

In-situ Messmethode zur Beurteilung von absorbierenden Lärmschutzbauten

**Etude sur le mesurage in situ du coefficient
d'absorption acoustique des ouvrages antibruit**

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
Abteilung Lärmbekämpfung und Akustik**

K. Eggenschwiler

R. Hofmann

A. Rosenheck

Forschungsarbeit 39/80

Oktober 1993



EMPA

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA, Überlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf Telefon 01/ 823 55 11 Telex 825 345 Telefax 01/ 823 47 93 Telegramme: Empaprfung

In-situ Messmethode zur Beurteilung von absorbierenden Lärmschutzbauten

Etude sur le mesurage in situ
du coefficient d'absorption acoustique
des ouvrages antibruit

Eidgenössisches Departement des Innern
Forschungsauftrag 39/80

Oktober 1993

Zusammenfassung

In-situ Messmethode zur Beurteilung von absorbierenden Lärmschutzbauten

Der Schallabsorptionsgrad von Lärmschutzwänden und anderen Abschirmungen beeinflusst deren Kosten sehr wesentlich. Trotzdem fehlt ein Verfahren zur verlässlichen Bestimmung des Absorptionsgrades am fertigen Bauwerk. Es wurde eine Impulsecho-Methode entwickelt, welche in günstigen Fällen mit ebenem Vorfeld erfolgreich angewendet werden kann. Das Verfahren ist jedoch sehr empfindlich auf Fremdeinflüsse und muss daher vorläufig dem Spezialisten vorbehalten bleiben.

Résumé

Etude sur le mesurage in situ du coefficient d'absorption acoustique des ouvrages antibruit

L'importance du coefficient d'absorption acoustique des parois et autres ouvrages antibruit influence très fortement leurs coûts. Malgré tout, un procédé de détermination sur place du coefficient d'absorption pour des constructions terminées fait défaut. On a développé avec succès un procédé basé sur les échos de bruit impulsif permettant une utilisation, dans les cas favorables d'un terrain plat devant l'obstacle. Le procédé est cependant très sensible aux influence secondaires. L'utilisation dans la pratique exige beaucoup d'expérience et de temps, c'est la raison pour laquelle la réalisation doit être provisoirement réservée aux spécialistes

Summary

On-site measurement method for the evaluation of sound-absorbing barriers

The sound absorption coefficient of walls and other acoustic barriers greatly influences their cost. However, a procedure for reliably predicting the absorption coefficient on-site is lacking. An impulse-echo method was developed which may be employed successfully if the region in front of the wall is sufficiently flat. However, this procedure is very sensitive to outside influences and therefore must be reserved, for now, to the specialist.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung - Resumé - Summery	1
Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung	3
1.1 Auftrag	
1.2 Problemumschreibung und Ziele der Untersuchung	
2. Methoden zur Beurteilung der Reflexionseigenschaften von absorbierenden Lärmschutzwänden	4
3. Das Messverfahren	5
3.1 Allgemeines zur Messung des Absorptionsgrades	
3.2 Die Echomethode	
3.3 Messtechnische Realisierung	
3.4 Messanordnung, Messbedingungen	
3.5 Der bewertete Reflexionsgrad	
4. Klassierung von Lärmschutzbauten für Strassenlärm	11
5. Erste Resultate	12
5.1 Vergleich der Messungen im Hallraum und im Kundt'schen Rohr	
5.2 Messungen an bepflanzten Lärmschutzwänden	
5.3 Erste Erfahrungen mit der neuen Messmethode, Messgenauigkeit	
6. Ausblick	16
6.1 Bisher erfolgte Prüfungen von Lärmschutzwänden	
6.2 Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Mess-Methode	
6.3 Neuere Literatur zur Messung des Reflexionsgrades	
7. Literaturverzeichnis	18
Anhang: Klassifizierung und akustische Prüfung von absorbierenden Schallschutzbauten gegen Strassenlärm. EMPA-Beilageblätter	20

1. Einleitung

1.1 Auftrag

Im Jahr 1980 wurden seitens der EMPA ein Forschungsvorhaben zur Messung der Absorption von Schallschutzwänden in-situ formuliert, ausgehend von der Erkenntnis, dass eine Garantieüberprüfung solcher Wände mit den bisherigen Methoden undurchführbar ist. Dazu kommt, dass heute viele Schallschutzbauten nach Prinzipien gebaut werden, welche die übliche Prüfung im Hallraum a priori nicht zulassen. Dazu gehören beispielsweise die begrünten und bepflanzten Konstruktionen. Ein neues Messverfahren sollte diese Lücke füllen.

1.2 Problemumschreibung und Ziele der Untersuchung

Lärmschutzwände bewirken nicht nur die gewünschte Abschirmung einer Wohnlage, sie führen oft auch zu unerwünschten Reflexionen des Schalles in die entgegengesetzte Richtung. In dicht besiedelten Gebieten ist es von grosser Wichtigkeit, diese Reflexionen so gering wie möglich zu halten. Besonders zu beachten sind dabei Situationen, in denen Empfangspunkte vom Direktschall abgeschirmt sind. In diesen Fällen kann reflektierter Schall zu erheblichen Pegelerhöhungen führen. Je nach Situation müssen deshalb die betreffenden Flächen mehr oder weniger stark absorbierend gestaltet werden.

Die Prüfung der Materialeigenschaften absorbierender Verkleidungen (Schallabsorptionsgrad) erfolgt in der Regel im sogenannten Hallraum. Für eine in-situ Überprüfung, besonders auch bei stark strukturierten Einrichtungen (z.B. Konstruktionen mit bepflanzbaren Stufen) fehlen aber bisher Messmethoden. Ziel der Untersuchung war die Entwicklung einer solchen In-situ-Messmethode, welche einfach und preisgünstig eingesetzt werden könnte.

2. Methoden zur Beurteilung der Reflexionseigenschaften von absorbierenden Lärmschutzwänden

Die Beurteilung der Absorptionsfähigkeit von Lärmschutzwänden erfolgt üblicherweise aufgrund des im Hallraum ermittelten statistischen Absorptionsgrades α_s . In der Schweiz werden oft die folgenden Richtwerte für absorbierende Lärmschutzwände gegen Strassenlärm vorgeschlagen (Mittelwerte):

$$\alpha_s \geq 0.9 \quad \text{für } 500 - 2'000 \text{ Hz}$$

$$\alpha_s \geq 0.7 \quad \text{für } 125 - 4'000 \text{ Hz}$$

Für die Bundesrepublik Deutschland gelten die Anforderungen der Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen RLS-81 [1]. Die Messmethode ist in den Zusätzlichen Technischen Vorschriften ZTV-Lsw 81 definiert [2]: Die Ergebnisse der Hallraummessungen werden in Bezug auf das Spektrum des Strassenverkehrsgeräusches gewichtet und in eine Pegelreduktion bei Reflexion umgerechnet. Es erfolgt eine Einteilung in eine der drei Klassen: reflektierend, absorbierend und hochabsorbierend, wobei in der RLS-81 die zugehörigen Einsatzbedingungen für jede Klasse beschrieben sind.

Die Resultate der Hallraummethode sind zwar von grosser Bedeutung für den Einsatz von Schallabsorbern in der Raumakustik. Um die Wirksamkeit von absorbierenden Lärmschutzwänden im Freifeld beurteilen zu können, ist der statistische Absorptionsgrad α_s nach unserer Erfahrung aber unzureichend. Die Einschätzung der eingangs erwähnten Pegelerhöhungen erforderte eigentlich die Kenntnis der Richtcharakteristik der Schallreflexion für verschiedene Schalleinfallswinkel. Besonders bei stark strukturierten Konstruktionen ist aber nicht nur die geometrische Reflexion, sondern auch die Streuung des Schalles von Bedeutung. Zweifellos ist eine exakte messtechnische Erfassung dieser Eigenschaften sehr aufwendig. Die Entwicklung eines entsprechenden, für die Praxis tauglichen Verfahrens ist recht anspruchsvoll. Andererseits besteht das dringende Bedürfnis nach einer relativ einfachen und raschen Messmethode, zum Beispiel zur Beurteilung von grossen Konstruktionen und bepflanzbaren Bauten, die im Hallraum nicht mehr aufgebaut werden können.

Im folgenden wird eine solche Methode zur In-situ Messung der Reflexionseigenschaften geschildert, welche als erster Schritt in Richtung einer verfeinerten Methode gewertet werden kann. Sie wurde an der Abteilung Akustik der Eidgenössischen Materialprüfungs und Forschungsanstalt (EMPA) entwickelt, und in einem ersten Vorstadium bereits in [3] vorgestellt. Ein ähnlicher Vorschlag für eine einfache Messung gleicher Art findet sich in einer französischen Norm [4]. Bei dem von uns entwickelten Verfahren wird für verschiedene Schalleinfallsrichtungen der geometrisch und diffus reflektierte Schall erfasst. Aus praktischen Gründen beschränken sich die Messungen auf kleine Winkel. Obwohl die Reflexionseigenschaften auf diese Weise nur begrenzt genau ermittelt werden können, eignet sich die Methode nach unserer Meinung zur Beurteilung schallabsorbierender Lärmschutzwände.

3. Das Messverfahren

3.1 Allgemeines zur Messung des Reflexionsgrades

Ziel der Messung ist es, das Verhältnis der von der Lärmschutzwand reflektierten zu der auf die Wand ein gestrahlten Energie zu bestimmen. Für ebene, homogene Flächen entspricht das Verhältnis dem Reflexionsgrad, der wie folgt definiert ist:

$$r^2 = \frac{I_e}{I_r}$$

I_e = einfallende Schallintensität

I_r = reflektierte Schallintensität

Es gilt dabei für den Absorptionsgrad α :

$$\alpha = 1 - r^2$$

Ist die Fläche nicht eben, enthält I_r auch die gestreute Schallenergie, und r^2 entspricht nicht mehr der üblichen Definition des Reflexionsgrades. Man müsste das Verhältnis von reflektierter und einfallender Intensität darum anders benennen, was im folgenden einfachheitshalber aber unterbleibt.

In der zu Beginn der Untersuchung zur Verfügung stehenden Literatur [5 - 9] werden verschiedene Verfahren zur In-Situ-Messung des Reflexionsgrades beschrieben. Die von uns verwendete klassische Echo-Methode ist dabei vermutlich das älteste: Von einem ausgesendeten Schallimpuls wird die Energie des Direktschalles mit jener der Reflexion verglichen. Die Methode war auch mit den zu Beginn der Untersuchung zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Signalverarbeitung relativ einfach durchzuführen. Trotzdem ist sie mit einigen prinzipiellen Schwierigkeiten verbunden. So muss z.B. der Impuls genügend kurz sein, um die zeitliche Trennung von Direktschall und Reflexion noch zu gewährleisten. Gleichzeitig muss er eine hohe Intensität aufweisen, damit ein vernünftiges Verhältnis von Nutz und Störsignal erreicht werden kann. Im weiteren muss das Zeitfenster für die Analyse genügend lang sein, um bei stark strukturierten Wänden noch alle reflektierte und gestreute Energie zu sammeln.

Andere Methoden, wie z.B. solche mit klassischer Korrelationsmesstechnik [7,8], die Cepstrumanalyse [6] und die Time Delay Spectrometry TDS [5], weisen diese Nachteile weniger auf, weil sie mit kontinuierlichen Signalen arbeiten. Sie sind jedoch mit praktischen Schwierigkeiten verbunden und erfordern meist auch einen grösseren apparativen Aufwand und eine kompliziertere Handhabung als die klassische Impulsmethode. Ohne den Blick von den anderen Methoden ganz abzuwenden, wurde aus diesen Gründen als erster Schritt die Entwicklung eines Messverfahrens mit der Echo-Methode vorgezogen.

Seit Abschluss der Untersuchung (1988) wurden weitere Fortschritte in der Sinalanalyse gemacht, vor allem durch die grössere Leistungsfähigkeit der neuen Computertechnik. Auf die entsprechenden Literaturstellen und die neuen Messeinrichtungen der EMPA wird am Schluss in Abschnitt 6 dieses Berichtes eingegangen.

3.2 Die Echo-Methode

In der idealisierten Anordnung von Bild 1a sendet die Schallquelle Q einen Schallimpuls aus. Beim Mikrofon M kann der in Bild 1b dargestellte Schalldruckverlauf festgestellt werden.

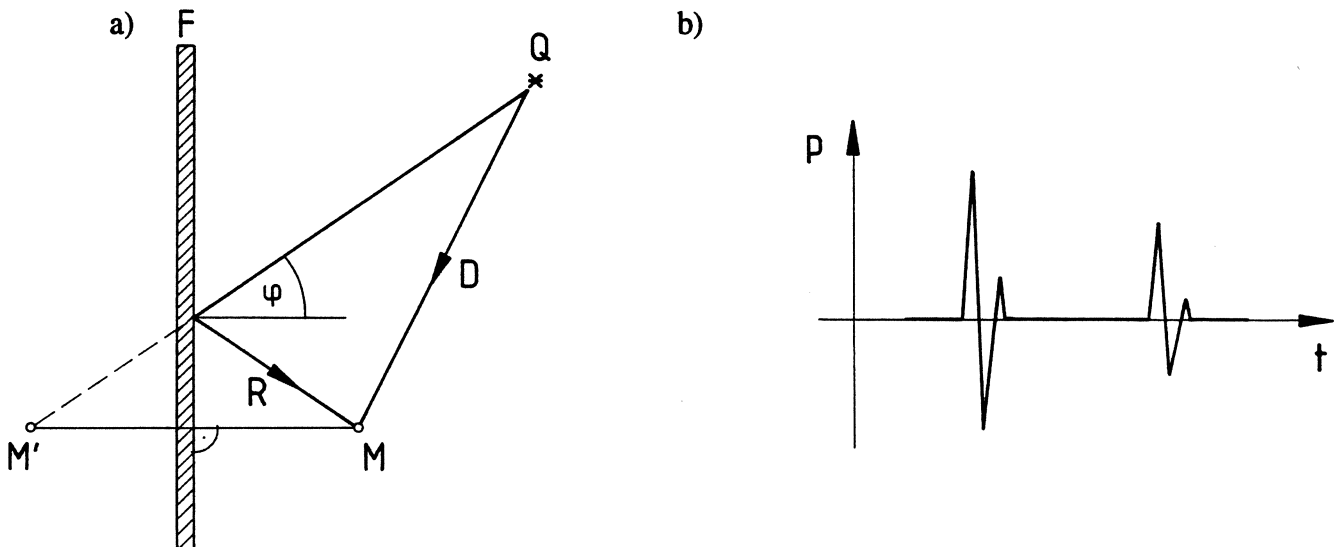


Bild 1: Ein kurzer Schallimpuls wird von der Schallquelle Q ausgesendet. Beim Mikrofon M treffen Direktschall D und un reflektierter Schall R ein. M' ist die gespiegelte Mikrofonposition

Der an der Fläche reflektierte Schall (R) trifft später ein als der Direktschall (D). Er ist durch die geometrische Dämpfung wegen der Weglängendifferenz von Direktschall und Reflexion sowie durch die Absorption an der Fläche F gemindert. Wird von Direktschall D und Reflexion R je das Leistungsspektrum bestimmt und der Weglängenunterschied berücksichtigt, kann der Reflexionsgrad r^2 für den Schalleinfallswinkel φ wie folgt berechnet werden:

$$r^2 = \frac{|P_r(f)|^2}{|P_e(f)|^2} \cdot k$$

wobei

$|P_r(f)|^2$ = Leistungsspektrum des Schalldruckes der Reflexion

$|P_e(f)|^2$ = Leistungsspektrum des Schalldruckes des Direktschalles

k = Korrekturfaktor für die Weglängendifferenz

$$= \left(\frac{QM'}{QM} \right)^2$$

und

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt$$

3.3 Messtechnische Realisierung

Die Messung erfolgt breitbandig von 250 bis 2000 Hz. Zur Schallabstrahlung wird ein leistungsfähiger Lautsprecher verwendet. Um Interferenzen zu vermeiden steht er direkt auf dem Boden. Im Gegensatz zu anderen Schallquellen die zwar u.U. höhere Schallpegel erzeugen (Pistolen, Knallpetarden, Knallfunken) ist mit einem Lautsprecher und einem elektronisch erzeugten Signal eine bessere Reproduzierbarkeit der Schallimpulse zu erreichen. Die Wellenform des abgestrahlten Schallimpulses ist in Bild 2 dargestellt. Sie wurde der Charakteristik des verwendeten Lautsprechers so angepasst, dass bei möglichst kurzer Signaldauer (ca. 3.5 ms) die Energie in die gewünschten Oktavbänder gleichmässig verteilt werden konnte. Das elektronische Signale am Eingang des Lautsprechers ist aus vier Teilsignalen zusammengesetzt, die alle bei $t=0$ beginnen (je eine Periode einer Sinusfunktion mit verschiedener Frequenz und Amplitude).

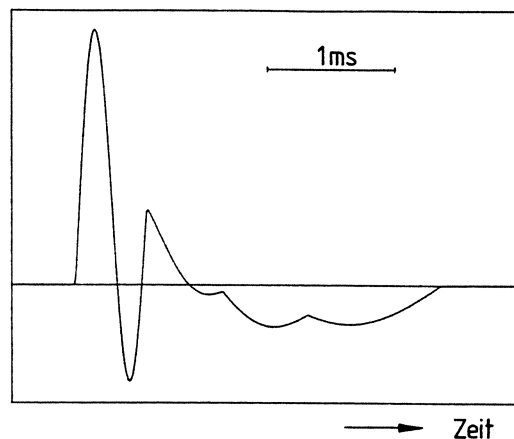
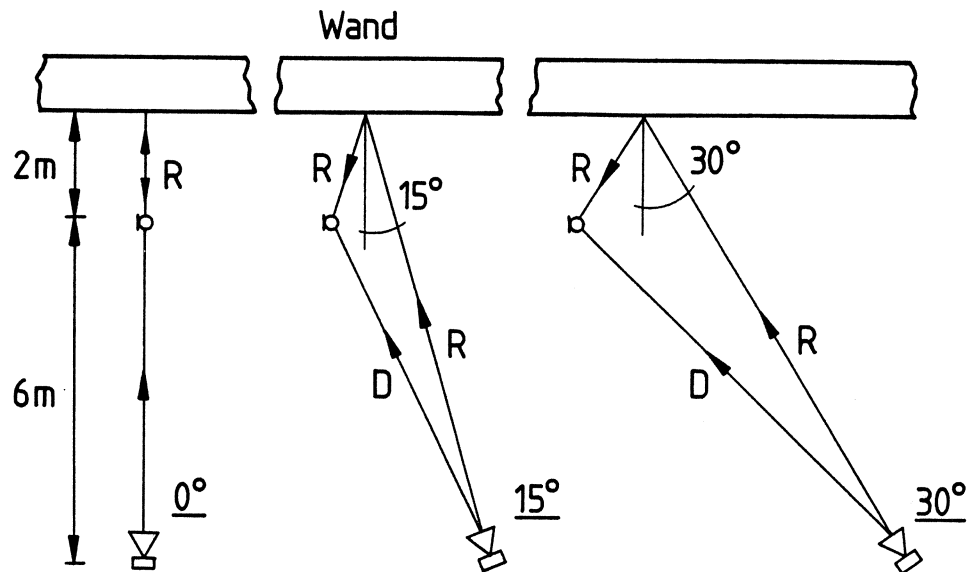


Bild 2: Der für die Messung verwendete Schallimpuls (Eingangssignal des Lautsprechers).

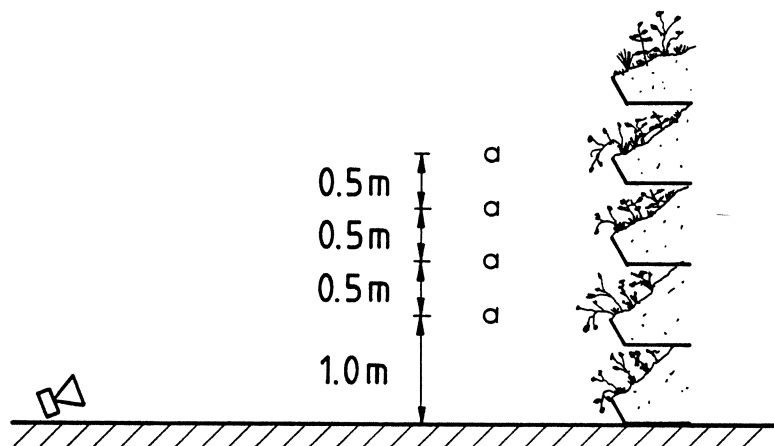
Das Leistungsspektrum wird mit einem 2-Kanal-FFT-Analysator gebildet. In einem Kanal wird der Direktschall, im anderen die Reflexion verarbeitet. Grundsätzlich geschieht dies, indem in den beiden 80 ms breiten Rechteckzeitfenstern vor und nach den zu analysierenden Signalen des Direktschalles, resp. der Reflexion, die Störsignale eliminiert werden (die entsprechenden Werte werden null gesetzt). Die beiden Spektren werden terzbandweise aus dem FFT-Gerät in einen Tischcomputer eingelesen und dort mit dem Korrekturfaktor für die Weglängendifferenz sowie einer kleinen Korrektur für die Lautsprecher-Richtcharakteristik zum Reflexionsgrad umgerechnet. Zur Verbesserung des Verhältnisses von Nutz- und Störsignal wird das Spektrum von einem mittleren zeitlichen Verlauf berechnet (Time Averaging).

3.4 Messanordnung, Messbedingungen

Die Messung erfolgt für die drei horizontalen Schalleinfallswinkel 0, 15, 30 Grad, sowie für vier vertikal verschobene Mikrofonpositionen. Auf grössere Schalleinfallswinkel muss aus praktischen Gründen (Platzmangel) verzichtet werden. Bild 3 zeigt die entsprechenden Messanordnungen.



Grundriss



Querschnitt

Bild 3 Messanordnung zur In-situ Reflexionsmessung an Lärmschutzwänden.

Der Messort muss die folgenden Bedingungen erfüllen (siehe Bild 4): Die zu prüfende Absorber-Fläche sollte mindestens 5 Meter breit sein und eine Höhe von mindestens 3 Meter aufweisen. Vor ihr muss eine freie Fläche von 10 Meter Breite und 13 Meter Länge vorhanden sein, damit keine fremde Reflexionen miteinbezogen werden. Vor der Wand, im Bereich der Mikrofon und Lautsprecherpositionen muss die Fläche eben und asphaltiert oder betoniert sein.

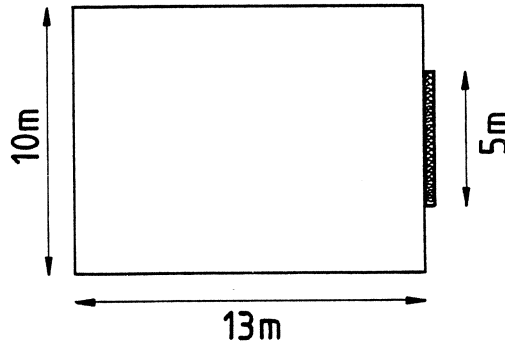


Bild 4: Bedingungen für die Umgebung Fläche vor dem Prüfling

Es zeigte sich, dass trotz der kleinen Schallwege eine Verfälschung der Resultate durch Windeinfluss möglich ist. Die Messung sollte deshalb bei möglichst kleinen Windgeschwindigkeiten stattfinden.

3.5 Der bewertete Reflexionsgrad

Die Resultate der drei verschiedenen Schalleinfallswinkel und der vier Mikrofonhöhen werden gemittelt, und in den vier Oktavbändern 250, 500, 1000, 2000 Hz zusammengefasst. Aus den vier Werten

$$r_{250}^2, r_{500}^2, r_{1000}^2 \text{ und } r_{2000}^2$$

wird eine gewichtete Grösse $\bar{r}^2$ gebildet, in welcher die Frequenz-Zusammensetzung des Strassenlärms und die A-Bewertung berücksichtigt werden:

$$\bar{r}^2 = 0.07 \cdot r_{250}^2 + 0.23 \cdot r_{500}^2 + 0.35 \cdot r_{1000}^2 + 0.35 \cdot r_{2000}^2$$

Da die Gewichtung auf ein in der Schweiz oft verwendetes Strassenlärm-Spektrum basiert, unterscheidet sie sich geringfügig von derjenigen der ZTV-Lsw-81 [2].

Wenn die zu prüfende Fläche starke Unregelmässigkeiten aufweist, werden die Messungen für verschiedene seitlich verschobene Mikrofon und Lautsprecherpositionen wiederholt, und die Resultate gemittelt.

Vergleicht man den so erhaltenen bewerteten Absorptionsgrad $\bar{\alpha} = 1 - \bar{r}^2$ mit einem ähnlich bewerteten Absorptionsgrad α_s der Hallraum-Messung bei ebenen Materialien, so zeigt sich, dass $\bar{\alpha}$ etwa um den Faktor 1.1 bis 1.3 geringer ist als α_s . Ein Grund findet sich bei der Hallraum-Messung, die bekanntlich mit verschiedenen Fehlern behaftet ist:

- Kanteneffekt, verursacht durch die Beugung an den Kanten der Probe. [10]
- Allfällig fehlende Diffusität im Hallraum. [11]
- Physikalische Ungenauigkeit der Sabine-Formel. [12]

Obwohl keine eindeutigen Beziehungen von α_s zum "wahren" Absorptionsgrad α_w bestehen, lassen sich etwa folgende Unterschiede feststellen:

Bei den tiefen Frequenzen (250 und 500 Hz) liegt α_w um einen Faktor 1.2 bis 1.8, bei den höheren Frequenzen (1000 und 2000 Hz) um einen Faktor 1.0 bis 1.2 tiefer als α_s .

Ein weiterer Grund für die Abweichung des bewerteten Absorptionsgrades $\bar{\alpha}$ besteht darin, dass $\bar{\alpha}$ aus einer Mittelung über die Einfallswinkel 0, 15 und 30 Grad gewonnen wird, während α_s annäherungsweise einer Mittelung über sämtliche Einfallswinkel entspricht (0 bis 90 Grad).

4. Klassierung von Lärmschutzbauten für Strassenlärm

Um eine für die Praxis geeignete Interpretation der Messresultate zu ermöglichen, wurden vier Kategorien für absorbierende Schallschutzbauten gegen Strassenlärm geschaffen. Dabei wurde das Konzept der Kategorien der RLS-81 [1] prinzipiell übernommen. Im Unterschied zur RLS-81 wurde zusätzlich eine Kategorie für hohe Anforderungen geschaffen. Die vier Kategorien I - IV werden durch folgende Werte eingegrenzt:

I	$0.00 \leq \bar{r}^2 \leq 0.20$
II	$0.20 < \bar{r}^2 \leq 0.45$
III	$0.45 < \bar{r}^2 \leq 0.70$
IV	$0.70 < \bar{r}^2 \leq 1.00$

Schallschutzbauten der **Kategorie I** erfüllen die höchsten Anforderungen bezüglich Absorption und sind zum Einsatz bei besonders empfindlichen Fällen bestimmt, z.B. wenn der Direktschall abgeschirmt ist, und deshalb der von einer Wandfläche reflektierte Schall ebenfalls stark vermindert werden soll.

Auch bei der **Kategorie II** kann die Absorption noch als hoch bezeichnet werden. Diese Kategorie wird z.B. dann gefordert, wenn Pegelerhöhungen durch reflektierten Schall an nicht abgeschirmten Empfänger-Positionen vermieden werden sollen.

Die Schallschutzbauten der **Kategorie III** sind zwar noch teilweise absorbierend, sollten aber bei kritischen Fällen nicht eingesetzt werden.

Bei der **Kategorie IV** wird der Schall zum grössten Teil reflektiert.

Mit Überlappungen gilt etwa die folgende Beziehung zwischen den Kategorien der BRD:

Kategorien CH	Kategorien RLS-81
I, II	hochabsorbierend
III	absorbierend
IV	reflektierend

5. Erste Resultate

5.1 Vergleiche der Echo-Messungen mit von Messungen im Hallraum und im Kundt'schen Rohr

Bei der Erprobung der Echo-Methode wurden u.a. Messungen an einer Lärmschutzwand mit konventionellem Absorber durchgeführt. Der Absorber besteht im wesentlichen aus zwei Steinwollschichten (Stärke 30 mm und 10 mm), welche durch einen Luftraum von 20 mm Dicke getrennt sind. Von dieser Wand wurde der Absorptionsgrad zum Vergleich sowohl im Hallraum, als auch im Kundt'schen Rohr ermittelt.

In Bild 5 sind die entsprechenden Messwerte dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 3.5 diskutiert, zeigt sich erwartungsgemäss, dass die mit der Echo-Methode erhaltenen Absorptionswerte tiefer liegen als jene der Hallraummethode. Die Messwerte vom Kundt'schen Rohr zeigen dagegen eine gute Übereinstimmung mit den Werten der Echo-Methode. Dieser Zusammenhang ist zu erwarten: Im Kundt'schen Rohr wird zwar nur der senkrechte Einfall gemessen. Die Verhältnisse bei den Winkeln 0, 15 und 30 Grad der Echo-Methode unterscheiden sich aber nicht stark vom senkrechten Einfall.

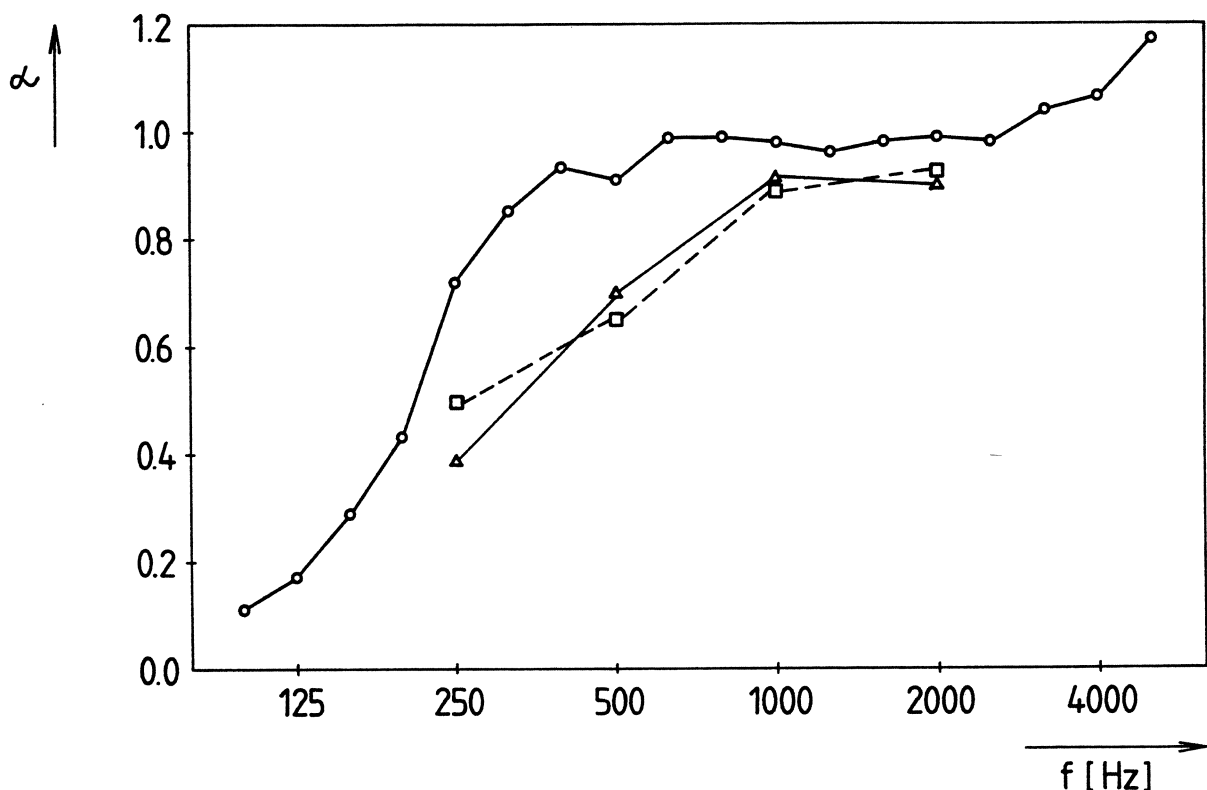


Bild 5 Vergleich von Messungen des Absorptionsgrades mit verschiedenen Verfahren: Echo-Methode (Δ), Hallraummethode (O), Messung im Kundt'schen Rohr ($\square$)

5.2 Messungen an bepflanzten Lärmschutzwänden

Die Echo-Methode wurde bisher vor allem eingesetzt für den Vergleich der Absorptionseigenschaften von bepflanzbaren Lärmschutzwänden, die nicht im Hallraum aufgebaut werden konnten. In Bild 6 sind die Messergebnisse von drei repräsentativen Wänden dargestellt. Im Gegensatz zu Bild 5 ist hier auf der Ordinaten-Achse der Reflexionsgrad und nicht der Absorptionsgrad eingetragen. Bei den drei Lärmschutzwänden handelt sich um Konstruktionen, die im Prinzip aus aufeinander montierten Betonkasten bestehen, die mit Erde gefüllt sind. Bild 7 zeigt ein Beispiel eines solchen Aufbaus. Die Wand A weist den kleinsten sichtbaren Anteil Beton auf und ergab damit bei den Messungen deutlich die besten Resultate, d.h. die tiefsten $\bar{r}^2$ -Werte.

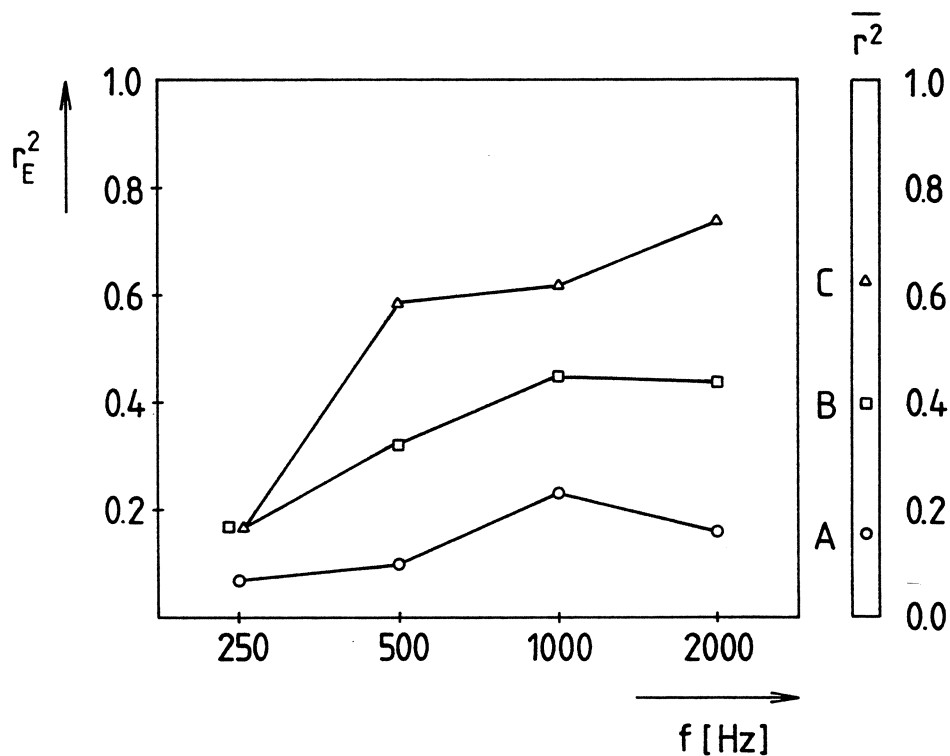


Bild 6 Resultate von Messungen mit der Echo-Methode an bepflanzbaren Lärmschutzwänden. Dargestellt sind Reflexionsgrad r_E^2 sowie der bewertete Reflexionsgrad $\bar{r}^2$.

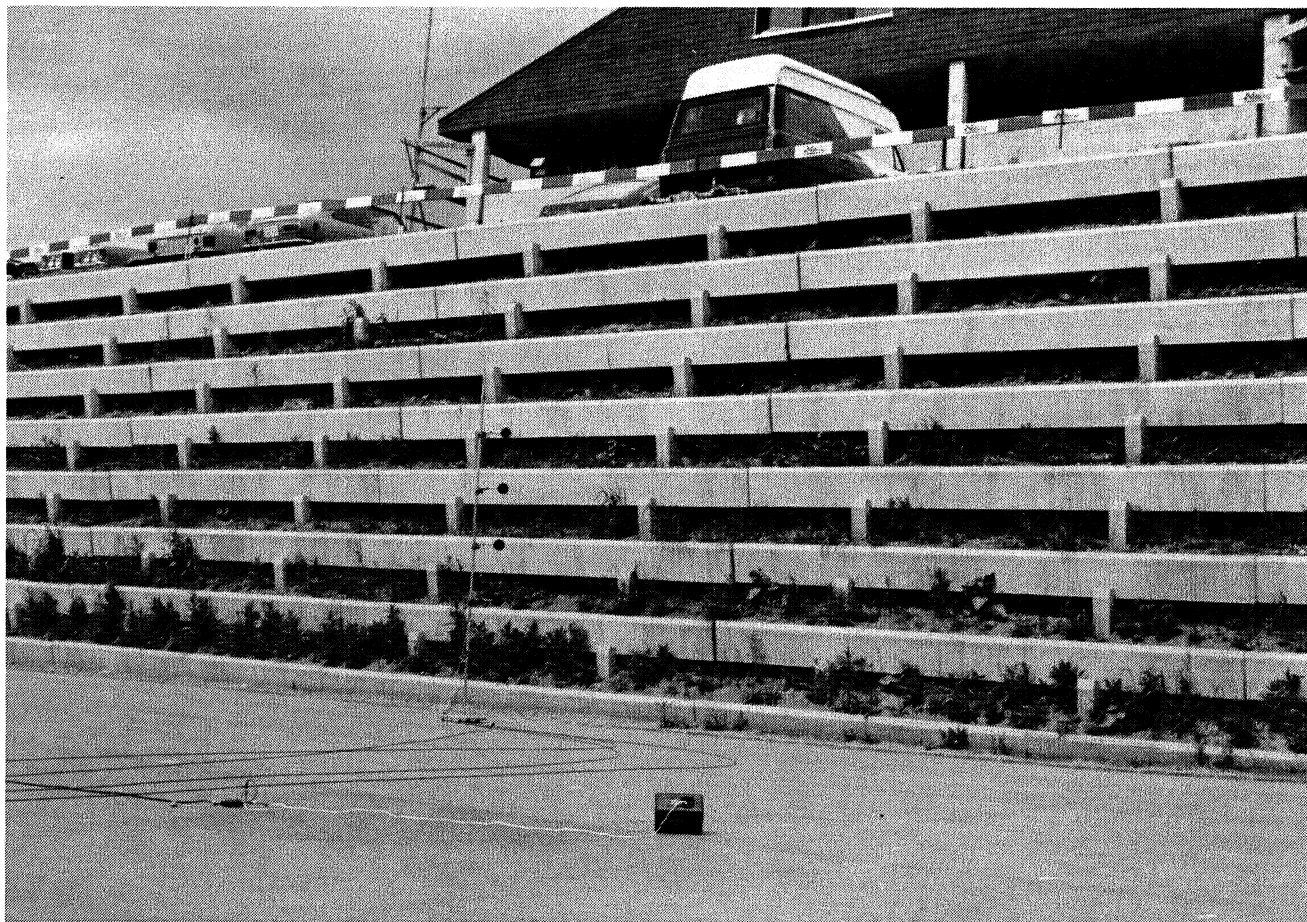


Bild 7 Beispiel einer bepflanzten Lärmschutzwand mit Anordnung von Lautsprecher und Mikrofonen für eine Reflexionsmessung

Weitere Messungen wurden an einer bepflanzten Steilböschung durchgeführt. Aus geometrischen Gründen (Neigung der Böschung) konnte nicht mit der üblichen Anordnung von Mikrofonen und Lautsprecher gearbeitet werden: Um eine gleiche Beurteilung wie bei den anderen Messungen zu ermöglichen, wurde der Lautsprecher auf 6 Meter, das Mikrofon auf 4 Meter Höhe platziert. Die Resultate liegen sehr nahe den Resultaten einer früheren Messung an einer senkrechten Lärmschutzwand, die auch fast vollständig aus Erde aufgebaut war. Beide konnten in die Kategorie II eingeteilt werden.

5.3 Erste Erfahrungen mit der neuen Messmethode, Messgenauigkeit

Die ersten Erfahrungen, die mit der Echo-Methode gewonnen werden konnten, sind positiv. Allerdings ist die Wiederholbarkeit der Messung noch nicht voll befriedigend. Die wichtigsten Einflussfaktoren liegen bei der Unterschiedlichkeit der Aufstellungsorte der Lärmschutzwände (Bodenverhältnisse vor der Wand, Störreflexionen, Störgeräusche, usw.). Diese Einflüsse könnten bei der Einrichtung eines permanenten Aussenprüfstandes für Prüfungen an Prototypen von Lärmschutzwänden praktisch eliminiert werden. Die Messung von Lärmschutzwänden in-situ bleibt vorläufig Spezialisten überlassen.

Die Genauigkeit der Methode beträgt bei idealen Verhältnissen (ebener Boden, flacher Schallabsorber) 6 %. Im Bereich $\bar{r}^2 = 0.5$ beträgt sie also ± 0.03 .

Die Echo-Methode als solche kann ganz allgemein zur Bestimmung des Reflexionsgrades von Materialien eingesetzt werden. Eine leicht abgeänderte und angepasste Version des hier beschriebenen Verfahrens wurde erfolgreich eingesetzt, um die absorbierende Wirkung neu entwickelter Strassenbeläge zu untersuchen. Es wird dadurch möglich, die Messungen an im Einsatz stehenden Belägen während kurzzeitigen Verkehrssperrungen durchzuführen.

6. Ausblick

6.1 Bisher erfolgte Prüfungen von Lärmschutzwänden

Das vorgestellte Messverfahren wird heute an der EMPA in Fällen eingesetzt, wo Lärmschutzwände nicht im Hallraum eingebaut werden können¹. Es wurden in den letzten Jahren für Kunden sieben Aufbauten von Lärmschutzwänden geprüft. Meist handelte es sich um Prototypen, welche für die Messungen auf speziell vorbereitetem Gelände aufgebaut wurden.

Bei den meisten Konstruktionen waren bepflanzbar (z.B. Steintröge, gefüllt mit Erde), z.T. sogar vollständig aus Erde bestehend, welche z.B. durch ein Drahtgeflecht zusammengehalten wird.

Fünffmal wurde die Kategorie II, zweimal die Kategorie III erreicht.

Bestand bei Lärmschutzwänden die Möglichkeit des Einbaues in den Hallraum, entschieden sich die Kunden immer für eine Hallraummessung zur Bestimmung des statistischen Absorptionsgrades. Einerseits ist diese Messung kostengünstiger als die Echo-Methode, andererseits wird von den Kantonen und vom Bund für den Nachweis der Absorptionswirkung der Lärmschutzwände praktisch ausschliesslich der statistische Schallabsorptionsgrad verlangt, obwohl die oben erwähnte Ungenauigkeit (Unzuverlässigkeit) der Hallraummethode in Kauf genommen werden muss.

6.2 Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Mess-Methode

Seit Abschluss der Arbeiten für das Forschungsprojekt 39/80 hat sich in der Signalanalyse-Technik durch die rasanten Fortschritte in der elektronischen Datenverarbeitung einiges verändert. Für das im Forschungsauftrag behandelte Thema hat dies vor allem Auswirkung auf die praktische Ausführung der Messung. Wie in 6.3 noch ausgeführt wird, lassen sich einige der oben geschilderten Probleme durch die Anwendung neuer Messverfahren lösen. Die EMPA ist zum jetzigen Zeitpunkt auch entsprechend mit Messgeräten ausgerüstet, jedoch müssten für die Messung an Lärmschutzwänden noch Anpassungen vorgenommen werden. Es müssten auch neue Erfahrungen bei der Messung von verschiedenen Prüflingen gewonnen werden.

Offen bleibt dabei immer noch das Problem von stark strukturierten Lärmschutzwänden, welche den Schall streuen und gestaffelt zurückwerfen. Zur Lösung dieses Teilproblemekes sind noch grundlegende Überlegungen notwendig.

Die Bedeutung solcher Messungen ist auch von der internationalen Normierung erkannt worden. In Frankreich ist eine Norm [4] in Kraft getreten, die vor bei allem nicht oder nur schwach strukturierten Oberflächen eingesetzt werden kann. Eine ISO-Arbeitsgruppe, welche sich auf diese französischen Vorarbeiten stützt, hat die Arbeiten zum Thema aufgenommen.

¹Eine Abwandlung der Methode wurde mehrere Male eingesetzt, um den Absorptionsgrad für verschiedene Schalleinfallswinkel zu bestimmen (z.B. für absorbierende, immer relativ flache Verkleidungen für Lärmschutzwände bei Schiesslärm). In diesen Fällen ist die Anwendung der Methode aus verschiedenen (z.T. geometrischen) Gründen viel weniger heikel als bei der im vorliegenden beschriebenen Anwendung.

6.3 Neuere Literatur zur Messung des Reflexionsgrades

Die Fortschritte in der Rechnertechnik hatten einen grossen Einfluss auf die Weiterentwicklung im Bereich der Messung der akustischen Reflexionsfaktoren. Arbeiten, welche sich aber direkt mit dem in diesem Bericht angeschnittenen Problemkreis befassen, konnten in der aktuellen Literatur nicht gefunden werden.

Direkt anwendbar für die Verbesserung der Messtechnik für die Prüfung von schallabsorbierenden Lärmschutzwänden sind die Arbeiten welche am Institut für Technische Akustik der RWTH in Aachen [13] geleistet wurden. Es wurde eine Maximalfolgen-Messsystem eingesetzt, wodurch eine grosse Messdynamik und eine geringe Anfälligkeit gegenüber Störgeräuschen erreicht wurde. Die Trennung des reflektierten und des einfallenden Schallanteils und von eventuellen Störreflexionen wird dadurch verbessert, dass aus der gemessenen Gesamtimpulsantwort zunächst die in einer Referenzmessung bestimmten Stossantwort des Messsystems herausgefaltet wird. Danach kann das reflektierte Signal herausgeschnitten und in den Frequenzbereich transformiert werden, um den komplexen Reflexionsfaktor $R(f)$ zu erhalten. Das Verfahren ist vor allem für die Raumakustik bestimmt. Es ist kommerziell von der RWTH zu erwerben. Prinzipiell lässt sich eine Anpassung für die Messung an Lärmschutzwänden bewältigen.

Da an der EMPA kürzlich ein ähnliches Messsystem angeschafft wurde (MLSSA), kann in naher Zukunft auf Grund der oben erwähnten Arbeiten ein Fortschritt in der Messtechnik erreicht werden.

Weitere Arbeiten zur "Messung des Reflexionsfaktors" sind im folgenden aufgeführt. Allerdings handelt es sich fast durchwegs um Methoden, welche sich für die In-situ-Messung von Lärmschutzwänden weniger gut oder überhaupt nicht eignen. Ein Überblick gibt [13]. Die Messmethoden können wie folgt unterteilt werden:

- **Transfer-Function - Methoden**

- Überblick: [14]

- Conventional two-microphone technique: [15,16]

- The Chung technique [17]

- The spherical wave estimate technique [18,19]

- **Methoden mit Schallintensitäts-Technik [20]**

- **Andere Methoden: [21]**

7. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Verkehr, BRD: Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen RLS-81.
- [2] Bundesministerium für Verkehr, BRD: Zusätzliche technische Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an der Strasse, ZTV-LSW-81.
- [3] Rosenheck, A.; Hofmann R.: In-situ measurement of reflections from structured noise barriers. Proc. Internoise 85(1985) 1263-1266
- [4] Normalisation française S31-089, Juillet 1990: Code d'essai pour la détermination in situ de caractéristiques acoustiques d'écrans utilisés en champs libre.
- [5] Biering, H.; Pederson, O.Z.: System analysis and time delay spectrometry (Part II). Brüel & Kjaer Technical Review 2(1983), 3-50
- [6] Bolten, J.S.; Gold E.: The determination of acoustic reflection coefficients by using cepstral techniques. J. of Sound and Vibration 110(1986) 179-202
- [7] Hollin K.A., Jones, M.H.: The measurement of sound absorption coefficient in situ by a correlation technique. Acustica 37(1977), 103-110
- [8] Lambert, J.-M.: Measurements of echoes with a stationary random sound source. Applied Acoustics 19 (1986), 91-106
- [9] Legeay, V.; Sezec, R.: Sur la détermination des caractéristiques acoustiques des matériaux absorbants. Acoustica 53 (1983) 172-192
- [10] Kuhl W.: Ursachen und Verhinderung systematischer Abweichungen vom "wahren" Absorptionsgrad bei Absorptionsgradmessungen im Hallraum. Acustica 52(1983) 197-210
- [11] Embleton T.F.W.: Absorption coefficients of surfaces calculated from decaying sound fields. JASA 50(1971) 801-811
- [12] Gomperts M.C.: Do the classical reverberation formula still have a right of existence?. Acustica 16(1965/66) 256-268
- [13] Heinz R.: In-situ Messung komplexer Reflexionsfaktoren von Wandflächen. Acustica 75(1991) 28-39
- [14] Cops, Lauriks, Allard: Characterisation of sound absorbing materials from two microphone experiments. Internoise 90, 117-122

- [15] Minten, Cops, Lauriks: Absorption characteristics of an acoustic material at oblique incidence measured with a two-microphone technique. *Journal of Sound and Vibr.* (1989)120(3) 499-510
- [16] Charles, Abraham, Pascal: Mesure in-situ de l'impédance acoustique des matériaux en fonction de l'angle d'incidence. *Revue 'Acoustique* No. 80, 1987
- [17] Chung, Blaser: Transfer Function method of measuring in-duct acoustic properties. *JASA*, 68(3) Sept. 80 907-920
- [18] Allard, Champoux: In-situ two-microphone technique for the measurement of the acoustic surface impedance of materials. *Noise Con. J.* Jan./Feb. 1989
- [19] Champoux, Allard: Toward an in-situ method for the measurement of acoustic impedance and absorption coefficient of acoustic materials, *Internoise 89*, p. 1089
- [20] Barwicz, Karminski: Determination of the acoustic reflection coefficient by measurement of complex intensity. *Internoise 90*, p. 127
- [21] Massayuki Tamura: Spatial Fourier transform method for measuring reflection coefficient at oblique incidence. *JASA* 88(5) Nov. 1990 p.2259

1. Ziel

Die im folgenden beschriebene Klassierung soll es ermöglichen, Schallschutzbauten gezielt gemäss ihren Absorptionseigenschaften einsetzen zu können. Die Klassierung erfolgt auf Grund einer Reflexionsmessung an Ort und Stelle oder an einem Prüfaufbau an der EMPA. Die Messmethode unterscheidet sich wesentlich von einer Messung des Absorptionsgrades im Hallraum.

2. Problem

Lärmschutzwände bewirken nicht nur die beabsichtigte Abschirmung in eine Richtung, sie führen auch oft zu unerwünschten Reflexionen in die entgegengesetzte Richtung. Auch andere Bauten (Stützmauern etc.) können zu störenden Reflexionen führen, welche mit absorbierenden Vorrichtungen verringert werden müssen. Ihre Reflexion- resp. Absorptionseigenschaften wurden bisher in der Schweiz auf Grund von Messungen im Hallraum beurteilt. Wie in Abschnitt 5 ausgeführt, sind diese Resultate aber nicht direkt auf die Verhältnisse im Freifeld übertragbar. Zudem können grosse Konstruktionen gar nicht mehr im Hallraum aufgestellt werden. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem der Reflexionsgrad an Ort und Stelle gemessen werden kann.



3. Die Echo-Methode

3.1 Messung

Es wird der Reflexionsgrad r^2 der Lärmschutzwand für verschiedene Schalleinfallswinkel bestimmt. Der Reflexionsgrad ist das Verhältnis der auf die Wand einfallenden Energie zu der von der Wand reflektierten Energie ($r^2 = 1$: Vollreflexion, $r^2 = 0$: Vollabsorption). Der Absorptionsgrad α berechnet sich aus r^2 wie folgt:

$$\alpha = 1 - r^2.$$

Das Messverfahren beruht auf dem Echoprinzip: Von einem Lautsprecher wird ein Schallimpuls ausgesendet. Das beim Mikrofon empfangene Signal wird von einem FFT-Analysator (Fast Fourier Transform) bearbeitet. Der Direktschall und der reflektierte Schall werden dabei separiert und von beiden die Energie gebildet. Das Verhältnis der beiden Energieanteile ergibt (nach Berücksichtigung der durch die Wegdifferenz entstehenden Dämpfung der Reflexion) den gesuchten Reflexionsgrad. Die Messung erfolgt für drei horizontale Schalleinfallswinkel (0° , 15° und 30°) und drei bis vier vertikal verschobene Mikrofonpositionen (1.0, 1.5, 2.0 und 2.5m). Der Frequenzbereich umfasst die Terzbänder von 250 Hz bis 2000 Hz. Die Messung für eine Mikrofonposition wird mehrfach wiederholt und dann gemittelt.

3.2 Auswertung

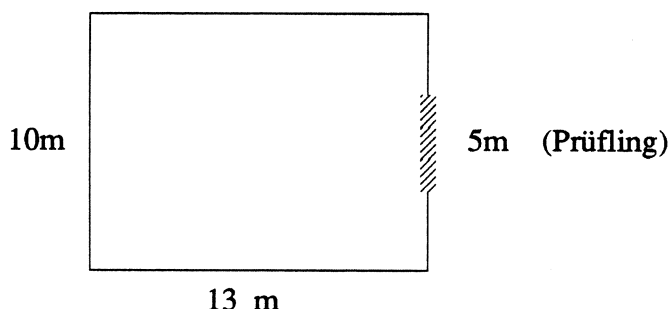
Die Resultate der einzelnen Messungen werden gemittelt und in den Oktavbändern 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz zusammengefasst. Aus diesen Werten wird eine gewichtete Grösse $\overline{r^2}$ gebildet, welche die Frequenzzusammensetzung des Strassenlärms und die A-Bewertung berücksichtigt:

$$\overline{r^2} = 0.07 \cdot r_{250}^2 + 0.23 \cdot r_{500}^2 + 0.35 \cdot r_{1000}^2 + 0.35 \cdot r_{2000}^2$$



4. Anforderungen an den Messort

Die zu prüfende Schallschutzbau­te sollten mindestens 5 m breit sein und eine Höhe von 3m aufweisen. Vor ihr muss eine freie, ebene, asphaltierte oder betonierte Fläche von 10m Breite und 13m Länge vorhanden sein.



5. Vergleich mit Hallraummessungen

Es ist auch üblich, die Absorptionseigenschaften von von Lärmschutzwänden im Hallraum zu bestimmen (z.B. BRD: Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen RLS-81; CH: Anforderungen an Schallschutzwände an Hochleistungsstrassen, EMPA 1980). Das Ergebnis dieser Messungen ist der statistische Absorptionsgrad α_s . Er ist zwar eine sinnvolle Grösse für die Anwendungen in der Raumakustik, liefert aber für die Bestimmung der Grösse einer Reflexion an Lärmschutzwänden im Freien prinzipiell falsche Resultate. Es besteht kein einfacher Zusammenhang zwischen α_s und dem mit der hier beschriebenen Messmethode ermittelten Reflexionsgrad. Mit Überlappungen gilt aber etwa die folgende Beziehung zwischen den Kategorien der BRD (ausgeführt in der RLS-81) und den im folgenden Abschnitt definierten Kategorien:

Kat. CH	Kat. RLS-81
I und II	hochabsorbierend
III	absorbierend
IV	reflektierend

6. Güteklassen für absorbierende Schallschutzbauten

Die gemessenen Schallschutzbauten werden entsprechend den Resultaten der Reflexionsmessungen in eine der folgenden Kategorien eingestuft:

I	0.00	$\leq$	$\overline{r}^2$	$\leq$	0.20
II	0.20	$<$	$\overline{r}^2$	$\leq$	0.45
III	0.45	$<$	$\overline{r}^2$	$\leq$	0.70
IV	0.70	$<$	$\overline{r}^2$	$\leq$	1.00

Schallschutzbauten der **Kategorie I** erfüllen die höchsten Anforderungen bezüglich Absorption und sind zum Einsatz bei besonders empfindlichen Fällen bestimmt, z.B. wenn der Direktschall bereits abgeschirmt ist, und der von einer Schallschutzbau reflektierte Schall stark vermindert werden soll.

Auch bei der **Kategorie II** kann die Absorption noch als hoch bezeichnet werden. Diese Kategorie wird z.B. dann gefordert, wenn Pegelerhöhungen durch reflektierten Schall an nicht abgeschirmte Empfänger-Positionen vermieden werden soll.

Die Schallschutzbauten der **Kategorie III** sind zwar noch teilweise absorbierend, sollten aber bei kritischen Fällen nicht eingesetzt werden.

Bei der **Kategorie IV** wird der Schall zum grössten Teil reflektiert.

