

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



Materials Science & Technology

Andreas von Rohr
Dietrich Schwarz Architekten AG
Seefeldstrasse 224
CH-8008 Zürich

Massstabsmodellmessungen an Schalldämmerker, Hohlstrasse 100

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 5214.008719
Ihr Auftrag vom:	26.2.2015
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	12

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

- 1 Ausgangslage und Auftrag
- 2 Messungen
- 3 Ergebnisse

Dübendorf, 26.3.2015

Der Projektleiter:

K. Heutschi

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:

K. Eggenschwiler

Zusammenfassung

Im Auftrag der Dietrich Schwarz Architekten AG wurde mit 1:16 Massstabsmodelluntersuchungen die pegelreduzierende Wirkung von drei verschiedenen Varianten von Schalldämmkern in der Geometrie an der Hohlstrasse 100 in Zürich bestimmt. Die Messungen zeigen erwartungsgemäss eine Zunahme der Wirkung mit aufsteigendem Stockwerk. Die 3-Loch Variante sowie die Variante mit einseitiger Öffnung rechts und Fensteröffnung links ergaben Wirkungen von rund 10 dB(A). Die Variante mit einseitiger Öffnung rechts und Fensteröffnung rechts blieb im untersten Geschoss mit beiden untersuchten Brüstungshöhen unter 6 dB(A). Anhand einer Extrapolation der Ergebnisse kann gefolgert werden, dass in dieser Variante eine Brüstungshöhe von 110 cm auf etwa 6.5 dB(A) und eine Brüstungshöhe von 120 cm auf etwa 7.0 dB(A) führen dürfte.

1 Ausgangslage und Auftrag

Aus Schallschutzgründen gegenüber Strassenlärm sind am Neubauprojekt an der Hohlstrasse 100 Schalldämmerker vorgesehen. Da die zu erwartende Pegelminderung mit üblichen Engineering-Rechenverfahren nicht zuverlässig vorausgesagt werden kann, wurde die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung mit e-mail vom 16.2.2015 durch die Dietrich Schwarz Architekten AG beauftragt, entsprechende messtechnische Untersuchungen an einem 1:16 Massstabsmodell durchzuführen. Eine Montagevorrichtung sowie die drei zu untersuchenden Erker wurden durch den Auftraggeber bereitgestellt.

2 Messungen

2.1 *Massstabsmodellmesstechnik*

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 Massstabsmodell 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 *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.

2.1.3 *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.

2.1.4 *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 Impulsantworten 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. Auswerteergebnisse 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 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 0.5 dB(A) im Sinne einer Standardabweichung abgeschätzt werden.

2.2.2 Erkertyp 2/3

Der Erkertyp 2 bzw. 3 weist auf der rechten Seite eine Öffnung auf, die sich ab einer Brüstung bis nach ganz oben erstreckt. Beim Typ 2 beträgt die akustisch wirksame Brüstungshöhe 70 cm, beim Typ 3 sind es 100 cm. Abbildung 3 zeigt den Grundriss.

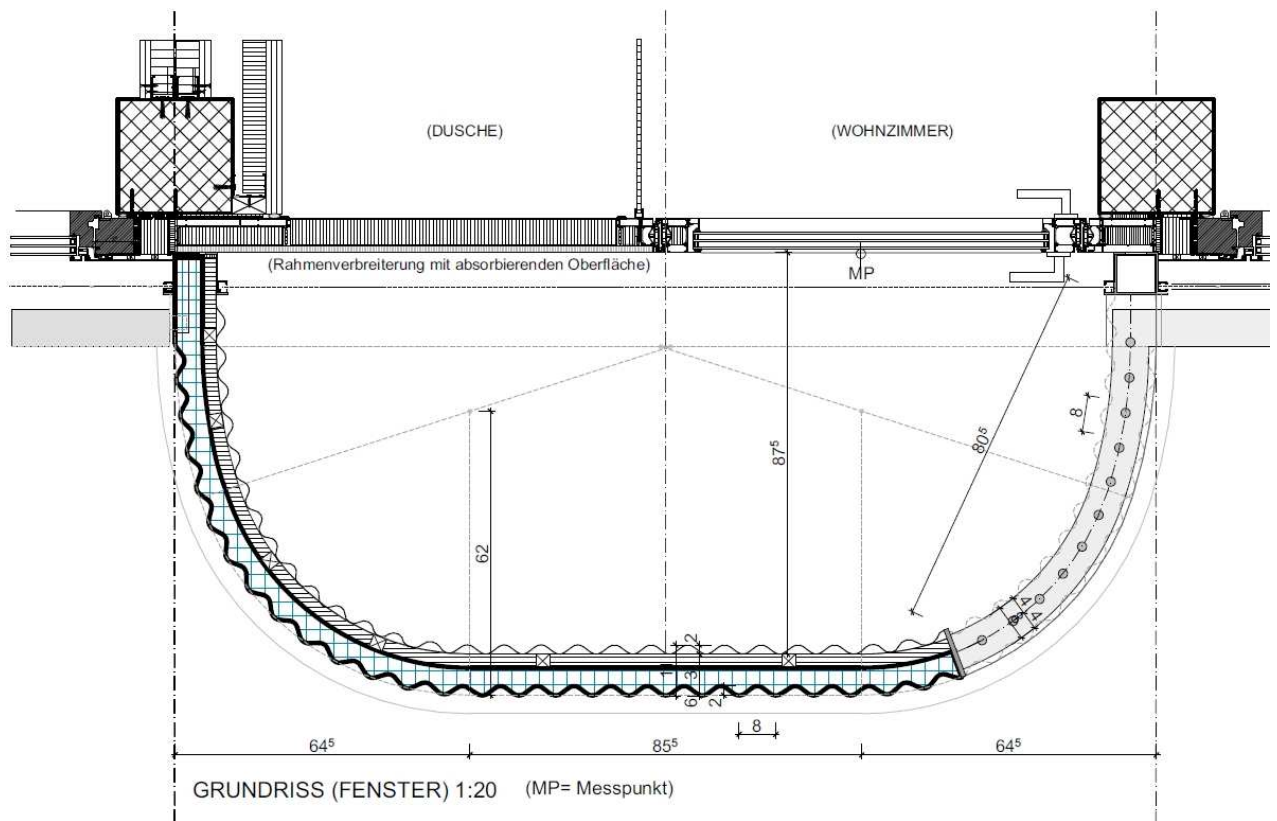


Abbildung 3: Grundriss Erkertyp 2 bzw. 3.

2.3 Untersuchte Geometrien

Die Abbildung 4 zeigt die Situation mit den Distanzen der beiden Fahrspuren zur interessierenden Fassade, die die Erker aufnehmen soll. Da das Gebäude viergeschossig geplant ist und aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel unterschiedliche Abschirmwirkungen zu erwarten sind, wurde jede Erkeranordnung auf vier Höhen untersucht.

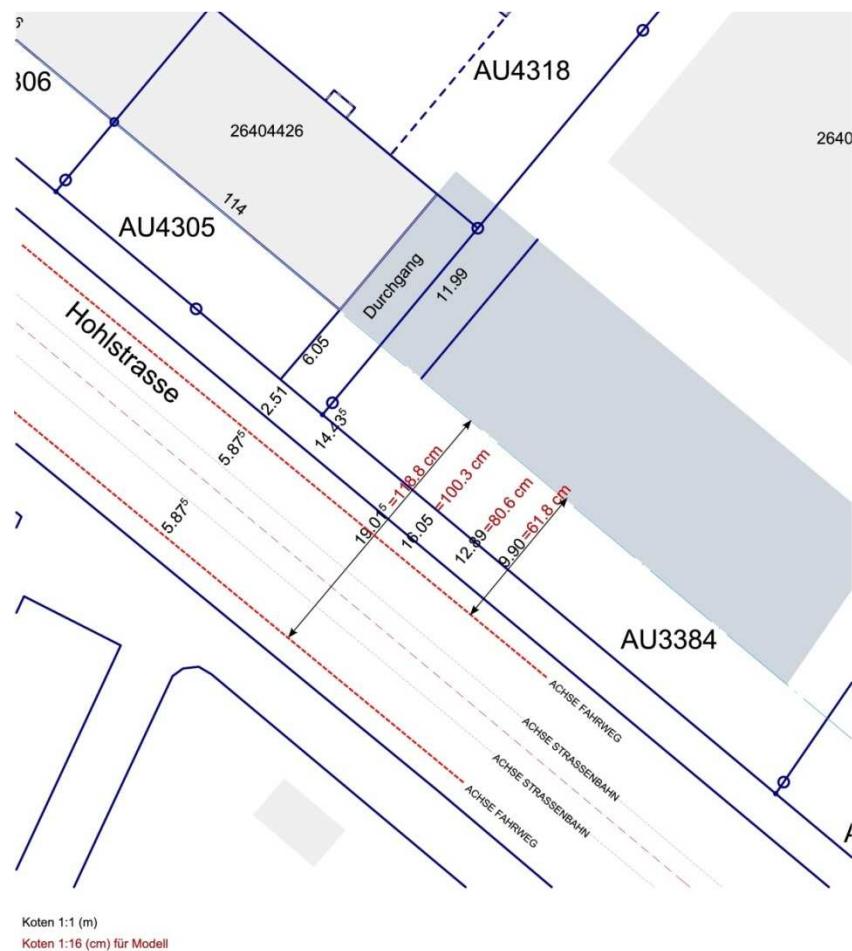


Abbildung 4: Situation Hohlstrasse 100 mit den Abständen der beiden Fahrspuren zur Fassade.

Auf Grund der Nähe zur Quelle wird der Verkehr auf der Hohlstrasse durch zwei Punktquellenreihen nachgebildet, die die Fahrbahnachsen der beiden Fahrwege repräsentieren. Am Gebäude wird die Wirkung des Schalldämmmerkers auf vier Geschossen untersucht. Die Abbildung 5 und die Tabelle 2 spezifizieren die untersuchte Geometrie mit den Quellen- und Empfängerpositionen, Abbildung 6 zeigt den Laboraufbau.

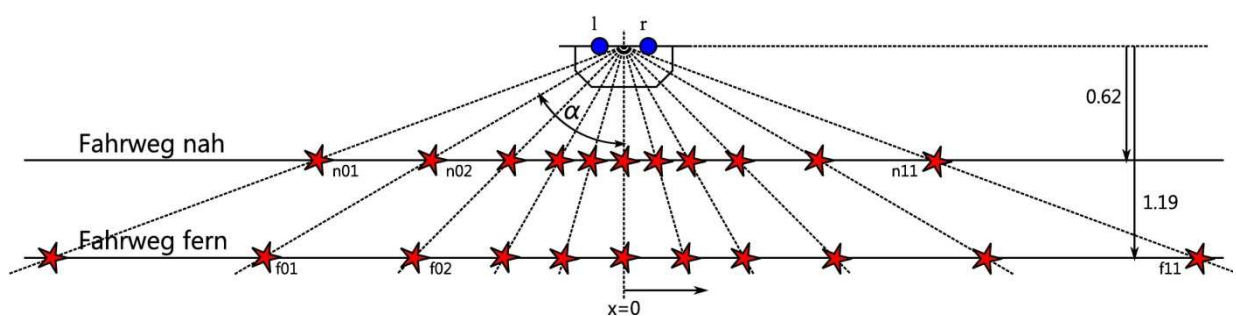


Abbildung 5: Modellgeometrie (Masse im Modell in m) mit den Quellenpunkten n01..n11 und f01..f11 in Rot und den beiden Fenster/Empfängerpunkten l (links) bzw. r (rechts) in Blau.

	n01	n02	n03	n04	n05	n06	n07	n08	n09	n10	n11
α [°]	70	60	45	30	15	0	15	30	45	60	70
x [m]	-1.70	-1.07	-0.62	-0.36	-0.17	0.00	0.17	0.36	0.62	1.07	1.70
Δx [m]	0.98	0.52	0.33	0.22	0.18	0.16	0.18	0.22	0.33	0.52	0.98

	f01	f02	f03	f04	f05	f06	f07	f08	f09	f10	f11
α [°]	70	60	45	30	15	0	15	30	45	60	70
x [m]	-3.27	-2.06	-1.19	-0.69	-0.32	0.00	0.32	0.69	1.19	2.06	3.27
Δx [m]	1.89	1.00	0.64	0.42	0.34	0.31	0.34	0.42	0.64	1.00	1.89

Tabelle 2: Quellenpunkte n01..n11 (nahe Spur) und f01..f11 (ferne Spur) mit dem Winkel α (Abbildung 5), der x-Koordinaten und der Länge Δx des repräsentierten Linienquellenabschnitts (Masse im Modell).

Jede Einzelmessung wurde wie folgt codiert:

E.R.M.G.Q...

mit:

E: Erkertyp wobei 1 = 3 Loch, 2 = asymmetrisch mit niedriger Brüstung rechts und 3 = asymmetrisch mit hoher Brüstung rechts

R: Fenster-/Empfängerposition l oder r

M: Materialart der Rückwand wobei 0 = reflektierend und 1 = absorbierend

G: Geschossnummer 1..4

Q: Quelle: n01..n11 bzw. f01..f11

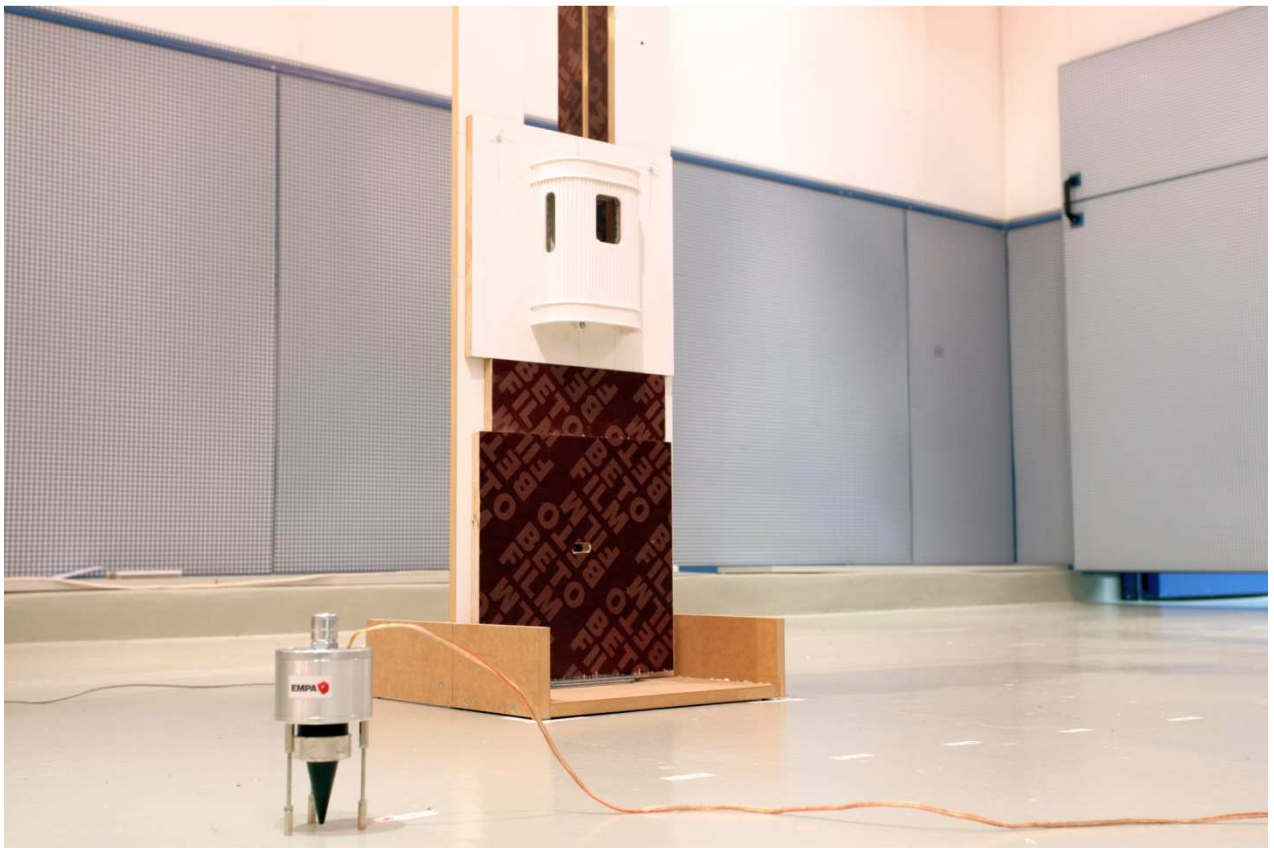


Abbildung 6: Laboraufbau mit der 3-Loch Erkervariante und dem Lautsprecher (akustische Quelle) im Vordergrund.

2.4 Auswertungen

Jede Messung lieferte nach Aufintegration der Impulsantwort, Normalisierung mit dem Lautsprecherfrequenzgang und Gewichtung mit dem Strassenverkehrslärmspektrum einen A-bewerteten Immissionspegel für den jeweiligen Quellenpunkt. Zur Nachbildung der Strasse als Linienquelle wurden die Beiträge aller Quellpunkte mit der Länge Δx des jeweils repräsentierten Strassenabschnitts gewichtet (Tabelle 2) und zu einen totalen Immissionspegel aufsummiert. Dieser totale Immissionspegel wurde in Bezug gesetzt zum totalen Immissionspegel unter Freifeldbedingungen, d.h. für eine identische Mikrofonposition aber ohne Erkermassnahme und Fassade.

3 Ergebnisse

Folgende vier Erkersituationen wurden untersucht:

1. **E1RIM0**: 3 Loch Erkertyp, Fenster-/Empfängerposition links (bzw. rechts¹), Rückwand reflektierend
2. **E2RrM0**: asymmetrischer Erker mit niedriger Brüstung rechts, Fenster-/Empfängerposition rechts, Rückwand reflektierend
3. **E3RIM1**: asymmetrischer Erker mit hoher Brüstung rechts, Fenster-/Empfängerposition links, Rückwand absorbierend
4. **E3RrM1**: asymmetrischer Erker mit hoher Brüstung rechts, Fenster-/Empfängerposition rechts, Rückwand absorbierend

Die Tabelle 3 zeigt die Auswertungen der Erkerwirkungen in der Summe über beide Fahrspuren, wobei gleicher Verkehr in beide Richtungen angenommen wurde.

	<i>E1RIM0</i>	<i>E2RrM0</i>	<i>E3RIM1</i>	<i>E3RrM1</i>
Geschoss 1	-9.5	-4.2	-11.2	-5.9
Geschoss 2	-10.8	-4.3	-12.3	-6.2
Geschoss 3	-10.9	-5.1	-12.6	-7.5
Geschoss 4	-12.3	-5.5	-13.0	-7.8

Tabelle 3: Pegelveränderungen in dB(A) für die vier Erkervarianten im Vergleich zu Freifeldausbreitung.

In einem punktuellen Vergleich wurde festgestellt, dass beim Erkertyp 3 mit der Fenster-/Empfängerposition rechts die Bedeutung der Absorption der Rückwand relativ gering ist. Unter der vereinfachenden Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Brüstungshöhe und der Wirkung lässt sich mit den Ergebnissen für E2RrM0 extrapolieren, dass im Geschoss 1 mit einer Brüstungshöhe von 110 cm eine Wirkung von 6.5 dB(A) zu erwarten ist, bei 120 cm lässt sich die Wirkung auf 7.0 dB(A) abschätzen.

¹ Da der 3-Loch Erker symmetrisch ist, spielt es keine Rolle, ob die Fensteröffnung links oder rechts ist.