

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)
Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

Masstabsmodelluntersuchungen zur Beziehung zwischen dem Schalldruck im Freifeld und im offenen Fenster

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5214.00313.0, int. 511.2605
Ihr Auftrag vom: 26.8.2013
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 16

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

- 1 Ausgangslage und Auftrag
- 2 Messungen und numerische wellentheoretische Simulationen
- 3 Rechenmodell
- 4 Diskussion und Folgerungen aus den Messergebnissen

Dübendorf, 3. Dezember 2013

Der Projektleiter:



K. Heutschi

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:



K. Eggenschwiler

Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern
- Auftragnehmer:** Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Abteilung Akustik / Lärminderung
- Autoren:** Kurt Heutschi, Kurt Eggenschwiler
- Begleitung BAFU:** Kornel Köstli
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

In der 1995 publizierten BUWAL Mitteilung zur Lärmschutzverordnung Nr. 7 wird für die Umrechnung einer Messung in Grenzflächenmontage auf das offene Fenster ein Wert von 5 dB angegeben. Daraus lässt sich folgern, dass im offenen Fenster gegenüber Freifeld ein systematisch höherer Pegel zu erwarten ist. Zur Klärung der Höhe dieses Zuschlags und Identifikation von beeinflussenden Faktoren wurden Massstabsmodellexperimente im Labor der Empa sowie numerische wellentheoretische Simulationen durchgeführt. Basierend auf Ergebnissen, die durch systematische Geometrievariation gefunden wurden, wurde ein semiempirisches Rechenmodell entwickelt, das die Abschätzung des Fensterzuschlags in Abhängigkeit des Schalleinfallswinkels, der Fenstergrösse und der Bedämpfung des dahinterliegenden Raums erlaubt. Für typische Geometrien und Raumnachhallzeiten wurde eine mittlere Pegelerhöhung im offenen Fenster gegenüber Freifeld von rund 0.5 dB(A) gefunden. Überdies wurde die zusätzliche pegelerhöhende Wirkung von Vorsprüngen (z.B. eines Daches) untersucht. Die gefundenen Zuschläge sind relativ gering, sofern sich der Vorsprung nicht unmittelbar oberhalb des Fensters befindet oder die Strasse sehr nahe an der Fassade vorbeiführt. Für Fahrspuren in mittlerer und grösserer Entfernung hat sich auch die Tiefe der Fensterleibung als unbedeutend herausgestellt. Nicht in die Untersuchungen einbezogen wurden abschirmende Elemente wie Brüstungen oder besonders ausladende Simse.

1 Ausgangslage und Auftrag

Die LSV definiert die Mitte des offenen Fensters als Ermittlungspunkt zur Abklärung von Lärmbelastungen. Angestossen durch die Schwierigkeit, Langzeitmessungen im offenen Fenster durchzuführen, hat das seinerzeitige BUWAL in den Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung Nr. 7, 1995 eine Messmethodik publiziert, die eine Mikrofonposition direkt auf der Gebäudefassade oder auf dem geschlossenen Fenster wählt (Grenzflächenmikrofonanordnung). Im Dokument wird ausgeführt, dass im offenen Fenster im Vergleich zur Grenzflächenmikrofonmessung von 5 dB tieferen Schalldruckpegeln auszugehen ist. Daraus lässt sich folgern, dass im offenen Fenster der dahinterliegende Raum und mögliche Randeffekte an der Fensterleibung in Erscheinung treten. Zur Quantifizierung dieser Effekte beauftragte das Bafu, Abteilung Lärmbekämpfung und NIS mit Vertrag vom 26.8.2013 die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung mit Massstabsmodelluntersuchungen zur Beziehung zwischen dem Schalldruck im Freifeld und im offenen Fenster. Diese Untersuchungen stellen eine Erweiterung einer Voruntersuchung mit Messungen auf dem Empa-Areal (Empa Bericht 5214.00035.9) dar.

2 Messungen und numerische wellentheoretische Simulationen

2.1 *Masstabsmodellmesstechnik*

2.1.1 *Prinzip*

Die Schallausbreitung von einer Quelle zu einem Empfänger im Beisein von Objekten und Raumbegrenzungsflächen wird durch die Geometrieabmessungen im Vergleich zur Schallwellenlänge und die Absorption bestimmt. Wenn sowohl die Schallwellenlänge als auch die Geometrie mit dem gleichen Faktor skaliert werden, ändert sich an der Schallausbreitung mit Ausnahme der möglichen Wirkung der Absorption nichts. Damit ist es möglich, die Schallausbreitung in einer spezifischen Umgebung in einem Masstabsmodell nachzubilden, wenn die Frequenz in gleichem Mass erhöht wird, wie die Geometrie geschrumpft wurde. Hinsichtlich der Absorption der Objekte und Begrenzungen ist sicherzustellen, dass die Materialien im transformierten Frequenzbereich jene Absorptionskoeffizienten aufweisen, die im Originalmassstab gelten.

2.1.2 *Laborraum*

Für die Untersuchungen stand mit dem Empa Labor SH2-332 ein Raum mit harter Bodenfläche und hochabsorbierenden Wand- und Deckenflächen zur Verfügung. Damit konnten störende Reflexionen von den Raumbegrenzungsflächen weitgehend ausgeschlossen werden.

2.1.3 *Messkonzept*

Zur Nachbildung einer inkohärenten Linienquelle wird der interessierende Abschnitt durch einzelne diskrete Punktquellen abgedeckt. Sämtliche Untersuchungen zu Ausbreitungsdämpfungen reduzieren sich dann auf einzelne Quellen- und Empfängerpunkte-Kombinationen. Durch nachträgliche Überlagerung kann in einem zweiten Schritt die Wirkung der ganzen Linienquelle ermittelt werden. Für die Messung wird demzufolge ein Lautsprecher und ein Mikrofon, sowie ein geeigneter Analysator benötigt. Die Beschreibung der Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger geschieht mit Vorteil durch die sogenannte Impulsantwort. Die Impulsantwort ist der Zeitverlauf des Signals am Empfänger, wenn an der Quelle ein kurzer Impuls erzeugt wird. In der Impulsantwort wird sichtbar, nach welcher Laufzeit wieviel Schallenergie am Empfänger eintrifft. Die Messung der Impulsantwort ist grundsätzlich problematisch, da auf Grund der Amplituden- und Zeitbeschränkung nur wenig Energie in den Anregungsimpuls gesteckt werden kann. Das Signal am Empfänger hebt sich demzufolge oft nur schwach vom Umgebungsgeräusch ab. Als eleganter Ausweg bietet sich der Einsatz von Korrelationsverfahren an. Diese erhöhen mittels eines rechnerischen Tricks das Signal/Rausch-Verhältnis ganz beträchtlich, indem die Anregung über einen längeren Zeitraum verteilt wird. Als Modellmassstab wurde 1:16 verwendet. Im Modell wurden die Oktaven 4...32 kHz untersucht, entsprechend den Oktaven 250...2'000 Hz im Originalmassstab.

2.1.4 *Messkette*

Die Messkette setzte sich wie oben angedeutet aus einem Lautsprecher, einem Mikrofon und dem Analysator zusammen. Der Lautsprecher hat die Aufgabe, im transformierten Frequenzbereich zwischen 4 und 32 kHz die Abstrahlung der Originalquelle nachzubilden. Als Lösung wurde hierzu ein Piezo-

Hochtonhorntreiber gefunden, der in ein Volumen mit einem 2 mm grossen Auslass arbeitet (Abbildung 1). Als Mikrofon wurde ein B&K Typ 4138 (1/8"), SN 251704 mit einem B&K Impedanzwandler Typ 2633, S/N 964998 verwendet. Der nutzbare Frequenzbereich erstreckt sich mit diesem Mikrofon über den ganzen Frequenzbereich bis 40 kHz und garantiert dabei eine omnidirektionale Richtcharakteristik. Die Bestimmung der Impulsantwort erfolgte mittels eines Audio-Interfaces vom Typ Sound Devices USBPre2 und der Software ARTA, die die Bestimmung von Systemimpulsantworten mittels Maximalfolgen erlaubt.



Abbildung 1: Modell-Lautsprecher. Die Schallaustrittsöffnung ist an der Spitze der kegelförmigen Struktur, etwa 3 mm über der Bodenplatte.

2.1.5 Primäre Messauswertung: Impulsantwort

Die primäre Messauswertung umfasst die Auftrennung der Impulsantwort in die verschiedenen Oktavbänder, die Kompensation von Störgeräuschen und der Luftabsorption sowie das Berechnen des Energieinhalts als Mass für den Pegel am Empfänger. Die ARTA Messung liefert die Impulsantwort für die gewählte Quellen-Empfänger Übertragungsstrecke. Als erstes wird die Impulsantwort zeitlich begrenzt, d.h. es werden allfällige Reflexionen, die nichts mit dem Modell zu tun haben (z.B. Reflexionen an Wänden oder der Decke des Laborraums) weggeschnitten. Um eine frequenzabhängige Aussage zu erhalten, wird die Impulsantwort anschliessend vierfach kopiert und für je das entsprechende Oktavband (4, 8, 16 und 32 kHz) bandpassgefiltert. Damit liegen vier Impulsantworten vor, die nur noch die Frequenzanteile des jeweiligen Oktavbandes enthalten. Als nächstes wird die Impulsantwort durch Quadrieren in eine Energieimpulsantwort überführt. Diese Energieimpulsantwort wird von allfälligem Störgeräusch befreit. Dieses manifestiert sich als gleichmässig über die Zeit verteiltes überlagertes Rauschen. In einem signalfreien Abschnitt der Energieimpulsantwort wird dieses Rauschen geschätzt und dann über die ganze Antwort abgezogen. Bei den hohen Frequenzen, die im Modellmassstab verwendet werden, fällt die Luftabsorption ganz beträchtlich ins Gewicht. Bei 4 kHz beträgt die Dämpfung pro Meter etwa 0.03 dB, bei 8 kHz etwa 0.1 dB, bei 16 kHz etwa 0.3 dB und bei 32 kHz etwa 1 dB. Diese Luftdämpfung muss rechnerisch kompensiert werden. Dies geschieht durch eine zeitlich variable Verstärkung der Energieimpulsantwort nach folgender Vorschrift :

$$\bar{h}^2(t) = h^2(t) \cdot 10^{\frac{\alpha \cdot t}{29.412}} \quad (1)$$

mit:

$\bar{h}^2(t)$ Energieimpulsantwort, kompensiert um die Luftabsorption im Modellmassstab

$h^2(t)$ gemessene Energieimpulsantwort

α Dämpfung in dB/km in Abhängigkeit der Frequenz, Temperatur und Feuchte gemäss ISO 9613-1

t Zeit in sec

Anschliessend wird die Luftabsorption für den Originalfrequenzbereich in analoger Weise wieder dazuge-rechnet (10°/70%). Die Energie, die in jeder der vier gefilterten Energieimpulsantworten steckt, lässt sich durch Aufintegrieren bestimmen. Dieser Wert ist ein Mass für den Pegel am Empfangspunkt, wenn die Quelle ein stationäres Rauschen abstrahlen würde.

2.1.6 Bestimmung des A-Pegels für Strassenverkehrslärm

Aus den vier Oktavbandpegeln wurde jeweils durch Gewichtung mit dem in Tabelle 1 gezeigten Spektrum für Strassenverkehrslärm ein A-Pegel gewonnen.

Oktave	250 / 4000 Hz	500 / 8000 Hz	1000 / 16000 Hz	2000 / 32000 Hz
Spec	-8.9	-7.3	-4.0	-5.3

Tabelle 1: Angenommenes A-bewertetes Strassenverkehrslärmspektrum [dB] für die Massstabsmodellmessungen.

2.1.7 Unsicherheit der Messergebnisse

Die Unsicherheit der Mess- bzw. Auswertergebnisse wird durch folgende Aspekte bestimmt:

- Stabilität der elektroakustischen Messkette (insbesondere Verstärker, Lautsprecher, Mikrophon)
- Richtcharakteristik des Mikrophons
- Positionierungsgenauigkeit des Lautsprechers und des Mikrophons
- Kompensation der Luftabsorption

Der Einfluss der Stabilität der Messkette und der Kompensation der Luftabsorption wurde minimiert, indem jeweils Referenzmessung und Testmessung kurz nacheinander durchgeführt wurden. Um den Einfluss der der Positionierungsgenauigkeit des Mikrophons bzgl. der Fensteröffnung klein zu halten, wurde die Messsequenz so gewählt, dass das Mikrophon möglichst selten verschoben werden musste. Die Bedeutung der Mikrophonrichtcharakteristik kann als gering eingestuft werden, da das 1/8" Mikrophon bis zu hohen Frequenzen hin eine nahezu runde Charakteristik zeigt und überdies das Mikrophon immer gleich ausgerichtet war. Unsicherheitsreduzierend wirkt sich aus, dass sämtliche Auswertungen Pegeldifferenzaussagen entsprechen. Schliesslich kann die Resultatunsicherheit zu rund 0.4 dB(A) im Sinne einer Standardabweichung abgeschätzt werden.

2.2 Untersuchte Geometrien

Die Wirkung des offenen Fensters wurde für eine inkohärente Linienquelle untersucht. Diese Linienquelle wurde durch Verschieben des anregenden Lautsprechers auf sechs Quellenpositionen (Q00 bis Q25 in Abbildung 2) und anschliessendem Aufsummieren der Ergebnisse nachgebildet. Die Separierung der Quellenpositionen längs der Linienquellenachse betrug einheitlich 5.0 m (0.31 m im Modell). Die Hausfassade wurde durch eine 16 m x 16 m (1.0 m x 1.0 m) grosse Fläche gebildet. Die Plattendicke war 17 mm, entsprechend 27 cm im Originalmassstab.

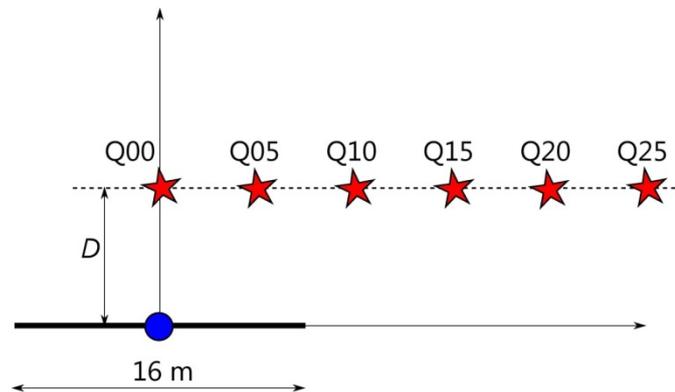


Abbildung 2: Nachbildung einer Linienquelle durch sechs Quellenpositionen Q00 bis Q25.

Die weiteren Grössen zur Beschreibung der Situation sind:

Fenstersituation F:

F0: kein Fenster d.h. keine Fassade vorhanden → Referenz- bzw. Freifeldmessung

F1: Breite = 140 cm, (9 cm) und Höhe = 140 cm, (9 cm)

F2: Breite = 70 cm, (4.5 cm) und Höhe = 140 cm, (9 cm)

Raumsituation R:

R0: kein angehängter Raum

R1: angehängter halliger Raum mit Abmessungen LxBxH: 4 m x 3 m x 2.4 m (25 cm x 19 cm x 15 cm)

R2: ganzer Boden mit Absorber belegt, d.h. Fläche = 4 m x 3 m = 12 m²

R3: ganze Rückwand mit Absorber belegt, d.h. Fläche = 3 m x 2.4 m = 7.2 m²

R4: teilweise Boden mit Absorber belegt (hinterer Bereich) 2.7 m x 1.8 m = 4.9 m²

Zusätzliche Elemente an der Fassade wie Balkone etc.

Z0: keine zusätzlichen Elemente

Z1: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.3 m Tiefe, 2 m über dem Empfänger

Z2: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.5 m Tiefe, 2 m über dem Empfänger

Z3: horizontal verlaufender Vorsprung von 1 m Tiefe, 2 m über dem Empfänger

Z4: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.3 m Tiefe, 4 m über dem Empfänger

Z5: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.5 m Tiefe, 4 m über dem Empfänger

Z6: horizontal verlaufender Vorsprung von 1 m Tiefe, 4 m über dem Empfänger
Z7: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.3 m Tiefe, 8 m über dem Empfänger
Z8: horizontal verlaufender Vorsprung von 0.5 m Tiefe, 8 m über dem Empfänger
Z9: horizontal verlaufender Vorsprung von 1 m Tiefe, 8 m über dem Empfänger

Höhe des Empfängers Hxx:

H07: $z = 7$ m (0.44m)

Horizontale Distanz Quellenlinie zum Empfänger Dxx:

D03: $y = 3$ m

D07: $y = 7$ m (0.44m)

D20: $y = 20$ m (1.25m)

Quellenposition Qxx:

Q00: $x = 0$ m (0.0m)

Q05: $x = 5$ m (0.31m)

Q10: $x = 10$ m (0.63m)

Q15: $x = 15$ m (0.94m)

Q20: $x = 20$ m (1.25m)

Q25: $x = 25$ m (1.56m)

Durch Zusammenfassen obiger Codes wurde jeweils ein Filename $FxRxZxHxxDxxQxx$ erzeugt, der eine Messkonfiguration vollständig beschreibt.

2.3 Numerische, wellentheoretische Simulationen

Zur Untersuchung der Wirkung der horizontal verlaufenden Vorsprünge (Z1..Z9) und des Einflusses der Tiefe der Fensterleibung wurden 2D FDTD Simulationen¹ durchgeführt. Dabei wurde die Geometrie auf einen vertikalen Schnitt abgebildet, d.h. die Quelle erscheint als kohärente Linienquelle und die Fensteröffnung als horizontal unendlich ausgedehntes Band. Aus den Simulationen wurden Terzbandspektren gewonnen und durch Gewichtung mit dem in Tabelle 2 gezeigten Spektrum für Strassenverkehrslärm ein A-Pegel ermittelt.

Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1k25	1k6
Spec	-20.0	-20.0	-18.0	-16.0	-15.0	-14.0	-13.0	-12.0	-11.0	-9.0	-6.6	-7.3	-8.0

Tabelle 2: Angenommenes A-bewertetes Strassenverkehrslärmspektrum[*dB*] für die numerischen Simulationen.

¹ Kurt Heutschi, Schallfeldprognosen bei Lärmschutzbauten, tec21, 46/2006 S. 9-11.

3 Rechenmodell

In der Folge wird ein semi-empirisches Rechenmodell entwickelt, welches mittels eines einfachen Formelwerks die Messungen bzw. numerischen Simulationen reproduziert. In einem ersten Schritt wird von glatten Fassaden ausgegangen, im zweiten Schritt wird die Reflexion/Streuung an Vorsprüngen miteinbezogen.

3.1 Einfluss des Einfallswinkels, der Fenstergrösse und der Raumbedämpfung

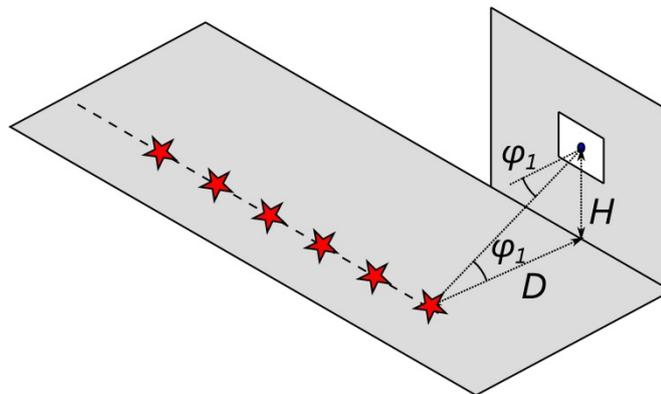


Abbildung 3: Situation zur Untersuchung des Einflusses des Einfallswinkels φ_1 , der Fenstergrösse und der Bedämpfung des Raumes. Die weisse Fläche steht für das Fenster, die Sterne markieren die Quellenpositionen.

In der in Abbildung 3 gezeigten Situation kann davon ausgegangen werden, dass der Schalldruck im offenen Fenster durch drei Komponenten gebildet wird. Der erste Anteil ist der Direktschall (entspricht der Freifeldsituation, wenn allfällige Abschattungseffekte ignoriert werden). Die zweite Komponente entspricht dem an den Kanten der Fensterleibung gebeugten Schall. Die dritte Komponente schliesslich ist der aus dem Raum zurückreflektierte Schall. Es wird angenommen, dass sich alle drei Anteile inkohärent überlagern, d.h. es kann für das Schalldruckquadrat p_F^2 im Fenster geschrieben werden:

$$p_F^2 = p_D^2 + p_B^2 + p_R^2 \quad (2)$$

wobei p_D^2 dem Schalldruckquadrat des Direktschalls, p_B^2 dem Schalldruckquadrat des gebeugten Schalls und p_R^2 dem Schalldruckquadrat des aus dem Raum zurückreflektierten Schalls entspricht. Für die Ableitung einer semi-empirischen Formel zur Berechnung des Fenstereinflusses werden folgende Annahmen getroffen:

Annahme 1:

In den Raum tritt über die Fensterfläche eine Schallleistung W ein, die sich aus dem Produkt der Fensterfläche F und der Normalkomponente der Intensität I ergibt. Vereinfachend wird I angesetzt als

$$I = \frac{P_D^2}{\rho c} \cos(\varphi_1) \cdot 0.8 \quad (3)$$

Der Faktor 0.8 in obiger Beziehung approximiert die Vorbeifahrt, d.h. berücksichtigt den Umstand, dass für eine Quellenposition im nicht kürzesten Abstand die auf das Fenster auftreffende Leistung auf Grund des schrägeren Einfallswinkels etwas kleiner ist. Im Raum wird ein ideales Diffusfeld angenommen mit einem Schalldruckquadrat p_{diffus}^2

$$p_{diffus}^2 = \frac{4W\rho c}{A+F} = \frac{4p_D^2 \cos(\varphi_1)F}{A+F} \cdot 0.8 \quad (4)$$

wobei A der totalen Absorption des Raumes, d.h. der Summe über alle Raumboflächen (ohne Fenster), gewichtet mit ihrem jeweiligen Absorptionskoeffizienten α entspricht mit

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i.$$

Das Fenster selbst bildet ebenfalls eine 100% absorbierende Fläche welche entsprechend zur totalen Absorption dazugerechnet werden muss.

Unmittelbar vor der absorbierenden Fensterfläche ist der Schalldruck kleiner als im Diffusfeld. Hier wird dazu der vorerst nicht bekannte Parameter χ eingeführt:

$$p_R^2 = \chi \cdot p_{diffus}^2 \quad (5)$$

Nach der Zusammenfassung aller konstanter Faktoren in einen Parameter γ wird für p_R^2 angesetzt:

$$p_R^2 = \frac{p_D^2 \cos(\varphi_1)F}{A+F} \cdot \gamma \quad (6)$$

Annahme 2:

Der gebeugte Anteil p_B^2 nimmt mit zunehmender Fensterfläche F ab, da der Abstand des Fensterpunktes zu den Beugungskanten immer grösser wird. Im Grenzfall von $F \rightarrow 0$, d.h. es ist gar kein Fenster vorhanden und die Messung findet auf einer reflektierenden Fläche statt, soll der gebeugte Anteil die sich ergebende Schalldruckverdopplung darstellen. Damit kann mit einer zu skalierenden Konstante β angesetzt werden:

$$\frac{p_B^2}{p_D^2} = \frac{1}{0.33 + \beta \cdot F} \quad (7)$$

Mit obigen Annahmen kann der Pegelzuschlag ΔL im offenen Fenster im Vergleich zu Freifeld geschrieben werden als:

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{P_F^2}{P_D^2} \right) = 10 \log \left(1 + \frac{1}{0.33 + \beta \cdot F} + \gamma \cdot \frac{F \cos(\varphi_1)}{A + F} \right) \quad (8)$$

Die freien Parameter γ und β wurden durch Vergleich der Messung mit der Berechnung für beste Übereinstimmung angepasst und so auf $\gamma = 0.8$ und $\beta = 30 \text{ [1/m}^2\text{]}$ festgelegt. In der Modellmessung wurde für den Raum eine Grundabsorption A_0 angenommen, die im Originalmassstab einer Fläche von 5 m^2 entspricht.

In Tabelle 3 und in Abbildung 4 werden für die im Modell untersuchten Situationen die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen einander gegenübergestellt. Sämtliche Differenzen sind kleiner gleich 0.5 dB(A) und liegen damit in der Grössenordnung der Messunsicherheit. Die zufriedenstellende Übereinstimmung bestätigt die Anwendbarkeit des Rechenmodells.

	φ_1	F	$A_{\text{zusätzlich}}$	$\Delta L_{\text{Messung}}$	$\Delta L_{\text{Rechnung}}$	$\Delta L_{\text{Rechnung}} - \Delta L_{\text{Messung}}$
	[°]	[m ²]	[m ²]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
F1R0Z0H07D07Qxx	45	1.96	∞	-0.1	0.1	0.1
F1R1Z0H07D07Qxx	45	1.96	0.0	0.8	0.7	-0.1
F1R2Z0H07D07Qxx	45	1.96	12.0	0.0	0.3	0.3
F1R3Z0H07D07Qxx	45	1.96	7.2	0.0	0.4	0.3
F1R0Z0H07D20Qxx	19	1.96	∞	0.1	0.1	0.0
F1R1Z0H07D20Qxx	19	1.96	0.0	0.7	0.9	0.2
F1R2Z0H07D20Qxx	19	1.96	12.0	0.4	0.4	0.0
F1R3Z0H07D20Qxx	19	1.96	7.2	0.2	0.5	0.3
F2R4Z0H07D07Qxx	45	0.98	4.9	-0.1	0.4	0.5
F2R3Z0H07D07Qxx	45	0.98	7.2	-0.2	0.3	0.5
F2R1Z0H07D20Qxx	19	0.98	0.0	1.0	0.6	-0.4
F2R2Z0H07D20Qxx	19	0.98	12.0	0.7	0.3	-0.4
F2R4Z0H07D20Qxx	19	0.98	4.9	0.8	0.4	-0.4
F2R3Z0H07D20Qxx	19	0.98	7.2	0.7	0.4	-0.3
F2R1Z0H07D07Qxx	45	0.98	0.0	0.4	0.5	0.1
F2R0Z0H07D07Qxx	45	0.98	∞	0.0	0.1	0.1
F2R1Z0H07D20Qxx	19	0.98	0.0	0.6	0.6	0.0
F2R0Z0H07D20Qxx	19	0.98	∞	0.3	0.1	-0.2

Tabelle 3: In den Massstabsmodelluntersuchungen messtechnisch gefundene Pegeldifferenzen $\Delta L_{\text{Messung}}$ und im Vergleich dazu die mit obiger Formel berechneten Fenstereinflüsse $\Delta L_{\text{Rechnung}}$. Die Grössen F (Fensterfläche) und $A_{\text{zusätzlich}}$ (zusätzliche totale Absorption) sind im Originalmassstab ausgedrückt. Die negativen Messwerte ($\Delta L_{\text{Messung}}$) sind physikalisch nicht sinnvoll und sind das Ergebnis der Messunsicherheit.

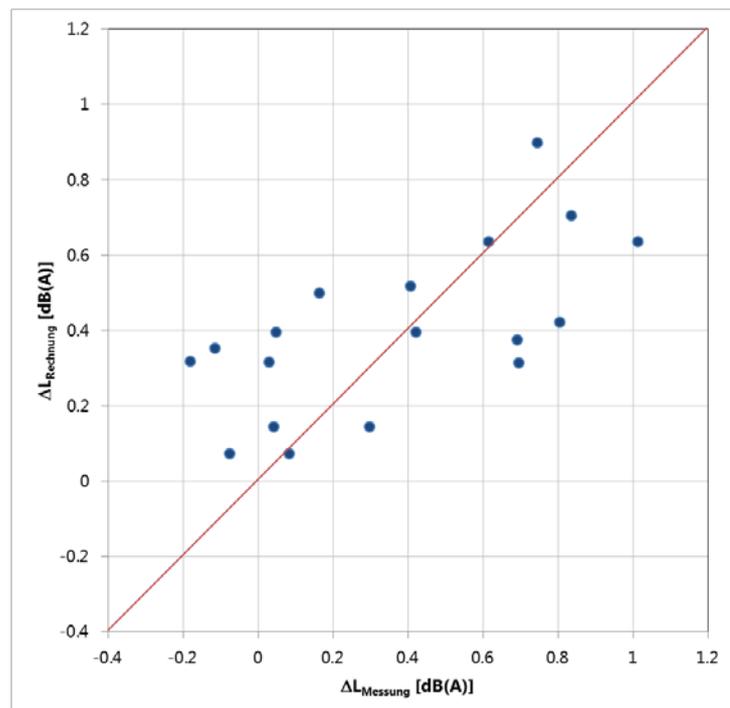


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Pegeldifferenzen „offenes Fenster“ zu „Freifeld“.

3.2 Bedeutung von Vorsprüngen

Vorsprünge, die zusätzlich Schallenergie auf den Fensterpunkt rückstreuen können, werden mit den in Abbildung 5 gezeigten Parametern beschrieben.

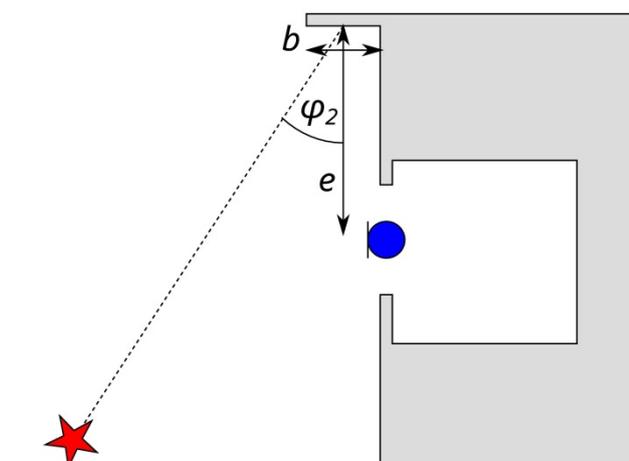


Abbildung 5: Breite b , Höhe e und Einfallswinkel φ_2 zur Charakterisierung von Vorsprüngen.

Die pegelerhöhende Wirkung wird durch einen zusätzlichen additiven Term p_s^2 in Gl. 2 berücksichtigt mit dem folgenden, semi-empirischen Ansatz:

$$\frac{p_s^2}{p_D^2} = \delta \cdot \frac{b \cdot \cos(\varphi_2)}{e} \quad (9)$$

wobei δ eine zu skalierende Konstante darstellt, b der Tiefe (Breite) und e der Höhe des Vorsprungs über dem Empfangspunkt entspricht. φ_2 bezeichnet den Einfallswinkel bzgl. der Vorsprungsflächennormalen. Die Pegelerhöhung insgesamt gegenüber Freifeld wird damit:

$$\Delta L = 10 \log \left(1 + \frac{1}{0.33 + 30 \cdot F} + 0.8 \cdot \frac{F \cos(\varphi_1)}{A + F} + \delta \cdot \frac{b \cdot \cos(\varphi_2)}{e} \right) \quad (10)$$

Durch Anpassung an die numerischen Simulationsergebnisse lässt sich der Faktor δ zu 0.35 bestimmen. Die Tabelle 5 zeigt die Simulationsergebnisse und die entsprechende Berechnung mit obigem Ansatz. Für die in einem Abstand von 3 m zur Fassade liegende Linienquelle (D03) wird im Fall des 1 m breiten Vorsprungs die Pegelerhöhung durch die Formel 10 allerdings unterschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier eine nahezu echte Reflexion stattfindet, deren Stärke mit dem Streuansatz in Gl. (9) nicht adäquat abgebildet wird.

3.3 Einfluss der Tiefe der Fensterleibung

Zur Untersuchung der Bedeutung der Tiefe der Fensterleibung wurden zweidimensionale numerische Simulationen durchgeführt. Für die vier Distanzen $D = 3$ m, 5 m, 7 m, und 20 m der Fahrspur zur Fassade wurden je die Fassadendicken $B = 10$ cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm und 50 cm modelliert. Die Dicke 30 cm wurde als Referenz verwendet. Wie die Tabelle 4 zeigt, ist der Einfluss der Tiefe der Fensterleibung für nicht zu nahe Fahrspuren ($D \geq 7$ m) vernachlässigbar. Für ganz nahe liegende Spuren kann der Einfluss grösser werden, wobei keine monotone Abhängigkeit mit der Dicke resultiert. Hier wirken mit der Abschirmung durch die untere Leibungskante und Streuung/Reflexion an der oberen Leibungsfläche zwei gegenläufige Effekte.

	Dicke 10cm	Dicke 20 cm	Dicke 40 cm	Dicke 50 cm
D = 3m	-0.2	0.0	-0.2	-0.6
D = 5m	-0.3	-0.1	-0.2	-0.4
D = 7m	-0.1	0.0	0.1	0.0
D = 20m	-0.1	0.0	0.0	0.0

Tabelle 4: Mit FDTD Simulationen gefundene Pegeldifferenzen für unterschiedliche Tiefen der Fensterleibung bezogen auf eine Dicke von 30 cm.

	φ_2	F	b	E	ΔL_{Sim}	$\Delta L_{Rechnung}$	$\Delta L_{Sim} - \Delta L_{Messung}$
	[°]	[m ²]	[m]	[m]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
F1R0Z1H07D03	18	1.96	0.25	2	0.5	0.2	-0.3
F1R0Z2H07D03	18	1.96	0.5	2	0.5	0.3	-0.1
F1R0Z3H07D03	18	1.96	1	2	2.5	0.7	-1.8
F1R0Z4H07D03	15	1.96	0.25	4	0.2	0.1	-0.1
F1R0Z5H07D03	15	1.96	0.5	4	0.3	0.2	-0.2
F1R0Z6H07D03	15	1.96	1	4	0.8	0.3	-0.4
F1R0Z7H07D03	11	1.96	0.25	8	0.1	0.0	-0.1
F1R0Z8H07D03	11	1.96	0.5	8	0.2	0.1	-0.1
F1R0Z9H07D03	11	1.96	1	8	0.4	0.2	-0.2
F1R0Z1H07D07	38	1.96	0.25	2	0.2	0.1	0.0
F1R0Z2H07D07	38	1.96	0.5	2	0.3	0.3	-0.1
F1R0Z3H07D07	38	1.96	1	2	0.3	0.6	0.3
F1R0Z4H07D07	32	1.96	0.25	4	0.1	0.1	0.0
F1R0Z5H07D07	32	1.96	0.5	4	0.1	0.2	0.0
F1R0Z6H07D07	32	1.96	1	4	0.2	0.3	0.1
F1R0Z7H07D07	25	1.96	0.25	8	0.1	0.0	0.0
F1R0Z8H07D07	25	1.96	0.5	8	0.1	0.1	0.0
F1R0Z9H07D07	25	1.96	1	8	0.1	0.2	0.1
F1R0Z1H07D20	66	1.96	0.25	2	0.1	0.1	0.0
F1R0Z2H07D20	66	1.96	0.5	2	0.1	0.2	0.0
F1R0Z3H07D20	66	1.96	1	2	0.2	0.3	0.1
F1R0Z4H07D20	61	1.96	0.25	4	0.1	0.0	0.0
F1R0Z5H07D20	61	1.96	0.5	4	0.1	0.1	0.0
F1R0Z6H07D20	61	1.96	1	4	0.1	0.2	0.1
F1R0Z7H07D20	53	1.96	0.25	8	0.0	0.0	0.0
F1R0Z8H07D20	53	1.96	0.5	8	0.1	0.1	0.0
F1R0Z9H07D20	53	1.96	1	8	0.0	0.1	0.1

Tabelle 5: Mit FDTD Simulationen (ΔL_{Sim}) gefundene Effekte von Vorsprüngen und im Vergleich dazu die mit obiger Formel berechneten Pegelerhöhungen ($\Delta L_{Rechnung}$).

3.4 Gesamtmodell

Mit den optimal angepassten Konstanten ergibt sich schliesslich der Rechenformalismus zur Schätzung der Pegeldifferenz offenes Fenster zu Freifeld in Abhängigkeit der Parameter:

- F Fensterfläche [m²]
 A totale Absorption des hinter dem Fenster liegenden Raumes (ohne Fensterfläche) [m²]
 φ_1 Einfallswinkel einer Quelle im kürzesten Abstand bzgl. der Fensterflächennormalen
 b Breite des Vorsprunges [m]
 e Höhe des Vorsprunges über dem Fensterpunkt [m]
 φ_2 Einfallswinkel einer Quelle im kürzesten Abstand bzgl. der Flächennormalen eines Vorsprunges

zu:

$$\Delta L = 10 \log \left(1 + \frac{1}{0.33 + 30 \cdot F} + 0.8 \cdot \frac{F \cos(\varphi_1)}{A + F} + 0.35 \cdot \frac{b \cdot \cos(\varphi_2)}{e} \right) \quad (11)$$

4 Diskussion und Folgerungen aus den Messergebnissen

Anhand von Massstabsmodelluntersuchungen sowie numerischen Simulationen wurden für typische Strassenlärmsituationen Pegeldifferenzen „offenes Fenster“ zu „Freifeld“ untersucht. Mittels Parameterstudien wurde ein semi-empirisches Rechenmodell abgeleitet, welches die Mess- und Simulationsergebnisse befriedigend reproduziert.

Im offenen Fenster sind die beiden Anteile *Beugung an der Fensterleibung* und *Raumrückreflexionen* je in umgekehrtem Sinn von der Fenstergrösse abhängig. Durch Vergrösserung bzw. Verkleinerung der Fensteröffnung nimmt der eine Beitrag zu, der andere ab, sodass der Pegel insgesamt nur relativ schwach von der Fenstergrösse abhängig ist. Wenn für Wohnräume mit lärmempfindlicher Nutzung typisch von rund 12 m² totaler Absorption ausgegangen wird (Nachhallzeit 0.5 s, Raumvolumen 38 m³) und keine Vorsprünge vorhanden sind, liefert das Rechenmodell im Winkelbereich $15^\circ < \varphi_1 < 45^\circ$ und für Fensterflächen $0.5 \text{ m}^2 < F < 2.0 \text{ m}^2$ Pegelerhöhungen gegenüber Freifeld zwischen 0.4 und 0.5 dB(A).

Die an oberhalb des Fensters liegenden Vorsprüngen entstehende Rückstreuung erwies sich in den untersuchten Geometrien als eher gering und beginnt erst bei $b/e > 0.5$, d.h. die Breite des Vorsprungs ist grösser als die halbe Höhe über der Fenstermitte, oder bei sehr nahe an der Fassade verlaufenden Linienquellen eine wesentliche Rolle zu spielen.

Der Einfluss der Tiefe der Fensterleibung hat sich für Fahrspuren, die 7 m und weiter weg von der Fassade verlaufen, als vernachlässigbar herausgestellt. Für sehr nahe Fahrspuren und grosse Tiefen kann der Effekt bis rund ein halbes dB im Sinne einer Abschwächung ausmachen.

Mit diesem Kenntnisstand erscheint die im Raum stehende pauschale Erhöhung von berechneten Freifeld-Immisionen um 1 dB(A) als etwas zu hoch, die Ergebnisse motivieren einen Zuschlag von 0.5 dB(A).

Nicht in die Untersuchungen einbezogen wurden abschirmende Elemente wie Balkonbrüstungen oder besonders ausladende Simse. Hierzu kann die SN EN 12354-3² herangezogen werden.

² SN EN 12354-3 : Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 3: Luftschalldämmung von Aussenbauteilen gegen Aussenlärm.