

Bestimmung der Einfügungsdämpfung an verkürzten Lärmschutzwänden

FA 2.272

Forschungsstelle: Gesellschaft für Akustikforschung
Dresden mbH, Dresden

Bearbeiter: Schulze, C. / Hübelt, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Februar 2008

1 Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen kostengünstigen Messverfahrens zur In-situ-Bestimmung der spektralen Einfügungsdämpfung einer Lärmschutzwand (Lsw). Das bisher eingesetzte Einzelmikrofon-Verfahren erfordert eine Lsw mit einer Länge von 200 m. Damit sind erhebliche Kosten sowie gegebenenfalls Beeinträchtigungen des laufenden Verkehrs verbunden. Die Messung mit einem Mikrofonarray-Messsystem soll die Ermittlung der Einfügungsdämpfung an einer stark verkürzten Wand ermöglichen (ca. 20 m Länge). Durch die erhebliche Verringerung der notwendigen Mindestlänge der zu untersuchenden Testwand können die Baukosten um ein Vielfaches gesenkt werden.

Als Mikrofonarray bezeichnet man eine Anordnung von mindestens zwei Mikrofonen. Anwendung finden Mikrofonarrays in den verschiedensten Bereichen der Akustik. Sie dienen vor allem der Lokalisation, Trennung und Analyse von Schallquellen. Die dadurch gewonnenen Informationen sind Voraussetzung für die Lärminderung von Maschinen, die Analyse der Geräuschenstehung bei der Umströmung von Objekten, die Suche nach akustischen Leckagen oder akustisches Design. Auch in der Sprachverarbeitung lassen sich Anwendungen finden, wie z. B. die Sprecherlokalisierung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands von Sprachsignalen als wichtiger Bestandteil der Mensch-Maschine-Kommunikation.

Grundlage des hier entwickelten Verfahrens ist die Ausnutzung der Richtwirkungseigenschaft eines Mikrofonarrays, die durch die Anwendung einer nachgeschalteten Signalverarbeitung auf die einzelnen Mikrofonensignale erzielt wird. Durch Fokussierung des Mikrofonarrays auf die zu untersuchende Schallquelle können Störquellen ausgeblendet werden. Da das Einzelmikrofon durch seine kugelförmige Richtcharakteristik nicht die Fähigkeit besitzt, Störquellen zu unterdrücken, ist es bisher notwendig, dieses Mikrofon durch eine entsprechend lange Lsw von seitlich auftretenden Störungen abzuschirmen. Bei ausreichender Richtwirkung des Mikrofonarrays ist eine Abschirmung der Störquellen unnötig.

Zu Beginn werden die Eigenschaften des Mikrofonarrays im Hinblick auf die In-situ-Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Lsw optimiert. Für die Untersuchungen soll dabei ein Linienarray eingesetzt werden, da für die Ermittlung der vom horizontalen Schalleinfallswinkel abhängigen Einfügungsdämpfung ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler Richtung notwendig ist. Gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray erhöhen sich dadurch bei gleicher Mikrofonanzahl die örtliche Auflösung und die Nebenkeulenunterdrückung (SNR).

Die Anforderungen an die Richtcharakteristik des Mikrofonarrays lassen sich dabei durch Ergebnisse von Schallausbreitungsberechnungen spezifizieren. Für die korrekte Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer infiniten Lsw durch Messungen an einer finiten Wand erfolgt die Definition einer Mindestlänge der Lärmschutzwand in Ab-

hängigkeit von der Höhe der Lsw für eine spezifische Quell-Empfänger-Geometrie.

Es wurden messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der spektralen winkelabhängigen Einfügungsdämpfung einer Referenz-Lärmschutzwand im Raum Sachsen durchgeführt. Dabei wurden zeitgleich das Einzelmikrofon- und das neuartige Mikrofonarray-Verfahren mit optimiertem Linienarray angewendet. Die Messungen erfolgten zum einen mithilfe einer stationären Punktschallquelle, zum anderen bei kontrollierter Vorbeifahrt eines Pkw mit konstanter Geschwindigkeit von 80 km/h.

Die Messergebnisse des Mikrofonarray-Verfahrens werden denen der Einzelmikrofon-Messung gegenübergestellt. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf der Analyse der Unterschiede beider Verfahren in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Schalleinfallswinkel. Es wird untersucht, ob für die Bestimmung der Einfügungsdämpfung die alleinige Betrachtung des horizontalen Schalleinfallswinkels von 0° ausreichend ist. Eine Möglichkeit der Anpassung der Ergebnisse des Mikrofonarray-Verfahrens an die der Einzelmikrofon-Messung besteht dabei in der Definition eines Korrekturfaktors.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Einzelmikrofon-Verfahren

Beim Einzelmikrofon-Verfahren wird in einem Abstand von 25 m zur Mitte des ersten Fahrstreifens und einer Höhe von 4 m über Fahrbahnniveau mithilfe eines einzelnen Mikrofons der mittlere Schallimmissionspegel bestimmt, der sich bei Vorbeifahrt eines Fahrzeugs über den Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels von $+60^\circ$ bis -60° hinter der Lsw ergibt.

Wird eine analoge Schallimmissionsmessung vor Errichtung der Lsw durchgeführt, erhält man die Einfügungsdämpfung der Lsw aus der Differenz der bestimmten Immissionspegel. Dieses Verfahren erfordert eine Lsw mit einer Länge von ca. 200 m, da aufgrund der kugelförmigen Richtcharakteristik des Einzelmikrofons störende Schallfeldanteile abgeschirmt werden müssen.

2.2 Mikrofonarray-Verfahren

Innerhalb des neu entwickelten Messverfahrens soll der Nachteil des Einzelmikrofon-Verfahrens vermieden werden, indem ein Mikrofonarray mit steuerbarer Richtcharakteristik durch Anwendung des Beamforming-Algorithmus eingesetzt wird.

Die Richtcharakteristik des für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Mikrofonarrays wurde im Hinblick auf die In-situ-Bestimmung der spektralen Einfügungsdämpfung einer Lsw im Frequenzbereich von 315 Hz bis 3150 Hz optimiert. Die Frequenzbandgrenzen resultieren dabei aus dem energetischen Schwerpunkt des standardisierten Verkehrslärmspektrums. Für die Untersuchungen wurde ein Linienarray ausgewählt, da für die Ermittlung der vom horizontalen Schalleinfallswinkel abhängigen Einfügungsdämpfung ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler Richtung notwendig ist. Gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray erhöhen sich dadurch bei gleicher Mikrofonanzahl die örtliche Auflösung und die Nebenkeulenunterdrückung. Die Anforderungen an die Richtcharakteristik des Mikrofonarrays ergeben sich dabei aus Ergebnissen von Schallausbreitungsberechnungen.

Die Berechnung der Schallausbreitung zur Vorhersage der winkelabhängigen Einfügungsdämpfung einer Lsw erfolgte nach dem in (Hübelt u. a., 2007) vorgestellten Verfahren. Die

Einfügungsdämpfung ergibt sich dabei aus der Differenz der Einzeldämpfungen, die bei Vorhandensein einer Lsw und bei freier Schallausbreitung zwischen einer Quelle und einem Empfänger bestimmt werden (Höhe Lsw: 3 m bis 9 m; Quell- / Empfängerhöhe: 0,5 m / 4,0 m; Abstand zwischen Lsw und Quelle / Empfänger: 7,625 m / 17,375 m).

Innerhalb der Berechnung der Schallausbreitung wurden folgende Effekte berücksichtigt:

- geometrische Divergenz,
- Luftabsorption,
- Schallbeugung an Hindernissen,
- Schallreflexion am Boden mit kontinuierlicher und diskontinuierlicher Impedanzbelegung sowie
- Schallreflexion an Hindernissen.

Die Gesamtdämpfung der einzelnen Schallpfade ergab sich durch Anwendung des Inkohärenz-Ansatzes in SonRoad (Heutschi, 2005). Zur Beschreibung der Schalleistung der Quelle wurde das standardisierte Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 (November 1997) herangezogen.

Die Ergebnisse der Berechnung lassen erkennen, dass die maximale Einfügungsdämpfung der Lsw mit zunehmender Höhe steigt. Unabhängig von der Höhe der Lsw tritt das Maximum der Einfügungsdämpfung stets unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° auf. Mit zunehmendem Einfallswinkel steigt die mittlere Schalldämpfung bei freier Schallausbreitung schneller als bei vorhandener Lsw, sodass die mittlere Einfügungsdämpfung abnimmt. Die Ergebnisse der Schallausbreitungsberechnungen sind für einen horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Einfügungsdämpfung D_e für horizontalen Schalleinfallswinkel $\varphi = 0^\circ$ in Abhängigkeit von der Höhe der Lsw im Vergleich zur Dämpfung mit und ohne Lsw, Frequenzbereich 100 Hz - 5 kHz

| Höhe Lsw [m] | D_{frei} [dB] | D_{Lsw} [dB] | D_e [dB] |
|--------------|-----------------|----------------|------------|
| 3 | 27,0 | 40,5 | 13,5 |
| 5 | 27,0 | 45,5 | 18,5 |
| 7 | 27,0 | 48,5 | 21,5 |
| 9 | 27,0 | 51,5 | 24,5 |

Angestrebtes Ziel des neu entwickelten Verfahrens ist die In-situ-Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer semi-infiniten Lsw (Länge $\rightarrow \infty$) durch Messung an einer stark verkürzten Wand von ca. 20 m Länge. Um dieses Ziel erreichen zu können, sollen folgende zwei Fälle betrachtet werden.

1. Fall: Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Lsw in **ungestörter** akustischer Umgebung

Für die korrekte Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Lsw mithilfe des Einzelmikrofon-Verfahrens muss die Schalldämpfung durch Beugung um die Seitenkanten des Schirms $D_{Lsw,s}$ gegenüber der Schalldämpfung durch Beugung an der Schirmoberkante $D_{Lsw,o}$ um ein Vielfaches größer sein. Daraus resultiert eine notwendige Mindestlänge L_{min} der Lsw als Funktion der Höhe der Lsw und der Quell-Empfänger-Geometrie. Für die messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämpfung der Lsw mithilfe einer Punktschallquelle unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° hinter der Lsw ist die notwendige Mindestlänge L_{min} gleich der doppelten effektiven seitlichen Schirmhöhe und damit der 8-fachen

effektiven Schirmhöhe (VDI, 1997). Dies entspricht einer Dämpfungsdifferenz von

$$\Delta L_{p,min} = D_{Lsw,s} - D_{Lsw,o} = 12 \text{ dB} \quad (1)$$

Für eine 3 m hohe Lsw ergibt sich bei beschriebener Quell-Empfänger-Geometrie eine notwendige Mindestlänge der Lsw von ca. 12,0 m. Mit zunehmender Schirmhöhe steigt die Mindestlänge der Lsw.

Bei Einsatz eines Mikrofonarray-Messsystems kann die notwendige Mindestlänge der Lsw aufgrund der seitlich der Hauptkeule des Arraypatterns auftretenden Nebenkeulenunterdrückung verringert werden. Gleichung (1) verändert sich somit zu

$$\Delta L_{p,min} = SNR + D_{Lsw,s} - D_{Lsw,o} = 12 \text{ dB} \quad (2)$$

Die Mindestlänge der 3 m hohen Lsw verringert sich dadurch auf 10 m. Für die messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämpfung der Lsw unter 0° bei kontrollierter Vorbeifahrt eines Pkw mit der Geschwindigkeit v in ungestörter akustischer Umgebung ist es notwendig, die Mindestlänge der Lsw um die Fahrzeuglänge $L_{Fahrzeug}$ und den zurückgelegten Weg des Fahrzeugs während des Beobachtungszeitraumes t_B zu erhöhen:

$$L_{min,v} = L_{min} + L_{Fahrzeug} + v * t_B \quad (3)$$

2. Fall: Bestimmung der Einfügungsdämpfung der Lsw in **gestörter** akustischer Umgebung

Untersuchungen (Reinhold, 1973) haben gezeigt, dass es zu einem deutlich hörbaren Pegelanstieg am Immissionsort kommt, wenn ein Pkw das Wandende einer abrupt endenden Lsw passiert. Der Pegelanstieg resultiert aus dem nahezu sprunghaften Übergang der Dämpfung D_{Lsw} des Schalls zwischen Fahrzeug und Immissionsort bei vorhandener Lsw zur Dämpfung D_{frei} bei freier Schallausbreitung. Nach (Maekawa, 1968) ist der Dämpfungswert an der Stelle des Wandendes (Sichtlinie Quelle / Empfänger) 5 dB höher als die Dämpfung bei freier Schallausbreitung. Durch seitliche Abtreppung der Lsw kann der sprunghafte Pegelanstieg verhindert werden. Für die korrekte Bestimmung der Einfügungsdämpfung muss die Nebenkeulenunterdrückung der Richtcharakteristik daher ausreichend groß sein, um zu garantieren, dass besonders seitlich der Lsw auftretende Störquellen keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Der dafür notwendige minimale Signal-Rausch-Abstand SNR_{min} ergibt sich aus

$$SNR_{min} = \Delta D_{max} + \Delta L_{p,min} \quad (4)$$

ΔD_{max} ist definiert als die maximale Differenz der Schalldämpfung $D_{Lsw,0^\circ}$ einer Punktschallquelle unter $\varphi = 0^\circ$ bei vorhandener Lsw und der minimalen Schalldämpfung $D_{frei,min}$ einer Punktschallquelle bei freier Schallausbreitung:

$$\Delta D_{max} = D_{Lsw,0^\circ} - D_{frei,min} \quad (5)$$

Für den praktischen Fall der Anwendung des Verfahrens im fließenden Verkehr soll die Wirkung einer einzelnen Störquelle auf den Immissionspegel vernachlässigt werden können. Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen wird daher, wie im 1. Fall, eine notwendige Pegeldifferenz $\Delta L_{p,min}$ von 12 dB festgelegt. Gegenüber Gleichung (2) stellt Gleichung (4) die höhere Anforderung an den minimalen SNR des Arraypatterns dar. Für eine 3 m hohe Lsw ist bei beschriebener Quell-

Empfänger-Geometrie ein minimaler SNR von 25,5 dB notwendig.

Der Einsatz eines mittels der in (Schulze u. a., 2004) beschriebenen numerischen Synthese optimierten 32-elementigen Linienarrays der Länge von 2,6 m garantiert einen SNR von 18,8 dB. Die In-situ-Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer Lsw in gestörter akustischer Umgebung ist damit nicht gesichert. Durch Anwendung einer Hamming-Mikrofonwichtung auf eine äquidistante Mikrofonanordnung kann der SNR auf 44,3 dB erhöht werden. Dadurch wird die In-situ-Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer Lsw bis zu einer Höhe von 9 m im fließenden Verkehr ermöglicht.

Die Mindestlänge der Lsw L_{min} ergibt sich bei Einsatz einer Punktschallquelle unter $\varphi = 0^\circ$ hinter der Lsw aus der HKB des Arraypatterns bei Dämpfung der tiefsten zu lokalisierenden Frequenz um SNR_{min} :

$$L_{min} = HKB_{SNR_{min}} \quad (6)$$

Für eine 3 m hohe Lsw wurde bei beschriebener Quell-Empfänger-Geometrie eine Mindestlänge der Lsw von ca. 37 m ermittelt. Diese ist entgegen den Projekterwartungen etwa doppelt so groß. Für die messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämpfung der Lsw bei kontrollierter Vorbeifahrt in gestörter akustischer Umgebung erhöht sich die Mindestlänge der Lsw analog Gleichung (4).

3 Untersuchungsergebnisse und Folgerungen für die Praxis

Die messtechnischen Untersuchungen zur In-situ-Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer Referenzlärmschutzwand wurden am Ortsausgang Kamenz, Macherstraße, Richtung Zschornau durchgeführt. Bei dem Referenzobjekt handelte es sich um eine unverputzte Ziegelmauer der Länge von ca. 155 m und einer Dicke von ca. 0,4 m. Die Schirmkronen befand sich ca. 3 m über Fahrbahnniveau. Am rechts- und linksseitigen Ende der Lärmschutzwand war keine Abtreppung vorhanden. Die Ziegelmauer lässt sich damit näherungsweise als infinites schallhartes keilförmiges Hindernis mit einem Keilwinkel von 0° modellieren.

Innerhalb der Untersuchungen wurden zeitgleich das Einzelmikrofon- und das neuartige Mikrofonarray-Verfahren unter Einsatz des konstruierten optimierten Linienarrays angewendet. Die Messungen erfolgten zum einen mithilfe einer stationären Punktschallquelle, die ein "rosa Rauschen" aussendete, zum anderen bei kontrollierter Vorbeifahrt eines Pkw mit konstanter Geschwindigkeit von 80 km/h. Die näherungsweise Bestimmung des Schallimmissionspegels für freie Schallausbreitung erfolgte mittels Referenzmikrofon auf der dem Mikrofonarray gegenüberliegenden Seite der Lsw. Die akustischen Messungen konnten aufgrund geringer Verkehrslast nahezu ohne akustische Störschallquellen durchgeführt werden. Für die Messungen mittels Referenzschallquelle wurde die Straße einseitig gesperrt. Die Untersuchungen bei kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw fanden im fließenden Verkehr statt. Die konstante Geschwindigkeit von ca. 80 km/h wurde dabei mithilfe von zwei Laser-Reflexionslichtschranken registriert, die sich unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von $\varphi = \pm 60^\circ$ vom Arraymittelpunkt befanden.

Die messtechnischen Untersuchungen mithilfe der Punktschallquelle ergaben eine nahezu winkelunabhängige Differenz von ca. 1,1 dB zwischen Einzelmikrofon- und Mikrofonarray-Verfahren. Der Schallimmissionspegel wurde mithilfe des Mikrofonarrays stets niedriger und damit die Einfügungsdämpfung höher bestimmt als mit Einzelmikrofon. Bei

Betrachtung der Terzbandspektren ließen sich jedoch frequenzabhängige Unterschiede erkennen. Mit steigender Frequenz nimmt die Differenz des Immissionspegels zwischen Einzelmikrofon-Verfahren und Mikrofonarray-Verfahren zu. Daraus lässt sich vermuten, dass die Ursache der Dämpfungsunterschiede Störgeräusche sind, die mit steigender Frequenz zunehmen und durch die Anwendung des Mikrofonarray-Messsystems entfernt werden.

Die Ergebnisse bei kontrollierter Vorbeifahrt weisen dagegen Unterschiede von durchschnittlich 2,9 dB auf. Zur Anpassung der Ergebnisse des Einzelmikrofon-Verfahrens bei Beobachtung des Fahrzeugs über einen Winkelbereich von $\varphi = \pm 60^\circ$ an die mittels Mikrofonarray unter 0° bestimmten Dämpfungswerte der Lsw wurde für die betrachtete Quell-Empfänger-Geometrie ein Korrekturterm von -3,8 dB ermittelt.

Es zeigte sich, dass das Mikrofonarray-Verfahren mit Punktschallquelle praktisch einsetzbar ist. Für die kontrollierte Vorbeifahrt sind vorerst weitere Untersuchungen notwendig, um herauszufinden, woraus die höheren Dämpfungsunterschiede resultieren, d. h. inwiefern beispielsweise das seitlich des Messorts befindliche Gebäude die Ergebnisse des Einzelmikrofon-Verfahrens beeinflusst.

4 Literatur

- Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V. (1997): DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum, Berlin, November 1997.
- Heutschi, K. (2005): SonRoad: Neues Schweizer Straßenlärmmodell, in: Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 52 (2005), Nr. 6, S. 174–179.
- Hübelt, J.; Schulze, C. (2007): Reflexion von Schall an seitlichen Hindernissen. Forschungsprojekt Nr. 02.264/2005/LRB, Abschlussbericht.
- Maekawa, Z. (1968): Noise reduction by screens, in: Applied Acoustics 1 (1968), Nr. 3, S. 157–173.
- Reinhold, G. (1973): Optimierungsprobleme bei der Planung von Abschirmeinrichtungen, Proceedings of DAGA.
- Schulze, C; Sarradj, E; Zeibig, A. (2004): Characteristics of microphone arrays. Proceedings of Internoise 2004, Prague, Czech Republic, August 2004.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (1997): VDI 2720-1: Schallschutz durch Abschirmung im Freien, März 1997.