

Glasklare Lärmschutzwände -Auswirkung auf die Schallausbreitung GLAS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2018 **VIF 2018**

Juli 2022









Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien Radetzkystraße 2 1030 Wien

ÖBB-Infrastruktur AG Praterstern 3 1020 Wien

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft Austro Tower Schnirchgasse 17 1030 Wien **Bundesministerium** Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

ASFINAG

Für den Inhalt verantwortlich:

Österreichische Akademie der Wissenschaften Institut für Schallforschung Wohllebengasse 12-14 A-1040 Wien

Technische Universität Wien Institut für Verkehrswissenschaften Karlsplatz 13/230-2 A-1040 Wien

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH Thematische Programme Sensengasse 1 1090 Wien











Glasklare Lärmschutzwände -Auswirkung auf die Schallausbreitung GLAS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

Verkehrsinfrastrukturforschung

VIF2018

Autorinnen und Autoren:

Dipl.-Ing. Dr. Christian KASESS Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas MALY apl. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Holger WAUBKE

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz ÖBB-Infrastruktur AG Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Schallforschung





INHALTSVERZEICHNIS

0	EX	ECUTIVE SUMMARY	6
	0.1	DEUTSCHE VERSION	
	0.2	ENGLISCHE VERSION	7
1	EIN	ILEITUNG	9
	1.1	PROBLEMSTELLUNG	
	1.2	LÖSUNGSANSATZ	10
2	ME	SSUNGEN	13
	2.1	MESSTELLE	13
	2.2	TEMPORÄRE ANBRINGUNG REFLEKTIERENDER WANDELEMENTE	21
	2.3	MESSKONFIGURATION	24
	2.4	Messdurchführung	
3	BE	RECHNUNGEN MITTELS BEM	
	3.1	METHODE	
	3.2	VORSIMULATIONEN	
	3.3	VALIDIERUNG	43
4	AU	SBREITUNGSRECHNUNG NACH ÖAL 28	68
	4.1	BETRACHTETE ERGEBNISGRÖßEN	
	4.2	MEHRFACHREFLEXIONEN	69
	4.3	INTERPRETATIONSSPIELRAUM DER ÖAL 28	73
5	МС	DELLANPASSUNGEN	83
	5.1	SZENARIEN	83
	5.2	ANNAHMEN FÜR DIE BEM	84
	5.3	BEISPIEL	91
	5.4	ÖAL ADAPTIONEN	91
6	VE	RGLEICH BEM-ÖAL	105
	6.1	2 м ноне LSW	
	6.2	3 м ноне LSW	119
	6.3	4 м ноне LSW	
	6.4	WAGENKASTENFORM	139





7	BEI FLF	RÜCKSICHTIGUNG REFLEKTIERENDER LÄRMSCHUTZWAND-	143
			140
7	7.1	PROBLEMATIKEN BEI ANWENDUNG DES NORMENKREISES 16272	.143
7	7.2	ANSATZ EINER AUSBREITUNGSSPEZIFISCHEN ADAPTION	.145
7	7.3	EMPFOHLENE MODELLANPASSUNGEN	.146
7	7.4	EINFLUSSFAKTOR WAGENKASTENFORM	.148
8	ZUS	SAMMENFASSUNG	151
9	П	FRATURVERZEICHNIS	159
Ŭ			
AN	IHAN	IG A EFFEKTE UNTERSCHIEDLICHER WAGENKASTENFORMEN	163





0 EXECUTIVE SUMMARY

0.1 Deutsche Version

Ist die gleiszugewandte Seite einer Lärmschutzwand schallreflektierend, so entstehen Mehrfachreflexionen zwischen der Wand und den Wagenkästen eines Zuges, welche die Abschirmwirkung der Lärmschutzwand mindern können. Aus diesem Grund sind Lärmschutzwände an Bahnstrecken stets hochabsorbierend ausgeführt.

Die aktuelle, nationale Umsetzung der Ausbreitungsrechnung des Europäischen Prognosemodells, die ÖAL-Richtlinie 28, beinhaltet eine Berechnungsmethode für solche Mehrfachreflexionen. Jedoch erlaubt es dieser Ansatz nicht ohne weiteres, ihn auch für teilreflektierende Bereiche, wie sie bei Verwendung von transparenten Wandelementen üblich ist, anzuwenden. Ziel des Projektes GLAS war es daher, Möglichkeiten zu finden, wie solche über die Wandhöhe variierenden Absorptionskoeffizienten berücksichtigt werden können und welchen Einschränkungen ein solcher Ansatz unterliegt.

Es wurden umfangreiche Messungen an einer zweigleisigen Bahnstrecke mit einer 2 m hohen, hochabsorbierenden, Lärmschutzwand durchgeführt. Um die schalltechnischen Effekte durch reflektierende Wandelemente messtechnisch erfassen zu können, wurden solche Elemente im Messquerschnitt durch temporär angebrachte Schalungsplatten auf der gleiszugewandten Wandseite nachgebildet. Es wurden vier verschiedene Konfigurationen gemessen: der Grundzustand, ein 1 m breiter reflektierender Streifen unmittelbar, sowie 0,5 m unterhalb der Oberkante der Lärmschutzwand und letztere Konfiguration mit nur jeder zweiten Platte montiert. Ein vergleichbarer Querschnitt ohne Lärmschutzwand in unmittelbarer Nähe diente als Referenzmessung, um das Rollgeräusch zu bestimmen. Die Messungen zeigten teils deutliche Effekte der reflektierenden Elemente, welche sowohl von der Wandkonfiguration als auch vom Wagentyp abhängig waren.

Mit den Messergebnissen konnte ein Berechnungsmodell basierend auf der 2.5D-Randelementemethode erfolgreich validiert werden, welches in weiterer Folge bei Vergleichen zur ÖAL 28 als Referenz diente. Das Hauptaugenmerk lag auf der Herleitung eines geeigneten Quellmodells für die Referenzberechnungen. Durch Platzierung der Quelle auf der der Lärmschutzwand zugewandten Schiene konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erzielt werden. Die Abweichungen lagen meist im Bereich von 1 dB, selten über 2 dB. Die Effekte der verschiedenen Wagenquerschnitte konnten gut nachgebildet werden, wobei einzelne Wagentypen, insbesondere bei Fahrzeugen mit komplexeren, seitlichen Reflexionsstrukturen, etwas größere Abweichungen zeigten.







Die Ergebnisse aus den Messungen und den Referenzberechnungen zeigen, dass eine Abbildung der Effekte reflektierender Teilbereiche in der Normengebung angezeigt ist und nur in der Ausbreitungsrechnung erfolgen kann. Der bestehende Berechnungsansatz für Mehrfachreflexionen nach ÖAL 28 bedarf jedoch entsprechender Anpassungen, um varijerende Materialeigenschaften berücksichtigen zu können. So bedarf es im Wesentlichen der in der ÖAL einer Anpassung der Quellposition und 28 vorgeschriebenen Wagenkastenposition, der Einführung Fresnelzonen für realitätsnahes von Reflexionsverhalten der Lärmschutzwand und einer Limitieruna der Anzahl an Mehrfachreflexionen.

Des Weiteren konnte der Einfluss der Wagenkastenform durch Analyse des Reflexionsverhaltens bei ausgewählten Wagentypen aufgezeigt werden. Während Personenzüge meist homogenes Verhalten aufweisen, welches durch die empfohlenen Anpassungen in der Ausbreitungsrechnung gut beschrieben wird, sind bei Güterwagen sehr unterschiedliche Effekte bis hin zum Fehlen signifikanter Reflexionen beobachtbar. Allgemein kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Reflexionsflächen kleiner als bei Personenwagen ausfallen und daher die Effekte geringer sind. Diese Unterschiede wurden grafisch aufbereitet und können als Grundlage für Entscheidungen in der Normengebung dienen, ob bzw. wie Güterverkehr gesondert zu berücksichtigen ist.

0.2 Englische Version

Noise barriers along railway lines are usually highly absorbing as sound hard or highly reflecting surfaces oriented towards the track lead to multiple reflections between train and barrier which may diminish the shielding effect of the barrier.

The ÖAL 28, which is the current Austrian implementation of the sound propagation part of the European noise mapping model, describes a calculation method for these reflections.

This approach, however, does not consider commonly used barriers combining highly absorbing and transparent and thus highly reflecting elements. The main aim of the project GLAS was to investigate the effects of absorption coefficients varying over the height of the barrier, a way to incorporate these effects into the existing calculation method, and the potential limitations of such an approach.

Extensive measurements were performed along a double-track line equipped with a 2 m high and highly absorbing noise barrier. In order to determine the effects of reflecting panels the noise barrier was modified by temporarily attaching wooden formliners to the side facing the track. Four different variants of the noise barrier composition were recorded: the highly







absorbing ground state, a 1 m high strip attached at the top as well as 0,5 m below the top of the barrier and for the latter in a fourth variant only every other panel was attached. A second cross-section in the immediate vicinity of the barrier served as a reference for determining the rolling noise. The measurements showed considerable effects of the reflecting panels which depend on the barrier variant as well as the type of rolling stock passing by.

The measurements were used to validate a 2.5D boundary element calculation model which was used as a reference for calculations using the ÖAL 28 model. The main focus for the reference model was to derive a suitable source model. Placing the source on top of the near rail lead to a good agreement between measurements and calculations with deviations mostly in the range of 1 dB and rarely more than 2 dB. The effects of the rolling stock were also partially reproduced in the calculations although for vehicles with more complex superstructures slightly higher deviations were observed.

The results from the measurements and reference calculations indicate the necessity of considering reflecting portions in standardized prediction models and that the only viable approach is the inclusion in the propagation model. The current approach for multiple reflections within the ÖAL 28 needs to be adjusted to incorporate varying material properties: the source position as well as the position of the vehicle body need to be adapted, Fresnel zones need to be introduced to achieve realistic reflections, and the number of reflections calculated needs to be limited.

Furthermore, the effect of the shape of the vehicle body was shown. While the effects for passenger trains were homogeneous and could be modelled in the propagation model, cargo trains yielded a wide range of effects of the reflecting panels up to a complete lack of any effect. Typically, however, cargo railcar bodies seem to have smaller reflecting portions than passenger trains and thus yield smaller effects of the reflecting. The differences were summarized graphically and can serve as a basis for standardization and for considerations about whether and how cargo traffic should be considered.





1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Lärmschutzwände (LSWs) sind momentan eine der wichtigsten Maßnahmen, um die Lärmbelastungen von Anrainern vor allem durch Verkehrslärm zu reduzieren. Der lärmmindernde Effekt bei LSWs entsteht durch die Veränderung der Schallausbreitung, d.h. Areale, in welchen keine direkte Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger besteht, sind am Besten geschützt. Durch die Beugung des Schalls an der Oberkante der LSW wird das Schallfeld so verändert, dass, abhängig von Frequenz, Entfernung der Quelle und des Empfängers zur Wand, Höhe der Quelle und des Empfängers usw. eine Abschwächung des Schalldrucks erreicht wird. Je höher die Wand desto stärker die Wirkung. Ein Problem das durch LSWs entsteht, ist aber die optische Barrierewirkung, welche natürlich stärker wird, je höher die LSW gebaut wird.

Um die Barrierewirkung zu reduzieren, wären transparente Materialien notwendig. Diese sind aber, im Gegensatz zu typischen hochabsorbierenden LSW-Materialien hochreflektierend, was zu unerwünschten Nebeneffekten führen kann. Einerseits können die Reflexionen den Lärmpegel auf der gegenüberliegenden Seite erhöhen, z.B. bei PKW-Verkehr, wo die Fahrzeuge selbst kein großes Hindernis für die Ausbreitung darstellen. Bei Zügen stellt aber das Verkehrsmittel selbst ebenfalls ein nicht zu vernachlässigendes Hindernis für die Schallausbreitung dar. Aufgrund der oftmals großen schallreflektierenden, meist senkrechten Flächen bei Zügen (insbesondere bei Personenzügen) können sich im Falle von schallharten Wandoberflächen Mehrfachreflexionen ausbilden, welche als Folge eines kleineren Beugungswinkels die Wirkung der Wände verringern würden. Der Effekt durch diese Reflexionen ist ähnlich zu einer Verschiebung der Quelle von der Wand weg. Werden die Reflexionen nicht durch Absorption abgeschwächt, kommen nun zu dem einem gebeugten Pfad mehrere Reflexionspfade hinzu, welche sich überlagern und daher zu höheren Schalldruckpegeln an Immissionsorten hinter der Wand führen.

Eine wichtige Frage die sich dadurch ergibt ist, wie stark durch die Integration einzelner transparenter Elemente die Wirkung der Lärmschutzwand beeinträchtigt wird. Die Parameter, welche hier von Interesse sind, sind einerseits die Größe, aber auch die vertikale Position der Elemente. Weiters stellt sich die Frage, ob und wie solche Veränderungen einer LSW in der Lärmkartierung berücksichtigt werden können. Ein weiterer Punkt ist, ob produktbezogene Normen über Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Lärmschutzwänden hier ebenfalls betroffen sind.





Die Aufgabe des Projektes GLAS ist es daher, durch umfangreiche Simulationen und in-situ Messungen einerseits den Effekt reflektierender Elemente systematisch zu untersuchen. Andererseits werden auf Basis dieser Simulationen und Messungen die Möglichkeiten bezüglich der Berücksichtigung teilreflektierender Wände in der Lärmkartierung, genauer der ÖAL 28 [1], untersucht.

1.2 Lösungsansatz

Um die Frage nach den Effekten und nach der Berücksichtigung transparenter Elemente in LSWs zu klären, wurde ein Lösungsansatz gewählt, der sich aus folgenden Teilen zusammensetzt:

- umfangreiche Simulationen mittels der Randelementmethode (Boundary Element Method, BEM) in 2.5D, um verschiedene Konfigurationen absorbierender und reflektierender Wandelemente zu analysieren
- akustische Messkampagne, in der die Wirkung verschiedener Anordnungen reflektierender Elemente bei realem Bahnbetrieb erfasst wird (die Auswahl erfolgt auf Basis der Ergebnisse von Vorsimulationen)
- Validierung der BEM-Berechnungen, welche als Referenzmodell dienen, mittels der Messdaten
- Abgleich der BEM-Rechenergebnisse mit der nationalen Umsetzung der Europäischen Berechnungsvorschriften (ÖAL 28 [1] für die Schallausbreitungsrechnung und zum Teil der RVE 04.01.02 [2] für die Emissionsprognose) gemäß des Annex II der Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [3] (Stand 2022)
- Evaluierung der Berücksichtigungsmöglichkeiten in der Ausbreitungsrechnung gemäß ÖAL 28 [1] und ggf. Erarbeitung eines vereinfachten Rechenmodells

BEM-Berechnungen

Die BEM ist ein Verfahren, das zur Berechnung von Schallfeldern z.B. durch Lösung der Wellengleichung verwendet werden kann. Der Vorteil der BEM ist, dass sehr komplexe Querschnitte simuliert werden können und die Methode sich unter bestimmten Bedingungen daher gut als Referenzmodell für die Berechnungen mit wesentlich einfacheren Berechnungsverfahren beispielsweise zur Lärmkartierung eignet. Die BEM wurde auch schon angewendet, um die Effekte verschiedener Lärmschutzwandquerschnitte [7], [8] zu simulieren.







Vor allem die Arbeit von Morgan et al. [8] ist hierbei interessant, da bereits gewisse Effekte der Platzierung von absorbierendem und reflektierendem Material und der Einfluss des Wagenkastens betrachtet wurden. Sowohl Absorption als auch die Form des Wagenkastens führten hier zu Änderungen des Einfügedämmmaßes. Mittels einer Kombination von BEM und Finite-Elemente-Methode untersuchten Bustos et al. [9] im Detail den Effekt der Platzierung von reflektierendem und absorbierendem Material. Sowohl Abstand als auch vertikale Platzierung wurden als Faktoren für die Wirkung der LSW identifiziert.

In beiden Arbeiten wurden allerdings reine zweidimensionale Ansätze verwendet, welche zwar sehr effizient sind und daher kurze Berechnungszeiten erlauben, denen aber auch eine unrealistische Annahme zugrunde liegt: das gesamte Schallfeld wird als konstant und kohärent in der Längsrichtung angenommen. Im Projekt GLAS soll die 2.5D-BEM [10], [11] verwendet werden, welche eine Zwischenstufe zwischen 2D und 3D darstellt. Sie erlaubt die Berechnung umfangreicher Variationen der LSW-Konfigurationen und der Umgebung. Ähnlich wie bei 2D-Ansätzen liegt auch der 2.5D-Methode die Annahme zugrunde, dass sowohl Geometrie als auch akustische Eigenschaften der Oberflächen in Fahrtrichtung konstant sind [12], [13]. Im Unterschied zu einem reinen zweidimensionalen Ansatz ist es aber möglich, punktförmige Quellen beliebig zu positionieren oder inkohärente Linienquellen zu berechnen.

Die BEM wurde in GLAS sowohl für die Bestimmung der Parameter der Messung verwendet als auch, nach der Validierung durch die Messungen, als Referenzmethode für die Schallausbreitungsrechnung gemäß des Europäischen Prognosemodells. Die Beschreibung der Details in Bezug auf Modellparameter und berechneter Situationen erfolgt in den jeweiligen Abschnitten dieses Ergebnisberichts.

Akustische Messungen bei verschiedenen Wandkonfigurationen

Im Rahmen von Vorsimulationen mittels BEM wurden eine sinnvolle Wandhöhe ermittelt, sowie 3 konkrete Konfigurationen der reflektierenden Elemente gewählt, welche einen möglichst großen Wirkungsbereich abdecken. Neben der Anordnung wurde auch jene Segmentlänge abgeschätzt, innerhalb welcher die reflektierenden Teilflächen der Wandoberfläche zu realisieren sind, ohne dass signifikante Einflüsse durch die vollabsorbierenden Wandbereiche zu erwarten sind. Und die konkreten Mikrofonpositionen wurden derart gewählt, dass bei verschiedenen Wandkonfigurationen die Ergebnisse der Vorsimulationen Differenzen aufweisen, die deutlich größer sind als die Unsicherheiten der Schallmessungen.

Anhand der Vorgaben durch die Vorsimulationen wurden im Anschluss geeignete Messstandorte an einer 2-gleisigen Strecke mit zumindest mittlerem Verkehrsaufkommen





ausgewählt. Da die Validierungen auf der Einfügedämmung der Lärmschutzwand beruhen, musste am Messstandort neben dem Messquerschnitt mit einer Lärmschutzwand (Testquerschnitt) auch ein nahegelegener Messquerschnitt mit freier Schallausbreitung und vergleichbarem Oberbau bestehen (Referenzquerschnitt), in welchem die gleichen Züge idealerweise im gleichen Geschwindigkeitsbereich verkehren.

Die akustischen Messungen erfolgten an jeweils 2 Messtagen je Wandkonfiguration, wobei Tage gewählt wurden, die möglichst frei von Windeinflüssen waren. Ergänzend wurden die Zuggeschwindigkeiten in beiden Querschnitten erfasst und die Zugkategorien mit protokolliert. Zudem wurden die akustischen Oberbauparameter (akustische Schienenrauheiten und Gleisabklingraten) in beiden Querschnitten und beiden Gleisen erhoben, um belastbare Vergleiche zwischen den Querschnitten, aber auch zwischen den Gleisen ziehen zu können.

Ausbreitungsrechnung nach ÖAL 28 und Produktnormenreihe ONR CEN/TS 16272

Als zentraler Ansatzpunkt für die Abbildung der Wirkung reflektierender Elemente in der Prognoserechnung wurde die Ausbreitungsrechnung angenommen. Hier war die Neufassung der ÖAL 28 [1] für die Schallausbreitungsrechnung, die im Wesentlichen auf dem aktuellen Annex II der Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [3] (eingeführt durch EU-Richtlinie 2015/996 [14] und zuletzt geändert durch die delegierte EU-Richtlinie 2021/1226 [15]) beruht, im Detail zu betrachten. Für die vorliegende Fragestellung war vor allem die Modellierung der Mehrfachreflexionen zwischen reflektierenden Lärmschutzwänden und den Seitenwänden von Schienenfahrzeugen essentiell. Im Zuge des Projektes wurde die Ausbreitungsrechnung gemäß dieser Richtlinie für einfaches ebenes Gelände, d.h. für konstanten Querschnitt, implementiert, um Berechnungsansätze für Wandkonfigurationen mit reflektierenden Die Fokussierung auf ein einfaches Geländemodell stellte dabei keine Einschränkung dar, da die Haupteffekte nahe an der Quelle auftreten und daher anzunehmen ist, dass die grundlegenden Schlussfolgerungen auch in komplexerem Gelände gelten.

Zusätzlich zur Ausbreitungsrechnung wurde auch die Relevanz der verschiedenen Teile der Normengruppe ONR CEN/TS 16272 in Bezug auf Wände mit reflektierenden Elementen betrachtet. Hier war vor allem der Teil 7 [6] relevant, der sich auf die in-situ Messung der Einfügungsdämpfung bezieht. Aufgrund der fehlenden Reflexionsfläche des Zuges erscheint allerdings die darin beschriebene Möglichkeit einer Messung mittels Lautsprecher problematisch. BEM-Simulationen ausgewählter Geometrien unter der Annahme einer Punktquelle ohne Wagenkasten wurden verwendet, um die Zulässigkeit dieses Verfahrens zu prüfen.





ASFINAG

2 MESSUNGEN

Zur Verifikation des Berechnungsmodells wurden akustische Messungen von Zugsvorbeifahrten in zwei benachbarten Querschnitten – einem Testquerschnitt mit einer Lärmschutzwand und einem Referenzquerschnitt ohne Lärmschutzwand – parallel durchgeführt. Zur Nachbildung der Reflexionseigenschaften transparenter Wandelemente wurden dabei die Absorptionseigenschaften von Teilen der Wand gezielt verändert. Im Folgenden wird daher sowohl auf die konkreten Messungen, als auch auf die betrachteten Wandkonfigurationen und deren Umsetzung näher eingegangen.

2.1 Messtelle

2.1.1 Anforderungen

Die wesentlichen Anforderungen bestanden zunächst in folgenden Punkten:

- 2-gleisige Strecke, um den Einfluss des Abstandes Zug-LSW zu bestimmen
- gerade Strecke mit mittlerem Verkehrsaufkommen, sodass ausreichend, repräsentative Messdaten gesammelt werden können
- LSW-Höhe von mindestens 2 m über der Schienenoberkante (SOK)
- auf der gleiszugewandten Seite hochabsorbierende Ausführung der LSW-Oberfläche
- Testquerschnitt mit möglichst freier Schallausbreitung für etwa 50 m hinter der LSW
- Referenzquerschnitt (ohne LSW) mit möglichst freier Schallausbreitung, welcher sich nahe des Testquerschnitts mit LSW befindet, um gleiche Züge bei vergleichbaren Geschwindigkeiten bzw. Betriebszuständen zu erfassen
- ausreichende Wandlänge zur Variation der Absorptionseigenschaften zur Nachbildung des Schallfeldes einer unendlich ausgedehnten Wand
- genügend Abstand vom Ende der Lärmschutzwand zu Test- und zu Referenzquerschnitt, um signifikante seitliche Beeinflussungen insbesondere bei langen Zügen zu vermeiden
- gute Zugänglichkeit durch Versorgungswege
- Messstelle im Großraum Wien, Niederösterreich, Burgenland oder der nördlichen Steiermark, um bei günstigen Witterungsbedingungen kurzfristig Messungen durchführen zu können

Um geeignete LSW-Höhen, Wandkonfigurationen und sinnvolle Messpunkte näher zu bestimmen, wurden im Rahmen von Vorsimulationen die zu erwartenden Schallfelder bei verschiedenen LSW-Höhen und einzelnen, reflektierenden LSW-Segmenten bestimmt (siehe Kapitel 3.2). Dabei zeigte sich, dass sich mit zunehmender Wandhöhe die durch reflektierende





Wandsegmente hervorgerufenen Änderungen in den Schallfeldern, die messtechnisch zuverlässig erfassbare Größenordnungen von zumindest einigen Dezibel aufweisen, vor allem in höhere Positionen verlagern. Zudem verdeutlichte sich, dass mit zunehmender Wandhöhe aufgrund der steigenden Absorptionsfläche für vergleichbare Effekte auch größere, reflektierende Flächen erforderlich sind. Aufgrund dieser Nachteile wurde daher der Fokus auf 2 m hohe Lärmschutzwände gelegt.

Des Weiteren konnte anhand der Vorsimulationen die erforderliche Länge für die Änderung der Absorptionseigenschaften, sowie die mindestens erforderlichen Abstände vom Wandende zum Test- und zum Referenzquerschnitt abgeschätzt werden. So bedarf es als Minimalanforderung einer Nachbildung von reflektierenden Wandsegmenten über einen Bereich von 100 m und das Wandende sollte sich zumindest rund 200 bis 250 m von den beiden Querschnitten entfernt befinden.

2.1.2 Messstelle Sarasdorf

Die Anforderungen einer 2-gleisigen Strecke und eines zumindest mittleren Verkehrsaufkommens erfüllen nur Hauptstrecken, welche mittels Google Maps und mit vom Auftraggeber bereitgestellten Streckenbildern nach potentiell geeigneten Messstellen abgesucht wurden. Da sich unmittelbar hinter Lärmschutzwänden meist bewohntes Gebiet befindet, schränken die Anforderungen einer freien Schallausbreitung bis rund 50 m hinter der Wand und der erforderliche Abstand von 200 bis 250 m zum Ende der Lärmschutzwand, die Anzahl an potentiellen Messorten stark ein. Die Forderung einer Wandhöhe von 2 m erfüllten davon schlussendlich nur zwei Bereiche der Ostbahn westlich und östlich von Sarasdorf.

Im Zuge von Begehungen dieser beiden Bereiche entstand der subjektive Eindruck, dass im Gegensatz zum Messtandort östlich von Sarasdorf am westlichen Messstandort der Straßenverkehr zu grenzwertig hohen Umgebungsgeräuschen in beiden Querschnitten, insbesondere in den entfernt liegenden Messpunkten, führt. Denn am westlichen Messstandort befindet sich im Referenzquerschnitt die Bundesstraße L 163 in deutlich geringem Abstand zur Bahnstrecke als beim westlichen Standort (~75 m vs. ~275 m). Im Testquerschnitt, in welchem aufgrund der Lärmschutzwand geringere Schalldruckpegel bei Zugsvorbeifahrten vorhanden sind, gleichen sich die Entfernungen zur Bundesstraße zwar etwas an (~300 m vs. ~200 m), jedoch hat der westliche Standort den Vorteil, dass Häuser neben der Bundesstraße eine direkte Sichtverbindung verhindern und somit die Straßengeräusche gemindert werden. Akustische Vormessungen an den beiden potentiellen Test- und Referenzquerschnitten mit einer Dauer von jeweils rund 45 min unterstrichen diesen subjektiven Eindruck. So fallen am Standort östlichen von Sarasdorf die Straßenverkehrsgeräusche gegenüber den



	Testquerschnitt (mit LSW)		Referenzo	querschnitt	
	Gleis 1	Gleis 2	Gleis 1	Gleis 2	
Strecke	Ostk	bahn	Ostbahn		
Kilometer	33	,78	34,30		
Breitengrad	48,023147	48,023109	48,022951	48,022915	
Längengrad	16,680207	16,680205	16,687092	16,687088	
Oberbau	Schotter	Schotter	Schotter	Schotter	
Schiene	UIC 60 E1	UIC 60 E1	UIC 60 E1	UIC 60 E1	
Schwellentyp	Beton	Beton	Beton	Beton	
Streckenneigung	-0,85 ‰	-0,85 ‰	-0,90 ‰	-0,90 ‰	
zulässige Geschwindigkeit	140 km/h	140 km/h	140 km/h	140 km/h	
Regelgleisabstand	4,0 m		4,0 m		
Abstand zu LSW-Mitte	4,44 m	8,51 m	-	-	

Tab. 2-1: Oberbauparameter beider Gleise von Test- und Referenzquerschnitt

Vorbeifahrtsgeräuschen der Züge deutlich geringer als am westlichen Standort aus. Konkret betragen am östlichen Standort die Differenzen zwischen den Medianen der Terzbandpegel von KFZ- und Zugsvorbeifahrten in dem für Straßenemissionen relevanten Frequenzbereich zwischen 1 und 2 kHz ca. 25-30 dB im Testquerschnitt und ca. 35 dB im Referenzquerschnitt, womit sie rund 5-10 dB größer sind als in den Querschnitten des westlichen Standorts.

Aus diesen Gründen wurde der Standort östlich von Sarasdorf gewählt. Konkret lag der Testquerschnitt bei km 33.78 und der Referenzquerschnitt bei km 34.30. Die akustischen Messungen erfolgten ausschließlich rechts der Bahn, sodass sich Gleis 2 mit der Leitha Regelfahrtrichtung nach Westen Richtung Bruck an näher den Mikrofonmesspunkten befand. Die Lärmschutzwand endet rund 240 m nach dem Test- bzw. 280 m vor dem Referenzquerschnitt, sodass in beiden Querschnitten selbst bei langen Zügen durch das Wandende keine signifikanten akustischen Einflüsse zu erwarten sind. Rund 200 m vor dem Testquerschnitt beginnt die Haltestelle Sarasdorf, sodass Schnellbahnen der Linie S60 im Testquerschnitt auf Gleis 1 verzögern und auf Gleis 2 beschleunigen. Die Oberbauparameter beider Querschnitte bzw. Gleise sind in Tab. 2-1 zusammengefasst.

2.1.3 Akustische Oberbauparameter

Die akustischen Schienenrauheiten und die Gleisabklingraten beider Messquerschnitte und beider Gleise wurden zeitnah nach den akustischen Messungen (9 Wochen nach dem ersten bzw. 1 Woche nach dem letzten Messtag) von Müller-BBM Rail Technologies GmbH messtechnisch ermittelt.





ASFINAG

Akustische Schienenrauheit

Die Schienenrauheiten wurden mit einem Schienenrauheitsmessgerät m|rail trolley von Müller-BBM (Typ M94757-2, SN 384618) gemäß EN 15610:2019 [16] bestimmt. Das Messgerät erlaubt eine kontinuierliche Erfassung, sodass für die Rauheitsmessungen, über die Minimalanforderung der Messnorm hinausgehend, ein Bereich von ±50 m um den jeweiligen Messquerschnitt gewählt wurde. Da die Breite des Fahrspiegels bzw. der Referenzfläche auf allen betrachteten Schienen über 30 mm betrug, wurden jeweils drei Messspuren erfasst. Die mittlere Spur wird als "0 mm" bezeichnet und befindet sich in einem Abstand von 40 mm zur Schienenaußenkante. Die verbleibenden beiden Spuren sind jeweils um 10 mm versetzt (Bezeichnungen "+10 mm" und "-10 mm", wobei positive Werte eine Messspur näher an der Schieneninnenkante bedeuten).

Ein Überblick über die energetischen Mittelwerte der Rauheiten der 100 m langen Schienensegmente wird in Abb. 2-1 gegeben (Berechnung auf Basis einer 4 m Segmentierung und einer 75% Überlappung). Dabei zeigt sich, dass die Grenzkurve der ÖNORM EN ISO 3095 [17] in der Regel deutlich unterschritten wird. Lediglich im Referenzquerschnitt zeigen die Rauheiten der inneren Messspuren auf beiden Schienen von Gleis 1 im mittleren Wellenlängenbereich etwas geringere Unterschreitungen bzw. wird die Grenzkurve bei einer Wellenlänge von 100 mm etwas überschritten. Auch bei Gleis 2 sind im Referenzquerschnitt - wenn auch geringere - Erhöhungen der Rauheiten der inneren Messspuren gegenüber den anderen Spuren zu verzeichnen. Detailauswertungen über die 100 m Schienensegmente zeigen, dass diese Rauheiterhöhungen kontinuierlich vorhanden sind. Der Theorie nach können derartige Rauheitserhöhungen zu höheren Emissionen im Referenz- gegenüber dem Testquerschnitt bei Zügen mit glatten Rädern im Frequenzbereich von bis zu rund 1 kHz bei üblichen Geschwindigkeiten führen. Jedoch bleibt in der Praxis die Frage offen, ob und in welchem Ausmaß die Kontaktflächen der Räder eines Fahrzeuges die Innenbereiche der beiden Fahrspiegeln tatsächlich überdecken. Da nachfolgend betrachtete, messtechnisch erfasste Schallsituationen stets eine Überlagerung der Emissionen mehrerer Radanregungen darstellen und auch die erhöhten Rauheiten die Grenzkurve kaum übersteigen, erscheinen die Messdaten trotz der etwas erhöhten Innenspurrauheiten zwischen den Messquerschnitten vergleichbar.

Abgesehen davon variieren die Rauheitspegel zwischen den Querschnitten in der Regel im Bereich von weniger als 5 dB. Aufgrund der sehr glatten Schienen und (aus Mangel an belastbaren Daten) unter Berufung auf Standardwerte für Radrauheiten der aktuellen, nationalen Umsetzung RVE 04.01.02 [2] des Europäischen Prognosemodells ist zu erwarten,

16









Abb. 2-1: Überblick der akustischen Schienenrauheiten im Testquerschnitt (obere beiden Diagramme) und im Referenzquerschnitt (untere beiden Diagramme), jeweils für das den Mikrofonmesspunkten entferntere Gleis 1 (1. und 3. Diagramm) und das nähere Gleis 2 (2. und 4. Diagramm), getrennt für die in Richtung aufsteigender Kilometrierung linke und rechte Schiene mit jeweils drei Messspuren (-10 mm, 0 mm und +10 mm bezogen auf einen Abstand von 40 mm zur Schienenaußenkante und mit positiven Werten hin zur Schieneninnenkante)





dass auch bei Kontaktpunkten abseits der Innenspuren selbst bei glatten Rädern die Rauheitsunterschiede nur geringe, in der Regel vernachlässigbare Emissionsänderungen hervorrufen.

Neben den Unterschieden in den mittleren Schienenrauheiten wurden bei Verläufen der Rauheitsspektren über die 100 m langen Schienensegmente auf Gleis 2 sowohl im Testquerschnitt (im Bereich vom Querschnitt bis zu rund 8 m davor), sowie im Referenzquerschnitt (im Bereich von rund 25 m bis 35 m vor dem Querschnitt) auf allen Messspuren beider Gleise lokal ausgeprägte Rauheitserhöhungen im langwelligen und zum Teil im mittleren Wellenlängenbereich erkannt. Eine Analyse der abgetasteten Höhenprofile zeigte hier Vertiefungen bis zu rund 150 µm, die – auch wenn die Abstände zwischen den Vertiefungen nicht mit typischen Achsabständen von Lokomotiven übereinstimmen – auf Schleuderstellen hindeuten. Da jedoch bei einer stichprobenweisen Prüfung von aufgezeichneten Vorbeifahrtsgeräuschen insbesondere leiser und/oder langsam fahrender Züge keine Auffälligkeiten wahrzunehmen waren, ist davon auszugehen, dass diese Unstetigkeiten in der Schienenoberfläche keinen signifikanten Einfluss auf die erfassten Schallsignale aufweisen.

Gleisabklingraten (Track Decay Rates, TDRs)

Zur Erfassung der Gleisabklingraten gemäß DIN EN 15461:2011 [18] wurden die Schienen mittels eines Impulshammers mehrfach angeregt und die Impulsantwort durch einen Beschleunigungssensor in jeweils definierten Abständen gemessen. Im Detail kamen folgende Messgeräte zum Einsatz:

- Beschleunigungsaufnehmer (Hersteller BBN, Typ 507-01, Seriennummer 0139)
- Impulshammer mit Stahlkappe und Zusatzmasse (Hersteller B&K, Typ 8202, Seriennummer 1514385)
- Mehrkanalmesssystem (Hersteller Mecalc, Typ MK-II mit Controller PQ12, Inputkarte SC427 und Inputmodul ICP429)

Die Schienentemperatur wurde mit einem Infrarot-Thermometer (Voltcraft IR 500-12S) erfasst und lag aufgrund der nächtlichen Messung im Bereich von 12,6 °C bis 14,4 °C. Die Schienentemperaturen wurden zwar während der akustischen Messungen nicht bestimmt, aufgrund der Umgebungstemperaturen und der Sonneneinstrahlung ist aber von deutlich höheren Schienentemperaturen auszugehen. Insofern sind in Abhängigkeit der Zwischenlageneigenschaften geänderte Abklingraten bei den akustischen Messungen möglich, jedoch ist von ähnlichen Änderungen in beiden Querschnitten auszugehen, sodass die Vergleichbarkeit der Querschnitte davon nicht beeinflusst wird.









Abb. 2-2: Überblick der Gleisabklingraten (links horizontal, rechts vertikal) im Testquerschnitt (obere beiden Diagramme) und im Referenzquerschnitt (untere beiden Diagramme), jeweils für das den Mikrofonmesspunkten entferntere Gleis 1 (Diagramme in 1. und 3. Zeile) und das nähere Gleis 2 (Diagramme in 2. und 4. Zeile)







In Abb. 2-2 wird ein Überblick über die ermittelten Gleisabklingraten gegeben. Die horizontalen Abklingraten, dargestellt in der linke Diagrammspalte, halten die Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 [3] in beiden Messquerschnitten bzw. auf beiden Gleisen nur im unteren Frequenzbereich ≤500 Hz nicht ein, während die vertikalen Abklingraten in der rechten Diagrammspalte nur auf Gleis 2, und hier vor allem im mittleren Frequenzbereich von 500 Hz bis 1 kHz die Grenzkurve unterschreiten. Bei Vergleich der Werte in beiden Querschnitten zeigen sich kaum Unterschiede, wenngleich Gleis 2 zum Teil klar geringere Abklingraten aufweist (horizontal vor allem im Frequenzbereich <1 kHz und vertikal von 400 Hz bis 2 kHz, insbesondere im Bereich um 600 Hz). Insofern sind zwar bei Zugsvorbeifahrten auf Gleis 2 höhere Emissionen um bis zu wenige Dezibel möglich (eine genauere Einschätzung würde die Kenntnis über isolierte Emissionsanteile von Schienen/Oberbau bzw. Rädern/Fahrzeugen oder gleichbedeutend von Gleis- und Fahrzeugtransferfunktionen erfordern), jedoch sind aufgrund der Abklingraten keine Emissionsunterschiede zwischen den Querschnitten zu erwarten.

2.1.4 Lärmschutzwand im Testquerschnitt

Bei der Lärmschutzwand im Testquerschnitt handelt es sich um eine Holzspanbetonlärmschutzwand mit einer Höhe von 2 m über der Schienenoberkante (SOK). Sowohl auf der bahnzugewandten Vorderseite, wie auch auf der bahnabgewandten Rückseite sind absorbierende Holzspanbetonelemente aufgebracht (siehe Abb. 2-3). In einem 0,5 m hohen Streifen unterhalb der Wandoberkante sind die Absorberelemente an beiden Seiten in



Abb. 2-3: Betonlärmschutzwand – Absorptionselemente auf der Vorderseite (links), auf der Rückseite (Mitte) und Seitenansicht der oberen Absorptionselemente (rechts)





einer waagrechten Wellenform ausgeführt, während sich in dem darunter liegenden, 2 m hohen Streifen Elemente mit senkrechter Wellenform an der Vorderseite und ebene Elemente geringerer Dicke an der Rückseite befinden. Auf beiden Seiten enden die Absorberelemente somit 0,5 m unterhalb der Schienenoberkante.

2.2 Temporäre Anbringung reflektierender Wandelemente

Da bei Betonwänden grundsätzlich eine Umschichtung der Wandelemente wirtschaftlich nachteilig ist und zudem im Testquerschnitt beide Wandseiten absorbierend ausgeführt sind, wurden entgegen ursprünglicher Ansätze zur Nachbildung reflektierender Wandelemente auf der Vorderseite temporär reflektierende Flächen installiert. Konkret wurden hierzu Schalungsplatten 3-SO der Firma Doka, mit einer Größe von 2,5 m x 1,0 m und einer Dicke von 27 mm verwendet.

2.2.1 Wandkonfigurationen

Für eine breite Verifikation des Rechenmodells war vorgesehen, die Absorptionseigenschaften der Lärmschutzwand anhand von drei verschiedenen Anordnungen reflektierender Elemente zu variieren. Hervorzuheben ist, dass dabei nicht nur eine realitätsnahe Nachbildung von Wänden mit transparenten Wandelementen im Vordergrund stand, sondern die Anordnung verschiedene Fälle von Mehrfachreflexionen bzw. Fragestellungen hinsichtlich des Rechenmodells abdecken sollte. Wie in Abb. 2-4 dargestellt, wurden ausgehend vom Originalzustand der Wand ohne reflektierende Elemente (Wandkonfiguration 0) mit den Schalungsplatten 1 m hohe, schallreflektierende Streifen beginnend bei der Wandoberkante (Wandkonfiguration 1) bzw. 0,5 m unterhalb der Wandoberkante (Wandkonfiguration 2) realisiert. Der entstehende, vergleichsweise hohe Anteil reflektierender Flächen der 2 m hohen Lärmschutzwand wurde aufgrund von Vorsimulationen bewusst gewählt, um entsprechende große und damit messtechnisch vorteilhafte Effekte in den Mikrofonmesspunkten zu erzeugen. Bei Wandkonfiguration 3 wurden gegenüber Konfiguration 2 jede zweite Schalungsplatte entfernt und damit der Anteil reflektierender Flächen halbiert, um Mischverhältnisse nachzustellen.

Die Wandkonfigurationen 1 bis 3 wurden jeweils über eine Gesamtlänge von 100 m symmetrisch zum Testquerschnitt ausgeführt (Details zur Wahl der Gesamtlänge siehe Kapitel 3.2.3). Akustische Störeinflüsse, die durch die höhere Wandabsorption abseits des ausgerüsteten Segments entstehen, können aufgrund der hohen Weglängen minimiert werden.

21









Abb. 2-4: Überblick über die Wandkonfigurationen, welche mit verschiedenen Anordnungen von 2,5 m x 1 m großen Schalungsplatten umgesetzt wurden (Höhenangaben beziehen sich auf die Schienenoberkante)

2.2.2 Konstruktion

Zur Anbringung der Schalungsplatten wurden Befestigungshaken aus Stahlprofilrohren mit rechteckigem Querschnitt (100 mm x 50 mm x 3 mm) angefertigt, welche eine Aufnahme der Schalungsplatten mittels Schraubverbindung in den zwei Höhen für die Wandkonfiguration 1 und 2 bzw. 3 vorsehen (siehe Abb. 2-5 und Abb. 2-6 Mitte). Die Haken liegen auf der Lärmschutzwand auf und werden für einen sicheren Halt auf der Wandrückseite mit einer Schraubverbindung geklemmt (Abb. 2-6, rechts). Um Störgeräusche durch Vibrationen bei Zugsvorbeifahrten zu vermeiden, wurden Gummielemente im Bereich der Kontaktfläche zur Wandoberseite, sowie rund um die Aufnahmepunkte für die Wandkonfiguration 2 bzw. 3 angebracht (blaue Elemente in der linken Skizze in Abb. 2-5 und Abb. 2-6 Mitte). Um Resonanzen durch die Hohlprofile zu vermeiden, wurde Montageschaum an den Enden der Haken eingebracht und plan abgeschnitten (Abb. 2-6, links oben).

Durch die Hakenbefestigung befanden sich die Schalungsplatten in den Wandkonfigurationen 1 bis 3 rund 6 cm vor den Absorptionselementen (Abb. 2-6, links oben). Bei den durchgehenden, reflektierenden Streifen in Konfiguration 1 und 2 wurden die Schalungsplatten dicht nebeneinander montiert, sodass sich etwaige Spalte auf wenige Millimeter beschränkten.









Abb. 2-5: Befestigung der Schalungsplatten mittels eigens angefertigter Haken aus Stahlprofilen am Beispiel der Wandkonfiguration 2



Abb. 2-6: Konstruktionsdetails - rund 6 cm breiter Spalt zwischen Lärmschutzwand und Schalungsplatten und mit Montageschaum geschlossenes Stahlhohlprofil der Befestigungshaken oben), Siebdruckplattenabdeckung des **Spaltes** (links bei Wandkonfiguration 1 (links unten), Schraubenbefestigung für Schalungsplattenaufnahme und Gummielemente zwischen Wand und Befestigungshaken zur Vermeidung von Störgeräuschen (Mitte), sowie Schraubklemmbefestigung der Befestigungshaken auf der Wandrückseite (rechts)

Um bei Konfiguration 1 eine möglichst definierte Beugekante zu erhalten, wurde der Spalt auf der Oberseite durch waagrecht montierte, 9 mm starke Siebdruckplatten geschlossen (Abb. 2-6, links unten). Um auch hier Störgeräusche zu vermeiden, wurde an den hinteren Enden der Siebdruckplatten, welche auf der Wandoberseite aufliegen, Moosgummidichtungen angebracht.





ASFINAG



Abb. 2-7: Illustrative Darstellung der Wandkonfigurationen 2 über eine Länge von 100 m (oben) und Detailausschnitte von Konfiguration 1 (links unten) und von Konfiguration 3 (rechts unten)

Zur Illustration der drei mit Schalungsplatten realisierten Wandkonfigurationen sind diese in Abb. 2-7 – im Fall von Konfiguration 2 über die gesamte Segmentlänge (oben) und im Fall von Konfiguration 1 und 3 als Detailansicht (links und rechts unten) – darstellt.

2.3 Messkonfiguration

Die akustischen Messungen im Testquerschnitt wurden stets durch parallele Messungen im Referenzquerschnitt mit einem unabhängigen Messsystem begleitet. Zudem wurden an einem einzelnen Messtag ausschließlich im Referenzquerschnitt die Vorbeifahrtsgeräusche mit einem erweiterten Messaufbau erfasst. Im Folgenden sind die drei unterschiedlichen Messkonfigurationen im Detail dokumentiert.

2.3.1 Testquerschnitt (parallele Messungen)

Das Gelände hinter der Lärmschutzwand ist leicht abfallend von rund 0,7 m unter SOK direkt hinter der Lärmschutzwand bis 1,4 m unter SOK in 25 m Entfernung zur Gleisachse von Gleis 2, Die stärkste Neigung besteht dabei unmittelbar hinter der Lärmschutzwand, während das Gelände in größerer Entfernung deutlich flacher verläuft (siehe Abb. 2-8). Im Anschluss an die Lärmschutzwand befindet sich ein ca. 6 m breiter Rasenstreifen, danach ein Maisfeld.





Um etwaige Störgeräusche im Ausbreitungsweg durch die Maispflanzen zu verhindern und zudem besser definierte akustische Bodenverhältnisse zu schaffen, wurden in einer rund 600 m² großen Schneise in Form eines gleichschenkeligen Dreiecks mit einem Öffnungswinkel von ~125°, welche bis 3 m hinter die 25 m Messpunkte reicht, die Pflanzen entfernt (siehe Abb. 2-9, oben).

Die Schallsituationen im Testquerschnitt wurden an 9 Messpunkten (zwei Punkte in 3,3 m, fünf Punkte in 7,5 m und weitere zwei Punkte in 25 m Entfernung zur Achse von Gleis 2) erfasst. Die konkreten Positionen wurden aufgrund von Vorsimulationen (siehe Kapitel 3.2.4) so gewählt, dass messbare Effekte durch reflektierende Wandelemente entsprechend der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Wandkonfigurationen 1 bis 3 zu erwarten sind.

Die genauen Positionen in Bezug auf Gleisachsen und Schienenoberkante sind in Abb. 2-8 grafisch dargestellt. Tab. 2-2 enthält neben diesen Informationen zusätzlich die Abstände zur Mittelachse der Lärmschutzwand, sowie die Höhen über der Geländeoberkante (GOK) und Angaben über die eingesetzten Mikrofone. Für die Mikrofone M1 und M2, welche vor der



Abb. 2-8: Anordnung der neun Mikrofone (M1 bis M9) im Testquerschnitt (alle Höhenangaben beziehen sich auf die Schienenoberkante)

	Abstand		Hö	bhe	Mikrofon		
Mikrofon	Achse Gleis 2	LSW- Mitte	über SOK	über GOK	Hersteller	Тур	Serien- nummer
M1	3,3 m	-1,2 m	2,8 m	3,7 m	PreSonus	PRM1	-
M2	3,3 m	-1,2 m	1,2 m	2,1 m	PreSonus	PRM1	-
M3	7,5 m	3,1 m	3,6 m	4,6 m	G.R.A.S	46AE	181735
M4	7,5 m	3,1 m	3,0 m	4,0 m	G.R.A.S	46AE	195125
M5	7,5 m	3,1 m	2,4 m	3,4 m	G.R.A.S	46AE	216621
M6	7,5 m	3,1 m	1,8 m	2,8 m	G.R.A.S	46AE	319662
M7	7,5 m	3,1 m	1,2 m	2,2 m	G.R.A.S	46AE	319463
M8	25,0 m	20,6 m	4,5 m	5,9 m	B&K	UA-1404	2487535
M9	25,0 m	20,6 m	2,0 m	3,4 m	B&K	UA-1404	2487534

Tab. 2-2: Überblick über die Positionen der Mikrofonmesspunkte und die verwendeten Mikrofontypen





ASFINAG



Abb. 2-9: Testquerschnitt hinter der Lärmschutzwand (oben), Realisierung der Mikrofonpositionen M1 und M2 vor der Lärmschutzwand mittels Wandhalterung (unten, links) und Illustration des Bereichs von vorbeifahrenden Fahrzeugen am Beispiel einer Lokomotive der Baureihe 1116, für welchen trotz einer 2 m Lärmschutzwand aus der Perspektive einer stehenden Person in rund 25 m Entfernung eine direkte Sichtverbindung besteht (unten, rechts)

Lärmschutzwand mittels einer eigens konstruierten Wandhalterung montiert waren (siehe Abb. 2-9, unten links), wurden ¼" Mikrofone mit geringerer Genauigkeit verwendet, da diese insensitiver im tiefen Frequenzbereich sind und daher nicht die Gefahr bestand aufgrund der durch die Zugsvorbeifahrten hervorgerufenen, großen Druckschwankungen zu übersteuern.

Die Mikrofonreihe M3 bis M7 in 7,5 m Entfernung diente vor allem der Untersuchung von Beugungseffekten, weshalb sie in ihrer Höhe um die Wandoberkante (asymmetrisch) angeordnet wurden (siehe Abb. 2-9, unten rechts). Um die Wirkung in weitere Entfernung beurteilen zu können, wurden zwei weitere Mikrofone in 25 m Entfernung (20,5 m hinter der LSW) angeordnet. Es ist festzuhalten, dass durch die Wandhöhe von 2 m über SOK die oberen Bereiche vorbeifahrender Züge darüber hinausragen und daher für höher liegende Geräuschquellen die Schirmwirkung durch die Lärmschutzwand stark abnimmt bzw. vernachlässigbar gering wird.

Zur Aufzeichnung der akustischen Signale kamen im Wesentlichen folgende akkubetriebene Hardwarekomponenten zum Einsatz, mit welchen die Messignale mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz erfasst wurden:





- 24-Kanal ICP[®]-Modul DIC24 (HEAD acoustics)
- M1 und M2 zusätzlich Audio/MIDI Interface E-MU 0404 USB (Creative Technology Ltd.)
- M8 und M9 zusätzlich Konditionierverstärker 2690 (Brüel & Kjaer)
- akustischer Kalibrator SV 30A der Firma Svantek (Seriennummer 29132)

Zur Achsdetektion wurden auf beiden Gleisen je ein Achszähler vom Typ RSR180 der Firma Frauscher installiert (0,2 m in aufsteigender Kilometrierung vor dem Messquerschnitt auf Gleis 1 und im Messquerschnitt auf Gleis 2). Die Torsignale der Achszähler wurden getrennt nach Gleis in das Aufzeichnungssystem DIC24 eingespeist. Mit Hilfe von im Referenzquerschnitt messtechnisch erfassten Achsabständen kann daraus auf die Geschwindigkeiten der Züge rückgeschlossen werden.

2.3.2 Referenzquerschnitt (parallele Messungen)

Im Referenzquerschnitt befindet sich neben dem Schotterbett ein ca. 4 m breiter Damm, sodass sich ein Einschnitt mit geringer Tiefe von ca. 0,9 m ergibt (siehe Abb. 2-11). Im Anschluss befindet sich eine nahezu ebene Wiesenfläche.

Zur Erfassung der Vorbeifahrtgeräusche wurden zwei Mikrofone M1 und M2 verwendet, deren Messpositionen – wie aus Abb. 2-10 bzw. Tab. 2-3 zu entnehmen ist – auch im Testquerschnitt bestehen (M7 und M8). Zudem handelt es sich bei M1 um den Standardmesspunkt für Emissionsmessungen von Zugsvorbeifahrten (vgl. Messpunkt A der ÖNORM EN ISO 3095 [17]).



Abb. 2-10: Anordnung der beiden Mikrofone (M1 und M2) im Referenzquerschnitt während der zum Testquerschnitt parallel durchgeführten Messungen (alle Höhenangaben beziehen sich auf die Schienenoberkante)

	Abstand	Höhe		Mikrofon		
Mikrofon	Achse Gleis 2	über SOK	über GOK	Hersteller	Тур	Serien- nummer
M1	7,5 m	1,2 m	1,5 m	G.R.A.S.	46AE	414089
M2	25,0 m	4,5 m	5,5 m	G.R.A.S.	46AE	414094

Tab. 2-3: Überblick über die Positionen der Mikrofonmesspunkte und die verwendeten Mikrofontypen





ASFINAG



Abb. 2-11: Gelände im Referenzquerschnitt bei zum Testquerschnitt parallel durchgeführten Messung (oben, links), Messposition M1 auf leichter Dammlage (unten, links), Doppellaserlichtschranke zur Geschwindigkeitsmessung (rechts, oben) und Anordnung der Laserlichtschranke und der Reflektoren knapp über der Schienenoberkante (rechts, unten)

Die Detektion der Zeitpunkte, an welchen die Achsen der Fahrzeuge den Messquerschnitt passieren, sowie die Bestimmung von Achsabständen und -geschwindigkeiten erfolgte mit einer Doppellaserlichtschranke, die unmittelbar über den Schienen quer zur Fahrtrichtung angeordnet war (siehe Abb. 2-11, rechts oben und rechts unten). Des Weiteren wurden von den Zugsvorbeifahrten Videoaufnahmen angefertigt, um neben der manuellen Protokollierung der Zugkategorien bzw. der Fahrzeugtypen eine zusätzliche Prüfmöglichkeit für die Auswertungen zur Verfügung zu haben.

Neben den in Tab. 2-3 erwähnten Mikrofonen bestand das akkubetriebene Gesamtmesssystem im Wesentlichen aus Folgenden Komponenten:

- CompactDAQ System, bestehend aus Chassis NI 9185 und Einschubkarten NI 9232 und NI 9401 (National Instruments)
- HD-Videokamera V727 (Panasonic)
- Doppellaserlichtschranke (Eigenbau)
- akustischer Kalibrator SV 30A der Firma Svantek (Seriennummer 29132)



Die akustischen Aufnahmen und die Erfassung der Lichtschrankensignale erfolgten mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz.

2.3.3 Referenzquerschnitt (Einzelmessung)

Der erweiterte Messaufbau bei der Einzelmessung im Referenzquerschnitt basiert auf den Mikrofonpositionen des Testquerschnitts. Lediglich die beiden gleisnahen Mikrofone M1 und M2 des Testquerschnitts wurden zur Erweiterung der Mikrofonreihe in 7,5 m Entfernung zur Achse von Gleis 2 eingesetzt. Konkret wurde M1 in einer Höhe von 4,2 m und M2 in einer Höhe von 0,6 m über der Schienenoberkante angeordnet. Die weiteren Mikrofonpositionen M3 bis M9 blieben hingegen gleich zum Testquerschnitt (siehe Abb. 2-12).

Durch den größeren Abstand zum näherliegenden Gleis 2 konnten auch für M1 und M2 die präzisieren ½" Mikrofone verwendet werden (siehe Tab. 2-4).

Zur Aufzeichnung wurde das Messsystem aus dem Testquerschnitt verwendet und um die Doppellaserlichtschranke ergänzt, weshalb die Abtrastraten 48 kHz betrugen. Des Weiteren wurden analog zu den parallel durchgeführten Messungen die Vorbeifahrten mittels einer Videokamera zu Kontrollzwecken erfasst.



Abb. 2-12: Anordnung der neun Mikrofone (M1 bis M9) bei Einzelmessung im Referenzquerschnitt (alle Höhenangaben beziehen sich auf die Schienenoberkante)

	Abstand	Höhe		Mikrofon		
Mikrofon	Achse Gleis 2	über SOK	über GOK	Hersteller	Тур	Serien- nummer
M1	3,3 m	4,2 m	4,5 m	G.R.A.S	46AE	414089
M2	3,3 m	0,6 m	0,9 m	G.R.A.S	46AE	414094
M3	7,5 m	3,6 m	3,9 m	G.R.A.S	46AE	181735
M4	7,5 m	3,0 m	3,3 m	G.R.A.S	46AE	195125
M5	7,5 m	2,4 m	2,7 m	G.R.A.S	46AE	216621
M6	7,5 m	1,8 m	2,1 m	G.R.A.S	46AE	319662
M7	7,5 m	1,2 m	1,8 m	G.R.A.S	46AE	319463
M8	25,0 m	4,5 m	5,5 m	B&K	UA-1404	2487535
M9	25,0 m	2,0 m	3,0 m	B&K	UA-1404	2487534

Tab. 2-4: Überblick über die Positionen der Mikrofonmesspunkte und die verwendeten Mikrofontypen





Abb. 2-13: Referenzquerschnitt bei Einzelmessung mit erweitertem Messumfang

2.4 Messdurchführung

Die in Test- und Referenzquerschnitt parallel durchgeführten Vorbeifahrtsmessungen wurden an 9 Messtagen im Sommer 2020 mit unterschiedlichen Wandkonfigurationen und die Einzelmessung im Referenzquerschnitt an einem weiteren Messtag vorgenommen. Die Entscheidung, ob Messungen stattfinden, wurde kurzfristig anhand von Wettervorhersagen getroffen, sodass bei allen Messungen trockene Bedingungen und in der Regel Windstille oder nur geringe Windstärken vorherrschten.

Ein chronologischer Überblick über die an den jeweiligen Messtagen vorhandene Wandkonfiguration und die jeweils erfassten Vorbeifahrten aller Züge, sowie getrennt nach

Messtag	Wand- konfiguration	Vorbeifahrten (Gleis 2 / Gleis 1)						
C C		Gesamt	Güterzug	Reisezug	NVZ 1	NVZ 2		
20. 7. 2020	0	35 / 32	2/6	3/3	5/5	17 / 15		
21. 7. 2020	0	43 / 51	5 / 10	4 / 4	7/7	23 / 23		
7. 8. 2020	1	57 / 52	12 / 11	4 / 4	8/7	25 / 25		
8. 8. 2020	1	41 / 42	11/8	2/5	7 / 8	14 / 14		
20. 8. 2020	2	77 / 77	10 / 17	5/6	10 / 11	36 / 35		
25. 8. 2020	2	48 / 44	7 / 12	3/3	5/6	22 / 20		
2. 9. 2020	3	48 / 47	9 / 11	3 / 4	7/7	23 / 23		
4. 9. 2020	3	74 / 75	13 / 15	5/7	11 / 10	36 / 36		
8. 9. 2020	0	61 / 57	11 / 13	2/1	8 / 8	29 / 28		
14. 9. 2020	-	72 / 69	13 / 17	2/1	11 / 10	38 / 35		

Tab. 2-5: Überblick der Wandkonfigurationen und Anzahl der messtechnisch erfassten Zugvorbeifahrten an den 10 Messtagen (letzter Messtag am 14. Sept. 2020 wegen Einzelmessung im Referenzquerschnitt ohne Angabe einer Wandkonfiguration), getrennt nach Gleisen (vor Aussonderung etwaiger Zugsbegegnungen in einer der Messquerschnitte oder Beschleunigungs- oder Bremsfahrten) und Separation nach den hauptsächlich verkehrenden Zugtypen (ohne Unterscheidung nach Einfach- und Doppelgarnituren)



den vier hauptsächlich verkehrenden Zugkategorien Güterzug, Reisezug, Nahverkehrszug 1 und 2 (NVZ 1 und NVZ 2) für Gleis 1 und 2 wird in Tab. 2-5 gegeben. Dabei sind folgende Punkte festzuhalten:

- Zugbegegnungen traten in beiden Messquerschnitten selten auf. Im jeweils anderen Messquerschnitt sind die Vorbeifahrtsmessungen in der Regel verwertbar, weshalb in Tab. 2-5 die Vorbeifahrten von Zügen im Messzeitraum querschnittsunabhängig ohne Abzug etwaiger Zugsbegegnungen angeführt sind.
- Die rund 200 m vor den Testquerschnitt endende Haltestelle wurde ausschließlich von der Schnellbahnlinie S60 angefahren, für welche NVZ2-Einfachgarnituren eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Distanz befanden sich diese Züge in der Regel auf Gleis 2 in der Beschleunigungsund auf Gleis 1 in der Bremsphase. Die mittleren Achsgeschwindigkeiten im Testguerschnitt lagen im Bereich von 60 bis 70 km/h mit Absolutwerten der Achsgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen erster und letzter Achse von 4 bis 7 km/h, während ein Großteil dieser Züge den Referenzquerschnitt mit deutlich höheren, mittleren Achsgeschwindigkeiten von 95 bis 105 km/h und mit Absolutwerten der Differenzen von meist unter 3 km/h passierten. Rund 1/3 der Vorbeifahrten von NVZ2-Zügen hielten hingegen nicht in Sarasdorf. Dabei handelte es sich um Doppelgarnituren, welche beide Querschnitte in der Regel konstant mit rund 135 bis 140 km/h durchfuhren, und damit für die nachfolgenden Auswertungen primär verwertbar waren.
- An den ersten beiden Messtagen (beide mit Wandkonfiguration 0) war bei Mikrofon M8 des Testquerschnitts während leiser Messphasen vor und nach Zugsvorbeifahrten, sowie bei Nullmessungen im FFT-Spektrum ein Störsignal zu erkennen, welches sich vor allem im Bereich um 6 kHz konzentrierte, jedoch auch geringere spektrale Anteile im Bereich um 3 kHz und bei Frequenzen über 10 kHz aufwies. Zudem unterlag das Störsignal nur bei leisen Zügen (bzw. bei Vorbeifahrten mit geringen Geschwindigkeiten) und dann in der Regel nur im Bereich um 6 kHz und (aufgrund des spektralen Abfalls des Vorbeifahrtgeräusches hin zu höheren Frequenzen) bei sehr hohen Frequenzen meist erst über 13 kHz im Spektrum zu erkennen. Als Ursache konnte ein Defekt im Kanal 18 des 24-kanaligen DIC24 Anschlusskabels eruiert werden, sodass ab dem dritten Messtag (7. Aug. 2020) dieser Kanal nicht mehr verwendet und die Mikrofone M8 und M9 auf Kanal 19 und 20 angeschlossen wurden. Trotz der sehr geringen Beeinflussung der Nutzsignale von M8 während Zugsvorbeifahrten wurde entschieden, die Messungen um einen zusätzlichen Messtag mit Wandkonfiguration 0 (8. Sept. 2020) zu erweitern.





Bei einer Detailanalyse zeigte sich, dass am 25. Aug. 2020 den Vorbeifahrtsgeräuschen der auf Gleis 2 verkehrenden Züge Schlaggeräusche ähnlich den Geräuschen bei Überfahren von Schienenstößen überlagert sind, welche vor allem bei den gleisnahen Mikrofonen (bis 7,5 m Entfernung zur Gleisachse) gut wahrnehmbar sind. Aufgrund von Zeitdifferenzen zwischen den Schlägen und den Achszeitpunkten in dem jeweiligen Querschnitt kann abgeschätzt werden, dass sich etwaige Unstetigkeiten rund 2 m vor dem Testquerschnitt bzw. rund 5 bis 6 m vor dem Referenzquerschnitt befunden haben müssen. Da diese Schlaggeräusche weder in den Messtagen davor, noch danach auftraten, können diese Unstetigkeiten von keinen dauerhaften Schäden der Schienenfahrflächen herrühren. Bei einer Besichtigung von Gleis 2 (von Positionen außerhalb des Gefahrenraumes) am 18. Sept. 2020 konnten keine Unstetigkeiten an besagten Stellen visuell gefunden oder akustisch wahrgenommen werden. Jedoch wurde etwa 90 m nach dem Referenzquerschnitt eine Ablagerung auf der rechten Schiene entdeckt (siehe Abb. 2-14, links), die bei Überfahrten von Zügen vergleichbare Schlaggeräusche verursachte. Im Zuge der Streckensperren zur Messung der akustischen Oberbauparameter am 21. Sept. 2020 wurden die Schienen genauer inspiziert. Allerdings waren weder Auffälligkeiten im Bereich der Querschnitte, noch die erwähnte Ablagerung auffindbar. Im Schotterbett wurden lediglich 2 Metallplättchen gefunden (siehe Abb. 2-14, rechts), die möglicherweise von Aufschweißungen bei Festbremsungen herrühren.

ASFINAG

Es wird daher vermutet, dass durch eine Zugfahrt zwischen 20. und 25. Aug. 2020 temporär Ablagerungen auf den Schienen von Gleis 2 aufgebracht wurden, welche bei Überfahrt Schlaggeräusche verursachten, die letztlich auch in den Aufzeichnungen



Abb. 2-14: Ablagerung auf rechter Schiene von Gleis 2 rund 90 m nach dem Referenzquerschnitt (links) und eines der im Schotterbett von Gleis 2 gefundenen Metallplättchen (rechts)







wiederzufinden waren. Die genaue Ursache für die Ablagerungen konnte jedoch nicht geklärt werden. Da die Bedienung der Messhardware von größerer Entfernung erfolgte, wurden die Schlaggeräusche nicht während der Messungen, sondern erst bei Analysen nach Beendigung der gesamten Messserie identifiziert, sodass eine Wiederholung des Messtages nicht mehr möglich war.

 Am 1. Sept. 2020 schloss Ungarn aufgrund von steigender COVID-Infektionszahlen seine Grenzen für nicht-ungarische Staatsbürger. Als Konsequenz wurde der Verkehr der Reisezüge nach Budapest Anfang Sept. reduziert, weshalb bei den beiden letzten Messtagen am 8. und 14. Sept. 2020 lediglich 3 Reisezüge die Messstellen passierten.







3 BERECHNUNGEN MITTELS BEM

Um sinnvolle Parameter für die Messungen zu bestimmen und ein Referenzmodell abzuleiten, wurden Berechnungen mittels der Randelementemethode (BEM) durchgeführt. Im Folgenden werden nun die Berechnungsmethode und die notwendigen Rahmenbedingungen dafür erläutert. Weiters werden die Ergebnisse der Berechnungen für die Messplanung und die Validierung des Quellmodells im Detail dargestellt.

3.1 Methode

Die Simulationen zur Messplanung, Modellbildung und auch später zur Abschätzung der Effekte verschiedener Wandkonfigurationen erfolgten mittels der 2.5D-Randelementmethode [10], [11]. Dabei wird ein Querschnitt für die zu simulierende Situation bestimmt, und dieser als unendlich lang und konstant angenommen. Daher eignet sich der 2.5D-Ansatz sehr gut für die Berechnung gerader Streckenabschnitte. Erst durch die Annahme eines konstanten Querschnittes lassen sich die im Projekt vorliegenden Situationen sinnvoll berechnen, da eine vollständige dreidimensionale Erfassung der zu berechnenden Situation zu sehr großen Modellen führt, welche entweder sehr lange Berechnungszeiten nach sich ziehen würden oder gar nicht berechenbar wären. Im Gegensatz zu der reinen 2D-Methode erlaubt es die 2.5D-Methode durch Simulation des zweidimensionalen Querschnittes unter der Annahme verschiedener Wellenzahlen in Längsrichtung auch Punkt- und inkohärente Linienquellen zu berechnen.

Die Berechnungen erfolgten in zwei Schritten. Erst wurde mittels der Annahme eines hypothetischen Querschnittes ermittelt, welche Wandhöhe, Konfigurationen der reflektierenden Anteile und Umbaulänge zielführend sind. Die Berechnungen zur Wahl der Messpositionen und später auch die Validierung mittels der Messdaten erfolgten auf Basis des tatsächlichen Querschnittes.

Für die Modellbildung wurden einerseits die bei der Messung verwendeten Wandkonfigurationen als auch verschiedene Zugtypen und Quellpositionen simuliert. Auf Basis dieser Simulationen erfolgte der Vergleich mit den Messungen um mögliche Quellmodelle abzuleiten, welche später für die systematische Variation verschiedener Konfigurationen verwendet wurden.

3.2 Vorsimulationen

In der Anfangsphase des Projekts erfolgten umfangreiche Simulationen um folgende Punkte vor den Umbauten und Messungen abzuklären:

34





- Welche Wandhöhe ist sinnvoll für die vorliegende Fragestellung?
- Wie lange sollte das umgebaute Segment sein, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten?
- Welche Wandkonfigurationen ergeben gut messbare Effekte?
- Welche Messpositionen sind dafür gut geeignet?

Diese Fragen lassen sich nicht unabhängig voneinander beantworten, da die Wandkonfigurationen sehr stark von der Wandhöhe abhängen, welche wiederum der wichtigste Punkt für die Identifizierung geeigneter Streckenabschnitte war. Realisierbare Messpositionen sind einerseits durch das Messequipment (z.B. maximale Messhöhe), andererseits durch die an der Messstelle vorhandenen Gegebenheiten (Geländeprofil, andere Lärmquellen) beeinflusst. Grundsätzlich wurde aber von 25 m Maximaldistanz ausgegangen, um den Einfluss meteorologischer Effekte gering zu halten. Die Länge des umzubauenden Segmentes ist eine Frage des zeitlichen und finanziellen Aufwands, aber auch des maximalen Abstandes der Messpositionen vom Gleis.

3.2.1 Simulierter Querschnitt

Abb. 3-1 zeigt den prinzipiellen Querschnitt für die Vorsimulationen. Die Wandhöhen wurden mit 2 m (links), 3 m und 4 m (rechts) angenommen. Quellpositionen wurden zum Teil aus [19] übernommen, und einige modifizierte Höhen wurden ebenfalls mitberechnet (100 mm über SOK und mit 410 mm über SOK eine etwas niedrigere Radhöhe). Für die Bestimmung der Messstellenparameter wurden die Radquelle (460 mm über SOK) und die Schienenquelle (SOK) als omnidirektionale Quellen und als horizontale Dipole betrachtet.



Abb. 3-1: Querschnitt für die 2 m hohe Wand (links) und die 4 m hohe Wand (rechts) zur Bestimmung der notwendigen Parameter für die Messstelle und den Umbau







3.2.2 Wandhöhe

Bei der Bestimmung der Wandhöhe ist ein wichtiger Punkt, messbare Effekte in Positionen zu erzielen, welche auch zugänglich sind (z.B. durch die maximal erreichbare Höhe bei der Mikrofonposition). Es wurden 2 m, 3 m und 4 m hohe Wände simuliert, wobei jeweils 1 m der Höhe als reflektierend angenommen wurde. Für die 2 m Wand war dieser Streifen entweder auf Höhe der Beugekante, 0,5 m oder 1 m darunter angeordnet. Bei 3 m und 4 m wurde dieser auf Höhe der Beugekante oder 1 m darunter angenommen. Die Berechnungen wurden für inkohärente Linienquellen und die bereits erwähnten Quellpositionen (Schiene auf SOK, Rad 460 mm über SOK) durchgeführt. Insgesamt zeigt sich, dass in gut zugänglichen Höhen bis zu 5 m über SOK bei niedrigeren Wänden größere Effekte durch die Modifikation erzielt werden (vgl. Abb. 3-2 und Abb. 3-3). Dies kann natürlich auch an der größeren absorbierenden



Abb. 3-2: Effekt der verschiedenen Wandkonfigurationen im Vergleich zur absorbierenden Wand und im direkten Vergleich (untere Abbildung) für eine 2 m hohe Wand bei 2 kHz für das Rad als Quelle








Abb. 3-3: Effekt der verschiedenen Wandkonfigurationen im Vergleich zur absorbierenden Wand und im direkten Vergleich (untere Abbildung) für eine 4 m hohe Wand bei 2 kHz für das Rad als Quelle

Restfläche von hohen Wänden liegen. Im direkten Vergleich zeigt sich bei 4 m zwar mehr Unterschied, aber der Effekt bei einem mittig oben platzierten Reflektor beginnt erst bei 5 bis 6 m. Weiters ist zu bedenken, dass die reflektierend ausgeprägte Beugekante hier einen Effekt produziert, der eigentlich nicht auf Reflexionen basiert. Dieser Effekt wird beim Vergleich zur Lärmkartierung im Detail analysiert.

Grundsätzlich zeigt sich bei anderen Quellpositionen oder Direktivitäten qualitativ ein ähnliches Bild. Da beim Vergleich mit den Messdaten noch genau auf die Effekte der Quellpositionen eingegangen wird, werden diese Daten hier nicht gezeigt. Ebenso wird später noch der Effekt der Bodenabsorption analysiert. Dieser ist typischerweise bei direktem Vergleich verschiedener gleich hoher Wände vernachlässigbar.

Zusammenfassend zeigt sich eine Lärmschutzwand mit 2 m Höhe über SOK als beste Variante. Einerseits werden große Effekte in gut zugänglichen Höhen erreicht, sofern das





ASFINAG

hinter der LSW liegende Gelände dies erlaubt. Anderseits sind auch nicht-akustische Faktoren relevant. Der Umbau ist bei einer niedrigeren Wand deutlich einfacher. Außerdem befinden sich höhere LSWs typischerweise an sehr stark befahrenen Hauptverkehrsrouten, was den Umbau ebenfalls erschwert.

3.2.3 Länge des Umbaus

Grundsätzlich ist klar, dass, je geringer die Länge des Umbaus, desto stärker die möglichen Abweichungen von der Idealsituation mit einem Umbau der deutlich länger ist als die Zuglänge. Um eine Abschätzung der minimalen notwendigen Länge des LSW-Umbaus durchzuführen, wurde ein einfacher geometrischer Ansatz gewählt. Es wurden die verschiedenen Situationen (vollständig absorbierend, oben und unten reflektierend) für Punktguellen bis 375 m seitlichem Versatz zum Messguerschnitt berechnet. Mithilfe dieser Punkte wurde eine fiktive Vorbeifahrt simuliert. Dafür wurden Achsmuster (auf dem 1 m-Raster) definiert und entlang des simulierten Bereichs (maximal ±375 m) verschoben. Aus den Achsmustern ergaben sich folgende Zuglängen: 120, 200, 250 und 340 m. Um eine Abschätzung der notwendigen Umbaulänge durchzuführen, wurden vier verschiedene Umbaulängen (zentriert um den Messguerschnitt) definiert: 60 m, 80 m, 100 m und 200 m. Für jede der Punktquellen (sprich Achsen) wurde bestimmt, ob die direkte Verbindung zum Empfängerpunkt auf dem Umbauabschnitt oder auf der Referenzwand (absorbierend) liegt und die jeweilige Berechnung herangezogen, um den Schalldruckpegel zu berechnen (ähnlich wie bei Lärmkartierungsberechnungen). Dieses Ergebnis wurde dann für jede Zugposition mit dem Ergebnis der Berechnung für einen vollständigen Umbau verglichen. Da sich natürlich die Reflexionen zwischen Wand und Zug entlang der Fahrtrichtung ausbreiten, entsteht in den Randbereichen ein gewisser Fehler, weswegen es sich hier nur um eine Abschätzung handelt. Abb. 3-4 zeigt den Verlauf der Abweichung als Funktion der Zugposition. Wenn der obere Bereich reflektierend ist, ergeben sich bei der omnidirektionalen Quelle auf Schienenhöhe relativ hohe Abweichungen, die mit steigender Länge des Umbaus wie zu erwarten geringer werden. Abb. 3-5 zeigt für einen etwas kürzeren Zug eine Übersicht des Fehlers in Abhängigkeit der Quellposition und der Direktivität. Um für den Großteil der Werte unterhalb 1 dB Abweichung zu bleiben, ist ein 100 m langer Umbau notwendig. Für längere Züge werden die Abweichungen noch geringfügig höher, für kürzere Züge (ca. 120 m) sind die Abweichungen für alle Wandkonfigurationen größtenteils unter 1 dB.

Wird der Messpunkt auf 50 m von der Gleisachse verschoben, steigen die Abweichungen um mehr als 0,5 dB an (Abb. 3-6).





ASFINAG



Abb. 3-4: Abhängigkeit der Veränderung des Einfügedämmmaß bei 2000 Hz in Abhängigkeit der modifizierten Lärmschutzwandlänge in 25 m Entfernung für einen 252 m langen Zug und einer omnidirektionalen Quelle auf Schienenhöhe



Abb. 3-5: Abhängigkeit der Veränderung des Einfügedämmmaß in Abhängigkeit der modifizierten Lärmschutzwandlänge in 25 m Entfernung für verschiedene Quelltypen über die Terzen von 630 Hz bis 2500 Hz und die zwei untersuchten Wandkonfigurationen bei einer Zuglänge von 204 m; die Zugposition wurde um ±20 m um den MQ variiert







Abb. 3-6: Abhängigkeit der Veränderung des Einfügedämmmaß in Abhängigkeit der modifizierten Lärmschutzwandlänge in 50 m Entfernung für verschiedene Quelltypen über die Terzen von 630 Hz bis 2500 Hz und die zwei untersuchten Wandkonfigurationen bei einer Zuglänge von 204 m; die Zugposition wurde um ±20 m um den MQ variiert

3.2.4 Messposition

Nachdem die Auswahl des Messquerschnittes erfolgt war und die Maße des Aufbaus und die Höhe der Lärmschutzwand bekannt waren, wurden die Messpositionen mittels eines an die Messstelle angepassten Querschnittes bestimmt. Die wichtigste Veränderung war, dass durch die Art des Umbaus die Platten als vorgelagert mit einem Abstand zur Lärmschutzwand abgebildet wurden (siehe Abb. 3-7). Die Halterungen können in der 2.5D-Methode nicht berücksichtigt werden, sollten aber aufgrund der relativ hohen Abstände keine große Rolle spielen. Für das absorbierende Material waren zu diesem Zeitpunkt keine Daten verfügbar, daher wurde weiterhin das Material der vorangegangenen Simulationen verwendet. Aus Berechnungen mit reflektierendem und absorbierendem Boden zeigte sich, dass für den Vergleich der LSWs der Boden eine untergeordnete Rolle spielt. Daher wurde der Boden reflektierend angenommen, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Im Prinzip wurde von einer maximalen Entfernung von 25 m ausgegangen, da dies eine typische Entfernung für Immissionsmessungen ist und meteorologische Effekte eher noch eine untergeordnete Rolle spielen. Außerdem: je weiter der Messpunkt vom Gleis entfernt ist, desto größer der Einfluss von weiter entfernten Punkten des Zuges, was sich wiederum auf die notwendige Länge des Umbaus auswirkt. Um Vergleichspunkte zur Emissionsmessung zu haben, wurden die Punkte knapp hinter der LSW auf 7,5 m Abstand von der Gleisachse gesetzt. Punkte zwischen LSW und Zug waren aufgrund der zu erfüllenden Sicherheitskriterien stark eingeschränkt.

GLAS



Abb. 3-7: Querschnitt für die 2 m hohe Wand oben reflektierend (Wandkonfiguration 1, links) und mittig reflektierend (Wandkonfigurationen 2 und 3, rechts) zur Bestimmung der notwendigen Parameter für die Messstelle und den Umbau

Abb. 3-8 und Abb. 3-9 zeigen die Veränderungen des Unterschieds zwischen teilreflektierenden Wänden und der absorbierenden Wand. Hier zeigt sich, dass die fünf durch graue Linien markierten Messpositionen in 7,4 m Entfernung sehr gut den Unterschied zwischen absorbierender und teilreflektierender Wand abbilden. Die aufgrund des verwendeten Rasters entstanden 0,1 m Abweichung zur tatsächlichen Messposition von 7,5 m spielen keine große Rolle da selbst eine Verschiebung um 1 m zur Wand hin ähnliche Effekte zeigt. Höhere Messpunkte, hier aufgrund des verwendeten Rasters in 7 m Entfernung, scheinen wenig sinnvoll, da die Effekte schnell abfallen.

Der Bereich zwischen LSW und Zug ist sehr empfindlich bzgl. vertikaler Verschiebungen. Daher ist es schwierig hier einen guten Messpunkt zu definieren. Es wurde versucht die Extrempunkte zu definieren. Die leicht unterschiedliche Positionierung zur Gleisachse produziert qualitativ ähnliche Ergebnisse. In 25 m Entfernung zeigen die verwendeten Messpunkte einen guten Kontrast, und hier wurde die maximale mögliche Höhe weitgehend ausgenutzt, welche durch das verfügbare, transportable Equipment limitiert ist. Insgesamt zeigen die Effekte eine starke Abhängigkeit von der Quellposition und vom Quelltyp. Da diese aber erst durch die Validierung bestimmt werden konnten, wurde diese Abhängigkeit nur bedingt berücksichtigt.

3.2.5 Wandkonfigurationen

Da bei einer 2 m hohen Wand eine reflektierende Ausführung des Bereiches von 0 bis 1 m über SOK nicht sinnvoll erscheint (vermutlich zu tief um eine optische Wirkung zu entfalten) und auch vom Aufwand her sehr hohe zusätzliche Kosten verursachen würde (längere Halterungen, um bis zur SOK zu gelangen) wurden reflektierende Elemente 1 m bis 2 m über









Abb. 3-8: Unterschiede zwischen oben reflektierender Wand und absorbierender Wand in Abhängigkeit vom Abstand zum Gleis und der Höhe über der Beugekante



Abb. 3-9: Unterschiede zwischen mittig reflektierender Wand und absorbierender Wand in Abhängigkeit vom Abstand zum Gleis und der Höhe über der Beugekante

SOK (Wandkonfiguration 1) und 0,5 m bis 1,5 m über SOK ausgewählt (Wandkonfigurationen 2 und 3). Die mittig platzierten Reflektoren (Wandkonfiguration 2) zeigen relativ hohe Effekte in einigen Messpositionen, daher wurde als letzte Wandkonfiguration (Wandkonfiguration 3) eine Variante gewählt, bei der jedes zweite Element entfernt wurde. Dies sollte den Effekt



haben, den Absorptionskoeffizienten in diesen Höhen zu reduzieren um damit eine Zwischenvariante zu produzieren.

3.3 Validierung

3.3.1 Berechnungsmodelle

Grundsätzlich blieb der LSW-Querschnitt wie zuvor mit zwei Änderungen:

- die Holzplatten wurden mit einer Absorption belegt (OSB-Platten, [20]) und
- die Absorption der LSW wurde mit Daten einer in-situ Messung einer Holzspanbetonlärmschutzwand modelliert gemäß EN 1793-5 (korrespondierend mit ÖNORM EN 1793-5 [21]).

Es wurden verschiedene Wagenquerschnitte simuliert, welche an das Wagenmaterial an der Messstelle angepasst sind (Abb. 3-10). Details folgen in den jeweiligen Abschnitten zu den Vergleichen zwischen Messung und Rechnung auf Basis der verschiedenen Zugtypen.



Abb. 3-10: Querschnitte für den Reisezug (links oben), den Nahverkehrszug 2 (rechts oben), den leeren Flachwagen (links unten) und den Kesselwagen (rechts unten)





Die Quellpositionen wurden beibehalten, wobei zusätzlich noch eine Dipolquelle auf der Schiene mit einer um 23° nach oben geneigten Dipolachse verwendet wurde, da das Maximum der Richtcharakteristik des Rollgeräusches gemäß RVE 04.01.02 bei ca. 23° liegt (Details zum vertikalen Richtverhalten finden sich in Kapitel 4.3.1 bzw. vgl. Abb. 4-4).

3.3.2 Reisezug

Der Reisezug ist der Zug mit den für den Vergleich am Besten geeigneten Eigenschaften:

- langer Zug (ca. 200 m)
 Triebfahrzeug am Ende platziert und aufgrund der Länge von ca. 200 m relativ weit weg, der Einfluss der Traktionsgeräusche daher gering.
- relevante akustische Effekte bei den Wagenübergängen sind unwahrscheinlich keine großen Abstände zwischen den Wagen (vgl. Doppelgarnituren bei üblichen Nahverkehrszügen)
- keine Dachaufbauten, glatte, ebene Außenhülle

Durch diese Eigenschaften ist die Annahme eines konstanten Querschnittes sehr gut erfüllt. Daher erfolgt eine detaillierte Analyse auf Basis dieser Messdaten.

Messergebnisse

Für alle Messungen wurden Kurzzeit-Fouriertransformationen (Spektrogramme) mit einer Analyselänge von 4096 Samples (85 ms bei 48 kHz) und einer hop-size von 1000 Abtastwerten (21 ms) berechnet. Die Berechnung erfolgte mittels der Funktion dgtreal der Large Time-Frequency Analysis Toolbox (LTFAT, [22]) für Octave [23]. Verwendet wurde das standardmäßige Gauß-Fenster. Aus diesen wurden dann abschnittsweise energetisch gemittelte Spektren bestimmt. Die Definition der zeitlichen Abschnitte hängt von der jeweiligen Analyse ab und wird jeweils im Detail angegeben.

Im ersten Schritt wurde ein Einfügedämmmaß der einzelnen Vorbeifahrten bestimmt. Hierfür wurde die Zugsvorbeifahrt im Testquerschnitt aufgrund der Achsdaten in Zeitpunkte mit konstantem Abstand (50 ms) unterteilt. Die Vorbeifahrt im Referenzquerschnitt wurde dann in gleich viele konstante Abschnitte unterteilt. Dieser Ansatz wurde gewählt, da unter der Voraussetzung konstanter Geschwindigkeit im jeweiligen Querschnitt leichte Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Querschnitten ausgeglichen werden können und somit in etwa gleiche Segmente des Zugs verglichen werden. Um allerdings etwas stabilere Schätzungen des Spektrums zu erhalten, wurde über ±5 Spektrogrammzeitpunkte energetisch gemittelt (d.h. es gibt hier eine leichte Unschärfe im Abschnitt des Zuges, allerdings wurden Vorbeifahrten mit Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Querschnitten größer







±3 km/h von der Analyse ausgeschlossen). Es wurden jeweils die ersten und letzten 8 Achsen (also Triebfahrzeug + Wagen oder Steuerwagen + Wagen) von der Analyse ausgeschlossen, um die Veränderungen an den Zugenden auszublenden. Für jeden Zeitpunkt wurde dann das Einfügedämmmaß bestimmt und pro Vorbeifahrt über alle Zeitpunkte gemittelt. Da im Referenzquerschnitt nur zwei Mikrofone vorhanden waren, wurde für die nahen Positionen der 7,5 m und für die 25 m-Messpositionen im Testquerschnitt die 25 m-Position im Referenzquerschnitt verwendet. Streng genommen ist es daher kein Einfügedämmmaß. Der Einfachheit halber wird aber der Begriff für das beschriebene Maß verwendet. Für den Reisezug wurde der Geschwindigkeitsbereich auf 110 bis 140 km/h eingeschränkt. In Tab. 3-1 gibt es eine Übersicht über die Anzahl der verwendeten Vorbeifahrten pro Personenzugtyp.

Wagentyp	Wandkonf. 0 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 1 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 2 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 3 (Gl. 2 / Gl. 1)
Reisezug	5/6	4/3	4/3	6/6
NVZ 1	6/3	6/2	9/7	10/8
NVZ 2	17/12	11/8	21/11	14/10



Tab. 3-1: Anzahl der für die Auswertung der Personenzüge verwendeten Vorbeifahrten

Abb. 3-11: Einfügedämmmaß beim Reisezug auf Gleis 2 als Funktion der Wandkonfiguration (Einzelfahrten werden durch Linientypen unterschieden)









Abb. 3-12: Unterschied Einfügedämmmaß beim Reisezug als Funktion der Wandkonfiguration verglichen mit der Referenzbedingung

Abb. 3-11 zeigt das Einfügedämmmaß der einzelnen Vorbeifahrten. Farblich kodiert sind die verschiedenen Wandkonfigurationen der Lärmschutzwände. Bei der Position zwischen Lärmschutzwand und Zug zeigen sich keine großen Unterschiede zwischen den Wandkonfigurationen, wobei beim höheren Mikrofon zumindest Unterschied von 1-2 dB über 1 kHz zwischen Referenz (d.h. Wandkonfiguration 0, absorbierend) und den verschiedenen Anordnungen der Paneele sichtbar sind. In 7,5 m (M3-M7) zeigen sich über 1 kHz in den oberen Positionen M3 und vor allem bei M4 Unterschiede von bis zu 6 dB. Tendenziell ist der Effekt bei den mittig angebrachten Paneelen (Wandkonfigurationen 2 und 3) größer. Am geringsten ist der Effekt bei den oben angebrachten Paneelen (Wandkonfiguration 1). Bei M5 (mittige Position) ist dieser Trend nicht zu erkennen und der Gesamteffekt ist ebenfalls geringer (bis zu ca. 2-5 dB). Bei den unteren Positionen M6-M7 werden die Unterschiede noch geringer (kleiner 4 dB) und verschieben sich zu höheren Frequenzen. In 25 m ist diese Verringerung in tiefen Positionen ebenfalls zu beobachten (bis zu 7 dB bei M8, bis zu 5 dB bei M9). Der Unterschied zu 7,5 m ist, dass hier die Wandkonfiguration 1 den größten Unterschied hervorruft, gefolgt von den mittig platzierten (Wandkonfiguration 2, ca. 1-2 dB weniger Unterschied). Am geringsten ist der Effekt bei den alternierenden Paneelen (Wandkonfiguration 3, kleiner 3 dB). Auch hier beginnt die Wirkung bei ca. 1 kHz. Die Daten





zeigen einen relativ klaren Effekt der reflektierenden Elemente und auch teils deutliche Unterschiede in der Anbringung. Abb. 3-12 zeigt den Mittelwert und den Standardfehler der Differenz. Im nachfolgenden werden die Simulationen mittels der 2.5D-BEM mit den Messungen verglichen. Hauptaugenmerk liegt darauf, ein geeignetes Quellmodell zu finden, welches die Unterschiede *zwischen* verschiedenen Wänden (also die Veränderung im Einfügedämmmaß) möglichst gut abbildet. Die korrekte Abbildung des Einfügedämmmaßes ist hierbei nicht entscheidend. Das Einfügedämmmaß hängt stärker von Faktoren wie dem Boden ab, beim Unterschied zwischen (gleich hohen) Wänden ist dieser aber nicht so stark von Bedeutung, wie auch später gezeigt wird.

BEM vs. Messung

Abb. 3-13 bis Abb. 3-15 zeigen die Unterschiede des mittleren Dämmmaßes bezogen auf die Wandkonfiguration 0 für verschiedene Quellmodelle (farbige dünne Linien) im Vergleich zur Messung (dicke strichlierte Linie).

Beim Vergleich dieser Quellmodelle in Abb. 3-13 zeigen sich für die oben reflektierende Wandkonfiguration 1 keine extremen Unterschiede. Abhängig von Position und Frequenz treten Unter- und Überschätzungen von bis zu 3 dB, meist aber unter 2 dB, auf. Tendenziell zeigen die Quellen auf Radhöhe eher eine Überschätzung bei höheren Frequenzen. Bei mittig platziertem Paneel (Wandkonfiguration 2, Abb. 3-14) zeigen Quellen auf Radhöhe ab ca. 2 kHz in den meisten Messpositionen eine Überschätzung von bis zu 5 dB, wobei die horizontale Dipolquelle eine größere Abweichung produziert. Bei den Schienenquellen ist der Unterschied zur Messung deutlich geringer. Die vertikale Dipolquelle sticht heraus, da hier konsistent eine Unterschätzung des Effektes auftritt. Alle anderen Schienenquellen liefern ähnliche Ergebnisse, wobei die Punktquelle eine etwas geringere Variation im Ergebnis aufweist.

Bei der alternierenden Wandkonfiguration 3 treten insgesamt geringere Abweichungen auf, das Verhalten ist aber ähnlich wie bei den mittig platzierten Paneelen in Wandkonfiguration 2 (Abb. 3-15).

Abb. 3-16 zeigt eine Zusammenfassung über alle Mikrofonpositionen und Wandkonfigurationen für verschiedene Quellmodelle. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich, dass eine schienennahe Quelle bessere Ergebnisse liefert als eine Quelle auf Höhe der Radachse. Die insgesamt geringe Abweichung zwischen Messung und Rechnung zeigt auch, dass die weiteren Modellannahmen, wie die Verwendung der in-situ Absorptionswerte für die Lärmschutzwand, gerechtfertigt sind. Dies steht auch in Einklang mit früheren Ergebnissen [24].









Abb. 3-13: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim Reisezug als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-14: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim Reisezug als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation









Abb. 3-15: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 3 zu Wandkonfiguration 0 beim Reisezug als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-16: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Reisezug für alle Positionen und Wandkonfigurationen – Vergleich zwischen Messung und Simulation

Wie oben beschrieben, wurden auch die in [19] verwendete Quellpositionen und -spektren auf Basis des TWINS-Modells (Track Wheel Interaction Noise Software) implementiert (Abb. 3-17). Im Vergleich zur Schienenquelle zeigen sich beim TWINS-Modell größere Unterschiede. Es scheint sich auch kein relevanter Unterschied zu ergeben, wenn beide Schienen als Quelle definiert werden (Zusatz LR in den Bezeichnungen) oder wenn nur die der LSW zugewandte Schiene verwendet wird.









Abb. 3-17: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Reisezug für alle Positionen und Wandkonfigurationen – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-18: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim Reisezug auf Gleis 1 als Funktion des Quellmodells-Vergleich zw. Messung und Simulation

Das von der LSW entferntere Gleis 1 war an der Messstelle 4,07 m vom wandnahen Gleis 2 entfernt (Abstand der Gleisachsen). Abb. 3-18 zeigt sehr gut, dass wie zu erwarten der Effekt reflektierender Paneele bei Wandkonfiguration 1 fast überall geringer ist. Dies gilt auch für mittige Platzierung (Wandkonfiguration 2, Abb. 3-19), wobei in 25 m hier beinahe kein Unterschied auftritt. Die Simulationen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und weisen darauf hin, dass das Quellmodell bei einer größeren Entfernung zur Wand eine geringere Rolle spielt (Abb. 3-20).









Abb. 3-19: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim Reisezug auf Gleis 1 als Funktion des Quellmodells–Vergleich zw. Messung und Simulation



Abb. 3-20: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Reisezug für alle Positionen und Wandkonfigurationen auf Gleis 1 – Vergleich zwischen Messung und Simulation

3.3.3 Nahverkehrszug 1

Der 1. Nahverkehrszug (NVZ 1) ist im Vergleich zum Reisezug deutlich kürzer und besteht typischerweise aus einer (ca. 70 m) oder zwei (ca. 140 m) Garnituren. Diese Zugkategorie hat eine plane Seitenwand und einen relativ geringen Abstand zwischen den Garnituren. Der Querschnitt ist gut vergleichbar mit dem des Reisezuges, die Räder wurden aber etwas kleiner und damit die Bodenhöhe etwas geringer angenommen. Die Auswertung der Messdaten erfolgte analog zum Reisezug.







BEM vs. Messung

Abb. 3-21 zeigt die Unterschiede des mittleren Dämmmaßes bezogen auf die absorbierende Wandkonfiguration 0 für verschiedene Quellmodelle (farbige dünne Linien) im Vergleich zur Messung von Doppelgarniturzügen (dicke strichlierte Linie). Die graue Linie zeigt zum Vergleich die Messung beim Reisezug und die punktierte Linie die Messungen bei Einzelgarnituren (hier wurden die ersten 4 Achsen an beiden Enden ignoriert).

Aus den Messergebnissen ist der Effekt der Zuglänge klar ersichtlich und beträgt bei hohen Frequenzen im Schnitt ca. 1-2 dB, wobei bei den tiefen Messpositionen der Effekt des reflektierenden Materials stärker reduziert zu sein scheint. Zwischen Reisezug und Doppelgarnitur ist kein systematischer Unterschied zu erkennen. Ein leichter Effekt scheint nur in 25 m bei der oberen Messposition aufzutreten. Beim Vergleich der Quellmodelle ergaben sich gegenüber dem Reisezug keine neuen Erkenntnisse, d.h. die Radquelle zeigt eine deutliche Überschätzung des Effekts der reflektierenden Elemente. Auch bei Wandkonfiguration 2 ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie beim Reisezug (Abb. 3-22). Der Unterschied zwischen kurzer und langer Zugkonfiguration ist ähnlich wie bei oben reflektierenden Elementen (Wandkonfiguration 1). Bei alternierenden Paneelen



Abb. 3-21: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 1 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation









Abb. 3-22: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 1 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-23: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 3 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 1 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation







Abb. 3-24: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim NVZ 1 für alle Positionen und Wandkonfigurationen – Vergleich zwischen Messung und Simulation

(Wandkonfiguration 3, Abb. 3-23) sind die Effekte ähnlich, allerdings scheint hier der Effekt der Zuglänge deutlich geringer aber der Unterschied zum Reisezug etwas größer.

Abb. 3-24 zeigt eine Zusammenfassung über alle Mikrofonpositionen und Wandkonfigurationen für verschiedene Quellmodelle beim langen Nahverkehrszug. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich wie schon beim Reisezug, dass eine schienennahe Quelle bessere Ergebnisse liefert als eine Quelle auf Höhe der Radachse. Das TWINS-Modell zeigt wie schon beim Reisezug eine Überschätzung des Effektes der Reflexionen, insbesondere bei mittig platzierten Reflektoren.

Da die Ergebnisse für das wandnahe Gleis 2 sehr ähnlich zum Reisezug sind, wurde hier das entferntere Gleis 1 nicht gesondert betrachtet.

3.3.4 Nahverkehrszug 2

Ähnlich wie NVZ 1 besteht auch der 2. Nahverkehrszug (NVZ 2) aus ein oder zwei Garnituren vergleichbarer Länge. Bei der ausgewählten Messstelle konnten nur Doppelgarnituren ausgewertet werden, da fast alle Einfachgarnituren in der nahgelegenen Station hielten und daher entweder bremsten oder beschleunigten. Der Querschnitt des 2. Nahverkehrszuges unterschied sich insofern, als dass die Seitenwand nicht flach, sondern leicht nach außen gewölbt war.

BEM vs. Messung

Abb. 3-25 zeigt die Unterschiede des Dämmmaßes bezogen auf die absorbierende Referenzbedingung für verschiedene Quellmodelle (farbige dünne Linien) im Vergleich zur Messung (dicke strichlierte Linie). Die graue Linie zeigt zum Vergleich die Messung beim Reisezug. Die Messergebnisse zeigen, dass bei diesem Zugtyp der Effekt des reflektierenden Materials deutlich geringer ausfällt als beim Reisezug mit Bandpegelunterschieden von bis zu 3 dB.









Abb. 3-25: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 2 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-26: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 2 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation









Beim Vergleich der Quellmodelle zeigen die Radquellen wiederum deutlich höhere Effekte, die Schienenquellen eine gute Übereinstimmung aufweisen. wogegen Für die Wandkonfiguration 2 (Abb. 3-26) ergeben alle Modelle außer dem vertikalen Schienendipol eine deutliche Überschätzung, die bei den Schienenmodellen eher mit dem Reisezug übereinstimmt. Radquellen liefern noch höhere Werte. Für die alternierende Wandkonfiguration 3 ergibt sich ein ähnliches Bild.

Abb. 3-27 zeigt wieder die Zusammenfassung über alle Mikrofonpositionen und Wandkonfigurationen für verschiedene Quellmodelle beim langen Nahverkehrszug 2. Hier ist



Abb. 3-28: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 2 auf Gleis 1 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zw. Messung und Simulation









Abb. 3-29: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim NVZ 2 auf Gleis 1 als Funktion des Quellmodells – Vergleich zw. Messung und Simulation



Abb. 3-30: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim NVZ 2 für alle Positionen und Wandkonfigurationen auf Gleis 1 – Vergleich zwischen Messung und Simulation

nochmals klar ersichtlich, dass alle Quellpositionen und Wandkonfigurationen eine Überschätzung produzieren, bei der Schiene ist der Effekt aber weniger ausgeprägt und streut auch weniger.

Abb. 3-28 zeigt, dass auch beim NVZ 2 der Effekt des reflektierenden Paneels in Wandkonfiguration 1 für das entferntere Gleis 1 fast überall etwas geringer ist. Für den mittig platzierten Reflektor (Wandkonfiguration 2) ist der Effekt teilweise nicht vorhanden oder nur







sehr gering (Abb. 3-29). Die Simulationen zeigen eine teilweise sehr gute Übereinstimmung aber auch eine deutliche Überschätzung in den 25 m Positionen bei mittigem Reflektor. Insgesamt scheint das Quellmodell hier eine geringere Rolle zu spielen (Abb. 3-30).

3.3.5 Flachwagen

Aufgrund der Heterogenität typischer Güterzüge und der durch den unterschiedlichen Aufbau erwartenden akustischen Unterschiede mussten die Güterzüge mittels der zu Videoaufzeichnungen analysiert und pro Achse klassifiziert werden. Weiters musste berücksichtigt werden, dass nur die Analyse ausreichend langer Segmente mit Wagen der gleichen Kategorie Aussagen über die akustische Wirkung der jeweiligen Kategorie erlaubt. Es wurden daher nur Achsen berücksichtigt, die mindestens 40 m von einer Achse eines anderen Wagentyps und 80 m vom Ende des Zuges entfernt waren. Für jede dieser Achsen wurden 21 benachbarte Spektren energetisch gemittelt. Dies wurde für den Test-, wie auch für den Referenzquerschnitt durchgeführt. Danach wurden die Bandpegel der Achsspektren des Referenzquerschnittes von den korrespondierenden Bandpegeln des Testquerschnitts subtrahiert und der Mittelwert über die Achsen berechnet. Für manche Bedingungen war allerdings nur eine sehr geringe Anzahl an auswertbaren Segmenten vorhanden (Tab. 3-2).

Der Flachwagen ist ein Extremfall, da nur ein minimaler Aufbau vorhanden ist. Typische Beispiele für solche Wagen sind unbeladene LKW-Transporter, Holztransportwagen, Containerzüge oder ähnliches. Abb. 3-31 zeigt klar, dass bei Wandkonfiguration 2 keine nennenswerten Effekte durch die reflektierenden Teile der Wand verursacht werden. Die Simulation zeigt ebenfalls keinen Effekt. Für die anderen Wandkonfigurationen sehen die Ergebnisse sehr ähnlich aus. Da jedoch nur jeweils ein bis maximal zwei Zugabschnitte die Kriterien erfüllten, kann hier keine Aussage über die Streuung der Messwerte getroffen werden.

Wagentyp	Wandkonf. 0 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 1 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 2 (Gl. 2 / Gl. 1)	Wandkonf. 3 (Gl. 2 / Gl. 1)
Flachwagen	1/3	1 / -	1/1	2/2
Kesselwagen	2 / 4	5/2	2/2	2/3
Containerwagen	2 / 5	5 / 8	8 / 5	5 / 1

Tab. 3-2: Anzahl der detektierten Segmente, welche mindestens 80 m vom jeweiligen Ende des Zuges und 40 m von einem anderen Wagentyp entfernt waren









Abb. 3-31: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim Flachwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation

3.3.6 Kesselwagen

Kesselwagen sind ebenfalls aufgrund der starken Abweichung von der flachen Außenwand, welche in der Norm angenommen wird, ein Extremfall. Daher ist es wichtig, diesen Fall genauer zu betrachten.

Abb. 3-32 zeigt eine positionsabhängige Reduktion des Effektes der oben platzierten Paneele (Wandkonfiguration 1), welche zum Teil auch durch die unterschiedlichen Quellmodelle in der Simulation nachgebildet wird. Bei der oberen Messposition in 25 m gibt es hier in den oberen Frequenzen eine Überschätzung von ca. 2 dB. Die dünnen grauen Linien zeigen die paarweisen Unterschiede zwischen allen 10 Kombinationen der zwei vorhandenen Segmente für Wandkonfiguration 0 und der fünf Segmente für Wandkonfiguration 1. Dies soll die Streuung illustrieren. Im hauptsächlich relevanten Frequenzbereich ab 1 kHz liegt die Streuung bei etwa 3 dB. Werden die Paneele mittig platziert (Wandkonfiguration 2, Abb. 3-33), so ergeben sich in der Messung in den höheren Positionen teils sehr starke Veränderungen gegenüber dem Reisezug von bis zu 5 dB. Die Streuung der Messergebnisse liegt im Bereich von 2 dB, allerdings sind jeweils nur zwei gemessene Abschnitte vorhanden (Tab. 3-2). Im Gegensatz zu allen bisherigen Ergebnissen zeigt hier das Rad als Quelle eine bessere









Abb. 3-32: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim Kesselwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-33: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 2 zu Wandkonfiguration 0 beim Kesselwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation









Abb. 3-34: Unterschied des Einfügedämmmaßes zur mittig reflektierend alternierend zu Referenzbedingung beim Kesselwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-35: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Kesselwagen für alle Positionen und Wandkonfigurationen – Vergleich zwischen Messung und Simulation

Übereinstimmung in gewissen Positionen. Bei alternierenden Paneelen ist nicht klar, ob Rad oder Schiene als Quelle besser geeignet sind (Abb. 3-34).

Abb. 3-35 zeigt, dass die Ergebnisse keine klare Entscheidung für eines der Quellmodelle zulassen.

Für Gleis 1 ergibt sich ein ähnliches Bild wie schon beim Reisezug, d.h. der Einfluss der Quellposition wird geringer (siehe Abb. 3-36).









Abb. 3-36: Unterschied des Einfügedämmmaßes zur Referenzbedingung beim Kesselwagen für alle Positionen und Wandkonfigurationen auf Gleis 1 – Vergleich zw. Messung und Simulation

3.3.7 Containerwagen

Durch die senkrechten Flächen sollte der beladene Containerwagen dem Reisezug am nächsten kommen. Genau genommen wurden hier alle geschlossenen Güterwagen mit flacher, senkrechter Außenwand zusammengefasst. Dadurch ergeben sich auch etwas höhere Fallzahlen (Tab. 3-2).

Abb. 3-37 zeigt, dass im Bereich bis 1-2 kHz der Effekt ähnlich ist, aber sich darüber deutlich abschwächt. Dies ist auch bei der mittig reflektierenden Wandkonfiguration zu beobachten.



Abb. 3-37: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 1 zu Wandkonfiguration 0 beim Containerwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zw. Messung und Simulation









Abb. 3-38: Unterschied des Einfügedämmmaßes Wandkonfiguration 3 zu Wandkonfiguration 0 beim Containerwagen als Funktion des Quellmodells – Vergleich zwischen Messung und Simulation



Abb. 3-39: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Containerwagen für alle Positionen und Wandkonfigurationen – Vergleich zwischen Messung und Simulation

Vor allem in den tieferen Positionen verstärkt sich dieser Unterschied zu hohen Frequenzen hin. Im Kontrast dazu ergibt sich im Falle der alternierenden Anbringung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Berechnungen (Abb. 3-38).

Abb. 3-39 zeigt den Anstieg des Modellfehlers bei höheren Frequenzen klar.

Für das fernere Gleis 1 ergibt der Vergleich eine sehr gute Übereinstimmung der Messung und Simulation für Wandkonfiguration 1 und 2 (Abb. 3-40) und eine teilweise Überschätzung für







Abb. 3-40: Unterschied des Einfügedämmmaßes zu Referenzbedingung beim Containerwagen für alle Positionen und Wandkonfigurationen und Gleis 1 – Vergleich zwischen Messung und Simulation

Wandkonfiguration 3, wobei hier aber nur ein Abschnitt zur Analyse vorhanden war. Die Ursache für den verringerten gemessenen Effekt am nahen Gleis 2 ist nicht klar und es spielen vermutlich mehrere Effekte eine Rolle. Einerseits können größere Abstände zwischen den Wagen vorkommen, andererseits sind Güterwagen offener gebaut als Personenzüge. Aufgrund der geringen Fallzahlen können hierzu aber keine Aussagen getroffen werden. Möglicherweise könnte es aber auch mit der Wellenstruktur der Container zu tun haben, welche wie ein Diffusor-Profil wirkt wodurch es zu einer Umverteilung der Energie bei der Reflexion kommt. Wichtig anzumerken ist, dass hier nur ein Teil der Züge solch ein Wellenprofil hat. Glatte Oberflächen wie bei Reisezügen kommen allerdings selten vor. Aus Abbildungen wurde bei den Containern eine ungefähre Wellenlänge von 20-30 cm abgeleitet, was einer Frequenz von etwas über 1 kHz bis ca. 1,7 kHz entsprechen würde. Der Effekt tritt auch stärker in tieferen Mikrofonpositionen auf, welche eher durch die höheren Reflexionsordnungen beeinflusst werden, die wiederum vmtl. durch das mehrfache Auftreffen auf der Wellstruktur stärker gestreut werden. Dies wäre auch in Einklang mit dem Unterschied zwischen nahem und fernem Gleis, da Reflexionen höherer Ordnung bei größeren Abständen weniger Einfluss haben sollten. Andererseits zeigten sich im Projekt WiaBahn [24] bei einem strukturierten Bahnsteigdach Effekte nur im Bereich der Wellenlänge der Struktur [25], was den Ergebnissen hier eher widerspricht, da hier höhere Frequenzen betroffen sind. Die Situation ist aber auch nur bedingt mit der in GLAS vergleichbar, da keine Beugungseffekte auftreten und nur eine Position betrachtet wurde. Letztendlich kann aus den bestehenden Simulationen und Messungen nicht sicher abgeleitet werden, was die Ursache für den reduzierten Effekt ist. Hierzu wären Simulationen in 3D z.B. mit periodischen Strukturen notwendig.





ASFINAG

3.3.8 Hochliegende Quellen

Beim NVZ 2 ergaben sich teils deutliche Überschätzungen, vor allem beim nahen Gleis. Eine mögliche Ursache dafür könnten hoch liegende Schallquellen sein (Lüftung, Kühlung, ...). Um solche Effekte gezielt untersuchen zu können, müssten die genauen Emissionsdaten solcher Aggregate bekannt sein. Dies ist zwar nicht Teil dieses Projekt, allerdings kann zumindest der Effekt solcher Quellen gezeigt werden.

Mittels der Referenzmessung (Messtag 10) mit 7 Emissionspositionen und 2 Immissionspositionen und BEM-Berechnungen wurden für solche hochliegenden Quellen die Emissionsstärken abgeschätzt, indem ein Least-Square-Fit durchgeführt wurde. Hier gibt es allerdings einige Dinge zu beachten. Erstens sollte die Anzahl der Quellen nicht zu hoch (max. 4-5) angenommen werden, da nur 9 Messpunkte vorhanden sind. Dieses Problem kann durch Annahme einer spektralen Glattheit etwas entschärft werden. Dadurch sind die Quellstärken der einzelnen Frequenzbänder nicht mehr unabhängig. Wenn man typische Quellmodelle, z.B. TWINS, ansieht scheint dies sinnvoll. Es gibt hier verschiedene Ansätze der Regularisierung, wobei hier die 2. Ableitung der Quellstärken über die Frequenzbänder verwendet wird und über einen Regularisierungsparameter die Glattheit kontrolliert wird.

Durchgeführt wurde die Anpassung mittels der Optimierungsmethode nlminb in R. Als Fehlerkriterium wurde die mittlere quadratische Pegelabweichung plus ein Regularisierungsterm (erste Ableitung der Quellstärken über die Frequenz) definiert, welches minimiert wurde. Die Überlagerung der Quellen erfolgt energetisch. Da die Quellstärken nur an die Referenzmessung angepasst werden, beeinflussen die Messergebnisse für die Lärmschutzwände nicht die abgeleiteten Quellstärken und es besteht keine Gefahr der Überanpassung.

Für diesen Ansatz muss auch der Referenzquerschnitt simuliert werden. Für die bisherigen Analysen der Unterschiede waren diese Simulationen nicht notwendig. Im Gegensatz zur Messung, wo von Vorbeifahrt zu Vorbeifahrt aufgrund externer Einflussfaktoren (Radrauheit, Geschwindigkeit, ...) die Emissionen variieren, ist das Quellmodell konstant für alle Simulationen. Für den Referenzquerschnitt ergeben sich zusätzliche Unsicherheiten. Es findet eine ungehinderte Ausbreitung statt und daher sind Bodenreflexionen ein relevanter Faktor, weswegen die Wahl des Bodenmodells hier eine entscheidende Rolle spielt. Ziel war es nicht, ein optimales Bodenmodell zu finden, daher wurde ein Grasland-Modell aus der Literatur genommen [26].

Abb. 3-41 und Abb. 3-42 zeigen Ergebnisse für verschiedene Kombinationen des 23° Dipols bei SOK und eines vertikalen und horizontalen Dipols der senkrecht über der Schiene 25 cm









Abb. 3-41: Unterschied des Einfügedämmmaßes Variante 1 zu Variante 0 beim NVZ 2 als Funktion des Quellmodells inkl. hochliegender Quellen – Vergleich zw. Messung und Simulation



Abb. 3-42: Unterschied des Einfügedämmmaßes Variante 2 zu Variante 0 beim NVZ 2 als Funktion des Quellmodells inkl. hochliegender Quellen – Vergleich zw. Messung und Simulation







über der Wagenkastenoberkante platziert wurde. Es zeigt sich, dass der Effekt der reflektierenden Paneele auf das Einfügedämmmaß beträchtlich reduziert werden kann. Die Reduktion fällt teilweise extrem aus, vor allem in höher liegenden oder weiter entfernten Positionen (wie erwähnt wurden die Quellstärken aus dem Referenzquerschnitt hergeleitet). Wie es scheint, wird hier die Stärke der oben liegenden Quellen überschätzt. Verwendet man ein noch komplexeres Modell (TWINS mit einer etwas niedrigeren Radquelle) lassen sich ein wenig bessere Ergebnisse erzielen.

Es gibt natürlich noch viele weitere Möglichkeiten einzelne Quellpositionen und -typen zu kombinieren. Allerdings illustrieren die gezeigten Ergebnisse bereits, dass hochliegende Quellen ein möglicher Faktor für die abweichenden Ergebnisse sind. Solche Quellen können aufgrund der Lage prinzipiell die Wirkung einer LSW reduzieren und damit, wie hier gezeigt, den Effekt reflektierender Anteile reduzieren. Aufgabe des Projektes GLAS war es aber, die Effekte von Mehrfachreflexionen bei teilreflektierenden LSW zu untersuchen. Hochliegende Quellen sind aufgrund der Position davon nicht betroffen und werden daher im Weiteren nicht behandelt.







4 AUSBREITUNGSRECHNUNG NACH ÖAL 28

Das Europäische Prognosemodell beinhaltet neben der Emissionsprognose auch die Schallausbreitungsrechnung, welche national durch die im Okt. 2021 erschiene ÖAL-Richtlinie Nr. 28 "Berechnung der Schallausbreitung im Freien und Zuweisung von Lärmpegeln und Bewohnern zu Gebäuden" [1] – kurz ÖAL 28 – umgesetzt wurde. Zur Untersuchung, wie reflektierende Wandelemente in dieser Norm Berücksichtigung finden können, sind flexible Ergänzungen in der Ausbreitungsrechnungen und entsprechende Vergleiche mit BEM-Simulationsergebnissen von Nöten. Aufgrund dessen wurde die Ausbreitungsrechnung für die strategische Lärmkartierung nach ÖAL 28 in vereinfachter Form in der skriptbasierten Berechnungsumgebung MATLAB (Version 2021a) implementiert. Die Vereinfachungen betreffen beispielsweise die Fokussierung auf einfache Geländemodelle (mit und ohne Lärmschutzwände), die Beschränkung auf Linienguellen oder den Entfall von lateraler Beugung. Auch wenn bei der strategischen Lärmkartierung ausschließlich günstige Ausbreitungsbedingungen betrachtet werden, sind bei Vergleichen mit BEM-Simulationen homogene Bedingungen zu bevorzugen, um etwaige Modellunterschiede zur Berücksichtigung günstiger Bedingungen zu eliminieren. Aus diesem Grund wurde die Ausbreitungsrechnung auch für homogene Bedingungen in MATLAB umgesetzt.

4.1 Betrachtete Ergebnisgrößen

Die ÖAL 28 erlaubt die Berechnung der Gesamtdämpfung *A* des Schallausbreitungsweges zwischen einem Quellpunkt *S* und einem Immissionspunkt *R*. Durch Beaufschlagung dieser Gesamtdämpfung *A* auf die gerichtete Quellschallleistung $L_{W,0,dir}$ ergibt sich der Schallpegel *L* im Punkt *R*.

 $L = L_{W,0,\text{dir}} - A$

Die Quellschalleistung $L_{W,0}$ wird in der Prognoserechnung abhängig vom Oberbau, von Fahrzeugen und vom Betrieb nach der aktuell gültigen RVE 04.01.02 über die Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen vom Feb. 2022 [2] ermittelt und entsprechend der konkreten Ausbreitungsrichtung mit Korrekturtermen für vertikale und horizontale Richtwirkung der Quelle versehen.

 $L_{W,0,\text{dir}} = L_{W,0} + \Delta L_{W,\text{dir,vert}} + \Delta L_{W,\text{dir,hor}}$

Da die BEM-Berechnungen die Richtwirkung der Schallquellen miteinbeziehen, sind diese auch für die Berechnungen nach ÖAL 28 zu berücksichtigen. Folglich werden nachfolgend die ungerichtete Quellschallleistung $L_{W,0}$ mit 0 dB angenommen, die Richtwirkung nach





RVE 04.01.02 und die Gesamtdämpfung A nach ÖAL 28 berechnet und als Vergleichsgröße der Schallpegel L für den jeweils betrachteten Empfangspunkt R ermittelt. Erwähnt sei, dass es sich bei der Größe L somit nicht um die negative Gesamtdämpfung A handelt, sondern dass die Größe L im Sinn von Übertragungsfaktoren zwischen ungerichteter Quellleistung und Immissionspegel verstanden werden kann.

Die Ergebnisgröße *L* liegt entsprechend der ÖAL 28 als Oktavbandspektrum von 63 Hz bis 8 kHz vor. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden auch Einzahlwerte genutzt, bei welchen als Quellstärke das standardisierte Schienenverkehrslärmspektrum gemäß ÖNORM EN 16272-3-2 über Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Lärmschutzwänden [27] verwendet wird. Dieses Quellspektrum definiert relative, A-bewertete Terzbandpegel nur im Frequenzbereich von 100 Hz bis 5 kHz, weshalb die Bandpegel bis 50 Hz mit -2 dB/Terz bzw. bis 10 kHz mit -4 dB/Terz extrapoliert wurden.

Für den Vergleich zu Ergebnissen der BEM-Simulationen werden, wie einleitend erwähnt, vor allem homogene Ausbreitungsbedingungen betrachtet bzw. wird nur vereinzelt auf günstige Bedingungen eingegangen. Zur Vereinfachung der Größenbezeichnungen wird auf eine Unterscheidung mittels der Indizes "h" (homogeneous) und "f" (favourable) im Allgemeinen verzichtet bzw. nur bei Verwechslungsgefahr eingeführt.

4.2 Mehrfachreflexionen

Die ÖAL 28 beinhaltet bereits eine Rechenvorschrift für Mehrfachreflexionen zwischen den Wagenkästen von Eisenbahnfahrzeugen und einer Lärmschutzwand oder anderen Objekten, deren gesamte, der Strecke zugewandte, senkrechte Oberfläche nicht ideal absorbierend sind und damit einen Teil der auftreffenden Schallenergie reflektieren. Von den beiden Ersatzquellen A und B des Emissionsmodells wird nur Quelle A in einer Höhe von 0,5 m über SOK berücksichtigt, da sich Quelle B in einer Höhe von 4,0 m über SOK befindet und daher keine nach oben gerichteten Mehrfachreflexionen aufgrund des Fehlens des Wagenkastens auftreten können. Das Berechnungsmodell legt weiters fest, die Linienquelle *A* aus der Vertikalebene der Gleisachse unter Beibehaltung der Höhe über die wandnähere Schienenfahrfläche zu verschieben (nachfolgend als Quellpunkt *S* bezeichnet).

Bevor auf das Berechnungsschema der ÖAL 28 näher eingegangen wird, sind in Abb. 4-1 zur Illustration Mehrfachreflexionen auf Basis des Strahlenmodells zwischen einem Quellpunkt *S* und vier Empfangspunkten R_1 bis R_4 mit unterschiedlichen Höhen dargestellt. Konkret sind in den vier Teildiagrammen jeweils der Direktstrahl (0-te Mehrfachreflexion) als blaue, durchgezogene Linie und die 1. und 2. Mehrfachreflexion als dunkeltürkise, strichlierte und als







helltürkise, punktierte Linie skizziert. Bei dem am tiefsten angeordneten Empfangspunkt R_1 ist im linken, oberen Diagramm zu erkennen, dass für alle eingezeichneten Schallstrahlen Beugung an der Wandkante auftritt und somit die Positionen der Reflexionspunkte an der und Fahrzeugwand bei gezeigtem Beispiel zumindest bis zur 2. Lärmschutz-Mehrfachreflexion unabhängig von der konkreten Empfangsposition werden. Bei Betrachtung des Empfangspunkts R_2 im rechten, oberen Diagramm besteht Beugung hingegen nur mehr beim Direktstrahl, während bei Betrachtung des noch höher gelegenen Empfangspunkts R_3 im linken unteren Diagramm keine Beugung mehr auftritt. Für Schallstrahlen ohne Beugung bewirkt eine Veränderung der Empfängerhöhe nun auch eine Verschiebung der Reflexionspunktpositionen. Dies veranschaulicht, dass es abhängig von den jeweils betrachten Rahmenbedingungen stets Grenzhöhen von Empfangspunkten in einem oberhalb definierten Abstand gibt, derer die Beugung verschwindet und die Reflexionspunktpositionen abhängig von der Empfängerposition werden.

Im rechten unteren Diagramm von Abb. 4-1 werden die Mehrfachreflexionen für den höchsten betrachteten Empfangspunkt R_4 skizziert. Dabei zeigt sich, dass bei der 2. Mehrfachreflexion der obere Reflexionspunkt an der Lärmschutzwand bereits oberhalb der Wandkante zu liegen käme und deshalb keine 2. Mehrfachreflexion mehr möglich ist. Dies soll illustrieren, dass abhängig von der Empfangshöhe (bei gegebenen geometrischen Rahmenbedingungen) die Ordnung der auftretenden Mehrfachreflexionen begrenzt sein kann.



Abb. 4-1: Illustration von Mehrfachreflexionen zwischen Wagenkasten und reflektierender Lärmschutzwand anhand von Schallstrahlen - Direktstrahl (dunkelblaue Linie), sowie 1. (dunkeltürkis, strichlierte Linie) und 2. (helltürkis, punktierte Linie) Mehrfachreflexion zwischen Quellpunkt *S* und vier Empfangspunkten R_1 bis R_4 unterschiedlicher Höhe ohne Berücksichtigung der Verschiebung der Fahrzeugwand gemäß ÖAL 28





Abb. 4-2: Exemplarische Darstellung von Spiegelquellen der 1. (oben) und der 2. (unten) Mehrfachreflexion und der Auffächerung zur Bestimmung von Reflexionshöhen an der Lärmschutzwand und am Wagenkasten unter Berücksichtigung der Verschiebung der Linienquelle *A* und der Fahrzeugwand (Reflexionsebene) zur wandnahen Schienenfahrfläche gemäß ÖAL 28

Um diese Mehrfachreflexionen rechnerisch abzubilden, wird in der ÖAL 28 für jede n-te Mehrfachreflexion eine eigene Ersatzschallquelle bzw. Spiegelquelle S_n angesetzt (die Position der Quelle S_0 ist dabei ident zur Position der ursprünglichen Quelle S). Diese Spiegelquellen befinden sich in der durch Quell- und Empfangspunkt aufgespannten zweidimensionalen, vertikalen Ebene. Die Höhen der Spiegelquellen ergeben sich aufgrund rein senkrechter Reflexionsebenen ident zur Höhe des Quellpunkts S. Zur Vereinfachung sieht die ÖAL neben der Quellpunktverschiebung auch eine vertikale Verschiebung der Reflexionsebene des Wagenkastens zur wandnahen Schienenfahrfläche vor, sodass sich die die Abstände der Spiegelquellen zum Quellpunkt mittels Auffächerung der Mehrfachreflexion als geradzahliges Vielfaches des Abstandes d_B zwischen Quellpunkt S und Reflexionsebene der Lärmschutzwand ergeben (siehe exemplarische Darstellung der Spiegelquellen für die 1. und die 2. Mehrfachreflexion in Abb. 4-2).

Die Ausbreitungsrechnung wird jedoch nicht für jede Spiegelquelle separat durchgeführt, sondern die Schallleistung der Quelle *S* wird mit den Schallleistungen der Spiegelquellen zusätzlich beaufschlagt, wodurch letztlich nur die Ausbreitung zwischen Quellpunkt *S* und Empfangspunkt *R* zu betrachten ist. Unterschiede, welche sich durch die geänderten Positionen der Spiegelquellen und durch die Absorptionseigenschaften von Lärmschutz- und Fahrzeugwand ergeben, werden im Berechnungsmodell durch fünf Korrekturterme für







Divergenz, Beugung, Wandabsorption, Fahrzeugreflexion und Retrobeugung berücksichtigt. Die konkreten Berechnungsvorschriften dieser Terme finden sich in der ÖAL 28 [4]. Um diesen Berechnungsansatz an einem konkreten Beispiel zu verdeutlichen, wird die geometrische Ausbreitungsdämpfung für die 2. Mehrfachreflexion (siehe Abb. 4-2, unteres Diagramm) näher $\overline{S_2R}$ betrachtet: durch den längeren Weg erfährt dieser Pfad eine höhere Ausbreitungsdämpfung als ein Schallstrahl, der vom ursprünglichen Quellpunkt S bzw. So ausgeht. Dementsprechend wird die der Quelle S beaufschlagten Schallleistung von S_2 um die zusätzliche Ausbreitungsdämpfung, die sich durch die Distanzerhöhung von $\overline{S_0R}$ auf $\overline{S_2R}$ ergibt, vermindert.

Das erläuterte Berechnungsmodell behandelt Mehrfachreflexionen bei der Ausbreitung zwischen einem Quell- und einem Empfangspunkt somit als ein rein zweidimensionales Problem. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine Vereinfachung einer im Allgemeinen dreidimensionalen Aufgabenstellung handelt. Denn befinden sich die Reflexionsebenen von Lärmschutzwand und Fahrzeugwand nicht normal auf die Projektion der direkten Quell-Empfänger-Verbindungslinie auf die horizontale Ebene, so ergeben sich für Spiegelquellen Ausbreitungspfade abseits der betrachteten, vertikalen Ebene. Abb. 4-3 veranschaulicht die Unterschiede in den Pfaden in einer Grundrissdarstellung exemplarisch für eine 2. Mehrfachreflexion: während die Schallstrahlen im dreidimensionalen Raum eine Zickzacklinie bilden (violett punktierte Linie), erfolgt die Mehrfachreflexion in der zweidimensionalen, vertikalen Ebene zwischen den Positionen *S* und *B* im Grundriss (violett durchgezogene Linie).

Die Vereinfachung der ÖAL hat bei schrägem Schalleinfall zur Folge, dass die Entfernungen im Zweidimensionalen überschätzt und etwaige Beugungswinkel unterschätzt werden. Zudem verlaufen die Schallstrahlen ob der höheren Entfernungen grundsätzlich flacher bzw. ändert sich auch der Horizontalwinkel zur Gleisachse, sodass die Emissionen entsprechend des



Abb. 4-3: Grundriss der Ausbreitungspfade zwischen Quellpunkt *S* und Empfangspunkt *R* bei schrägem Einfallswinkel exemplarisch für die 2. Mehrfachreflexion zwischen Lärmschutzwand (Reflexionsebene grün strichliert) und Wagenkasten (Reflexionsebene gemäß ÖAL 28 rot strichliert) – dreidimensionaler Pfad (violett punktiert) und vereinfachte, zweidimensionale Betrachtung in vertikaler Ebene gemäß ÖAL 28 (violett, durchgängige Linie)




horizontalen und des vertikalen Richtverhaltens der Quelle *S* beeinflusst werden. Und durch Höhenunterschiede der Reflexionspunkten an der Wand sind auch etwaige Retrobeugungen von der Vereinfachung betroffen.

Zwar kann qualitativ das Verhalten einzelner Effekte abgeschätzt werden: beispielsweise Zweidimensionalen bewirken höhere Entfernungen im höhere geometrische Ausbreitungsdämpfungen, wodurch die Quellstärken bei Schrägeinfall unterschätzt werden. Auch kann überlegt werden, dass Unterschiede mit zunehmendem Schrägeinfall oder mit geringer werdendem Normalabstand des Empfangspunkts zur Gleisachse anwachsen. Jedoch können anhand solcher Überlegungen keine Aussagen über die Gesamtwirkung insbesondere bei Betrachtung von zahlreichen Quellpunkten zur Nachbildung von Linienschallguellen abgeleitet werden. Hierfür wäre die allgemeine Berechnung von Reflexionen höherer Ordnung erforderlich, auf welche im Rahmen des vorliegenden Projekts wegen des erheblichen Implementierungsaufwandes verzichtet wurde.

4.3 Interpretationsspielraum der ÖAL 28

Die ÖAL 28 beinhaltet aus Sicht der Autoren zum Teil Lücken oder Unklarheiten in den Eingangsparametern und Berechnungsvorschriften, welche je nach Interpretation zu Unterschieden in Rechenergebnissen führen können. Auf die wesentlichen Punkte wird im Folgenden eingegangen.

4.3.1 Vertikales Richtverhalten der Quelle A

Gemäß des Emissionsmodells nach RVE 04.01.02 [2] weisen die beiden Linienquelle A und B abhängig von der Geräuschkategorie zum Teil horizontales und vertikales Richtverhalten auf, wodurch eine Abhängigkeit der abgegebenen Schallenergie von der Abstrahlrichtung entsteht. Rechnerisch wird dies durch winkelabhängige Zuschläge auf die Schallleistung je Meter berücksichtigt. Konkret werden in der RVE für Punktquellen, durch die letztlich alle Linienquellen für die Ausbreitungsrechnung nach ÖAL 28 angenähert werden (Quellensegmentierung), ein Vertikalwinkel Ψ zwischen der jeweiligen Emissionsrichtung und der horizontalen Ebene, sowie ein Horizontalwinkel φ zwischen der Projektion der jeweiligen Emissionsrichtung auf die horizontale Ebene und der Fahrtrichtung eingeführt (vgl. Abbildung 2 der RVE).

Die Emissionsrichtung wird weder durch die Quellfestlegungen der RVE noch durch das geometrische Ausbreitungsmodell der ÖAL 28 exakt definiert. Zwar werden bei Letzterem stets Ausbreitungswege bzw. Schallstrahlen zwischen Quell- und Empfangspunkte betrachtet, allerdings bleibt unklar, ob diese letztlich zur Bestimmung der Emissionsrichtung





heranzuziehen sind. Denn beispielsweise werden zur Berechnung der geometrischen Ausbreitungsdämpfung oder der Luftabsorption nicht diese Ausbreitungspfade, sondern die direkte Schrägentfernung zwischen Quell- und Empfangspunkte betrachtet, welche sich im Fall von Beugungen oder Reflektionen von den Ausbreitungspfaden (deutlich) unterscheiden können.

Diese fehlende Definition der Emissionsrichtung führt bei betrachtetem Querschnitt mit einer Lärmschutzwand dazu, dass für die Berücksichtigung des vertikalen Richtverhaltens von Rollgeräuschen (Quelle A) mehrere Bestimmungsansätze in Frage kommen. So kann die Emissionsrichtung für alle Empfangspunkte ohne direkte Sichtverbindung zum jeweiligen Quellpunkt, sowohl anhand des Ausbreitungswegs über die Oberkante der Lärmschutzwand (Beugekante), als auch anhand der erwähnten, direkten Verbindung durch die Lärmschutzwand bestimmt werden. Bei ausbreitungsgünstigen Bedingungen wäre auch eine Berücksichtigung der gekrümmten Schallstrahlen denkbar, wodurch der Winkel Ψ geringfügig erhöht werden würde.

Die Berechnung des vertikalen Schallleistungszuschlages $\Delta L_{W,dir,ver}$ für Emissionen der Quelle A ist abhängig von der betrachteten Terzbandmittenfrequenz $f_{c,i}$ des *i*-ten Terzbandes und wird für Abstrahlungen nach schräg oben (1. Quadrant) gemäß RVE wie folgt ermittelt:

$$\Delta L_{\text{W,dir,ver}} = \frac{40}{3} \left[\frac{2}{3} \cdot \sin(2\Psi) - \sin(\Psi) \right] \cdot \lg \left(\frac{f_{c,i} + 600}{200} \right) \, \text{dB} \quad \text{für } 0 < \Psi < \frac{\pi}{2}$$

Zur Veranschaulichung dieses Richtverhaltens sind Abb. 4-4 die Zuschläge $\Delta L_{W,dir,ver}$ für die jeweiligen mittleren Terzbänder der in der Ausbreitungsrechnung betrachteten Oktavbänder dargestellt. Bis zu einem Winkel von 41,4° nehmen die Zuschläge stets positive Werte an, wobei die jeweiligen Maxima stets bei einem Winkel von 23,2° auftreten und die Zuschläge Werte bis 1,9 dB für das 8 kHz Terzband annehmen (zum Vergleich beläuft sich der maximale Zuschlag für das 1 kHz Terzband auf rund 1,1 dB oder für das 63 Hz Band auf 0,6 dB).



Abb. 4-4: Illustration des vertikalen Richtverhaltens – Zuschlag $\Delta L_{W,dir,ver}$ für die jeweils mittleren Terzbänder der in der Ausbreitungsrechnung betrachteten acht Oktavbänder in Abhängigkeit des vertikalen Emissionswinkels Ψ







ASFINAG



Abb. 4-5: Bandpegeldifferenzen ΔL zwischen vertikalen Emissionsrichtungsdefinitionen (zur Beugekante abzüglich Direktpfad) für die 250 Hz (oben), die 1 kHz (Mitte) und die 4 kHz (unten) Oktave bei eingleisiger Strecke mit hochabsorbierender 2 m LSW (ohne Mehrfachreflexionen)



Abb. 4-6: Bandpegeldifferenzen ΔL zwischen vertikalen Emissionsrichtungsdefinitionen (zur Beugekante abzüglich Direktpfad) für die 250 Hz (oben), die 1 kHz (Mitte) und die 4 kHz (unten) Oktave bei eingleisiger Strecke mit hochabsorbierender 4 m LSW (ohne Mehrfachreflexionen)







Zur Einschätzung des Effekts für nachfolgende Vergleichsberechnungen wurden für eine eingleisige gerade Strecke mit einer hochabsorbierenden Lärmschutzwand in 4,5 m Entfernung zur Gleisachse die Immissionen bei homogenen Ausbreitungsbedingungen für beide Definitionen der Emissionsrichtungen ohne Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen zwischen Wagenkasten und Wand berechnet. Die resultierenden Bandpegeldifferenzen ΔL sind für das 250 Hz, das 1 kHz und das 4 kHz Oktavband für eine Wandhöhe von 2 m über SOK in Abb. 4-5 und für eine Wandhöhe von 4 m über SOK in Abb. 4-6 dargestellt.

In beiden Fällen sind hin zu den tiefergelegenen Immissionspunkten steigende Pegeldifferenzen aufgrund zunehmender Differenzen der Vertikalwinkel erkennbar. Bei tieferen Frequenzen fallen die Pegeldifferenzen wegen der geringeren Winkelabhängigkeiten (vgl. Abb. 4-4) erwartungsgemäß niedriger aus. Bei der 2 m hohen Lärmschutzwand (siehe Abb. 4-5) bestehen höhere und durchwegs positive Differenzwerte bis zu rund 1,5 dB in der 4 kHz Oktave, da der vertikale Emissionswinkel Ψ zur Beugekante bis zu rund 18° (Maximalwert bei Emissionsrichtung normal Gleisachse bzw. Fahrtrichtung) beträgt und damit höhere Zuschläge als bei Direktpfadbetrachtung mit geringeren Vertikalwinkeln folgen. Demgegenüber fallen bei 4 m Wandhöhe (siehe Abb. 4-6) die maximalen Differenzen auf knapp unter 1 dB und nehmen in höheren Bereichen hinter der Lärmschutzwand zum Teil auch negative Werte an. Dieses Verhalten resultiert aus den größeren vertikalen Emissionswinkeln zur Beugekante von bis zu rund 38° bzw. den damit verbundenen geringen Zuschlägen und den gleichzeitig kleineren Vertikalwinkeln für den Direktpfad, die auch höhere Zuschläge als in Beugekantenrichtung hervorrufen können. Die bei der 4 m hohen Wand gut erkennbaren, gekrümmten Isolinien entstehen durch seitliche Immissionsanteile der Linienquelle, bei welchen der vertikale Emissionswinkel – sowohl hin zur Beugekante, als auch bei Direktpfad zum jeweiligen Immissionspunkt - mit zunehmender Schräge (Abweichung von der Normalemission) abnimmt.

Zusammenfassend sind die Effekte durch die beiden Ansätze zur Ermittlung des vertikalen Emissionswinkels Ψ stark von den geometrischen Verhältnissen und den betrachteten Immissionspositionen abhängig. Sofern – wie in vielen praktisch relevanten Situationen – der Emissionswinkel zur Beugekante 40° nicht überschreitet, können die Differenzen in den Bandpegeln nicht über 2 dB liegen.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurde entschieden, einheitlich den Berechnungsansatz zu verwenden, welcher die Emissionsrichtung anhand des Ausbreitungspfads und damit bei Lärmschutzwänden für tiefergelegene Immissionspunkte über die Beugekante definiert. Aus Sicht der Autoren erscheint es nachvollziehbarer, dass bei fehlender Sichtverbindung durch





eine Lärmschutzwand, sich auch die für die Immissionen relevante Hauptemissionsrichtung ändert und dass folglich die Quellstärke entsprechend des Richtungsverhaltens der Quelle anzupassen ist – auch wenn sich dadurch die Quellstärke gegenüber der freien Schallausbreitung durch Hinzufügen einer Lärmschutzwand ändert und damit die klassische Einfügedämpfung der Wand von Quelleigenschaften mitbestimmt wird.

Bei etwaigen Berechnungen für günstige Ausbreitungsbedingungen wurde auf eine Einbeziehung der Krümmung von Schallstrahlen für die Ermittlung von vertikalen Emissionswinkeln verzichtet, da einerseits die Krümmung in der ÖAL ausschließlich für die Modellierung der Beugung herangezogen wird und damit eine Berücksichtigung für die Emissionsrichtung fraglich erscheint. Andererseits treten aufgrund der hohen Radien der Krümmung nur geringe Winkeländerungen auf (ab für Entfernungen ≥ 125 m ergeben sich Änderungen von $\sin^{-1}(1/16) \approx 3.6^{\circ}$, während unter 125 m kleinere Winkel auftreten, die mit Annäherung zur Quelle gegen Null tendieren), wodurch auch nur ein geringer Einfluss auf die Quellstärken zu erwarten ist.

4.3.2 Anzahl an Mehrfachreflexionen

Die ÖAL 28 enthält den in Kapitel 4.2 erläuterten Rechenansatz für Mehrfachreflexionen zwischen einer Lärmschutzwand und dem Wagenkasten, jedoch wird die Anzahl an zu berücksichtigenden Mehrfachreflexion offengelassen. Zwar besteht für Immissionspunkte, die hinsichtlich ihrer Höhe oberhalb der LSW-Beugekante liegen, die in Kapitel 4.2 angedeutete, positionsabhängige, geometrische Grenze für die Reflexionsanzahl (siehe Abb. 4-1, rechte untere Grafik). Hingegen können für Immissionspunkte, welche hinter der LSW liegen und Höhen bis maximal der LSW-Höhe aufweisen, beliebig viele Reflexionen angesetzt werden.

Welche Änderungen sich durch die Hinzunahme von einer weiteren Mehrfachreflexion ergeben, ist aufgrund der verschiedenen, möglichen Rahmenbedingungen (geometrische Anordnung, Absorptionsverhalten von Wand und Wagenkasten, etc.) nicht allgemein darstellbar. Jedoch nehmen die Beiträge jeder weiteren Mehrfachreflexion aufgrund von zusätzlicher Divergenz und Retrobeugung selbst bei ideal reflektierenden Wand- und Wagenkastenoberflächen stets ab. Somit sind zumindest grobe Einschätzungen anhand der Beiträge der *i*-ten Mehrfachreflexionen bzw. gleichbedeutend anhand der Änderungen der Immissionen zwischen Berechnungen bis zur (i - 1)-ten und bis zur *i*-ten Mehrfachreflexionen möglich.

Für eine Diskussion der Größenordnung der bei ungünstigen Verhältnissen einzubeziehenden Anzahl an Mehrfachreflexionen, wird erneut eine 4 m hohen Lärmschutzwand betrachtet, diesmal werden jedoch Wand- und Wagenkastenoberflächen ideal reflektierend







Abb. 4-7: Immissionsanteil der 1. Mehrfachreflexion (Bandpegeldifferenzen ΔL zwischen 1. und ohne Mehrachreflexionen) für das 250 Hz (oben), das 1 kHz (Mitte) und das 4 kHz (unten) Oktavband bei eingleisiger Strecke mit 4 m hoher, ideal reflektierender LSW



Abb. 4-8: Immissionsanteil der 5-ten (oben), 10-ten (Mitte) und 20-ten (unten) Mehrfachreflexion (Bandpegeldifferenzen ΔL zwischen *i*-ten und der (*i* - 1)-ten Mehrachreflexion) für das 4 kHz Oktavband bei eingleisiger Strecke mit 4 m hoher, ideal reflektierender LSW







angenommen. Der resultierende, in Abb. 4-7 dargestellte Immissionsanteil der 1. Mehrfachreflexion zeigt, dass bei höheren Frequenzen beträchtliche Erhöhungen der Immissionen die Folge sein können (in diesem Beispiel bis rund 20 dB im 4 kHz Oktavband). Abb. 4-8 illustriert die Abnahme der Beiträge durch weitere Mehrfachreflexionen für das 4 kHz Band, indem auch die Anteile der 5-ten (obere Grafik), der 10-ten (mittlere Grafik) und der 20-ten (untere Grafik) Mehrfachreflexion abgebildet sind. Abgesehen von der zunehmenden Abflachung des Einflussbereichs aufgrund der Reflexionsgeometrie ist zu erkennen, dass selbst durch die 20-te Mehrfachreflexion Immissionen in kleineren Regionen noch bis zu rund 0,15 dB erhöht werden. Für diesen ungünstigen Fall wären daher, um Rechengenauigkeiten (nicht zu verwechseln mit Prognosegenauigkeiten) von <0,1 dB zu erreichen, mehr als 20 Mehrfachreflexionen zu berechnen.

Auch für allgemeine Situationen abseits ideal reflektierender Wandoberflächen können für die erwähnte Rechengenauigkeit von 0,1 dB mehr als 5 Mehrfachreflexionen notwendig sein. Da diese mit zunehmender Zahl an Mehrfachreflexionen durch die erwähnte Abflachung nur positive Immissionsbeiträge in tieferliegenden Regionen bewirken, kommt es zu einer Verlagerung der Ausbreitungsrichtungen innerhalb des gesamten Immissionsbildes.

Für eine gute Übereinstimmung mit den BEM-Simulationen ist die Frage der erforderlichen Mehrfachreflexionen auch an die BEM-Rechenergebnisse zu koppeln. In Kapitel 5.4.4 wird daher ein entsprechender Ansatz zur Begrenzung der Anzahl an Mehrfachreflexionen vorgestellt, der auf Erkenntnissen aus den BEM-Berechnungen beruht.

4.3.3 LSW-Absorptionskoeffizienten

Die ÖAL behandelt allgemein Reflexionen an vertikalen Objektflächen, sowie im Speziellen erwähnten Mehrfachreflexionen zwischen Wagenkasten und die reflektierenden Lärmschutzwänden. Im ersteren Fall wird eine Abschwächung des reflektierten Schalls mittels eines Absorptionskoeffizienten α_r gemäß der Europäischen Norm EN 1793-1 über die Prüfverfahren der Schallabsorption von Lärmschutzvorrichtungen an Straßen aus dem Jahr 2012 definiert (korrespondierend ÖNORM EN 1793-1 [28]). Diese Norm verweist zur Messung des Terzspektrums des Schallabsorptionsgrades $\alpha_{\rm S}$ auf die EN ISO 354 zur Messung der Schallabsorption in Hallräumen (korrespondierend ÖNORM EN ISO 354 [29]) und beschreibt lediglich die darauf aufbauende Berechnung eines auf ganze Zahlen gerundeten Einzahlwertes DL_{α} . Dieser Umstand, sowie die fehlende Erwähnung einer Frequenzabhängigkeit in der ÖAL 28 bekräftigen die aus Sicht der Autoren gelebte Praxis bei Prognoserechnungen, bei Reflexionen frequenzunabhängige Einzahlwerte als Absorptionskoeffizienten zu verwenden.





ASFINAG

Demgegenüber wird bei der Beschreibung der Mehrfachreflexionen in der ÖAL 28 der Absorptionskoeffizient der Wandinnenseite konsequent als α bzw. im Text durchgehend als $\alpha(f)$ bezeichnet. Die Autoren interpretieren dies als Indiz dafür, dass Mehrfachreflexionen mittels frequenzabhängiger Absorptionskoeffizienten zu berechnen sind, welche reale Absorptionseigenschaften exakter beschreiben.

Zur Illustration der Unterschiede wurden die Immissionen für eine 4 m Lärmschutzwand sowohl mit frequenzabhängigem Absorptionskoeffizient entsprechend eines später eingeführten Referenzspektrums, welches ein über verschiedene Absorber gemittelten Absorptionsspektrums entspricht (vgl. Abb. 5-1), als auch mit einer frequenzunabhängigen Abschwächung von 8 dB (entspricht einem Absorptionskoeffizienten von ~0,84) bis zur 10-ten Mehrfachreflexion berechnet. Die Immissionsdifferenzen sind in Abb. 4-9 für vier Oktaven



Abb. 4-9: Bandpegeldifferenzen ΔL (LSW mit gemitteltem, frequenzabhängigen Absorptionsspektrum aus Abb. 5-1 abzüglich LSW mit frequenzunabhängigem Absorptionskoeffizienten für eine Abschwächung von 8 dB) bei Berechnung bis zur 10-ten Mehrfachreflexion für die 63 Hz, die 250 Hz, die 1 kHz und die 4 kHz Oktave (Grafiken von oben nach unten)







(63 Hz, 250 Hz, 1 kHz und 4 kHz) dargestellt. Aufgrund der technisch bedingten Abnahme der Absorptionsfähigkeit bei tieferen Frequenzen sind in der 63 Hz und in der 250 Hz Oktave für den betrachteten Querschnitt deutliche Pegeldifferenzen von bis zu rund 5 dB erkennbar. In den oberen Frequenzen fallen die Differenzen klar geringer aus und nehmen in der (nicht dargestellten) 8 kHz Oktave aufgrund des in diesem Frequenzbereichs etwas höheren Absorptionskoeffizienten des Referenzspektrum negative Werte bis zu knapp -1 dB an.

Für eine Vergleichbarkeit mit BEM-Simulationsergebnissen, bei welchen zur realitätsnahen Nachbildung der Schallsituationen ebenfalls frequenzabhängige Absorptionskoeffizienten verwendet werden, aber auch mit Prognoserechnungen ohne Mehrfachreflexionen, bei welchen gemäß obiger Interpretation der ÖAL Einzahlwerte zu Grunde liegen müssten, werden bei nachfolgenden Betrachtungen ausschließlich frequenzabhängige Absorptionen für die Lärmschutzwand angenommen.

Die Verwendung frequenzabhängiger Absorptionskoeffizienten für Mehrfachreflexionen wirft (unter anderem aus rechentechnischer Sicht) aber die Frage auf, ob Absorptionsspektren für Lärmschutzwände anwendbar sind, die wie in der ÖAL für vertikale Hindernisse gefordert mittels Hallraumverfahren nach EN 1793-1 ermittelt werden. Denn bedingt durch den Ermittlungsansatz, bei welchem die Absorption auf die Fläche des Absorbers, nicht aber auf die effektiv wirksame Oberfläche bezogen wird, sind spektrale Absorptionswerte ≥1 bei strukturierten Absorberelementen als Ergebnis möglich bzw. sogar üblich (vgl. Conter und Wehr [30]). Aufgrund der Definition des Absorptionskoeffizienten bedeuten solche Werte, dass mehr Schallenergie absorbiert werden müsste, als auf die Wand auftrifft, was unmöglich ist. Werte ≥ 1 führen zudem zu dem mathematischen Problem, dass der Logarithmus $lg(1 - \alpha)$ in Gleichung 47 (ebenso wie in Gleichung 36) der ÖAL 28 für diesen Wertebereich nicht mehr definiert ist und in weiterer Folge nach EN 1793-1 ermittelte Absorptionseigenschaften in der Praxis nicht direkt verwendbar sind. Zwar könnten zu hohe Werte entsprechend begrenzt werden, jedoch sind die Koeffizienten ≥1 letztendlich nur ein Indiz dafür, dass dieses Verfahren nach EN 1793-1 die Absorptionseigenschaft strukturierter Oberflächen auch in Bereichen mit geringeren Absorptionswerten tendenziell überschätzt.

Für die BEM-Modellierung in Kapitel 3 wurden die Wandeigenschaften verwendet, die nach dem Adrienne-Verfahren nach EN 1793-5 (korrespondierend mit ÖNORM EN 1793-5 [21]) gemessen wurden. Die gute Übereinstimmung mit den Messwerten bestätigt dieses Vorgehen. Aufgrund dessen, aber auch wegen der erwähnten rechentechnischen Nachteile, erscheinen für Mehrfachreflexionen ausschließlich nach EN 1793-5 (respektive nach dem Pendent

81







EN 16272-5 für Bahnanwendungen, korrespondierend mit ÖNORM EN 16272-5 [5]) ermittelte Absorptionsspektren geeignet.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass gemäß ÖAL 28 Mehrfachreflexionen vernachlässigt werden können, sofern sich Lärmschutzwände entweder in einem Abstand zur wandnahen Schiene von mehr als dem 5-fachen der Wandhöhe (über SOK) befinden oder die frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten der Lärmschutzwand $\alpha(f)$ den Werte von 0,8 übersteigen (entspricht ~7 dB Abschwächung). Erste Bedingung ist für übliche Lärmschutzwandabstände von rund 4,5 m zur Gleisachse nur für Wandhöhen von rund 0,75 m erfüllt und kommt daher in der Praxis zumindest für ein- oder zweigleisige Strecken kaum zum Tragen. Die zweite Bedingung ist nach Einschätzung der Autoren für alle betrachteten Frequenzbänder zu erfüllen, um Mehrfachreflexionen vernachlässigen zu können. Da die Absorptionsfähigkeiten von üblichen Wandoberflächen im unteren Frequenzbereich im Allgemeinen deutlich unterhalb dieser Forderung liegen, sind unter diesem Gesichtspunkt Mehrfachreflexionen in die Prognoserechnung bei ein- oder zweigleisigen Regelquerschnitten mit Lärmschutzwänden (selbst bei nur 2 m Wandhöhe) defacto immer einzubeziehen.







5 MODELLANPASSUNGEN

In diesem Kapitel werden die Szenarien beschrieben, mittels welchen die BEM-Berechnungen und die Berechnungen nach ÖAL 28 verglichen wurden. Außerdem werden die zugrunde liegenden Annahmen und Anpassungen für die BEM und die ÖAL 28 beschrieben.

5.1 Szenarien

Um Berechnungen nach dem Europäischen Prognosemodell mit den Referenzberechnungen zu vergleichen, wurden Wandkonfigurationen verwendet, die auf den bisherigen Berechnungen basierten.

5.1.1 Wandhöhen und Wandkonfigurationen

Um einen realistischen Höhenbereich abzudecken wurden drei Wandhöhen gewählt: 2 m, 3 m und 4 m über SOK. Wie bisher wurde für die 2 m hohe Wand eine Wandkonfiguration mit jeweils einem 1 m breiten Streifen bei der Beugekante und 0,5 m darunter gewählt. Bei 3 m Wandhöhe wurde in der zweiten Wandkonfiguration der Streifen auf 1 m unterhalb der Beugekante gesetzt. Bei 4 m Wandhöhe kam noch eine dritte Wandkonfiguration dazu, bei welcher der Streifen 2 m unterhalb der Beugekante platziert war. Es wurde auch eine vollständig reflektierende Wandkonfiguration berechnet und eine Wand mit perfekter Absorption. Bei der BEM gibt es beim Vergleich mit der idealen Wand Einschränkungen auf die bei den Berechnungen der jeweiligen Höhen eingegangen wird.



Abb. 5-1: Absorptionskurven reproduziert aus [30] und die mittlere Absorption für die Berechnungen der Lärmschutzwände als Funktion der Terzbandfrequenz





Als Referenz diente eine absorbierende Wand mit der in Abb. 5-1 abgebildeten Absorptionskurve. Diese ist eine mittlere Absorption aus den in [30] abgebildeten 6 in-situ Messungen verschiedener Absorber. Oberhalb von 5 kHz wurde der Wert bei 5 kHz verwendet. Unterhalb von 200 Hz wurde der Koeffizient linear interpoliert unter der Annahme, dass bei 0 Hz der Wert 0 beträgt.

5.1.2 Abstände Wand-Gleis

Wie schon die Messungen gezeigt haben, ist der Effekt der reflektierenden Anteile der LSW abhängig vom Abstand des Gleises zur Wand. Es wurden daher drei Abstände gewählt. Das erste Gleis war 4,5 m von der Wand entfernt. Als Gleisachsenabstand wurde 4 m gewählt und das zweite Gleis auf 8,5 m von der Wand positioniert. Wie später noch im Detail erklärt, werden Mehrfachreflexionen in der ÖAL 28 nur bis zu einer Entfernung der Gleisachse von maximal dem fünffachen der Wandhöhe berücksichtigt. Daher wurde das dritte Gleis abhängig von der Wandhöhe positioniert. Um über den von der ÖAL vorgegebenen Bereich hinauszugehen, wurde das letzte Gleis um das Fünffache der Wandhöhe vom ersten Gleis verschoben.

5.1.3 Empfängerpositionen

Es wird ein Bereich bis 102 m von der Gleisachse von Gleis 1 abgedeckt und bis zu einer Höhe von 20,5 m über SOK gerechnet. Dies soll einen guten Überblick über einen großen Bereich geben.

5.1.4 Wagenkasten

Die ÖAL bietet keine Möglichkeit die Form des Wagenkastens zu verändern. Um die Effekte nicht nur in einzelnen Punkten wie bei der Validierung darzustellen, wurden mit der BEM der Kesselwagen und der NVZ 2 mit der leicht bombierten Form für die 2 m und 4 m hohe Wand und Gleis 1 und 2 berechnet.

5.2 Annahmen für die BEM

5.2.1 Allgemein

Für die Validierung der BEM mittels Messungen wurden die Terzbänder berechnet. Bei der ÖAL werden typischerweise Oktavbänder verwendet. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgenden Berechnungen ebenfalls Oktavbänder betrachtet, d.h. die Summe aus 3 benachbarten Terzen. Die BEM eignet sich zwar prinzipiell für Querschnitte wie sie in GLAS definiert sind, ist aber eine sehr rechenintensive Methode. Die verwendete 2.5D-BEM-





Implementierung benötigt für einen Querschnitt mit einer 2 m hohen LSW ca. 3,5 h, hier wird allerdings auf 30-40 Kernen parallel gerechnet. Für höhere Wände oder größere Gleisabstände in denen das Schotterbett zwischen Wand und Zug auch entsprechend berücksichtigt werden muss, erhöht sich dieser Wert nochmals (4 m, drittes Gleis ca. 12 h pro Konfiguration).

Mehrfachreflexionen zwischen Fahrzeugwänden von Schienenfahrzeugen und reflektierenden Lärmschutzwänden werden in der ÖAL 28 letztlich durch eine Anpassung der Quellstärke und eine Positionsverschiebung berücksichtigt. Dadurch bleibt die eigentliche Ausbreitungsrechnung, welche die verschiedenen Ausbreitungsbedingungen und -effekte abbildet, unberührt. Vergleiche der Rechenergebnisse von BEM und ÖAL 28 an Immissionspunkten können prinzipiell unter der Annahme homogener und von günstiger Ausbreitungsbedingungen erfolgen. Jedoch ist die mathematische Einbeziehung günstiger Bedingungen in der ÖAL-Rechnung auch als ein vereinfachtes Modell zu verstehen, welches letztlich Unsicherheiten bei Vergleichen zu BEM-Ergebnissen hervorruft. Aufgrund dessen, aber auch da Unterschiede einfacher interpretiert werden können und wegen ausschließlicher Quellmodifikationen keine Abstriche in der Aussagekraft zu erwarten sind, werden für Vergleiche primär homogene Ausbreitungsbedingungen betrachtet.

5.2.2 Quelle

Aus den Simulationen die zum Abgleich mit den Messungen durchgeführt wurden, ergab sich, dass die Quellposition auf SOK der der LSW zugewandten Schiene am Besten geeignet ist, um die Effekte der reflektierenden Wandanteile zu berechnen. Die BEM erlaubt es, unendlich lange inkohärente Linienquellen zu berechnen, aber auch, wie in Normen üblich, die Linienquelle durch eine Aneinanderreihung von Punktquellen welche energetisch aufsummiert werden, anzunähern. Für die Berechnung der Linienquelle bei der BEM ist nur die Evaluierung einer einzigen Fourierrücktransformation notwendig, während für die Annäherung durch versetzte Punktquellen jeder Abstand eine eigene Rücktransformation bedingt [10]. Dadurch ist die Berechnung einer inkohärenten Linienquelle deutlich weniger aufwändig. Um zu überprüfen, ob diese auch für den Vergleich herangezogen werden kann, wurde für einige Bedingungen das Ergebnis auch mit der aus Punktquellen zusammengesetzten Linienquelle verglichen, um die dadurch entstehende Unsicherheit abzuschätzen. Abb. 5-2 zeigt den Unterschied bei 1 kHz für eine in jede Richtung 100 m lange Reihe (200 m insgesamt) von omnidirektionalen Punktquellen mit 1 m Abstand. Bei dieser Frequenz ist der Effekt am größten und es zeigen sich Unterschiede im Bereich bis zu 1-2 dB vor allem in Bodennähe









Abb. 5-2: Unterschied einer omnidirektionalen Punktquellensequenz (200 m lang, 1 m Abstand) und einer Linienquelle zwischen einer absorbierenden Wand und Wänden mit reflektierenden Elementen bei 1 kHz

und bei dem mittig platzierten Reflektor. Generell wird der Effekt der reflektierenden Elemente bei Verwendung der Punktquellen leicht überschätzt. Wird eine Dipolquelle (23° zur Horizontalen) verwendet ist der Effekt geringer als 1 dB, da die seitlichen Quellen das Ergebnis weniger beeinflussen.

Eine Verlängerung der Quelle auf 150 m in jede Richtung oder eine engere Abtastung (0,5 m) ändert nichts Wesentliches (Dipolquellen, mittlere und untere Grafik in Abb. 5-3).

Bei einer 3 m hohen LSW ergeben sich teilweise auch geringere Effekte der Reflektoren bei Verwendung einer Sequenz von Punktquellen. Die Effekte bewegen sich hier im Bereich von bis zu 2 dB, dies aber nur in eingeschränkten Bereichen des definierten Empfangsgebiets (Abb. 5-4). Bei Verwendung einer Dipolquellensequenz sind die Unterschiede unter 1 dB in den Bandpegeln.









Abb. 5-3: Unterschied zwischen einer absorbierenden Wand und mittig reflektierenden Elementen für verschiedene Folgen von Dipolquellen bei 1 kHz

5.2.3 Bodenmodell

Die Berechnung mittels der BEM ist am effizientesten, wenn der Boden als schallhart, also vollständig reflektierend angenommen wird, was allerdings nicht sehr realitätsnahe ist. Bei der Ausbreitungsrechnung verursachen Annahmen über den Boden teils große Unterschiede. Die Berücksichtigung in der BEM entweder durch Diskretisierung des Bodens oder durch ein Bodenmodell führt zu einem deutlich erhöhten Rechenaufwand. Außerdem gibt es eine große Anzahl von verschiedenen Modellen und Parameterwerten [26], [31]. Weiters, wenn man verschiedene Lärmschutzwände gleicher Geometrie vergleicht, ist der Effekt des Bodens relativ gering. Abb. 5-5 zeigt den Effekt beim Vergleich absorbierend vs. reflektierend bei 1 kHz für das Graslandmodell in [26]. Hier zeigt sich in Bodennähe ein Effekt im Bereich von bis zu 2 dB, wobei dieser bei 1 kHz deutlich größer ist als bei 500 Hz oder 2 kHz. Es ist davon auszugehen, dass sich bei teilreflektierenden oder höheren LSWs dieser Effekt noch weiter









Abb. 5-4: Unterschied einer omnidirektionalen Punktquellensequenz (±100 m lang, 1 m Abstand) und einer Linienquelle zwischen einer absorbierenden Wand und Wänden mit reflektierenden Elementen bei 4 kHz (die Wandhöhe beträgt 3 m)



Abb. 5-5: Effekt der Bodendämpfung auf den Unterschied zwischen einer absorbierenden und einer reflektierenden Wand für eine omnidirektionale Punktquelle bei 1 kHz

reduziert. Bei Verwendung der Dipolquelle ist der Bodeneffekt noch weiter reduziert. Aufgrund dieser Ergebnisse ist die Verwendung eines reflektierenden Bodens gerechtfertigt.







5.2.4 Luftdämpfung

Die Luftdämpfung kann bei der BEM durch eine komplexe Wellenzahl berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich in etwa fast eine Verdoppelung der Rechenzeit. Beim Vergleich zwischen Berechnungen mit und ohne Luftdämpfung ergab selbst bei 4 kHz ein Effekt von weniger als 1 dB. Dadurch ist ein Vergleich der ÖAL-Ergebnisse mit denen der BEM ohne Luftdämpfung möglich. Wichtig ist zu erwähnen, dass hier der Effekt der Luftdämpfung ja aufgrund sehr ähnlicher Ausbreitungswege bei absorbierender und reflektierender Wand gering ist, nicht die Luftdämpfung selbst. Diese beträgt bei den in der ÖAL 28 definierten Standardbedingungen z.B. bei 4 kHz 3,3 dB für 100 m.

5.2.5 Ausbreitungsbedingung

Die BEM erlaubt ohne Modifikationen grundsätzlich nur die homogene Ausbreitung. Andere Varianten wie die günstige Ausbreitung sind nur entweder durch die Kopplung verschiedener



Abb. 5-6: Unterschied zwischen homogener und günstiger Ausbreitung für die Änderung im Einfügedämmmaß einer reflektierenden im Vergleich zu einer absorbierenden Wand bei einer Wandhöhe von 2 m bei 4 kHz

89







Domänen [32] oder durch Transformation der Querschnittsgeometrie zu erreichen [33]–[35]. Auch hier ist es notwendig, den gesamten Boden bis zum letzten Empfangspunkt zu diskretisieren, was zu einer deutlich erhöhten Rechenzeit führt. Zu Testzwecken wurden daher für zwei Konfigurationen (2 m Höhe voll absorbierend und voll reflektierend) exemplarisch eine Simulation mit gekrümmtem Boden durchgeführt (Radius 1000 m in Anlehnung an die ÖAL 28).

Im Gegensatz zu homogenen Ausbreitungsbedingungen zeigt ein Vergleich der Ergebnisse bei günstigen Bedingungen größere Unterschiede auf (siehe Abb. 5-6). Dies deutet darauf hin, dass die Modellierung von günstigen Bedingungen in der ÖAL 28, insbesondere bei Vorhandensein von Beugekanten, von den erwähnten Modifikationen der BEM-Simulationen abweicht. Eine Analyse der Differenzen und Erarbeitung von Korrekturmöglichkeiten ist allerdings nicht in den Zielen des vorliegenden Projekts enthalten, weshalb nachfolgend ausschließlich homogene Ausbreitungsbedingungen zur Bewertung von Adaptionen der Ersatzquelle betrachtet werden.



Abb. 5-7: Unterschied im Einfügedämmmaß bei einer Wandhöhe von 2 m bei 1 kHz für die verschiedenen Wandkonfigurationen









Abb. 5-8: Unterschied im Einfügedämmmaß bei einer Wandhöhe von 2 m bei 4 kHz für die verschiedenen Varianten

5.3 Beispiel

Abschließend zeigen Abb. 5-7 und Abb. 5-8 den Effekt der verschiedenen Wandkonfigurationen im Vergleich zu einer absorbierenden Wand für 1 kHz und 4 kHz bei einer Wandhöhe von 2 m. Diese Abbildungen dienen als Referenz für die Beschreibung der Anpassungen der ÖAL im nächsten Abschnitt.

5.4 ÖAL Adaptionen

Das Rechenmodell der ÖAL 28 erlaubt es, Mehrfachreflexionen nur zwischen Wagenkasten und hinsichtlich der Absorptionseigenschaften homogenen Lärmschutzwänden zu berücksichtigen. Für reflektierende Wandelemente bedarf es daher entsprechender Adaptionen. Jedoch geben das Modell und insbesondere der darin gewählte Ansatz für Mehrfachreflexionen bereits wesentliche Rahmenbedingungen vor:





- die Verwendung des Strahlenmodells bzw. von Ausbreitungspfaden
- die Berechnung von Beugung und Retrobeugung
- die Limitierung auf eine Quelle für das Rollgeräusch und deren Richtverhalten
- die vereinfachte Betrachtung von Mehrfachreflexionen in einer vertikalen Ebene (siehe Diskussion in Kapitel 4.2)
- Ansatz für Mehrfachreflexionen mit Spiegelquellen und Korrekturtermen für Divergenz, Beugung, Wandabsorption, Fahrzeugreflexion und Retrobeugung

Daher bestand die Zielsetzung darin, dass die Adaptionen auf der einen Seite keiner dieser grundlegenden Rahmenbedingungen widersprechen und sich gut in das bestehende Modell einfügen lassen. Gleichzeitig sollten sich die Rechenergebnisse der ÖAL an den Ergebnissen der BEM-Simulationen orientieren.

Im Folgenden wird zunächst erläutert, welcher grundlegende Ansatz für die Berücksichtigung reflektierender Wandelemente gewählt wurde. Um Abweichungen gegenüber den BEM-Rechnungen zu verringern, wurden zusätzlich zwei Anpassungen an dem Berechnungsansatz vorgenommen, die im Anschluss im Detail beschrieben werden. Abschließend wird noch ein Ansatz zur Begrenzung der Anzahl an zu berechnenden Mehrfachreflexionen vorgestellt.

5.4.1 Ansatz zur Berücksichtigung reflektierender Teilflächen

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wird zur Nachbildung der *n*-ten Mehrfachreflexionen (mit n > 0) eine Spiegelquelle S_n genutzt, bei welcher ausgehend von der gleichen Quellschallleistung L_W wie die der Originalquelle *S* Korrekturterme entsprechend des geänderten Schallstrahls beaufschlagt werden. Zur Berücksichtigung der Absorption an der Lärmschutzwand lautet dieser Korrekturterm gemäß Gl. 47 der ÖAL 28 für die *n*-ten Mehrfachreflexion

$$\Delta L_{\mathrm{abs},n} = n \cdot 10 \cdot \lg(1-\alpha).$$

Da die *n*-te Mehrfachreflexion auch *n*-fach von der Lärmschutzwand reflektiert wird, entspricht der Ausdruck letztlich der Additionen von Einzelabsorptionen mit gleicher Absorptionsstärke $10 \cdot \lg(1 - \alpha)$. Geht man von unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der Wandelementen aus, so kann dies durch die Einführung eines höhenabhängigen (und frequenzabhängigen) Absorptionskoeffizienten $\alpha(h, f)$ angenähert werden. Mathematisch lässt sich dies durch folgenden Ausdruck formulieren

$$\Delta L_{\mathrm{abs},n}(f) = \sum_{j=1}^{n} 10 \cdot \mathrm{lg} \big(1 - \alpha(h_{n,j}, f) \big),$$

wobei $h_{n,j}$ die Höhe über SOK des *j*-ten Reflexionspunkts der *n*-ten Mehrfachreflexion beschreibt.





Abb. 5-9: Einführung eines Wandabsorptionskoeffizienten $\alpha(h, f_i)$ für das *i*-te Terzband, der von der Höhe *h* (gemessen über SOK) abhängig ist

Zur Illustration ist in Abb. 5-9 eine Wand mit einem reflektierenden Wandelement und exemplarisch ein entsprechender höhenabhängiger Absorptionskoeffizientenverlauf für das *i*-te Terzband dargestellt. In diesem konkreten Beispiel liegt der Reflexionspunkt der 1. Mehrfachreflexion auf dem reflektierenden Element, während die zwei Reflexionen der 2. Mehrfachreflexion im Bereich der absorbierenden Teilflächen zu liegen kommen. Insofern würden der Korrekturterm für die 1. Mehrfachreflexion $\Delta L_{abs,1} = 0$ dB betragen, wohingegen der Term für die zweite Mehrfachreflexion $\Delta L_{abs,2}$ von dem reflektierenden Element nicht beeinflusst wird.

5.4.2 Quell- und Wandposition

Vergleiche des zuvor beschriebenen Ansatzes mit BEM-Simulationsergebnissen weisen zwar grundsätzlich ähnliche Tendenzen auf, jedoch liegen die durch Mehrfachreflexionen beeinflussten Bereiche bei Berechnungen nach ÖAL 28 im Allgemeinen etwas tiefer. Zur Illustration wurden die Berechnungen aus Kapitel 5.3 (Abb. 5-7 und Abb. 5-8) für das Einfügedämmmaß von reflektierenden Elementen gegenüber durchgängig absorbierenden Lärmschutzwänden gemäß ÖAL 28 durchgeführt. Die Ergebnisse für die 1 kHz und die 4 kHz Oktave sind in Abb. 5-10 und in Abb. 5-11 dargestellt. Analog zu den Abbildungen aus Kapitel 5.3 werden darin jeweils in der oberen Grafik eine Wand mit einem 1 m hohen, reflektierenden Streifen direkt unter der Wandoberkante, in der mittleren Grafik ein Wand mit einem um 0,5 m nach unten versetzten 1 m hohen reflektierenden Streifen und in der unteren Grafik eine vollflächig reflektierende Wand betrachtet.

Die erwähnten Unterschiede werden insbesondere in der höherfrequenten 4 kHz Oktave offensichtlich: während bei oberer Position des reflektierenden Streifens in den BEM-Ergebnissen die Hauptkeule der Abstrahlung deutlich steiler ist und daher bereits in 40 m bis 50 m Entfernung eine Höhe von 20 m erreicht, ist die Hauptkeule bei ÖAL Berechnungen flacher und beginnt erst ab Entfernungen von rund 70 m bis 80 m (je nach zugrunde gelegter









ASFINAG

Abb. 5-10: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 1 kHz (adaptierte ÖAL Berechnung mit höhenäbhängigem Absorptionskoeffizienten bis zur 10. Mehrfachreflexion)



Abb. 5-11: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 4 kHz (adaptierte ÖAL Berechnung mit höhenäbhängigem Absorptionskoeffizienten bis zur 10. Mehrfachreflexion)







Skalierung) in dieser Höhe wirksam zu werden. Vergleichbares lässt sich auch bei den anderen Wandkonfigurationen erkennen. Die Gründe für die flacher verlaufenden Einflüsse bzw. Isolinien sind vor allem in den unterschiedlichen, geometrischen Rahmenbedingungen des ÖAL- und des BEM-Berechnungsmodells zu suchen. So wurde bei letzterem aufgrund der Validierung mit den Messungen als Quellposition die Oberkante der wandnahen Schiene gewählt (vgl. Kapitel 5.2.2). Bei der ÖAL wird die Quellposition zwar auch verschoben, jedoch nicht weiter abgesenkt, was zwangsläufig zu flacheren Mehrfachreflexionen führt. Ein zweiter, wesentlicher Unterschied liegt in der Position der reflektierenden Wagenkastenwand. Während die BEM-Berechnungen auf angenäherten Wagensilhouetten basieren, wird in der ÖAL die Reflexionsebene über der wandzugwandten Schiene angenommen (vgl. Abb. 4-2 in Kapitel 4.2), wodurch letztlich der Abstand zur Wand vergrößert wird und Mehrfachreflexionen in einem flacheren Winkel verlaufen. Die Gründe für eine derartige Wahl in der ÖAL bzw. im zugrunde liegenden Europäischen Berechnungsmodell sind für die Autoren nicht nachvollziehbar, insbesondere da in der Realität die Breiten von Wagen mit reflektierenden Seitenflächen deutlich größer als der Schienenabstand von rund 1,435 m sind.

Um die ÖAL-Simulationsergebnisse weiter den BEM-Berechnungen anzunähern, wurde daher das ÖAL-Modell für Mehrfachreflexionen zusätzlich folgendermaßen adaptiert:

- Absenkung der Quellposition auf die Schienenoberkante, während die Horizontalverschiebung zur wandnahen Schiene beibehalten wurde
- horizontale Verschiebung der Wagenkastenreflexionsebene auf eine Entfernung von 1,41 m zur Gleisachse (zum Vergleich beträgt die Breite eines Reisezugwagens 2,825 m)

Zur besseren Einordnung der Auswirkungen dieser Adaptionen auf die Geometrien der Ausbreitungspfade und der Spiegelquellen wurden das in Abb. 4-2 bereits gezeigte Beispiel einer 1. und einer 2. Mehrfachreflexion in Abb. 5-12 ausgegraut und die neuen Verhältnisse farbig darübergelegt. Dabei ist zu erkennen, dass die größte Steigerung der Anstieg der 1. Reflexion erfährt, während mit zunehmender Anzahl an Mehrfachreflexionen die Änderungen der Steigung abnehmen.

Zum Illustration des Effekts Adaptionen die der wurden zuvor ermittelten Immissionsdifferenzen aus Abb. 5-10 und Abb. 5-11 mit geänderter Quellund Wagenkastenposition neu berechnet und in Abb. 5-13 und Abb. 5-14 dargestellt. Bei Vergleich sind die nun mit der Entfernung deutlich steiler ansteigenden Isolinien und Hauptkeulen oberhalb der Wandoberkante gut zu erkennen, wodurch die Immissionsdifferenzen bzw. Einfügedämmmaße letztlich besser mit den BEM-Ergebnissen übereinstimmen. Obwohl die geometrischen Änderungen vergleichsweise gering waren, bewirken sie in den Beispielen



Abb. 5-12: Exemplarische Darstellung der Änderung der Ausbreitungspfade und der Spiegelquellenpositionen der 1. (oben) und der 2. (unten) Mehrfachreflexion bei adaptieren Quell- und Wagenkastenwandposition gegenüber den ursprünglichen, in grau unterlegten Positionen und Pfade gemäß ÖAL 28 aus Abb. 4-2

durch die reflektierenden Elemente aber zum Teil hohe lokale Pegeländerungen von bis zu rund 8 dB in der 4 kHz Oktave.

Wegen der deutlich besseren Übereinstimmungen und vor allem aufgrund der physikalischen Nachvollziehbarkeit erscheinen die beiden Adaptionen, die Quellabsenkung und die horizontale Wagenkastenwandverschiebung, zur Ermittlung der schalltechnischen Effekte erforderlich. Daher werden die Adaptionen für alle nachfolgenden Berechnungen übernommen.

5.4.3 Fresnelzonen zur Ermittlung reflektierter Schallanteile

Durch die Einführung des höhenabhängigen Absorptionskoeffizienten $\alpha(h, f)$ und den bei Übergänge zwischen reflektierenden Elementen und den absorbierenden Wandoberflächen entstehenden Sprungstellen (vgl. Abb. 5-9) liefert der strahlenbasierte Berechnungsansatz der ÖAL jedoch insbesondere bei höheren Frequenzen lokal zum Teil abrupte Übergänge in den Einfügedämmmaßen. Sehr deutlich zu erkennen ist dies beispielsweise in Abb. 5-13 und Abb. 5-14 bei oben liegendem, reflektierenden Streifen (obere Grafiken) an der unteren Grenze der am steilsten ansteigenden Keule oder, etwas weniger ausgeprägt, auch bei abgesenktem, reflektierenden Streifen (mittlere Grafiken) bei der oberen Grenze des Bereichs







Abb. 5-13: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 1 kHz (gegenüber Abb. 5-10 mit abgesenkter Quelle und verschobener Reflexionsebene des Wagenkastens)



Abb. 5-14: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 4 kHz (gegenüber Abb. 5-11 mit abgesenkter Quelle und verschobener Reflexionsebene des Wagenkastens)



mit Immissionsdifferenzen > 0 dB. Bei vollflächig reflektierender Wand (untere Grafiken) sind derartige abrupte Änderungen aufgrund der fehlenden Sprünge des Absorptionskoeffizienten hingegen nicht zu erkennen.

Diese Übergänge verdeutlichen die Grenzen der strahlenbasierten Modellierung. Denn wenn ein Schallstrahl an einer zweigeteilten Fläche mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten reflektiert wird und sich der Reflexionspunkt nahe der Grenze dieser Teilflächen befindet (Abstand < Wellenlänge), so wird aus physikalischer Sicht mit geringer werdendem Abstand der Einfluss der Nachbarfläche zunehmend größer. Wandert der Reflexionspunkt aufgrund von Verschiebungen des betrachteten Immissionspunktes über diese Grenze, entstehen in der Realität somit stets fließende Übergänge des reflektierten Schallanteils, die sich auch in den BEM-Berechnungen widerspiegeln (vgl. teilreflektierende Flächen in oberen und mittleren Grafiken von Abb. 5-7 und Abb. 5-8).

Zur Nachbildung dieses Verhaltens werden in strahlenbasierten Modellen anstatt von Reflexionspunkten häufig Reflexionsflächen in Form von frequenzabhängigen, elliptischen Schnittflächen zwischen Fresnelellipsoiden und der Reflexionsfläche rund um den Reflexionspunkt betrachtet. Die Grenzen solcher Fresnelzonen ergeben sich allgemein aus all jenen Punkten *P'* der Reflexionsfläche, bei welchen sich Ausbreitungswege vom Quellpunkt *S* zum Empfangspunkt *R*, um eine festgelegte, wellenlängenabhängige Distanz gegenüber dem ursprünglichen Ausbreitungspfad über den Reflexionspunkt *P* vergrößern:

 $\overline{SP'} + \overline{P'R} = \overline{SP} + \overline{PR} + \frac{\lambda}{2 \cdot N}$ mit *N* als ganze Zahl ≥ 1

Als konkretes Beispiel werden im Schweizer Prognosemodell sonRAIL für die Bodenreflexionen $\lambda/4$ -Fresnelzonen als Reflexionsflächen verwendet, um den reflektierten Schallanteil bei fehlenden Flächenanteilen innerhalb dieser Zone wegen der Proportionalität zwischen Schalldruck und den zur Reflexion beitragenden Flächenanteilen entsprechend zu reduzieren [36].

Berechnungsansatz

In Anlehnung an diesen Ansatz werden auch bei reflektierenden Wandelementen $\lambda/4$ -Fresnelzonen zur Ermittlung von Reflexionsanteilen eingeführt. Im Detail wird dabei von dem Fresnel-Ellipsoid zwischen der jeweiligen Spiegelquelle S_n der *n*-ten Mehrfachreflexion und dem betrachteten Empfangspunkt *R* ausgegangen. Vereinfachend gilt dies unabhängig davon, ob der Ausbreitungspfad bei tieferliegenden Empfangspunkten an der Wandoberkante gebeugt wird. Die Fresnelzone ergibt sich dann als Schnittfläche des Ellipsoids mit der jeweiligen (gedachten) Wand im aufgefächerten Ausbreitungspfad. Diese Vorgangsweise ist





für das zuvor betrachtete Beispiel aus Abb. 5-12 in Abb. 5-15 für die 1. Mehrfachreflexion (obere Grafik) und für die 2. Mehrfachreflexion für den 1. und den 2. Reflexionspunkt (mittlere und untere Grafik) veranschaulicht.

Wie in der unteren Grafik von Abb. 5-15 angedeutet, können Fresnelzonen einseitig (bei tieferen Frequenzbereichen auch beidseitig) aufgrund der physischen Ausdehnung der Lärmschutzwand beschnitten sein. Die ÖAL 28 berücksichtigt bereits die Verringerung reflektierter Anteile durch endliche Wandhöhen mittels der Retrodiffraktion. Insofern gehen die Autoren davon aus, dass die ÖAL 28 bei der Abschätzung der Energieanteile von Mehrfachreflexionen solche Effekte bereits ausreichend genau abbildet, weshalb bei ein- oder beidseitig beschnittenen Fresnelzonen der reflektierte Schallanteil im Gegensatz zu sonRAIL nicht weiter vermindert wird.



Abb. 5-15: Illustration von Fresnel-Ellipsoiden und den sich daraus ergebenden Fresnelzonen für die 1. Mehrfachreflexion (oben) und für die beiden Reflexionspunkte der 2. Mehrfachreflexion (Mitte und unten) im aufgefächerten Ausbreitungspfad aus Abb. 5-12







Mathematisch wird für den *j*-ten Reflexionspunkt einer *n*-ten Mehrfachreflexion somit von einer (ggf. auch beschnittenen), frequenzabhängigen Fresnelzone mit Gesamtfläche der $A_{n,j,0}(f)$ ausgegangen. Diese Fläche kann dann in $K_{n,j}(f)$ Teilflächen $A_{n,j,k}(f)$ mit jeweils konstanten, Absorptionskoeffizienten $\alpha_{n,j,k}(f)$ für $k = 1 \dots K_{n,j}(f)$ unterteilt werden, wobei

$$A_{n,j,0}(f) = \sum_{k=1}^{K_{n,j}(f)} A_{n,j,k}(f)$$

gilt. Daraus ergibt sich dann der jeweilige frequenzabhängige Absorptionskoeffizient $\alpha_{n,j}(f)$ als flächenproportionale Gewichtung der Reflexionsfaktoren zu

$$\alpha_{n,j}(f) = 1 - \sum_{k=1}^{K_{n,j}(f)} \left[1 - \alpha_{n,j,k}(f)\right] \cdot \frac{A_{n,j,k}(f)}{A_{n,j,0}(f)}$$

Der Korrekturterm $\Delta L_{abs,n}(f)$ für die Wandabsorption der *n*-ten Mehrfachreflexion folgt daraus unmittelbar als

$$\Delta L_{\text{abs},n}(f) = \sum_{j=1}^{n} 10 \cdot \lg \left(1 - \alpha_{n,j}(f) \right) = \sum_{j=1}^{n} 10 \cdot \lg \left(\sum_{k=1}^{K_{n,j}(f)} \left[1 - \alpha_{n,j,k}(f) \right] \cdot \frac{A_{n,j,k}(f)}{A_{n,j,0}(f)} \right)$$

Die Verwendung solcher Fresnelzonen bewirkt bei abrupten Änderungen des höhenabhängigen Absorptionskoeffizienten folglich eine lokale Verschmierung der Immissionsdifferenzen, sodass Extremwerte abgeschwächt und beeinflusste Bereiche vergrößert werden. Für die beiden Beispiele eines 1 m hohen, reflektierenden, entweder direkt unter der Wandoberkante angeordnetem oder 0,5 m nach unten versetzten Streifens aus



Abb. 5-16: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 1 kHz (gegenüber den oberen beiden Grafiken aus Abb. 5-13 hier mit Berücksichtigung von $\lambda/4$ -Fresnelzonen)





Abb. 5-17: Einfügedämmmaß bzw. Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 4 kHz (gegenüber den oberen beiden Grafiken aus Abb. 5-14 hier mit Berücksichtigung von $\lambda/4$ -Fresnelzonen)

Abb. 5-13 und Abb. 5-14 (jeweils obere und mittlere Grafik) ergeben sich dadurch die in Abb. 5-16 und in Abb. 5-17 dargestellten, deutlich glatter verlaufenden Immissionsdifferenzen. Für die unteren Grafiken in Abb. 5-13 und Abb. 5-14 entstehen hingegen keine Änderungen durch Verwendung von Fresnelzonen, da wegen der vollflächig reflektierenden Wand erwähnte Sprungstellen des Absorptionskoeffizienten fehlen.

Vereinfachung

Die Berechnung der Flächenanteile der elliptischen Fresnelzone kann zwar aufgrund der Ellipsenbreite auf eine Unabhängigkeit von der rein eindimensionale Aufgabe erfordert heruntergebrochen werden. dennoch deren Lösung einen gewissen Rechenaufwand. Analog zur erwähnten Bodenreflexionsberechnung in sonRAIL [36] wird daher zur Vereinfachung die Fresnelellipse durch ein Rechteck gleicher Höhe angenähert, dessen Flächenanteile direkt proportional zu den Höhenanteilen sind. Wie in Abb. 5-18 ersichtlich, sind die durch diese Näherung entstehenden Unterschiede in den Flächenanteile gering: die maximale Abweichung liegt bei rund 5,8 %.

Zur Illustration sind die Unterschiede zwischen exakter Berechnung und Näherung mit rechteckigen Fresnelzonen für die Immissionsdifferenzen ΔL aus Abb. 5-16 und Abb. 5-17 in Abb. 5-19 und Abb. 5-20 dargestellt. Die dabei auftretenden Unterschiede liegen im Bereich von $\leq 0,5$ dB. Aufgrund der auch abseits dieser Beispiele geringen Unterschiede wird bei den nachfolgenden Betrachtungen diese Vereinfachung genutzt.









Abb. 5-18: Vergleich der Berechnung von Flächenanteilen bei exakter Berechnung mittels elliptischer Fresnelzone und bei Näherung durch eine rechteckige Zone gleicher Höhe h_0



Abb. 5-19: Unterschiede im Einfügedämmmaß bzw. in der Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 1 kHz aus Abb. 5-17 – exakte Berechnung mittels elliptischer Fresnelzonen abzüglich näherungsweiser Berechnung mittels rechteckiger Fresnelzonen



Abb. 5-20: Unterschiede im Einfügedämmmaß bzw. in der Immissionsdifferenz ΔL von verschiedenen reflektierenden Wandelementen gegenüber vollflächig absorbierender, 2 m hoher LSW bei 4 kHz aus Abb. 5-18 – exakte Berechnung mittels elliptischer Fresnelzonen abzüglich näherungsweiser Berechnung mittels rechteckiger Fresnelzonen







5.4.4 Ansatz zu Limitierung der maximalen Anzahl von Mehrfachreflexionen

Wie in Kapitel 4.3.2 aufgezeigt, ist in der ÖAL 28 keine Vorgabe über die erforderliche Anzahl von zu berücksichtigenden Mehrfachreflexionen enthalten. Darüber hinaus zeigten sich bereits bei ersten Vergleichen zwischen BEM- und ÖAL-Berechnungen, dass sich Steigerungen der Mehrfachreflexionsanzahl zunächst positiv auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auswirkte, bei zu großer Mehrfachreflexionsanzahl die ÖAL jedoch in den unteren Bereichen die Immissionsdifferenzen zunehmend überschätzt. Ursache hierfür ist, dass bei BEM-Berechnungen die Wagenkastenwand entsprechend realer Verhältnisse nicht bis zur Schienenoberkante modelliert wird, sondern in einer Höhe $h_e = 0.8$ m endet. Da mit steigender Anzahl an Mehrfachreflexionen die Schallausbreitung zwischen Wagenkasten und Lärmschutzwand zunehmend flacher verläuft, sinkt damit auch die Position der untersten, relevanten Reflexionsfläche (im Strahlenmodell des untersten Reflexionspunkts) am Wagenkasten. Kommt die Reflexionsfläche im Bereich der unteren Wagenkastenkante zu liegen, so wird entsprechend nur mehr ein Teil der Schallenergie durch den Wagenkasten reflektiert, sodass Ausbreitungswege mit höherer Anzahl an Mehrfachreflexionen kaum mehr Beiträge leisten.

Um dieses Verhalten für ÖAL-Berechnungen nachzubilden, wurde folgender, vereinfachter Ansatz entwickelt. Ausgegangen wird dabei von der Steigung k_n einer *n*-ten Mehrfachreflexion zur Beugekante der Lärmschutzwand (siehe exemplarische Darstellung für die 2-te Mehrfachreflexion in der rechten Grafik in Abb. 5-21). Diese ergibt sich aufgrund der geometrischen Verhältnisse zu

$$k_n = \frac{h}{d_{\rm B} + n \cdot 2d_{\rm B'}}.$$

Die Steigung hin zur unteren Wagenkastenkante auf der Höhe h_e beläuft sich hingegen auf

$$k_{\rm e} = \frac{h_{\rm e}}{d_{\rm B} + d_{\rm B'}}$$

Die Bedingung, dass der unterste Reflexionspunkt noch am Wagenkasten liegen muss, kann mittels der Steigungen durch

 $k_n \ge k_e$

ausgedrückt werden. Durch Umformung gewinnt man daraus die folgende Forderung für die zulässige Anzahl an Mehrfachreflexionen:

$$n \leq \frac{1}{2d_{\mathrm{B}'}} \cdot \Big[\frac{h}{h_{\mathrm{e}}} \cdot (d_{\mathrm{B}} + d_{\mathrm{B}'}) - d_{\mathrm{B}}\Big].$$







Abb. 5-21: Exemplarische Darstellung der Steigung $k_{n=2}$ der 2-ten Mehrfachreflexion zur Beugekante der Lärmschutzwand (links) und Steigung k_e zur unteren Wagenkastenkante (rechts)

Um die Ungleichung zu erfüllen wird bei ÖAL-Berechnungen die Anzahl an Reflexionen auf die nächstkleinere, ganze Zahl

 $n_{\max} = \lfloor n \rfloor$

begrenzt. Die Eignung dieses Ansatzes wird in den nachfolgenden Vergleichen zwischen BEM- und ÖAL Berechnungen im nachfolgenden Kapitel 6 geprüft.







6 VERGLEICH BEM-ÖAL

Für die im Kapitel 5 beschriebenen Parameter, werden nun die Ergebnisse der Berechnungen mittels BEM und ÖAL 28 verglichen. Die Vergleiche sollen die Unterschiede als Funktion der Wandkonfiguration und der Empfängerposition in Abhängigkeit der Frequenz darstellen. Weiters liegt das Hauptaugenmerk auf der Analyse von Unterschieden, die durch die fundamental unterschiedliche Herangehensweise der Berechnungsmethoden entstehen.

6.1 2 m hohe LSW

Es wurden folgende Situationen mit einer 2 m hohen LSW verglichen:

- reflektierendes Band von der Oberkante bis 1 m unter der Oberkante
- reflektierendes Band 0,5 m unter der Oberkante bis 1,5 m unter der Oberkante
- vollständig reflektierende LSW

Es wurden sowohl Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Fresnelzone als auch einer $\lambda/4$ -Fresnelzonen verglichen. Es gibt hier 2 mögliche Referenzbedingungen, nämlich die



Abb. 6-1: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit einer oder zwei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)







realistische absorbierende Wand (d.h. keine reflektierenden Elemente) und die ideale Wand mit vollständiger Absorption. Laut ÖAL 28 sind bei einer hochabsorbierenden Wand für $\alpha(f) > 0,8$ keine Reflexionen zu berechnen (ein Absorptionskoeffizient von 0,8 entspricht etwa 7 dB Pegelreduktion pro Reflexion), d.h. die beiden Fälle würden für das hier angenommene Material im Frequenzbereich ab 1 kHz in der ÖAL in etwa gleich behandelt (einige Frequenzen liegen hier leicht unterhalb 0,8). Es werden zum besseren Verständnis beide Fälle betrachtet wobei zu Beginn die realistische Wand herangezogen wird.

Abb. 6-1 zeigt den Vergleich nach ÖAL 28 mit einer (obere Abbildung) und zwei Reflexionen (mittlere Abbildung) im Vergleich zur BEM (unten) für den Unterschied zwischen oben reflektierender und absorbierender Wand. Die Ergebnisse sind qualitativ in großen Bereichen ähnlich, allerdings zeigt die BEM vor allem im mittleren Höhenbereich deutlich höhere Effekte (z.B. 50 m Abstand, 15 m über SOK). Dieser Unterschied tritt auch bei niedrigeren Frequenzen auf. Bei der oben reflektierenden Wandkonfiguration (Abb. 6-1) wird das Problem der Betrachtung als Strahl offensichtlich, da hier die ÖAL Bereiche aufweist, wo keine der



Abb. 6-2: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit zwei oder drei Reflexionen inklusive Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)





ASFINAG

Reflexionen eine Wirkung aufweist. In der BEM ist so ein Sprung nicht zu sehen, da Reflexionen ja nicht von einem Punkt zum nächsten "verschwinden", sondern ein kontinuierlicher Übergang stattfindet.

Wird die Fresnelzone mitberücksichtigt (Abb. 6-2 für 2 bzw. 3 Reflexionen), ergibt sich eine qualitativ bessere Übereinstimmung, allerdings ist der Gesamteffekt bei der ÖAL-Berechnung noch immer deutlich geringer. Daran ändern auch Reflexionen höherer Ordnung wenig (3 Reflexionen, mittleres Paneel), da diese in immer tiefer liegenden Bereichen wirken, wo die Übereinstimmung an sich besser ist.

Die bisherigen Darstellungen zeigen die Verteilung der Veränderungen des Schalldruckpegels für eine Frequenz. Um einen besseren Überblick zu geben, wird der Bereich hinter der LSW in ein Winkelraster mit 5°-Schritten unterteilt und Mittelwert und Standardabweichung der Veränderungen im jeweiligen Keil über die Oktavbänder dargestellt.

Abb. 6-3 zeigt nun die Ergebnisse für bis zu 3 Reflexionen im Vergleich zur BEM. Hier sieht man deutlich die in Abb. 6-2 gezeigten Abweichungen bei ca. 20-30° aber auch stärkere Abweichungen unterhalb von 0°, d.h. von der LSW-Beugekante zum Boden hin.

Der Ursprung dieser Abweichungen ist nur zum Teil nachzuvollziehen. Ein Punkt der bei der BEM auftritt ist, dass Absorption in der Nähe der Beugekante den Schalldruckpegel hinter der Wand reduziert (auch ohne Mehrfachreflexionen). Dieser Effekt ist in der ÖAL nicht abgebildet. Eine Berechnung der Situation mit einer reflektierenden und einer absorbierenden Wand aber beide ohne Wagenkasten zeigt hier Unterschied bis zu 2 dB, allerdings hauptsächlich nahe am Boden und knapp hinter der LSW (Abb. 6-4). Hier hängt der Effekt stark vom Quelltyp ab.



Abb. 6-3: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-4: Reflektierend vs. absorbierend ohne Wagenkasten: Gesamtübersicht



Abb. 6-5: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts

Bei der Dipolquelle ist der Effekt geringer, da seitliche Pfade, bei denen der Schall flacher über die Kante kommt und die Absorption an der Beugekante stärker wirkt, durch die Direktionalität bereits abgeschwächt werden.

Der Effekt der Beugekante kann nicht exakt berücksichtigt werden. Eine Abschätzung ist aber möglich, indem das Ergebnis in Abb. 6-4 von dem in Abb. 6-5 abgezogen wird. Im unteren Winkelbereich ergibt sich nun eine sehr gute Übereinstimmung, die Abweichungen im Bereich um die 20° können damit aber nicht erklärt werden.

Wird der Reflektor in der Mitte platziert (Abb. 6-6), zeigt sich, dass auch schon ohne Fresnelzonen ein glatteres Bild bei der ÖAL entsteht. Auch hier wird allerdings der Effekt des Reflektors in der ÖAL um bis zu 3 dB niedriger berechnet als mit der BEM.

💳 Bundesministerium






Abb. 6-6: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit einer oder zwei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)

Wird die Fresnelzone mitberücksichtigt (Abb. 6-7 für 2 bzw. 3 Reflexionen), erhöht sich der Effekt der reflektierenden Paneele, allerdings verschiebt sich das Maximum gegenüber der BEM nach unten. Eine 3. Reflexion (mittleres Paneel) zeigt hier nochmals eine Erhöhung, jedoch deutlich zu tief.

Abb. 6-8 zeigt eine Übersicht für die mittig platzierten reflektierenden Elemente. Klar zu erkennen ist die Verschiebung des Maximums. Da bei dieser Wandkonfiguration die Beugekante ebenfalls absorbierend ist, ergeben sich hier keine Abweichungen bei tiefen Lagen im Vergleich zur Referenzbedingung.

Bei einer voll reflektierenden Wand (Abb. 6-9) zeigt sich bei 2 Reflexionen (oben) bereits eine gute Übereinstimmung, wobei aber auch hier im oberen Bereich deutliche Abweichungen auftreten, und eine 3. Reflexion auch hier wie erwartet nur in tieferen Lagen Pegelerhöhungen verursacht. Da die ganze Wand reflektierend ist, ergibt die Verwendung von Fresnelzonen hier keinen Sinn. Auch bei der vollständig reflektierenden Wand zeigen sich die größten Abweichungen im Bereich um 20° herum (Abb. 6-10). Die Abweichungen im negativen









Abb. 6-7: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit zwei oder drei Reflexionen inklusive Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)



Abb. 6-8: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM









Abb. 6-9: Reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit zwei oder drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)



Abb. 6-10: Reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts





Winkelbereich wurden auch hier wieder durch die näherungsweise Berücksichtigung des Beugekanteneffekts reduziert. Aus dieser Abbildung lässt sich schließen, dass die 3. Reflexion eigentlich keine Verbesserung, sondern eher sogar eine Verschlechterung des Ergebnisses liefert.

Zusammenfassend zeigt sich also, dass qualitativ eine gute Übereinstimmung vorhanden ist, die berechneten Werte aber im Bereich von bis zu 3 dB abweichen. Reflexionen höherer Ordnung verbessern die Übereinstimmung nur sehr bedingt, außerdem ist die Gültigkeit aufgrund der stark strukturierten und teilweise offenen Bereiche im unteren Teil eines Zuges in Frage zu stellen. Eine Berücksichtigung von Übergangsbereichen zwischen absorbierenden und reflektierenden Bereichen (Fresnelzonen) zeigt teilweise eine Verbesserung, allerdings ergeben sich auch gewisse Verschiebungen der betroffenen Bereiche. Ein methodischer Unterschied zwischen BEM und ÖAL, nämlich der Effekt von Absorption an der Beugekante, konnte näherungsweise kompensiert werden, was eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung ergab.

Werden die Lärmschutzwandkonfigurationen gegen eine ideale Wand verglichen sind bei der BEM einige Dinge zu beachten. Aufgrund des oben genannten Beugekanteneffektes kann nicht einfach eine Absorption von 100 % angenommen werden, da diese auch den Beugungseffekt selbst stark verändern würde (gleiches gilt auch für den Wagenkasten und dessen Unterkante). Daher kann nur die Situation ohne Wagenkasten als Referenzbedingung ohne Reflexionen herangenommen werden. Hier ergibt sich allerdings wiederum der oben beschriebene Unterschied zwischen Absorption und Reflexion an der Beugekante, weswegen die Referenzbedingung hier von der Vergleichsbedingung abhängt, d.h. wird mit einer



Abb. 6-11: Absorbierend vs. ideale Wand: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM





Wandkonfiguration mit absorbierender Kante verglichen, ist die ideale Variante absorbierend ohne Wagenkasten, bei reflektierender Kante ist die ideale Variante reflektierend ohne Wagenkasten.

Abb. 6-11 zeigt den Vergleich zwischen der absorbierenden Wand (d.h. ohne reflektierende Elemente) und der idealen Wand (keine Reflexionen). Hier zeigt sich, dass auch bei Absorptionskoeffizienten im Bereich von 0,8 bereits relativ hohe Effekte entstehen, wobei bei mehr als einer Reflexion an der absorbierenden Wand kein großer Effekt mehr auftritt. BEM und ÖAL stimmen hier gut überein. Die starke Abweichung jenseits der 30° entsteht hier durch den in der BEM verwendeten Wagenkasten, genauer durch dessen untere Beugekante der das Feld bei der absorbierenden Wand beeinflusst. Abb. 6-12 zeigt diesen Effekt für diese Bedingung bei 4 kHz. Dieser tritt klarerweise bei allen Vergleichen dieser Art auf.

Ein Vergleich zwischen oben reflektierender und idealer Wand zeigt eine gute Übereinstimmung, abgesehen vom schwächer ausgeprägten aber noch immer vorhandenen



Abb. 6-12 Absorbierend vs. ideale Wand: Effekt der Reflexionen und des Wagenkastens bei 4 kHz



Abb. 6-13 Oben reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM





Effekt der diskreten Materialübergänge (Abb. 6-13), welcher durch die Berücksichtigung der Fresnelzonen geglättet wird (Abb. 6-14). Das Maximum ist gegenüber der BEM leicht verschoben aber vergleichbar hoch.

Bei der mittig reflektierenden Wand ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 6-15). Fresnelzonen zeigen hier wenig Änderung und werden daher nicht dargestellt.

Bei der vollständig reflektierenden Wand zeigt sich ähnlich wie bei der oben reflektierenden Wand eine Verschiebung des Maximums zu tieferen Positionen, aber auch hier ist die Amplitude der Veränderungen in einem ähnlichen Bereich (Abb. 6-16).



Abb. 6-14: Oben reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-15: Mitte reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-16: Reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM

6.1.1 Zweites Gleis

Wenn das zweite Gleis simuliert wird (4 m Abstand von der Gleisachse des der LSW am nächsten Gleises), zeigt sich, dass trotz der größeren Entfernung noch immer starke Veränderungen aufgrund der reflektierenden Elemente auftreten. Insgesamt ist der Effekt aber wie zu erwarten kleiner, da bei größerem Quellabstand die Beugungseffekte weniger stark ausgeprägt sind, und daher schon der direkte Pfad (inklusive Beugung) einen größeren Schalldruckpegel erzeugt. Ebenfalls zu erwarten war, dass die Schalldruckpegelerhöhungen



Abb. 6-17: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts





auf tieferen Empfangspositionen auftreten werden, da der Winkel der reflektierten Schallpfade deutlich flacher ausfällt.

Abb. 6-17 und Abb. 6-18 zeigen den Vergleich BEM-ÖAL für oben reflektierend ohne und mit Berücksichtigung der Fresnelzonen. Die ÖAL zeigt geringere Unterschiede als die BEM, wobei die Abweichungen im unteren Bereich bei der BEM wiederum durch Berücksichtigung der Absorption an der Beugekante in der Referenzbedingung ausgeglichen wurden.

Mittig reflektierende Elemente (Abb. 6-19) zeigen eine gute Übereinstimmung. Der vollständig reflektierende Fall wird bei der BEM auch eher höher eingeschätzt als bei der ÖAL (Abb. 6-20).



Abb. 6-18: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-19: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-20: Reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts

Bezogen auf die ideale Wand steigen die Werte um bis zu 4 dB an, qualitativ ändert sich nicht sehr viel. Interessant ist aber der Unterschied zwischen absorbierend und ideal, welcher noch immer bis zu 4 dB betragen kann und sowohl von der ÖAL-Methode als auch der BEM sehr ähnlich bestimmt wird (Abb. 6-21). Die Ausnahme ist hier das 250 Hz Frequenzband, wo der Effekt bei der ÖAL bei 2 dB liegt. Bei noch tieferen Frequenzen ergeben sich ebenfalls Differenzen. Hier ist vmtl. wichtig zu berücksichtigen, dass bei tiefen Frequenzen die Wellenlänge schon sehr groß wird und daher die energetische Betrachtung der ÖAL bei den Mehrfachreflexionen an ihre Grenzen stößt.



Abb. 6-21: Absorbierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM







6.1.2 Letztes Gleis

Beim letzten Gleis (Gleisachse 10 m vom ersten Gleis entfernt) ergeben sich bei der BEM Effekte von 4 dB (oben, Abb. 6-22), 5 dB (mittig, Abb. 6-23) und 7 dB (voll reflektierend, Abb. 6-24), wobei unter Berücksichtigung der Beugekante die Abweichung bei der ÖAL im Bereich von 2 dB und darunter liegt. Qualitativ sind die Ergebnisse sehr ähnlich zum ersten Gleis.



Abb. 6-22: Oben reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-23: Mitte reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM





Abb. 6-24: Reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-25: Absorbierend vs. ideal, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu drei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM

Gegen die ideale Wand gerechnet, ergeben sich etwas höhere Effekte da auch die absorbierende Wand einen gewissen Anteil an Mehrfachreflexionen hat (Abb. 6-25).

6.2 3 m hohe LSW

Es wurden folgende Situationen mit einer 3 m hohen LSW verglichen:

- reflektierendes Band von der Oberkante bis 1 m unter der Oberkante
- reflektierendes Band 1 m unter der Oberkante bis 2 m unter der Oberkante
- vollständig reflektierende LSW





Bei der 3 m hohen LSW wurden für die ÖAL-Berechnungen 1, 2, 3 und 5 Reflexionen berücksichtigt. Abb. 6-26 zeigt den Vergleich zwischen BEM und ÖAL für die oben reflektierende LSW. Zusätzlich zu der bei 2 m schon beobachteten scharfen Abgrenzung der Reflexionen tritt hier ein zusätzlicher Effekt auf, nämlich dass im Vergleich zur BEM die erste Reflexion bei deutlich größeren Winkeln (von der LSW-Kante betrachtet) Effekte produziert. Dieser Unterschied ist auf die Höhe des Wagenkastens zurückzuführen, da dieser bei der ÖAL als unendlich hoch angenommen wird und bei der BEM die erste Reflexion hier schon in die Nähe der Oberkante des Wagenkastens rückt, und daher nur mehr teilweise oder für noch größere Höhen gar keine Reflexion auftritt.

Für zwei Reflexionen ist das Ergebnis stark auf höhere Bereiche beschränkt. Abb. 6-27 zeigt die Ergebnisse für 3 und 5 Reflexionen.



Abb. 6-26: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit einer oder zwei Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)









Abb. 6-27: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei oder fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)

Berücksichtigt man die Fresnelzonen (Abb. 6-28), zeigt sich noch ein homogeneres Bild aber insgesamt ist der Effekt bei der ÖAL, wie schon bei 2 m, geringer als bei der BEM.

In der Gesamtübersicht (Abb. 6-29, mit Fresnel) zeigen sich im Wesentlichen die oben genannten Effekte.

Klar zu sehen ist, dass selbst bei 5 Reflexionen der betroffene Bereich nach unten eingeschränkt ist im Vergleich zur BEM. Allerdings ist der Unterschied von 3 auf 5 Reflexionen schon sehr gering, sodass diese Abweichung durch eine zu geringe Anzahl von Reflexionen nicht erklärt werden kann. Die Ursache hierfür liegt vmtl. wiederum and der absorbierenden Beugekante in der Referenzbedingung.

Abb. 6-30 zeigt den Vergleich der reflektierenden und absorbierenden Wand ohne Wagenkasten. Im Vergleich zu 2 m ist der Effekt hier noch stärker, was vmtl. am steileren Winkel zwischen Quelle und LSW-Oberkante liegt, wodurch ein geringerer Winkel zwischen Strahl und LSW entsteht.









Abstand zu Gleis 1 (m)

Abb. 6-28: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei oder fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)



Abb. 6-29: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM





Abb. 6-30: Reflektierend vs. absorbierend ohne Wagenkasten: Gesamtübersicht mit Fresnelzonen



Abb. 6-31: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts

Das Ergebnis nach näherungsweiser Berücksichtigung des Beugekanteneffekt ist in Abb. 6-31 dargestellt und es zeigt sich ein deutlich besseres Bild.

Wenn nun die Punkte, welche über dem Pfad der ersten Reflexion liegen sofern diese auf die Oberkante des Wagenkastens trifft, auf 0 dB (also keine Erhöhung) gesetzt werden, ergibt sich das Bild in Abb. 6-32, wo deutlich ersichtlich ist, dass die Übereinstimmung im gesamten Bereich nun sehr gut ist. Unklar ist hier, ob 3 oder mehr Reflexionen sinnvoll sind, aber der Effekt der 4. und 5. Reflexion scheint nicht relevant zu sein.



-

Bundesministerium

Abb. 6-32: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-33: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei und fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)









Abb. 6-34: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei und fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)



Abb. 6-35: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM





Für den mittig platzierten Reflektor zeigen bereits die ersten beiden Reflexionen einen großen Effekt über den gesamten Bereich (Abb. 6-33), vor allem wenn noch die Fresnelzonen miteinbezogen werden (Abb. 6-34), wobei im oberen Bereich bei der BEM ein deutlich höherer Effekt zu beobachten ist.

Da hier der obere Bereich der Wand absorbierend ist, tritt weder der Beugekanteneffekt auf, noch spielen erste Reflexionen über dem Wagenkasten eine große Rolle, da diese an der absorbierenden Wand abgeschwächt werden. Trotzdem sollte auch hier die Höhe des Wagenkastens mit in Betracht gezogen werden.



Abb. 6-36: Reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-37: Reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts







Die Gesamtübersicht (Abb. 6-35, mit Fresnel) spiegelt im Wesentlichen die Ergebnisse wider. Die Ursache des großen Unterschieds zwischen 20 und 30° ist unklar.

Für die vollständig reflektierende Wand (Abb. 6-36) tritt bei 20-30° ebenfalls ein großer Unterschied auf. Werden hier sowohl die Beugekante berücksichtigt als auch hohe erste Reflexionen ausgeschlossen (Abb. 6-37), ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung, wobei der Beugekanteneffekt im unteren Bereich nicht ganz kompensiert wird. Die Vermutung ist, dass für die einzelnen Reflexionen die jeweiligen Beugungsterme einen Beitrag zum Unterschied zwischen der absorbierenden und reflektierenden Kante leisten.



Abb. 6-38: Absorbierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-39: Oben reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM







Wird die absorbierende Wand mit der idealen Wand verglichen (Abb. 6-38), zeigen sich auch hier wieder deutliche Effekte, trotz des Absorptionskoeffizienten im Bereich von 0,8 im hohen Frequenzbereich. Die Übereinstimmung mit der gerichteten Quelle in der BEM ist sehr gut, und es ist ersichtlich, dass ab der 3. Reflexion keine großen Änderungen mehr auftreten. Auch hier sind große Winkel wieder problematisch, da der Wagenkasten interferiert. Im Prinzip zeigen die Vergleiche der (teilweise) reflektierenden Wandkonfigurationen ähnliche Tendenzen (Abb. 6-39 bis Abb. 6-41).



Abb. 6-40: Mitte reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-41: Reflektierend vs. ideal: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM





6.2.1 Zweites Gleis

Beim zweiten Gleis (4 m Abstand von der Gleisachse) ergeben sich bei der BEM noch immer Unterschiede von 3 dB (oben, Abb. 6-42), 8 dB (mittig, Abb. 6-43) und 10 dB (voll reflektierend, Abb. 6-44), wobei unter Berücksichtigung der Beugekante und hoher erster Reflexionen die Abweichung an manchen Stellen bei der ÖAL im Bereich bis zu 2 dB liegt, größtenteils aber geringer ist. Qualitativ sind die Ergebnisse sehr ähnlich zum ersten Gleis.



Abb. 6-42: Oben reflektierend vs. absorbierend, zweites Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-43: Mitte reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-44: Reflektierend vs. absorbierend, zweites Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts

6.2.2 Letztes Gleis

Beim letzten Gleis (Gleisachse 15 m vom ersten Gleis entfernt) ergeben sich bei der BEM Effekte von 1 dB (oben, Abb. 6-45), 5 dB (mittig, Abb. 6-46) und 7 dB (voll reflektierend, Abb. 6-47), wobei unter Berücksichtigung der Beugekante und hoher erster Reflexionen die Abweichung bei der ÖAL im Bereich von 1 dB und darunter liegt. Qualitativ sind die Ergebnisse sehr ähnlich zum ersten Gleis.



Abb. 6-45: Oben reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-46: Oben reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-47: Reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu fünf Reflexionen ohne Fresnelzonen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts

6.3 4 m hohe LSW

Es wurden folgende Situationen mit einer 4 m hohen LSW verglichen:

- reflektierendes Band von der Oberkante bis 1 m unter der Oberkante
- reflektierendes Band 1 m unter der Oberkante bis 2 m unter der Oberkante
- reflektierendes Band 2 m unter der Oberkante bis 3 m unter der Oberkante
- vollständig reflektierende LSW





Bei der 4 m hohen LSW wurden für die ÖAL-Berechnungen 1, 2, 3 und 7 Reflexionen berücksichtigt. Abb. 6-48 zeigt den Vergleich zwischen BEM und ÖAL für die oben reflektierende LSW für 3 und 7 Reflexionen. Drei Dinge sind hier zu beachten. Erstens, 4. bis 7. Reflexion haben nur sehr geringen Einfluss. Zweitens, das Problem der unbegrenzten Höhe des Wagenkastens wirkt sich hier bis inklusive der 3. Reflexion aus. Drittens, auch hier spielt die Absorption an der Beugekante eine wesentliche Rolle.

Berücksichtigt man die Fresnelzonen (Abb. 6-49), verteilt sich der Effekt ab der 4. Reflexion weiter nach unten, wo die BEM allerdings keinen nennenswerten Effekt produziert.

Bei der Betrachtung über alle Frequenzen ergeben sich hier keine nennenswerten Unterschiede. Wird nun, wie bereits bei 3 m versucht, die Absorption an der Kante zu berücksichtigen, ergibt sich ein interessantes Bild, da hier anscheinend überkompensiert wird (Abb. 6-50). Die Ursache hierfür ist unklar. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei 4 m die Unterkante des Wagenkastens bereits den direkten Pfad zur Beugekante beeinflusst und sich



Abb. 6-48: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei und sieben Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)









Abb. 6-49: Oben reflektierend vs. absorbierend: Berechnung mit ÖAL mit drei und sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM (von oben nach unten)



Abb. 6-50: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts





dadurch der Beugungseffekt verändert. Es sind auch die Effekte der Reflexionen, welche in der BEM-Berechnung aufgrund der beschränkten Höhe des Wagenkastens nicht mehr vorkommen, klar ersichtlich. Wird der Bereich oberhalb der 3. Reflexion (welche die Wagenkante trifft) auf 0 gesetzt, ergibt sich de facto kein Effekt des Elements mehr (Abb. 6-51).

Für die Wandkonfiguration mit dem reflektierenden Band 1 m unterhalb der Beugekante (Wandkonfiguration Mitte oben) zeigt sich ein deutlich höherer Effekt, wobei auch hier die hohen Reflexionen in der ÖAL deutliche Unterschiede verursachen (Abb. 6-52). Die



Abb. 6-51: Oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen mit beschränkter erster, zweiter und dritter Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-52: Mitte oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM





Berücksichtigung der Fresnelzonen verursacht auch hier eine bessere Übereinstimmung (Abb. 6-53). Aufgrund der Vermischung mehrerer Reflexionen in den oberen Bereichen kann hier nicht einfach ein Bereich ausgenommen werden, sondern es müssten die Reflexionen jede für sich beschränkt und danach addiert werden.

Für die Wandkonfiguration mit dem reflektierenden Band 2 m unterhalb der Beugekante (Wandkonfiguration Mitte-unten) ergibt sich ähnlich schon wie bei der 3 m hohen Wand mit mittig platzierten Reflektoren eine sehr gute qualitative Übereinstimmung, allerdings wird der Effekt bei der BEM fast über den gesamten Bereich höher berechnet als bei der ÖAL



Abb. 6-53: Mitte oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-54: Mitte unten reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM

135





(Abb. 6-54). Die Berücksichtigung von Fresnelzonen führt hier zu einer Verschiebung und insgesamt etwas schlechteren Übereinstimmung (Abb. 6-55).

Abb. 6-56 zeigt den Vergleich für die reflektierende Wand. Das deutlich höhere Ergebnis bei 7 Reflexionen zwischen -10 und 20° lässt vermuten, dass eine Berücksichtigung von 7 Reflexionen deutlich zu hoch ist, und eher im Bereich um 3 herum ausreichend sein dürfte. Ein Vergleich mit der ideal absorbierenden Wand bzw. bei der BEM mit der Variante ohne Wagenkasten ist bei 4 m Wandhöhe (am ersten Gleis) nicht mehr möglich, da hier die untere Wagenkante schon zu stark den direkten Pfad beeinflusst, und daher der Wagenkasten nicht nur die reflektierten Pfade signifikant beeinflusst.



Abb. 6-55: Mitte unten reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-56: Reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen ohne Fresnelzonen und BEM





6.3.1 Zweites Gleis

Beim zweiten Gleis (4 m Abstand von der Gleisachse) ist der Effekt der reflektierenden Paneele deutlich reduziert. Beim oben platzierten Paneel ergibt sich im Großen und Ganzen kein nennenswerter Effekt mehr, wenn die über der Wagenkastenoberkante liegenden Reflexionen ignoriert werden (Abb. 6-57). Wird der Reflektor weiter unten positioniert, ergeben sich noch Unterschiede zur absorbierenden Wand von maximal 3 dB. Hier ist klar ersichtlich, dass höherliegende Reflexionen das Ergebnis der ÖAL stark beeinflussen (Abb. 6-58).



Abb. 6-57: Oben reflektierend vs. absorbierend, zweites Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen mit beschränkter erster Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-58: Mitte-oben reflektierend vs. absorbierend: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-59: Mitte-unten vs. absorbierend, zweites Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM

Abb. 6-59 zeigt den Vergleich für das 2 m unter der Beugekante angebrachte reflektierende Element. Qualitativ ergibt sich eine gute Übereinstimmung, aber wie schon beim ersten Gleis ergibt sich bei der BEM-Berechnung ein höherer Effekt.

6.3.2 Letztes Gleis

Beim letzten Gleis (20 m Abstand vom ersten Gleis) ist der Effekt der reflektierenden Paneele nochmals deutlich reduziert. Beim oben platzierten Paneel ist der Effekt deutlich unter 1 dB (Abb. 6-60). Wird der Reflektor weiter unten positioniert, ergeben sich noch Unterschiede zur



Abb. 6-60: Oben reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen mit beschränkter erster, zweiter und dritter Reflexion und BEM unter Berücksichtigung des Beugekanteneffekts



Abb. 6-61: Mitte-oben reflektierend vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM



Abb. 6-62: Mitte-unten vs. absorbierend, letztes Gleis: Gesamtübersicht Berechnung mit ÖAL mit bis zu sieben Reflexionen mit Fresnelzonen und BEM

absorbierenden Wand von maximal 2 dB (Abb. 6-61). Abb. 6-62 zeigt den Vergleich für das 2 m unter der Beugekante angebrachte reflektierende Element. Qualitativ ergibt sich eine gute Übereinstimmung, aber wie schon beim ersten Gleis ergibt sich bei der BEM-Berechnung ein höherer Effekt (ca. 4 dB vs. 3 dB).

6.4 Wagenkastenform

Aus den Messungen und den Validierungsberechnungen ist klar ersichtlich, dass die Wagenkastenform einen beträchtlichen Einfluss auf die Veränderung des





Einfügedämmmaßes durch reflektierende Elemente haben kann. Die Auswertungen erfolgten dort nur punktuell, also an den jeweiligen Messpunkten. Es soll hier nochmals kurz anhand verschiedener Formen (gekrümmte Außenwand, Kesselwagen) für einige Konfigurationen illustriert werden, wie sich die Effekte verändern, bzw. wie sich auch die Abhängigkeit von der Messposition verändert.

Abb. 6-63 zeigt den Einfluss des Wagenkastens auf den Effekt des oben platzierten Paneels. Der leicht gekrümmte Wagenkasten zeigt hier deutliche Effekte im Bereich um den Winkel Quelle-Beugekante (graue Linie). Bei größeren Winkeln zeigt sich ebenfalls ein gewisser Effekt, wobei zumindest ein Teil dieses Unterschiedes auch durch die leicht verschobene untere Beugekante des gekrümmten Wagenkastens entstehen könnte. Da aber beim



Abb. 6-63: Oben vs. absorbierend, erstes Gleis: Abhängigkeit von der Form des Wagenkastens



Abb. 6-64: Mitte vs. absorbierend, erstes Gleis: Abhängigkeit von der Form des Wagenkastens







Kesselwagen, bei welchem die untere Kante noch deutlich stärker verschoben ist (näher an der Gleisachse und weiter oben), kein solcher Effekt auftritt, liegt der Unterschied vmtl. an der Wagenkastenkrümmung. Der Kessel erzeugt aber im unteren Winkelbereich um die Horizontale deutliche Unterschiede. Wird das Paneel mittig angenommen, zeigen sich nur noch beim Kesselwagen Unterschiede, eine leichte Krümmung verursacht hier nur noch einen geringen Unterschied (Abb. 6-64).

Auch am zweiten Gleis zeigt sich eine ähnliche Tendenz, also größere Effekte bei oben platziertem Paneel für die beiden gekrümmten Wagenkästen und ein Effekt des Kessels bei mittig platziertem Paneel.



Abb. 6-65: Oben vs. absorbierend, erstes Gleis, 4m: Abhängigkeit von der Form des Wagenkastens



Abb. 6-66: Mitte oben vs. absorbierend, erstes Gleis, 4 m: Abhängigkeit von der Form des Wagenkastens



Abb. 6-67: Mitte unten vs. absorbierend, erstes Gleis, 4 m: Abhängigkeit von der Form des Wagenkastens

Bei der 4 m hohen LSW ergeben sich teils deutliche Unterschiede zwischen den Wagenkästen, die sehr stark von der Positionierung der reflektierenden Paneele abhängig sind (Abb. 6-65 bis Abb. 6-67). Beim oben platzierten Paneel ergibt sich kein nennenswerter Unterschied, da hier der Effekt vom reflektierenden Material an der Beugekante verursacht wird. 1 m unter der Beugekante reduziert die Krümmung den Effekt der Reflexion fast vollständig, wogegen beim 2 m unter der Beugekante platzierten Paneel ein deutlicher, leicht verschobener Anstieg des Schalldruckes auftritt, der aber um bis zu 3 dB geringer ist. Am zweiten Gleis ergeben sich keine qualitativen Unterschiede.



7 BERÜCKSICHTIGUNG REFLEKTIERENDER LÄRMSCHUTZWAND-ELEMENTE IN DER ÖAL 28

Die mit Messdaten validierten BEM-Berechnungen zeigen, dass reflektierende Wandelemente signifikante Einflüsse auf die Immissionswerte haben können. Eine Berücksichtigung in der ÖAL 28 erscheint daher grundsätzlich sinnvoll. Auch wurden entsprechende Adaptionen vorgeschlagen, um ähnliche Ergebnisse mittels ÖAL zu erhalten wie bei BEM-Berechnungen. Zum Teil wurde in den vorangegangenen Ausführungen schon auf einige Aspekte hingewiesen, die es bei einer etwaigen Berücksichtigung in der ÖAL 28 zu beachten gilt. Nachfolgend sollen diese zum Teil ergänzt, zusammengefasst und vertiefend diskutiert werden.

7.1 Problematiken bei Anwendung des Normenkreises 16272

Die Normen/technischen Spezifikationen der Reihe 16272-x über Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Lärmschutzwänden und verwandten Vorrichtungen zur Beeinflussung der Schallausbreitung sind an die Reihe 1793-x über Lärmschutzvorrichten an Straßen angelehnte, bahnspezifische Normen. Diese betreffen folgende Bereiche:

- ÖNORM EN 16272-1 und -2 [37], [38]: Luftschallabsorption und -dämmung im diffusen Schallfeld (Hallraum)
- ÖNORM EN 16272-3-1 und -3-2 [27], [39]: Schienenverkehrsspektrum diffus und gerichtet
- ÖNORM EN 16272-4 [4]: Schallbeugung in gerichteten Schallfeldern
- ÖNORM EN 16272-5 und -6 [5], [40]: Luftschallreflexion und -Dämmung im gerichteten Schallfeld (in-situ Messung)
- ONR CEN/TS 16272-7 [6]: In-situ Messung der Einfügedämmung

Aufgrund der Art der Studie, welche sich mit den Effekten von veränderter Absorption und dem dadurch veränderten Einfügedämmmaß auseinandersetzt, sind die Regelwerke ÖNORM EN 16272-2, -3-1, -3-2 und -6 hier nicht relevant, da eventuelle Einflüsse auf die Transmission durch die Wand hier nicht betrachtet werden.

Durch Messungen und Berechnungen wurden starke Positionseffekte (d.h. verändertes Einfügedämmmaß für unterschiedlich vertikal positionierte, aber gleich große reflektierende Oberflächen) festgestellt. Die Messung der Absorption verschiedener solcher Material-Konfigurationen im diffusen Schallfeld (ÖNORM EN 16272-1) ist daher nicht sinnvoll, da hier







jegliche veränderte Positionierung reflektierender Anteile unter der Annahme eines idealen Diffusfeldes das gleiche Ergebnis, nämlich eine vom reflektierenden Flächenanteil abhängige reduzierte Absorption hervorbringen sollte. Unterschiede in der gemessenen Absorption können hier an den Rändern entstehen oder durch ein nicht ideales diffuses Schallfeld. Solche Unterschiede stehen aber in keiner Beziehung zu den in-situ gemessenen Veränderungen des Einfügedämmmaßes.

Im gerichteten Schallfeld (ÖNORM EN 16272-5) ergeben sich ebenfalls Probleme mit der Anwendbarkeit. Typischerweise sollte die zu messende Wand mindestens 4 m hoch sein, es ist aber für in-situ-Anwendungen auch zulässig niedrigere Wände zu messen, wobei hier die untere Frequenzgrenze ansteigt. Bei 2 m Höhe liegt diese im Bereich von 800 Hz, also in einem Bereich in dem laut Messungen schon Effekte der reflektierenden Elemente auftreten können. Bei 1,5 m würde diese bereits auf 2 kHz ansteigen.

Prinzipiell ist die Messung an unebenen oder inhomogenen Prüfkörpern vorgesehen und es werden auch Vorgangsweisen beschrieben, wobei in der Norm nur auf periodische Unebenheiten eingegangen wird. Inhomogene Prüfkörper werden nur als aus mehreren Materialien bestehend definiert, es werden aber keine weiteren Schritte definiert.

Bei unebenen Prüfkörpern soll an verschiedenen Punkten der Unebenheit gemessen werden, aber möglichst nahe der mittleren Höhe der Wand. Wendet man dies auf die unterschiedlichen Materialen an, so entstünden bei den hier betrachteten Konfigurationen zwei Probleme. Erstens, reichen die Elemente teilweise bis zur Wandoberkante, hier würden Beugungseffekte zu verfälschten Messergebnissen führen. Zweitens, können diese Elemente auch deutlich unterhalb der halben Höhe enden. Dies wiederum führt zu einer nochmaligen Absenkung der unteren Frequenzgrenze.

Die Norm ÖNORM EN 16272-4 ist für einen untersuchten Fall interessant, nämlich dann, wenn der obere Bereich (Beugekante) reflektierend ausgeführt wird. Wie die Berechnungen mittels der BEM gezeigt haben, ist hier ein gewisser Effekt durch eine modifizierte Beugung zu erwarten, welche durch das reine Reflexionsmodell in der ÖAL 28 nicht abgebildet werden kann. Die Messungen in dieser Norm zielen üblicherweise auf die veränderte Beugung durch Aufsätze ab, aber auch der Fall der wegfallenden Absorption im Kantenbereich ist laut Simulationen relevant. Es gibt hier aber weder in der Europäischen Richtlinie noch in der ÖAL 28 einen Zusatz, wie solche modifizierten Beugekanten berücksichtigt werden können.

Die Technische Spezifikation ONR CEN/TS 16272-7 beschreibt die Vorgangsweise einer insitu Bestimmung des Einfügedämmmaßes. Es werden 3 prinzipielle Möglichkeiten beschrieben: die Messung im regulären Betrieb, die Messung mit Hilfe von Versuchszügen

144






und die Messung mittels eines Lautsprechers. Letztere ist im Hinblick auf die Ergebnisse des Projektes GLAS problematisch, da hierbei eben keine Mehrfachreflexionen berücksichtigt werden. Der einzige Effekt, der gemessen werden kann ist der der Beugekante, falls in diesem Bereich eingegriffen wird. Die Ergebnisse der BEM-Berechnungen ohne Wagenkasten zeigen dies sehr eindrücklich. Es sollte hier angedacht werden, für diesen Schallquellentyp (Typ C im Dokument) eine einschränkende Bedingung hinzuzufügen, welche die Verwendung auf LSWs beschränkt, bei denen keine Effekte durch Mehrfachreflexionen zu erwarten sind.

7.2 Ansatz einer ausbreitungsspezifischen Adaption

Die BEM-Simulationsergebnisse zeigen sehr deutlich, dass bei Personenzügen mit gerader, reflektierender Wagenwand parallel zur Lärmschutzwand abhängig von deren jeweiligem lokalen Reflektionsverhalten sehr unterschiedliche Verteilungen der Immissionsdifferenzen bzw. Einfügedämmmaße entstehen können. Diese werden zum einen von den Mehrfachreflexionen niedriger Ordnung geprägt. Zum anderen beeinflusst vor allem die Beugung an der Wandoberkante die häufig relevanten, unter der Beugekante liegenden Bereiche hinter der Lärmschutzwand, wobei gerade den flacheren Ausbreitungspfaden von Mehrfachreflexionen hier hohe Bedeutung zukommt. Durch dieses Zusammenspiel sind vor allem im mittleren und oberen Frequenzbereich ausgeprägte, keilförmige Verteilungen der Immissionsdifferenzen zu beobachten, die auch mehrere Maxima in verschiedenen Winkeln aufweisen können.

Der einfachste Ansatz um reflektierende Wandelemente im Prognosemodell zu berücksichtigen, wäre es, von einer Lärmschutzwand mit vollflächig homogenen Absorptionseigenschaften auszugehen und lediglich das Absorptionsspektrum abhängig von den jeweiligen geometrischen Verhältnissen von Strecke, Lärmschutzwand und Position der reflektierenden Elemente zu machen. Allerdings ist es einsichtig (vgl. beispielsweise Abb. 5-7 und Abb. 5-8 aus Kapitel 5.3), dass dadurch die keilförmigen Strukturen in den Immissionsdifferenzen nicht erzielbar sind und daher vergleichsweise großen lokale Abweichungen in Kauf genommen werden müssten.

Ein weiterer emissionsseitiger Ansatz besteht in der Adaption des Richtverhaltens der Quelle *A* der RVE 04.01.02. Jedoch ist eine einfache Änderung des vertikalen Richtverhaltens nicht ausreichend, sondern es müssten abhängig von der geometrischen Situation zwischen Wand, Strecke und Position der reflektierenden Elemente für jede Spiegelquelle der Mehrfachreflexionen Anpassungen in vertikaler und – um auch die geänderten geometrischen Verhältnisse der schräg einfallenden Anteile zu berücksichtigen (vgl. Abb. 4-3 aus Kapitel 4.2)



 - in horizontaler Richtung erfolgen. Daher erscheint dieser Ansatz weder praktikabel, noch wäre dadurch das Problem der in Kapitel 5.4.2 aufgezeigten, nachteiligen Positionen der Quelle A und der Wagenkastenwand behoben.

Aus diesen Gründen ist für eine Berücksichtigung der Effekte reflektierender Wandelemente die bereits in Kapitel 5.4 dargelegte Anpassung des Ausbreitungsmodells gegenüber einer emissionsseitigen Anpassung klar zu bevorzugen. Abgesehen von den einfacheren und transparenteren Änderungen, beschränken sich diese rein auf die Behandlung der Mehrfachreflexionen in der ÖAL 28, während emissionsseitige Adaptionen in der RVE 04.01.02 trotzdem die erwähnte Positionsänderung der Quelle A und der Wagenkastenwand in der ÖAL 28 erfordern würden.

7.3 Empfohlene Modellanpassungen

Aus dem Vergleich der verschiedenen Wandhöhen, Abstände und Konfigurationen zeigt sich, dass die dargelegten Modifikationen (Einführung der Fresnelzonen, Beschränkung der Anzahl der Reflexionen, Absenkung der Quelle, sowie horizontale Verschiebung des Wagenkastens) im Wesentlichen zu einer sehr guten Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen der Randelementemethode führen.

Die Verwendung von Fresnelzonen ist vor allem dann wichtig, wenn die reflektierenden Anteile der Wand im oberen Bereich liegen, da für diese Fälle ansonsten sprunghafte Übergänge entstehen. Die Ursache liegt in der räumlichen Trennung der Anteile der einzelnen Reflexionen, die durch die Verwendung der Fresnelzonen geglättet wird. Befindet sich der reflektierende Bereich eher im unteren Teil der Wand, kann es teilweise auch zu einer sehr leichten Verschiebung gegenüber dem Effekt in der Randelementemethode kommen.

Die Einschränkung der Anzahl der Reflexionen ist ebenfalls ein wesentlicher Aspekt, der sich deutlich in der Analyse zeigt. Bei den Wänden mit 2 m oder 3 m Höhe zeigt sich, dass die Übereinstimmung sehr gut ist. Bei 3 m Höhe ist der Unterschied von 3 zu 5 Reflexionen so gut wie immer vernachlässigbar. Bei der vollständig reflektierenden Wand zeigt sich tendenziell sogar schon eine Überschätzung. Bei 4 m Höhe ist dieser Effekt für 7 Reflexionen im Vergleich zu 3 Reflexionen schon sehr stark ausgeprägt, wogegen für teilreflektierende Wände der Unterschied wiederum zu vernachlässigen ist. Der Grund für diesen Unterschied zwischen teilund vollreflektierender Wand liegt darin, dass bei Ersterer Reflexionen höherer Ordnung mehrmals auf absorbierende Wandabschnitte treffen. Auf Basis dieser Ergebnisse und der erhöhten Rechenzeit bei hohen Reflexionsordnungen scheint eine striktere Einschränkung auf





3 bis 5 Reflexionen sinnvoll. Dies liegt deutlich unter der auf geometrischen Argumenten basierenden Einschränkung bei hohen Wänden.

Der Vergleich der beiden Berechnungsmethoden zeigt einen weiteren Punkt auf, nämlich den Effekt der Höhe des Wagenkastens. Die ÖAL 28 beschränkt die Höhe des Wagenkastens nicht. Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass bei höheren Wänden und hohen Lagen (relevant erst ab Abstrahlwinkel von der Beugekante von rund 30°) ein Einfluss der Oberkante des Wagenkastens bestehen kann. Allerdings ist dieser Effekt auf Konfigurationen mit höher liegenden Reflektoren beschränkt. Zudem ist dieses Verhalten implizit in den Modellannahmen der ÖAL 28 enthalten, weshalb die Autoren davon ausgehen, dass die davon betroffenen, bereits bei mittleren Abständen höher liegenden Immissionsbereiche (z.B. in 25 m Entfernung, nur Höhen ≥14,5 m) nur geringe praktische Bedeutung aufweisen.

Ein Effekt, der sich im Vergleich der Berechnungsmethoden gezeigt hat, ist nicht auf die Behandlung von Mehrfachreflexionen, sondern auf den Unterschied in der Berechnung der Beugung an sich zurückzuführen. Befinden sich reflektierende Elemente im Bereich der Beugekante, so erzeugt dies bei der Berechnung mit der Randelementmethode eine Erhöhung des Schalldruckpegels in niedrigeren Lagen, da bei der Randelementmethode die Absorption an der Beugekante mitberücksichtigt wird. Die gute Übereinstimmung mit den Messungen lässt darauf schließen, dass dieser Effekt auch in-situ auftritt. Bei den Berechnungen mittels der ÖAL 28 wird die Beugekante hingegen unabhängig vom Material betrachtet. Beim Vergleich der beiden Berechnungsmethoden ergaben sich dadurch Unterschiede von bis zu maximal 3 dB vor allem in Bereichen mit großen Beugewinkeln, also nahe hinter der Wand. Bei hohen Wänden (4 m) können solche Effekte im Bereich von 1-2 dB laut Berechnungen (ohne messtechnischen Nachweis) auch in größeren Entfernungen und Höhen bei Frequenzen ≥500 Hz auftreten (siehe z.B. Abb. 6-48). Allerdings ist hier auch zu bedenken, dass zumindest bei kleineren Paneelen im Beugekantenbereich, die Reflexionen selbst keine wesentlichen Effekte hinter der Lärmschutzwand haben.

Da dieser Effekt einen zentralen Teil der ÖAL 28 betrifft, kann er nicht sinnvoll berücksichtigt werden. Weiters werden hier die Art der Lärmschutzwand und die Ausprägung der Beugekante eine Rolle spielen. Ein Weg dies zu vermeiden ist es, wenn möglich, reflektierende Elemente nicht zu nahe an der Beugekante zu platzieren.

Ein letzter Aspekt ist eine alternierende Anbringung von reflektierenden Elementen in einer bestimmten Höhe entlang der Längsrichtung der Lärmschutzwand, wie sie in der Messkampagne auch erhoben wurde. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Berechnungen mittels der Randelementemethode mit den Messungen scheint hier die





Mittelung der Absorptionskoeffizienten der absorbierenden und reflektierenden Elemente über die Länge der Anbringung zulässig. Dadurch ist nur ein Höhenprofil der Absorption, aber kein Längsprofil für den relevanten Abschnitt notwendig.

7.4 Einflussfaktor Wagenkastenform

Die Wagenkastenform stellt, wie zu erwarten, einen wesentlichen Einflussfaktor für den Effekt reflektierender Lärmschutzwandelemente dar. Effekte der Wagenkastenform konnten sowohl in den Messungen gezeigt, als auch mittels Berechnungen nachvollzogen werden. In Kapitel 6.4 wurde anhand von einem leicht gekrümmten Wagenkasten und mittels eines Kesselwagenquerschnitts gezeigt, dass in den Berechnungen aufgrund der Mehrfachreflexionen lokale Effekte von bis zu 4 dB auftreten können.

Bezogen auf die ÖAL 28 besteht aktuell keine direkte Möglichkeit, den Effekt der Wagenkastenform rechnerisch zu berücksichtigen, da die Rahmenbedingungen für die Berechnungen zu stark von den dafür notwendigen Anforderungen abweichen. Einerseits müsste der Wagenkasten in seiner tatsächlichen Form abgebildet oder die Form zumindest angenähert werden. Als Konsequenz müssten die Reflexionen über ein weitaus komplexeres Spiegelquellenmodell beschrieben werden, wodurch sich auch der Rechenaufwand deutlich erhöhen würde.

Darüber hinaus bestehen bei einigen Wagenkastenformen Überhänge, wodurch Strahlen beispielsweise am Boden reflektiert werden und so ebenfalls zu den Immissionen beitragen können. In der ÖAL 28 wird aber immer von einem direkten Strahl ausgegangen, und für diesen der Bodeneffekt berechnet (die Berechnung wird modifiziert, falls sich relevante Beugekanten im Pfad befinden). Bei hängenden Hindernissen bildet der Boden selbst eine Spiegelebene für den direkten Strahl, was in der ÖAL 28 grundsätzlich nicht vorgesehen ist und weshalb diese Rechenvorschrift hierfür nicht anwendbar ist.

Im Hinblick auf die Prognoserechnung sind reflektierende Wandelemente daher bei Personenzügen mit klassischer Wagenkastenform mit näherungsweise senkrechten Seitenwänden zu berücksichtigen, da die erwähnten signifikanten Effekte bestehen und diese durch die adaptierte Rechnung gut abgebildet werden können. Für Güterverkehr besteht hier jedoch das Problem der Heterogenität: während für Flachwagen ohne Beladung Mehrfachreflexionen entfallen, zeigen andere Formen wieder sehr unterschiedliche Effekte. Beispielsweise verbreitern Kesselwagen die im Querschnitt vorhandene Keilform der Immissionserhöhung, wodurch die höchsten Immissionswerte tendenziell abgeschwächt werden. Bei mit Containern beladenen Wagen ist hingegen teilweise eine Abschwächung zu







beobachten. Und komplizierteren Wagenformen, bei Schotterwagen, bei wie Holztransportwagen, oder KFZ-Transportwagen (mit oder ohne Beladung) ist von unterschiedlichen Effekten auszugehen. Wegen der offenen Bauweise beim Wagenaufbau und im Unterflurbereich und der meist vorhandenen, größeren Lücken zwischen einzelnen Wagen kann den Güterwagen gegenüber Personenwagen allgemein nur ein etwas hinsichtlich verminderter Effekt der über die Lärmschutzwand reflektierten Gesamtschallenergie attestiert werden.

mittlere Zusammensetzung von Fahrzeugtypen und Beladungszuständen Eine im Güterverkehr ist nicht allgemein prognostizierbar, sondern es ist von streckenspezifischen Unterschieden auszugehen. Zudem sind auch Veränderungen innerhalb der für die Prognoserechnung relevanten, längeren Zeiträume von mehreren Jahren nicht auszuschließen (neue Fahrzeugtypen, geänderter Transportbedarf, etc.). Insofern sind Erhebungen des Status quo oder von vergangenen Entwicklungen des Fahrzeugmix an einer Strecke zwar grundsätzlich für eine Einordnung hilfreich, können aber nicht als langfristiges Fixum angesehen werden. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen im Rahmen der Normengebung ein Kompromiss zu wählen, welcher einerseits einen praktikable Prognoserechnung erlaubt und andererseits Abweichungen im tolerierbaren Rahmen hält. Möglichkeiten hierfür wären beispielsweise in Anlehnung an die derzeitige Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen bei vollflächig reflektierenden Wände Güterzüge wie Personenzüge zu behandeln und damit die Minderung der Lärmschutzwandwirkung tendenziell zu überschätzen oder pauschale Abschläge auf die Schallenergie der Mehrfachreflexionen zu vereinbaren.

Als Grundlage für die Normengebung, wurden zur Einschätzung der Effekte für die Wandkonfiguration 1 und 2 bei Lärmschutzwänden mit einer Höhe von 2 m und von 4 m jeweils für Gleis 1 und 2 mittels BEM für drei Wagenkastenformen (Personenzug mit senkrechter und gekrümmter Seitenwand, sowie Kesselwagen; durchgängige Wagenkastenform) berechnet und ausgehend vom Schienenverkehrslärmspektrums gemäß ÖNORM EN 16272-3-2 [27] als A-gewichtete Einzahlwerte über dem Beugekantenwinkel aufgetragen (exemplarische Darstellung siehe Abb. 7-1 und Abb. 7-2 bzw. sind alle erstellten Diagramme in Anhang A zu finden). Zudem wurden die Ergebnisse der Messungen in den beiden entfernten Messpunkten in 25 m, sofern entsprechende Abschnitte in Zügen vorhanden waren, als Punkte eingetragen. Neben dem Kesselwagen wurden dabei auch Container- und leere Flachwagen berücksichtigt. Jedoch sind diese Messergebnisse das Resultat von sehr wenigen, zum Teil auch einzelner, Vorbeifahrten und unterliegen daher vergleichsweise hohen Unsicherheiten.







Anhand der BEM-Ergebnisse in den Grafiken wird illustriert, dass die Reduktion der Abschirmwirkung nicht nur fahrzeugtyp- bzw. beladungsabhängig ist, sondern sich noch signifikant über die betrachtete Ausbreitungsrichtung ändert, wodurch pauschale Aussagen über verminderte Effekte von Güterfahrzeugen ohne Annahmen über Rahmenbedingungen verhindert werden. Durch den Personenzug mit senkrechter Seitenwand und durch die Nulllinie (im Fall von unbeladenen Flachwagen ist von einem verschwindenden Effekt durch Mehrfachreflexionen auszugehen) ist die Bandbreite der Effekte in der Regel gut abschätzbar.



Abb. 7-1: direkter Vergleich der Effekte bei verschiedenen Wagenkastenformen für Gleis 1, einer 2 m hohe Lärmschutzwand und einem oben reflektierenden, 1 m hohen Streifen (WK1) anhand von BEM-Berechnungen (Linien) und Messungen in 25 m Entfernung in 2 m und 4,5 m Höhe über SOK (Punkte)



Abb. 7-2: direkter Vergleich der Effekte bei verschiedenen Wagenkastenformen für Gleis 2, einer 2 m hohe Lärmschutzwand und einem oben reflektierenden, 1 m hohen Streifen (WK1) anhand von BEM-Berechnungen (Linien) und Messungen in 25 m Entfernung in 2 m und 4,5 m Höhe über SOK (Punkte)





8 ZUSAMMENFASSUNG

In Querschnitten mit Lärmschutzwänden ohne hochabsorbierende Wandoberflächen auf der gleiszugewandten Seite entstehen bei Zügen mit seitlichen, reflektierenden Wagenkastenwänden, zwischen Lärmschutzwand und Fahrzeugen Mehrfachreflexionen. Aus diesem Grund sind Lärmschutzwände an Bahnstrecken stets hochabsorbierend ausgeführt. Werden jedoch transparente und damit schallharte Elemente in die Wand integriert (z.B. um die visuelle Barrierewirkung für Fahrgäste und/oder Anrainer zu verringern), so können Mehrfachreflexionen aufgrund der reflektierenden Teilbereiche entstehen, welche die schallabschirmende Wirkung der Wände mindern.

Die ÖAL 28 enthält bereits eine Berechnungsmethode, die vorgibt, unter welchen Bedingungen solche Mehrfachreflexionen miteinzubeziehen sind. Allerdings basiert dieser Ansatz nur auf der Situation mit einer homogenen Wand und erlaubt nicht ohne weiteres die Berücksichtigung reflektierender Teilbereiche. Ziel des Projektes GLAS war es daher, Möglichkeiten zu finden, wie solche über die Wandhöhe variierenden Absorptionskoeffizienten berücksichtigt werden können und welchen Einschränkungen ein solcher Ansatz unterliegt.

Messungen

Die schalltechnischen Effekte von reflektierenden Wandelementen wurden im vorliegenden Projekt durch umfangreiche Referenzberechnungen analysiert. Für die Validierung des zugrunde liegenden Berechnungsmodells bedurfte es Schallmessungen in einem Querschnitt mit einer Lärmschutzwand, bei welcher in einem Versuchsaufbau verschiedene Wandkonfigurationen mit reflektierenden Wandelementen umgesetzt wurden. Die Auswahl wesentlicher Parameter für diese Messungen, wie eine geeignete Wandhöhe und geeignete Wandkonfigurationen sowie sinnvolle Messpunkte, wurde durch Vorberechnungen unterstützt. Basierend auf diesen Anforderungen wurde für die Messungen ein Querschnitt an der zweigleisigen Ostbahn bei Sarasdorf gewählt, in welchem sich eine Holzbeton-Lärmschutzwand mit 2 m Wandhöhe über SOK befindet (Testquerschnitt). Bei solch einer geringen Wandhöhe ist der Einbau transparenter Elemente zwar unüblich, jedoch ergaben die Vorberechnungen, dass bei dieser Höhe deutlich größere und damit zuverlässiger zu erfassende Auswirkungen in den Messpunkten bis rund 5 m Höhe zu erwarten sind, ohne dass Nachteile für die Modellvalidierung bestehen.

In rund 500 m Entfernung wurde in einem zweiten Querschnitt ohne Lärmschutzwand (Referenzquerschnitt) parallel gemessen, um die Emissionen der gleichen Züge bei vergleichbaren Geschwindigkeiten bzw. Betriebszuständen auch unter freier Schallausbreitung zu erfassen.







Reflektierende Wandelemente im Messquerschnitt wurden durch eine temporäre Anbringung von (stark reflektierenden) Schalungsplatten auf die gleiszugewandte Wandseite über einen Bereich von ±50 m um den Messquerschnitt realisiert. Dabei wurden neben dem Grundzustand einer vollflächig absorbierenden Wand drei verschiedene Konfigurationen (1 m hoher reflektierender Streifen bis zur Wandoberkante, um 0,5 m herabgesetzter Streifen und herabgesetzter Streifen, bei welchem nur jede zweite Platte montiert wurde) umgesetzt.

Die Messkonfiguration im Testquerschnitt umfasste 9 Mikrofonmesspunkte (zwei davon vor der Lärmschutzwand positioniert), einen induktiven Achszähler je Gleis für die Zugdetektion und Geschwindigkeitsermittlung, während im Referenzquerschnitt zwei Mikrofone, eine Videokamera zur Zugidentifikation und eine Doppellaserlichtschranke zur Achsmuster- und Geschwindigkeitsermittlung eingesetzt wurden. Die bemannten Messungen erfolgten im Sommer 2020 tageweise und ausschließlich bei trockenen Witterungsbedingungen und geringem Windaufkommen. Dabei wurden bei jeder Wandkonfiguration mit reflektierenden Elementen rund 100 bis 120 Vorbeifahrten je Gleis (zwei Messtage) und bei der Grundkonfiguration rund 140 Vorbeifahrten (drei Messtage) erfasst. Zudem wurde an einem weiteren Messtag im Referenzquerschnitt eine ähnliche Messkonfiguration mit 9 Messmikrofonen wie im Testquerschnitt aufgebaut und rund 70 Vorbeifahrten je Gleis gemessen.

Referenzberechnungen

Um Referenzberechnungen für den Vergleich mit der ÖAL 28 zu erhalten, wurde die Randelementemethode (BEM) verwendet. Die Validierung der Rechenmethode mittels der Messwerte zeigte teils eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen von den gemessenen Reduktionen des Einfügedämmmaßes in den Terzbändern von meist unter 1 dB, selten über 2 dB. Allerdings entstanden auch größere Abweichung bei zwei Zugtypen. Der Nahverkehrszug 2 hatte eine gekrümmte Oberfläche, der verringerte Effekt der reflektierenden Elemente konnte aber in der Simulation dadurch nicht erklärt werden. Berechnungen legen nahe, dass hier möglicherweise vom Rollgeräusch zu unterscheidende Emissionen von hoch liegenden Aggregaten eine entscheidende Rolle spielen. Um dies aber mit Sicherheit zu sagen, wären Messungen mit mehr Mikrofonen (z.B. Mikrofonarray) oder das Vorliegen konkreter Emissionswerte dieser Aggregate notwendig.

Ein zweiter Zugtyp, bei dem es zu größeren Abweichungen kam, waren geschlossene Güterzüge mit größeren vertikalen, reflektierenden Außenflächen (der Einfachheit halber als Containerzüge bezeichnet). Bei Verwendung des Querschnittes des Reisezuges ergibt sich beim nahen Gleis teils eine deutliche Überschätzung des Effekts der Reflexionen auf das







Einfügedämmmaß, vor allem bei Frequenzen ab 3,15 kHz. Die aus den Messungen abgeleiteten Effekte der Paneele streuen aber sehr stark. Hier spielen vermutlich mehrere Effekte eine Rolle. Einerseits können größere Abstände zwischen den Wagen vorkommen, andererseits sind Güterwagen offener gebaut als Personenzüge. Eine weitere Möglichkeit könnte sein, dass die im Gegensatz zu den Personenzügen strukturierte Oberfläche solcher Züge (z.B. Trapezbleche der Container oder ähnliches) durch Streuung zu einer Umverteilung der Energie bei der Reflexion führt, welche den Effekt der Mehrfachreflexionen auf ein größeres Gebiet verteilt, wobei hier nur ein Teil der betrachteten Züge tatsächlich Containerzüge waren. Im Vorgängerprojekt WiaBahn zeigten sich bei einem strukturierten Bahnsteigdach Effekte im Bereich der Wellenlänge der Struktur [25], was den Ergebnissen hier eher widerspricht, da hier höhere Frequenzen oberhalb der durch die geschätzte Wellenlänge der Struktur gegebenen Frequenz von ca. 1,5 kHz betroffen sind. Die Situation ist aber auch aufgrund der deutlich unterschiedlichen Messbedingungen nicht gut mit den Messungen in GLAS vergleichbar. Letztendlich kann die Ursache für den reduzierten Effekt aus den bestehenden 2.5D-Simulationen und Messungen nicht sicher abgeleitet werden. Hierzu wären Simulationen in 3D z.B. mit periodischen Strukturen notwendig.

Als Quellmodell hat sich eine Quelle auf SOK auf der der LSW näheren Schiene herauskristallisiert. Die Ausführung als omnidirektionale Quelle oder als ein Dipol mit 23° Neigung zur Horizontalen, hat einen relativ geringen Effekt. Da aber Quellmodelle wie das der ÖAL 28 eine horizontale und vertikale Richtcharakteristik beinhalten, wurde der Dipol als Standardmodell bestimmt. Quellen auf Höhe der Radachse führten zu teilweise deutlichen Überschätzungen des Effekts der Reflexionen, mit Ausnahme des Kesselwagens, bei dem das Rad bei den tiefer angeordneten Platten eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung liefert und die Annahme der Quelle auf der Schiene teilweise zur Überschätzung des Effektes führt.

Erkenntnisse aus Referenzberechnung

Aufgrund der Variabilität der Ergebnisse der Referenzberechnungen ist es schwierig, allgemeingültige und einfache Tendenzen abzuleiten. Im Falle von 2 m hohen Lärmschutzwänden kann ein 1 m hoher reflektierender Paneelstreifen Immissionserhöhungen gegenüber einer vollflächig absorbierenden Lärmschutzwandwirkung von mehreren Dezibel hervorrufen. Von den zwei betrachteten Anordnungen der Paneele (beginnend 0 m und 0,5 m unter der Wandoberkante) bewirkt die untere Position tendenziell eine höhere Minderung der Lärmschutzwandwirkung für Züge auf dem wandnahen Gleis einer zweigleisigen Strecke, während für Züge des entfernteren Gleises die Effekte sich annähern. Die größten





Immissionserhöhungen treten stets in mit der Entfernung zunehmenden Immissionshöhen gegenüber der horizontalen Ebene auf, wobei die Maxima der Erhöhungen bei Zügen auf dem wandnahen Gleis deutlich rascher mit der Entfernung ansteigen als bei Zügen auf dem entfernteren Gleis.

Im Fall von 4 m hohen Wänden ruft ein direkt unter der Wandoberkante angeordneter. 1 m reflektierender Paneelstreifen nur hoher eine sehr geringe Minderungen der Abschirmungswirkung hervor, da Reflexionen aufgrund der begrenzten Wagenkastenhöhe teilweise oder ganz über den Wagenkasten hinweg gehen. Als Folge werden die geringen Immissionserhöhungen vor allem durch den bereits erwähnten Beugekanteneffekt bestimmt, welcher bei niedrigeren Wänden nur unterhalb der horizontalen Ausbreitungsrichtung eine signifikante Rolle spielt. Wird bei 4 m hohen Wänden der reflektierende Streifen um 1 m unter die Wandoberkante abgesenkt. sind ähnlich wie bei 2 m hohen Wänden die Mehrfachreflexionen dominant und führen zu vergleichbaren Maxima der Immissionserhöhungen von bis zu mehreren Dezibel.

Dies deutet auf einen generellen Trend bei ebenem Gelände hin, dass direkt unter der Wandoberkante positionierte, reflektierende Elemente oftmals einen geringeren Effekt auf die Wandabschirmwirkung haben, als etwas tiefer angeordnete Elemente.

Bei größeren Quellentfernungen, welche bis zur 5-fachen Wandhöhe betrachtet wurden, nimmt die Minderung der abschirmenden Wandwirkung durch reflektierende Paneele ab, bei niedrigeren Wänden ist aber noch immer ein, jedoch räumlich eingeschränkter, Effekt vorhanden.

Aus den Messdaten lässt sich schließen, dass eine alternierende Anbringung von reflektierenden und absorbierenden Paneelen in einer durchgängigen Höhe der Lärmschutzwand eine wesentliche Reduktion des akustischen Effekts bewirken kann. Ob die optische Barrierewirkung der Lärmschutzwand dadurch reduziert wird, war aber nicht Teil dieser Untersuchung.

Normenkreis 16272

Ein Teil der Projektaufgabenstellung bestand in der Analyse der Anwendbarkeit bahnspezifischer Normen und technischer Spezifikationen der Reihe 16272-x in Bezug auf Wände mit reflektierenden Elementen. Ein Teil dieser Regelwerke ist nicht anwendbar, da diese entweder die Messung der Absorption im Hallraum (Teil 1) oder die Bestimmung der Transmission (Teile 2 und 6) sowie Verkehrslärmspektren (Teile 3-1 und 3-2) behandeln. Teil 4 beinhaltet Messvorschriften für die Messung von Beugekanten z.B. zur Evaluierung von Lärmschutzwandaufsätzen. Bezogen auf die vorliegenden Ergebnisse ist ein potentieller





Anwendungsfall die Situation mit reflektierenden Elementen im Bereich der Beugekante. Allerdings besteht aktuell keine Möglichkeit diese Effekte in der ÖAL 28 zu berücksichtigen. Die Anwendung von Teil 5 betreffend die in-situ Messung der Reflexionseigenschaften ist aufgrund der speziellen Wandkonfigurationen problematisch. Einerseits sind Messungen nahe am Boden oder der Beugekante notwendig, um verschiedene Messpositionen abzudecken, andererseits können diese Ergebnisse nicht sinnvoll mit den positionierungsabhängigen Effekten in Einklang gebracht werden. Für Teil 7, der in-situ Messung des Einfügedämmmaßes ergibt sich die Konsequenz, dass Messungen mittels eines Lautsprechers in Situationen mit reflektierenden Elementen nicht angewendet werden sollten, da die Effekte durch Mehrfachreflexionen nicht abgebildet werden können.

Anpassungen der ÖAL 28

Der Berechnungsansatz für Mehrfachreflexionen nach ÖAL 28 basiert auf Verwendung von Spiegelquellen, um Mehrfachreflexionen verschiedener Ordnung berücksichtigen zu können. Allerdings zeigten Vergleiche mit den Referenzberechnungen, dass erst eine Absenkung der Quellposition auf Schienenoberkante und eine Verschiebung der Reflexionsebene des Wagenkastens von der Position der wandnahen Schiene auf eine realitätsnähere Position ähnliche keilförmige Effektregionen hervorbringt.

Referenzberechnungen verdeutlichten, dass sich Mehrfachreflexionen je nach Position der reflektierenden Elemente zum Teil in keilförmigen Regionen verstärkt bemerkbar machen. Eine Berücksichtigung reflektierender Elemente durch Abänderung des Absorptionsverhaltens einer vollflächig absorbierenden Wand erwies sich daher als nicht sinnvoll, da derartige Effekte damit nicht erzielbar sind. Und auch eine rein emissionsseitige Berücksichtigung wurde rasch als unpraktikabel ausgeschlossen, da eine querschnittsabhängige Adaption des Emissionsverhaltens nicht nur für die ursprünglichen Linienquelle, sondern auch für alle betrachteten Spiegelquellen separat durchzuführen wäre.

Aus diesen Gründen wird ein Ansatz verfolgt, welcher auf dem bestehenden Reflexionsmodell der ÖAL 28 aufbaut, indem die Quellleistung einer Spiegelquelle entsprechend erhöht wird, wenn die zugehörige Mehrfachreflexion auf ein reflektierendes Wandelement trifft. Da allerdings ein strahlenbasiertes Modell zu teilweise physikalisch unrealistisch starken Konzentrationen des Effekts führt, bedarf es der Einführung von Fresnelzonen. Durch diese werden stets die Absorptionseigenschaften eines, den Reflexionspunkt umgebenden Bereichs einbezogen, sodass beim Übergang von absorbierender zu reflektierender Fläche eine Glättung des sprunghaften Reflexionsanstiegs entsteht. Aufgrund der geringsten







Abweichungen zu den Referenzberechnungen wird die Verwendung von λ /4-Fresnelzonen empfohlen.

Im Berechnungsmodell der ÖAL 28 ist keine Limitierung der Anzahl an einzubeziehenden Mehrfachreflexionen vorgesehen. Zwar bestehen geometrische Einschränkungen für höher liegende Immissionspunkte, jedoch zeigten die Referenzberechnungen auf, dass auch für tiefer liegende Immissionspunkte eine zu hohe Anzahl an Mehrfachreflexionen den Effekt reflektierender Elemente, insbesondere wenn große Teile der Wand reflektierend sind, überschätzt. Daher wurde in Anlehnung an reale Verhältnisse eine Unterkante der Wagenkastenwand bei 0,8 m über SOK eingeführt. Bei Mehrfachreflexionen höherer Ordnung käme der unterste Reflexionspunkt als Folge der flacher verlaufenden Schallstrahlen unterhalb dieser Kante zu liegen, was somit eine Limitierung der Mehrfachreflexionen bewirkt.

Die Berechnungsmethode nach der ÖAL 28 bietet keine Möglichkeit, Effekte durch Absorption an der Beugekante zu berücksichtigen. Die bei der Referenzmethode auftretenden Unterschiede durch Beugekanteneffekte, welche von der Frequenz, der Empfängerposition und auch der Wandhöhe abhängen, können daher in der ÖAL nicht abgebildet werden.

Absorptionseigenschaften von Wänden

Die Ausführungen in der ÖAL 28 über die für Mehrfachreflexionen zu verwendenden Wandabsorptionskoeffizienten sind mehrdeutig. Im tieferen Frequenzbereich von wenigen 100 Hz sind die Absorptionsfähigkeiten von absorbierenden Lärmschutzwänden in der Realität deutlich geringer als es die Einzahlwerte widerspiegeln. Exemplarische Berechnungen bei einer 4 m hohen Wand mit homogenen Absorptionseigenschaften zeigen Unterschiede in den Immissionen in den unteren Oktavbändern von rund 5 dB. Infolgedessen erscheint eine spektrale Beschreibung der Absorptionen als Basis für die Berechnung zwingend erforderlich. Für die Ermittlung der Absorptionseigenschaften homogener Wandelemente steht die erwähnte Normenfamilie 16727-x zur Verfügung. Zwar legt die ÖAL 28 für Reflexionen an vertikalen Hindernissen fest, dass die Absorptionseigenschaften nach der EN 1793-1 (Pendent der EN 16272-1 für Straßen) zu bestimmen sind, jedoch bescheinigen solche Hallraummessungen strukturierten Absorberoberflächen tendenziell zu hohe Absorptionsfähigkeiten, wodurch das Absorptionsspektrum in der Praxis Werte von 1 erreichen und/oder (entgegen der physikalischen Definition) den Wert 1 übersteigen können. Für letzteren Fall versagt das Formelwerk der ÖAL 28, aber auch bei Werten <1 ist von verfälschten Prognoseergebnissen auszugehen.

Demgegenüber lassen sich durch das Adrienne-Verfahren nach ÖNORM EN 16272-5 realistischere Absorptionsspektren ableiten. Die messtechnische Validierung des BEM-





Modells liefert gute Ergebnisse bei Verwendung des Adrienne-Absorptionsspektrums. Aus diesen Gründen sind für die Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen stets Absorptionsspektren nach ÖNORM EN 16272-5 zu nutzen.

Anwendungsaspekte

Reisezugwagen verfügen mit wenigen Ausnahmen meist über senkrechte schallreflektierende Seitenwände, bei welchen die Effekte durch reflektierende Lärmschutzwandelemente mittels der empfohlenen Adaptionen des ÖAL 28 Berechnungsmodells gut beschrieben werden können.

Anders stellt sich die Situation bei Güterwagen dar, deren Aufbauten und/oder Ladungen sehr heterogene Formen und Reflexionseigenschaften aufweisen. Ein formabhängiger Ansatz für die Ausbreitungsrechnung scheitert vor allem aufgrund der Komplexität und den Möglichkeiten des zugrunde liegenden Ausbreitungsmodells. So stellt das Modell für Überhänge oder Reflexionen an Zylinderformen (bewusst) keine Rechenvorschriften bereit, da es - um auch für größere Gebiete wie Städte oder Bereiche entlang von Hauptverkehrsstrecken anwendbar zu bleiben – ein entsprechendes Maß an Abstraktion voraussetzt. Hinzu kommt, dass es für viele Güterwagen kaum möglich sein wird, die Reflexionseigenschaften überhaupt zu bestimmen, da diese entweder sehr komplex sind und/oder stark variieren können, wie es KFZ-Transportwagen, beispielsweise bei aber auch bei offenen Wagen oder Containertragwagen (aufgrund unterschiedlicher Beladung oder bei Leerfahrten) der Fall ist. Die Ergebnisse der betrachteten Güterwagen zeigen im Mittel geringere Effekte als bei Personenwagen, da vertikale Reflexionsflächen kleiner sind oder fast gänzlich fehlen. Schreibt man diese Eigenschaft dem Durchschnitt aller Güterwagen zu, so kann aus schalltechnischer Sicht davon ausgegangen werden, dass bei Güterwagen im Mittel geringere Effekten durch reflektierende Wandelemente auftreten. Untermauert wird dies, dass zum einen ein gewisser Anteil an Güterfahrzeugen ohne Beladung verkehrt. Zum anderen sind die reflektierenden Flächen in der Regel kleiner (offenere Fahrzeugkonstruktion im Unterflurbereich, Lücken zwischen Güterwagen meist größer) oder sie weisen diffuseres Reflexionsverhalten auf, wodurch sich gewisse Anteile der reflektierten Schallenergie unterschiedlich entlang des Zuges verteilen beziehungsweise in steilem Winkel nach oben ausbreiten und/oder nach unten

Ob bzw. wie Güterwagen von Personenzügen in Bezug auf Effekte durch reflektierende Wandelemente unterschieden werden, oder ob in Anlehnung die derzeitige rechentechnische Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen bei vollflächig reflektierenden Wänden gemäß ÖAL 28 auf eine gesonderte Behandlung von Güterfahrzeugen verzichtet wird und damit zu

gerichtet sein können und zum Teil vom Schotterbett absorbiert werden.







hohe Immissionswerte in Kauf genommen werden, ist eine Entscheidung, die der Normengebung vorbehalten ist. Denn hier gilt es letztlich abzuwägen, in welchem Ausmaß Abweichungen des Rechenmodelles gegenüber tatsächlichen Immissionen zulässig sind, was in weiterer Folge auch stark von den betrachteten Rahmenbedingungen wie Ausbreitungsrichtung, mittlere Güterfahrzeugtypmix und mittlerer Beladungszustand abhängig ist. Als Grundlage hierfür wurden mittels BEM-Simulationen die Effekte berechnet und in Diagrammen über dem Beugekantenwinkel dargestellt, welche ein 1 m hoher, reflektierender Streifen direkt oder abgesetzt unter der Wandoberkante angeordnet bei einer 2 m und einer 4 m hohen Lärmschutzwand auf einer 2-gleisigen Strecke bei drei verschiedenen Wagenkastenformen (Personenzug mit senkrechter oder mit gekrümmter Seitenwand und Kesselwagen) hervorrufen.







9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung: "ÖAL-Richtlinie Nr. 28 Berechnung der Schallausbreitung im Freien und Zuweisung von Lärmpegeln und Bewohnern zu Gebäuden", 1. Okt. 2021.
- [2] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV): "RVE 04.01.02, Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen", 1. Feb. 2022.
- [3] Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: *Richtlinie 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*, 25. Juni 2002, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 189 vom 18. Aug. 2002.
- [4] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-4, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 4: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte zur Schallbeugung in gerichteten Schallfeldern", 15. Nov. 2016, ident mit EN 16272-4:2016-09.
- [5] Europäisches Komitee für Normung: "ONR CEN/TS 16272-5, Bahnanwendungen -Oberbau - Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte zur Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern", 15. Aug. 2014.
- [6] Europäisches Komitee für Normung: "ONR CEN/TS 16272-7, Bahnanwendungen -Oberbau - Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 7: Fremdspezifische Merkmale - In-situ-Werte zur Einfügungsdämpfung", 15. Dez. 2015.
- [7] Christian H. Kasess, Wolfgang Kreuzer und Holger Waubke: "Deriving correction functions to model the efficiency of noise barriers with complex shapes using boundary element simulations", *Applied Acoustics*, Bd. 102, S. 88–99, 2016, ISSN: 0003-682X, doi: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.009.
- [8] P. A. Morgan, D. C. Hothersall und S. N. Chandler-Wilde: "Influence of Shape and Absorbing Surface—a Numerical Study of Railway Noise Barriers", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 217, Nr. 3, S. 405–417, 1998, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1773.
- [9] César Bustos, Vincent Jurdic, Calum Sharp und David Hiller: "Optimisation of Railway Noise Barrier Design Using Finite Elements and Boundary Element Modelling Methods", in *Euronoise 2021*, S. 10.
- [10] Denis Duhamel: "Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 197, Nr. 5, S. 547–571, 1996, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0548.
- [11] Christian H. Kasess, Wolfgang Kreuzer und Holger Waubke: "An efficient quadrature for 2.5D boundary element calculations", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 382, S. 213– 226, 2016, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.06.041.
- [12] Matthew Kamrath, Philippe Jean, Julien Maillard, Judicaël Picaut und Christophe Langrenne: "Extending standard urban outdoor noise propagation models to complex geometries", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 143, Nr. 4, S. 2066– 2075, 2018, doi: 10.1121/1.5027826.





- [13] Christian H. Kasess, Holger Waubke, Marco Conter, Christian Kirisits, Reinhard Wehr und Harald Ziegelwanger: "The effect of railway platforms and platform canopies on sound propagation", *Applied Acoustics*, Bd. 151, S. 137–152, 2019, ISSN: 0003-682X, doi: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.003.
- [14] Europäische Kommission: *Richtlinie (EU) 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, 19. Mai 2015, Amtsblatt der Europäischen Union L 168 vom 1. Juli 2015.
- [15] Europäische Kommission: Delegierte Richtlinie (EU) 2021/1226 zur Änderung des Anhangs II der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich gemeinsamer Methoden zur Lärmbewertung zwecks Anpassung an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt, 21. Dez. 2020, Amtsblatt der Europäischen Union L 269 vom 28. Juli 2021.
- [16] Deutsches Institut f
 ür Normung e.V.: "EN 15610:2019, Bahnanwendungen Akustik -Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen", Nov. 2021.
- [17] Austrian Standards Institute / Österreichisches Normungsinstitut: "ÖNORM EN ISO 3095, Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen", 15. Dez. 2014, ident mit EN ISO 3095:2013-08.
- [18] Deutsches Institut für Normung e.V.: "DIN EN 15461:2011, Bahnanwendungen -Schallemission - Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtsgeräuschmessungen", Jän 2011.
- [19] P. Jean und Y. Gabillet: "Using a Boundary Element Approach To Study Small Screens Close To Rails", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 231, Nr. 3, S. 673–679, 2000, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2554.
- [20] Jerzy Smardzewski, Tadeusz Kamisiński, Dorota Dziurka, Radosław Mirski, Adam Majewski, Artur Flach und Adam Pilch: "Sound absorption of wood-based materials", *Holzforschung*, Bd. 69, Nr. 4, S. 431–439, 2015, doi: doi:10.1515/hf-2014-0114.
- [21] Austrian Standards International: "ÖNORM EN 1793-5, Lärmschutzvorrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der aktustischen Eigenschaften, Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern", 15. Feb. 2019.
- [22] Zdeněk Průša, Peter L. Søndergaard, Nicki Holighaus, Christoph Wiesmeyr und Peter Balazs: "The Large Time-Frequency Analysis Toolbox 2.0", in *Sound, Music, and Motion*, Mitsuko Aramaki, Olivier Derrien, Richard Kronland-Martinet und Sølvi Ystad (Hrsg.), Springer International Publishing, 2014, S. 419–442, doi: 10.1007/978-3-319-12976-1_25., ISBN: 978-3-319-12975-4.
- [23] John W. Eaton, David Bateman, Søren Hauberg und Rik Wehbring: *GNU Octave version 5.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations*, 2020.
- [24] Marco Conter, Holger Waubke, Christian Kiristis, Christian Kasess, Harald Ziegelwaner und Reinhard Wehr: "Akustische Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten und Bahnsteigdächern (WiABahn)", Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2013, Ergebnisbericht, Nov. 2017, online: https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=1239 (zugegriffen: 27. Sep. 2022).
- [25] Christian Kaseß und Holger Waubke: "Moving sources and the 2.5d helmholtz boundary element method", in *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA)*, Aachen, Sep. 2019, S. 7475–7482, ISBN: 978-3-939296-15-7.





- [26] Keith Attenborough: "Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces", Journal of Sound and Vibration, Bd. 99, Nr. 4, S. 521–544, 1985, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1016/0022-460X(85)90538-3.
- [27] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-3-2, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften", 1. Apr. 2015, ident mit EN 16272-3-2:2014-07.
- [28] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 1793-1, Lärmschutzvorrichtungen an Straßen
 Prüfverfahren zur Bestimmung der aktustischen Eigenschaften, Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption", Jänner 2013.
- [29] Österreichisches Normungsinstitut: "ÖNORM EN ISO 354, Akustik Messung der Schallabsorption in Hallräumen", 1. Nov. 2003.
- [30] Marco Conter und Reinhard Wehr: "Forschungsprojekt REFLEX Vergleich der Schallabsorptionsmessung von Lärmschutzwänden nach Hallraum- und in-situ-Verfahren", in *Tagungsband, DAGA 2015 - 41. Jahrestagung für Akustik (Fortschritte der Akustik)*, Nürnberg, 2015, S. 700–703, ISBN: 978-3-939296-08-9.
- [31] Keith Attenborough, Imran Bashir und Shahram Taherzadeh: "Outdoor ground impedance models", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 129, Nr. 5, S. 2806–2819, 2011, doi: 10.1121/1.3569740.
- [32] S. Hampel, Sabine C. Langer und Adrián P. Cisilino: "Coupling boundary elements to a raytracing procedure", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Bd. 73, 2008.
- [33] Maud Priour, Eric Premat und Philippe Blanc-Benon: "Calculations with BEM in a refracting atmosphere", in *Tagungsband CFA/DAGA '04 - 7ème Congrès Francais* d'Acoustique / 30. Deutsche Jahrestagung für Akustik, S. 665–666, online: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/articles/001325.pdf (zugegriffen: 27. Sep. 2022).
- [34] Martin Almgren: "Simulation by using a curved ground scale model of outdoor sound propagation under the influence of a constant sound speed gradient", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 118, Nr. 2, S. 353–370, 1987, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1016/0022-460X(87)90531-1.
- [35] K. M. Li und Q. Wang: "A BEM approach to assess the acoustic performance of noise barriers in a refracting atmosphere", *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 211, Nr. 4, S. 663–681, 1998, ISSN: 0022-460X, doi: https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1427.
- [36] Drangu Sehu, Jean Marc Wunderli, Kurt Heutschi, Thomas Thron, Markus Hecht, Andre Rohrbeck und Thomas Ledermann: "sonRAIL - Projektdokumentation", Okt. 2010, online: https://www.empa.ch/documents/56129/160826/sonRailprojektdokumentation.pdf/f036553f-80c8-4b87-bc74-ead535ea29ab (zugegriffen: 21. Dez. 2021).
- [37] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-1, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 1: Produktspezifische Merkmale - Schallabsorption (Labormethode) bei diffusen Schallfeldern", 15. Mai 2013, ident mit EN 16272-1:2012-10.
- [38] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-2, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften,





Teil 2: Produktspezifische Merkmale - Luftschalldämmung (Labormethode) bei diffusen Schallfeldern", 1. Dez. 2012, ident mit EN 16272-2:2012-10.

- [39] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-3-1, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3-1: Standardisiertes Schienenverkehrslärmspektrum und Einzahl-Angaben für diffuse Schallfelder", 1. Dez. 2012, ident mit EN 16272-3-1:2012-10.
- [40] Austrian Standards Institute: "ÖNORM EN 16272-6, Bahnanwendungen Oberbau -Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 6: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte zur Luftschalldämmung in gerichteten Schallfeldern", 1. Dez. 2014, ident mit EN 16272-6:2014-10.







Anhang A Effekte unterschiedlicher Wagenkastenformen

Die folgenden Abbildungen dienen als Grundlage für die Normengebung und zeigen die Ergebnisse der BEM-Berechnung für Lärmschutzwänden mit einer Höhe von 2 m und von 4 m jeweils für Gleis 1 und 2. Dargestellt sind die Varianten mit reflektierendem Element an der Wandoberkante und in der Mitte platziert (bei 4 m von 1 bis 2 m über SOK) im Vergleich zu einer hochabsorbierenden Wand gleicher Höhe. Gezeigt werden Berechnungen für drei Wagenkastenformen: Personenzug mit senkrechter (blaue Linien) und mit gekrümmter (gelbe Seitenwand, sowie ein Kesselwagen (grüne Linien). Das verwendete Linien) Berechnungsmodell bedingt, dass alle drei Wagenkastenformen über die Zugslänge durchgängig modelliert werden. Über dem Beugekantenwinkel sind A-gewichtete Einzahlwerte auf Basis des Schienenverkehrslärmspektrums gemäß ÖNORM EN 16272-3-2 [27] aufgetragen.

Für die 2 m hohe LSW werden die Messwerte in 25 m für den Reisezug und den Nahverkehrszug 1 (senkrechte Wand, blaue Plussymbole), den Nahverkehrszug 2 (gekrümmte Wand, gelbe Plussymbole), Güterzüge mit senkrechter Wand (blaue Kreise), Kesselwagen (grüne Kreise) und unbeladene Flachwagen (schwarze Quadrate) dargestellt. Zu beachten ist, dass der Messaufbau sich von diesen Simulationen (vgl. Kapitel 3 und 6) unterscheidet, da kein Abstand zwischen Reflektor und Lärmschutzwand angenommen wurde. Weiters ist, wie in Kapitel 3 erwähnt, das Quellmodell auf der Schiene für den Kesselwagen bei dem mittig platzierten Reflektor nicht optimal, weswegen hier eine Überschätzung des Effektes auftritt.









Abb. A-1: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 1

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-30	1,6	-	1,4	-	1,5	-	30	2,7	0,6	0,9	0,1	1,3	0,2
-25	1,7	-	1,4	-	1,5	-	35	1,1	0,5	0,5	0,1	0,8	0,1
-20	1,7	0,1	1,5	0,1	1,5	0,0	40	0,5	0,4	0,3	0,0	0,7	0,1
-15	1,7	0,0	1,6	0,0	1,5	0,0	45	0,3	0,3	0,3	0,0	1,0	0,2
-10	1,8	0,1	1,7	0,1	1,5	0,1	50	0,3	0,4	0,4	0,1	1,2	0,2
-5	1,9	0,1	2,0	0,1	1,5	0,1	55	0,1	0,3	0,4	0,0	1,3	0,1
0	2,1	0,2	2,4	0,3	1,7	0,2	60	0,1	0,2	0,4	0,0	1,2	0,2
5	2,8	0,3	2,9	0,2	2,2	0,2	65	0,0	0,1	0,4	0,0	0,9	0,3
10	3,5	0,2	2,8	0,1	2,7	0,2	70	0,0	0,0	0,5	0,0	0,7	0,3
15	3,9	0,3	2,3	0,2	2,9	0,1	75	0,0	0,0	0,6	0,0	0,5	0,2
20	4,2	0,4	1,8	0,1	2,6	0,2	80	0,1	0,0	0,7	0,1	0,3	0,0
25	4,1	0,4	1,3	0,1	2,0	0,2							

Tab. A-1: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 1 (Werte zu Abb. A-1)









Abb. A-2: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 0,5 m unter Wandoberkante, Gleis 1

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-30	1,0	-	0,6	-	0,8	-	30	1,7	0,5	0,7	0,1	1,4	0,3
-25	1,2	-	0,7	-	0,9	-	35	0,7	0,3	0,3	0,1	0,8	0,1
-20	1,1	0,0	0,7	0,1	0,9	0,0	40	0,4	0,2	0,2	0,0	0,6	0,1
-15	1,3	0,1	0,9	0,1	1,0	0,1	45	0,3	0,2	0,2	0,0	0,6	0,0
-10	1,5	0,1	1,2	0,1	1,2	0,1	50	0,2	0,2	0,2	0,0	0,6	0,0
-5	1,7	0,2	1,6	0,2	1,3	0,1	55	0,1	0,1	0,2	0,0	0,6	0,0
0	1,9	0,3	2,2	0,4	1,6	0,2	60	0,1	0,1	0,2	0,0	0,6	0,1
5	2,7	0,3	2,8	0,2	2,3	0,3	65	0,1	0,1	0,2	0,0	0,5	0,1
10	3,8	0,4	2,6	0,1	3,4	0,4	70	0,1	0,0	0,2	0,0	0,3	0,2
15	4,8	0,3	2,1	0,2	4,3	0,2	75	0,1	0,0	0,3	0,1	0,3	0,1
20	4,5	0,3	1,6	0,1	3,8	0,3	80	0,1	0,0	0,5	0,0	0,2	0,1
25	3,2	0,5	1,1	0,1	2,5	0,4							

Tab. A-2: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 0,5 m unter Wandoberkante, Gleis 1 (Werte zu Abb. A-2)









Abb. A-3: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 2

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-30	1,0	-	0,7	-	0,9	-	30	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0
-25	1,0	-	0,7	-	0,8	-	35	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,0
-20	1,0	0,1	0,7	0,0	0,8	0,0	40	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,0
-15	1,0	0,0	0,7	0,0	0,8	0,0	45	0,1	0,1	0,2	0,0	0,4	0,0
-10	1,1	0,1	0,7	0,0	0,8	0,0	50	0,1	0,1	0,2	0,0	0,4	0,0
-5	1,3	0,1	0,8	0,0	0,8	0,1	55	0,1	0,1	0,2	0,0	0,4	0,1
0	1,7	0,4	1,0	0,2	0,9	0,2	60	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
5	2,8	0,4	1,2	0,1	1,4	0,1	65	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
10	3,4	0,4	0,8	0,1	1,5	0,1	70	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
15	2,2	0,6	0,4	0,1	0,9	0,2	75	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
20	0,8	0,4	0,2	0,0	0,4	0,1	80	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
25	0,3	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0							

Tab. A-3: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 2 (Werte zu Abb. A-3)









Abb. A-4: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 0,5 m unter Wandoberkante, Gleis 2

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-30	0,4	-	0,1	-	0,2	-	30	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0
-25	0,4	-	0,1	-	0,2	-	35	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,0
-20	0,4	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	40	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
-15	0,5	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	45	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,0
-10	0,7	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	50	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
-5	0,9	0,1	0,4	0,1	0,6	0,1	55	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
0	1,3	0,3	0,7	0,2	0,9	0,3	60	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
5	2,6	0,5	1,0	0,1	1,7	0,3	65	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
10	3,4	0,3	0,7	0,1	2,1	0,2	70	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
15	2,1	0,6	0,4	0,1	1,2	0,3	75	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1
20	0,7	0,4	0,2	0,0	0,5	0,1	80	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
25	0,3	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0							

Tab. A-4: 2 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 0,5 m unter Wandoberkante, Gleis 2 (Werte zu Abb. A-4)







Abb. A-5: 4 m LSW mit 1 m hohem	, reflektierenden Streifen	unter Wandoberkante, Gleis 1
---------------------------------	----------------------------	------------------------------

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-55	1,5	-	1,7	-	1,6	-	15	0,7	0,1	1,1	0,0	1,0	0,1
-50	1,3	-	1,6	-	1,5	-	20	0,5	0,1	1,0	0,0	0,9	0,1
-45	1,4	0,2	1,6	0,1	1,5	0,2	25	0,3	0,1	1,0	0,0	0,9	0,1
-40	1,3	0,2	1,6	0,1	1,4	0,2	30	0,3	0,0	0,8	0,1	0,7	0,1
-35	1,3	0,1	1,6	0,1	1,4	0,1	35	0,4	0,0	0,6	0,0	0,5	0,1
-30	1,3	0,1	1,6	0,1	1,4	0,1	40	0,5	0,0	0,5	0,1	0,4	0,0
-25	1,2	0,1	1,5	0,1	1,4	0,1	45	0,4	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0
-20	1,2	0,1	1,5	0,1	1,3	0,1	50	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
-15	1,1	0,1	1,5	0,1	1,3	0,1	55	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
-10	1,1	0,1	1,4	0,1	1,2	0,1	60	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0
-5	1,0	0,1	1,3	0,2	1,1	0,2	65	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0
0	0,9	0,1	1,3	0,1	1,1	0,1	70	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9	0,1	1,3	0,0	1,2	0,1	75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,9	0,1	1,2	0,1	1,1	0,1	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. A-5: 4 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 1 (Werte zu Abb. A-5)







Abb. A-6: 4 m LSW mit	1 m hohem, reflektierende	n Streifen 2,0 m unter	Wandoberkante, Gleis 1
-----------------------	---------------------------	------------------------	------------------------

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-55	1,4	-	0,4	-	0,7	-	15	3,5	0,3	0,8	0,1	1,4	0,1
-50	1,3	-	0,3	-	0,6	-	20	4,8	0,5	1,1	0,1	1,8	0,2
-45	1,4	0,1	0,3	0,0	0,7	0,1	25	6,1	0,3	1,7	0,3	2,5	0,3
-40	1,5	0,2	0,3	0,1	0,8	0,1	30	5,9	0,4	2,5	0,3	3,5	0,4
-35	1,4	0,1	0,4	0,0	0,8	0,1	35	4,0	0,6	2,9	0,2	4,5	0,3
-30	1,5	0,2	0,3	0,0	0,8	0,1	40	2,6	0,6	2,3	0,3	4,6	0,3
-25	1,5	0,1	0,4	0,0	0,8	0,1	45	1,3	0,5	1,4	0,2	3,8	0,3
-20	1,7	0,2	0,4	0,1	0,9	0,1	50	0,5	0,3	0,8	0,1	2,9	0,3
-15	1,7	0,1	0,4	0,1	0,9	0,1	55	0,2	0,1	0,5	0,1	1,9	0,3
-10	1,8	0,1	0,5	0,1	0,9	0,1	60	0,1	0,1	0,4	0,0	1,3	0,3
-5	1,8	0,3	0,4	0,1	0,9	0,2	65	0,1	0,0	0,5	0,0	0,9	0,3
0	2,1	0,3	0,5	0,1	1,0	0,2	70	0,1	0,0	0,5	0,0	0,6	0,2
5	2,6	0,2	0,6	0,1	1,2	0,1	75	0,1	0,0	0,6	0,0	0,4	0,1
10	2,9	0,2	0,6	0,1	1,3	0,1	80	0,1	0,0	0,7	0,1	0,3	0,0

Tab. A-6: 4 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 2,0 m unter Wandoberkante, Gleis 1 (Werte zu Abb. A-6)







Abb. A-7: 4 m LSW mit 1 m hohem	, reflektierenden Streifen unte	r Wandoberkante, Gleis 2
---------------------------------	---------------------------------	--------------------------

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-55	1	-	1,1	-	1,1	-	15	0,2	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0
-50	0,9	-	1,0	-	1,0	-	20	0,2	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0
-45	0,9	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	25	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
-40	0,9	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	30	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
-35	0,9	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-30	0,9	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-25	0,8	0,0	0,9	0,0	0,9	0,1	45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-20	0,8	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-15	0,7	0,1	0,8	0,1	0,8	0,1	55	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-10	0,6	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-5	0,6	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	0,5	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	70	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,5	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,4	0,1	0,5	0,0	0,6	0,0	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. A-7: 4 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen unter Wandoberkante, Gleis 2 (Werte zu Abb. A-7)







Abb. A-8: 4 m LSW mit	1 m hohem, reflektierenden	Streifen 2,0 m unter	Wandoberkante, Gleis 2
-----------------------	----------------------------	----------------------	------------------------

Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	Winkel zur Beugekante	PZ flach, BEM Dipol 23°	PZ flach, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	GZ Kessel, BEM Dipol 23°	GZ Kessel, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23°	PZ gekrümmt, BEM Dipol 23° (Standardabweichung)
0	dB	dB	dB	dB	dB	dB	0	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-55	0,6	-	0,1	-	0,2	-	15	4,0	0,4	0,8	0,1	1,2	0,2
-50	0,6	-	0,1	-	0,2	-	20	2,2	0,7	0,9	0,1	1,6	0,2
-45	0,6	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	25	0,8	0,5	0,5	0,1	1,3	0,2
-40	0,6	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	30	0,2	0,2	0,2	0,1	0,6	0,1
-35	0,6	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	35	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0
-30	0,7	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	40	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0
-25	0,7	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	45	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0
-20	0,8	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	50	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0
-15	0,9	0,1	0,2	0,0	0,3	0,0	55	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
-10	1,0	0,1	0,2	0,0	0,3	0,0	60	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
-5	1,1	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1	65	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
0	1,5	0,2	0,2	0,0	0,4	0,1	70	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
5	2,3	0,3	0,3	0,0	0,5	0,1	75	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
10	3,6	0,5	0,5	0,1	0,8	0,1	80	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0

Tab. A-8: 4 m LSW mit 1 m hohem, reflektierenden Streifen 2,0 m unter Wandoberkante, Gleis 2 (Werte zu Abb. A-8)