

Akustische Simulation und psychoakustische Untersuchungen zur Wirksamkeit einer gleismontierten Mini-Lärmschutzwand

Christine Huth, Manfred Liepert, Ulrich Möhler, Augsburg, München

Zusammenfassung Als innovative Schallschutzmaßnahme an Schienenverkehrswegen wurde eine niedrige gleismontierte Lärmschutzwand (Mini-LSW) untersucht. Diese wird im Gegensatz zur niedrigen Lärmschutzwand direkt an der Schwelle montiert und befindet sich gerade außerhalb des Lichtraumprofils und somit noch näher an der Quelle. Die Wirksamkeit einer solchen Lärmschutzwand kann dabei nicht ohne Korrekturen mit den Rechenverfahren der Schall 03 prognostiziert werden, da darin das Rollgeräusch im Rechenverfahren idealisiert auf Höhe der Schienenoberkante situiert wird und die tatsächliche flächenhafte Ausdehnung der Quellen (Radscheibe, Schiene) vernachlässigt wird. Daher wurde die Wirksamkeit der Mini-LSW anhand theoretischer Überlegungen und anhand von Rechenmodellen abgeschätzt. Um die Auswirkungen der Mini-Lärmschutzwand auf die Lästigkeitswirkung für Anwohner zu erfassen, wurden des Weiteren Hörversuche mit Zugvorbeifahrten ohne und mit simulierten Lärmschutzwänden durchgeführt. Die Probanden wurden nach den Größen Lästigkeit, Lautheit und Schärfe befragt.

Simulation and psychoacoustic investigations of a mini noise barrier

Summary In addition to conventional noise barriers along rail tracks new innovative noise barriers can be applied, as for example a small noise barrier which is mounted without any further groundwork upon the sleepers. Besides a much easier approval procedure the advantage of this so called "mini noise barrier" is the fact that it can be attached between the two tracks in case of double-track lines. In the first part of the present study, the efficiency of this mini noise barrier is predicted for various scenarios. Additionally, the predicted level differences at the immission point are applied to recordings of train passes using digital filters. Following this way, different noise barrier scenarios are simulated and subjective evaluations are performed to receive data about the actual effect of different noise protection measures for the residents.

Simulation einer Mini-Lärmschutzwand

Berechnungsgrundlagen

Das Rollgeräusch wurde zunächst nach Schall 03 [1] für einen Güterwagen mit vier Achsen und einer Geschwindigkeit von 100 km/h berechnet. Das spektrale Ergebnis wurde dann entsprechend einer Untersuchung von Behr [2] auf die Radflächen, die Schienen und die Schwellenfläche aufgeteilt.

Die für die Ermittlung der Vertikalrastrer erforderlichen Schallausbreitungsberechnungen wurden in Oktavbandbreite entsprechend dem Regelwerk DIN ISO 9613-2 [3] durchgeführt, wobei für die Bodenabsorption das allgemeine Berechnungsverfahren mit porösem Boden angenommen wurde. Zur Bestimmung der Unterschiede zwischen unterschiedlichen simulierten Varianten wurden Immissions- und Differenzpegelrastrer berechnet. Die Größe

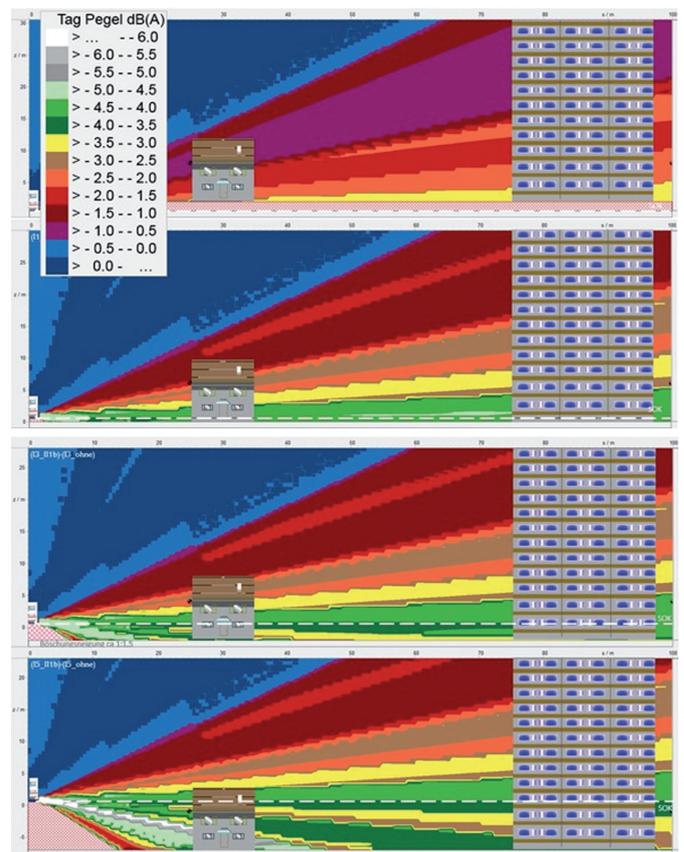


Bild 1 Pegelreduzierungen durch die Mini-LSW von oben nach unten: Einschnitt, Ebene und zwei verschiedene Dammlagen (2,5 und 7,5 m).

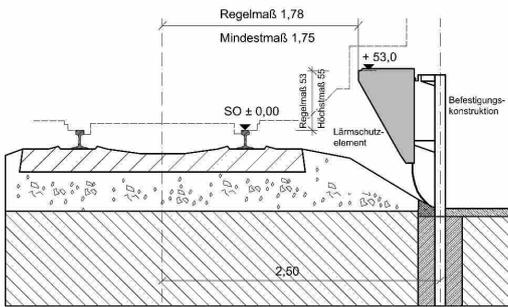
der Vertikalschnitte beträgt für alle Berechnungen in z-Richtung (Höhe) 30 m und in y-Richtung (Entfernung vom Gleis) 100 m.

Der Einsatzort der Mini-LSW wurde im Folgenden systematisch modifiziert: Neben dem Einsatz in der ebenen Lage wurden eine Einschnittslage und zwei unterschiedliche Dammlagen (2,5 und 7,5 m) betrachtet.

Wirksamkeit der Mini-Lärmschutzwand bei Variation des Einsatzorts

Die Wirkung der einzelnen Varianten wird jeweils am Immissionspunkt in 25 m Abstand und 3,5 m Höhe verglichen. Zusätzlich wird im Abstand von 25 und 75 m jeweils diejenige Höhe beschrieben, bei der durch die Maßnahme eine Pegelminderung von ca. 3 dB erzielt wird. Hierbei wird die resultierende Höhe in Bezug zu den Geschosshöhen einer Bebauung betrachtet.

niedrige Schallschutzwand



Mini-Lärmschutzwand

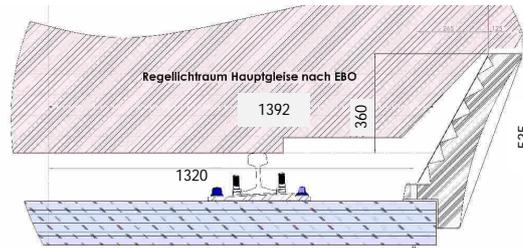


Bild 2 Darstellung der niedrigen Schallschutzwand und der Mini-LSW im Querschnitt [4].

Die Geschosshöhen wurden dabei für das erste Geschoss mit 3,5 m, für jedes weitere mit 2,8 m Höhe festgelegt. Eine „3 dB-Schutzwirkung für ein Geschoss“ würde also bedeuten, dass bis zur Höhe von einem Geschoss (3,5 m Höhe) durch die Maßnahme 3 dB Verbesserung erzielt werden kann.

Für die ebene Lage (Bild 1 zweites Bild von oben) resultiert in 25 m Abstand und einer Höhe von 3,5 m über Gelände zum Beispiel eine Verbesserung von 2,5 bis 3 dB. Demnach ist im Abstand von 25 m die 3-dB-Schutzwirkung für ein Geschoss gewährleistet. Im Abstand von 75 m ist bis zu 2,5 Geschossen (bis 8 m Höhe) eine 3-dB-Schutzwirkung gegeben.

Für den Fall des Einschnitts (Bild 1 ganz oben) verringern sich erwartungsgemäß die Pegelminderungen im Abstand von 25 m und 3,5 m über Gelände auf 1,5 bis 2 dB. Ebenso nimmt der Bereich mit 3-dB-Schutzwirkung ab: Im Abstand von 25 m ist keine 3-dB-Schutzwirkung zu verzeichnen, im Abstand von 75 m ist diese nur auf 0,5 Geschosse (bis 2 m Höhe) begrenzt.

Bei einer 2,5-m-Dammlage (Bild 1 drittes Bild von oben) zeigen sich deutlich größere Vorteile durch die Mini-Lärmschutzwand als bei der Einschnittslage: Die Wirkung im Abstand von 25 m und 3,5 m über Gelände betragen nun 4 bis 4,5 dB. Die 3-dB-Schutzwirkung liegt im Abstand von 25 m bei 1,5 Geschossen (bis 5,5 m Höhe), im Abstand von 75 m liegt sie bei 3,5 Geschossen (bis 10 m Höhe). Bei einer höheren Dammlage von 7,5 m (Bild 1 ganz unten) ergeben sich im Abstand von 25 m und 3,5 m über Gelände Verbesserungen von 5,5 bis 6 dB. Die 3-dB-Schutzwirkung in 25 m Entfernung beträgt hier 3,5 Geschosse (bis 11 m Höhe), in 75 m Entfernung beträgt sie fünf Geschosse (bis 15 m Höhe).

Gegenüberstellung von Mini-LSW und niedriger Schallschutzwand (SSW)

Ein wesentlicher Vorteil der Mini-LSW (Bild 2 rechts) gegenüber der niedrigen SSW (Bild 2 links), wie sie in der Schall 03 [1] aufgeführt ist, besteht darin, dass diese auch zwischen den Gleisen montiert werden kann. Deshalb wurde für den zweigleisigen Fall eine Anbringung der niedrigen SSW an einem Gleis im Vergleich zur Anbringung der Mini-LSW an beiden Gleisen berechnet. Bild 3 zeigt die Differenzpegelraster dieser beiden Anordnungen jeweils im Vergleich zum Fall ohne Anbringung einer SSW.

Für die niedrige SSW an einem Gleis resultiert im Abstand von 25 m und 3,5 m über Gelände eine Verbesserung von 2 bis 2,5 dB. Bei Einsatz von Mini-Lärmschutzwänden an beiden Gleisen resultiert eine Verbesserung von 3 bis 3,5 dB. Im Abstand von 75 m und 14 m über Gelände resultieren bei Einsatz der niedrigen SSW 1,5 bis 2 dB Verbesserung, bei Einsatz der Mini-Lärmschutzwände 2,5 bis 3 dB. Die 3-dB-Schutzwirkung beträgt im Abstand von 25 m für beide Fälle ein Geschoss, jedoch im Abstand von 75 m beträgt die 3-dB-Schutzwirkung bei

Niedrige LSW an einem Gleis – ebenes Gelände

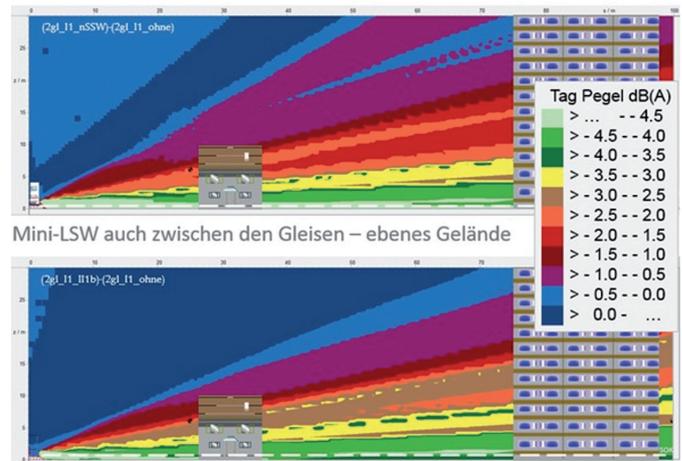


Bild 3 Wirksamkeit der niedrigen Schallschutzwand an einem Gleis (oben) gegenüber der Mini-LSW an beiden Gleisen (unten) bei zweigleisiger Strecke.

der niedrigen SSW nur 2,5 Geschosse, bei den Mini-Lärmschutzwänden hingegen fünf Geschosse.

Psychoakustische Untersuchungen zur Wirksamkeit der Mini-Lärmschutzwand

Motivation

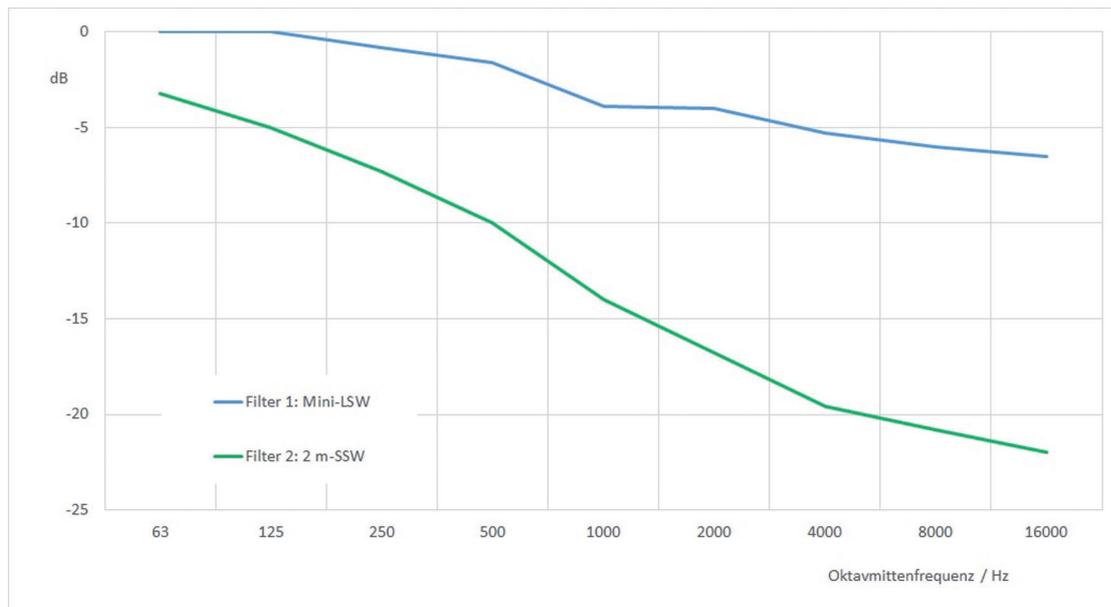
In der Praxis der Lärmkartierung und der Lärmaktionsplanung stellt sich oft die Frage, inwiefern die Anwohner tatsächlich von den Lärmschutzmaßnahmen profitieren. Die Angabe eines Pegelwerts ist nicht immer ausreichend und repräsentiert oft nicht die wirkungsbezogene Verbesserung durch die Lärmschutzmaßnahme. Deshalb wird im Folgenden anhand von psychoakustischen Experimenten die wahrgenommene Verbesserung für die Anwohner in einem Abstand von 25 m untersucht.

Durchführung der Hörversuche

In einem Abstand von 25 m und einer Höhe von 3,5 m zur Mitte der Gleise wurden typische Zugvorbeifahrten aufgezeichnet. Insgesamt wurden elf Zugvorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtlänge zwischen 11 und 47 s für die Untersuchung ausgewählt: vier Güterzüge (GZ), ein Personenzug (IC), drei Hochgeschwindigkeitszüge (ICE) und drei Nahverkehrszüge (NVZ).

Neben der Mini-Lärmschutzwand wurde auch die Dämmwirkung einer klassischen Schallschutzwand mit einer Höhe von 2 m und einem Abstand von 3,8 m zur Mitte der Gleise simuliert.

Bild 4 Pegelunterschiede der beiden berechneten Schallschutzwände in 25 m Abstand und 3,5 m Höhe.



belästigend	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich
	0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
laut	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich
	0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
scharf	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich
	0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40

Bild 5 Kategorienskalisierung für die Hörversuche.

Bild 4 zeigt die am Immissionsort in 25 m Abstand und 3,5 m Höhe berechneten Pegelunterschiede.

Diese Pegelunterschiede wurden als digitale Filter auf alle elf Zugvorbeifahrten angesetzt. In dieser Art und Weise wurden für die subjektiven Beurteilungen Zugvorbeifahrten **mit** Schallschutzwänden simuliert. Zusammen mit den Originalvorbeifahrten (**ohne** Schallschutzwand) resultierten somit für die Beurteilungen 33 Zugvorbeifahrten.

Die Pegelminderung der Zugvorbeifahrten betrug mit den verwendeten Filtern für den Fall der Mini-Lärmschutzwand im Mittel 3,6 dB(A), für den Fall der 2-m-Schallschutzwand im Mittel 13,6 dB(A). Pegelminderungen von etwa 3 dB(A) werden für Maßnahmen bei Zugvorbeifahrten als kaum wahrnehmbar betrachtet [5].

Ziel der Hörversuche war es, die subjektive Wirksamkeit der unterschiedlichen Schallschutzwände zu ermitteln. Hierfür wurden im Hörversuch drei unterschiedliche psychoakustische Größen befragt: Lästigkeit, Lautheit und Schärfe.

Wenngleich als psychometrische Methode eine Vergleichsmethode, wie etwa „Größenschätzung mit Ankerschall“ oder „Paarvergleich“ deutliche Unterschiede liefern könnte, wurde eine absolute Skalierungsmethode ausgewählt, um ein realistischeres Szenario für die Beurteilung darzustellen [5]. Hierfür wurde eine Kategorienskalisierung mit den nach [6] empfohlenen fünf Kategorien für Intensität verwendet. Die Kategorien waren dementsprechend mit den Bezeichnungen „gar nicht“, „kaum“, „mittelmäßig“, „ziemlich“ und „außerordentlich“ versehen. Um eine detailliertere Beurteilung zu ermöglichen, wurden diese Kategorien zusätzlich in zehn Stufen unterteilt. **Bild 5** zeigt die Skalierung, wie sie den Versuchspersonen präsentiert wurde.

Nach jeder Zugvorbeifahrt war von den Versuchspersonen somit ein Zahlenwert entsprechend der Skalierung in das Versuchsprotokoll einzutragen. Wenn gewünscht, wurde die Vorbeifahrt zur Beurteilung wiederholt.

Zu Beginn des Experiments wurden drei Testbeurteilungen durchgeführt. Alle 33 Stimuli wurden je dreimal in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Die Hörversuche wurden in einem ruhigen Raum mit einem Set von vier STAX Kopfhörern (SR-307) durchgeführt. Vierzehn normalhörende Versuchspersonen im Alter zwischen 22 und 46 Jahren (Median 33 Jahre) nahmen an den Experimenten teil.

Wirksamkeit Mini-Lärmschutzwand

Bild 6 zeigt den Median und die Interquartile aller Versuchspersonen. Die Ergebnisse der Vorbeifahrten ohne Schallschutzwand sind in blau dargestellt, die der unterschiedlichen Schallschutzwände in orange (Mini-LSW) und grün (2-m-LSW). Eine statistische Analyse (bilaterale heteroskedastischer T-Test, basierend auf allen Einzelurteilen) zwischen „ohne“ und „2-m-LSW“ zeigt auf einem Signifikanzniveau von 5 % für alle Zugvorbeifahrten signifikante Unterschiede. Eine Analyse zwischen „ohne“ und „Mini-LSW“ ergibt für alle Zugvorbeifahrt, ausgenommen für die Vorbeifahrt NVZ_141, signifikante Unterschiede.

Die Wirksamkeit der Mini-LSW beträgt im Mittel 1 bis 6 Kategoriepunkte, die Wirksamkeit der 2-m-LSW 10 bis 17 Kategoriepunkte. In der Kategorie „außerordentlich belästigend“ befinden sich insgesamt fünf Zugvorbeifahrten ohne Lärmschutzwand: drei der vier Güterzüge, der IC und einer der drei ICE. Die Mini-LSW verbessert bei vier dieser fünf Vorbeifahrten die Lästigkeit zur nächstbesseren Kategorie „ziemlich belästigend“.

Die 2-m-LSW jedoch bewirkt bei den Versuchspersonen für alle „außerordentlich“ und „ziemlich“ belästigenden Vorbeifahrten eine Verbesserung in die Kategorie „mittelmäßig“. Die beste Wirksamkeit bei beiden Schallschutzwänden kann grundsätzlich bei den lästigeren Vorbeifahrten beobachtet werden.

Die Ergebnisse der Größe Lautheit sind in **Bild 7** dargestellt. Hier reduziert der Einsatz einer Mini-LSW die wahrgenommene Lautheit zwischen 1,5 und 7,5 Kategoriepunkten, der Einsatz einer 2-m-LSW zwischen 8 und 17 Kategoriepunkten. Die Ergebnisse sind ähnlich zu denen der Lästigkeit: Vier Zugvorbeifahrten wurden als „außerordentlich laut“ beurteilt. Bei drei dieser vier Vorbeifahrten bewirkt der Einsatz einer Mini-LSW eine Verbesserung in die Kategorie „ziemlich laut“. Die 2-m-LSW verbessert die Lautheit aller „außerordentlich“ und „ziemlich“ lauten Vorbeifahrten in die Kategorien „mittelmäßig“ und „kaum“.

Eine Signifikanzanalyse (basierend auf den Einzelurteilen, bilateraler heteroskedastischer T-Test, Signifikanzniveau 5 %)

zwischen „ohne“ und „Mini-LSW“ zeigt für alle Vorbeifahrten, ausgenommen NVZ_V118 und NVZ_V141, einen signifikanten Unterschied. Die Unterschiede zwischen den Lautheitsurteilen „ohne und „2-m-LSW“ sind für alle Vorbeifahrten signifikant.

Die Ergebnisse für die psychoakustische Größe Schärfe sind **Bild 8** zu entnehmen. Absolut betrachtet, resultieren im Vergleich zu den Größen Lästigkeit und Lautheit Einstufungen in geringeren Kategorien: Es wird lediglich eine Zugvorbeifahrt als „außerordentlich“ scharf bewertet, alle anderen Vorbeifahrten ohne Lärmschutzwand werden als „ziemlich“ oder „mittelmäßig“ scharf beurteilt. Der Einsatz der Mini-LSW kann die empfundene Schärfe um 1,5 bis 9 Kategoriepunkte verbessern, der der 2-m-LSW um 6,5 bis 17 Kategoriepunkte.

Die Unterschiede zwischen den Urteilen „ohne“ und „2-m-LSW“ sind auch für die Schärfe alle signifikant, die Unterschiede zwischen „ohne“ und „Mini-LSW“ sind bei allen Vorbei-

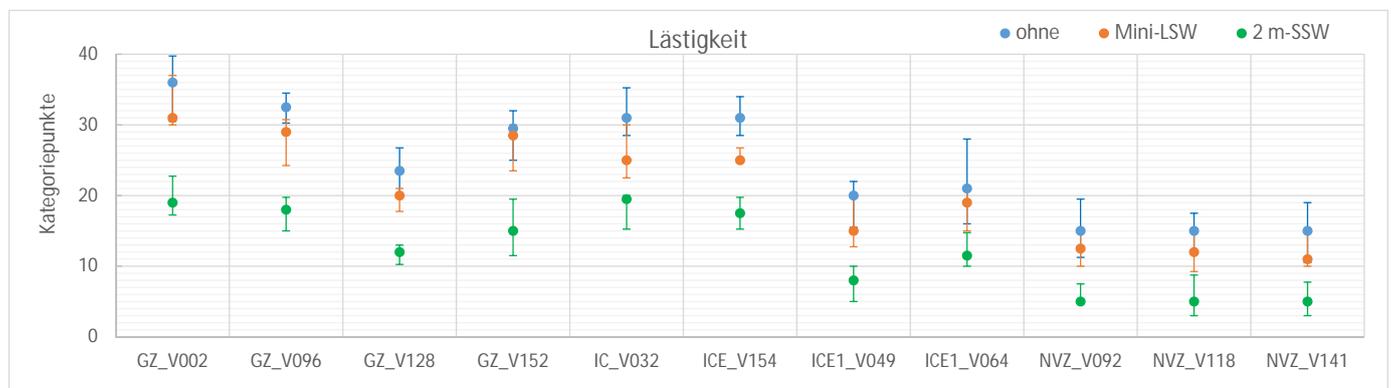


Bild 6 Lästigkeit aller elf Zugvorbeifahrten ohne Lärmschutzwand (blau), mit Mini-LSW (orange) und mit 2-SSW (grün).

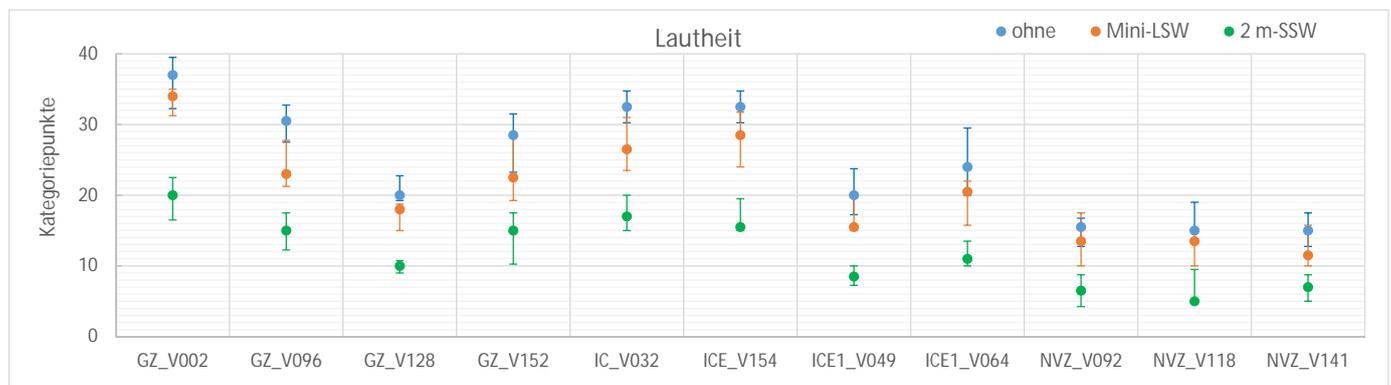


Bild 7 Lautheit aller elf Zugvorbeifahrten ohne Lärmschutzwand (blau), mit Mini-LSW (orange) und mit 2-SSW (grün).

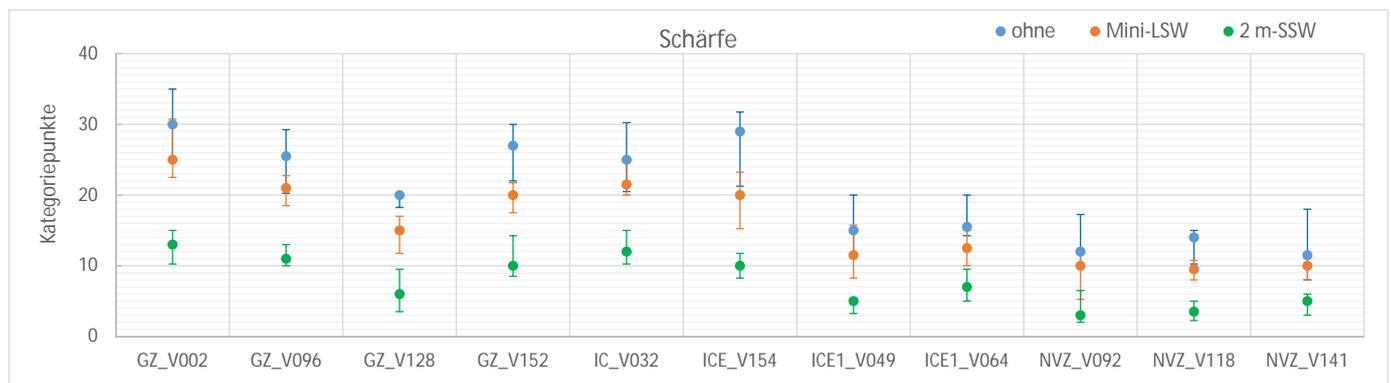


Bild 8 Schärfe aller elf Zugvorbeifahrten ohne Lärmschutzwand (blau), mit Mini-LSW (orange) und mit 2-m-SSW (grün).

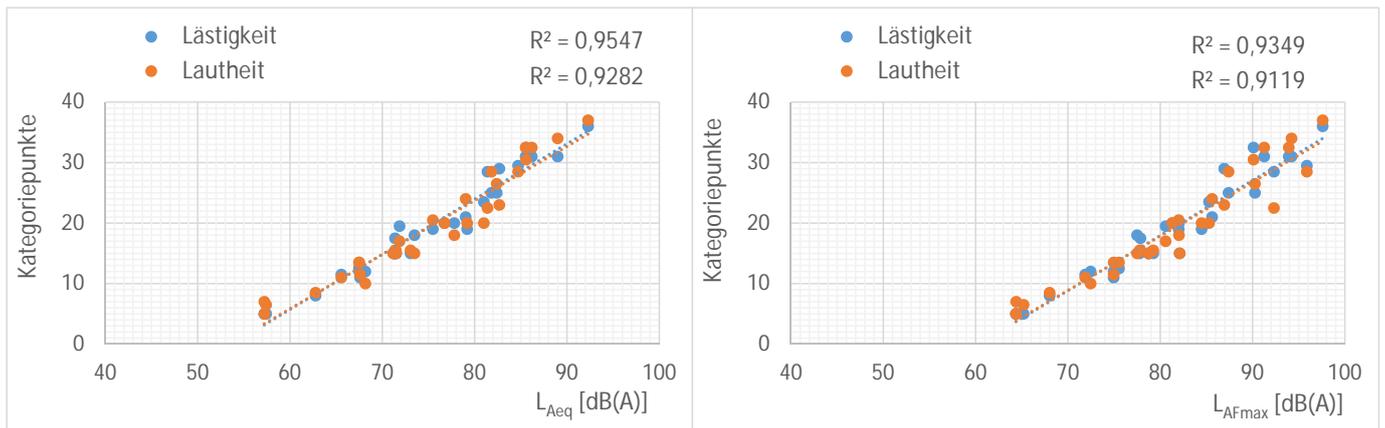


Bild 9 Korrelation zwischen Lästigkeit (blau) bzw. Lautheit (orange) und dem L_{Aeq} (links) und dem L_{AFmax} (rechts) der Zugvorbeifahrten.

fahrten signifikant, ausgenommen der Vorbeifahrten GZ_V002, IC_V032, NVZ_V092 und NVZ_V141.

Auch wenn die Zugvorbeifahrten unterschiedlich lang waren (zwischen 11 und 47 s) und teilweise auch sehr charakteristische Geräuschmerkmale – wie Quietschen oder Klappern – aufwiesen, scheint die Beurteilung von Lästigkeit und Lautheit sehr gut übereinzustimmen. In **Bild 9** sind diese beiden Größen den Pegelwerten L_{Aeq} (linke Seite) und L_{AFmax} (rechte Seite) gegenübergestellt. Die hohe Korrelation zwischen Lästigkeit und Lautheit und den Pegelwerten ist deutlich zu erkennen. Der Zusammenhang zwischen Pegelreduktion durch die Schallminderungsmaßnahme und der tatsächlichen Wirksamkeit für die Anwohner stellt sich folgendermaßen dar: Eine Absenkung sowohl von L_{Aeq} als auch von L_{AFmax} um 11 dB(A) repräsentiert eine Verbesserung der Lästigkeit um eine gesamte Kategorie (10 Kategoriepunkte).

Zusammenfassung

Grundlegende Berechnungen zur Mini-Lärmschutzwand weisen als optimalen Einsatzort für die Mini-Lärmschutzwand die Dammlage aus. Ein besonderer Vorteil der Mini-LSW gegenüber bisherigen Systemen (niedrige SSW) stellt sich in der Möglichkeit der Anbringung zwischen den Gleisen bei einer mehrgleisigen Strecke dar. Hier ergibt sich insbesondere bei größeren Abständen (75 m) eine verbesserte Schutzwirkung der betroffenen Gebäude hin zu höheren Geschossen.

Um die tatsächliche Wirksamkeit der Mini-Lärmschutzwand für die Anwohner zu erfassen, wurden Zugvorbeifahrten in 25 m

Abstand mit Mini-Lärmschutzwand simuliert und in Hörversuchen mit den Zugvorbeifahrten ohne Lärmschutzwand und denen mit einer simulierten 2-m-Lärmschutzwand beurteilt. Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen die Vorbeifahrten – insbesondere bezüglich ihrer Lästigkeit und Lautheit – mit Mini-Lärmschutzwand signifikant unterschiedlich, verglichen zu denen ohne Lärmschutzwand, bewerten. So verändert der Einsatz der Mini-LSW nahezu alle Einstufungen der untersuchten Vorbeifahrten bezüglich Lästigkeit und Lautheit von der Kategorie „extrem“ in die nächste Kategorie „ziemlich“.

Nachdem die subjektiven Beurteilungen mit Zugvorbeifahrten in ebener Lage durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass durch einen optimalen Einsatzort der Mini-Lärmschutzwand in Dammlage und zwischen den Gleisen die wahrgenommene Verbesserung für die Anwohner noch deutlich gesteigert werden kann.

In einem nächsten Schritt soll die Mini-Schallschutzwand an einer Teststrecke aufgebaut werden und die Wirksamkeit durch Schallmessungen nachgewiesen werden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen können im Detail in den Tagungsbänden der DAGA 2016 [8] und Internoise 2016 [9] nachgelesen werden.

Dr.-Ing. **Christine Huth**, Dipl.-Ing. **Manfred Liepert**,
Dipl.-Ing. **Ulrich Möhler**, Möhler + Partner Ingenieure AG,
Augsburg, München.

Literatur

- [1] Erläuterungen zur Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV), Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03). www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/verkehrslaerm-schutzvo-schall-03-erlaeterungen.pdf?_blob=publicationFile
- [2] Behr, W.: Wirkung der Kombination von Rad- und Schienen-dämpfern. Fachtagung Bahnakustik 2011 – Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb, 2011, S.130-138.
- [3] DIN ISO 9613-2: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag 1999.
- [4] Konstruktionszeichnung zur Mini-LSW der Fa. Strail. www.strail.de/

- [5] Jäger, K.; Fastl, H.; Schöpf, F.; Gottschling, G.; Möhler U.: Wahrnehmung von Pegeldifferenzen bei Vorbeifahrten von Güterzügen. Fortschritte der Akustik DAGA 1997, S. 228-229.
- [6] Ellermeier, W.; Hellbrück J.; Kohlrausch A.; Zeitler A.: Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis. Berlin: DEGA 2008.
- [7] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics – facts and models. 2nd Ed. Berlin: Springer-Verlag 1999.
- [8] Huth, C.; Beronius, A.; Liepert, M.; Möhler, U.: Akustische Simulation einer gleismontierten Mini-Lärmschutzwand. DAGA 2016, Aachen.
- [9] Huth, C.; Liepert, M.; Möhler U.: Psychoacoustic investigations on the efficiency of different noise barriers. Internoise 2016, Hamburg.