
Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 381

Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

von

Paul Lindner, Mirko Ruhnau, Christian Schulze

Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 381

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 02.0419
Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Fachbetreuung:
Wolfram Bartolomaeus

Referat:
Umweltschutz, Immissionen

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 | Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-794-5 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v381>

Bergisch Gladbach, Oktober 2024

Kurzfassung – Abstract

Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Gegenstand des Vorhabens ist die Durchführung dreidimensionaler Simulationen zur Bewertung der akustischen Wirksamkeit beliebig geformter bzw. mit unterschiedlicher Impedanz belegter Lärmschutzwände (Lsw) zum Schutz gegen Straßenverkehrslärm. Das Ziel ist die Erstellung von Berechnungsmodulen, die die dreidimensionalen Berechnungsergebnisse in analytische Beschreibungen für die 2½-dimensionale Berechnungsmethode überführt, die beispielsweise in einer überarbeiteten Version der „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS“ verwendet werden können.

Zu diesem Zweck wird zu Beginn der Stand der Technik durch eine Studie der einschlägigen Forschungsergebnisse der letzten Jahre auf dem Gebiet der Einfügungsdämpfung und der Reflexion von Lsw – vor allem solcher Schallschirme, die sich von der konventionellen ebenen, senkrecht stehenden Bauweise unterscheiden – zusammengefasst.

Anschließend erfolgt die Konzeption der angestrebten 3D-Simulationen der Schirmwirkung – insbesondere im Fernfeld der von der Quelle abgewandten Seite – verschiedener abgeknickter und gekrümmter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw. Zusätzlich wird die quellseitige Reflexion dieser Lsw und die damit verbundene potenzielle Pegelerhöhung an Immissionsorten auf der Quellseite der Lsw betrachtet.

Im dritten Teil werden die geplanten numerischen Simulationen durch Anwendung der Finite-Elemente-Methode durchgeführt und ausgewertet. Bei der Auswertung wird der Fokus neben dem spektralen Schirmmaß insbesondere auf die Einfügungsdämpfung der jeweiligen komplexen Lsw gegenüber einer geraden, schallharten Lsw an der Position der ersten Beugungskante (Referenz) gelegt.

Abschließend erfolgt die Erstellung analytischer Beschreibungen zur Berücksichtigung der spektralen Wirksamkeit abgeknickter und gekrümmter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw in Form von Zusatzdämpfungen gegenüber der Referenz für die Anwendung innerhalb der DIN ISO 96132 oder einer überarbeiteten Version der RLS.

Acoustic effectiveness of kinked and curved noise screens

Subject of the project is the execution of 3D simulations to evaluate the acoustic effectiveness of kinked and curved screens as well as noise barriers of variable surface impedance for protection against road traffic noise. The goal is the development of computational models that transfer the 3D calculation results to analytical descriptions for the 2½D computational method which can be applied, for instance, within a revised version of the “Guidelines for noise protection at roads – RLS”.

For that purpose, at first, the state-of-the-art in the field of insertion loss and reflection of screens – especially such noise barriers that differ from the conventional, plane, vertically standing construction type – is summarized by reviewing the latest existing literature and research results.

Subsequently, the conception of the intended 3D simulations of the screening effect – especially in the far field of the side facing away from the source – of various kinked and curved screens as well as noise barriers with variable surface impedance is carried out. Additionally, the source side reflection of such screens together with the resulting potential level increase at points of sound immission on the source side of the noise barrier is examined.

In the third section, by applying the Finite Element Method, the projected numerical simulations are carried out and examined. During the evaluation, besides the spectral screening effect, the focus was especially set to the insertion loss of the particular complex noise barrier in comparison to the one of a straight, rigid noise barrier at the position of the relevant diffraction edge (reference).

Concluding, analytical descriptions are developed to consider the spectral effectiveness of kinked and curved screens as well as noise barriers with variable surface impedance in the form of additional attenuation terms compared to the reference that can be applied within DIN ISO 96132 as well as a revised version of the RLS.

Summary

Acoustic effectiveness of kinked and curved noise screens

1 Introduction

Noise barriers (screens) serve the screening of points of immission, such as residential areas, against unwanted noise. In contrast to conventional, plane, vertically installed screens, especially kinked and curved noise screens can bring the first diffraction edge closer to the noise source in question. This can lead to an increase of the acoustic effectiveness at points of immission on the side of the screen facing away from the source.

To be able to consider the full potential of noise reduction and to make detailed statements regarding the noise situation when designing noise protection systems, it is important to have computational models available that are as accurate as possible. For kinked and curved screens as well as noise barriers of variable surface impedance, such computational models do not exist yet within the current “Guidelines for noise protection at roads – RLS”. Therefore, within the present project, such models were to be developed. For this purpose, numerical 3D simulations of the sound propagation in the area of such specific noise barriers were to be carried out.

2 Review of Literature

In the first section, existing publications in the field of insertion loss and reflection of screens were compared and discussed. It became apparent that the acoustic effectiveness of complex geometries of screens and crown elements for noise barriers to influence the sound diffraction above the top edge of the screen has been widely investigated. In most cases, it was confirmed that such systems improve the effectiveness of screens in their shadow area. Cylindrical attachments to noise barriers and Tshaped profiles theoretically bring a high insertion loss, especially sound absorbing or low-impedance designs. But also curved and kinked screens improve the acoustic effectiveness in most cases. Latter ones especially allow to vary between different alignments (facing towards or away). Thereby, for most geometries, screens facing the road represent the safer option, because local level increases occur more rarely for such curved and kinked noise barriers, although the acoustic effectiveness may locally turn out lower than for construction types facing away from the road.

Regarding the surface impedance of screens, numerous investigations prove that an absorbent lining of single areas of screens and crown elements can already lead to a significant improvement of the acoustic effectiveness. It is stated in several publications that a low-impedance design, especially of the top edge and the attachment to noise barriers, allows a further increase in effectiveness.

3 Conception of Simulations

For the conception of the numerical simulations to determine the screening effect of various complex noise barriers – especially in the far field of the side facing away from the source – it appeared to be expedient to investigate curved and kinked screens that face towards the road with partial absorbent lining at the inner side and the top edge (see Figure 3.1). In order to obtain as general statements as possible, the focus was set to the influence of different geometrical parameters as well as the impedance of the partial areas on the effectiveness for different source-barrier-receiver geometries.

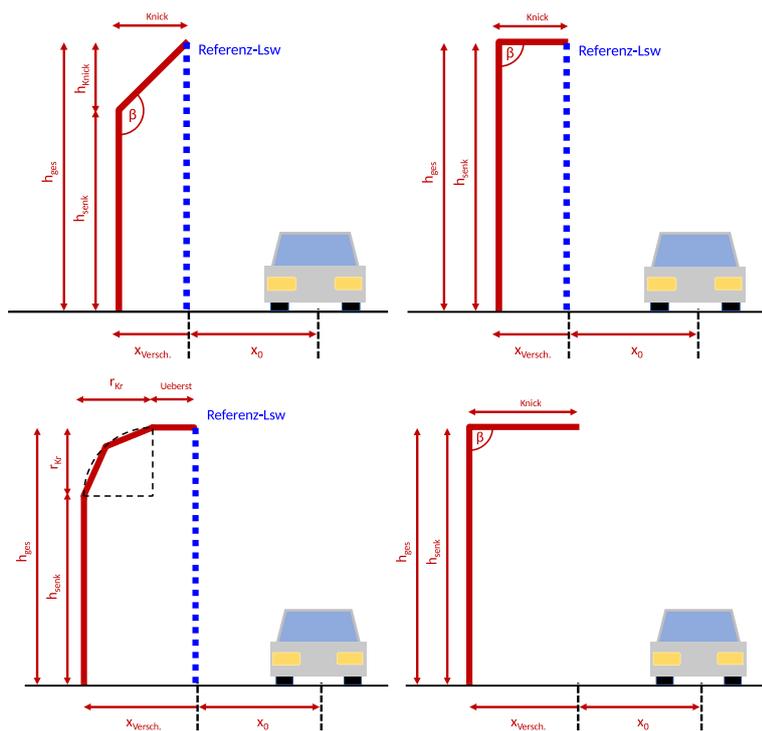


Fig. 3.1: Geometries of selected investigated screens (not true to scale); from top left to bottom right: single-kinks E1 and E3, triple-kink D1, single-kink, top edge with absorbent lining A4

In order to reproduce the road, which in reality can be seen as an incoherent line source, as realistically as possible, 3D FEM simulations were used. For the creation of a model in accordance with the RLS, this line source was discretized in the form of individual point sources, whose effect at the point of immission was added energetically and weighted with respect to the length of the section (determination of the effect of a complete vehicle pass-by).

During the conception, it quickly came apparent that a complete numerical computational model generated to carry out 3D simulations exceeds the available calculation capacities by far. Since the application of the FEM requires the complete meshing of the air volume between sound source and receiver, the total number of calculation points increases by the third power with frequency. At the same time, it must be ensured that the sound immission behind the noise barrier is dominated by the sound propagation over the top of the screen and that the sound propagation around the side edges of the screen can be neglected. Especially when simulating the sound propagation for large source angles, the size of the computational model increases immensely with complete meshing.

For the successful execution of the 3D simulations, an advantage of the FEM was used, and the numerical computational model was limited laterally by applying so-called PMLs (Perfectly Matched Layers, see Figure 3.2, Figure 3.3). These PMLs create a match of the acoustic impedance in the boundary area of the computational field in such a way, as no relevant sound reflection in direction of the interesting center of the computational field and thus no relevant influence on the computational results occurs in this area.

A “rotation” of the screen for the various source angles, as it occurs within the analytical calculation in the RLS (see Figure 3.4), was not applied within the 3D simulations. However, when validating the generated numerical computational model, it was shown that the calculation of the spectral insertion loss of a simple vertical noise barrier is not influenced by such “rotation” (see Figure 3.5, top). With respect to kinked and curved screens, this statement is not valid. Because of the constructive superposition of incident wave parts and the wave parts being reflected at the front side of the screen – and the associated occurrence of local spectral minima and maxima of the sound field in the area around the screen (interference pattern) – the 3D geometry of the screen as well as the source angles play an important role for the exact determination of the frequency-dependent effectiveness.

Within the project, however, it could be shown that this statement can be relativized above approximately 500 Hz as soon as a complete vehicle pass-by instead of a single source angle as well as octave bands instead of single frequency lines are considered. As a result of the resulting both spatial and spectral averaging of the interference pattern of the sound field in the area around the noise screen, the 3D and 2D simulations give identical results to a large extent (see Figure 3.5, bottom). Thus, by means of 2D simulations, the evaluation of the acoustic effectiveness of the investigated noise barriers could be expanded to the energetically relevant higher-frequency range of the traffic noise spectrum as well as to bigger source-receiver-distances.

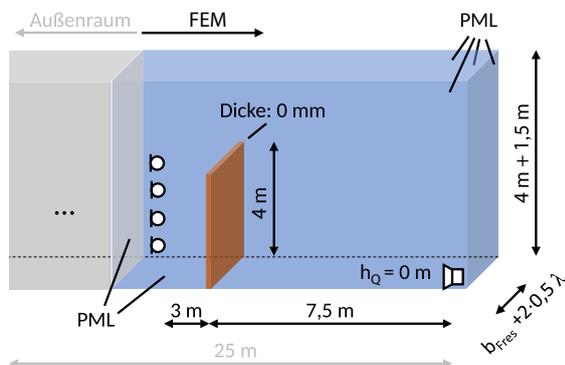


Fig. 3.2: Computational model with source-receiver-distance for 3D FEM simulation

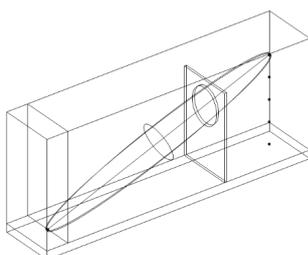


Fig. 3.3: 3D aspect of numerical computational model for simulation of sound propagation above rigid, straight screen; determination of required minimum length of screen to be modelled based on the Fresnel zone model; third-octave band 1 kHz; source angle 0°

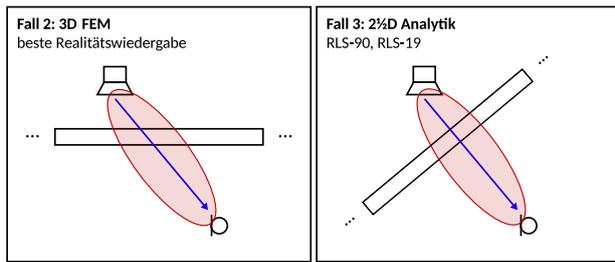


Fig. 3.4: Schematic diagram of different procedures to simulate the sound propagation near screens

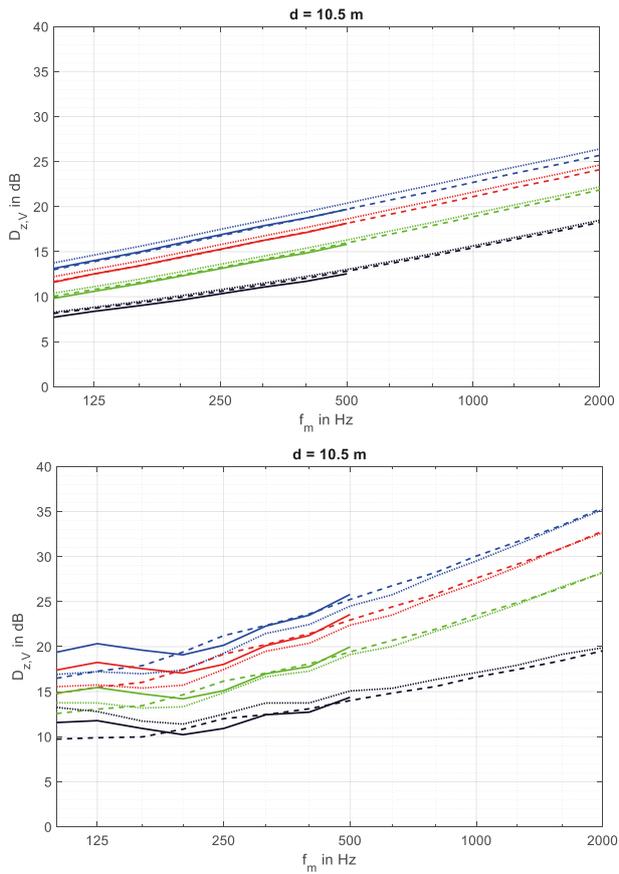


Fig. 3.5: Third-octave band spectrum of pass-by screening effect of straight noise barrier G (top) and single-kink E3 (bottom) for different receiver heights h ; source-receiver-distance $d = 10,5$ m; continuous: 3D-FEM; dashed: 2D FEM; dotted: analytical computation; blue: $h = 1$ m; red: $h = 2$ m; green: $h = 3$ m; black: $h = 4$ m

4 Implementation & Evaluation

During the evaluation of the simulations, besides the spectral screening effect, the focus was set especially to the insertion loss of the particular complex noise barrier in comparison to the one of a straight, rigid noise barrier at the position of the relevant diffraction edge (reference). The numerical calculations show that a single-kinked screen with flap angle of 90° can provide a reliable level reduction beyond the effectiveness of the reference (see Figure 3.5, Figure 4.1). In fact, for single-kinked screens with a flap angle greater than 90° as well as for the investigated triple-kinked noise barrier, a positive effectiveness compared with the reference occurs as well. However, this is limited to a small area behind the screen. At greater distance, the screening effect of such noise barriers approaches the one of the reference.

Investigations regarding an additional application of a variable surface impedance at single-kinked screens with a flap angle of 90° showed that an absorbent lining at the inner side (facing the source) of the noise barrier does not have any positive influence on the effectiveness in the shadow area. On the other hand, an absorbent lining of the top edge of the single-kinked noise barrier with a sound absorption coefficient greater than 0,5 can lead to a significant increase of the screening effect. This increase turns out the higher, the greater the length of the absorbing flap of the screen is and the higher the sound absorption coefficient is.

The numerical investigations carried out with reference to the source side sound reflection at curved and kinked screens showed that no significant increase of the sound pressure level greater than 1 dB is to be expected at the relevant point of sound immission on the source side of the noise barrier due to the geometrical change of the screen compared to the rigid, vertical reference. Thereby, spectral level increases and reductions are always very locally limited and mostly cover a height range of significantly less than 1 m. In return, by source side absorbent lining of the screen, a reliable level reduction compared to a rigid noise barrier can be achieved.

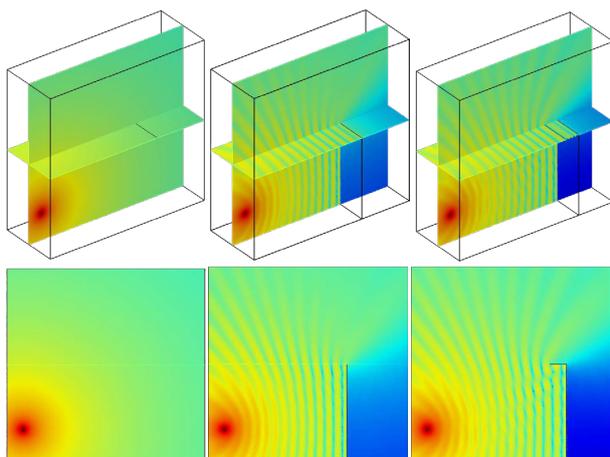


Fig. 4.1: Sound pressure level for single frequency 315 Hz of 3D FEM; source angle $\phi = 0^\circ$; from top left to bottom right: free field, straight screen G, single-kink E3; top: 3D sectional view; bottom: vertical sectional view

5 Computational Model

Concluding, based on results of the numerical investigations, analytical add-on terms were developed to consider the spectral effectiveness of kinked and curved screens as well as noise barriers with variable source impedance that can be applied within DIN ISO 96132 as well as a revised version of the RLS.

It was especially discussed, to what extent it is possible to state generalizations for particular practical applications and which influencing factors are required as input parameters to these modules.

It was considered expedient to describe the effectiveness of kinked screens with a flap angle of 90° by means of a simplified calculation method. The remaining geometries, on the other hand, can be considered within the calculation of sound propagation in such a way, that instead of the noise barrier of complex geometry, a straight, rigid, vertical screen is included to the propagation model whose top edge is located at the position of the first diffraction edge of the complex screen. In a small part of the close range of the screen, the effectiveness of the noise barrier is thereby underestimated. It is therefore a calculation on the safer side. To consider absorptively lined, single-kinked screens, a simplified calculation of an additional attenuation term was created depending on geometrical parameters as well as the sound absorption coefficient.

In contrast to the numerical simulations carried out, the analytical computational model of AED, which was extended by the sound propagation over obstacles with two diffraction edges according to [Plovsing 2001], allowed the calculation of the spectral pass-by shielding of single-kinked noise barriers with a flap angle of 90° . Those calculations were carried out for a variety of source-receiver-geometries and parameter combinations of the screen (e. g. height, flap length). Subsequently, the gained results were applied to a regression (see Figure 5.1) based on the parameter of the virtual height which was found to be relevant beforehand (see Figure 5.2) to describe an additional attenuation term to consider the geometry of such construction type. The development of an additional attenuation term to simultaneously consider a top edge flap with absorbent lining was carried out in simplified form.

Concluding, the effectiveness of a single-kinked and a triple-kinked noise barrier can be determined in up to three steps. At first, in all cases, the calculation of the effectiveness of a vertical, rigid reference screen is carried out that is located at the position of the first diffraction edge, according to technical guidelines, e. g. DIN ISO 96132. Provided that the flap angle of a single-kinked screen equals 90° , the developed additional attenuation term to consider the geometry is to be added. In case that the top edge of the same screen has absorbent lining, the developed additional attenuation term to consider the impedance must also be assigned. All calculations are carried out separately for individual octave bands (see Figure 5.3).

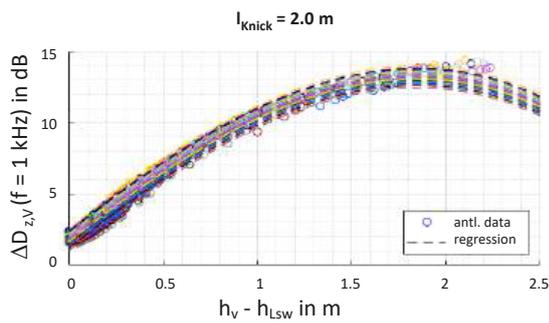


Fig. 5.1: Data points and regression for octave band 1 kHz and flap length $l_{\text{Knick}} = 2,0$ m; each color represents a combination of screen height h_{Lsw} and source distance to the screen x_0

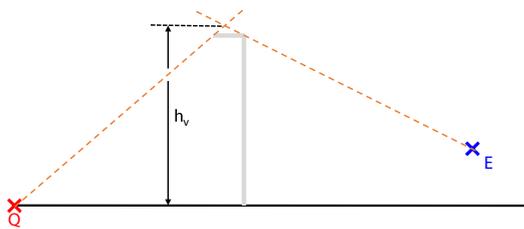


Fig. 5.2: Determination of virtual height of screen h_v

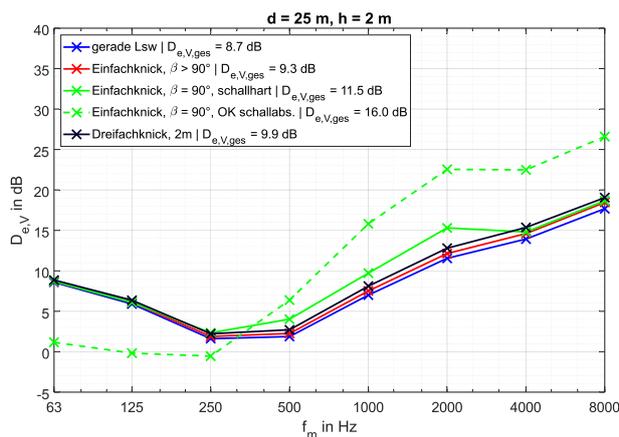


Fig. 5.3: Insertion loss of various screens (see Figure 3.1) by application of developed additional attenuation terms as octave spectrum; source-receiver-distance $d = 25$ m; receiver height $h = 2$ m; blue: straight screen (rigid) at 7,50 m distance to road; red: single-kink with flap angle $>90^\circ$ (projection 1 m, identical base point); green continuous: single-kink with flap angle 90° (kink length 1 m, rigid, identical base point); green dashed: single-kink with flap angle 90° (kink length 1 m, top edge with absorbent lining, identical base point); black: triple-kink (projection 2 m, rigid, identical base point)

References

PLOVSING, B.; KRAGH, J.: Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction / DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics. 2001 (AV 1849/00). – Report on behalf of Nordic Noise Group

Inhalt

1	Einleitung	15
2	Stand der Wissenschaft und Technik, Literaturstudie	16
2.1	Beliebig geformte Lärmschutzwände	16
2.1.1	Übersicht existierender Geometrien von Lärmschutzwänden	16
2.1.2	Abnickende Lärmschutzwände	17
2.1.3	Gekrümmte Lärmschutzwände	20
2.1.4	T-Profil	23
2.1.5	Zylindrische Schirmkronen	25
2.1.6	Weitere Geometrien von Lärmschutzwänden	26
2.2	Unterschiedlich mit Impedanz belegte Lärmschutzwände	27
2.3	Schallausbreitungsmodelle und Berechnungsansätze	31
2.4	Normen und Berechnungsvorschriften	33
2.5	Schallausbreitungsmodell AED	35
2.5.1	Schallausbreitungseffekte	36
2.5.2	Rechnerische Umsetzung	37
2.6	Fazit	41
3	Simulationen	42
3.1.1	Modellerstellung	43
3.1.2	Modellvalidierung	51
3.1.3	Test-Szenarien	56
3.2	Durchführung	65
3.2.1	Erste Berechnungsergebnisse	65
3.2.2	Ermittlung der akustischen Wirksamkeit	69

3.3	Auswertung	73
3.3.1	Berechnungsergebnisse	73
3.3.2	Gegenüberstellung	77
3.3.3	Weiterführende Untersuchungen	82
4	Erarbeitung eines Berechnungsalgorithmus	116
4.1	Analytische Berechnungen	116
4.2	Regression anhand von Berechnungsergebnissen	120
4.3	Berechnungsmodell	130
4.3.1	Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90°	130
4.3.2	Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90°	131
4.3.3	Berechnung der Wirksamkeit einer dreifach geknickten Lsw	133
4.3.4	Berechnung der Wirksamkeit einer einfach geknickten, mit Impedanz belegten Lsw	133
4.4	Exemplarische Berechnung	134
5	Zusammenfassung	137
	Literatur	141
	Bilder	146
	Tabellen	157

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

Gegenstand des Vorhabens ist die Durchführung dreidimensionaler Simulationen zur Bewertung der akustischen Wirksamkeit beliebig geformter bzw. mit unterschiedlicher Impedanz belegter Lärmschutzwände (Lsw) zum Schutz gegen Straßenverkehrslärm. Das Ziel ist die Erstellung von Berechnungsmodulen, die die dreidimensionalen Berechnungsergebnisse in analytische Beschreibungen für die 2½-dimensionale Berechnungsmethode überführt, die beispielsweise in einer überarbeiteten Version der „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS“ verwendet werden können.

Zu diesem Zweck wird zu Beginn der Stand der Technik durch eine Studie der einschlägigen Forschungsergebnisse der letzten Jahre auf dem Gebiet der Einfügungsdämpfung und der Reflexion von Lsw beleuchtet, insbesondere solcher Schallschirme, die sich von der konventionellen, ebenen, senkrecht stehenden Bauweise unterscheiden. Anschließend erfolgt die Konzeption der angestrebten 3D-Simulationen der Schirmwirkung – insbesondere der Pegelminderung im Fernfeld der von der Quelle abgewandten Seite – verschiedener abgelenkter und gekrümmter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw. Zusätzlich wird die quellseitige Reflexion dieser Lsw und die damit verbundene potenzielle Pegelerhöhung an Immissionsorten auf der Quellseite der Lsw betrachtet. Im dritten Teil werden die geplanten numerischen Simulationen durch Anwendung der Finite-Elemente-Methode durchgeführt und ausgewertet. Abschließend erfolgt die Erstellung analytischer Beschreibungen zur Berücksichtigung der spektralen Wirksamkeit der untersuchten unterschiedlich geformten bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegten Lsw für die Anwendung innerhalb der [DIN ISO 96132] oder einer überarbeiteten Version der RLS.

2 Stand der Wissenschaft und Technik, Literaturstudie

Zur Ermittlung des Stands der Technik wurde eine zweckmäßige Literaturstudie angefertigt. Durch diese wird die Bandbreite bisheriger experimenteller, messtechnischer und simulativer Untersuchungen aufgezeigt. In die Recherche wurden insbesondere nationale und internationale Quellen einbezogen, die die folgenden Bereiche betreffen:

- experimentelle und messtechnische Studien, die sich mit der akustischen Wirksamkeit von
 - abgelenkten Lsw,
 - gekrümmten Lsw und
 - mit unterschiedlicher Impedanz belegten Lsw beschäftigen;
- existierende Schallausbreitungsmodelle und Ansätze zur Vorhersage der durch abgelenkte, gekrümmte und mit unterschiedlicher Impedanz belegte Lsw zu erwartenden Lärminderung;
- bestehende Standards und Regelwerke, die die akustische Wirksamkeit abgelenkter, gekrümmter und mit unterschiedlicher Impedanz belegter Lsw berücksichtigen.

2.1 Beliebige geformte Lärmschutzwände

2.1.1 Übersicht existierender Geometrien von Lärmschutzwänden

Es existieren zahlreiche Geometrien von Lsw, mithilfe derer eine Verringerung der Lärmeinwirkung von Straßen auf Immissionsorte bei gleichzeitig verhältnismäßig geringer Wandhöhe erzielt werden soll. Eine Auswahl existierender Geometrien von Lsw ist in Bild 2-1 dargestellt. Bild 2-2 zeigt zudem exemplarisch einen Lsw-Aufsatz zur Beeinflussung der Beugung über die Oberkante (ähnlich einem T-Profil mit Resonatoren).

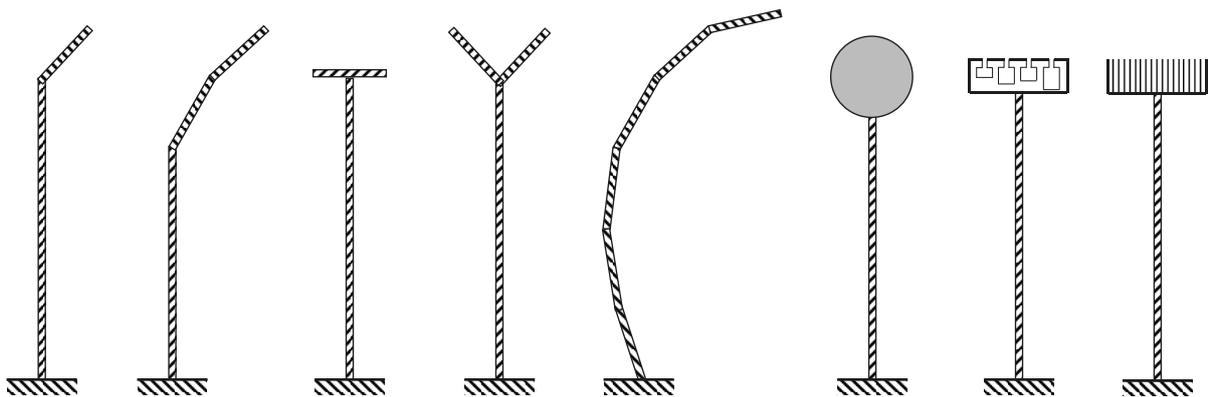


Bild 2-1: Verschiedene Geometrien von Lsw (Auswahl; Schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung); von links nach rechts: abgelenkt/Klappen-Profil, doppelt abgelenkt/doppeltes Klappen-Profil, T-Profil, Y-Profil, gekrümmte Lsw, zylindrische Schirmkrone, T-Profil mit Helmholtz-Resonatoren, T-Profil mit $\lambda/4$ -Resonatoren



Bild 2-2: Diffraktor WHIS®top der niederländischen Firma 4Silence aus (4SILENCE 2020)

Die verschiedenen Geometrien von Lsw unterlagen bereits zahlreichen Untersuchungen mithilfe verschiedener Simulationsmodelle, In-situ-Messungen sowie Modellmessungen. Nachfolgend ist der Stand der Wissenschaft und Technik in Form einer Literaturstudie getrennt für die verschiedenen existierenden Geometrien zusammengefasst. Dabei liegt der Fokus auf den innerhalb dieses Forschungsvorhabens betrachteten gekrümmten, geknickten und mit unterschiedlicher Impedanz belegten Lsw.

2.1.2 Abknickende Lärmschutzwände

Zuchowski 2019

Um die akustische Wirksamkeit verschiedener Lsw-Aufsätze zu untersuchen, erfolgten in [Zuchowski 2019] Messungen im reflexionsarmen Raum sowie Berechnungen mittels SoundPLAN. Unter Verwendung einer Punktschallquelle wurde in verschiedenen horizontalen Distanzen sowie unterschiedlichen Höhen die Einfügdämpfung der Lsw mit Aufsatz bestimmt. Dabei konnte für alle untersuchten Profiltypen (Klappe, Y-Profil, Zylinder, mehrfach geknickte Oberkante) eine Verbesserung der akustischen Wirksamkeit der zwei Meter hohen Lsw in deren Schattenbereich nachgewiesen werden. Die größte Verbesserung stellte sich dabei für jene Profile ein, bei denen ein Abknicken der Oberkante in Richtung der Schallquelle erfolgt. Es zeigte sich, dass die akustische Wirksamkeit der Aufsätze mit zunehmender Empfängerhöhe abnimmt.

Kokavec 2011

In [Kokavec 2011a] und [Kokavec 2011b] erfolgten umfassende Simulationen der Einfügdämpfung von Lsw mit klappenförmigen Aufsätzen. Der Boden blieb dabei jedoch unberücksichtigt, die Modellierung der Lsw erfolgte als halbbunendliche Schneide. Es konnte gezeigt werden, dass eine Verbesserung der akustischen Wirksamkeit von Lsw durch das Aufbringen eines klappenförmigen Aufsatzes erreicht werden kann, die über die Wirksamkeit einer einfachen (senkrechten) Erhöhung der Lsw hinausgeht. Dies gilt insbesondere für Schallquellen, die sich nah am Boden befinden und deren Entfernung zur Lsw gering ist. In Bild 2-3 ist exemplarisch das Einfügdämmmaß einer Lsw mit klappenförmigem Aufsatz aus [Kokavec 2011b] dargestellt. Vor allem nah der Oberkante ist der Einfluss auf die Schallbeugung durch die abgeknickte Form der Lsw deutlich zu erkennen.

Es wurde in [Kokavec 2011b] zudem untersucht, wie sich der Winkel zwischen Schallquelle und Lsw sowie der Klappen-Öffnungswinkel auf die akustische Wirksamkeit der Maßnahme auswirken. Zu diesem Zweck erfolgten eine Messung sowie eine Simulation bei unterschiedlicher Quellhöhe und verschiedenen Klappen-Öffnungswinkeln. Die Skizze zur Veranschaulichung der variierten geometrischen Parameter sowie das ermittelte

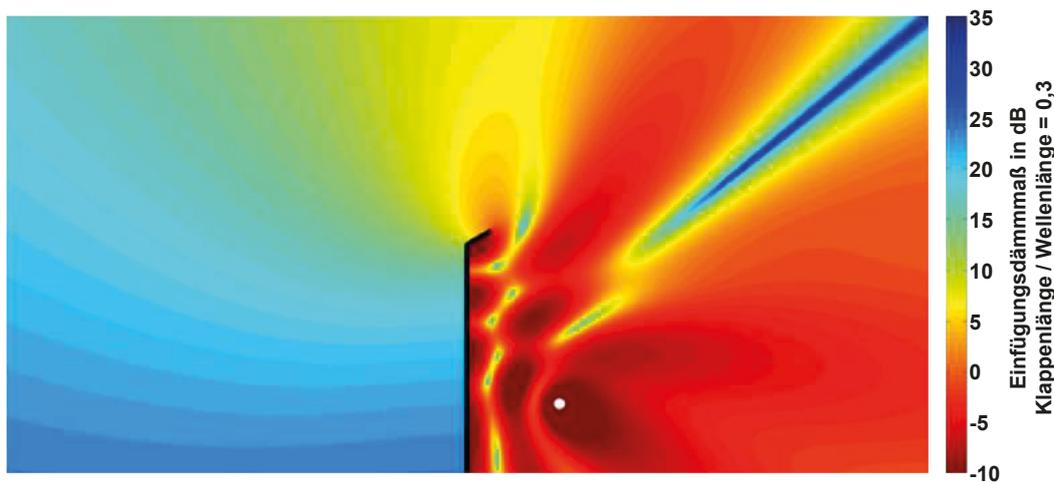


Bild 2-3: Einfügungsdämmmaß einer Lsw mit klappenförmigem Aufsatz aus [Kokavec 2011b]

Verbesserungsmaß (die Minderung des Immissionsschalldruckpegels durch den Aufsatz gegenüber dem Immissionsschalldruckpegel an einer einfachen, senkrechten Wand) sind in Bild 2-4 dargestellt. Für den Quellwinkel von 90° (entspricht einer Quelle auf der Höhe der Lsw-Oberkante) ergibt sich erwartungsgemäß die höchste Verbesserung bei einem Klappen-Öffnungswinkel von 180° (entspricht einer einfachen Erhöhung der senkrechten Wand). Bei einem Quellwinkel von 30° hingegen ist ein Maximum der akustischen Wirksamkeit des Aufsatzes von ca. 6 dB bei etwa 60° bis 80° Klappen-Öffnungswinkel erkennbar. In diesem Winkelbereich ist die Wirksamkeit des Aufsatzes ca. 2 dB höher als bei einer senkrechten Erhöhung der Klappe. Der Berechnung des Gesamt-Einfügungsdämmmaßes liegt ein Verkehrslärmspektrum zugrunde.

In [Kokavec 2011a] wird auf Grundlage der Mess- und Simulationsergebnisse zusammengefasst, dass mithilfe der Geometrie einer abknickenden Lsw eine bessere akustische Wirksamkeit erreicht werden kann als mithilfe von T-Profilen. Die akustische Wirksamkeit der Aufsätze ist dabei jedoch stark von der Quellposition abhängig (siehe Bild 2-4). Zudem ist eine Wirksamkeit des Aufsatzes nur dann gegeben, wenn der Klappen-Öffnungswinkel φ_K größer ist als der Quellwinkel φ_Q (vgl. Bild 2-4, links). Mithilfe der Klappenlänge kann die Frequenzabstimmung des Aufsatzes vorgenommen werden.

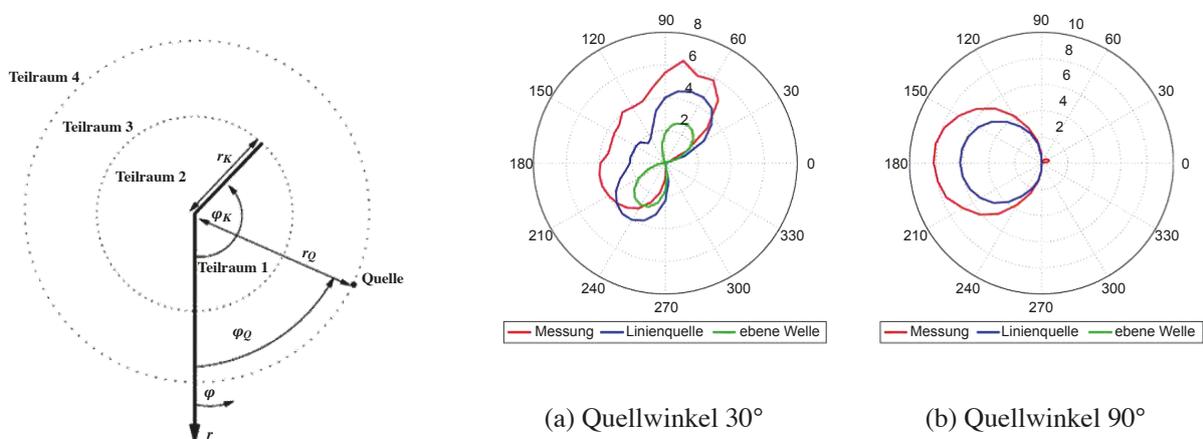


Bild 2-4: Verbesserungsmaß eines klappenförmigen Lsw-Aufsatzes (Einfügungsdämpfung gegenüber senkrechter Wand); links: Geometrieparameter; mittig: Mess- und Berechnungsergebnis für Quellwinkel von 30° ; rechts: Mess- und Berechnungsergebnis für Quellwinkel von 90° aus [Kokavec 2011b]

Hoislbauer 2014

In [Hoislbauer 2014] wird anhand von Modellmessungen im Maßstab 1:4 gezeigt, dass eine um 45° zur Schallquelle hin abgeknickte Lsw gegenüber einer senkrechten Wand gleicher Höhe eine Verbesserung von bis zu ca. 8 dB an einer nahen, hohen Empfängerposition bewirken kann. Für bodennahe und weiter entfernte Empfängerpositionen ergibt sich eine Verbesserung von ca. 3 dB. Eine von der Quelle weg abgeknickte Lsw hingegen weist ausschließlich in Bodennähe einen positiven Effekt gegenüber einer senkrechten Lsw auf, der mit zunehmender Distanz abnimmt. In höheren Empfängerpositionen ergibt sich eine teils deutliche Verringerung der akustischen Wirksamkeit gegenüber der senkrechten Wand, wenn durch das Abknicken die Abschirmung der Quelle an der Empfängerposition wegfällt.

Waubke 2013

In [Waubke 2013] wird bestätigt, dass die in Quellrichtung abgeknickte Lsw vor allem bei einer geringen realisierbaren Wandhöhe und/oder bei fehlender Schallabsorption der Lsw akustisch besser wirksam ist als das in Empfängerrichtung abgeknickte Äquivalent. Bei einer geringen Klappenlänge, einer großen Wandhöhe und einer zur Straße hin absorbierend ausgeführten Variante der Lsw ergibt sich für die von der Straße weg abgeknickte Lsw jedoch mitunter eine bessere Wirksamkeit als für die in Quellrichtung abgeknickte Lsw. Es wird zusammengefasst, dass eine absorbierende Ausführung der Lsw in jedem Fall die akustische Wirksamkeit verbessert. So ergibt sich bei absorbierender Gestaltung einer 3 m bzw. 5 m hohen Lsw mit einer 1 m langen Klappe ein Verbesserungsmaß im Fernbereich von bis zu ca. 1 dB unter Zugrundelegung eines Verkehrslärmspektrums. Für eine 7 m hohe Lsw mit einer 1 m langen Klappe beträgt das Verbesserungsmaß im Fernfeld lediglich ca. 0,5 dB. Durch Verdoppelung der Klappenlänge lässt sich dieses jedoch auf ca. 2 dB erhöhen. Für niedrige Wandhöhen bewirkt eine Erhöhung der Klappenlänge keine derart starke Verbesserung.

Es zeigt sich auch hier, dass für hohe Empfängerpositionen im Nahbereich der Lsw die Ausrichtung der Klappe in Empfängerrichtung durch die verminderte Abschirmung zu einer deutlichen Reduzierung der akustischen Wirksamkeit führen kann, vor allem für geringe Quelldistanzen. Für große Quelldistanzen, eine Empfängerhöhe von 10 m und eine vollständig absorbierende Ausführung der Lsw weist die in Quellrichtung orientierte Klappe durchgehend mindestens genau so hohe Werte der Einfügungsdämpfung auf wie das in Empfängerrichtung orientierte Äquivalent. Vor allem für große Quelldistanzen und hohe Empfängerpositionen ergeben sich jedoch für beide Varianten im Fernbereich Verschlechterungen gegenüber der senkrechten Wand. Diese fallen für die in Quellrichtung orientierte Klappe bei absorbierender Ausführung der Lsw jedoch deutlich kleiner als 1 dB aus. Dies stellt somit die zu bevorzugende Anordnung dar, wenn maßgebliche lokale Pegelerhöhungen vermieden werden sollen.

Ingenieur.de

In [ingenieur.de] konnte anhand von FEM-Simulationen bzw. gekoppelten FEM/BEM-Simulationen mittels COMSOL sowie mithilfe von Messungen eine Verbesserung der akustischen Wirksamkeit einer Lsw neben einer Straße durch eine um 90° zur Straße hin abknickende Oberkante von ca. 1 dB nachgewiesen werden.

2.1.3 Gekrümmte Lärmschutzwände

Lee 2015

In [Lee 2015] erfolgten Simulationen an transparenten Lsw unterschiedlicher Geometrie unter Verwendung des Schallausbreitungsmodells [Nord 2000]. Als Schallquelle wurde eine sechsspurige Straße betrachtet. Die Untersuchungen zielten darauf ab festzustellen, ob eine gekrümmte, reflektierende Lsw an einer Straßenseite durch Streuung des Schalls zu einer Verminderung des Immissions-schalldruckpegels an der Wohnbebauung auf der gegenüberliegenden Straßenseite führen kann. Es konnte gezeigt werden, dass durch das Einbringen der gekrümmten Lsw auf der gegenüberliegenden Straßenseite eine Verminderung des immissionsseitigen Schalldruckpegels um bis zu 1,2 dB in einer Höhe von 15 m über Straßenniveau erreicht werden kann. Allerdings erhöhte sich im gleichen Zuge der Immissions-schalldruckpegel an der Wohnbebauung in 30 m Höhe. Eine Betrachtung des durch die Lsw abgeschirmten Bereichs fand nicht statt.

orange architekten

Der Ansatz einer gekrümmten Lsw wird auch bei der C-Schale von „orange architekten“ verfolgt, die in Bild 2-5 dargestellt ist (siehe [orange architekten]). Hierbei handelt es sich explizit um ein für den Schienenverkehr entwickeltes Produkt, das bei geringer Höhe eine möglichst gute Abschirmung des Rollgeräuschs bewirken soll. Dies wird erzielt, indem die C-Schale als eine Art Parabolspiegel wirkt und der vom Zug emittierte Schall in das Gleisbett reflektiert wird, wo durch den Schotteruntergrund gute Schallabsorptionseigenschaften vorhanden sind. Für Straßenverkehrslärm scheint das Modell jedoch nur bedingt geeignet. So sind einerseits vor allem bei mehrspurigen Straßen deutlich größere Entfernungen zwischen Schallquelle und Lsw zu erwarten, was die Wirksamkeit der niedrigen Lsw grundsätzlich einschränkt. Zusätzlich ist der Straßenbelag im Allgemeinen nur bedingt zur Schallabsorption geeignet. Möglicherweise kann es zu Mehrfachreflexionen kommen, die wiederum eine Verschlechterung der akustischen Situation bedingen können. Eine absorbierende Ausführung der C-Schale könnte zumindest für den der Lsw nächstgelegenen Fahrstreifen eine gute Wirksamkeit erzielen. Allerdings verliert das Produkt bei Anwendung für den Straßenverkehr durch die deutlich niedrigere Position der meisten Passagiere gegenüber dem Schienenverkehr den Vorteil, dass diese aus dem Zug heraus über die Wand hinwegsehen können. Bei Autobahnen und Bundesstraßen ist es grundsätzlich schwer umsetzbar, eine ausreichende Abschirmwirkung auch für die entfernteren Fahrstreifen zu realisieren, ohne die Sichtfreiheit einzuschränken.

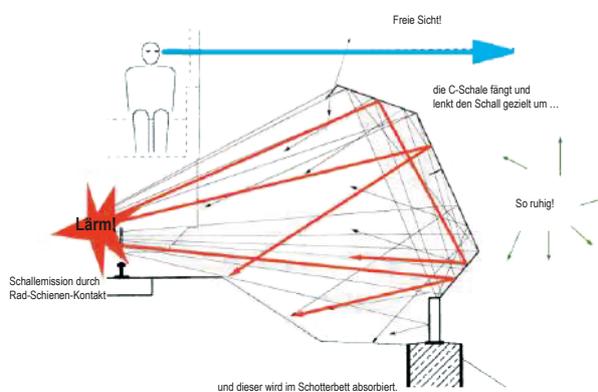


Bild 2-5: C-Schale als niedrige gekrümmte Lsw zur Abschirmung von Schienenverkehrslärm aus [orange architekten]

Waubke 2008

In [Waubke 2008] erfolgte die Untersuchung des durch unterschiedlich geformte und teils gekrümmte Lsw abgeschirmten Bereichs mittels numerischer Simulationen. Die untersuchten Geometrien der Lsw sind in Bild 2-6 dargestellt. In einem Empfängergebiet von 50 m (horizontale Distanz) x 8 m (Höhe über dem Boden) hinter der Lsw erfolgte die Ermittlung der akustischen Wirksamkeit der verschiedenen Lsw-Typen. Die simulierte Einfügungsdämpfung wurde anschließend über alle Positionen gemittelt, was quantitative Aussagen über die Wirksamkeit für verschiedene Quell-Empfänger-Geometrien stark einschränkt. Es konnte jedoch bei Anordnung der Modelle „S1“ bzw. „Brannenburg“ mit Orientierung in Empfängerrichtung (mit der konvexen Seite der Straße zugewandt) unter Annahme eines Straßenverkehrslärmspektrums eine Verringerung des Gesamtpegels von ca. 1 dB (bei 10 m entfernter Quelle) bis ca. 2 dB (bei 2,5 m entfernter Quelle) gegenüber dem Vorhandensein einer 3 m hohen, senkrechten Lsw („Nürnberg 3 m“) festgestellt werden. Eine geringfügig bessere Abschirmung von 2,6 dB bietet das Modell „A1“ bei einer Quelldistanz von 2,5 m. Eine noch größere Wirksamkeit als die gekrümmten Varianten ergibt sich für die 4 m hohe, senkrechte Wand („Nürnberg 4 m“) mit einer Einfügungsdämpfung von ca. 3 dB für alle untersuchten Quelldistanzen. Die Modelle „S35A“ und „Nürnberg schief“ weisen gegenüber der 3 m hohen, senkrechten Wand („Nürnberg 3 m“) nur vereinzelt eine geringfügige Verbesserung bis hin zu einer Verschlechterung um 0,4 dB auf.

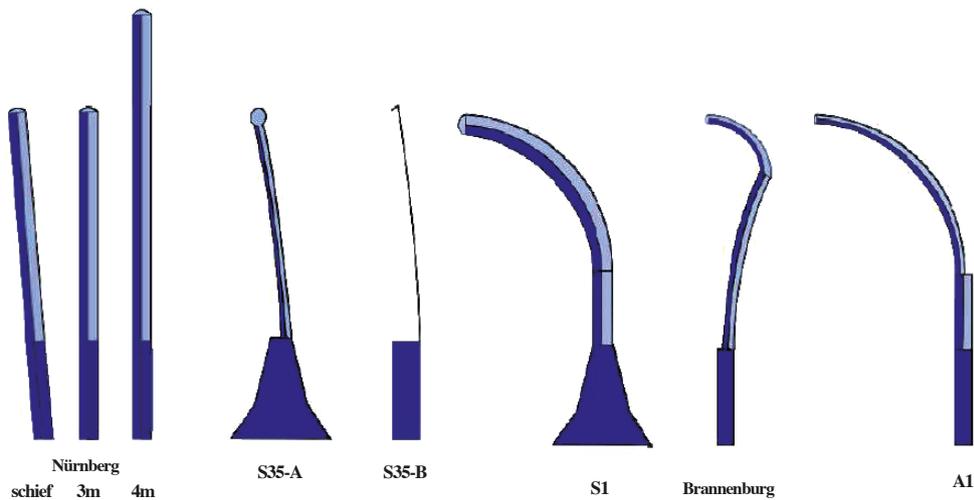


Bild 2-6: Mittels BEM-Simulationen untersuchte unterschiedlich geformte Lsw aus [Waubke 2008]

Waubke 2013, Hoislbauer 2014

In [Waubke 2013] und [Hoislbauer 2014] erfolgten Untersuchungen zu weiteren gekrümmten (bzw. doppelt geknickten) Lsw durch Messungen in situ sowie mittels FEM-Simulationen und Modellmessungen im Maßstab 1:4. Dabei findet zusätzlich zur „nach außen gekrümmten“ Lsw (konvexe Seite der Straße zugewandt) auch der Fall der „nach innen gekrümmten“ Lsw (konkave Seite der Straße zugewandt) Anwendung. Für letzteren Fall wird in [Hoislbauer 2014] gezeigt, dass die Wirksamkeit der in Quellrichtung gekrümmten Lsw deutlich über die Wirksamkeit einer senkrechten Wand hinausgeht, vor allem für nahe und hohe Empfängerpositionen. Die Anordnung der in Empfängerrichtung gekrümmten Lsw weist eine geringere Wirksamkeit auf, die vor allem für hohe und weit entfernte Empfängerpositionen um bis zu ca. 1 dB niedriger ausfallen kann als die der senkrechten Wand gleicher Höhe. Die „nach innen gekrümmte“ Lsw weist hingegen bei absorbierender Ausführung im Fernfeld gegenüber einer senkrechten Lsw gleicher Höhe ein Verbesserungsmaß von 4 dB und mehr auf, das sich mit zunehmender Empfängerhöhe und abnehmender

Distanz zur Lsw auf bis zu ca. 12 dB erhöht. Bei reflektierender Ausführung der Oberseite der Krümmung nimmt das Verbesserungsmaß auf ca. 3 dB im Fernbereich ab, bleibt jedoch im gesamten betrachteten Bereich positiv gegenüber der Wirksamkeit einer senkrechten Lsw gleicher Höhe.

Die in [Waubke 2013] durchgeführten Simulationen an zwei gekrümmten Lsw konnten durch In-situ-Messungen grundlegend bestätigt werden. Es resultiert eine maximale spektrale Abweichung zwischen Messung und Simulation von ca. 2 dB. Im Gesamtpegel belaufen sich die Unterschiede zwischen Messung und Simulation auf maximal 1,5 dB. Dabei fällt auf, dass die Abweichung für geringe Quelledistanzen und niedrige Empfängerhöhen am höchsten ist. Die Simulationen erfolgten für verschiedene Quelledistanzen, für eine reflektierende, eine straßenseitig absorbierende und eine vollständig absorbierende Ausführung der Lsw. Betrachtet wurde ein Bereich von Empfängern in horizontalem Abstand von 5 m bis 150 m zur Lsw und in einer Höhe von 1 m bis 10 m über dem Boden. Für die zur Straße hin gekrümmte Wand ergibt sich im Fernbereich die höchste Einfügungsdämpfung gegenüber einer senkrechten, zur Straße hin absorbierend verkleideten Lsw von bis zu 3 dB. Für Distanzen zur Lsw von weniger als ca. 10 m bis 25 m nimmt das Verbesserungsmaß deutlich zu. Bei teils reflektierender Ausführung der Lsw nimmt die Wirksamkeit in Quellrichtung gekrümmten Lsw ab, während die Wirksamkeit der in Empfängerrichtung gekrümmten Lsw weniger stark beeinflusst wird. Dies hat zur Folge, dass die in Empfängerrichtung gekrümmte Lsw für einige geometrische/impedanzspezifische Konstellationen eine größere Wirksamkeit aufweist als das in Quellrichtung gekrümmte Äquivalent. So weist eine 7 m hohe und 1 m breite, in Quellrichtung gekrümmte und teils mit Absorptionsmaterial belegte Lsw im Fernfeld eine Einfügungsdämpfung gegenüber einer senkrechten straßenseitig absorbierenden Lsw von ca. 0,5 dB auf. Wenn die Krümmung in Empfängerrichtung erfolgt, kann in diesem geometrischen Fall eine Erhöhung des Verbesserungsmaßes auf ca. 2,5 dB erreicht werden. Dieser Effekt tritt jedoch nicht auf, wenn die Wand eine größere Breite von 2 m aufweist. In diesem Fall weisen die zur Straße hin gekrümmte und die von der Straße weg gekrümmte Lsw nahezu dieselbe Wirkung auf. Allerdings zeigt sich an den in Empfängerrichtung gekrümmten Lsw vor allem der Effekt, dass sich, ähnlich wie bei den geknickten Lsw, an höheren Empfängerpositionen nahe der Lsw eine deutliche Erhöhung des Schalldruckpegels gegenüber der Verwendung einer senkrechten Lsw ergeben kann, da durch die Krümmung mitunter die bei einer senkrechten Lsw erfolgende Abschattung dieses Bereichs wegfällt.

Anhand der Ergebnisse aus [Waubke 2013] und [Hoislbauer 2014] lässt sich zusammenfassen, dass eine in Empfängerrichtung gekrümmte Lsw unter gewissen geometrischen Bedingungen eine bessere Wirksamkeit erzielen kann als eine in Quellrichtung gekrümmte Lsw. Allerdings sind diese Unterschiede gering im Vergleich zu dem Effekt, dass eine in Empfängerrichtung gekrümmte Lsw eine teils deutliche lokale Verschlechterung der Wirksamkeit mit sich bringt. Bei der in Quellrichtung gekrümmten Lsw treten hingegen nur vereinzelt geringfügig negative Werte der Einfügungsdämpfung auf. Auf Grundlage dessen ist festzuhalten, dass die Krümmung in Quellrichtung die höhere Sicherheit mit sich bringt, da lokale Pegelerhöhungen weitgehend vermieden werden und vor allem bei absorbierender Bekleidung der Lsw nicht zu erwarten sind.

2.1.4 T-Profil

Hothersall 1991, May 1980

T-Profile stellen vor allem aufgrund der mechanisch verhältnismäßig einfach zu konstruierenden Geometrie eine Maßnahme dar, die Grundlage zahlreicher Untersuchungen ist. So ist in [Hothersall 1991a] beschrieben, dass ein schallhartes T-Profil auf der Oberkante einer Lsw für ein Straßenverkehrslärmspektrum eine Verbesserung von 0,5 dB gegenüber einer einfachen Lsw bewirken kann, die sich durch eine absorbierende Bekleidung des T-Profiles auf 2,5 dB steigern lässt. In [May 1980b] werden Verbesserungen von 1 dB bis 1,5 dB für Straßenverkehrslärm durch ein T-Profil gezeigt.

Watts 1994

Zur systematischen Untersuchung der akustischen Wirksamkeit von T-Profilen erfolgten in [Watts 1994] Messungen und BEM-Simulationen an Lsw mit verschiedenen, unter anderem T-förmigen Lsw. Hierbei wurde die Einfügungsdämpfung einerseits senkrechter Lsw mit einer Höhe von 2,0 m, 2,5 m und 3,0 m sowie andererseits dreier T-förmiger, 2 m hoher Lsw ermittelt. Die T-förmigen Lsw unterschieden sich dabei in ihrer Breite sowie bezüglich der Ausführung der Oberkante:

- Typ 1: 1 m breit, schallharte Oberkante,
- Typ 2: 1 m breit, absorbierende Oberkante,
- Typ 3: 2 m breit, absorbierende Oberkante.

Es wurden Berechnungen und Messungen unter Verwendung zweier Schallquellen durchgeführt, die 5,5 m bzw. 7,8 m von der Lsw entfernt positioniert waren, während der Immissionsschalldruckpegel in einer Distanz von 20 m, 40 m und 80 m hinter der Lsw und in einer Höhe von 1,5 m bzw. 4,5 m über dem Boden erfasst wurde. Zur Ermittlung der Gesamt-Einfügungsdämpfung wurde ein Verkehrslärmspektrum zugrunde gelegt.

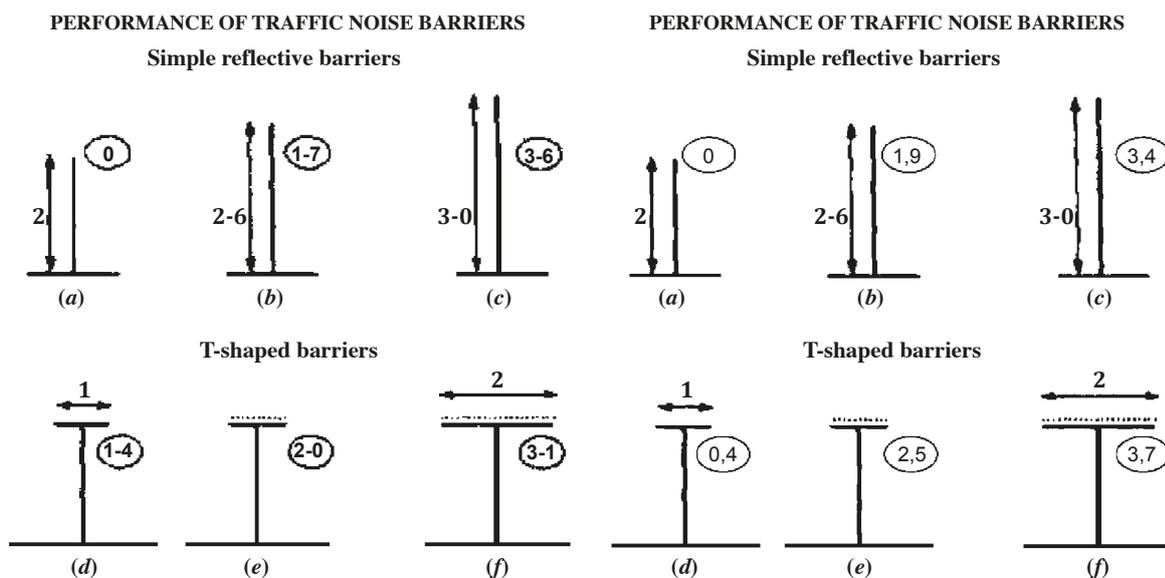


Bild 2-7: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw aus [Watts 1994] in dB; links: Messergebnisse; rechts: BEM-Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen bzw. Simulationen sind in Bild 2-7 links bzw. rechts dargestellt. Sowohl die Messergebnisse als auch die Simulationsergebnisse zeigen für alle T-Aufsätze gegenüber einer 2 m hohen Wand eine positive Einfügungsdämpfung. Das Verbesserungsmaß fällt umso höher aus, je breiter der T-Aufsatz ausgeführt ist. Zudem steigt dieses an, wenn die Oberkante des T-Aufsatzes absorbierend ausgeführt wird. Insgesamt reichen die gemessenen Werte des Verbesserungsmaßes von 1,4 dB bis 3,1 dB, während die Simulationen eine ähnliche Wirksamkeit von 0,4 dB bis 3,7 dB wiedergeben. In beiden Fällen ist erkennbar, dass die 2 m hohe Lsw mit absorbierendem T-Profil die Wirksamkeit einer 2,5 m hohen, senkrechten Wand übersteigt. Selbst die 3 m hohe Wand zeigt eine Einfügungsdämpfung, die nur geringfügig von der der 2 m hohen Wand mit absorbierendem, 2 m breitem T-Profil abweicht. Eine weitere Erkenntnis aus den Untersuchungen in [Watts 1994] ist, dass die T-Profile für Frequenzen unterhalb von 400 Hz nicht wirksam sind.

Hoislbauer 2014

In den zuvor beschriebenen Modellmessungen in [Hoislbauer 2014] erfolgten ebenfalls modellmesstechnische Untersuchungen an T-Profilen mit einer umgerechneten realen Breite von ca. 2,8 m auf einer 5 m hohen Lsw. Bei einem Quellabstand von umgerechnet 4 m bzw. 8 m und einer Quellhöhe von 0,6 m erfolgte die Aufzeichnung des Schalldruckpegels an neun Messpositionen hinter der Lsw in einem horizontalen Abstand von umgerechnet 10 m bis 40 m und in einer Höhe über dem Boden von umgerechnet 2,5 m bis 10 m. Für eine reflektierende und eine absorbierende Ausführung des T-Profils stellen sich hier Einfügungsdämpfungen ein, die mit den Ergebnissen in [Watts 1994] vergleichbar sind: Für eine reflektierende Ausführung des T-Profils ergeben sich positive Einfügungsdämpfungen für Straßenverkehrslärm von 0,4 dB bis 3,8 dB mit nur einem geringfügig negativen Ergebnis. Für die niedrige und mittlere Empfängerhöhe beträgt die Dämpfung 0,4 dB bis 2,3 dB. Bei absorbierender Ausführung des T-Profils erhöht sich dessen Wirksamkeit auf 2,1 dB bis 4,9 dB, wobei sich für Empfänger in niedriger und mittlerer Höhe über dem Boden Werte von 2,5 dB bis 3,7 dB ergeben.

Ingenieur.de, Waubke 2013

Messungen und Simulationen in [ingenieur.de] ergeben ebenfalls gut mit der restlichen Literatur übereinstimmende Werte der Einfügungsdämpfung zweier T-förmiger Lsw-Aufsätze von ca. 1 dB bei 1 m breiter Ausführung bzw. von 1,8 dB bis 2,5 bei einer Breite von 2 m.

In [Waubke 2013] bestätigen sich diese Werte tendenziell, wobei hier durch die Untersuchung mittels FEM-Simulationen ein deutlich größerer Bereich an Empfängerpositionen ausgewertet werden konnte. Es zeigt sich jedoch auch hier deutlich der Effekt, dass eine größere Breite des T-Profils und eine absorbierende Bekleidung zu einer deutlichen Erhöhung der Wirksamkeit führen. Für eine Schallquelle, die 4 m von der Lsw entfernt ist ergeben sich in 2 m Höhe über dem Boden und in 150 m Distanz zur Lsw Verbesserungen durch ein 4 m breites, absorbierendes T-Profil von ca. 5,5 dB (3 m hohe Wand) bzw. 6 dB (4 m bzw. 7 m hohe Wand).

2.1.5 Zylindrische Schirmkronen

Volz 1997, Möser 1999

Auch zylindrische Schirmkronen sind aufgrund ihrer einfachen geometrischen Form ein oft gewähltes Mittel zur Beeinflussung der Schallbeugung über die Oberkante von Lsw. In [Volz 1997] konnte an einer zylindrischen Resonator-Schirmkrone messtechnisch eine Wirksamkeit von bis zu 7 dB nachgewiesen werden. In [Möser 1999] wird für einen ähnlichen Aufsatz die Wirksamkeit von bis zu ca. 7 dB messtechnisch bestätigt, wobei keine Berücksichtigung der aus dem Vorhandensein der Schirmkrone resultierenden Wanderhöhung erfolgt. Die frequenzabhängige Untersuchung der Einfügungsdämpfung der zylindrischen Schirmkrone zeigt, dass eine Verbesserung von 3 dB bis 7 dB vor allem im Frequenzbereich von $f_{m, \text{Terz}} = 800 \text{ Hz}$ bis $f_{m, \text{Terz}} = 1.000 \text{ Hz}$ zu erwarten ist. In der Terz um 2,5 kHz ist mit Verbesserungen um 1 dB bis 3 dB zu rechnen, während sich im Frequenzbereich von 355 Hz bis 710 Hz bzw. von 280 Hz bis 560 Hz eine Verschlechterung von bis zu 3 dB bzw. sogar 5 dB ergibt.

Zudem erfolgten in [Möser 1999] rechnerische Voruntersuchungen zur Wirksamkeit der Impedanz einer solchen zylindrischen Schirmkrone. Die Ergebnisse sind in Bild 2-8 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die akustische Wirksamkeit im Schattenbereich der Lsw deutlich erhöht, wenn die Schirmkrone mit einer Impedanz von $Z = 0$ ausgeführt wird. Da dies in der Realität nur näherungsweise durch die Verwendung von Resonatoren erreicht werden kann, wurde die Schirmkrone innerhalb der experimentellen Untersuchungen als Helmholtz-Resonator ausgeführt. Da dieser nur in der Nähe seiner Eigenfrequenz f_0 eine entsprechend niedrige Impedanz aufweist und somit nur in einem sehr begrenzten Frequenzbereich wirksam wird, wurde der Zylinder testweise mit einem Bezug geringen Strömungswiderstands bespannt. Dadurch konnte die akustische Wirksamkeit des Helmholtz-resonators in einem Bereich von mehreren 100 Hz gegenüber der nicht bespannten Variante teilweise deutlich erhöht werden.

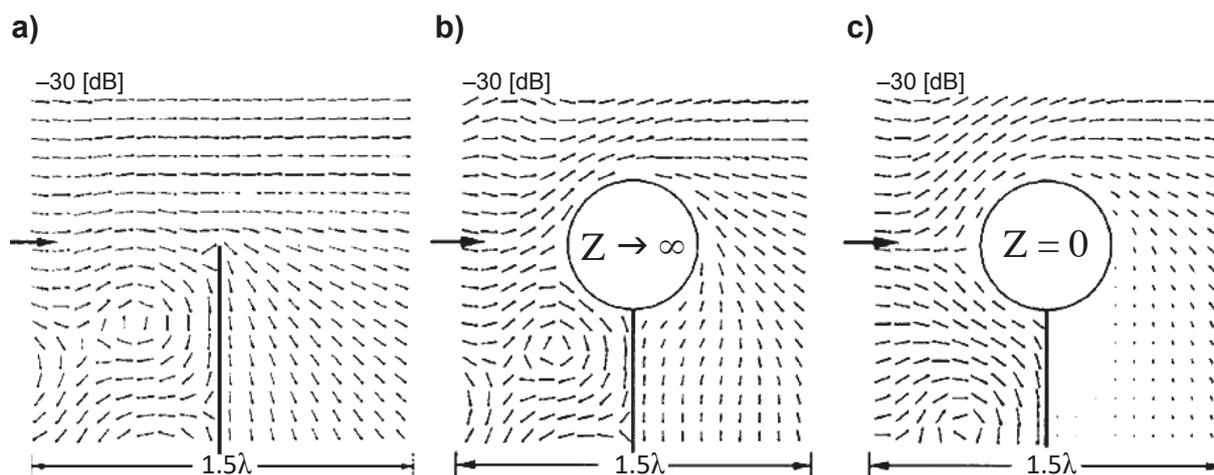


Bild 2-8: Rechnerische Untersuchung der Beeinflussung der Schallintensität in der Umgebung einer Lsw ohne Schirmkrone (links), mit einer Schirmkrone unendlicher Impedanz (mittig) bzw. mit einer Schirmkrone einer Impedanz von null (rechts) aus [Möser 1999]

2.1.6 Weitere Geometrien von Lärmschutzwänden

May 1980, Hothersall 1991

Es existieren zahlreiche weitere mögliche Geometrien von Lsw. Diese umfassen beispielsweise Pfeil-Profile, Y-Profile, Mehrkantenaufsätze sowie komplexere Geometrien wie vielfach verzweigte Schirmkronen. Auch zu diesen erfolgten bereits Untersuchungen, die aufgrund des Fokus des vorliegenden Projekts auf geknickte und gekrümmte Lsw nur kurz Erwähnung finden sollen.

[May 1980a] und [Hothersall 1991b] kann entnommen werden, dass innen absorbierend ausgekleidete Y bzw. Pfeil-Profile eine etwas geringere Wirksamkeit aufweisen als T-Profile.

Aznarez 2007

In [Aznarez 2007] wurde mithilfe von 2D-BEM-Simulationen und eines evolutionären Algorithmus untersucht, mit welchen geometrischen Eigenschaften einer Y-förmigen Lsw sich die optimale akustische Wirksamkeit einer 3,5 m bzw. 4 m hohen senkrechten Wand erzielen lässt. Dabei ergaben sich die in Bild 2-9 dargestellten Geometrien.

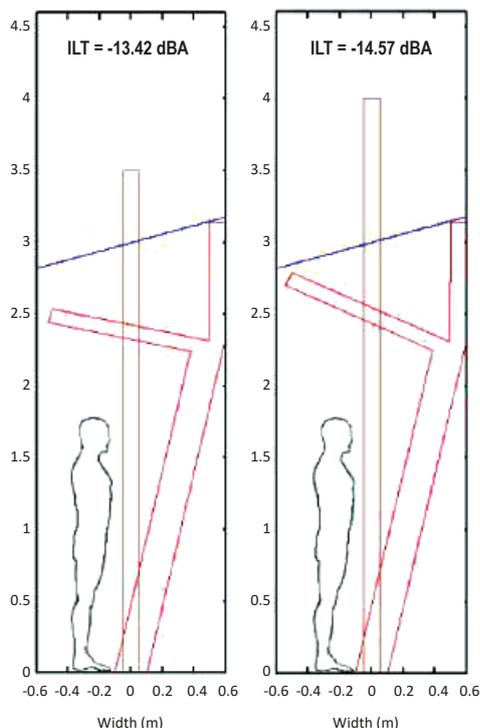


Bild 2-9: Mittels evolutionärem Algorithmus ermittelte Geometrie einer Y-förmigen Lsw zur Wiedergabe der akustischen Eigenschaften einer 3,5 m hohen (links) bzw. 4 m hohen (rechts) senkrechten Wand aus [Aznarez 2007]

Ingenieur.de

In [Ingenieur.de] wurden anhand von Simulationen mit COMSOL (FEM und gekoppelte FEM/BEM) sowie mittels Messungen zusätzlich zu den bereits beschriebenen L-förmigen und T-förmigen Geometrien auch Mehrkantenaufsätze untersucht. Für diese ergab sich unter den betrachteten Geometrien die höchste Einfügungsdämpfung gegenüber einer senkrechten Wand von ca. 3 dB.

2.2 Unterschiedlich mit Impedanz belegte Lärmschutzwände

Thorsson 2000

Wie anhand der zuvor beschriebenen Ergebnisse aus [Möser 1999] und [Hothersall 1991a] ersichtlich ist, hat die Impedanz eines Lsw-Aufsatzes einen mitunter maßgeblichen Einfluss auf dessen Wirksamkeit. In [Thorsson 2000] erfolgten zusätzlich Untersuchungen zum Einfluss der Impedanz einer Lsw ohne Verwendung eines Beugungsaufsatzes. Zu diesem Zweck wurde die in Bild 2-10 dargestellte 1 m hohe Lsw in sieben Segmente aufgeteilt, deren Impedanz einfluss anschließend mittels BEM-Simulationen untersucht wurde. Es wurde ein schallharter Boden zugrunde gelegt. Aufgrund des Berechnungsaufwands sind die Ergebnisse auf Frequenzen bis maximal 350 Hz begrenzt.

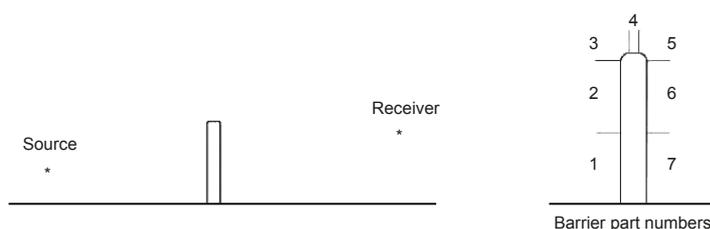


Bild 2-10: Ermittlung des Einflusses der akustischen Impedanz von Segmenten einer Lsw; links: Quell-Lsw-Empfänger-Geometrie; rechts: Definition der Segmente mit zu variierender Impedanz; Quellhöhe: 0,1 m aus [Thorsson 2000]

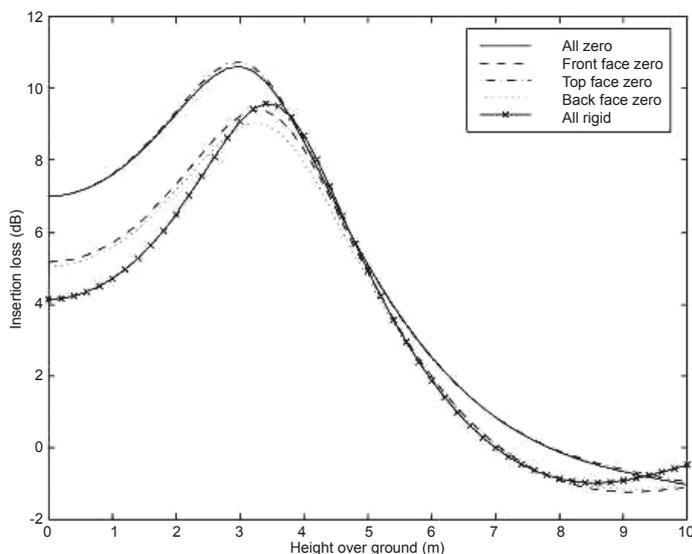


Bild 2-11: Einfügungsdämpfung einer Lsw mit Segmenten unterschiedlicher akustischer Impedanz aus [Thorsson 2000]

In Bild 2-11 ist die Einfügungsdämpfung der verschiedenen Optionen (bezogen auf die freie Schallausbreitung über reflektierendem Boden) aus [Thorsson 2000] in Abhängigkeit von der Empfängerhöhe für eine Frequenz von 350 Hz dargestellt. Es ist erkennbar, dass die schallweiche Ausführung aller Flächen vor allem bei einer Empfängerhöhe von ca. 3,5 m und weniger eine deutlich erhöhte akustische Wirksamkeit mit sich bringt im Vergleich zur schallharten Ausführung der gesamten Lsw. Die schallweiche Ausführung ausschließlich der Vorder- oder Rückseite der Lsw bringt eine geringfügige Verbesserung der Wirksamkeit im Bereich unterhalb von 3 m Empfängerhöhe mit sich, sorgt allerdings im Maximum der Dämpfung bei ca. 3,5 m zu einer leichten Reduzierung der Wirksamkeit gegenüber der

schallharten Ausführung. Der größte Effekt zeigt sich bei schallweicher Belegung der Oberkante der Lsw. Hierbei ergibt sich eine Dämpfung, die jener bei vollständig schallweicher Auslegung der Lsw gleicht und diese im Maximum sogar minimal übersteigt. Im Bereich größerer Empfängerhöhen von ca. 5 m bis 9 m ist noch immer eine leichte Verbesserung gegenüber der schallharten Ausführung der Wand erkennbar.

Zuchowski 2019

Zu einem ähnlichen Ergebnis führen die Untersuchungen in [Zuchowski 2019]. Hier ergibt sich bei der Installation einer akustisch wirksamen Oberkante auf einer Lsw mit einer Gesamthöhe von 2 m zumindest eine geringfügige Verbesserung der Wirksamkeit vor allem im Bereich niedriger Empfängerhöhen von unter 2,5 m gegenüber einer einfachen Lsw mit einer Höhe von 2 m. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um einen schallweichen, sondern um einen absorbierenden Aufsatz, was vermutlich die geringere Wirksamkeit im Vergleich zu den Ergebnissen aus [Thorsson 2000] bedingt.

Huang 2020

Dem Einfluss der akustischen Impedanz der Oberkante der Lsw wurde sich zudem in [Huang 2020] gewidmet. Hier erfolgten Untersuchungen von Lsw mit Oberkanten unterschiedlicher Impedanz mittels des BEM-Modells aus [Zhao 2015]. Bei dieser handelt es sich um eine analytische Beschreibung zur Berechnung der Schallausbreitung, die jedoch eine numerische Lösung erfordert. Ein Abgleich mit FEM-Simulationen in COMSOL zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse bei deutlich reduziertem Rechenaufwand. In Bild 2-12 ist der mittels der Berechnungen ermittelte Immissionsschalldruckpegel dargestellt, der sich an zwei Empfängerpositionen in Abhängigkeit von der Oberflächenadmittanz der Schirmoberkante einstellt. Es ist erkennbar, dass der Kurvenverlauf ein globales Maximum im Bereich von ca. $\text{Imag}(\beta) = 11,2 \cdot \beta_0$ und ein lokales Minimum bei ca. $\text{Imag}(\beta) = 27,3 \cdot \beta_0$ aufweist. Dabei ist zu beachten, dass der Immissionsschalldruckpegel im Maximum den sich bei einer schallharten Ausführung der Wand einstellenden Wert deutlich übersteigt. Im Gegenzug fällt der Immissionsschalldruckpegel im Minimum geringer aus als bei schallweicher Auslegung der Oberkante.

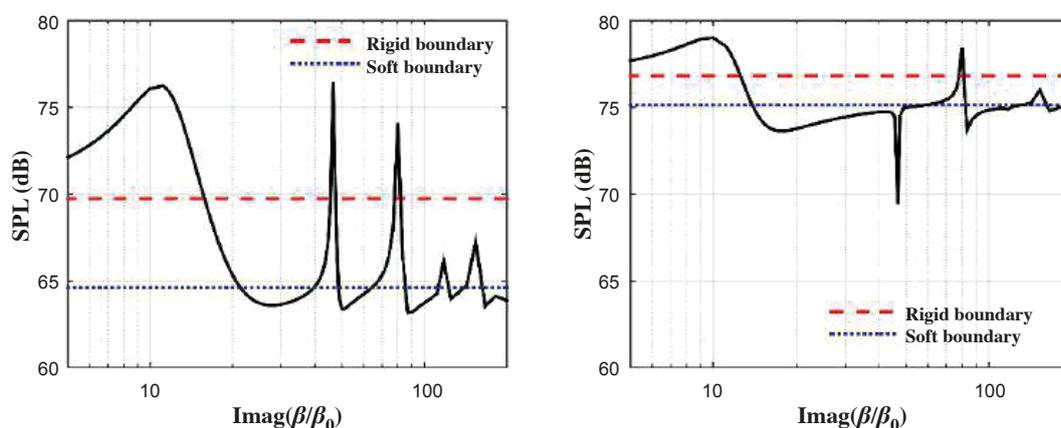


Bild 2-12: Immissionsschalldruckpegel an zwei Empfängerpositionen in Abhängigkeit vom Imaginärteil der Admittanz der Oberkante aus [Huang 2020] [Zhao 2015]; links: Empfängerposition 1; rechts: Empfängerposition 2

In Bild 2-13 sind die Schalldruckpegel- und die Schallintensitätsverteilung im Bereich um die impedanzbelegte Oberkante der Lsw dargestellt, die sich unter Verwendung der ungünstigen Impedanz aus Bild 2-12 (a), einer schallharten Auslegung (b), der günstigen Impedanz aus Bild 2-12 (c) und einer schallweichen Auslegung (d) der Oberkante in [Huang 2020] [Zhao 2015] ergibt. Es ist zu erkennen, dass die günstige Impedanz aus Bild 2-12 zu einer stärkeren Ausbildung des Schattenbereichs hinter der Lsw führt als die schallweiche Ausführung, während die ungünstige Impedanz eine Erhöhung des Immissions Schalldruckpegels und der Schallintensität gegenüber der schallharten Ausführung der Oberkante herbeiführt.

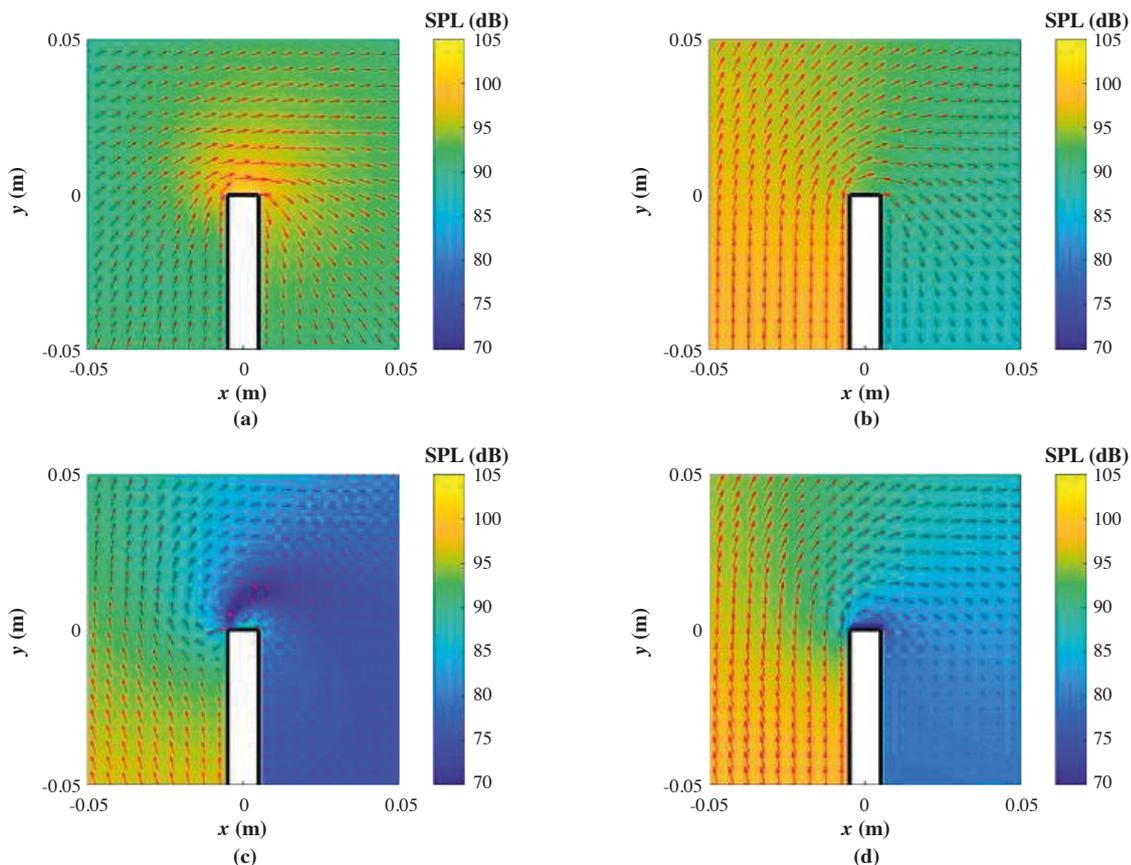


Bild 2-13: Schalldruckpegel- und Schallintensitätsverteilung bei 500 Hz im Bereich der Oberkante verschiedener Admittanz einer Lsw aus [Huang 2020]; a) ungünstige Impedanz ($\text{Imag}(\beta) = 11,2 \cdot \beta_0$) aus Bild 2-12; b) schallhart ($\beta = 10^{-10}$); c) günstige Impedanz ($\text{Imag}(\beta) = 27,3 \cdot \beta_0$); d) schallweich ($\beta = 10^{-10}$)

Monazzam 2015

In [Monazzam 2005] erfolgten Untersuchungen mithilfe von BEM-Simulationen an einer Vielzahl von Lsw-Aufsätzen. Dabei wurde zusätzlich zur Form der Aufsätze der Einfluss verschiedener Ausführungen der Oberkante betrachtet. So wurde bei den untersuchten T-, Y-, pfeilförmigen sowie zylindrischen Aufsätzen die Oberfläche der Aufsätze variiert zwischen reflektierend (als Referenz), absorbierend und versehen mit Schroederdiffusoren (quadratic residue diffusor – QRD). Zur Ermittlung der in Bild 2-14 dargestellten Gesamtverbesserung gegenüber einer reflektierenden Ausführung der jeweiligen Geometrie wurde ein Straßenverkehrslärmspektrum zugrunde gelegt.

Es ist erkennbar, dass sich die akustische Wirksamkeit aller Aufsätze in nahezu allen betrachteten Empfängerdistancen durch die Verwendung von Schroederdiffusoren gegenüber der reflektierenden Ausführung verbessert. Dabei ergibt sich für das T-Profil bereits durch die absorbierende Bekleidung eine Verbesserung um 1,4 dB, die sich bei Verwendung von Schroederdiffusoren zusätzlich um ca. 1 dB erhöht. Für die zylindrische Schirmkrone ergibt sich durch die absorbierende Bekleidung eine Verbesserung von ca. 1 dB bis 2 dB. Jedoch verringert sich in diesem Fall die Wirksamkeit bei Nutzung von Schroederdiffusoren vor allem für nahe Empfängerpositionen deutlich. Beim Pfeil- und Y-Profil ergibt sich sowohl für die absorbierende Variante als auch für die Variante mit Schroederdiffusoren eine Verbesserung von jeweils ca. 3 dB (Pfeil-Profil) bzw. 2 dB (Y-Profil). Die Untersuchungen bestätigen demnach die Wichtigkeit der gezielten Auslegung der Impedanz bei der Ausführung von Lsw-Aufsätzen. Die Nutzung von Schroederdiffusoren scheint dabei jedoch ausschließlich für das T-Profil eine zusätzliche positive Wirkung zu erzielen. Für die verbleibenden Geometrien der Aufsätze ergibt sich bei absorbierender Ausführung der Aufsätze eine gleiche bis höhere akustische Wirksamkeit.

Die Ergebnisse der BEM-Simulationen aus [Monazzam 2005] an absorbierend bekleideten Schirmkronen konnten in [Fard 2013] mithilfe von FEM-Simulationen reproduziert werden.

(a)						
Distance from receiver (m)	T - shape		A T - shape		QRD edged (Model G)	
	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))
20	15.9	0.0	17.2	1.4	18.2	2.3
50	15.1	0.0	16.5	1.4	17.5	2.4
100	14.9	0.0	16.2	1.4	17.3	2.4

(b)						
Distance from receiver (m)	Cylinder - shape		A Cylinder - shape		QRD edged (Model O)	
	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))
20	13.6	0.0	14.6	1.1	13.2	-0.4
50	11.1	0.0	13.1	2.0	12.5	1.4
100	11.0	0.0	12.9	1.9	12.4	1.4

(c)						
Distance from receiver (m)	Arrow - shape		A Arrow - shape		QRD edged (Model M)	
	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))
20	13.4	0.0	16.5	3.1	16.3	2.9
50	12.9	0.0	15.8	2.9	15.8	2.9
100	12.8	0.0	15.6	2.8	15.7	2.9

(d)						
Distance from receiver (m)	Y - shape		A Y - shape		QRD edged (Model S)	
	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))	Mean (dB(A))	Δ IL (dB(A))
20	16.3	0.0	18.3	2.1	18.4	2.1
50	15.2	0.0	17.1	1.9	17.2	2.0
100	15.0	0.0	16.8	1.8	17.0	2.1

Bild 2-14: Akustische Gesamtverbesserung von Lsw-Aufsätzen unterschiedlicher Geometrie für verschiedene Empfängerdistancen bei Variation der Oberflächenimpedanz aus [Monazzam 2005]; a) T-Profil; b) zylindrische Schirmkrone; c) Pfeil-Profil; d) Y-Profil; links: reflektierende Ausführung der Aufsätze; mittig: absorbierende Ausführung der Aufsätze; rechts: Ausführung der Aufsätze mit Schroederdiffusoren

2.3 Schallausbreitungsmodelle und Berechnungsansätze

Aufgrund der komplexen Geometrie und der daraus resultierenden aufwendigen analytischen Beschreibung der akustischen Wirksamkeit von Lsw-Aufsätzen basieren die meisten der zuvor beschriebenen Forschungsergebnisse auf FEM- oder BEM-Simulationen bzw. gekoppelten FEM-/BEM-Berechnungen sowie auf Messungen an definierten (Modell-) Aufbauten.

Die akustische Wirksamkeit einzelner Aufsätze von Lsw in bestimmten Testszenarien sowie die Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen wurden bereits mehrfach untersucht und nachgewiesen. So zeigt sich in [ingenieur.de] eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen einer Messung, einer FEM-Simulation und einer gekoppelten FEM-/BEM-Simulation an drei verschiedenen Wandaufsatz-Typen mit Abweichungen von höchstens 0,7 dB zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Methoden. Auch in [Waubke 2013] erfolgte ein Abgleich des verwendeten FEM-Simulationsmodells mit den Messungen, wobei sich Abweichungen von maximal 1,5 dB im Gesamtpegel für eine gekrümmte Lsw-Geometrie unter Zugrundelegung eines Verkehrslärmspektrums einstellten. Allerdings bleibt das Problem bestehen, dass die Durchführung von Simulationen einen sehr großen Rechen- und Zeitaufwand mit sich bringt, der nicht mit der vereinfachten Ausbreitungsrechnung vereinbar ist.

Um komplexe Geometrien in der Schallausbreitungsrechnung berücksichtigen zu können, erfolgte in [Waubke 2013] auf Basis der zuvor beschriebenen Simulationen die Entwicklung eines Berechnungsansatzes zur Berücksichtigung komplexer Lsw-Geometrien in der Ausbreitungsrechnung. Zu diesem Zweck wurden die Simulationsergebnisse über verschiedene Größen wie die Quell-Lsw-Empfänger-Geometrie und die geometrischen Parameter der unterschiedlichen Lsw-Geometrien aufgetragen und nach Zusammenhängen gesucht. Betrachtet wurde dabei der Zusammenhang zwischen der Einfügungsdämpfung und:

- dem Winkel zum Immissionsort,
- dem Winkel zur Schallquelle,
- der Summe der Winkel zu Immissionsort und Schallquelle,
- dem Umweg der Schallausbreitung über die Lsw gegenüber freier Schallausbreitung sowie
- der Differenz des Umwegs gegenüber der Referenzwand.

Dabei stellte sich der Umweg, der mit der effektiven Höhe der Lsw korreliert, als einziger Parameter heraus, der einen Zusammenhang zur resultierenden Einfügungsdämpfung herstellen lässt. Beispielhaft ist dieser Umweg für ein T-Profil in Bild 2-15 dargestellt. Die drei betrachteten Zonen, in die das Schallfeld in der Umgebung der Lsw eingeteilt wird, sind in der rechten Darstellung enthalten.

In Zone 1: $\delta = SR - (ST_1 + T_1R) \{<0\}$

In Zone 2: $\delta = ST_1 + T_1R - SR \{>0\}$

In Zone 3: $\delta = ST_1 + T_1T_2 + T_2R - SR$

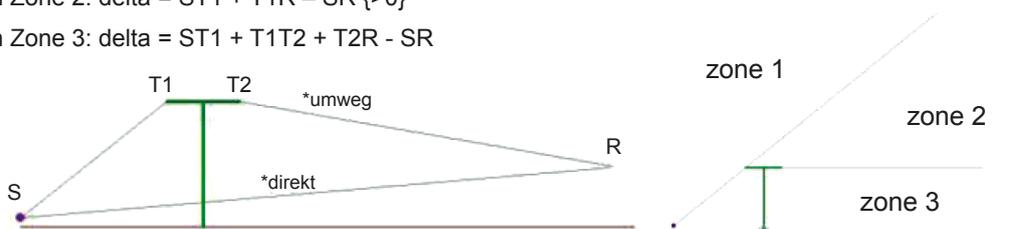


Bild 2-15: Umweg gegenüber der direkten, ungehinderten Schallausbreitung exemplarisch für ein T-Profil (links) sowie Definition der drei Zonen (rechts) aus [Waubke 2013]

Anhand des sich entsprechend Bild 2-15 ergebenden Umwegs δ erfolgte eine frequenzabhängige Regression der Messergebnisse zur Ermittlung des Anstiegs $m(f)$ in dB/m und des Achsenabschnitts $b(f)$ in m. Die Zusatzdämpfung dL der einzelnen Wandtypen ergibt sich auf Grundlage dessen zu

$$dL(\delta) = \begin{cases} 0 & \text{für } \delta < \delta_{min} \\ \frac{\delta_{min} - \delta}{\delta_{min}} \cdot b & \text{für } \delta_{min} < \delta < 0 \\ m \cdot \delta + b & \text{für } \delta \geq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

mit

$$\delta_{min} = - \frac{125 \text{ Hz}}{f}. \quad (2.2)$$

Um eine Berechnung auf der sicheren Seite durchzuführen, erfolgte die Addition der Standardabweichung zum Achsenabschnitt b . Mithilfe der sich ergebenden Matrix kann für beliebige Wandhöhen h und Profilbreiten a die Zusatzdämpfung ermittelt werden, indem eine Interpolation der Zusatzdämpfung der nächstgelegenen Tabellenwerte durchgeführt wird. Eine Extrapolation über die simulativ untersuchten Szenarien heraus ist nicht vorgesehen, stattdessen findet für über die Matrix hinausgehende Werte der nächstgelegene, in der Matrix vorhandene Wert Anwendung.

Die Rechenvorschrift entsprechend Gl. (2.1) wurde in die Schallausbreitungssoftware SoundPLAN implementiert und anschließend die Geometrie der beiden in situ untersuchten gekrümmten Lsw modelliert und die Berechnung entsprechend [RVS 04.02.11] unter Verwendung der mittels der neuen Rechenvorschrift ermittelten Zusatzdämpfung durchgeführt. Im Anschluss erfolgte sowohl für die Messergebnisse als auch für die Berechnungsergebnisse die Berechnung der Differenz zwischen der Einfügungsdämpfung der höheren gekrümmten Lsw und der niedrigeren gekrümmten Lsw sowie eine tabellarische Gegenüberstellung dieser (siehe Tabelle 2.1). Es ist erkennbar, dass die Abweichung zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen in Abhängigkeit von der Empfängerposition maximal ± 1 dB beträgt. Aufgrund des Vergleichs zweier Szenarien ist diese Gegenüberstellung jedoch nur begrenzt aussagekräftig. Ein Vergleich der absoluten Einfügungsdämpfung verschiedener Geometrien zur Validierung der Rechenvorschrift ist in [Waubke 2013] nicht enthalten.

	Pegeldifferenzen zwischen den Messquerschnitten in dB							
	MP-Abstand 12,5 m				MP-Abstand 25 m			
	MP-1	MP-2	MP-3	MP-4	MP-5	MP-6	MP-7	MP-8
MP-Höhe	6 m	4,5 m	3 m	1,5 m	6 m	4,5 m	3 m	1,5 m
Messung	3,9	3,7	3,8	3,2	1,9	1,3	0,8	1,8
Berechnung	2,9	3,3	4,4	4,2	1,7	1,5	1,4	1,8
Differenz Messung/Berechnung	1,0	0,4	-0,6	-1,0	0,2	-0,2	-0,6	0,0

Tab. 2.1: Vergleich der Differenz der Einfügungsdämpfung einer hohen und einer niedrigen gekrümmten Lsw aus Messung und Berechnung für verschiedene Empfängerpositionen aus [Waubke 2013]

2.4 Normen und Berechnungsvorschriften

In den meisten bestehenden Normen und Berechnungsvorschriften wie der [RLS-19] bzw. [RLS-90] sowie der [DIN ISO 96132] wird der Einfluss komplexer Lsw-Geometrien sowie partiell mit Impedanz belegter Lsw auf die Schallausbreitung nicht berücksichtigt. Während die [Nord 2000] die Berücksichtigung impedanzbelegter keilförmiger Hindernisse ermöglicht und die niederländische Berechnungsvorschrift [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012] die Berücksichtigung absorbierender T-förmiger Lsw-Aufsätze erlaubt, können entsprechend [ASJ RTN-Model 2018] bestimmte L-förmige (in einem Winkel von 90° geknickte) und auch mehrfach verzweigte Aufsätze auf Lsw in der Schallausbreitungsrechnung berücksichtigt werden. Auf diese beiden Rechenvorschriften soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Reken- en meetvoorschrift geluid 2012

Die [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012] erlaubt die Berücksichtigung von T-Profilen mit absorbierender Oberkante, die mindestens 1 m in jede Richtung überkragen, in der Schallausbreitungsberechnung. Hierbei handelt es sich um eine frequenzunabhängige Berechnung. Einen relevanten Parameter stellt dabei die vertikale Distanz zwischen Empfänger und der Kurve C dar, die in Bild 2-16 dargestellt ist.

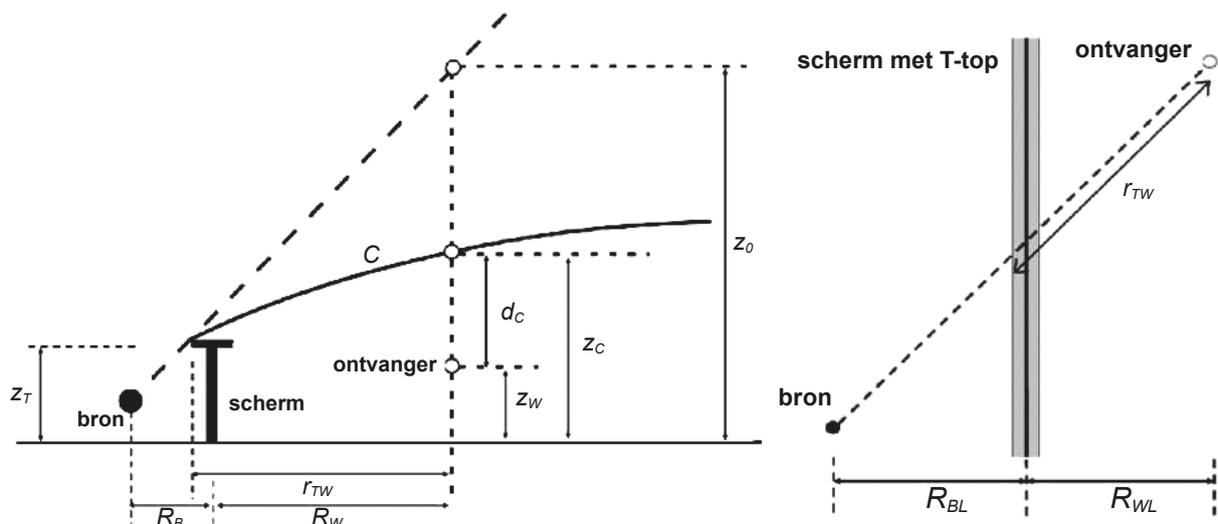


Bild 2-16: Geometrische Parameter zur Ermittlung des Abstands d_C zwischen Empfänger und Kurve C [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012]

Der Verlauf der Kurve C ist dabei definiert als

$$z_C(r_{TW}) = z_0(r_{TW}) - \frac{r_{TW}}{C_1} - \left(\frac{r_{TW}}{C_2}\right)^2, \quad (2.3)$$

wobei C_1 und C_2 Konstanten sind. Anschließend ergibt sich in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern die akustische Wirksamkeit C_T des Aufsatzes entsprechend dem in Bild 2-17 dargestellten Berechnungsschema.

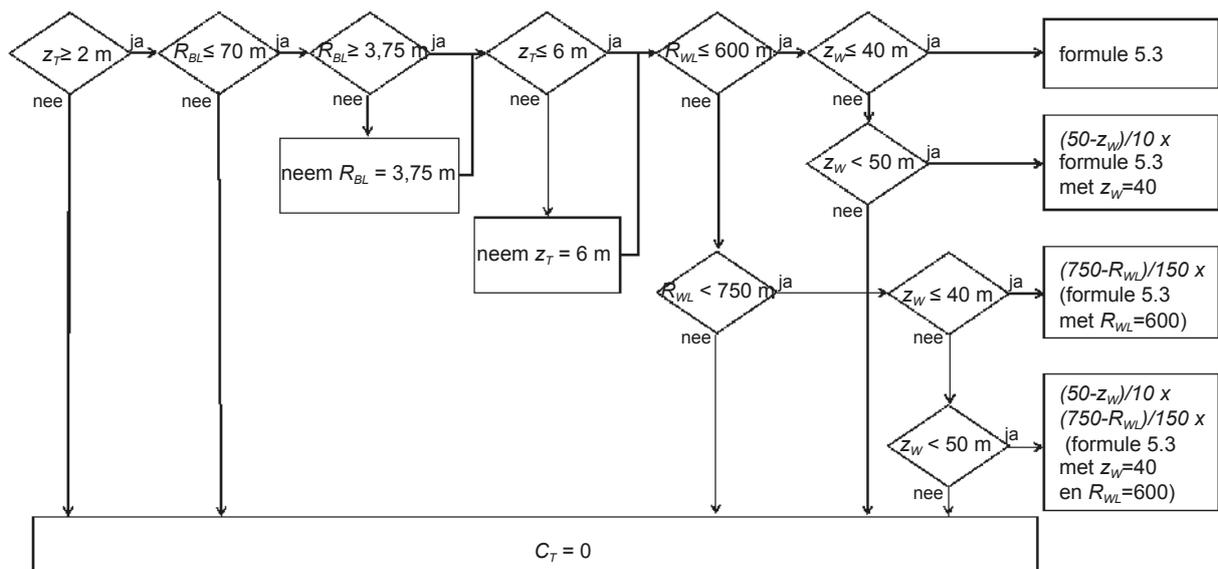


Bild 2-17: Berechnungsschema des Verfahrens zur Bestimmung des Wertes C_T aus [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012]

ASJ RTN-Model 2018

Das [ASJ RTN-Model 2018] erlaubt die Berücksichtigung von L-förmigen Lsw-Aufsätzen mit einer Breite von 3 m und 5 m sowie den in Bild 2-18 dargestellten mehrfach verzweigten Aufsätzen. Die Berechnung basiert dabei auf an der jeweiligen Geometrie gewonnenen Messergebnissen. Ähnlich der Vorgehensweise in [Waubke 2013] wird das Gebiet um die Lsw in drei geometrisch definierte Regionen eingeteilt (siehe Bild 2-19). In Abhängigkeit davon, in welcher Region sich ein Empfänger P befindet, erfolgt die Berechnung des Beugungs-Korrekturterms des Aufsatzes. Die hierbei zugrunde gelegten Parameter müssen allerdings für jeden neuen Aufsatz einzeln ermittelt werden, was eine Berücksichtigung anderer als der in Bild 2-18 enthaltenen Geometrien stark erschwert. In [ASJ RTN-Model 2018] wird zudem darauf hingewiesen, dass die Vorhersagegenauigkeit der Optionen (4) und (5) (L-förmige Aufsätze) nicht verifiziert wurde.

Zusätzlich zur Berücksichtigung der in Bild 2-18 enthaltenen Geometrien ist es möglich, die Wirksamkeit weiterer Geometrien messtechnisch zu bestimmen und in der Schallausbreitungsrechnung gemäß [ASJ RTN-Model 2018] zu berücksichtigen. Hierzu ist eine Vielzahl von Messungen unter verschiedenen Quell- und Empfängerwinkeln notwendig, anhand derer eine Matrix aufgespannt werden kann, innerhalb derer anschließend eine frequenzabhängige Interpolation zur Ermittlung der Einfügungsdämpfung der Lsw in der betrachteten Ausbreitungssituation erfolgt. Auch eine Extrapolation über die auf Basis der Messungen aufgespannte Matrix hinaus ist möglich.

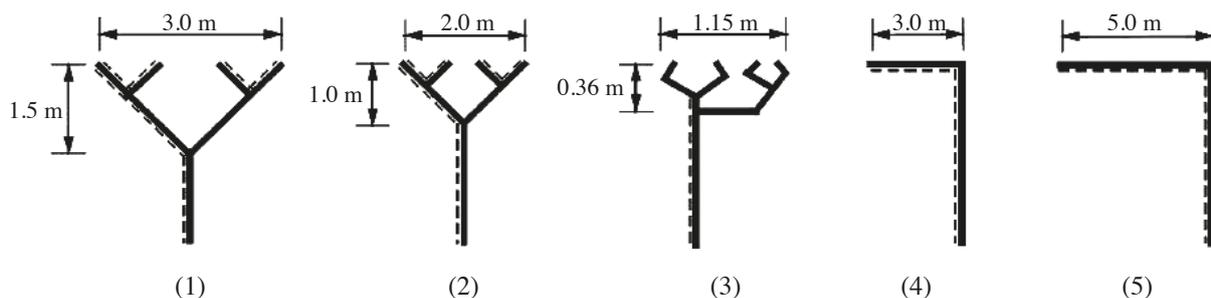


Bild 2-18: In ASJ RTN-Model 2018 berücksichtigbare Geometrien von Lsw aus [ASJ RTN-Model 2018]

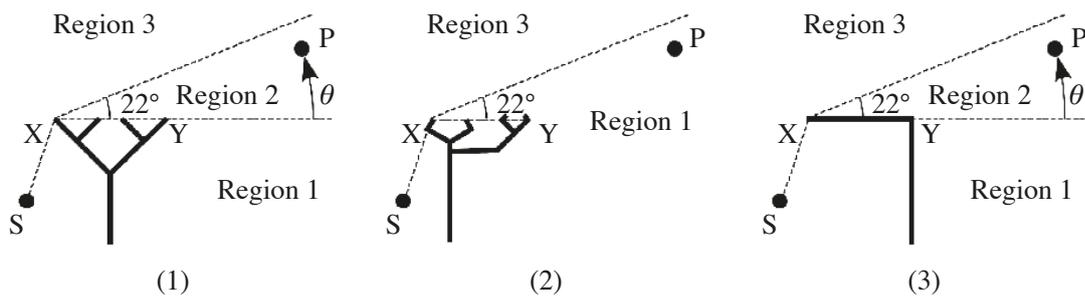


Bild 2-19: Geometrieparameter zur Berechnung der Wirksamkeit von Lsw-Aufsätzen aus [ASJ RTN-Model 2018]

Nord 2000

In [Plovsing 2001] ist eine Rechenvorschrift zur Berücksichtigung der Einfügungsdämpfung von Hindernissen mit komplexer Geometrie enthalten. Insbesondere sind an dieser Stelle die Hindernisse mit mehreren Beugungskanten zu erwähnen, die in Bild 2-20 dargestellt sind. In einem ersten Schritt wird der Beugungskoeffizient der beiden Beugungskanten getrennt voneinander bei einer Frequenz von 250 Hz berechnet. Die beiden Werte werden miteinander verglichen. In Abhängigkeit davon, welcher der beiden Werte größer ist, werden geometrische Parameter angepasst, um die finale, frequenzabhängige Berechnung beider Beugungskoeffizienten durchzuführen, die anschließend zu einer Gesamtwirkung zusammengefasst werden.

Es ist vorstellbar, eine Lsw komplexer Geometrie (z. B. eine einfach geknickte Lsw) als spezielle Form eines Hindernisses mit zwei Beugungskanten zu interpretieren. So ergibt sich beispielsweise in erster Näherung eine L-förmige Lsw, wenn die Fläche Q_1 in Bild 2-20 deckungsgleich zu Q_2 liegt.

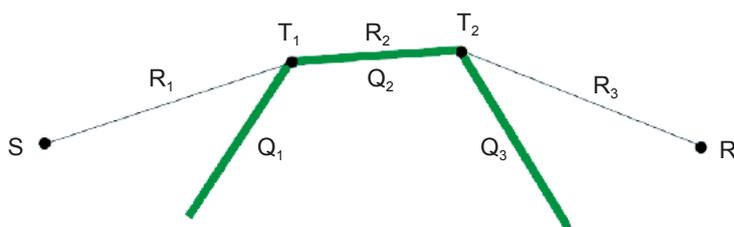


Bild 2-20: Geometrieparameter zur Berechnung der Wirksamkeit eines Hindernisses mit zwei Beugungskanten aus [Plovsing 2001]

2.5 Schallausbreitungsmodell AED

Zur Berechnung der Luftschallausbreitung im Freien liegt der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH ein Berechnungswerkzeug auf der Basis einer Mathematiksoftware vor. Dieses Verfahren geht weit über die Schallausbreitungsbeschreibung nach [ISO 9613-2] hinaus und ist aufgrund der Berücksichtigung eines Kugelwellenreflexionsfaktors besonders für die Beschreibung tieffrequenten Lärms geeignet [Huebelt 2007].

2.5.1 Schallausbreitungseffekte

Im Einzelnen werden folgende Effekte berücksichtigt:

Bodenreflexionen

Es existiert eine Vielzahl genäherter Verfahren zur Berechnung der Bodenreflexion von Kugelwellen. Diese Verfahren basieren in den meisten Fällen auf einer asymptotischen Näherung der exakten Schallfeldbeschreibung, z. B. [Thomasson 1980], [Chien 1980]. Als sehr einfach und genau hat sich jedoch in den letzten Jahren das Modell von „WEYL – VAN DER POL“ [Pol 1935] durchgesetzt.

Schallausbreitung über impedanzbelegten Flächen mit Diskontinuität (Übergang Fahrbahn/angrenzender Boden etc.)

Zu den Methoden, die die Berechnung der Schallausbreitung über impedanzbelegten Flächen erlauben, gehören u. a. das „Ray-Tracing-Verfahren“, z. B. [L'Esperance 1992] [Li 1998], und das „Fresnel-Zonen-Modell“, z. B. [Hothersall 1994], [Nord 2000]. Zur vereinfachten Beschreibung der Schallausbreitung wird nach [Nord 2000] das „Fresnel-Zonen-Modell“ angewandt. Im Gegensatz zum „Ray-Tracing-Verfahren“ lässt sich mit Hilfe dieses Modells die Ausbreitung von Kugelwellen sehr einfach berücksichtigen. Durch Definition eines mittleren wirksamen komplexen Kugelwellenreflexionsfaktors kann die Impedanz-Diskontinuität zwischen der Fahrbahn und dem angrenzenden Boden auch phasenbehaftet berücksichtigt werden [Schulze 2015].

Beugung an Schirmen/Wällen mit absorbierenden Flächen

Zur Beschreibung der Beugung von Schallwellen an Schirmkanten ist u. a. das Modell nach LAM und MAEKAWA ([Lam 1994], [Maekawa 1968]) erwähnenswert. Diesem Verfahren konnte anhand von Modellmessungen eine ausreichend hohe Genauigkeit bescheinigt werden [Hübelt 1997]. Nachteil des Verfahrens ist jedoch, dass bei der Berechnung der Beugung der Schallwelle am Schirm die Impedanz der Schirmfläche keine Berücksichtigung findet. Abhilfe kann hier das Verfahren nach HADDEN ([Hadden 1981], [Nord 2000]) liefern, das die Modellierung der akustischen Wirksamkeit eines impedanzbelegten keilförmigen Hindernisses ermöglicht (siehe Bild 2-21).

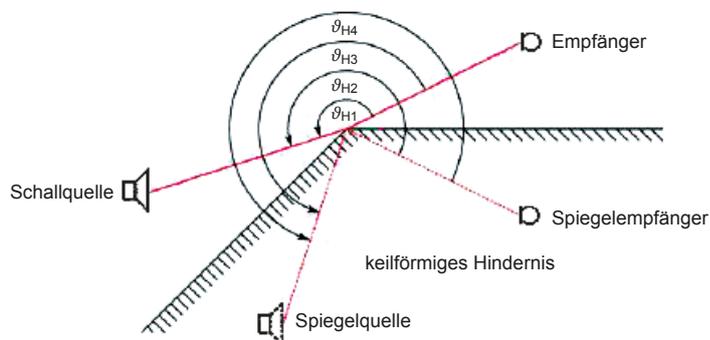


Bild 2-21: Winkel ϑ_{H_i} für die Berücksichtigung der vier relevanten Schallanteile am Empfänger zur Modellierung der Schallbeugung an einem keilförmigen Hindernis mit impedanzbelegten Flächen nach [Nord 2000] aus [Schulze 2015]

Diffuse Reflexion an Flächen mit Struktur

Die Auswirkung der Struktur auf die Schallreflexion am Schallschirm kann durch einen die Rauigkeit berücksichtigenden Faktor, z. B. [Attenborough 1995], durch die Annahme eines zusätzlichen Strahlers und durch die Berücksichtigung der Einzelflächen mit Hilfe des „Fresnel-Zonen-Modells“ aus [Nord 2000] beschrieben werden.

Inkohärenz

Beugung durch Wind- und Temperaturprofil, Turbulenz: In [Embleton 1996], [Li 1996], [Ostashev 2001] werden Berechnungsmodelle zur Vorhersage der Schallfeldanteile durch Wind- und Temperaturprofile beschrieben. Diese Modelle können nicht als einfache Berechnungsverfahren betrachtet werden. Einfachere Verfahren stellen z. B. ATTENBOROUGH [Attenborough 1997] und [Nord 2000] vor. ATTENBOROUGH berechnet die Beugung anhand eines linearen Windprofils. Nord 2000 verwendet dagegen ein logarithmisches Profil. Ein sehr einfaches Turbulenzmodell beschreibt BERENGIER in [Berengier 1997]. Hier werden zur Berechnung der Auswirkung der Turbulenz in der Atmosphäre normalverteilte Größen angesetzt, deren Amplitude für Windgeschwindigkeiten zwischen 0 ... 4 m/s angegeben werden. Die berechneten Schallfeldanteile werden energetisch addiert. Die Kombination der schalltechnischen Wirkung der verschiedenen relevanten Ausbreitungspfade erfolgt auf Grundlage von partieller kohärenter Addition der einzelnen Schalldruckanteile am Immissionsort in Verbindung mit einem spektralen Kohärenzfaktor (vgl. [sonRoad 2004]).

Komplexe Geometrien von Lärmschutzwänden sowie Lärmschutzwände mit definierter akustischer Impedanz

Das bestehende Berechnungswerkzeug lässt sich flexibel um zusätzliche Module zur Berücksichtigung komplexer Geometrien von Lsw sowie von Lsw mit definierter (lokal unterschiedlicher) Impedanz erweitern. Eine effektive Möglichkeit besteht in der Definition einer Zusatzdämpfung durch komplexe Lsw-Geometrien bzw. unterschiedliche Impedanz, die auf Basis von FEM-Berechnungen ermittelt und in die Ausbreitungsrechnung übertragen werden kann.

2.5.2 Rechnerische Umsetzung

Die analytischen Berechnungen der Einfügungsdämpfung zur Validierung des Simulationsmodells erfolgten entsprechend [Schulze 2015].

Die von einer Schallquelle mit dem spektralen Schalleistungspegel $L_w(f)$ und dem frequenzabhängigen Richtungsmaß $D(f)$ emittierte Schallenergie tritt durch eine um die Schallquelle gedachte, kugelförmige Hüllfläche

$$S_H = 4\pi r_{\text{Ref}}^2 \quad (2.4)$$

hindurch und erzeugt im Referenzabstand von $r_{\text{Ref}} = 1 \text{ m}$ ($S_0 = 1 \text{ m}^2$) einen Schalldruckpegel $L_{p\text{Ref}}(f)$. Bei der weiteren Schallausbreitung zum Empfänger tritt eine frequenzabhängige Pegelminderung $\Delta L_p(f)$ infolge der verschiedenen in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Schallausbreitungseffekte auf. Somit ergibt sich der spektrale Schalldruckpegel am Empfänger zu

$$L_{pE}(f) = L_w(f) + D(f) - 10 \cdot \lg\left(\frac{S_H}{S_0}\right) \text{ dB} - \Delta L_p(f). \quad (2.5)$$

Innerhalb der Schallfeldsimulationen zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer semi-infiniten Lsw erfolgt die Berechnung der frequenzabhängigen Pegelminderung $\Delta L_p(f)$ durch partiell kohärente Addition (Operator \cap) der einzelnen relevanten Schalldruckanteile am Empfänger zu

$$\Delta L_p(f) = -10 \cdot \lg \left(\left| \bigcap_i \frac{p_{Ei}(f)}{p_{Ref}(f)} \right|^2 \right) \text{dB.} \quad (2.6)$$

p_{Ei} beschreibt dabei den komplexen Schalldruck, der durch Schallausbreitung von der Quelle zum Empfänger entlang des i -ten Ausbreitungspfads am Empfänger verursacht wird. p_{Ref} entspricht dem komplexen Schalldruck am Referenzort. Für die partiell kohärente Addition der einzelnen relevanten Schalldruckanteile am Empfänger anhand von

$$\left| \bigcap_i \frac{p_{Ei}(f)}{p_{Ref}(f)} \right|^2 = \left| \frac{p_{dir-H}}{p_{Ref}} + \sum_{i=1}^{N_B} \frac{p_{Bi}}{p_{Ref}} \right|^2 K_S^2 + \left(\left| \frac{p_{dir-H}}{p_{Ref}} \right|^2 + \sum_{i=1}^{N_B} \left| \frac{p_{Bi}}{p_{Ref}} \right|^2 \right) (1 - K_S^2) + \sum_{i=1}^{N_{NB}} \left| \frac{p_{NBi}}{p_{Ref}} \right|^2 \quad (2.7)$$

wird auf die Formulierungen in [sonRoad 2004] zurückgegriffen. p_{dir-H} entspricht darin dem absoluten Schalldruck am Empfänger bei Schallausbreitung von der Quelle zum Empfänger über den direkten Pfad bei gegebenenfalls vorhandenem Hindernis (primärer Ausbreitungspfad). Der Kohärenzfaktor K_S ermöglicht es, die Stärke der Kohärenz zwischen den Schalldruckanteilen entlang der einzelnen Ausbreitungspfade in Abhängigkeit von den vorliegenden Schallausbreitungsbedingungen sowie der Abstrahlung der betrachteten Schallquelle beeinflussen zu können. Bei den sekundären Ausbreitungspfaden ist dazu zwischen N_B Bodenreflexionspfaden und N_{NB} Nicht-Bodenreflexionspfaden zu unterscheiden. Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen wird der Ausbreitungspfad, der mehr als eine Bodenreflexion einschließt, als Nicht-Bodenreflexionspfad gekennzeichnet. Die schalltechnische Wirkung dieses Ausbreitungspfades fließt damit ausschließlich energetisch (inkohärent) und nicht phasenrichtig (kohärent) in die Berechnung der Pegelminderung ΔL_p ein. Für die Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer semi-infiniten Lsw erfolgt die Berechnung von K_S nach [sonRoad 2004]. Die schalltechnische Wirkung des i -ten Ausbreitungspfades am Empfänger

$$\frac{p_{Ei}}{p_{Ref}} = \prod_n F_{\text{Effekt } n} \quad (2.8)$$

resultiert aus der Multiplikation der komplexen Schallminderungsfaktoren $F_{\text{Effekt } n}$ der n verschiedenen Schallausbreitungseffekte. Im Detail werden die verschiedenen Schallausbreitungseffekte wie folgt modelliert:

Der Schallminderungsfaktor für Divergenz und atmosphärische Dämpfung berechnet sich unter Berücksichtigung des Schalldämpfungskoeffizienten der Luft aus [DIN ISO 9613-1] gemäß

$$F_{\text{Div}} = \frac{r_{\text{Ref}}}{r} \cdot e^{-jk(r-r_{\text{Ref}})} \cdot e^{-0,1151\alpha(r-r_{\text{Ref}})}. \quad (2.9)$$

Die atmosphärische Dämpfung entlang des Pfades der Länge $r_{\text{Ref}} = 1$ m von der Quelle zum Referenzort bleibt in Gl. (2.5) unberücksichtigt, da sie nicht relevant ist.

Der Schallminderungsfaktor für eine Bodenreflexion bei vorhandener Impedanzdiskontinuität

$$F_{\text{Boden}} = \mu r_{K1} + (1 - \mu) r_{K2} \quad (2.10)$$

entspricht dem mittleren wirksamen Kugelwellenreflexionsfaktor aus [Schulze 2015]. Die darin enthaltenen Kugelwellenreflexionsfaktoren r_{Ki} ($i = 1, 2$), die den beiden relevanten Oberflächen zugeordnet sind, ergeben sich durch Anwendung der Weyl-van-der-Pol-Lösung gemäß [Chien 1980] zu

$$r_{Ki} = r_{Ei}(\vartheta_{Bi}) + (1 - r_{Ei}(\vartheta_{Bi})) \cdot F_i(w_{Bi}). \quad (2.11)$$

Für die Berechnung der numerischen Distanz wird auf [Stinson 1995] zurückgegriffen. Die Bestimmung des Wichtungsfaktors μ erfolgt gemäß [Schulze 2015], Gleichung (4.30).

Der Schallminderungsfaktor für die Schallbeugung an einem keilförmigen Hindernis mit impedanzbelegten Flächen berechnet sich mit

$$F_{\text{Beug}} = -\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^4 r_{Ki} A_H(\vartheta_{Hi}) E_v(A_H(\vartheta_{Hi})) \quad (2.12)$$

analog zum Schallbeugungskoeffizienten aus [Plovsing 2001]. Zur Modellierung eines dünnen Schallschirms wird der Winkel bei der Ermittlung der Parameter ϑ_{Hi} entsprechend Bild 2-21 auf 2π gesetzt.

Die Bestimmung des Gesamtpegels der Einfügungsdämpfung einer semi-infiniten Lsw erfolgt schließlich gemäß

$$\begin{aligned} D_{e \text{ Lsw}} &= L_{pE \text{ frei}} - L_{pE \text{ Lsw}} \\ &= L_{pE \text{ frei}} - 10 \cdot \lg \left(\sum_f 10^{\frac{L_{pE \text{ frei}}(f) - D_{e \text{ Lsw}}(f)}{10 \text{ dB}}} \right) \text{ dB.} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Darin entspricht $L_{pE \text{ frei}}$ dem Schalldruckpegel am Empfänger, der sich bei freier Schallausbreitung über reflektierendem Boden und $L_{pE \text{ Lsw}}$ dem Schalldruckpegel am Empfänger, der sich bei installierter Lsw über reflektierendem Boden infolge der Schallemission einer Quelle ergibt. Die frequenzabhängige Einfügungsdämpfung des Schallschirms $D_{e \text{ Lsw}}(f)$ berechnet sich unter Berücksichtigung von Gl. (2.5) zu

$$\begin{aligned} D_{e \text{ Lsw}}(f) &= L_{pE \text{ frei}}(f) - L_{pE \text{ Lsw}}(f) \\ &= \Delta L_{p \text{ Lsw}}(f) - \Delta L_{p \text{ frei}}(f). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Bild 2-22 zeigt die prinzipiellen geometrischen Szenarien zur Ermittlung der spektralen Minderung des Schalldruckpegels am Referenzort infolge der verschiedenen Schallausbreitungseffekte bei freier Schallausbreitung über reflektierendem Boden $\Delta L_{p \text{ frei}}(f)$ sowie bei Schallausbreitung über die Lsw über reflektierendem Boden $\Delta L_{p \text{ Lsw}}(f)$ für einen horizontalen Schalleinfallswinkel zwischen Quelle und Empfänger von $\varphi_Q = 0^\circ$ (senkrechter Schalleinfall).

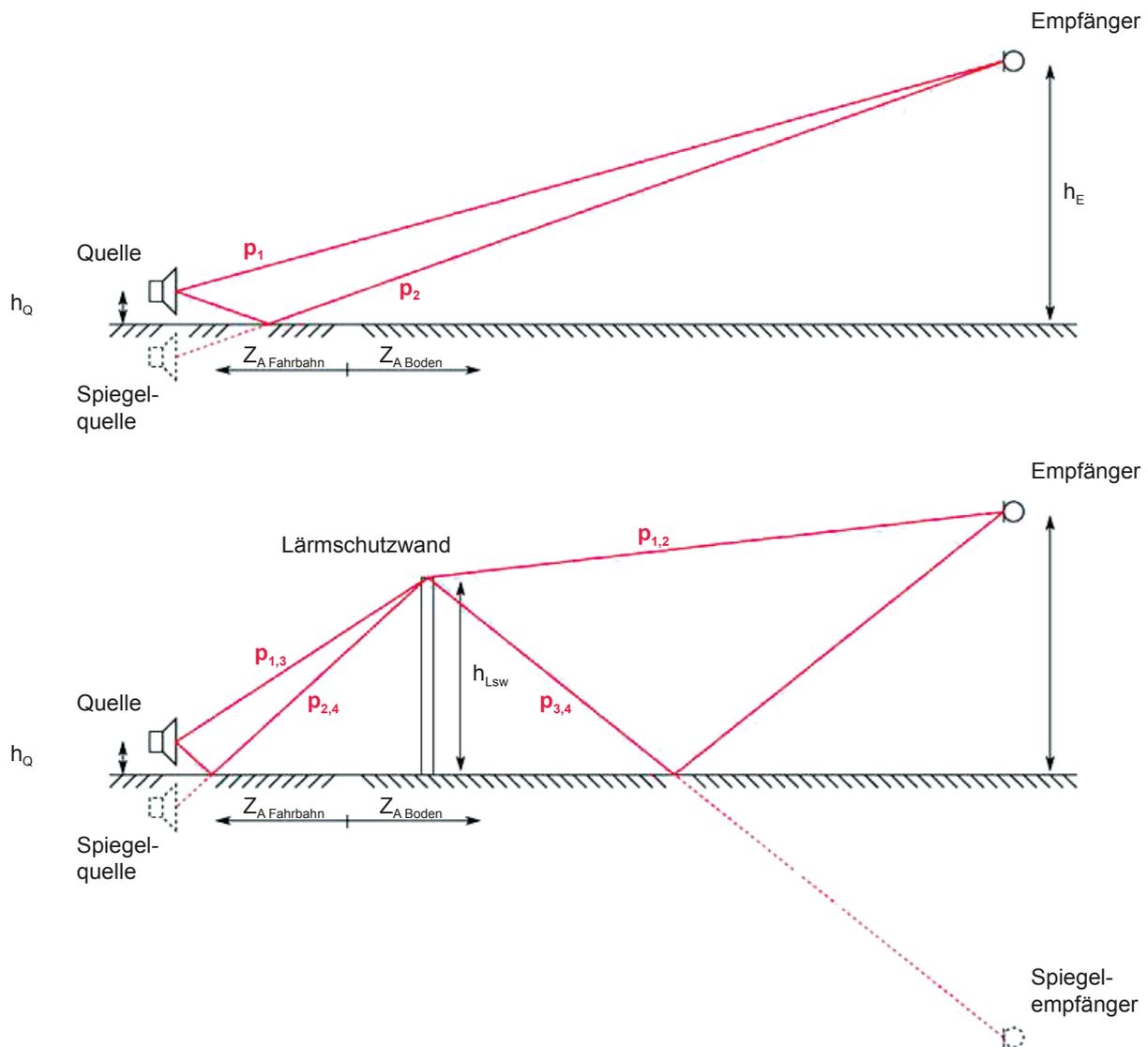


Bild 2-22: Prinzipielle geometrische Szenarien zur Simulation der spektralen Minderung des Schalldruckpegels am Referenzort infolge der verschiedenen Schallausbreitungseffekte bei freier Schallausbreitung über reflektierendem Boden (oben) sowie bei Schallausbreitung über die Lsw über reflektierendem Boden (unten) für einen horizontalen Schalleinfallswinkel zwischen Quelle und Empfänger von $\varphi_Q = 0^\circ$ (senkrechter Schalleinfall; Abstände in vertikaler Richtung gegenüber Abständen in horizontaler Richtung im Verhältnis von 2:1 dargestellt); aus [Schulze 2015]

2.6 Fazit

Die akustische Wirksamkeit von Lsw-Aufsätzen und komplexen Geometrien von Lsw zur Beeinflussung der Schallbeugung über die Oberkante der Lsw wurde bereits vielfach untersucht. Dabei wird zumeist bestätigt, dass die Wirksamkeit der Lsw in weiten Teilen ihres Schattenbereichs verbessert wird. Als sehr vielversprechende und einfach zu konstruierende Lösung haben sich zylindrische Lsw-Aufsätze und T-Profile erwiesen, die vor allem bei absorbierender und insbesondere bei schallweicher Ausführung (in der Theorie) eine hohe Einfügungsdämpfung mit sich bringen. Aber auch für gekrümmte und geknickte Lsw zeigt sich in den meisten Fällen eine Verbesserung der Wirksamkeit. Aufgrund des asymmetrischen Querschnitts ergibt sich bei diesen die Möglichkeit, die Ausrichtung zur Straße (zugewandt oder abgewandt) zu variieren. Dabei hat sich herausgestellt, dass die zur Straße hingewandte Option für die meisten Geometrien die sicherere Variante darstellt. Zwar ist bei der der Straße abgewandten Option lokal eine bessere Wirksamkeit möglich als bei der der Straße zugewandten Variante, jedoch weist die der Straße abgewandte Variante gelegentlich lokale Erhöhungen des Schalldruckpegels gegenüber einer einfachen Lsw auf. Für der Straße zugewandte gekrümmte bzw. geknickte Lsw treten lokale Pegelerhöhungen selten auf, insbesondere, wenn eine vollständig absorbierende Ausführung der Lsw umgesetzt wird.

Die absorbierende Ausführung von Lsw im Allgemeinen stellt den ersten Schritt in der Betrachtung des Einflusses der Impedanz auf die Wirksamkeit einer Lsw dar. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass bereits eine absorbierende Bekleidung einzelner Bereiche von Lsw bzw. von Aufsätzen zu einer maßgeblichen Verbesserung der akustischen Wirksamkeit führen kann. Im nächsten Schritt wurde zusätzlich untersucht, ob die Wirksamkeit bei einer gezielten Auslegung der Impedanz noch weiter optimiert werden kann. Hierbei wurde in mehreren Veröffentlichungen festgestellt, dass eine schallweiche Auslegung vor allem der Oberkante bzw. der Aufsätze der Lsw zu einer weiteren Steigerung der Wirksamkeit führen kann. Da dies in der Realität durch den Einsatz von Resonatoren zumeist nur sehr schmalbandig möglich ist, wurde zudem untersucht, inwiefern die Wirksamkeit von Resonatoren auf einen breiteren Frequenzbereich erweitert werden kann. Hierbei stellten sich das Belegen des Resonators mit einem Material geringen Strömungswiderstands sowie die Verwendung von Schroederdiffusoren als vielversprechende und unter Umständen weiter zu verfolgende Ansätze heraus.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde anhand der Literaturrecherche die Untersuchung zur Straße hin gewandter gekrümmter bzw. geknickter Lsw als zielführend angenommen. Dabei stand insbesondere der Einfluss verschiedener Geometrieparameter sowie der Impedanz der einzelnen Teilflächen auf die Wirksamkeit für verschiedene Quell-Lsw-Empfänger-Geometrien im Fokus, um möglichst allgemeingültige Aussagen zu treffen. Diese konnten anschließend in einen Berechnungsalgorithmus überführt werden, der die Berücksichtigung komplexer Geometrien von Lsw sowie unterschiedlicher akustischer Impedanzen in der Schallausbreitungsrechnung nach [DIN ISO 96132] und [RLS-19] ermöglicht.

3 Simulationen

3.1 Konzeption

In diesem Kapitel werden die Konzeption der durchzuführenden Simulation, die Festlegung konstant zu haltender Parameter und die Definition des zu variierenden Parameterraums beschrieben. Dies umfasst insbesondere:

- geometrische und akustische Eigenschaften der Lsw, wie
 - Höhe,
 - komplexer Reflexionsfaktor bzw. Schallabsorptionsgrad;
- geometrische und akustische Eigenschaften der abknickenden Lsw, wie
 - Klappenöffnungswinkel,
 - Klappenlänge,
 - komplexer Reflexionsfaktor bzw. Schallabsorptionsgrad der Klappen und der Lsw;
- geometrische und akustische Eigenschaften der gekrümmten Lsw, wie
 - Krümmungsradius,
 - komplexer Reflexionsfaktor bzw. Schallabsorptionsgrad der gekrümmten Bereiche;
- geometrische und akustische Eigenschaften mit Impedanz belegter Teilflächen der Lsw, wie
 - Positionierung,
 - Ausdehnung,
 - komplexer Reflexionsfaktor bzw. Schallabsorptionsgrad;
- Umgebungsfaktoren, wie
 - Quell-Geometrie (Positionierung der Schallquelle relativ zur Lsw),
 - Empfänger-Geometrie (Positionierung der Immissionsorte relativ zur Lsw),
 - Bodeneigenschaften (komplexer Reflexionsfaktor bzw. Schallabsorptionsgrad).

Auf dieser Grundlage wurde eine Variablen-Matrix aufgestellt, mit der ein umfangreicher und repräsentativer Parameterraum aufgespannt werden konnte. Diese Matrix ermöglicht es, die wesentlichen Einflussfaktoren auf die akustische Wirkung beliebig geformter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw getrennt zu berücksichtigen.

Ausgegangen wird von vier zu betrachtenden Szenarien:

- gerade Lsw (Referenz)
- überkragende Lsw
- gekrümmte Lsw
- unterschiedlich mit Impedanz belegte Lsw

Innerhalb dieser Szenarien wurden die zuvor genannten Parameter gezielt variiert, um Aussagen über deren Einfluss auf die Schallausbreitung treffen zu können.

3.1.1 Modellerstellung

In der Realität kann eine Straße als inkohärente Linienquelle angesehen werden. Um dies möglichst realitätsnah wiederzugeben, erfolgt in der analytischen 2½D-Berechnung (Fall 3) entsprechend [RLS-19] bzw. [RLS-90] eine Diskretisierung dieser Linienquelle in Form einzelner Punktquellen. Wie in Bild 3-1 (rechts) dargestellt, wird dabei angenommen, dass die Lsw für jede berechnete Kombination aus Quell- und Empfängerposition senkrecht zur direkten Verbindungslinie steht. Die Wand dreht sich somit virtuell für die verschiedenen Einfallswinkel.

Die beste Realitätswiedergabe liefert eine 3D-FEM-Simulation (Fall 2), wie sie in Bild 3-1 (mittig) dargestellt ist. Hier kann zur Abbildung einer inkohärenten Linienquelle ebenfalls eine Diskretisierung dieser als eine Vielzahl von Punktquellen erfolgen. Ein Drehen der Wand für die verschiedenen Einfallswinkel, wie es bei der analytischen Berechnung auftritt, erfolgt hierbei nicht. Für eine einfache, senkrechte Lsw ist durch das virtuelle Drehen nicht von einer Beeinflussung der berechneten Einfügungsdämpfung auszugehen. Es wird im Folgenden untersucht, ob dies auch auf unterschiedlich geformte, wie beispielsweise geknickte oder gekrümmte Lsw zutrifft.

Eine deutliche Verringerung des Rechenaufwands gegenüber der 3D-FEM-Simulation stellt eine 2DFEM-Simulation (Fall 1) dar, wie in Bild 3-1 (links) dargestellt. Diese erlaubt jedoch ausschließlich die Verwendung einer Punkt- bzw. kohärenten Linienquelle, was Unterschiede in den Berechnungsergebnissen gegenüber der 3D-FEM hervorrufen kann. Zur Überprüfung, ob eine solche Beeinflussung in maßgeblichem Ausmaß erfolgt, wurden für ein definiertes Szenario einerseits 2D-FEM-Simulationen mit einer unendlich langen (kohärenten) Linienquelle und einer unendlich langen Lsw durchgeführt. Andererseits erfolgte die Berechnung desselben Szenarios durch eine Diskretisierung der (inkohärenten) Linienquelle als einzelne Punktquellen. Anschließend wurden die Schalldruckpegel der einzelnen Quell-Empfänger-Kombinationen energetisch addiert, um zu überprüfen, inwiefern sich die Ergebnisse der 3D-FEM und der 2D-FEM unterscheiden.

Abschließend sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Ergebnisse der FEM-Simulation in eine analytische Beschreibung zu überführen, die der Umsetzung in der [RLS-19] bzw. [RLS-90] entspricht. Da der Rechenaufwand der 2D-FEM deutlich geringer ist als jener der 3D-FEM und durch die geringeren Rechenzeiten und den geringeren Ressourcenbedarf ein größerer Frequenzbereich bzw. Parameterraum abgebildet werden kann, ist diese Vorgehensweise grundsätzlich zu bevorzugen. Es musste jedoch davon ausgegangen werden, dass durch die Annahme einer kohärenten Linienquelle die Ergebnisse der 2D-FEM zu stark von den Ergebnissen der 3D-FEM abweichen. Darum erfolgte im ersten Schritt in Kapitel 3.1.2 die Validierung des 3DFEMModells mithilfe einer analytischen Berechnung.

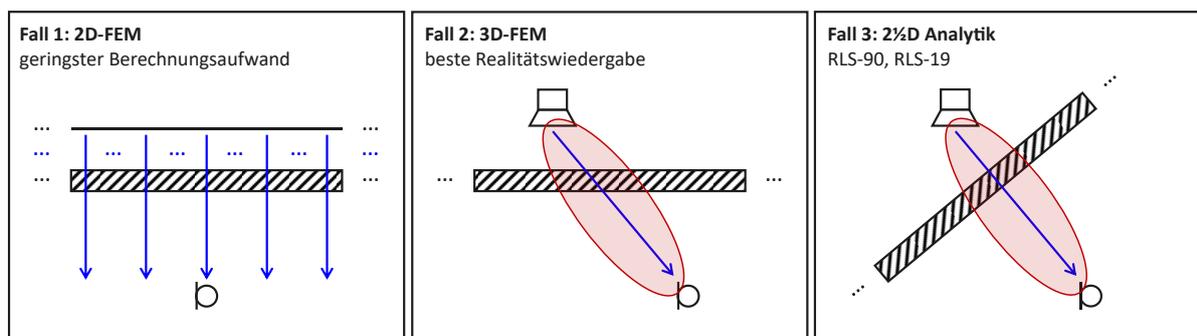


Bild 3-1: Prinzipielle Darstellung verschiedener Vorgehensweisen zur Simulation der Schallausbreitung von Straßenverkehrslärm im Bereich einer Lsw

Die angestrebte Quell-Empfänger-Geometrie sieht vor, die Schallquelle in einem realitätsnahen Abstand zur Lsw zu positionieren und einen möglichst großen Bereich hinter der Lsw rechenstechnisch zu untersuchen. Der Abstand der Quelle von der Lsw wurde daher auf 7,5 m festgelegt. Es wurde angestrebt, einen Bereich von mindestens 25 m hinter der Lsw zu betrachten. Es war dabei vorgesehen, Berechnungen im Frequenzbereich von 250 Hz bis 4 kHz durchzuführen. Die anzustrebende Anzahl von Frequenzlinien je betrachtetem Terzband kann für einen maximalen Fehler von 1 dB und für verschiedene Konfidenzintervalle $n_{i\%}$ entsprechend [Junker 2005] Tabelle 3.1 entnommen werden. Bei den simulationstechnischen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde angestrebt, eine möglichst hohe Anzahl an Frequenzlinien je Terzband zu realisieren. Auf den damit verbundenen Rechenaufwand wird im Folgenden näher eingegangen.

f_m in Hz	$n_{95\%}$	$n_{99\%}$	$n_{100\%}$	f_m in Hz	$n_{95\%}$	$n_{99\%}$	$n_{100\%}$	f_m in Hz	$n_{95\%}$	$n_{99\%}$	$n_{100\%}$
50	1	1	7	250	2	7	8	1.250	5	8	11
63	1	3	8	315	3	7	8	1.600	6	8	13
80	1	3	8	400	4	7	8	2.000	6	8	17
100	1	4	7	500	4	7	8	2.500	6	9	22
125	1	6	8	630	4	7	8	3.150	7	12	25
160	1	6	8	800	5	8	8	4.000	7	15	34
200	2	6	8	1.000	5	7	8				

Tab. 3.1: Anzustrebende Linienzahl je Terzband zum Erreichen eines maximalen Fehlers von 1 dB für verschiedene Konfidenzintervalle aus [Junker 2005]

Im Allgemeinen wird für die Durchführung akustischer FEM-Simulationen eine Mindest-Elementzahl von sechs je Wellenlänge vorausgesetzt. In COMSOL werden fünf bis zehn Elemente je Wellenlänge für akustische Berechnungen empfohlen, wobei für Außenraumprobleme mit großen Dimensionen grundsätzlich eine geringere Knotenzahl ausreichend ist als für kleine, detailreiche Modelle.

Zur Auswahl des anzuwendenden numerischen Berechnungsmodells erfolgten umfangreiche Voruntersuchungen zur Simulation der Schallausbreitung an einer schallharten geraden Lsw mittels Randelemente-Methode (BEM) und Finite-Elemente-Methode (FEM). Für die Berechnungen kamen eine leistungsfähige Workstation mit 2x Intel Xeon Prozessor E5-2650 v4 (30 MB Cache, 2,20 GHz), 16 Kernen und 265 GB DDR 4 Arbeitsspeicher sowie die numerische Simulationssoftware COMSOL Multiphysics® zum Einsatz.

Es zeigte sich sehr schnell, dass ein zur Realisation von Fall 2 aus Bild 3-1 erzeugtes vollständiges numerisches Berechnungsmodell die verfügbaren Berechnungskapazitäten bei Weitem übersteigt. Die Anwendung der FEM erfordert die komplette Vernetzung des Luftvolumens zwischen Schallquelle und Empfänger. Die Anzahl der Berechnungspunkte steigt dabei in der dritten Potenz mit der Frequenz an. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die Schallimmission hinter der Lsw durch die Schallausbreitung um die Seitenkanten der Lsw vernachlässigbar ist gegenüber der Schallimmission durch Schallausbreitung über die Schirmoberkante. Insbesondere zur Simulation der Schallausbreitung für große horizontale Schalleinfallswinkel nimmt die Größe des Berechnungsmodells bei vollständiger Vernetzung mit dem Tangens des Winkels zu, sodass Berechnungen ausschließlich im für Straßenverkehrslärm wenig relevanten niedrigen Frequenzbereich möglich sind.

Die alternative Anwendung der BEM erfordert keine Vernetzung des Luftvolumens zwischen Schallquelle und Empfänger, sondern eine Vernetzung sämtlicher das Schallausbrei-

tungsgebiet begrenzenden Oberflächen (Boden, Lsw, usw.). Bei ausschließlicher Modellierung der Lsw als unendlich dünnen Schallschirm (2-dimensionaler Schirm) fällt die bei Anwendung der BEM gegenüber der FEM bei vollständiger Vernetzung maximal auswertbare Frequenz höher aus. Jedoch ermöglicht diese Art der Modellierung keinerlei Berücksichtigung einer einseitigen Wandimpedanz, was jedoch als ein Teilziel des vorliegenden Projekts definiert war. Eine Erweiterung des BEM-Berechnungsmodells auf einen 3-dimensionalen Schirm führt jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des Berechnungsaufwands und damit wiederum zur deutlichen Reduzierung der maximal auswertbaren Frequenz.

Ein Vorteil der FEM besteht in der möglichen Anwendung sogenannter PML (Perfectly Matched Layer), wodurch das numerische Berechnungsmodell seitlich begrenzt werden kann. Prinzipiell erzeugt diese PML eine akustische Anpassung im Randbereich des Berechnungsgebiets, sodass keine relevante Schallreflexion in das interessierende Zentrum des Berechnungsgebiets und damit keine relevante Beeinflussung der Berechnungsergebnisse in diesem Bereich auftritt.

Zur Ermittlung der für den jeweiligen horizontalen Schalleinfallswinkel erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw wird auf das Fresnel-Zonen-Modell zurückgegriffen. Gemäß diesem Modell erfolgt die Übertragung der relevanten Schallenergie nicht nur entlang des direkten Ausbreitungspfads zwischen Quelle und Empfänger, sondern innerhalb eines gedachten Rotationsellipsoids, in dessen Brennpunkten sich Quelle und Empfänger befinden. Dies ist beispielhaft für die Modellierung der Schallreflexion am Boden in Bild 3-2 dargestellt, wobei das Rotationsellipsoid in diesem Fall durch Spiegelquelle und Empfänger aufgespannt wird. Die Schnittfläche des Rotationsellipsoids mit dem Boden wird als Fresnel-Zone bezeichnet, die als in diesem Fall wirksame Reflexionsfläche – das heißt als Fläche, an der die wesentliche Schallenergie reflektiert wird – angesehen werden kann. Die Ausdehnung des Rotationsellipsoids ergibt sich aus der Definition der zulässigen Wegverlängerung über den Rand des Rotationsellipsoids ($\overline{S'PR}$) gegenüber der direkten Schallausbreitung zwischen Spiegelquelle und Empfänger ($\overline{S'R}$).

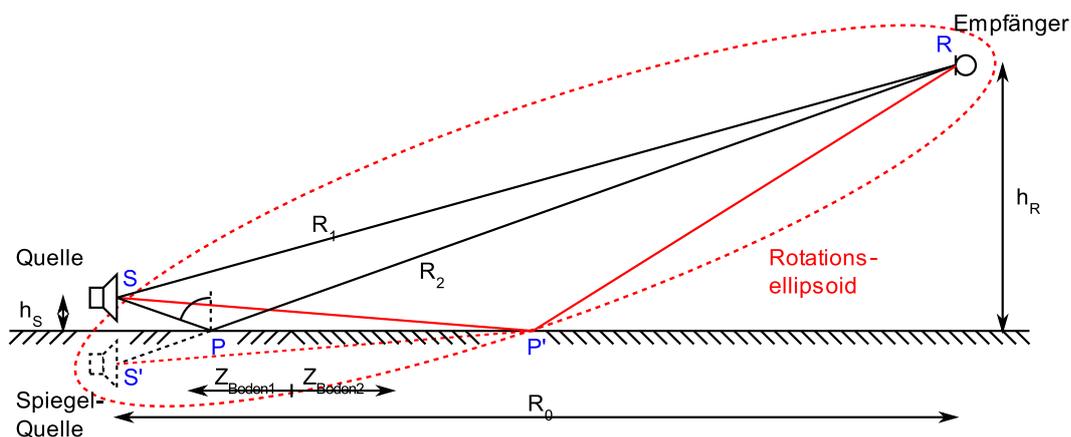


Bild 3-2: Modellierung der Schallreflexion am Boden auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells aus [Schulze 2015]

Innerhalb der folgenden Untersuchungen wurde diese Wegverlängerung entsprechend [Schulze 2015] auf ein Drittel der betrachteten Wellenlänge festgelegt. Zur Festlegung der für den jeweiligen horizontalen Schalleinfallswinkel erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw wurde die Schnittfläche zwischen Rotationsellipsoid und Lsw in Wandrichtung um jeweils eine halbe Wellenlänge rechts und links vergrößert. Das sich daraus ergebende Berechnungsmodell mit Quell-Empfänger-Geometrie zeigt Bild 3-3.

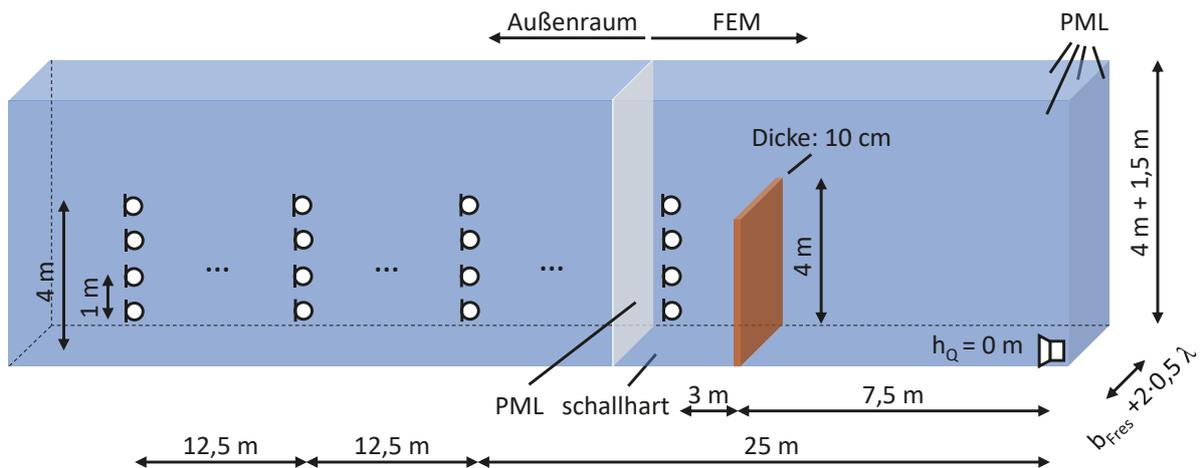


Bild 3-3: Berechnungsmodell mit Quell-Empfänger-Geometrie

Das Berechnungsmodell besteht aus zwei Berechnungsgebieten – einem FEM-Gebiet und einem Außenraum. Im FEM-Gebiet erfolgt dem Namen entsprechend die numerische Berechnung der Schallausbreitung über die Oberkante der Lsw mit Hilfe der FEM. Für die Voruntersuchungen wurde eine schallharte, gerade Lsw mit einer Höhe von 4 m und einer Dicke von 0,1 m gewählt. Die Schallquelle befindet sich unmittelbar auf dem Boden und in einem horizontalen Abstand von 7,5 m zur Lsw. Dies repräsentiert eine im Geschwindigkeitsbereich von ca. 40 km/h und 120 km/h dominante Rollgeräusch-Schallquelle eines Pkws auf dem ersten Fahrstreifen einer Autobahn. Der Boden ist über den kompletten Bereich als schallhart definiert. Hinter der Lsw befinden sich vier Empfänger im Abstand von 3 m zur Lsw und in verschiedenen Höhen über dem Boden. Die Elementzahl wurde im ersten Schritt auf vier je Wellenlänge, die Anzahl an Frequenzlinien je Terzband auf drei festgelegt.

Im Außenraum wird zusätzlich eine gekoppelte vereinfachte BEM eingesetzt, die es ermöglicht, auf Basis der Berechnungsergebnisse an der Hinterkante des FEM-Bereichs die Schallausbreitung über schallhartem oder vollständig schallabsorbierendem Boden bis in große Abstände zur Lsw zu berechnen. Der dafür erforderliche Berechnungsaufwand fällt gegenüber dem Aufwand der FEM-Berechnungen vergleichsweise gering aus.

Bild 3-4 bis Bild 3-7 zeigen die resultierenden numerischen Berechnungsmodelle zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich der schallharten, geraden Lsw mit Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells für verschiedene horizontale Schalleinfallswinkel und Terzmittenfrequenzen. Darin ist zu erkennen, dass die Längenausdehnung des Berechnungsgebiets und damit der Berechnungsaufwand mit zunehmendem horizontalem Schalleinfallswinkel wie erwähnt steigt. Die Breitenausdehnung des Berechnungsgebiets reduziert sich für zunehmende horizontale Schalleinfallswinkel und zunehmende Frequenzen geringfügig, da sich der Durchmesser des Rotationsellipsoids verringert. Der Erhöhung der Berechnungszeit durch die kubische Erhöhung der Stützstellenanzahl des vernetzten Berechnungsgebiets bei steigender Frequenz wirkt dies jedoch nur geringfügig entgegen.

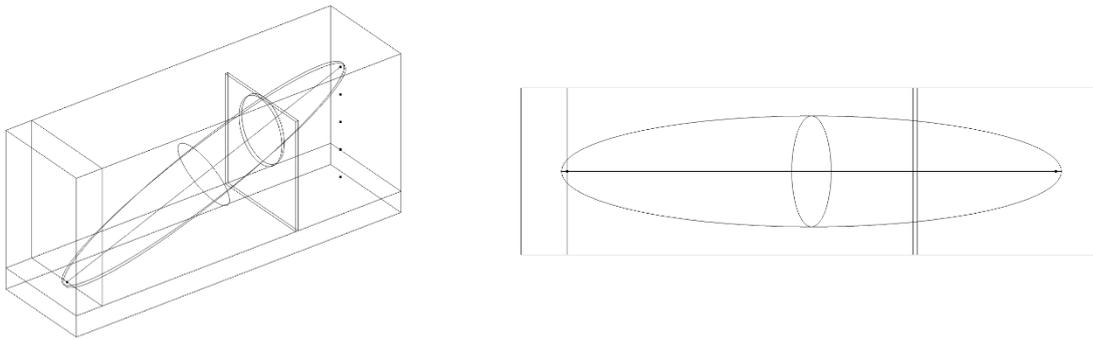


Bild 3-4: Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 0° , Terzmittenfrequenz 500 Hz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht

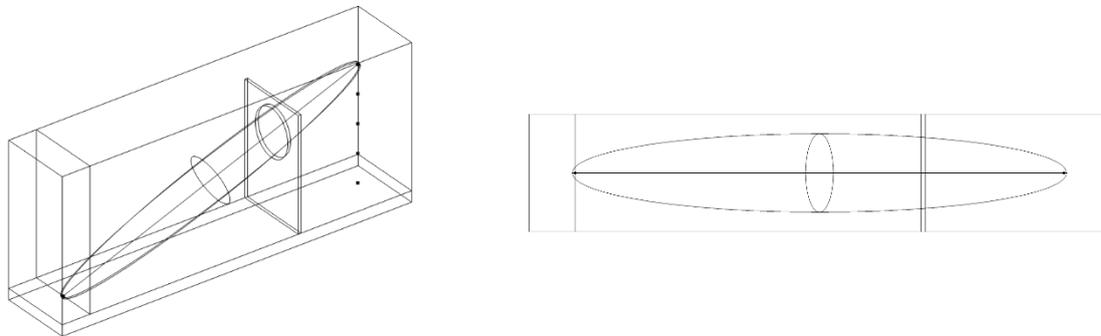


Bild 3-5: Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 0° , Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht

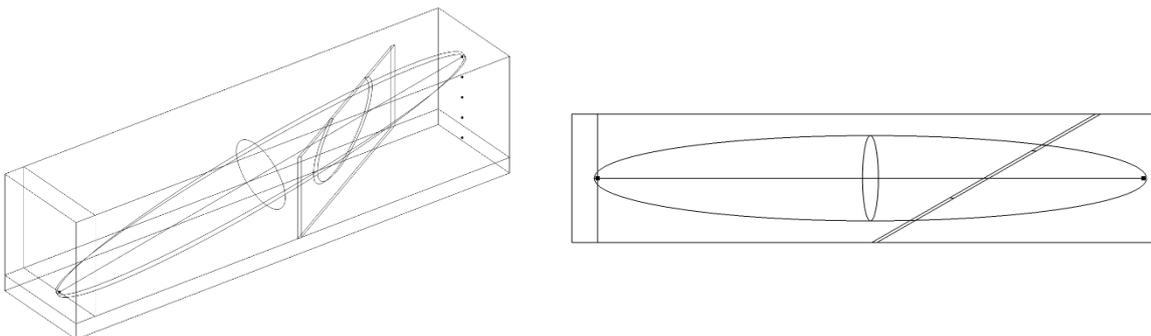


Bild 3-6: Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 60° , Terzmittenfrequenz 500 Hz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht

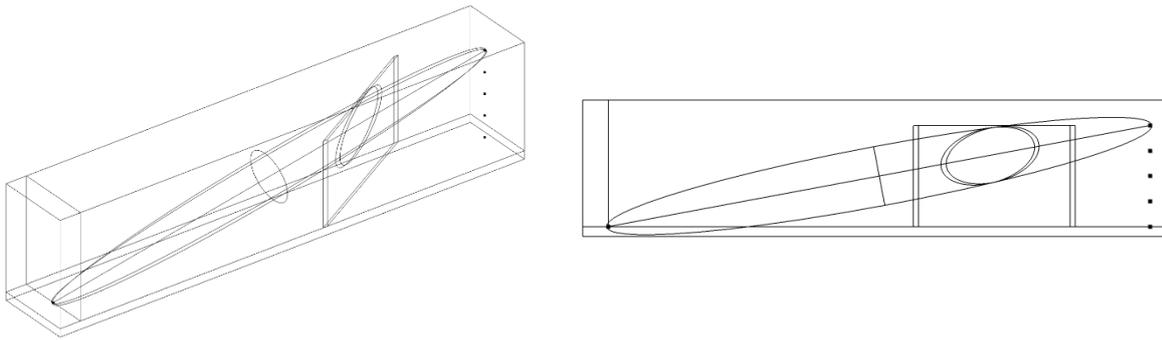


Bild 3-7: Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 60° , Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Seitenansicht

Die Ankopplung der PML zur umseitigen Begrenzung (mit Ausnahme des Bodens) des quaderförmigen numerischen Berechnungsmodells zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich der schallharten, geraden Lsw ist in Bild 3-8 beispielhaft für einen horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° für die Terzmittenfrequenz von 1 kHz dargestellt.

Das numerische Berechnungsmodell zur Simulation der freien Schallausbreitung ohne Lsw über schallhartem Boden weist dieselben Dimensionen auf wie das jeweilige Berechnungsmodell mit Lsw.

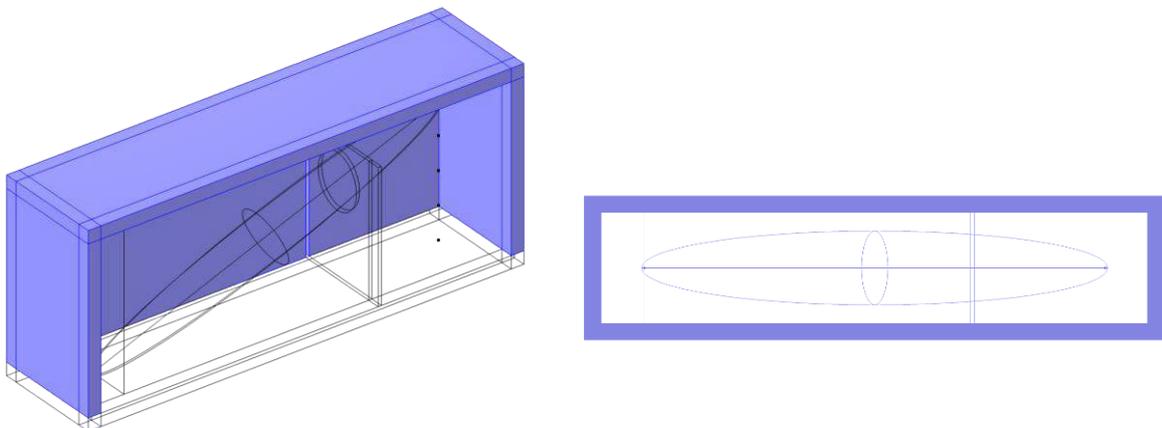


Bild 3-8: Begrenzung des numerischem Berechnungsmodells zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw durch umseitige PML (ausgenommen des Bodens); horizontaler Schalleinfallswinkel 0° , Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht

In Bild 3-9 ist die Dauer zur Durchführung der FEM-Berechnungen für drei Linien je Terzband exemplarisch für den Frequenzbereich von $f_m = 400$ Hz bis $f_m = 800$ Hz dargestellt. Es bestätigt sich die Annahme, dass die Berechnungsdauer sowohl mit steigender Frequenz als auch mit zunehmendem Öffnungswinkel mit der dritten Potenz ansteigt. Die Berechnungen für 800 Hz mussten nach der Berechnung für 0° und 20° aufgrund der hohen Berechnungszeit abgebrochen werden. Für den Frequenzbereich bis 800 Hz ergeben sich bereits für das Modell mit reduzierter Elementzahl und verringerter Distanz der Empfängerposition zur Lsw sehr hohe Berechnungszeiten von ca. 7 h bis 8 h. Im weiteren Projektverlauf wurde das Modell weiter optimiert, um eine Berechnung bei höheren Frequenzen, in größeren Distanzen hinter der Lsw und auch für große horizontale Schalleinfallswinkel mit einem akzeptablen Zeit- und Ressourcenaufwand zu realisieren. Des Weiteren wurde untersucht, ob sich mithilfe einer 2D-Simulation (entsprechend Fall 1 in Bild 3-1)

eine ähnliche Ergebnisqualität erreichen lässt wie mithilfe der 3D-Simulation. Die 2D-FEM weist gegenüber der 3D-FEM den Vorteil auf, dass die Berechnungen schneller und mit einem geringeren Ressourcenaufwand durchgeführt werden können.

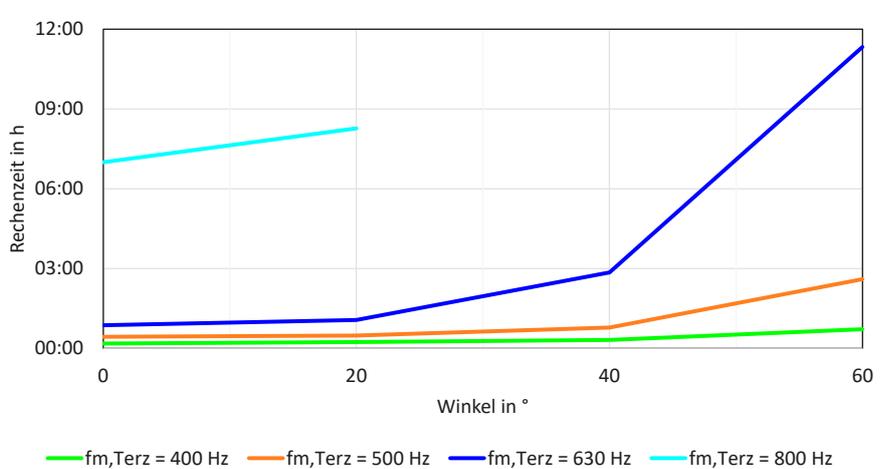


Bild 3-9: Rechenzeit der numerischen 3D-FEM-Simulationen an gerader Lsw für verschiedene Terzbänder (drei Frequenzlinien je Terzband) und verschiedene horizontale Schalleinfallswinkel

Anpassung des Simulationsmodells

Auf Grundlage der ersten Simulationsergebnisse erfolgte eine umfassende Anpassung des Simulationsmodells zur Steigerung der Effizienz der Untersuchungen. Das angepasste Modell ist in Bild 3-10 dargestellt. Es wurden drei maßgebliche Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Modell umgesetzt. Zum einen wird in den simulationstechnischen Untersuchungen im Folgenden ausschließlich der FEM-Bereich berücksichtigt. Dies hat eine starke Reduzierung der Rechendauer zur Folge, die sich jedoch nicht auf die Aussagekraft der Ergebnisse innerhalb des FEM-Bereichs auswirkt. Durch den Wegfall des BEM-Berechnungsgebiets kann im FEM-Bereich die obere Grenze des abbildbaren Frequenzbereichs erweitert werden. Die zweite Änderung sieht vor, dass der bislang als schallhart angenommene Boden mittels PML schallabsorbierend umgesetzt wird. Dies hat zur Folge, dass anstelle der Einfügungsdämpfung des betrachteten Systems das Schirmmaß D_z berechnet werden kann.

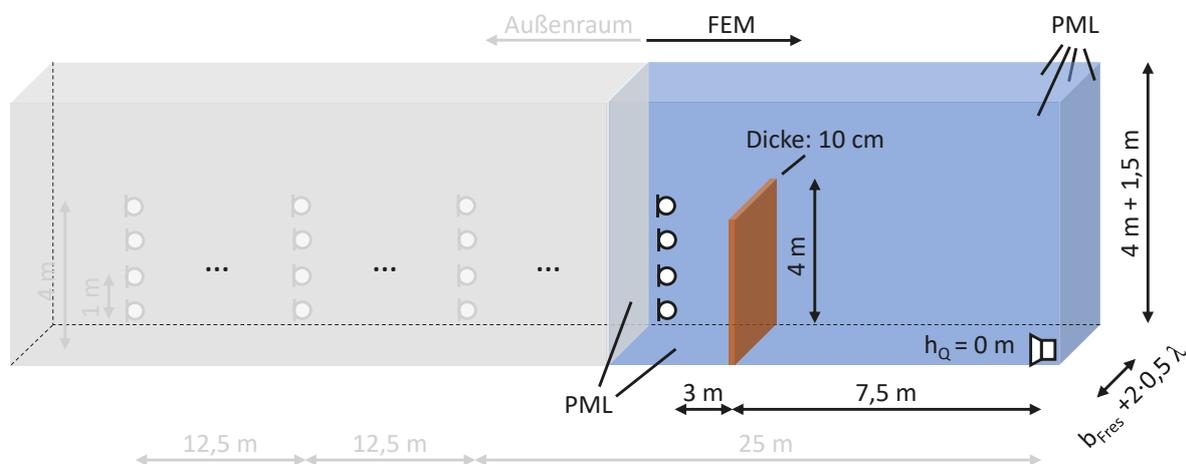


Bild 3-10: Angepasstes Berechnungsmodell mit Quell-Empfänger-Geometrie für numerische 3D-FEM-Simulationen

Eine weitere Änderung des Modells adressiert den Effekt, dass die Definition von Teilstücken der Linienquelle in konstanten Intervallen des horizontalen Schalleinfallswinkels (0° , 20° , 40° , 60° ; im Folgenden als Quellwinkel bezeichnet) zur Folge hat, dass die Teilstücke mit zunehmendem Winkel deutlich länger werden. In der [RLS-19] wird festgehalten, dass die Länge eines Teilstücks l_i höchstens so groß sein darf wie die halbe Distanz zwischen der Teilstückmitte und dem Immissionsort s_i . Dieser Bedingung konnte mit dem bisherigen Modell für große Winkel nicht genüge getan werden. Des Weiteren ergibt sich, dass sich die angesetzten Punktquellen mitunter nicht exakt mittig im jeweiligen Teilstück befinden. Durch die Einführung eines weiteren Teilstücks, dessen Mittelpunkt sich bei einem Quellwinkel von 50° befindet sowie die Verschiebung des 40° -Teilstücks zu $37,5^\circ$ konnten beide Effekte eliminiert werden. Wie in Bild 3-11, unten dargestellt, ergibt sich für das angepasste Modell eine deutlich gleichmäßigere Verteilung der Teilstücklängen über die Gesamtlänge der betrachteten Straße. Gleichzeitig befinden sich die Punktschallquellen jedes Teilstücks in dessen geometrischem Mittelpunkt. Die verbleibenden Längenunterschiede finden bei der energetischen Addition der Schallanteile mehrerer Teilstücke durch geometrische Wichtung Berücksichtigung.

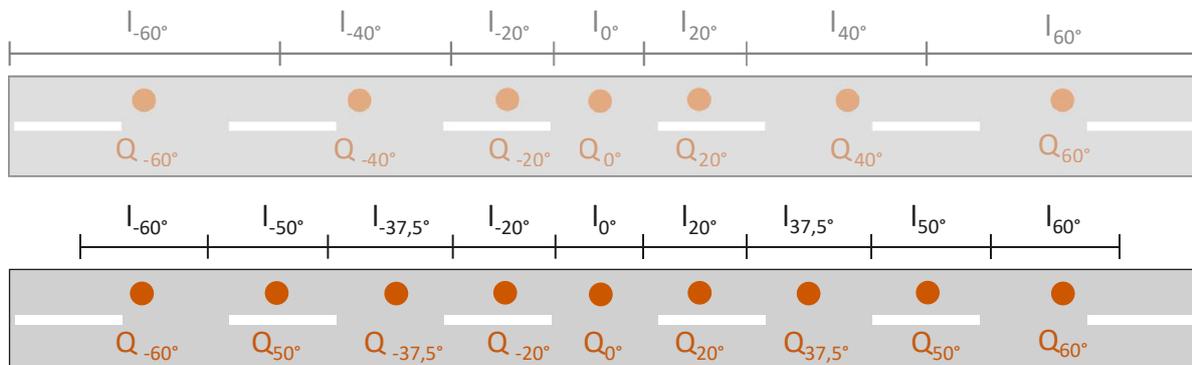


Bild 3-11: Geometrische Anordnung der modellierten Punktschallquellen unter verschiedenen horizontalen Schalleinfallswinkeln (Quellwinkeln) zur Repräsentation definierter Teilstücke einer Straße; oben: bisheriges Modell; unten: angepasstes Modell

3.1.2 Modellvalidierung

Zur Validierung des 3D-FEM-Modells wurden vergleichende 2D-FEM-Simulationen durchgeführt. Diese dienen gleichzeitig dem Ziel zu evaluieren, ob eine Untersuchung mittels 2D-FEM-Simulation gleichwertige Ergebnisse liefert. Dies hätte mehrere Vorteile. Zum einen erfordert die zweidimensionale Simulation eine deutlich reduzierte Berechnungsdauer und weist einen geringeren Arbeitsspeicherbedarf auf. Zum anderen kann ein größerer Frequenzbereich sowie ein ausgedehnterer geometrischer Bereich mithilfe der Simulationen abgedeckt werden. Das verwendete Modell ist exemplarisch für eine einfach geknickte Lsw in Bild 3-12 für einen Einfallswinkel von 0° (oben) sowie einen Einfallswinkel für 60° (unten) dargestellt. Dabei sind analog zum ursprünglichen Modell der 3D-Simulationen die Immissionsorte in 25 m, 37,5 m und 50 m Distanz zur Schallquelle enthalten.



Bild 3-12: 2D-FEM-Simulationsmodell; Quell-Empfänger-Geometrie am Beispiel einer einfach geknickten Lsw; Seitenansicht; oben: Einfallswinkel 0° ; unten: Einfallswinkel 60°

Um einen in vereinzelt Simulationen beobachteten geringfügigen Einfluss der den Boden darstellenden PML auf die Berechnungsergebnisse zu eliminieren, wurde das Modell um einige Meter nach unten erweitert, weshalb die Schallquelle sich nicht an der unteren Grenze des Modells befindet. Da der Boden als PML ausgeführt ist, hat diese Maßnahme keinen Einfluss auf die zu erwartenden Berechnungsergebnisse.

Erläuternd kann Bild 3-13, oben entnommen werden, wie sich die winkelabhängige Geometrie des Modells sowie der Lsw in Bild 3-12 ergibt. Hier sind die einzelnen den Teilstücken entsprechenden Schallquellen sowie die Lsw und die Immissionsorte hinter der Lsw schematisch in Draufsicht abgebildet. Links oben ist dabei der Fall für einen Quellwinkel ϕ von 0° dargestellt. Für den rechts oben gezeigten Fall eines Quellwinkels ϕ von $37,5^\circ$ ergibt sich gegenüber dem senkrechten Schalleinfall eine scheinbare Verschiebung der Immissionsorte IO 2 bis IO 4. Diese ist darauf zurückzuführen, dass bei einem gleichbleibenden Quellwinkel die Quellposition für die unterschiedlichen Immissionsorte verschieden sein muss. Dies kann für eine gerade Straße und eine parallel dazu verlaufende Lsw jedoch analog durch eine Verschiebung der hinteren Immissionsorte realisiert werden, was den Vorteil hat, dass die Berechnung für jeden Quellwinkel nur einmal durchgeführt werden muss, da auf diese Weise alle Immissionsorte gleichzeitig berechnet werden können. Die scheinbare analoge Verschiebung der Quellposition ist in Bild 3-13, unten links für IO 2 und unten rechts für IO 4 veranschaulicht. Durch den konstanten Quellwinkel ergibt sich mit zunehmendem Abstand des Immissionsorts von der Straße eine Verschiebung der Quellposition nach rechts, analog zur Verschiebung der Immissionsorte IO 2 und IO 4 in Bild 3-13, oben rechts.

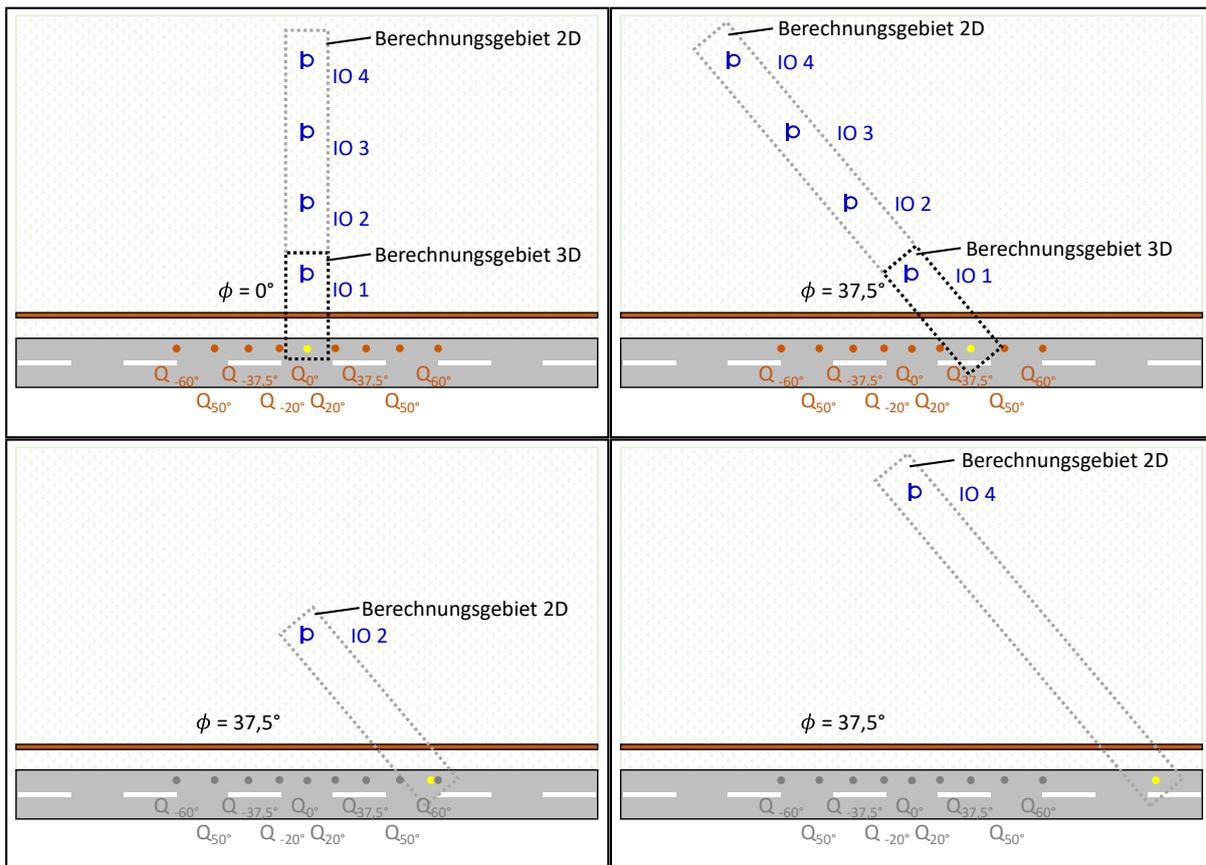


Bild 3-13: 2D-Simulationsmodell in Draufsicht; oben links: Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; oben rechts: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Immissionsorte IO bei gleichbleibender Quellposition; unten links: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Quellposition bei gleichbleibendem Immissionsort IO 2; unten rechts: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Quellposition bei gleichbleibendem Immissionsort IO 4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Gleichzeitig erfolgten analytische Berechnungen mithilfe des in Kapitel 2.5 beschriebenen Schallausbreitungsmodells der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH. Den Berechnungen liegen dieselben geometrischen Bedingungen zugrunde wie der 3D-FEM, jedoch mit der zusätzlichen Möglichkeit, auch die weiter entfernten Immissionsorte IO 2 bis IO 4 berücksichtigen zu können.

Schalldruckpegel

In einem weiteren Schritt erfolgte ein Abgleich der Absolutwerte des Schalldruckpegels von 3D-FEM-Simulationen und analytischen Berechnungen. Bild 3-14 zeigt die der analytischen dreidimensionalen Berechnung zugrunde liegende Quell-Empfänger-Geometrie inkl. Schallausbreitungspfade exemplarisch für einen Quellwinkel von 0° (oben), $37,5^\circ$ (mittig) und 60° (unten).

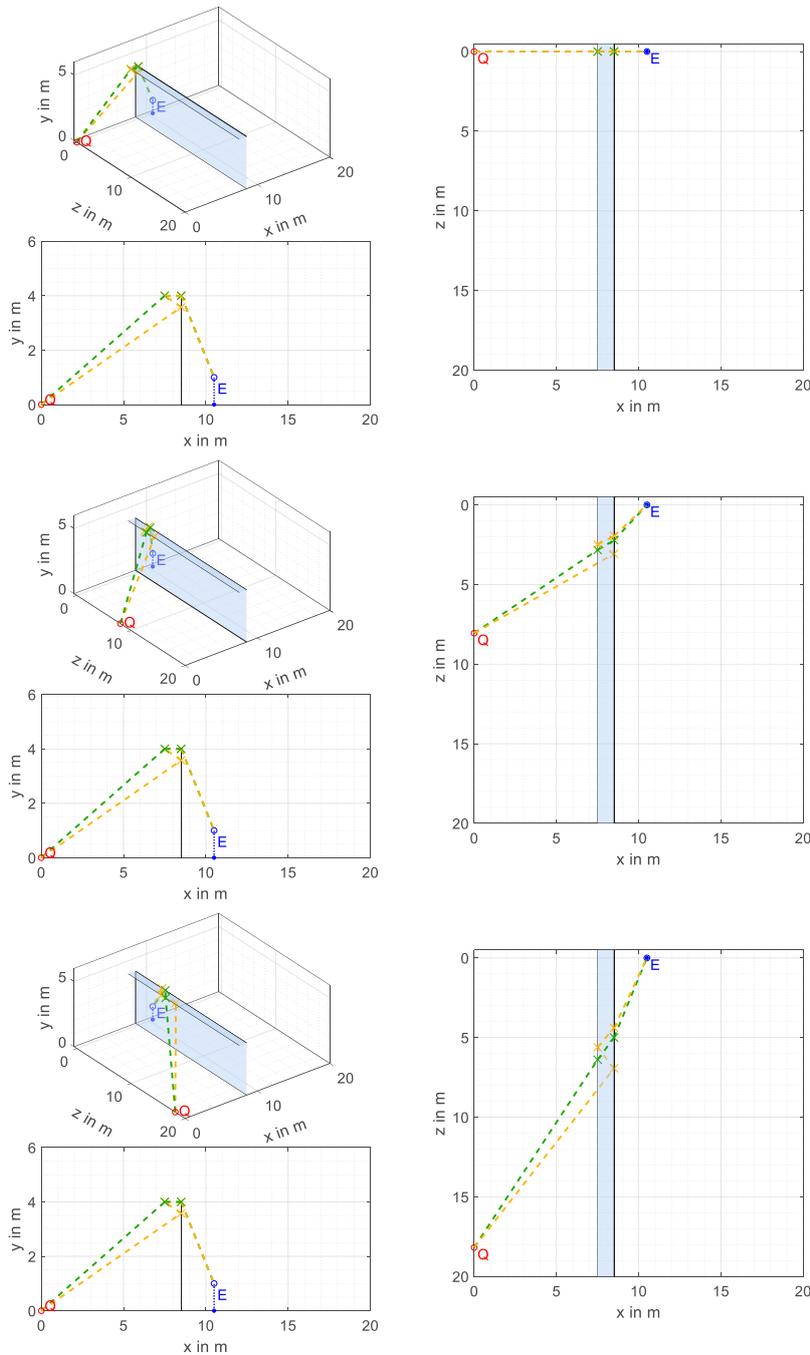


Bild 3-14: Quell-Empfänger-Geometrie des dreidimensionalen Modells inkl. Schallausbreitungspfade zur analytischen Beschreibung der Schallausbreitung; exemplarische Darstellung für einfach geknickte Lsw; links: dreidimensionale Ansicht und Seitenansicht; rechts: Draufsicht; oben: Quellwinkel 0° ; mittig: Quellwinkel $37,5^\circ$; unten: Quellwinkel 60° ; grün: Pfad 1 (Quelle \rightarrow erste Beugungskante \rightarrow zweite Beugungskante \rightarrow Empfänger); gelb: Pfad 2 (Quelle \rightarrow Reflexion an Lsw \rightarrow erste Beugungskante \rightarrow zweite Beugungskante \rightarrow Empfänger)

In Bild 3-15 ist der resultierende Schalldruckpegel bei freier Schallausbreitung aus der 3D-FEM-Berechnung (durchgezogen) und aus der analytischen Berechnung (gepunktet) für eine Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger von 10,5 m für verschiedene Empfängerhöhen und Quellwinkel gegenübergestellt. Zusätzlich findet sich rechts eine erläuternde Grafik. Bei den Berechnungen wurde eine Schallleistung von 90 dB zugrunde gelegt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Berechnungsergebnissen mit Abweichungen von deutlich weniger als 1 dB. Gleichzeitig ergibt sich für größere Distanzen zur Quelle ein geringerer Immissionsschalldruckpegel als für kleinere Distanzen. Dabei weist die Empfängerhöhe erwartungsgemäß nur einen geringen (und mit zunehmender Distanz abnehmenden) Einfluss auf den Schalldruckpegel auf.

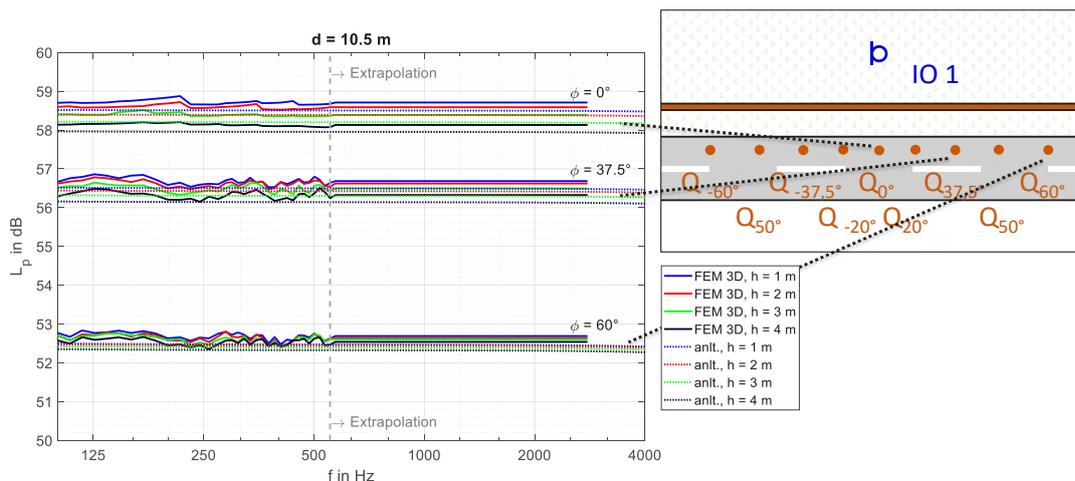


Bild 3-15: Kontinuierliches Spektrum des Immissionsschalldruckpegels bei freier Schallausbreitung für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m

In Bild 3-16 ist der über den betrachteten Frequenzbereich energetisch addierte und auf die Frequenzlinienanzahl bezogene Gesamt-Schalldruckpegel $L_{p,ges}$ in Abhängigkeit von der Distanz des Immissionsorts vom Emissionsort dargestellt.

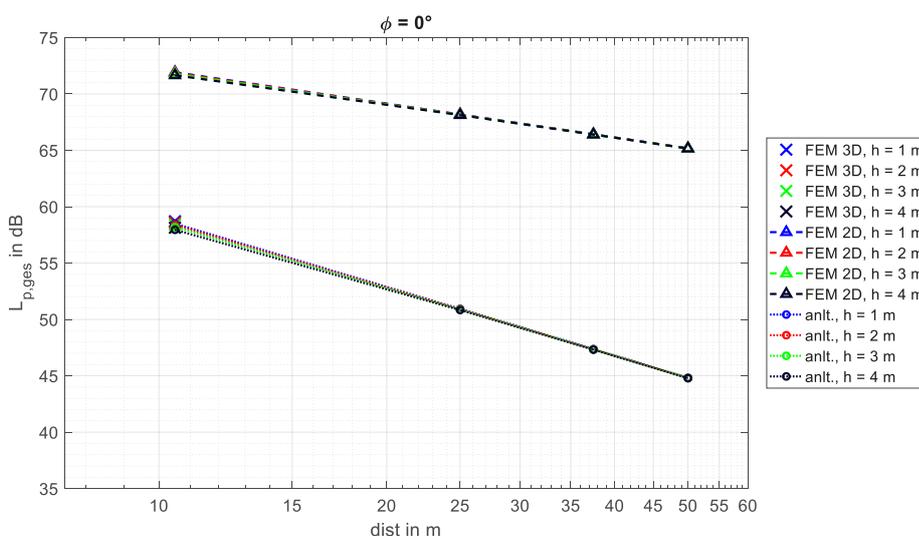


Bild 3-16: Gesamtpegel des Immissionsschalldrucks bei freier Schallausbreitung in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Immissionsort und Schallquelle für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; Kreuze: 3D-FEM

Da mithilfe der 3D-FEM nur der Immissionsort in 10,5 m Distanz zur Schallquelle berechnet werden kann, ist hier nur ein einzelner Punkt für jede Empfängerhöhe dargestellt. Zusätzlich zur 3D-FEM und zur analytischen Berechnung ist hier das Berechnungsergebnis mittels 2DFEM dargestellt. Da der 2D-FEM anstelle einer Punktschallquelle mit einem Schallleistungspegel von 90 dB eine Linienschallquelle mit einem längenbezogenen Schallleistungspegel von 90 dB/m zugrunde liegt, unterscheidet sich der absolute Immissions Schalldruckpegel der 2D-FEM von den Werten aus der 3D-FEM und der analytischen Berechnung. Zudem ist erkennbar, dass sich für die analytische Berechnung eine Pegelabnahme je Abstandsverdopplung von 6 dB/dd ergibt, während die 2D-FEM erwartungsgemäß eine Pegelabnahme je Abstandsverdopplung von 3 dB/dd wiedergibt.

Einfluss der Variation des Modells

Zu Validierungszwecken wurde untersucht, inwiefern eine Variation des Simulationsmodells zu einer Veränderung der Berechnungsergebnisse führt, um auszuschließen, dass das Modell zu klein gewählt wurde, um die maßgeblichen physikalischen Effekte korrekt abbilden zu können. In Bild 3-17 ist der Immissions Schalldruckpegel bei Vorhandensein einer geraden Lsw für die vier verschiedenen Empfängerhöhen von 1 m bis 4 m dargestellt. Hierbei liegt das ursprüngliche Modell mit schallhartem Boden und einer Wand der Dicke 10 cm zugrunde. Es ist davon auszugehen, dass die aus den Ergebnissen gezogenen Schlüsse ebenfalls für das Modell mit absorbierendem Boden gelten. Zwischen den vier verschiedenen Simulationen wurde das Modell geringfügig variiert, um Einflüsse der Modellabmessungen auf die Simulationsergebnisse zu erfassen. In blau dargestellt ist das Simulationsergebnis für das Ausgangsmodell mit senkrechter Lsw. Für die rote Kurve wurde das Modell um 5 m nach oben erweitert, für die gelbe Kurve erfolgte eine Verbreiterung des Ausgangsmodells vom dreifachen auf den sechsfachen Radius des Rotationsellipsoids. Zur Erstellung der violetten Kurve wurde anstelle der Wand mit 10 cm Dicke eine unendlich dünne Wand angenommen, was sich vor allem positiv auf die benötigte Rechendauer und den abbildbaren Frequenzbereich auswirkt.

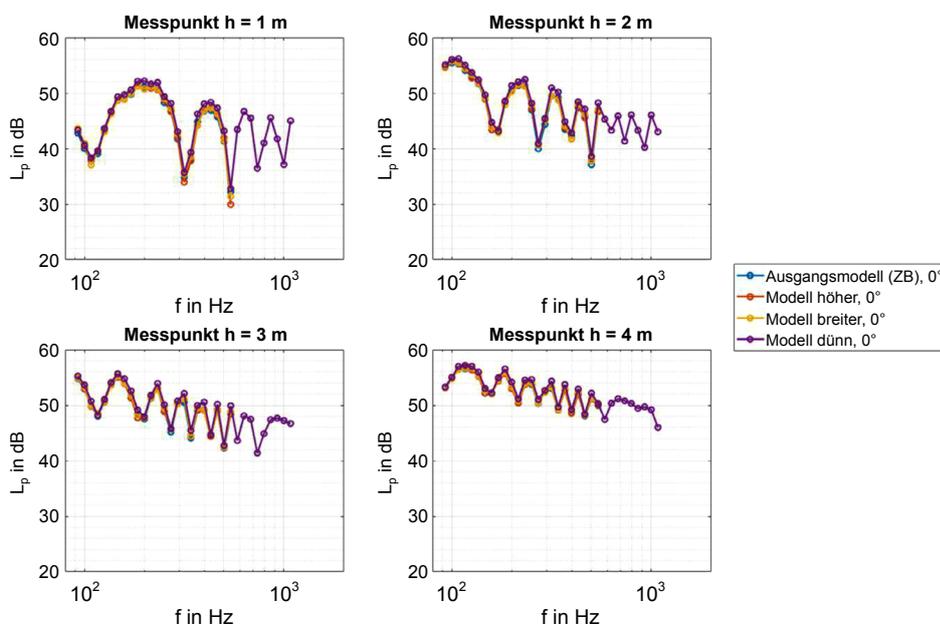


Bild 3-17: Kontinuierliches Spektrum des Immissions Schalldruckpegels an gerader Lsw aus 3D-FEM-Simulationen für verschiedene Höhen des Immissionsorts h ; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$ links oben: $h = 1$ m); rechts oben: $h = 2$ m; links unten: $h = 3$ m; rechts unten: $h = 4$ m; blau: Ausgangszustand (10 cm dicke Lsw, schallharter Boden); rot: Modell um 5 m nach oben erweitert; gelb: Modellbreite verdoppelt; violett: unendlich dünne Lsw

Es ist erkennbar, dass die Abweichung zwischen den Kurven sehr gering ausfällt. Vor allem die Erweiterung des Modells in der Höhe bzw. Breite führt zu kaum erkennbaren Veränderungen des Schalldruckpegels im Bereich von zumeist deutlich weniger als 1 dB. Lediglich in den Schalldruckminima zeigt sich hier teils eine Veränderung von ca. 1 dB. Dies beschränkt sich jedoch auf einzelne Frequenzlinien und hat somit keinen nennenswerten Effekt auf den Terz- oder Oktav-Schalldruckpegel. Die unendlich dünne Ausführung der Lsw führt zu einer geringfügigen Erhöhung des Schalldruckpegels von bis zu ca. 1 dB. Dies stellt jedoch gemessen an dem deutlich reduzierten Berechnungsaufwand ebenfalls eine geringfügige Beeinflussung dar, weshalb im weiteren Verlauf eine unendlich dünne Lsw zugrunde gelegt wird. Es ist festzuhalten, dass eine maßgebliche Variation des Modells in Form einer deutlichen Erhöhung bzw. Verbreiterung keinen nennenswerten Einfluss auf das Berechnungsergebnis nimmt. Es ist somit sichergestellt, dass das Modell nicht zu klein ist, um die maßgeblichen physikalischen Effekte korrekt abzubilden.

3.1.3 Test-Szenarien

Zur strukturierten Untersuchung des Einflusses verschiedener Geometrien der Lsw sowie Impedanzen auf die akustische Wirksamkeit der Lsw erfolgte die Erarbeitung einer Matrix der zu variierenden Parameter. Diese wird im Folgenden beschrieben. Die erste Version der Parametermatrix umfasst die Untersuchung:

- dreier einfach geknickter Lsw:
 - E1: Klappen-Öffnungswinkel $\beta = 135^\circ$, Überstand 1 m (Knickansatz auf $3/4 h_{Lsw}$),
 - E2: Klappen-Öffnungswinkel $\beta = 153^\circ$, Überstand 1 m (Knickansatz auf $1/2 h_{Lsw}$),
 - E3: Klappen-Öffnungswinkel $\beta = 90^\circ$, Überstand 1 m;
- einer dreifach geknickten Lsw:
 - D1: Überstand 2 m, Approximation einer gekrümmten Lsw durch dreifach geknickte Lsw sowie
- dreier partiell absorbierend verkleideter Lsw auf Basis des Einfachknicks E3:
 - A1: Oberkante der Lsw absorbierend verkleidet,
 - A2: Innenseiten der Lsw absorbierend verkleidet,
 - A3: Oberkante und Innenseiten der Lsw absorbierend verkleidet.

Alle innerhalb der ersten Version der Parametermatrix untersuchten Lsw weisen eine Höhe von 4 m auf. Um nach Abschluss der Simulationen offen gebliebene Fragestellungen beantworten zu können, wurde die Parametermatrix um einige Modifikationen der bereits untersuchten Lsw erweitert. Dies umfasst:

- zwei Modifikationen der einfach geknickten Lsw E3:
 - E4: Erhöhung des Überstands auf 1,66 m,
 - E5: Vergrößerung der Wandhöhe auf 6 m;
- zwei Modifikationen der einfach geknickten Lsw E1 bzw. E2:
 - E6: Klappen-Öffnungswinkel β angepasst auf 117° (Knickansatz auf $5/8 h_{Lsw}$),
 - E7: Klappen-Öffnungswinkel β angepasst auf 146° (Knickansatz auf $7/8 h_{Lsw}$) sowie
- eine Modifikation der absorbierend verkleideten Lsw A2:
 - A4: Vergrößerung des Überstands auf 1,66 m (entsprechend E4).

In Kapitel 3.3.3 wird dargelegt, dass eine speziell für das vorliegende Forschungsvorhaben konzipierte 2DFEM-Simulation in der Lage ist, im untersuchten für den Straßenverkehrslärm relevanten Frequenzbereich von ca. 400 Hz bis 2,5 kHz Ergebnisse zu liefern, die sehr gut mit den Ergebnissen aus den 3D-FEM-Simulationen übereinstimmen. Aufgrund des größeren abdeckbaren Frequenzbereichs bis 2 kHz und der gleichzeitig deutlich verkürzten Berechnungsdauer erfolgten zusätzliche Berechnungen mittels des 2DFEM-Modells. Um auch für die Untersuchungen aus der ersten Version der Parametermatrix hochfrequente Aussagen treffen zu können und die analytischen Berechnungen in diesem Frequenzbereich zu validieren, wurden diese Simulationen ebenfalls mittels 2D-FEM wiederholt. Der Abgleich zwischen 2D-FEM und 3D-FEM ist in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

Gerade Lsw G

Die gerade Lsw ohne geometrische Besonderheiten stellt die Referenz für die Untersuchungen dar. Die geometrischen Eigenschaften lauten:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

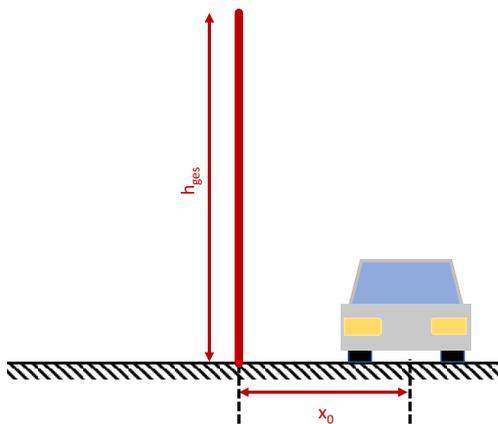


Bild 3-18: Gerade Lsw G; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E1

Es werden drei verschiedene einfach geknickte Lsw untersucht. Der Einfachknick E1 weist einen einfachen Knick in Richtung der Schallquelle mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 135° auf. Die Position der ersten Beugungskante bleibt gegenüber der geraden Lsw (Referenz) gleich. Somit ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 135^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

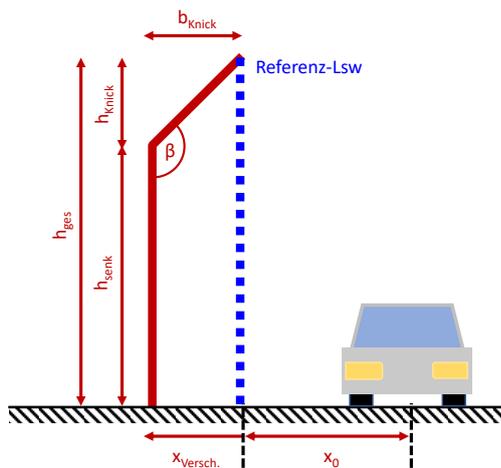


Bild 3-19: Einfachknick E1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E2

Der Einfachknick E2 weist einen einfachen Knick in Richtung der Schallquelle mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 153° auf. Die Position der ersten Beugungskante bleibt gegenüber der geraden Lsw gleich. Somit ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 2 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 153^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

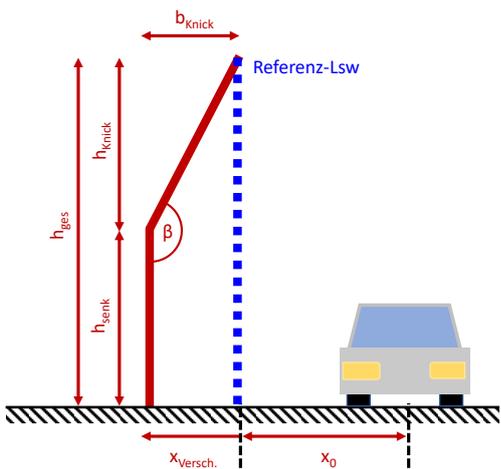


Bild 3-20: Einfachknick E2; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E3

Der Einfachknick E3 weist einen einfachen Knick in Richtung der Schallquelle mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° auf. Die Position der ersten Beugungskante bleibt gegenüber der geraden Lsw gleich. Somit ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 0 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 90^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

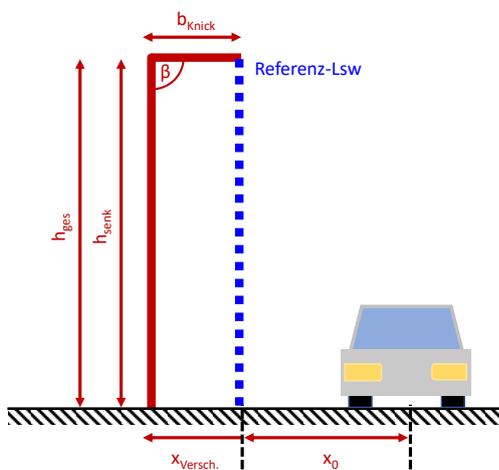


Bild 3-21: Einfachknick E3; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E4

Der Einfachknick E4 stellt eine Modifikation des Einfachknicks E3 dar. Unter Beibehaltung des Klappen-Öffnungswinkels von 90° und der Wandhöhe von 4 m wurde die Breite des Überstands auf 1,66 m vergrößert. Somit ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 0 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1,66 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1,66 \text{ m}$,
- $\beta = 90^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

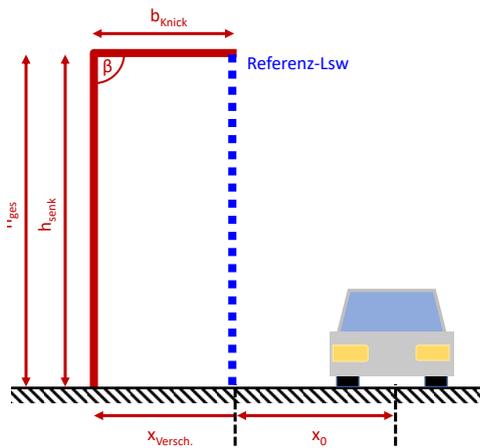


Bild 3-22: Einfachknick E4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E5

Der Einfachknick E5 stellt eine Modifikation des Einfachknicks E3 dar. Unter Beibehaltung des Klappen-Öffnungswinkels von 90° und des Überstands von 1 m wurde die Wandhöhe auf 6 m erhöht. Somit ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 6 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 0 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 90^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

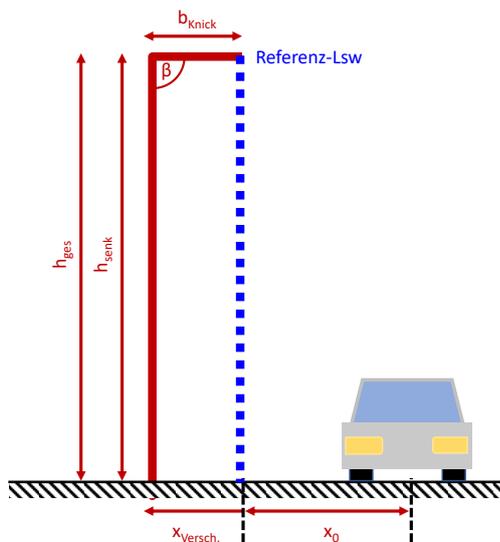


Bild 3-23: Einfachknick E5; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E6

Der Einfachknick E6 stellt eine Modifikation der einfach geknickten Lsw E1 und E2 dar. Während sich der Knickansatz bei E1 auf 3/4 der Höhe der Lsw und bei E2 auf der Hälfte der Lsw-Höhe befindet, liegt der Knickansatz bei E6 auf 7/8 der Höhe der Lsw (Variante zwischen E1 und E3). Somit ergeben sich die folgenden geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 117^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

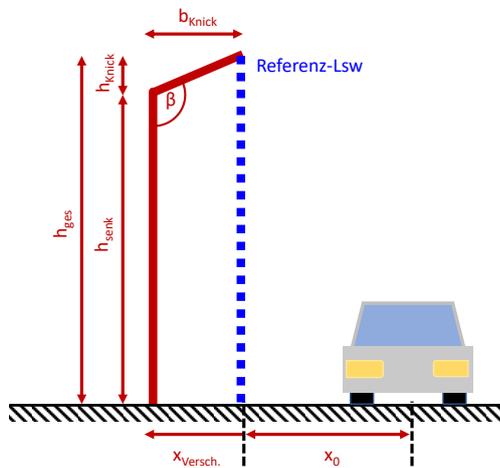


Bild 3-24: Einfachknick E6; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfachknick E7

Der Einfachknick E7 stellt eine Modifikation der einfach geknickten Lsw E1 und E2 dar. Während sich der Knickansatz bei E1 auf 3/4 der Höhe der Lsw und bei E2 auf der Hälfte der Lsw-Höhe befindet, liegt der Knickansatz bei E7 auf 5/8 der Höhe der Lsw (Variante zwischen E2 und E1). Somit ergeben sich die folgenden geometrischen Eigenschaften:

- $h_{\text{ges}} = 4 \text{ m}$,
- $h_{\text{Knick}} = 1,5 \text{ m}$,
- $b_{\text{Knick}} = 1 \text{ m}$,
- $x_{\text{Versch}} = 1 \text{ m}$,
- $\beta = 146^\circ$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

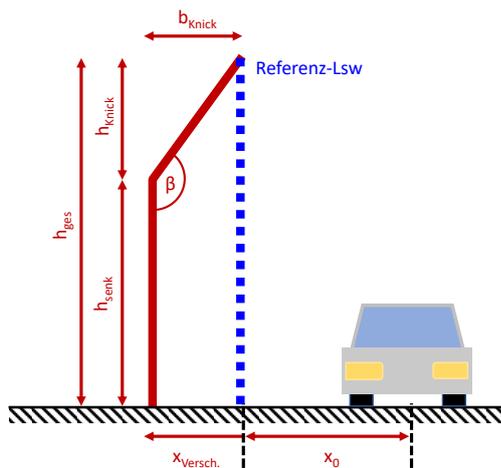


Bild 3-25: Einfachknick E7; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Dreifachknick D1

Der Dreifachknick D1 verfügt über eine dreifach in Richtung der Schallquelle geknickte Geometrie. Diese setzt sich aus einem Doppelknick, der eine Krümmung mit dem Radius r_{Kr} approximiert, und einem horizontalen Teil der Länge $b_{Ueberst}$ zusammen. Es ergeben sich die geometrischen Eigenschaften:

- $h_{ges} = 4 \text{ m}$,
- $h_{Knick} = 1 \text{ m}$,
- $r_{Kr} = 1 \text{ m}$,
- $b_{Ueberst} = 1 \text{ m}$,
- $x_{Versch} = 2 \text{ m}$,
- $x_0 = 7,5 \text{ m}$.

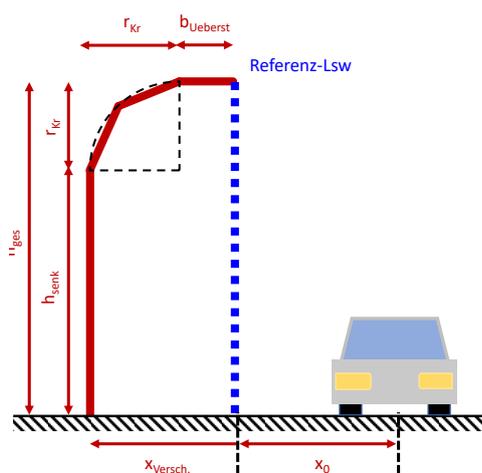


Bild 3-26: Dreifachknick D1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A1

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenimpedanzen der Lsw werden drei Szenarien mit an definierten Stellen angebrachtem absorbierendem Material betrachtet. Die Geometrie ist identisch zu der des Einfachknicks E3 mit dem einzigen Unterschied, dass der Lsw eine Dicke von 1 cm zugewiesen wird, um im Simulationsmodell Oberflächenimpedanzen einbringen zu können. Als Absorber kommt ein 5 cm starker poröser Absorber mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand von 25 kPa·s/m² und einer Porosität von 0,98 zum Einsatz, der in Form einer Impedanz auf die schallharte Oberfläche der Lsw aufgebracht wird. Mithilfe des homogenen Modells aus [Mechel 2008] kann der in Bild 3-27 dargestellte Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall ermittelt werden.

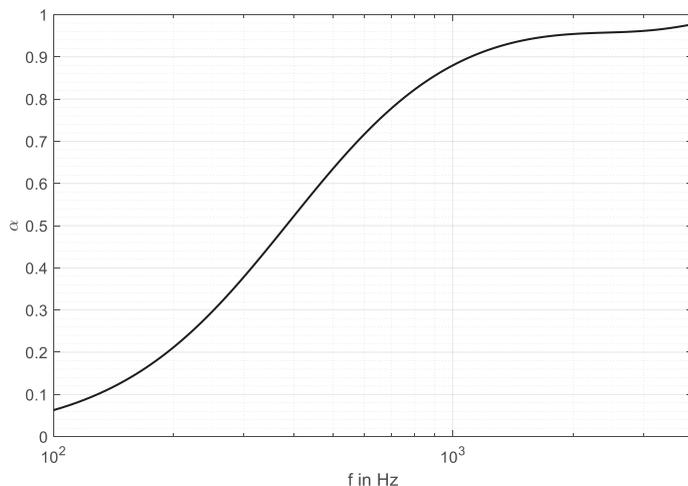


Bild 3-27: Spektraler Schallabsorptionsgrad des angenommenen 5 cm dicken Schallabsorbers für senkrechten Schalleinfall

Bei der absorbierend verkleideten Lsw A1 in Bild 3-28 sind die Innenseiten der Lsw mit Schallabsorptionsmaterial belegt. Dies umfasst:

- die der Schallquelle zugewandte Seite des senkrechten Teils der Lsw sowie
- die Unterseite des horizontalen Teils (der „Klappe“) der Lsw.

Durch die absorbierende Bekleidung der Innenseite der Lsw ist eine maßgebliche Dämpfung des Schallpfads 2 (Reflexion an der Schirmvorderseite → Beugung an der Oberkante) zu erwarten.

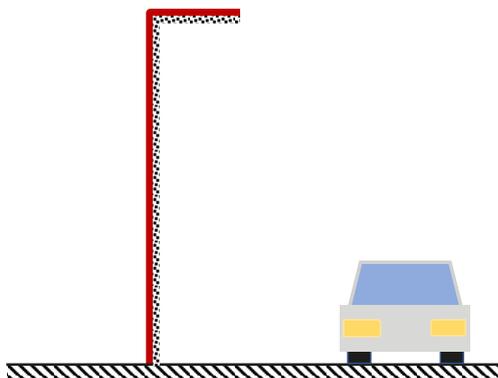


Bild 3-28: Einfach geknickte, absorbierende Lsw A1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A2

Bei der absorbierend verkleideten Lsw A2 ist die Oberseite des horizontalen Teils (der „Klappe“) der Lsw mit Schallabsorptionsmaterial belegt.

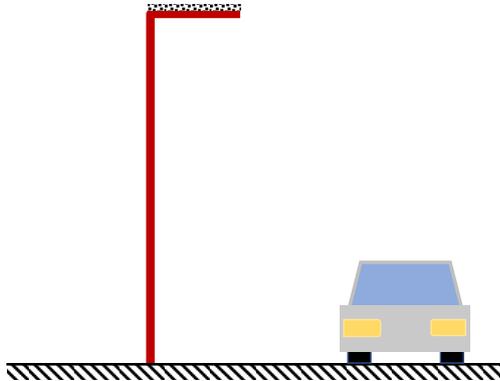


Bild 3-29: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A2; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A3

Die absorbierend verkleidete Lsw A3 führt die absorbierend verkleideten Lsw A1 und A2 zusammen, sodass die folgenden Flächen mit Schallabsorptionsmaterial belegt sind. Dies umfasst:

- die der Schallquelle zugewandte Seite des senkrechten Teils der Lsw,
- die Unterseite des horizontalen Teils (der „Klappe“) der Lsw sowie
- die Oberseite des horizontalen Teils (der „Klappe“) der Lsw.

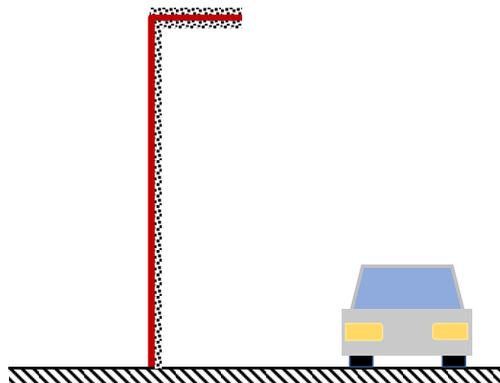


Bild 3-30: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A3; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A4

Die absorbierend verkleidete Lsw A4 stellt eine Modifikation der absorbierend verkleideten Lsw A2 dar. Unter Beibehaltung der absorbierenden Bekleidung der Oberkante wurde die Breite des Überstands auf 1,66 m erhöht (analog Einfachknick E4).

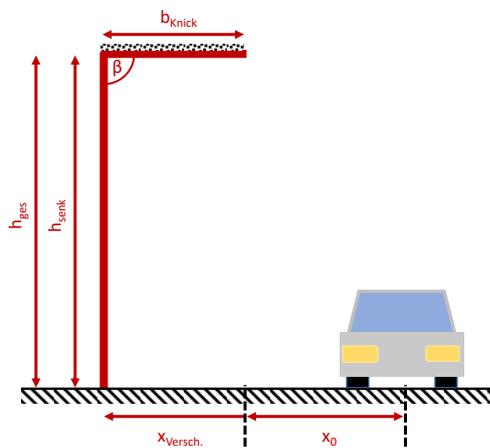


Bild 3-31: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung

3.2 Durchführung

In diesem Kapitel erfolgt die Durchführung der umfassend konzipierten 3D-Simulationen anhand der in Kapitel 3.1 festgelegten Parameter. Die FEM-Simulationen der Schallausbreitung in der Umgebung beliebig geformter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw, deren Eigenschaften in Kapitel 3.1 umfassend konzipiert wurden, erfolgten mit COMSOL Multiphysics®.

3.2.1 Erste Berechnungsergebnisse

In Bild 3-32 sind die Berechnungsergebnisse der 3D-FEM-Simulation für einen Quellwinkel von 0° enthalten. Hierin ist der Schalldruckpegel einerseits für Freifeld-Schallausbreitungsbedingungen (links) und andererseits für die gerade Lsw G (mittig) sowie die einfach geknickte Lsw E3 (rechts) dargestellt. Für die Freifeld-Schallausbreitung ergibt sich mit zunehmender Distanz zur Schallquelle in alle Richtungen eine gleichmäßige Abnahme des Immissionschalldruckpegels. Dies zeigt, dass eine wesentliche Rückwirkung der PML auf die Berechnungsergebnisse ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren ist erkennbar, dass das Vorhandensein einer Lsw erwartungsgemäß eine deutliche Reduzierung des Schalldruckpegels in der der Schallquelle abgewandten Richtung der Lsw mit sich bringt. Gleichzeitig ergibt sich bei vorhandener Lsw quellseitig ein Interferenzmuster durch die Überlagerung der von der Schallquelle ausgehenden und der an der schallharten Lsw reflektierten Schallwelle. Durch das Vorhandensein des Knicks stellt sich in der rechten Darstellung eine zusätzliche Pegelreduktion im Schattenbereich der Lsw ein. Gleichzeitig zeigt sich, dass sich das Interferenzmuster im Bereich oberhalb der Lsw mit Knick stärker fortsetzt, als dies bei der geraden Lsw (ohne Knick) der Fall ist.

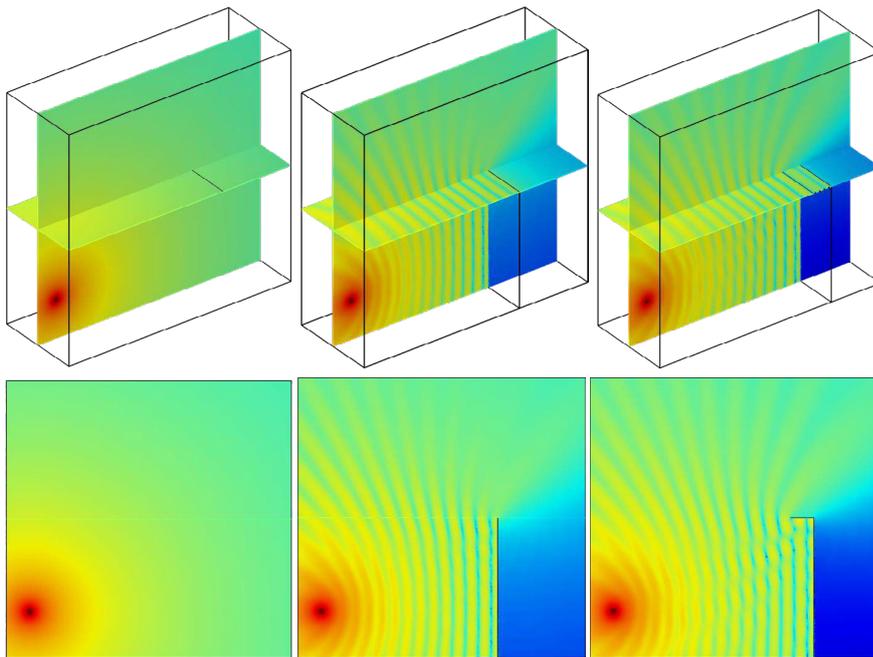


Bild 3-32: Schalldruckpegel für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; links: Freifeld; mittig: gerade Lsw G; rechts: einfach geknickte Lsw E3; oben: dreidimensionale Schnitt-Darstellung; unten: vertikale Schnitt-Darstellung

In Bild 3-33 ist analog zur rechten unteren Darstellung aus Bild 3-32 die vertikale Schnitt-Darstellung für die einfach geknickte Lsw E3 für verschiedene Einzelfrequenzen (links: 390 Hz; rechts 287 Hz) enthalten. Durch die unterschiedliche Frequenz und die daraus resultierende verschiedene Wellenlänge ergibt sich der Effekt, dass an der Vorderkante des Knicks (vordere Beugungskante) in der linken Darstellung ein Schwingungsknoten vorhanden ist und bei der rechten Darstellung ein Schwingungsbauch auftritt. Dies wirkt sich vor allem erkennbar auf den Bereich oberhalb und hinter der Lsw aus. Während in der rechten Darstellung ein verhältnismäßig starkes Interferenzmuster oberhalb der Lsw erkennbar ist, verschieben sich die Minima und Maxima in der linken Darstellung und sind zudem schwächer ausgeprägt. Es ist davon auszugehen, dass dieser frequenzabhängige Effekt auch den Schalldruckpegel im Schattenbereich hinter der Lsw beeinflusst.

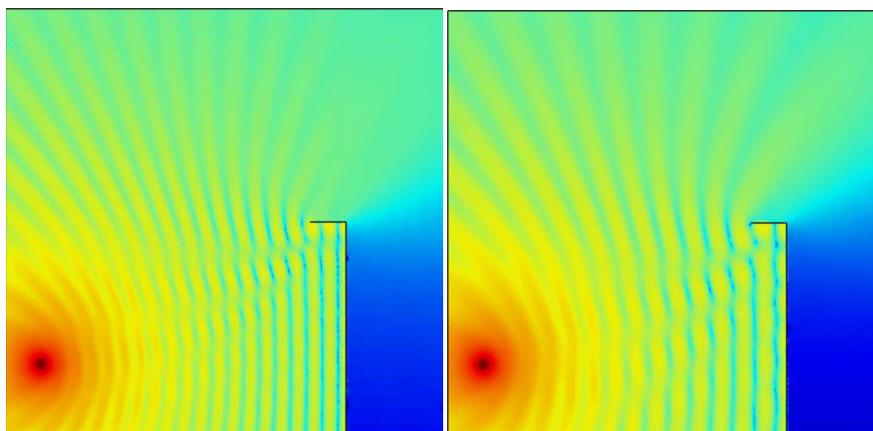


Bild 3-33: Vertikale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für einfach geknickte Lsw E3 für verschiedene Einzelfrequenzen aus 3D-FEM für Quellwinkel 0° ; links: 390 Hz; rechts: 287 Hz

In Bild 3-34 und Bild 3-35 sind analog zu den vorigen Darstellungen die Simulationsergebnisse für einen Quellwinkel von 60° dargestellt. Für die beiden Lsw ergibt sich ein ähnliches Interferenzmuster wie zuvor, das jedoch eine größere scheinbare Wellenlänge aufweist. Dies ist auf die schräge Schallreflexion im dreidimensionalen Simulationsmodell zurückzuführen. In der Schnitt-Darstellung ergibt sich eine größere Distanz zwischen Schwingungsknoten und -bäuchen der Schalldruckverteilung. Dies wird insbesondere in Bild 3-36 ersichtlich. Hier ist für die einfach geknickte Lsw E3 der Schalldruckpegel als horizontaler Schnitt in einer Höhe von 3,5 m dargestellt. Es ist erkennbar, dass die schräg im Modell befindliche Lsw zu einer Ablenkung des Schalls aus dem Modell hinaus führt. Es ist ersichtlich, dass sich die scheinbare Wellenlänge, die sich bei einem vertikalen Schnitt ergibt, verkürzt, je näher der Schnitt an der Linie erfolgt, die von der Schallquelle aus senkrecht zur Lsw verläuft (hier außerhalb des dargestellten Bereichs). Entsprechend wird die scheinbare Wellenlänge größer, je größer der „Drehungswinkel“ der Lsw (der Quellwinkel) ist.

Dieser Effekt stellt den maßgeblichen Unterschied zwischen 3D- und 2D-FEM-Simulationen dar. Anhand der in Bild 3-37 dargestellten Ergebnisse der 2D-FEM ist erkennbar, dass sich hier dieselbe scheinbare Wellenlänge ergibt wie im senkrechten Fall – und somit eine kürzere scheinbare Wellenlänge als in der entsprechenden 3D-FEM. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die 2D-FEM keine Ablenkung des Schalls aus dem Modell hinaus in die nicht vorhandene z-Richtung (entlang der Straße) ermöglicht, wie sie in Bild 3-36 für die 3D-Simulation erkennbar ist. Stattdessen wird die Geometrie modellbedingt derart interpretiert, als befände sich an der Position, an der das Modell die schräge Lsw schneidet, eine unendlich lange, parallel zur Linien-Schallquelle (Straße) verlaufende Lsw. Der Einfluss dieses Unterschieds zeigt sich auch im Schirmmaß, das sich aus den Simulationen ergibt. Hierauf wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen.

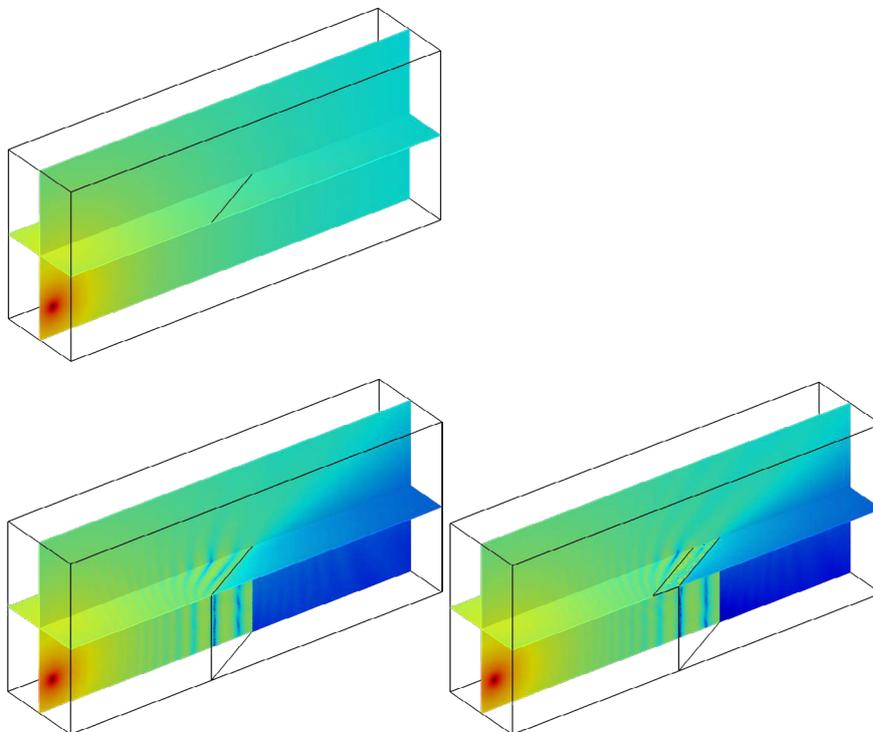


Bild 3-34: Dreidimensionale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; links unten: gerade Lsw G; rechts unten: einfach geknickte Lsw E3

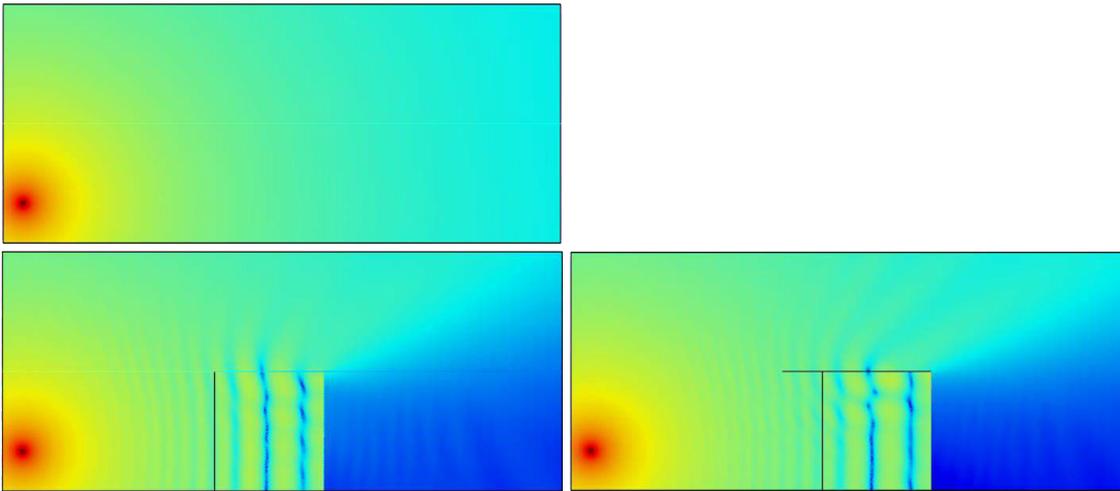


Bild 3-35: Vertikale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; links unten: gerade Lsw G; rechts unten: einfach geknickte Lsw E3

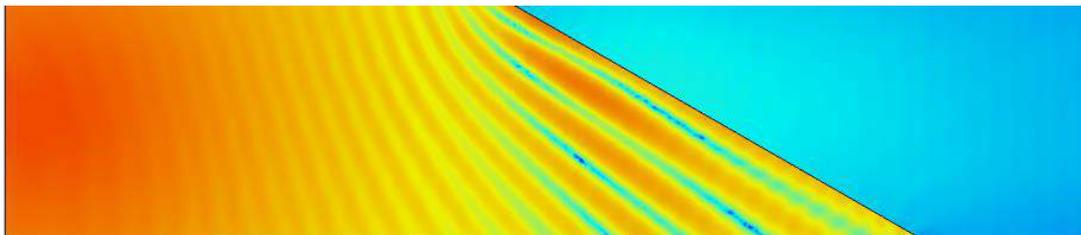


Bild 3-36: Horizontale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; einfach geknickte Lsw E3; Schnittebene in 3,5 m Höhe parallel zum Boden

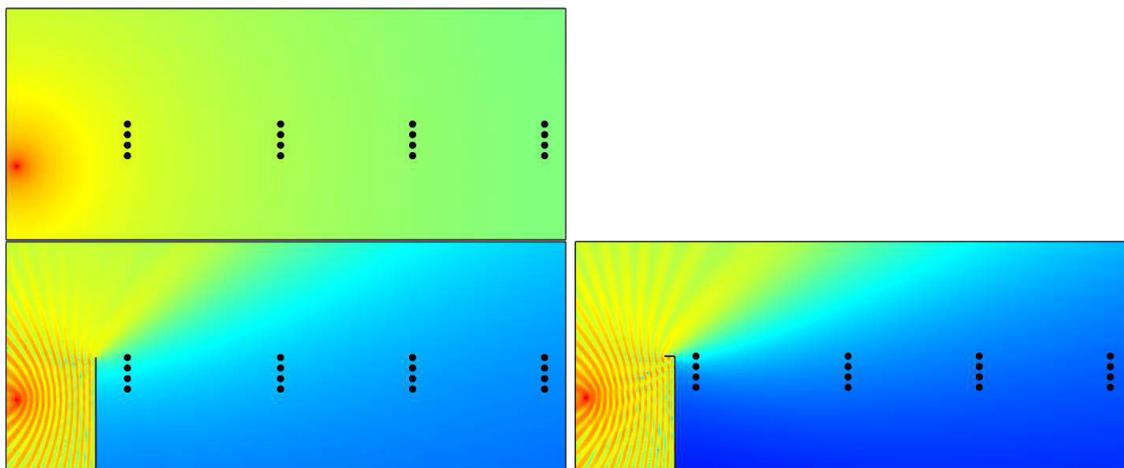


Bild 3-37: Vertikale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 2D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; unten links: gerade Lsw G; unten rechts: einfach geknickte Lsw E3

3.2.2 Ermittlung der akustischen Wirksamkeit

Nach Abschluss der Validierung des Simulationsmodells erfolgten 3D-FEM-Simulationen der Schallausbreitung unter Vorhandensein einer geraden Lsw unter Verwendung des in Kapitel 3.1.1 beschriebenen finalen Modells. Dabei werden für jeden Quellwinkel i (für jedes Teilstück i) der Freifeld-Schalldruckpegel $L_{p,FF,i}$ sowie der Schalldruckpegel unter Vorhandensein der Lsw $L_{p,Lsw,i}$ am Immissionsort bestimmt. Aus diesen ergibt sich das Schirmmaß für das i -te Teilstück zu

$$D_{z,i} = L_{p,FF,i} - L_{p,Lsw,i} \quad (3.1)$$

Im Anhang ist in Bild 7-1 bzw. Bild 7-2 das Abschirmmaß der geraden Lsw G für verschiedene Empfängerhöhen bei einem Quellwinkel von 0° bzw. 60° in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Abgebildet sind jeweils das Ergebnis der 3D-FEM als durchgezogene Linie, das Ergebnis der 2D-FEM als gestrichelte Linie und das Ergebnis der analytischen Berechnung als gepunktete Linie. Es ist erkennbar, dass die Werte der drei Verfahren sehr gut übereinstimmen. Vor allem die analytische Berechnung und die 3D-FEM liefern bei einem Quellwinkel von 0° nahezu deckungsgleiche Ergebnisse, während die 2D-FEM für die tiefste Empfängerposition ein geringfügig niedrigeres Schirmmaß wiedergibt. Für einen Quellwinkel von 60° stellt sich eine leichte Welligkeit bei den 3D-FEM-Ergebnissen ein. Gleichzeitig stimmen bei einem Quellwinkel von 60° die Ergebnisse von 2D-FEM und analytischer Berechnung sehr gut überein, während die 3D-FEM geringfügig niedrigere Werte bestimmt als die anderen beiden Verfahren.

Um das Schirmmaß in Terzen zu betrachten, erfolgt eine energetische Addition der einzelnen spektralen Werte des Schalldruckpegels innerhalb einer jeden Terz bei gleichzeitiger Normierung auf die Linienzahl je Terzband, damit die Frequenzauflösung das Berechnungsergebnis nicht beeinflusst. Mithilfe von Gl. (3.1) kann das Terz-Schirmmaß ermittelt werden. Auf Grundlage der Simulations- und Berechnungsergebnisse in Terzen lässt sich anschließend das Gesamt-Abschirmmaß $D_{z,ges}$ unter Berücksichtigung des Verkehrslärmspektrums bestimmen.

In Bild 3-38 sind verschiedene durch das Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen (FIGE) bzw. TÜV Nord messtechnisch erfasste Verkehrslärmspektren aus [Hänisch 2020] gegenübergestellt. In blau ist das Spektrum für einen Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) abgebildet, wobei dunkelblau Pkw-Verkehr mit 100 km/h widerspiegelt und hellblau Lkw-Verkehr mit 80 km/h verkörpert. Analog stellen dunkel- und hellgrün Pkw- und Lkw-Verkehr auf einem offenporigen Asphalt (OPA) dar. In schwarz ist zudem das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus [DIN EN 1793-3] dargestellt. Es ist erkennbar, dass alle fünf Spektren ein Maximum im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2 kHz aufweisen, jedoch fällt bei den gemessenen Spektren das Maximum schmäler aus als beim standardisierten Verkehrslärmspektrum. In den nachfolgenden Untersuchungen wird zur Berechnung von Gesamt-Schalldruckpegeln sowie Gesamt-Schirmmaßen das gemessene Verkehrslärmspektrum für SMA, Pkw 100 km/h zugrunde gelegt.

Das gewählte Verkehrslärmspektrum wird zu den entsprechenden spektralen Freifeld- und Lsw-Schalldruckpegeln addiert. Anschließend erfolgt die energetische Summation über die Terzen von 400 Hz bis 2,5 kHz, um die Gesamt-Schalldruckpegel zu berechnen, aus denen sich anschließend wiederum mithilfe von Gl. (3.1) das Gesamt-Abschirmmaß ergibt. Die Beschränkung des Frequenzbereichs auf die Oktaven 500 Hz bis 2 kHz resultiert dabei gegenüber einer Betrachtung der Oktaven von 63 Hz bis 8 kHz in einem Fehler des Gesamt-Schalldruckpegels von weniger als 0,3 dB.

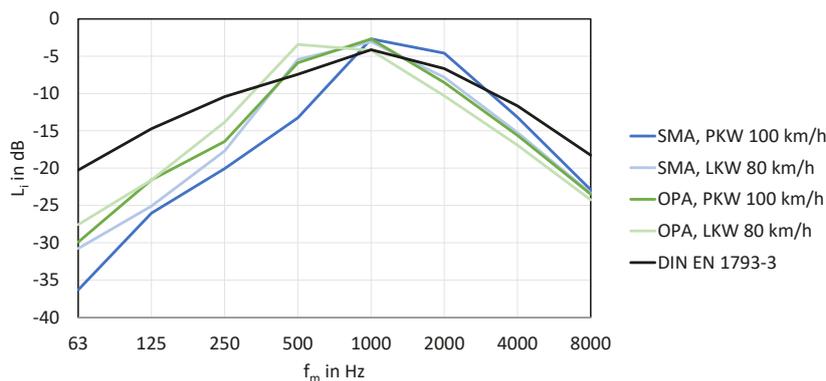


Bild 3-38: Oktavband-Verkehrslärmspektren; dunkelblau: Messergebnis für Pkw mit 100 km/h auf SMA aus [Hänisch 2020]; hellblau: Messergebnis für Lkw mit 80 km/h auf SMA aus [Hänisch 2020]; dunkelgrün: Messergebnis für Pkw mit 100 km/h auf OPA aus [Hänisch 2020]; hellgrün: Messergebnis für Lkw mit 80 km/h auf OPA aus [Hänisch 2020]; schwarz: standardisiertes Verkehrslärmspektrum aus [DIN EN 1793-3]

In Bild 3-39 ist das Gesamt-Abschirmmaß $D_{z,ges}$ einer geraden Lsw G für die verschiedenen Empfängerhöhen in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger aus 2D-FEM-Simulationen und analytischen Berechnungen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass das Abschirmmaß für die niedrigen Empfängerpositionen mit steigender Quell-Empfänger-Distanz abnimmt, während sich für die höheren Empfängerpositionen eine umgekehrte Tendenz feststellen lässt. Dies ist, wie in Bild 3-40 dargestellt, auf die unterschiedliche Beeinflussung des Beugungswinkels φ_s und der effektiven Höhe h_s der Lsw zurückzuführen. Für einen Empfänger nah am Boden (Bild 3-40, oben) ergibt sich mit zunehmender Quell-Empfänger-Distanz eine etwas größere effektive Höhe, während der Beugungswinkel deutlich kleiner wird. Diese Verringerung des Beugungswinkels dominiert die Veränderung des Abschirmmaßes, sodass dieses mit zunehmender Quell-Empfänger-Distanz geringer wird. Für einen Empfänger in einer Höhe nahe der Schirmoberkante hingegen ändert sich der Beugungswinkel bei zunehmender Quell-Empfänger-Distanz kaum bis nicht (Bild 3-40, unten). Gleichzeitig nimmt jedoch die effektive Höhe zu, was dazu führt, dass auch das Schirmmaß mit zunehmendem Abstand des Immissionsorts zur Quelle steigt. Es zeigt sich, dass sich die Schirmmaße der unterschiedlichen Empfängerhöhen mit zunehmender Quell-Empfänger-Distanz einem Grenzwert annähern.

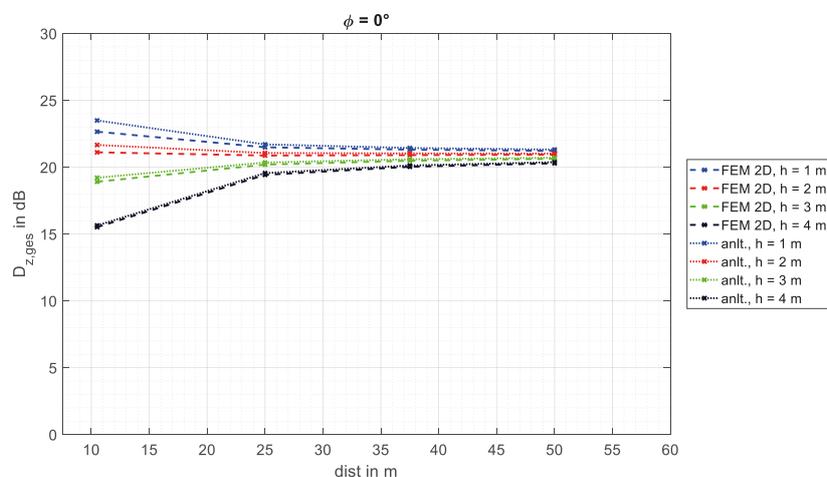


Bild 3-39: Gesamt-Schirmmaß von gerader Lsw G in Abhängigkeit von der Quell-Empfänger-Distanz d für verschiedene Empfängerhöhen h; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung

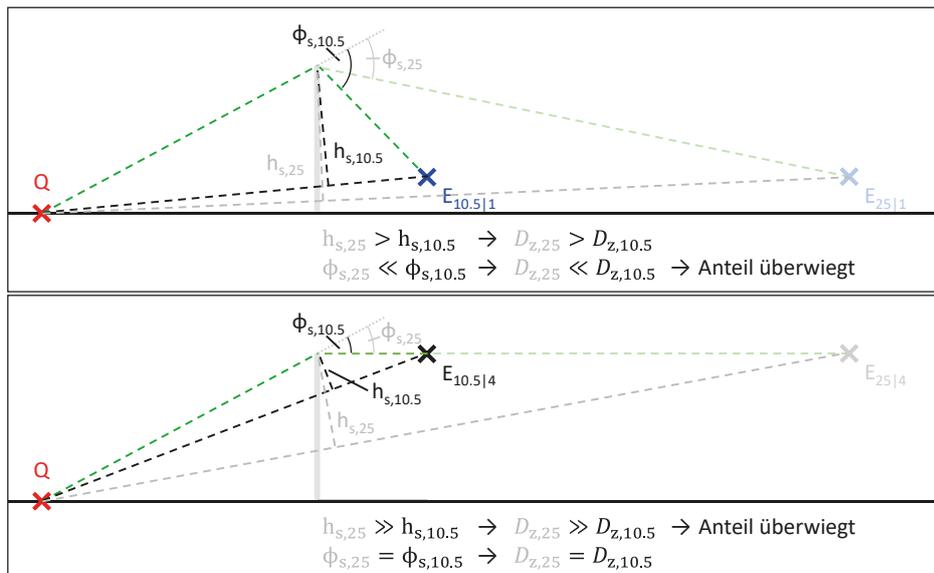


Bild 3-40: Skizze zur Veranschaulichung der Ab- bzw. Zunahme des Schirmmaßes von gerader Lsw G durch Beeinflussung von effektiver Schirmhöhe h_s und Beugungswinkel ϕ_s bei steigender Distanz d zwischen Quelle und Empfänger; oben: Empfängerhöhe $h = 1$ m; unten: Empfängerhöhe $h = 4$ m

Der Fokus der Untersuchungen soll jedoch auf einer spektralen Betrachtung der Wirksamkeit von Lsw liegen. Zusätzlich zum Gesamt-Abschirmmaß lässt sich zu diesem Zweck aus den spektralen Schalldruckpegeln das spektrale Vorbeifahrts-Schirmmaß $D_{z,V}$ bestimmen, das die akustische Wirksamkeit der Lsw in Bezug auf eine gesamte Vorbeifahrt, also alle betrachteten Quellwinkel, beschreibt. Dieses ergibt sich aus einer gewichteten energetischen Addition der Schalldruckpegel der verschiedenen Teilstücke i :

$$D_{z,V} = 10 \cdot \lg \sum_i \left(10^{L_{p,FF,i}/10 \text{ dB}} \cdot \frac{l_i}{l_{\text{ges}}} \right) - 10 \cdot \lg \sum_i \left(10^{L_{p,Lsw,i}/10 \text{ dB}} \cdot \frac{l_i}{l_{\text{ges}}} \right). \quad (3.2)$$

Hierin ist l_{ges} die betrachtete Gesamtlänge der Schallquelle. Die Multiplikation mit l_i/l_{ges} erfolgt, um den unterschiedlichen Teilstücklängen (Verweilzeiten eines vorbeifahrenden Fahrzeugs konstanter Geschwindigkeit im i -ten Teilstück) Rechnung zu tragen. Das Vorbeifahrts-Schirmmaß einer geraden Lsw G ist exemplarisch für eine Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger von 10,5 m bzw. von 50 m in Bild 3-41, oben bzw. unten enthalten. Analog zu den vorigen Darstellungen stellen die verschiedenen Linientypen die Berechnungsmethode (3D-FEM, 2D-FEM, analytische Berechnung) dar, während die Farben die unterschiedlichen Empfängerhöhen symbolisieren. Es ist erkennbar, dass sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen allen drei Berechnungsmethoden einstellt. Es ergibt sich ein mit zunehmender Frequenz leicht konvex ansteigender Verlauf des Vorbeifahrts-Schirmmaßes für alle Empfängerhöhen und Quell-Empfänger-Distanzen, wobei sich die Verläufe mit zunehmendem Abstand zwischen Quelle und Empfänger annähern (vgl. Bild 3-39).

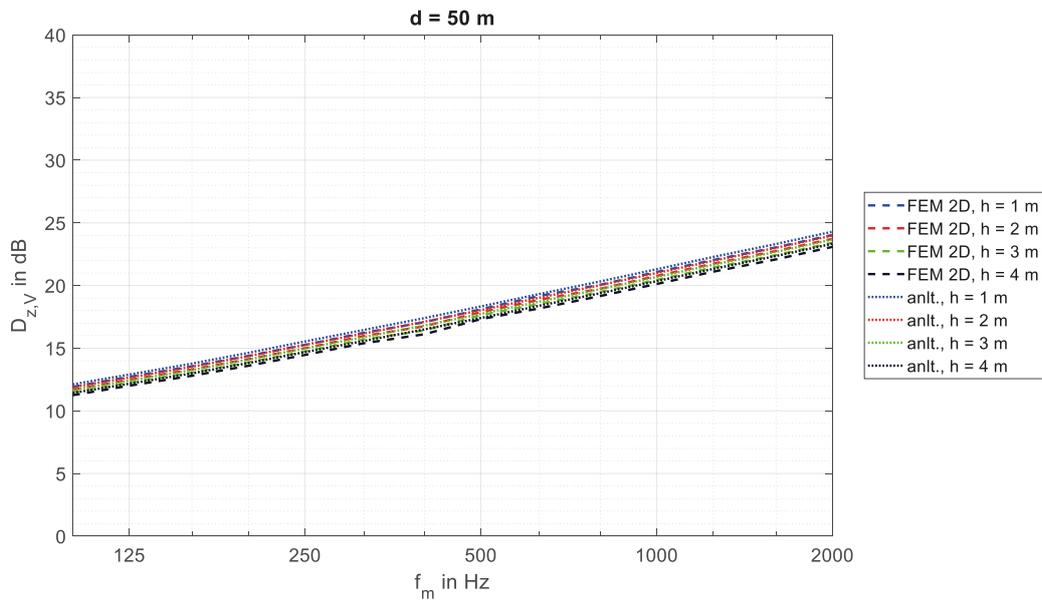
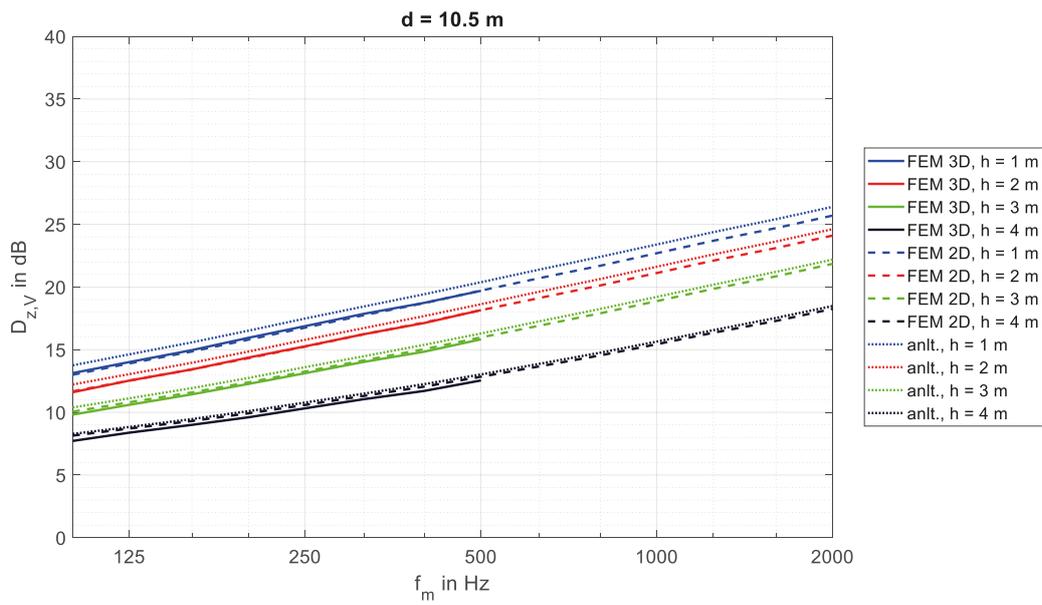


Bild 3-41: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Abschirmmaßes der geraden Lsw G für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung

3.3 Auswertung

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der in Kapitel 3.1 konzipierten und in Kapitel 3.2 durchgeführten Simulationen. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Einfügungs-dämpfung der jeweiligen Lsw gegenüber einer geraden, schallharten Lsw (Referenz). Die Schirmmaße der verschiedenen Lsw aus der 3DFEM für eine Auswahl verschiedener Quellwinkel ϕ (0° , $37,5^\circ$ und 60°) sind im Anhang in Bild 7-3 bis Bild 7-10 als kontinuierliche Spektren dargestellt. Dabei beinhaltet Bild 7-3 das Ergebnis für die gerade Wand G, Bild 7-4, Bild 7-5 und Bild 7-6 die Ergebnisse für E1, E2 und E3 sowie Bild 7-7 das Ergebnis für D1 und Bild 7-8, Bild 7-9 und Bild 7-10 die Ergebnisse für A1, A2 und A3. Für die gerade Lsw und den Einfachknick E3 werden zudem eine 2D-FEM-Simulation und eine analytische Berechnung durchgeführt. Für letztere kommt das bestehende Tool der AED zur Berechnung der Ausbreitung von Kugelwellen über impedanzbelegten Böden mit Impedanzdiskontinuität sowie keilförmigen Hindernissen bei partiell kohärenter Überlagerung der Wirkung der einzelnen Ausbreitungspfade aus Kapitel 2.5 zum Einsatz, das um die Doppelbeugung aus [Nord 2000] erweitert wurde. Die Ergebnisse sind entsprechend in den Diagrammen durch verschiedene Linientypen gekennzeichnet. In Bild 7-12 bis Bild 7-19 sind die Schirmmaße der Lsw für die verschiedenen Quellwinkel als Terzspektren dem resultierenden Vorbeifahrts-Schirmmaß gegenübergestellt. Dabei beinhaltet Bild 7-12 das Ergebnis der geraden Lsw G, Bild 7-13, Bild 7-14 und Bild 7-15 enthalten die Ergebnisse für E1, E2 und E3, während Bild 7-16 das Ergebnis für D1 wiedergibt und Bild 7-17, Bild 7-18 und Bild 7-19 die Ergebnisse für A1, A2 und A3 beinhalten.

3.3.1 Berechnungsergebnisse

Spektrales Schirmmaß

Am spektralen Schirmmaß der geraden Lsw G in Bild 7-3 zeigt sich der bereits zuvor erwähnte und zu erwartende Effekt, dass die akustische Wirksamkeit der Lsw mit abnehmender Empfängerhöhe zunimmt. Zudem stellt sich ein mit ansteigender Frequenz zunehmender Verlauf des Schirmmaßes ein. Mit Zunahme des Quellwinkels verschieben sich die Kurven annähernd parallel zu niedrigeren Werten des Schirmmaßes hin. Die 2D-FEM und die analytische Berechnung bilden den Verlauf der Ergebnisse der 3DFEM vor allem für geringe Quellwinkel im gesamten Frequenzbereich sehr gut nach. 2D-FEM und analytische Berechnung weichen kaum voneinander ab. Während 2D-FEM und analytische Berechnung das Schirmmaß aus der 3D-FEM bei kleinen Quellwinkeln geringfügig unterschätzen, erfolgt bei großen Quellwinkeln ein leichtes Überschätzen der Ergebnisse der 3D-FEM durch die 2D-FEM und die analytische Berechnung. Der mit steigendem Quellwinkel zu beobachtende Effekt der zunehmenden Welligkeit der Ergebnisse der 3D-FEM stellt sich bei 2D-FEM und analytischer Berechnung nicht ein und ist möglicherweise auf die begrenzte Breite des Modells der 3D-FEM zurückzuführen.

Beim Einfachknick E1 kommt zu der Tendenz des mit zunehmender Frequenz steigenden spektralen Schirmmaßes eine spektrale Welligkeit hinzu. Diese resultiert vermutlich aus dem in Bild 3-33 gezeigten Effekt, dass der Schalldruckpegel im Schattenbereich der Lsw davon abhängt, ob sich an der Vorderkante der Lsw ein Schwingungsknoten oder ein Schwingungsbauch befindet. Da die Position der Schwingungsknoten und -bäuche von der Wellenlänge vorgegeben wird, ergibt sich die frequenzabhängige Welligkeit der Schirmwirkung des geknickten Aufsatzes. Diese Welligkeit zeigt sich für alle betrachteten Quellwinkel. Es ist jedoch beobachtbar, dass sich die Welligkeit mit ansteigendem Quellwinkel zu höheren Frequenzen hin verschiebt. Dies kann auf den in Kapitel 3.2.1 dargestellten Effekt zurückgeführt werden, dass sich mit ansteigendem Quellwinkel eine Zunahme der schein-

baren Wellenlänge des Interferenzmusters vor der Lsw im dreidimensionalen Modell ergibt.

Für den Einfachknick E2 ist eine deutlich geringere Welligkeit des spektralen Schirmmaßes als für den Einfachknick E1 zu beobachten. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies am größeren Klappen-Öffnungswinkel der Lsw liegt. Durch diesen wird das Interferenzmuster in der Schalldruckpegeldarstellung im Bereich der Oberkante der Lsw schwächer, was sich entsprechend auf den Schattenbereich der Lsw auswirkt.

Entsprechend ergibt sich beim Einfachknick E3 die stärkste Welligkeit des spektralen Schirmmaßes, da E3 den geringsten Klappen-Öffnungswinkel aufweist, wodurch das Interferenzmuster nahe der Oberkante der Lsw sehr stark ausgeprägt ist. Das für einen Quellwinkel von 0° zusätzlich dargestellte Schirmmaß aus der 2D-FEM weist eine gute Übereinstimmung mit dem Simulationsergebnis der 3D-FEM auf. Gleichzeitig gibt die analytische Berechnung einen sehr ähnlichen Verlauf des Schirmmaßes wieder wie die 3D-FEM und die 2D-FEM. Die 2D-FEM und die analytische Berechnung lassen durch den größeren abgedeckten Frequenzbereich die Beobachtung zu, dass der mit zunehmender Frequenz auftretende Anstieg des Schirmmaßes umso steiler wird, je geringer die Empfängerhöhe ist.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in Bild 7-6 auf die Darstellung der 2D-FEM-Ergebnisse für Quellwinkel größer 0° verzichtet. In Bild 7-11 ist stattdessen der Verlauf des Schirmmaßes aus der 2D-FEM für einen Quellwinkel von $37,5^\circ$ bzw. von 60° dem Schirmmaß aus der 3D-FEM gegenübergestellt. Während die Ergebnisse der analytischen Berechnung mit zunehmendem Quellwinkel weiter dem Verlauf der Ergebnisse der 3D-FEM folgen, ergibt sich aus der 2D-FEM eine deutlich veränderte Länge der Welligkeit des spektralen Schirmmaßes. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 diskutiert, resultiert dies aus der Eigenschaft der 2D-FEM, keine Schallreflexion aus dem Modell heraus in die (nicht existente) z-Richtung zuzulassen. Stattdessen liegt dem 2D-FEM-Modell die Annahme einer unendlich langen, parallel zur Schallquelle verlaufenden Lsw zugrunde. Dadurch ergibt sich eine veränderte scheinbare Wellenlänge des Interferenzmusters vor der Lsw, das die spektrale Lage der Minima und Maxima im Schirmmaß bedingt.

Das spektrale Schirmmaß des Dreifachknicks D1 weist gegenüber dem Schirmmaß der einfach geknickten Lsw eine geringere Welligkeit auf. Jedoch ist auch hier beobachtbar, dass sich der Anstieg des spektralen Schirmmaßes mit zunehmender Frequenz umso stärker erhöht, je größer die Empfängerhöhe ist.

Bei den einfach geknickten, absorbierend verkleideten Lsw A1, A2 und A3 zeigt sich grundsätzlich dasselbe Verhalten wie beim Einfachknick E3, auf dem alle drei Geometrien der einfach abgeknickten, absorbierenden Lsw beruhen. Auf den Vergleich der verschiedenen Typen wird in Kapitel 3.3.2 näher eingegangen.

Spektrales Vorbeifahrts-Schirmmaß

Wie in Kapitel 3.2.2 anhand von Gl. (3.2) beschrieben, werden die sich für die einzelnen Quellwinkel ergebenden spektralen Schirmmaße zu einem spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaß $D_{z,v}$ zusammengefasst. Dieses ist in Bild 7-12 bis Bild 7-19 für die verschiedenen Lsw dargestellt. Hierbei sind die zuvor beschriebenen Schirmmaße für die verschiedenen Empfängerhöhen als Terzspektren abgebildet und das resultierende Vorbeifahrts-Schirmmaß in Schwarz dargestellt. In einigen Abbildungen ist zusätzlich zum Vorbeifahrts-Schirmmaß der entsprechenden Lsw das Vorbeifahrts-Schirmmaß der geraden Lsw in dunkelgrau bzw. des Einfachknicks E3 in Hellgrau als Referenz enthalten.

Für die gerade Lsw G ergibt sich aufgrund des nahezu parallelen und linearen Verlaufs der Einzelkurven ein ebenfalls annähernd linear verlaufendes spektrales Vorbeifahrts-Schirmmaß. Dieses nimmt, wie auch das winkelabhängige spektrale Schirmmaß, mit zunehmender Empfängerhöhe ab.

Beim Einfachknick E1 reduziert sich die Erkennbarkeit der spektralen Welligkeit bereits in der Terzdarstellung der Einzelkurven gegenüber der kontinuierlichen Darstellung. Die spektrale Welligkeit bleibt jedoch vor allem im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 400 Hz in Form eines etwas größeren Unterschieds zwischen den kleinen und großen Quellwinkeln sichtbar. Im spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaß wird dies durch die gewichtete Mittelung über die einzelnen Quellwinkel jedoch nahezu ausgeglichen. Oberhalb von etwa 250 Hz ergibt sich ein annähernd linearer Verlauf des spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaßes, das für eine Empfängerhöhe von 1 m um ca. 2 dB bis 3 dB höher liegt als das der geraden Lsw an der Position der ersten Beugungskante des Einfachknicks und zudem einen geringfügig steileren frequenzabhängigen Anstieg aufweist. Für eine Empfängerhöhe von 2 m reduziert sich der akustische Vorteil des Einfachknicks E1 gegenüber der geraden Lsw G auf weniger als 1 dB. Bei einer weiteren Zunahme der Empfängerhöhe ergibt sich sogar eine leichte Verringerung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes gegenüber dem der geraden Lsw G.

Das Schirmmaß des Einfachknicks E2 weist eine deutlich geringere spektrale Welligkeit auf als jenes von E1 und E3. Daraus resultiert, dass sich nahezu über den gesamten Frequenzbereich ein annähernd linearer Verlauf des spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaßes ergibt. Gleichzeitig weist dieses zwar zumindest für eine Empfängerhöhe von 1 m einen etwas steileren frequenzabhängigen Anstieg auf als das Vorbeifahrts-Schirmmaß der geraden Lsw G, jedoch resultiert hieraus eine Verbesserung von lediglich etwas mehr als 1 dB. Mit zunehmender Empfängerhöhe nähert sich das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E2 zunehmend dem der geraden Lsw G an. Während sich für eine Empfängerhöhe von 2 m zumindest im Frequenzbereich von etwa 160 Hz bis 400 Hz eine geringfügige Verbesserung gegenüber der geraden Lsw G zeigt, sind die beiden Kurven bei einer Empfängerhöhe von 4 m nahezu deckungsgleich. Die Ähnlichkeit des Simulationsergebnisses des Einfachknicks E2 und der geraden Lsw G erscheint naheliegend, da der Einfachknick E2 die geringste geometrische Abweichung von der geraden Lsw aufweist. Grundsätzlich ist bei dieser Betrachtung zu berücksichtigen, dass der Fußpunkt der geknickten Lsw entsprechend Kapitel 3.1.3 1 m weiter von der Straße entfernt ist als jener der geraden Lsw (Erzeugung derselben effektiven Schirmhöhe bezüglich der Oberkante der Lsw). Unter Beibehaltung des Fußpunktes wäre somit zumindest eine geringfügige Verbesserung gegenüber der geraden Lsw auch bei hohen Empfängerhöhen zu erwarten.

Im Gegensatz dazu weist das Schirmmaß des Einfachknicks E3 die stärkste spektrale Welligkeit auf. Diese ist selbst im Vorbeifahrt-Schirmmaß noch leicht erkennbar, was jedoch vor allem auf den Frequenzbereich unterhalb von ca. 200 Hz beschränkt ist. Für höhere Frequenzen gleichen sich die Minima und Maxima der einzelnen Quellwinkel derart aus, dass sich auch hier ein nahezu linearer frequenzabhängiger Verlauf mit lediglich einer leichten Welligkeit ergibt. Das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 ist für eine Empfängerhöhe von 1 m deutlich höher als das der geraden Lsw G an der Position der ersten Beugungskante. Eine starke akustische Verbesserung gegenüber der geraden Lsw G von etwa 6 dB ergibt sich bei 125 Hz. Oberhalb nimmt das Schirmmaß geringfügig ab, sodass sich eine Verbesserung von etwa 3 dB bei 200 Hz einstellt. Zu höheren Frequenzen steigt das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 steiler an als das der geraden Lsw G, sodass sich bei 500 Hz wiederum eine Verbesserung von ca. 6 dB gegenüber der geraden Lsw ergibt. Mit zunehmender Empfängerhöhe nimmt das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 zwar ab, jedoch ist im Gegensatz zum Einfachknick E1 in keinem Terzband eine

Verschlechterung gegenüber der geraden Lsw G beobachtbar. Selbst bei einer Empfängerhöhe von 4 m weist der Einfachknick E3 bei 500 Hz noch ein um knapp 2 dB höheres Schirmmaß auf als die gerade Lsw.

In der Darstellung des Schirmmaßes des Dreifachknicks D1 ist zusätzlich zur geraden Lsw das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 aufgeführt. Durch die geringe spektrale Welligkeit der Schirmmaße für die einzelnen Quellwinkel ergibt sich für D1 wiederum ein nahezu linearer Verlauf des frequenzabhängigen Vorbeifahrts-Schirmmaßes. Für eine Empfängerhöhe von 1 m weist dieses einen ähnlichen Anstieg auf wie das des Einfachknicks E3. Das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Dreifachknicks D1 verläuft oberhalb von etwa 250 Hz annähernd parallel zu dem des Einfachknicks E3, wodurch sich eine um etwa 3 dB höhere akustische Wirksamkeit des Dreifachknicks ergibt. Somit steigt die Verbesserung gegenüber der geraden Lsw an der Position der ersten Beugungskante von etwa 4 dB bei 100 Hz auf ca. 9 dB bei 500 Hz erheblich an. Auch diese Verbesserung reduziert sich jedoch deutlich für höhere Empfängerpositionen. Während das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Dreifachknicks D1 bei 2 m Empfängerhöhe noch um etwa 2 dB höher ist als das des Einfachknicks E3, sind die Werte bei 3 m Empfängerhöhe nahezu gleich. Bei einer Empfängerhöhe von 4 m weist der Dreifachknick D1 nahezu die gleiche akustische Wirksamkeit auf wie die gerade Lsw G, während das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 vor allem im Frequenzbereich oberhalb von 250 Hz um ca. 1 dB bis 2 dB höher ist als das des Dreifachknicks D1.

Die einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A1 weist ein sehr ähnliches Schirmmaß auf wie der Einfachknick E3. Durch den auf maximal 500 Hz begrenzten Frequenzbereich erfolgen die Simulationen in einem Frequenzbereich, in dem der für Straßenverkehrslärm ausgelegte Schallabsorber nur eine begrenzte akustische Wirksamkeit aufweist (siehe Bild 3-27). Dadurch ergibt sich nur eine geringfügige Verbesserung des Schirmmaßes von bis zu ca. 1 dB im Frequenzbereich von etwa 250 Hz bis 400 Hz. Bei tieferen Frequenzen ist mitunter eine Verschlechterung gegenüber dem Einfachknick E3 beobachtbar, jedoch ist dies für den vordergründig betrachteten Straßenverkehrslärm von geringer Bedeutung. Bei 500 Hz weisen A1 und E3 nahezu dasselbe Vorbeifahrts-Schirmmaß auf. Es ist zu vermuten, dass mit darüber hinaus ansteigender Frequenz – und somit deutlich zunehmendem Schallabsorptionsgrad – die Wirkung von A1 höher wird als die von E3. Der Unterschied zwischen A1 und E3 ist im betrachteten Frequenzbereich nahezu unabhängig von der Empfängerhöhe.

Ein noch deutlicherer Einfluss des geringen Schallabsorptionsgrads zeigt sich bei der einfach geknickten, absorbierend bekleideten Lsw A2. Obwohl, wie in Kapitel 2.2 dargelegt wurde, davon auszugehen ist, dass eine Veränderung der akustischen Impedanz an der Oberkante der Lsw das größte Potenzial für eine Erhöhung der Wirksamkeit der Lsw mit sich bringt, weist A2 im gesamten betrachteten Frequenzbereich und für alle Empfängerhöhen ein geringeres Vorbeifahrts-Schirmmaß auf als der schallharte Einfachknick E3. Dieser Effekt wird in Kapitel 3.3.3 tiefergehend untersucht.

Die absorbierend bekleidete Lsw A3 stellt eine Zusammenführung von A1 und A2 dar. Es zeigt sich hier jedoch ebenfalls im gesamten betrachteten Frequenzbereich eine Verringerung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes gegenüber dem des Einfachknicks E3.

3.3.2 Gegenüberstellung

In Bild 3-42 und Bild 3-43 ist für die geometrisch variierten Lsw das Vorbeifahrts-Schirmmaß dargestellt. Als Referenz dient die gerade Lsw (schwarze Kurve). In Dunkelblau, Hellblau bzw. Grau sind die Berechnungsergebnisse E1, E2 bzw. E3 enthalten, während Rot die Werte von D1 verkörpert. Analog dazu ist im Anhang in Bild 7-20 die spektrale Verbesserung des Schirmmaßes gegenüber dem einer geraden Lsw dargestellt (Einfügungs-Schirmmaß).

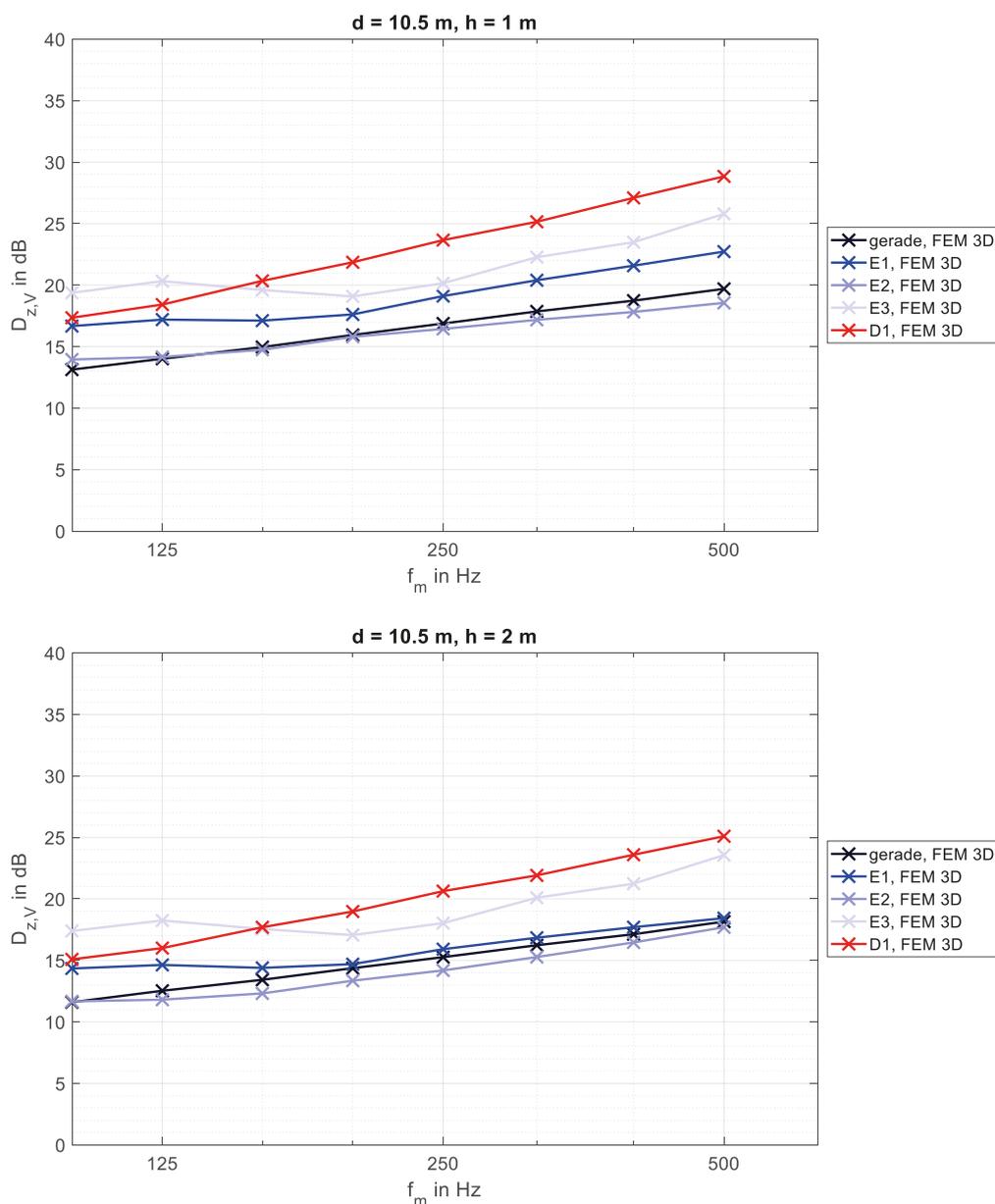


Bild 3-42: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der verschiedenen Lsw-Geometrien aus 3D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw; dunkelblau: Einfachknick E1; hellblau: Einfachknick E2; grau: Einfachknick E3; rot: Dreifachknick D1; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m

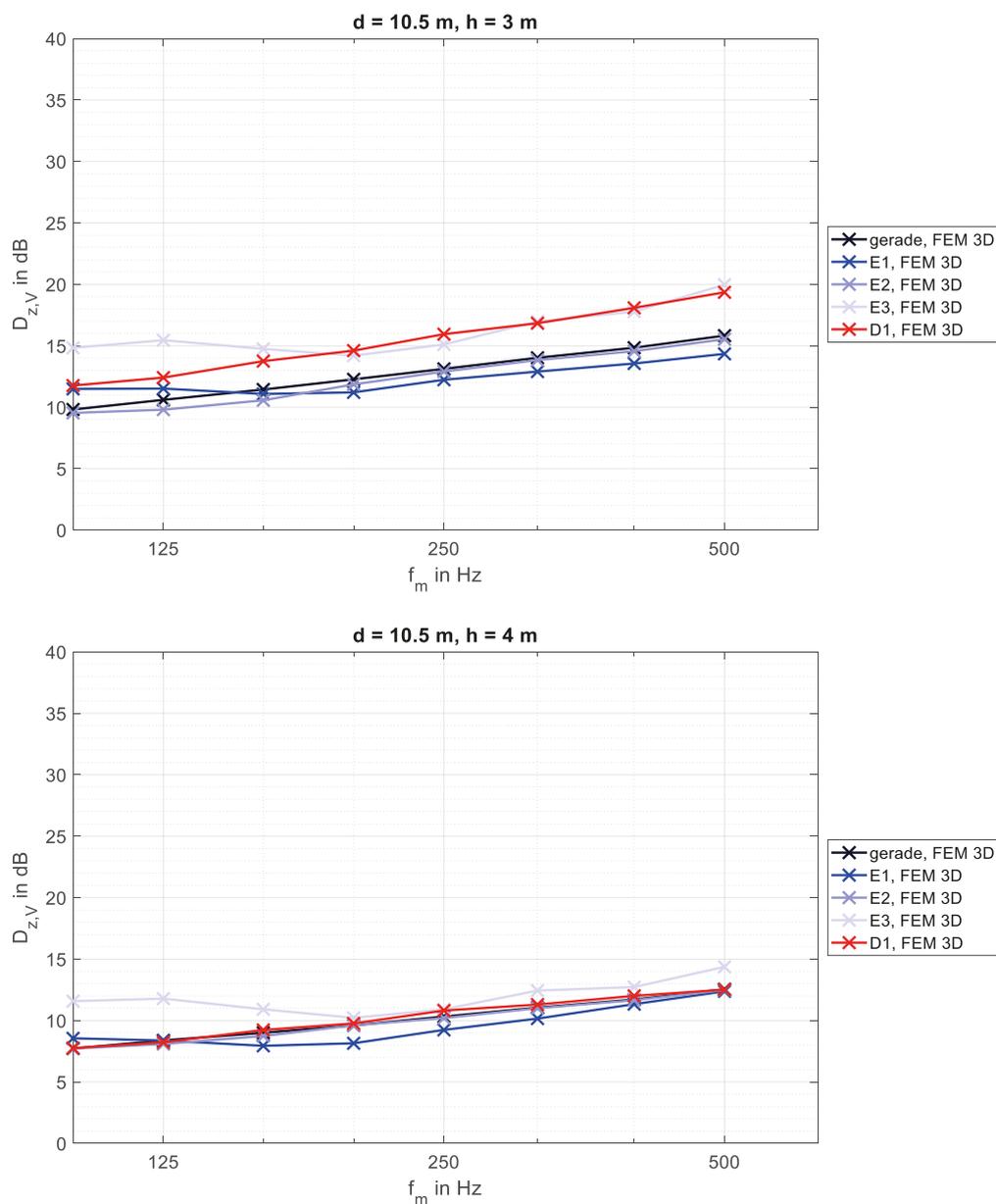


Bild 3-43: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmaßes der verschiedenen Lsw-Geometrien aus 3D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw; dunkelblau: Einfachknick E1; hellblau: Einfachknick E2; grau: Einfachknick E3; rot: Dreifachknick D1; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m

Wie bereits in den Darstellungen der einzelnen Kurven erkennbar, weisen E1, E3 und D1 für eine Empfängerhöhe von 1 m die größte akustische Wirksamkeit auf. Diese nimmt mit zunehmender Empfängerhöhe jedoch stark ab, insbesondere für D1. Während D1 für eine Empfängerhöhe von 1 m das höchste Schirmaß aufweist und im Frequenzbereich von ca. 200 Hz bis 500 Hz eine etwa 3 dB größere Wirksamkeit aufweist als E3, reduziert sich die Differenz zwischen D1 und E3 mit zunehmender Empfängerhöhe auf etwa 2 dB in 2 m Höhe. Für eine Empfängerhöhe von 3 m liegen die Kurven nahezu deckungsgleich und in 4 m Höhe übersteigt das Schirmaß von E3 jenes von D1 hochfrequent geringfügig. Der Einfachknick E1 weist ein ähnliches tendenzielles Verhalten auf, seine Wirksamkeit ist jedoch grundsätzlich geringer als die von E3 und D1. Mit zunehmender Empfängerhöhe reduziert sich auch für E1 die akustische Wirksamkeit. Diese ist für eine Empfängerhöhe

von 1 m nur noch geringfügig höher als die der geraden Lsw G. Für 3 m bzw. 4 m hohe Empfänger führt E1 gegenüber G zu einer leichten Pegelerhöhung. E2 führt für alle Empfängerhöhen zu Schirmmaßen, die in der Größenordnung jener der geraden Lsw liegen und teilweise zu einer leichten Verringerung der Wirkung gegenüber der geraden Lsw.

In Bild 3-44 und Bild 3-45 ist analog zu Bild 3-42 und Bild 3-43 das Terzband-Vorbeifahrts-Schirmmaß für die verschiedenen absorbierenden Ausführungen der einfach geknickten Lsw dargestellt. Als Referenz dienen hier einerseits die gerade Lsw G (schwarz) und andererseits der schallharte Einfachknick E3 (grau), auf dem die absorbierend bekleideten Lsw geometrisch basieren. In Grün ist die innenseitig absorbierend bekleidete Lsw A1 abgebildet, in Pink die Lsw, deren Oberseite des Knicks absorbierend ausgekleidet ist. In Gelb dargestellt ist die Lsw A3, die die Zusammenführung von A1 und A2 darstellt, bei der also sowohl die Innenseite als auch die Oberseite des Knicks absorbierend bekleidet sind. Analog ist im Anhang, Bild 7-21 die spektrale Verbesserung des Schirmmaßes gegenüber dem der geraden Lsw dargestellt.

Entsprechend der Literaturrecherche wurde erwartet, dass die absorbierende Bekleidung insbesondere der Oberseite der Lsw eine maßgebliche Verbesserung der Wirksamkeit der geknickten Lsw mit sich bringt. Es zeigt sich jedoch, dass die verschiedenen absorbierend bekleideten Lsw grundsätzlich ein geringeres Vorbeifahrts-Schirmmaß aufweisen als die schallharte Variante E3. Einzige Ausnahme stellt A1 im Frequenzbereich von ca. 250 Hz bis 400 Hz dar. Hier weist A1 ein um etwa 1 dB höheres Schirmmaß auf als E3. Für die anderen Varianten bzw. für die tieferen Frequenzen weisen alle einfach abgeknickten, absorbierend ausgekleideten Lsw ein geringeres Schirmmaß auf als E3.

Erst an der Obergrenze des betrachteten Frequenzbereichs bei 500 Hz weisen A2 und A3 ein geringfügig höheres Vorbeifahrts-Schirmmaß auf als E3. Dies deutet darauf hin, dass im betrachteten Frequenzbereich der Schallabsorptionsgrad nicht ausreichend hoch ist, um eine maßgebliche positive Wirkung zu erzielen. Da der Schallabsorptionsgrad entsprechend Bild 3-27 bei 500 Hz nur etwa 0,65 beträgt und mit zunehmender Frequenz bis etwa 2 kHz deutlich auf ca. 0,95 ansteigt, ist zu vermuten, dass auch die Wirksamkeit des eingebrachten Absorptionsmaterials mit ansteigender Frequenz zunimmt. Hierin liegt eine grundlegende Schwierigkeit, die sich aus der dreidimensionalen Simulation ergibt: Dadurch, dass der Absorber für Straßenverkehrslärm ausgelegt ist, also eine optimale Wirkung vor allem im Frequenzbereich oberhalb von ca. 630 Hz aufweist, ist die akustische Wirkung im mittels der 3D-FEM auswertbaren tieffrequenten Bereich deutlich verringert.

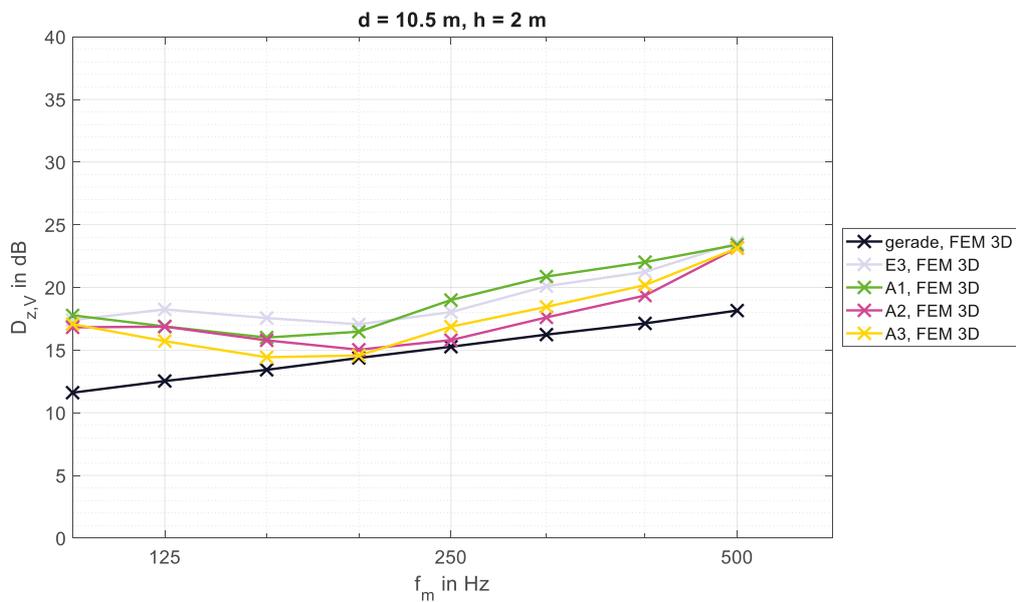
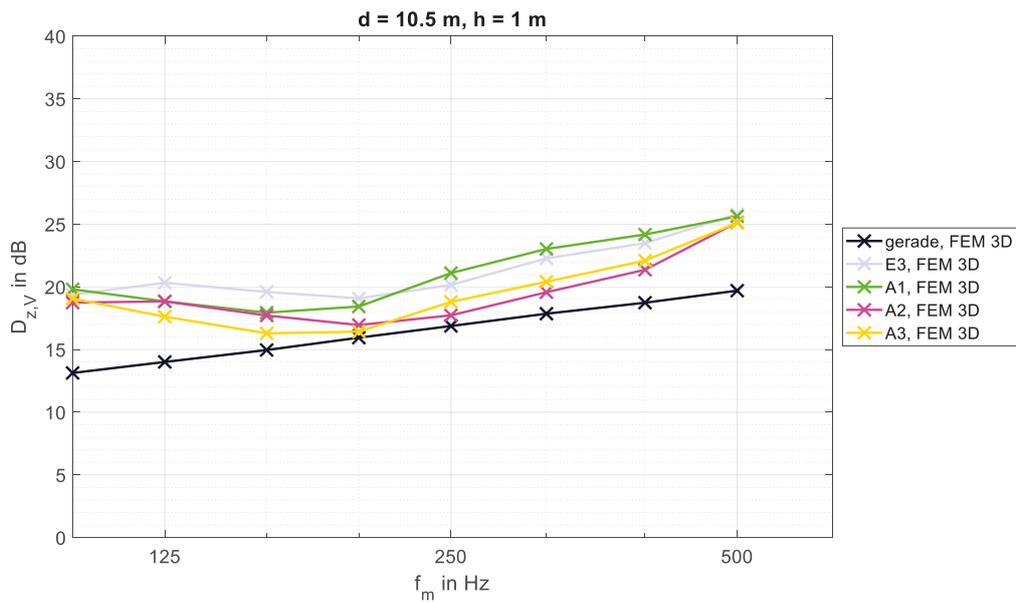


Bild 3-44: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus 3DFEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw G; grau: Einfachknick E3; grün: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A1 (Innenseite); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen); gelb: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A3 (Innenseite + Oberkante außen); oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m

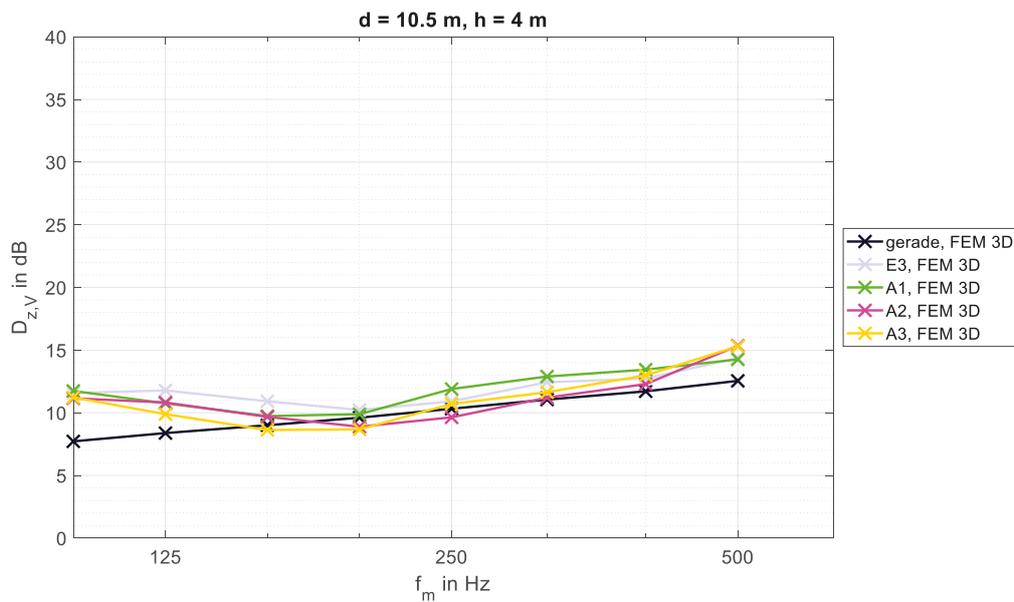
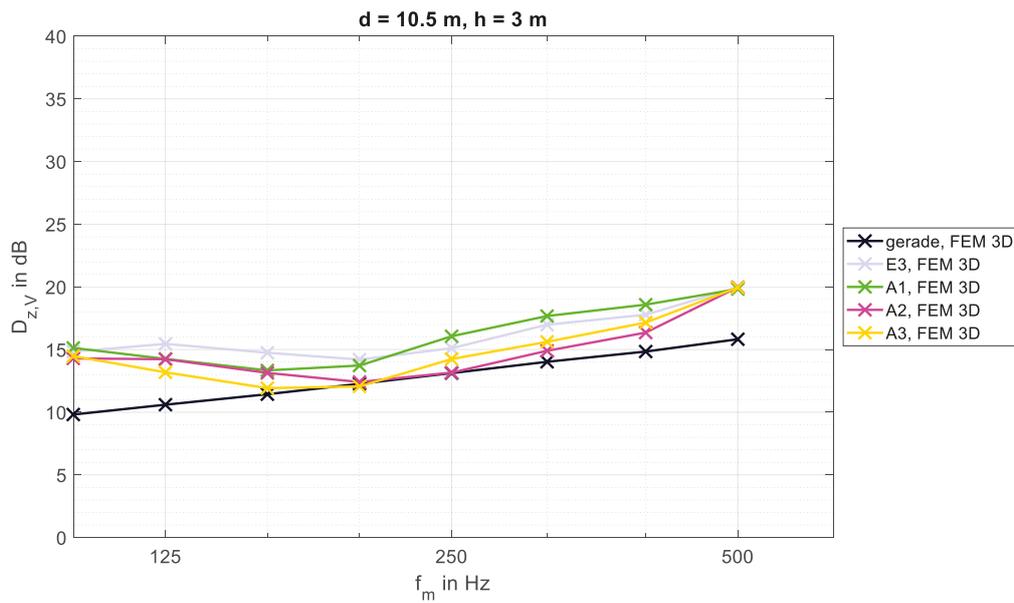


Bild 3-45: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus 3DFEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw G; grau: Einfachknick E3; grün: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A1 (Innenseite); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen); gelb: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A3 (Innenseite + Oberkante außen); oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m

3.3.3 Weiterführende Untersuchungen

Modellierung der schallabsorbierenden Oberfläche

Die These, dass der geringe Absorptionsgrad zu der Verschlechterung der Wirksamkeit bei Einbringung von Absorptionsmaterial führt, bestätigt sich anhand von Bild 3-46. Hier ist exemplarisch für eine Empfängerhöhe von 1 m (oben) bzw. 4 m (unten) das Schirmmaß für einen Quellwinkel von 0° bei Umsetzung verschiedener Modifikationen des 3D-FEM-Modells dargestellt. In Schwarz bzw. Grau sind analog zu den vorigen Diagrammen das Schirmmaß der geraden Lsw G und des Einfachknicks E3 abgebildet. Zudem ist in Pink das Schirmmaß der absorbierend bekleideten Lsw A2 unter Verwendung des ursprünglichen Modells enthalten. Diesem liegt entsprechend Kapitel 3.1.3 ein 5 cm dicker Absorber zugrunde, dessen akustische Impedanz als lokal reagierendes Medium auf der Oberseite des Knicks der 1 cm dicken Lsw installiert wurde. Während die geometrischen Variationen (G, E1, E2, E3, D1) aus Gründen des Rechenaufwands an unendlich dünnen Lsw erfolgten, erforderte die Integration verschiedener akustischer Impedanzen in das Modell, dass die Lsw eine reale Dicke aufweist. Darum liegt den Modellen A1 bis A3 eine 1 cm dicke Lsw zugrunde. Zur Ermittlung der dunkelvioletten Kurve wurde dieselbe Vorgehensweise gewählt wie für die pinke Kurve mit dem einzigen Unterschied, dass bei der Berechnung der akustischen Impedanz des Absorbers statt 5 cm eine Dicke von 10 cm zugrunde gelegt wurde. Für die hellrosa Kurve wurde das Modell bezüglich der Integration des Absorbers modifiziert: Anstatt die akustische Impedanz des Materials zu berechnen und die Oberfläche damit zu belegen, wurde hier ein realer Absorber mit den für A2 zugrunde gelegten Parametern in das Modell eingebracht. Um den Einfluss der Dicke der Lsw zu bewerten, ist außerdem der Fall einer schallharten Lsw entsprechend dem Einfachknick E3 mit einer Dicke von 1 cm untersucht worden. Dieser ist als hellblaue Kurve eingetragen.

Dass die Erhöhung der Dicke des Absorbers im gesamten betrachteten Frequenzbereich oberhalb von ca. 100 Hz zu einer deutlichen Erhöhung des Schirmmaßes führt, die auch die akustische Wirksamkeit des schallharten Einfachknicks E3 übersteigt, legt nahe, dass die Reduzierung der Wirksamkeit von A2 gegenüber E3 mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den geringen Schallabsorptionsgrad des 5 cm dicken Absorbers im betrachteten Frequenzbereich zurückzuführen ist. Dies bestätigt sich des Weiteren dadurch, dass sich für eine Empfängerhöhe von 1 m die dunkelvioletten Kurve der pinken Kurve tieffrequent annähert. Es ist davon auszugehen, dass der hier ebenfalls geringe Schallabsorptionsgrad genau wie im Fall A2 zu einer leichten Verringerung der akustischen Wirksamkeit der Lsw führt, dieser Effekt jedoch aufgrund der größeren Absorberdicke auf einen tieferen Frequenzbereich begrenzt ist. Im Frequenzbereich oberhalb von ca. 200 Hz zeigt sich für eine Empfängerhöhe von 4 m eine Erhöhung des Schirmmaßes gegenüber E3 von 3 dB bis teilweise deutlich mehr als 4 dB. Es ist davon auszugehen, dass der 5 cm dicke Absorber im für Straßenverkehrslärm maßgeblichen Frequenzbereich oberhalb von ca. 800 Hz eine ähnliche Erhöhung des Schirmmaßes bewirken kann.

Die Umsetzung des 5 cm dicken Absorbers als realen Absorber resultiert in einem Schirmmaß, das jenem von A2 entspricht. Es ist somit anzunehmen, dass die lokale Umsetzung des Absorbers im betrachteten Frequenzbereich keinen maßgeblichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat.

Der Fall des 1 cm dicken, schallharten Einfachknicks E3 ergibt ein Schirmmaß, das nahezu mit dem der unendlich dünnen Ausführung des Einfachknicks E3 übereinstimmt. Somit kann ausgeschlossen werden, dass die Dickenänderung der Lsw die Ursache für die Verringerung der Wirksamkeit von A2 gegenüber E3 darstellt.

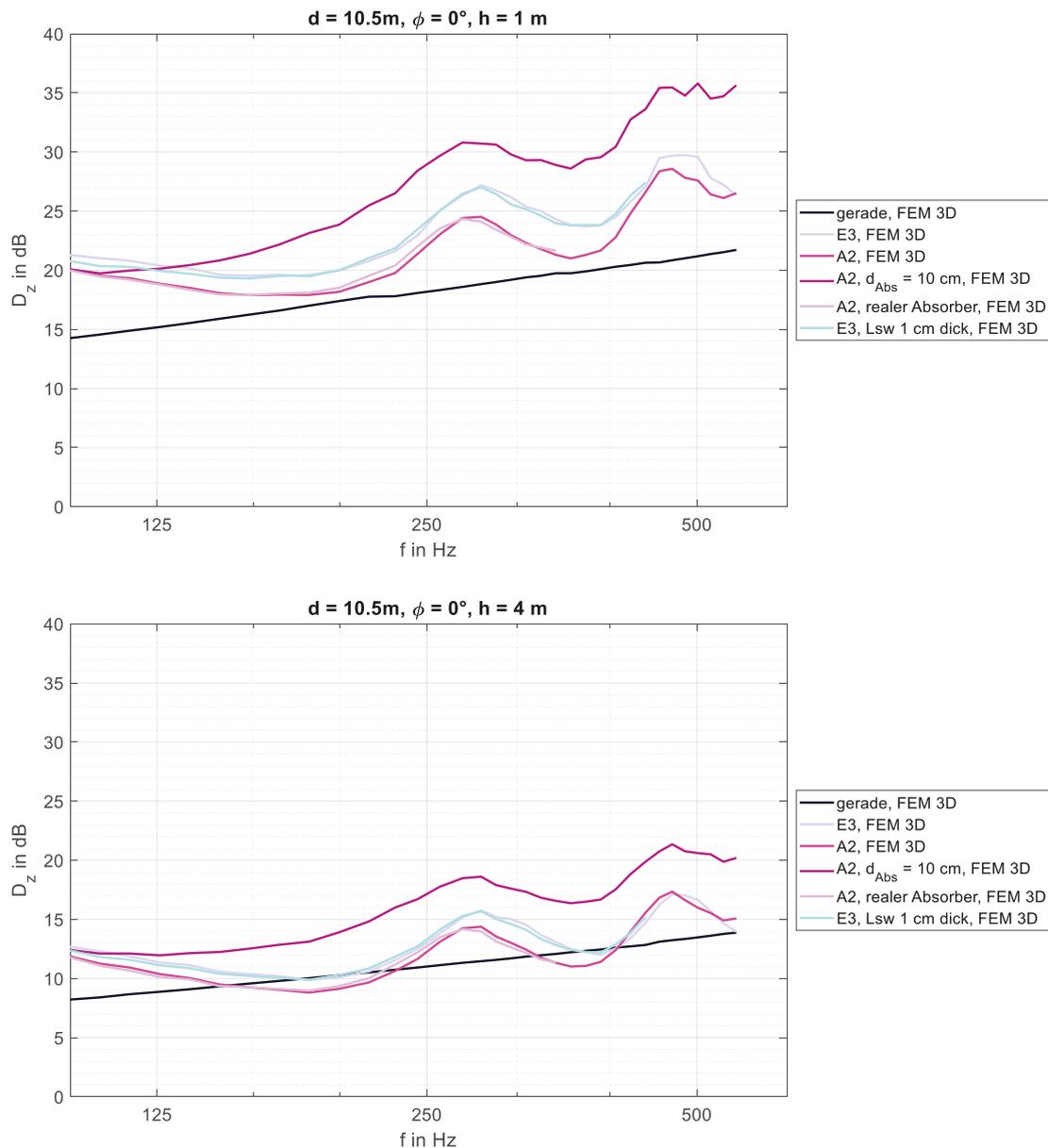


Bild 3-46: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus modifizierter 3D-FEM; schwarz: gerade, schallharte Lsw G; grau: Einfachknick E3 (unendlich dünne, schallharte Lsw); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 5 cm dickem Absorber entsprechend Ausgangs-Modellierung); dunkelviolett: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 10 cm dickem Absorber); hellrosa: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 5 cm dickem, realem Absorber); hellblau: Einfachknick E3 (1 cm dicke, schallharte Lsw); oben: h = 1 m; unten: h = 4 m

Analytische Berechnungen und 2D-FEM

Das in Kapitel 2.5 beschriebene und in Kapitel 3.1.2 zur Validierung des 3D-FEM-Modells genutzte analytische Schallausbreitungsmodell ist in der Lage, freie Schallausbreitung sowie Schallausbreitung über eine gerade Lsw hinweg über Boden mit definierter Impedanz zu beschreiben. Anhand von Bild 3-41 sowie Bild 7-1 bis Bild 7-3 ist ersichtlich, dass das Schallausbreitungsmodell Ergebnisse des Schirmmaßes liefert, die sehr gut mit denen der 3D-FEM sowie der 2D-FEM übereinstimmen. Um zu untersuchen, ob das Modell derart modifiziert werden kann, dass es die Schallausbreitung über eine geknickte Lsw ebenfalls korrekt beschreiben kann, wurden für den Einfachknick E3 exemplarische Schallausbreitungsberechnungen sowie 2D-FEM-Simulationen durchgeführt. Diese sind im Anhang in Bild 7-6 zusätzlich zu den Ergebnissen der 3D-FEM enthalten. Da bei ersten Versuchen der analytischen Berechnung festgestellt wurde, dass eine einfache Umsetzung als doppelte Beugung und unter Berücksichtigung des in Bild 3-14 dargestellten Pfads 2 keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wurde die Schallausbreitung aus [Plovsing 2001] über Hindernisse mit zwei Beugungskanten umgesetzt (siehe Bild 2-20). Dabei kam wiederum das in Bild 3-14 dargestellte dreidimensionale Modell unter Berücksichtigung der Pfade 1 und 2 zum Einsatz, um die spektrale Welligkeit der Ergebnisse korrekt abzubilden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in Bild 7-6 darauf verzichtet, die 2D-FEM-Ergebnisse für Winkel größer als 0° aufzunehmen. Diese sind Bild 3-47 für einen Winkel von 20° und Bild 3-48 für einen Winkel von $37,5^\circ$ (oben) bzw. 60° (unten) zu entnehmen.

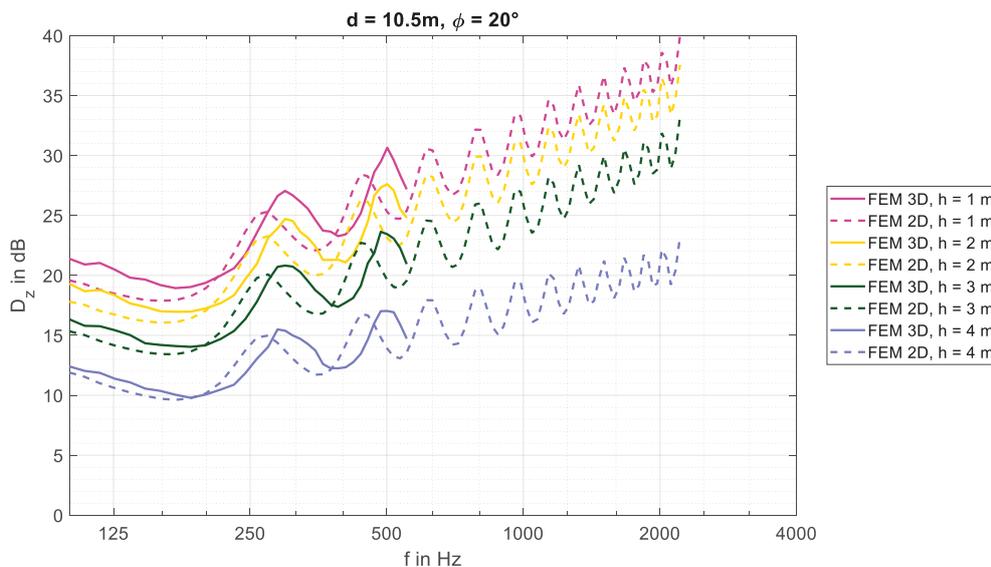


Bild 3-47: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; pink: $h = 1$ m; gelb: $h = 2$ m; dunkelgrün: $h = 3$ m; violett: $h = 4$ m; $\phi = 20^\circ$

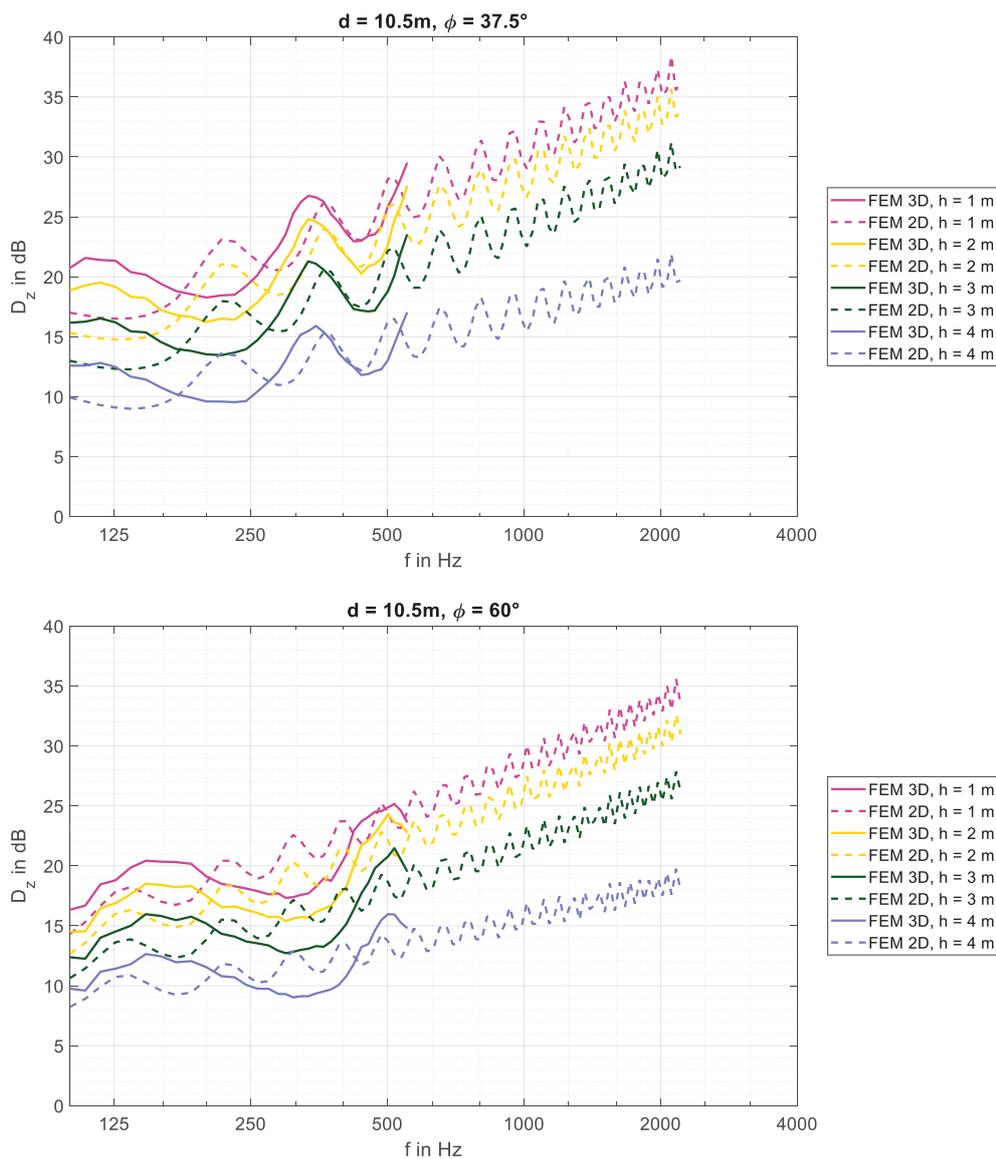


Bild 3-48: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; pink: $h = 1$ m; gelb: $h = 2$ m; dunkelgrün: $h = 3$ m; violett: $h = 4$ m; oben: $\phi = 37,5^\circ$; unten: $\phi = 60^\circ$

In Bild 7-6 zeigt sich eine gute Übereinstimmung der analytischen Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der 3D-FEM. Für einen Quellwinkel von 0° stimmen die Ergebnisse aller drei Verfahren gut überein, wobei die analytische Berechnung vor allem im Bereich der lokalen Maxima und für geringe Empfängerhöhen etwas niedrigere Schirmmaße wiedergibt als die 3D-FEM. Auch die 2D-FEM weist für einen Quellwinkel von 0° eine sehr gute Übereinstimmung mit der 3D-FEM auf. Für die niedrigeren Empfängerposition ergeben sich hier geringfügige Abweichungen, die jedoch mit steigender Frequenz abnehmen. Bei einer Erhöhung des Quellwinkels zeigt sich, dass die analytische Berechnung die veränderte spektrale Welligkeit der 3D-FEM-Ergebnisse gut wiedergeben kann. Der Effekt, dass die analytische Berechnung etwas zu geringe Schirmmaße vorhersagt, bleibt dabei bestehen.

Die 2D-FEM liefert hingegen zwar Ergebnisse, die den mit zunehmender Frequenz ansteigenden Trend der 3D-Ergebnisse wiedergibt, jedoch eine mit steigendem Quellwinkel zunehmend falsche spektrale Welligkeit aufweisen. Dadurch stimmen 2D-FEM und 3D-FEM insbesondere für tiefe Frequenzen nicht gut überein. Es ist zu vermuten, dass dies auf den bereits in Kapitel 3.2.1 beschriebenen und anhand von Bild 3-36 erläuterten Effekt der unterschiedlichen scheinbaren Wellenlänge im Interferenzfeld zwischen Schallquelle und Lärmschutzwand zurückzuführen ist. Anhand der Ergebnisse in Bild 7-13 bis Bild 7-16 zeigt sich jedoch, dass sich die spektrale Welligkeit der Schirmmaße für die einzelnen Quellwinkel deutlich reduziert, wenn die Kombination der Quellwinkel zur Bestimmung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes erfolgt. Beim Einfachknick E3, dessen winkelabhängiges Schirmmaß die größte Welligkeit aufweist, ist die spektrale Welligkeit des Vorbeifahrts-Schirmmaßes auf den tieffrequenten Bereich unterhalb von ca. 200 Hz begrenzt. Oberhalb ist lediglich eine geringfügige spektrale Welligkeit erkennbar, bei der jedoch ebenfalls davon auszugehen ist, dass diese mit zunehmender Frequenz weiter abnimmt.

In Bild 3-49 und Bild 3-50 ist das Vorbeifahrts-Schirmmaß des Einfachknicks E3 für die verschiedenen Empfängerhöhen und Quell-Empfänger-Distanzen aus der 2D-FEM, der analytischen Berechnung sowie (für die Quell-Empfänger-Distanz 10,5 m) aus der 3D-FEM dargestellt. Hier zeigt sich insbesondere der zuvor diskutierte Effekt, dass die Welligkeit des Schirmmaßes für die einzelnen Quellwinkel einen mit zunehmender Frequenz nachlassenden Effekt auf das Vorbeifahrts-Schirmmaß hat. Dadurch bedingt stimmen mit zunehmender Frequenz nicht nur analytische Berechnung und 3D-FEM gut überein, sondern es zeichnet sich bereits im Frequenzbereich von etwa 315 Hz bis 500 Hz ab, dass auch die 2DFEM einen Wert des Vorbeifahrts-Schirmmaßes wiedergibt, der jenem aus der 3D-FEM sehr ähnlich ist. Da, wie zuvor gezeigt, die analytische Berechnung eine gute Übereinstimmung mit der 3D-FEM aufweist, lässt sich des Weiteren annehmen, dass die mit zunehmender Frequenz immer geringer werdende Abweichung zwischen analytischer Berechnung und 2D-FEM ebenfalls für die Beziehung zwischen 3D-FEM und 2D-FEM gelten könnte. Das heißt, obwohl der 2D-FEM die falsche spektrale Welligkeit für die einzelnen Quellwinkel zugrunde liegt, nähern sich die Ergebnisse der 2D-FEM jenen der analytischen Berechnung, die die korrekte Welligkeit beinhaltet, an, wenn die gesamte Vorbeifahrt betrachtet wird. Dies impliziert, dass es zielführend sein kann, die tieffrequenten 3D-Ergebnisse, die nur bis etwa 500 Hz gewonnen werden können, um hochfrequente 2D-FEM-Ergebnisse zu ergänzen, um den Frequenzbereich von etwa 630 Hz bis 2 kHz abzudecken, der für den Straßenverkehrslärm die höchste Relevanz hat. Dies hätte zusätzlich den Vorteil, dass eine Betrachtung entfernterer Empfängerpositionen durch numerische Simulation möglich wäre. Für höhere Frequenzen und größere Quell-Empfänger-Distanzen zeigt sich insbesondere, dass die Ergebnisse der 2DFEM und der analytischen Berechnung in guter Übereinstimmung zueinander stehen.

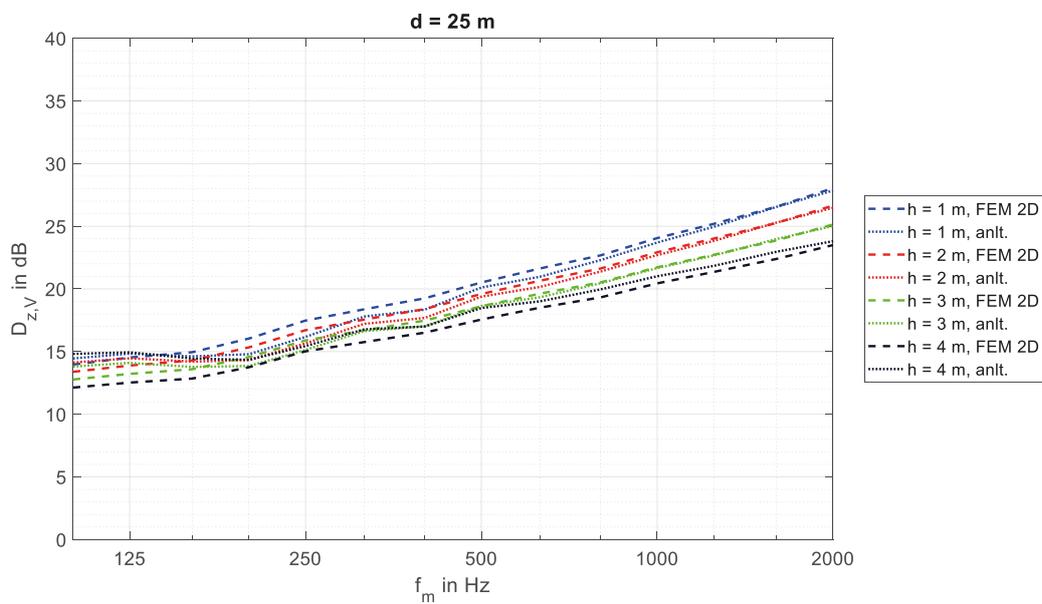
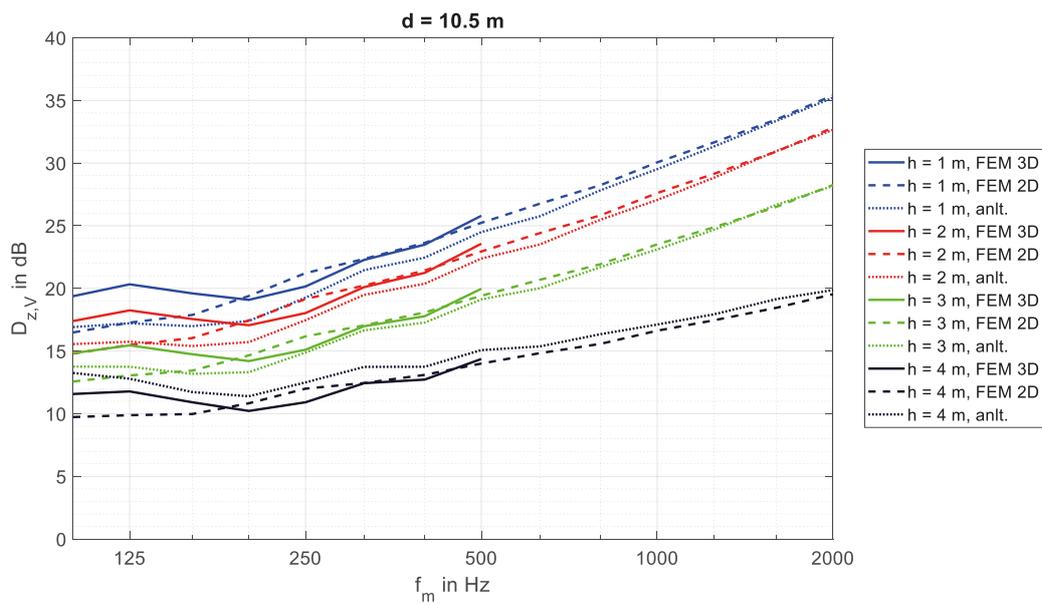


Bild 3-49: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 25$ m

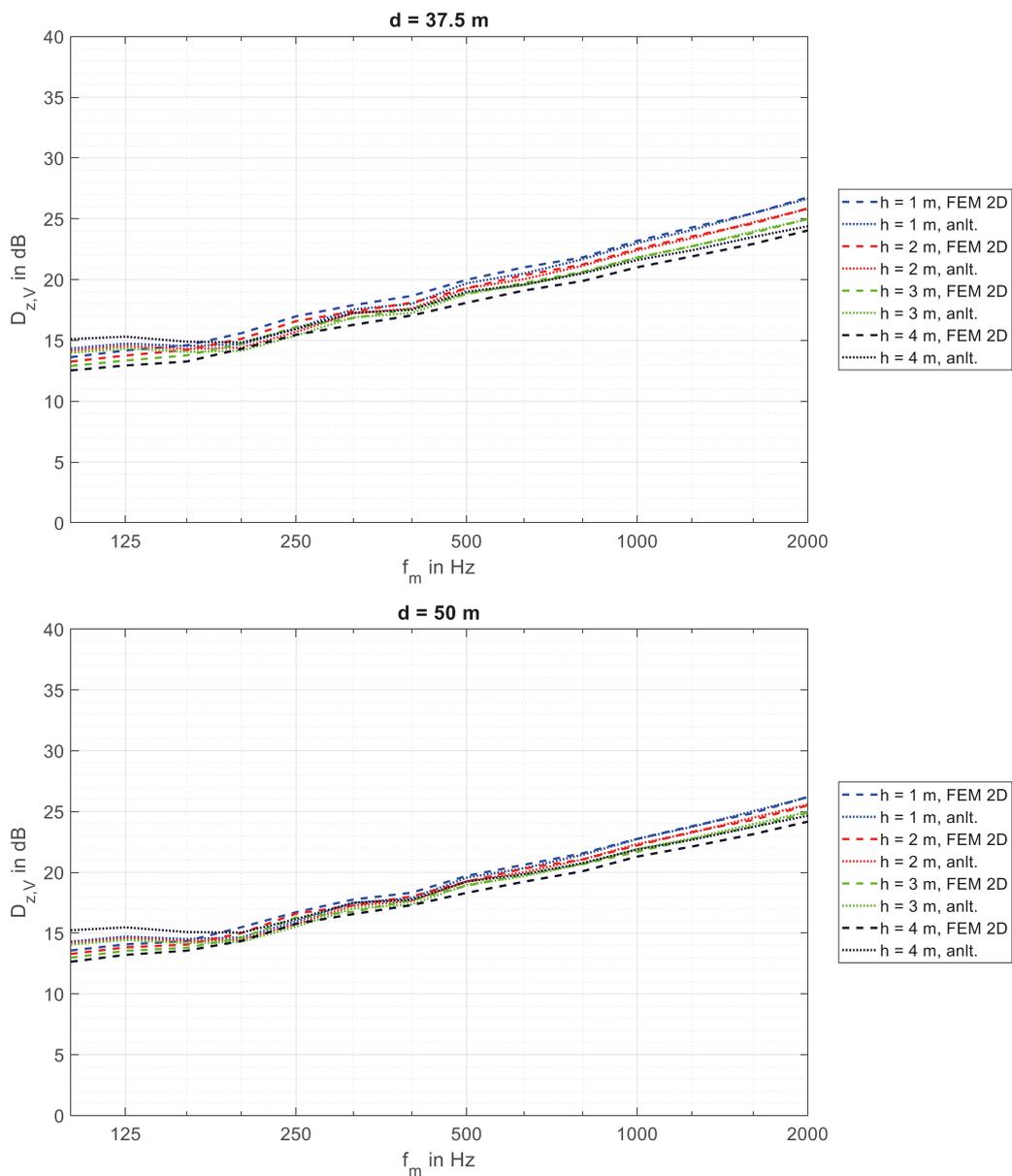


Bild 3-50: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmaßes des Einfachknicks E3 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 37,5$ m; unten: $d = 50$ m

Quellseitige Reflexion

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde geprüft, inwiefern durch die veränderte Geometrie und Impedanz von Lsw eine quellseitige Pegelerhöhung zu erwarten ist. In Bild 3-51 ist die zugrunde liegende Geo-metrie exemplarisch für eine einfach geknickte Lsw dargestellt. Hier befindet sich ein Empfänger E linksseitig der Lsw, zwischen dem Empfänger und der Lsw liegt die Schallquelle Q. In Grün ist der direkte Schallpfad von der Schallquelle zum Empfänger dargestellt, während Blau den Schallpfad von der Quelle zum Empfänger mit einfacher Reflexion am senkrechten Teil der Lsw darstellt. Dieser Pfad ist bei der geknickten Lsw zu erwarten, sorgt jedoch bereits bei einer senkrechten Wand für eine quellseitige Pegelerhöhung. Bei der geknickten Lsw ist jedoch zusätzlich mit Schallpfaden wie Pfad 3 zu rechnen, bei dem es am horizontalen Teil der Lsw zu einer Reflexion in Richtung des Bodens kommt, die in Verbindung mit anderen Reflexionen am senkrechten Teil der Lsw und am Boden zu einer weiteren Erhöhung des Schalldruckpegels führen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine solche Pfadbetrachtung nur eine grobe Abschätzung des Sachverhalts zulässt, da Wellenaspekte der Schallausbreitung außer Acht gelassen werden.

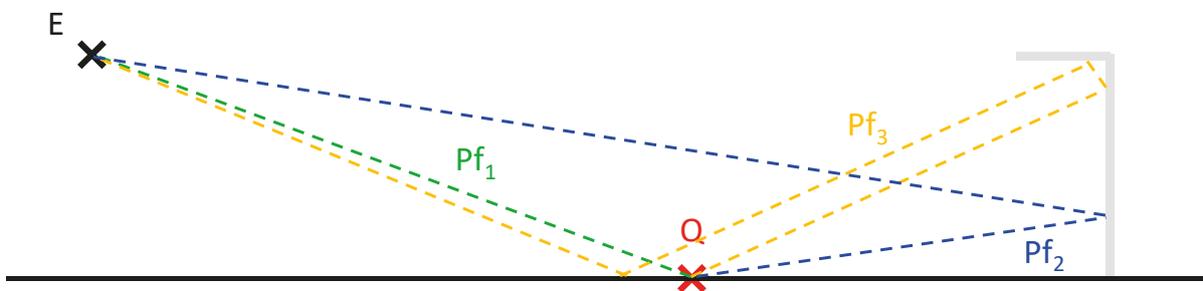
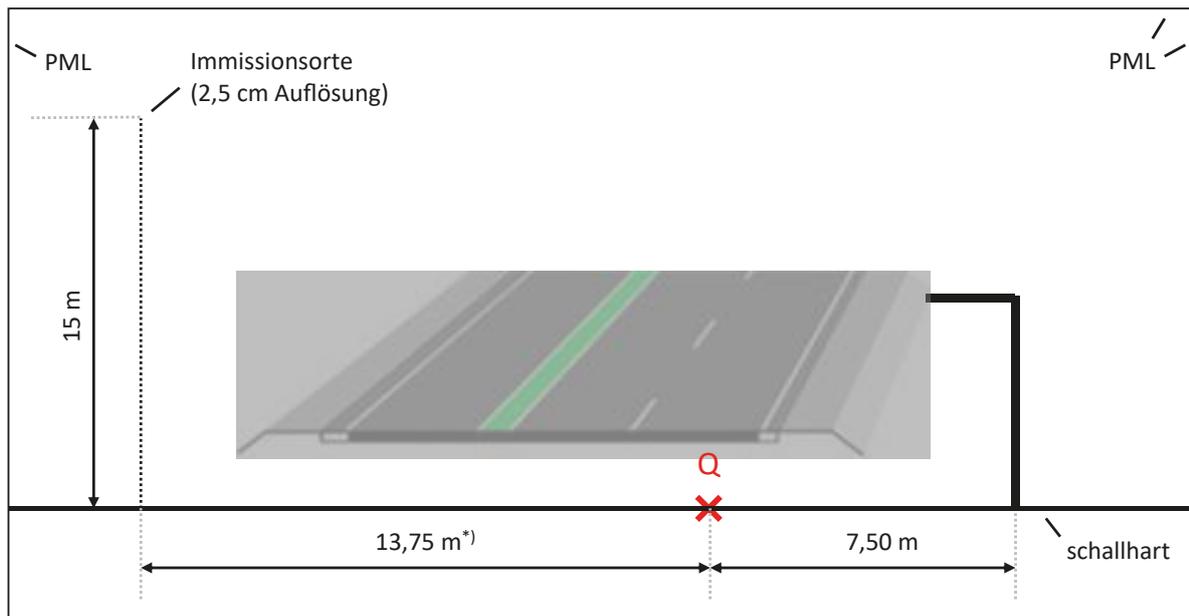


Bild 3-51: Grundlegende Geometrie zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion gekrümmter und mit Impedanz belegter Lsw; E: Empfänger, Q: Schallquelle; grün: direkter Schallpfad von Quelle zu Empfänger; blau: Schallpfad von Quelle über senkrechten Teil der Lsw zu Empfänger; gelb: Schallpfad mit mehrfachen Reflexionen an senkrechtem Teil der Lsw, waagrechttem Teil der Lsw und Boden (exemplarisch)

Um den Effekt der quellseitigen Reflexion zu untersuchen, erfolgte eine Anpassung des bereits zuvor verwendeten 2D-FEM-Simulationsmodells. Das modifizierte Simulationsmodell ist in Bild 3-52 dargestellt. Das Modell wurde nach links erweitert und nach rechts eingeschränkt, wobei der Abschluss nach rechts, links und oben wiederum umlaufend mit PML erfolgte. Der Boden wurde anders als in den bisherigen Untersuchungen schallhart modelliert, um Bodenreflexionen und somit Mehrfachreflexionspfade wie Pfad 3 in Bild 3-51 zuzulassen. Die Breite des Modells wurde anhand des Querschnitts einer Straße der Entwurfsklasse 1 (EKL 1) vorgenommen und eine zusätzliche Distanz von 2 m zum Bankett angesetzt. Zwar handelt es sich bei EKL 1 um einen Querschnitt für eine Außerorts-Straße, jedoch sind die resultierenden Distanzen auch in einer urbanen Umgebung vorstellbar (z. B. einseitige straßennahe Bebauung links, Lärmschutzwand zum Schutz weiter entfernter Bebauung rechts). Anstelle einzelner Empfängerpositionen wie bei den bisherigen Untersuchungen wurde eine Linie von Immissionsorten mit einer örtlichen Auflösung von 2,5 cm senkrecht in einer Distanz von 13,75 m zur Schallquelle implementiert, um eine Höhe von 15 m abtasten zu können.



^{*)} \triangleq EKL 1 + 2 m Distanz zum Bankett

Bild 3-52: Simulationsmodell zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion; Querschnitt der Straße aus [bast.de]

Die Simulation wurde für die Geometrien E1, E2, E3, D1 und A1 durchgeführt. Da durch die Belegung der Oberkante der Lsw mit schallabsorbierendem Material keine signifikante Beeinflussung der Rückwirkung auf das Schallfeld vor der Lsw zu erwarten ist, wurden die Geometrien A2 und A3 außen vorgelassen. In einem ersten Schritt erfolgte die Auswertung in Form einer Schnittdarstellung der qualitativen Schalldruckpegelverteilung in der Umgebung der Lsw für die drei Terzen mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz. Dies ist für die verschiedenen Geometrien in Bild 3-53 dargestellt. Jede Zeile entspricht hier einer Lsw-Geometrie, während die Spalten von links nach rechts die verschiedenen Terzen darstellen.

Es zeigt sich, dass bereits die senkrechte Lsw ein deutlich erkennbares Interferenzmuster verursacht, das auf der Quellseite der Lsw zu lokalen Pegelerhöhungen und -reduzierungen führen kann. Dieses Interferenzmuster ist abhängig von der Wellenlänge und somit der Frequenz. Durch eine Veränderung der Geometrie kommt es zu einer mitunter deutlich erkennbaren Beeinflussung dieses Interferenzmusters, die wiederum frequenzabhängig ist. So ist bei E1 im Terzband 500 Hz eine geringfügige Beeinflussung in der unmittelbaren Nähe zur Lsw erkennbar, im weiter entfernten Bereich scheint die Beeinflussung jedoch gering zu sein. Mit zunehmender Frequenz zeigt sich bei E1 der Effekt, dass eine Art Verschiebung von Bereichen höheren Pegels infolge von Schallumlenkung erfolgt. Dies ist beispielsweise bei 2 kHz erkennbar für den rot gefärbten Bereich, der sich bei G zwischen der Oberkante der Lsw und dem oberen Viertel der IO-Linie ergibt. Im Fall von E1 scheint dieser Bereich nicht vorhanden oder an andere Stelle verschoben zu sein. Hingegen ist erkennbar, dass ein neuer Bereich höheren Pegels auf der Verbindungslinie zwischen Knick-Ansatz und ca. dem dritten Fünftel der IO-Linie auftritt. Dieses Verhalten bestätigt sich für die restlichen Geometrien. Bei E2 ist insbesondere bei 2 kHz der Effekt zu beobachten, dass eine Art Fokussierung des am geknickten Teil der Lsw reflektierten Schalls in Richtung der Quelle erfolgt, was geometrisch bedingt ist. Dies führt zu einer deutlichen Veränderung des Interferenzmusters auch entlang der IO-Linie. Zwischen G und E3 scheint die Beeinflussung des Interferenzmusters sehr gering zu sein, wobei hier eine lokale Erhöhung

des Schalldruckpegels vor allem bei hohen Frequenzen im zweiten und dritten Viertel der Höhe der IO-Linie zu erfolgen scheint. Der Dreifachknick D1 bewirkt vor allem im Bereich niedriger Empfängerpositionen eine Erhöhung des Schalldruckpegels, was auf die fokussierende Wirkung der „gekrümmten“ Geometrie zurückzuführen ist. Bei schallabsorbierender Bekleidung des senkrechten Teils der Lsw (A1) ergibt sich erwartungsgemäß eine deutliche Verringerung des Interferenzmusters sowie im Allgemeinen eine großflächige Pegelreduzierung. Der Effekt nimmt mit steigender Frequenz zu, da auch der Absorptionsgrad des implementierten Materials spektral ansteigt (vgl. Bild 3-27).

Um quantitative Aussagen über das Verhalten des Schalldruckpegels treffen zu können, wurde im nächsten Schritt der Schalldruckpegel entlang der IO-Linie für die verschiedenen Geometrien spektral aufgetragen und anschließend auf das Berechnungsergebnis der geraden Lsw an derselben Position bezogen. Die sich somit ergebende Schalldruckpegeldifferenz ist für die verschiedenen Geometrien in Bild 7-22 als Schmalbandspektrum und in Bild 7-23 als Terzspektrum dargestellt. Es bestätigt sich anhand der Schmalband-Schalldruckpegel, dass die veränderte Geometrie zu mitunter signifikanten lokalen Pegelerhöhungen von teils mehr als 10 dB führen. Gleichzeitig sind diese Pegelerhöhungen nicht nur lokal, sondern auch spektral begrenzt und werden zudem begleitet durch Bereiche ebenso starker Pegelreduzierung. Der Effekt der spektralen Begrenzung zeigt sich in der Terz-Betrachtung: Hier reduzieren sich die Pegelerhöhungen und -reduzierungen amplitudenmäßig deutlich (Anm.: veränderte Skala beachten). Beispielsweise reduzieren sich die zahlreichen Bereiche einer Pegelerhöhung von mehr als 10 dB bei der Schmalbandbetrachtung zu E2 auf wenige Bereiche mit einer Pegelerhöhung von zumeist weniger als 5 dB bei Betrachtung von Terzen. Gleichermaßen verringern sich die in der Schmalbanddarstellung zu A1 erkennbaren Bereiche starker Pegelerhöhung derart, dass nahezu im gesamten spektralen Bereich gleichbleibende bis verringerte Terzpegel beobachtbar sind.

Um dies tiefergehend zu untersuchen, wurden im nächsten Schritt die jeweiligen drei zu einer Oktave gehörenden Terzen zusammengefasst, um eine zweidimensionale Darstellung zu erreichen. Zudem erfolgte die Bestimmung der Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums aus Bild 3-38 für SMA, Pkw 100 km/h. In Bild 3-54 bis Bild 3-56 ist die Schalldruckpegeldifferenz in den verschiedenen Oktaven sowie die Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz für die unterschiedlichen Geometrien in Abhängigkeit von der Empfängerhöhe dargestellt.

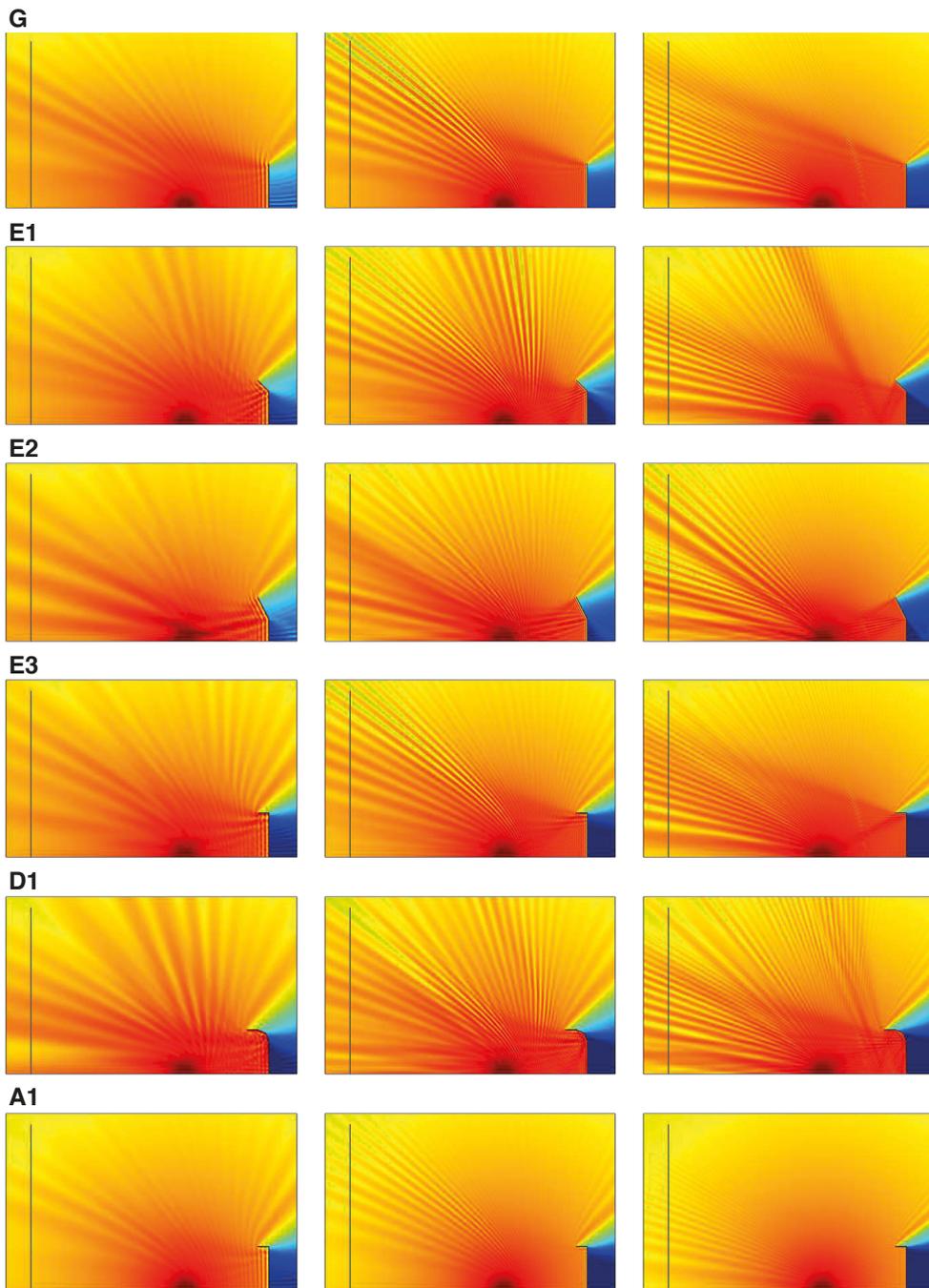


Bild 3-53: Schalldruckpegelverteilung (qualitativ) in Umgebung der Lsw zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion für verschiedene Terzbänder; linke Spalte: $f_m = 500$ Hz; mittlere Spalte: $f_m = 1$ kHz; rechte Spalte: $f_m = 2$ kHz; von oben nach unten: G, E1, E2, E3, D1, A1

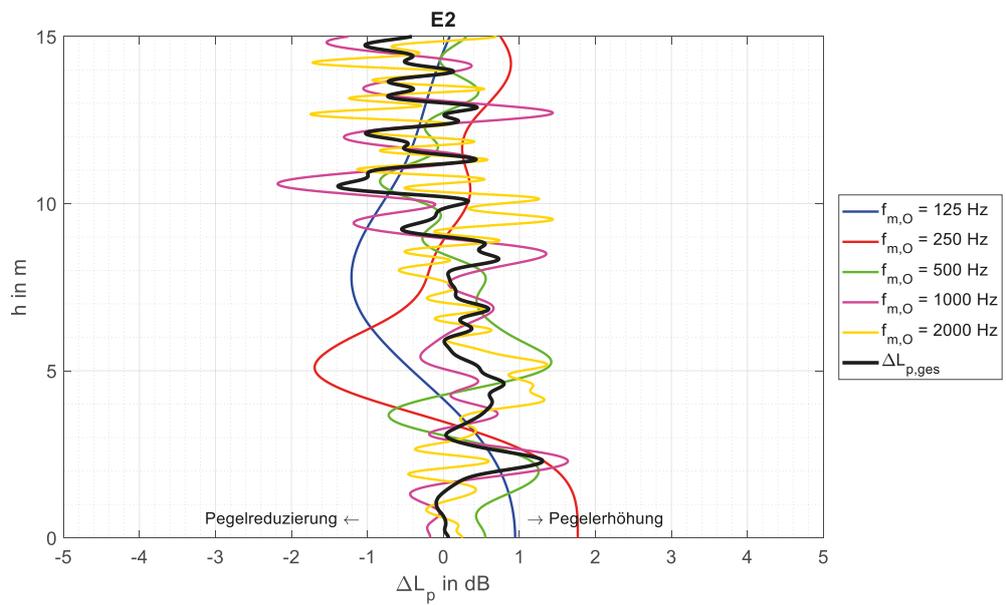
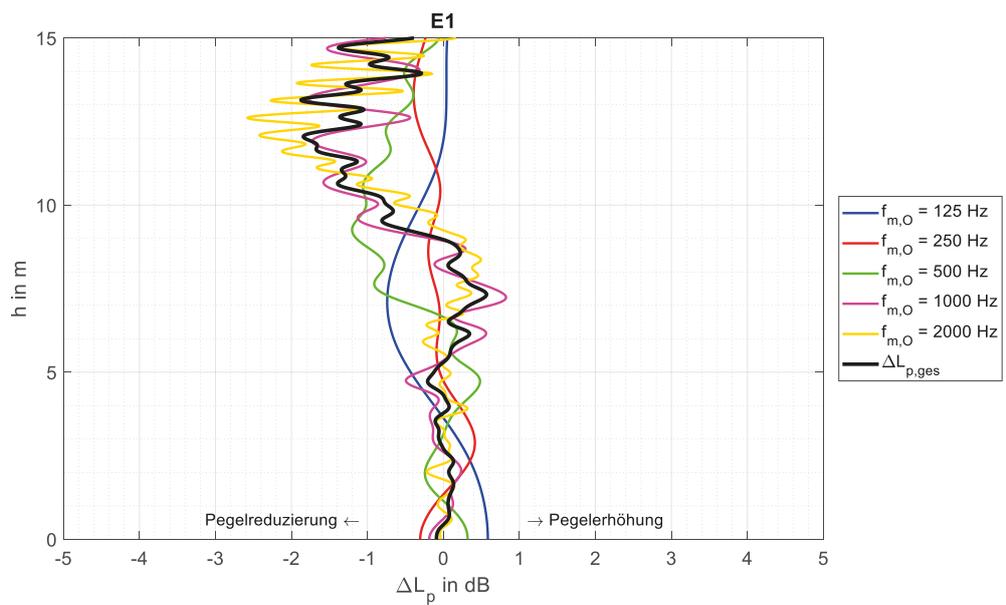


Bild 3-54: Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,O} = 125$ Hz; rot: $f_{m,O} = 250$ Hz; grün: $f_{m,O} = 500$ Hz; pink: $f_{m,O} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,O} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums; oben: E1, unten: E2

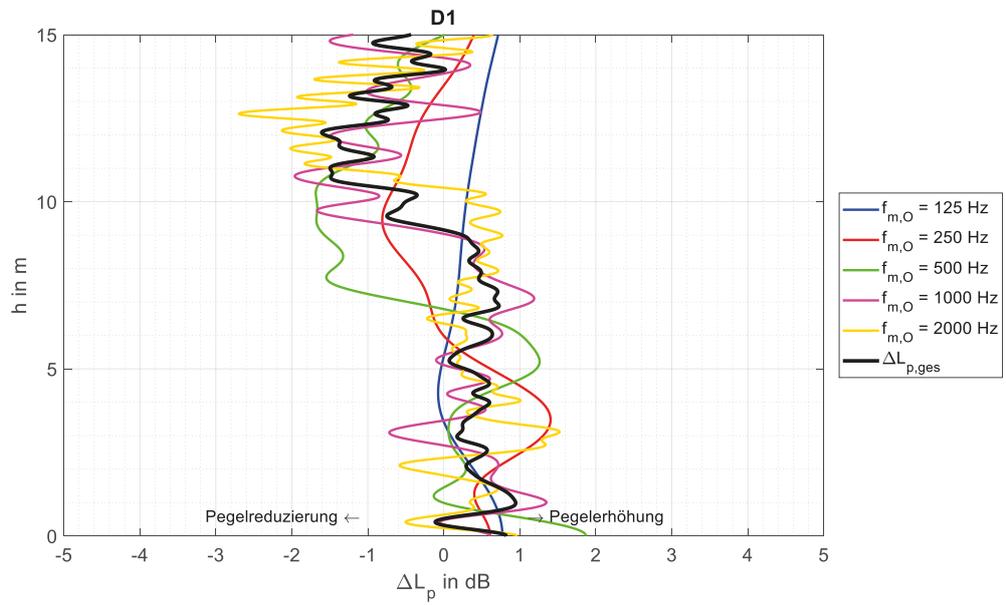
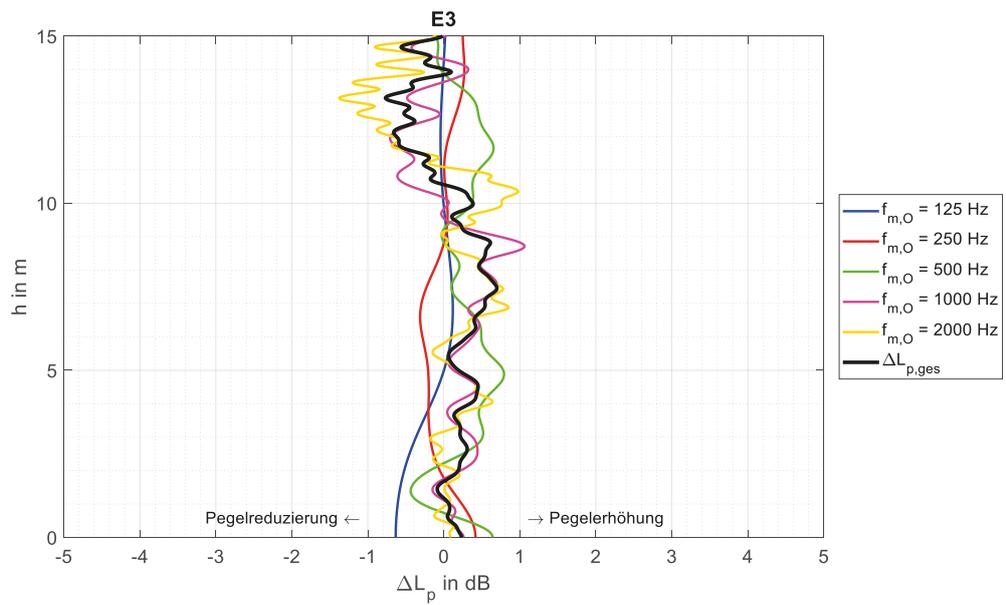


Bild 3-55: Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,0} = 125$ Hz; rot: $f_{m,0} = 250$ Hz; grün: $f_{m,0} = 500$ Hz; pink: $f_{m,0} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,0} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums; oben: E3, unten: D1

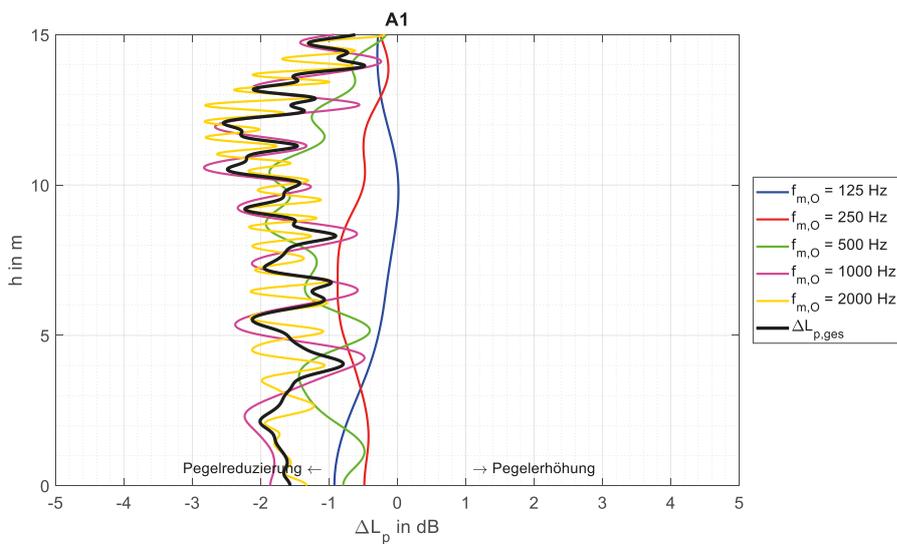


Bild 3-56: Schalldruckpegeldifferenz für A1, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,0} = 125$ Hz; rot: $f_{m,0} = 250$ Hz; grün: $f_{m,0} = 500$ Hz; pink: $f_{m,0} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,0} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums

Es bestätigen sich die zuvor getroffenen Beobachtungen. So ist in Abhängigkeit von der Geometrie eine lokale spektrale Pegelerhöhung und -reduzierung auch in den Oktaven beobachtbar, die jedoch noch immer sehr lokal begrenzt ist und zumeist einen Höhenbereich von deutlich weniger als 1 m umfasst. Die Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz nimmt in positiver (ungünstiger) Richtung Werte von maximal ca. 1,3 dB an, wobei tendenziell bei tieferen Empfängerpositionen eher eine geringfügige Pegelerhöhung und bei höheren Empfängerpositionen eine leichte Pegelreduzierung zu beobachten ist.

Dies zeigt sich auch in Bild 3-57. Hier ist die Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz der verschiedenen Geometrien gegenübergestellt. Es ist festzuhalten, dass im Wesentlichen keine signifikante Pegelerhöhung größer als 1 dB durch die geometrische Veränderung der Lsw zu erwarten ist. Im Gegenzug ist durch absorbierende Bekleidung der quellseitigen Oberfläche der Lsw eine zuverlässige Pegelminderung (gegenüber einer schallharten, senkrechten Lsw) erreichbar.

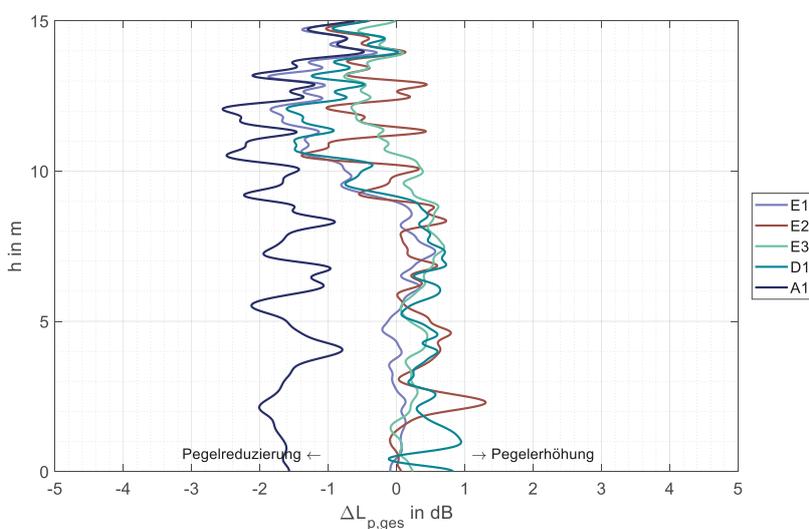


Bild 3-57: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums

Validierung der 2D-FEM für weitere Geometrien

Zuvor wurde dargelegt, dass für den Einfachknick E3 die 2D-FEM unter Berücksichtigung einer ausreichenden Anzahl an Quellwinkeln (Berücksichtigung einer kompletten Fahrzeugvorbeifahrt) in der Lage ist – ungeachtet der falschen Wiedergabe der spektralen Welligkeit des Schirmmaßes einzelner Quellwinkel größer 0° –, hochfrequent korrekte Werte des Vorbeifahrts-Schirmmaßes zu liefern. Um dies für die weiteren Geometrien zu bestätigen, erfolgten Simulationen mittels des 2D-FEM-Modells für die Geometrien der ersten Version der Parametermatrix. Diese sind in Bild 3-58 bis Bild 3-60 für eine Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m den Berechnungsergebnissen der 3D-FEM gegenübergestellt.

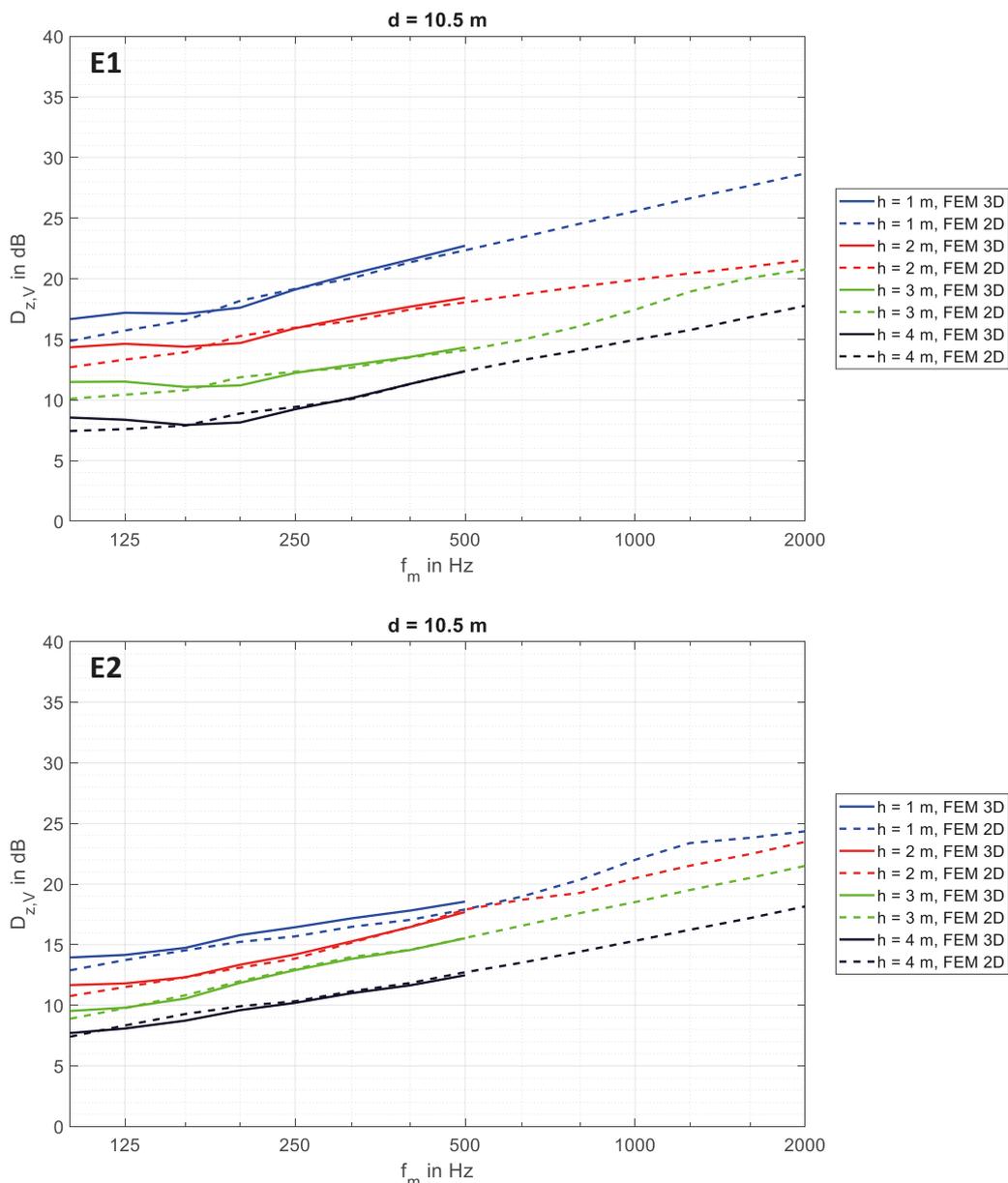


Bild 3-58: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: E1; unten: E2

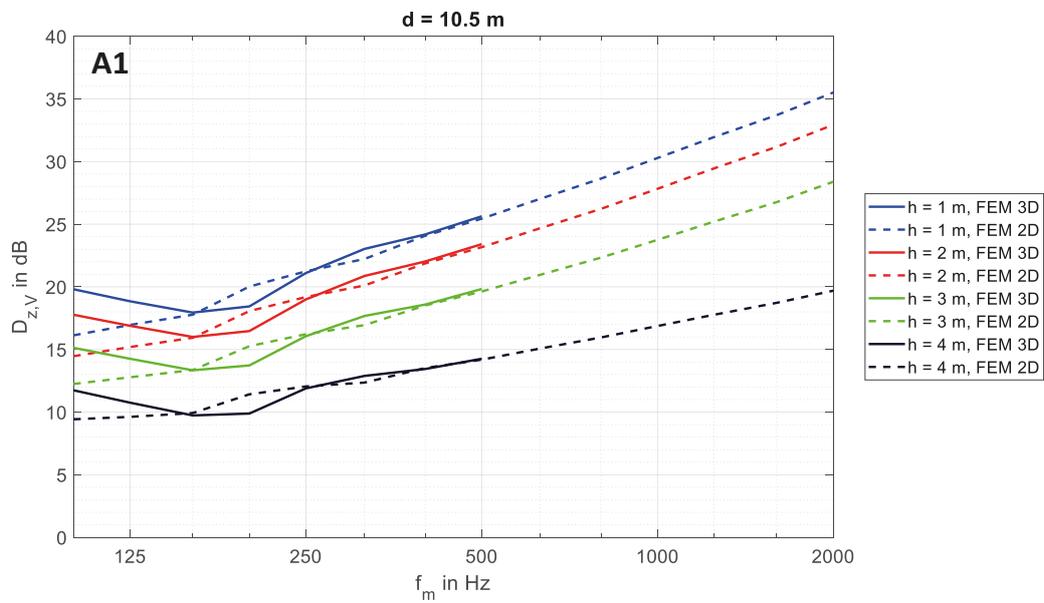
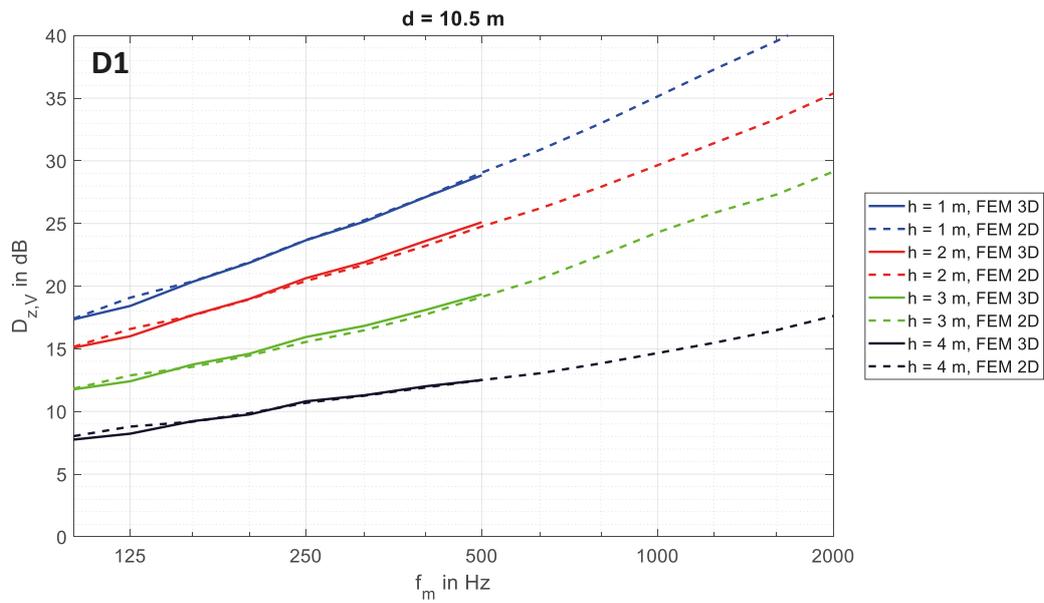


Bild 3-59: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: D1; unten: A1

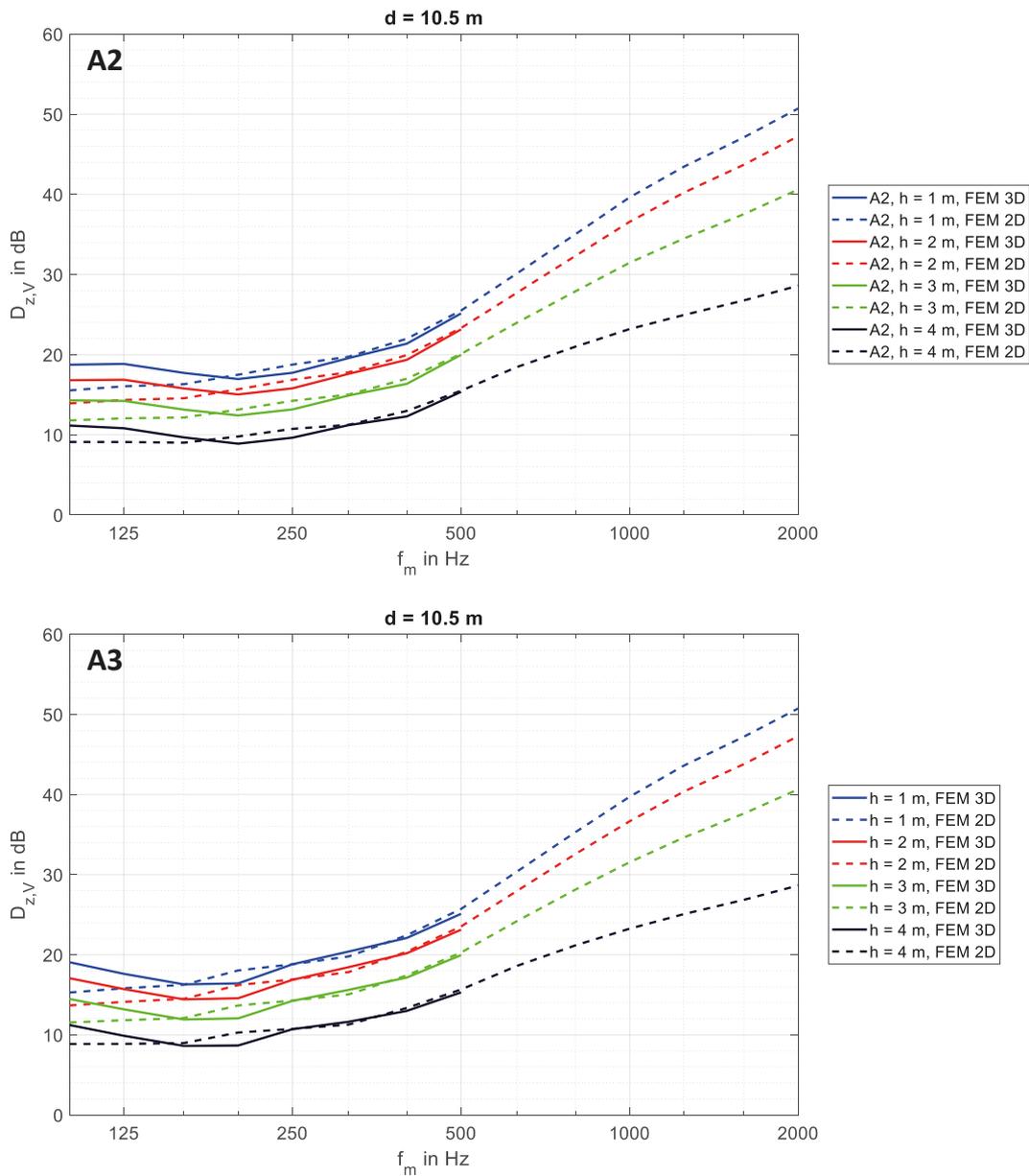


Bild 3-60: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: A2; unten: A3

Sowohl für alle verschiedenen Geometrien als auch für die unterschiedlich mit Impedanz belegten Lsw bestätigt sich die bereits bei E3 aufgestellte Vermutung, dass sich die Ergebnisse der 3D-FEM im Frequenzbereich bis 500 Hz den Ergebnissen der 2D-FEM annähern. Es kann somit als bestätigt angesehen werden, dass die 2D-FEM in der Lage ist, die hochfrequente Wirksamkeit sowohl gekrümmter als auch mit Impedanz belegter Lsw korrekt wiederzugeben, wenn die Berücksichtigung einer ausreichenden Anzahl von Quellwinkeln (Berücksichtigung einer kompletten Fahrzeugvorbeifahrt) erfolgt.

Validierung des analytischen Modells für 90°-Knick

Um zu bestätigen, dass die zuvor für den Einfachknick E3 validierte analytische Beschreibung in der Lage ist, auch die akustische Wirksamkeit geometrisch abweichender Lsw mit einem Klappenöffnungswinkel von 90° zu beschreiben, erfolgten zusätzliche Simulationen. Die zwei zusätzlich untersuchten Geometrien E4 und E5 sind in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Es handelt sich einerseits um eine Lsw mit einer auf 1,66 m erhöhten Länge des Überstands und andererseits um eine Lsw mit einer auf 6 m vergrößerten Höhe. Die Länge des Überstands von 1,66 m wurde gewählt, um eine ganzzahlige „Vervielfachung“ der Länge und infolgedessen eine Beibehaltung der Welligkeit des Schalldruckpegels zu vermeiden.

In Bild 3-61 und Bild 3-62 ist analog zu den vorigen Darstellungen das spektrale Schirmmaß des Einfachknicks E4 für die verschiedenen Empfängerhöhen und -distanzen dargestellt.

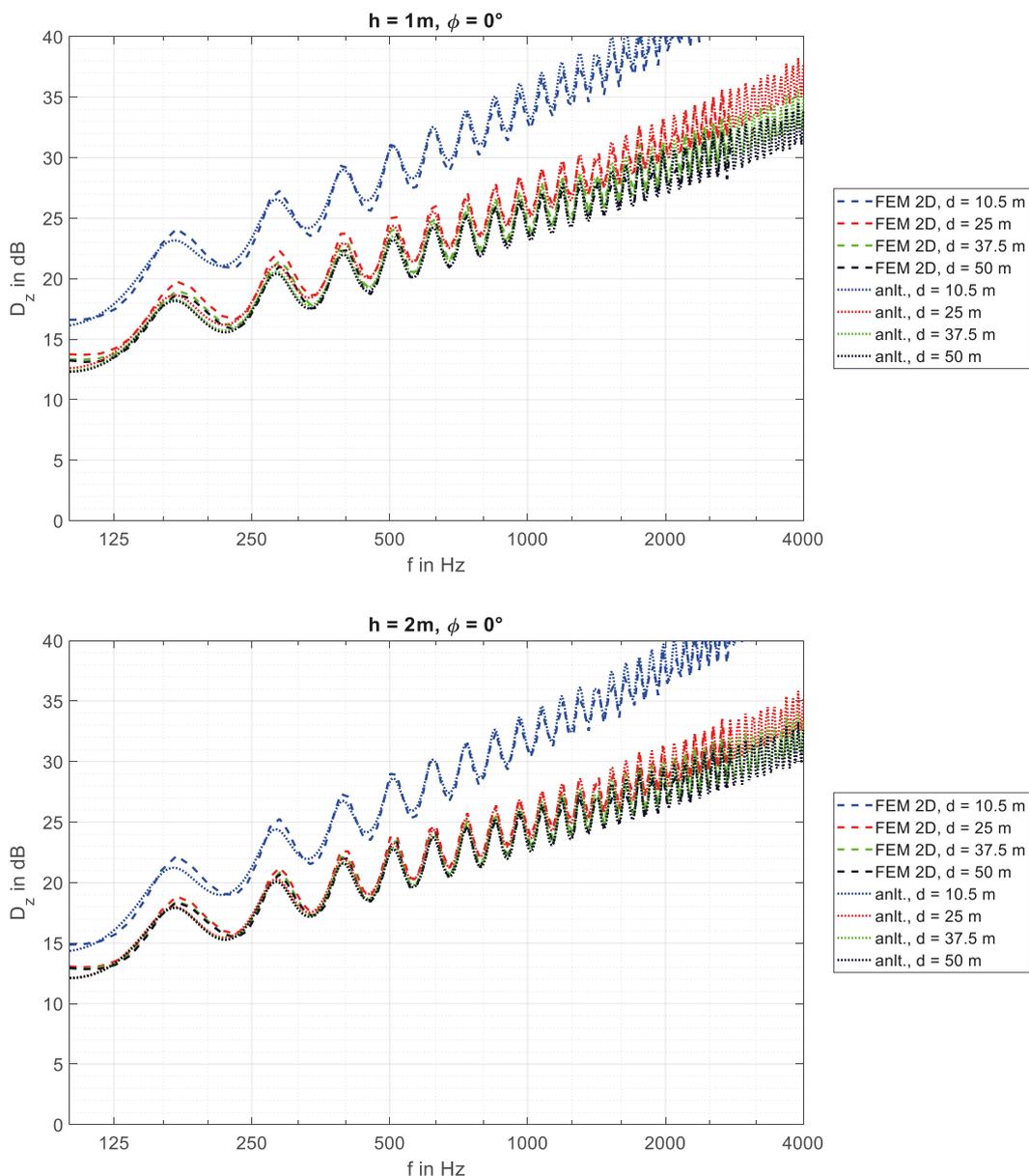


Bild 3-61: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m

Die gestrichelten Linien symbolisieren die 2D-FEM-Simulationsergebnisse, während die gepunkteten Linien die analytischen Berechnungsergebnisse wiedergeben. Das Ergebnis ist für einen Quellwinkel von 0° dargestellt, um eine Vergleichbarkeit der Welligkeit zu ermöglichen. Es ist erkennbar, dass sich wie bei E3 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen 2D-FEM und Analytik ergibt.

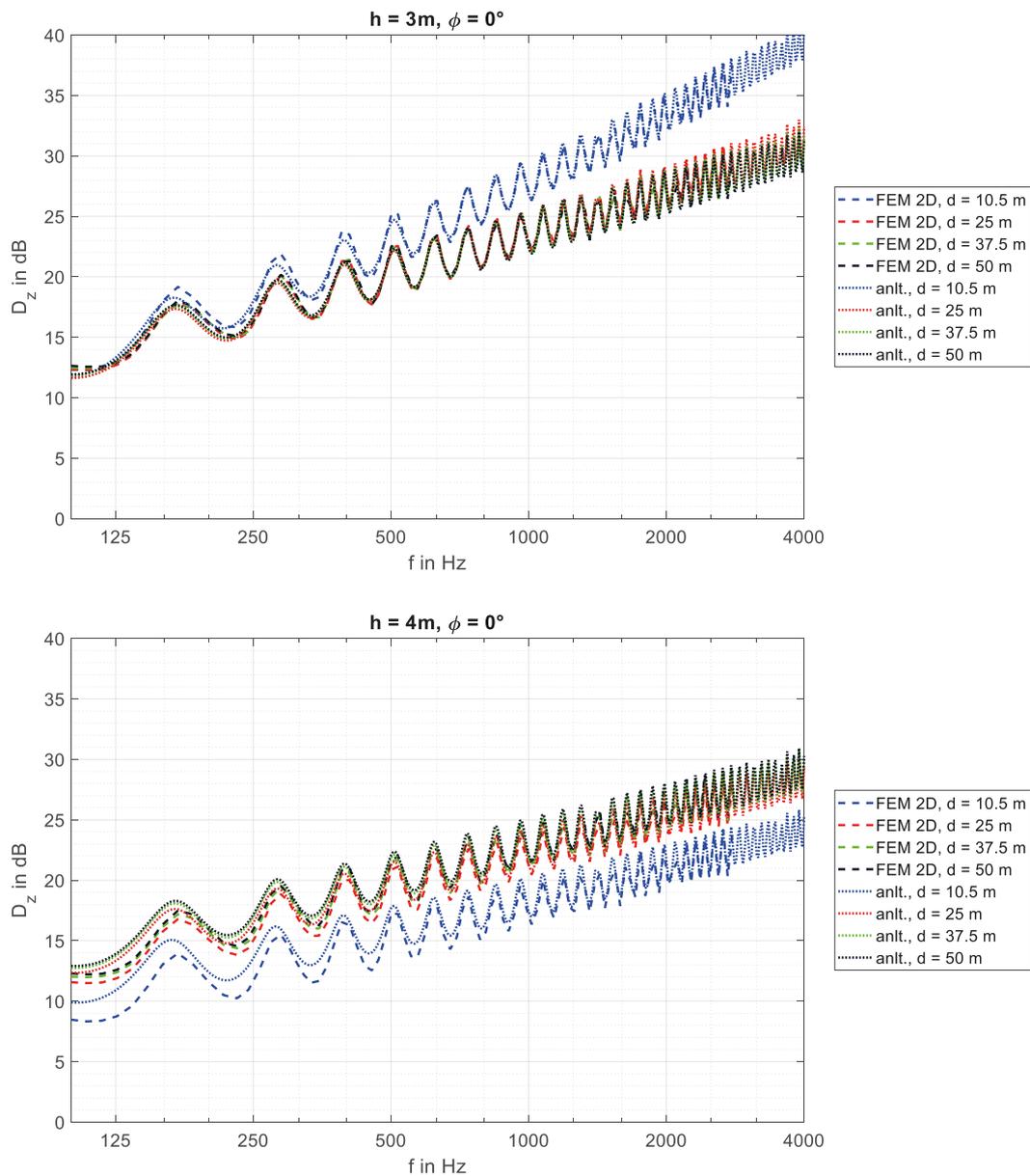


Bild 3-62: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m

In Bild 3-63 und Bild 3-64 ist analog zur vorigen Darstellung das Schirmmaß des Einfachknicks E5 dargestellt. Auch hier bestätigt sich die korrekte Wiedergabe des Schirmmaßes einschließlich der Welligkeit des Berechnungsergebnisses.

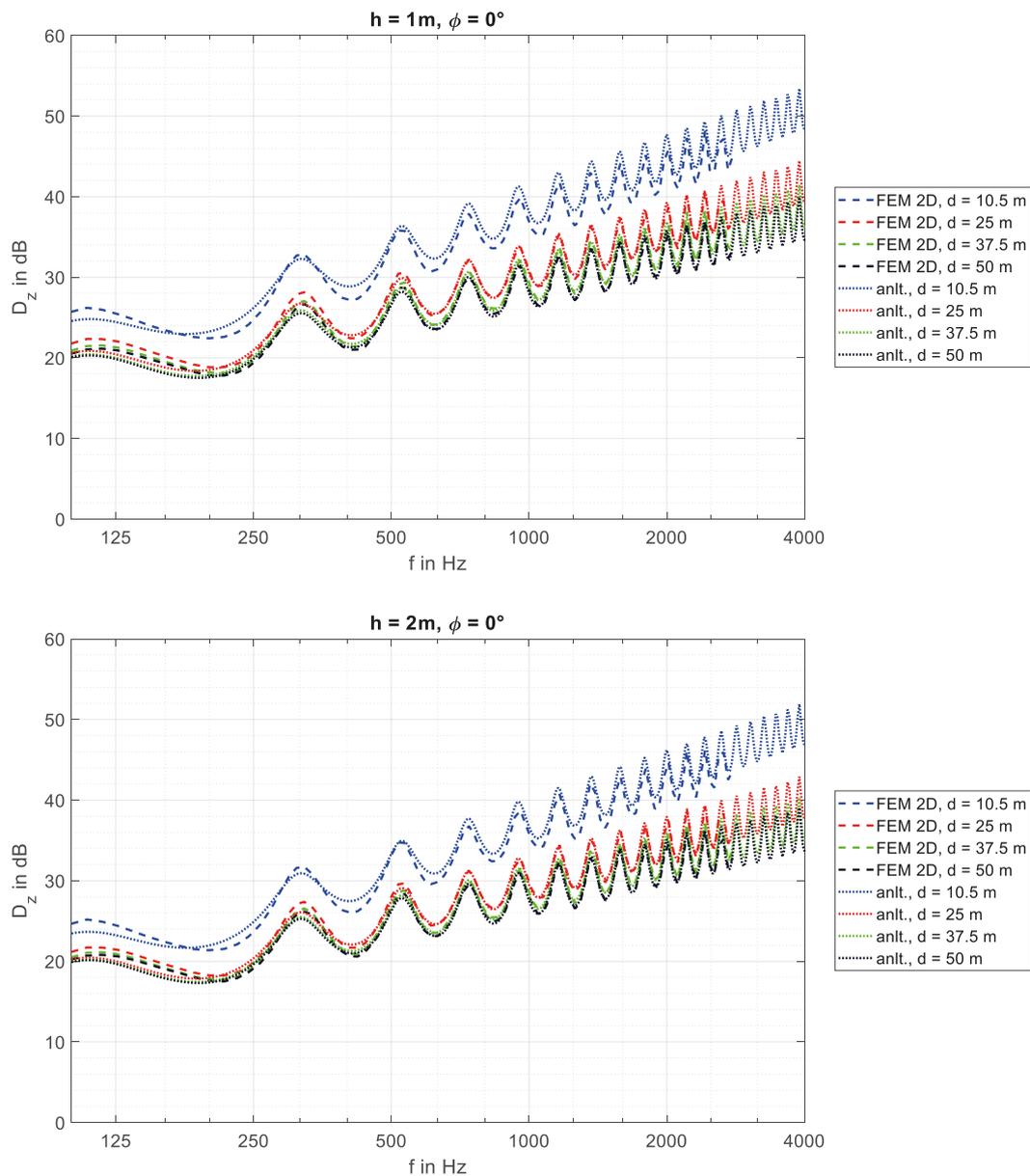


Bild 3-63: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m

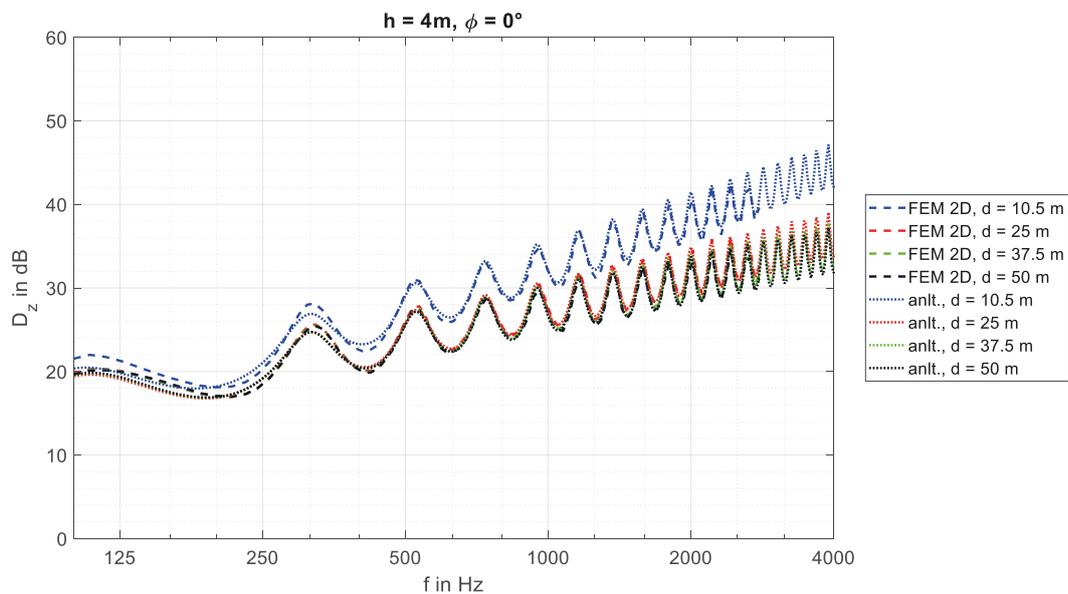
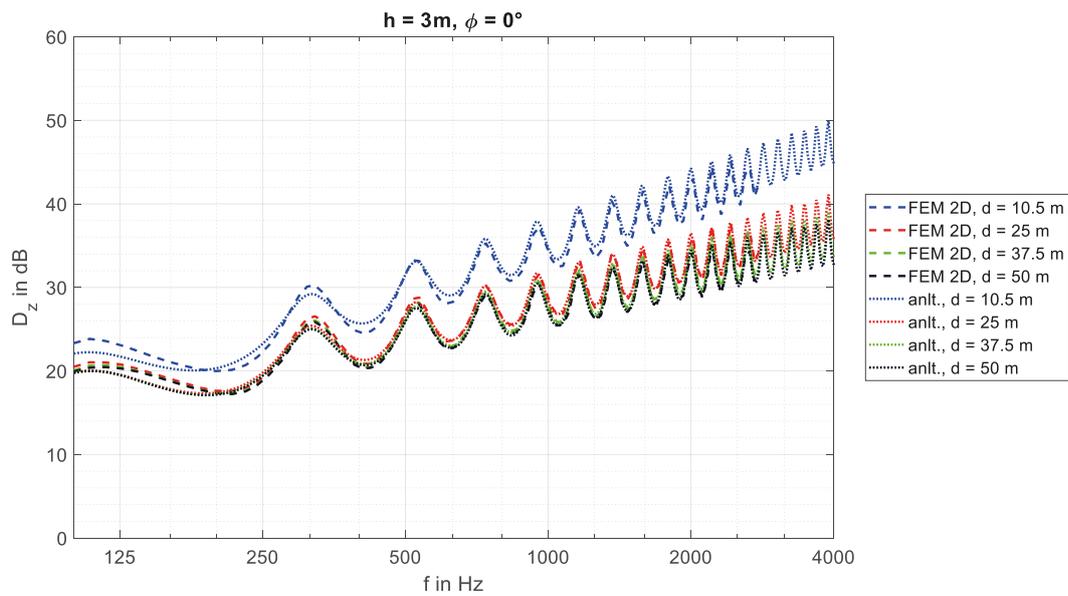


Bild 3-64: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m

In Bild 3-65 und Bild 3-66 ist das durch Kombination aller berechneten Quellwinkel ermittelte spektrale Vorbeifahrts-Schirmmaß für E4 und E5 exemplarisch für die Quell-Empfänger-Distanzen 10,5 m und 37,5 m dargestellt. Es zeigt sich wie bereits für E3, dass die aus der unterschiedlichen Wiedergabe der Welligkeit resultierenden Unterschiede im Vorbeifahrts-Schirmmaß sehr gering ausfallen und sich auf den Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz beschränken. Somit bestätigt sich auch für die zusätzlich untersuchten gekrümmten Lsw E4 und E5 die Eignung der 2D-FEM-Simulation zur Berechnung der akustischen Wirksamkeit gekrümmter Lsw, wenn die Berechnung für einen ausreichenden Quellwinkelbereich erfolgt.

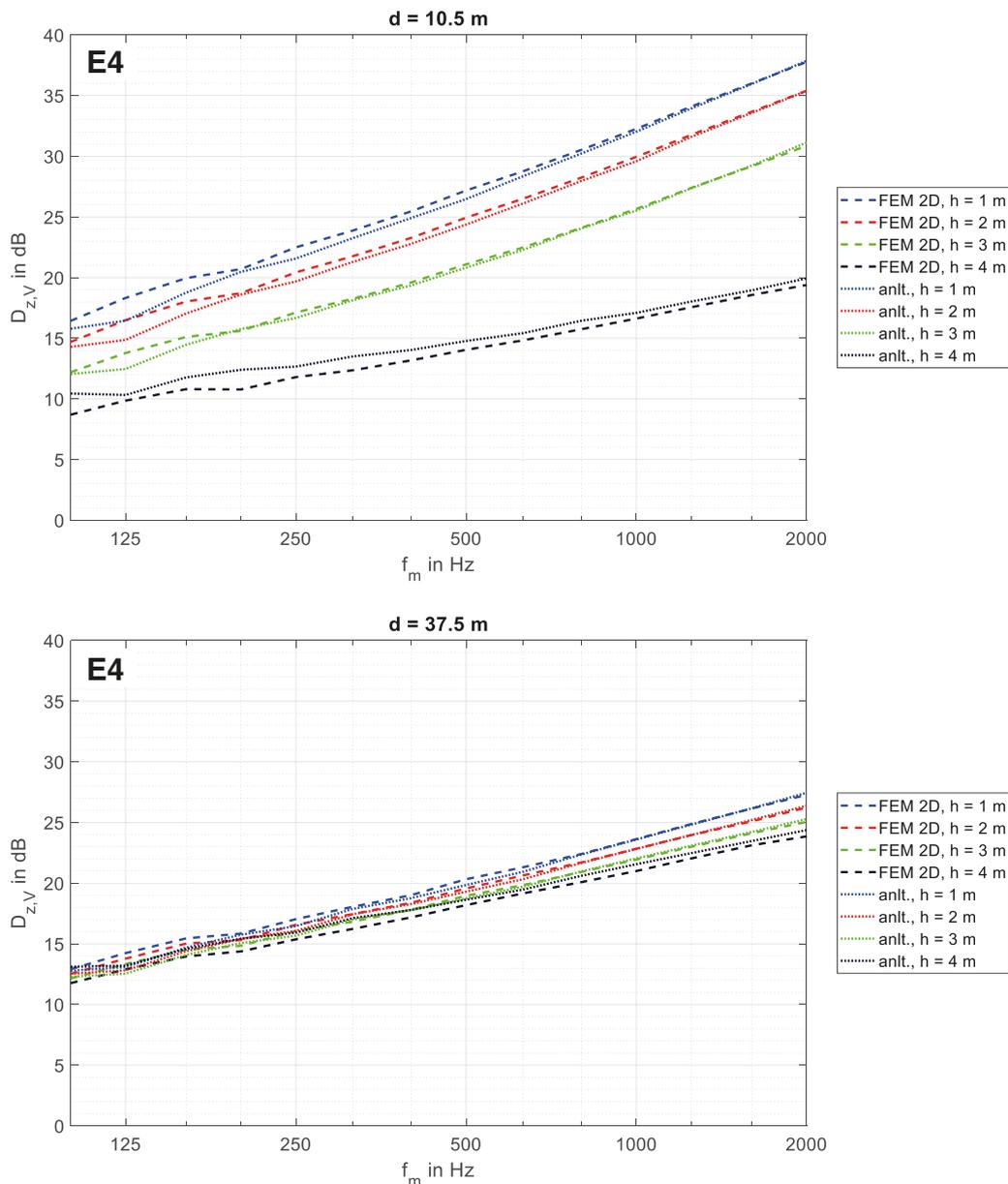


Bild 3-65: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 37,5$ m

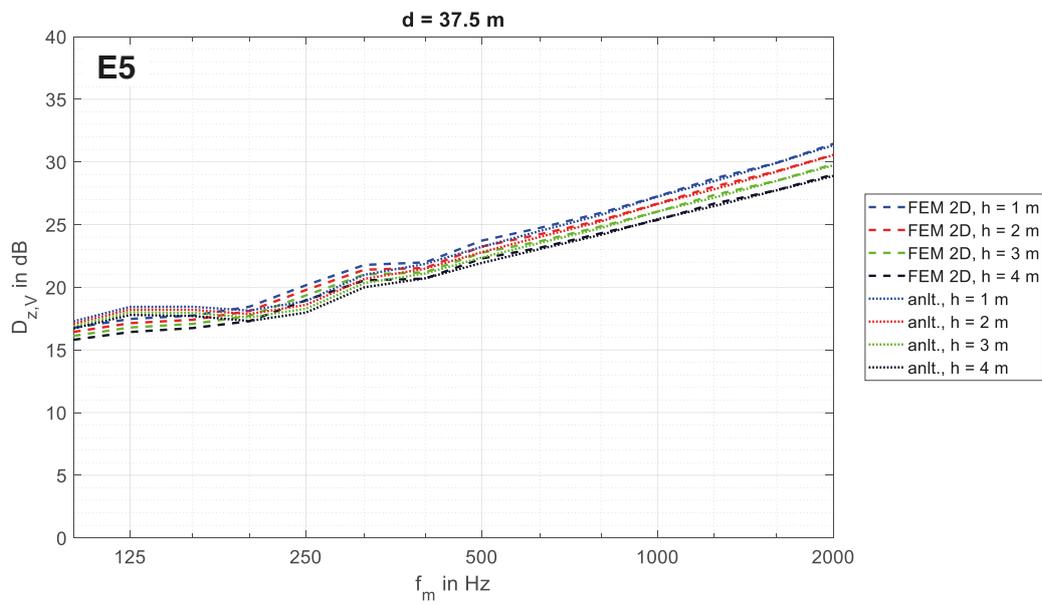
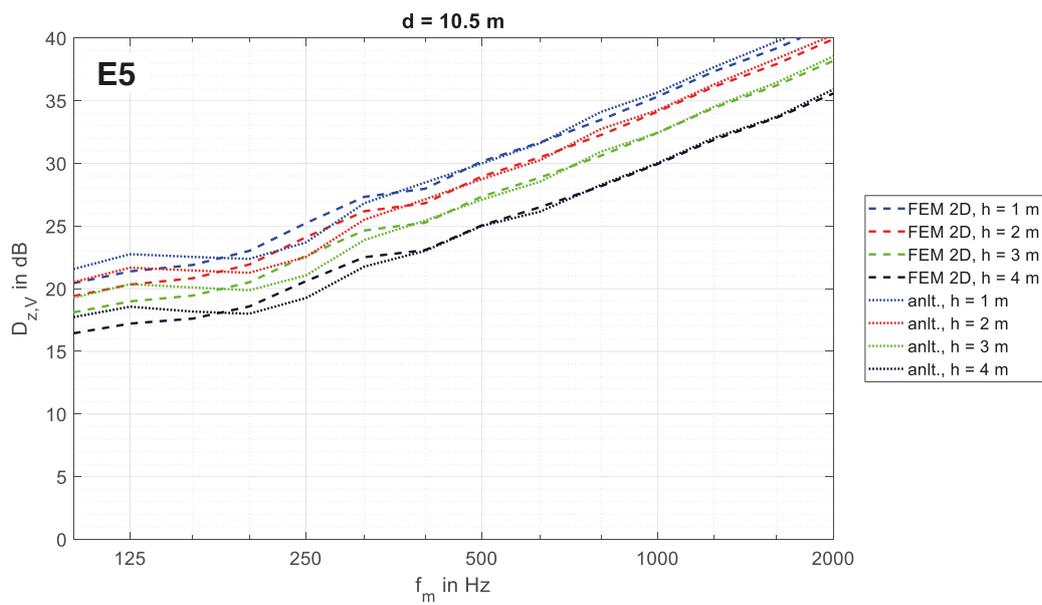


Bild 3-66: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; unten: $d = 10,5$ m; oben: $d = 37,5$ m

Einfluss des Klappen-Öffnungswinkels

In Bild 7-20 ist die Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der verschiedenen Lsw-Geometrien aus Variante 1 der Parametermatrix dargestellt. Hier zeigte sich, dass die Wirksamkeit der einfach geknickten Lsw stark von der Höhe des Knick-Ansatzes bzw. vom Öffnungswinkel der Lsw abhängt. Es wurden bisher jedoch zusätzlich zum 90°-Knick E3 nur zwei weitere Knickwinkel (135° bei E1 und 153° bei E2) untersucht. Diese Geometrien basieren auf einer Positionierung des Knick-Ansatzes auf 3/4 der Wandhöhe bei E1 bzw. auf der Hälfte der Wandhöhe bei E2 unter Beibehaltung der ersten Beugungskante entsprechend den Abbildungen in Kapitel 3.1.3. Während sich für E1 bei einer Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m und einer Empfängerhöhe von 1 m eine Wirksamkeit von ca. 3 dB gegenüber der Referenzwand ergibt, weist E2 hier eine geringfügige Verschlechterung auf. Für zunehmende Empfängerhöhen nähert sich E3 ebenfalls einem $\Delta D_{z,V}$ von 0 an (= gleiche Wirksamkeit wie Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante). Um den Einfluss der Höhe des Knick-Ansatzes näher zu untersuchen, erfolgten 2D-FEM-Simulationen an den zwei weiteren einfach geknickten Lsw E6 und E7. Diese sind in Kapitel 3.1.3 beschrieben und dargestellt und weisen eine Höhe des Knick-Ansatzes von 7/8 der Wandhöhe (E6) bzw. von 5/8 der Wandhöhe (E7) auf. Die Untersuchungen erfolgten mittels des zuvor validierten 2D-FEM-Simulationsmodells unter Berechnung der fünf verschiedenen Quellwinkel, die anschließend wiederum zu einem Vorbeifahrts-Schirmmaß zusammengefasst wurden, das anschließend einen Bezug auf das Vorbeifahrts-Schirmmaß der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante erfuh.

In Bild 3-67 und Bild 3-68 ist die Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes für die einfach geknickten Lsw mit unterschiedlichem Knick-Ansatz dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Aufnahme der Lsw-Bezeichnungen in der Legende verzichtet und stattdessen die Höhe des Knickansatzes h_K als Vielfaches der Lsw-Höhe h_{Lsw} angegeben. Dabei entsprechen die Bezeichnungen:

- $h_K = 4/8 h_{Lsw}$ dem Einfachknick E2,
- $h_K = 5/8 h_{Lsw}$ dem Einfachknick E7,
- $h_K = 6/8 h_{Lsw}$ dem Einfachknick E1,
- $h_K = 7/8 h_{Lsw}$ dem Einfachknick E6 und
- $h_K = 8/8 h_{Lsw}$ dem Einfachknick E3.

Im ersten Diagramm ist erkennbar, dass die Verschiebung des Knick-Ansatzes von 8/8 auf 7/8 der Wandhöhe kaum zu einer Verringerung der Wirksamkeit in 10,5 m Quell-Empfänger-Distanz und in 1 m Höhe führt. Eine weitere Reduzierung der Höhe des Knick-Ansatzes auf 6/8 der Wandhöhe führt bereits zu einer signifikanten Reduzierung der Wirksamkeit, wobei im Frequenzbereich von ca. 400 Hz bis 2 kHz noch immer eine Verbesserung von ca. 3 dB gegenüber der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante vorliegt. Die weitere Reduzierung der Höhe des Knick-Ansatzes auf 5/8 bzw. 4/8 der Wandhöhe führt zu einer abrupten Verringerung der Wirksamkeit bis hin zu einer Verschlechterung gegenüber der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante.

Eine Vergrößerung der Empfängerhöhe sorgt für eine deutliche Verringerung der Wirksamkeit aller Geometrien. Hierbei zeigt sich, dass die Wirksamkeit der Geometrien mit einer Höhe des Knick-Ansatzes niedriger als die Wandhöhe deutlich schneller mit zunehmender Empfängerhöhe abnimmt als die des 90°-Knicks (Knick-Ansatz auf 8/8 Wandhöhe). Dies führt dazu, dass bereits bei einer Empfängerhöhe von 3 m alle Geometrien abgesehen vom 90°-Knick eine vernachlässigbare Wirksamkeit im für den Straßenverkehrslärm relevanten

Frequenzbereich aufweisen, während der 90°-Knick selbst bei einer Empfängerhöhe von 4 m noch eine geringfügige positive Verbesserung von ca. 1 dB im Frequenzbereich von 315 Hz bis 2 kHz aufweist.

Dieses Verhalten bestätigt sich für weiter entfernte Empfängerpositionen, wie in Bild 3-69 exemplarisch für eine Quell-Empfänger-Distanz von 25 m und eine Empfängerhöhe von 1 m bzw. 4 m dargestellt. In dieser größeren Quell-Empfänger-Distanz ergibt sich selbst für die niedrigste Empfängerposition in 1 m Höhe über dem Boden ausschließlich für den 90°-Knick eine positive Wirksamkeit von ca. 2 dB bis 4 dB gegenüber der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante. Die übrigen Geometrien weisen keine Verbesserung bis hin zu einer geringfügigen Verschlechterung auf. Für die Empfängerhöhe von 4 m ergibt sich dasselbe Bild.

Es ist somit festzuhalten, dass von den untersuchten einfach geknickten schallharten Lsw ausschließlich der 90°-Knick E3 in der Lage ist, eine zuverlässige Pegelminderung in einem großen Bereich hinter der Lsw zu bewirken. Zwar ist mit einer geringfügig abweichenden Geometrie eine ähnliche Wirksamkeit im Nahbereich der Lsw zu erreichen, wenn der Knickansatz sich möglichst nahe der Oberkante befindet, jedoch ist dieser Bereich der Wirksamkeit sehr stark begrenzt. Bereits in 2 m horizontaler Distanz zur Lsw ($d = 10,5$ m) ist in einer Höhe über dem Boden von 3 m keine nennenswerte Wirksamkeit des Einfachknicks mit auf 7/8 der Wandhöhe befindlichem Knickansatz zu verzeichnen. Es erscheint somit nicht zielführend, die Einfachknicke mit abweichendem Knickansatz als Sonderfall in den Berechnungsalgorithmus aufzunehmen. Stattdessen kann eine Berücksichtigung solcher Lsw in der Auslegung dahingehend erfolgen, als dass in das Berechnungsmodell eine senkrechte Lsw gleicher Höhe aufgenommen wird, die derart positioniert ist, dass ihre Oberkante der ersten Beugungskante der Lsw entspricht (= Referenz-Lsw). Zwar kann dies lokal zu einer Überschätzung der Wirksamkeit führen, jedoch ist diese auf maximal ca. 2 dB für einzelne Geometrien und bestimmte Empfängerhöhen beschränkt (siehe helltürkise Kurve in Bild 3-69, unten).

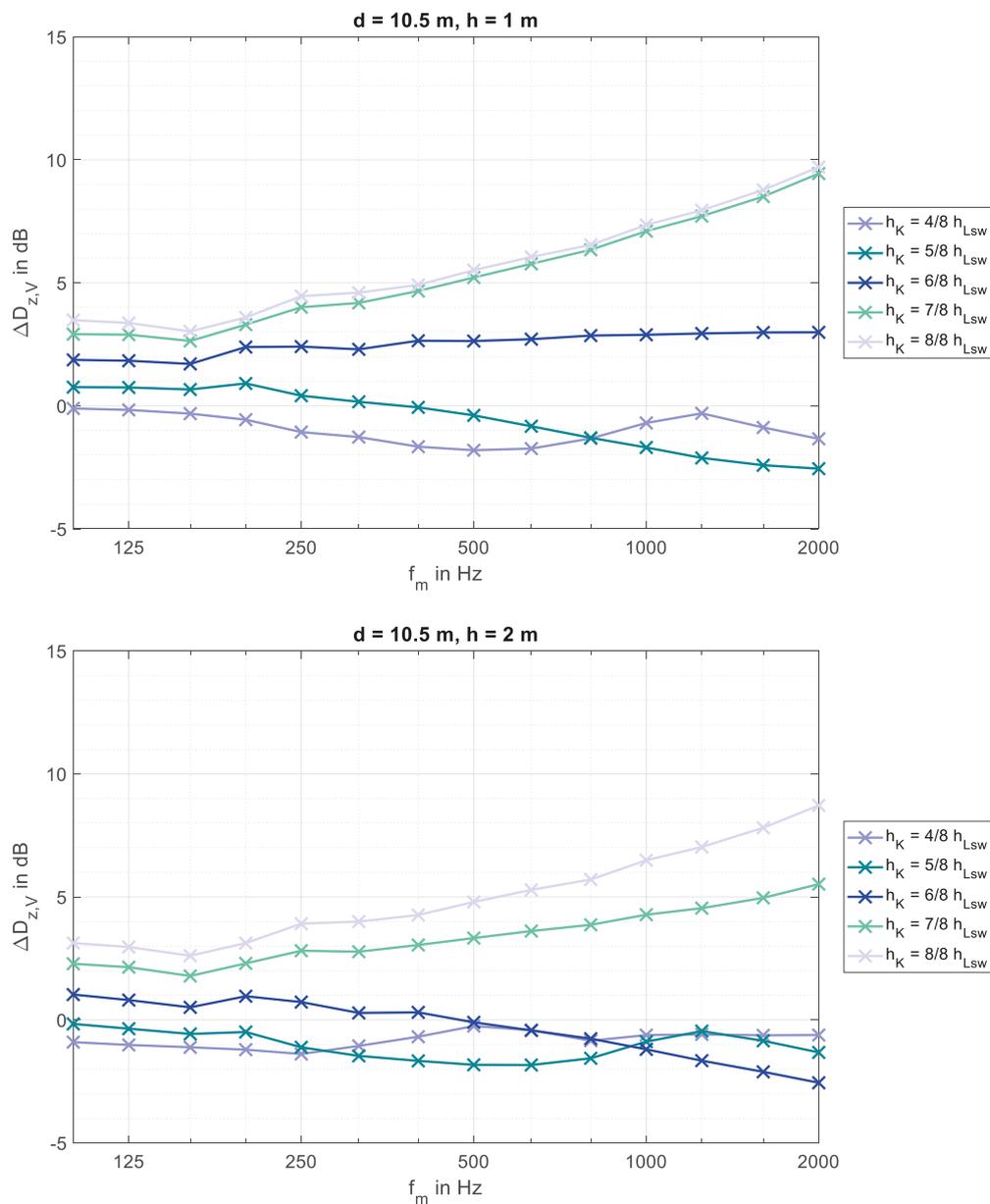


Bild 3-67: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden Lsw G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m; hellblau: $h_K = 4/8 h_{Lsw}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{Lsw}$; blau: $h_K = 6/8 h_{Lsw}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{Lsw}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{Lsw}$ (= Einfachknick E3)

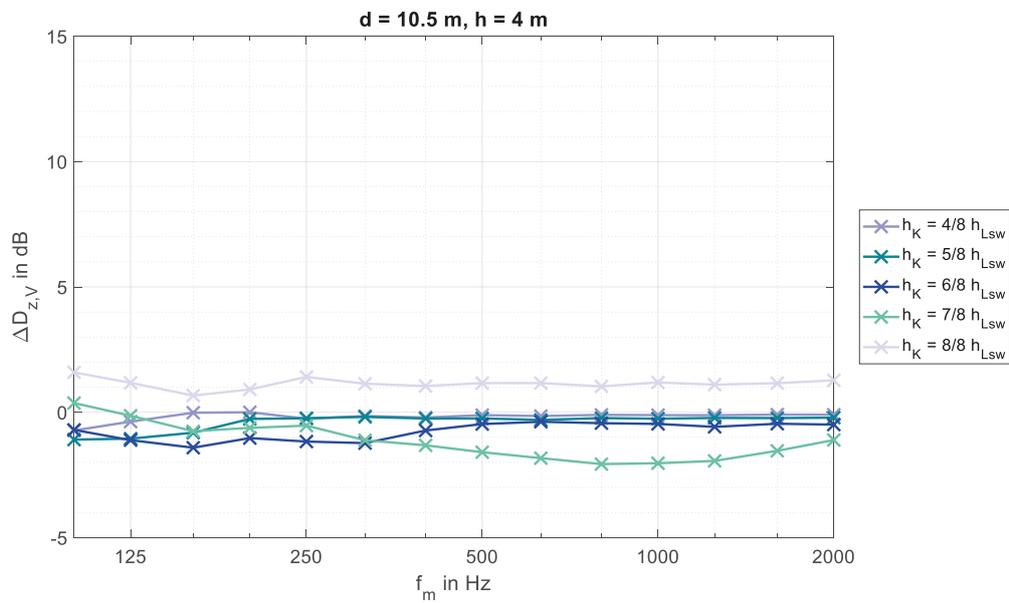
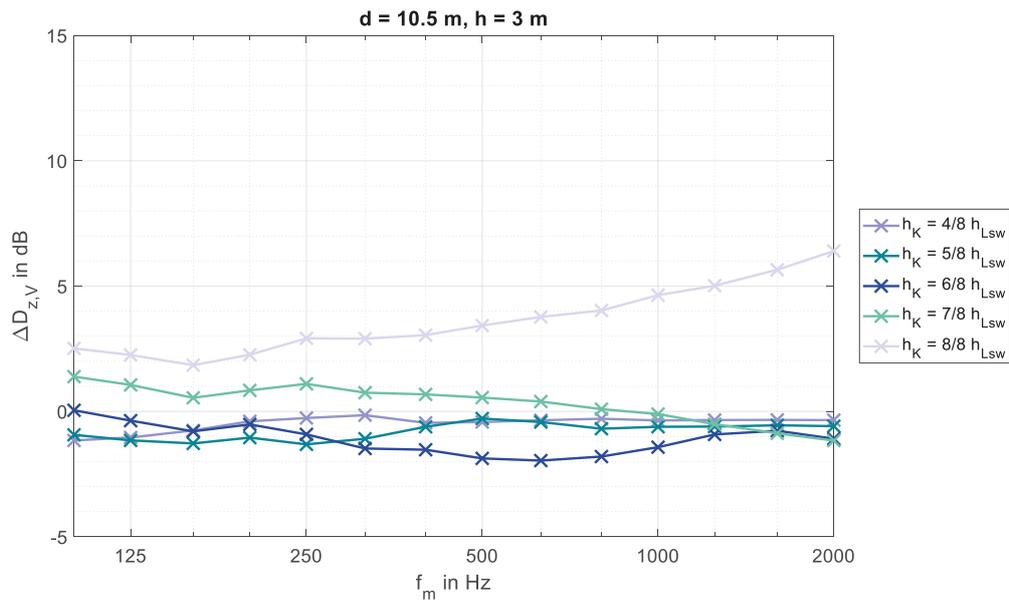


Bild 3-68: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden Lsw G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m; hellblau: $h_K = 4/8 h_{LSW}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{LSW}$; blau: $h_K = 6/8 h_{LSW}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{LSW}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{LSW}$ (= Einfachknick E3)

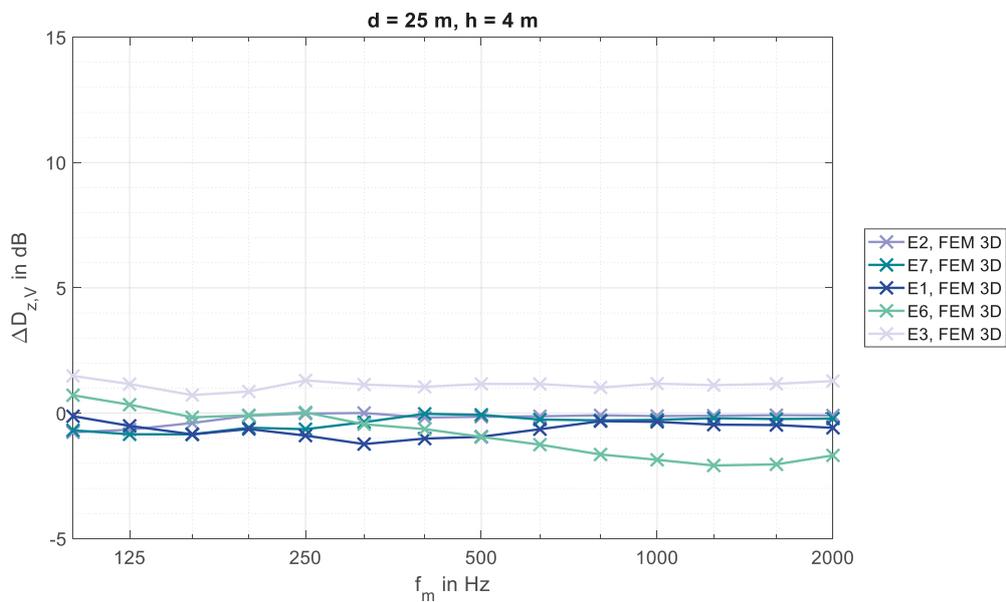
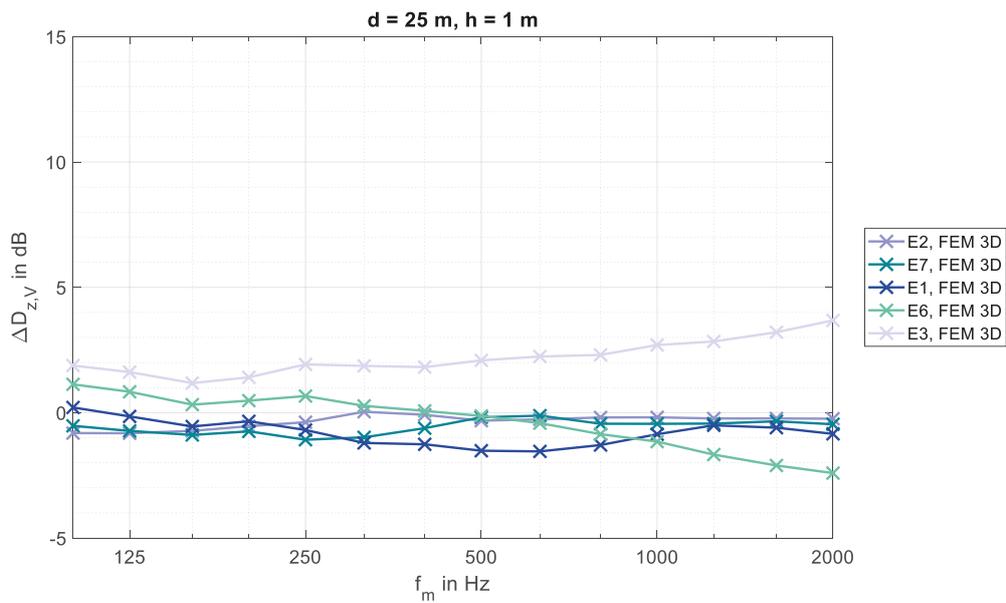


Bild 3-69: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden Lsw G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 25$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 4$ m hellblau: $h_K = 4/8 h_{Lsw}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{Lsw}$; blau: $h_K = 6/8 h_{Lsw}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{Lsw}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{Lsw}$ (= Einfachknick E3)

Einfluss des Überstands des Dreifachknicks

In Bild 7-20 ist die Wirksamkeit des Dreifachknicks D1 der Wirksamkeit des Einfachknicks E3 gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass D1 eine mitunter deutlich größere Wirksamkeit aufweist als E3. Bei dieser Unterscheidung ist jedoch zu berücksichtigen, dass D1 einen deutlich größeren Überstand von 2 m aufweist als E3, der einen Überstand von nur 1 m besitzt. Zwar wird dies teilweise ausgeglichen, indem die Fußpunkte beider Lsw entsprechend ihres Überstands von der Quelle weg verschoben werden (Beibehaltung derselben Referenz-Lsw und somit der Beugungskante), dennoch ist dieser Vergleich nur begrenzt aussagekräftig. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen, erfolgte die analytische Berechnung der Wirksamkeit einer modifizierten einfach geknickten Lsw auf Basis der Geometrie von E3. Dabei wurde gegenüber E3 die Klappenlänge auf 2 m verdoppelt, womit sich eine zu D1 vergleichbare Geometrie ergibt. Die zugrunde gelegte Geometrie ist in Bild 3-70 dargestellt.

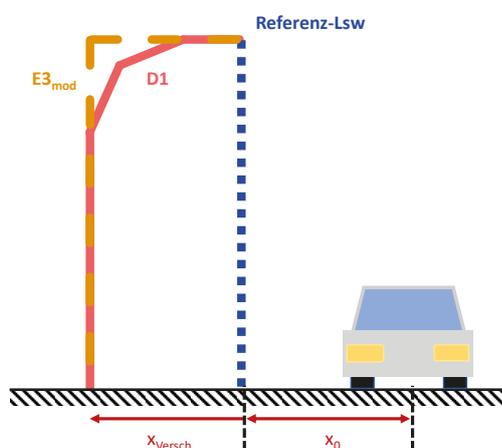


Bild 3-70: Geometrie des modifizierten Einfachknicks $E3_{\text{mod}}$ und des Dreifachknicks D1; schematische, nicht maßstabgetreue Darstellung

In Bild 3-71 und Bild 3-72 ist die Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Dreifachknicks D1 jener des modifizierten Einfachknicks E3 für verschiedene Quell-Empfänger-Distanzen und Empfängerhöhen gegenübergestellt. Hierbei stellen die roten Kurven jene des Dreifachknicks D1 dar, während die hellroten Kurven die Berechnungsergebnisse für E3mod repräsentieren. Die verschiedenen Linienstile geben die unterschiedlichen Empfängerhöhen über dem Boden wieder.

Es ist erkennbar, dass D1 für eine Empfängerhöhe von 1 m und eine Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m im gesamten betrachteten Frequenzbereich eine um etwa 1 dB bis 3 dB höhere Wirksamkeit aufweist als die entsprechende einfach geknickte Lsw. Jedoch wird bei Betrachtung der höheren Empfängerpositionen ersichtlich, dass diese erhöhte Wirksamkeit auf einen sehr kleinen geometrischen Bereich beschränkt ist. Bereits bei einer Empfängerhöhe von 2 m weist der Dreifachknick eine geringfügig niedrigere Wirksamkeit auf als der Einfachknick. Mit zunehmender Empfängerhöhe wird dieser Effekt größer, sodass bei einer Empfängerhöhe von 4 m anstelle der ca. 1,5 dB Wirksamkeit von E3mod eine geringfügige Verschlechterung der Wirksamkeit gegenüber der Referenz-Lsw auftritt. Mit zunehmender Quell-Empfänger-Distanz bestätigt sich dieser Effekt, wobei festzuhalten ist, dass bereits bei einer Quell-Empfänger-Distanz von 25 m kaum noch eine nennenswerte Verbesserung gegenüber der Referenz-Lsw durch den Dreifachknick erreicht werden kann,

während der entsprechende Einfachknick $E3_{\text{mod}}$ selbst in einer Empfängerhöhe von 4 m und einer Quell-Empfänger-Distanz noch eine breitbandige Verbesserung von ca. 1,5 dB bewirkt. Die geringfügige Verschlechterung, die sich hochfrequent für D1 gegenüber der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante einstellt, ist möglicherweise auf die infolge der angepassten Geometrie veränderte Impedanz zurückzuführen. Während sowohl bei einer senkrechten Lsw als auch bei der einfach geknickten Lsw ein Impedanzsprung an der Hinterkante (= Oberkante der geraden Lsw) besteht, erfolgt bei der gekrümmten Ausführung der Lsw eine schrittweise akustische Impedanzanpassung, die in erster Näherung vergleichbar ist mit der Wirksamkeit eines Trichters zur besseren Impedanzanpassung zwischen einem begrenzten und einem großen Luftvolumen.

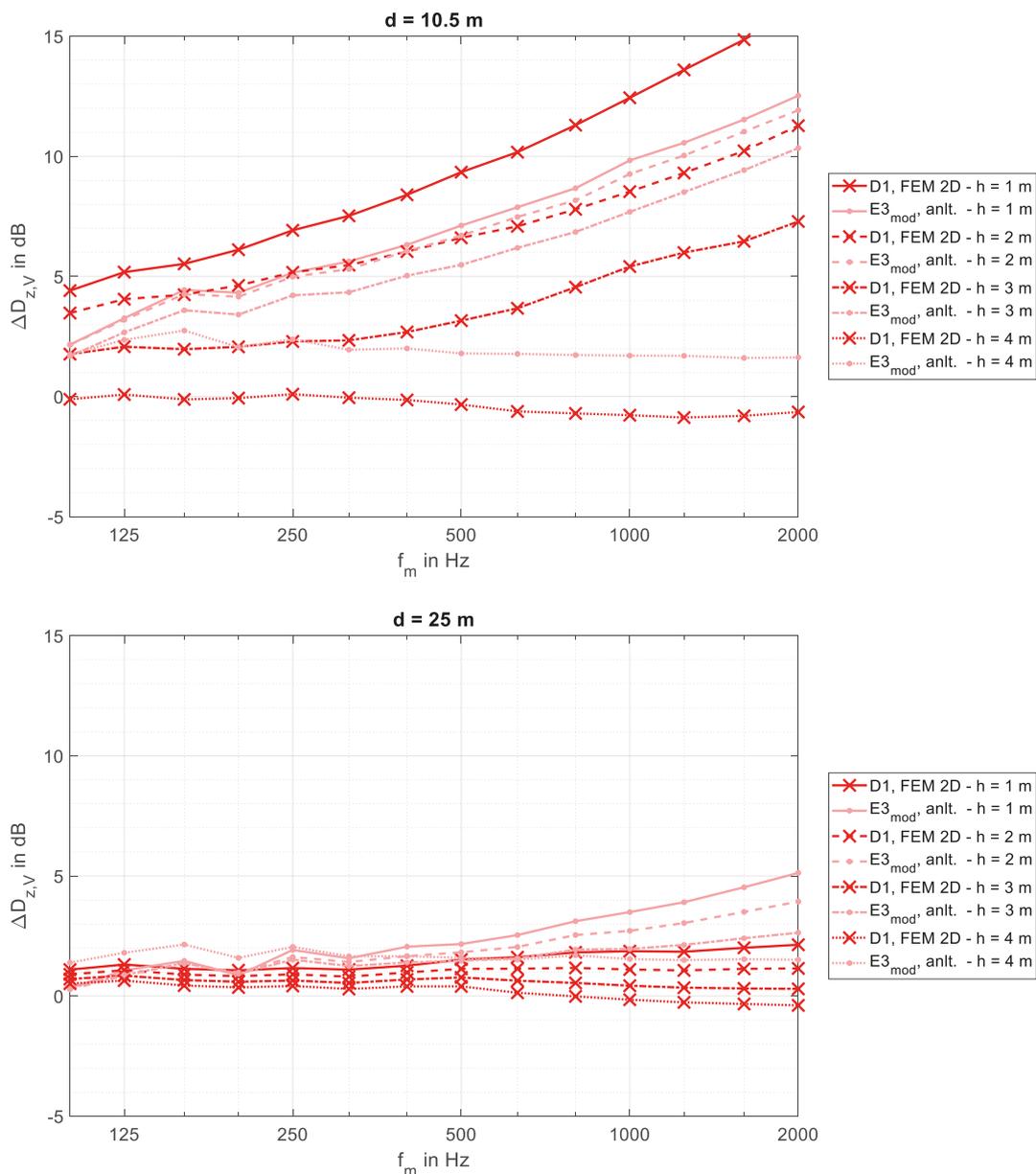


Bild 3-71: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der dreifach geknickten Lsw aus 2D-FEM sowie der modifizierten einfach geknickten Lsw $E3_{\text{mod}}$ für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 25$ m; rot: D1; hellrot: $E3_{\text{mod}}$

Es ist somit ähnlich wie bei den einfach geknickten Lsw mit unterschiedlich hoher Knick-Ansatzhöhe festzuhalten, dass die Wirksamkeit, die eine dreifach geknickte Lsw gegenüber der Referenz-Lsw aufweist, auf einen sehr kleinen Bereich hinter der Lsw beschränkt ist. Somit kann auch für die dreifach geknickte Lsw eine Berücksichtigung in der Ausbreitungsberechnung dahingehend erfolgen, dass ihre Wirksamkeit jener der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante entspricht. Zwar können sich auch hier lokal Pegelerhöhungen gegenüber der Referenz-Lsw ergeben, jedoch sind diese auf etwa 1 dB beschränkt und treten nur für Empfängerhöhen nahe der Wandhöhe auf.

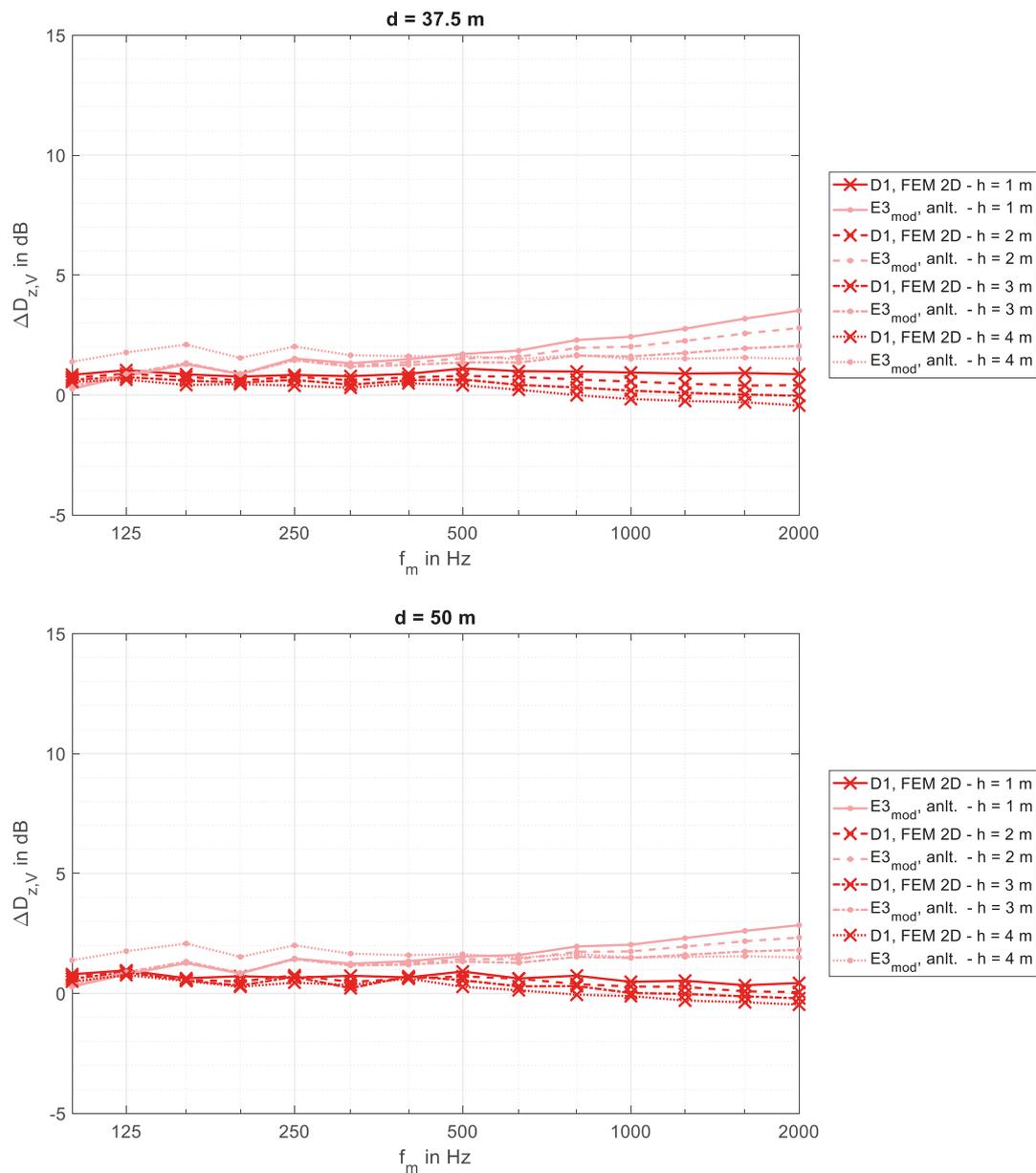


Bild 3-72: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der dreifach geknickten Lsw aus 2D-FEM sowie der modifizierten einfach geknickten Lsw E3_{mod} für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d; oben: d = 37,5 m; unten: d = 50 m; rot: D1; hellrot: E3_{mod}

Einfluss des Schallabsorptionsgrads

In Kapitel 3.3.2 deutete sich an, dass eine Belegung von Teilen einer einfach geknickten Lsw mit schallabsorbierendem Material keine nennenswerte Verbesserung von deren Wirksamkeit bewirkt. Jedoch konnte festgestellt werden, dass dieser Zusammenhang auf den begrenzten Frequenzbereich der 3DFEM-Simulationen und den in diesem Frequenzbereich noch verhältnismäßig geringen Schallabsorptionsgrad zurückzuführen sein kann. Dies bestätigte sich im Rahmen der in Kapitel 3.3.3, Abs. „Modellierung der schallabsorbierenden Oberfläche“ durchgeführten zusätzlichen Untersuchungen. Durch die Erhöhung der Absorberdicke – und somit des Schallabsorptionsgrads im betrachteten Frequenzbereich – konnte eine signifikante Erhöhung der Wirksamkeit der einfach geknickten Lsw erzielt werden.

Auf Grundlage dessen und basierend auf der Validierung der 2D-FEM-Simulationen in Kapitel 3.3.3, Abs. „Validierung der 2D-FEM für weitere Geometrien“ erfolgte die Ermittlung der Wirksamkeit der Lsw A1, A2, A3 und A4, die geometrisch auf den einfach geknickten Lsw E3 bzw. E4 basieren und bei denen Teile der Lsw mit schallabsorbierendem Material belegt sind. Durch die Untersuchung mittels 2D-FEM kann der Frequenzbereich oberhalb von 500 Hz untersucht werden, in dem das verwendete, schallabsorbierende Material eine hohe Wirksamkeit aufweist.

In Bild 7-24 bis Bild 7-27 ist das mittels 2D-FEM gewonnene Vorbeifahrts-Schirmmaß der verschiedenen schallabsorbierend bekleideten Lsw dem Vorbeifahrts-Schirmmaß ihrer schallhart ausgeführten Äquivalente E3 bzw. E4 sowie der Referenz-Lsw G gegenübergestellt. Für A1 (Innenseite schallabsorbierend bekleidet; Bild 7-24) ergibt sich eine Wirksamkeit, die nur marginal von jener der schallharten Lsw E3 abweicht. Eine Bekleidung der Innenseite hat somit keinen Einfluss auf die Wirksamkeit der einfach geknickten Lsw im Schattenbereich. Für A2 hingegen bestätigt sich, dass die Bekleidung der Oberkante der einfach geknickten Lsw mithilfe eines Materials mit einem Schallabsorptionsgrad größer ca. 0,5 eine signifikante Erhöhung der Schirmwirkung mit sich bringen kann (siehe Bild 7-25). Während bei ca. 400 Hz die Wirksamkeit von A2 und E3 nahezu identisch sind, steigt die Wirksamkeit von A2 mit zunehmender Frequenz überproportional stark an, sodass sich bei 2 kHz eine um bis zu ca. 15 dB größere Wirksamkeit ergibt als für die schallharte Variante der Lsw. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen für A1 (Innenseite schallabsorbierend bekleidet) und A2 (Oberkante schallabsorbierend bekleidet) ergibt sich für A3 (Innenseite und Oberkante schallabsorbierend bekleidet, Bild 7-26) eine Wirksamkeit, die jener von A2 entspricht. Somit ist nachgewiesen, dass eine schallabsorbierende Bekleidung der Innenseite der Lsw keine Erhöhung der Wirksamkeit im Schattenbereich mit sich bringt, unabhängig davon, ob die Lsw zusätzlich eine schallabsorbierende Oberkante besitzt. Für A4 (Oberkante schallabsorbierend, Knicklänge auf 1,66 m erhöht, Bild 7-27) stellt sich ein Ergebnis analog zu A2 ein. Auch hier erhöht sich die Wirksamkeit infolge der schallabsorbierenden Bekleidung der Oberkante deutlich gegenüber der schallharten Variante der Lsw, wobei die Zunahme des Schirmmaßes noch höher ausfällt als bei A2, was darauf hindeutet, dass die Länge des oberseitig absorbierend bekleideten Knicks die Wirksamkeit maßgeblich beeinflusst.

Um den Einfluss der Knicklänge auf die Wirksamkeit der oberseitigen schallabsorbierenden Bekleidung der Lsw zu untersuchen, dient Bild 7-28. Hier ist die Zusatzdämpfung durch eine (teilweise) schallabsorbierende Bekleidung für die verschiedenen Lsw exemplarisch für ausgewählte Quell-Empfänger-Distanzen und Empfängerhöhen dargestellt. Diese ergibt sich aus

$$\Delta D_{z,abs} = D_{z,V,abs} - D_{z,V,sh} \quad (3.3)$$

$D_{z,V,abs}$ steht hierin für das Vorbeifahrts-Schirmmaß der teilweise absorbierend bekleideten, geknickten Lsw, während $D_{z,V,sh}$ das Vorbeifahrts-Schirmmaß des schallharten Äquivalents der geknickten Lsw symbolisiert. Im Falle von A4 beispielsweise ergibt sich die Zusatzdämpfung durch die schallabsorbierende Bekleidung zu $\Delta D_{z,abs} = D_{z,V,A4} - D_{z,V,E4}$. Es bestätigen sich die oben bereits beschriebenen Erkenntnisse hinsichtlich der Wirksamkeit der absorbierenden Bekleidung der Oberkante und der Innenseite der Lsw. Zusätzlich deutet sich in Bild 7-28 an, dass A4 und A3 sich in Abhängigkeit von der Quell-Empfänger-Geometrie proportional zueinander verschieben. Dies lässt sich anhand von Bild 3-73 bestätigen. Hierin ist die Zusatzdämpfung von A4 auf die Zusatzdämpfung von A2 bezogen dargestellt. Die verschiedenen Linienfarben symbolisieren die verschiedenen Kombinationen aus Quell-Empfänger-Distanz und Empfängerhöhe. Es zeigt sich, dass ein konstanter Faktor von ca. 1,3 zwischen A4 und A2 zu existieren scheint, dem sich die Kurven hochfrequent annähern. Im Bereich von ca. 400 Hz bis 500 Hz nimmt dieses Verhältnis vereinzelt deutlich höhere bzw. niedrigere Werte an, oberhalb von 500 Hz ist die Streuung jedoch sehr gering.

Der in Bild 3-73 dargestellte Zusammenhang muss ausschließlich durch die Knicklänge bedingt sein, da die restlichen Faktoren (z. B. Geometrie, Schallabsorptionsgrad) zwischen beiden Fällen (A4 und A2) gleich sind. Um diesen Zusammenhang zu quantifizieren, scheint die Beschreibung

$$k = \Delta D_{z,abs,A4} / \Delta D_{z,abs,A2} = \sqrt{b_{\text{Knick}}} \quad (3.4)$$

sinnvoll, den es durch weitere Simulationen zu validieren gilt. Für ein Knicklängenverhältnis von 1 m zu 1,66 m ergibt sich der in Bild 3-73 beobachtbare Wert von ca. 1,3.

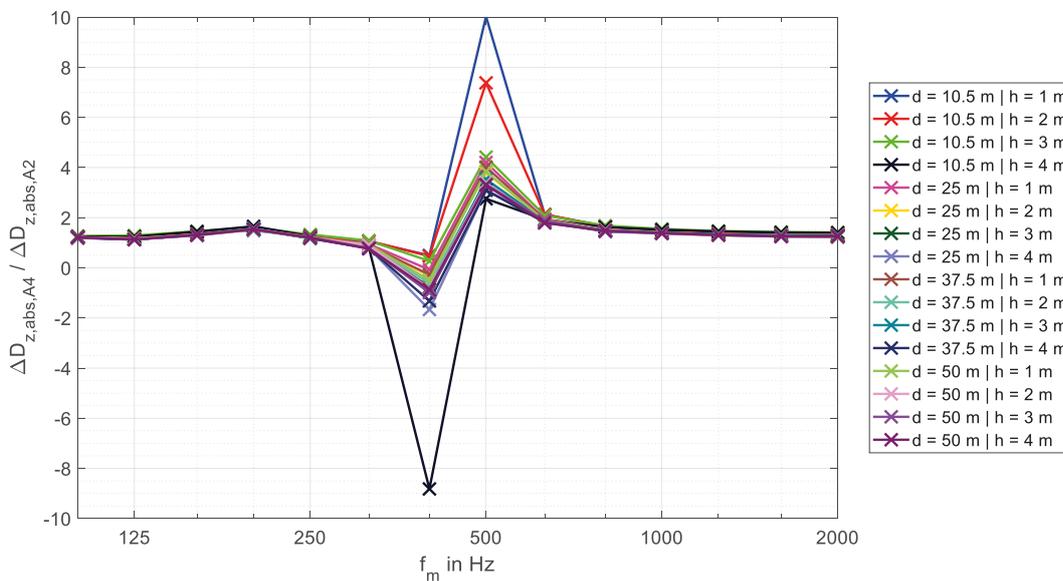


Bild 3-73: Verhältnis aus Zusatzdämpfung durch absorbierende Bekleidung von A4 und A2 als Terzspektrum; Kurvenfarbe: Kombination aus Quell-Empfänger-Distanz und Empfängerhöhe

Der frequenzabhängige Anstieg der in Bild 7-28 dargestellten Zusatzdämpfung durch teilweise schallabsorbierende Bekleidung der Lsw nähert sich mit zunehmender Quell-Empfänger-Distanz dem Wert an, der in 37,5 m Distanz zur Lsw bereits nahezu erreicht ist (Fernfeld der Lsw). Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass dieser Anstieg primär aus dem Anstieg des Schallabsorptionsgrads im Frequenzbereich zwischen ca. 500 Hz und 2 kHz resultiert (vgl. Bild 3-27). Zur Bestimmung des Faktors zwischen Schallabsorptionsgrad und Wirksamkeit der Lsw wird in Bild 7-28, unten, der Wert für $\Delta D_{z,abs}$ der Lsw A2 bei

2 kHz abgelesen, da bei dieser Frequenz der Schallabsorptionsgrad mit einem Wert von ca. 0,95 nahezu sein Maximum erreicht hat. Der ermittelte Wert beträgt ca. 7,5 dB. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs ergibt sich für einen Schallabsorptionsgrad von Eins:

$$7,5 \text{ dB} \cdot \frac{1}{0,95} \approx 8 \text{ dB.} \quad (3.5)$$

Da die Zusatzdämpfung durch teilweise schallabsorbierende Bekleidung der Lsw im Frequenzbereich unterhalb von ca. 500 dB etwa 0 dB beträgt, der Schallabsorptionsgrad in diesem Frequenzbereich jedoch Werte von bis zu ca. 0,5 aufweist, wird zur abschätzenden Berechnung der Zusatzdämpfung der Schallabsorptionsgrad des verwendeten Materials um 0,5 reduziert und zum Ausgleich der Maximalwert (8 dB aus Gl. (3.5)) verdoppelt. Hieraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Zusatzdämpfung durch teilweise absorbierende Bekleidung der Lsw:

$$\Delta D_{z,abs} \sim (\alpha - 0,5) \cdot 16 \text{ dB.} \quad (3.6)$$

Dies stellt eine Abschätzung für große Quell-Empfänger-Distanzen (Fernfeld der Lsw) und Empfängerhöhen nahe der Höhe der Lsw dar. Für geringere Quell-Empfänger-Distanzen und kleinere Empfängerhöhen sind mitunter deutlich höhere Werte der Zusatzdämpfung zu erwarten. Den quantitativen Zusammenhang zwischen der schallabsorbierenden Bekleidung von geknickten Lsw und der absoluten Wirksamkeit der geknickten Lsw gilt es auf Grundlage einer größeren Datenbasis tiefer zu untersuchen, um vor allem auch im Nahfeld der Lsw präzisere Vorhersagen treffen zu können.

4 Erarbeitung eines Berechnungsalgorithmus

Basierend auf den Simulationsergebnissen aus Kapitel 3 erfolgt in diesem Kapitel die Erstellung von Zusatzmodulen zur Berücksichtigung geknickter und gekrümmter bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw in der 2½-dimensionalen Ausbreitungsrechnung entsprechend [DIN ISO 96132]. Dabei wird unter Bezug auf die Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln diskutiert, in welchem Maße es möglich ist, Verallgemeinerungen für konkrete Anwendungsfälle zu treffen und welche Einflussfaktoren als Eingangsparameter für die Module notwendig sind.

In Kapitel 3 konnte gezeigt werden, dass einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° eine zuverlässige Pegelminderung über die Wirksamkeit der Verschiebung der maßgeblichen Beugungskante hinaus (gerade schallharte Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante) liefern. Für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90° sowie für die untersuchte dreifach geknickte Lsw zeigen die durchgeführten numerischen Simulationen zwar ebenfalls positive Wirksamkeiten gegenüber der Referenz-Lsw, jedoch sind diese auf einen sehr kleinen Bereich hinter der Lsw begrenzt. In größerer Distanz nähern sich die Schirmmaße jenem der Referenz-Lsw an. Es ist somit als zielführend anzusehen, die Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° mittels einer vereinfachten Berechnungsmethode zu beschreiben, während für die verbleibenden Geometrien eine Berücksichtigung in der Schallausbreitungsberechnung dahingehend erfolgen kann, dass anstelle der Lsw mit komplexer Geometrie eine senkrechte Wand in das Modell aufgenommen wird, deren Oberkante sich an der ersten Beugungskante der komplexen Wand befindet. In einem kleinen Teil des Nahbereichs der Lsw wird die Wirksamkeit der Lsw dadurch unterschätzt. Es handelt sich somit um eine Berechnung auf der sicheren Seite. Zur Berücksichtigung von absorbierend bekleideten einfach geknickten Lsw erfolgt die vereinfachte Berechnung einer Zusatzdämpfung in Abhängigkeit von geometrischen Parametern.

4.1 Analytische Berechnungen

Zur Berücksichtigung einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° ist es zielführend, eine Regression über einen weiten Parameterraum durchzuführen. Mithilfe der gewonnenen Regressionsparameter ist es im Anschluss möglich, für eine beliebige Geometrie die Wirksamkeit einer solchen Lsw zu berechnen. Da der Umfang der 3D- und 2D-FEM-Simulationen nicht ausreicht, um alle Parametervariationen sicher abzudecken, wurde das analytische Berechnungstool der AED aus in Kapitel 2.5, das um die Schallausbreitung über Hindernisse mit zwei Beugungskanten aus [Plovsing 2001] erweitert und validiert werden konnte, für eine Vielzahl von Berechnungen herangezogen.

Um eine möglichst breite Datenbasis zu schaffen, erfolgte die Berechnung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes für alle Kombinationen der folgenden Parameter:

- Knicklänge l_{Knick} : 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m,
- Höhe der Lsw h_{Lsw} : 4 m/5 m/6 m/7 m/8 m/9 m,

- Distanz Quelle – Vorderkante Lsw x_0 : 3,5 m/4,5 m/5,5 m/6,5 m/7,5 m,
- Quell-Empfänger-Distanz d : 10 m/15 m/20 m/25 m/30 m/35 m/40 m/45 m/50 m,
- Empfängerhöhe h : 1 m/2 m/3 m/4 m.

Im Folgenden wird l_{Knick} als Formelzeichen für die Knicklänge verwendet. Diese ist gleichbedeutend mit b_{Knick} in Kapitel 3. Auf Basis der ca. 4300 Datensätze erfolgte eine Korrelationsanalyse zur Findung systematischer Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und dem resultierenden Vorbeifahrts-Schirmmaß. In einem ersten Schritt wurde der geometrische Parameter gesucht, der den wesentlichen Einflussfaktor auf das Schirmmaß darstellt. Zu Beginn wurde untersucht, ob es zielführend ist, den Verlauf des kontinuierlichen spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaßes anhand seines Absolutwerts (Offset) bei 2 kHz $D_{z,V}(f=2\text{kHz})$ und seines Anstiegs m zwischen 500 Hz und 4 kHz zu beschreiben (Anstieg und Offset). Der Wert von 2 kHz wurde dabei gewählt, da in diesem Frequenzbereich die geringste Fehlerfortpflanzung auf Grundlage der Welligkeit im Ergebnis zu erwarten ist. In Bild 4-1 sind exemplarisch die der Regression zugrunde liegenden Datenpunkte in Abhängigkeit von der effektiven Höhe der Lsw, entsprechend h_s in Bild 3-40, dargestellt. Die effektive Höhe wurde als Parameter signifikanten Einflusses vermutet, da dieser in der Berechnung der Wirksamkeit der geraden Lsw in [Maekawa 1968] den maßgeblichen Einflussparameter darstellt. Es ist erkennbar, dass eine grobe Gruppierung der Datenpunkte vor allem in Abhängigkeit von der Höhe der Lsw erfolgt, dass diese jedoch nicht ausreicht, um eine Beschreibung der Wirksamkeit gekrümmter Lsw anhand der effektiven Höhe vorzunehmen.

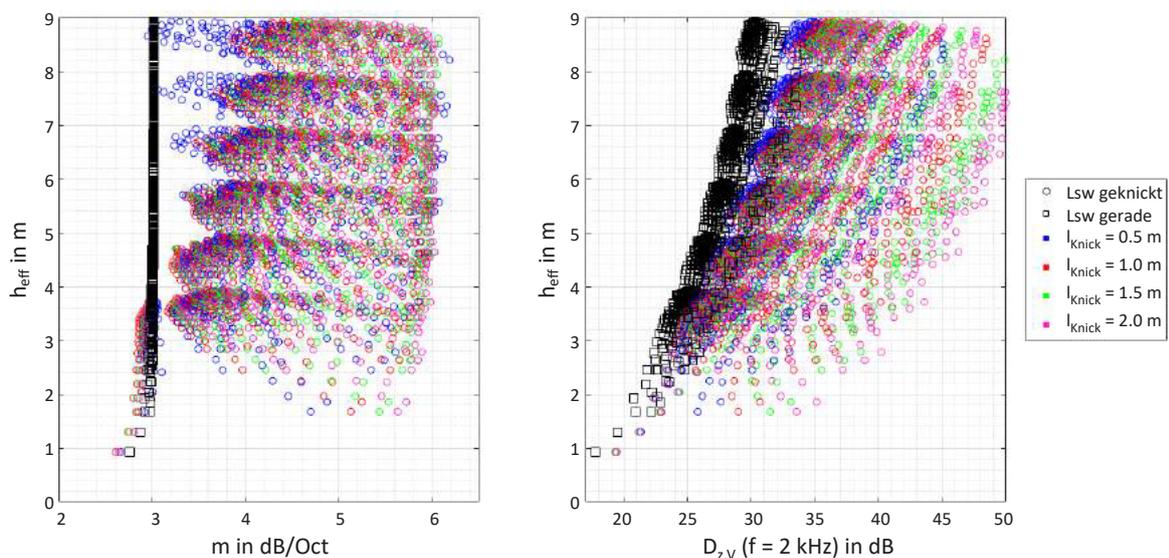


Bild 4-1: Anstieg m und Offset $D_{z,V}(f=2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw an der Position der ersten Beugungskante und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} , in Abhängigkeit von der effektiven Höhe h_{eff} ; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m

Aus diesem Grund wurde im nächsten Schritt das Produkt aus effektiver Höhe und Knicklänge als Einflussparameter untersucht. Die Datenpunkte aus der analytischen Beschreibung sind in Bild 4-2 in Abhängigkeit von diesem Produkt aus effektiver Höhe und Knicklänge dargestellt. Auch hier ist eine leichte Gruppierung zu erkennen, die jedoch nicht ausreicht, um einen zuverlässigen Zusammenhang zwischen den Eingangsparametern und der Wirksamkeit der Lsw (Anstieg und Offset) herzustellen.

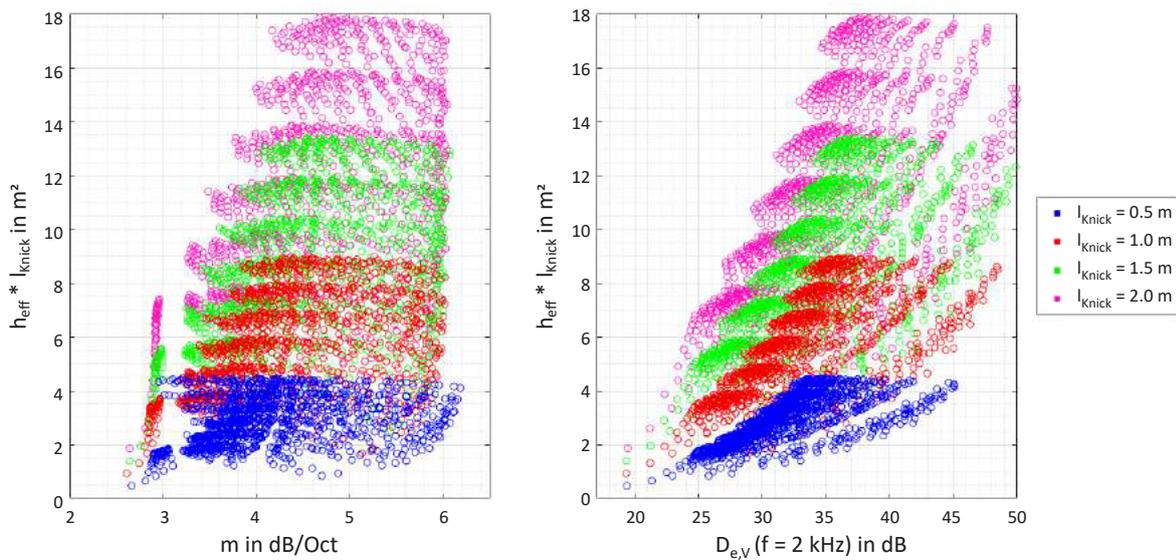


Bild 4-2: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw an der Position der ersten Beugungskante und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von dem Produkt aus effektiver Höhe h_{eff} und Knicklänge l_{Knick} ; links: Anstieg; rechts: Offset; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m

Die auf diese Weise erfolgte Korrelationsanalyse wurde für zahlreiche potenzielle Einflussfaktoren sowie unter gezielter Festsetzung von Parametern und gleichzeitiger Variation der verbleibenden Parameter wiederholt. Als für das Vorbeifahrts-Schirmmaß maßgeblicher Parameter erwies sich innerhalb dieses Prozesses die virtuelle Höhe der Lsw h_v als vielversprechend, die geometrisch beschreibbar ist und entsprechend Bild 4-3 die Höhe des Punktes über dem Boden darstellt, an dem sich die Verlängerungen der Verbindungslinie Quelle – erste Beugungskante und der Verbindungslinie zweite Beugungskante – Empfänger schneiden.

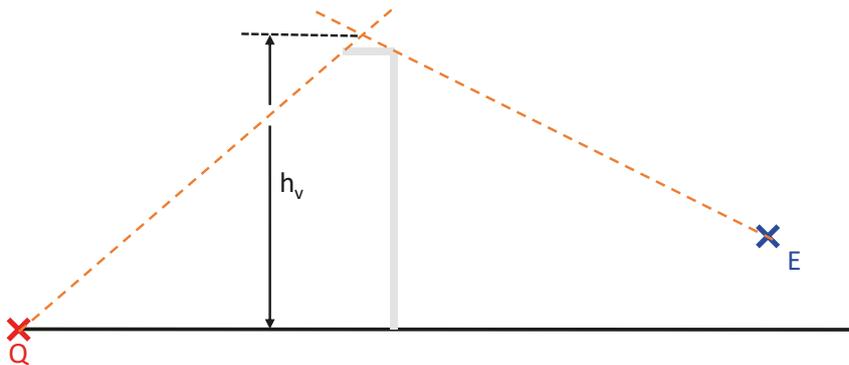


Bild 4-3: Bestimmung der virtuellen Höhe der Lsw h_v

In Bild 4-4 sind analog zur vorigen Darstellung die Datenpunkte in Abhängigkeit von der virtuellen Höhe dargestellt. Hier zeigt sich ein deutliches Gruppieren der einzelnen Punkte, wobei im Wesentlichen zwei Parameter erkennbar sind, die einen zusätzlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben. Dies ist einerseits die absolute Höhe der Lsw (mehrere Gruppen von Punkten in vertikaler Richtung) und andererseits die Knicklänge (Gruppen verschiedener Farbe).

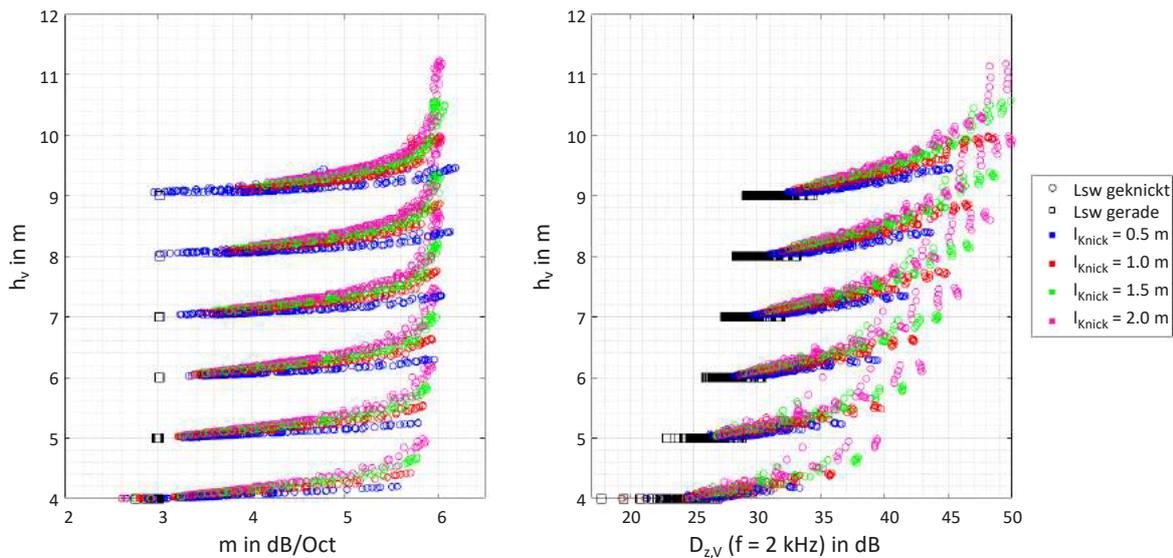


Bild 4-4: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2 \text{ kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von der virtuellen Höhe h_v ; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m

Um den Einfluss der Lsw-Höhe zu in der Darstellung in Bild 4-4 zu eliminieren, erfolgte im nächsten Schritt die Darstellung der Datenpunkte in Abhängigkeit von der virtuellen Höhe abzüglich der tatsächlichen Höhe der Lsw, also der virtuellen Überhöhung $h_v - h_{Lsw}$. Dies ist analog zu den vorigen Darstellungen in Bild 4-5 abgebildet. Es bestätigt sich eine Gruppierung der Datenpunkte anhand des gewählten Parameters sowohl für den Anstieg als auch für den Offset, wobei letzterer vor allem zu höheren Werten der virtuellen Überhöhung noch eine größere Streuung aufweist.

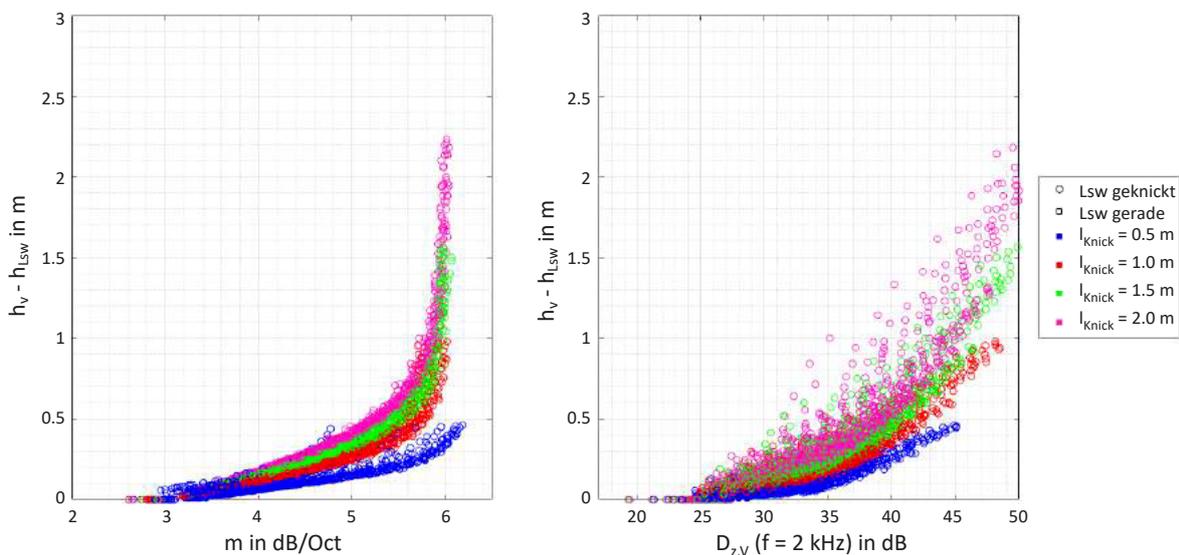


Bild 4-5: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2 \text{ kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von der virtuellen Überhöhung $h_v - h_{Lsw}$; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m

4.2 Regression anhand von Berechnungsergebnissen

Im nächsten Schritt erfolgte die Durchführung erster Regressionen anhand des zuvor als relevant bewerteten Parameters der virtuellen Überhöhung. Es stellte sich bei der Durchführung der Regressionen jedoch heraus, dass eine Betrachtung von Anstieg und Offset ($D_{z,V}$ bei 2 kHz) mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zielführend ist, sondern die getrennte Berechnung des Vorbeifahrts-Dämpfungsmaßes für die verschiedenen für den Straßenverkehrslärm relevanten Oktavbänder als praktikabler erscheint, vor allem hinsichtlich der Implementierung in bestehendes oder zukünftiges Regelwerk. Zudem stellte sich heraus, dass es zielführend erscheint, anstelle des absoluten Werts des Vorbeifahrts-Schirmmaßes die Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes gegenüber der Referenz-Lsw zu betrachten. Darum sind im Folgenden anstelle des Anstiegs und Offsets die Werte der Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes $\Delta D_{z,V}$ in Abhängigkeit von der Oktavmittenfrequenz dargestellt. Für die Herleitung einer Vorgehensweise für die Regression wird sich auf die Oktavbänder von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz beschränkt, da in diesem Frequenzbereich der spektrale Schwerpunkt des Straßenverkehrslärmspektrums liegt. Im letzten Schritt wird die Regression auf die Oktaven mit den Mittenfrequenzen 250 Hz und 4 kHz ausgeweitet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde im Folgenden gegenüber den bisherigen Darstellungen ein Vertauschen der x- und y-Achse vorgenommen, um systematische Zusammenhänge zwischen Eingangsparemetern (virtuelle Überhöhung) und Berechnungsergebnis (Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes) intuitiver erfassen zu können.

Im ersten Schritt erfolgte die Auswahl einer Funktionsgleichung, die für die Regression zielführend ist. Zu diesem Zweck wurden Polynome der Ordnung zwei bis fünf (y_1 bis y_4) sowie eine gebrochen-rationale Funktion (y_5) untersucht. Die Betrachtung verschiedener Polynome diente dazu, zu bewerten, welche Komplexität der Funktion erforderlich ist, um den Zusammenhang möglichst präzise zu erfassen. Die Bruchfunktion, die aus einem quadratischen Term ($1/x^2$) und einem linearen Term ($1/x$) zusammengesetzt ist, wurde gewählt, da sich in den Daten andeutet, dass eine Konvergenz der Dämpfungserhöhung zu hohen Werten der virtuellen Überhöhung hin erfolgt. Die zugrunde liegenden Funktionsgleichungen sind

$$y_1 = ax^2 + bx + c, \quad (4.1)$$

$$y_2 = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (4.2)$$

$$y_3 = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e, \quad (4.3)$$

$$y_4 = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + g, \quad (4.4)$$

$$y_5 = \frac{a}{b \cdot x^2 - c} + \frac{d}{e \cdot x - g} + h. \quad (4.5)$$

Hierin sind y_1 bis y_5 die Verbesserung des Vorbeifahrts-Schirmmaßes gegenüber der Referenz-Lsw und x die virtuelle Überhöhung. a, b, c, d, e, g und h stellen die Regressionsparameter dar. In Bild 4-6 sind die der Regression zugrunde liegenden Daten den mittels Regression anhand von Gl. (4.1) bis Gl. (4.5) gewonnenen Funktionsverläufen exemplarisch für eine Oktavmittenfrequenz von 2 kHz gegenübergestellt. Zudem enthält Tabelle 4.1 das Bestimmtheitsmaß R^2 , das sich für die verschiedenen Regressionsfunktionen und die unterschiedlichen Oktavbänder und Knicklängen ergibt. Dieses beschreibt, welcher Anteil der Varianz der abhängigen Variable (Ausgangsparameter) anhand der unabhängigen Variab-

len (Eingangsparameter) beschrieben werden kann. Ein größeres Bestimmtheitsmaß entspricht somit einer größeren Vorhersagegenauigkeit des Regressionsmodells.

Es ist erkennbar, dass alle Funktionsverläufe grundlegend den Trend der zugrunde liegenden Daten wiedergeben. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass das Polynom zweiter Ordnung (y_1) vor allem bei einer Knicklänge von 2 m für hohe Werte der virtuellen Überhöhung einen negativen Anstieg besitzt, obwohl die analytisch gewonnenen Werte einen positiven Anstieg aufweisen. Im Bestimmtheitsmaß macht sich dieser Effekt nicht bemerkbar, da die Punktdichte im Bereich zwischen $0 \text{ m} \leq h_v - h_{Lsw} \leq 1 \text{ m}$ sehr viel größer ist als oberhalb von $h_v - h_{Lsw} = 1,5 \text{ m}$. Dadurch führt das starke Unterschätzen in diesem Bereich nur zu einer insignifikanten Reduzierung des Bestimmtheitsmaßes. Das Polynom dritter Ordnung weist einen Verlauf auf, der den Berechnungsergebnissen ähnlich gut folgt wie das Polynom zweiter Ordnung, mit dem Unterschied, dass das Polynom dritter Ordnung bei hohen Werten der virtuellen Überhöhung die Berechnungsergebnisse weniger stark unterschätzt und einen Anstieg nahe Null aufweist. Eine weitere Steigerung der Ordnung des Polynoms führt zu keiner weiteren Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes, womit die Verwendung eines Polynoms vierter oder fünfter Ordnung nicht erforderlich ist. Die Bruchfunktion weist einen Verlauf auf, der ebenfalls sehr gut dem Trend der Berechnungsergebnisse folgt und erwartungsgemäß zu großen Werten der virtuellen Überhöhung einen konvergenten Verlauf aufweist, sodass auch eine Berechnung über den betrachteten Bereich der virtuellen Überhöhung hinaus keine deutlich überschätzenden Werte der Wirksamkeit liefert. Allerdings ist für die Bruchfunktion in einigen Fällen beobachtbar, dass sich – wie hier bei $f_m = 2 \text{ kHz}$ und $l_{Knick} = 0,5 \text{ m}$ – Polstellen der Funktion im interessierenden Bereich der virtuellen Überhöhung befinden. Um eine daraus resultierende falsche Vorhersage der Wirksamkeit zu vermeiden, wurde die Verwendung eines Polynoms dritten Grades beschlossen.

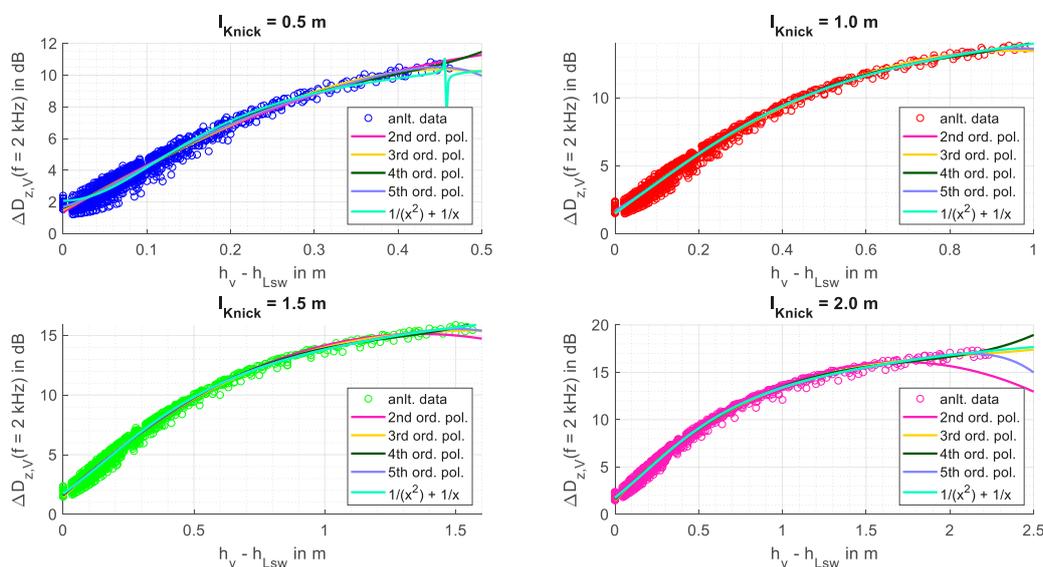


Bild 4-6: Datenpunkte und Regression anhand verschiedener Funktionsgleichungen für Oktav-Mittelfrequenz 2 kHz; pinke Linie: Polynom 2. Ordnung (y_1); gelbe Linie: Polynom 3. Ordnung (y_2); schwarze Linie: Polynom 4. Ordnung (y_3); violette Linie: Polynom 5. Ordnung (y_4); türkise Linie: Bruchfunktion (y_5) von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{Knick} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

R ² in %	f _m	500 Hz				1 kHz				2 kHz				
		Gl.	l _{Knick}	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	0,5 m	1 m	1,5 m
Y ₁			38,0	94,4	97,0	97,6	95,2	96,9	98,4	98,6	96,5	99,0	99,2	99,2
Y ₂			38,0	94,4	97,1	97,7	95,1	97,0	98,4	98,7	96,6	99,0	99,2	99,3
Y ₃			38,0	94,4	97,1	97,8	95,2	97,1	98,4	98,7	96,7	99,1	99,3	99,3
Y ₄			39,1	94,5	97,2	97,8	95,3	97,1	98,4	98,8	96,8	99,1	99,3	99,4
Y ₅			38,2	93,8	96,4	97,7	94,8	96,6	98,1	98,8	96,2	99,0	99,3	99,4

Tab. 4.1: Bestimmtheitsmaß der Regression mithilfe der verschiedenen Funktionsgleichungen aus Gl. (4.1) bis Gl. (4.5)

In Bild 4-7 bis Bild 4-11 ist den zugrundeliegenden Datenpunkten der Verlauf der Regression anhand eines Polynoms dritten Grades für die Oktavmittenfrequenzen von 250 Hz bis 4 kHz gegenübergestellt. Zusätzlich sind als Kreuze die mittels der FEM-Simulationen aus Kapitel 3 gewonnenen Datenpunkte dargestellt.

Es ist zu beachten, dass die Kreuze im linken unteren Diagramm aus der FEM mit einer Knicklänge von 1,66 m resultieren, die Datenpunkte aus der Analytik jedoch für eine Knicklänge von 1,5 m gelten. Trotz dieser geringen Abweichung ist erkennbar, dass sich die per FEM-Simulation gewonnenen Datenpunkte sehr gut in die Menge der analytisch ermittelten Datenpunkte einfügen. Zudem zeigt sich, dass vor allem für die Knicklängen größer 0,5 m und für Frequenzen größer 500 Hz in erster Näherung eine gute Wiedergabe der Wirksamkeit anhand der Regressionskurven möglich ist.

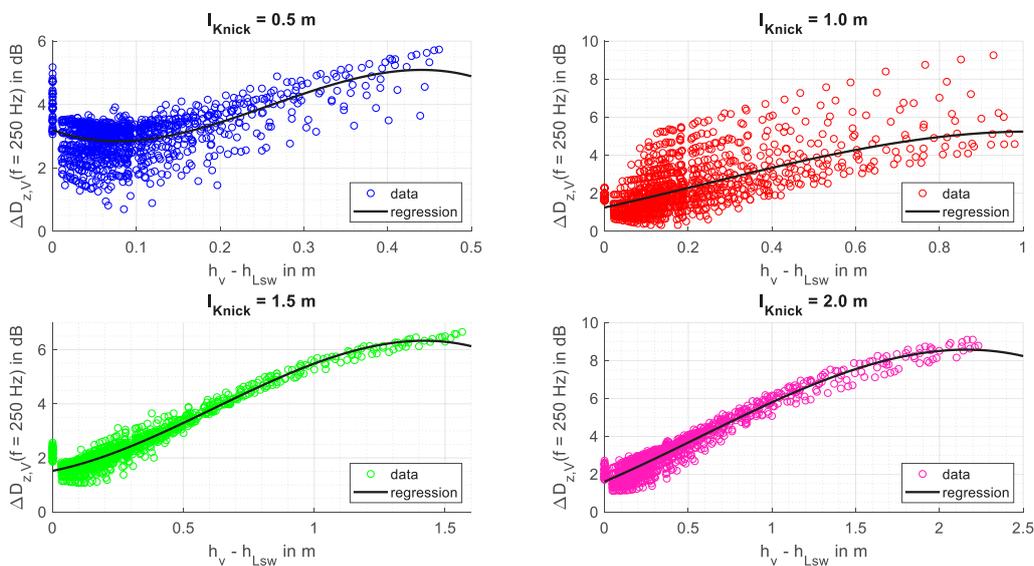


Bild 4-7: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 250 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

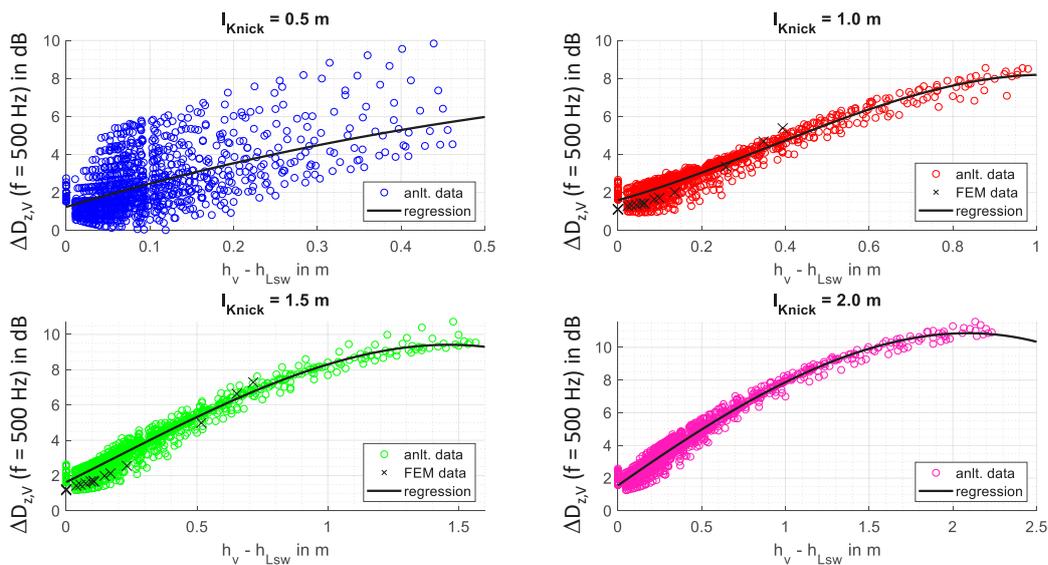


Bild 4-8: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

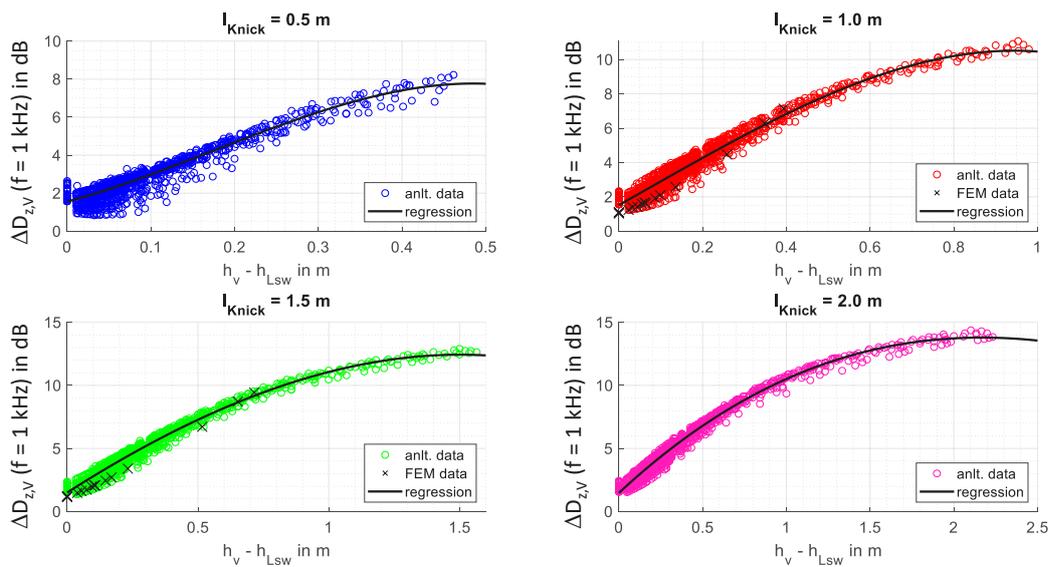


Bild 4-9: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 1 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

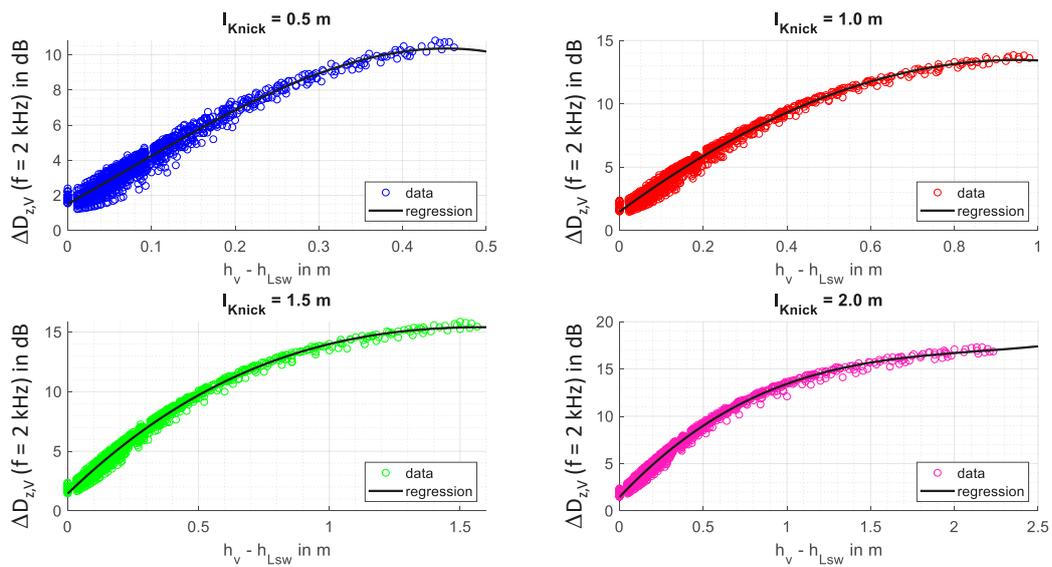


Bild 4-10: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 2 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

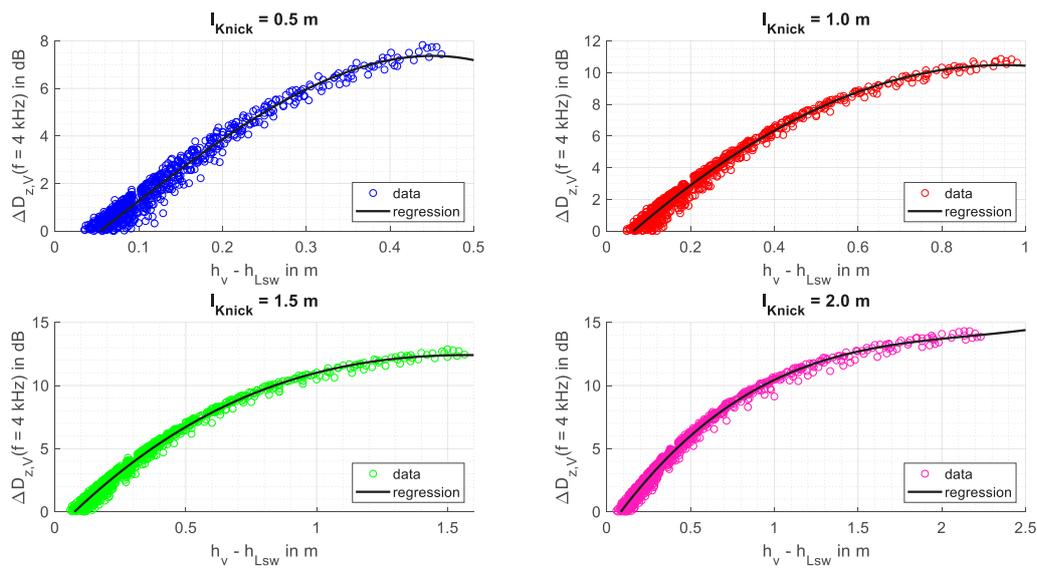


Bild 4-11: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 4 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$

In Tabelle 4.2 ist das Bestimmtheitsmaß der Regressionen aus Bild 4-7 bis Bild 4-11 für die Oktavmittelfrequenzen 250 Hz bis 4 kHz für die Knicklängen l_{Knick} 0,5 m bis 2 m gegenübergestellt. Wie bereits anhand der grafischen Darstellung zu vermuten, ist das Bestimmtheitsmaß für die Knicklänge von 0,5 m und eine Oktavmittelfrequenz von 500 Hz mit 38 % sehr gering. Auch für das Oktavband 250 Hz ergibt sich für die Knicklängen von 0,5 m und 1,0 m ein Bestimmtheitsmaß von weniger als 50 %. Für die verbleibenden Knicklängen und Frequenzen ergeben sich deutlich höhere Werte von ca. 94 % bis 99 %.

R^2	$f_m = 250 \text{ Hz}$	$f_m = 500 \text{ Hz}$	$f_m = 1 \text{ kHz}$	$f_m = 2 \text{ kHz}$	$f_m = 4 \text{ kHz}$
$l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$	44,2 %	38,0 %	95,1 %	96,6 %	96,6 %
$l_{\text{Knick}} = 1,0 \text{ m}$	47,5 %	94,4 %	97,0 %	99,0 %	99,0 %
$l_{\text{Knick}} = 1,5 \text{ m}$	96,9 %	97,1 %	98,4 %	99,2 %	99,2 %
$l_{\text{Knick}} = 2,0 \text{ m}$	94,8 %	97,7 %	98,7 %	99,3 %	99,3 %

Tab. 4.2: Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 anhand von Gl. (4.2) für verschiedene Oktavmittelfrequenzen f_m und Knicklängen l_{Knick}

Da vor allem für die Knicklänge von 0,5 m bei 250 Hz und 500 Hz sowie für die Knicklänge von 1,0 m bei 250 Hz noch eine große Streuung vorliegt, die die Vorhersagegenauigkeit der Regression stark einschränkt, wurde nach weiteren maßgeblichen Einflussparametern oder einer Kombination aus Einflussparametern gesucht, die die Wirksamkeit der L_{sw} maßgeblich beeinflussen. Zu diesem Zweck erfolgte eine Filterung der Daten hinsichtlich bestimmter Eingangsparameter, um qualitativ Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und dem Berechnungsergebnis zu finden. In Bild 7-29 bis Bild 7-32 im Anhang sind die Datenpunkte für die Oktave mit der Mittenfrequenz 500 Hz aus Bild 4-8 anhand verschiedener Parameter gefiltert dargestellt. Jedes Diagramm enthält zudem die jeweils resultierende Regressionskurve, die ausschließlich auf der jeweiligen Datenbasis gewonnen wurde und auf dem zuvor verwendeten Polynom dritten Grades basiert. So enthält Bild 7-29 beispielhaft ausschließlich jene Datenpunkte, die übrig bleiben, wenn ausschließlich eine Variation der Wandhöhe und Empfängerdistanz erfolgt und die restlichen Parameter konstant sind sowie die daraus resultierende Regressionskurve.

Es ist erkennbar, dass vor allem für die Klappenlänge von 0,5 m keine wesentliche Gruppierung der Punkte erfolgt. Dies ist auch für die nachfolgenden zwei Darstellungen der Fall. Bild 7-30 zeigt den Datensatz, der verbleibt, wenn die Wandhöhe konstant gehalten wird, in Bild 7-31 wurden die Wandhöhe und die Empfängerhöhe konstant gehalten.

In Bild 7-32 sind schließlich die Datenpunkte dargestellt, die verbleiben, wenn die Wandhöhe und die Quelledistanz der Wand konstant gehalten werden. Hier zeigt sich eine signifikante Gruppierung der Datenpunkte, die zudem grundsätzlich dem positiven Anstieg zwischen $\Delta D_{z,v}$ und $h_v - h_{Lsw}$ folgt. Um dies zu bestätigen, ist in Bild 4-12 der Datensatz aus Bild 4-7 dargestellt, wobei anstelle der Einfärbung der Datenpunkte gemäß der Knicklänge jedem Datenpunkt eine Farbe gemäß der Kombination aus Wandhöhe und Quelledistanz zugewiesen wurde. Es bestätigt sich für alle vier untersuchten Klappenlängen die Gruppierung der Punkte anhand der Kombination aus Wandhöhe und Quelledistanz.

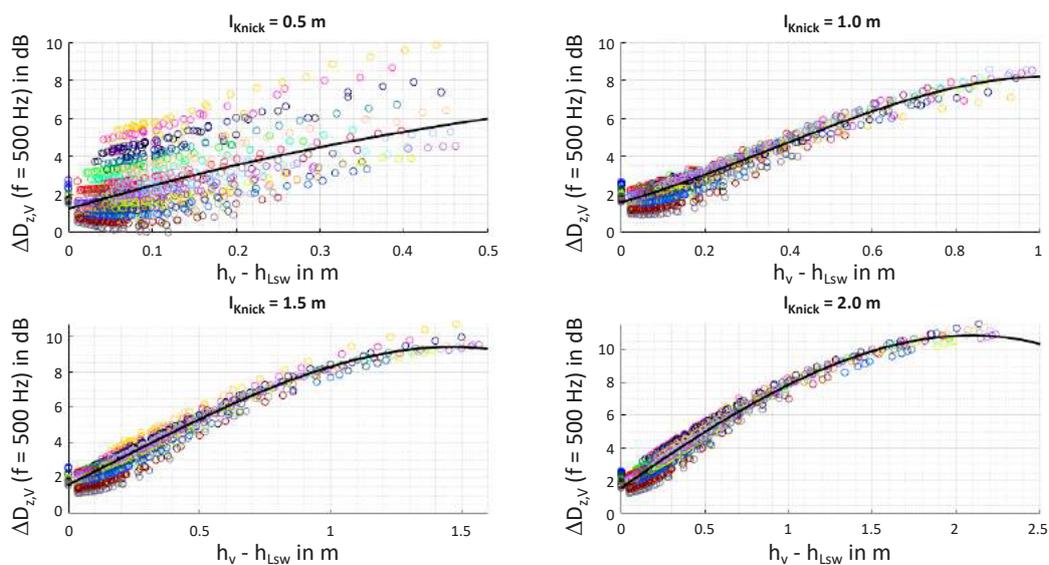


Bild 4-12: Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Punktfarbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelledistanz der Wand x_0

Um die Beeinflussung der Wirksamkeit der einfach geknickten Lsw durch die Wandhöhe und die Quelledistanz der Wand in der Regression zu berücksichtigen und somit die Vorhersagegenauigkeit zu steigern, wurde die Regressionsgleichung aus Gl. (4.2) um zwei zusätzliche Terme erweitert:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d + e \cdot h_{\text{Lsw}} + g \cdot x_0, \quad (4.6)$$

worin h_{Lsw} und e die Wandhöhe und der dazugehörige Regressionsparameter sind und x_0 und g die Quelledistanz der Wand und den dazugehörigen Regressionsparameter darstellen. Unter Verwendung von Gl. (4.6) wurde die Regression wiederholt. In Bild 4-13 bis Bild 4-17 sind analog zu Bild 4-12 die Datenpunkte für jede Oktave dargestellt, die entsprechend der jeweiligen Kombination aus Wandhöhe und Quelledistanz der Wand eingefärbt wurden. Anders als in den bisherigen Darstellungen enthält jedes Diagramm nun keine Gesamt-Regressionskurve mehr, sondern jeweils eine Regressionskurve für jede Kombination aus Wandhöhe und Quelledistanz der Wand. Zudem ist Tabelle 4.3 das Bestimmtheitsmaß für jede Kombination aus Oktavmittenfrequenz und Knicklänge zu entnehmen.

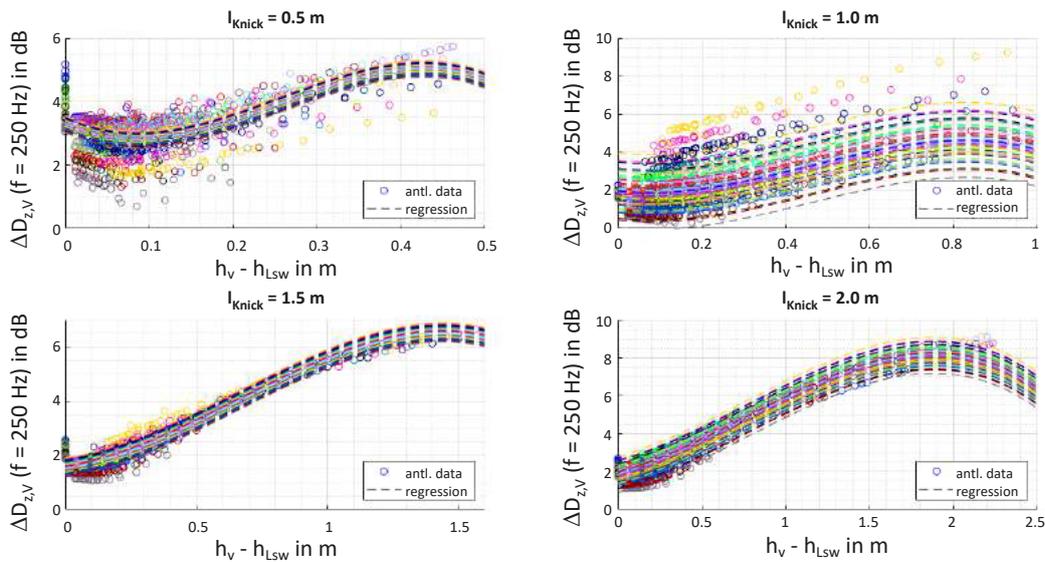


Bild 4-13: Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 250 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{LSW} und Quelldistanz der Wand x_0

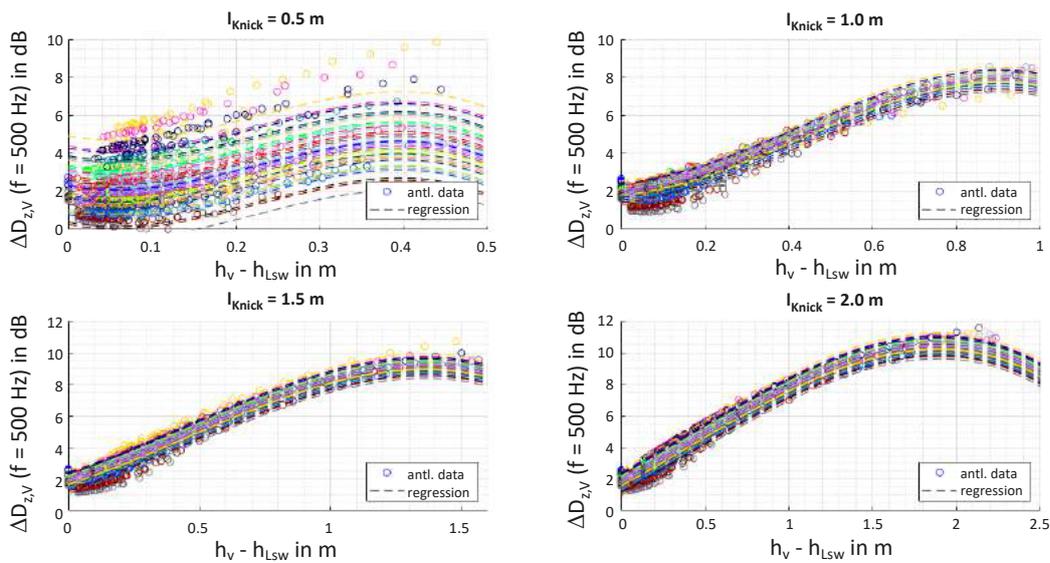


Bild 4-14: Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{LSW} und Quelldistanz der Wand x_0

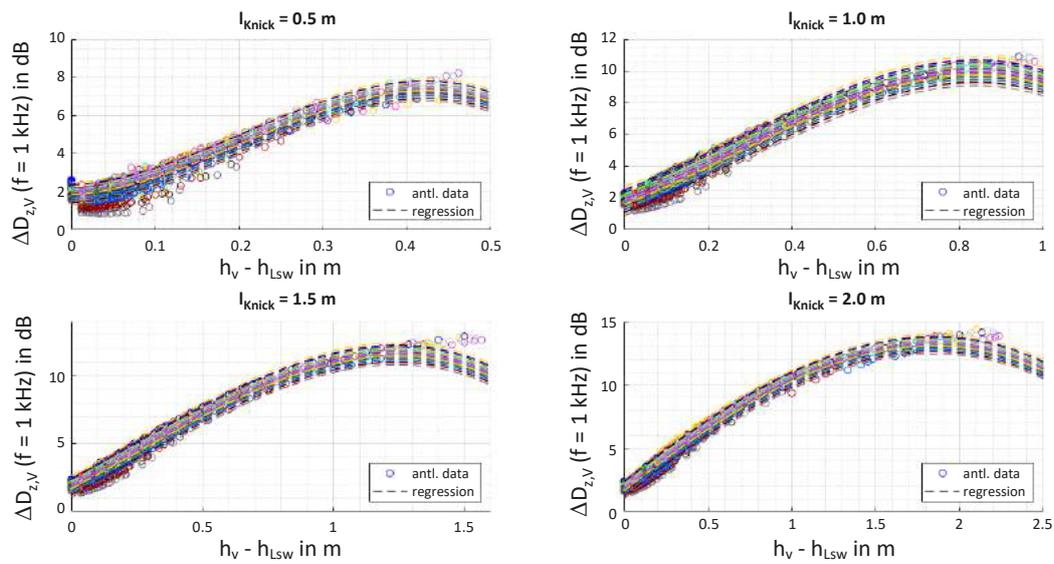


Bild 4-15: Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 1 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{LSW} und Quelldistanz der Wand x_0

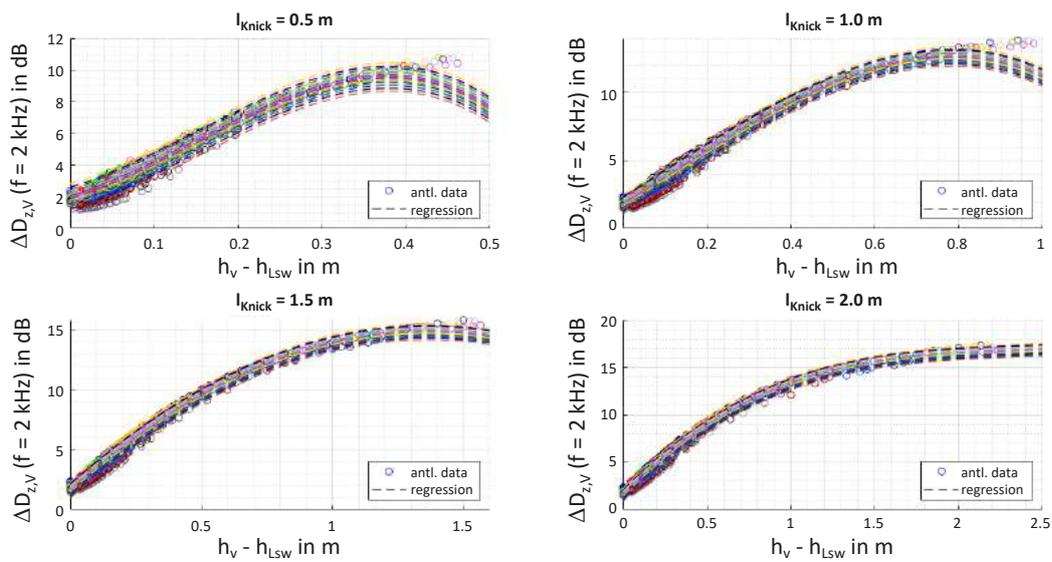


Bild 4-16: Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 2 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{LSW} und Quelldistanz der Wand x_0

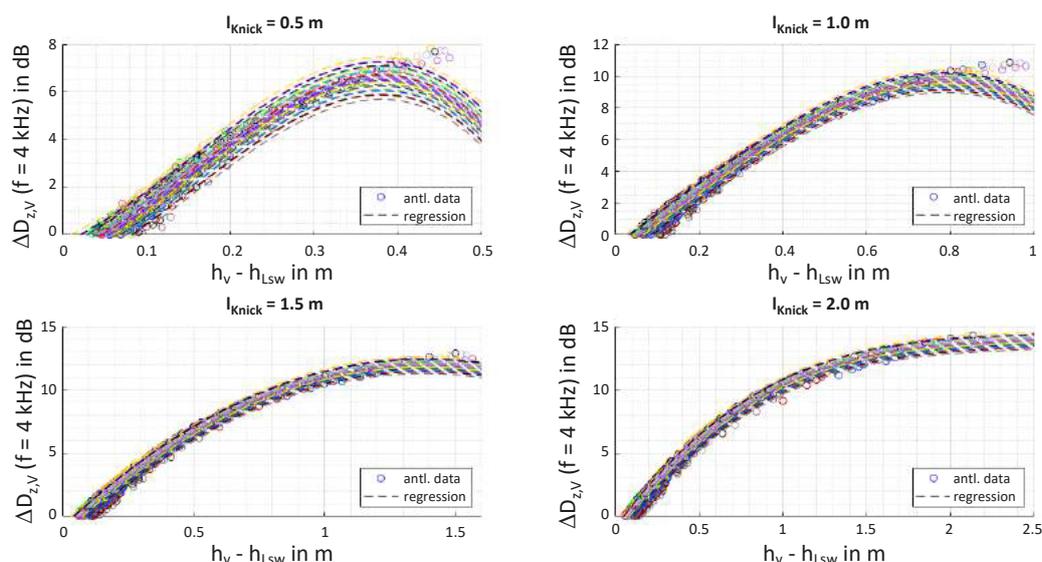


Bild 4-17: Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 4 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0

R^2	$f_m = 250 \text{ Hz}$	$f_m = 500 \text{ Hz}$	$f_m = 1 \text{ kHz}$	$f_m = 2 \text{ kHz}$	$f_m = 4 \text{ kHz}$
$l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$	46,2 %	92,7 %	95,4 %	99,5 %	99,5 %
$l_{\text{Knick}} = 1,0 \text{ m}$	94,0 %	96,4 %	99,8 %	99,7 %	99,7 %
$l_{\text{Knick}} = 1,5 \text{ m}$	99,5 %	99,4 %	99,7 %	99,8 %	99,8 %
$l_{\text{Knick}} = 2,0 \text{ m}$	99,2 %	99,8 %	99,7 %	99,9 %	99,9 %

Tab. 4.3: Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 anhand von Gl. (4.6) für verschiedene Oktavmittenfrequenzen f_m und Knicklängen l_{Knick}

Die Einführung der beiden Zusatzterme zur Berücksichtigung von Wandhöhe und Quelldistanz der Wand erhöht erkennbar den durch die Regression abgedeckten Wertebereich der Datenpunkte, auch wenn erkennbar bleibt, dass einige Datenpunkte von der Regression unterschätzt werden (siehe vor allem 500 Hz, $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$ und 250 Hz, $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$ und $l_{\text{Knick}} = 1,0 \text{ m}$). Die deutliche Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes auf über 92 % für alle Fälle mit Ausnahme von 250 Hz, $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$ belegt jedoch, dass die Vorhersagegenauigkeit der Regression deutlich gesteigert werden konnte. Für die Oktave mit der Mittenfrequenz 250 Hz ist die Vorhersagegenauigkeit für eine Knicklänge von 0,5 m sehr begrenzt. Aus diesem Grund und weil das Straßenverkehrslärmspektrum in diesem Frequenzbereich bereits einen deutlich geringeren Schallleistungspegel enthält als im spektralen Schwerpunkt bei ca. 1 kHz, wird im Folgenden für das Oktavband 250 Hz für Knicklängen von weniger als 1 m eine Wirksamkeit von 0 dB angesetzt. Dies gilt gleichermaßen für Oktavbänder unterhalb von 250 Hz für alle Knicklängen, da für diesen Frequenzbereich mit einer weiteren Abnahme der Zusatzwirkung gegenüber höheren Frequenzen zu rechnen ist und gleichzeitig das Straßenverkehrslärmspektrum sehr geringe Werte aufweist. Für das Oktavband 4 kHz sind für geringe Werte der virtuellen Überhöhung negative Werte der Zusatzdämpfung beobachtbar. Dieser Effekt zeigt sich in den Berechnungsergebnissen und wird von der Regression abgebildet, indem der Regressionsparameter d einen Vorzeichenwechsel

sel erfährt (vgl. Tabelle 4.4). Da der spektrale Schwerpunkt des Verkehrslärmspektrums deutlich unterhalb von 4 kHz liegt, ist nicht damit zu rechnen, dass dieser Effekt für die hier untersuchten Knicklängen eine Erhöhung des Gesamt-Schalldruckpegels verursachen kann. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei dieser spektralen Pegelerhöhung um einen wellenlängenbezogenen Effekt handeln kann, der sich möglicherweise für längere Knicklängen zu tieferen Frequenzen hin verschiebt. Dies gilt es bei der Auslegung geknickter Lsw mit einem Überstand von mehr als 2 m mittels analytischer Berechnungen oder FEM-Simulation zu überprüfen.

4.3 Berechnungsmodell

Die Berechnung der Wirksamkeit einer einfach geknickten Lsw bzw. einer dreifach geknickten Lsw setzt sich aus einem bis drei Schritten zusammen:

1. Berechnung der Wirksamkeit der senkrechten Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante entsprechend Regelwerk (z. B. [DIN ISO 96132]),
2. falls Klappen-Öffnungswinkel der einfach geknickten Lsw 90°:
Bestimmung der Geometrie-Zusatzdämpfung anhand von Gl. (4.6),
3. falls Oberkante derselben einfach geknickten Lsw mit schallabsorbierendem Material belegt:
Bestimmung der Impedanz-Zusatzdämpfung anhand von Gl. (4.9).

Die folgenden Berechnungsvorschriften gelten für Empfängerpositionen, die sich hinter der Lsw befinden und eine Höhe über dem Boden aufweisen, die geringer ist als die Wandhöhe.

4.3.1 Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90°

Für die in Kapitel 3 beschriebenen einfach geknickten Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° konnte festgestellt werden, dass die Verbesserung, die über die Wirksamkeit der Referenz-Lsw hinausgeht, auf einen sehr eingeschränkten geometrischen Bereich hinter der Lsw begrenzt ist. In größeren Distanzen nähert sich die Wirksamkeit der einfach geknickten Lsw dem Wert der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante an.

Aus diesem Grund erfolgt die Berücksichtigung einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90° durch Ersetzen der Lsw durch eine an deren Vorderkante befindliche senkrechte Lsw, sodass sich die Oberkante der Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante der geknickten Lsw befindet (siehe Bild 4-18). Die Berechnung des Schirmmaßes der Referenz-Lsw $D_{z,Ref,i}$ im i -ten Oktavband erfolgt spektral für die Oktav-Mittenfrequenzen 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz mithilfe des entsprechenden Regelwerks, z. B. [DIN ISO 96132]. Das Vorbeifahrts-Schirmmaß der einfach geknickten Lsw $D_{z,V,i}$ ergibt sich somit zu

$$D_{z,V,i} = D_{z,Ref,i}. \quad (4.7)$$

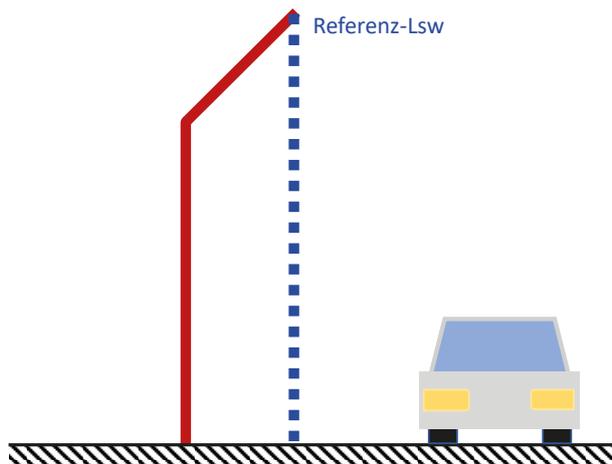


Bild 4-18: Position der Referenz-Lsw für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90°

4.3.2 Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90°

Für die Berechnung der Wirksamkeit einer einfach geknickten schallharten Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° finden die Schritte 1 und 2 Anwendung. Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung des Schirmmaßes der Referenz-Lsw $D_{z,Ref,i}$ an der Position der ersten Beugungskante entsprechend dem standardmäßigen Regelwerk, z. B. [DIN ISO 96132] analog zur Vorgehensweise für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90° (vgl. Bild 4-19). Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der spektralen Verbesserung des Vorbeifahrts-Dämpfungsmaßes $\Delta D_{z,V,i}$ entsprechend Gl. (4.6). Zur Berechnung ist entsprechend Tabelle 4.4 der jeweilige Parametersatz in Abhängigkeit von der Oktavmittelfrequenz und der Knicklänge zu verwenden. Die Parameter sind Tabelle 4.5 zu entnehmen.

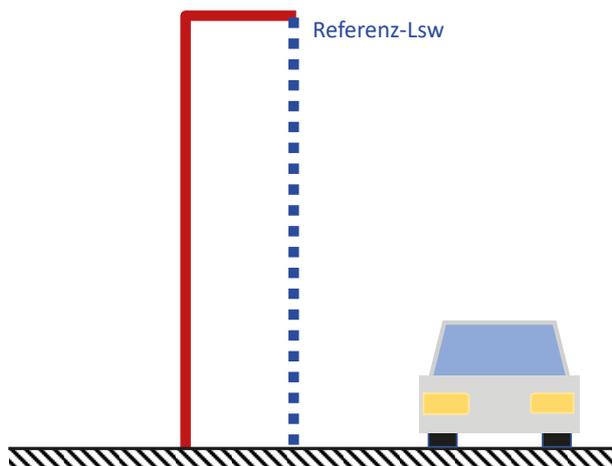


Bild 4-19: Position der Referenz-Lsw für einfach geknickte Lsw mit einem Klappenöffnungswinkel von 90°

Datensatz Nr.	$f_m = 250 \text{ Hz}$	$f_m = 500 \text{ Hz}$	$f_m = 1 \text{ kHz}$	$f_m = 2 \text{ kHz}$	$f_m = 4 \text{ kHz}$
$l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$	1	2	3	4	5
$l_{\text{Knick}} = 1,0 \text{ m}$	6	7	8	9	10
$l_{\text{Knick}} = 1,5 \text{ m}$	11	12	13	14	15
$l_{\text{Knick}} = 2,0 \text{ m}$	16	17	18	19	20

Tab. 4.4: Zuordnung der Datensatz-Nummer in Abhängigkeit von Knicklänge l_{Knick} und Oktav-Mittenfrequenz f_m

Knick-Länge	Oktave	D.-Nr.	a	b	c	d	e	g
$l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}$	250 Hz	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	500 Hz	2	-129,068	87,305	-8,469	2,448	0,523	-0,637
	1 kHz	3	-132,909	81,805	2,039	1,682	0,136	-0,119
	2 kHz	4	-168,271	74,973	15,849	1,909	0,185	-0,214
	4 kHz	5	-166,322	73,896	15,987	-1,063	0,184	-0,214
$l_{\text{Knick}} = 1,0 \text{ m}$	250 Hz	6	-12,933	17,583	-2,500	2,075	0,399	-0,483
	500 Hz	7	-14,071	18,015	1,798	1,867	0,138	-0,151
	1 kHz	8	-13,231	10,575	10,187	1,871	0,182	-0,226
	2 kHz	9	-13,643	3,720	19,278	1,845	0,143	-0,173
	4 kHz	10	-13,437	3,497	19,332	-1,129	0,142	-0,173
$l_{\text{Knick}} = 1,5 \text{ m}$	250 Hz	11	-2,621	5,140	1,501	1,915	0,046	-0,121
	500 Hz	12	-2,870	3,862	5,420	1,939	0,149	-0,194
	1 kHz	13	-3,524	2,415	10,325	1,814	0,165	-0,193
	2 kHz	14	-0,044	-6,990	19,319	1,669	0,138	-0,165
	4 kHz	15	0,123	-7,304	19,470	-1,315	0,136	-0,164
$l_{\text{Knick}} = 2,0 \text{ m}$	250 Hz	16	-1,209	2,767	2,416	1,959	0,188	-0,243
	500 Hz	17	-0,925	1,081	5,846	1,942	0,156	-0,215
	1 kHz	18	-0,534	-1,372	10,554	1,744	0,159	-0,184
	2 kHz	19	1,042	-7,375	18,043	1,544	0,141	-0,160
	4 kHz	20	1,039	-7,363	18,026	-1,423	0,140	-0,160

Tab. 4.5: Parameter der verschiedenen Datensatz-Nummern aus Tabelle 4.4 zur Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° in Abhängigkeit von Knicklänge l_{Knick} und Oktav-Mittenfrequenz f_m

Das Vorbeifahrts-Schirmmaß der Lsw $D_{z,V,i}$ im Oktavband i ergibt sich zu

$$D_{z,V,i} = D_{z,Ref,i} + \Delta D_{z,V,i} \quad (4.8)$$

Für Knicklängen, die zwischen den von der Tabelle der Regressionsparameter abgedeckten Werten liegen, sind der nächstgrößere und der nächstkleinere Wert der Regressionsparameter zu ermitteln und zwischen diesen linear zu interpolieren. Für Knicklängen größer 2 m sind die Regressionsparameter für $l_{\text{Knick}} = 2 \text{ m}$ zu verwenden. Für Knicklängen kleiner 0,5 m ist in Gl. (4.8) der Term $\Delta D_{z,V,i} = 0$ zu setzen. Für die Oktavbänder unterhalb von 250 Hz ist $\Delta D_{z,V,i} = 0$ anzusetzen. Für die Oktavbänder oberhalb von 4 kHz ist der Wert $\Delta D_{z,V,4\text{kHz}}$ (die Verbesserung, die sich im Oktavband 4 kHz ergibt) anzusetzen. Aufgrund des geringen spektralen Anteils des Straßenverkehrslärmspektrums in diesem Frequenzbereich ist mit einem vernachlässigbar geringen Fehler zu rechnen.

4.3.3 Berechnung der Wirksamkeit einer dreifach geknickten Lsw

Die Berechnung der Wirksamkeit einer dreifach geknickten Lsw erfolgt analog zu der einer einfach geknickten Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90° in Kapitel 4.3.1. Die Positionierung der Referenz-Lsw erfolgt ebenfalls analog zur Vorgehensweise in Kapitel 4.3.1.

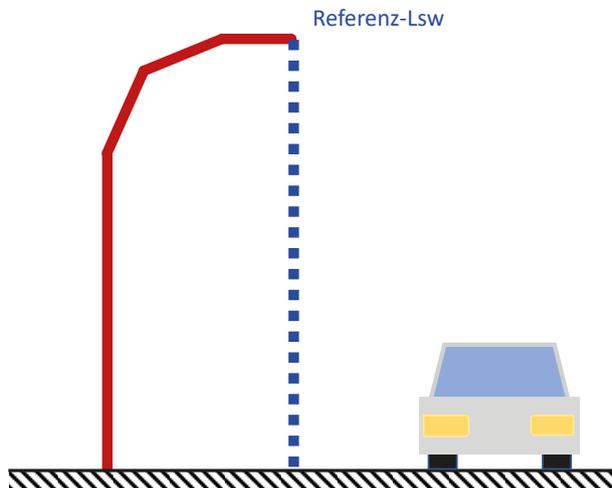


Bild 4-20: Position der Referenz-Lsw für dreifach geknickte Lsw

4.3.4 Berechnung der Wirksamkeit einer einfach geknickten, mit Impedanz belegten Lsw

Für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° kann eine Belegung der Oberkante mit schallabsorbierendem Material in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt werden. Hierfür werden zuerst die in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Schritte 1 (Berechnung der Wirksamkeit der Referenz-Lsw) und 2 (Berechnung der Verbesserung durch die geknickte Geometrie) durchgeführt. Anschließend wird die Zusatzdämpfung durch absorbierende Bekleidung der Oberkante berechnet zu

$$\Delta D_{z,abs,i} = [(\alpha_i - 0,5) \cdot 16 \cdot k] \text{ dB.} \quad (4.9)$$

Hierin ist α_i der Schallabsorptionsgrad im i -ten Oktavband. k ist ein Skalierungsfaktor zur Berücksichtigung der Klappenlänge und errechnet sich anhand von Gl. (3.4). Das Vorbeifahrts-Schirmmaß der Lsw ergibt sich zu

$$D_{z,V,i} = D_{z,Ref,i} + \Delta D_{z,V,i} + \Delta D_{z,abs,i}. \quad (4.10)$$

Die Herleitung der Gl. (4.9) ist in Kapitel 3.3.3, Abs. Einfluss des Schallabsorptionsgrads beschrieben. Diese stellt eine Abschätzung dar, die für große Distanzen und Empfängerhöhen nahe der Höhe der Lsw gilt. Für Empfängerpositionen nahe der Lsw und in geringer Höhe über dem Boden sind grundsätzlich höhere Werte der Zusatzdämpfung durch absorbierende Bekleidung der Oberkante zu erwarten.

4.4 Exemplarische Berechnung

Mithilfe des in Kapitel 4.3 beschriebenen Berechnungsmodells erfolgte für eine Auswahl von Lsw mit veränderter Geometrie bzw. teils angepasster Impedanz eine exemplarische Berechnung der Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw entsprechend [DIN ISO 96132]. Zu den gemäß dieser Norm ermittelten Werten der Einfügungsdämpfung wurde die Zusatzwirkung durch abweichende Geometrie bzw. veränderte Impedanz entsprechend Kapitel 4.3 addiert. Die Simulationen erfolgten für vier Empfängerpositionen in 15 m bzw. 25 m horizontaler Distanz zur Quelle sowie jeweils in 2 m und 4 m Höhe über dem Boden. Die verwendete Schallquelle stellt eine inkohärente Linienschallquelle mit einer Länge von ± 200 m (max. Teilstücklänge 1 m) dar. Der Bodenfaktor wurde im Quellbereich auf $G_s = 1$ (harter Boden) und im Empfänger- sowie Mittelbereich auf $G_r = G_m = 0,5$ (Mischboden) gesetzt. Zur Bestimmung des Gesamt-Schalldruckpegels $L_{p,ges}$ sowie des Gesamt-Vorbeifahrts-Schirmmaßes $D_{e,V,ges}$ fand das Straßenverkehrslärmspektrum aus Bild 3-38 für SMA, Pkw 100 km/h Anwendung. Die Berechnung erfolgte für eine 4 m hohe, senkrechte Lsw, deren Fußpunkt sich in 7,50 m horizontaler Distanz zur Schallquelle befindet sowie für vier verschiedene Lsw gleicher Höhe, deren Fußpunkte sich an derselben Stelle befinden:

- eine einfach geknickte, schallharte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel $\beta > 90^\circ$ und Gesamt-Überstand von 1 m (Berechnung gemäß Kapitel 4.3.1),
- eine einfach geknickte, schallharte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel $\beta = 90^\circ$ und Knicklänge 1 m (Berechnung gemäß Kapitel 4.3.2),
- eine einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel , und Knicklänge 1 m, deren Oberkante mit schallabsorbierendem Material belegt ist (Berechnung gemäß Kapitel 4.3.3, Schallabsorptionsgrad aus Bild 3-27) sowie
- eine dreifach geknickte, schallharte Lsw mit einem Gesamt-Überstand von 2 m (Berechnung gemäß Kapitel 4.3.4).

Für die Berechnungen kam die Analysesoftware Soundplan, Version 8.1 zum Einsatz.

In Bild 4-21 und Bild 4-22 ist die Einfügungsdämpfung der verschiedenen Lsw dargestellt. Entsprechend den Beobachtungen aus Kapitel 3.3 weist die einfach geknickte Lsw infolge der Verschiebung der ersten Beugungskante in Richtung der Quelle eine geringfügig höhere Wirksamkeit auf als die gerade Lsw mit demselben Fußpunkt. Gleichermaßen übersteigt die Wirksamkeit des Dreifachknicks jene der einfach geknickten Lsw mit $\beta > 90^\circ$ infolge der zusätzlichen Verschiebung der ersten Beugungskante in Richtung der Quelle (Überstand 2 m). Hier ergibt sich eine Verbesserung gegenüber der senkrechten Lsw von ca. 1 dB für eine Empfängerhöhe von 2 m, die mit ansteigender Empfängerhöhe zunimmt. Die einfach geknickte Lsw mit $\beta = 90^\circ$ weist im Frequenzbereich unterhalb von 4 kHz eine noch höhere Wirksamkeit auf, insbesondere für tiefer gelegene Empfänger. Hier stellt sich eine Reduzierung des Gesamt-Schalldruckpegels von bis zu ca. 4 dB ein. Mit zunehmender Empfängerhöhe nähert sich die Wirksamkeit des Einfachknicks mit $\beta = 90^\circ$ unterhalb von 4 kHz der Wirksamkeit des Dreifachknicks an. Oberhalb von 2 kHz stellen sich vereinzelt Werte der Wirksamkeit des Einfachknicks mit $\beta = 90^\circ$ ein, die geringfügig niedriger ausfallen als die Werte der geraden Lsw. Die größte Wirksamkeit weist der Einfachknick mit $\beta = 90^\circ$ und schallabsorbierender Bekleidung der Oberkante auf. Die schallabsorbierende Bekleidung liefert hier eine zusätzliche Verbesserung von bis zu ca. 6 dB gegenüber der schallharten Variante der geknickten Lsw.

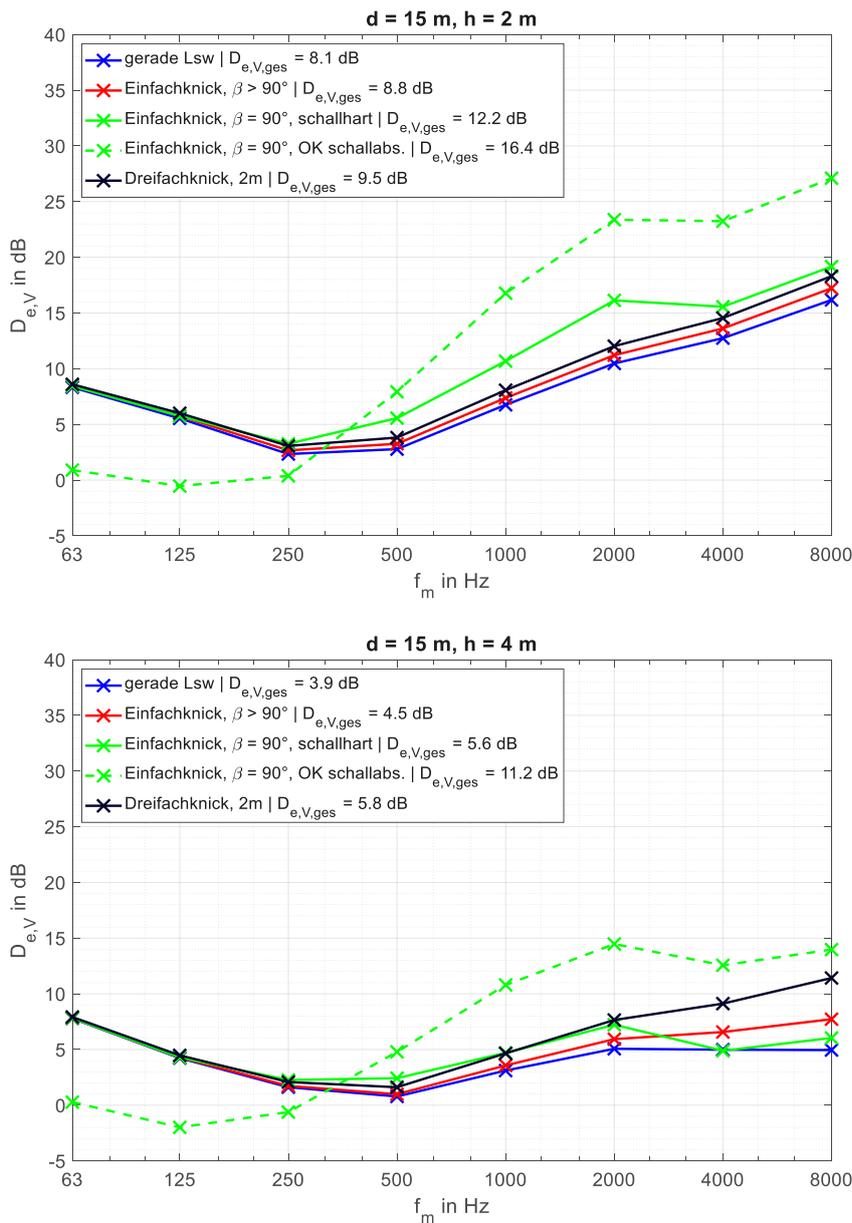


Bild 4-21: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw entsprechend [DIN ISO 96132] unter Verwendung der Zusatzterme aus Kapitel 0 als Oktavspektrum für Quell-Empfänger-Distanz $d = 15$ m und verschiedene Empfängerhöhen h ;
 oben: $h = 2$ m; unten: $h = 4$ m;
 blau: gerade Lsw (schallhart) in 7,50 m Distanz zur Straße;
 rot: einfach geknickte Lsw mit Überstand von 1 m und Fußpunkt identisch zur geraden Lsw;
 grün durchgezogen: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m (schallhart) mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw;
 grün gestrichelt: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m mit absorbierender Bekleidung der Oberkante mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw;
 schwarz: dreifach geknickte Lsw (schallhart) mit Überstand von 2 m, Fußpunkt identisch zur geraden Lsw

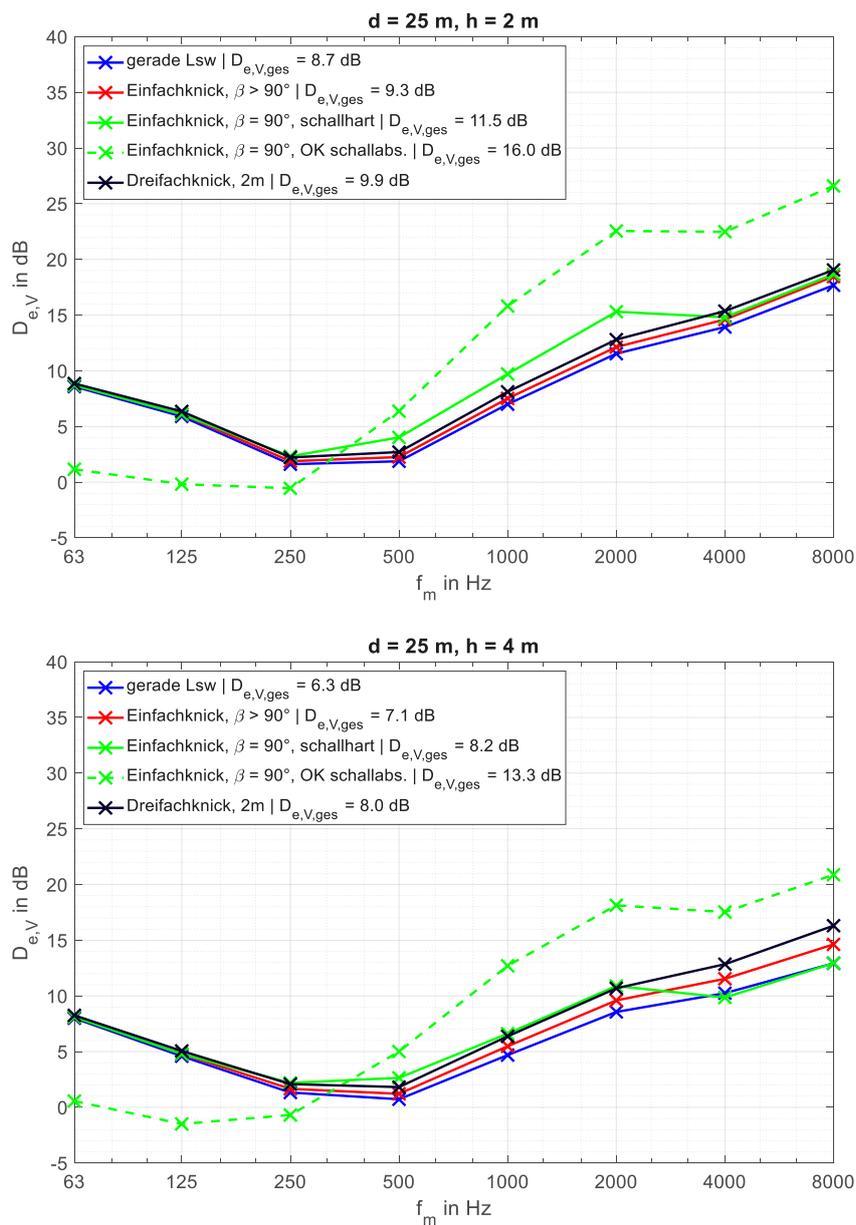


Bild 4-22: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw entsprechend [DIN ISO 96132] unter Verwendung der Zusatzterme aus Kapitel 0 als Oktavspektrum für Quell-Empfänger-Distanz $d = 25$ m und verschiedene Empfängerhöhen h ;
 oben: $h = 2$ m; unten: $h = 4$ m;
 blau: gerade Lsw (schallhart) in 7,50 m Distanz zur Straße;
 rot: einfach geknickte Lsw mit Überstand von 1 m und Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; grün durchgezogen: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m (schallhart) mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw;
 grün gestrichelt: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m mit absorbierender Bekleidung der Oberkante mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw;
 schwarz: dreifach geknickte Lsw (schallhart) mit Überstand von 2 m, Fußpunkt identisch zur geraden Lsw

5 Zusammenfassung

Lärmschutzwände (Lsw) dienen der Abschirmung von Immissionsorten wie beispielsweise Wohnbebauungen vor unerwünschtem Schall. Gegenüber konventionellen, ebenen, senkrecht stehenden Lsw lässt sich insbesondere durch abgeknickte und gekrümmte Lsw die erste Beugungskante näher an die abzuschirmende Lärmquelle heranbringen, um damit die akustische Wirksamkeit des Schallschirms an den maßgeblichen Immissionsorten auf der von der Quelle abgewandten Seite der Lsw zu erhöhen.

Um das volle Minderungspotenzial bei der Auslegung von Lärmschutzmaßnahmen berücksichtigen und detaillierte Aussagen zur Lärmsituation an den maßgeblichen Immissionsorten treffen zu können, ist es wichtig, möglichst genaue Berechnungsmodelle verfügbar zu haben. Für abgeknickte und gekrümmte bzw. mit unterschiedlicher Impedanz belegte Lsw liegen solche Berechnungsmodelle in den aktuellen „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS“ noch nicht vor, weshalb sie innerhalb des vorliegenden Vorhabens entwickelt werden sollten. Als Grundlage dafür waren numerische 3D-Simulationen der Schallausbreitung im Bereich solcher Lsw durchzuführen.

Stand der Technik

Im ersten Kapitel wurden bereits existierende Publikationen auf dem Gebiet der Einfügungsdämpfung und der Reflexion von Lsw gegenübergestellt und diskutiert. Es zeigte sich, dass die akustische Wirksamkeit komplexer Lsw-Geometrien sowie von Lsw-Aufsätzen zur Beeinflussung der Schallbeugung über die Oberkante der Lsw bereits vielfach untersucht wurde. Es bestätigte sich zumeist, dass solche Maßnahmen die Wirksamkeit der Lsw in weiten Teilen ihres Schattenbereichs verbessern. Zylindrische Lsw-Aufsätze und T-Profile bringen in der Theorie vor allem bei absorbierender und schallweicher Ausführung eine hohe Einfügungsdämpfung mit sich. Aber auch gekrümmte und geknickte Lsw verbessern in den meisten Fällen die akustische Wirksamkeit. Insbesondere ergibt sich bei diesen die Möglichkeit, die Ausrichtung der Lsw zur Straße (zugewandt oder abgewandt) zu variieren. Dabei stellen der Straße zugewandte Lsw für die meisten Geometrien die sicherere Variante dar, da bei derartig gekrümmten und abgeknickten Lsw lokale Pegelerhöhungen seltener auftreten, auch wenn die akustische Wirksamkeit lokal niedriger ausfallen kann als bei quellabgewandter Bauweise.

Bezüglich der Impedanzbelegung von Lsw zeigen zahlreiche Untersuchungen, dass bereits eine absorbierende Bekleidung einzelner Bereiche von Lsw bzw. von Aufsätzen zu einer maßgeblichen Verbesserung der akustischen Wirksamkeit führen kann. In mehreren Veröffentlichungen wurde festgestellt, dass eine schallweiche Auslegung vor allem der Oberkante bzw. der Aufsätze der Lsw eine weitere Steigerung der Wirksamkeit ermöglicht. Dabei stellten sich die Verwendung von Resonatoren, die mit einem Material geringen Strömungswiderstands belegt werden, sowie der Einsatz von Schroederdiffusoren als vielversprechende und unter Umständen weiter zu verfolgende Ansätze heraus.

Simulationen – Konzeption

Für die Konzeption der numerischen Simulationen zur Ermittlung der Schirmwirkung verschiedener komplexer Lsw – insbesondere der Pegelminderung im Fernfeld der von der Quelle abgewandten Seite – erschien die Untersuchung der Straße zugewandter gekrümmter bzw. geknickter Lsw mit teilweise absorbierender Auskleidung von Innenseite und

Oberkante zielführend. Um möglichst allgemeingültige Aussagen zu treffen, wurde der Einfluss verschiedener Geometrieparameter sowie der Impedanz der einzelnen Teilflächen auf die Wirksamkeit für verschiedene Quell-Lsw-Empfänger-Geometrien in den Fokus gestellt. Daraus ergab sich die Möglichkeit – ähnlich der Vorgehensweise in [ASJ RTN-Model 2018] zur Berücksichtigung spezieller Geometrien von Lsw – eine Matrix aufzuspannen, innerhalb derer eine frequenzabhängige Interpolation zur Ermittlung der Einfügungsdämpfung der Lsw in der betrachteten Ausbreitungssituation erfolgen kann.

Um die in der Realität als inkohärente Linienquelle ansehbare Straße möglichst realitätsnah wiederzugeben, wurde auf dreidimensionale FEM-Simulationen zurückgegriffen und zur Modellerstellung – entsprechend [RLS-19] bzw. [RLS-90] – eine Diskretisierung dieser Linienquelle in Form von einzelnen Punktquellen vorgenommen, deren Teilwirkung am maßgeblichen Immissionsort energetisch addiert wurde (Ermittlung der Wirkung einer kompletten Fahrzeugvorbeifahrt). Entsprechend der Länge der einzelnen realisierten Teilstücke fand die energetische Addition der Teilwirkung gewichtet statt.

Bei der Konzeption zeigte sich sehr schnell, dass ein zur Durchführung dreidimensionaler Simulationen erzeugtes vollständiges numerisches Berechnungsmodell die verfügbaren Berechnungskapazitäten bei Weitem übersteigt. Da die Anwendung der FEM die komplette Vernetzung des Luftvolumens zwischen Schallquelle und Empfänger erfordert, steigt die Anzahl der Berechnungspunkte potenziell mit der Frequenz an. Gleichzeitig muss jedoch sichergestellt sein, dass die Schallimmission hinter der Lsw durch die Schallausbreitung über die Schirmoberkante dominiert wird und die Schallausbreitung um die Seitenkanten der Lsw vernachlässigbar ist. Insbesondere zur Simulation der Schallausbreitung für große horizontale Schalleinfallswinkel nimmt die Größe des Berechnungsmodells bei vollständiger Vernetzung damit immens zu.

Zur erfolgreichen Durchführung der dreidimensionalen Simulationen wurde daher auf einen Vorteil der eingesetzten FEM zurückgegriffen und das numerische Berechnungsmodell durch Anwendung sogenannter PML (Perfectly Matched Layer) umseitig begrenzt. Diese PML erzeugen eine akustische Anpassung im Randbereich des Berechnungsgebiets, sodass keine relevante Schallreflexion in das interessierende Zentrum des Berechnungsgebiets und damit keine relevante Beeinflussung der Berechnungsergebnisse in diesem Bereich auftritt.

Ein Drehen der Lsw für die verschiedenen Einfallswinkel, wie es bei der analytischen Berechnung in den RLS auftritt, erfolgte bei den dreidimensionalen Simulationen nicht. Im Rahmen der ausführlichen Validierung des erstellten numerischen Berechnungsmodells konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der spektralen Einfügungsdämpfung für eine einfache, senkrechte Lsw durch dieses Drehen nicht beeinflusst wird. Auf davon abweichend geformte geknickte oder gekrümmte Lsw trifft diese Aussage jedoch nicht zu. Infolge der konstruktiven Überlagerung von einfallenden und an der Vorderseite der Lsw reflektierten Wellenanteilen – und dem damit verbundenen Auftreten lokaler spektraler Minima und Maxima des Schallfelds im Bereich der Lsw (Interferenzmuster) – spielen die exakte dreidimensionale Geometrie der Lsw sowie der spezifische Schalleinfallswinkel für die exakte Ermittlung der frequenzabhängigen Wirksamkeit eine ausschlaggebende Rolle. Im Verlauf des Vorhabens konnte allerdings nachgewiesen werden, dass diese Aussage oberhalb von ca. 500 Hz relativiert werden kann, sobald eine komplette Fahrzeugvorbeifahrt anstelle einzelner Schalleinfallswinkel sowie Oktavbänder anstelle einzelner Frequenzlinien betrachtet werden. Unter diesen Voraussetzungen – infolge der sowohl örtlichen als auch spektralen Mittelung des Interferenzmusters des Schallfelds im Bereich der Lsw – nehmen

dreidimensionale und zweidimensionale Simulationen auf Basis des Teilstückverfahrens weitgehend identische Ergebnisse an. Durch zusätzliche zweidimensionale Simulationen konnte daher die Bewertung der akustischen Wirksamkeit der untersuchten Lsw auf den höherfrequenten und energetisch relevanten Bereich des Verkehrslärmspektrums sowie größere Quell-Empfänger-Distanzen ausgedehnt werden.

Simulationen – Durchführung und Auswertung

Bei der Auswertung der numerischen Berechnungsergebnisse wurde der Fokus neben dem spektralen Schirmmaß insbesondere auf die Einfügungsdämpfung der jeweiligen komplexen Lsw gegenüber einer geraden, schallharten Lsw (Referenz) gelegt. Die numerischen Berechnungsergebnisse zeigten, dass einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° eine zuverlässige Pegelminderung über die Wirksamkeit der Verschiebung der maßgeblichen Beugungskante hinaus (gerade schallharte Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante) liefern. Für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90° sowie für die untersuchte dreifach geknickte Lsw ergibt sich zwar ebenfalls eine positive Wirksamkeit gegenüber der Referenz-Lsw, jedoch ist diese auf einen sehr kleinen Bereich hinter der Lsw begrenzt. In größerer Distanz nähert sich das Schirmmaß dieser Lsw jenem der Referenz-Lsw an.

Untersuchungen zur zusätzlichen Impedanzbelegung einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° zeigten, dass die innenseitige (quellseitige) absorbierende Bekleidung der Lsw keinen positiven Einfluss auf die Wirksamkeit im Schattenbereich aufweist. Eine Bekleidung der Oberkante der einfach geknickten Lsw mithilfe eines Materials mit einem Schallabsorptionsgrad größer ca. 0,5 kann dagegen eine signifikante Erhöhung der Schirmwirkung mit sich bringen. Die Zunahme des Schirmmaßes fällt umso höher aus, je höher der Schallabsorptionsgrad und je größer die Länge des oberseitig absorbierend verkleideten Knicks der Lsw sind.

Bezüglich der quellseitigen Schallreflexion an gekrümmten und geknickten Lsw ergaben die durchgeführten numerischen Untersuchungen, dass am maßgeblichen Immissionsort auf der Quellseite der Lsw durch die geometrische Veränderung der Lsw gegenüber der schallharten, senkrechten Referenz keine signifikante Erhöhung des Schalldruckpegels größer als 1 dB zu erwarten ist. Spektrale Pegelerhöhungen und -minderungen sind dabei stets sehr lokal begrenzt und umfassen zumeist einen Höhenbereich von deutlich weniger als 1 m. Im Gegenzug ist durch absorbierende Bekleidung der quellseitigen Oberfläche der Lsw eine zuverlässige Pegelminderung gegenüber einer schallharten, senkrechten Lsw erreichbar.

Berechnungsmodell

Auf Grundlage der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen erfolgte abschließend die Erstellung von Zusatzmodulen zur Berücksichtigung der spektralen Wirksamkeit geknickter Lsw bzw. unterschiedlich mit Impedanz belegter Lsw für die Anwendung innerhalb der [DIN ISO 96132] oder einer überarbeiteten Version der RLS. Dabei wurde insbesondere diskutiert, in welchem Maße es möglich ist, Verallgemeinerungen für konkrete Anwendungsfälle zu treffen und welche Einflussfaktoren als Eingangsparameter für die Module notwendig sind.

Es wurde als zielführend angesehen, die Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° mittels einer vereinfachten Berechnungsmethode zu beschreiben, während für die verbleibenden Geometrien eine Berücksichtigung in der

Schallausbreitungsberechnung dahingehend erfolgen kann, dass anstelle der Lsw mit komplexer Geometrie eine senkrechte Wand in das Modell aufgenommen wird, deren Oberkante sich an der Position der ersten Beugungskante der komplexen Wand befindet. In einem kleinen Teil des Nahbereichs der Lsw wird die Wirksamkeit der Lsw dadurch unterschätzt. Es handelt sich somit um eine Berechnung auf der sicheren Seite. Zur Berücksichtigung von absorbierend verkleideten, einfach geknickten Lsw erfolgte eine vereinfachte Berechnung einer Zusatzdämpfung in Abhängigkeit von geometrischen Parametern und dem Schallabsorptionsgrad.

Gegenüber den durchgeführten numerischen Simulationen ermöglichte das analytische Berechnungsmodell der AED aus Kapitel 2.5, das um die Schallausbreitung über Hindernisse mit zwei Beugungskanten aus [Plovsing 2001] erweitert und validiert werden konnte, die Berechnung des spektralen Vorbeifahrts-Schirmmaßes einfach geknickter Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel von 90° für eine Vielzahl von Quell-Empfänger-Geometrien und Parameterkombinationen der Lsw (z. B. Höhe, Knicklänge). Die ermittelten Ergebnisse wurden anschließend einer Regression anhand des zuvor als relevant erachteten Parameters der virtuellen Überhöhung der Lsw unterzogen, um eine Geometrie-Zusatzdämpfung dieser Bauweise von Lsw zu beschreiben. Die Entwicklung einer Impedanz-Zusatzdämpfung zur zusätzlichen Berücksichtigung eines oberseitig absorbierend verkleideten Knicks erfolgte in vereinfachter Form.

Abschließend kann die Wirksamkeit einer einfach geknickten bzw. einer dreifach geknickten Lsw anhand von bis zu drei Schritten ermittelt werden. Zu Beginn erfolgt in allen Fällen die Berechnung der Wirksamkeit einer senkrechten, schallharten Referenz-Lsw an der Position der ersten Beugungskante entsprechend Regelwerk, z. B. [DIN ISO 9613 2]). Sofern der Klappenöffnungswinkel einer einfach geknickten Lsw 90° beträgt, ist die entwickelte Geometrie-Zusatzdämpfung zu addieren. Im Falle, dass die Oberkante derselben Lsw mit schallabsorbierendem Material belegt ist, ist zudem die entwickelte Impedanz-Zusatzdämpfung zu vergeben. Sämtliche Berechnungen erfolgen für die einzelnen Oktavbänder getrennt.

Literatur

[ASJ RTN-Model 2018]

Sakamoto, S.: Road traffic noise prediction model "ASJ RTN-Model 2018": Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. *Acoust. Sci. & Tech.* 41, 1 (2020)

[Attenborough 1997]

Attenborough, K.: Ground effect for A-weighted noise in the presence of turbulence and refraction. *JASA*, Vol. 102 (2), 1013, 1997, doi.org/10.1121/1.419854

[Aznarez 2007]

Aznarez, J. J. et al.: A methodology for optimum design of Y-shape noise barriers. 19th international congress on acoustics, ica, madrid 2007

[bast.de]

bast.de (Hrsg.): RAL – Die neuen Straßentypen für Landstraßen; <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-strassentypen.html>

[Berengier 1997]

Berengier, M. C.; Stinson, M. R.; Hamet, J. F.: Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *JASA*, Vol. 101 (1), 155, 1997, doi.org/10.1121/1.417998

[Chien 1980]

Chien, C. F.; Soroka, W. W.: A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface. In: *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)* 69 (1980), September, Nr. 2, S. 340–343

[Diez 2010]

Diez, G. I. et al.: MAITE II: 3D Numerical Simulation for sound diffraction of added device. *InterNoise 2010*, June 13-16, Lisbon

[DIN EN 1793-3]

DIN EN 1793-3:1997-11: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum; Deutsche Fassung EN 1793-3:1997

[DIN ISO 9613-1]

DIN ISO 9613-1:1993-06: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft

[DIN ISO 96132]

DIN ISO 9613-2:1999-10: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996), 1999

[Embleton 1996]

Embleton, T. F. W.: Tutorial on sound propagation outdoors. *JASA*, Vol. 100 (1), 31, 1996, doi.org/10.1121/1.415879

[Fard 2013]

Fard, S. M. B. et al.: Numerical Study of Noise Barrier Designs. Proceedings of Acoustics 2013 – Victor Harbor, Australia 2013

[Hadden 1981]

Hadden, J. W.; Pierce, A. D.: Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations. JASA 69, 1266, 1981, doi.org/10.1121/1.385809

[Hänisch 2020]

Hänisch, F.; Heidebrunn, F.: Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe V: Verkehrstechnik (333), 2020

[Hoislbauer 2014]

Hoislbauer, H.: Entwicklung eines Rechenverfahrens für Lärmschutzwände mit komplexer Geometrie – Modellmessungen. 263. Plenarsitzung des ÖAL, Wien, 18.06.2014

[Hothersall 1991a]

Hothersall, D. C.; Chandler-Wilde, S. N.; Hajmirzae, M. N.: Efficiency of single noise barriers. JSV, Vol. 146 (2), 303-322, 1991, doi.org/10.1016/0022-460X(91)90765-C

[Hothersall 1991b]

Hothersall, D. C.; Crombie, D. H.; Chandler-Wilde, S. N.: The performance of t-profile and associated noise barriers. Applied Acoustics, Vol. 32 (4), 269-287, 1991, doi.org/10.1016/0003-682X(91)90075-P

[Huang 2020]

Huang, X., Zou, H., Qiu, X.: Effects of the Top Edge Impedance on Sound Barrier Diffraction. Appl. Sci. 2020, 10, 6042, doi.org/10.3390/app10176042

[Hübelt 1997]

Hübelt, J.; Sarradj, E.: Schallschirmversuchsstand. Fortschritte der Akustik – DAGA, 1997

[Hübelt 2007]

Hübelt, J.; Schulze, C.: Reflexion von Schallquellen an seitlichen Hindernissen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr Bau und Stadtentwicklung und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 973, September 2007

[ingenieur.de]

ingenieur.de (Hrsg.): Besseres Design von Lärmschutzwänden. 01.05.2018, <https://www.ingenieur.de/fachmedien/laermbekaempfung/laermwirkung/besseres-design-von-laermschutzwaenden/> (zuletzt abgerufen am 25.06.2021)

[Junker 2005]

Junker, F. et al.: Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance. Electricité de France, Département Analyses Mécaniques et Acoustique, Groupe T63 – Acoustique et Vibrations Sous Ecoulement, 2005

[Kamrath 2017]

Kamrath, M.: Extending standard outdoor noise propagation models to complex geometries. Dissertation, Le Mans Université, Université Bretagne Loire, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux, 2017

[Kokavec 2011a]

Kokavec, J.: Einfluss der Geometrie auf die Wirkung von Schallschutzwänden. genehmigte Dissertation TU Berlin, 2011

[Kokavec 2011b]

Kokavec, J.; Möser, M.: Verbesserung von Schallschutzwänden durch Aufsätze. DAGA 2011, Düsseldorf, 305-306

[Lam 1994]

Lam, Y. W.: Using Maekawa's Charts to Calculate Finite Length Barriers Insertion Loss. Applied Acoustics, Vol. 42(1), 1994, 29-40, doi.org/10.1016/0003-682X(94)90122-8

[Lee 2015]

Lee, J., Kim, I., Chang, S.: Analysis of highway reflection noise reduction using transparent noise barrier types. Environ. Eng. Res. 2015, 20(4): 383-391, doi.org/10.4491/eer.2015.065

[L'Esperance 1992]

L'Esperance et al.: Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile. Applied Acoustics, Vol. 37, 111-139, 1992, doi.org/10.1016/0003-682X(92)90022-K

[Li 1996]

Li, K. M.; Wang, Q.: Analytical solutions for outdoor sound propagation in the presence of wind. JASA, Vol. 102 (4), 2040, 1997, doi.org/10.1121/1.419692

[Li 1998]

Li, K. M.; Taherzadeh, S.; Attenborough, K.: An improved ray-tracing algorithm for predicting sound propagation outdoors. JASA, Vol. 104 (4), 2077, 1998, doi.org/10.1121/1.423721

[Maekawa 1968]

Maekawa, Z.: Noise reduction by Screens. Applied Acoustics, Vol. 1 (3), 157-173, 1968

[May 1980a]

May, D. N.; Osman, N. M.: Highway noise barriers: new shapes. JSV, Vol. 71 (1), 73-101, 1980, doi.org/10.1016/0022-460X(80)90410-1

[May 1980b]

May, D. N.; Osman, M. M.: The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto. JSV, Vol. 71 (1), 65-71, 1980, doi.org/10.1016/0022-460X(80)90409-5

[Mechel 2008]

Mechel, F. P.: Formulas of Acoustics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2008

[Monazzam 2005]

Monazzam, M., Lam, Y. W.: Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers. University of Salford, Manchester, 2005, doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.08.008

[Möser 1999]

Möser, M., Volz, R.: Improvement of sound barriers using headpieces with finite acoustic impedance. J. Acoust. Soc. Am. 106 (6), December 1999, doi.org/10.1121/1.428158

[Nord 2000]

DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics (Hrsg.): Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction. 2001

[Oismueller 2009]

Oismüller, A.: Effizienzvergleich von Lärmschutzmaßnahmen im Straßenbau unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009

[orange architekten]

orange architekten (Hrsg.), A. Weber, P. Tschada: C-Schale. Lärmschutzsystem für Bahnstrecken, Präsentation, www.c-schale.com

[Ostashev 2001]

Ostashev, V. E.; et al.: On the Refraction Law for a Sound Ray in a Moving Medium. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 87 (3), 303-306(4), 2001

[Plovsing 2001]

PLOVSING, B.; KRAGH, J.: Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction/DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics. 2001 (AV 1849/00). – Report on behalf of Nordic Noise Group

[Reken- en meetvoorschrift geluid 2012]

Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu van Nederland (Hrsg.): Reken- en meetvoorschrift geluid 2012, <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031722/2021-04-01> (zuletzt abgerufen am 25.06.2021)

[RLS-19]

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Ausgabe 2019

[RLS-90]

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Ausgabe 1990, berichtigte Fassung 1992

[RVS 04.02.11]

RVS 04.02.11: Berechnung von Schallemissionen und Lärmschutz, Arbeitsausschuss VU02 Verkehrsbedingte Immissionen – Lärm, Februar 2019

[Schulze 2015]

Schulze, C.: Mikrofonarrays zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung an verkürzten Lärmschutzwänden. Anerkannte Dissertation TU Dresden, 2015

[sonRoad 2004]

Heutschi, K.: SonRoad. Berechnungsmodell für Strassenlärm. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Lärm, Bern 2004

[Stinson 1995]

Stinson, M. R.: A note on the use of an approximate formula to predict sound fields above an impedance plane due to a point source. In: Journal of the Acoustical Society of America (JASA) 98 (1995), September, Nr. 3, S. 1810–1812

[Thorsson 2000]

Thorsson, P.: Influence of Different Barrier Surface Parts on the Insertion Loss. InterNoise 2000, 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 27-30 August 2000, Nice, France

[Volz 1997]

Volz, R., Möser, M.: Schallschirme mit zylinderförmigen Aufsätzen – erste Ergebnisse. Fortschritte der Akustik – DAGA 1997

[Watts 1994]

Watts, D. H.; Hothersall, D. C.: Acoustic Performance Of New Designs Of Traffic Noise Barriers: Full Scale Tests. JSV, Vol. 177 (3), 289-305, 1994, doi.org/10.1006/jsvi.1994.1435

[Waubke 2008]

Waubke, H., Kreuzer, W., Chen, Z.: Simulation of noise barrier insertion loss using the boundary element method. Acoustics 08 Paris, June 29-July 4, 2008

[Waubke 2013]

Waubke, H. et al.: Entwicklung eines vereinfachten Rechenverfahrens für Lärmschutzwände mit komplexer Geometrie. RELSKG, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Wien 2013

[Zhao 2015]

Zhao, S.; Qiu, X.; Cheng, J.: An integral equation method for calculating sound field diffracted by a rigid barrier on an impedance ground. J. Acoust. Soc. Am. 2015, 138, 1608–1613.

[Zuchowski 2019]

Zuchowski, R.; Nowoswiat, A.; Bochen, J.: Impact of an Edge Sound Reducer Built into the Upper Edge of the Acoustic Screen on the Distribution of Acoustic Field on the Receiver's Side. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 471 (3), 2019

[4SILENCE 2020]

4Silence (2020): Produktdatenblatt zu verschiedenen Diffraktoren der niederländischen Firma 4Silence.

Bilder

Bild 2-1: Verschiedene Geometrien von Lsw (Auswahl; Schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung); von links nach rechts: abgeknickt/Klappen-Profil, doppelt abgeknickt/doppeltes Klappen-Profil, T-Profil, Y-Profil, gekrümmte Lsw, zylindrische Schirmkrone, T-Profil mit Helmholtz-Resonatoren, T-Profil mit $\lambda/4$ -Resonatoren.....	16
Bild 2-2: Diffraktor WHIS®top der niederländischen Firma 4Silence aus (4SILENCE 2020)	17
Bild 2-3: Einfügungsdämmmaß einer Lsw mit klappenförmigem Aufsatz aus [Kokavec 2011b].....	18
Bild 2-4: Verbesserungsmaß eines klappenförmigen Lsw-Aufsatzes (Einfügungsdämpfung gegenüber senkrechter Wand); links: Geometrieparameter; mittig: Mess- und Berechnungsergebnis für Quellwinkel von 30°; rechts: Mess- und Berechnungsergebnis für Quellwinkel von 90° aus [Kokavec 2011b]	18
Bild 2-5: C-Schale als niedrige gekrümmte Lsw zur Abschirmung von Schienenverkehrslärm aus [orange architekten].....	20
Bild 2-6: Mittels BEM-Simulationen untersuchte unterschiedlich geformte Lsw aus [Waubke 2008]	21
Bild 2-7: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw aus [Watts 1994] in dB; links: Messergebnisse; rechts: BEM-Simulationsergebnisse.....	23
Bild 2-8: Rechnerische Untersuchung der Beeinflussung der Schallintensität in der Umgebung einer Lsw ohne Schirmkrone (links), mit einer Schirmkrone unendlicher Impedanz (mittig) bzw. mit einer Schirmkrone einer Impedanz von null (rechts) aus [Möser 1999].....	25
Bild 2-9: Mittels evolutionärem Algorithmus ermittelte Geometrie einer Y-förmigen Lsw zur Wiedergabe der akustischen Eigenschaften einer 3,5 m hohen (links) bzw. 4 m hohen (rechts) senkrechten Wand aus [Aznarez 2007].....	26
Bild 2-10: Ermittlung des Einflusses der akustischen Impedanz von Segmenten einer Lsw; links: Quell-Lsw-Empfänger-Geometrie; rechts: Definition der Segmente mit zu variierender Impedanz; Quellhöhe: 0,1 m aus [Thorsson 2000]	27
Bild 2-11: Einfügungsdämpfung einer Lsw mit Segmenten unterschiedlicher akustischer Impedanz aus [Thorsson 2000]	27
Bild 2-12: Immissionsschalldruckpegel an zwei Empfängerpositionen in Abhängigkeit vom Imaginärteil der Admittanz der Oberkante aus [Huang 2020] [Zhao 2015]; links: Empfängerposition 1; rechts: Empfängerposition 2.....	28

Bild 2-13: Schalldruckpegel- und Schallintensitätsverteilung bei 500 Hz im Bereich der Oberkante verschiedener Admittanz einer Lsw aus [Huang 2020]; a) „ungünstige“ Impedanz ($\text{Imag}(\beta) = 11,2 \cdot \beta_0$) aus Bild 2-12; b) schallhart ($\beta = 10^{-10}$); c) „günstige“ Impedanz ($\text{Imag}(\beta) = 27,3 \cdot \beta_0$); d) schallweich ($\beta = 10^{-10}$).....	29
Bild 2-14: Akustische Gesamtverbesserung von Lsw-Aufsätzen unterschiedlicher Geometrie für verschiedene Empfängerdistanzen bei Variation der Oberflächenimpedanz aus [Monazzam 2005]; a) T-Profil; b) zylindrische Schirmkrone; c) Pfeil-Profil; d) Y-Profil; links: reflektierende Ausführung der Aufsätze; mittig: absorbierende Ausführung der Aufsätze; rechts: Ausführung der Aufsätze mit Schroederdiffusoren	30
Bild 2-15: Umweg gegenüber der direkten, ungehinderten Schallausbreitung exemplarisch für ein T-Profil (links) sowie Definition der drei Zonen (rechts) aus [Waubke 2013]	31
Bild 2-16: Geometrische Parameter zur Ermittlung des Abstands d_C zwischen Empfänger und Kurve C [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012].....	33
Bild 2-17: Berechnungsschema des Verfahrens zur Bestimmung des Wertes C_T aus [Reken- en meetvoorschrift geluid 2012]	34
Bild 2-18: In ASJ RTN-Model 2018 berücksichtigbare Geometrien von Lsw aus [ASJ RTN-Model 2018]	34
Bild 2-19: Geometrieparameter zur Berechnung der Wirksamkeit von Lsw-Aufsätzen aus [ASJ RTN-Model 2018].....	35
Bild 2-20: Geometrieparameter zur Berechnung der Wirksamkeit eines Hindernisses mit zwei Beugungskanten aus [Plovsing 2001]	35
Bild 2-21: Winkel θ_{Hi} für die Berücksichtigung der vier relevanten Schallanteile am Empfänger zur Modellierung der Schallbeugung an einem keilförmigen Hindernis mit impedanzbelegten Flächen nach [Nord 2000] aus [Schulze 2015]	36
Bild 2-22: Prinzipielle geometrische Szenarien zur Simulation der spektralen Minderung des Schalldruckpegels am Referenzort infolge der verschiedenen Schallausbreitungseffekte bei freier Schallausbreitung über reflektierendem Boden (oben) sowie bei Schallausbreitung über die Lsw über reflektierendem Boden (unten) für einen horizontalen Schalleinfallswinkel zwischen Quelle und Empfänger von $\varphi_Q = 0^\circ$ (senkrechter Schalleinfall; Abstände in vertikaler Richtung gegenüber Abständen in horizontaler Richtung im Verhältnis von 2:1 dargestellt); aus [Schulze 2015] ...	40
Bild 3-1: Prinzipielle Darstellung verschiedener Vorgehensweisen zur Simulation der Schallausbreitung von Straßenverkehrslärm im Bereich einer Lsw.....	43
Bild 3-2: Modellierung der Schallreflexion am Boden auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells aus [Schulze 2015]	45
Bild 3-3: Berechnungsmodell mit Quell-Empfänger-Geometrie	46

Bild 3-4:	Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 0°, Terzmittenfrequenz 500 Hz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht.....	47
Bild 3-5:	Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 0°, Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht.....	47
Bild 3-6:	Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 60°, Terzmittenfrequenz 500 Hz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht.....	47
Bild 3-7:	Numerisches Berechnungsmodell zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw; Ermittlung der erforderlichen Mindestlänge der zu modellierenden Lsw auf Basis des Fresnel-Zonen-Modells; horizontaler Schalleinfallswinkel 60°, Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Seitenansicht.....	48
Bild 3-8:	Begrenzung des numerischem Berechnungsmodells zur Simulation der Schallausbreitung im Bereich von schallharter, gerader Lsw durch umseitige PML (ausgenommen des Bodens); horizontaler Schalleinfallswinkel 0°, Terzmittenfrequenz 1 kHz; links: 3D-Ansicht; rechts: Draufsicht	48
Bild 3-9:	Rechenzeit der numerischen 3D-FEM-Simulationen an gerader Lsw für verschiedene Terzbänder (drei Frequenzlinien je Terzband) und verschiedene horizontale Schalleinfallswinkel	49
Bild 3-10:	Angepasstes Berechnungsmodell mit Quell-Empfänger-Geometrie für numerische 3D-FEM-Simulationen.....	49
Bild 3-11:	Geometrische Anordnung der modellierten Punktschallquellen unter verschiedenen horizontalen Schalleinfallswinkeln (Quellwinkeln) zur Repräsentation definierter Teilstücke einer Straße; oben: bisheriges Modell; unten: angepasstes Modell	50
Bild 3-12:	2D-FEM-Simulationsmodell; Quell-Empfänger-Geometrie am Beispiel einer einfach geknickten Lsw; Seitenansicht; oben: Einfallswinkel 0°; unten: Einfallswinkel 60°	51
Bild 3-13:	2D-Simulationsmodell in Draufsicht; oben links: Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; oben rechts: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Immissionsorte IO bei gleichbleibender Quellposition; unten links: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Quellposition bei gleichbleibendem Immissionsort IO 2; unten rechts: Quellwinkel $\phi = 37,5^\circ$, „Verschiebung“ der Quellposition bei gleichbleibendem Immissionsort IO 4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung.....	52

Bild 3-14: Quell-Empfänger-Geometrie des dreidimensionalen Modells inkl. Schallausbreitungspfade zur analytischen Beschreibung der Schallausbreitung; exemplarische Darstellung für einfach geknickte Lsw; links: dreidimensionale Ansicht und Seitenansicht; rechts: Draufsicht; oben: Quellwinkel 0° ; mittig: Quellwinkel $37,5^\circ$; unten: Quellwinkel 60° ; grün: Pfad 1 (Quelle \rightarrow erste Beugungskante \rightarrow zweite Beugungskante \rightarrow Empfänger); gelb: Pfad 2 (Quelle \rightarrow Reflexion an Lsw \rightarrow erste Beugungskante \rightarrow zweite Beugungskante \rightarrow Empfänger).....	53
Bild 3-15: Kontinuierliches Spektrum des Immissionsschalldruckpegels bei freier Schallausbreitung für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m.....	54
Bild 3-16: Gesamtpegel des Immissionsschalldrucks bei freier Schallausbreitung in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Immissionsort und Schallquelle für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; Kreuze: 3D-FEM.....	54
Bild 3-17: Kontinuierliches Spektrum des Immissionsschalldruckpegels an gerader Lsw aus 3D-FEM-Simulationen für verschiedene Höhen des Immissionsorts h ; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$ links oben: $h = 1$ m; rechts oben: $h = 2$ m; links unten: $h = 3$ m; rechts unten: $h = 4$ m; blau: Ausgangszustand (10 cm dicke Lsw, schallharter Boden); rot: Modell um 5 m nach oben erweitert; gelb: Modellbreite verdoppelt; violett: unendlich dünne Lsw.....	55
Bild 3-18: Gerade Lsw G; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	57
Bild 3-19: Einfachknick E1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	58
Bild 3-20: Einfachknick E2; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	58
Bild 3-21: Einfachknick E3; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	59
Bild 3-22: Einfachknick E4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	60
Bild 3-23: Einfachknick E5; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	60
Bild 3-24: Einfachknick E6; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	61
Bild 3-25: Einfachknick E7; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	62
Bild 3-26: Dreifachknick D1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	62
Bild 3-27: Spektraler Schallabsorptionsgrad des angenommenen 5 cm dicken Schallabsorbers für senkrechten Schalleinfall	63
Bild 3-28: Einfach geknickte, absorbierende Lsw A1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung	63
Bild 3-29: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A2; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung.....	64
Bild 3-30: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A3; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung.....	64

Bild 3-31: Einfach geknickte, absorbierend verkleidete Lsw A4; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung.....	65
Bild 3-32: Schalldruckpegel für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; links: Freifeld; mittig: gerade Lsw G; rechts: einfach geknickte Lsw E3; oben: dreidimensionale Schnitt-Darstellung; unten: vertikale Schnitt-Darstellung	66
Bild 3-33: Vertikale Schnittdarstellung des Schalldruckpegels für einfach geknickte Lsw E3 für verschiedene Einzelfrequenzen aus 3D-FEM für Quellwinkel 0° ; links: 390 Hz; rechts: 287 Hz.....	66
Bild 3-34: Dreidimensionale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; links unten: gerade Lsw G; rechts unten: einfach geknickte Lsw E3 ...	67
Bild 3-35: Vertikale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; links unten: gerade Lsw G; rechts unten: einfach geknickte Lsw E3	68
Bild 3-36: Horizontale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 3D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; einfach geknickte Lsw E3; Schnittebene in 3,5 m Höhe parallel zum Boden.....	68
Bild 3-37: Vertikale Schnitt-Darstellung des Schalldruckpegels für Einzelfrequenz 315 Hz aus 2D-FEM; Quellwinkel $\phi = 60^\circ$; oben: freie Schallausbreitung; unten links: gerade Lsw G; unten rechts: einfach geknickte Lsw E3	68
Bild 3-38: Oktavband-Verkehrslärmspektren; dunkelblau: Messergebnis für Pkw mit 100 km/h auf SMA aus [Hänisch 2020]; hellblau: Messergebnis für Lkw mit 80 km/h auf SMA aus [Hänisch 2020]; dunkelgrün: Messergebnis für Pkw mit 100 km/h auf OPA aus [Hänisch 2020]; hellgrün: Messergebnis für Lkw mit 80 km/h auf OPA aus [Hänisch 2020]; schwarz: standardisiertes Verkehrslärmspektrum aus [DIN EN 1793-3]	70
Bild 3-39: Gesamt-Schirmmaß von gerader Lsw G in Abhängigkeit von der Quell-Empfänger-Distanz d für verschiedene Empfängerhöhen h; Quellwinkel $\phi = 0^\circ$; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung	70
Bild 3-40: Skizze zur Veranschaulichung der Ab- bzw. Zunahme des Schirmmaßes von gerader Lsw G durch Beeinflussung von effektiver Schirmhöhe h_s und Beugungswinkel ϕ_s bei steigender Distanz d zwischen Quelle und Empfänger; oben: Empfängerhöhe h = 1 m; unten: Empfängerhöhe h = 4 m....	71
Bild 3-41: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Abschirmmaßes der geraden Lsw G für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung	72
Bild 3-42: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der verschiedenen Lsw-Geometrien aus 3D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h; Quell-Empfänger-Distanz d = 10,5 m; schwarz: gerade Lsw; dunkelblau: Einfachknick E1; hellblau: Einfachknick E2; grau: Einfachknick E3; rot: Dreifachknick D1; oben: h = 1 m; unten: h = 2 m	77

- Bild 3-43: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der verschiedenen Lsw-Geometrien aus 3D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw; dunkelblau: Einfachknick E1; hellblau: Einfachknick E2; grau: Einfachknick E3; rot: Dreifachknick D1; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m 78
- Bild 3-44: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus 3DFEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw G; grau: Einfachknick E3; grün: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A1 (Innenseite); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen); gelb: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A3 (Innenseite + Oberkante außen); oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m 80
- Bild 3-45: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus 3DFEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; schwarz: gerade Lsw G; grau: Einfachknick E3; grün: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A1 (Innenseite); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen); gelb: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A3 (Innenseite + Oberkante außen); oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m 81
- Bild 3-46: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Impedanz aus modifizierter 3D-FEM; schwarz: gerade, schallharte Lsw G; grau: Einfachknick E3 (unendlich dünne, schallharte Lsw); pink: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 5 cm dickem Absorber entsprechend Ausgangs-Modellierung); dunkelviolett: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 10 cm dickem Absorber); hellrosa: einfach geknickte, absorbierend bekleidete Lsw A2 (Oberkante außen mit 5 cm dickem, realem Absorber); hellblau: Einfachknick E3 (1 cm dicke, schallharte Lsw); oben: $h = 1$ m; unten: $h = 4$ m 83
- Bild 3-47: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; pink: $h = 1$ m; gelb: $h = 2$ m; dunkelgrün: $h = 3$ m; violett: $h = 4$ m; $\phi = 20^\circ$ 84
- Bild 3-48: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für ausgewählte Quellwinkel ϕ und verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; pink: $h = 1$ m; gelb: $h = 2$ m; dunkelgrün: $h = 3$ m; violett: $h = 4$ m; oben: $\phi = 37,5^\circ$; unten: $\phi = 60^\circ$ 85
- Bild 3-49: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 25$ m 87

Bild 3-50: Terzbandspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E3 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 37,5$ m; unten: $d = 50$ m	88
Bild 3-51: Grundlegende Geometrie zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion gekrümmter und mit Impedanz belegter Lsw; E: Empfänger, Q: Schallquelle; grün: direkter Schallpfad von Quelle zu Empfänger; blau: Schallpfad von Quelle über senkrechten Teil der Lsw zu Empfänger; gelb: Schallpfad mit mehrfachen Reflexionen an senkrechtem Teil der Lsw, waagrechtem Teil der Lsw und Boden (exemplarisch).....	89
Bild 3-52: Simulationsmodell zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion; Querschnitt der Straße aus [bast.de].....	90
Bild 3-53: Schalldruckpegelverteilung (qualitativ) in Umgebung der Lsw zur Untersuchung der quellseitigen Reflexion für verschiedene Terzbänder; linke Spalte: $f_m = 500$ Hz; mittlere Spalte: $f_m = 1$ kHz; rechte Spalte: $f_m = 2$ kHz; von oben nach unten: G, E1, E2, E3, D1, A1	92
Bild 3-54: Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,0} = 125$ Hz; rot: $f_{m,0} = 250$ Hz; grün: $f_{m,0} = 500$ Hz; pink: $f_{m,0} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,0} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums; oben: E1, unten: E2.....	93
Bild 3-55: Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,0} = 125$ Hz; rot: $f_{m,0} = 250$ Hz; grün: $f_{m,0} = 500$ Hz; pink: $f_{m,0} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,0} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums; oben: E3, unten: D1	94
Bild 3-56: Schalldruckpegeldifferenz für A1, für verschiedene Oktavbänder; blau: $f_{m,0} = 125$ Hz; rot: $f_{m,0} = 250$ Hz; grün: $f_{m,0} = 500$ Hz; pink: $f_{m,0} = 1$ kHz; gelb: $f_{m,0} = 2$ kHz; schwarz: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums.....	95
Bild 3-57: Gesamt-Schalldruckpegeldifferenz für unterschiedliche Lsw-Geometrien unter Zugrundelegung des Verkehrslärmspektrums	95
Bild 3-58: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: E1; unten: E2	96
Bild 3-59: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: D1; unten: A1.....	97
Bild 3-60: Terzspektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes diverser gekrümmter Lsw für verschiedene Empfängerhöhen h bei Quell-Empfänger-Distanz von 10,5 m; durchgezogen: 3D-FEM; gestrichelt: 2D-FEM; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: A2; unten: A3.....	98

Bild 3-61: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m	99
Bild 3-62: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m	100
Bild 3-63: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 2$ m	101
Bild 3-64: Kontinuierliches Spektrum des Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d bei Quellwinkel 0° ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $d = 10,5$ m; rot: $d = 25$ m; grün: $d = 37,5$ m; blau: $d = 50$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m	102
Bild 3-65: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E4 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 37,5$ m	103
Bild 3-66: Kontinuierliches Spektrum des Vorbeifahrts-Schirmmaßes des Einfachknicks E5 für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; gestrichelt: 2D-FEM; gepunktet: analytische Berechnung; blau: $h = 1$ m; rot: $h = 2$ m; grün: $h = 3$ m; schwarz: $h = 4$ m; unten: $d = 10,5$ m; oben: $d = 37,5$ m.....	104
Bild 3-67: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten L_{sw} mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden L_{sw} G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; oben: $h = 1$ m ; unten: $h = 2$ m; hellblau: $h_K = 4/8 h_{L_{sw}}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{L_{sw}}$; blau: $h_K = 6/8 h_{L_{sw}}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{L_{sw}}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{L_{sw}}$ (= Einfachknick E3).....	107
Bild 3-68: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten L_{sw} mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden L_{sw} G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 10,5$ m; oben: $h = 3$ m; unten: $h = 4$ m; hellblau: $h_K = 4/8 h_{L_{sw}}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{L_{sw}}$; blau: $h_K = 6/8 h_{L_{sw}}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{L_{sw}}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{L_{sw}}$ (= Einfachknick E3).....	108

Bild 3-69: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der einfach geknickten Lsw mit variierender Höhe des Knick-Ansatzes gegenüber der geraden Lsw G aus 2D-FEM für verschiedene Empfängerhöhen h ; Quell-Empfänger-Distanz $d = 25$ m; oben: $h = 1$ m; unten: $h = 4$ m hellblau: $h_K = 4/8 h_{Lsw}$; dunkeltürkis: $h_K = 5/8 h_{Lsw}$; blau: $h_K = 6/8 h_{Lsw}$; helltürkis: $h_K = 7/8 h_{Lsw}$; hellgrau: $h_K = 8/8 h_{Lsw}$ (= Einfachknick E3).....	109
Bild 3-70: Geometrie des modifizierten Einfachknicks E3 _{mod} und des Dreifachknicks D1; schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung.....	110
Bild 3-71: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der dreifach geknickten Lsw aus 2D-FEM sowie der modifizierten einfach geknickten Lsw E3 _{mod} für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; oben: $d = 10,5$ m; unten: $d = 25$ m; rot: D1; hellrot: E3 _{mod}	111
Bild 3-72: Terzbandspektrum der Differenz des Vorbeifahrts-Schirmmaßes der dreifach geknickten Lsw aus 2D-FEM sowie der modifizierten einfach geknickten Lsw E3 _{mod} für verschiedene Empfängerhöhen h und Quell-Empfänger-Distanzen d ; oben: $d = 37,5$ m; unten: $d = 50$ m; rot: D1; hellrot: E3 _{mod}	112
Bild 3-73: Verhältnis aus Zusatzdämpfung durch absorbierende Bekleidung von A4 und A2 als Terzspektrum; Kurvenfarbe: Kombination aus Quell-Empfänger-Distanz und Empfängerhöhe.....	114
Bild 4-1: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw an der Position der ersten Beugungskante und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} , in Abhängigkeit von der effektiven Höhe h_{eff} ; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/ 1,5 m/2,0 m.....	117
Bild 4-2: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw an der Position der ersten Beugungskante und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von dem Produkt aus effektiver Höhe h_{eff} und Knicklänge l_{Knick} ; links: Anstieg; rechts: Offset; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m.....	118
Bild 4-3: Bestimmung der virtuellen Höhe der Lsw h_v	118
Bild 4-4: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von der virtuellen Höhe h_v ; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m.....	119
Bild 4-5: Anstieg m und Offset $D_{z,v}(f = 2\text{kHz})$ der als Basis für die Regression dienenden Daten für gerade Lsw und einfach geknickte Lsw mit verschiedenen Knicklängen l_{Knick} in Abhängigkeit von der virtuellen Überhöhung $h_v - h_{Lsw}$; links: Anstieg; rechts: Offset; Kreise: geknickte Lsw; Quadrate: gerade Lsw; blau/rot/grün/pink: Knicklänge 0,5 m/1,0 m/1,5 m/2,0 m.....	119

Bild 4-6:	Datenpunkte und Regression anhand verschiedener Funktionsgleichungen für Oktav-Mittenfrequenz 2 kHz; pinke Linie: Polynom 2. Ordnung (y_1); gelbe Linie: Polynom 3. Ordnung (y_2); schwarze Linie: Polynom 4. Ordnung (y_3); violette Linie: Polynom 5. Ordnung (y_4); türkise Linie: Bruchfunktion (y_5) von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	121
Bild 4-7:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 250 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	122
Bild 4-8:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	123
Bild 4-9:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 1 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	123
Bild 4-10:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 2 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	124
Bild 4-11:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 4 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$	124
Bild 4-12:	Datenpunkte und Regression anhand Polynom 3. Grades für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Punktfarbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	126
Bild 4-13:	Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 250 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	127
Bild 4-14:	Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 500 Hz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	127
Bild 4-15:	Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 1 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	128
Bild 4-16:	Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 2 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	128
Bild 4-17:	Datenpunkte und Regression anhand von Gl. (4.6) für Oktav-Mittenfrequenz 4 kHz; von links oben nach rechts unten: Knicklänge $l_{\text{Knick}} = 0,5 \text{ m}/1,0 \text{ m}/1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$; jede Farbe entspricht einer Kombination aus Wandhöhe h_{Lsw} und Quelldistanz der Wand x_0	129

Tab. 4.3: Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 anhand von Gl. (4.6) für verschiedene Oktavmittenfrequenzen f_m und Knicklängen l_{Knick}	129
Bild 4-18: Position der Referenz-Lsw für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-Öffnungswinkel größer 90°	131
Bild 4-19: Position der Referenz-Lsw für einfach geknickte Lsw mit einem Klappen-öffnungswinkel von 90°	131
Bild 4-20: Position der Referenz-Lsw für dreifach geknickte Lsw.....	133
Bild 4-21: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw entsprechend [DIN ISO 96132] unter Verwendung der Zusatzterme aus Kapitel 0 als Oktavspektrum für Quell-Empfänger-Distanz $d = 15$ m und verschiedene Empfängerhöhen h ; oben: $h = 2$ m; unten: $h = 4$ m; blau: gerade Lsw (schallhart) in 7,50 m Distanz zur Straße; rot: einfach geknickte Lsw mit Überstand von 1 m und Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; grün durchgezogen: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m (schallhart) mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; grün gestrichelt: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m mit absorbierender Bekleidung der Oberkante mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; schwarz: dreifach geknickte Lsw (schallhart) mit Überstand von 2 m, Fußpunkt identisch zur geraden Lsw	135
Bild 4-22: Einfügungsdämpfung verschiedener Lsw entsprechend [DIN ISO 96132] unter Verwendung der Zusatzterme aus Kapitel 0 als Oktavspektrum für Quell-Empfänger-Distanz $d = 25$ m und verschiedene Empfängerhöhen h ; oben: $h = 2$ m; unten: $h = 4$ m; blau: gerade Lsw (schallhart) in 7,50 m Distanz zur Straße; rot: einfach geknickte Lsw mit Überstand von 1 m und Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; grün durchgezogen: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m (schallhart) mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; grün gestrichelt: einfach geknickte Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° und Knicklänge von 1 m mit absorbierender Bekleidung der Oberkante mit Fußpunkt identisch zur geraden Lsw; schwarz: dreifach geknickte Lsw (schallhart) mit Überstand von 2 m, Fußpunkt identisch zur geraden Lsw	136

Tabellen

Tab. 2.1: Vergleich der Differenz der Einfügungsdämpfung einer hohen und einer niedrigen gekrümmten Lsw aus Messung und Berechnung für verschiedene Empfängerpositionen aus [Waubke 2013]	32
Tab. 3.1: Anzustrebende Linienzahl je Terzband zum Erreichen eines maximalen Fehlers von 1 dB für verschiedene Konfidenzintervalle aus [Junker 2005].....	44
Tab. 4.1: Bestimmtheitsmaß der Regression mithilfe der verschiedenen Funktionsgleichungen aus Gl. (4.1) bis Gl. (4.5)	122
Tab. 4.2: Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 anhand von Gl. (4.2) für verschiedene Oktavmittenfrequenzen f_m und Knicklängen l_{Knick}	125
Tab. 4.4: Zuordnung der Datensatz-Nummer in Abhängigkeit von Knicklänge l_{Knick} und Oktav-Mittenfrequenz f_m	132
Tab. 4.5: Parameter der verschiedenen Datensatz-Nummern aus Tabelle 4.4 zur Berechnung der Wirksamkeit einfach geknickter Lsw mit Klappen-Öffnungswinkel von 90° in Abhängigkeit von Knicklänge l_{Knick} und Oktav-Mittenfrequenz f_m	132

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2023

V 366: Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen

Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 367: In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 368: Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth

€ 20,00

V 369: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Fritz, Grigoropoulos, Kath, Baier, Reinartz, Schuckließ, Junghans, Lücken, Leonhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 370: Wissenschaftliche Begleitung des digitalen Testfelds auf der A9 zwischen München und Nürnberg

Vierkötter, Mischnick, Spangler, Gerstenberger, Windmann, Nedkov, Emmermann, Haspel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen

Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst

Hess, Best, Lohmeier, Temme

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-794-5
<https://doi.org/10.60850/bericht-v381>

www.bast.de