

Lärmschutzwände mit Beugungskante aus Helmholtz-Resonatoren für Lkw

FA 2.292

Forschungsstelle: Novicos GmbH, Hamburg

Bearbeiter: Zaleski, O. / Bockstedte, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2010

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Projektes wurde mithilfe von Berechnungsmodellen eine auf den spezifischen Lkw-Lärm einer Schnellstraße angepasste Ausführung von Lärmschutzwänden mit Beugungskante aus Helmholtz-Resonatoren ausgelegt. Die Anwendung von numerischen Untersuchungsmethoden ist in diesem Fall besonders sinnvoll, da die physikalischen Effekte im Hinblick auf die Akustik sehr kompliziert sind und eine Vielzahl von Varianten untersucht werden müssen, bevor sich die angestrebte Wirksamkeitssteigerung einstellt.

Die im Rechner gefundene Wandauslegung wurde als Prototyp gebaut und die mit ihr erreichte Schallreduktion messtechnisch nachgewiesen.

2 Aufsätze für Lärmschutzwände

Die schallschirmende Wirkung von Lärmschutzwänden kann durch Beugungseffekte an der oberen Abschlusskante der Wände wesentlich gemindert werden. Daher ist eine Gestaltung der Abschlusskanten in Form von Aufsätzen derart anzustreben, dass die Beugung der Schallwellen in den abgeschatteten Bereich reduziert wird. Ein wesentlicher Einfluss auf das Beugungsverhalten kommt dabei der Oberflächenimpedanz zu.

Helmholtz-Resonatoren

Grundlegend für die Auslegung der Beugungskante ist die Intention, eine Belegung der Beugungskante mit verschwindender Resonanz zu realisieren. Zu diesem Zweck sind Resonatoren in die Beugungskante zu integrieren, deren Öffnungen die schallweiche Oberfläche der Beugungskante bilden sollen.

Da die Resonatoren allerdings nur im Falle bestimmter Frequenzen eine verschwindende Oberflächenimpedanz nachbilden können, stellt die Abstimmung der Beugungskante auf das abzuschirmende Anregungsspektrum einen wesentlichen Entwurfsschritt dar.

3 Einfluss der Oberflächenimpedanz an zylindrischen Aufsätzen

Um im Weiteren die Güte der Frequenzabstimmung der Resonatoren beurteilen zu können, wird zunächst als Referenz die Belegung der Beugungskanten mit idealisierter Oberflächenimpedanz berechnet.

Idealisierte Beugungskante

Im Folgenden sind die Ergebnisse von Berechnungen 2-dimensionaler Modelle einer Lärmschutzwand zusammengestellt. Die Berechnung des sich einstellenden Schallfeldes besonders im abgeschirmten Feld wurde für zwei Positionen einer Punktschallquelle mit Einheitsstärke durchgeführt, siehe Bild 1.

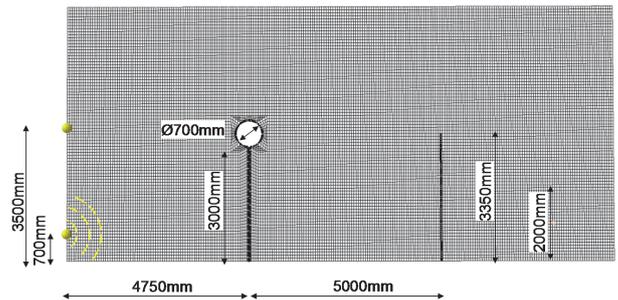


Bild 1: Abmessungen der untersuchten Schallschirme sowie die Lage der Schallquelle und der Bewertungsfläche

In den Bildern 2 und 3 werden zunächst die Schalldruckfelder für einen schallharten Aufsatz im Vergleich zu einem schallweichen Aufsatz (Impedanz $Z = 0$ auf der Zylinderoberfläche) beispielhaft bei einer Anregungsfrequenz von 500 Hz der unteren Schallquelle gegenübergestellt.

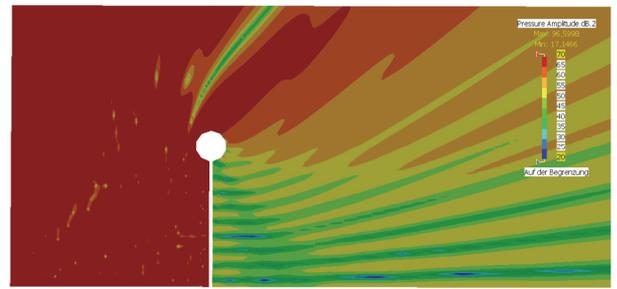


Bild 2: Schallfeld bei 500 Hz für eine schallharte Beugungskante (Schallquelle in unterer Position)

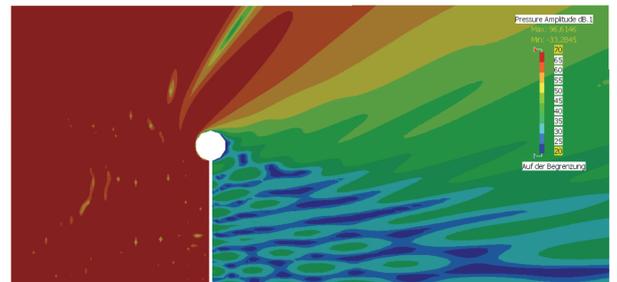


Bild 3: Schallfeld bei 500 Hz für eine schallweiche Beugungskante (Wand schallhart, Schallquelle in unterer Position)

Für die untere Schallquelle zeigt Bild 4 die Schalleistung an der Auswertefläche im Schatten des Schallschirmes. Zudem ist das Ergebnis für eine Beugungskante angegeben, die lediglich auf der Oberseite mit der Impedanz $Z=0$ belegt ist, die untere Zylinderhälfte ist hingegen schallhart angesetzt.

Zunächst sind in Bild 4 die sich für zunehmende Anregungsfrequenz wiederholenden Minima zu erkennen. Diese resultieren aus Interferenzen des direkten Schallweges mit dem am (schallharten) Boden zwischen Quelle und Schallschirm reflektierten Schallweges.

Außerhalb dieser Interferenzauslöschungen tritt zwischen schallharten und schallweichen Beugungskanten ein Unterschied der Schalleistung von etwa 15 dB im Falle der unteren Schallquelle (bzw. von etwa 8 dB im Falle der oberen

Schallquelle) auf. Dabei zeigt die lediglich auf der Oberseite schallweiche belegte Beugungskante nahezu die gleiche Verbesserung wie die rundum schallweiche Beugungskante.

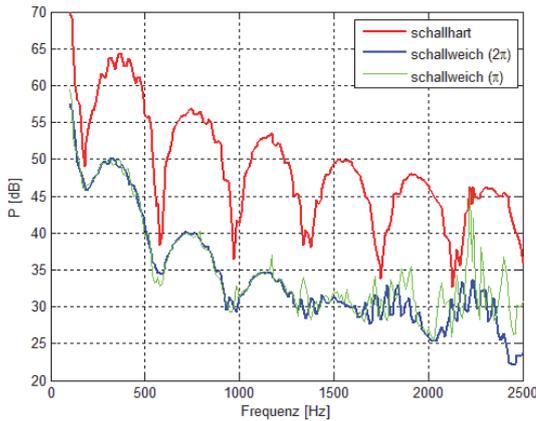


Bild 4: Schalleistung durch Auswertefläche für unterschiedliche Impedanzen der Beugungskante (Schallquelle in unterer Position)

Für die folgenden Untersuchungen ist damit ein Maßstab für die im Idealfall zu erwartende Verbesserung des Beugungsverhaltens gegeben. Die Verbesserung der Schallschirmung nimmt mit geringer werdender schallweicher Teilbelegung ab, allerdings nicht linear. Ist lediglich 1/7 der Oberseite des Zylinderaufsatzes (streifenweise) schallweich, so stellt sich noch etwa die Hälfte (in dB) der Verbesserung gegenüber dem schallharten Aufsatz im Vergleich zur vollständig schallweichen Zylinderoberfläche ein. Dieser Zusammenhang ist wesentlich für die Realisierung der gewünschten Impedanz durch Helmholtz-Resonatoren, da die Öffnungen der Resonatoren auch nur Teilbereiche der Aufsatzkontur bedecken können und dennoch deutliche Verbesserungen der Schallschirmung erwartet werden können.

Dimensionierung von Schallschirmen und Beugungskanten

Bei gegebener maximaler Schirmhöhe sind Lärmschutzwände mit T-förmigen Aufsätzen, die zudem möglichst dicht an der Schallquelle positioniert sind, am besten geeignet. Ein gutes Entwurfskriterium für die Dimensionierung der Lärmschutzwand und des Aufsatzes, das mehr Freiheiten für den Gesamtentwurf zulässt, ist die Maximierung des Gesamtbeugungswinkels des Schallweges. In Bild 5 sind zum Vergleich drei Schallschirme mit verschiedenen Aufsatzformen dargestellt: eine ebene Wand (ohne Aufsatz), ein zylindrischer Aufsatz und ein T-förmiger Aufsatz. Die Höhe der Schallschirme wurde dabei so angepasst, dass sich in Bezug auf eine Schallquelle und eine virtuelle Mikrofonposition der gleiche Gesamtbeugungswinkel ergibt.

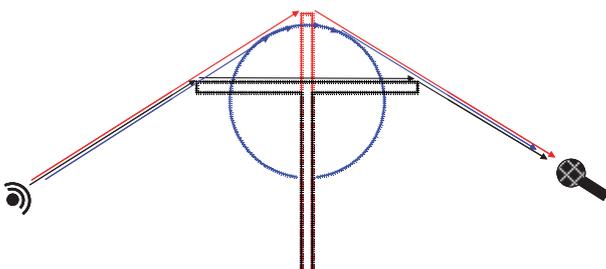


Bild 5: Vergleich der Schallwege bei Beugung an Wand, Zylinder- und T-Aufsatz

In Bild 6 findet sich eine Darstellung der dazu gehörigen Schalldruckpegel. Bei dem T-förmigen Aufsatz ist ein ausgeprägteres Interferenzverhalten als in den anderen beiden Fällen zu erkennen, da die der Schallquelle zugewandte Kante des T-Aufsatzes besonders exponiert und quellnah im Schallweg liegt. Im übrigen liegen die Schalldruckpegel in den drei Beispielen nahe beieinander.

4 Aufsatzentwurf

Für den weiteren Entwurf der Lärmschutzwand wurde eine Konturform festgelegt und mit Helmholtz-Resonatoren versehen.

Bikonvexe Außenkontur

Als Außenkontur für den Aufsatz wird eine bikonvexe Form entsprechend Bild 7 gewählt:

- Die flache bikonvexe Form ist der Form eines T-Aufsatzes entlehnt, um die Vorteile der Mehrfachbeugung und eines vergrößerten Gesamtbeugungswinkels zu nutzen.
- Durch die Wölbungen entsteht ein Innenraum, in dem die Resonatoren untergebracht werden können.
- Gleichzeitig lassen die zusammenlaufenden Außenkanten das Profil schlanker und weniger aufdringlich erscheinen.

Bei einer Optimierung einer generischen Kantenkontur wurde mithin eine der bikonvexen Kontur sehr ähnliche Außenform ermittelt, wodurch die gute Schirmwirkung des Profils bestätigt wird. Im nächsten Abschnitt wird nun die Parametrisierung der Resonatorkammern für die Optimierung betrachtet.

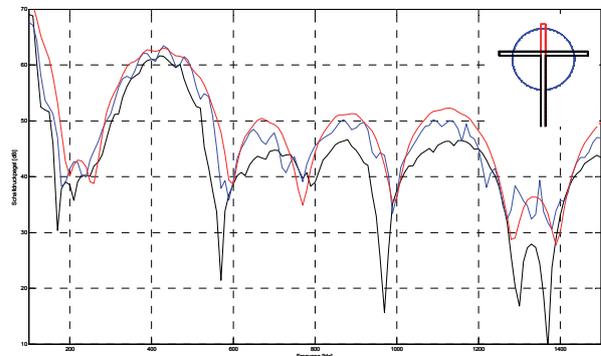


Bild 6: Vergleich der Schalldruckpegel bei Beugung an Wand, Zylinder- und T-Aufsatz

Parametrisierung der Resonatoren

In das bikonvexe Aufsatzprofil werden sieben Kammern eingebracht, deren Breite jeweils durch den Winkel α_i , $i = 1 \dots 7$, bezogen auf den Mittelpunkt des oben liegenden Kreissegmentes, festgelegt wird. Die Kammern reichen dabei bis zur unteren Schale, siehe Bild 7. Die entsprechenden Öffnungswinkel der Spalte sind mit ε_i parametrisiert, die einheitliche Stärke der Deckplatte, die ebenfalls Einfluss auf die Luftmassen in den Resonatoröffnungen hat, mit w .

Die Wanddicken der Kammerunterteilungen werden beibehalten. Die Positionen der Kammern werden dabei derart angepasst, dass die Resonatorstaffel innerhalb des Aufsatzes zentriert wird.

Die Referenzsituation der Optimierungen entspricht den zuvor beschriebenen Szenarien. Das Ergebnis der Optimierung ist in Bild 8 dargestellt.

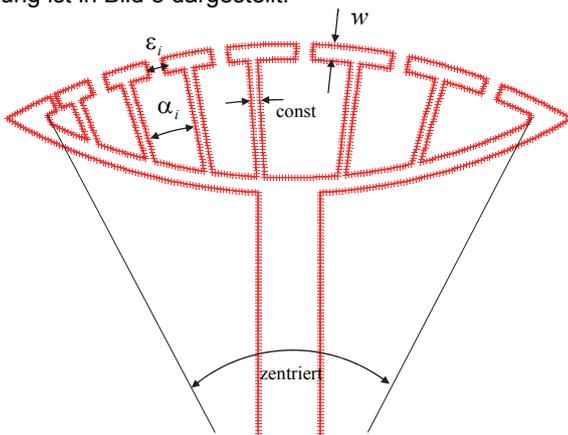


Bild 7: Bikonvexer Aufsatzentwurf mit parametrisierten Resonatorhöhlen

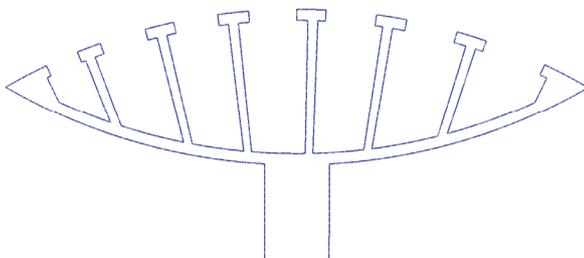


Bild 8: Optimierte Resonatoranordnung

Evaluierung des Entwurfs

Der Optimierung der Kammerauslegung liegt ein Gütekriterium zu Grunde, das den Schalldurchgang durch die Auswertefläche im Frequenzband von 400 Hz bis 1 200 Hz bewertet. Für den optimierten Entwurf ist der Schalldurchgang darüber hinaus im Bereich 100 Hz bis 1 800 Hz in Bild 10 dargestellt. Im Vergleich hierzu werden die entsprechenden Verläufe für eine vertikale Wand gleicher Gesamthöhe, aber ohne Aufsatz, sowie für einen geschlossenen Aufsatz ohne Resonatorhöhlen gezeigt, siehe Bild 9. Der bikonvexe Aufsatz bewirkt dank der T-förmigen Auskragungen bereits eine Verbesserung der Schirmwirkung gegenüber der vertikalen Wand. Auffällig ist dabei, dass die lokalen Minima bei den auskragenden Profilen zu größeren Wellenlängen hin verschoben sind.

Diese Minima resultieren aus Interferenzen mit der am schallharten Boden reflektierten Welle, und bei auskragenden Profilen sind die Gangunterschiede entsprechend größer. geschlossenen Kammern dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich ein nahezu identisches Ergebnis wie bei der geschlossenen Kontur.

Der Aufsatz mit Resonatorhöhlen zeigt schließlich eine weitere deutliche Verbesserung der Schirmwirkung. Letztlich, um numerische Einflüsse der Diskretisierung ausschließen zu können, ist noch eine Variante mit modellierten, aber nahezu geschlossenen Kammern dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich ein nahezu identisches Ergebnis wie bei der geschlossenen Kontur.

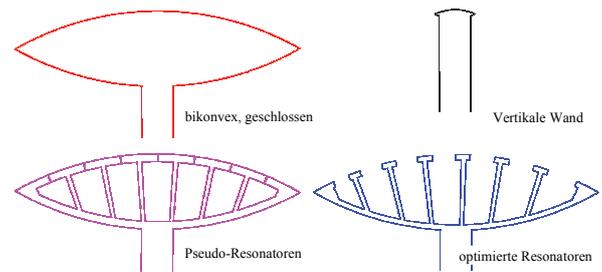


Bild 9: Optimierte Kontur und Vergleichsprofile

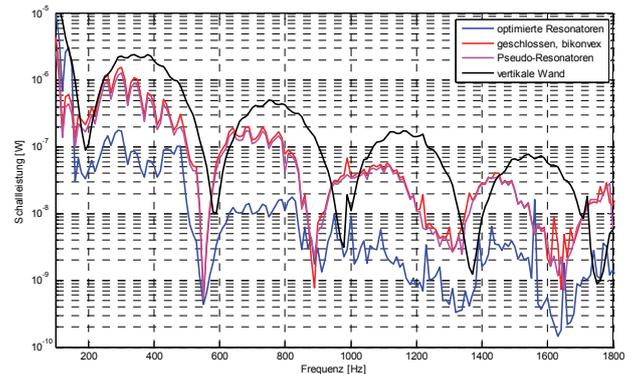


Bild 10: Schalleistung am Auswertungsschirm für die optimierte Kontur und die Vergleichsprofile

5 Versuch

Der messtechnische Nachweis der Beugungskante erfolgte auf dem Gelände der Firma EuDur-Bau GmbH & Co. KG in Herzebrock-Clarholz. Der Aufsatz mit den Resonatoren wurde aus wasserfest imprägniertem Holz hergestellt. In die Längsrichtung der Wand wurde der Aufsatz in 50 cm-lange Abschnitte durch Querwände unterteilt. Bei der Messung selbst kam ein im Rahmen von FA 2.272/2006/LRB "Bestimmung der Einfügungsdämpfung an verkürzten Lärmschutzwänden" entwickeltes Messverfahren zum Einsatz. Dadurch bedingt musste der Abschnitt der untersuchten Wand nur 20 m lang sein. Es wurden 40 Einzelelemente der Beugungskante vorbereitet, die vor Ort zu einer möglichst durchgängigen Struktur zusammengesetzt wurden, siehe Bild 11.

Der Aufsatz mit Resonatorhöhlen wurde auf einer 4 m hohen und straßenseitig hochabsorbierender Lärmschutzwand montiert. Sowohl die Wandhöhe als auch die schallabsorbierende Wandbeschichtung weichen von dem numerisch untersuchten Aufbau ab.



Bild 11: Aus Einzelelementen bestehende Beugungskante

Es wurden drei unterschiedliche Aufbauvarianten untersucht:

- Variante 1: Schallschutzwand ohne die Beugungskante,
- Variante 2: Schallschutzwand mit Beugungskante,
- Variante 3: Schallschutzwand mit abgedeckter Beugungskante.

Zur Abdeckung der Resonatorokammern wurde eine schwere, gummierte Gewebeplane benutzt.

Für die Untersuchungen wurde ein geradliniges, zwei Meter breites Mikrofonzeilenarray mit 21 Mikrofonen aufgebaut. Die Signale der einzelnen Mikrofone wurden so kombiniert, dass sich eine Hauptempfindlichkeitsrichtung senkrecht zur Arrayausrichtung ergab. Hieraus entstand eine Empfindlichkeitsabschwächung von -13 dB bei einem Winkel von +/- 13 ° bei 600 Hz, bzw. bei +/- 5 ° bei 1 500 Hz. Es entstanden keine Nebenkeulen, da der gewählte Mikrofonabstand kürzer war als die halbe Wellenlänge der oberen Grenzfrequenz.

Messaufbau

Das Mikrofonarray war in 2 m Höhe über dem Boden und 9 m Abstand von der Schallschutzwand aufgebaut, siehe Bild 12. Der Dodekaeder-Lautsprecher als Schallquelle befand sich 0,7 m über dem Boden und in 4,75 m Abstand von der Wand jeweils auf den Mittelpunkt des Lautsprechers bezogen. Das Referenzmikrofon wurde zwischen Lautsprecher und Wand in 1,6 m Höhe über dem Boden und 2 m Abstand zum Lautsprecher aufgestellt. Alle Einrichtungen standen mittig der 20 m breiten Schallschutzwand. Für die Messung wurde über den Dodekaeder-Lautsprecher ein weißes Rauschen als Quellsignal ausgegeben. Gemessen wurden Übertragungsfunktionen zwischen dem Referenzmikrofon und den Array-Mikrofonen, sowie Schmalbandspektren der Arraymikrofonensignale mit Phasenbezug zum Referenzmikrofon. Die Spektren wurden jeweils über einen Zeitraum von 60 Sekunden gemittelt. Durch diese Art der Berechnung wurden nur Schallanteile berücksichtigt die mit dem Quellsignal kohärent sind, der Einfluss von Störgeräuschen wurde unterdrückt. Die Berechnung des Arraysignals erfolgt durch Addition der einzelnen Mikrofon-Spektren und anschließender Normierung mit der Anzahl der Mikrofone.

Ergebnisse

Bild 13 zeigt den Vergleich aller wie oben beschrieben berechneten Schmalbandspektren. Dabei sind rot dargestellt die Spektren bei offenem Aufbau, grün bei geschlossenem Aufbau und blau ohne Aufbau. Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Wiederholungsgenauigkeit. Die Wirkung der Beugungskante ist deutlich zu erkennen.



Bild 12: Messaufbau: untersuchte Wand mit Beugungskante (oben), Dodekaeder-Lautsprecher und Referenzmikrofon (mitte)

Ein Vergleich der messtechnisch erzielten Ergebnisse mit der numerischen Vorhersage ist aufgrund der Unterschiede zwischen der vermessenen und der simulierten Lärmschutzwand nicht im vollen Umfang möglich. Die starke Lärmschutzwirkung der entwickelten Beugungskante ist aber auch in den Messergebnissen deutlich sichtbar. Dies bestätigt die Vergleichsanalyse für die Lärmschutzwand mit und ohne die Beugungskante. Die Abnahme des Schalldruckpegels in den Terzen bis 2,5 kHz variiert zwischen 0,5 dB und 11,5 dB, wobei sie in den meisten Terzen mindestens 4 dB beträgt. In dem Frequenzbereich des Lkw-Lärms, für den die Beugungskante ausgelegt wurde, beträgt der Unterschied mindestens 8 dB.

Ein großer Teil der erzielten Schalldruckpegelreduktion wird durch den vorgeschlagenen Beugungskörper verursacht. Die Resonatoren verstärken zusätzlich ihre Lärmschutzwirkung, insbesondere im Frequenzbereich des Lkw-Lärms bei der 1 000 Hz-Terz. Es ist hierbei zu beachten, dass bei Messungen mit abgedeckten Resonatoren, diese wahrscheinlich doch einen Resteinfluss auf die Schallausbreitung ausübten. Der abdeckende Stoff könnte unter Umständen wie eine Membran gewirkt haben, die einzelne Resonatoren flexibel abschließt. Zusammenfassend ist deshalb festzuhalten, dass der Beitrag der Resonatoren zur erzielten Lärmschutzwirkung einer Lärmschutzwand mit der vorgeschlagenen Beugungskante in den Messungen möglicherweise unterbewertet wurde.

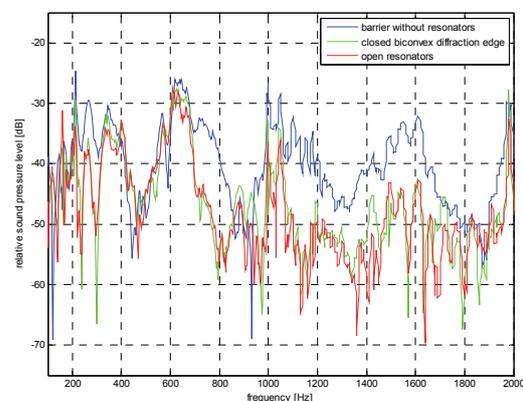


Bild 13: Alle gemessenen Schmalbandspektren des Schalldrucks