

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Transparente, schallabsorbierende Lärmschutzwände

von

Philip Leistner, Xiaoru Zhou

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart

Förderkennzeichen: BWI 26001

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juni 2009

Inhalt

Kurzzusammenfassung	4
1 Einleitung	4
2 Übersicht Grundlagen und Kenngrößen für transparente Lärmschutzwände	5
2.1 Grundlagen	5
2.2 Schalltechnische Kenngrößen	5
2.3 Lichttechnische Kenngrößen	6
3 Lärmschutzwände – Stand der Technik	7
3.1 Transparente Lärmschutzwände	7
3.2 Transparente Lärmschutzwände mit schallabsorbierenden Eigenschaften – bestehende Lösungen	8
4 Transparente Schallabsorber – Wirkprinzipien und Möglichkeiten	10
4.1 Poröse Absorber	10
4.2 Resonanzabsorber	12
5 Ansätze zur akustischen Optimierung	14
6 Beurteilungsmethoden und -werkzeuge	16
6.1 Rechnerische Parametervariation	16
6.2 Absorptionsgrad	16
6.3 Poröse Absorber	17
6.4 Plattenresonatoren	18
6.5 Lochplattenresonatoren	20
6.6 Mehrschichtige Resonanzabsorber	21
6.7 Nebeneinander liegende Absorberflächen	23
6.8 Rechenbeispiele und theoretische Optimierungen	23
7 Experimentelle Untersuchung	27
7.1 Senkrechter Schalleinfall	28
7.1.1 Messprinzip und -einrichtung	28
7.1.2 Vergleich Messung – Rechnung	28
7.2 Diffuser Schalleinfall	30
7.2.1 Messprinzip und -einrichtung	30
7.2.2 Messergebnisse	30
7.2.2.1 Einlagige Konstruktionen	32
7.2.2.2 Zweilagige Konstruktionen	32
7.2.2.3 Dreilagige Konstruktion	33
7.3 Untersuchung der Wirkung der Absorberauskleidung	33
7.3.1 Messprinzip und -einrichtung	33
7.3.2 Ergebnisse	35

8	Analyse und Beurteilung der gewählten Ansätze	37
8.1	Akustische Qualität	37
8.2	Beurteilung hinsichtlich realer Verkehrssituationen	38
9	Zusammenfassung und Ausblick	39
10	Literatur	41
11	Anlagen	74
11.1	Transparente Materialien für den Außeneinsatz	74
11.1.1	Acrylglas	74
11.1.2	ETFE	74
11.1.3	Polycarbonat	75
11.1.4	PET	76
11.2	Veränderung des Absorptionsgrad bei Modifikation eines Eingangsparmeters	77
11.2.1	Makro mit ETFE-Folie:	77
11.2.2	Gitter mit PC-Folie	82
11.3	Wabenplatte mit vergrößertem Wabendurchmesser	87
11.4	Veränderung der Absorptionswirkung unter dem Einfluss von Wasser, Schlamm und Schnee	88
11.5	Maßnahmen zum Schutz gegen Vogeltod	91

Kurzzusammenfassung

Bisher sind keine transparenten Lärmschutzwände auf dem Markt, die eine substantielle akustische Absorption aufweisen. Hier werden die Grundlagen und die akustischen und optischen Kenngrößen und Anforderungen von Lärmschutzwänden aufgezeigt. Die wesentlichen akustischen Wirkprinzipien samt ihrer Vor- und Nachteile werden erörtert. Aus diesen werden unter Berücksichtigung praktischer und auch optischer Aspekte die mikroperforierten Absorber (MPA) als Kernelement transparenter Lärmschutzwände identifiziert. Auf dieser Basis sind fünf mikroperforierte und drei kombinierte Konstruktionen entworfen worden. Für diese wurde eine Parametervariation hinsichtlich Schallabsorption durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse bestätigen den Ansatz, dass die Mikroperforation von Flächengebilden als Wirkprinzip für transparente Lärmschutzwände geeignet sind. Die notwendige Schalldämmung der Gesamtkonstruktion wird von der Tragglasplatte und nicht von den MPA gewährleistet.

At present there are no noise barriers available which are optically transparent and acoustically absorbent. The basic principles as well as the acoustic and optical requirements and parameters have been stated. Also the major acoustic absorbing principles including their advantages and disadvantages have been discussed. On this basis and with respect to the practical requirements for noise barriers the micro perforated absorbing principle has been chosen as suitable one. Five simple and three combined constructions based on this principle have been developed. For these a parameter variation has been performed regarding sound absorption. The results of this variation confirm the MPA approach as sound absorbing principle in transparent noise barriers. But the required sound insulation is not being realised by means of MPA. It is given instead by the backing glass partition.

1 Einleitung

Dieser Abschlussbericht beinhaltet Teile der Arbeitspakete 1, 2, 3, 4 und 5, ohne Anwendungsbeispiele, siehe Vorhabensbeschreibung und Datenblatt zum Antrag [1]. Die Recherche stützt sich auf veröffentlichte Fachartikel, Schutzrechte und in einigen Fällen Produktinformationen, die gesondert gekennzeichnet sind. Mit dem Stand der Technik als Ausgangspunkt werden mögliche Ausführungsbeispiele transparenter, schallabsorbierender Lärmschutzwände sowohl konstruktiv dargestellt als auch durch ihre zu erwartenden technischen Kenngrößen charakterisiert. Soweit vorhanden und sinnvoll, ergänzen Hinweise auf Auslegungs- und Bemessungsregeln bzw. physikalische Wirkprinzipien die Beschreibung insbesondere der Einzelkomponenten der Lärmschutzwände.

2 Übersicht Grundlagen und Kenngrößen für transparente Lärmschutzwände

2.1 Grundlagen

Um sowohl im Schienen- als auch im Kfz-Verkehr eingesetzt werden zu können, müssen transparente Lärmschutzwände akustischen Anforderungen (siehe [2] und [3]) entsprechen. Die akustischen Ansprüche bestehen in Mindestwerten hinsichtlich der Schalldämmung und der Schallabsorption zumindest auf einer Seite der Lärmschutzwand. Der Begriff Transparenz ist etwas weiter zu fassen, da er zwischen Lichtdurchlässigkeit und Durchsichtigkeit eine Vielzahl von Zwischenstufen einschließt. Darüber hinaus kann die Transparenz sehr stark von Umgebungsbedingungen (z.B. Verschmutzung) abhängen.

2.2 Schalltechnische Kenngrößen

Die Schalldämmung R des Wandaufbaus, definiert nach [4], stellt eine Mindestanforderung dar, siehe **Tabelle 1**. Sie gilt in jedem Fall als erfüllt, wenn Betonwände die übliche Tragbetonschicht von mindestens 8 cm Dicke aufweisen. Die zugrunde liegende Relation von flächenbezogener Masse und Schalldämmung trifft hauptsächlich auf einschalige, sozusagen monolithische Wände zu. Prinzipiell ließe sich daher auch eine materialbezogene Mindestdicke für andere, z.B. transparente Elemente, aufstellen.

Tabelle 1:
Nachzuweisende Luftschalldämmung, nach [2]

Frequenz f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Schalldämmmaß R [dB]	12	18	24	30	35	35

Der Schallabsorptionsgrad α_s der schallabsorbierenden Wandseite, definiert nach [5] durch Messungen im Hallraum, darf nach [2] die Werte nicht unterschreiten.

Tabelle 2:
Mindestwerte der Schallabsorption

Frequenz f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Schallabsorptionsgrad	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9	0,8

Der Gültigkeitsbereich dieser Messgröße betrifft nahezu ebene und gleichmäßig absorbierende Oberflächen. Bei nur teilflächig absorbierend verkleideten Wänden oder stark strukturierten Oberflächen mit z.B. vorspringenden Einzelabsorbieren verunsichert die Festlegung der Bezugsfläche die Bestimmung des Absorptionsgrades aus der äquivalenten Absorptionsfläche. Nach [3] wird aus den im Labor nach [4] ermittelten frequenzabhängigen Schalldämmmaßen die maßgebende Luftschalldämmung für Lärmschutzwände an Straßen ($\Delta L_{A,R,Str}$) ermittelt. Ähnlich wird mit der Berechnung der Schallabsorption von Lärmschutzwänden verfahren. Die Größe DL_a wird aus den, im Hallraum nach [5] gemessenen, Schallabsorptionsgraden berechnet. Sie muss mindestens 4 dB be-

tragen, um als *absorbierend* bezeichnet zu werden und um *hoch absorbierend* bezeichnet zu werden, muss sie 8 dB betragen **Tabelle 3**. Bei den Absorptionseigenschaften von LSW werden folgende Absorptionsgruppen unterschieden, die nach DIN EN 1793-1 für ebene Oberflächen zu prüfen sind:

Tabelle 3:
Absorptionsgruppen nach ZTV-Lsw 06

Gruppe	Absorption DL_a	
A1	< 4	nicht absorbierend
A2	4 - 7	absorbierend
A3	8 - 11	hoch absorbierend
A4	> 11	

Die Berechnung ergibt sich an Hand der gemessenen Einzelwerte α_j für die Terzbereiche mit den Terzmittenfrequenzen 100 Hz bis 5 kHz mittels der Formel

$$DL_a = -10 \cdot \lg \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^{18} \alpha_j \cdot 10^{0,1L_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j}} \right] \text{ in dB,} \quad (1)$$

um die Effektivität der Absorptionsschicht in Bezug auf Straßenverkehrsräusche zu beurteilen. Bei Werten, die größer als 1 sind, werden diese zwar im Diagramm mit dem Absorptionsgrad angezeigt, jedoch bei der Berechnung von DL_a gemäß der DIN EN 1793 auf 0,99 begrenzt. Die Faktoren L_j ergeben sich aus der Frequenzzusammensetzung eines mittleren Straßenverkehrsräusches unter Berücksichtigung der A-Bewertung. Der für die jeweilige Terz einzusetzende Wert L_j ist in **Tabelle 4** bzw. **Bild 27** dargestellt.

Tabelle 4:
 L_j -Werte in dB nach DIN EN 1793 für die Bestimmung der Absorbergruppen

Frequenz f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
L_j - Wert [dB]	-20	-20	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11
Frequenz f [Hz]	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k
L_j - Wert [dB]	-9	-8	-9	-10	-11	-13	-15	-16	-18

2.3 Lichttechnische Kenngrößen

Die Lichtdurchlässigkeit oder -transmission τ , definiert nach [7], beschreibt den direkt durchgelassenen Strahlungsanteil im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts bezogen auf die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges. Farblose Verglasungen erreichen im sauberen Zustand Werte bis 95 %. Dies gilt in etwas geringerem Maße z.B. auch für Gussglasbauteile, deren Durchsichtigkeit jedoch deutlich verringert ist.

Tabelle 5:
Vereinfachte Stufeneinteilung für die Lichttransparenz

	Beschreibung	Beispiel
A	durchsichtig, lichtdurchlässig	Klarglas
B	eingeschränkt durchsichtig, lichtdurchlässig	Gussglas
C	lichtdurchlässig ($\tau > 75 \%$)	A,B mit Weiß-Trübung
D	teilweise lichtdurchlässig ($\tau < 75 \%$)	Reflexionsglas
E	flächenbezogene Kombinationen aus A bis D und lichtundurchlässigen Materialien	A-D teilflächig

Die Bild-Verzerrung erschwert oder verhindert eine Erkennung von Konturen und Objekten. Dieser Unterschied begründet die in dieser Studie vorgenommene Klassifizierung der Transparenz als Merkmal entsprechender Lärmschutzwände. Im folgenden orientiert sich die Unterteilung an den Stufen nach **Tabelle 5**. Angesichts nur weniger geprüfter Daten in diesem Sinne beruht die Zuordnung an mehreren Stellen auf Erfahrungswerten. Dies gilt ebenfalls für Übergangs- und Grenzfälle.

3 Lärmschutzwände – Stand der Technik

Der praktizierte Stand der Technik zeigt, dass transparente Lärmschutzwände mit vernachlässigbaren bzw. ohne Absorbereigenschaften in vielfachen Ausführungsvarianten bereits bestehen. Mit unterschiedlichen Materialien und Bauteilen können diese Lärmschutzwände sowohl die Anforderungen nach Tabelle 1 erfüllen als auch anderen bautechnischen Ansprüchen genügen. Die zusätzliche Forderung nach absorbierenden Eigenschaften verringert die verfügbare Auswahl bereits praktizierter Lösungen jedoch erheblich.

3.1 Transparente Lärmschutzwände

Abgesehen von Sonderfällen lassen sich schalldämmende Bauteile für transparente Lärmschutzwände technisch wie folgt unterscheiden:

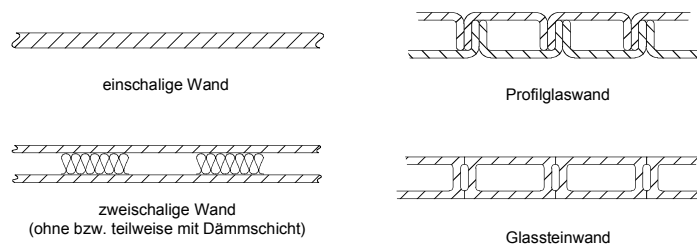


Abb. 1:
Beispiele für transparente schalldämmende Wandkonstruktionen (schematische Darstellung).

- Einschalige Wände,
- mehrschalige Wände (mit oder ohne Hohlraumfüllung / Sicherheitsverbundglas),
- Wände aus Profilglas-Elementen (i.d.R. mehrschalig),
- Wände aus Glassteinen.

Als Materialien kommen dabei Glas oder Kunstglas (Acrylglas etc.) aus unterschiedlichen stofflichen Bestandteilen sowie mit diversen Herstellungs- und Montageverfahren in Frage. Die Schalldämmung dieser Bauteile und -systeme kann problemlos an die Forderungen nach Tabelle 1 angepasst werden. Bei einschaligen Wänden, d.h. mit nahezu monolithischem Aufbau, ist die Auswahl bzw. Bemessung vergleichsweise einfach. Neben den Randbedingungen in Gestalt der Einfassung (z.B. Undichtheiten mit geringer Schalldämmung) usw. bestimmen insbesondere die flächenbezogene Masse und die Biegesteife das typische Schalldämmungsspektrum. In **Bild 1** ist die nach [8] berechnete Schalldämmung einer 25 mm dicken, einschaligen Acrylglas-Wand im beispielhaften Vergleich mit der berechneten Schalldämmung von Sicherheitsverbundglas und der gemessenen von Isolierverglasung dargestellt. Die Forderungen nach Tabelle 1 werden weitgehend erfüllt. Zur Sicherstellung der Schalldämmung mit transparenten Wandbauteilen und -systemen besteht also Spielraum, der sich auch auf die lichttechnischen Eigenschaften ausdehnen lässt. Für nahezu alle Varianten können die Transparenzstufen A bis D nach Tabelle 5 fast beliebig gewählt werden.

3.2 Transparente Lärmschutzwände mit schallabsorbierenden Eigenschaften – bestehende Lösungen

Der bislang vorherrschende technische Ansatz für transparente Lärmschutzwände, bei denen ausdrücklich Wert auf schallabsorbierende Eigenschaften gelegt wird, besteht in der teilflächigen Belegung der transparenten Wand mit nichttransparenten porösen Schallabsorbent (Mineralwolle, offenzelliger Schaum, poriger Glasschaum [9]). Konkrete Vorschläge [10] sind in Abb. 2 dargestellt, wobei entweder absorbierende Vorsprünge vor einer ebenen Wand oder absorbierende Teilflächen auf einer (z.B. sägezahnförmig) profilierten Wand verwendet werden.

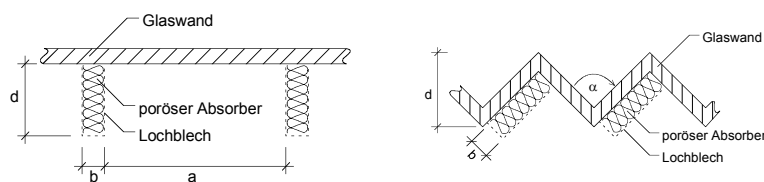


Abb. 2:

Bestehende Lösungsvorschläge für transparente Lärmschutzwände mit schallabsorbierenden Eigenschaften (schematische Darstellung).

Die schalltechnischen Daten zum Vergleich mit den Anforderungen nach Tabelle 2 liegen nicht vor. Anhand von Analogiebetrachtungen und Erfahrungen mit strukturierten Absorbent lässt sich jedoch feststellen, dass bei entsprechender geometrischer Gestaltung und geeigneten Materialien diese Werte erreichbar

sind. In [11] wird z.B. eine Anordnung keilförmiger Absorberpakete vor einer schallharten Rückwand vorgestellt. Aus diesen Ergebnissen können einige vorläufige Hinweise für die Auslegung bzw. Belegung von transparenten schallharten Wänden mit nichttransparenten porösen Absorbern abgeleitet werden:

- Absorberdicke ≥ 100 mm,
- Flächenbelegung ≥ 50 %
- Absorberteilflächen $\geq 0,1$ m² (z.B. streifenförmig).

Zusätzlich sind in Abb. 3 und **Bild 2** der Aufbau und die Wirksamkeit ebener Schichten bzw. Flächen aus porösen Absorbern gegenübergestellt.

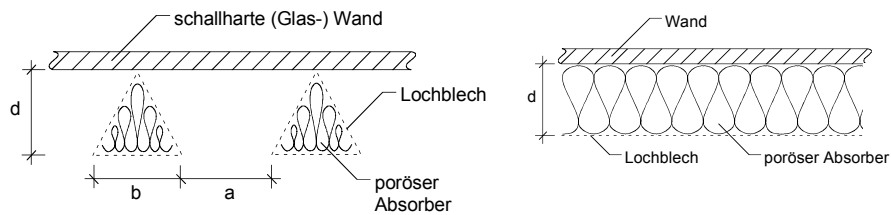


Abb. 3:

Absorberkeile (offenzelliger Schaum, mit Rieselschutz und perforierter Kunststoffolie abgedeckt) nach und ebene Absorberflächen vor schallharter Wand (a = 570 mm; b = 330 mm; d = 290 mm).

Eine z.B. keil-, wellen- oder säulenförmige Strukturierung der Absorberoberflächen trägt zur Erhöhung der Absorptionswirkung bei [12] [13]. Als Materialien kommen Mineralwolle, offenzellige (PU- oder Melaminharz-) Schäume aber auch haufwerksporige Materialien in Frage, die einen Strömungswiderstand von ca. 10 bis 20 kPa s/m² aufweisen. Die mechanische Empfindlichkeit dieser Materialien erfordert in der Regel eine entsprechende Schutzabdeckung (Lochblech, Rieselschutz). Die schützende gelochte oder geschlitzte Abdeckung kann auch aus Glas- oder transparentem Kunstglas bestehen und einen ebenen Abschluss der teilflächig porösen Absorberschicht bilden, Abb. 4.

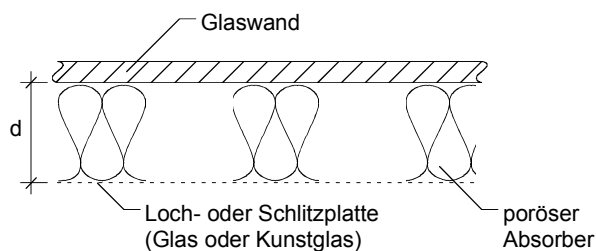


Abb. 4:

Ebene transparenter Abschluss auf verteilten porösen Absorberabschnitten vor schallharter Wand (schematische Darstellung).

Die erreichbare Transparenz der resultierenden Lärmschutzwand würde unter die Stufe E nach Tabelle 5 fallen. Die Lichtdurchlässigkeit hängt von der Flächenbelegung mit Absorbern sowie von deren Dicke und Struktur ab.

Eine zumindest konzeptionell untersuchte Lösung für transparente Lärmschutzwände bezieht so genannte aktive oder Antischall-Systeme ein [11], [7]. Mit Hilfe meist zahlreicher elektroakustischer Komponenten, wie Mikrofonen, Lautsprechern und elektronischen Regelungseinrichtungen, wird der einfallenden Schallwelle auf beiden Seiten der Wand eine gegenphasige Schallwelle gleicher Amplitude sozusagen destruktiv überlagert. Im Ergebnis soll eine gegenseitige Auslöschung der einfallenden und künstlich erzeugten Schallwellen stattfinden, Abb. 5. Diese und ähnliche Versuche erfordern bislang jedoch einen erheblichen technischen Aufwand und erreichen mit zunehmender Frequenz auch physikalische Grenzen. Belastbare Daten zur akustischen Wirksamkeit liegen nicht vor.

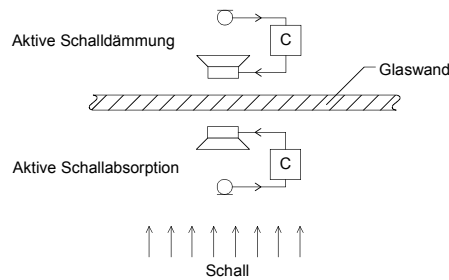


Abb. 5:
Prinzipdarstellung für Lärmschutzwände mit aktiv erhöhter Schalldämmung und -absorption.

4 Transparente Schallabsorber – Wirkprinzipien und Möglichkeiten

Die anwendungsreife Palette transparenter Absorberbauteile ist durchaus reichhaltig und kann in der Raumakustik mittlerweile als Standard betrachtet werden. Je nach Anspruch an die Lichtdurchlässigkeit bzw. Durchsichtigkeit Tabelle 5 lassen sich unter Nutzung der entsprechenden Wirkprinzipien unterschiedlich transparente schallabsorbierende Vorsatzkonstruktionen für schalldämmende Wände entwerfen und umsetzen.

4.1 Poröse Absorber

Die dissipative Wirkung der Mehrheit poröser Absorber [14], [15] beruht in erster Linie auf Materialeigenschaften wie Strömungswiderstand, Dichte, Porosität und Strukturfaktor.

Die akustische Wirkung wird zusätzlich durch die Dicke des Materials sowie gegebenenfalls durch einen rückseitigen Wandabstand und eine vorderseitige Abdeckung bestimmt. Während Mineralwolle, Stahlwolle, geflockte bzw. verwobene Naturfasern oder offenzellige Schäume lichtundurchlässig sind, gibt es auch poröse Stoffe mit einer gewissen Lichtdurchlässigkeit:

- haufwerksporige Materialien, z.B. gebundene oder ungebundene Schüttungen aus Glasgranulaten mit einer geeigneten Korngrößenverteilung,

- dünne Gewebe (ein- oder mehrlagig) insbesondere aus transparenten Kunststofffasern mit geeignetem Strömungswiderstand und rückseitigem Wandabstand,
- vielfach gefaltete oder regelrecht gestopfte perforierte Folie aus transparentem Kunststoff.

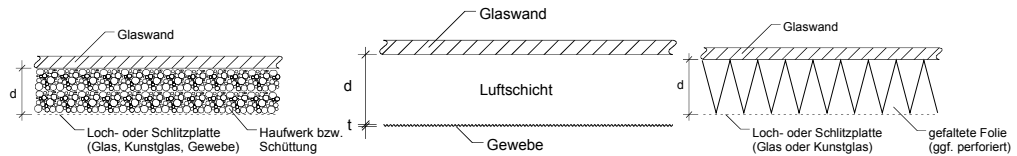


Abb. 6:
Schematische Darstellung lichtdurchlässiger poröser Schallabsorber (-systeme).

In Abb. 6 ist der jeweilige Aufbau dieser Beispiele schematisch dargestellt. Als Anhaltspunkt für die Schallabsorption eines Glaskugel-Haufwerks sind in **Bild 3** Messwerte mit einem gesinterten Granulat (REAPOR) aus Recycling-Glas dargestellt, das in dieser Form lichtundurchlässig ist. Die Absorption der 50 mm dicken Schicht verfehlt zwar bei tiefen Frequenzen die geforderten Werte, mit steigender Schichtdicke ließe sich diese Unterschreitung jedoch verhindern. Die angegebenen Materialeigenschaften können als Richtwerte für Schüttungen aus transparenten Glaskugeln betrachtet werden. Die erreichbare Lichtdurchlässigkeit sinkt natürlich mit steigender Schichtdicke. Als maximale Transparenz ist die Stufe D nach Tabelle 5 zu betrachten, konkrete Angaben zum Lichttransmissionsgrad liegen hierzu jedoch nicht vor.

Auch bei der Verwendung dünner Gewebelagen, die z.B. aus transparenten Kunststofffasern als Strömungswiderstand vor einem Luftvolumen, sind akustische Vorteile und lichttechnische Nachteile eng miteinander verbunden. In **Bild 4** ist die Schallabsorption eines Gewebes mit zwei unterschiedlichen Wandabständen gezeigt. Aus diesen Ergebnissen lassen sich hinsichtlich der Anforderungen nach **Tabelle 2** folgende Konsequenzen ableiten:

- Wandabstand > 100 mm,
- spezifischer Strömungswiderstand > 250 Pa s/m, d.h. bei einer Dicke von 1 mm einen längenbezogenen Strömungswiderstand von 250 kPa s/m²
- kassettiertes Rückvolumen,
- mindestens zweilagig.

Durch den hohen Strömungswiderstand und mehrere Gewebelagen wird bei den bekannten Materialien die Lichtdurchlässigkeit allerdings stark eingeschränkt. Auch hier gilt bestenfalls Stufe D nach Tabelle 5 als erreichbare Transparenz.

Zu den ebenfalls wie poröse Absorber wirkenden gefalteten und perforierten Folien liegen bislang weder Mess- noch Rechenwerte zur Absorption bei diffussem Schalleinfall vor. Einige Versuche mit diesen Materialien bei senkrechtem Schalleinfall deuten jedoch eine etwa mit Mineralwolle vergleichbare Wirksamkeit an. Auch hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass unter Umständen die

akustisch notwendige Vielzahl von Stoffübergängen die Lichtdurchlässigkeit zunehmend einschränkt.

4.2 Resonanzabsorber

Während die zugrunde liegenden Wirkprinzipien akustischer Resonanzsysteme bekannt sind, gilt dies angesichts der Gestaltungsvielfalt für die tatsächlichen Ausführungsvarianten nicht ohne weiteres. Eine praktische Verbreitung und Ausführbarkeit mit transparenten Materialien gilt für folgende Resonanzabsorber:

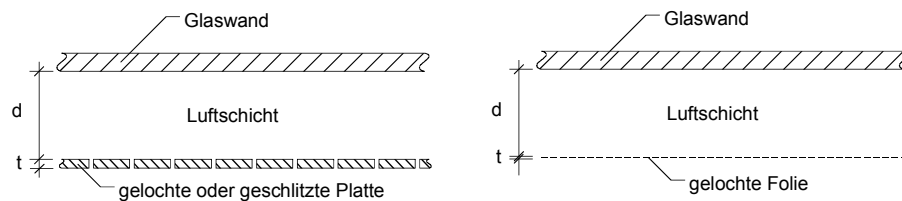


Abb. 7:
Schematische Darstellung des Aufbaus von Helmholtz-Resonatoren (z.B. Mikroperforierte Platte oder Folie mit Wandabstand).

- Helmholtz-Resonatoren [14] [15] [16], Beispiele in Abb. 7,
- Loch- oder Schlitzplatten mit Wandabstand; Funktionsmodell: Luftmasse mit Mündungskorrektur und Luftfeder,
- Loch- oder Schlitzplatten einschließlich Strömungswiderstand (Gewebe etc.) mit Wandabstand; Funktionsmodell: Luftmasse mit Mündungskorrektur, poröse Reibung und Luftfeder [17],
- Mikroperforierte Loch- oder Schlitzplatten mit Wandabstand; Funktionsmodell: Luftmasse mit Mündungskorrektur, viskose Lochreibung und Luftfeder [18] [19] [20] [21],
- Mikroperforierte Folien mit Wandabstand; Funktionsmodell: Luftmasse mit Mündungskorrektur, viskose Lochreibung und Luftfeder [21].

Eine charakteristische Eigenschaft von Einzelresonatoren ist deren zwar hohe aber schmalbandige Absorption im Bereich der Resonanzfrequenz(en). Obgleich die Bandbreite mit zusätzlich integrierter Reibung erweitert werden kann, bleiben z.B. die Anforderungen nach **Tabelle 2** unerreichbar. Dies veranschaulicht die Schallabsorption mikroperforierter Blechplatten (einlagig) mit 200 mm Wandabstand, die als Helmholtz-Resonator mit inhärenter Reibungsdämpfung wirken. Messung und Rechnung zeigen gleichermaßen den Abfall der Absorption beiderseits des Resonanzmaximums. Eine breitbandigere Wirkung ist mit weiteren, vorgeschalteten Lochplatten oder -folien und entsprechenden Luftschichten möglich. Zugleich können mit mikroperforierten Absorbern sowohl ebene als auch in hohem Maße transparente Bauteile (bis Stufe A) realisiert werden.

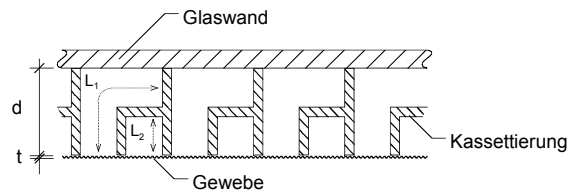


Abb. 8:
Schematische Darstellung des Aufbaus von Wellenleitern bzw. $\lambda/4$ -Resonatoren (z.B. Kombination zweier Hohlkammerlängen L_1 und L_2 und poröse Abdeckung der Mündungen).

- Wellenleiter (bzw. $\lambda/4$ -Resonatoren) [14], Beispiel in Abb. 8,
- Langgestreckte einseitig geschlossene Hohlkammern; Funktionsmodell: Hohlraumeigenschwingungen mit Mündungskorrektur,
- Langgestreckte einseitig geschlossene Hohlkammern einschließlich mündungsseitigem Strömungswiderstand; Funktionsmodell: Hohlraumeigenschwingungen mit Mündungskorrektur und poröser Reibung.

Der Übergang von dieser Art Helmholtz-Resonatoren zu Wellenleitern bzw. $\lambda/4$ -Resonatoren ergibt sich, wenn die ebene(n) Luftschicht(en) hinter den mikroperforierten Platten oder Folien so kassettiert wird, dass Hohlkammern mit unterschiedlicher Länge entstehen. Um auch hierbei nicht bei der Schmalbandigkeit eines Einzelresonators stehen zu bleiben, können mehrere Hohlkammern unterschiedlicher Länge nebeneinander angeordnet werden. Diese Verteilung der Absorption in der Absorberebene funktionierte bereits bei den teilflächig ausgelegten porösen Absorbern. Die Transparenz denkbarer Bauteile sollte ohne Probleme selbst hohen Ansprüchen genügen.

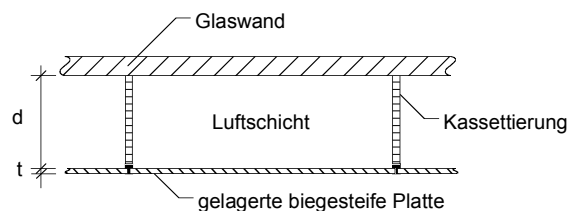


Abb. 9:
Schematische Darstellung des Aufbaus von Plattenschwingern.

- Plattenschwinger [14] [17], Beispiel in Abb. 9,
- Biegesteife Platten mit Wandabstand; Funktionsmodell: modale Plattenimpedanz (Biegeeigenschwingungen) und Luftfeder,
- Biegesteife Platten mit Wandabstand und teilweise Absorberfüllung; Funktionsmodell: modale Plattenimpedanz (Biegeeigenschwingungen) und Luftfeder mit poröser Reibung.

Plattenschwinger eignen sich funktionsbedingt nur zur tieffrequenten Ergänzung von bereits mittel- und hochfrequent wirksamen Absorbern. Da Frequenzen der entscheidenden Biegeeigenschwingungen im wesentlichen von den seitlichen Abmessungen, der Randeinspannung und den elastischen Materialparametern abhängen, benötigen sie dafür vergleichsweise wenig Bautiefe.

Hinsichtlich ihrer Transparenz bestehen nahezu keine Einschränkungen, da eine Reihe von Kunststoffen verwendet werden können.

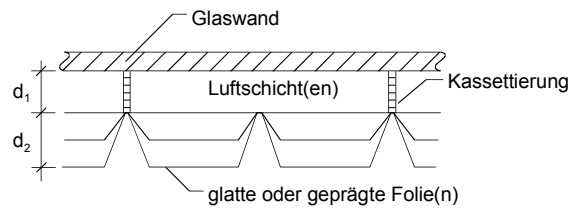


Abb. 10: Schematische Darstellung des Aufbaus von Masse-Feder-Systemen (z.B. mehrlagig Kunststofffolien mit zwischen liegenden Luftfedern und Wandabstand).

- Masse-Feder-Systeme [14] [15] [22], Beispiel in Abb. 10,
- Biege weiche Platten oder Folien mit Wandabstand (Platten- oder Folienmasse und Luftfeder),
- Biege weiche Platten oder Folien mit Wandabstand und teilweise Absorberfüllung (Platten- oder Folienmasse und Luftfeder mit poröser Reibung).

Dass Masse-Feder-Systeme wiederum deutlich höhere Anforderungen an die Absorption erfüllen können, zeigt die breitbandige Schallabsorption in **Bild 5**. Trotz der erkennbar guten Abstimmung der Einzelresonatoren (Folienmasse und Luftschicht) bleiben allerdings schmalbandige Einbrüche zwischen den resonanzbedingten Maxima. Die Transparenz dieses Absorbertyps ist analog zu den mikroperforierten Absorbern relativ hoch zu bewerten.

Für die Mehrheit der vorgestellten Wirkprinzipien gilt im übrigen, dass mit einer Erhöhung der Schalldämmung der Schallschutzwand nur in sehr eingeschränktem Maße zu rechnen ist. Sowohl poröse Materialien, Lochbleche aber auch mikroperforierte Platten können lediglich bei sehr hohen Frequenzen die Schalldämmung geringfügig verbessern [23].

5 Ansätze zur akustischen Optimierung

Unter Berücksichtigung einsatzbedingter Randbedingungen und einer möglichst hohen optischen Transparenz wird aus den oben genannten Wirkprinzipien der Fokus auf mikroperforierte Absorberkonstruktionen gelegt. Es wurden fünf rein perforierte Varianten und drei kombinierte Varianten entworfen. Die ersten sind:

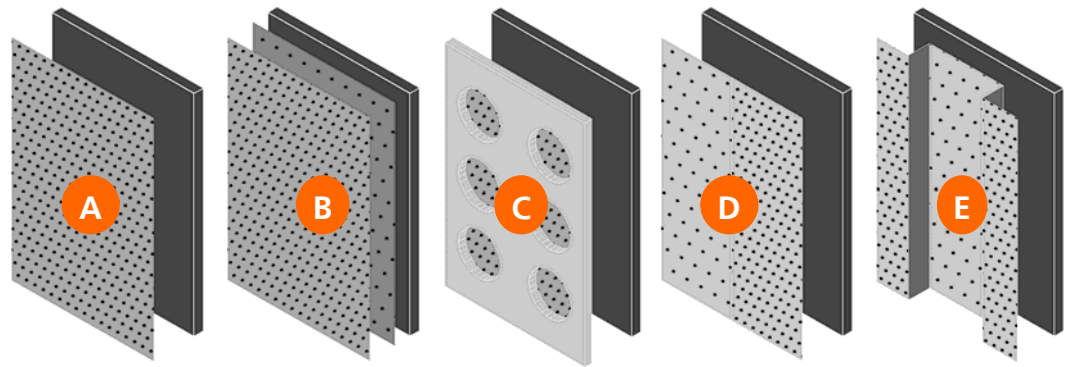


Abb. 11:
Ansätze zur akustischen Optimierung (A bis E)

A und B sind ein- bzw. mehrlagige transparente MPA vor einer transparenten Wand. Hier könnten die MPA aus Kunstglas hergestellt werden. In C könnte die MPA Schicht aus einer dünneren Folie hergestellt werden; sie wird durch eine Makroperforation geschützt. Die Variante D besteht aus verschiedenen MPA-Lagen in einer Ebene. Und E ist durch versetzte MPA-Lagen gekennzeichnet.

Übliche Lärmschutzwandkonstruktionen weisen aus statischen Gründen Pfosten und Streben aus. Diese sind in der Regel nicht transparent, bieten sich aber als akustische Ergänzung an. So können die in 4.2 angedeuteten Schwächen der MPA teilweise kompensiert werden. Die kombinierten Varianten sind:

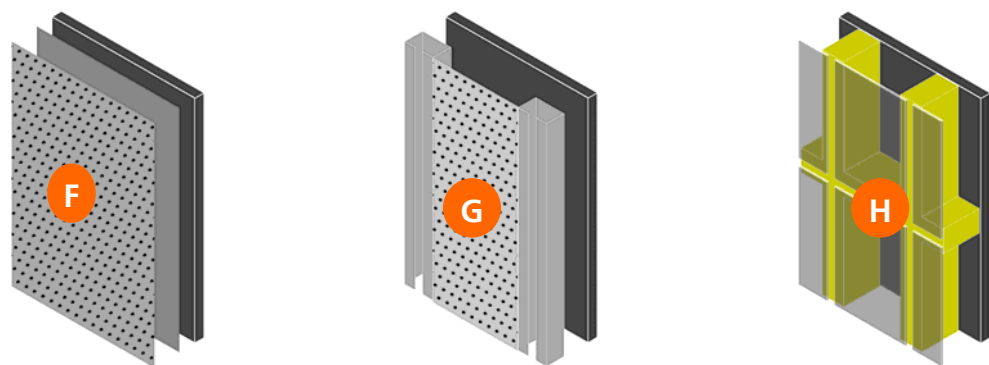


Abb. 12:
Ansätze zur akustischen Optimierung (F bis H)

F ist die Kombination einer MPA-Lage mit einem Plattenschwinger. In G werden die Stützen als Helmholtz-, $\lambda/4$ -Resonator, oder als poröser Absorber gebildet und in H werden Stützen und Streben als poröser Absorber gestaltet. In den Varianten G und H wird das Streufeld durch die periodisch angeordneten Absorber ausgenutzt. Dadurch entsteht eine vergleichsweise höhere Absorption als ein Flächenmittel vermuten lässt.

Die Funktion der Schalldämmung wird durch die Ebene übernommen, die auch die statischen Lasten abträgt, siehe **Abb. 7**. Für übliche Kunstglas- oder Glasscheiben sind bewertete Schalldämm-Maße größer 30 dB zu erwarten.

Die Schalldämmung der Basis-Wand kann nach 3.1 z.B. mit einer 25 mm Acrylglas-Platte leicht erfüllt werden. Die nachfolgende Arbeit konzentriert sich deshalb darauf, wie die transparente und absorbierende Vorsatzschale ein hohes Absorptionsvermögen, z. B. Gruppe A3 in **Tabelle 3**, erreichen kann.

6 Beurteilungsmethoden und -werkzeuge

6.1 Rechnerische Parametervariation

Am Fraunhofer IBP sind Verfahren entwickelt und optimiert worden, um den Schallabsorptionsgrad α_0 der unter Kap. 5 gezeigten, Konstruktionen abzuschätzen. Aus der Vielzahl der durchgeführten Variationen werden hier die gezeigt, die die Möglichkeiten der Konstruktionen aufzeigen. Das Rechenmodell beschränkt sich hierbei auf den Fall des senkrechten Schalleinfalls.

6.2 Absorptionsgrad

Als Schallabsorption wird die Umwandlung von Schallenergie in Wärme bezeichnet. Der Schallabsorptionsgrad α kann aus dem Reflexionsfaktor r wie folgt berechnet werden:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2)$$

Der Reflexionsfaktor r kann auch aus der komplexen Wandimpedanz Z abgeleitet werden, da diese das Hindernis (z.B. Lärmschutzwand) akustisch gänzlich beschreibt. Für senkrechten Schalleinfall gilt:

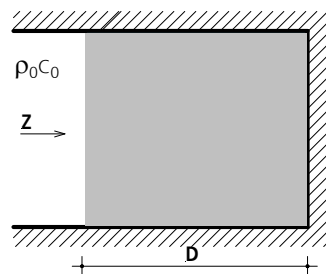


Abb. 13:
Schema einer Absorptionsstruktur mit Eingangsimpedanz Z .

$$r = \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

$$\text{mit } Z_0 = \rho_0 c_0 = 1,2 \text{ kg m}^{-3} \cdot 343 \text{ m s}^{-1} = 413 \text{ Pa s m}^{-1}$$

Die Absorption wird am größten, wenn die Wandimpedanz optimal an die Schallkennimpedanz der Luft angepasst ist: $Z = \rho_0 c_0$, somit $r = 0$.

Für diffusen Schalleinfall kann der Schallabsorptionsgrad nach

$$\alpha_s = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\Theta) \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \quad (3)$$

ermittelt werden, wobei Θ den Schalleinfallswinkel in Bezug auf die Wandnormale darstellt.

6.3 Poröse Absorber

An den aus statischen Gründen vorhanden Pfosten können eventuell poröse Materialien angebracht werden. Deshalb wird in diesem Zusammenhang ein Rechenmodell für poröse Absorber berücksichtigt.

Die Faserbauteile bestehen hauptsächlich aus Luft und einem mehr oder weniger beweglichen Skelett. In der Luftschicht breiten sich Luftschallwellen aus, die während ihrer Ausbreitung gedämpft (absorbiert) werden. Auch das Skelett schwingt (je nach Steifigkeit und Trägheit) mit und trägt damit zur Schalldämpfung bei. Als Ausgangspunkt wird in diesem Vorhaben ein bewährtes Modell, welches zusätzlich zur Dämpfung in den Luftporen auch das mitschwingende Skelett berücksichtigt, verwendet. Es ist bereits für künstliche Faser- und Schaumbauteile erfolgreich angewendet worden [14].

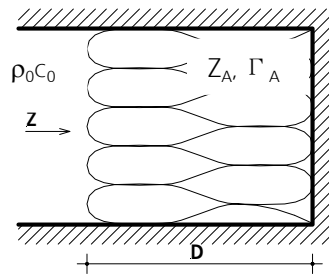


Abb. 14:
Schema eines porösen Absorbers.

Um die Schallabsorption einer homogenen Schicht zu berechnen, müssen die Ausbreitungskonstante Γ_A und der Wellenwiderstand Z_A der Schicht, aus den bekannten Parametern, berechnet werden.

Die Ausbreitungskonstante Γ_A in einer homogenen Faserschicht kann wie folgt berechnet werden:

$$\Gamma_A = j \cdot k_0 \sqrt{\frac{\kappa + jE_{\text{eff}}/E_0}{1 + jE_{\text{eff}}/E_0}} \left(\chi - j \frac{\sigma_v}{2\pi E_{\text{eff}}} \right) \quad (4)$$

und der Wellenwiderstand Z_A in einer homogenen Faserschicht folgendermaßen berechnet werden:

$$Z_A = \frac{Z_0}{\sigma_v} \sqrt{\frac{1 + jE_{\text{eff}}/E_0}{\kappa + jE_{\text{eff}}/E_0} \left(\chi - j \frac{\sigma_v}{2\pi E_{\text{eff}}} \right)} \quad (5)$$

mit:

$$E_{\text{eff}} = \frac{\rho_0 f}{\Xi} - j \frac{\rho_0}{2\pi \rho_a} \quad (6)$$

Die Wandimpedanz (Widerstand an der Oberfläche des porösen Materials, den die Schallwelle „sieht“) des Faserbauteils wird nach

$$Z = Z_A \coth(\Gamma_A D) \quad (7)$$

berechnet.

D	Dicke der Absorber Schicht
κ :	Adiabatexponent für Luft (= 1.4);
χ :	Strukturfaktor;
σ_v :	Volumen-Porosität des Absorbermaterials
ρ_0 :	Dichte der Luft;
ρ_a :	Dichte des Absorberskeletts;
f:	Frequenz;
$k_0 = 2 \pi f / c_0$	Wellenzahl
$Z_0 = \rho_0 c_0$	Schallkennimpedanz der Luft
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft
Ξ :	längenbezogener Strömungswiderstand des Absorbermaterials

6.4 Plattenresonatoren

Plattenresonatoren sind physikalisch gesehen Feder-Masse-Systeme, wobei die schwingende Platte (Folie oder Membran verstehen sich als eine Masse ohne eigene Innenspannung bzw. biegesteife) als Masse und der eingeschlossene Luftraum hinter der Platte als Feder fungiert. Als einschichtiger Plattenresonator versteht man eine biegesteife Platte mit einem dahinter liegenden, schallhart abgeschlossen Luftvolumen der Dicke D.

Im Folgenden werden quadratische Platten betrachtet. Die Impedanz Z ergibt sich entsprechend der „Additionsregel für Impedanzen“ [24] additiv aus einem Anteil Z_p , welcher sich aus den Impedanzen der Eigenschwingung der Platte zusammensetzt und einer Transferimpedanz Z_T , welche die Wirkung des schallhart abgeschlossenen Luftvolumens berücksichtigt. Die Gesamtimpedanz Z für senkrechten Schalleinfall ergibt sich zu:

$$Z = Z_p + Z_T, \quad (8)$$

wobei nach [42]

$$Z_p = \frac{1}{\sum_m \sum_n \frac{1}{Z_{mn}}} \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \quad (9)$$

und nach [42] für die Transferimpedanz (= Impedanz der am Ende schallhart abgeschlossenen Luftschicht der Dicke D am Ort der schwingenden Platte)

$$Z_T = -j\rho_0 c \cdot \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) \quad (10)$$

einzusetzen ist.

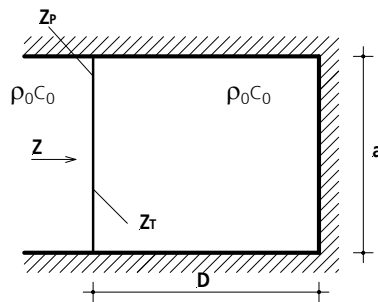


Abb. 15:
Schema eines Plattenabsorbers.

Die einzelnen Impedanzen Z_{mn} der Platteneigenschwingungen sind parallel geschaltet und ermitteln sich wie folgt:

$$Z_{mn} = \frac{B' B_{mn} g_{mn}}{\omega \cdot a^4} + j \left[\omega \cdot m'' A_{mn} - \frac{B' B_{mn}}{\omega \cdot a^4} \right] \quad (11)$$

$$\text{mit } B' = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \mu_p^2)} \quad (12)$$

$$\text{und } A_{mn} = m^2 n^2 \pi^4 \frac{1}{64}, \quad B_{mn} = (m^2 + n^2)^2 \pi^4 A_{mn} \quad (13)$$

Hierin bedeuten:

B'	Biegesteife der Platte
A_{mn}, B_{mn}	Konstanten, von der Platteneinspannung abhängig
g_{mn}	Verlustfaktor der Moden (m,n)
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz
m''	Flächenbezogene Masse der Platte
E	Elastizitätsmodul des Plattenmaterials
t	Dicke der Platte

a	Seitenlänge
μ_p	Poissonsche Querkontraktionszahl

6.5 Lochplattenresonatoren

Die Impedanz eines Lochplattenresonators lässt sich wie beim Plattenresonator, aus zwei verschiedenen Anteilen zusammensetzen. Zum einen die Impedanz Z_L der Lochplatte und zum anderen der Transferimpedanz Z_T der dahinterliegenden, schallhart abgeschlossenen Luftschicht. Die Impedanz der Gesamtkonstruktion ergibt sich zu:

$$Z = Z_L + Z_T. \quad (14)$$

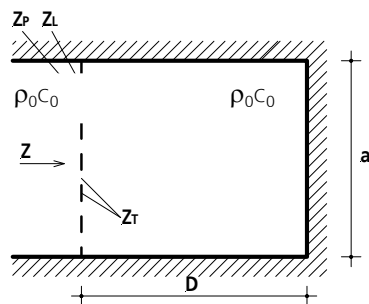


Abb. 16:
Schema eines Lochplattenabsorbers.

Die Transferimpedanz Z_T ist entsprechend Glg. (10) zu berechnen. Für die Berechnung der Impedanz der schwingungsfähigen Lochplatte muss vorab die Impedanz Z_h der Luftpfropfen in den Löchern (nach [18], wie folgt ermittelt werden:

$$Z_h = \rho_0 c \left[\frac{32 \mu}{\varepsilon} \frac{t}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{x \sqrt{2}}{8} \frac{d}{t} \right) + j \frac{\omega t}{\varepsilon c_0} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 0,85 \frac{d}{t} \right) \right] \quad (15)$$

wobei sich der dimensionslose (auf die Grenzschichtdicke bezogene) Lochradius x durch

$$x = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}} \frac{d}{2} \quad (16)$$

bestimmen lässt. Darin bedeuten:

d	Lochdurchmesser
b	Lochabstand

$$\varepsilon = \frac{\pi d^2}{4 b^2} \quad \text{Lochflächenanteil}$$

$$\mu \quad \text{Kinematische Zähigkeit der Luft } (\mu = 1,56 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$$

Wenn es sich um ein gut wärmeleitendes Plattenmaterial handelt, treten zusätzliche Verluste auf, die durch eine Erhöhung der kinematischen Zähigkeit in Glg. (17) berücksichtigt werden.

$$\mu \rightarrow \mu + \Delta\mu \quad \text{mit } \Delta\mu \approx 3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ (bei Metall)} \quad (18)$$

Unter der Voraussetzung, dass sich die Biegesteife der Platte durch das Einbringen der Löcher nicht verändert, kann die Impedanz Z_L der schwingungsfähigen Lochplatte aus der akustischen Parallelschaltung der Teilimpedanzen Z_p (schwingungsfähige Platte) und Z_h (Luft in den Löchern) folgendermaßen berechnet werden:

$$Z_L = \frac{Z_p Z_h}{Z_p + Z_h}, \quad (19)$$

wobei für Z_p die Glg. (9) und für Z_h die Glg. (15) zu verwenden sind. Die Gesamtimpedanz der Konstruktion ergibt sich durch Einsetzen der Glg. (10) und Glg. (18) in Glg. (14).

Die Absorptionsgrade dieser einschichtigen Resonatoren weisen neben relativ schmal ausgeprägten Absorptionsmaxima auch starke Einbrüche zwischen den einzelnen Resonanzspitzen auf. Durch eine raffiniert gewählte, mehrschichtige Konstruktion schwingungsfähiger Lochplatten kann die Tiefe der Einbrüche reduziert werden. Zu beachten ist dabei, dass die verschiedenen geometrischen und stofflichen Parameter mit Hinblick auf ein möglichst breitbandiges Absorptionsvermögen ausgelegt sind, d.h. dass alle Resonanzen eine hohe Absorption erzeugen und jeweils nicht zu weit auseinander liegen. Bei den erzeugten Absorptionsmaxima ist darauf zu achten, dass die höchsten Frequenzanteile vor allem in der (vom Raum her gesehen) ersten und die tiefsten Anteile insbesondere in der letzten Schicht absorbiert werden.

6.6 Mehrschichtige Resonanzabsorber

Bei mehrfach geschichteten Resonanzabsorbern werden die einzelnen Schichten für die Berechnung der Impedanz zerlegt, so dass jeweils ein einschichtiger Resonator entsteht. Der Abschluss der Luftvolumina dieser einzelnen Teilsysteme werden nicht mehr prinzipiell schallhart, sondern zur Generalisation durch eine Impedanz Z_1 einer begrenzenden Ebene abgeschlossen. Diese beschreibt das akustische Verhalten der hinter der begrenzenden Ebene liegenden anknüpfenden Absorptionsschicht. Die Berechnung der Gesamtimpedanz Z erfolgt analog zu der in den vorigen Abschnitten angewendeten Berechnungsweise. Es ist lediglich eine modifizierte Transferimpedanz anstelle von der angegebenen Transferimpedanz in Glg. (10) einzusetzen, welche die Wirkung der begrenzenden Ebene, des mit der Impedanz Z_1 abgeschlossenen Luftvolumens, am Ort unmittelbar hinter der schwingenden Platte bzw. Lochplatte beschreibt. Die

modifizierte Transferimpedanz (ebenfalls mit Z_T bezeichnet) ist nach [42] wie folgt definiert:

$$Z_T = \rho_0 c \frac{-j \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) Z_1 + \rho_0 c_0}{-j \rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) + Z_1} \quad (20)$$

Besteht der Resonanzabsorber aus mehreren Schichten (Abb. 17), dann ist die Transferimpedanz rekursiv zu ermitteln.

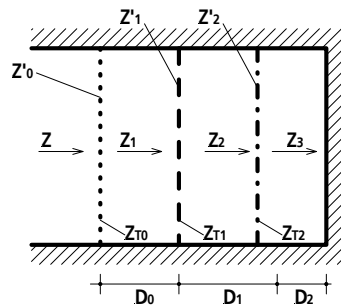


Abb. 17:
Schema einer mehrschichtigen MPA-Anordnung.

Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Platten bzw. Lochplatten die Trennimpedanzen $Z'_0, Z'_1, Z'_2 \dots$ aufweisen, die sich bei Platten entsprechend Glg. (9), bei „starken Lochplatten“ mittels Glg. (15) und bei „schwingungsfähigen Lochplatten“ nach Glg. (18) bestimmen lassen, dann lautet die Rekursionsformel für die Impedanz einer mehrschichtigen Resonanzabsorber-Anordnung allgemein:

$$Z_m = Z'_m + Z_{Tm} \quad (21)$$

mit

$$Z_{Tm} = \rho_0 c \frac{-j \cot\left(\frac{\omega D_m}{c_0}\right) Z_{m+1} + \rho_0 c_0}{-j \rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega D_m}{c_0}\right) + Z_{m+1}}, \quad m = 0 \text{ bis } m_{\text{ges}} - 1. \quad (22)$$

Dabei bezeichnet m_{ges} die Anzahl der Schichten der Gesamtanordnung und Z_m die Eingangsimpedanz, mit der die (m-1)te Schicht abgeschlossen ist, $Z_{m_{\text{ges}}}$ die Eingangsimpedanz des schallharten Abschlusses und D_m die Luftschichtdicke der (m-1)ten Schicht.

6.7 Nebeneinander liegende Absorberflächen

Die Berechnung der nebeneinander liegenden Absorberflächen erfolgt in Analogie zur Elektrotechnik. Zunächst wurde die Impedanz der jeweiligen Absorberfläche einzeln ermittelt (Z_1, Z_2 mit entsprechenden Flächen von S_1 und S_2). Die Gesamtimpedanz Z ergibt sich aus der akustischen Parallelschaltung dieser beiden flächenbewerteten ($\sigma_1; \sigma_2$) Impedanzen gemäß Glg. (22).

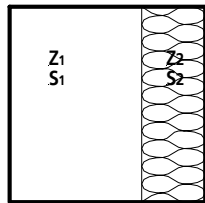


Abb. 18:
Aufsicht eines nebeneinander liegenden Absorbers.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{(1 - \sigma_1)\underline{Z}_1 + \sigma_1 \underline{Z}_2} \quad (23)$$

Mit $\sigma_1 = S_1/(S_1+S_2)$, und $\sigma_2 = S_2/(S_1+S_2)$ und $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$

Durch Ausnutzung der nebeneinander liegenden Absorptionsflächen, wie Pforten oder Sockelstellen können die Absorptionsvermögen einer Lärmschutzwand optimiert werden.

6.8 Rechenbeispiele und theoretische Optimierungen

Im nun folgenden Teil wird auf Grundlage der vorher beschriebenen Theorie der Schallabsorptionsgrad von den im Kapitel 6 dargestellten Ansätzen (**Abb. 11** und **Abb. 12**) modelliert. Diese Modellierung wird anschließend im experimentellen Teil noch mit messtechnisch ermittelten Absorptionswerten bei senkrechtem Schalleinfall verglichen, weshalb bei der Modellierung nur solche Elemente herangezogen wurden, die tatsächlich auf dem Markt zu haben sind.

Tabelle 6:
Materialparameter für die theoretische Modellierung

Bezeichnung	Material	Dicke t [mm]	Loch-abstand b [mm]	Loch-durchmesser d [mm]	Loch-anteil [%]	E-Modul [MPa]	Dichte [kg/m³]
Gitter	Stahl	2	30 x 30	25	69.5	210000	7800
Makro	Acrylglas	5	10 x 10	8	50.2	3000	1150
ETFE-Folie	ETFE	0.14	2 x 2	0.17	0.57	1200	1700
PC-Folie	PC	0.44	6 x 6	0.4	0.35	5500	1400
Folie (ungelocht)	PET	0.19	--	--	--	3800	1400
Wabenplatte	PET	1	1.8 x 1.8	0.25	1.5	3300	1300

PET1-Folie	PET	1.5	5 x 5	0.4	0.64	3300	1300
PET2-Folie	PET	0.65	1.8 x 1.8	0.4	3.88	3300	1300

Die gewählten Absorber sind in Tabelle 6

mit ihren wichtigsten Parametern für die Modellierung charakterisiert und in Abb. 19 bildlich dargestellt:

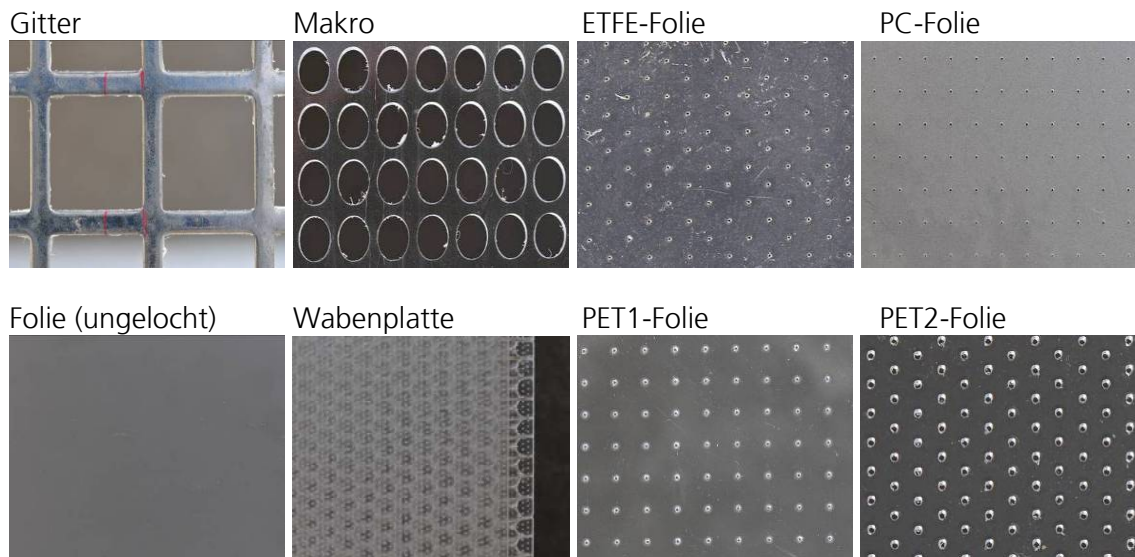


Abb. 19:
Absorber für die Modellierung.

Die Bestimmung der Parameter erfolgte auf unterschiedliche Art und Weise. Die Foliendicke wurde mittels Messschieber bestimmt und ist sehr genau definierbar. Bei den Lochabständen konnten die Herstellerangaben übernommen werden, da diese mit den messtechnisch ermittelten Werten exakt übereinstimmten. Die Lochdurchmesser wurden unter dem Mikroskop (Abb. 20) ermittelt und weichen von den Herstellerangaben teils deutlich ab, sie sind im Allgemeinen kleiner als angegeben.

Bei der Betrachtung der mikroperforierten Folien unter dem Mikroskop fiel zudem auf, dass die Lochdurchmesser einer teils starken Streuung unterliegen, speziell bei Folien die über mit heißen Nadeln bestückte Walzen mikroperforiert werden. So wurden bei der ETFE-Folie Lochdurchmesser von 0.12 bis 0.19 mm gemessen (für die Berechnung wurde unterm Mikroskop ein mittlerer Lochdurchmesser von 0.17 mm bestimmt).

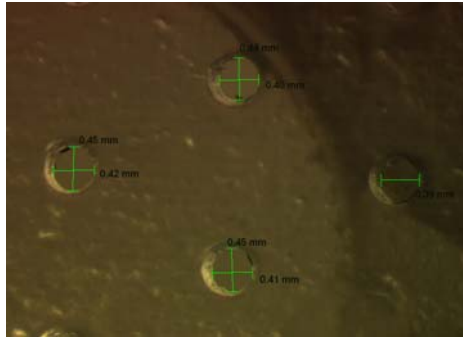


Abb. 20:
Mikroskopische Aufnahme der Löcher einer mikroperforierten Folie.

Zu erklären ist dies damit, dass sich der geschmolzene Kunststoff nach entfernen der heißen Nadel undefinierbar zusammen zieht und dabei nicht kreisförmige Lochgeometrien ausbildet. Diese Art des Einbringens der Löcher in die Folie verändert aber nicht nur den sich ausbildeten Lochdurchmesser, sondern auch die Foliendicke im Bereich der Löcher, weil die Nadeln beim Durchdringen und Schmelzen der Folie Kunststoff mitreißen, der nach Entfernung einen Grat in Eindringrichtung entstehen lässt. Bei der ETFE-Folie, welche an den ungelochten Stellen 0.1 mm stark ist, ergibt sich bei den Löchern eine Foliendicke (inkl. Grat) von 0.17 mm (Berechnung erfolgt mit $t = 0.14$ mm). Ähnlich Probleme, jedoch nicht so stark ausgeprägt, sind auch bei der PET2-Folie anzutreffen. Für die Modellierung musste die Mündungskorrektur in Glg. 15 angepasst werden.

Im Fall der Folien (z.B. PC- oder PET1-Folie), die mittels Stanzung perforiert sind, wiesen die geometrisch runden Lochdurchmesser Schwankungen in einer Größenordnung von 0.02 mm auf, bei jedoch deutlich größeren Lochdurchmessern. Ein Grat im Lochbereich bildet sich bei dieser Methode nicht aus.

Für die Modellierung wurden die allgemeinen Parameter (E-Modul, Dichte) der Stoffe aus Kap. 11.1 gewählt. Gesondert wird hier auch, soweit es möglich war, die Eigenschaften und das Verhalten des jeweiligen Materials für den Außeneinsatz beleuchtet.

Eine typische Eigenschaft von Einzelresonatoren ist deren zwar hohe aber relativ schmalbandige Absorption im Bereich der Resonanzfrequenz, insofern sind die Anforderungen nach Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 unerreichbar. Dies verdeutlicht die Schallabsorption einer mikroperforierten PET-Folie (einlagig) mit 100 mm (---) und 50 mm (—) Wandabstand (**Bild 6**), die als Helmholtz-Resonator mit inhärenter Reibungsdämpfung wirkt. Die berechneten Kurven zeigen den Abfall der Absorption beiderseits des Resonanzmaximums. Da in einem solchen „Flächengebilde“ mit einem Perforationsgrad von $> 1\%$ die Hohlraumresonanzen offenbar gut angeregt werden, kann das Maximum der Absorption des MPA mit wachsendem Wandabstand D zu tiefen Frequenzen verschoben werden.

Die in **Bild 7** demonstrierten Absorptionsgrade von zwei weiteren mikroperforierten Folien, mit jeweils 10 cm Wandabstand, zeigen indes zwei völlig ver-

schiedene Verläufe. Die PC-Folie mit ihrem Resonanzmaximum zwischen 300 und 400 Hz, ist hinsichtlich ihrer in **Tabelle 6** definierten Folienparameter optimal ausgelegt. Im Gegensatz dazu, ist die PET2-Folie aufgrund ihres relativ großen Lochanteils von 3.9% unterdämpft. Der Realteil von Z/Z_0 ist in diesem Fall kleiner als 1. Eine Optimierung der Wirkung der PET2-Folie könnte erreicht werden, wenn der Lochabstand auf 5 x 5 cm vergrößert würde (resultierender Lochanteil 0.5%). Das dadurch entstandene Resonanzmaximum würde laut Rechnung einen ähnlich Verlauf wie bei der PC-Folie aufweisen.

Durch ein weitmaschiges Stützgerüst können auch dünnere Folie in Form gehalten und so am Mitschwingen bei Frequenzen unterhalb des Resonanzmaximums gehindert werden. Das Mitschwingen der Folie bzw. Platte kann in Folge des so genannten „Kurzschluss durch Schwingung des Luftpfropfens“ das Absorptionsverhalten des mikroperforierte Elementes verschlechtern. Ein Beispiel hierfür ist in **Bild 8** mittels einer 0.14 mm starken ETFE-Folie aufgezeigt. Es ist erkennbar, dass die Fixierung der Folie auf das Gitter (- - -) im Gegensatz zur unfixierten Folie (—) keinen entscheidenden Vorteil bringt. Die Abmessung der einzelnen fixierten Folienelemente ist höchstwahrscheinlich noch zu groß. Bei der Berechnung wurde eine Größe der durch die Verklebung resultierenden Folienelemente von 25 x 25 mm zugrunde gelegt, welche der Lochgröße der Abdeckung gleichkommt.

Erst beim Einsatz der Makro-Struktur als Stützgerüst (.....) wird bei Frequenzen, welche unterhalb des Maximums liegen, eine deutlich Verbesserung (bei 250 Hz Absorptionsgraderhöhung von 0.4 Punkten) erreicht, ohne dabei jedoch im Frequenzbereich oberhalb der Resonanzfrequenz Absorption einzubüßen. Der MPA-Folienabsorber hat durch die Verklebung auf die Makro-Struktur erheblich an Breitbandigkeit gewonnen. Als Rechengrundlage wurde die Versteifung der Folie mit 6 x 6 mm angesetzt.

Eine breitbandigere Wirkung als mit einlagigen, durch ein Stützgerüst fixierten mikroperforierten Folien ist mit weiteren, vor- bzw. nachgeschalteten Lochplatten oder -folien und entsprechenden ausgelegten Luftschichten möglich (**Bild 9**).

Hierbei ergänzen sich die jeweiligen Maxima der nacheinander geschalteten MPA-Elemente. Dabei ist zu beachten, dass die Resonanzmaxima der Folien nicht zu weit auseinander liegen, um eine breitbandige Wirkung zu erlangen. Bei der zweilagigen Konstruktion aus Gitter mit ETFE-Folie und PC-Folie (—) ist dies gut gelungen, das Resonanzmaximum der ETFE-Folie bei 1 kHz und das der PC-Folie bei ca. 360 Hz sind deutlich zu erkennen. Bei der Wabenplatte (- - -) wird zum einen das Maximum bei 1 800 Hz deutlich, was auf Grund der geringen Luftschicht (1.8 cm) zwischen den beiden Folien bei sehr hohen Frequenzen anzutreffen ist und das der zweiten Folien bei etwa 360 Hz. Die sehr breitbandige Form des Resonanzmaximums (auch im tiefen Frequenzbereich) rührt daher, dass die Waben zwischen den Folien diese wie ein Stützgerüst fixieren und so am Mitschwingen hindern. Die Kassettierung der Folien wurde in der Berechnung mit 0.6 x 0.6 mm bei quadratischer Geometrie angesetzt, die tatsächliche Kassettierung weist eine runde Form mit einem Durchmesser von 0.7 mm auf.

Bei der dreilagigen Konstruktion (.....) wird der Einbruch zwischen den beiden Absorptionsgradspitzen der Wabenplatte durch die vorgeschaltete ETFE-Folie mit 3 cm Wandabstand kompensiert. Zu tiefen Frequenzen fällt sie minimal schlechter aus, da die erste Schicht einen geringen Teil der auftreffenden Schallenergie abschirmt (reflektiert).

Die Berechnungsergebnisse für die Ansätze mit verschiedenen MPA-Lagen in einer Ebene, sowie für den Aufbau mit versetzten MPA-Lagen sind in **Bild 10**, **Bild 11** dargestellt. In Bild 10 wurde das Flächenverhältnis der jeweiligen MPA-Konstruktion mit $0,5 : 0,5$ ($\sigma_1 : \sigma_2$) angesetzt, im Fall aus Bild 11 (- - -) betrug es $0,83 : 0,17$ (das verstehe ich nicht). Somit konnte die Impedanz mittels Glg. (23) bestimmt werden und der Absorptionsgrad anschließend über Glg. (2) bestimmt werden.

In den Fällen laut Bild 10 ergänzen sich die beiden MPA-Lagen, insofern ihr Resonanzmaximum bei unterschiedlichen Frequenzen liegt, und erzielen dadurch eine breitbandigere Wirkung als es der Fall ist, wären sie einzeln aufgebaut.

Die Kombination mit porösen Absorbern (Bild 11) führt zu einer Anhebung des Absorptionsgrades durch die periodisch angeordneten Absorber. Somit entsteht eine höhere Absorption, als das Flächenmittel vermuten lässt. Dieser Effekt ist sowohl im kleinen Maßstab bei Impedanzrohrmessungen als auch bei großen Proben im Hallraum nachweisbar.

Plattenschwinger eignen sich funktionsbedingt nur zur tieffrequenten Ergänzung von bereits mittel- und hochfrequent wirksamen Absorbern. Da die Frequenz der Biegeeigenschwingungen hauptsächlich von den seitlichen Abmessungen, der Randeinspannung und den elastischen Materialparametern abhängt (s. Glg. 11), reichen hierfür relativ geringe Bautiefen aus (**Bild 12**).

Im Kap. 11.2 sind für die Kombinationen Makro mit ETFE-Folie und Gitter mit PC-Folie die berechneten Absorptionsverläufe in Abhängigkeit eines veränderbaren Parameters dargestellt. Dies soll den Einfluss der jeweiligen Parameter auf den resultierenden Absorptionsgrad deutlich machen. In Kap. 11.3 ist die Wabenplatte mit unterschiedlich großen Wabendurchmessern abgebildet, um zu zeigen, ob und wie sich eine Vergrößerung der Versteifungselemente auf die sich ausbildende Folienschwingung auswirkt.

7 Experimentelle Untersuchung

Wie unter 2.2 erläutert, werden Lärmschutzwände durch das Schalldämm-Maß und den Schallabsorptionsgrad gekennzeichnet. Die Anforderung an die Schalldämmung einer absorbierenden transparenten Lärmschutzwand ist leicht (z.B. mit 25 mm dicken Acrylglas) umzusetzen. Deshalb lag die Konzentration darauf, eine transparente Struktur mit hohem Absorptionsvermögen zu realisieren. Messungen wurden im Impedanzrohr durchgeführt, um optimierte Strukturen zu selektieren. Ein Prototyp aus Kostengründen nicht transparent ausgeführt, der transparenten Absorberkonstruktion für die Lärmschutzwand wurde aufgebaut, um den Absorptionsgrad im Hallraum für das diffuse Schallfeld, zu

ermitteln. Die Einfügungsdämmung und zusätzliche Wirkung durch die absorptive Vorsatzschale der Wand wurde auch im Halbfreifeldraum getestet.

7.1 Senkrechter Schalleinfall

7.1.1 Messprinzip und -einrichtung

Der Reflexionsgrad bzw. die Wandimpedanz für senkrechten Schalleinfall wurde im Kundt'schen Rohr, auch Impedanzrohr genannt, nach DIN EN ISO 10534 Akustik-Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren mittels der „1-Mikrofon-FFT-Methode“ ermittelt. Abb. 21 veranschaulicht den Aufbau.

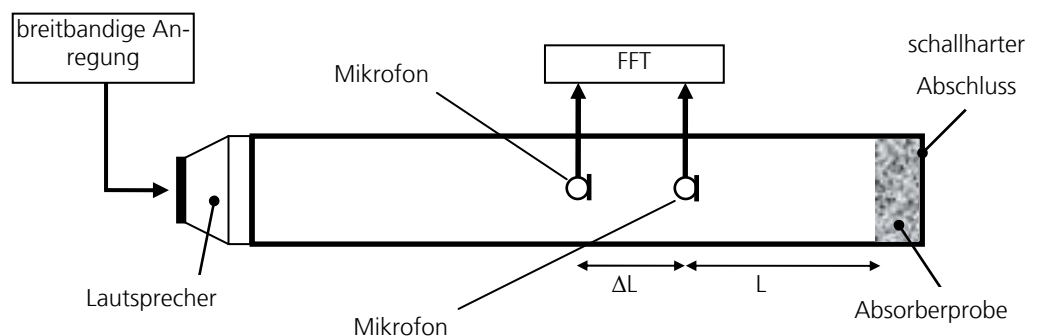


Abb. 21:
Aufbau und Messprinzip im Impedanzrohr.

Der Rohrquerschnitt des Impedanzrohres beträgt $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$. Da der Messaufbau aus einem Set von vier Mikrofonen besteht, welche parallel zur Probenoberfläche angeordnet sind, ist es möglich, die ersten beiden Quermoden des Messkanals auszublenden. Der daraus resultierende Messbereich liegt somit zwischen 50 und 2 800 Hz, wobei unter 125 Hz die Messung hauptsächlich durch die „Restabsorption“ des Rohres bestimmt ist.

7.1.2 Vergleich Messung – Rechnung

Die Messergebnisse sind nachfolgend in den Diagrammen als gepunktete Kurven dargestellt und zeigen den Schallabsorptionsgrad α_0 im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 2.5 kHz. In den Diagrammen ist weiterhin der berechnete Absorptionsgrad (aus den Probenparametern resultierend, s. Kapitel 6) zum Vergleich als Linie ausgewiesen.

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung bei senkrechtem Schalleinfall zeigt im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Trends sind eindeutig festzustellen, Resonanzmaxima können eindeutig ausgemacht werden. Die Messergebnisse der einlagigen MPA aus **Bild 13** und **Bild 14** lassen sich mittels theoretisch nahezu identisch nachbilden, selbst die Platteneigenschwingungen werden wiedergegeben.

In Bild 14 wird zum Einen die optimale Abstimmung der PC-Folie (— , o), hinsichtlich ihrer Folienparameter, deutlich ersichtlich, zum Anderen ist im Fall

der PET2-Folie (--- , □) die Überdämpfung des Absorbers mit ein paar kleinen Abstrichen gut skizziert.

Auch im Fall der einlagigen Folie mit Stützgerüst (s. **Bild 15**) ist eine hervorragende Übereinstimmung vorhanden. Die Rechnung spiegelt im Fall des Gitters als Fixierung (--- , □) die daraus resultierende Folienschwingung bei ca. 860 Hz wieder. Bei der Wahl der Makro-Lochplatte als Stützgerüst (..... , ✱) ist keinerlei Folienschwingung mehr auszumachen, was auch die Messung wiedergibt.

Der Einbruch zwischen der Absorption der Lochplatte und dem schallharten, abgeschlossen Luftvolumen bei ca. 1 750 Hz wird exakt abgebildet, ebenso dass sich anschließend durch das rückwärtige Luftvolumen ausbildende Maximum bei etwa 2 kHz.

Bei der Nachbildung der zweilagigen mikroperforierten Folienkonstruktionen (— , ○ und --- , □) in **Bild 16** werden die sich ausbildenden Resonanzmaxima gut wiedergespiegelt, der Einbruch zwischen ihnen wird jedoch etwas geringer dargestellt, als es die Wirklichkeit zeigt. Wenn der Einbruch jedoch mittels einer dritten MPA-Schicht kompensiert wird (..... , ✱), so liefert die Rechnung eine beachtbare Genauigkeit des Absorptionsgrades bis ca. 1.4 kHz.

Die Resultate bei den unterschiedlichen Folien in einer Ebene, sowie bei der versetzten Variante, sind ebenfalls überzeugend, wobei zu beachten ist, dass die Sprünge des Absorptionsgrades zwischen 160 Hz und dem Resonanzmaximum im Fall der unterschiedlichen Folie in einer Ebene (— , ○ in **Bild 17**) daher rühren, dass die Folien in der Mitte, beim Übergang von der einen auf die andere Folie, unzureichend auf dem Gitter zu fixieren waren und somit kleine Zwischenräume entstanden sein könnten. Die berechnete Darstellung gibt jedoch auch in diesem Fall die Realität gut wieder. Der Absorptionsgrad für den Ansatz mit der versetzten Folie (--- , □) ist mittels Rechnung, bis auf das etwas geringer ausfallende Absorptionsmaximum, fast übereinstimmend möglich.

Bei der Variante mit porösen Zwischenelementen (**Bild 18**) (--- , □) ist eine Modellierung oberhalb von 500 Hz exakt möglich. Der Einbruch zwischen dem Resonanzmaximum der ETFE-Folie und dem dahinter befindlich Absorptionsmaximum des schallhart abgeschlossenen Luftraumes (bei etwas unter 2 kHz) wird durch das poröse Material (im Gegensatz zur Variante ohne in Bild 15 --- , □) deutlich abgemindert, was sowohl Rechnung also auch Messung belegen. Unterhalb von 500 Hz ist eine Modellierung unzureichend.

Der Ansatz mit der ungelochten Folie als zweiter Schicht hinter einer mikroperforierten Folie in **Bild 19** (— , ○) ist mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Die nicht angepasste Struktur bringt einen großen Einbruch im Absorptionsspektrum mit sich, was Messung und Rechnung gleichermaßen widerspiegeln.

In diesem Zusammenhang sollte auch noch auf die große Abweichung unterhalb von 250 Hz hingewiesen werden – die teilweise bei vorangegangenen Untersuchungen ebenfalls aufgetreten sind – welche aller Wahrscheinlichkeit nach aus einer Unzulänglichkeit der Messbedingungen hervorgeht.

7.2 Diffuser Schalleinfall

7.2.1 Messprinzip und -einrichtung

Zur Messung der Absorptionsgrade der verschiedenen Aufbauten bei diffusem Schalleinfall wurden diese in Anlehnung an die DIN EN ISO 354 im Hallraum des IBP positioniert. Die Raumbreite ist ca. 7,05 bis 7,75 m, Länge ca. 7,86 bis 8,46 m und Höhe ca. 5,92 bis 7,08 m. Das Raumvolumen beträgt 392 m^3 , siehe Abb. 22.

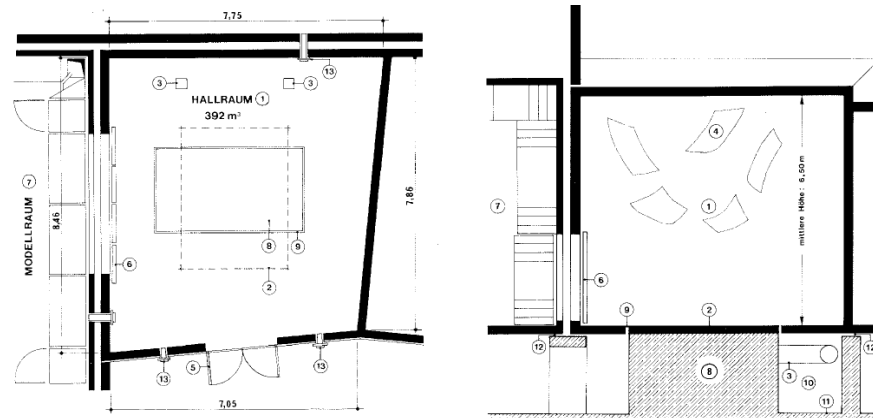


Abb. 22:
Hallraum am IBP.

7.2.2 Messergebnisse

In den anschließenden Untersuchungen hinsichtlich einer Erfüllung des in Tabelle 2 aufgeführten Absorptionsgrades, als auch nach der Klassifikation gemäß Tabelle 3, wurden verschiedene ein- und mehrlagige Konstruktionen im Hallraum aufgebaut und untersucht. Der Aufbau der Proben erfolgte wie in Abb. 23.

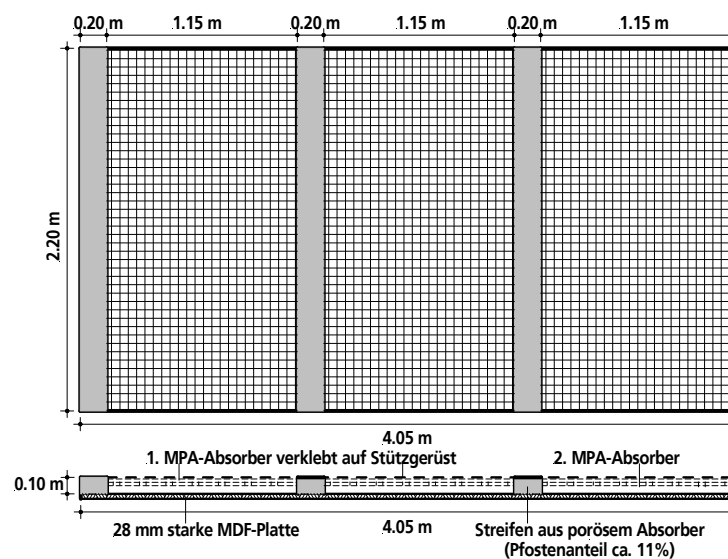


Abb. 23:
Probenaufbau im Hallraum.

Die Rahmenhöhe betrug in allen gemessenen Konfigurationen 10 cm, so dass bei geringeren Einbautenhöhen (z.B. einlagig 5 cm Wandabstand) vergleichbare Effekte auftraten. Zwischen den einzelnen, kassettierten MPA-Elementen (1.15 x 2.20 m) sind jeweils poröse Absorberstreifen angebracht (s. **Abb. 24**), welche die aus statischen Gründen vorhandenen Pfosten einer Lärmschutzwand simuliert, die generell nicht transparent ausgeführt werden können und somit eine geeignete Fläche bilden, um mit porösen Absorbermaterial das Schallabsorptionsvermögen der Aufbauten zu optimieren. Bei der Messung mit freien Pfosten wurden die MPA-Elemente nicht zusammengeschoben, sondern der frei werdende Bereich zwischen ihnen blieb schallhart (s. **Abb. 25**), so dass auch in diesem Fall ein Impedanzsprung zwischen den jeweiligen Elementen vorhanden ist. Die Kassettierung der einzelnen MPA-Abschnitte bestand jedoch, wie im Fall mit den ausgelegten Pfosten, weiterhin.



Abb. 24:
Hallraumaufbau mit Pfosten aus porösem Material.

Unter diesen Voraussetzungen wurden verschiedene ein-, zwei- und dreilagige Strukturen im Hallraum samt Unterkonstruktion positioniert und geprüft. In jedem der folgenden fünf Aufbauten wurden mindestens zwei Ansätze miteinander kombiniert, wobei bei allen Proben der Ansatz H (s. Abb. 12), mit den porös ausgelegten oder freien Pfosten zum Einsatz kam. Des Weiteren kommen die Ansätze A, B und C (s. Abb. 11) in unterschiedlichen Kombinationen miteinander zur Anwendung. Die im Aufbau genutzten Ansätze sind jeweils in einem kleinen Bild rechts neben dem Diagramm mit dem Absorptionsgrad dargestellt. Der Aufbau des MPA-Elementes ist in einem Bildchen links oberhalb des Diagramms dargestellt, die resultierende Draufsicht als Foto rechts daneben.



Abb. 25:
Hallraumaufbau mit freien (nicht ausgelegten) Pfosten.

Des Weiteren ist in den Diagrammen als Orientierung die Anforderung der DB-Richtlinie 800.2001 aus Tabelle 2 als gestrichelte Linie () dargestellt. Wird diese Kurve als Absorptionsgrad in der Wirkungsbewertung nach DIN EN 1793 zugrunde gelegt, wäre der Einzahlwert DL_a mit 7 dB als „absorbierend“ einzu-stufen, wobei zu beachten ist, dass für die Einstufung als „hoch absorbierend“, d.h. $DL_a > 8$ dB, nur noch geringfügig etwas mehr Absorption nötig ist. Dies bedeutet, dass die MPA-Konstruktion annähernd an diese Forderung heranrei-chen muss, um in die Absorbergruppe A3 nach Tabelle 3 eingeordnet zu wer-den.

7.2.2.1 Einlagige Konstruktionen

Bei diffusem Schalleinfall verschiebt sich das Maximum der Absorption der Gitter ETFE-Folienkonstruktion im Gegensatz zur Impedanzrohrmessung (s. **Bild 20**, vgl. Bild 15) von 500 Hz auf 800 bis 1.25 kHz. Es erreicht nun zwar nicht mehr den bestmöglichen Wert von 1, dafür fällt das Absorptionsspektrum ins-gesamt etwas breiter aus. Die Anforderung nach Tabelle 2 sind nur im Bereich zwischen 250 und 1 000 Hz erfüllt, ab 1.25 kHz wird diese signifikant unter-schritten. Der resultierende Einzahlwert ist mit 6 dB jedoch schon recht beacht-lich für eine einlagige MPA-Struktur. Der Unterschied zwischen den mit porö-sem Absorber ausgelegten Pfosten und der freien, schallharten Variante ist sig-nifikant, nahezu eine durchgängige Erhöhung des Absorptionsgrad um mehr als 10% ist festzustellen. Die Rechnung bei diffusen Schalleinfall in **Bild 21** spiegelt die Wirklichkeit, d.h. den Aufbau ETFE-Folie mit freien Pfosten zwis-chen den MPA-Elementen, gut wieder.

Der Absorptionsgrad des „Gitter PC-Folien“ - Aufbaues zeigt ähnliche Merkma-le, hinsichtlich des Vergleiches Messung Impedanzrohr (s. Bild 14) und Hallraum (**Bild 22**), wie die vorhergehenden einlagige Konstruktion. Die Forderung der DB Richtlinie (– –) ist nicht erreichbar, der Einzahlwert DL_a fällt mit 5 dB etwas schwächer aus als im obigen Fall. Dies ist hauptsächlich auf die fehlende Ab-sorption zurückzuführen (oberhalb von 2 kHz ca. 20% geringer als im vorigen Fall). Die Effektivität des Absorberstreifens zwischen den mikroperforierten Ab-sorberstreifen ist identisch.

7.2.2.2 Zweilagige Konstruktionen

Der Aufbau aus **Bild 23** stellt eine Kombination der beiden vorangegangenen ein-lagigen Konstruktionen dar. Das Maximum der ersten MPA-Lage befindet sich zw. 1.2 und 1.6 kHz. Der Absorptionsmaximum der inneren MPA-Ebene wird etwas zu tieferen Frequenzen angehoben (vgl. mit Bild 22). Das Ergebnis ist ein sehr breitbandiger Absorber im Frequenzbereich zwischen 315 bis 2 500 Hz, der bei ausgefüllten Pfosten die Anforderung nach Tabelle 2 fast gänzlich erfül-len kann und nach DIN EN 1793 mit $DL_a = 9$ dB als „hoch absorbierend“ einzu-stufen ist. Auch im Fall einer zweilagigen MPA-Konstruktion bildet die Rech-nung die Wirklichkeit, wie in **Bild 24** dargestellt, gut wieder. Tendenzen, sind ebenso wie in der Modellierung eines einlagigen MPA-Konstruktion (s. Bild 21), eindeutig auszumachen.

Im Diffusschallfeld gleichen sich die Maxima und Einbrüche im Absorptions-spektrum durch den winkelabhängigen Schalleinfall im Vergleich zum senkrech-ten Schalleinfall (s. Bild 9) aus. Die beiden „Resonanzspitzen“ der ersten (mit

1.8 cm Luftvolumen) und der zweiten Folie (mit 5 cm Wandabstand) gehen förmlich ineinander über, d.h. der Einbruch zwischen ihnen ist annähernd verschwunden (s. **Bild 25**). Die daraus resultierende Breitbandigkeit zwischen 315 und 3 150 Hz ist exzellent, selbst die Anforderung nach der DB Richtlinie 800.2001 (s. Tabelle 2) stellt keine große Hürde dar (mit Ausnahme von 100 bis 160 Hz). Ohne porös ausgelegte Pfosten ist der Aufbau mit $DL_a = 8$ dB als „hoch absorbierend“ zu bewerten, wobei die Variante mit ausgefüllten Pfosten zu bevorzugen ist.

7.2.2.3 Dreilagige Konstruktion

Der Absorptionsgrad dieses dreilagigen MPA-Absorbers, aus **Bild 26**, erfüllt selbst höchste Ansprüche. Der bei der Wabenplatte noch vorhandene Einbruch der Absorption bei 4 kHz (Vgl. Bild 25) ist durch die ETFE-Folie als Eingangsschicht kompensiert worden, es bildet sich, mit einer 10 cm Strukturtiefe, ein Absorptionsmaximum über fast 4 Oktaven aus (315 bis 4 000 Hz). Der resultierende Einzahlenwert von $DL_a > 11$ dB reicht an Konstruktionen aus porösem Absorbermaterial gleicher Bautiefe heran. Die Forderung bezüglich Tabelle 2 werden durchgängig überschritten.

7.3 Untersuchung der Wirkung der Absorberauskleidung

7.3.1 Messprinzip und -einrichtung

In der VDI-Richtlinie 2720 "Schallschutz durch Abschirmung im Freien" [27] wird bezüglich der Blockierung der Schallausbreitung das Abschirmmaß D_z definiert. Das bestimmte Abschirmmaß ist bei Einfachbeugung in der Regel nicht größer als 20 dB. Des Weiteren wird bei der Berechnung angenommen, dass nur ein pegelbestimmender Ausbreitungsweg von der Schallquelle zum Immissionsort vorhanden ist. Auch gilt die Berechnung nur, wenn das Luftschalldämmmaß des Schallschirmes groß gegenüber dem Abschirmmaß ist. Dies ist jedoch bei Schallschirmen mit flächenbezogenen Massen von größer 10 kg/m^2 (28 mm MDF-Platte oder 15 mm Acrylglas in etwa 16 kg/m^2) erfüllt.

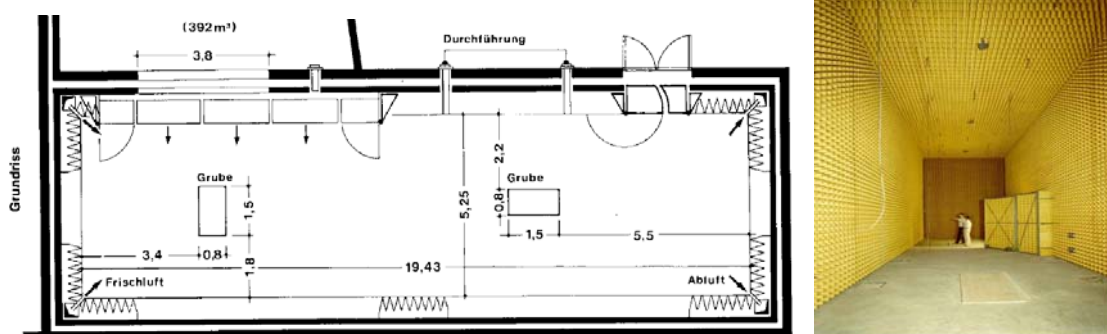


Abb. 26:
Grundriss und Foto des Halbfreifeldraumes am IBP.

Da es bereits zahlreiche Untersuchungen über die Abschirmungsmaß D_z gibt, wurde in den anschließenden Untersuchungen ausschließlich auf die Wirkung der absorbierenden Auskleidung Bezug genommen. Zur Untersuchung der Wirkung der Auskleidung der Lärmschutzwand wurde diese im Halbfreifeldraum

(Modellraum) des IBP positioniert. Die Raumabmessungen innerhalb der Raumauskleidung sind 19,43 m x 5,25 m x 6,17 m, Das Raumvolumen beträgt 629 m³. Die Tiefe der absorbierenden Auskleidung ist 650 mm und die Grenzfrequenz für $\alpha \geq 0,99$ liegt bei 125 Hz, s. **Abb. 26**.

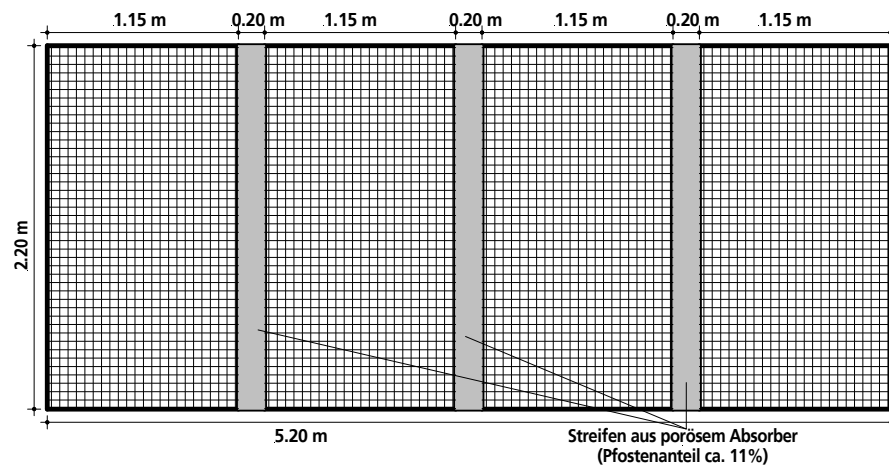


Abb. 27:
Wandaufbau im Modellraum.

Zur Messung der Wirkung der Auskleidung der LSW wurde im Modellraum eine Konstruktion von 5.20 m Breite und 2.20 m Höhe aufgebaut (s. **Abb. 27**). Die Positionierung der Mess- und Quellenpositionen ist in **Abb. 28** dargestellt. Der Dodekaeder-Lautsprecher (Quelle) wurde einmal im Abstand von 3 m aufgestellt, was in etwa der Fahrbahnmitte einer einspurigen Straße entspricht, sowie in 6 m Entfernung positioniert, dies kommt annähernd dem Mittelstreifen einer Autobahn (zweispurig, ohne Standstreifen) gleich. Als Quellenhöhe wurde 0.6 m gewählt, welches ca. dem Emissionspunkt eines Kfz entspricht (RLS 90 nimmt 0.5 m an). Die Lärmschutzwand befindet sich zwischen der Quelle und dem betrachteten Immissionsbereich. Eine weitere Wandstruktur (Gegenwand) simuliert eine gegenüberliegende Wand, die Anordnung stellt sozusagen einen Straßenzug zwischen einem Lärmschutzwandaufbau dar. Der Messpunkt M1 diente als Referenzpunkt zur Beurteilung der Wirkung des Aufbaus, M2 zur Betrachtung der Wirkungsweise der Konstruktion zur Fahrbahnseite hin. Die Messpositionen M3 bis M5 befanden sich in einer Höhe von 1.2 m, die Position M6 in 2.4 m und M7 in 3.6 m, was in etwa dem ersten Stock eines Hauses gleichkommt.

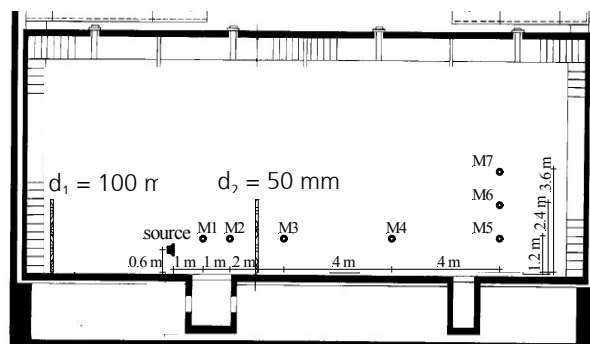


Abb. 28:
Messsituation im Modellraum.

7.3.2 Ergebnisse

Um zu vergleichen, wie sich eine nichtabsorbierende Konstruktion im Gegensatz zu der MPA-Konstruktion (**Abb. 29**) verhält, wurde die LSW einmal mit der MPA-Konstruktion ausgekleidet und die Schalldruckpegel an den 7 Messpunkten ermittelt. In der anderen Situation wurden jegliche Absorber von der Wand entfernt und, wie in **Abb. 28** zu erkennen ist, die schallharte Gegenwand parallel dazu positioniert. Dies soll einen Straßenzug darstellen, der auf beiden Seiten von einer schallharten LSW „eingekapselt“ ist. Im Fall mit der MPA-Konstruktion wurde angenommen, dass zwei absorbierende Wände aufgebaut wurden, wobei die Gegenwand in diesem Fall durch die Absorberkeile (ohne die Gegenwand in Abb. 28) des Modellraums ausgedrückt wird. Da die Absorptionsgrade einer MPA-Konstruktion nicht so gut (insbesondere im tiefen Frequenzbereich) wie die Keile sind, sind die Messungen bzw. die Aussage etwas überschätzt. Wenn aber die Frequenzzusammensetzung eines mittleren Verkehrsgeräusches (A-bewertet) nach DIN EN 1793, aus welchen die L_T -Werte in Bild 27 resultieren, berücksichtigt wird, ist es zu erkennen, dass tiefe Frequenzen eine relativ geringe Wichtigung erfahren. Dieser Effekt kann ebenfalls in den geforderten Absorptionsgrad nach Tabelle 2 wiedererkannt werden. Unter diesen Voraussetzungen können die Ergebnisse allemal als Orientierungswerte benutzt werden.



Abb. 29:
Lärmschutzwand ohne (links) und mit MPA-Absorber (rechts).

Tabelle 7:
Wirkung verschiedener Auskleidungen von Lärmschutzwänden.

Aufbau	gemessene SPL [dB(A)]						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
A: schallharte Lärmschutzwand und Gegenwand	94.7	93	72.1	68.2	66.8	69.8	71.8
B: Lärmschutzwand mit MPA - Konstruktion, ohne Gegenwand	93.9	91.3	69.8	65.3	62.5	62.3	63.9
C: Lärmschutzwand mit MPA - Konstruktion und Gegenwand	94.3	91.5	71.7	67.6	66.1	68.5	70.5
D: schallharte Lärmschutzwand; ohne Gegenwand	93.9	92.1	70.0	65.4	62.8	62.6	64.6

Differenz zwischen: A – B	0.8	1.7	2.3	2.9	4.3	7.5	7.9
Differenz zwischen: A – C	0.4	1.5	0.4	0.6	0.7	1.3	1.3
Differenz zwischen: A – D	0.8	0.9	2.1	2.8	4.0	7.2	7.2
Differenz zwischen: C – B	0.4	0.2	1.9	2.3	3.6	6.2	6.6
Differenz zwischen: D – B	0.0	0.8	0.2	0.1	0.3	0.3	0.7

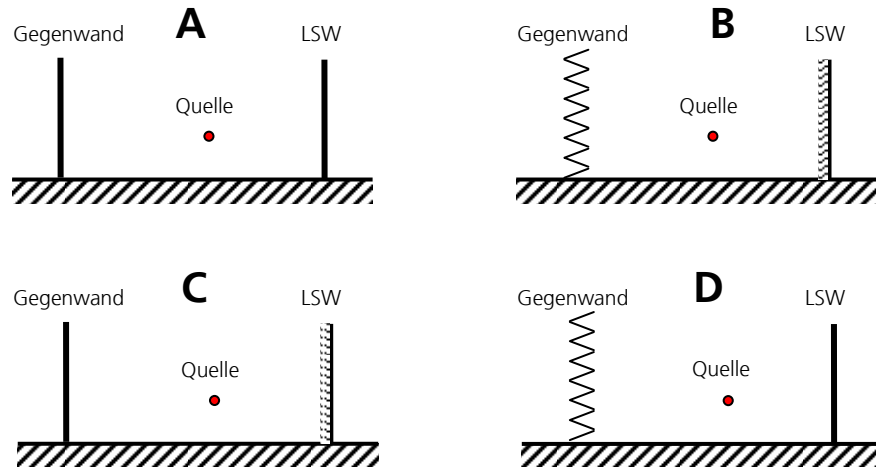


Abb. 30:
Aufbauten im Halbfreifeldraum.

Bei Betrachtung der ermittelten Pegeldifferenz zwischen **A** und **B** in Tabelle 7 ist erkennbar, dass sich die Wirkung des Absorbers vor der Lärmschutzwand (M1 und M2) nur als sehr gering herausstellt (Pegeldifferenz um 2 dB(A)), bei einer Berechnung der Grenzwerte für eine bestimmte Situation, wo Grenzwerte einzuhalten sind, wäre eine derartige Minderung dennoch vorteilhaft. Es ist zum Teil auf die Überlagerungen der Reflexionen (von der harten Wand und Boden) zurückzuführen. Auch hinter der LSW (M3 und M4) ist eine kleine Verbesserung bezüglich der Wandkonstruktion ohne Absorber zu erkennen. Erst ab Messpunkt M5 wird die Wirkung signifikant, nun werden Differenzen > 4 dB(A) erreicht. Dies ist damit zu erklären, dass in der Situation **A** die schallharte Gegenwand den Schall reflektiert und ihn auf die Immissionsseite weiterleitet. Dass dies erst ab Messpunkt M5 einen beträchtlichen Einfluss hat, ist damit zu begründen, dass bei den beiden vorhergehenden Messpunkten die Abschattung durch die Wand noch zu groß ist. Die nochmalige Erhöhung des Pegels von > 3 dB (von M5 zu M6/M7) resultiert daher, dass zwischen Messpunkt und schallharter Rückwand nun teilweise eine direkte Sichtverbindung besteht, demzufolge kann der reflektierte Schall ungehindert zum Messpunkt gelangen.

Aus den Aufbauten B und C wird ersichtlich, dass die Schirmwirkung durch die schallreflektierende Gegenwand signifikant beeinflusst wird, d.h. durch sie wird, infolge der Reflexionen, die erzielte Schirmung zu Nichte gemacht. Die

Wirkung der LSW lässt in diesen Fall (Differenz C – B) um 2 bis 6 dB(A) auf der Immissionsseite (M3 bis M7) nach. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die LSW die zwischen Emissions- und Immissionspunkt steht nicht unbedingt schallabsorbierend ausgekleidet sein muss, in dieser Situation ist es entscheidend, dass die gegenüberliegend LSW mit absorbierenden Material ausgekleidet ist um Reflexion über die LSW zu unterbinden (s. Differenz zwischen C – D aus Tabelle 7).

8 Analyse und Beurteilung der gewählten Ansätze

8.1 Akustische Qualität

Mit den in **Abb. 11** und **Abb. 12** dargestellten Ansätzen kann eine absorbierende, transparente Struktur für Lärmschutzwände in unterschiedlichen Absorptionsstufen, nach Tabelle 3, erreicht werden:

Tabelle 8: Absorptionsgruppen nach ZTV-Lsw 06

Gruppe	Absorption DL_a	MPA-Strukturen	Ansätze in Abschnitt 5
A1	nicht absorbierend	existiert (ohne Absorber)	-
A2	absorbierend	einlagige MPA-Struktur	A bzw. C
A3	hoch absorbierend	zwei-lagige MPA-Struktur	B, bzw. C
A4		drei-lagige MPA-Struktur	A+B+H, bzw. D

Der Ansatz C ist in allen Strukturen notwendig, um ein Mitschwingen der Folie als Ganzes zu verhindern.

Die theoretische Modellierung kommt, wie in Abschnitt 6 dargestellt, mit ein paar Abstrichen, gut an die messtechnisch bestimmten Absorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall heran. Die Genauigkeit der Modellierung ist dabei im Wesentlichen nur von der Exaktheit der bestimmten Eingangsparameter (Lochdurchmesser, Foliendicke, etc.) der jeweiligen Folie, den Randbedingungen der Befestigung und der Justierung im Impedanzrohr abhängig.

Die Anforderung der ZTV-Lsw 06 bzw. DIN EN 1793 als „hoch absorbierend“ ist mittels verschiedener MPA-Konstruktionen möglich. Notwendig ist hierfür ein zweilagiger MPA-Aufbau (Ansatz B aus **Abb. 11**), wobei die Folien mittels einer Makroperforation (Ansatz C aus **Abb. 11**) in Form gehalten werden. Des Weiteren ist eine Belegung der LSW-Pfosten mit nicht transparentem, porösem Absorbermaterial sinnvoll (Ansatz H aus **Abb. 12**), um eine Verbesserung hinsichtlich Breitbandigkeit und Absorptionsmaximum zu erreichen. Die möglichen Konfigurationen, die in Frage kommen, sind in den **Bild 23** bis **Bild 26** ausgewiesen. Mittels einlagiger Konstruktion, wie in den **Bild 20** und **Bild 22** dargestellt, ist nur ein Einzahlwert von maximal 6 dB möglich; das ist „absorbierend“ nach Tabelle 3.

Die aus integraler Sicht bevorzugte Konstruktion ist die Wabenplatte (**Bild 25**); auch wenn die Kombination von Gitter mit ETFE-Folie samt Wabenplatte (**Bild 26**) eine noch effektivere Lösung darstellt. Denn die dünne ETFE-Folie ist sehr

anfällig für Schmutz und Vandalismus, auch wenn sie durch das Makrostützgerüst geschützt wird.

Um den Gesamtaufbau noch beständiger gegen Verwitterung zu gestalten und auch dem Aspekt der Nachhaltigkeit Rechnung zu tragen, könnte anstelle des porösen Schaumstoffes Basotect® als Pfostenmaterial der aus Altglas hergestellte Blähglas-Absorber Reapor® (entweder 10 cm stark oder 5 cm mit 5cm Wandabstand) eingesetzt werden. Damit werden ähnlich gute Ergebnisse realisiert. Dies sollte allerdings mittels einer Messung noch verifiziert werden. Neben dem ökologischen Aspekt weist Reapor® wegen seiner stabilen Struktur noch den Vorteil einer bessern Haltbarkeit gegen jegliche Umwelteinflüsse auf. Bei Eindringen von Wasser in den Blähglas-Absorber wird seine Wirkung zwar beeinträchtigt, wie bei anderen porösen Absorbern auch, wenn die Feuchtigkeit jedoch verdunstet ist, nimmt das Absorptionsvermögen, im Gegensatz zu herkömmlichen porösen Absorber, wieder seinen ursprünglichen Wert an.

8.2 Beurteilung hinsichtlich realer Verkehrssituationen

Die von einem Kfz abgestrahlte Schalleistung hängt von seiner Art und Konstruktion, der Motordrehzahl und der Fahrgeschwindigkeit sowie der Beschaffenheit von Bereifung und Fahrbahnoberfläche ab. Die Schallemission wird durch die Antriebsgeräusche, das Reifenrollgeräusch und aerodynamische Luftverwirbelungen verursacht.

Die Antriebsgeräusche, hierunter fallen alle Geräusche die von Motor, Hilfsaggregaten, Kraftübertragung, Auspuff und Ansaugung ausgehen, überwiegen hauptsächlich bei schweren Nutzfahrzeugen. Bei Pkw bestimmen sie die erzeugte Schalleistung nur beim Anfahren und Beschleunigen, sowie beim Fahren mit niedrigen Geschwindigkeiten. Schon bei unbeschleunigter und niedertouriger Fahrweise innerorts überwiegt das Rollgeräusch. Strömungs- oder Windgeräusche tragen erst oberhalb von Geschwindigkeiten größer 120 km/h merklich zum Pegel bei. Die entstehenden Wirbelablösungen weisen jedoch ein eher breitbandiges Spektrum (ähnlich einem Rauschen) auf.

Um nun eine Aussage darüber zu treffen, wie sich das zu erwartende Verkehrslärmspektrum darstellt, muss zwischen zwei Situationen differenziert werden: Fahrt mit geringer Geschwindigkeit ($v \leq 50$ km/h) und vielen Beschleunigungsphasen im innerstädtischen Verkehr und Fahrt auf Bundesstraßen und Autobahnen mit hohen Geschwindigkeiten. Im innerstädtischen Bereich treten vor allem die Antriebsgeräusche in den Vordergrund, welche sich im tiefen Frequenzbereich zwischen 80 und 200 Hz bei Pkw's und bei Lkw's zwischen 31.5 und 400 Hz bewegen. Bei Lastkraftwagen kommt noch ein viel höherer Gesamtpegel als bei Personenkraftwagen hinzu (s. **Bild 29, Bild 30**, $\Delta L > 9$ dB(A); bedeutet, dass 1 Lkw soviel Lärm wie 8 Pkw's „produziert“). Auf Autobahnen ist das Reifenrollgeräusch dominant (s. **Bild 31**). Pkws weisen ein Maximum zwischen 800 und 1 600 Hz und Lkw zwischen 500 und 2 000 Hz auf. Der Gesamtpegel liegt jetzt, beim Vergleich Pkw und Lkw auf der Autobahn, jedoch nicht mehr soweit auseinander wie im vorhergehenden Sachverhalt (s. **Bild 29, Bild 30** $\Delta L > 3.5$ dB (A)). Auch bei Betrachtung der Spektren ist ersichtlich, dass die Pegeldifferenz ΔL je Terz nicht mehr so groß ist wie im niedrigen Geschwindigkeitsbereich. Ferner ist erkennbar, dass sich auf der Autobahn eine

Überlappung von Pkw- und Lkw-Spektrum ab 1.25 kHz ergibt, weil das Reifen-Fahrbahn-Spektrum in beiden Fällen fast identisch ist (s. **Bild 31**) und in dieser Situation, wie oben bemerkt, überwiegt.

Auf Grundlage dieser beiden Betrachtungsfälle (es sollten allerdings weitere Spektren herangezogen werden), ist es eventuell zweckmäßig, den Absorptionsgrad von Lärmschutzwänden im Frequenzbereich 400 bis 800 Hz etwas anzuheben, um die oben genannten Einflüsse (hinsichtlich Spektrum Stadtstraße bzw. Autobahn) besser im Einzahlwert zu berücksichtigen. Die untersuchten Absorberstrukturen für absorbierende, transparente LSW in Bild 23, Bild 25 und Bild 26 besitzen im Frequenzbereich von 250 Hz bis 2 000 Hz ein höheres Absorptionsvermögen, als es nach Tabelle 2 nötig wäre, sie passen so zum „Lärmspektrum“. Eine Anpassung der Absorberkonstruktion für den innerstädtischen Verkehr im tieffrequenten Bereich < 315 Hz ist nur durch größere Einbautiefen oder Einbringen von Plattenschwingern möglich.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die theoretische Modellierung funktioniert für alle hier untersuchten Konfigurationen ausreichend gut. Die Qualität der Rechenergebnisse ist hauptsächlich von der Güte der Eingangsparameter abhängig. Trends können eindeutig identifiziert werden. Somit kann eine Beurteilung der Wirkung für den Aufbau als Absorberschicht vor einer transparenten Lärmschutzwand berechnet werden. Absorbierende nicht transparente Pfosten können den Schallabsorptionsgrad der transparenten Lärmschutzwände deutlich verbessern. Um auch diesen Fall zu simulieren, sollten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Die experimentellen Untersuchungen der geeigneten transparenten Ansätze im Hallraum – für den praktischen Einsatz sind dies die maßgeblichen Ergebnisse – ergab, dass die Anforderungen nach ZTV-Lsw 06 bzw. DIN EN 1793 erfüllt werden. Auch für den Einsatz an Eisenbahntrassen sind die gezeigten Konstruktion einsatzfähig. Sie erfüllen größtenteils die Forderungen der DB Richtlinie 800.2001. Die erzielte Wirkung der ausgewählten Konstruktionen reicht beinahe an die vollflächig poröser Absorber gleicher Bautiefe heran. Jedoch müssen die Folien dabei mittels einer engmaschigen Versteifung ausgesteift werden, um ein Mitschwingen zu verhindern.

Hinsichtlich der Haltbarkeit für den Außeneinsatz müssten noch genauere Untersuchungen in Angriff genommen werden. Hierbei muss vor allem die Verwitterung, Verschmutzung mit Partikeln (Staub, Gummiabrieb, Salz) und Chemikalien (Öle, Kraftstoff, etc.) untersucht werden. Auch die Standfestigkeit einer MPA-Konstruktion (z.B. unter Windlast) bedarf noch einer genaueren Betrachtung. Zu diesem Zwecke sollte ein Gesamtaufbau als Prototyp konzipiert werden, der die notwendige Bedingung hinsichtlich Absorption und Transparenz erfüllt. Dieser könnte an einer Teststrecke und/oder unter Laborbedingungen diesen Tests unterzogen werden. Erste einfache Versuche bei Einwirkung von Wasser, Schlamm und Schnee sind Kap. 11.4 dokumentiert.

Als wirksame Schutzmaßnahme gegen den „Vogeltod“ haben sich engmaschige Muster auf Scheiben herausgestellt, welche die transparenten Elemente für

Vögel sichtbar machen, siehe auch 11.5. Im Fall der mit einer MPA-Konstruktion versehenen transparenten LSW, könnte man gegebenenfalls auf eine derartige Lösung verzichten. Denn die transparenten Wabenplatten haben eine periodisch sichtbare Struktur. Diese Vermutung muss aber erst experimentell mit Vögeln bestätigt werden.

10 Literatur

- [1] Antrag auf Zuwendung „Transparente schallabsorbierende Lärmschutzwände“, BW-Plus Programm.
- [2] Netzinfrasturktur Technik entwerfen; Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken. Richtlinie Nr. 800.2001 der Deutsche Bahn AG, 2000.
- [3] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen Ausgabe 2006 (ZTV-Lsw 06).
- [4] DIN EN ISO 140 - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen.
- [5] DIN EN 20354 - Messung der Schallabsorption im Hallraum.
- [6] ISO CD 10534 - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes.
- [7] DIN 67507 - Lichttransmissionsgrade, Strahlungstransmissionsgrade und Gesamtenergiedurchlassgrade von Verglasungen.
- [8] Maysenhölder, W.: LAYERS - ein Werkzeug zur Untersuchung der Schalldämmung von Platten aus homogenen anisotropen Schichten. IBP-Mitteilung 26 (1999), Nr. 347.
- [9] Gödeke, H.; Fuchs, H.V.: Reapor - Sintered open-pore glass as a high-strength sound absorber. Glastechnische Berichte 71 (1998), H. 9, S. 282-284.
- [10] R. Kohlhauer GmbH, Gaggenau.
- [11] Guo, J.; Pan, J.; Bao, L.: Actively Created Quiet Zones by Multiple Control Sources in Free Space. Journal of the Acoustical Society of America 101 (1997) 3, 1492-1502.
- [12] US 3819010 - Sound-absorbing wedge.
- [13] US 4477505 - Structure for absorbing acoustic and other wave energy.
- [14] Mechel, F.P.: Schallabsorber, Bd. I,II. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1989, 1995.
- [15] Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch. VDI-Verlag Düsseldorf, 1976.
- [16] CH 612237 - Schallabsorber.
- [17] Leistner, P; Fuchs, H.V.: Schlitzförmige Schallabsorber. Erscheint in Bauphysik 23 (2001), H. 6.
- [18] Maa, D.-Y.: Microperforated panel wideband absorbers. Noise Control Engineering Journal 29 (1987), H. 3, S. 77-84.
- [19] DE 4315759 - Schallabsorbierendes Glas- oder transparentes Kunstglasbauteil.
- [20] DE 4437196 - Schallabsorbierendes Glas- oder transparentes Kunstglasbauteil.

- [21] EP 1146178 - Wide spectrum sound absorption building element for walls, floors and ceilings.
- [22] DE 4408782 - Folien-Schallabsorber.
- [23] Hunecke, J.: Akustische Eigenschaften einer transparenten mikroperforierten Vorsatzschale zur Verbesserung der Schalldämpfung, -dämmung und -streuung von Außenbauteilen aus Glas. Interner Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik B-TA 4/1996
- [24] Zhou, X., Heinz, R.: Vereinfachte Rechenverfahren für einfache und geschichtete Resonanzabsorber. Interner Bericht des Fraunhofer Instituts
- [25] Ford, R. D.; McCormick, M. A.: Panel Sound Absorbers. J. Sound Vib.10 (1969), S. 411- 423.
- [26] Heckl, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der technischen Akustik, Berlin: Springer, 1994.
- [27] VDI-Richtlinie 2720 "Schallschutz durch Abschirmung im Freien "
- [28] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Handbuch Umgebungslärm Minderung und Ruhevorsorge, Wien (2007).
- [29] Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V.: Vogeltod an Glasflächen.
- [30] Biber, Jean-Pierre (Bureau NATCONS): Transparente Schallschutzwände an Strassen und Vogelschlag. Basel.
- [31] Buer, F.; Regner, M.: Mit „Spinnennetz-Effekt“ und UV-Absorbern gegen den Vogeltod an transparenten und spiegelnden Scheiben Zeitschrift für Vogelkunde und Naturschutz in Hessen. Vogel und Umwelt 13: S. 31 – 41 (2002)

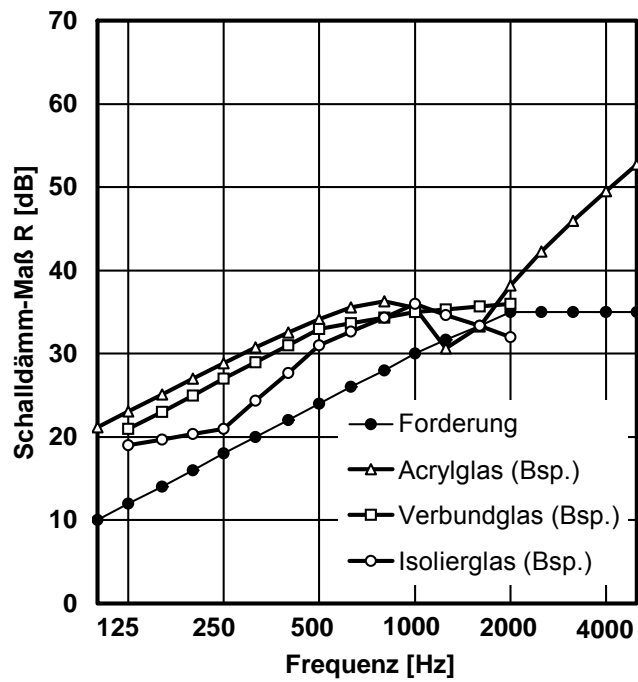


Bild 1 :
 Berechnete und gemessene Schalldämmung transparenter, schalldämmender
 Wandkonstruktionen in Abhängigkeit von der Frequenz (Acrylglas 25 mm dick,
 28 kg/m²; Verbundglas 80 mm dick, 19 kg/m²; Isolierglas zweischalig, 2 x 4 mm
 dick, 12 mm Abstand).

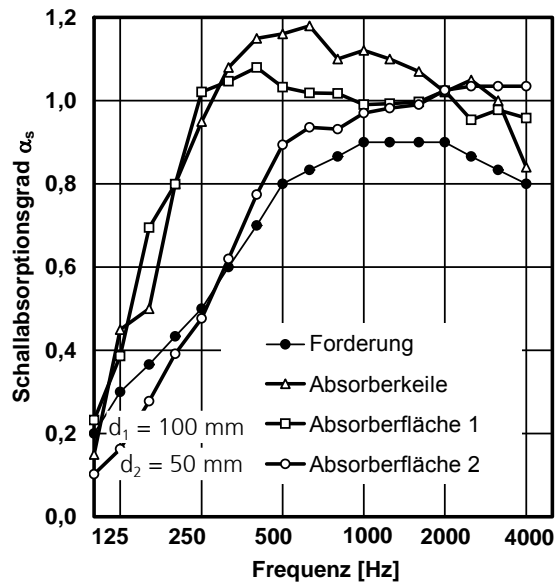


Bild 2 :
 Gemessene Schallabsorption der Absorberkeile sowie von ebenen Absorberflächen (offenzelliger Schaum mit der Bautiefe $d_1 = 100$ mm, und $d_2 = 50$ mm) nach Abb. 3 in Abhängigkeit von der Frequenz.

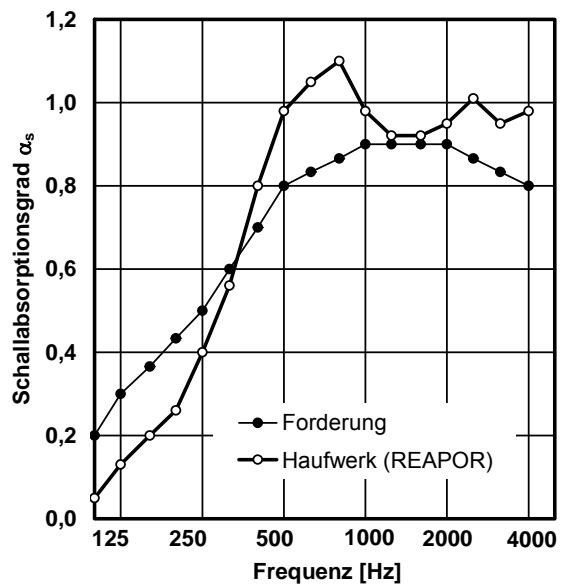


Bild 3 :
 Gemessene Schallabsorption einer 50 mm dicken Schicht aus REAPOR
 nach Abb. 6 (gesintertes Glasgranulat) in Abhängigkeit von der Frequenz;
 Strömungswiderstand 11 kPa s/m², Dichte 275 Kg/m³.

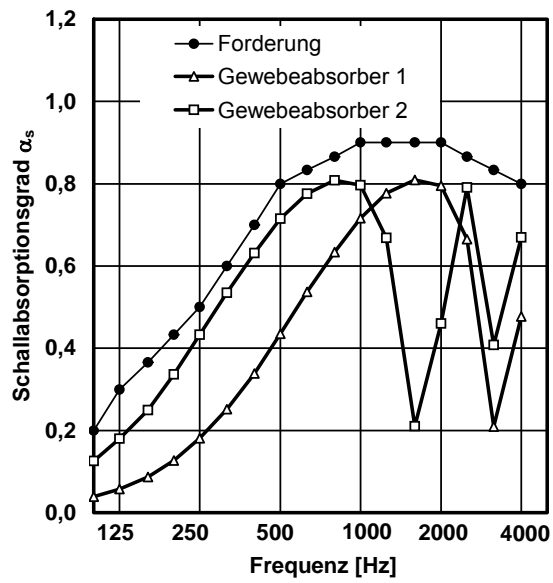


Bild 4 :
 Berechnete Schallabsorption einer einzelnen Gewebelage mit 50 mm (1) und 100 mm (2) dicker, kassetierter rückseitiger Luftschicht in Abhängigkeit von der Frequenz; Strömungswiderstand 280 kPa s/m².

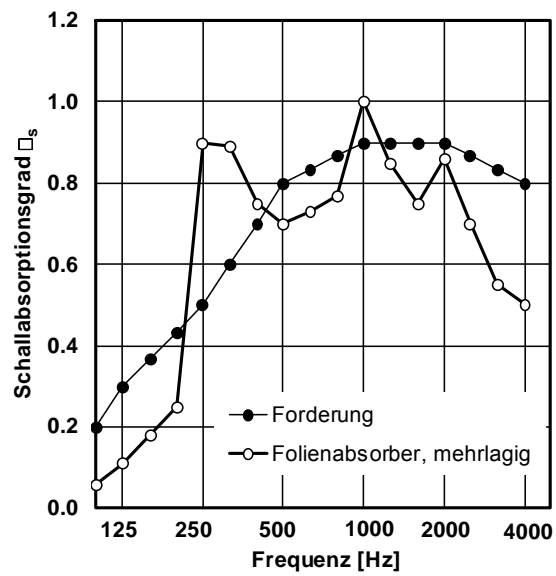


Bild 5
 Gemessene Schallabsorption eines mehrlagigen Folienabsorbers nach Abb. 10 mit dazwischen liegenden Luftfedern und Wandabstand in Abhängigkeit von der Frequenz.

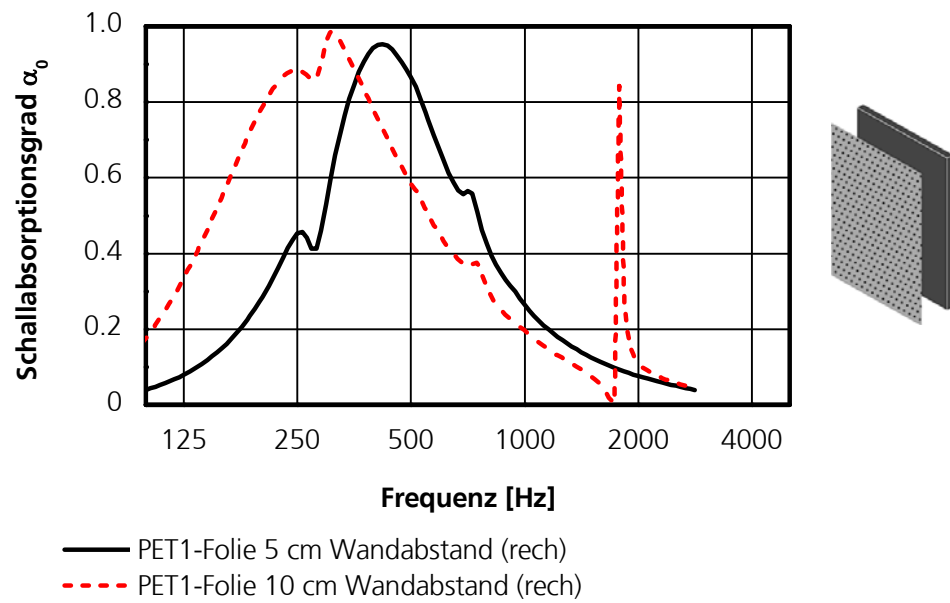


Bild 6 :
Berechneter Absorptionsgrad der PET1-Folie mit unterschiedlichem Wandabstand.

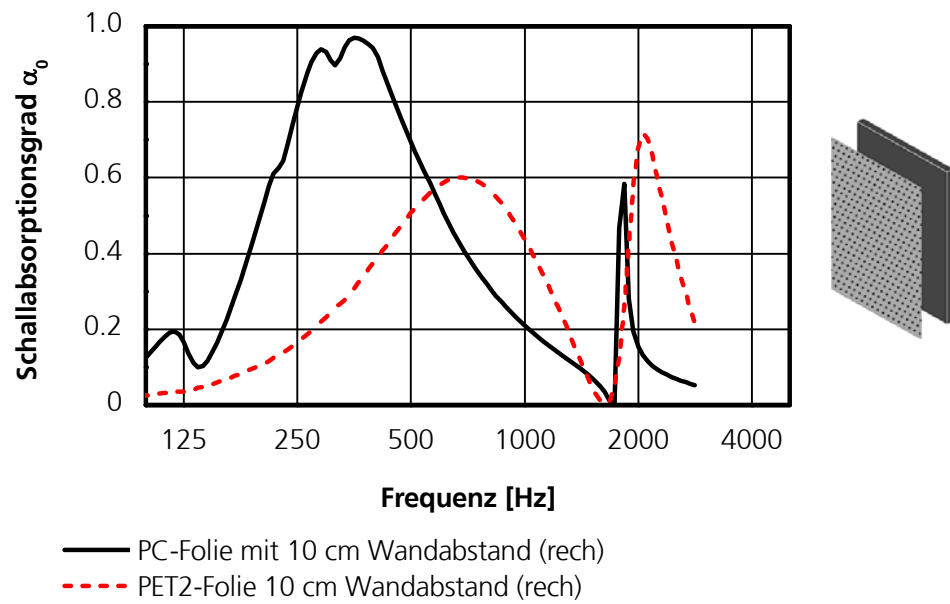


Bild 7 :
Berechneter Absorptionsgrad von einlagigen MPA-Konstruktionen.

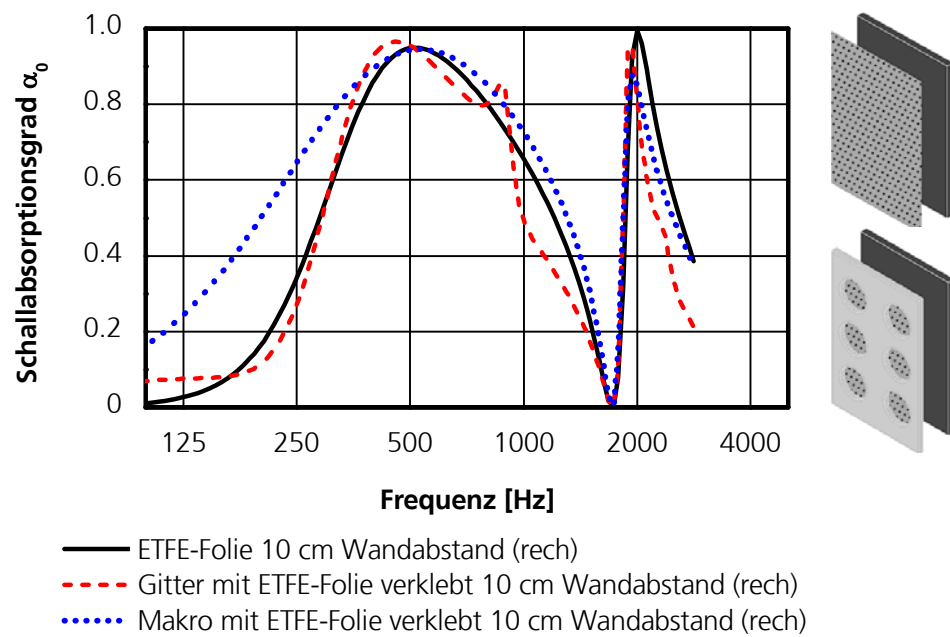


Bild 8 :
Berechneter Absorptionsgrad bei Konfigurationen ohne und mit zwei verschiedenen Abdeckungen.

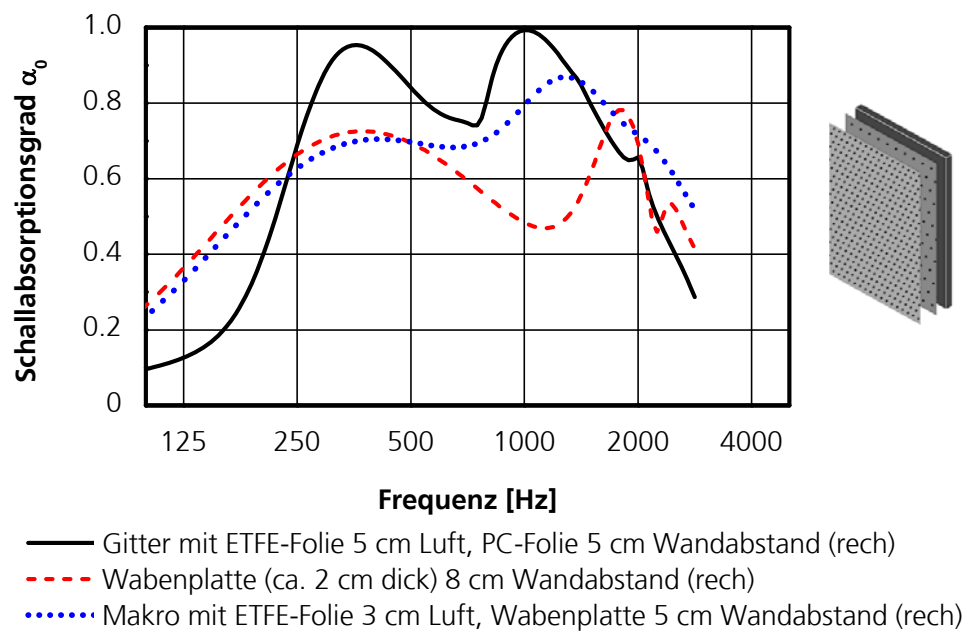


Bild 9 :
Berechneter Absorptionsgrad mehrlagiger MPA-Konstruktionen.

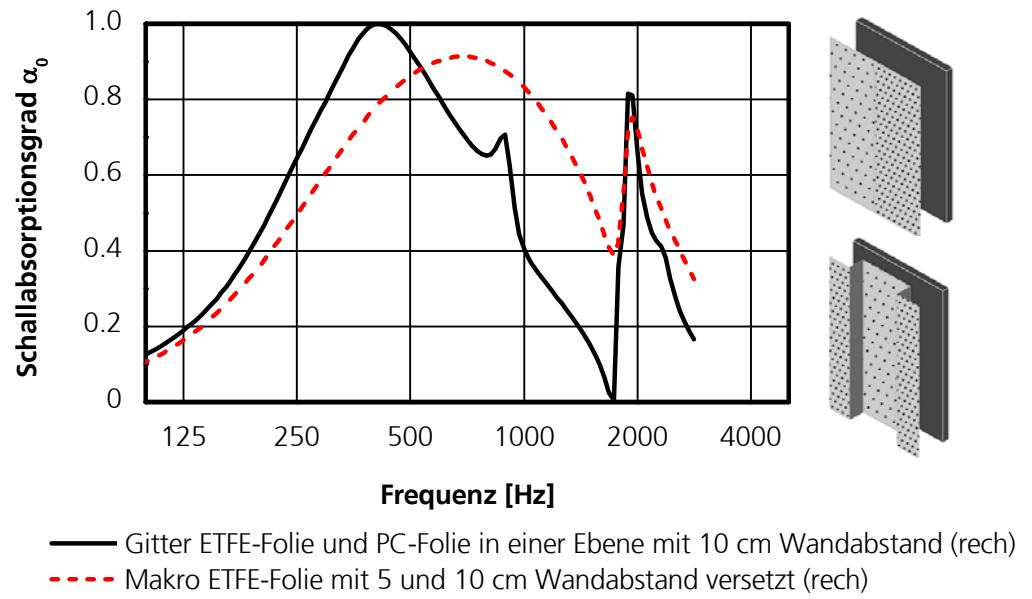


Bild 10 :
 Berechneter Absorptionsgrad von zwei verschiedenen MPA-Folien in einer Ebene (D, —) oder versetzt (E, - - -).

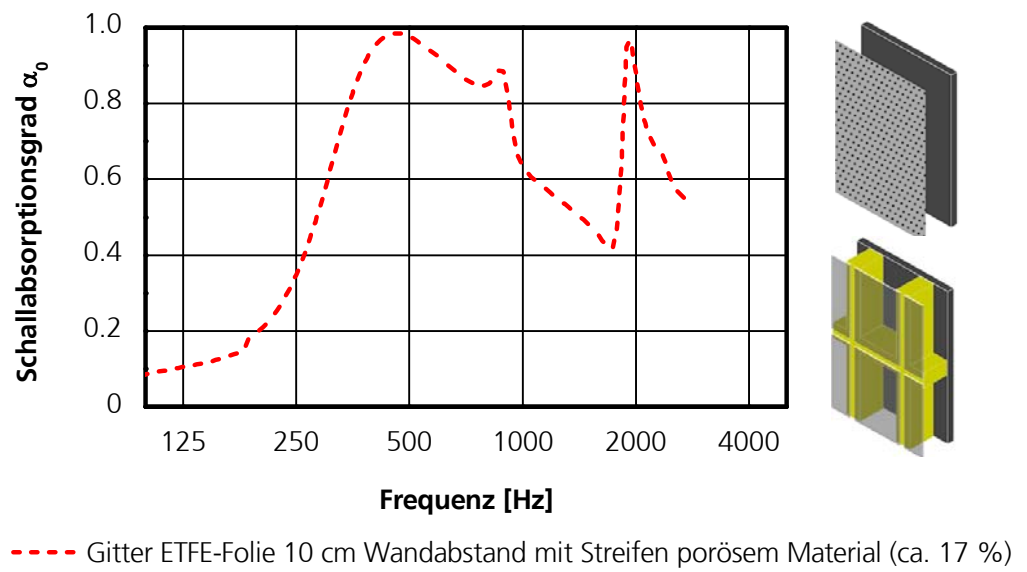


Bild 11 :
Berechneter Absorptionsgrad von einer MPA-Folie mit Streifen aus porösem Material.

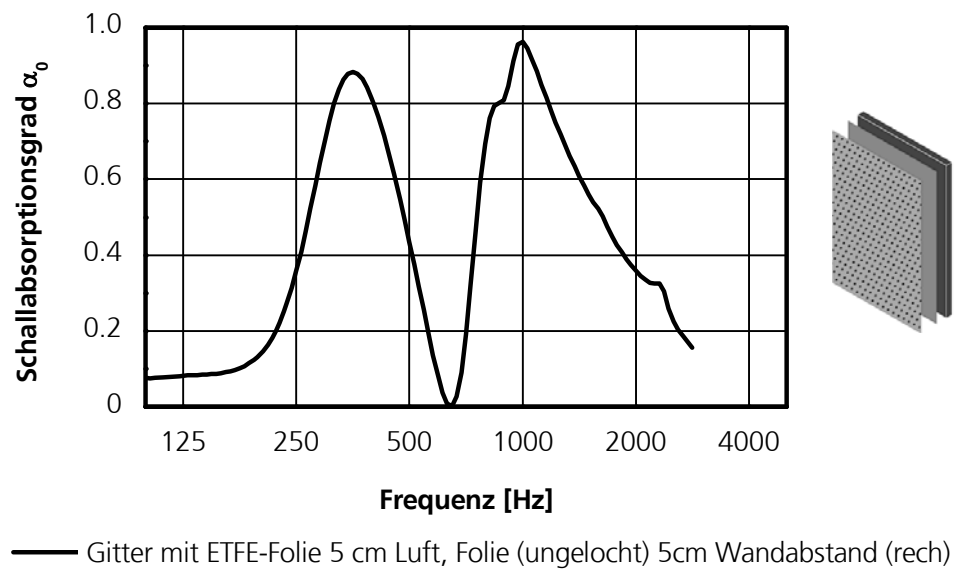


Bild 12 :
Berechneter Absorptionsgrad einer MPA-Folie mit nachgeschalteten Plattenschwinger.

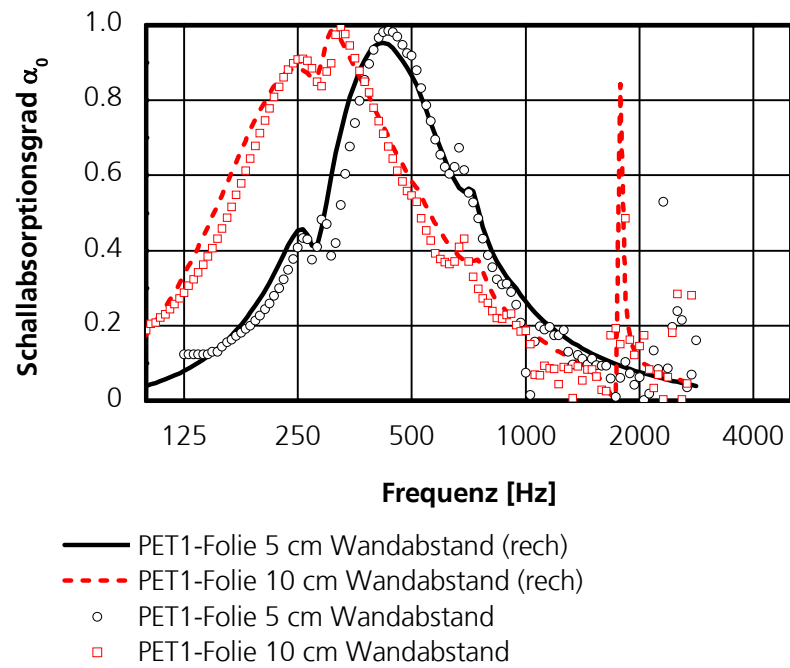


Bild 13 :
 Vergleich Messung - Rechnung: Einlagiger MPA-Absorber mit 5 und 10 cm Wandabstand.

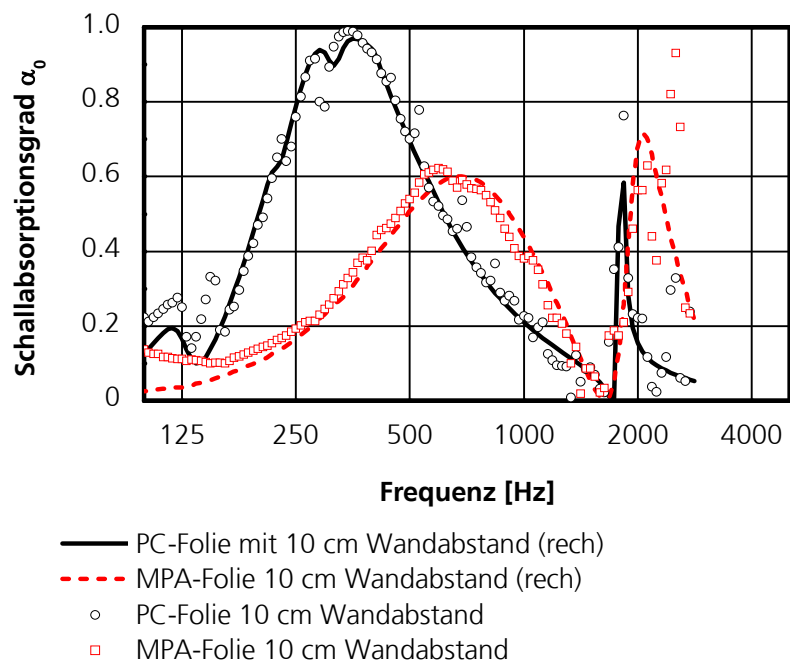


Bild 14 :
 Vergleich Messung – Rechnung: Einlagige MPA-Absorber (angepasst und überdämpft).

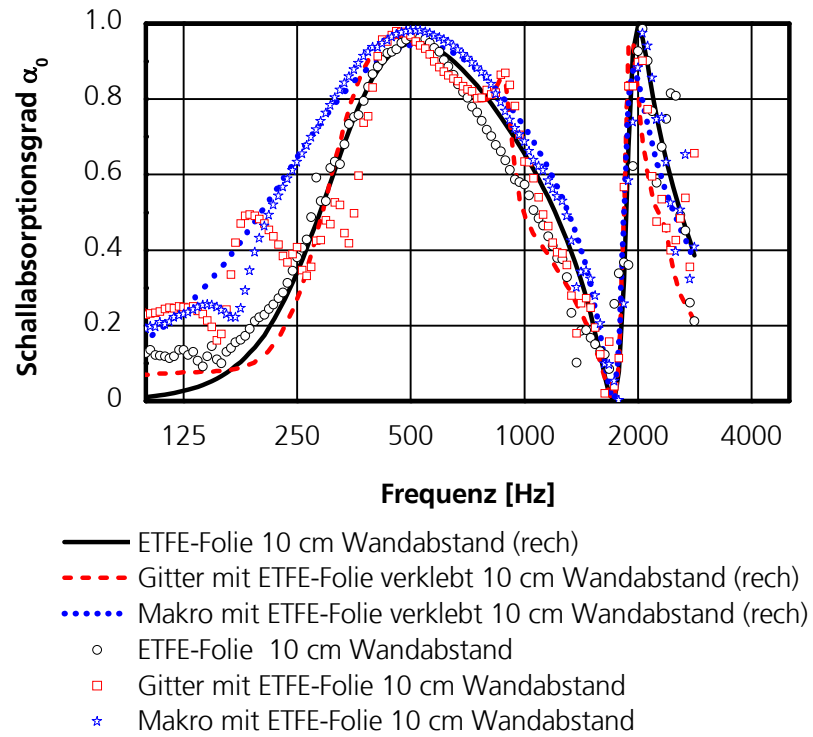
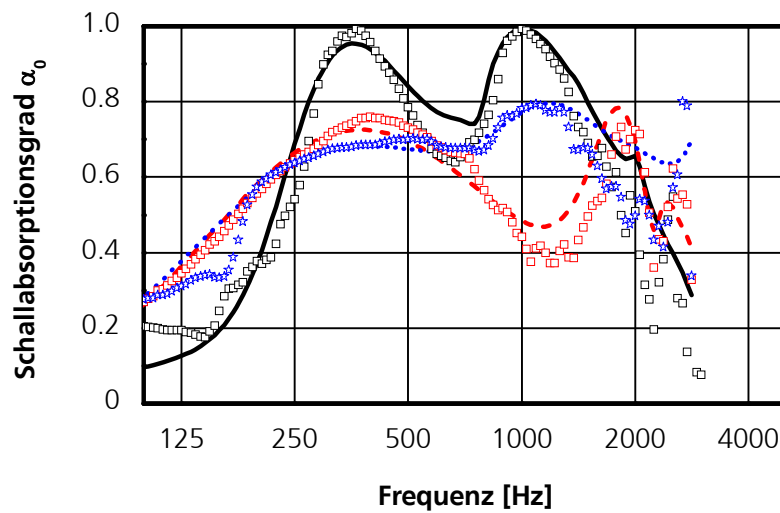
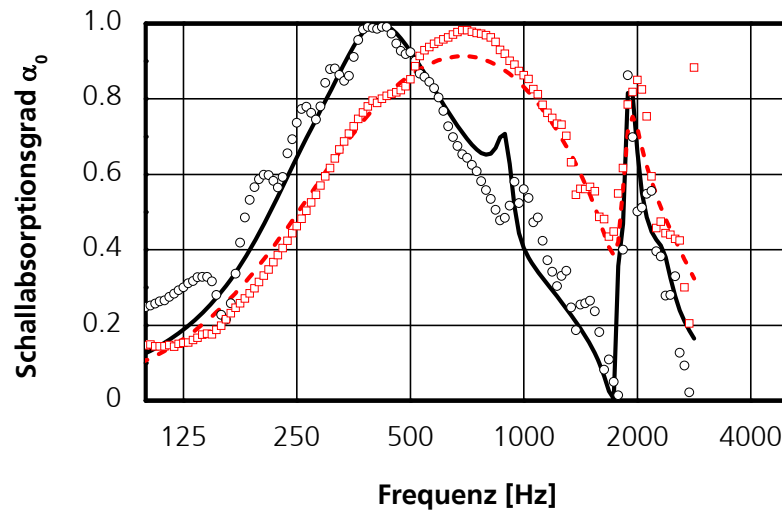


Bild 15 :
Vergleich Messung – Rechnung: Dünne ETFE-Folie ohne und mit zwei verschiedenen Stützgerüsten.



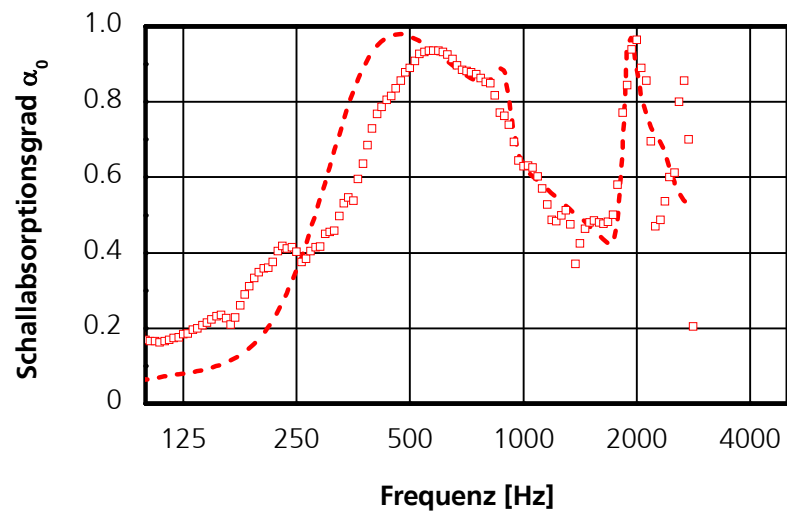
- Gitter mit ETFE-Folie 5 cm Luft, PC-Folie 5 cm Wandabstand (rech)
- - - Wabenplatte (ca. 2 cm dick) 8 cm Wandabstand (rech)
- Makro mit ETFE-Folie 3 cm Luft, Wabenplatte 5 cm Wandabstand (rech)
- Gitter mit ETFE-Folie 5 cm Luft, PC-Folie 5 cm Wandabstand
- Wabenplatte (ca. 2 cm dick) 8 cm Wandabstand
- * Makro mit ETFE-Folie 3 cm Luft, Wabenplatte 5 cm Wandabstand

Bild 16 :
Vergleich Messung – Rechnung: Mehrschichtige MPA-Konstruktionen.



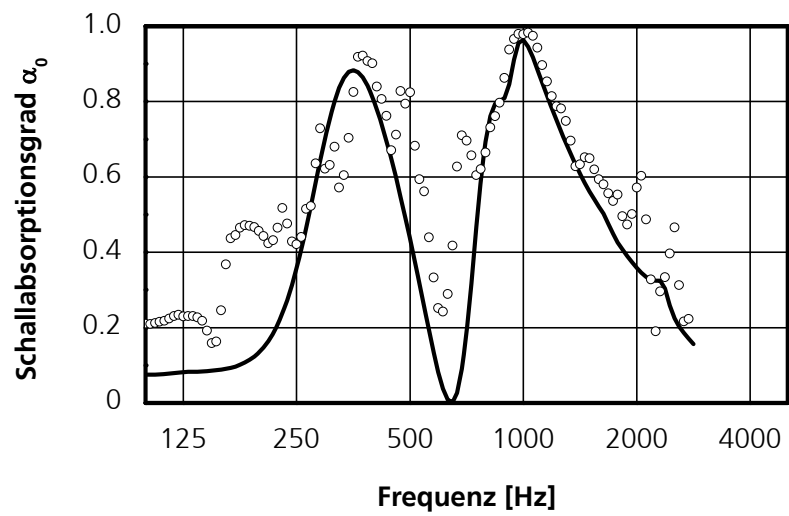
- Gitter ETFE-Folie und PC-Folie in einer Ebene mit 10 cm Wandabstand (rech)
- - - Makro ETFE-Folie mit 5 und 10 cm Wandabstand versetzt (rech)
- Gitter ETFE-Folie und PC-Folie in einer Ebene mit 10 cm Wandabstand
- Makro ETFE-Folie mit 5 und 10 cm Wandabstand versetzt

Bild 17 :
Vergleich Messung – Rechnung: Nebeneinander liegende Flächen aus einschichtigen, mikroperforierten Folien.



- - - Gitter ETFE-Folie 10 cm mit Streifen porösem Material (ca. 17 %) (rech)
- Gitter ETFE-Folie 10 cm Wandabstand mit Streifen porösem Material (ca. 17 %)

Bild 18 :
Vergleich Messung – Rechnung: MPA-Folie mit Streifen aus porösem Material.



- Gitter mit ETFE-Folie 5 cm Luft, Folie (ungelocht) 5cm Wandabstand (rech)
- Gitter mit ETFE-Folie 5 cm Luft, Folie (ungelocht) 5cm Wandabstand

Bild 19 :
Vergleich Messung – Rechnung: Zweischichtige Struktur aus MPA-Folie mit Plattenschwinger.

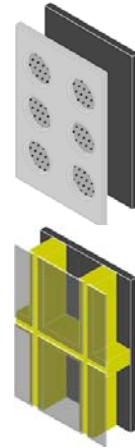
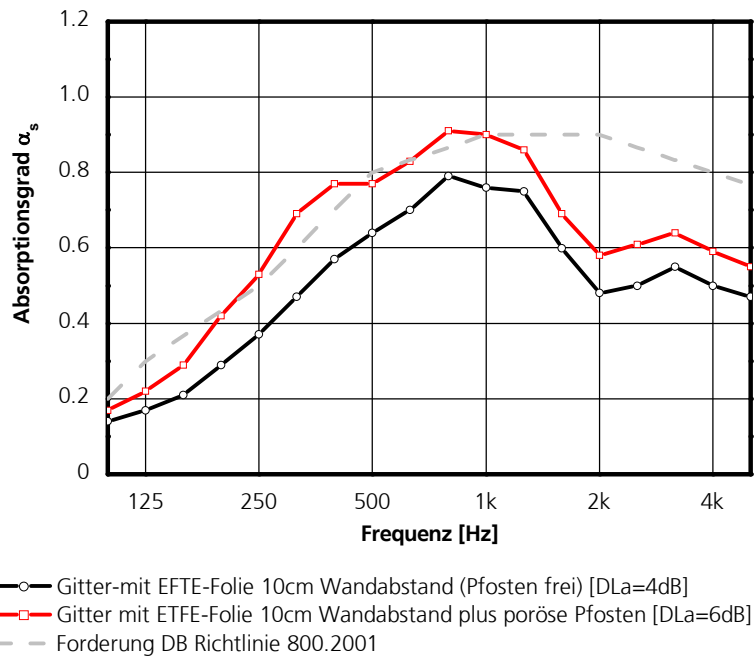
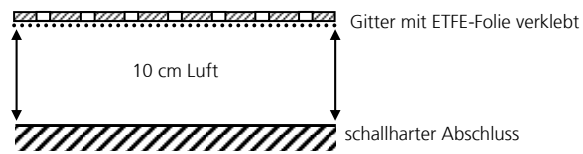


Bild 20 :
Absorptionsgrad einer dünnen mikroperforierten Folie mit Stützgerüst.

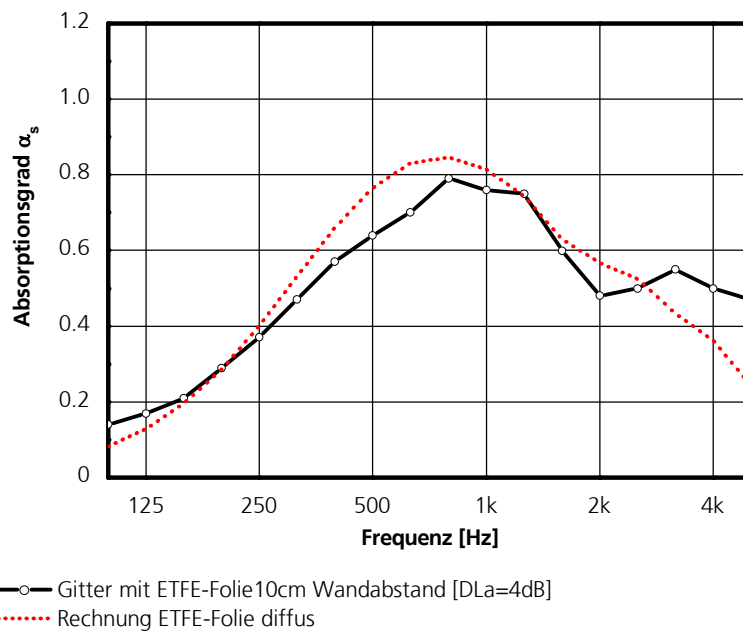


Bild 21 :
Vergleich Messung – Rechnung eines einlagigen MPA-Aufbaus in Bild 20.

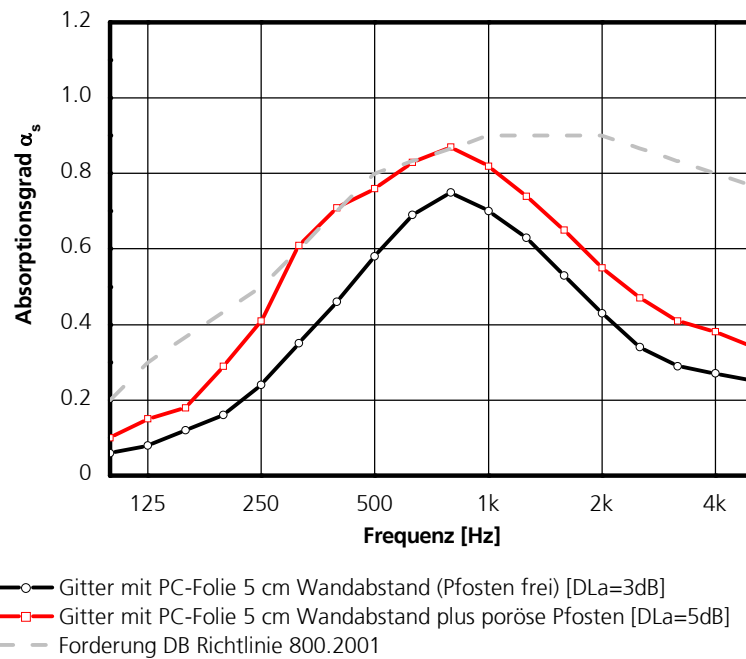
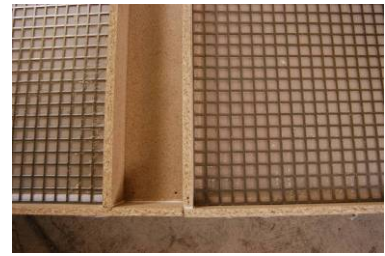
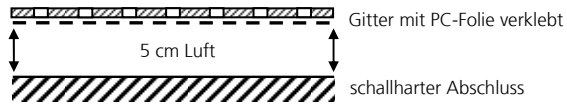


Bild 22 :
Absorptionsgrad einer 0.44 mm starken PC-Folie mit Stützgerüst.

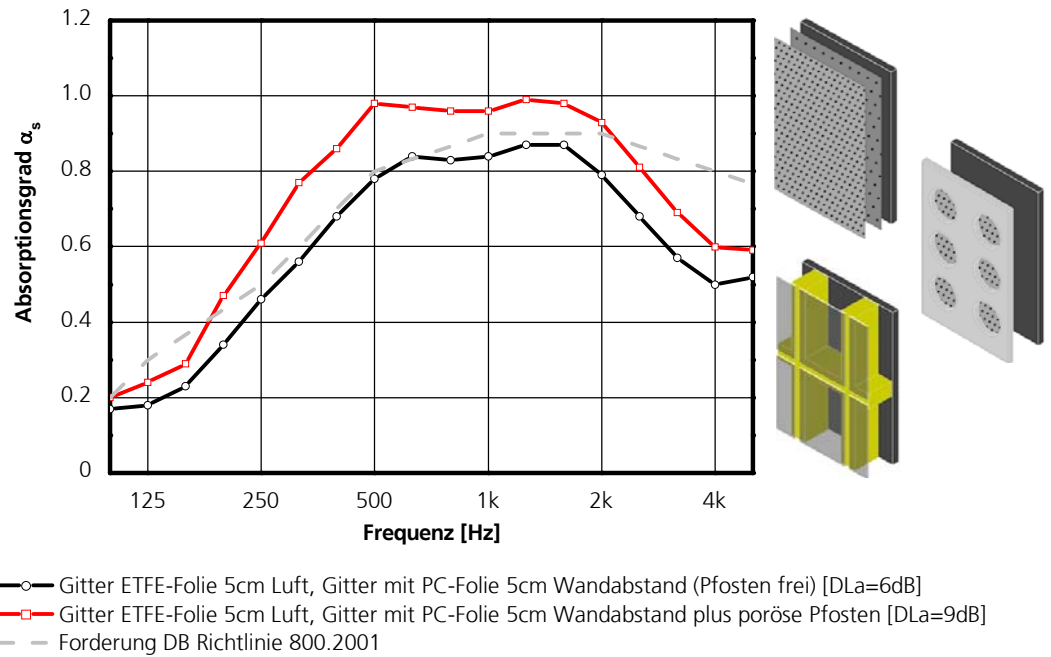
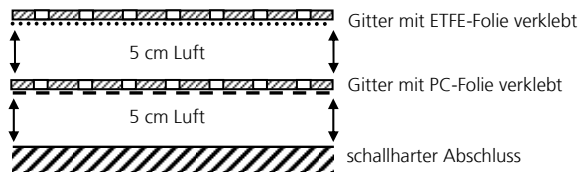


Bild 23 :
Absorptionsgrad einer zweilagigen MPA-Konstruktion.

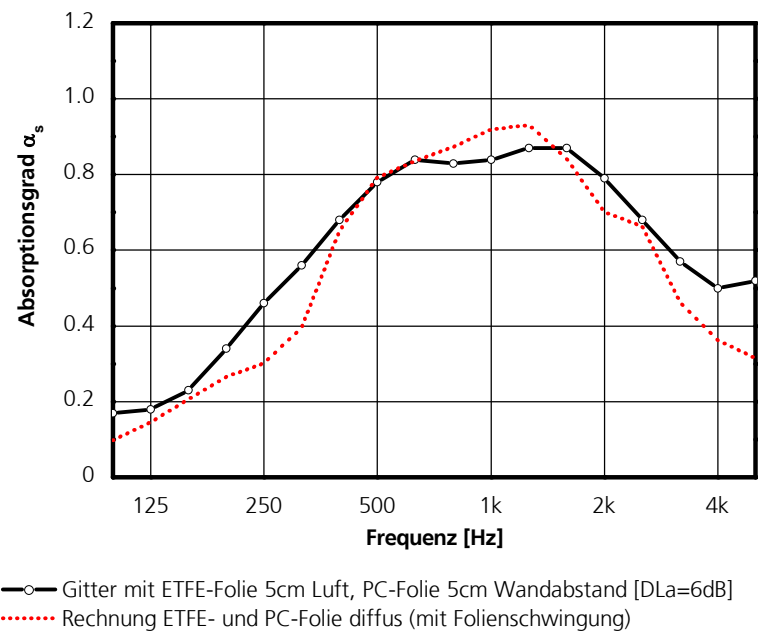


Bild 24 :
Vergleich Messung – Rechnung eines zweilagigen MPA-Aufbaus in Bild 23.

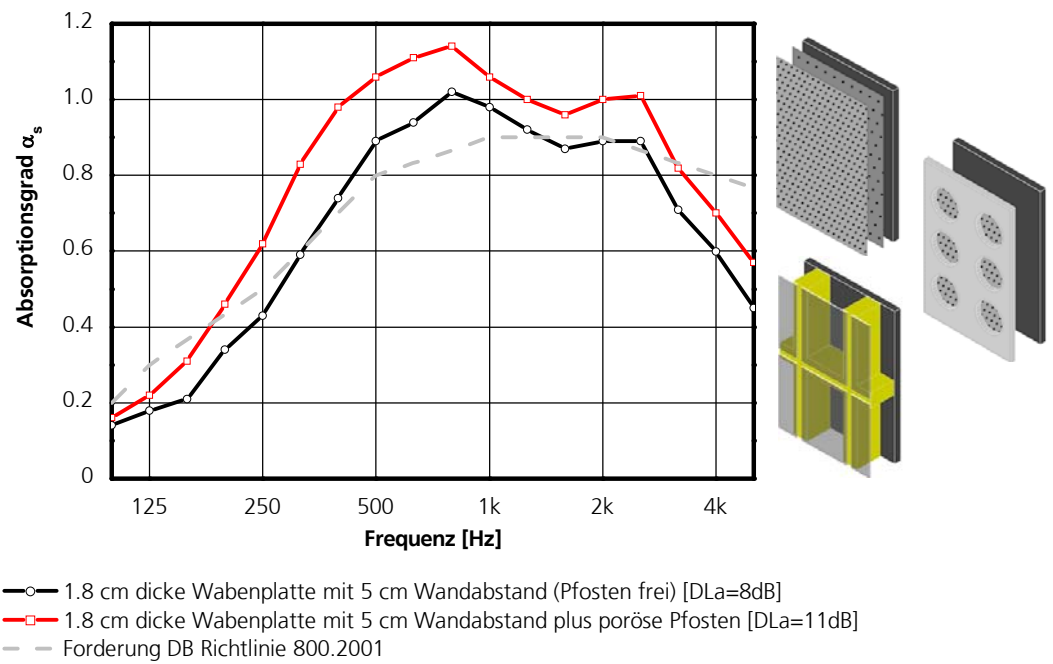
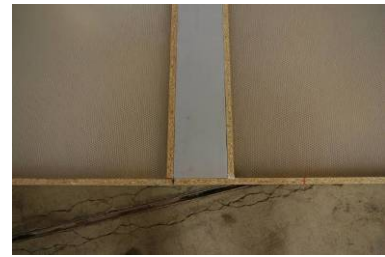


Bild 25 :
Absorptionsgrad der Wabenplatte.

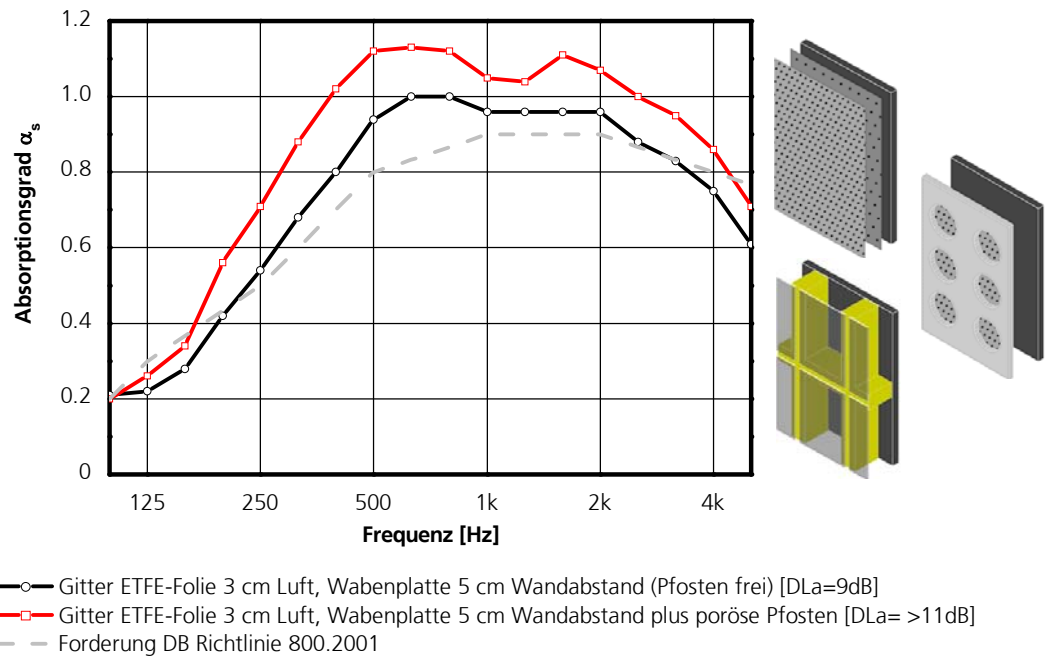
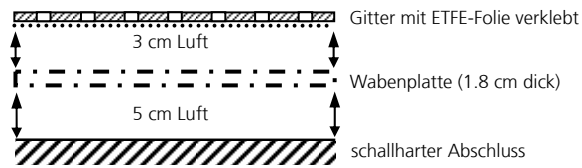


Bild 26 :
Absorptionsgrad einer dreilagigen MPA-Konstruktion.

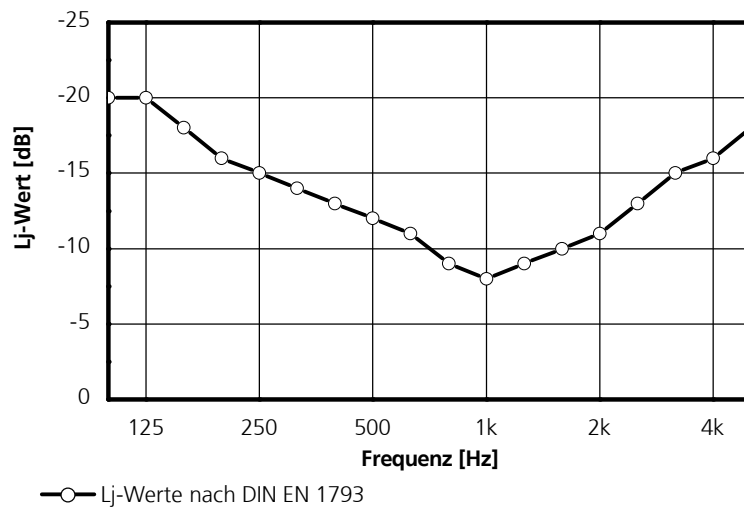
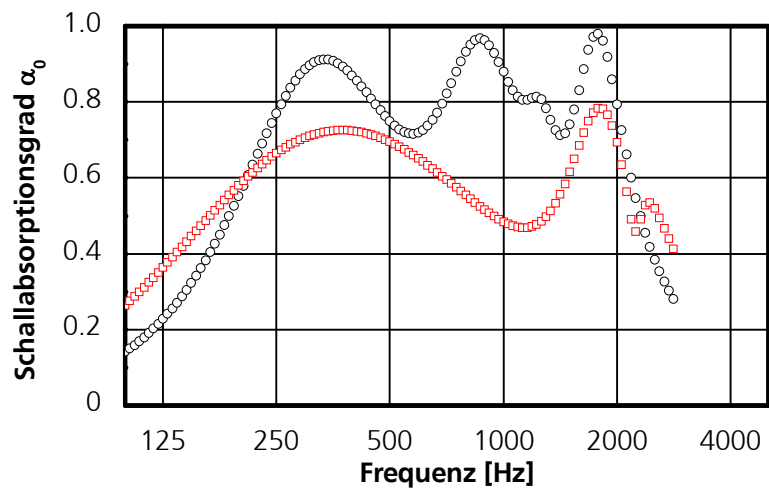
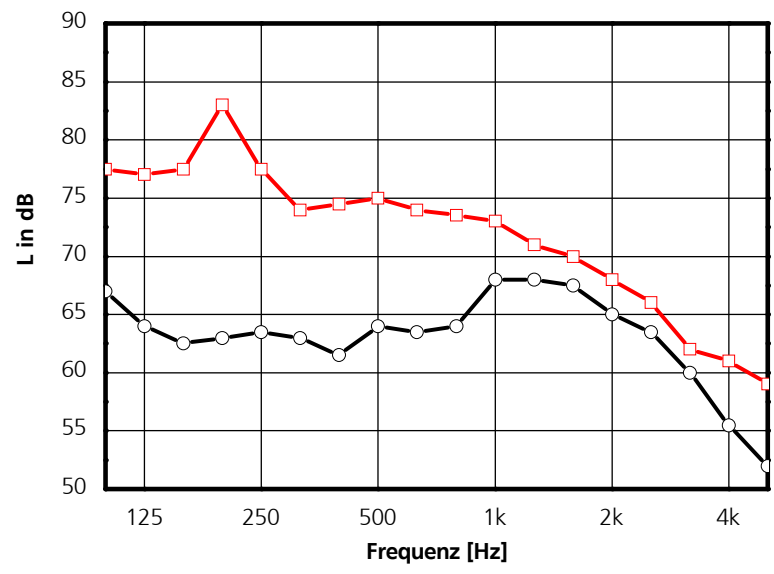


Bild 27 :
 L_j -Werte-Kurve, resultierend aus der Frequenzzusammensetzung eines mittleren Verkehrsgeräusches (A-bewertet) nach IN EN 1793.



- rechnerischer Absorptionsgrad für einen dreilagigen MPA
 ($t_1=2\text{mm}$, $b_1=2\times 2\text{mm}$, $d_1=0.45\text{mm}$, $D_1=25\text{mm}$;
 $t_2=2\text{mm}$, $b_2=2.5\times 2.5\text{mm}$, $d_2=0.45\text{mm}$, $D_2=30\text{mm}$;
 $t_3=2\text{mm}$, $b_3=4\times 4\text{mm}$, $d_3=0.45\text{mm}$, $D_3=45\text{mm}$)
- Wabenplatte (rech)

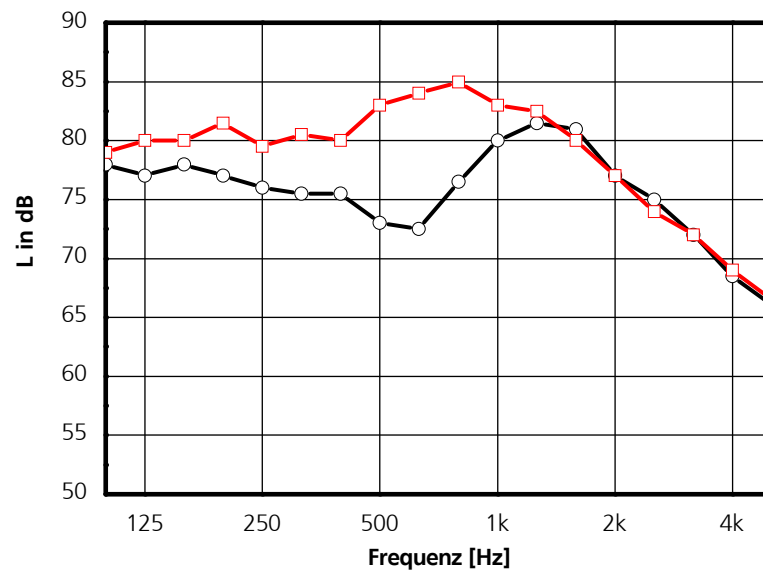
Bild 28 :
 Beispiel für eine mögliche dreilagige MPA-Konstruktion (rechnerisch).



- Spektrum Pkw-vorbeifahrt auf Stadtstraße in Ingolstadt (v=53.3 km/h, L= 70.7 dB(A))
- Spektrum Lkw-vorbeifahrt auf Stadtstraße in Ingolstadt (v=49.6 km/h, L= 80 dB(A))

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Schallpegelmessungen in Ingolstadt (2006)

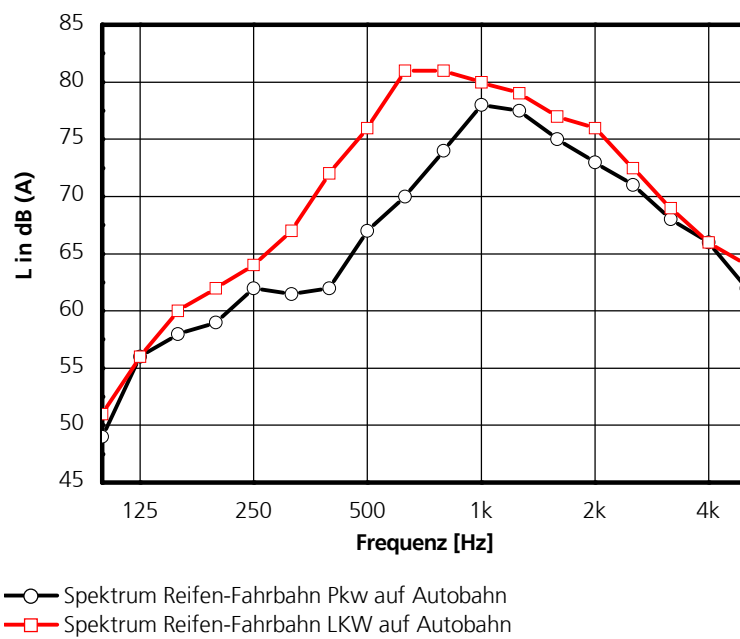
Bild 29 :
Spektrum einer Pkw- und Lkw-Vorbeifahrt auf Stadtstraße.



- Spektrum Pkw-vorbeifahrt auf Autobahn bei Echingen ($v=122.3$ km/h, $L= 83.5$ dB(A))
- Spektrum Lkw-vorbeifahrt auf Autobahn bei Echingen ($v=86.7$ km/h, $L= 87.1$ dB(A))

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Schalltechnische Untersuchungen an der A9 (2006)

Bild 30 :
Spektrum einer Pkw- und Lkw-Vorbeifahrt auf Autobahn.



Quelle: Steven, TÜV Nord 2005

Bild 31 :
 Spektrale Zusammensetzung des Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei fahrt auf einer
 Autobahn, in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse.

11 Anlagen

11.1 Transparente Materialien für den Außeneinsatz

11.1.1 Acrylglas

Strukturformel:	$[-\text{CH}_2 - \text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3) -]_n$
Name:	Polymethylmethacrylat
Andere Namen:	PMMA, Acrylglas, Plexiglas
CAS-Nummer:	9011-14-7
Monomer:	Methylmethacrylat ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ [100,117 g/mol])

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	fest
Dichte:	1190 kg/m ³
E-Modul:	2700–3200 MPa
Zugfestigkeit:	73 MPa
Wärmeleitfähigkeit:	0,19 W/(m K)
Brechzahl:	1,492 (Mineralglas: 1,45–1,9)

PMMA ist hart und steif, weist gute Zug-, Druck- und Biegefestigkeit auf. Günstig ist die für einen Kunststoff geringe Kratzempfindlichkeit. Es ist absolut farblos und von hoher Lichtdurchlässigkeit (transmittiert Licht besser als Glas). Beim Außeneinsatz ist es bestens licht-, alterungs- und witterungsbeständig - kein Vergilben! Des Weiteren ist es beständig gegen Säuren und Laugen mittlerer Konzentration, sowie gegen Benzin und Öl. Brennt nach dem Anzünden weiter, nach DIN 4102 ist es meist (wenn eine Prüfung durchgeführt wurde) als normal entflammbar (Baustoffklasse B2) eingestuft. Die Verbindung einzelner Elemente ist mittels Kleben oder Schweißen möglich.

11.1.2 ETFE

Im dauerhaften Außeneinsatz werden nur Folien auf Fluorkunststoffbasis erfolgreich verwendet. Diese hochwertigen Folien, beispielsweise aus ETFE, werden extrudiert, um eine hohe Qualität und eine gleichmäßige Materialdicke zu erreichen. Auch eine höchstmögliche Transparenz wird durch dieses Verfahren sichergestellt.

Strukturformel:	$[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 -]_n$
Name:	Ethylen-Tetrafluorethylen
Art des Polymers:	Copolymer
Monomer:	Ethen (C_2H_4 [28,05 g/mol]) Tetrafluorethylen (C_2F_4 [100,02 g/mol])

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	fest
Dichte:	1700 kg/m ³
E-Modul:	1170-1380 MPa
Zugfestigkeit:	37,9-48,3 MPa
Dehnung:	250-350 %
Wärmeleitfähigkeit:	0,24 W/(m K)

ETFE hat exzellente mechanische Eigenschaften, Härte und Reißfestigkeit kombiniert mit der chemischen Beständigkeit und den elektrischen und thermalen Eigenschaften anderer Fluorkunststoffe. Es ist besonders beständig gegen Angriffe aller aggressiven Chemikalien und Säuren, erlaubt somit den Einsatz in einem aggressiven Umweltmilieu. Über die mechanischen Eigenschaften hinaus bietet ETFE eine hervorragende Abriebfestigkeit und Steifheit. Durch seine glatte, antiadhäsive (nichthaftende) Oberfläche ist die Folie selbstreinigend. Im Gegensatz zu Glas und anderen transparenten Folien- und Plattenmaterialien ist ETFE auch durchlässig für UV-Licht (UV-A bis UV-C). Nach heutigen Erkenntnissen hat ETFE eine Lebensdauer von über 25 Jahren, ohne irgendwelche Änderungen der optischen und mechanischen Eigenschaften.

11.1.3 Polycarbonat

Strukturformel: $[- C(CH_3)_2 - C_6H_4 - O - CO - O - C_6H_4 -]_n$

Eigenschaften:

Dichte:	1200 bis 1240 kg/m ³
E-Modul:	2200 bis 2400 MPa
Zugfestigkeit:	60 MPa
Dehnung:	80 %
Wärmeleitfähigkeit:	0,21 W/K m
Brechzahl n:	1,58 - 1,6

Lichtdurchlässigkeit:

Unterhalb 400 nm Wellenlänge hohe Absorption (UV-undurchlässig aufgrund der aromatischer C-Ringe)

Transparenz im sichtbaren Bereich: 80-90%

Oberhalb 1400 nm Abfall der IR-Durchlässigkeit (auf ca. 30% bei 2400nm).

PC ist glasklar mit stark glänzender, extrem schlagfester Oberfläche. Es ist beständig gegen Witterungseinflüsse und energiereiche Strahlung (UV) und eignet sich deshalb auch für Außenanwendungen. Nachteilig an PC ist seine begrenzte Beständigkeit gegen Chemikalien, sowie Lösungsmittel, starke Säuren

und Laugen und viele Kohlenwasserstoffe (Aceton, Benzol, Toluol, Methanol). Der Kunststoff ist schwer entflammbar, d.h. bei Entzündung brennt er rußend unter Bläschenbildung, nach Entfernen der Zündquelle verlöscht Polycarbonat sofort.

11.1.4 PET

Strukturformel:	$[-O - CO - C_6H_4 - CO - O - CH_2 - CH_2 -]_n$
Name:	Polyethylenterephthalat
CAS-Nummer:	25038-59-9
Monomer:	Ethylenterephthalat ($C_8H_8O_2$ [100,117 g/mol])

Eigenschaften:

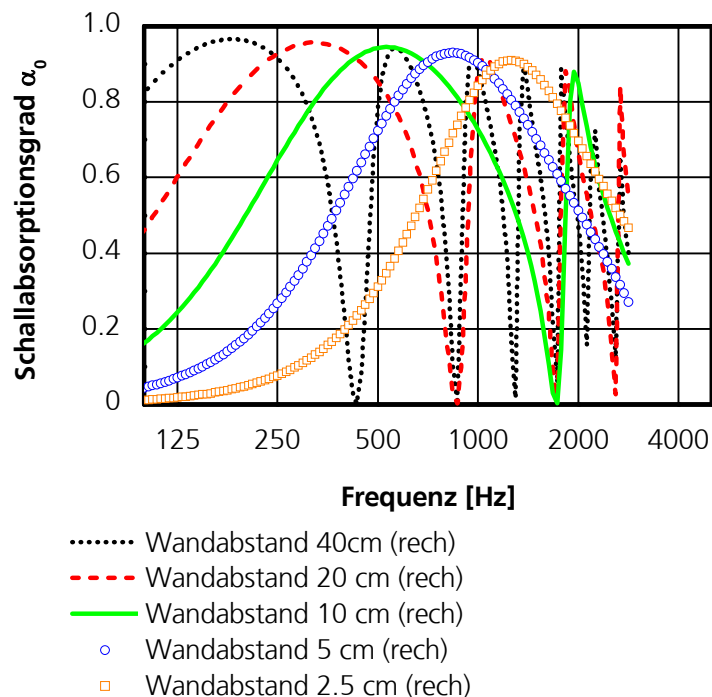
Dichte:	1300 bis 1400 kg/m ³
E-Modul:	2800 bis 3800 MPa
Dehnung:	70 %
Wärmeleitfähigkeit:	0,15 – 0,4 W/K m
Brechzahl n:	1,58 - 1,64

PET ist ein teilkristalliner thermoplastischer Polyester mit äußerst geringer Feuchtigkeitsaufnahme und hervorragenden Zeitstandverhalten. Er zeichnet sich durch hohe Härte, Zugfestigkeit und Steifigkeit aus. Hinsichtlich der Verwendung und der Haltbarkeit von PET im Außenbereich liegen keinerlei Erfahrungswerte vor, da PET hauptsächlich als Verpackungsmaterial in der Lebensmittelindustrie Anwendung findet. Es wird auch als Präzisionselement im Maschinenbau (z.B. als Lager, Zahnrad, Dichtring) verwendet, da es mechanisch, thermisch und chemisch sehr beständig ist, was bei einem Außeneinsatz von Nutzen wäre. Nur bezüglich der UV-Beständigkeit sind Abstriche zu machen.

11.2 Veränderung des Absorptionsgrad bei Modifikation eines Eingangsparameters

Als Beispiel ist der berechnete Absorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall für die Konfigurationen Makro mit ETFE-Folie und Gitter mit PC-Folie angeführt, die hier für benötigten Modellierungsparameter sind am jeweiligen Diagramm ausgewiesen. Die ursprüngliche Variante (aus den Parametern in Tabelle 6 resultierend) ist für beide Fällen im Diagramm jeweils als grüne, durchgezogene Kurve (—) abgebildet. Die Veränderung des Parameters geschah durch Verdoppelung bzw. Halbierung des ursprünglichen Wertes, um den Einfluss des jeweiligen Parameters auf das sich aufbildende Resonanzmaximum darzulegen.

11.2.1 Makro mit ETFE-Folie:

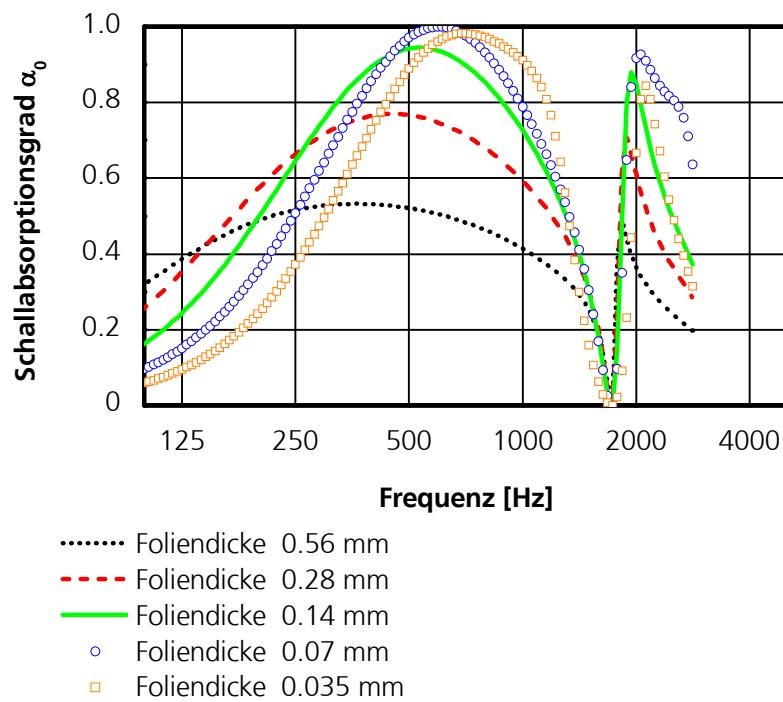


Rechenparameter:

$t = 0.14 \text{ mm}$; $b = 2 \times 2 \text{ mm}$; $d = 0.17 \text{ mm}$; $D = s$. Legende Diagramm

Bild 32 :

Variation des Wandabstandes der Makro mit ETFE-Folie – Konstruktion.

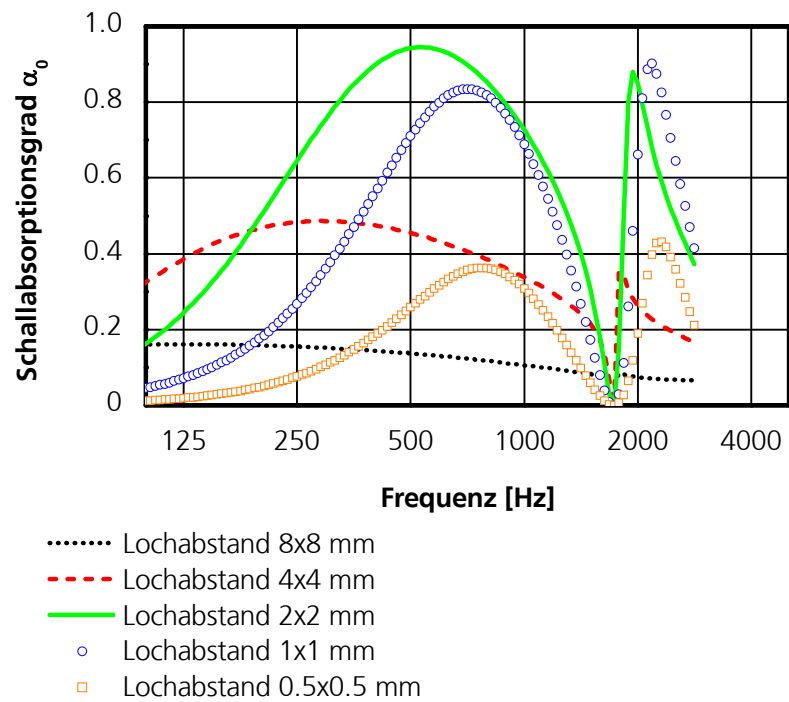


Rechenparameter:

$t = s$. Legende Diagramm; $b = 2 \times 2 \text{ mm}$; $d = 0.17 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

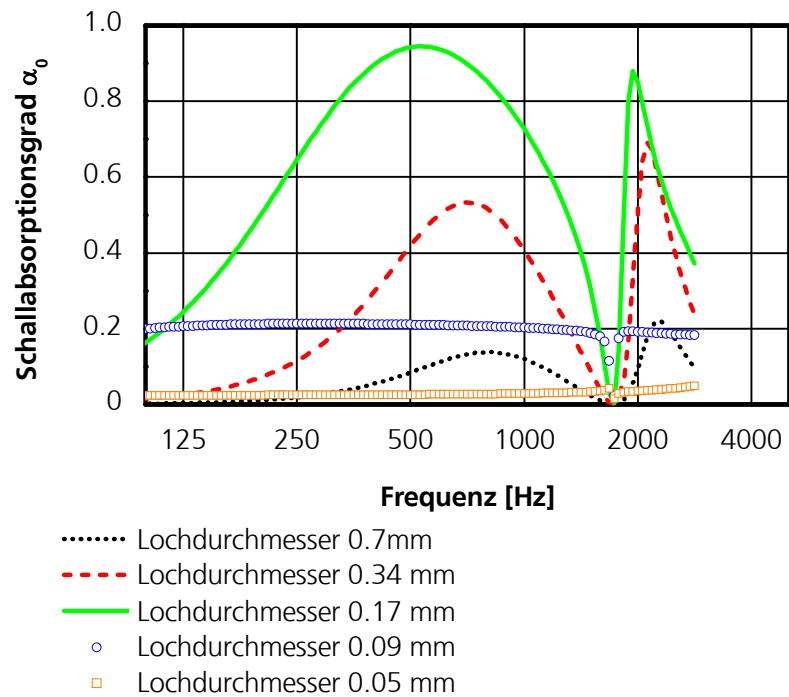
Bild 33 :

Variation Foliendicke der Makro mit ETFE-Folie – Konstruktion.



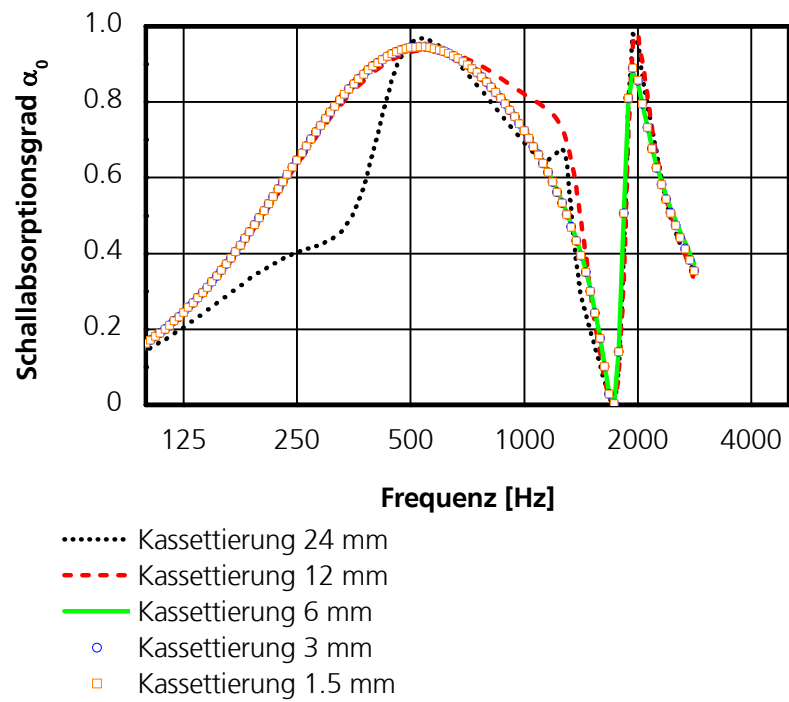
Rechenparameter:
 $t = 0.14 \text{ mm}$; $b = s$. Legende Diagramm; $d = 0.17 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 34 :
 Variation des Lochabstandes der Makro mit ETFE-Folie – Konstruktion.



Rechenparameter:
 $t = 0.14 \text{ mm}$; $b = 2 \times 2 \text{ mm}$; $d = s$. Legende Diagramm; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 35 :
 Variation des Lochdurchmessers der Makro mit ETFE-Folie – Konstruktion.



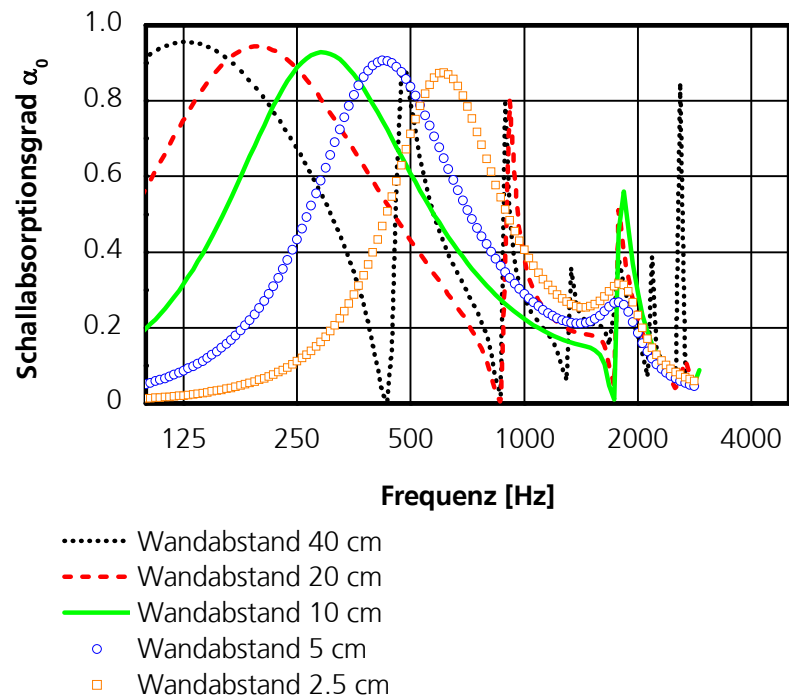
Rechenparameter:

$t = 0.14 \text{ mm}$; $b = 2 \times 2 \text{ mm}$; $d = 0.17 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 36 :

Variation Kassetierung der Makro mit ETFE-Folie – Konstruktion.

11.2.2 Gitter mit PC-Folie

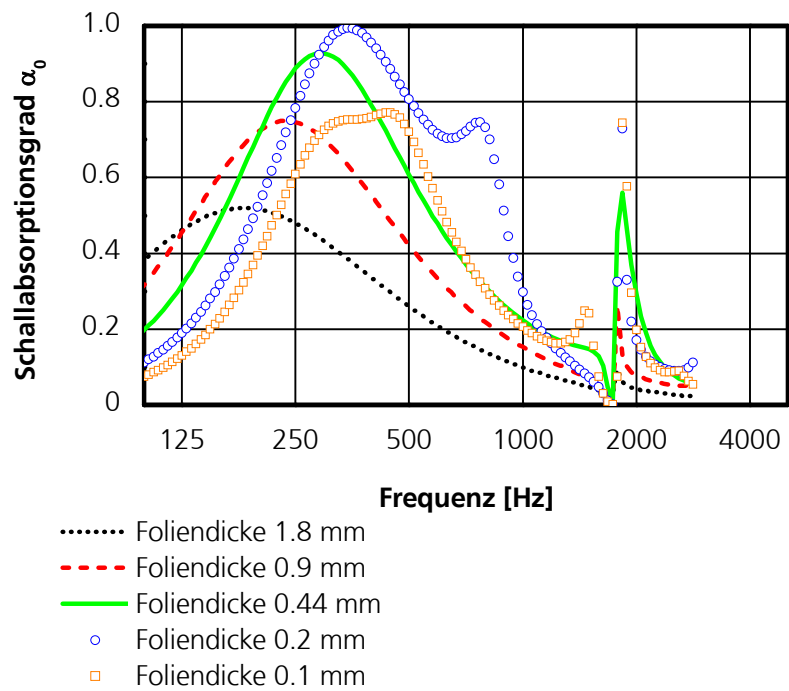


Rechenparameter:

$t = 0.44 \text{ mm}$; $b = 6 \times 6 \text{ mm}$; $d = 0.4 \text{ mm}$; $D = s$. Legende Diagramm

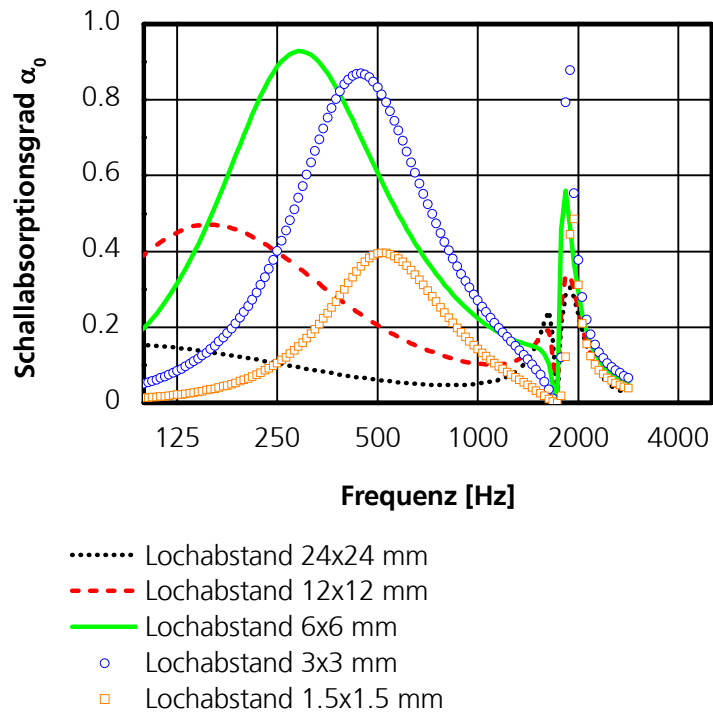
Bild 37 :

Variation des Wandabstandes der Gitter mit PC-Folie – Konstruktion.



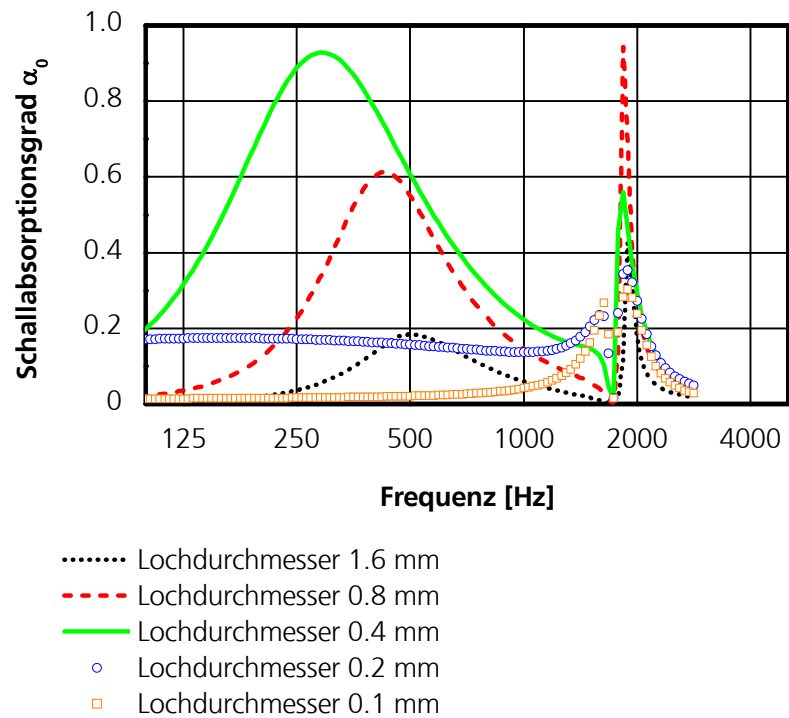
Rechenparameter:
 $t = s.$ Legende Diagramm; $b = 6 \times 6 \text{ mm}$; $d = 0.4 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 38 :
 Variation Foliendicke der Gitter mit PC-Folie – Konstruktion.



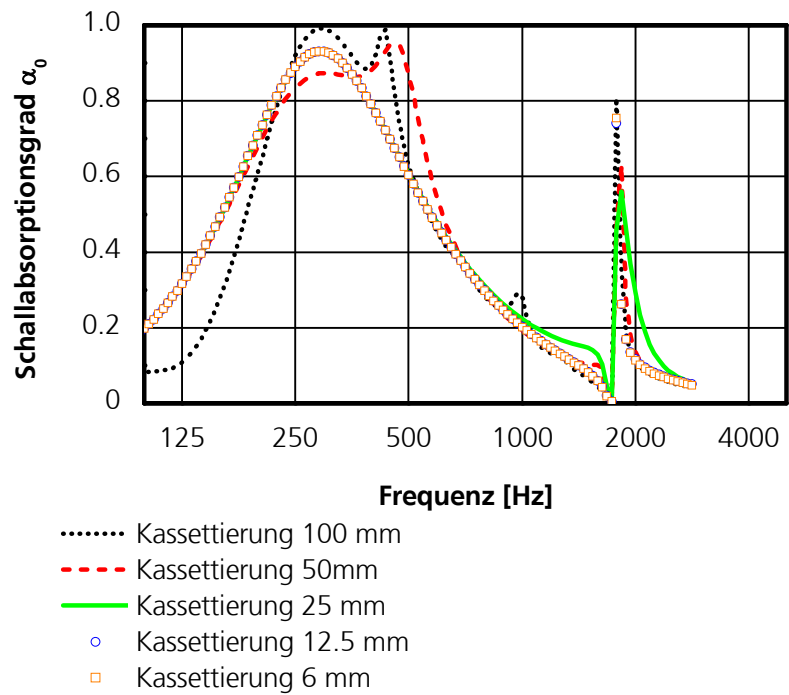
Rechenparameter:
 $t = 0.44 \text{ mm}$; $b = s$. Legende Diagramm; $d = 0.4 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 39 :
 Variation des Lochabstandes der Gitter mit PC-Folie – Konstruktion.



Rechenparameter:
 $t = 0.44 \text{ mm}$; $b = 6 \times 6 \text{ mm}$; $d = s$. Legende Diagramm; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 40 :
 Variation des Lochdurchmessers der Gitter mit PC-Folie – Konstruktion.



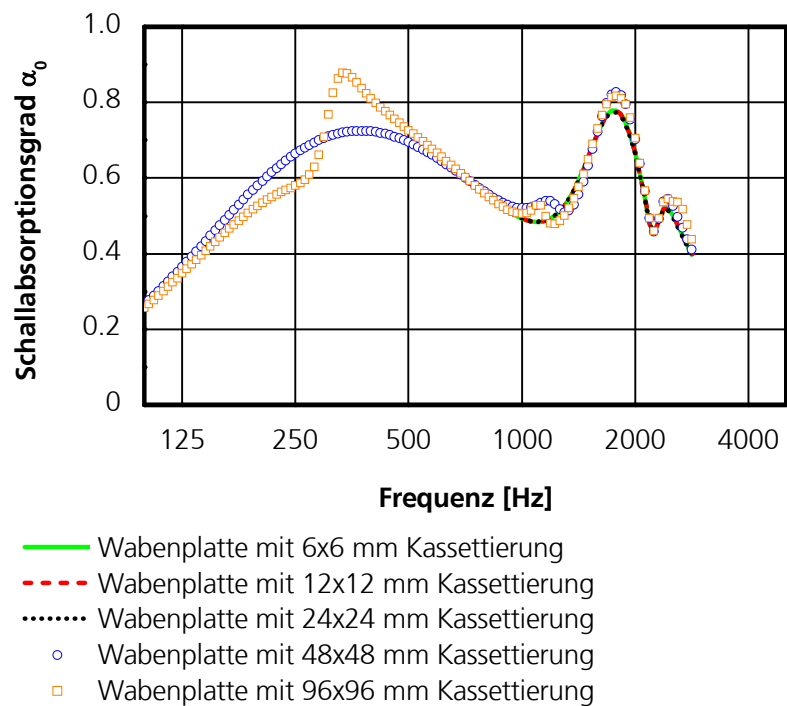
Rechenparameter:

$t = 0.44 \text{ mm}$; $b = 6 \times 6 \text{ mm}$; $d = 0.4 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$

Bild 41 :

Variation Kassettierung der Gitter mit PC-Folie – Konstruktion.

11.3 Wabenplatte mit vergrößertem Wabendurchmesser



Rechenparameter:

$t_{1,2} = 1 \text{ mm}$; $b_{1,2} = 1.8 \times 1.8 \text{ mm}$; $d_{1,2} = 0,25 \text{ mm}$; $D_1 = 18 \text{ mm}$; $D_2 = 80 \text{ mm}$

Bild 42 :

Einfluss der Wabengröße auf den Absorptionsgrad bei der Wabenplatte.

11.4 Veränderung der Absorptionswirkung unter dem Einfluss von Wasser, Schlamm und Schnee

Um den Einfluss von Umwelteinwirkungen auf des Absorptionsvermögen von MPA-Elementen zu verdeutlichen, wurden einfache Laboruntersuchungen durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden ausgewählte MPA-Proben mit Wasser oder Schlamm versehen und um im Impedanzrohr die Auswirkung auf den Absorptionsgrad bei senkrechten Schalleinfall zu untersuchen.

Es ist fest zustellen, dass das Absorptionsvermögen durch das einwirken von Wasser etwas abnimmt, bei Verschmutzung der Probe mit Schlamm ist signifikanter Rückgang ersichtlich (s. **Bild 43**, **Bild 44**). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Löcher der MPA-Elemente zusetzen und in folge dessen der Perforationsgrad abnimmt, was eine Verschiebung des Resonanzmaximums zu tieferen Frequenzen zuzufolge hat. Durch Schlamm setzen sich die Löcher, auf Grund der Schmutzpartikel, stärker zu, was eine stärker Verschiebung zur Folge hat.

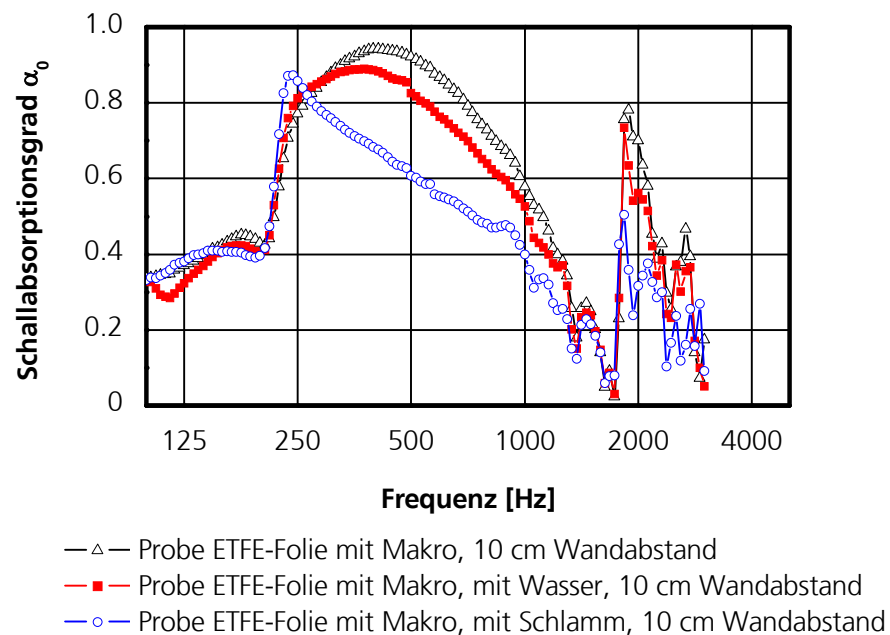


Bild 43 :
Veränderung des Absorptionsvermögens der ETFE-Folie auf Makro fixiert unter Einwirkung von Wasser und Schlamm.

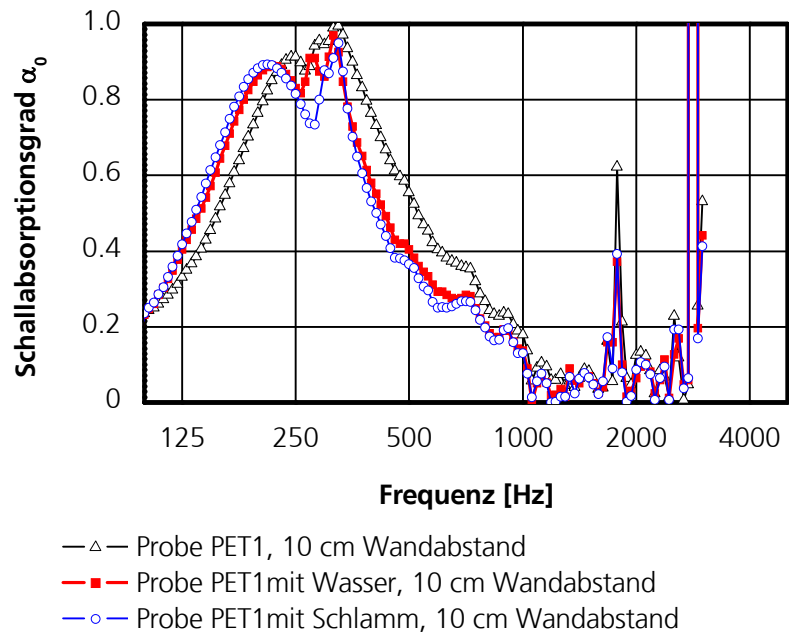
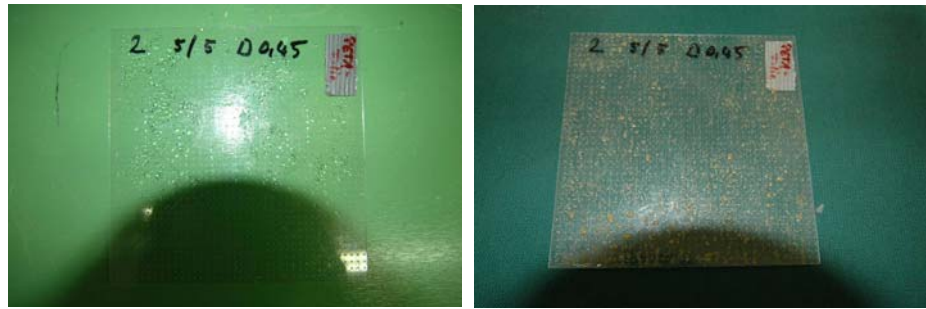


Bild 44 :
Veränderung des Absorptionsvermögens bei der PET1-Folie unter Einwirkung von Wasser und Schlamm.

Durch eine Schneeschicht vor einer MPA-Probe, wird wie in **Bild 45** dargestellt, das Absorptionsvermögen positiv beeinflusst, indem der Schnee als poröser Absorber bei hohen, und die mikroperforierte Konstruktion bei tiefen Frequenz wirkt.

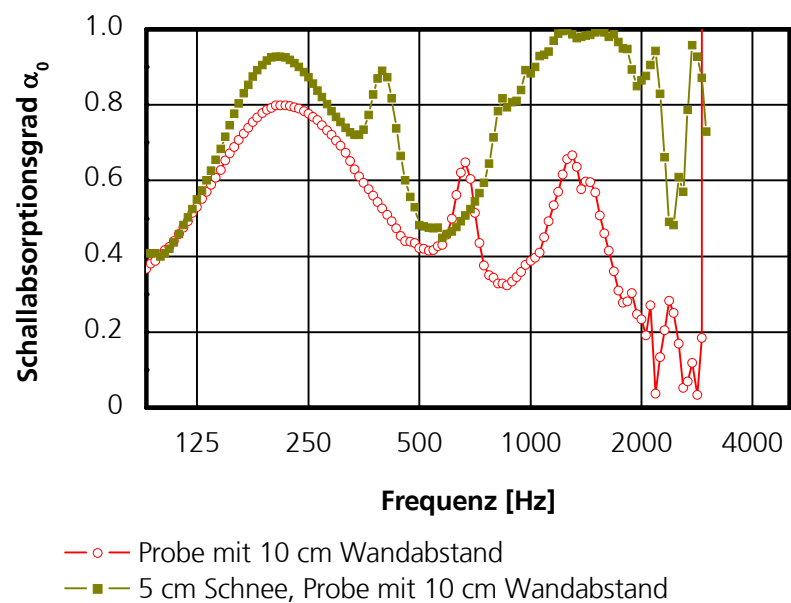
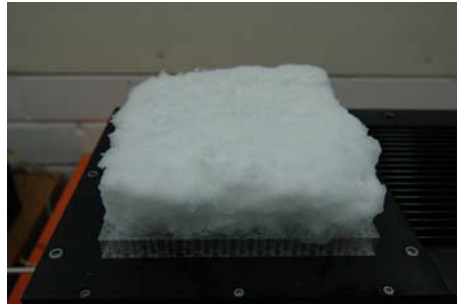


Bild 45 :
Einfluss einer Schneeschicht (5 cm) vor einer MPA-Probe auf das Absorptionsvermögen.

11.5 Maßnahmen zum Schutz gegen Vogeltod

Gefahr Nr. 1: Durchsicht

Vögel können Glas nicht als Hindernis erkennen, sie nehmen lediglich die Landschaft dahinter wahr und versuchen, diese durch die Scheibe hindurch zu erreichen.

Gefahr Nr. 2: Spiegelung

Himmel und Bäume die sich in Scheiben spiegeln, täuschen Vögeln die Illusion einer Landschaft vor. Beim Anflug dieser „Landschaft“ prallen sie dann gegen das Glas.

Glas/Kunststoff und Vogelschutz sind kein Widerspruch

Die Verwendung von Glas und Vogelschutz sind vereinbar. Es gibt experimentell belegte Methoden, wie Glasflächen für Vögel entschärft werden können, s. [28] bis [31]:

1. Beschränkung der transparenten Flächen auf das notwendige Maß.
2. Der Einsatz von verspiegeltem Glas ist zu vermeiden. Man sollte überlegen, ob in Teilbereichen Milchglas, mattes oder farbiges Glas verbaut werden kann.
3. Muster auf Scheiben machen diese für Vögel sichtbar. Die besten Ergebnisse liefern hierbei senkrechte/waagerechte weiße oder reflektierende Streifen (20 mm breit, 100 mm Abstand oder 10 mm breit, 50 mm Abstand). Auch Karos, Punktreihen oder Spinnenmuster helfen – wichtig ist hierbei, dass die Abstände der Markierungen unter 100 mm bleiben.

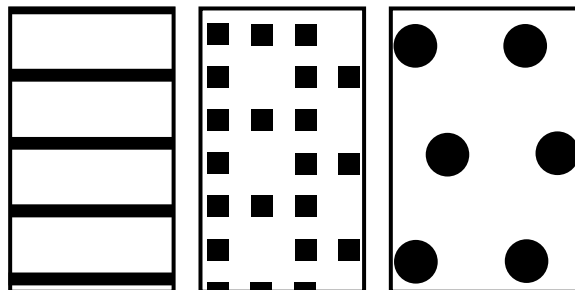


Bild 46 :

Wirksame Vogelschutzdekore (Farbe Schwarz nur zur Darstellung)

Von Links nach Rechts: Streifen 10 mm breit, 50 mm Abstand;
Quadrate 20 x 20 mm groß, 20 mm Abstand;
Punkte \varnothing 40 mm, Abstand zwischen den Mittelpunkten 100 mm

4. Greifvogelsilhouetten werden von Vögeln nicht als Feindbild wahrgenommen, weil sie sich nicht bewegen. Vögel sehen somit nur das Hindernis und prallen daneben an die Scheibe. Maßgeblich sind auch hierbei allein die Abstände der Aufkleber untereinander (< 100 mm).

5. Vermeidung von schwarzen Motiven, weil sich die Glasscheibe unterschiedlich erwärmt und somit reißen kann. Des Weiteren sind schwarze Motive in der Dämmerung für Vögel schwer erkennbar, weshalb Aufkleber in weißer oder roter Reflexionsfolie zu verwenden sind.
6. Vögel haben die Fähigkeit, im Gegensatz zu uns Menschen, UV-Licht zu sehen (Spinnennetz-Effekt). Diese Fähigkeit kann genutzt werden, indem man neu entwickeltes Isolierglas verwendet, welches mittels einer Beschichtung UV-Licht auf der Scheibe für Vögel sichtbar macht (bei weitestgehender Transparenz für das menschliche Auge). Des Weiteren könnten Vogelschutz - Folien, -Lotionen, UV-Einlagen in Kunststoffscheiben integrieren werden, um dieses Problem auch hier in Angriff zu nehmen.
7. Nach außen geneigte Flächen sind eine wirkungsvolle Maßnahme, um zu verhindern, dass Vögel in eine Glasfront fliegen. Allerdings muss der Winkel mind. 20° betragen. Noch wirkungsvoller sind nach außen geneigte Flächen, die einen Winkel bis 40° aufweisen.