen grösser als Direktschall

10 Anwendungsbeispiele

10.1 Beispiel 1: Lärmschutzwand auf gegenüberliegender Seite

Situation

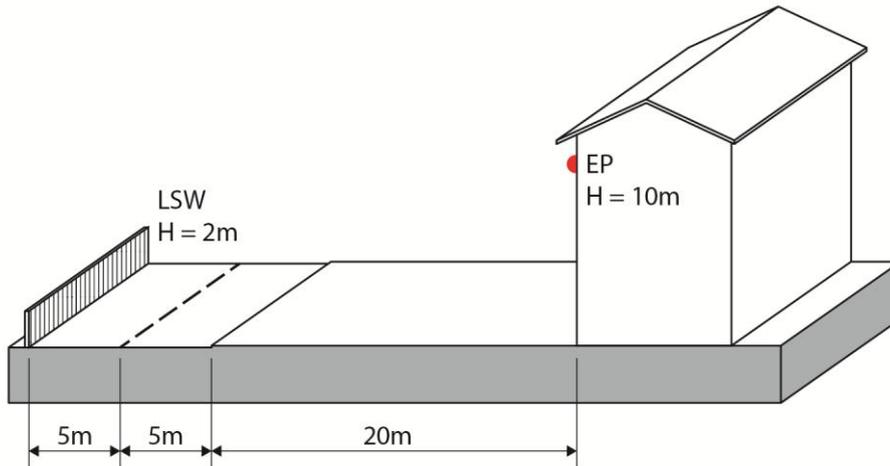


Abbildung 10.1.1: Situation Beispiel 1

- Emissionspegel $L_{e, 1m} = 75$ dBA (Tag), massgebender BGW: PW ES III = 60 dBA
- Querschnitt +/- konstant → Abschätzung Einfluss Reflexionen im Querschnitt möglich

Berechnungen

Tabelle 10.1.1: Berechnungsergebnisse Beispiel 1

Berechnung Spiegelquelle	L_i [dBA]
ohne Reflexionen	60.9
Reflexionen 1. Ordnung	60.9
Reflexionen bis 3. Ordnung	60.9
Berechnung Flächenquelle	
nur Direktschall	62.0
mit Flächenquellen	64.2
Differenz	
Spiegelqu.(3. Ord.) - Flächenqu.	3.3

Beurteilung

Unsicherheit in der Berechnung: mittel

Einfluss der Reflexionen: klein

Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen	klein	mittel	gross
Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel	klein	mittel	gross
klein	STL-86+ genügend	●	STL-86+ mit ergänzenden Überlegungen zur Eingrenzung der Unsicherheit ev.
mittel		Situation genauer prüfen - Aufteilung Quellen - Mehrfachreflexionen - Flächenquellen - Fresnelzonen ev.	↓
gross			Einsatz komplexer Rechenmodelle (Kirchhof-Helmholz) oder Massstabsmodelle prüfen

Abbildung 10.1.2: Beurteilung Anwendungsbereich Beispiel 1

Schlussfolgerung

- Weder die Unsicherheit in der Berechnung noch der Einfluss der Reflexionen ist gross.
- Würde der Empfangspunkt tiefer liegen, würde sich mit dem Spiegelquellenmodell ein Reflexionszuschlag von ca. 3 dB ergeben, ähnlich wie beim Flächenmodell.

Beispiel 1 – Berechnungen

Tabelle 10.1.2: Detaillierte Berechnung Beispiel 1
Schallpegelberechnung mit Flächenquellen
 Berechnungsformeln siehe Anhang 7

Emissionspegel $L_{e,1m}$		75											
Direktschall	$L_{e,DS}$	s	ds	$L_{i,OH}$	$s1$	dh	u	dL	$L_{i,DS}$	L_i			
	75	20	-13.0	62.0			0.000	0.0	62.0	62.0			
Teilflächen													
	φ	$L_{W,TF}$	$KMfr$	s	α	ds	$d\alpha$	$L_{i,TF,OH}$	$s1$	dh	u	dL	$L_{i,TF}$
1	25	74.4	3.0	31.0	15	-14.9	1.8	56.3			0.000	0.0	56.3
2	160	82.5	3.0	27.0	79	-14.3	-5.2	57.9			0.000	0.0	57.9
3		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
4		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
5		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
6		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
7		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
8		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
9		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
										Total Teilflächen	60.2		
												64.2	

Schallpegelberechnung mit dem Spiegelquellen-Verfahren
 Berechnung nach STL-86+

Emissionspegel $L_{e,1m}$ 75

Vergleichswerte Direktschall ohne Hindernis

	Distanz	Distanz	Immissionspegel
	[m]	[dB]	[dBA]
Direkt	20.0	-13.1	61.9

Vergleichswerte Direktschall mit Hindernis

	Distanz	Hindernis	Absorption an Reflexionsflächen	Schallpegelreduktion	Immissionspegel	Differenz zu Direktschall
	[m]	Abstand [m] Höhe [m] Umw [m]	1 2 3	Distanz Hindernis: Absorption [dB] [dB] [dB]	[dBA]	[dB]
Direkt	25.0			-14.1 0.0 0.0	60.9	
1. Reflexion				0.0 0.0 0.0	--	
2. Reflexion				0.0 0.0 0.0	--	
3. Reflexion				0.0 0.0 0.0	--	
Total				ohne Reflexionen	60.9	60.9
				Ref. 1. Ordnung		0.0
				Ref. 2. Ordnung		0.0
				Ref. 3. Ordnung		0.0

10.2 Beispiel 2: Stützmauer und Lärmschutzwand

Situation

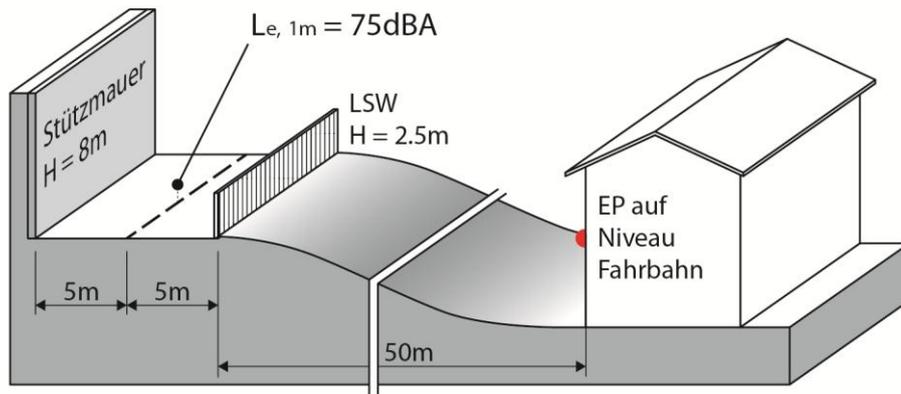


Abbildung 10.2.1: Situation Beispiel 2

- Emissionspegel $L_{e, 1m} = 75 \text{ dBA}$ (Tag), massgebender BGW: PW ES III = 60 dBA
- Querschnitt +/- konstant → Abschätzung Einfluss Reflexionen im Querschnitt möglich

Berechnungen

Tabelle 10.2.1: Berechnungsergebnisse Beispiel 2

Berechnung Spiegelquelle	L_i [dBA]
ohne Reflexionen	42.2
Reflexionen 1. Ordnung	45.7
Reflexionen bis 3. Ordnung	48.3
Berechnung Flächenquelle	
nur Direktschall	42.9
mit Flächenquellen	54.2
Differenz	
Spiegelqu.(3. Ord.) - Flächenqu.	5.9

Beurteilung

Unsicherheit in der Berechnung: mittel – gross

Einfluss der Reflexionen: gross

Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen auf den Gesamtpegel	Einfluss der Reflexionen		
	klein	mittel	gross
klein	STL-86+ genügend		STL-86+ mit ergänzenden Überlegungen zur Eingrenzung der Unsicherheit ev.
mittel		Situation genauer prüfen - Aufteilung Quellen - Mehrfachreflexionen - Flächenquellen - Fresnelzonen ev.	
gross			Einsatz komplexer Rechenmodelle (Archhof-Helmholz) oder Massstabsmodelle prüfen

Abbildung 10.2.2: Beurteilung Anwendungsbereich Beispiel 2

Schlussfolgerung

- Die Unsicherheit in der Berechnung und der Einfluss der Reflexionen ist mittelgross.
- Der hohe Anteil der Reflexionen am Gesamtpegel lässt vermuten, dass die Immissionen als stark störend wahrgenommen werden (Auswirkungen auf Spektrum).
- Der Gesamtpegel liegt deutlich unter dem PW. Dies ist beim Aufwand für detailliertere Berechnungen zu berücksichtigen.
-

Beispiel 2 – Berechnungen

Tabelle 10.2.2: Detaillierte Berechnung Beispiel 2

Schallpegelberechnung mit Flächenquellen

Berechnungsformeln siehe Anhang 7

Emissionspegel	$L_{e,1m}$	75											
Direktschall	$L_{e,DS}$	s	ds	$L_{i,OH}$	s1	dh	u	dL	$L_{i,DS}$	L_i			
	75	55	-17.4	57.6	5	1.7	0.310	14.7	42.9	42.9			
Teilflächen													
	φ	$L_{W,TF}$	KMfr	s	α	ds	$d\alpha$	$L_{i,TF,OH}$	s1	dh	u	dL	$L_{i,TF}$
1	21	73.7	3.0	60.0	5	-17.8	1.9	52.8	10.0	-1.2	-0.086	0.0	52.8
2	35	75.9	3.0	60.0	6	-17.8	1.9	55.0	10.0	0.6	0.022	8.1	46.9
3	155	82.3	3.0	55.0	90	-17.4	-160.2	0.0	5.0	2.5	0.653	17.6	-17.6
4		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
5		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
6		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
7		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
8		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
9		0.0				0.0	2.0	-6.0			0.000	0.0	0.0
										Total Teilflächen	53.8		
												54.2	

Schallpegelberechnung mit dem Spiegelquellen-Verfahren

Berechnung nach STL-86+

Emissionspegel	$L_{e,1m}$	75										
Vergleichswerte Direktschall ohne Hindernis												
	Distanz							Distanz	Immissions-			
	[m]							[dB]	pegel			
Direkt	55.0							-17.7	57.3			
Vergleichswerte Direktschall ohne Hindernis												
	Distanz	Hindernis			Absorption an Reflexionsflächen			Schallpegelreduktion			Immission Differenz	
	[m]	Abstand	Höhe	Umw	1	2	3	Distanz	Hindernis	Absorption	pegel	zu
	[m]	[m]	[m]	[m]				[dB]	[dB]	[dB]	[dBA]	Direktschall
Direkt	55.0	5.0	1.8	0.35				-17.7	-15.1		42.2	
1. Reflexion	65.0	10.0	1.9	0.21				-18.5	-13.4	0.0	43.1	
2. Reflexion	75.0	10.0	2.0	0.23				-19.1	-13.7	0.0	42.2	
3. Reflexion	85.0	10.0	2.0	0.22				-19.7	-13.6	0.0	41.7	
Total										ohne Reflexionen	42.2	42.2
										Ref. 1. Ordnung	45.7	45.7
										Ref. 2. Ordnung	47.3	47.3
										Ref. 3. Ordnung	48.3	48.3

10.3 Beispiel 3: Reflektion an Brückenuntersicht

Situation

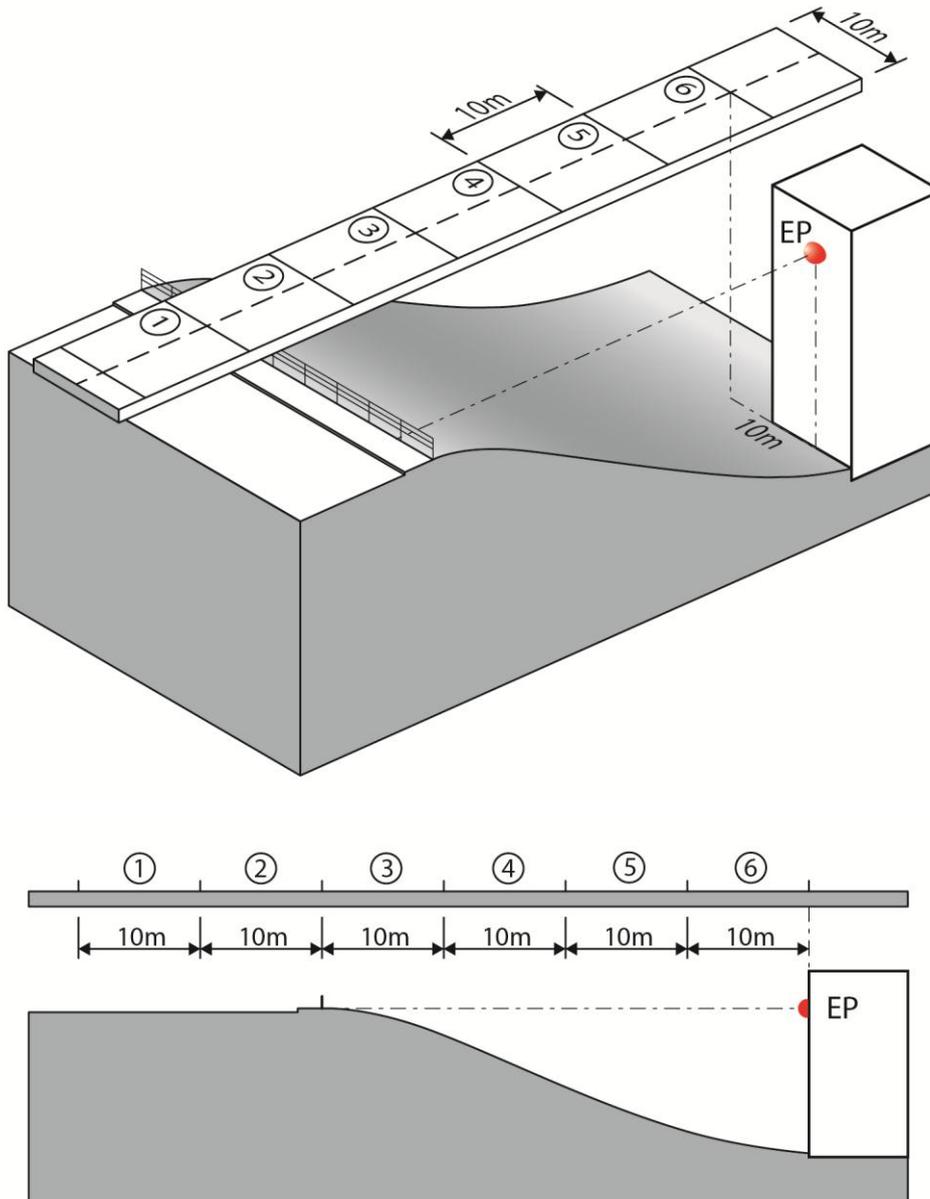


Abbildung 10.3.1: Situation Beispiel 3

- EP: Wohnhaus mit ES III; $L_{e,1m} = 75$ dBA (Tag) massgebender BGW: IGW ES III = 65 dBA

Die Schallabschirmung muss 3-dimensional gerechnet werden (Emissionspegel 75 dBA in 1 m Abstand)

- Spiegelquelle mit CadnaA (nur 1. Ordnung, höhere nicht möglich, ergäbe für vorliegende Situation auch keinen Sinn)
- Mit Flächenquellenmodell (erweitert für 3-dimensionale Anwendung)

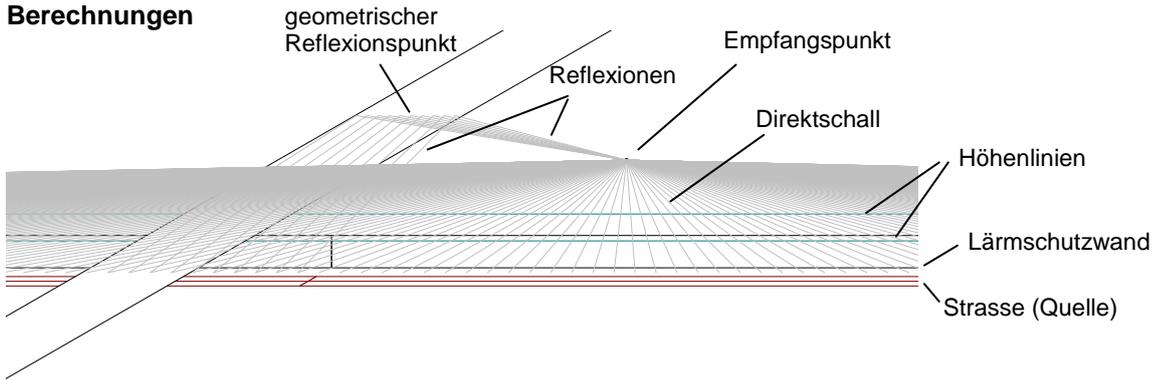


Abbildung 10.3.2: Darstellung CadnaA-Modell

Das Spiegelquellenmodell reflektiert die Emissionen des Abschnittes, bei dem der geometrische Reflexionspunkt auf die Unterseite der Brücke trifft.

Tabelle 10.3.1: Berechnungsergebnisse Beispiel 3

Berechnung Spiegelquelle	Li [dBA]
ohne Reflexionen	41.5
Reflexionen 1. Ordnung	36.9
Berechnung Flächenquelle	
nur Direktschall	41.5
mit Flächenquellen	40.8
Differenz	
Spiegelqu.(1. Ord.) - Flächenqu.	3.9

Beurteilung

Unsicherheit in der Berechnung: mittel

Einfluss der Reflexionen: mittel

Unsicherheitsbereich beim Abschätzen der Reflexionen Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel	klein	mittel	gross
	klein	STL-86+ genügend	STL-86+ mit ergänzenden Überlegungen zur Eingrenzung der Unsicherheit ev.
	mittel	Situation genauer prüfen - Aufteilung Quellen - Mehrfachreflexionen - Flächenreflexionen - Fresnelreflexionen ev.	Einsatz komplexer Rechenmodelle (Kirchhof-Helmholz) oder Massstabsmodelle prüfen
gross			

Abbildung 10.3.3: Beurteilung Anwendungsbereich Beispiel 3

Schlussfolgerung

- Es besteht eine mittlere Unsicherheit in der Berechnung und ein mittlerer Einfluss der Reflexionen auf den Gesamtpegel.
- Ob detailliertere Untersuchungen vorzunehmen sind, ist hier im Einzelfall zu entscheiden.

Beispiel 3 – Berechnungen

Tabelle 10.3.2: Detaillierte Berechnung Beispiel 3

Berechnung Immissionen Flächenquellen

	Segment						
	1	2	3	4	5	6	
Emission							
Li	64	65	64	62	60	59	
Fläche relativ	55	100	55	37	27	22	
Distanz Q - R	14	10	14	22	32	41	
LW TF	58.5	65.0	58.5	50.8	44.2	40.2	
Immission Direktschall							
Direktschall		75.0					Total
Distanzkorrektur	45	16.5					
Hinderniskorrektur		17.0					41.5
Immission							
Distanz Achse	55	45	35	25	15	5	
Winkel Achse	10.3	12.5	15.9	21.8	33.7	63.4	
Distanz Raum	55.9	46.1	36.4	26.9	18.0	11.2	
Winkel Raum	10.1	12.2	15.4	20.4	29.0	41.8	
Richtwinkel	79.9	77.8	74.6	69.6	61.0	48.2	
Richtmass	-5.6	-4.8	-3.8	-2.6	-1.2	0.2	
Distanz	56.8	47.2	37.7	28.7	20.6	15.0	
Immissionspegel	27.4	35.5	30.9	25.6	21.9	20.6	37.8
Zuschlag Mehrfachrefl.							3.0
							40.8

Bemerkungen

- Die Berechnung über die Flächenquellen im 3D-Raum ergäbe wegen der geringen räumlichen Ausdehnung und den grossen Distanzen bei Punktquellen sehr geringe Beiträge der Reflexionen an die Immissionen. Die Situation wird deshalb auf den 2-dimensionalen Bereich reduziert und die Quelle als Linienquelle interpretiert.
- Das Beispiel zeigt, dass Flächenquellen als Punktquellen bei geringen Flächen und grösseren Distanzen zu geringe Resultate ergeben.

Anhänge

I	Literaturauswertung	47
II	Modellabmessungen und –fotos	50
III	Messungen und Berechnungen für das Modell "Unterführung"	54
III.1	Ziel	54
III.2	Methodik.....	54
III.3	Messungen	58
III.4	Berechnungen.....	61
III.5	Vergleich Messungen-Berechnungen.....	64
III.6	Zusammenfassung	66
IV	Absorption von Teilflächen.....	68
IV.1	Zielsetzung	68
IV.2	Methodik.....	68
IV.3	Wirkung der absorbierenden Teilflächen	70
IV.4	Beurteilung	71
IV.5	Schlussfolgerungen	73
V	Berechnung mit Fresnelzonen	74
VI	Berechnungsmodell Flächenquellen	77
VII	Anleitung zur Bestimmung der Immissionen über Flächenquellen	82
VIII	Berechnungsmethode Kirchhoff-Helmholtz-Integral	84
IX	Vergleich Spiegelquelle mit Flächenquelle für kleinen Reflektor	85

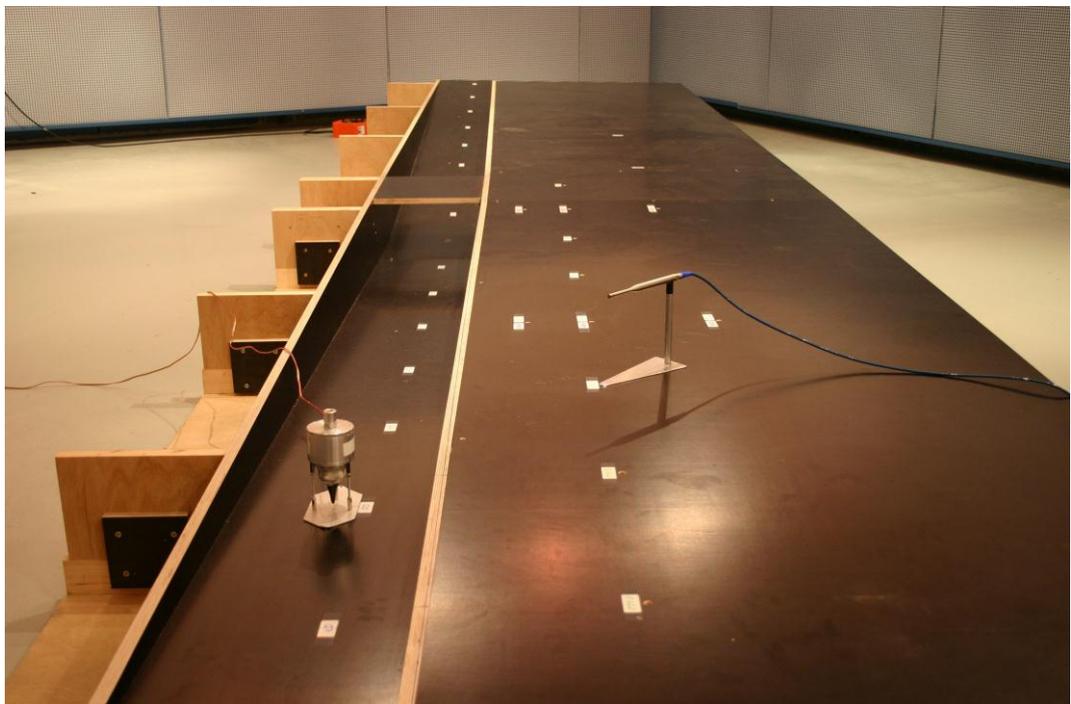
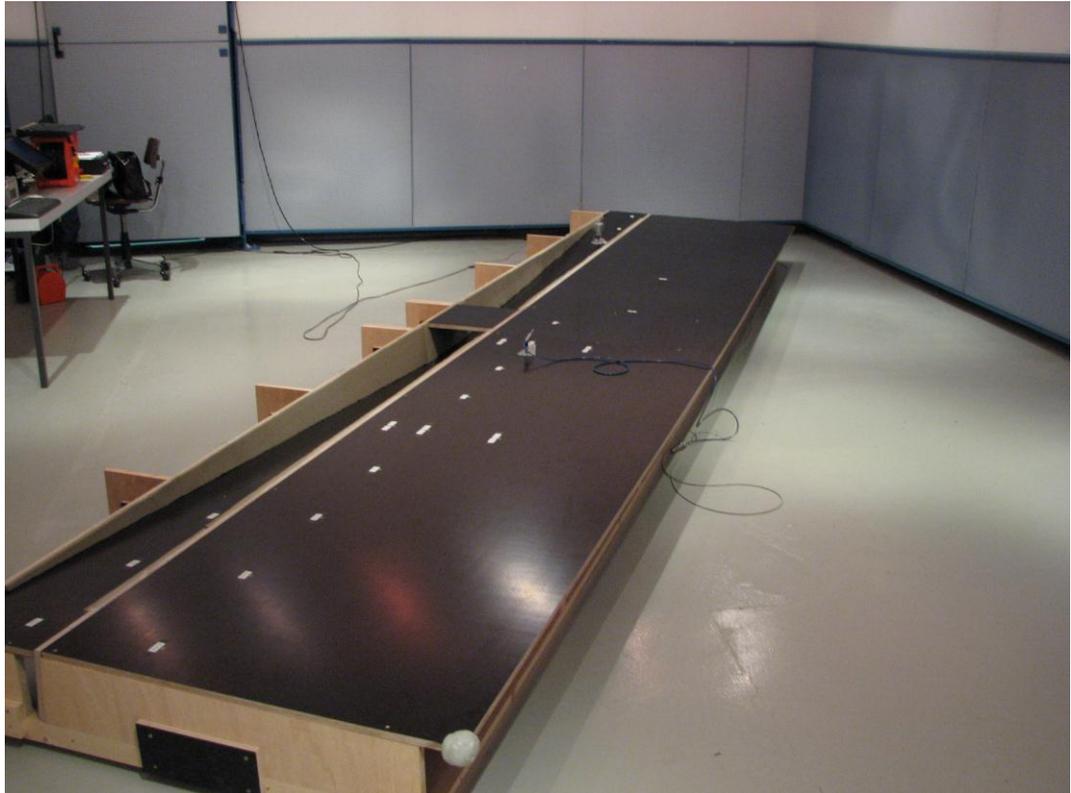
I Literaturoberwertung

Nr.	Autor	Jahr	Erschienen bei, Publiziert in	Titel	Seiten	Sichworte inhalt (ca. 3)	1. Wertung
	Tunnelportale Strasse						
1	EMPA, R. Hofmann, A. Rosenheck, Balzani & Schudel, H.J. Grolimund, U. Petermann	1983	EDI, Bundesamt für Strassenbau	Verfahren zur Berechnung der Lärmabstrahlung von Strassentunnel-Portalen	54	Berechnungsverfahren Tunnelärm, Pegelverlauf Einzelfahrzeuge, Wirksamkeit von absorbierenden Massnahmen	Berechnungsmethode für Reflexionen an Kunstbauten grundsätzlich auch interessant
2	Prof. Dr. Stenho, Prof. Dr. Viktor Stenho, Johann Ertl	1991	Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien	Lärmausbreitung an Tunnelportalen	122	Berechnungsverfahren Tunnelärm, Pegelverlauf Einzelfahrzeuge, Wirksamkeit von absorbierenden Massnahmen, verschiedene Tunnelquerschnitte	Gute Ergänzung zum Bericht EMPA, berücksichtigt zusätzlich verschiedene Querschnitte kein eigentliches Modell sondern Präsentation von sauber dokumentierten Messergebnissen, können als Testfälle verwendet werden
28	Schew-Ram Mehra	2003	DAGA			Untersuchung der Schallabstrahlung von Strassentunnelportalen anhand dreier Objekte	Ev. nützliche Messdaten zur Überprüfung von Modellannahmen
33	S.R. Mehra, M. Rosas	2003	Zeitschrift für Lärmbekämpfung	Schallabstrahlung von Tunnelportalen	7	Messungen an 3 Tunnelportalen in innerstädtischem Gebiet	Berechnungsmethode auch für Reflexionen an Kunstbauten interessant
3	Wolfgang Probst	2008	Zeitschrift für Lärmbekämpfung	Prognose des aus Tunnelmündungen abgestrahlten Schalls	9	Analytisches Berechnungsverfahren für Tunnelärm, Modellierung Tunnelöffnung als vertikale Flächenquelle	
6	Michael Chudalla	1983	DAGA	Die Geräuschmindernde Wirkung von Galerien, Untersuchungen an Modellgalerien	2	Massstabsmodellmessungen an Galeriebauten bei Strassen	interessant hinsichtlich der berichteten Messwerte
10	Eggenchwiler, Kurt, Heutschi, Kurt, Lüthi-Freuler, Nicole	2000	DAGA	Modellmessungen an einer Überdeckung und Teilüberdeckung einer Autobahn	2	Beschreibung von Massstabsmodellexperimenten an einer Galeriestituation	nur exemplarischen Charakter ohne Verallgemeinerung
34	Eggenchwiler, Kurt, Heutschi, Kurt, Lüthi-Freuler, Nicole	2001	tec21	Optimaler Lärmschutz dank akustischer Modellmessung	4	Beschreibung von Massstabsmodellexperimenten an einer Galeriestituation	nur exemplarischen Charakter ohne Verallgemeinerung
35	H. Tiefenthaler, E. Kammeringer, H. Kubasta	1990	Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift	Verkehrsschallpegel an einer Strassengalerie mit vorgelagertem Lärmschutzwall	5	Messung an einer Lärmschutzgalerie	Vor allem die Messdaten könnten von Interesse sein
	Allgemeine Modelle						
26	K. P. Lee and H. G. Davies	1975	J. Acoustical Society America	Nomogram for estimating noise propagation in urban areas	4	Grafik zum Abschätzen der Schallausbreitung in urbaner Umgebung	Nicht das eigentliche Modell bzw. der Algorithmus ist interessant sondern die kompakte Darstellung der Ergebnisse, evtl. als Anregung für unser Projekt
31	Judicaël Picaut, Isabelle Schimich, Jérôme Défrance, Philippe Woloszyn, Aline Barlet, Françoise Chartier	2006	Euronoise	EFFECTS OF DIFFUSE REFLECTION BY BUILDING FACADES ON THE SOUND PROPAGATION AND SOUNDSCAPES IN URBAN AREAS	6	Untersuchung zur Bedeutung von diffusen Reflexionen im urbanen Raum	möglicherweise interessant hinsichtlich der Modellierung diffuser Reflexionen

18. K. Heutschi Spezielle Situationen	Acta Acustica united with 2009/Actustica	Calculation of reflections in an urban environment	Numerisches Modell zur Berechnung von Reflexionen an allgemeinen Strukturen, Differenzierung von spiegelnden und diffusen Reflexionen, Validierung anhand von Massstabsmodellexperimenten	sehr rechenaufwändig, da keine Diskretisierung der reflektierenden Flächen notwendig ist
25. W.-D. KNOP	1979/ Applied Acoustics IPB Mitteilungen	ZUR ABSCHIRMUNG VON BAUELEMENTEN GEGENÜBER STRASSENVERKEHRS-LÄRM	Massstabsmodelluntersuchungen zu Wirkung einer Lärmschutzwand in 2 städtischem Gebiet	Fokus auf Abschirmung von Lärmschirmen, aber auch Bedeutung von Reflexionen hinsichtlich der Wirkungsminderung untersucht. Einzelfall, zu knapp dokumentiert
32. S.R. Mehra	2001/ Fraunhofer Institut	Lärmpegelerhöhung durch eine Lärmschutzwand		Verwendung von Spiegelquellen und radioactivity Methode, wiederum gezeigt, dass diffuse im Vergleich zu spiegelnden Reflexionen geringere Schalldruckpegel erzeugen, keine neue Algorithmen
24. Jian Kang	2005. J. Acoustical Society America	Numerical modeling of the sound fields in urban squares		sehr sorgfältige messtechnische Untersuchung, Geometrie wohl für unsere Fragestellung nicht relevant
19. Maarten Hornikx, Jens Forssén, Strassenschluchten, parallele Lärmschutzwände	Acta Acustica united with 2008/Actustica	A Scale Model Study of Parallel Urban Canyons	Massstabsmodellexperimente für das "Übersprechen" von einer Strassenschlucht 17 in eine benachbarte	
9. Huw G. Davies	1978. J. Acoustical Society America	Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets	Rechenmodell für Strassenschluchtsituationen basierend auf einem Spiegelquellenansatz und einer 5 Diffusfeldannahme	Theoretische Parameterstudie der wichtigsten Geometrieparameter
20. D.A. Hutchins, D. Pitcam	1983. J. Acoustical Society America	A laser study of multiple reflections within parallel noise barriers	Optische Untersuchung zum Strahlenverlauf 3 zwischen parallelen Lärmschirmen	konzeptuell interessant, keine Ergebnisse
4. William Bowdby, Louis F. Cohn	1986. J. Acoustical Society America	A model for insertion loss degradation for parallel highway noise barriers	Algorithmus zur Schallfeldberechnung zwischen zwei parallelen Lärmschutzwänden, Validierung anhand diverser dokumentierter 13 Messungen	untersuchte Geometrie kann evtl. eine unserer Prototypsituationen abdecken, interessant sind die aus anderen Studien zitierten Daten
11. V. Hartmann, W. Leschnik	1987/ DAGA	Einfluss einer quellennahen Bebauung auf die Schallausbreitung	Situation der strassenseitigen Bebauung, auch mit Lücken	Massstabsmodelluntersuchung, evtl. als Testfälle interessant
5. C. H. Chew	1995/ Applied Acoustics	The Influence of Inclined Buildings on Road Traffic Noise	Untersuchung zur Bedeutung der horizontalen Ausrichtung von strassennahen 18 Gebäuden auf die Reflexionen	eher grossmassstäblich interessant, für unseren Fokus eher weniger bedeutend
14. K. Heutschi	1995/ Applied Acoustics	A Simple Method to Evaluate the Increase of Traffic Noise Emission Level Due to Buildings for a Long Straight Street	Modell zur Berechnung des Schallfeldes in Strassenschluchten, ausgewertet als Tabellenwerk zur Anwendung für 16 verschiedene Geometrien	Modell nur für Empfangspunkte innerhalb der Schlucht anwendbar, auch Lücken berücksichtigbar
7. C. Cianfrini, M. Corcione & D. M. Fontana	1996/ Applied Acoustics	Theoretical Analysis of the Acoustical Behaviour of Roadside Barriers with Diffusive Internal Surfaces	Schallfelder in Situationen mit beidseitigen Lärmschirmen, Untersuchung der Bedeutung 16 allfälliger Diffusität	nur theoretische Untersuchungen, Parameterstudien ohne Vergleich mit echten Messungen

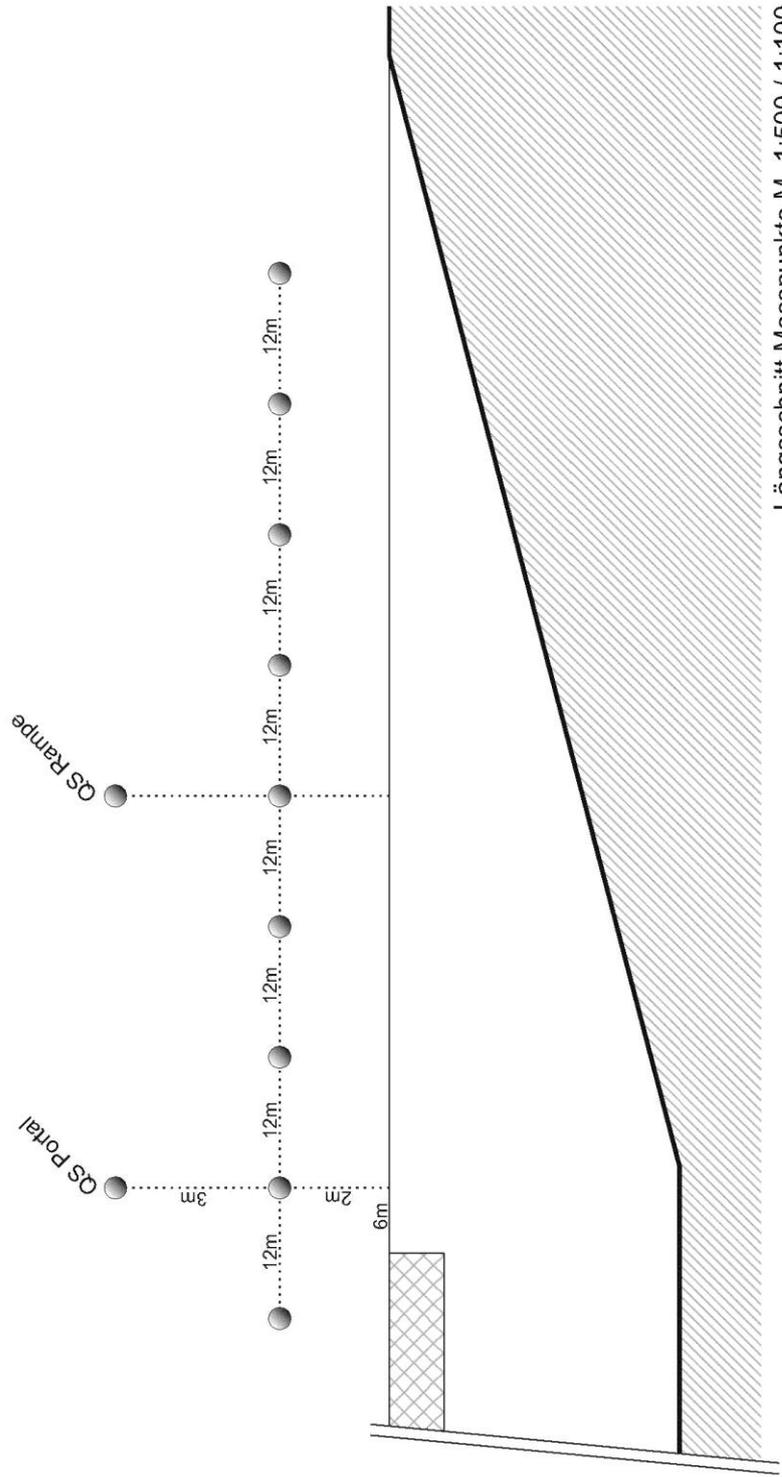
12	Chew Chye Heng	1996	Applied Acoustics	Sound Propagation in Housing Estates From a Passing Vehicle	Rechenmodell für Strassenschluchtsituationen basierend auf einem Spiegelquellenansatz höherer Ordnung und einer Diffusfeldkomponente	Rechenmodell einigermassen nahelegend, Messergebnisse vielleicht interessant
23	Jan Kang	2000	J. Acoustical Society America	Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries		Spiegelquellen und "radiosity" Methode für diffuse Reflexionen, sehr sorgfältig, insbesondere radiosity Methode ist interessant, bedeutende Pegelunterschiede durch Reflexionstyp nachgewiesen
22	R. Janczur, E. Walerian, M. Czechowicz	2001	Applied Acoustics	Sound levels forecasting for city-centers Part III: a road lane structure influence on sound level within urban canyon	Studie zum Schallfeld in einer Strassenschlucht	Untersuchung zur Bedeutung der Strassengeometrie und Fahrspuranlage, etwa spezielle Geometrie, einfaches geometrisches Modell, Vergleich mit realen Messungen
13	Lloyd A. Herman, Craig M. Clum	2002	J. Acoustical Society America	Analysis of noise barrier overlap gaps	Berechnung der Reflexionen zwischen parallel stehenden, leicht distanzerten Lärmschutzwänden	
29	K. K. lu and K. M. Li	2002	J. Acoustical Society America	The propagation of sound in narrow street canyons	Model zur kohärenten Überlagerung der Beiträge verschiedener Schallausbreitungspfade in einer engen Strassenschlucht	
15	Kurt Heutschi	2003	Acta Acustica united with Acustica	Parameter Study of the Insertion Loss Reduction in Case of a Building Facade Parallel to a Noise Barrier	Parameterstudie zu den Reflexionen zwischen Fassade und Rückseite einer Lärmschutzwand, zu Grunde liegende Berechnungen mit einem wellentheoretischen Ansatz	zu aufwändiges Modell für unsere Fragestellung
27	Thierry Le Polles, Judicael Picaut, Michel Berengier	2004	J. Acoustical Society America	Sound field modeling in a street canyon with partially diffusely reflecting boundaries by the transport theory	Schallfeldberechnungen in Strassenschluchten unter der Annahme diffuser Reflexionen	etwas spezielle Geometrie Theoretisch interessantes Modell, Präsentation von Messungen einer echten Strassenschlucht
21	M.R. Ismail, D.J. Oldham	2005	Applied Acoustics	A scale model investigation of sound reflection from building facades	Untersuchungen zur Bedeutung von diffusen Reflexionen an Hausfassaden	interessante Erkenntnisse zur Grösse und Wichtigkeit eines Streukoeffizienten bei der Berechnung von Reflexionen
8	Claudio Cianfrini, Massimo Corcione *, Lucia Fontana	2007	Applied Acoustics	Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers	Schallfelder in Situationen mit beidseitigen Lärmschirmen, Untersuchung der Bedeutung allfälliger Diffusität	höherer Ordnung zwischen parallelen Hausfassaden experimentelle Ergebnisse, Massstabsmodelluntersuchungen
30	Kai Ming Li, Man Pun Kwok, Ming Kan Law	2008	J. Acoustical Society America	A ray model for hard parallel noise barriers in high-rise cities	Untersuchungen zum Schallfeld rund um zwei parallele, reflektierende Lärmschutzwände	etwas spezielle Geometrie, aber evtl. nützliche Messdaten der Massstabsmodelluntersuchungen
16	K. Heutschi, R. Bayer	2006	Acta Acustica united with Acustica	Sound Radiation From Railway Tunnel Openings	semi-empirisches Modell zur Schallfeldberechnung ausserhalb von Eisenbahntunnelportalen, Validierung mit Messungen	Modellwendung durch Auswertung von wenigen einfachen algebraischen Formeln
17	Kurt Heutschi	2008	Applied Acoustics	Sound propagation in railway line cuttings	Berechnung und Massstabsmodellmessungen abgeleitetes empirisches Modell zur Schallausbreitung rund um Eisenbahneinschnitte	Modell nur für Eisenbahnanwendungen, da explizit die Reflexionen zwischen Einschnittwand und Zugskörper berücksichtigt werden

II Modellabmessungen und -fotos



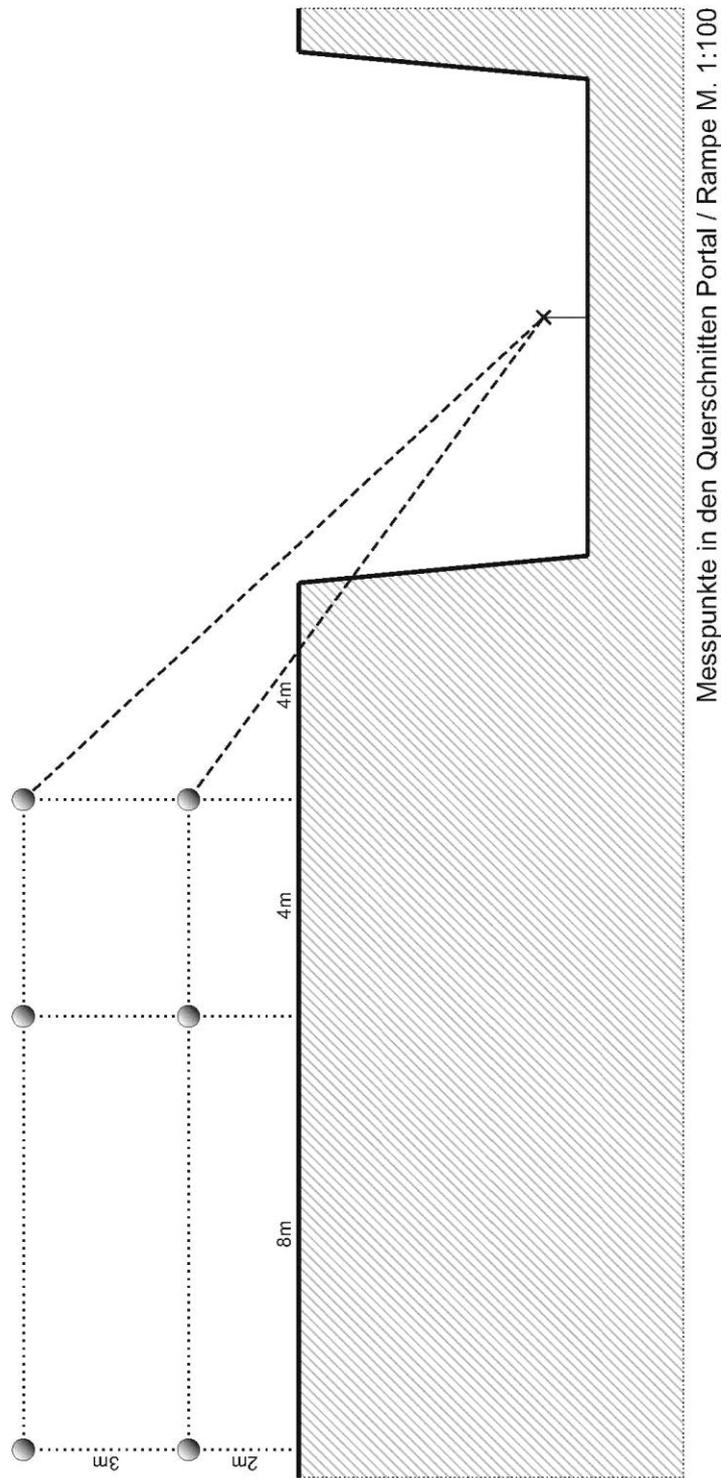
Schallreflexion an Kunstbauten

Abmessungen Massstabsmodell Unterführung



Schallreflexion an Kunstbauten

Abmessungen Massstabsmodell Unterführung



III Messungen und Berechnungen für das Modell "Unterführung"

III.1 Ziel

Um die Mechanismen der Reflexion in komplexen Strukturen zu erfassen und zu begreifen wurde eine typische Situation im Modell nachgebildet. Gewählt wurde eine Unterführung, da dies einerseits ein häufiges Bauwerk ist und andererseits bei diesem Bauwerk die wichtigsten Mechanismen der Schallreflexion – Mehrfachreflexion, Portalabstrahlung aus überdeckten Bereichen, etc. – auftreten.

Mit den Messungen am Modell werden im Wesentlichen drei Ziele verfolgt:

- Durch den Vergleich der Messresultate mit einer Vergleichsrechnung in einem konventionellen Modell mit Schallreflexion soll geprüft werden, wie korrekt mit einem solchen Modell die Realität abgebildet wird und wo Abweichungen auftreten.
- Die Modellmessungen bilden eine Grundlage für die Prüfung möglicher Rechenansätze. Die Differenzen zwischen den Modellmessungen und den Resultaten dieser Rechenansätze zeigen, wie gut der Rechenansatz die effektive Schallausbreitung erklären kann.
- Mit dem Modell lässt sich auch prüfen, mit welchen absorbierenden Massnahmen welcher Effekt erreicht wird. Die Resultate dieser Messungen können dann wiederum für die Verifikation der Rechenansätze verwendet werden.

III.2 Methodik

III.2.1 Messverfahren

2.1.1 Grundlagen der Massstabsmodelltechnik

Die Schallausbreitung von einer Quelle zu einem Empfänger im Beisein von Objekten und Raumbegrenzungsflächen wird durch die Geometrieabmessungen im Vergleich zur Schallwellenlänge und die Absorption bestimmt. Wenn sowohl die Schallwellenlänge als auch die Geometrie mit dem gleichen Faktor skaliert werden, ändert sich an der Schallausbreitung mit Ausnahme der möglichen Wirkung der Absorption nichts. Damit ist es möglich, die Schallausbreitung in einer komplizierten Umgebung in einem Massstabsmodell nachzubilden, wenn die Frequenz in gleichem Mass erhöht wird, wie die Geometrie geschrumpft wurde. Hinsichtlich der Absorption der Objekte und Begrenzungen ist sicherzustellen, dass die Materialien im transformierten Frequenzbereich jene Absorptionskoeffizienten aufweisen, die im Originalmassstab gelten.

2.1.2 Messkonzept

Strassenlärm stellt eine inkohärente Linienquelle dar. Eine direkte Umsetzung einer solchen Quelle in ein Massstabsmodell ist schwierig. Ein Ausweg besteht in der Auflösung der Linienquelle in einzelne diskrete Punktquellen. Sämtliche Untersuchungen zu Ausbreitungsdämpfungen reduzieren sich dann auf einzelne Quellen- und Empfängerpunkte. Durch nachträgliche Überlagerung kann in einem zweiten Schritt die Wirkung der ganzen Linienquelle ermittelt werden. Für die Messung wird demzufolge ein Lautsprecher und ein Mikrofon, sowie ein geeigneter Analysator benötigt. Die Beschreibung der Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger geschieht mit Vorteil durch die sogenannte Impulsantwort. Die Impulsantwort ist der Zeitverlauf des Signals am Empfänger, wenn an der Quelle ein kurzer Impuls erzeugt wird. In der Impulsantwort wird sichtbar, nach welcher Laufzeit wie viel Schallenergie am Empfänger eintrifft. Die Messung der Impulsantwort ist grundsätzlich problematisch, da auf Grund der Amplituden- und Zeitbeschränkung nur wenig Energie in den Anregungsimpuls gesteckt werden kann. Das Signal am Empfänger hebt sich demzufolge oft nur schwach vom Umgebungsgeräusch ab. Als eleganter Ausweg bietet sich der Einsatz von Korrelationsverfahren auf. Diese erhöhen mittels eines rechnerischen Tricks das Signal/Rausch-Verhältnis ganz beträchtlich, indem

die Anregung über einen längeren Zeitraum verteilt wird. Als Modellmassstab wurde 1:32 verwendet. Im Modell wurden die Oktaven 4..32 kHz untersucht, entsprechend den Oktaven 125..1'000 Hz im Originalmassstab.

2.1.3 Messkette

Die Messkette setzte sich wie oben angedeutet aus einem Lautsprecher, einem Mikrofon und dem Analysator zusammen. Der Lautsprecher hat die Aufgabe, im transformierten Frequenzbereich, d.h. zwischen 4 und 32 kHz die Abstrahlung der Originalquelle nachzubilden. Als Lösung wurde hier ein Piezo-Hochtonhorntreiber verwendet, der in ein Volumen mit einem rohrförmigen, 2 mm grossen Auslass arbeitet. Als Mikrofon wurde ein B&K Typ 4135 (1/4"), SN 125178 mit einem Norsonic Impedanzwandler Typ 1201, S/N 23866 verwendet. Der nutzbare Frequenzbereich erstreckt sich mit diesem Mikrofon von 20 Hz bis 40 kHz. Die Bestimmung der Impulsantworten erfolgte mit einem MLSSA Messsystem. Dieses Messgerät basiert auf einer PC-Einsteckkarte und erlaubt die Bestimmung von Systemimpulsantworten mittels Maximalfolgen.

2.1.4 Primäre Messauswertung: Impulsantwort

Die primäre Messauswertung umfasst die Auftrennung der Impulsantwort in die verschiedenen Oktavbänder, die Kompensation von Störgeräuschen und der Luftabsorption sowie das Berechnen des Energieinhalts als Mass für den Pegel am Empfänger. Die MLSSA Messung liefert die Impulsantwort für die gewählte Quellen-Empfänger Übertragungsstrecke. Als erstes wird die Impulsantwort zeitlich begrenzt, d.h. es werden Restreflexionen, die nichts mit dem Modell zu tun haben, weggeschnitten. Um eine frequenzabhängige Aussage zu erhalten, wird die Impulsantwort anschliessend vierfach kopiert und für das entsprechende Oktavband (4, 8, 16 und 32 kHz) bandpassgefiltert. Damit liegen vier Impulsantworten vor, die je nur noch die Frequenzanteile des jeweiligen Oktavbandes enthalten. Als nächstes wird die Impulsantwort durch Quadrieren in eine Energieimpulsantwort überführt. Diese Energieimpulsantwort wird so gut als möglich von allfälligem Störgeräusch befreit. Dieses manifestiert sich als gleichmässig über die Zeit verteiltes überlagertes Rauschen. In einem signalfreien Abschnitt der Energieimpulsantwort wird dieses Rauschen geschätzt und dann überall abgezogen. Bei den hohen Frequenzen, die im Modellmassstab verwendet werden, fällt die Luftabsorption ganz beträchtlich ins Gewicht. Bei 4 kHz beträgt die Dämpfung pro Meter etwa 0.03 dB, bei 8 kHz etwa 0.1 dB, bei 16 kHz etwa 0.3 dB und bei 32 kHz etwa 1 dB. Diese Luftdämpfung muss rechnerisch kompensiert werden.

Anschliessend wird die Luftabsorption für den Originalfrequenzbereich in analoger Weise wieder dazugerechnet. Die Energie, die in jeder der vier gefilterten Energieimpulsantworten steckt, lässt sich durch Aufintegrieren bestimmen. Dieser Wert ist ein Mass für den Pegel am Empfangspunkt, wenn die Quelle ein stationäres Rauschen abstrahlen würde.

2.1.5 Modellabsorber

Zur Nachbildung der Absorption im Modell müssen Materialien gesucht werden, die im transformierten Frequenzbereich die gleichen Absorptionseigenschaften wie das Material im Originalfrequenzbereich aufweisen. Als stark absorbierendes Material im Modellfrequenzbereich hat sich ein 1 cm starker Schaumstoff vom Typ CMHR 40 erwiesen. Der Diffusfeld-Absorptionskoeffizient ist für Frequenzen über 4 kHz grösser als 0.7.

III.2.2 Modellabmessungen und Messpunkte

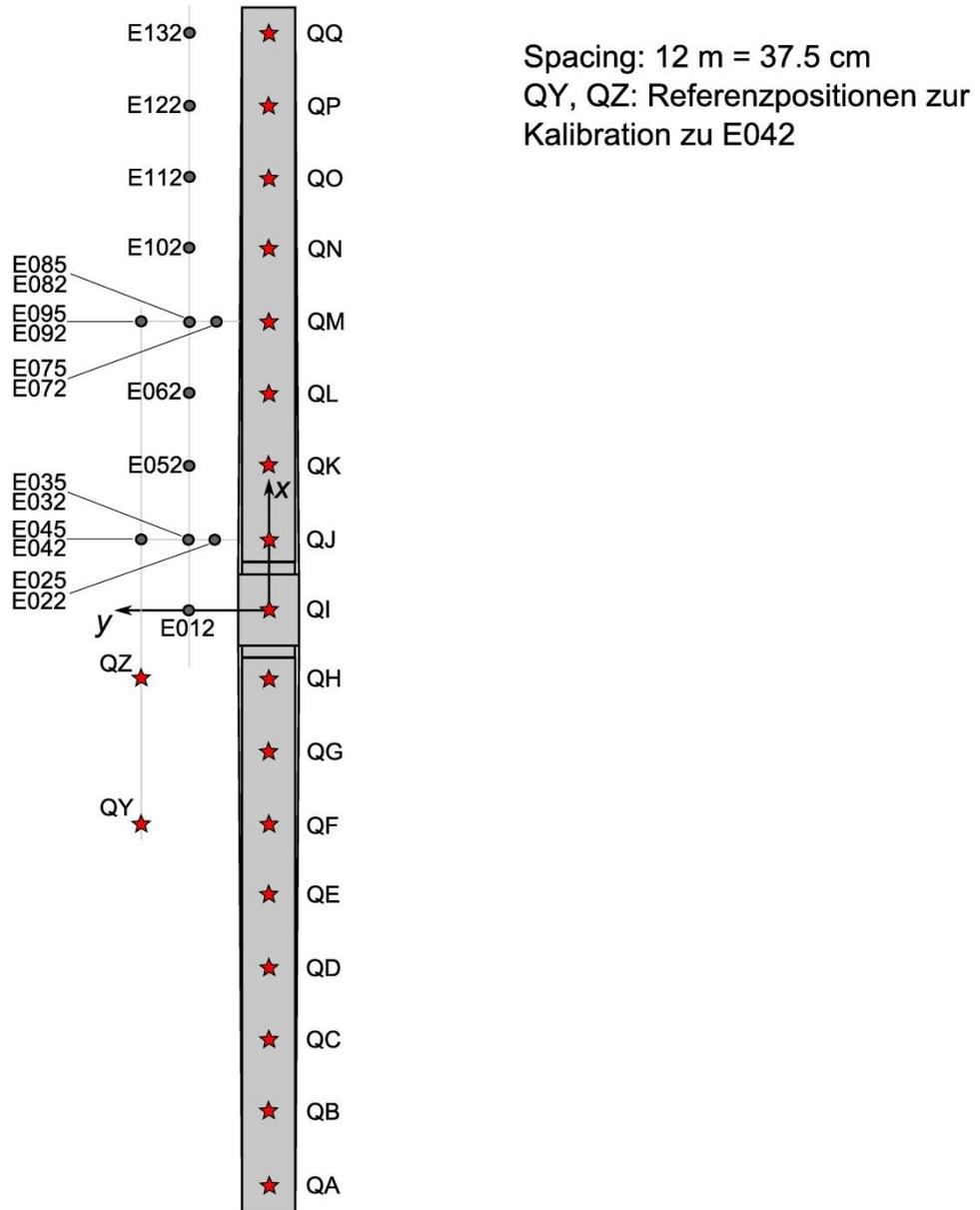


Abbildung III.2.2.1: Modell – Abmessungen und Messpunkte

Koordinaten der Quellenpunkte (Dimensionen im Originalmassstab)*Tabelle III.2.2.1: Koordinaten Quellenpunkte*

	x	y	z
QA	-96.0	0.0	-0.3
QB	-84.0	0.0	-1.0
QC	-72.0	0.0	-1.7
QD	-60.0	0.0	-2.4
QE	-48.0	0.0	-3.1
QF	-36.0	0.0	-3.8
QG	-24.0	0.0	-4.5
QH	-12.0	0.0	-5.2
QI	0.0	0.0	-5.5
QJ	12.0	0.0	-5.2
QK	24.0	0.0	-4.5
QL	36.0	0.0	-3.8
QM	48.0	0.0	-3.1
QN	60.0	0.0	-2.4
QO	72.0	0.0	-1.7
QP	84.0	0.0	-1.0
QQ	96.0	0.0	-0.3
QY	-36.0	21.1	0.0
QZ	-12.0	21.1	0.0

Koordinaten der Empfängerpunkte (Dimensionen im Originalmassstab)*Tabelle III.2.2.2: Koordinaten Empfängerpunkte*

E012	0.0	13.1	2.0
E022	12.0	9.1	2.0
E025	12.0	9.1	5.0
E032	12.0	13.1	2.0
E035	12.0	13.1	5.0
E042	12.0	21.1	2.0
E045	12.0	21.1	5.0
E052	24.0	13.1	2.0
E062	36.0	13.1	2.0
E072	48.0	9.1	2.0
E075	48.0	9.1	5.0
E082	48.0	13.1	2.0
E085	48.0	13.1	5.0
E092	48.0	21.1	2.0
E095	48.0	21.1	5.0
E102	60.0	13.1	2.0
E112	72.0	13.1	2.0
E122	84.0	13.1	2.0
E132	96.0	13.1	2.0

Vergleich A → C: Mit/ohne absorbierenden Wänden (ohne absorbierende Brückenuntersicht)

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 reduzieren sich die Immissionen mit beidseitig absorbierenden Wänden um 6.9 dB gegenüber der Situation ohne schallabsorbierende Wände. Diese Differenz kann als Beitrag der Reflexionen interpretiert werden.

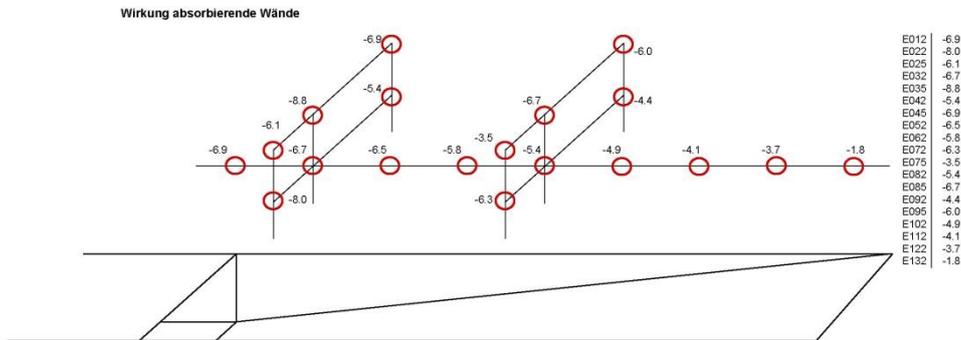


Abbildung III.3.2.2: Vergleich Messresultate Szenarien A und C

Ergebnis: Die beidseitig schallabsorbierende Verkleidung reduziert die Immissionen stark. Die Wirkung nimmt entlang der Strassenachse (abnehmende Trogtiefe) ab.

Vergleich C → D: Mit zusätzlich absorbierender Brückenuntersicht (Stützmauern absorbierend)

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 erhöhen sich die Immissionen gegenüber der Situation mit den schallabsorbierenden Wänden und nicht schallabsorbierender Brückenuntersicht um 0.1 dB wenn zusätzlich die Brückenuntersicht schallabsorbierend verkleidet ist.

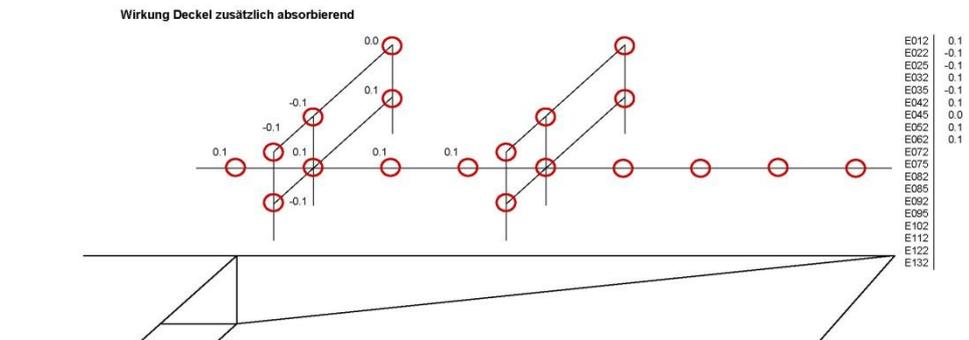


Abbildung III.3.2.3: Vergleich Messresultate Szenarien C und D

Ergebnis: Die zusätzliche schallabsorbierende Verkleidung der Deckelunterseite führt im Nahbereich zu unerheblichen Zu- und Abnahmen des Schallpegels. Ihre Wirkung ist vernachlässigbar.

Vergleich C → E: Wirkung teilweiser Verkleidung gegenüber Gesamtverkleidung

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 vermindert sich die Wirkung bei teilweiser Wandverkleidung um 2.5 dB gegenüber einer Vollverkleidung

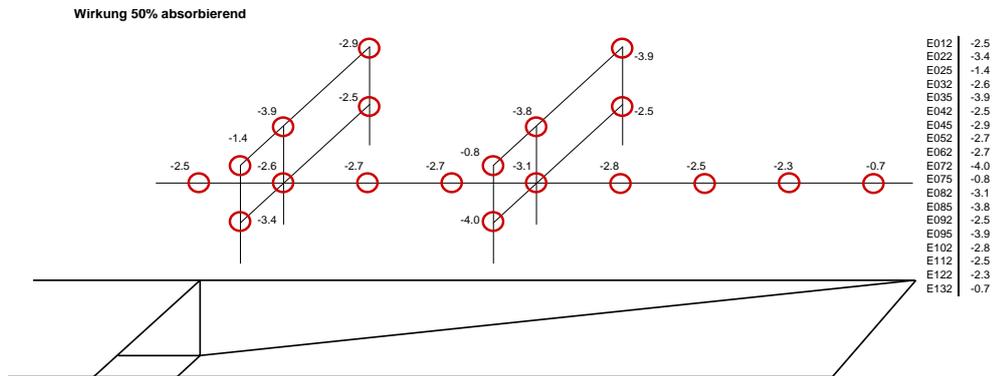


Abbildung III.3.2.4: Vergleich Messresultate Szenarien C und E

Ergebnis: Die Reduktion der Wandverkleidung um 50% ergibt eine Verminderung der Wirkung um ca. 3 dB.

III.4 Berechnungen

Modell

Die Unterführung wurde mit den gleichen Modellabmessungen im Programm CadnaA modelliert. Reflexionen nach dem Prinzip der Spiegelquelle können wahlweise bis zur 6. Ordnung berücksichtigt werden.

Die Berechnungen erfolgten mit den Einstellungen Stl-86 (ohne Seitenbeugung) und einem Schallabsorptionsgrad der absorbierenden Verkleidungen von 0.8. Die Reflexionen werden in diesem Modell nach der Spiegelquellenmethode berücksichtigt.

Es wurden Berechnungen für die folgenden Zustände durchgeführt (alle Berechnungen mit Brückenüberführung):

- A Für verschiedene Reflexionsordnungen, ohne absorbierende Verkleidungen
- B Für verschiedene Reflexionsordnungen, mit beidseitig absorbierenden Stützmauern
- C Für verschiedene Reflexionsordnungen, Stützmauern zu 50 % im oberen Bereich absorbierend verkleidet

Der Vergleich dieser Messungen beantwortet folgende Fragen:

- A → A Wie wirkt sich die Berücksichtigung von Reflexionen verschiedener Ordnung auf den Immissionspegel aus, wenn keine schallabsorbierenden Verkleidungen bestehen?
- B → B Wie wirkt sich die Berücksichtigung von Reflexionen verschiedener Ordnung auf den Immissionspegel aus, wenn die Seitenwände schallabsorbierend verkleidet sind?
- C → C Wie wirkt sich eine Reduktion der Vollverkleidung um 50% aus?

Vergleich A → A: Erhöhung der Immissionen durch Reflexionen (ohne schallabsorbierende Verkleidungen)

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 erhöhen sich die Immissionen bei Berücksichtigung der Reflexionen 1. Ordnung um 5.3 dB.

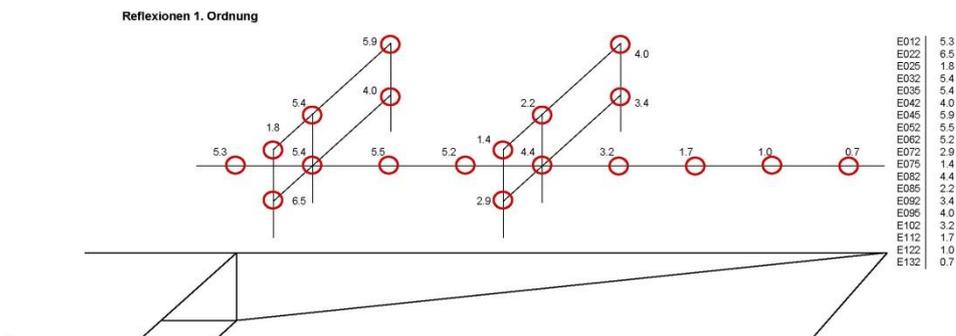


Abbildung III.4.1: Szenario A Reflexionen 1. Ordnung

Ergebnis: Die Berücksichtigung der Reflexion 1. Ordnung erhöht die Immissionen. Die Wirkung nimmt entlang der Strassenachse (abnehmende Trogtiefe) ab.

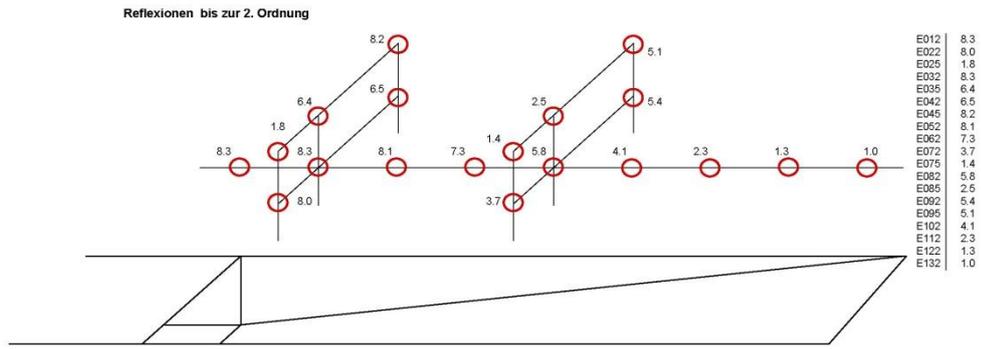


Abbildung III.4.2: Szenario A Reflexionen bis 2. Ordnung

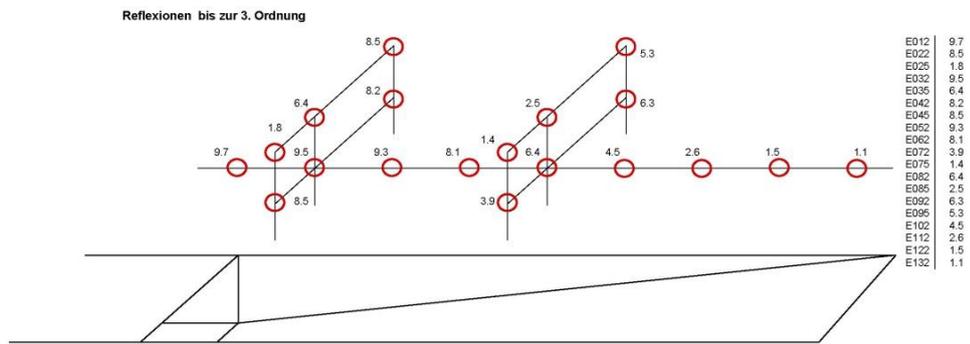


Abbildung III.4.3: Szenario A Reflexionen bis 3. Ordnung

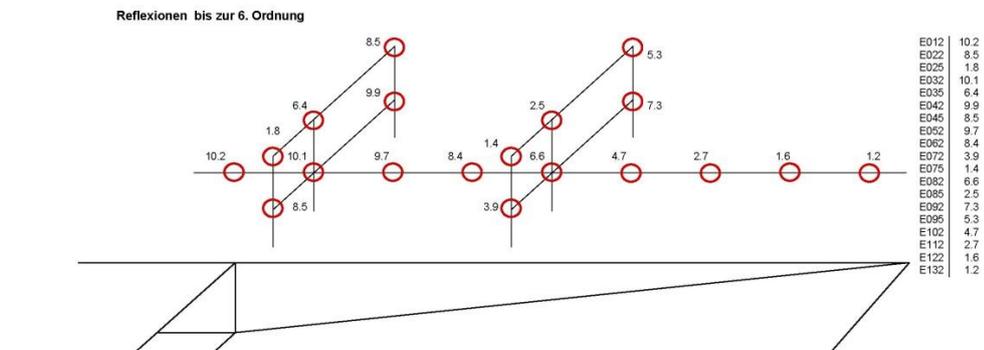


Abbildung III.4.4: Szenario A Reflexionen bis 6. Ordnung

Ergebnis: Dort, wo keine Hindernisdämpfung durch die Stützmauer besteht (E025, E075 und E085), nimmt die Wirkung der Reflexionen auch unter Berücksichtigung höherer Reflexionsordnungen nicht mehr zu.

Vergleich B → B: Wirkung der schallabsorbierenden Wände unter Berücksichtigung verschiedener Reflexionsordnungen

Leesebeispiel: Am Empfangsort E012 nehmen die Immissionen mit schallabsorbierenden Wänden bei Berücksichtigung der Reflexionen 1. Ordnung gegenüber der Situation ohne Reflexionen um 1.7 dB zu.

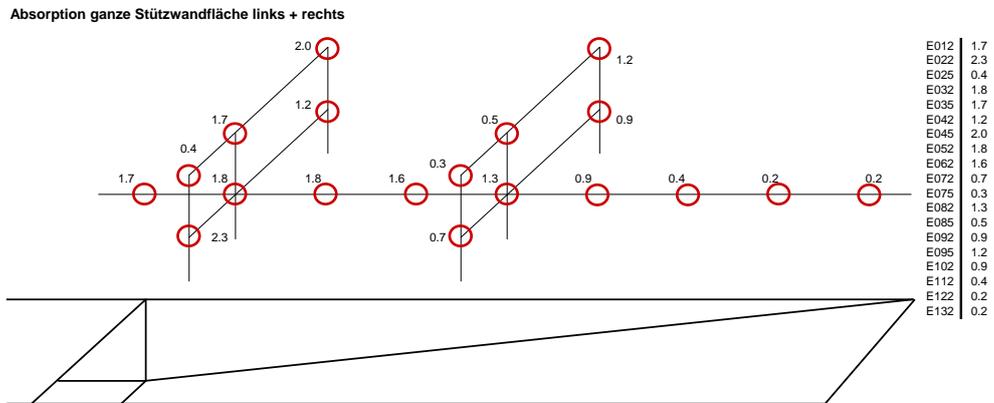


Abbildung III.4.5: Berücksichtigung Absorption und Reflexionen bis 1. Ordnung

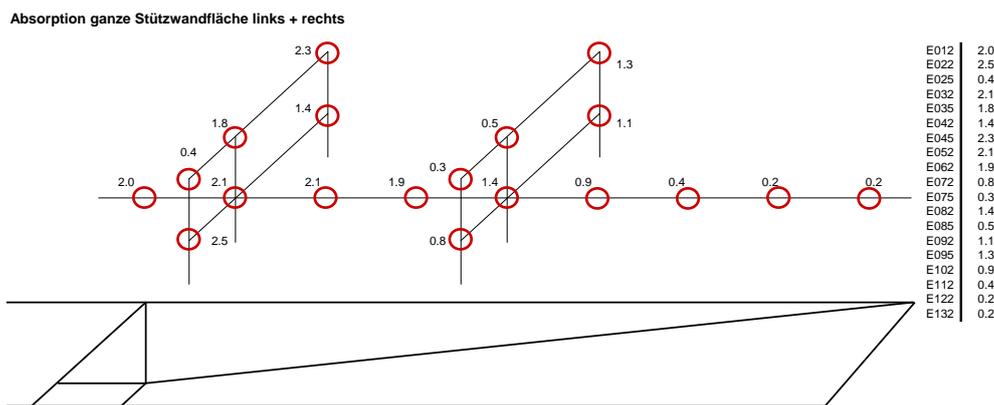


Abbildung III.4.6: Berücksichtigung Absorption bis 2. Ordnung

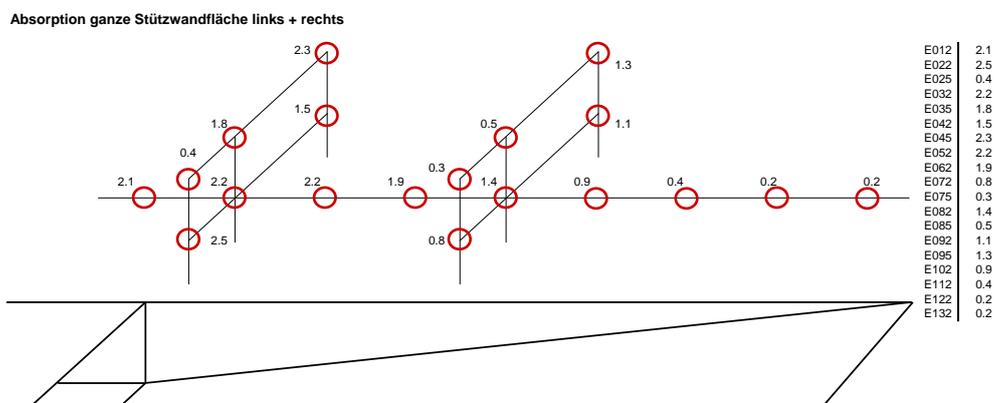


Abbildung III.4.7: Berücksichtigung Absorption bis 6. Ordnung

Ergebnis: Dort, wo keine Hindernisdämpfung durch die Stützmauer besteht (E025, E075 und E085) und der Beitrag von Reflexionen vernachlässigbar ist (vgl. vorne), hat dementsprechend auch die schallabsorbierende Verkleidung keinen Einfluss auf die Immissionen.

III.5 Vergleich Messungen-Berechnungen

Der Vergleich der Resultate der Messungen und der Berechnungen soll zeigen, wo Differenzen auftreten. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Resultate der Messungen weitgehend der Realität entsprechen sollten und die Abweichungen mindestens zum grossen Teil in der Berechnung liegen, sei es im Modellansatz oder auch im Berechnungsalgorithmus.

Vergleichen lassen sich einerseits die absoluten Werte (bei Berechnung mit dem gleichen Emissionswert) sowie die Differenzen zwischen Zuständen mit und ohne absorbierende Massnahmen.

Vergleich 1 Messung – Berechnung: Absolute Werte ohne absorbierende Massnahmen

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 liegt der berechnete Wert um 0.2 dB tiefer als bei der Messung.

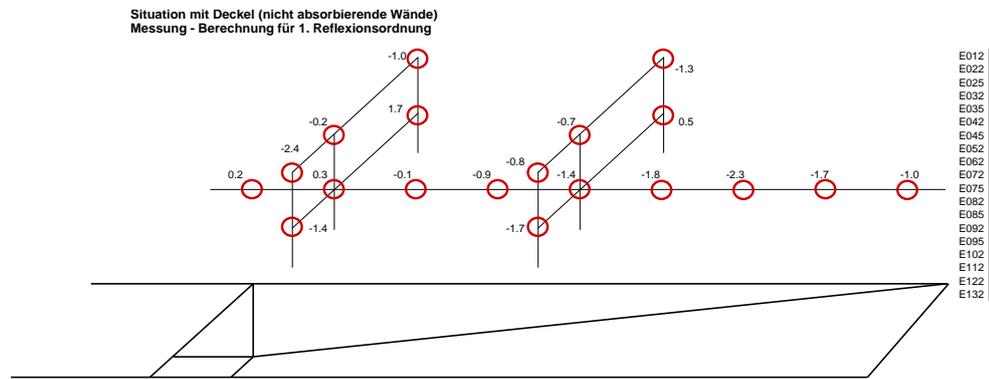


Abbildung III.5.1: Vergleich 1 - Absolute Werte ohne absorbierende Massnahmen, 1. Ordnung

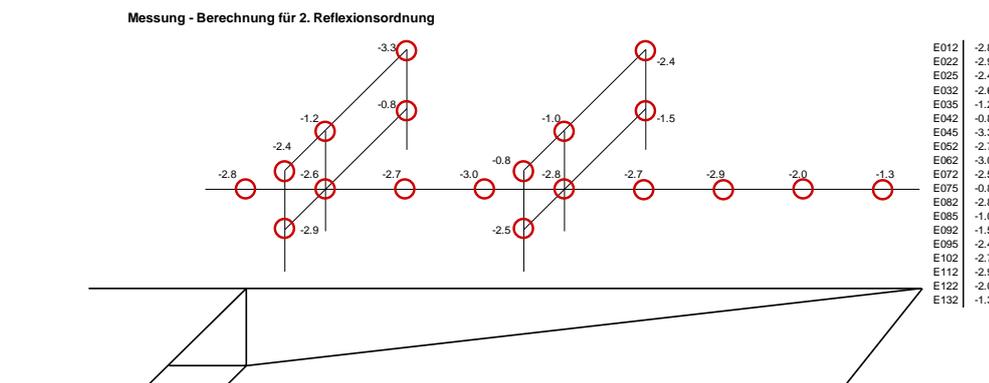


Abbildung III.5.2: Vergleich 1 - Absolute Werte ohne absorbierende Massnahmen, 2. Ordnung

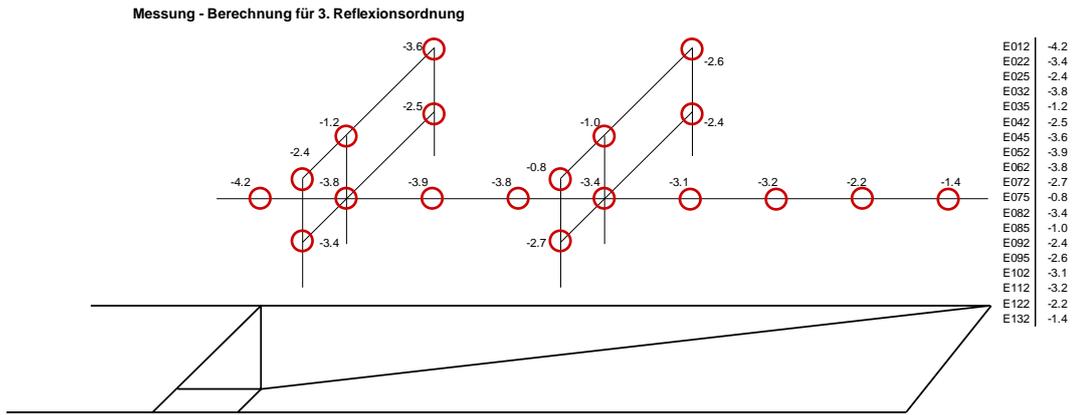


Abbildung III.5.3: Vergleich 1 - Absolute Werte ohne absorbierende Massnahmen, 3. Ordnung

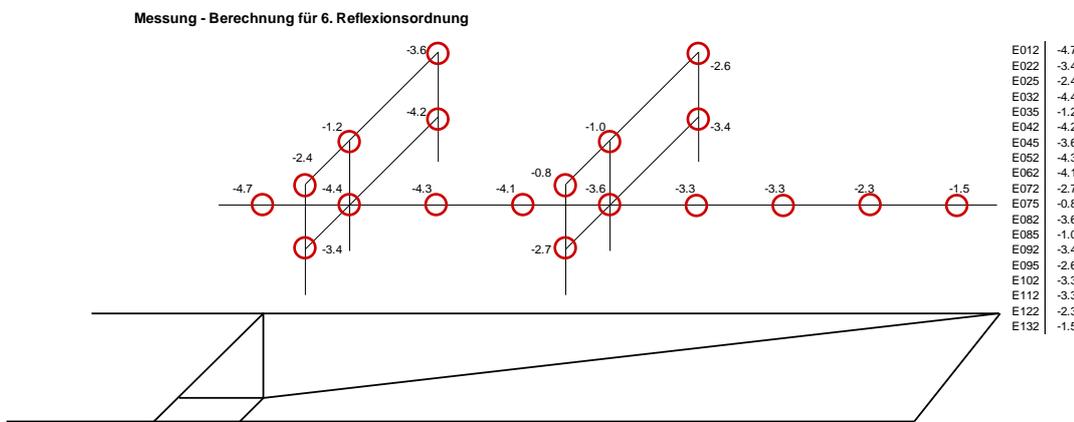


Abbildung III.5.4: Vergleich 1 - Absolute Werte ohne absorbierende Massnahmen, 6. Ordnung

Ergebnis: Bei der Berücksichtigung der Reflexionen 1. Ordnung ist die Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen am besten. Das Berechnungsmodell (ohne absorbierende Flächen) überschätzt auch bei Berücksichtigung nur der 1. Reflexionsordnung die Lärmbelastungssituation mehrheitlich. Im oberen Teil der Rampe und bei den der Rampe am nächsten gelegenen Punkten werden die Reflexionen am stärksten überschätzt.

Vergleich 2 Messung – Berechnung: Absolute Werte mit absorbierenden Wänden

Lesebeispiel: Am Empfangsort E012 liegt der Messwert um 1.3 dB tiefer als bei der Berechnung.

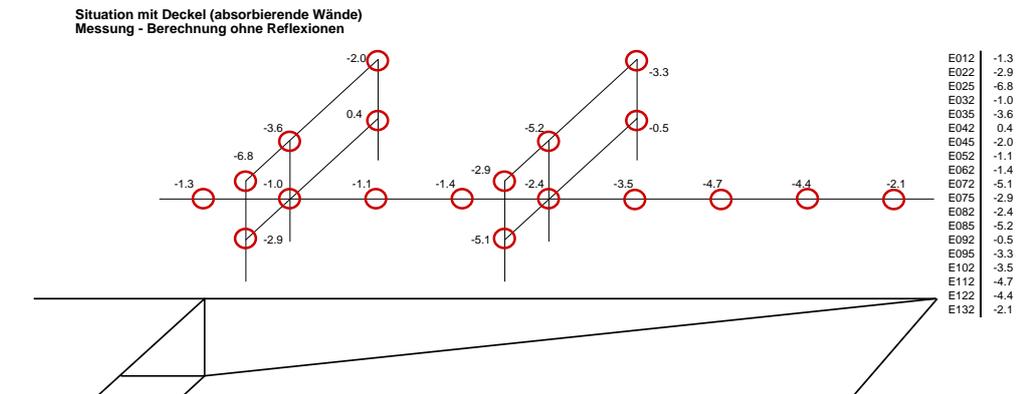


Abbildung III.5.2: Vergleich 2 - Absolute Werte mit absorbierenden Wänden

Ergebnis: Die Wirkung von schallabsorbierenden Massnahmen wird mit der Berechnung massiv unterschätzt, insbesondere bei Empfangspunkten mit geringer resp. ohne Hindernisdämpfung.

III.6 Zusammenfassung

Messungen

- Die Brückenüberführung erhöht die Immissionen nur im Nahbereich geringfügig.
- Die beidseitig schallabsorbierende Verkleidung reduziert die Immissionen stark.
- Eine zusätzliche schallabsorbierende Verkleidung der Brückenuntersicht hat keinen Einfluss auf die Immissionen und bringt somit keine Verbesserung.
- Die Reduktion der schallabsorbierenden Verkleidung auf 50 % reduziert die Wirkung auf rund die Hälfte der Wirkung der Gesamtverkleidung.

Berechnungen

- Die Berücksichtigung von höheren Reflexionsordnungen erhöht die Immissionen erheblich.
- Mit der schallabsorbierenden Verkleidung erhöhen sich die Immissionen ab der 1. Reflexionsordnung nur noch geringfügig.

Vergleich Messungen – Berechnungen: Ohne absorbierende Verkleidung

- Messung und Berechnung stimmen am besten überein, wenn nur die Reflexionen 1. Ordnung berücksichtigt werden.
- Grundsätzlich ergibt das Berechnungsmodell eher höhere Belastungen als die Messungen. Dies betrifft insbesondere die Punkte mit keiner oder geringer Hinderniswirkung.

Vergleich Messungen – Berechnungen: Mit absorbierender Vollverkleidung der Wände

- Die absorbierende Wirkung wird bei den Berechnungen unterschätzt. Bereits bei der Berechnung ohne Berücksichtigung von Reflexionen (Stützmauern absorbierend) liegen die Berechnungswerte höher als die Messungen. Dies gilt für alle Berechnungspunkte ohne diejenigen mit der grössten Hinderniswirkung.

- Auch an Punkten ohne Hindernisdämpfung und geringem Reflexionsanteil nach CadnaA (oben vorne) und damit hohem Anteil des Direktschalls ist die Reduktion durch die absorbierende Verkleidung hoch.
- Die Berechnung ergibt bei absorbierenden Stützmauern für den Direktschall höhere Werte als die Messung.

Vergleich Messungen – Berechnungen: Mit absorbierender Teilverkleidung der Wände

- Mit einer Teilverkleidung im oberen Bereich auf ca. 50 % der Gesamtfläche vermindert sich die Schallreduktion gegenüber einer vollflächigen Verkleidung um ca. 3 dB.

Schlussfolgerungen

- Reflexionen sind bei der Berechnung nicht vernachlässigbar.
- Mit Berücksichtigung der 1. Reflexion wird die beste Übereinstimmung mit der Messung erreicht. Die Berücksichtigung höherer Reflexionsordnungen ergibt viel zu hohe Immissionen.
- Die Reflexionen werden bei der Berechnung vor allem im oberen Rampenbereich überschätzt. Kleine Mauern ergeben zu hohe Reflexionsanteile. Es sind also geeignete Systemgrenzen zu ziehen, innerhalb derer Reflexionen berücksichtigt werden sollen.
- Der Reflexionsanteil wird bei den Punkten, die der Rampe am nächsten liegen, überschätzt. Dies könnte ev. darauf zurückzuführen sein, dass die Seitenwände beim Massstabsmodell eine leichte Neigung (1:10) aufwiesen, die sich beim Modellieren in CadnaA für höhere Reflexionsordnungen nicht nachbilden liess.

IV Absorption von Teilflächen

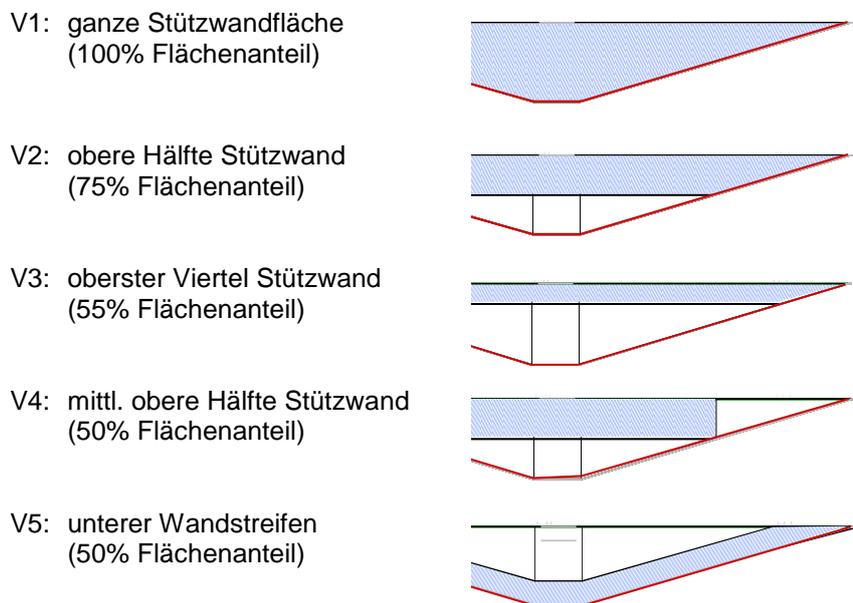
IV.1 Zielsetzung

Anhand von Berechnungen im CadnaA und einem Quervergleich mit den Messungen am Massstabsmodell soll die Wirkung unterschiedlicher Absorptionsanordnungen untersucht werden. Es ist zu ermitteln welche Teilflächen in welchem Mass für die Reflexionen verantwortlich sind bzw. an welchen Stellen mit absorbierenden Materialien der effektivste Nutzen erzielt werden kann. Damit sollen die Beurteilungsgrundlagen für die Optimierung geplanter Kunstbauten und die effiziente Sanierung bestehender Bauwerke bereitgestellt werden.

IV.2 Methodik

IV.2.1 Vorgehen

Für die Untersuchung der Auswirkungen einer absorbierenden Verkleidung der seitlichen Rampenwände werden die folgenden schematischen Teilflächen unterschieden:



Der Absorptionsgrad wird mit 0.8 angenommen. Für den quantitativen Vergleich verschiedener Varianten mit unterschiedlicher Anordnung von absorbierenden Bereichen sind die Berechnungen mit einer hohen Reflexionszahl durchzuführen. Die Ausbreitungsrechnungen erfolgen deshalb bis zur 6. Reflexionsordnung ohne Brücke über dem Strasseneinschnitt. Die Beurteilung wird unabhängig von effektiven Immissionswerten anhand von Pegeldifferenzen vorgenommen.

IV.2.2 Disposition Beurteilungspunkte

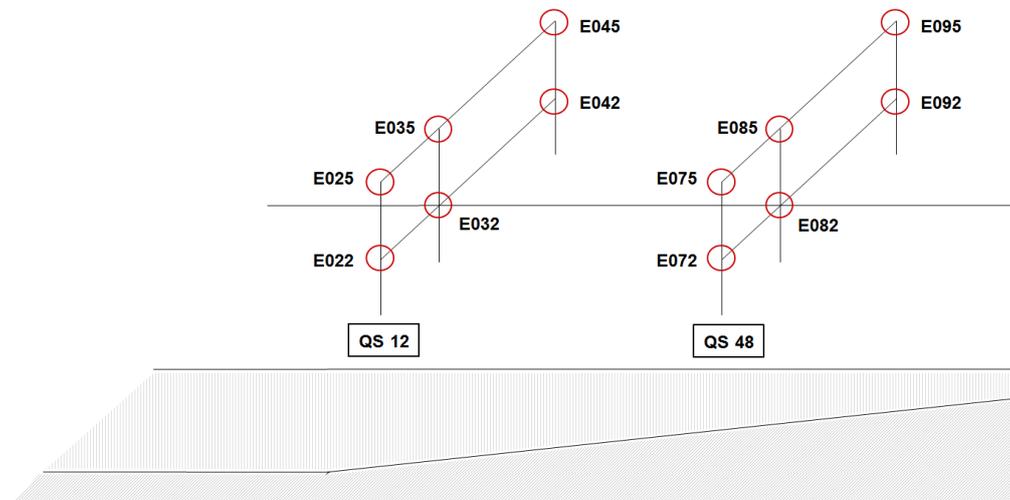


Abbildung IV.2.2.1: Beurteilungspunkte 3D-Modell

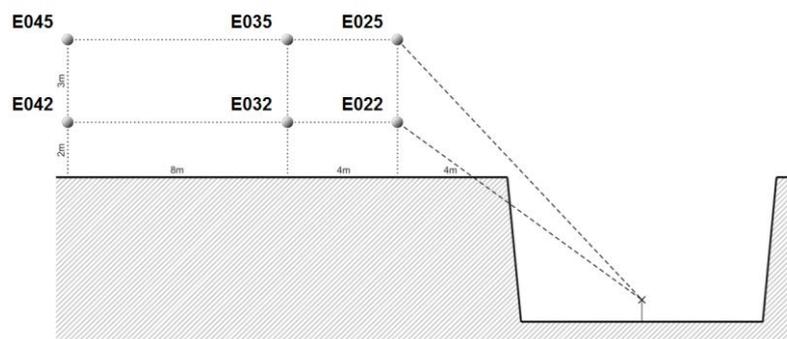


Abbildung IV.2.2.2: Beurteilungspunkte Schnitt QS 12

Schalleinfallswinkel im QS-12m

Innerhalb eines zentralen Aspektwinkels von ca. 220° ist E025 der einzige Punkt mit Direktschall. Ab einem seitlichen Winkel von 110° (ab senkrechter Linie zur Strasse) weisen auch E035 und E022 Direktschallanteile auf.

Schalleinfallswinkel im QS-48m

Innerhalb eines zentralen Aspektwinkels von ca. 80° ist E075 der einzige Punkt mit Direktschall. Ab einem seitlichen Winkel von 40° weisen auch E085 und E072 Direktschallanteile auf.

IV.4 Beurteilung

IV.4.1 Ergebnisse der Berechnung

Variantenvergleich A: Berechnete Unterschiede in der Absorptionswirkung

Tabelle IV.4.1.1: Berechnungsergebnisse Variantenvergleich A

Varianten- vergleich	Querschn.	EP-Höhe	nur rechts			rechts + links			
			5 m	E02	E03	E04	E02	E03	E04
			2 m	E07	E08	E09	E07	E08	E09
V1 → V2	12 m	5 m	0.0	0.0	1.0	0.0	0.4	1.5	
		2 m	2.1	1.9	1.5	2.4	2.5	1.4	
	48 m	5 m	-0.1	0.0	0.4	-0.1	0.0	0.4	
		2 m	0.2	0.5	0.7	0.1	0.4	0.5	
V1 → V4	12 m	5 m	0.0	0.0	1.1	0.0	0.4	1.6	
		2 m	2.1	1.8	2.1	2.4	2.4	2.2	
	48 m	5 m	-0.1	0.3	1.1	-0.1	0.3	1.2	
		2 m	0.6	1.6	2.2	0.6	1.7	2.4	
V2 → V4	12 m	5 m	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	
		2 m	0.0	-0.1	0.6	0.0	-0.1	0.8	
	48 m	5 m	0.0	0.3	0.7	0.0	0.3	0.8	
		2 m	0.4	1.1	1.5	0.5	1.3	1.9	

Direktschalleinfluss:

- Für Punkte mit Direktschall über den ganzen Schalleinfallswinkel (E025, E075) hat die absorbierende Ausführung der Stützwände einen vernachlässigbaren Einfluss: 0 - 1.5 dB bei allen Absorptions-Varianten
- Punkte mit teilweise seitlich einfallenden Direktschallanteilen weisen gegenüber den anderen Berechnungspunkten eine deutlich verminderte Wirkung infolge Absorptionsflächen auf, v.a. E085.

V1, ganze Stützwandfläche absorbierend:

- QS-12m: Bei absorbierenden Wänden beidseits der Strasse resultiert die höchste Pegelreduktion: 4 - 8 dB für Punkte ohne Direktschall. Sind die Stützwände nur rechtsseitig (Strassenseite gegenüber Immissionspunkten) absorbierend, so resultieren um ca. 1 dB höhere Immissionspegel.
- QS-48m: Bei absorbierenden Wänden beidseits der Strasse resultiert die höchste Pegelreduktion: 4 - 6 dB. Sind die Stützwände nur rechtsseitig (Seite Immissionspunkte) absorbierend, so resultieren um ca. 1 dB höhere Immissionspegel.

V2, obere Hälfte der Stützwände absorbierend:

- QS-12m: Die Wirkung der absorbierenden Auskleidung ist um ca. 1 - 2 dB geringer als bei V1 (s. Tabelle Variantenvergleich A) und liegt bei 4 - 7 dB.
- QS-48m: Die Pegelminderung infolge Absorption unterscheidet sich nicht wesentlich von derjenigen der Variante V1 (s. Tabelle Variantenvergleich A).

V3, oberer Viertel der Stützwände absorbierend:

- Die Pegelminderungen liegen bei beiden Querschnitten in derselben Größenordnung:
 - vordere Punkte E02, E03 und E07, E08 ca. 0 - 2 dB
 - hintere Punkte E04 und E09 ca. 2 - 3 dB
 Dies bedeutet, dass die Absorption erst ab einer Distanz von ca. der doppelten Stützwand-Maximalhöhe deutlich wirksam wird.

V4, mittlere obere Hälfte der Stützwände absorbierend:

- QS-12m: Die Resultate sind vergleichbar mit denjenigen der Variante V2 (s. Tabelle Variantenvergleich A).
- QS-48m: Die Resultate sind vergleichbar mit denjenigen von V3. Die Absorptionswirkung liegt ca. 2 dB unter denjenigen im QS-12m.

V5, unterer Wandstreifen absorbierend (50% der Wandflächen):

- Keine wahrnehmbare Wirkung infolge Schallabsorption.

IV.4.2 Vergleich Berechnung-Messung**Variantenvergleich B: Gemessene Unterschiede in der Absorptionswirkung***Tabelle IV.4.1.2: Berechnungsergebnisse Variantenvergleich B*

Varianten- vergleich	Querschnitt	EP-Höhe	rechts + links		
			E02	E03	E04
		5 m	E02	E03	E04
		2 m	E07	E08	E09
V1 → V4	12 m	5 m	1.3	4.0	2.9
		2 m	3.4	2.7	2.5
	48 m	5 m	0.8	3.8	3.9
		2 m	4.0	3.1	2.5

V1, beidseits ganze Stützwandflächen absorbierend:

Der Unterschied der Absorptionswirkung zwischen den Querschnitten QS-12 und QS-48 ist bei den Messungen um ca. 1 dB kleiner als bei den Berechnungen.

V4, beidseits mittlere obere Hälften der Stützwände absorbierend:

Der Unterschied der Absorptionswirkung zwischen den beiden Querschnitten liegt bei der Messung und der Berechnung etwa gleich hoch, ausgenommen bei den strassennahen Punkten E022/E072.

Vergleich V1-V4:

Aufgrund der durchgeführten Modellmessungen können die Werte der Varianten V1 und V4 mit Absorption beidseits der Strasse miteinander verglichen werden.

Gegenläufige Tendenz bezüglich Höhe bei Punkten ohne Direktschall:

- Berechnung: höhere Wirkung bei tief gelegenen Punkten
- Messung: höhere Wirkung bei hoch gelegenen Punkten

Bei strassennahen Punkten umgekehrt (wenig oder keine Abschirmung): Höhere Wirkung bei hoch gelegenen Punkten aufgrund der Messungen.

Dies bedeutet, dass der reflektierte Pegelanteil (mit Absorption) im Vergleich zum Anteil des Direktschalls eher höher liegt, als in den Berechnungen berücksichtigt.

IV.5 Schlussfolgerungen

- Bei der Berechnung der Immissionen werden die Reflexionen bis zur 6. Ordnung berücksichtigt. Damit wird die Lärmausbreitung möglichst wirklichkeitsnah abgebildet, auch wenn die Gesamtimmissionen eher überschätzt werden. Dies ist aber von geringerer Bedeutung, da der Relativvergleich zwischen den Reflexionsanteilen der einzelnen Varianten im Vordergrund steht.
- Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten für die Varianten V1 und V4 zeigt:
 - Die Reflexionen bei den vorderen Punkten mit wenig oder keiner Abschirmung sind bei der Messung deutlich höher als bei der Berechnung.
 - Bei den übrigen Messpunkten ergibt sich eine gute Übereinstimmung.
- Daraus folgt, dass die Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Werten vergleichbar sind, ausgenommen bei den vordersten Punkten. Für diese Punkte sind die Messresultate nicht restlos erklärbar; die berechneten Werte hingegen sind plausibel. Damit kann die Beurteilung von Rampen mit teilweise absorbierend verkleideten Flächen anhand von Berechnungen durchgeführt werden, wobei die Reflexionen bis zur 6. Ordnung zu berücksichtigen sind (Spiegelquellenansatz).
- Die Verkleidung der Stützwand auf der gegenüberliegenden Seite des Beurteilungspunktes genügt. Beidseitige Verkleidungen sind nicht erforderlich, wenn die lärmempfindlichen Bauten nur auf einer Seite der Rampe angeordnet sind. Die erzielbare Verbesserung durch beidseitige Verkleidung gegenüber einer einseitigen Absorptionsmassnahme liegt unter 1 dB.
- Bei vollständiger Verkleidung der Rampenwände liegt die Schallminderung etwa bei 6 dB. Bei einer Verkleidung zu 50 % - 70 % (V4 und V2) ist dieser Wert etwa 1 - 2 dB geringer. Die Effizienz liegt damit für diese 3 Varianten in einem ähnlichen Bereich. Kleine Teilverkleidungen oben wie unten (V3 und V5) bringen nur sehr wenig Nutzen. Die Veränderungen liegen im nicht wahrnehmbaren Bereich. Im tiefen Kanalbereich ist eine absorbierende Auskleidung effizienter. Dies folgt aus den Ergebnissen für die Varianten V2 und V4, die praktisch die identischen Messresultate liefern. Der Unterschied besteht darin, dass bei V4 die Absorption im flachen Bereich weggelassen wird. Die absorbierende Fläche reduziert sich damit von 70 auf 50 %. Dass die Messpunkte im Bereich der tieferen Rampenhälfte liegen, trägt zwar zu dieser Aussage bei, wesentlich ist aber die bessere Wirkung der Absorption.

V Berechnung mit Fresnelzonen

Die an einem akustisch harten Reflektor zurückgeworfene Schallwelle kann man sich erzeugt denken kann als Wirkung sehr vieler Elementarstrahler auf der Reflektoroberfläche. Da die Normalkomponente der Schallschnelle auf der Reflektorfläche verschwinden muss, lässt sich das Schallfeld in eine einfallende und eine reflektierte Welle auftrennen, wobei deren Schnellenormalkomponenten auf dem Reflektor entgegengesetzte Richtungen und gleichen Betrag haben. An einem Empfangspunkt resultiert ein Schalldruck der reflektierten Welle entsprechend der amplituden- und phasenrichtigen Überlagerung der Beiträge aller Elementarquellen. Die Analyse lässt sich wesentlich vereinfachen, wenn die Phasenlagen der Beiträge der Elementarquellen den beiden Klassen $+1$ ($0 < [\phi \text{ modulo } 2\pi] < \pi$) und -1 ($\pi < [\phi \text{ modulo } 2\pi] < 2\pi$) zugeteilt werden. Damit lassen sich auf dem Reflektor Zonen gleicher Phasenklasse – sogenannte Fresnelzonen – ausscheiden, deren Beiträge zum Empfängerschalldruck durch das Vorzeichen, die Zonenfläche und den Abstand gegeben sind. Der Beitrag der ersten Zone wird positiv angenommen. Dann erhält der Beitrag der zweiten Zone ein negatives Vorzeichen, wirkt also gegenüber der ersten Zone destruktiv. Die dritte Zone dagegen wirkt wiederum konstruktiv etc. Die Flächeninhalte der Zonen höherer Ordnung nehmen nur sehr langsam zu. Es lässt sich zeigen, dass für einen unendlich grossen Reflektor der verbleibende Schalldruck am Empfänger demjenigen Anteil entspricht, der von der Hälfte der ersten Zone ausgeht. Die Fläche der halben ersten Fresnelzone beschreibt das Gebiet, aus welchem bei einer Reflexion "Energie geschöpft" wird. Vereinfachend wird daher in der Regel jene Zone für eine vollständige Reflexion angenommen, welche für Beiträge am Empfänger innerhalb einer Viertelwellenlänge verantwortlich ist.

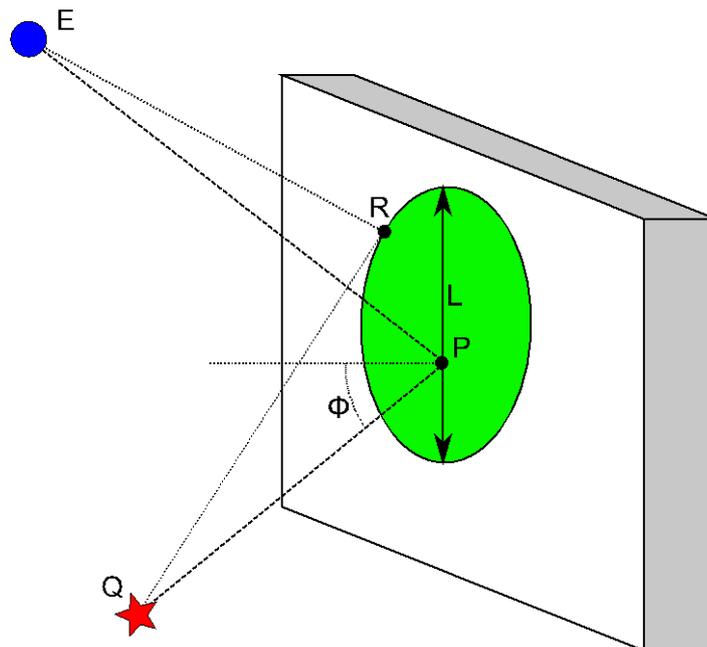


Abbildung V.1: Situation zur Reflexion an einer Fläche mit der Quelle Q, dem Reflexionspunkt P und dem Empfänger E. Die Fresnelzone (grün), d.h. der für die Reflexion relevante Bereich auf dem Reflektor wird begrenzt durch die Linie für die gilt, dass die Distanz Q-R-E um eine Viertelwellenlänge grösser ist als die Distanz Q-P-E.

Die Tabellen V.1 – V.4 zeigen für 1 kHz (Schwerpunktsfrequenz von A-bewertetem Strassenverkehrslärm) die grösste Ausdehnung L der Fresnelzone für verschiedene Geometrien.

Tabelle V.1: Ausdehnung L der Fresnelzone in Meter bei senkrechtem Schalleinfall ($\phi = 0^\circ$) für unterschiedliche Abstände Quelle-Reflektor (QP) und Reflektor-Empfänger (PE).

$\phi = 0^\circ$

		Abstand PE									
		1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Abstand QP	1	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
	2	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	4	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7
	8	0.8	1.1	1.4	1.7	1.9	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3
	16	0.8	1.1	1.5	1.9	2.3	2.7	3.0	3.1	3.2	3.3
	32	0.8	1.2	1.6	2.1	2.7	3.3	3.8	4.2	4.4	4.5
	64	0.8	1.2	1.6	2.2	3.0	3.8	4.7	5.4	5.9	6.2
	128	0.8	1.2	1.6	2.3	3.1	4.2	5.4	6.6	7.6	8.4
	256	0.9	1.2	1.7	2.3	3.2	4.4	5.9	7.6	9.3	10.8
	512	0.9	1.2	1.7	2.3	3.3	4.5	6.2	8.4	10.8	13.2

Tabelle V.2: Ausdehnung L der Fresnelzone in Meter bei Schalleinfall unter $\phi = 30^\circ$ bzgl. der Reflektornormalen für unterschiedliche Abstände Quelle-Reflektor (QP) und Reflektor-Empfänger (PE).

$\phi = 30^\circ$

		Abstand PE									
		1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Abstand QP	1	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	2	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
	4	0.9	1.1	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9
	8	0.9	1.2	1.6	1.9	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7
	16	1.0	1.3	1.7	2.2	2.7	3.1	3.4	3.6	3.7	3.8
	32	1.0	1.3	1.8	2.4	3.1	3.8	4.4	4.8	5.1	5.2
	64	1.0	1.3	1.9	2.5	3.4	4.4	5.4	6.2	6.8	7.2
	128	1.0	1.4	1.9	2.6	3.6	4.8	6.2	7.6	8.8	9.7
	256	1.0	1.4	1.9	2.7	3.7	5.1	6.8	8.8	10.8	12.5
	512	1.0	1.4	1.9	2.7	3.8	5.2	7.2	9.7	12.5	15.2

Tabelle V.3: Ausdehnung L der Fresnelzone in Meter bei Schalleinfall unter $\phi = 60^\circ$ bzgl. der Reflektornormalen für unterschiedliche Abstände Quelle-Reflektor (QP) und Reflektor-Empfänger (PE).

$\phi = 60^\circ$

		Abstand PE									
		1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Abstand QP	1	1.1	1.3	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8
	2	1.3	1.6	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4
	4	1.5	1.9	2.3	2.7	3.0	3.1	3.2	3.3	3.3	3.4
	8	1.6	2.1	2.7	3.3	3.8	4.2	4.4	4.6	4.6	4.7
	16	1.7	2.2	3.0	3.8	4.6	5.4	5.9	6.2	6.4	6.5
	32	1.7	2.3	3.1	4.2	5.4	6.6	7.6	8.4	8.8	9.1
	64	1.8	2.4	3.2	4.4	5.9	7.6	9.3	10.8	11.8	12.5
	128	1.8	2.4	3.3	4.6	6.2	8.4	10.8	13.2	15.2	16.7
	256	1.8	2.4	3.3	4.6	6.4	8.8	11.8	15.2	18.7	21.6
	512	1.8	2.4	3.4	4.7	6.5	9.1	12.5	16.7	21.6	26.4

Tabelle V.4: Ausdehnung L der Fresnelzone in Meter bei Schalleinfall unter $\phi = 80^\circ$ bzgl. der Reflektornormalen für unterschiedliche Abstände Quelle-Reflektor (QP) und Reflektor-Empfänger (PE).

$\phi = 80^\circ$

		Abstand PE									
		1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Abstand QP	1	1.8	2.5	3.4	4.5	5.5	6.3	6.8	7.1	7.2	7.3
	2	2.5	3.1	4.1	5.3	6.5	7.4	8.0	8.4	8.6	8.7
	4	3.4	4.1	5.2	6.6	8.0	9.2	10.0	10.5	10.8	10.9
	8	4.5	5.3	6.6	8.2	10.0	11.7	12.9	13.7	14.1	14.3
	16	5.5	6.5	8.0	10.0	12.4	14.8	16.8	18.1	18.9	19.3
	32	6.3	7.4	9.2	11.7	14.8	18.2	21.4	23.9	25.5	26.4
	64	6.8	8.0	10.0	12.9	16.8	21.4	26.3	30.7	33.9	35.9
	128	7.1	8.4	10.5	13.7	18.1	23.9	30.7	37.6	43.6	48.0
	256	7.2	8.6	10.8	14.1	18.9	25.5	33.9	43.6	53.5	61.9
	512	7.3	8.7	10.9	14.3	19.3	26.4	35.9	48.0	61.9	75.8

VI Berechnungsmodell Flächenquellen

Als alternatives Modell zum Spiegelquellenansatz wurde für die Berechnungen der Immissionen aus den Reflexionen die Unterführung als segmentierte Flächenquelle nachgebildet. Die Immissionen wurden pro Empfangspunkt für jede Flächenquelle berechnet und addiert. Die Berechnung erfolgte nach den Grundsätzen:

- Es wurden Flächenquellen von 1 x 5 m (vertikal, horizontal) gebildet.
- Es wurde die Schallenergie ermittelt, die auf die Flächenquelle auftritt.
- Die Flächenquelle wurde für die weitere Berechnung in eine Punktquelle mit der Schallenergie der Flächenquelle umgewandelt.
- Für die Abstrahlung wurde eine Richtcharakteristik $[\cos(f)]$ angenommen (Vergleichsberechnungen ohne Richtcharakteristiken und mit der Richtcharakteristik $[\cos(f)]^2$ zeigten jedoch, dass der Einfluss der Richtcharakteristik in der vorliegenden Situation gering ist).
- Die Immissionen wurden unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik, der Distanz und der (allfälligen) Hinderniswirkung berechnet. Bodeneffekte und Luftdämpfung wurden nicht berücksichtigt.

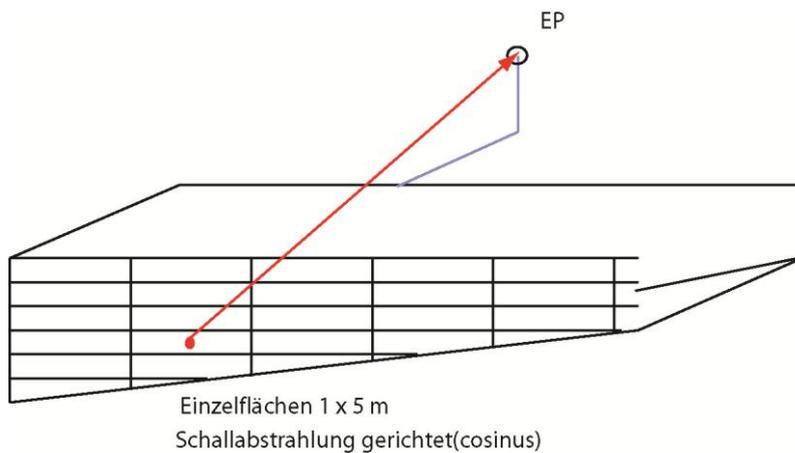


Abbildung VI.1: Berechnungsmodell Flächenquellen

Die Berechnungen wurden in Excel durchgeführt. Beiliegendes Beispiel zeigt den Aufbau der Berechnungen.

VII Anleitung zur Bestimmung der Immissionen über Flächenquellen

Die folgende Anleitung zeigt exemplarisch an einem Beispiel, wie sich die Immissionen berechnen lassen. Die Berechnung kann auch an ähnlichen Querschnitten nach der gleichen Methode vorgenommen werden. Bei stark von der vorliegenden abweichenden Situationen ist die Anwendbarkeit zu prüfen.

Schritt 1: Bestimmung der Teilflächen

- Unterteilung in einzelne Flächen
- Unterscheidung von Flächen mit Direktsicht und abgeschirmte Flächen

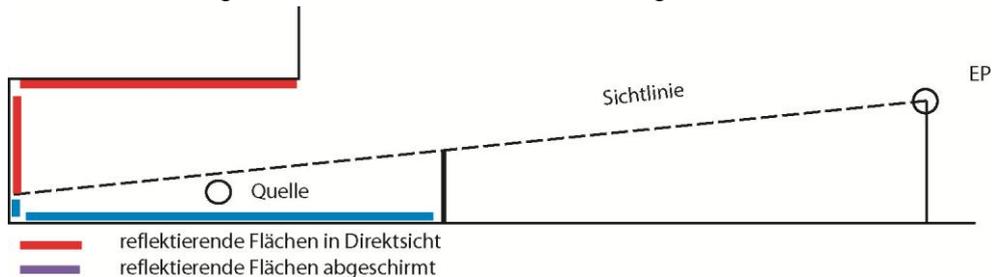


Abbildung VII.1: Vorgehen Flächenquellen-Modell Schritt 1

Schritt 2: Bestimmen der Schallenergie einer Teilquelle

Die Energie einer Teilfläche wird aus der Grösse der Fläche bestimmt. Im Querschnitt kann dies mit dem Winkel φ bestimmt werden, da $\varphi / 2\pi$ dem Anteil der gesamten Schallenergie entspricht.



Abbildung VII.2: Vorgehen Flächenquellen-Modell Schritt 2

$$L_{wTF} = L_{e, 1m} + 11 \text{ dB} + 10 \cdot \log(\varphi / 2\pi)$$

Schritt 3: Bestimmung Immissionspegel Teilfläche

Der Immissionspegel aus der Teilfläche wird folgendermassen bestimmt:

- Es wird eine Punkt (resp. Linienquelle) in der Mitte der Fläche angenommen.
- Die Abstrahlung erfolgt über die Halbkugel (-8 dB).
- Es wird eine Richtcharakteristik $[\cos(\alpha)]$ angenommen.

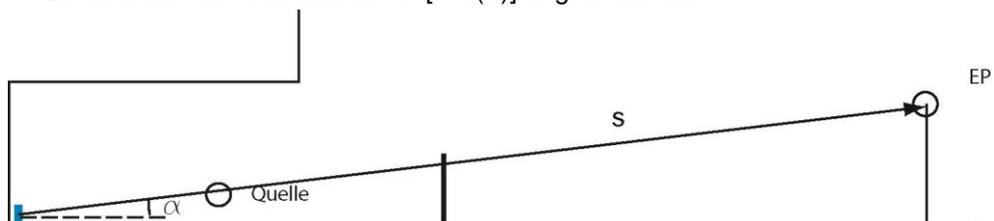


Abbildung VII.3: Vorgehen Flächenquellen-Modell Schritt 3

$$L_{i,TF} = L_{w,TF} - 8 \text{ dB} - 10 \cdot \log(s) + 10 \cdot \log(1.57 \cdot \cos(\alpha)) - \delta h + K_{Mfr}$$

Wobei δh (Hinderniswirkung):

$$u > 0.025 \quad \delta h = 10 \cdot \log(5 + 80 \cdot u)$$

$$0.025 > u > 0.0125 \quad \delta h = 10 \cdot \log(3 + 160 \cdot u)$$

u = Mehrweg über Hindernis gegenüber direktem Weg

Zuschlag für Mehrfachreflexion

$K_{Mfr} = 3 \text{ dB}$ (bei Galerien und ähnlichen Querschnitten)

Schritt 4: Immissionspegel Direktschall bestimmen

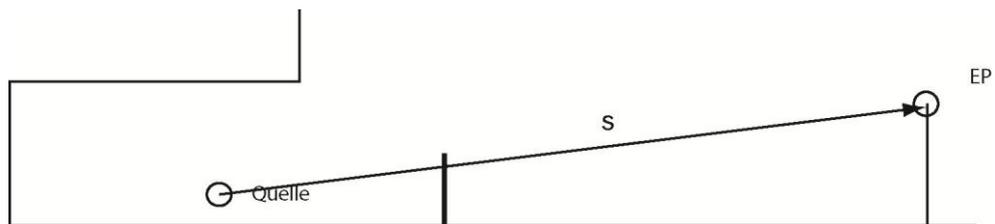


Abbildung VII.4: Vorgehen Flächenquellen-Modell Schritt 3

$$L_{i,DS} = L_{e,1m} - 10 \cdot \log(s) - \delta h$$

δh siehe Schritt 3

Schritt 5: Immissionspegel total

Damit ergibt sich der Gesamtpegel:

$$L_{i,Tot} = 10 \cdot \log\left(10^{\left(\frac{L_{i,DS}}{10}\right)} + \sum_{i=0}^i 10^{\left(\frac{L_{i,DS}}{10}\right)}\right)$$

VIII Berechnungsmethode Kirchhoff-Helmholtz-Integral

In Ergänzung zu den im Bericht aufgezeigten Herangehensweisen wird hier eine Möglichkeit zur Berechnung von Reflexionen dargestellt, die auf dem Kirchhoff-Helmholtz Integral basiert. Dieser wellentheoretische Ansatz geht wesentlich weiter als typische Engineering-Modelle und stellt für grosse dreidimensionale Situationen die genaueste, mit vertretbarem Aufwand ausführbare Rechenmethode dar.

Das Kirchhoff-Helmholtz Integral stellt im Frequenzbereich den Schalldruck p an einem beliebigen Punkt (x,y,z) im Raum durch ein Flächenintegral des Oberflächendrucks p_S und der Oberflächenschnelle v_S dar. Mit der Oberfläche S , der Kreisfrequenz ω , der Dichte ρ und dem Abstand r vom Oberflächenpunkt zum Punkt (x,y,z) lässt sich schreiben:

$$p(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_S j\omega\rho v_S \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} + p_S \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} dS$$

Mit der Wellenzahl k

$$k = \frac{\omega}{c}$$

und der Auswertung der partiellen Ableitung des Schalldruckbeitrags, kann obiges Integral umgeschrieben werden zu [Ref Heutschi 2009]:

$$p(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_S j\omega\rho v_S \frac{e^{-jkr}}{r} + p_S \frac{1 + jkr}{r^2} \cos(\phi) e^{-jkr} dS$$

Der Winkel ϕ entspricht dem Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Richtung zum Punkt (x,y,z) .

Die von einem Reflektor zurückgeworfene Schallwelle kann nun als Beitrag des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals interpretiert werden, wenn die Reflektorfläche als Oberfläche S interpretiert wird. Unter der Annahme eines harten Reflektors und unter Vernachlässigung von Beugungseffekten an den Kanten (Kirchhoff'sche Näherung) verschwindet die Oberflächenschnelle v_S und der Oberflächendruck p_S verdoppelt sich im Vergleich zur einfallenden Welle.

IX Vergleich Spiegelquelle mit Flächenquelle für kleinen Reflektor

Das folgende Testbeispiel zeigt das unterschiedliche Bild der Reflexionen für einen kleinen Reflektor für verschiedene Reflexionsberechnungen.

- Spiegelquelle (SQ)
- Fresnelzonen
- Flächenquelle (FQ)

Es wurde mit einer punktförmigen Quelle am Boden gerechnet. Der Direktschall wurde nicht berücksichtigt. Als Reflektor wurde ein Schirm in 5, 10, 20 und 40 m angenommen.

Berechnungssituation

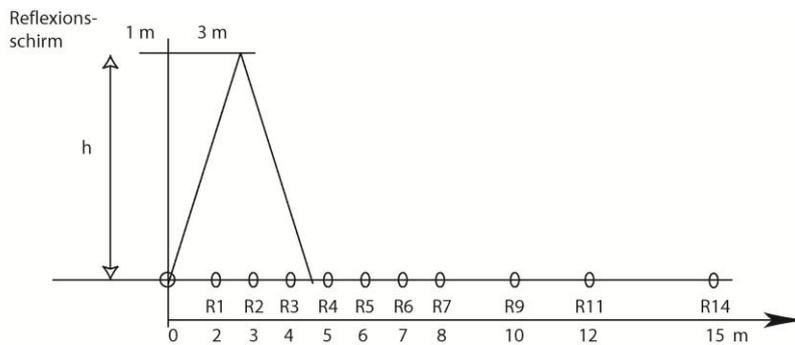


Abbildung IX.1: Berechnungssituation

Resultate

Tabelle IX.1: Berechnungsergebnisse

$L_{s, 1m} = 78 \text{ dB}$

Immissionspegel

h=	5 m			10 m			20 m			40 m					
	SQ	Fresnel	FQ	SQ	Fresnel	FQ	SQ	Fresnel	FQ	SQ	Fresnel	FQ			
R1	68.0	67.8	59.2	R1	65.0	64.8	53.6	R1	62.0	61.0	47.7	R1	59.0	57.3	41.7
R2	68.0	67.7	58.8	R2	65.0	64.7	53.5	R2	62.0	61.0	47.7	R2	59.0	57.2	41.7
R3	68.0	67.5	58.3	R3	65.0	64.5	53.4	R3	62.0	60.6	47.6	R3	59.0	56.9	41.7
R4	68.0	66.7	57.8	R4	65.0	63.7	53.2	R4	62.0	59.9	47.6	R4	59.0	56.3	41.7
R5	68.0	65.0	57.2	R5	65.0	62.0	53.0	R5	62.0	58.8	47.5	R5	59.0	55.5	41.7
R6		62.6	56.5	R6		59.6	52.7	R6		57.4	47.5	R6		54.6	41.6
R7		60.2	55.9	R7		57.2	52.5	R7		55.6	47.4	R7		53.5	41.6
R9		56.1	54.7	R9		53.1	51.9	R9		50.7	47.2	R9		50.8	41.6
R11		53.5	53.6	R11		50.5	51.2	R11		49.2	46.9	R11		48.7	41.5
R14		47.5	51.6	R14		44.5	50.0	R14		40.8	46.4	R14		42.9	41.3

Differenz zu Spiegelquelle

R1	-0.2	-8.8	-0.2	-11.4	-1.0	-14.3	-1.7	-17.3
R2	-0.3	-9.2	-0.3	-11.5	-1.0	-14.3	-1.8	-17.3
R3	-0.5	-9.7	-0.5	-11.6	-1.4	-14.4	-2.1	-17.3
R4	-1.3	-10.2	-1.3	-11.8	-2.1	-14.4	-2.7	-17.3
R5	-3.0	-10.8	-3.0	-12.0	-3.2	-14.5	-3.5	-17.3
R6	62.6	56.5	59.6	52.7	57.4	47.5	54.6	41.6
R7	60.2	55.9	57.2	52.5	55.6	47.4	53.5	41.6
R9	56.1	54.7	53.1	51.9	50.7	47.2	50.8	41.6
R11	53.5	53.6	50.5	51.2	49.2	46.9	48.7	41.5
R14	47.5	51.6	44.5	50.0	40.8	46.4	42.9	41.3

SQ Spiegelquelle
 Fresnel Berücksichtigung der Fresnelzonen
 FQ Flächenquelle

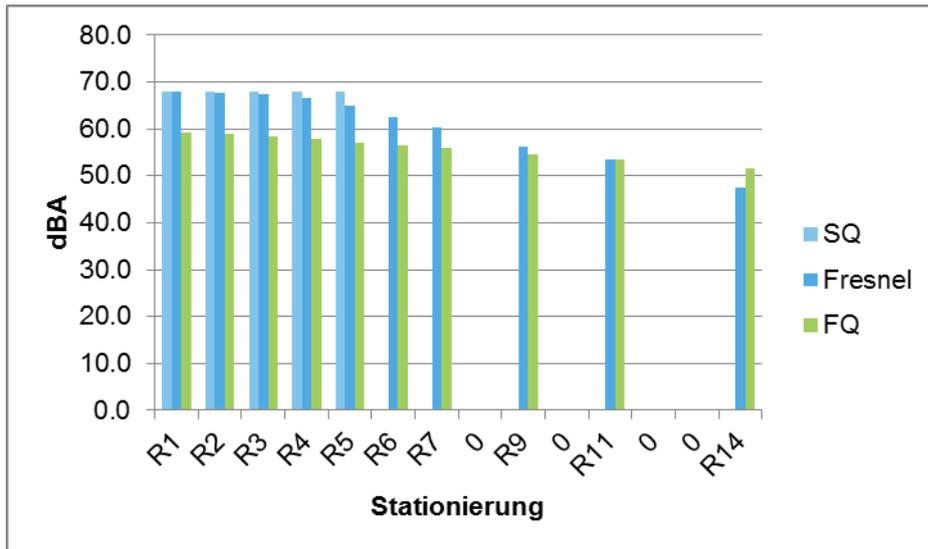


Abbildung IX.2: Berechnungsergebnisse Schirmabstand 5 m

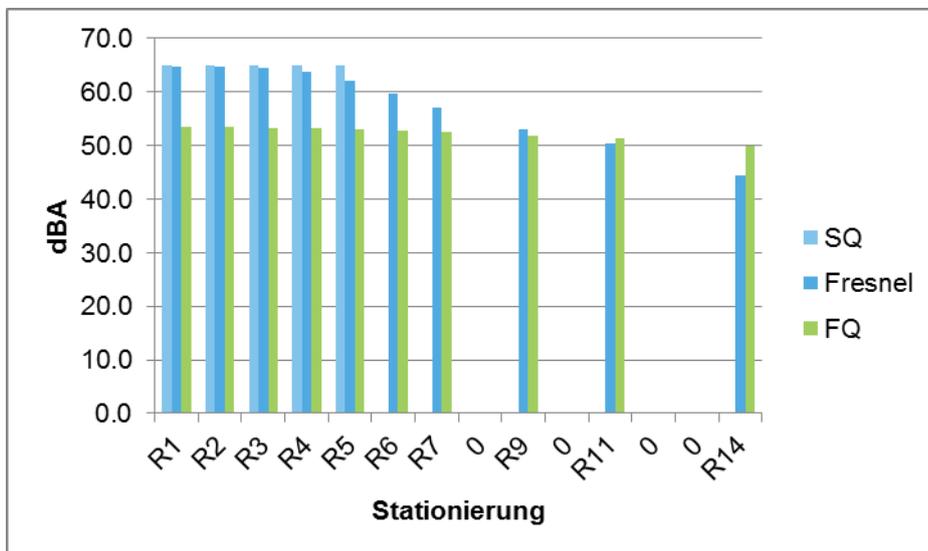


Abbildung IX.3: Berechnungsergebnisse Schirmabstand 10 m

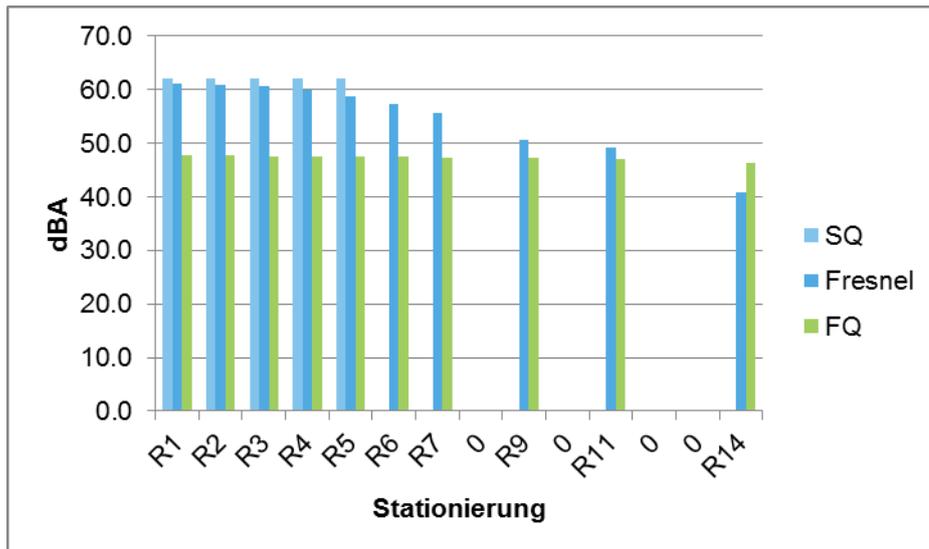


Abbildung IX.4: Berechnungsergebnisse Schirmabstand 20 m

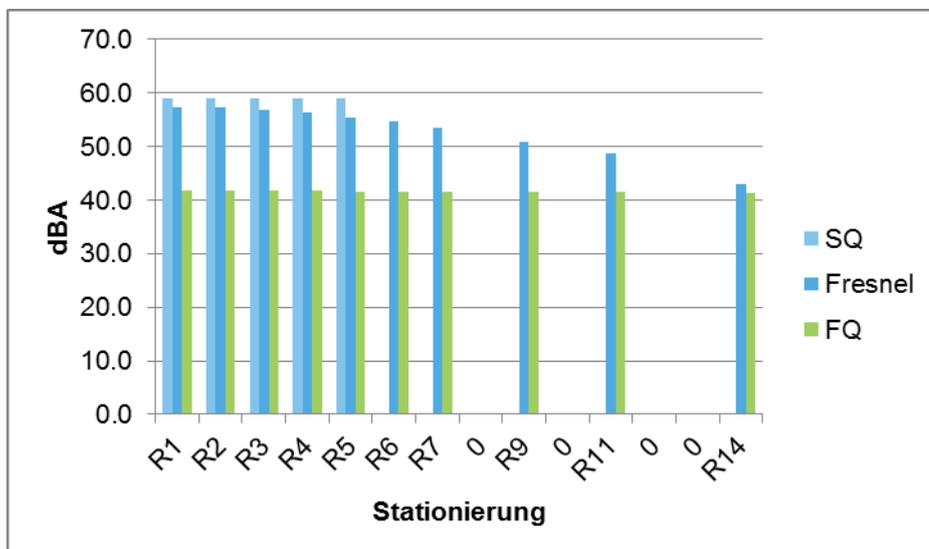


Abbildung IX.5: Berechnungsergebnisse Schirmabstand 40 m

Ergebnisse

Die Resultate zeigen:

- Im Bereich, in dem die Reflexionen der reinen Spiegelquelle auftreten (R1 - R5), liefert die Berechnung mit Fresnelzonen mit grösserem Abstand zunehmend tiefere Werte als die reine Spiegelquelle. Dieser Effekt verstärkt sich, je höher der Reflektor liegt.
- Die Berechnung mit der Flächenquelle (ohne Korrekturwert) liefert immer deutlich tiefere Werte. Die Differenz zur Spiegelquelle erhöht sich mit der Höhe des Reflektors
- Ausserhalb des Reflexionsbereichs der reinen Spiegelquelle konvertieren die berechneten Werte mit Fresnelzonen und Flächenmodell mit zunehmendem Abstand, und dies praktisch unabhängig von der Höhe des Reflektors.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AG	Aktiengesellschaft
ARAMIS	Informationssystem über Forschungsprojekte und Entwicklungsvorhaben in der Schweiz
BGW	Belastungsgrenzwerte
CadnaA	Software zur Berechnung, Darstellung, Beurteilung und Prognose von Umgebungslärm
CMHR	Combustion Modified High Resilience
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Schweiz
EP	Empfangspunkt
ES	Empfindlichkeitsstufe
FQ	Flächenquelle
IGW	Immissionsgrenzwert
ISO	Internationale Organisation für Normung
LSW	Lärmschutzwand
MLSSA	Maximum-Length Sequence System Analyzer
PC	Personal Computer
PDF	Portable Document Format
PE	Abstand Reflektor-Empfänger
PW	Planungswert
QP	Abstand Quelle-Reflektor
QS	Querschnitt
SBT	Strassen Brücken Tunnel
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizerische Normen-Vereinigung
SQ	Spiegelquelle
STL-86+	Rechenmodell der EMPA für Strassenverkehrslärm
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

-
- [1] EMPA, R. Hofmann, A. Rosenheck; Balzari & Schudel, H.J. Grolimund, U. Petermann (1983). *Verfahren zur Berechnung der Lärmabstrahlung von Strassentunnel-Portalen*. Forschungsarbeit 16/82. Bern: EDI, Bundesamt für Strassenbau.
-
- [2] Prof. Dr. Gerhard Stehno, Prof. Dr. Viktor Stehno, Johann Ertl (1991). *Lärmausbreitung an Tunnelportalen*. Strassenforschungsvorhaben Nr. 627. Wien: Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten.
-
- [3] Wolfgang Probst (2008). *Prognose des aus Tunnelmündungen abgestrahlten Schalls*. Lärm-bekämpfung, 3, S. 130-139
-
- [4] William Bowlby, Louis F. Cohn (1986). *A model for insertion loss degradation for parallel highway noise barriers*. J. Acoustical Society America, 80, S. 855-868
-
- [5] C. H. Chew (1995). *The Influence of Inclined Buildings on Road Traffic Noise*. Applied Acoustics, 45, S. 26-46.
-
- [6] Michael Chudalla (1993). *Die Geräuschkindernde Wirkung von Galerien, Untersuchungen an Modellgalerien*. DAGA, S. 386-387.
-
- [7] C. Cianfrini, M. Corcione & D. M. Fontana (1996). *Theoretical Analysis of the Acoustical Behaviour of Roadside Barriers with Diffusive Internal Surfaces*. Applied Acoustics, 48, S. 323-338.
-
- [8] C. Cianfrini, M. Corcione, L. Fontana (2007). *Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers*. Applied Acoustics, 68, S. 1357-1372.
-
- [9] Huw G. Davies (1978). *Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets*. J. Acoustical Society America, 64, S. 517-521.
-
- [10] K. Eggenschwiler, K. Heutschi, N. Lüthi-Freuler (2000). *Modellmessungen an einer Überdeckung und Teilüberdeckung einer Autobahn*. DAGA, S. 442-443.
-
- [11] V. Hartmann, W. Leschnik (1987). *Einfluss einer quellennahen Bebauung auf die Schallausbreitung*. DAGA, S. 305-308.
-
- [12] Chew Chye Heng (1996). *Sound Propagation in Housing Estates From a Passing Vehicle*. Applied Acoustics, 48, S.175-183.
-
- [13] Lloyd A. Herman, Craig M. Clum (2002). *Analysis of noise barrier overlap gaps*. J. Acoustical Society America, 111, S. 1734-1742.
-
- [14] K. Heutschi (1995). *A Simple Method to Evaluate the Increase of Traffic Noise Emission Level Due to Buildings, for a Long Straight Street*. Applied Acoustics, 44, S. 259-274.
-
- [15] K. Heutschi (2003). *Parameter Study of the Insertion Loss Reduction in Case of a Building Facade Parallel to a Noise Barrier*. Acta Acustica united with Acustica, 89, S. 908-912
-
- [16] K. Heutschi, R. Bayer (2006). *Sound Radiation From Railway Tunnel Openings*. Acta Acustica united with Acustica, 92, S. 567-573
-
- [17] K. Heutschi (2008). *Sound propagation in railway line cutting*. Applied Acoustics, 69, S. 1189-1194.
-
- [18] K. Heutschi (2009). *Calculation of reflections in an urban environment*. Acta Acustica united with Acustica, 95, S. 644-652
-
- [19] Maarten Hornikx, Jens Forssén (2008). *A Scale Model Study of Parallel Urban Canyons*. Acta Acustica united with Acustica, 94, S. 265-281
-
- [20] D.A. Hutchins, D. Pitcarn (1983). *A laser study of multiple reflections within parallel noise barriers*. J. Acoustical Society America, 73, S. 2216-2218.
-

-
- [21] M.R. Ismail, D.J. Oldham (2005). *A scale model investigation of sound reflection from building façades*. Applied Acoustics, 66, S. 123-147.
-
- [22] R. Janczur, E. Walerian, M. Czechowicz (2001). *Sound levels forecasting for city-centers Part III: a road lane structure influence on sound level within urban canyon*. Applied Acoustics, 62, S. 493-512.
-
- [23] Jian Kang (2000). *Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries*. J. Acoustical Society America, 107, S. 1394-1404.
-
- [24] Jian Kang (2005). *Numerical modeling of the sound fields in urban squares*. J. Acoustical Society America, 117, S. 3695-3706.
-
- [25] W.-D. Knop (1979). *Zur Abschirmwirkung von Bauelementen gegenüber Strassenverkehrslärm*. Applied Acoustics, 12, S. 195-213.
-
- [26] K. P. Lee, H. G. Davies (1975). *Nomogram for estimating noise propagation in urban areas*. J. Acoustical Society America, 57, S. 1477-1480.
-
- [27] T. Le Polles, J. Picaut, M. Berengier (2004). *Sound field modeling in a street canyon with partially diffusely reflecting boundaries by the transport theory*. J. Acoustical Society America, 116, S. 2969-2983.
-
- [28] S.R.Mehra (2003). *Schallabstrahlung von Tunnelportalen*. DAGA, S. 420-421.
-
- [29] K. K. Lu and K. M. Li (2002). *The propagation of sound in narrow street canyons*. J. Acoustical Society America, 112, S. 537-550.
-
- [30] Kai Ming Li, Man Pun Kwok, Ming Kan Law (2008). *A ray model for hard parallel noise barriers in high-rise cities*. J. Acoustical Society America, 123, S. 121-132.
-
- [31] Judicaël Picaut, Isabelle Schmich, Jérôme Defrance, Philippe Woloszyn, Aline Barlet, Françoise Chartier (2006). *Effects of diffuse reflection by building façades on the sound propagation and soundscapes in urban areas*. Euronoise 2006.
-
- [32] S.R.Mehra (2001). *Lärmpegelerhöhung durch eine Lärmschutzwand*. IPB Mitteilungen Fraunhofer Institut, 28, 392.
-
- [33] S.R. Mehra, M. Rosas (2003). *Schallabstrahlung von Tunnelportalen*. Zeitschrift für Lärmbe-kämpfung, 50, 6.
-
- [34] K. Eggenschwiler, K. Heutschi, N. Lüthi-Freuler (2001). *Optimaler Lärmschutz dank akustischer Modellmessung*. Tec21, 7, S. 7-10.
-
- [35] H. Tiefenthaler, E. Kammeringer, H. Kubasta (1990). *Verkehrsschallpegel an einer Strassengalerie mit vorgelagertem Lärmschutzwall*. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 135, 6, S. 272-276.
-

Projektabschluss

Formular 3 ARAMIS SBT als PDF (Das Formular einscannen, dann das PDF öffnen und dann mit dem Schnappschuss-Werkzeug (Fotoapparat) die Seiten markieren und dann hier einfügen).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 05.10.2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2006/204
Projekttitel: Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich
Enddatum: September 2012

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel des Projekts war es, das Erkennen und die Berechnungsmethodik der Lärmimmissionen zu verbessern. Die wichtigsten Resultate der Untersuchung sind:

- Es treten mit dem heute hauptsächlich verwendeten Spiegelquellenmodell bereits bei einfacheren Situationen erhebliche Abweichungen zur effektiven Lärmbelastung auf.
- Mit einem Reflexionsmodell, das die Fresnelzonen mit einbezieht, lassen sich gewisse Unzulänglichkeiten, die aus der starren Geometrie des Spiegelquellenmodells herrühren, vermindern.
- Mit einem Flächenmodell werden teils recht gute Resultate erreicht, in einzelnen Situationen kann es aber auch zu abweichenden Resultaten führen. Das Flächenmodell hat sich generell als interessanter Ansatz erwiesen und kann, vor allem auch in Kombination mit anderen Berechnungsmethoden, interessante Hinweise liefern resp. Schwächen auskorrigieren.
- Mit dem Massstabmodell konnten interessante Erkenntnisse über die Immissionen in der Umgebung von Unterführungen sowie dem Nutzen einer teilweise oder vollständig absorbierenden Auskleidung gewonnen werden.
- Es wurden Kriterien und Empfehlungen für den Einsatz der verschiedenen Methoden zur Ermittlung der Lärmbelastung erarbeitet. Diese können unmittelbar in der Praxis zur Beurteilung bei bezüglich Lärmimmissionen komplexer Bauvorhaben umgesetzt werden.

Zielerreichung:

Grundsätzlich sind alle Ziele des Forschungsprojekts erreicht worden, wobei bei einzelnen Zielsetzungen sich die Schwerpunkte im Laufe der Bearbeitung geändert haben:

- Der Einfluss der Reflexionen bei verschiedenen Bauwerkstypen wurde aufgezeigt.
- Es wurden Modelle für die Quantifizierung der Reflexionsanteile getestet und teilweise auch entwickelt. Es zeigte sich aber, dass alle Modelle, ausgenommen die auf der Wellentheorie basierenden oder die Massstabsmodelle, Schwächen aufweisen und schon bei relativ einfachen Situation von der effektiven Immissionssituation deutlich abweichende Resultate liefern können. Dies ist für die künftige Beurteilung von Lärmsituationen anhand von Lärmberechnungen ein wichtiges Resultat.
- Es konnten zwar keine klar definierten Beurteilungskriterien für die Festlegung von absorbierenden Massnahmen erarbeitet werden, dafür konnten Kriterien und eine Empfehlung für den Einsatz der Berechnungsmethoden erarbeitet werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die vorliegende Arbeit liefert wertvolle Impulse für die Beurteilung der Lärmimmissionen und den Einsatz von Berechnungsmodellen in komplexen Situationen. Sie gibt zudem für die Praxis interessante Hinweise für Prognosegenauigkeit von Lärmberechnungsprogrammen.

Die Ansätze des Flächenmodells verdienen es, vertieft auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis geprüft zu werden.

Publikationen:

Neben dem Forschungsbericht sind die folgenden Publikationen vorgesehen:

- Strasse und Verkehr: Artikel mit Schwerpunkt Absorption in Unterführungen
- Umfassende Publikation in Fachzeitschrift oder an Kongress (noch offen)

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Weber

Vorname: Markus

Amt, Firma, Institut: Basler & Hofmann, ingenieure, Planer und Berater, 8133 Esslingen

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Begleitkommission teilt die Beurteilung der Forschungsstelle. Die Empfehlungen und die Hinweise auf die Schwächen der Modellansätze können in der Praxis angewendet werden.

Umsetzung:

Diejenigen Stellen, welche für die Publikation von Lärmberechnungsmodellen zuständig sind, sollten die Empfehlungen der Forschung in ihre Dokumente aufnehmen. Sie können auch direkt anhand des Forschungsberichtes angewendet werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Im vorliegenden Rahmen besteht momentan kein weiterer Forschungsbedarf. Mittelfristig ist es sinnvoll, die Modelle zu verfeinern. Diese Forschung müsste in einem umfassenderen Rahmen stattfinden.

Einfluss auf Normenwerk:

Da die Strassenlärmberechnungsmodelle nicht im VSS-Normenwerk enthalten sind, hat die Forschung keinen Einfluss darauf.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Stauber

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: BBS Ingenieure AG, Gertrudstrasse 17, 8400 Winterthur

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

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

1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011

1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> <i>Innovative approaches to parking management</i>	2012

1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012
------	--------------	--	------