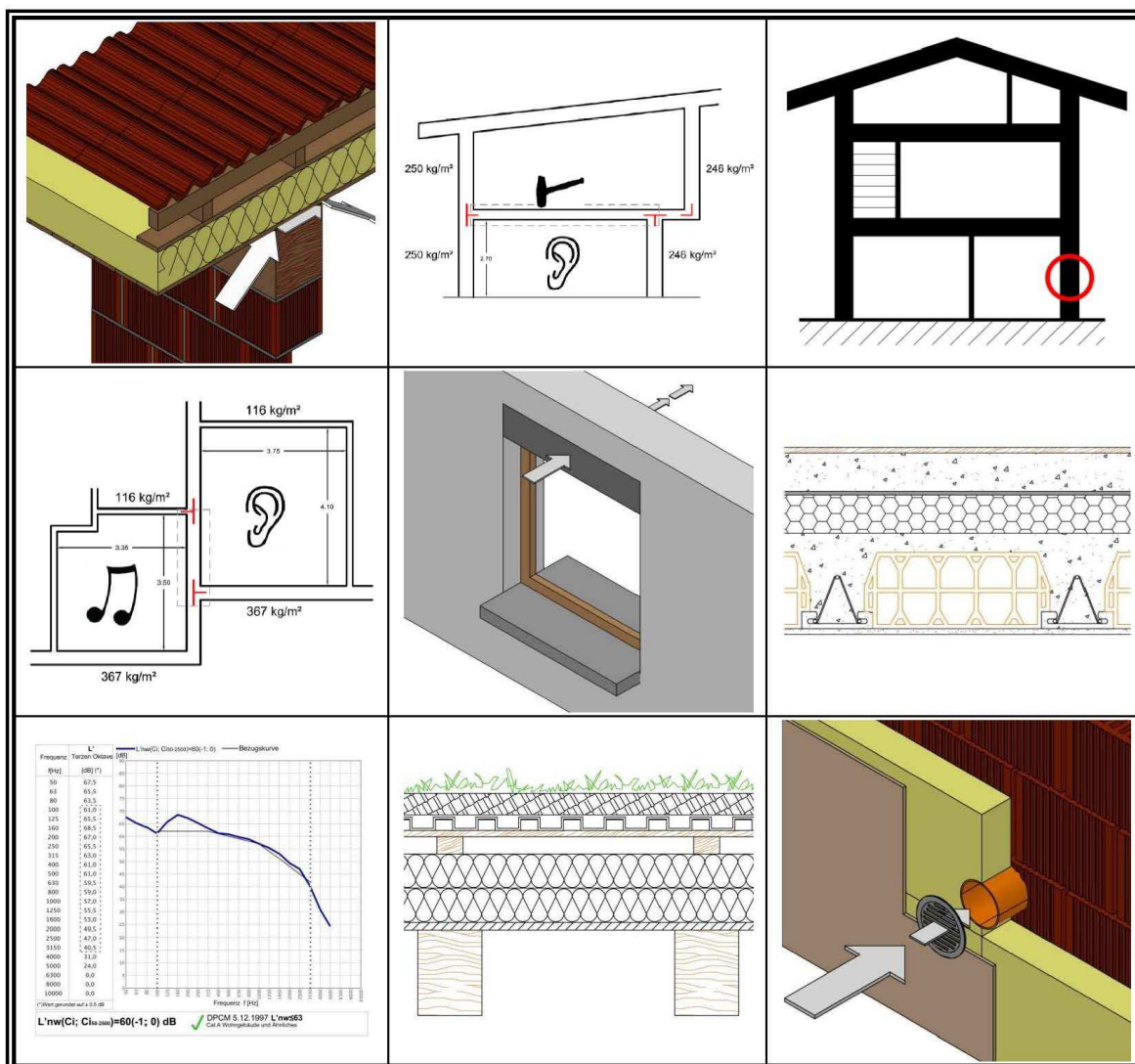


BAUTEILKATALOG ZUR BAUAKUSTIK



Herausgeber:

Autonome Provinz Bozen/Südtirol
Landesumweltagentur - Amt für Luft und Lärm
Bozen 2014

Für weitere Auskünfte:

Amt für Luft und Lärm
Tel.: 0471 411820
Internet: www.provinz.bz.it/umweltagentur/
Email: all@provinz.bz.it

Die im Katalog zusammengestellten Datenblätter sowie das vorliegende Handbuch zur Bauakustik wurden im Auftrag der Landesumweltagentur vom TBZ Technischen Bauphysik-Zentrum (Arch. Dr. Bernhard Oberrauch, Per. Ind. Alberto Piffer, Dott. Ing. Elena Resenterra) erstellt und sind das Ergebnis langjähriger Erfahrung, Messungen und Forschung.

Sämtliche Rechte des akustischen Bauteilkatalogs sind Eigentum der Autonomen Provinz Bozen. Der akustische Bauteilkatalog kann frei herunter geladen und verwendet werden, solange seine Inhalte nicht verändert oder verfälscht werden, oder für gewerbliche Zwecke benutzt oder verbreitet werden.

Bei Übertretungen sind die Strafen laut Gesetz Nr.633 vom 22.April 1941 vorgesehen.

Die in den Datenblättern enthaltenen Informationen sind als gesetzlicher Nachweis oder gerichtlicher Beweis unzulässig und die Umweltagentur kann in keinsten Weise dafür verantwortlich gemacht werden.



Lärm belastet! Er stört die geistige Arbeit, die Konzentration und die Kommunikation. Er beeinträchtigt unseren Schlaf, unsere Entspannung und unsere Erholung und wirkt sich dadurch negativ auf unsere Gesundheit aus. In den letzten Jahrzehnten wurde Lärm zu einer der größten Umweltbelastungen.

Ein steigender Anteil der Bevölkerung fühlt sich durch Lärm belästigt. Nicht ganz unerwartet steht an erster Stelle der Lärm durch Straßenverkehr.

Unmittelbar danach folgt aber der Nachbarschaftslärm. Damit müssen vorbeugende Maßnahmen zur Lärmvermeidung und zum Lärmschutz natürlich wachsende Bedeutung zukommen. Diesem Anliegen hat sich auch die Landesagentur für Umwelt verschrieben. In einem neuen Projekt hat die Agentur diese Grundlage geschaffen.

Südtirol hat mit dem Klimahaus neue Maßstäbe im energieeffizienten Bauen und auch in der Wohnqualität gesetzt. Neben einer ausgeglichenen Raumtemperatur und warmen Oberflächen zählt aber insbesondere auch ein guter Schallschutz zu den Voraussetzungen für eine gute Wohnqualität. Der Wunsch in der eigenen Wohnung zur Ruhe kommen zu dürfen und nicht durch Lärm belästigt zu werden, nimmt zu Recht wachsenden Stellenwert ein.

Mit dem vorliegenden Bauteilkatalog möchte die Umweltagentur Planern und Bauherren eine praktische Hilfestellung geben. Er enthält eine Vielzahl von am Bau nachgemessenen Lösungen, die einen guten Schallschutz ermöglichen. Dies wird umso wichtiger, wenn man bedenkt, dass sich Fehler in Planung und Ausführung gerade im Wohnungsbau nicht mehr oder nur mit erheblichen Aufwand korrigieren lassen. Der Katalog ist als offenes Dokument zu betrachten. Die Umweltagentur freut sich, wenn Planer und Baufirmen uns weitere erprobte und gemessene Konstruktionsmethoden und -lösungen zusenden würden.

Eine gute Qualität beim Schallschutz kann auch als Möglichkeit gesehen werden, um den Klimahaus-Standard mit einem weiteren Qualitätsstandard zu versehen und um den Bewohnern die bestmögliche Lebensqualität zu ermöglichen.

Richard Theiner

Landesrat für Raumentwicklung, Umwelt und Energie



AKUSTISCHER BAUTEILKATALOG

Inhaltsverzeichnis

Wie der Katalog zu lesen ist.....	3
Zusammenfassung der Ergebnisse, Aufbau, Raum-Geometrie – Seite 1.....	4
Das Diagramm und der Einzahl-Wert – Seite 2.....	7
Fachbegriffe und Definitionen.....	9
Akustische Grundlagen.....	13
Der Schall - Definition.....	13
Ausbreitung des Schalls im Gebäude.....	17
Akustische Absorption und Schalldämmung.....	18
Die Nachhallzeit.....	19
Der Einfluss der Anschlüsse / Stöße.....	20
Strategien für eine gute Schalldämmung.....	23
Akustische Qualität der angrenzenden Räume: die Kontrolle des Nachhalls.....	24
Luftschall.....	25
Das Schalldämm-Maß und das Bau-Schalldämm-Maß.....	25
Standard-Schallpegeldifferenz Luftschall.....	26
Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes.....	27
Die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w und	
Bau-Schalldämm-Maßes $R'w$	28
Mechanismen der Ausbreitung des Luftschalls.....	29
Einschalige Wände/Bauteile.....	29
Zweischalige Wände.....	30
Wesentliche Fehler in der Ausführung.....	32
Schalldämmung der Fassade.....	36
Die Bestimmung der Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade $D_{2m,nT,w}$	37
Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen.....	38
Die Dämpfung des Schalls durch Absorption: der Schalldämpfer.....	41
Wesentliche Fehler bei der Ausführung.....	43
Zusammenfassung Fassade.....	45
Körperschall.....	46
Trittschallpegel.....	46
Die Messung des Norm-Trittschallpegels.....	48
Die Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels $L_{n,w}$ und $L'_{n,w}$	50
Mechanismen der Ausbreitung des Körperschalls.....	51
Die dynamische Steifigkeit.....	52
Wesentliche Fehler bei der Ausführung.....	54



Lärmbelästigung durch Installationen.....	56
Sanitärinstallationen.....	56
Aufzüge.....	57
Heizungen.....	58
Lüftungsanlagen.....	59
Kühlanlagen.....	59
Gesetze und Normen.....	60
Das derzeit gültige Gesetz.....	60
Die gültige technische Norm.....	60
Rechenmodelle für die Planung.....	62
Laut UNI EN 12354-1.....	62
Laut UNI EN 12354-2.....	62
Laut UNI EN 12354-3.....	62
Kommerzielle Software.....	63



Wie der Katalog zu lesen ist

Die Autonome Provinz Bozen hat den vorliegenden akustischen Bauteil-Katalog erstellt, um ein leicht verständliches, frei verfügbares Werkzeug für Planer, Akustiktechniker und alle anderen im Bauwesen Tätigen zur Verfügung zu stellen. Die im Katalog dargestellten Lösungen dienen dabei als Hilfe und Orientierung. Die erzielbaren Schalldämmungen hängen jedoch stark von der Planung und insbesondere von der Ausführung ab, und wir empfehlen, kompetente Techniker in Akustik von Anfang an mit einzubeziehen.

Die gesammelten und dargestellten Messungen sind keine Labormessungen, sondern Messungen vor Ort. Damit enthalten sie auch Schwachstellen, wie Flankenübertragungen und andere Fehler oder notwendige Kompromisse. Bei manchen Datenblättern war es trotz maximaler Sorgfalt nicht möglich zu überprüfen, ob die in der Planung vorgesehenen Materialien und Stärken auch tatsächlich so ausgeführt wurden. Insofern dürfen die angegebenen Werte nicht als absolut betrachtet werden. Da die akustische Eigenschaft jedes Elements auch von den umgebenden Bauteilen ("Flanken") und deren Verbindungen abhängt, ist deren Einfluss und jener eventueller Schallbrücken im geometrischen Kontext wesentlicher Bestandteil des Ergebnisses. Als Beispiel dafür kann der Schall-Nebenweg über die Dachkonstruktion die Schalldämmung einer Wohnungstrennwand im Dachgeschoss wesentlich mindern.

Wo es möglich war, wurde dieser Einfluss auch in den Datenblättern im Vergleich dargestellt mit den entsprechenden Hinweisen auf andere Datenblätter. Dadurch werden Zusammenhänge begreiflich gemacht.

Der Katalog enthält über 150 Bauelemente mit verschiedenen Lösungen. Die konstruktiven Elemente im Katalog betreffen Decken, Trennwände zwischen verschiedenen Wohnungen oder verschieden genutzten Räumen, Fassaden und Dächer, sowohl in Massivbauweise als auch Leichtbauweise (Holzbau und Trockenbau).

Zusätzlich zu den Aufbauten, welche die gesetzlichen Mindestanforderungen des Ministerialdekrets vom 05.12.1997 erfüllen, sind auch einige enthalten, die diese Grenzwerte nicht einhalten. Diese sollen dem Vergleich dienen, da sie entweder typische Fehler enthalten oder den Status quo vor der Sanierung darstellen.

Der Katalog ist so aufgebaut, dass er ständig erweitert werden kann, sodass auch zukünftige am Markt verwendete Techniken und Aufbauten integriert werden können.

Die Akustiktechniker und die Planer, welche über Messungen von Aufbauten verfügen, die hier noch nicht dargestellt sind, sind eingeladen diese zur Verfügung zu stellen. Diese neuen Datenblätter werden vom Amt für Luft und Lärm der Umweltagentur genehmigt und in den Katalog integriert.



Zusammenfassung der Ergebnisse, Aufbau, Raum-Geometrie – Seite 1

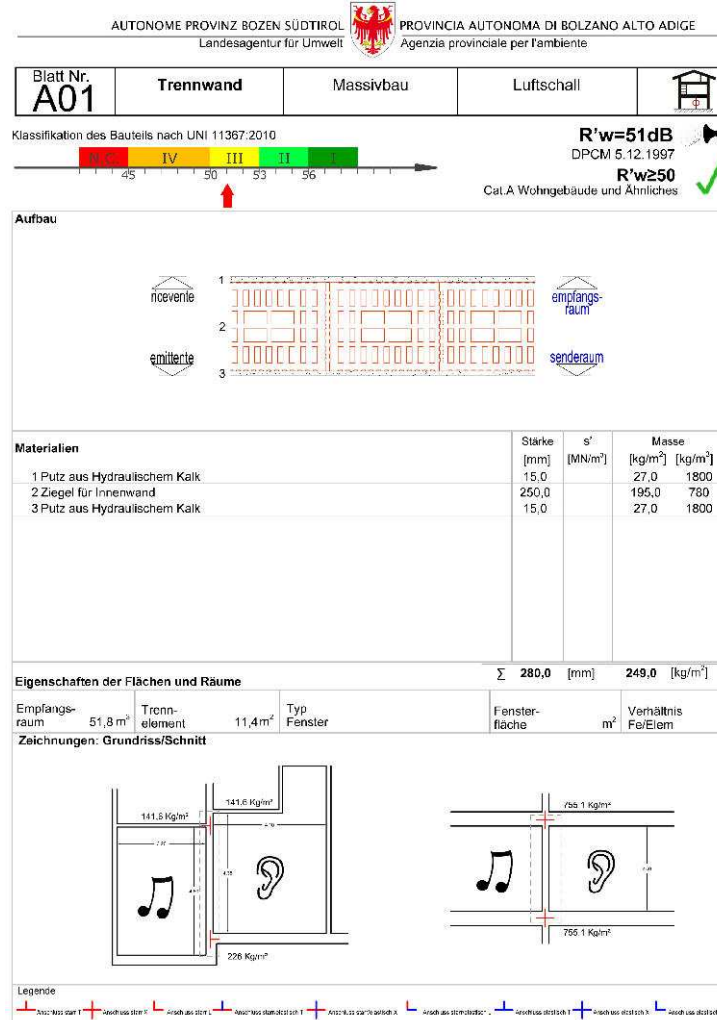


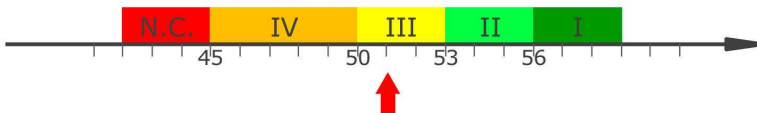
Fig. 1 Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Die Datenblätter sind nach Art der Elemente (Trennwand, Decke,...) sortiert, im dargestellten Beispiel mit der Nummer "A01"; weiters wird die Art des Bauteils, der Messung und der Bauweise angegeben. Das Ergebnis wird als kurzer Einzahlwert und die Klassifizierung laut UNI 11367 dargestellt, die Farben der Bewertung sind an die energetische Zertifizierung angelehnt.



Blatt Nr. A01	Trennwand	Massivbau	Luftschall	
-------------------------	------------------	-----------	------------	--

Klassifikation des Bauteils nach UNI 11367:2010

**R'_w=51dB**

DPCM 5.12.1997

R'_w≥50

Cat.A Wohngebäude und Ähnliches



Fig. 2 oberer Teil Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Im mittleren Teil wird der Bauteil mit Zeichnung, Materialien, deren Stärken, eventueller dynamischer Steifigkeit s' und Masse pro Fläche bzw. Volumen (Rohdichte) dargestellt. An dieser Stelle möchten wir darauf erneut hinweisen, dass es in der Ausführung oft Änderungen insbesondere bei der Rohdichte gibt, die nicht ausreichend dokumentiert werden.

Für die dynamische Steifigkeit s' wird der vom Hersteller bereit gestellte Wert verwendet, falls in den Bemerkungen im Datenblatt nicht anders angegeben. Dieser Wert muss allerdings kritisch und mit Vorbehalt verwendet werden, da die Technischen Daten mancher Hersteller Werte mit Abweichungen von der Messmethode der UNI 29052-1 enthalten.

Aufbau

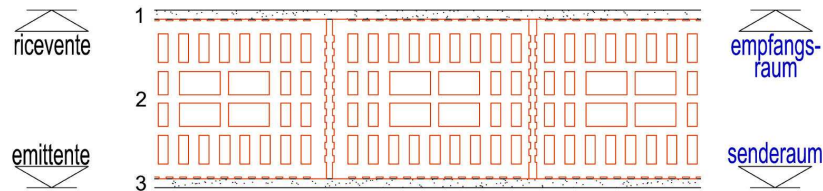
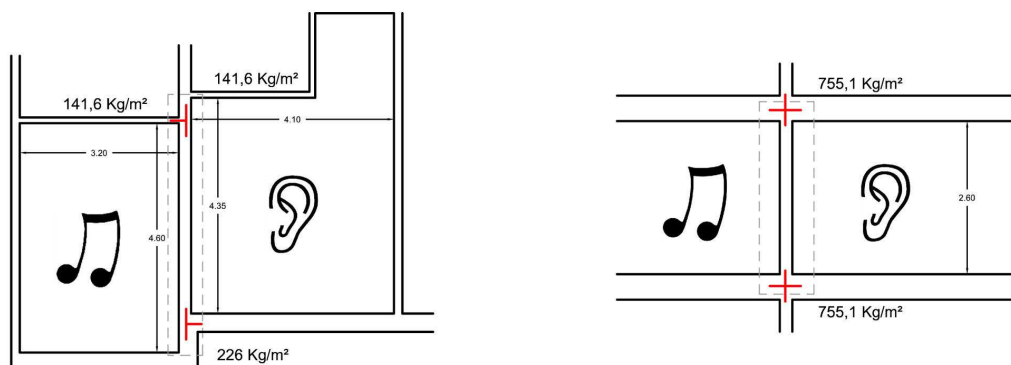
[illegible]

Fig. 3 mittlerer Teil Datenblatt , 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Der untere Teil beschreibt die geometrische Situation zwischen Senderraum und Empfangsraum, sowie die flächenspezifischen Massen der umgebenden Bauteile und die Art der Verbindungen.

Zeichnungen: Grundriss/Schnitt



Legende



Fig. 4 unterer Teil Datenblatt , 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH



Das Diagramm und der Einzahl-Wert – Seite 2

Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Schalldämmung bzw. des Schallpegels bei den unterschiedlichen Frequenzen an, sowie das Einzahl-Ergebnis, welches der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz entspricht (siehe auch UNI 717 1/2).

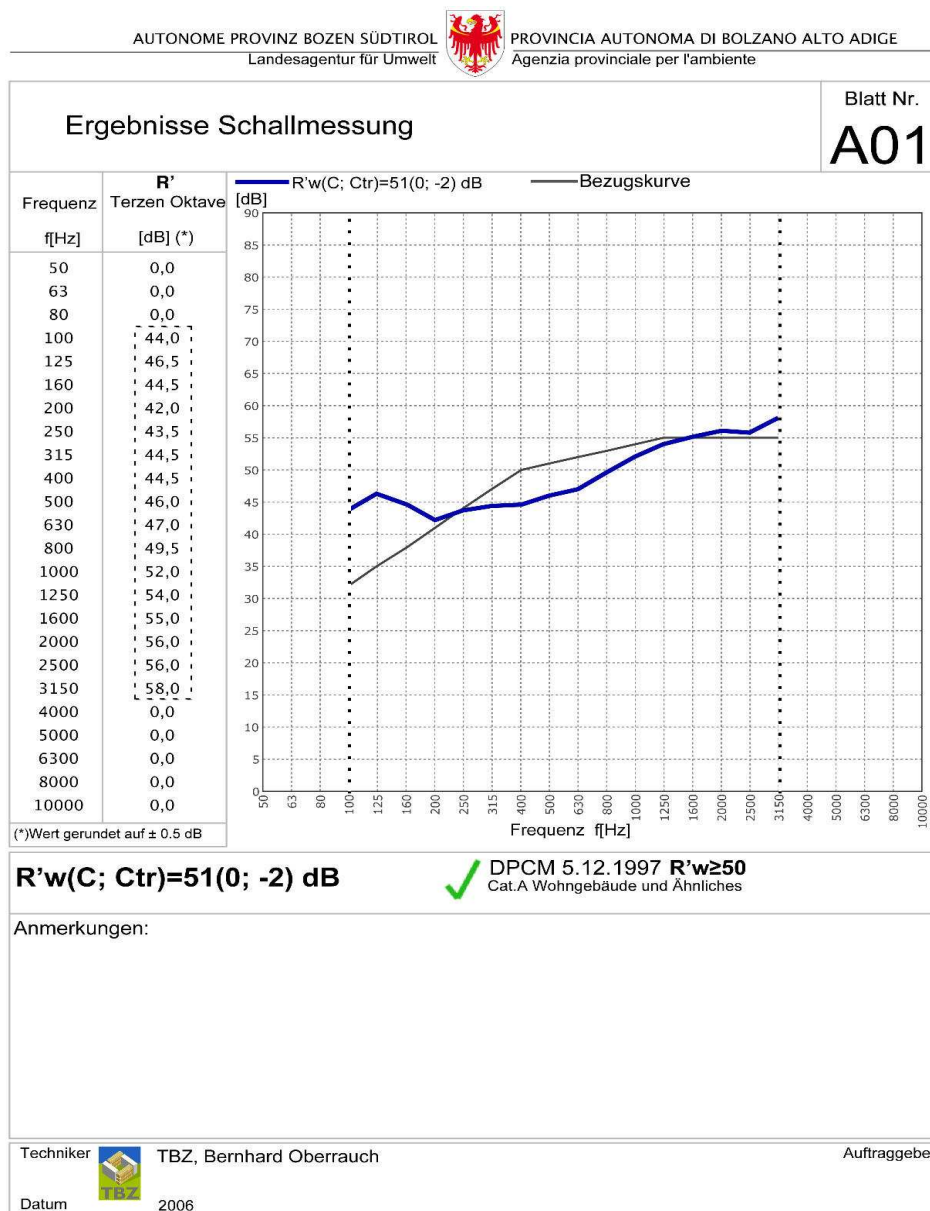


Fig. 5 Datenblatt , 2.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Die Korrekturspektren C und C_{tr} werden in Italien, Österreich und Deutschland noch nicht angewandt, in der Schweiz aber sehr wohl. C wird für die internen Elemente verwendet, C_{tr} für die



Fassaden, wobei für den Verkehrslärm besonders die tieferen Frequenzen berücksichtigt werden (tr = "traffic").

Mit Hilfe des Diagrammes lassen sich eventuell auch jene Frequenzen bestimmen, bei denen das Bauteil Schwachstellen aufweist (z.B. hervorgerufen durch Resonanzeffekte oder steife Anschlüsse). Auch wenn Bauteile den gleichen Einzahl-Wert aufweisen, können sie sich akustisch unterschiedlich verhalten, wenn sich der Frequenzverlauf unterscheidet.

Es sei darauf hingewiesen, dass sehr tiefe Frequenzen (unter 100 Hz) nicht in die Berechnung des Einzahl-Wertes mit einfließen, auch wenn sie vom Menschen wahrgenommen werden. Wo verfügbar werden aber auch die tiefen Frequenzen in den Datenblättern dargestellt.

Im Abschnitt "Anmerkungen" werden weitere Hinweise, mögliche Fehler oder Sonstiges angegeben.

Ganz unten ist der Messtechniker und das Jahr der Messung eingetragen, sowie fakultativ der Auftraggeber der Messung. Diese Angabe soll auch ein Anreiz für den Messtechniker und den Auftraggeber der Messung sein, weitere Messungen zur Verfügung zu stellen, um die vorliegende Sammlung im Laufe der Zeit zu erweitern.



Fachbegriffe und Definitionen

In dieser Tabelle werden die Fachbegriffe, die im Katalog verwendet werden, zusammengefasst und erklärt:

Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Periode	T	s	Die zeitliche Dauer einer Wellenlänge, um eine ganze Schall-Welle zu vollenden.
Wellenlänge	λ	m	Abstand einer Schallwelle in der Periode T .
Frequenz	f	Hz	Die Anzahl der Wellen pro Zeiteinheit. Die unterschiedlichen Frequenzen werden als tiefe, mittlere und hohe Töne wahrgenommen.
Resonanz-Frequenz	f_0	Hz	Frequenz, bei der das Element stark mitschwingt und deshalb die Schalldämmung wesentlich reduziert. Sie ist bedingt durch die Stärke, das Flächengewicht und die Steifigkeit. Das konstruktive Element soll so dimensioniert werden, dass die Resonanz-Frequenz unterhalb der relevanten Frequenzen liegt.
Koinzidenz-Frequenz	f_c	Hz	Frequenz, bei der das Element stark mit schwingt und deshalb die Schalldämmung wesentlich reduziert. Das konstruktive Element soll so dimensioniert werden, dass die Koinzidenz-Frequenz oberhalb der relevanten Frequenzen liegt.
Schalldruck	P	Pa	Amplitude der Schallwelle.
Bezugsdruck	P_0	Pa	Schalldruck von 20 μ Pa, Hörgrenze (entspricht 0 Dezibel).
Dezibel	dB	dB (bez. 20 μ Pa)	Numerische Darstellung des Schall-Pegels, Quotient aus gemessenem Schalldruck P und Bezugsdruck P_0 . Durch diese Darstellung sind die Zahlen leichter zu vergleichen und zu gebrauchen.
Schallpegel in einem Raum	L	dB (bez. 20 μ Pa)	Mittlerer Schallpegel in Dezibel.
Schallpegel im Senderaum	L_1	dB (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel im Senderaum, der durch das konstruktive Element vom Empfangsraum getrennt ist.
Schallpegel im Empfangsraum	L_2	dB (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel im Empfangsraum, der durch das konstruktive Element vom Senderaum getrennt ist.
Schallpegel bei 2 m Entfernung	$L_{1,2m}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel in einer Entfernung von 2 Metern vor der Fassade.
Absorptionsgrad	α	-	Der Schallabsorptionsgrad α ist ein Maß für die offensichtlich absorbierte Schallenergie. Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallenergie. $\alpha+r=1$; damit liegt α zwischen 0 (absorbiert nichts) und 1 (absorbiert alles).
Äquivalente Absorptionsfläche	A	m ²	Multipliziert man die Fläche eines Bauteils mit dessen Absorptionsgrad α , so erhält man die Äquivalente Absorptionsfläche A .



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Äquivalente Bezugs-Absorptionsfläche	A_0	m ²	Äquivalente Absorptionsfläche von 10 m ² .
Volumen	V	m ³	Volumen eines Raumes.
Schallquelle	S	-	Elektroakustisches oder mechanisches Gerät, um Schall zu erzeugen.
Schallreflexions-faktor	r	-	Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallenergie.
Absorptions-Koeffizient	δ	-	Schallenergie, welche vom Material absorbiert wird.
Schalltransmissions-grad	τ	-	Der Schalltransmissionsgrad τ ist ein Maß für die durchgelassene Schallintensität
Nachhallzeit	T_{60}	s	Ist definiert als die Zeit, in welcher der Pegel des Ausgangssignals um 60 dB abnimmt. Allerdings wird für diese Messung nur die Zeit berücksichtigt, die für einen Abfall von 0 dB auf -20 dB bzw. -30 dB benötigt wird. Die gemessene Zeit wird dann auf einen Abfall um 60 dB extrapoliert.
Bezugs-Nachhallzeit	T_0	s	Für Wohnräume wird mit einer Bezugs-Nachhallzeit $T_0 = 0,5$ s gerechnet.
Stoßstellendämm-Maß	K_{ij}	dB (bez. 20 µPa)	Stoßstellendämm-Maß für jeden Übertragungsweg zwischen dem Bauteil i und dem Bauteil j an einer Stoßstelle, nach EN12354-2000.
Dichte	m	kg/m ³	Masse pro Volumeneinheit.
Flächengewicht	m'	kg/m ²	Flächenbezogene Masse eines Bauteils.
Schallpegel-Differenz	D	dB (bez. 20 µPa)	Differenz zwischen den Schallpegeln L_1 und L_2 , welche zwischen dem Senderaum und Empfangsraum gemessen wurden.
Norm-Schallpegel-differenz	D_n	dB (bez. 20 µPa)	Schallpegeldifferenz D bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche.
Standard-Schallpegel-differenz	$D_{n,T}$	dB (bez. 20 µPa)	Schallpegeldifferenz D bezogen auf einen Bezugswert der Nachhallzeit im Empfangsraum T_{60} .
Schalldämm-Maß	R	dB (bez. 20 µPa)	Norm-Schallpegeldifferenz zwischen L_1 und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A und die Fläche des konstruktiven Elements (als Labormessung) ohne Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewertetes Schalldämm-Maß	R_w	dB (bez. 20 µPa)	Einzahl-Angabe des Schalldämm-Maßes als Labormessung, bezogen auf 500 Hz.
Bau-Schalldämm-Maß	R'	dB (bez. 20 µPa)	Norm-Schallpegeldifferenz zwischen L_1 und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A und die Fläche des konstruktiven Elements als Messung vor Ort, mit Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	R'_w	dB (bez. 20 µPa)	Einzahl-Angabe des Bau-Schalldämm-Maßes als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Standard Schallpegeldifferenz einer Fassade	$D_{2m,nT}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade zwischen L_1 (in 2 m Entfernung von der Fassade) und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A , als Messung vor Ort.
bewertete Standard-Schallpegeldifferenz einer Fassade	$D_{2m,nT,w}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.
Norm-Trittschallpegel, Labormessung	L_n	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Trittschallpegel L_2 bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A ohne Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewerteter Norm-Trittschallpegel, Labormessung	L_{nw}	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe des Norm-Trittschallpegels als Labormessung, bezogen auf 500 Hz.
Norm-Trittschallpegel, Messung vor Ort	L'_n	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Trittschallpegel L_2 bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A mit Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewerteter Norm-Trittschallpegel, Messung vor Ort	$L'_{n,w}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe des Norm-Trittschallpegels als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.
Spektrum-Anpassungswert C und C_{tr}	C / C_{tr}	dB (bez. 20 μ Pa)	Korrekturwert für die Einzahl-Angaben für Luftschallmessungen, um das Ergebnis besser dem Höreindruck anzupassen, relativ auf die verwendete Schallquelle (C : bei typischem „Wohnlärm“ wie Sprechen, normal lauter Musik aus Stereoanlagen oder TV, C_{tr} : Verkehrslärm).
Spektrum-Anpassungswert C_1 , $C_{1,50-2500}$	C_1 $C_{1,50-2500}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Korrekturwert für die Einzahl-Angaben für Trittschallmessungen. Mit Hilfe der Spektrum-Anpassungswerte C_1 , $C_{1,50-2500}$ sollen die Geräusche, die beim Begehen verschiedener Arten von Decken entstehen, besser nachgebildet werden, wegen mangelhafter Abbildung von Gehgeräuschen bei Betondecken ohne wirkungsvolle Deckenauflage oder bei Holzbalkendecken (tieffrequente Spitzenpegel); bei Betondecken mit wirkungsvollen Deckenaufgaben ergibt sich der Spektrum-Anpassungswert zu $C_1 = 0$. $C_{1,50-2500}$ berücksichtigt dabei auch die tiefen Frequenzen von 50-100 Hz, die für das subjektive Hörempfinden wesentlich sind.
Dynamische Steifigkeit	s'	MN/m ³	Elastizität eines Materials bei dynamischer Belastung.
Schallpegel Installations-geräusche kontinuierlich	L_{Aeq} L_{ic}	dB(A) (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel von kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie Heizung, Kühlung, Lüftung, usw.
Schallpegel Installations-geräusche diskontinuierlich	L_{ASmax} L_{id}	dB(A) (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel von nicht kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie sanitären Zu- und Abflüssen, Aufzügen, usw.



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Rosa Rauschen	-	-	Das Rosa Rauschen (auch $1/f$ -Rauschen) bezeichnet ein Rauschen, wo der Schallpegel mit steigender Frequenz proportional abnimmt, die Rauschleistungsdichte halbiert sich bei Verdopplung der Frequenz. Praktisch heißt dies, dass der Schallpegel zu höheren Frequenzen hin um 3 Dezibel pro Oktave abnimmt.
Weisses Rauschen	-	-	Beim weißen Rauschen hingegen ist der Schallpegel auf allen Frequenzen gleich, er hat die konstante Amplitude A_f .
Sine Sweep	-	-	Dies ist ein Geräusch, wo die Tonhöhe dauernd ansteigt, ausgehend von 50 Hz bis 5000 Hz. Dieses Geräusch wird vorwiegend für die Messung der Nachhallzeiten verwendet. Die Nachhallzeit T_{60} kann damit sehr genau gemessen werden, sowie auch weitere akustische Eigenschaften des Raumes.

Tabelle 1: Akustische Begriffe und Definitionen. Quelle: TBZ GmbH

Akustische Grundlagen

Der Schall - Definition

Der Schall wird über vibrierende, in Schwingung versetzte Körper erzeugt und gelangt über die Luft oder über andere elastische Materialien zum Ohr, wobei sich Kompression und Expansion abwechseln. Durch den wechselnden Druck der Schallwellen wird das Trommelfell in Schwingungen versetzt, die von den Gehörknöchelchen im Mittelohr zum Innenohr weitergeleitet werden. Dort werden die Schwingungen über die Nervenzellen in einen Höreindruck umgewandelt und vom Gehirn mit Erlebnissen verknüpft, gespeichert und eventuell in Handlungen umgesetzt.

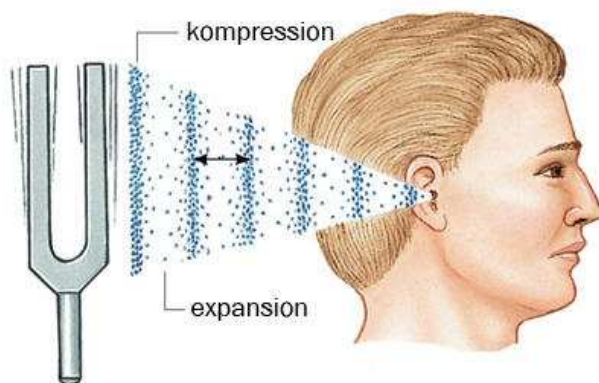


Fig. 6: Ausbreitung des Schalls. Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Auch starre Materialien leiten die Schallwellen, indem auch diese in Schwingung versetzt werden. Je starrer ein Material ist, desto schneller ist die Schallgeschwindigkeit darin:

<i>Material</i>	<i>Schallgeschwindigkeit c [m/s]</i>
Trockene Luft (15°C)	341
Wasser	1460
Ziegel	3650
Glas	5000
Stahl	6000
Kork	500
Elastisches Gummi	30 ÷ 70

Tabelle 2: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien. Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Um ein Schall-Ereignis zu definieren, werden neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit auch die Eigenschaften der Schallwelle angegeben: die Frequenz, die Periode und die Wellenlänge.

Die **Frequenz** f gibt die Anzahl der Schwingungen in der Zeit an, ausgedrückt in Hertz [Hz].

$$f = 1/T \quad [\text{Hz}]$$

Die **Periode** T ist der Kehrwert der Frequenz und gibt an, wieviel Zeit für eine komplette Schwingung vergangen ist (Kompression und Expansion), ausgedrückt in Sekunden [s].

$$T = 1/f \quad [\text{s}]$$

Die **Wellenlänge** λ gibt den Abstand zwischen zwei Wellen an, ausgedrückt in Metern [m].

Die Wellenlänge des Schalls λ kann mit seiner Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c über folgende Beziehung berechnet werden:

$$\lambda = c/f = cT \quad [\text{m}]$$

Je tiefer die Frequenz ist, desto länger ist die Wellenlänge.

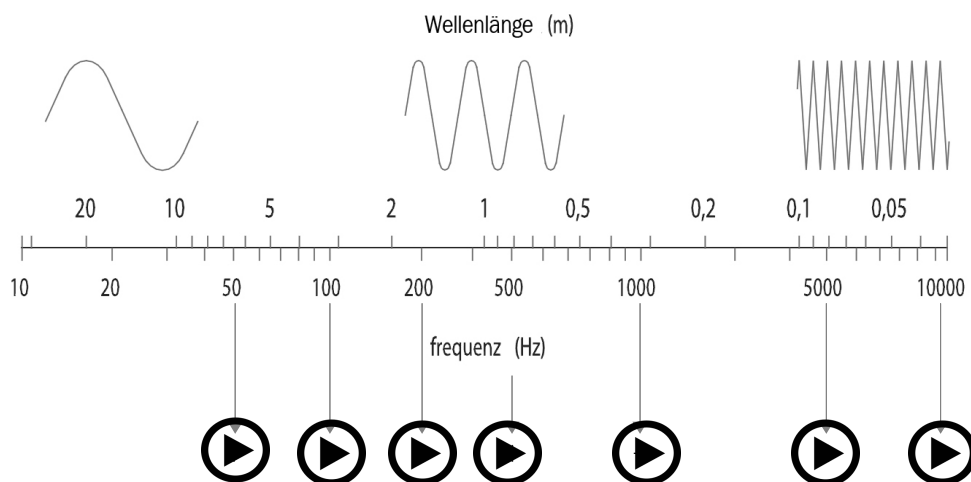


Fig. 7: Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Das menschliche Ohr kann Frequenzen von 16 bis 20.000 Hz wahrnehmen. Frequenzen unter 16 Hz werden als Vibrationen wahrgenommen, Frequenzen über 20.000 Hz sind Ultraschall und werden noch von manchen Tieren gehört. Im Laufe des Alters wird der wahrgenommene Frequenzbereich immer kleiner. Auch übermäßige Belastung hoher Lärmpegel z.B. durch Kopfhörer oder Diskotheken reduziert vorzeitig den wahrgenommenen Frequenzbereich.

Der Höreindruck hat keine lineare, sondern logarithmische Beziehung zum Schalldruck. Deshalb werden sämtliche Schallgrößen als Verhältnis zum Basiszustand angegeben, nämlich als **Decibel** [dB], und wären damit eigentlich einheitslos. Der Schallpegel [dB] definiert sich damit wie folgt:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad [\text{dB}]$$



wo P der gemessene Schalldruck ist und P_0 der Druck des Basiszustandes, unterhalb dessen das menschliche Ohr nichts mehr wahrnehmen kann, mit $20 \mu\text{Pa}$. Der Bezugswert ($20 \mu\text{Pa}$) entspricht dem minimalen Schalldruck bei einer Frequenz von 1000 Hz, und damit 0 dB. Rein mathematisch ergibt sich dann bei einem 10-fachen Schalldruck eine Erhöhung des Schallpegels um 20dB. 200 μPa entsprechen also 20 dB, 2000 μPa sind 40 dB, 20.000.000 μPa sind 120 dB, usw. Die logarithmische Skalierung wurde gewählt, damit man nicht mit immens großen Zahlen hantieren muss. In der folgenden Tabelle werden einige typische Schallereignisse in dB und in Pascal aufgelistet.

Schallquelle	Schallpegel [dB]	Schalldruck [Pa]
Rakete beim Start	180	20000
Düsenflugzeug	160	2000
Presslufthammer	130	63
Sirene	120	20
Motorsäge 1 m entfernt	110	6
Diskotheek	100	1
Lastwagen	90	0,6
starker Straßenverkehr	80	0,20
Staubsauger in 1 m Entfernung	70	0,063
Büroarbeit	60	0,020
Gespräch	50	0,0063
Bibliothek	40	0,0020
Flüstern	25	0,00036
Ticken einer Uhr	20	0,00020
Grundgeräusch im Wald	15	0,00011
Hörschwelle	0	0,000020

Tabelle 3: Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara



Das Hörempfinden der Schallintensität hängt auch von der Umgebung ab. In einer ruhigen Umgebung kann auch ein leises Geräusch als störend empfunden werden, bei einem leicht höheren Grundgeräusch-Pegel wird dasselbe Geräusch nicht mehr wahrgenommen.

Das menschliche Ohr nimmt einen Unterschied in der Lautstärke wahr, wenn die Differenz des Schallpegels +3 dB beträgt. Ein offensichtlicher Unterschied in der Lautstärke wird bei +5 dB wahrgenommen, während das Lautstärke-Empfinden (loudness) bei +10 dB eine Verdoppelung wahrnimmt.

Das Lautstärke-Empfinden kann mit folgendem Hör-Beispiel erlebt werden:

	+ 1 dB	+ 3 dB	+ 5 dB	+ 10 dB
Rosa Rauschen				
Männliche Stimme				

Tabelle 4: Quelle: TBZ GmbH

Wie in diesen Beispielen zu beobachten ist, wird bei einem gleichbleibenden Geräusch und großer Konzentration ein Unterschied beim Schallpegel schon bei 1 dB spürbar, während er bei einer verändernden Schallquelle (z.B. der männlichen Stimme) bei 1 dB nicht hörbar ist, und auch bei einer Verdoppelung der Schallleistung bei 3 dB nur schwer wahrgenommen wird. Erst bei 5 oder 10 dB ist der Unterschied deutlich.

Der mittlere Hörbereich des menschlichen Ohrs ist im folgenden Diagramm dargestellt.

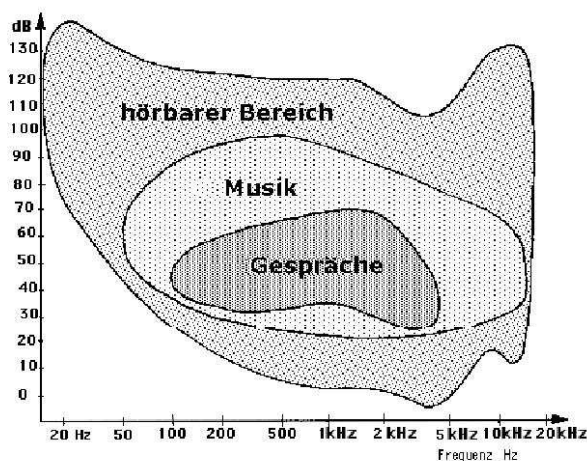


Fig. 8: Diagramm des mittleren Hörbereichs des menschlichen Ohrs.
Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di Acustica di Ferrara



Ausbreitung des Schalls im Gebäude

Wie vorher schon erwähnt, braucht der Schall zu seiner Ausbreitung ein flüssiges, festes oder gasförmiges Medium. Im Inneren des Gebäudes breitet sich der Schall über die konstruktiven Elemente wie Wände und Decken aus, und zwar entweder indirekt als Luftschall oder direkt als Körperschall.

- Luftschall sind Schallwellen, die sich über die Luft ausbreiten, wie zum Beispiel im Falle von Gesprächen, Musik, usw. In Gebäuden breiten sich diese Schallwellen zwischen einem und dem anderen Raum über die Trennelemente aus, indem diese zum Schwingen gebracht werden. Dadurch wird ein Teil der Schallenergie in den Nachbarraum übertragen.

- Körperschall ist Schall, der sich in einem Festkörper ausbreitet, wie zum Beispiel die Geräusche durch Gehen auf dem Boden, Klopfen an der Wand oder Decke, wenn auf der Anrichte Fleisch gehackt, in der Wand ein Loch gebohrt wird, usw. In diesem Fall wird der Festkörper direkt angeregt. Im Empfangsraum schwingen wiederum die Oberflächen der umgebenden Bauteile. Dadurch wird die Luft zum Schwingen gebracht und das hören wir dann. Starke Vibrationen nehmen wir auch körperlich wahr, wenn z.B. ein Lastwagen vorbei fährt, die Bässe einer potenten Musikanlage durchdringen oder die Erde bebt.

Wenn also in einem Raum (Senderraum) die Schallwellen von einer Schallquelle zur Wand gelangen, so wird davon ein Teil wieder zurück reflektiert, ein Teil von der Wand absorbiert bzw. in andere Teile des Gebäudes weitergeleitet und der restliche Teil gelangt in den anderen Raum dahinter (Empfangsraum).

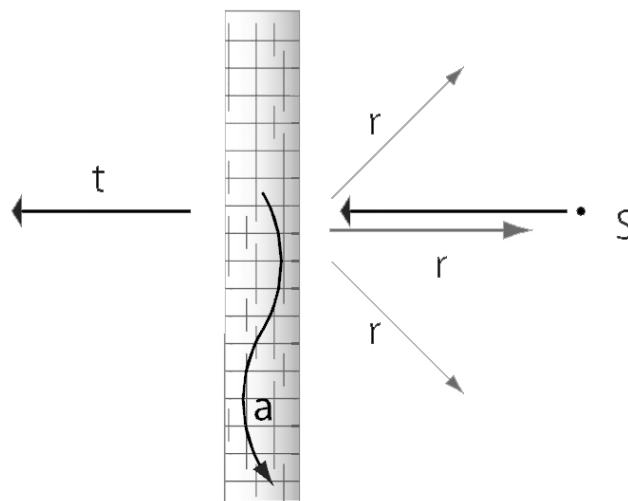


Fig. 9: Quelle: Unterrichtsmaterialien Scuola di acustica Università di Ferrara

S) Schallquelle; r) reflektierte Energie; a) absorbierte/weitergeleitete Energie; t) übertragene Energie

Diese übertragene Energie t wird als direkte Schallübertragung bezeichnet, da sie nur über das

trennende konstruktive Element übertragen wird (Wand oder Decke).

In der Praxis wird der Schall auch über die angrenzenden Bauteile übertragen.

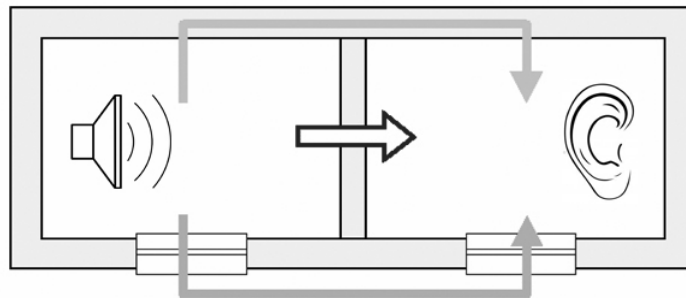


Fig. 10: Quelle TBZ GmbH

Teile der Schallenergie werden als Vibrationen über die Flanken weitergeleitet. Diese seitlichen Bauelemente werden also in Schwingung versetzt und bringen wiederum die Luft zum Schwingen, wodurch sie hörbar werden.

Akustische Absorption und Schalldämmung

Wie vorher erwähnt, wird ein Teil der Energie der Schallwellen absorbiert. Die Schallwellen bringen dabei das Material selbst oder die in den Poren enthaltene Luft zum Schwingen. In beiden Fällen gibt es Reibungsverluste, wodurch dieser Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird.

Der **Schallabsorptionsgrad** α ist ein Maß für die offensichtlich absorbierte Schallenergie. Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallintensität. $\alpha + r = 1$; damit liegt α zwischen faktisch 0 bzw. 0,01 absorbiert nichts, alles wird reflektiert und 1 absorbiert alles, nichts wird reflektiert, wie z.B. ein offenes Fenster. Der Schalltransmissionsgrad τ ist ein Maß für die durchgelassene Schallintensität. Die Summe aus Schalldissipationsgrad δ und Schalltransmissionsgrad τ ergibt den Schallabsorptionsgrad α : $\delta + \tau = \alpha$; bei den Messungen vor Ort ist es schwer, den Schalltransmissionsgrad zu messen, deshalb wird allgemein der Absorptionsgrad verwendet.

Somit errechnet sich der Schallabsorptionsgrad α aus:

$$\alpha = 1 - r = \delta + \tau = 1 - (W_r / W_i)$$

δ = Schalldissipationsgrad = W_δ / W_i ;

r = Schallreflexionsgrad = W_r / W_i ;

τ = Schalltransmissionsgrad = W_τ / W_i ;

W_i = Gesamte einfallende Energie;

W_δ = Teil der absorbierten Energie;

W_r = Teil der reflektierten Energie;

W_τ = Teil der durchgelassenen Energie.



Das **Schalldämm-Maß R** indessen zeigt an, inwieweit der Schalldurchgang in dB behindert wird, und gibt damit die Dämm-Leistung des konstruktiven Elements zwischen Senderaum und Empfangsraum an:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad [\text{dB}]$$

Beide Parameter sind unabhängig voneinander.

Die Nachhallzeit

Wenn in einem Raum eine Schallquelle plötzlich abgeschaltet wird, geht der Schallpegel nicht sofort auf Null, da die Schallwellen, die mit Schallgeschwindigkeit noch unterwegs sind, von mehreren Flächen mehrfach reflektiert werden. Abhängig vom Volumen des Raumes und von den schallschluckenden Eigenschaften der Oberflächen nimmt der Schallpegel mehr oder weniger langsam ab.

Der amerikanische Wissenschaftler Wallace Clement Sabine (1868-1919) hat dieses Phänomen untersucht und den Begriff der Nachhallzeit geprägt. Die Nachhallzeit ist definiert als die Zeit, in welcher der Pegel des Ausgangssignals um 60 dB abnimmt. Allerdings wird für diese Messung nur die Zeit berücksichtigt, die für einen Abfall von 0 dB auf -20 dB bzw. -30 dB benötigt wird. Die gemessene Zeit wird dann auf einen Abfall um 60 dB extrapoliert.

Wenn ein Raum vollkommen reflektiert, so ist die Nachhallzeit in allen Punkten gleich und es gilt:

$$T_{60} = 0,161 V / A \quad [\text{s}]$$

dabei ist V das Volumen des Raumes und A die Äquivalente Absorptionsfläche:

$$A = \alpha S \quad [\text{m}^2]$$

darin ist α der mittlere Absorptionsgrad des Empfangsraumes und S die Summe der rauminternen Oberflächen des Empfangsraumes.

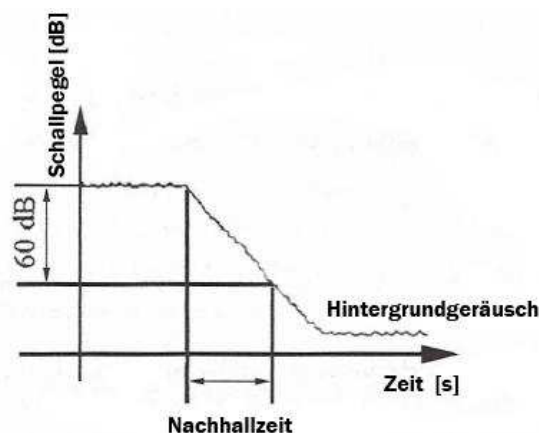


Fig. 11: Nachhallzeit. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Der Einfluss der Anschlüsse / Stöße

Der Einfluß der Anschlüsse der Verbindungen zwischen den trennenden konstruktiven Elementen und den angrenzenden Elementen (Decken, Fassaden, Trennwände) wird meist unterschätzt und bleibt deshalb oft unberücksichtigt. Somit passiert es, dass für eine vermeintlich bessere Schalldämmung mehrere zusätzliche Schichten angebracht werden, die Erwartungen dabei aber nicht erfüllt werden. Die seitlichen Schallbrücken (Flankenübertragungen) übertragen den Schall als Vibrationen, die vibrierenden Flächen erzeugen dann im Empfangsraum wieder einen Luftschall.

Durchgehende starre Materialien wie Betonstrukturen oder Holzbalken, oder auch Hohlräume wie Kamine geben dem Schall dabei eine Vorzugsspur. Durch elastische Materialien können diese Wege getrennt werden. Auch die Schallwellen suchen sich den Weg des geringsten Widerstandes. Wenn es Ausweichwege gibt, so wird auch die beste Schalldämmung daneben wirkungslos. Schallbrücken haben überproportionale Auswirkungen.

Beispiele von starren Stößen mit der Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes (UNI TR 11175).

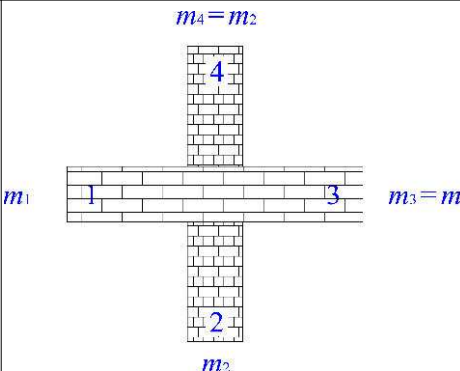
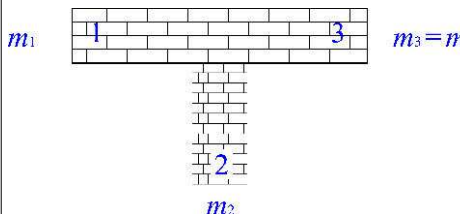
Typische Transmission von Stoßstellen K_{ij} für typische Anschlüsse				
Stoßstelle		Transmission		Werte K_{ij} [dB]
a) Starrer Kreuzstoß		Direkt	$\longleftrightarrow$	$K_{13} = 8,7+17,1M+5,7M^2$
		Winkel	$\swarrow \searrow$	$K_{12} = 8,7+5,7M^2$
				$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$
b) Starrer T-Stoß		Direkt	$\longleftrightarrow$	$K_{13} = 5,7+14,1M+5,7M^2$
		Winkel	$\swarrow \searrow$	$K_{12} = 5,7+5,7M^2$
$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$ mit: $m'_{\perp i}$ ist das Flächengewicht des Elements i in der Flanke ij [kg/m ²]; m'_i ist das Flächengewicht des dazu rechtwinklig stehenden Elements der Flanke [kg/m ²].				

Tabelle 5: Beispiel starrer Stöße. Quelle UNI TR 11175



Die Berechnung des Beitrags der Flankenübertragungen über die Stöße kann mit den Normen UNI EN ISO 12354 und UNI TR 11175 abgeschätzt werden. Nachfolgend werden einige Beispiele starrer Stöße tabellarisch wiedergegeben.

Korrekturfaktor K für die Flankenübertragung für Trittschall [dB]									
Flächengewicht der Decke [kg/m²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente ohne Vorsatzschalen [kg/m²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tabella 6: Quelle UNI TR 11175 Tabelle 5

Globaler Beitrag der Flankenübertragung K' für starre Kreuzstöße und gleichmäßig verteilte Flächengewichte [dB]									
Flächengewicht der Trennwand [kg/m²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente [kg/m²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
150	3,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
200	4,5	2,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
250	5,0	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
300	6,0	4,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
350	7,0	5,0	3,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
400	7,5	5,5	3,5	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0
450	8,0	6,0	4,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5
500	8,5	6,5	4,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5

Tabelle 7: Quelle UNI TR 11175 Tabelle A.7



Globaler Beitrag der Flankenübertragung K' für starre T-Stöße und gleichmäßig verteilte Flächengewichte [dB]									
Flächengewicht der Trennwand [kg/m ²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	3,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
150	5,0	3,0	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
200	6,5	4,5	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
250	8,0	5,5	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
300	9,0	6,5	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
350	10,0	7,5	6,0	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5
400	10,5	8,5	6,5	5,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0
450	11,5	9,0	7,5	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5
500	12,0	9,5	8,0	6,5	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0

Tabelle 8: Quelle UNI TR 11175 Tabelle A.8

Die Verteilung des Körperschalls in einer Struktur hängt von der Kraft des Schall-Erregers, der Masse und den Eigenschaften von Elastizität/Dämpfung der Struktur ab. Bei gleich starren Stößen vibriert eine leichte Struktur mehr als eine schwere, die mehr Energie absorbiert, bis sie in Schwingung kommt. Eine leichte Struktur gibt dabei auch wieder mehr Luftschall ab, sobald sie in Schwingung versetzt ist.

Aus den abgebildeten Tabellen ist ersichtlich, dass der beste Kompromiss erzielt wird, wenn Elemente mit ähnlichem Flächengewicht verbunden werden. Dabei wird die Schallenergie gleichmäßig verteilt. Wenn hingegen Wände mit unterschiedlichem Flächengewicht verbunden sind, dann konzentriert sich die Schallenergie auf das schwächere, leichtere Element.

Elastische Stöße erhält man, indem zwischen zwei Strukturen federnde Materialien gegeben werden. Es ist aber zu beachten, dass ein Stoß als nicht elastisch betrachtet werden kann, wenn:

- das elastische Material übermäßig vom Gewicht der Struktur belastet wird;
- ein Verputz oder andere starre Verbindungen kein ausreichend freies Schwingen der Struktur ermöglichen.

Somit können als elastische Verbindungen nur massive Elemente betrachtet werden, die mit leichten Strukturen, mit Trockenbau oder mit Systemen, die zur Gänze in Trockenbauweise hergestellt wurden (Gipskarton), verbunden sind.



Strategien für eine gute Schalldämmung

Wenn ein konstruktives Element einen Senderraum von einem Empfangsraum trennt, dann hören wir das Geräusch des Senderraumes umso leiser, je besser die Schall dämmende Wirkung des trennenden Elements ist. Beim Luftschall wird die Schalldämmung als Schalldämm-Maß R oder für die Fassade als Standard-Schallpegeldifferenz D angegeben. Je höher R oder D sind, desto besser. Für den Trittschall wird (derzeit noch) nicht die Schalldämmung angegeben, sondern der Schallpegel: je leiser das Geräusch, das im Empfangsraum eintrifft, je niedriger also der bewertete Norm-Trittschallpegel L_{nw} , desto besser ist es.

In beiden Fällen geht es de facto um die Schall dämmende Wirkung. Um diese zu verbessern, gibt es mehrere Strategien.

Wenn die Masse des trennenden Elements erhöht wird, braucht es mehr Energie, um es in Schwingung zu versetzen.

Wenn zwischen zwei Massen ein weiches elastisches Element gegeben wird, eine „Feder“, dann wird die Schallübertragung in diesem mehrschichtigen Element abgetrennt. Das ist dann das bekannte „Masse-Feder-Masse“-Prinzip. Wenn allerdings mehr oder weniger kleine starre Verbindungen zwischen beiden Massen bestehen bleiben, z.B. Schrauben, dann wird die Wirkung der Feder stark beeinträchtigt oder gar aufgehoben. Dann spricht man von „Schallbrücken“. Wenn die Masse des trennenden mehrschichtigen Elements erhöht wird, braucht es auch hier mehr Energie, um es in Schwingung zu versetzen.

Systeme der Schalldämmung: einschichtiges Element mit weniger (Bild A) oder mehr (Bild B) Masse; mehrschichtiges Element „Masse-Feder-Masse“ (Bild C) und mehrschichtiges Element mit Schallbrücke (Bild D)

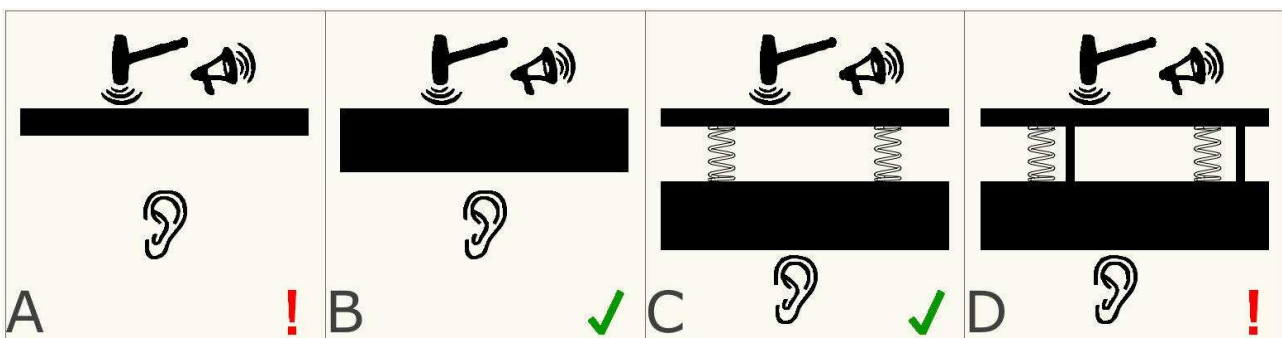


Fig. 12: Systeme der Schalldämmung, gute und weniger gute. Quelle: TBZ GmbH

Beide Systeme der Schalldämmung funktionieren sowohl im Massivbau als auch im Leichtbau. Es scheinen banale Konzepte zu sein, aber sie verdienen die volle Beachtung auch bei der Ausführung auf der Baustelle und oft gibt es statische oder konstruktive Hinderungsgründe, sodass diese Konzepte nicht zu 100% verwirklicht werden können. Schallbrücken beeinflussen dann das Endergebnis wesentlich.



Akustische Qualität der angrenzenden Räume: die Kontrolle des Nachhalls

Die Nachhallzeit wird für den akustischen Komfort oft nicht ausreichend berücksichtigt, und es werden Materialien eingesetzt, die den Schall nicht ausreichend absorbieren. Es gibt zwei gute Gründe:

1. In einem halligen Raum wird jedes Geräusch gewaltig verstärkt, unabhängig davon, ob es von außen oder vom Inneren des Gebäudes stammt, weil es von allen Oberflächen reflektiert wird. Dies kann in komplett leeren Wohnungen erlebt werden. Sobald die Wohnung eingerichtet ist, wird der Nachhall stark reduziert.
2. In einem halligen Raum werden auch die selber erzeugten Geräusche als unangenehm und übertrieben stark erlebt. Wenn sich viele Personen gleichzeitig in einem großen halligen Raum aufhalten, werden die Gespräche sehr mühsam und der Aufenthalt unangenehm.

In kleineren Räumlichkeiten, wie sie in den meisten Wohnungen vorkommen, ist der Nachhall begrenzt, weil die vielen Einrichtungsgegenstände die Schall-Reflexion behindern und den Schall absorbieren. In großen Räumlichkeiten mit harten und glatten Oberflächen wird der Nachhall zum Problem. Ein klassisches Beispiel sind die Stiegehäuser. Darin entstandener Lärm verbreitet sich über alle Geschosse, und da die meisten Wohnungseingangstüren schlecht Schall dämmen, ist der Lärm dann auch in allen Wohnungen zu hören.

Als Gegenmaßnahme können Schall absorbierende Decken eingebaut werden. Zur Bestands-Sanierung können optisch ansprechende und zugleich schallschluckende Gegenstände an den Wänden und Decken angebracht werden.

Es folgt ein Hörbeispiel von Kindern in einer Mensa mit kleinem, mittlerem und großem Nachhall:

Umgebung	Kleiner Nachhall (T_{60} Mittel 0.5 Sekunden)	Mittlerer Nachhall (T_{60} Mittel 1 Sekunde)	Starker Nachhall (T_{60} Mittel > 4 Sekunden)
Schulmensa			

Tabelle 9: Beispiel des Höreindrucks von verschiedenem Nachhall. Quelle: TBZ GmbH



Luftschall

Das Schalldämm-Maß und das Bau-Schalldämm-Maß

Wie im vorigen Kapitel erläutert, gibt das **Schalldämm-Maß** an, wie groß die akustische Dämm-Leistung eines konstruktiven Elements ist, welches zwei Räume trennt.

Dieser Wert wird im Labor nach den Richtlinien der Norm UNI EN ISO 140-3 gemessen. Das zu messende Element wird zwischen zwei Räume eingebaut, wobei durch elastische Verbindungen alle Schallbrücken ausgeschaltet werden. Das Element wird also in seiner Reinheit gemessen. In beiden Räumen werden die Schallpegel in allen Frequenzen gemessen und im Empfangsraum wird die Nachhallzeit bestimmt.

Das Schalldämm-Maß wird dann mit folgender Formel berechnet:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad [\text{dB}]$$

Dabei ist S die Fläche des konstruktiven Elements und A die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes.

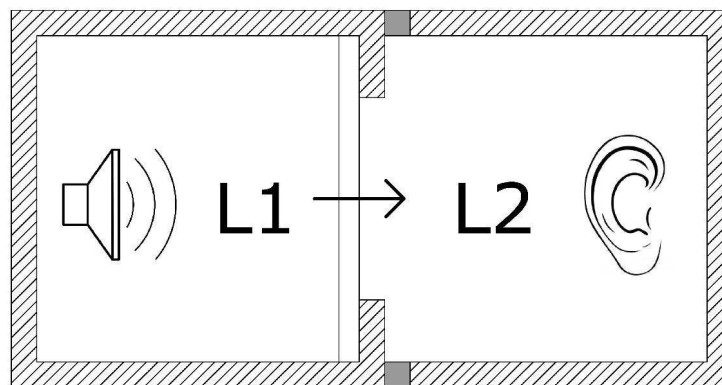


Fig. 13: Labormessung Schalldämm-Maß. Quelle: TBZ GmbH

Am Bau hingegen können Schallbrücken nicht wie im Labor vermieden werden. Die Flankenübertragungen reduzieren das Schalldämm-Maß.

Der Wert der Luft-Schalldämmung, gemessen unter realen Bedingungen, wird als **Bau-Schalldämm-Maß** bezeichnet.

Die Messung und Berechnung erfolgt analog zum Schalldämm-Maß:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad [\text{dB}]$$

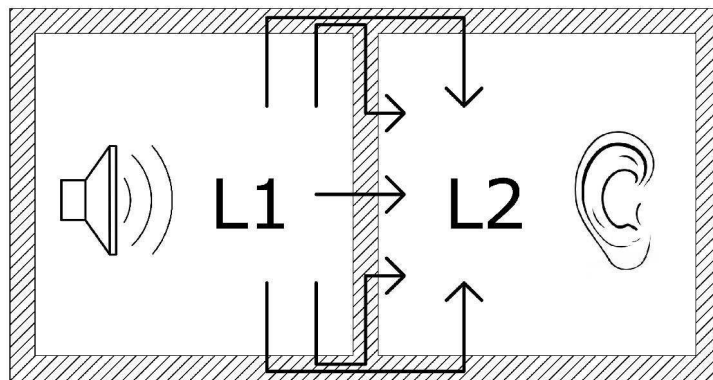


Fig. 14: Messung Bau-Schalldämm-Maß. Quelle: TBZ GmbH

Es ist klar, dass hier auch Schall über die Flanken übertragen wird, sodass der Schallpegel im Empfangsraum L_2 höher als im Labor mit den elastischen Stößen sein wird, und somit ist das Bau-Schalldämm-Maß auch geringer.

Am Bau sind keine Laborwerte erreichbar.

Standard-Schallpegeldifferenz Luftschall

Die Bestimmung der **Schallpegeldifferenz** D eines Elements erfolgt ähnlich wie beim Schalldämm-Maß nach folgender Formel:

$$D = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}]$$

wobei L_1 der Schallpegel des Senderraumes ist und L_2 jener des Empfangsraumes.

Für die Bewertung wird noch die Nachhallzeit berücksichtigt, somit ist die **Norm-Schallpegeldifferenz** D_n oder die **Standard-Schallpegeldifferenz bezogen auf die Bezugs-Nachhallzeit** D_{nT} : $D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$

wobei A die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes ist und A_0 die äquivalente Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m^2 .

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei T die Nachhallzeit des Empfangsraumes ist und T_0 die Bezugs-Nachhallzeit, bei normalen Wohnräumen $0,5 \text{ s}$.

Der Unterschied zum Schalldämm-Maß R besteht darin, dass hier die Fläche des trennenden Elements S nicht berücksichtigt ist, weil dies für gewisse Fälle nicht möglich oder sinnvoll ist.

Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes

Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes $R'w$ erfolgt laut den Richtlinien der UNI EN ISO 140 Teil 4 und 14 (besondere Situationen für die Messungen).

Im Senderraum wird ein akustisches Signal erzeugt (rosa oder weißes Rauschen), mit einer Schallquelle, die ein gleichmäßiges Schallfeld bewirkt, z.B. mittels Dodekaeder. Es werden die Schallpegel L_1 im Senderraum und L_2 im Empfangsraum gemessen. Im Senderraum sind mindestens zwei Positionen der Schallquelle vorgesehen. Im Empfangsraum sollen an mindestens 5 Punkten mit diffusem Schallfeld gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass:

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.

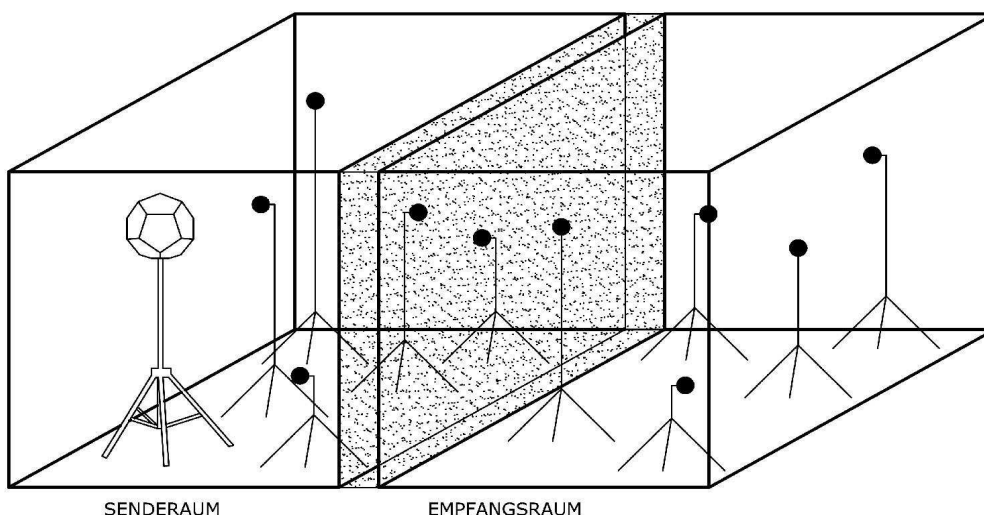


Fig. 15: Schema zur Messung von $R'w$. Fonte: TBZ GmbH

Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen.

Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf den zu messenden Pegel nicht überdecken, und muss deshalb in allen Frequenzbereichen 6-10dB niedriger sein als der Schallpegel L_2 .

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe), oder auch mit einem Geräusch, bei dem die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep), im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert.

Die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w und Bau-Schalldämm-Maßes R'_w

Zur schnelleren und bequemerem Vergleichbarkeit wird ein Einzahl-Wert berechnet, das bewertete Schalldämm-Maß R_w für die Labormessungen und das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w für die Messungen am Bau.

Die Berechnung ist in der Norm UNI EN ISO 717-1 beschrieben und wird als Methode des Vergleichens bezeichnet. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe.

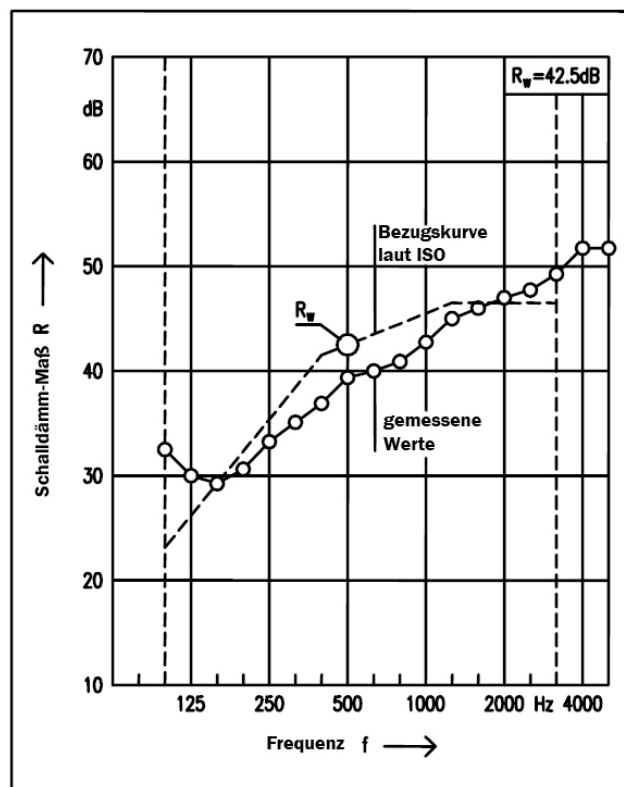


Fig. 16: Bestimmung der Einzahl-Angabe. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Es ist trotzdem sinnvoll, nicht nur den Einzahl-Wert zu betrachten, sondern den gesamten Frequenzverlauf. Deshalb wird dieser in den Datenblättern auch dargestellt.

Um die Mängel der Einzahl-Werte ein wenig auszugleichen und das Ergebnis je nach Schallquelle besser dem Höreindruck anzupassen, wurde der Spektrum-Anpassungswert C und C_{tr} für den Luftschall eingeführt.

Beim Luftschall betrifft der Spektrum-Anpassungswert C dem typischen „Wohnlärm“ wie Sprechen, normal laute Musik aus Stereoanlagen oder TV, der Spektrum-Anpassungswert C_{tr} den Verkehrslärm.

Mechanismen der Ausbreitung des Luftschalls

Je nach Art des trennenden Elements beobachten wir verschiedene Phänomene.

Einschalige Wände/Bauteile

Im folgenden Bild betrachten wir die Abhängigkeit der Schalldämmung vom Frequenzverlauf.

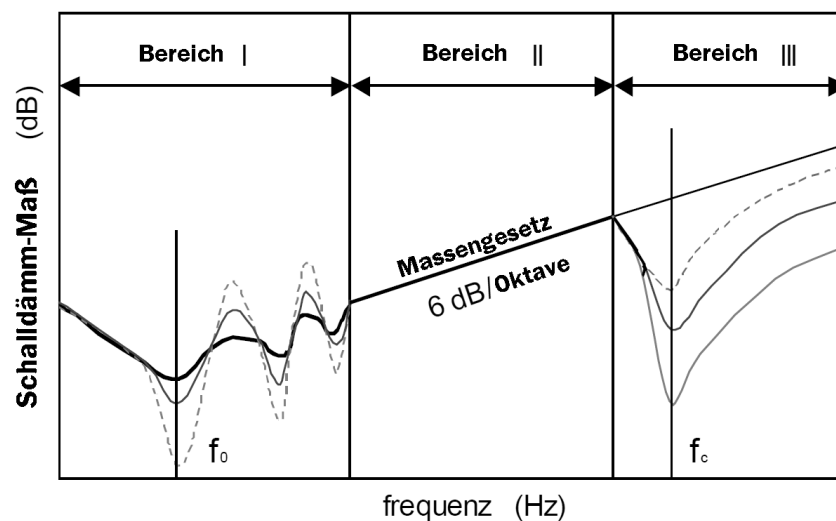


Fig. 17: Verlauf der Schalldämmung für einschalige Wände. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Im Bereich I ist die Resonanz-Frequenz des Bauteils zu beobachten, bei der die Frequenz der eintreffenden Schallwelle gleich hoch ist wie die Eigenfrequenz des Bauteils. Deshalb geht das Bauteil in besonders starke Schwingung, was die Schalldämmung wesentlich reduziert. Normalerweise ist dieser Effekt bei sehr tiefen Frequenzen unter 50 – 100 Hz zu beobachten. Dieses Phänomen kann beim Fensterglas gut beobachtet werden: es klirrt, wenn ein Auto in der Nähe vorbeifährt.

Im Bereich II wirkt das **Masse-Gesetz**: je höher die Frequenz ist, desto höher ist die Schalldämmung, es gibt eine lineare Beziehung. Die tiefen Töne sind also schwerer abzuschirmen als hohe.

Im Bereich III gibt es wieder eine Frequenz, bei der das Element stark mitschwingt und dabei die Schalldämmung wesentlich reduziert. Die tiefste dieser Frequenzen wird als Koinzidenz-Frequenz (f_c) bezeichnet.

Für die einschaligen Bauteile nimmt die Schalldämmung zwar mit zunehmender Masse zu, dabei sinkt aber auch die Koinzidenz-Frequenz bis in die Bereiche von 100 bis 500 Hz, welche für den Höreindruck am wichtigsten sind.

Wenn die Bauteilstärke zu hoch wird, treten auch Resonanzeffekte durch die Longitudinalwellen und Transversalwellen auf, die sich im Inneren des Bauteils bilden. Dadurch kann die Schalldämmung bei den hohen Frequenzen stark abnehmen. Dieses Phänomen tritt bei Stärken über 15-20cm auf und betrifft Frequenzen über 5000 Hz.

Zweischalige Wände

Im Unterschied zu den einschaligen Bauteilen, wo die Schalldämmung durch hohe Massen erreicht wird, wird bei den mehrschaligen Bauteilen die Schalldämmung durch Schalldämpfung erreicht.

Bei zweischaligen Wänden wird der Zwischenraum mit einem Faser-Dämmstoff gefüllt, welcher den Schall absorbiert und dadurch Reflexion verhindert. Durch dieses Prinzip kann die Schalldämmung erhöht werden, ohne das Gewicht des Bauteils zu erhöhen.

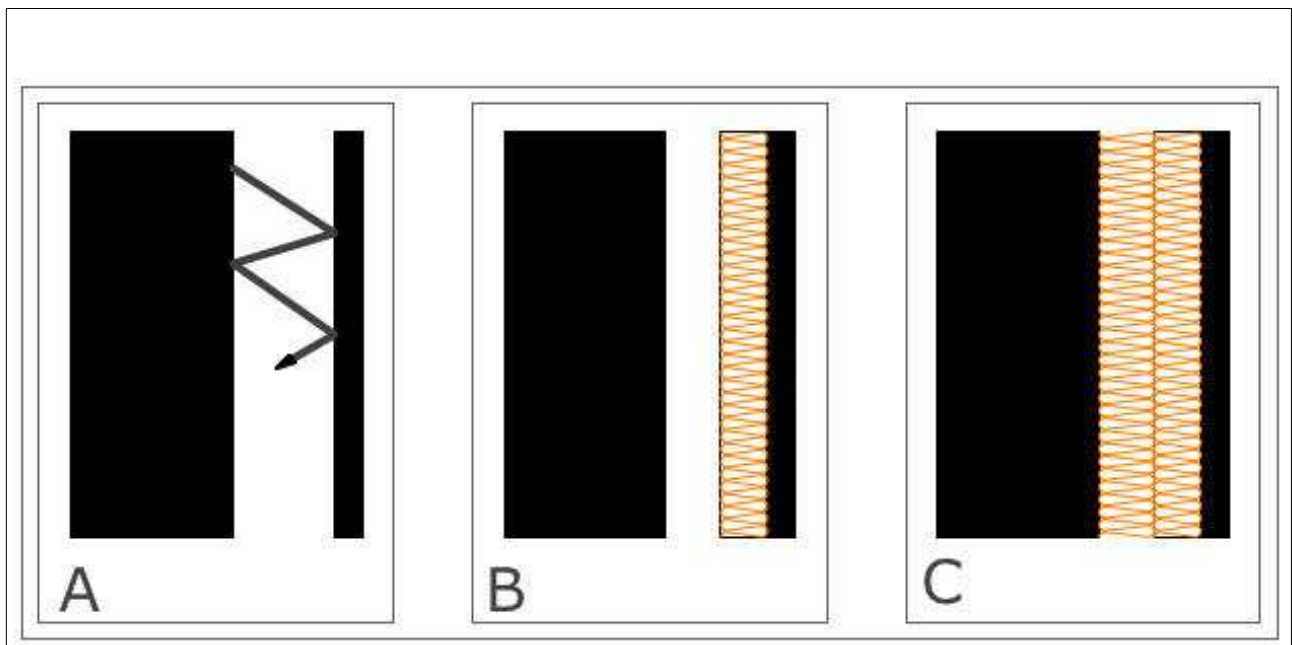


Fig. 18 Die Hohlraumdämmung im mehrschichtigen Aufbau. Quelle: TBZ GmbH

Ein Hohlraum funktioniert wie der Klangkörper einer Gitarre: die Schallwellen werden reflektiert und dadurch verstärkt (Bild A). Wenn der selbe Hohlraum zumindest auf einer Seite mit absorbierendem Material bekleidet wird, wird eine Reflexion wesentlich reduziert (Bild B). Wenn der Hohlraum zur Gänze mit absorbierendem Material gefüllt wird, wird die Schalldämmung weiter, aber nur leicht verbessert (Bild C).

Dieses System funktioniert nach dem „**Masse-Feder-Masse**“-Prinzip. Sollten zu viele Schallbrücken vorhanden sein, reduziert sich die Wirkung auf die Masse des einschaligen Bauteils.



Auch bei den mehrschaligen Bauteilen gibt es Einbrüche der Schalldämmung bei gewissen Frequenzen. Der erste taucht bei der Resonanz-Frequenz des gesamten Aufbaus auf. Andere Einbrüche sind durch die Koinzidenz-Frequenz der einzelnen Schichten bestimmt. Ein letzter Einbruch entsteht durch die Resonanz-Frequenz des Hohlraumes, wo sich stehende Schallwellen ausbilden.

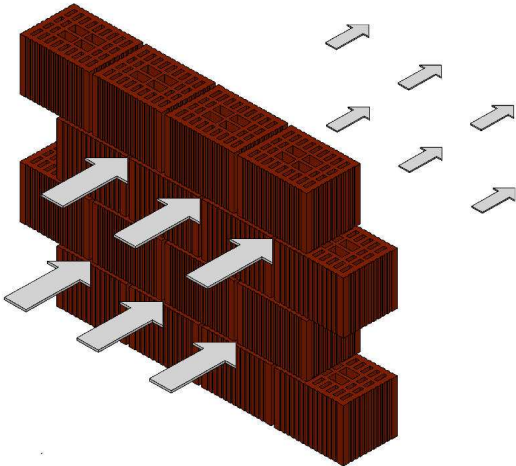
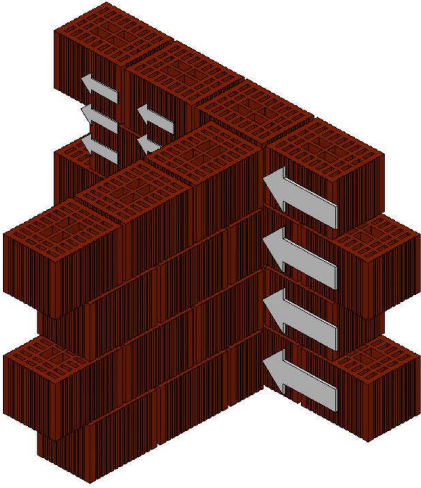
Durch Veränderung des Abstandes der beiden Schalen kann der Einbruch bei der Resonanz-Frequenz ausgeglichen werden, sodass diese unterhalb des störenden Frequenzbereichs bleibt.

Die Koinzidenz-Frequenz der einzelnen Schichten kann durch die Wahl verschiedener Materialien mit verschiedenem Flächengewicht und verschiedener Steife beeinflusst werden, sodass die Schwächen der einen Schicht von den Stärken der anderen aufgefangen werden.

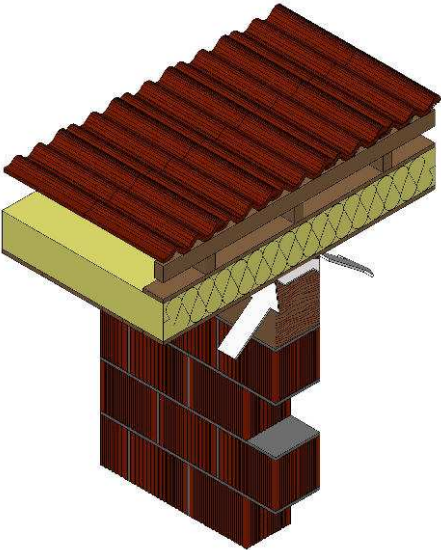
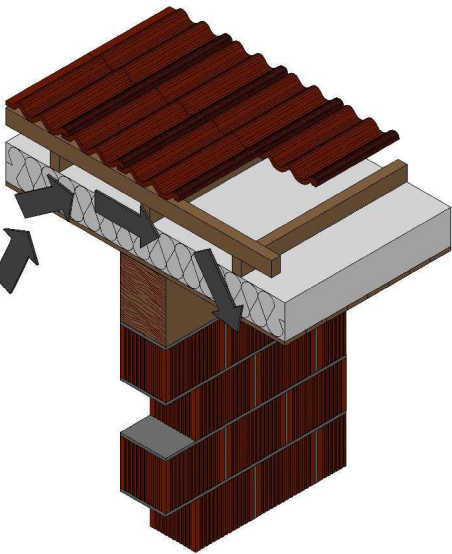
Dem letzten Einbruch wird durch das Einbringen von faserigem absorbierendem Material begegnet und indem Schallbrücken vermieden bzw. reduziert werden.

Wesentliche Fehler in der Ausführung

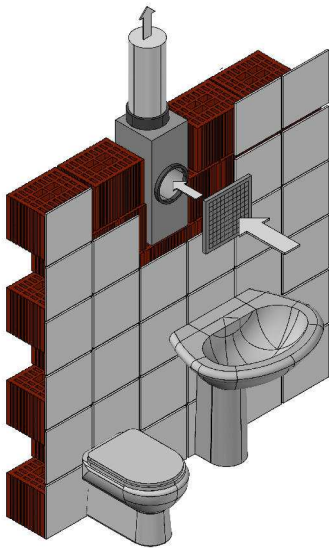
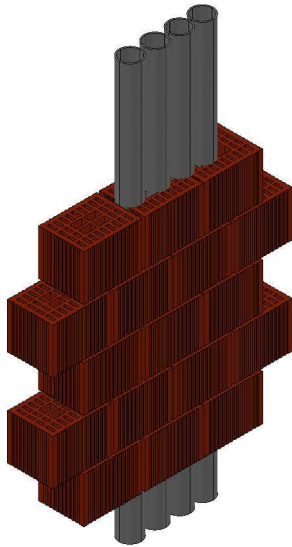
Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler (ohne Anspruch auf Vollständigkeit), bei vertikalen und horizontalen trennenden Elementen:

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Die Stoßfugen der Ziegel sind nicht vollständig vom Verputz überdeckt, sodass teilweise das Licht durchscheint. Es gibt viele kleine Stellen, wo Luft durchströmt.	3-6 dB	1. Mehr Sorgfalt bei der Ausführung der Stoß- und Lagerfugen. 2. Zusätzlicher Verputz. 3. Vorsatzschale aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		
Fugen bei den Anschlussstellen zwischen der Trennwand und den seitlichen Wänden bzw. anderen Elementen wie dem Kamin.	1-3 dB	1. Mehr Sorgfalt bei der Ausführung der Stoß- und Lagerfugen. 2. Zusätzlicher Verputz mit Einlage eines Netzes. 3. Vorsatzschale aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Schalldurchgang über das Dach, durchgehende Schalung.	1-10 dB	1. Schalung von oben durchtrennen. Andere Möglichkeiten der akustischen Trennung zusätzlich betrachten. 2. Abgehängte Decke aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		
Schalldurchgang über das Dach, Wärmedämmung aus zu leichter und starrer Wärmedämmung wie EPS.	3-6 dB	1. Trennung der Schalung und der Sparren. Austausch der Wärmedämmung bzw. Zusatz von faserhaltiger Wärmedämmung. 2. Abgehängte Decke aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Schalldurchgang aus Lüftungsleitungen aus Bad und Küche.	1-9 dB	1. Verwendung von mehrschichtigen Rohrleitungen. Diese mit elastischem Dämmstoff ummanteln und anschließend Mörtel dazwischen gießen, um eine Masse-Feder-Masse-System zu erzeugen. 2. Den starren Kontakt zwischen mehreren Leitungen vermeiden. 3. Schalldämpfer beim Auslass einbauen.
		
Schwächung der Struktur durch Leitungen, indem die Struktur als Installationsebene missbraucht wird.	1-9 dB	1. Vorsatzschale/Vorsatzwand für die Leitungen verwenden. 2. Für den Spülkasten eine Vormauerung bis 1m Höhe vorsehen.
		



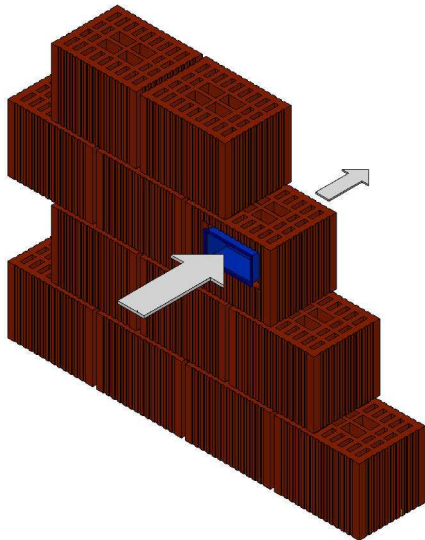
kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Elektrodosen	1-3 dB	1. Gegenüberliegende Elektrodosen vermeiden. 2. Die Rückseite der Elektrodose mit Faserdämmstoff ausstopfen. 3. Durchgehende Leerrohre vermeiden, bzw. diese luftdicht absperren und mit Faserdämmstoff schließen.
		

Tabelle 10: R'_w – die wichtigsten Ursachen für die Schwächung. Quelle: TBZ GmbH

Schalldämmung der Fassade

Die Messung der Standard-Schallpegeldifferenz $D_{n,T}$ der Fassaden-Elemente wird in der Norm UNI EN ISO 140-5 beschrieben. Die Schallquelle kann ein Lautsprecher oder auch der Verkehrslärm selbst sein. Berechnet wird der Wert dann mit folgender Gleichung:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log (T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei $L_{1,2m}$ als Schallpegel des „Senderraumes“ 2 m vor der Fassade gemessen wird; L_2 ist der Schallpegel im Empfangsraum; T ist die Nachhallzeit im Empfangsraum und T_0 ist die Bezugs-Nachhallzeit, mit 0,5 s.

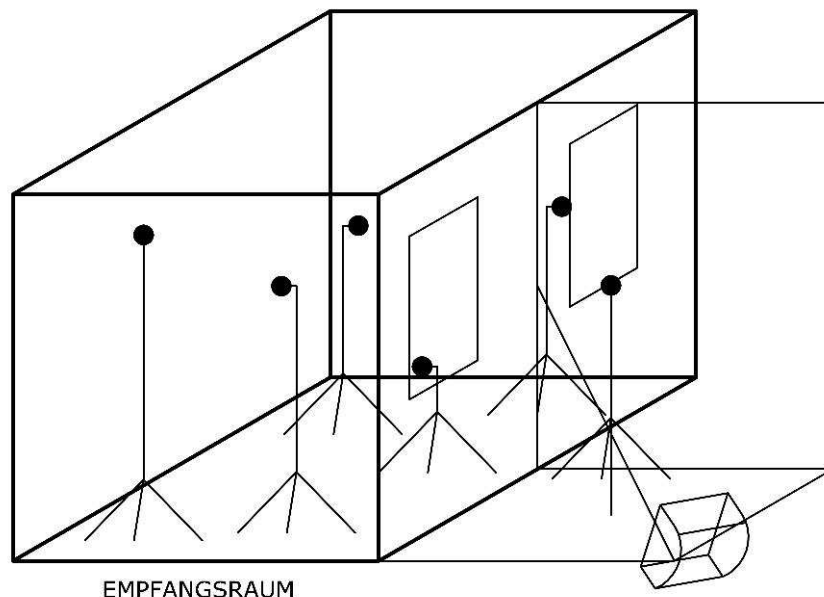


Fig. 19: Schema für die Messung der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$. Quelle: TBZ GmbH

Wenn ein Lautsprecher verwendet wird, so wird dieser in einem Mindest-Abstand von 5m mit 45° zur Fassade aufgestellt. In diesem Winkel ist die Fassade am schwächsten für den Schalldurchgang. Das Mikrofon für die Messung des Schallpegels außen wird 2 m vom Zentrum der Fassade bei einer Höhe von 1,5 m über dem Fußboden aufgestellt.

Im Empfangsraum soll an mindestens 5 Punkten mit diffusem Schallfeld gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.



Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen.

Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf den zu messenden Pegel nicht überdecken, und muss deshalb in allen Frequenzbereichen 6-10 dB niedriger sein als der Schallpegel L_2 .

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, oder einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe), oder auch mit einem Geräusch, wo die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep) im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert. Dies ist wichtig, weil der Schall in einem Raum sehr stark von den akustischen Eigenschaften des Raumes abhängt. So hört man den Schall in einem leeren Raum (mehr Reflexionen) viel länger als in einem vollständig eingerichteten Raum. Durch diese Mehrfachreflexionen wird der Schallpegel im leeren Raum bedeutend höher als im eingerichteten Raum, wo der Schall von den Oberflächen absorbiert wird. Damit dadurch aber nicht die Bestimmung des Luftschalldämmmaßes beeinflusst wird, werden die Ergebnisse der Messungen auf eine Standartnachhallzeit bezogen. Diese beträgt bei Wohnbauten 0,5 s.

Die Bestimmung der Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade **$D_{2m,nT,w}$**

Die Methode um die Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade $D_{2m,nT,w}$ zu bestimmen, ist die gleiche wie jene, welche in der Norm UNI EN ISO 717-1 für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes und des Bau-Schalldämm-Maßes beschrieben wird. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe. Auch in diesem Fall kann zur Einzahl-Angabe der Spektrum-Anpassungswert C bzw. C_{tr} addiert werden, um das Ergebnis dem menschlichen Hörempfinden in Bezug auf die Art der Lärmquelle anzupassen.



Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen.

Wenn die Fassade außer dem Mauerwerk noch Fenster, Türen, Lüftungsöffnungen oder Rollläden enthält, dann geht ein Teil der Schallenergie auch durch diese Elemente, welche meist schwächer als das Mauerwerk selbst sind. Für das Gesamt-Ergebnis wird das energetische Mittel über alle beteiligten Elemente gebildet:

$$R'_w = -10 \log \left(\sum \frac{S_n}{S_{\text{Gesamt}}} \cdot 10^{\frac{R_n}{10}} + \sum \frac{S_{n(\text{kleine Elemente})}}{S_{\text{Gesamt}}} \cdot 10^{\frac{-D_{\text{kleine Elemente}}}{10}} \right) \quad [dB]$$

[dB]

$$D_{2m,nT,w} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{0,163 \cdot V}{T_0 \cdot S} \right)$$

S_n sind die Flächen der

verschiedenen Komponenten (Wand, Fenster, Türen);

R_n sind das Schall-Dämm-Maß der verschiedenen Komponenten;

$S_{n \text{ kleine Elemente}}$ sind die Flächen der kleinen technischen Komponenten wie Rollläden, Lüftungsöffnungen, usw.;

$D_{\text{kleine Elemente}}$ sind das Schalldämm-Maß der technischen Komponenten;

ΔL_{fs} Korrekturfaktor für die Form der Fassade.

Die Fenster sind ohne Zweifel das Element, das am meisten das Gesamtergebnis bestimmt, beeinflusst vom Schalldämm-Maß des Fensters und der Fläche.

Je mehr Fensterglas in der Fassade vorhanden ist, desto mehr nähert sich das Gesamtergebnis dem Schalldämm-Maß der schwächeren Komponente, des Fensterglases an.

Ein Beispiel: Außenwand mit $R'_w=50$ dB, Fenster mit $R'_w=38$ dB, Anteil der Verglasung zwischen 5% und 98% (Eckzimmer mit den Maßen 3,38 m x 3,65 m und Netto-Höhe 2,61 m). Aus der Grafik ist ersichtlich, wie das Gesamtergebnis von $D_{nT,w}=48$ dB bzw. $R'_w=50$ dB (Wand beinahe ohne Fenster) bis zu $D_{2m,nT,w}=36$ dB bzw. $R'_w=38$ dB für die vollständig verglaste Fassade absinkt.

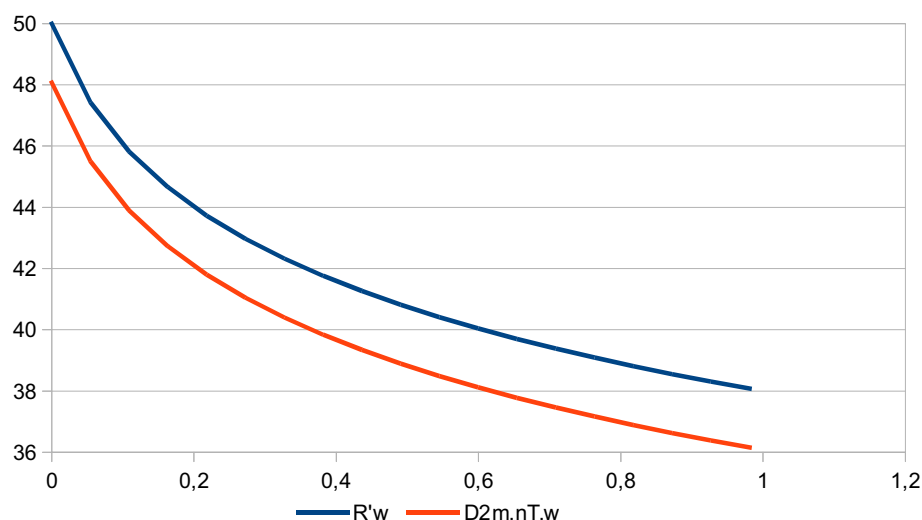


Fig. 20: Verlauf des Bau-Schalldämm-Maßes R'_w und der Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$ abhängig vom Anteil der Verglasung. Quelle: TBZ GmbH

Der numerische Unterschied zwischen R'_w und $D_{2m,nT,w}$ hängt von der Geometrie des Empfangsraumes ab, die Kurven verlaufen parallel. Zur Erinnerung: Die Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$ unterscheidet sich vom Bau-Schalldämm-Maß R'_w darin, dass hier die Fläche des trennenden Elements S nicht berücksichtigt ist, weil dies für Fälle wie diesen nicht möglich oder sinnvoll ist. Für die Bewohner hinter einer Fassade ist es unerheblich, wie groß die Schalldämmung pro m^2 ist, wesentlich ist die gesamte Schalldämmung. Auf der anderen Seite bedeutet das für Planer und Ausführende, dass sie Räume mit größerer Fassadenfläche mit größerer Aufmerksamkeit behandeln müssen. Das betrifft besonders Eckzimmer.

Es gibt jedenfalls ausreichend Produkte am Markt, um sowohl eine gute Schalldämmung als auch eine gute Wärmedämmung verwirklichen zu können.

Von den Fensterherstellern sind bisher meist vorwiegend Laborwerte weiter gegeben worden, die am Bau gemessenen Werte hängen stark von der Ausführung und dem Einbau der Fenster ab, oft werden die Mindestwerte der italienischen Norm unterschritten.

Ein Schwachpunkt der Montage der Fenster liegt am Blindrahmen. Oft werden Fugen zwischen Mauerwerk und Blindrahmen von 3-5cm mit Polyurethanschaum verschlossen, der akustisch schlechte Eigenschaften hat. Als Masse bleibt an diesen Stellen nur mehr der Innenputz übrig und das reicht nicht aus. Die Überdeckung mit einem Vollwärmeschutz aus EPS ist akustisch irrelevant.

Ein Beispiel: für eine Fassade mit den Maßen 4 x 2,7 m (10,8 m^2) mit einer Fenstertür 2,2 x 1,0 m (2,2 m^2) und rundherum an 3 Seiten eine Fuge von 3 cm kann das folgende Bau-Schalldämm-Maß geschätzt werden:



Element	Fläche m ²	% Fläche	R'_w [dB]	% Einfluss auf das Gesamt-Ergebnis
Mauerwerk	8,4	77,9	50	4,1%
Fenstertür	2,2	20,5	36	17,2%
verschlossene Fugen	0,16	1,6	20	78,7%
Gesamt-Ergebnis			37,2 dB	
erwartetes Ergebnis ohne Fugen			43,9 dB	
Verlust			- 6,7 dB	

Tabelle 11: Beispiel des Einflusses von kleinen Schallbrücken auf die Fassade. Quelle: TBZ GmbH

Dieses Beispiel zeigt den großen Einfluss der Ausführung auf das Gesamt-Ergebnis. Es ist sicher billiger, auf eine gute Ausführung zu achten, als mit teureren Fenstern oder Dämmsystemen eine schlechte Bauausführung auszugleichen.

Ein weiterer Schwachpunkt sind Lüftungsöffnungen. Wenn die Luft durchströmt, kommt auch der Schall durch. Abhilfe können Schalldämpfer schaffen.

Die Dämpfung des Schalls durch Absorption: der Schalldämpfer

Wenn eine Schallwelle auf eine absorbierende Oberfläche trifft, wird die mechanische Energie des Schalls in Wärme umgewandelt, und das Geräusch wird damit „absorbiert“. Die Schalldämpfer funktionieren nach diesem Prinzip. Die Luft wird in einem Rohr an schallschluckenden Oberflächen wie Holzwolle, Holzweichfaser, Mineralwolle, Schafwolle, oder elastischen Schaumstoffen, vorbeigeführt.

Natürlich funktioniert die Schalldämpfung nur, wenn das schallschluckende Material in direktem Kontakt mit der vorbei streifenden Luft ist. Deshalb sollen nur gesundheitlich unbedenkliche Materialien für die Absorption verwendet werden.



Fig. 21: Flexibler Schalldämpfer. Quelle: TBZ GmbH

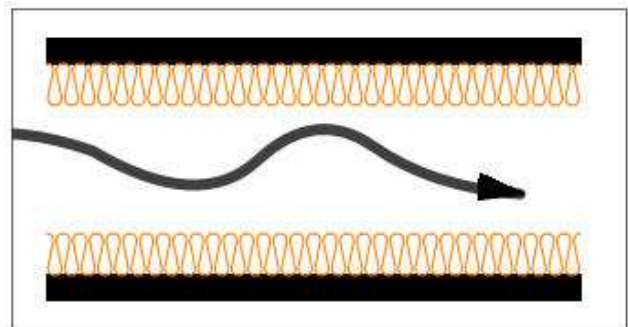


Fig. 22: Funktionsprinzip des Schalldämpfers . Quelle: TBZ GmbH

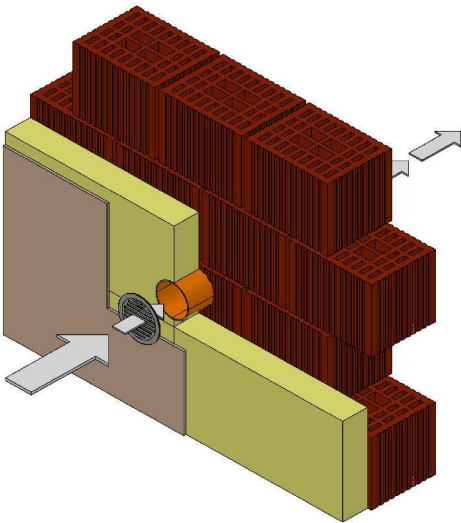
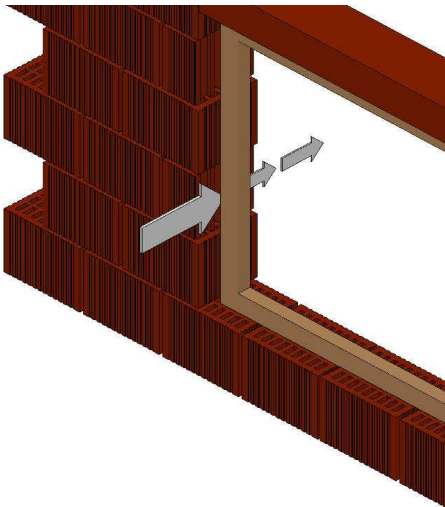
Ein Forschungsprojekt über Schalldämmung von Holzdächern hat spannende Erkenntnisse über Lecks bei schallschluckenden Wärmedämmstoffen aus Holzweichfaser gebracht: das Dach wurde mit Löchern von 20-100mm Durchmesser durchbohrt, ohne dass die Schalldämmung des Daches wesentlich abgenommen hat. Kaum wurde aber ein Plastik-Rohr, welches den Schall reflektiert, in das Loch durch die Holzweichfaser geführt, konnte der „Schalldämpfer“ nicht mehr wirken, und die Schalldämmung wurde schlagartig reduziert. Dieses Experiment zeigt die Vorzüge von schweren Faserdämmstoffen im Vergleich zu leichten Schaumdämmstoffen.

Fig. 23: Experiment beim Forschungsprojekt "Schall am Dach". Quelle: TBZ GmbH



Wesentliche Fehler bei der Ausführung

Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler von Fassaden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Lüftungsöffnungen ohne Schalldämpfer	5-15 dB	1.Schallschluckendes Material einführen. 2.Schalldämpfer montieren.
		
Montage der Fenster mit zu großem Abstand zwischen Blindrahmen und Mauerwerk	3-9 dB	1.Die großen Fugen mit Mörtel statt mit Montage-Schaum schließen. 2.Die kleinen Fugen mit Faserdämmstoff schließen. 3.Den Fensterrahmen mit Stein oder anderem schwerem Material überdecken.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung
Ungenügender Druck auf die Fensterdichtungen	1-3 dB	1. Einstellung des Drucks auf die Fensterdichtungen. 2. Regelmäßige Kontrolle/ Austausch der Fensterdichtungen.
Nicht isolierter Rollokasten	3-6 dB	1. Einbau eines massiven Überlegers hinter den Rollokasten. 2. Einbau von schallschluckender Isolierung in den Rollokasten.

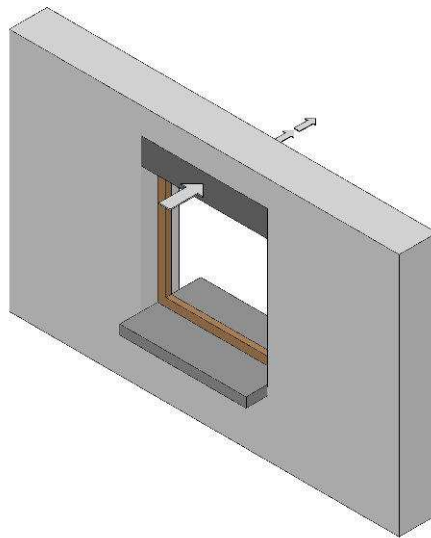


Tabelle 12: $D_{2m,nt,w}$ – wesentliche Schwachstellen der Fassade. Quelle: TBZ GmbH



Zusammenfassung Fassade

Die folgenden Punkte fassen allgemein die Erfahrungen aus den Messungen zusammen:

1. Das Prinzip Masse-Feder-Masse funktioniert auch bei leichten Dächern.
2. Schwere Bauteile braucht es vor allem, um die tiefen Frequenzen in den Griff zu bekommen (z.B. aus Verkehrslärm oder Fluglärm)
3. Leichte und zugleich starre Wärmedämmungen (z.B. expandiertes oder extrudiertes Polystyrol) bieten keinen ausreichenden Schallschutz und brauchen zusätzliche schwere Materialien.
4. Luftundichtigkeiten und Fugen nach außen beeinträchtigen die Schalldämmung wesentlich, wenn diese nicht mit absorbierenden Materialien ausgekleidet werden. Hier eignen sich insbesondere Faserdämmstoffe.
5. Fassadenelemente, wie Fenster und Lüftungsöffnungen haben einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Das schwächste Element hat den größten Einfluss und ist entscheidend für die Schalldämmung der gesamten Fassade (siehe die Beispiele im Kapitel "Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen"). Sowohl für den Schallschutz als auch vom ökonomischen Standpunkt aus gesehen kann es kontraproduktiv sein, besonders effiziente Elemente (z.B. Fenster) mit schlecht isolierenden (z.B. Lüftungsöffnungen oder nicht isolierte Rolllädenkästen) zu kombinieren. Es ist viel mehr vorteilhafter, die akustischen Eigenschaften der verschiedenen Elemente abzugleichen, bzw. für einen gleichmäßigen Schallschutz zu sorgen, indem man mehr in die schwächeren Elemente investiert.
6. Auch das Dach kann nicht als Bauteil allein betrachtet werden, denn auch die Außenwand hat einen großen Einfluss auf die Schalldämmung für den Innenraum. Als Grundregel gilt auch hier wie unter Punkt 5, die "Außenhaut" als Ganzes zu betrachten und zu vermeiden, nur einzelne Elemente zu berücksichtigen. Elemente, welche von außen nach innen führen (Sparren, Balken, Balkone...) übertragen den Schall gut und vermindern damit den Schallschutz. Die thermische und akustische Trennung ist fundamental.
7. Bei rechnerischer Schätzung in der Planung ist eine Reserve von mindestens 5dB zu den gesetzlichen Mindestwerten sinnvoll, da es in der Ausführung immer zu unvorhergesehenen Schwierigkeiten kommen kann.

Körperschall

Trittschallpegel

Der Trittschallpegel ist definiert als der Schallpegel, der sich im Empfangsraum einstellt, wenn im Senderraum ein normalisierter Trittschall-Klopfer seine Hämmerchen auf den Boden fallen lässt.

Wie beim Luftschall gibt es auch hier Labormessungen nach der Norm UNI EN ISO 140-6 oder Messungen am Bau nach der Norm UNI EN ISO 140-7.

Der gemessene **Norm-Trittschallpegel** hängt wiederum von den akustischen Eigenschaften des trennenden Elements, der Decke, ab, und von der äquivalenten Absorptionsfläche des Empfangsraumes in Bezug auf die Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m²:

$$L_n = L + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei L der Trittschallpegel im Empfangsraum ist, wenn die Decke von einem normalisierten Trittschall-Klopfer ins Schwingen gebracht wird; A ist die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes; A_0 ist die Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m².

Der Norm-Trittschallpegel L_{nT} in Bezug auf die Nachhallzeit ist hingegen:

$$L_{nT} = L + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei T die Nachhallzeit im Empfangsraum ist und T_0 die Bezugs - Nachhallzeit von 0,5 s.

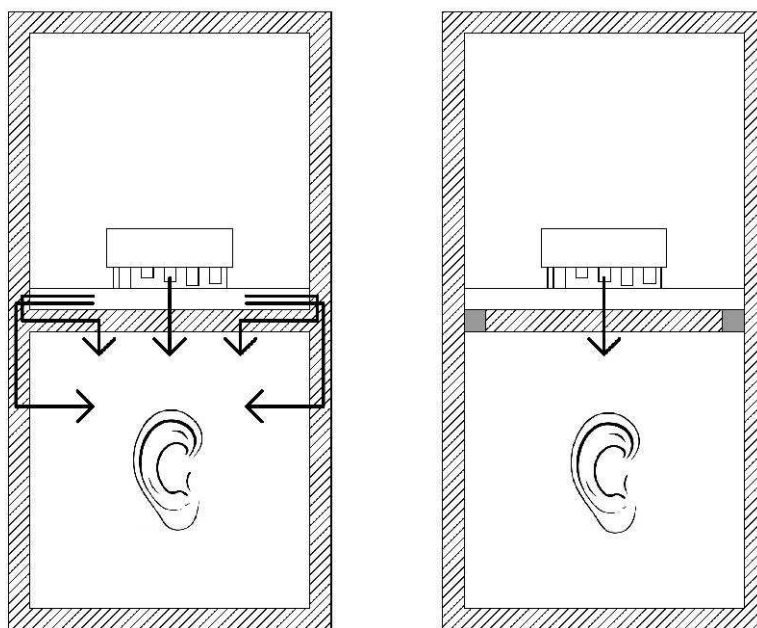


Fig. 24: Trittschallmessung am Bau (sx) und im Labor (dx). Quelle: TBZ GmbH



In den Labormessungen ist die Decke von den seitlichen Wänden isoliert, um die Schallübertragung bei den Flanken zu minimieren, damit die direkte Schallleitung durch das konstruktive Element gemessen werden kann. Das Auflager, welches die zu messende Decke trägt, sowie auch die seitlichen Wände müssen aus schwerem Stahlbeton und in ausreichender Stärke errichtet sein, um die Vibrationen zu begrenzen.

Die Labormessung ergibt den Norm-Trittschallpegel L_n , während bei der Messung am Bau der Apex ' des Norm-Trittschallpegels L'_n auf die möglichen Schallbrücken und Flankenübertragung durch Vibrationen hinweist.

Die Messung des Norm-Trittschallpegels

Die Messung des Norm-Trittschallpegels wird laut den Normen UNI EN ISO 140 Teil 7 und Teil 14 (besondere Mess-Situationen) durchgeführt.

Bei zwei übereinander liegenden Räumen, welche durch die zu messende Decke getrennt sind, wird der Körperschall durch einen Trittschall-Klopfer erzeugt. Dies ist ein elektromechanisches Gerät, wo 5 Hämmerchen mit jeweils 500 g Gewicht aus 4 cm Höhe in einer zeitlichen Distanz von 100 ms auf den Boden fallen gelassen werden. Das Gerät muss die Bestimmungen laut UNI EN ISO 10140-5 einhalten, wodurch auch Geräte verschiedener Hersteller als „normalisiert“ bezeichnet werden können.



Fig. 25: Trittschallklopfer. Quelle: TBZ GmbH

Hörbeispiel für den Trittschall bei verschiedenen Bodenbelägen		
	Holz	Fliesen
Senderraum (oben)		
Empfangsraum (unten)	 $L'_{nw}: 53 \text{ dB}$	 $L'_{nw}: 62 \text{ dB}$

Tabella 13: Hörbeispiel für den Trittschall. Quelle: TBZ GmbH

Der Trittschall-Klopfer muss in mindestens 4 Positionen auf der Decke verteilt werden, am besten indem der Trittschall-Klopfer um 45° zu den Balken gedreht wird. Im Empfangsraum sollen mindestens 6 Messungen des Schallpegels bei laufendem Trittschall-Klopfer durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.

Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen. Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf während der Messung nicht den zu messenden Pegel beeinflussen und muss deshalb in allen Frequenzbereichen um 6 – 10 dB niedriger sein als der Schallpegel $L_{2..}$

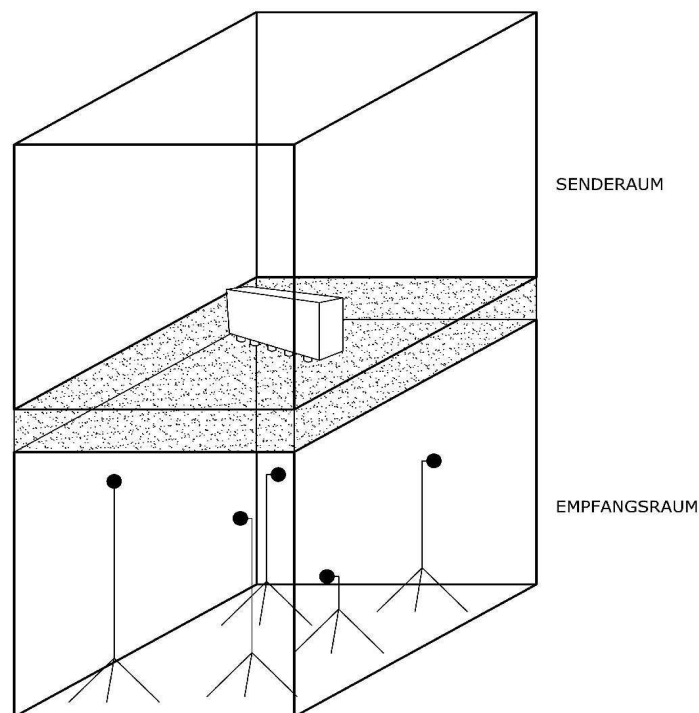


Fig. 26: Schema für die Messung des bewerteten Trittschallpegels $L'w$. Quelle: TBZ GmbH

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, oder einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe) oder auch mit einem Geräusch, wo die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep), im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert. Dies ist wichtig, weil der Schall in einem Raum sehr stark von den akustischen Eigenschaften des Raumes abhängt. So hört man den Schall in einem leeren Raum (mehr Reflexionen) viel länger als in einem vollständig eingerichteten Raum. Durch diese Mehrfachreflexionen wird der Schallpegel im leeren Raum bedeutend höher als im eingerichteten Raum, wo der Schall von den Oberflächen absorbiert wird. Damit dadurch aber nicht die Bestimmung des Luftschalldämmmaßes beeinflusst wird, werden die Ergebnisse der Messungen auf eine Standartnachhallzeit bezogen. Diese beträgt bei Wohnbauten 0,5 s.

Die Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels $L_{n,w}$ und $L'_{n,w}$

Wie auch beim Luftschall kann das Ergebnis einer Schallmessung als Einzahl-Angabe erfolgen: $L_{n,w}$ im Labor und $L'_{n,w}$ am Bau.

Die Berechnung ist in der Norm UNI EN ISO 717-2 beschrieben und wird als Methode des Vergleichens bezeichnet. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe.

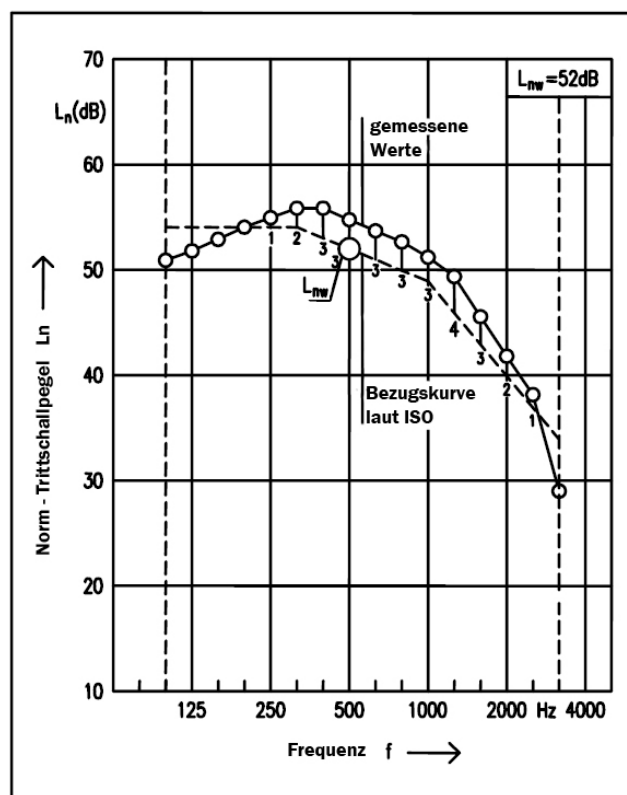


Fig. 27: Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels. Quelle:
Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Mit Hilfe der Spektrum-Anpassungswerte C_1 , $C_{1,50-2500}$ kann man den Trittschallpegel an die Betondecken mit / ohne wirksamen Deckenauflage bzw. Holzboden anpassen. Betonböden mit einer wirksamen Auflage haben einen Wert von $C_1 = 0$. C berücksichtigt die tiefen Frequenzen von 50 – 100 Hz, die für das menschliche Hörempfinden wesentlich sind. Derzeit werden die Spektrum-Anpassungswerte nur in wenigen Ländern angewendet. In Italien werden sie noch nicht zur Überprüfung der Einhaltung der gesetzlichen Normen herangezogen.

Mechanismen der Ausbreitung des Körperschalls

Die Quellen des Körperschalls sind vorwiegend die Schritte der Personen, das Fallen von Gegenständen, das Verschieben von Stühlen oder anderen Möbeln. Die Geräusche dieser Tätigkeiten breiten sich als **Vibrationen** sowohl vertikal als auch horizontal über die Strukturen aus, bringen Wände und Decken zum Schwingen, und diese erzeugen damit dann den Luftschall den wir hören.

Der effektiv wiedergegebene Schall hängt auch von der Dämpfungsfähigkeit der Strukturen und den Stößen zwischen Decken und Wänden ab.

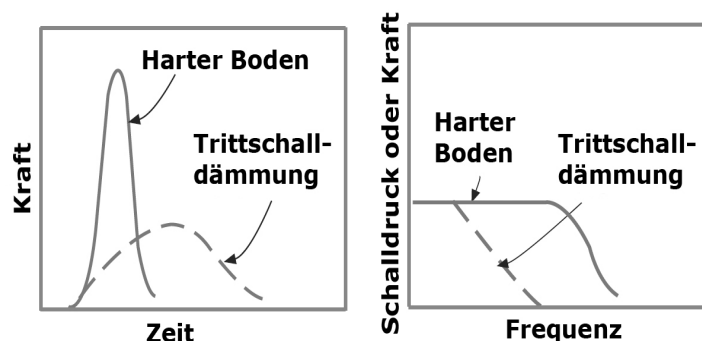


Fig. 28: Reaktion der Bodenbeläge auf Schläge. Quelle: "Manuale di acustica applicata" (R.Spagnolo)

Das Bild oben zeigt, dass ein Schlag auf eine harte Oberfläche ein lautes aber kurzes Geräusch hervorruft, derselbe Schlag auf eine weichere, nachgiebige Oberfläche ein leiseres Geräusch, wobei die Energie auf einen größeren Zeitraum verteilt wird. Deshalb ist auch der damit verursachte Schallpegel im Empfangsraum geringer.

Die beste und effektivste Lösung, um den Durchgang von Trittschall zu begrenzen, liegt im mehrschichtigen Aufbau mit dem „schwimmenden“ Bodenaufbau bzw. Estrich. Die zwei Platten werden durch eine elastische Feder getrennt nach dem „Masse-Feder-Masse“ Prinzip, wobei die obere Platte durch die Schwerkraft allein fixiert ist, wodurch der Schall von der statisch tragenden Struktur getrennt bleibt und in der Trittschalldämmung gedämpft wird.

Im folgenden Bild ist ein solcher Aufbau schematisch dargestellt.

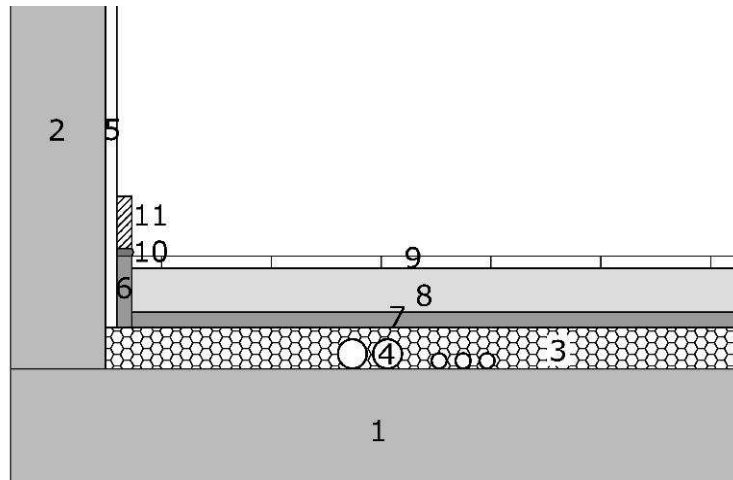


Fig. 29: Schwimmender Fußboden. Quelle: TBZ GmbH

1. Boden – 2. Wand – 3. Ausgleichsestrich – 4. Leitungen – 5. Putz – 6. Randdämmstreifen – 7. Trittschallmatte – 8. schwimmender Estrich – 9. Bodnebelag – 10. Elastische Füllung – 11. Sockelleiste

Die Verlegung von sehr dünnen Trittschall-Dämmmatten kann in der Realität der Baustellen zu wesentlich schlechteren Ergebnissen führen, als es aufgrund der Laborwerte zu erwarten wäre. Steinchen können die Trittschall-Dämmmatten durchdringen oder zerreißen, wodurch Schallbrücken entstehen.

Die dynamische Steifigkeit

Beim schwimmenden Estrich erfolgt die akustische Trennung durch eine Trittschallmatte. Die Elastizität dieser wird durch die **dynamische Steifigkeit** beschrieben. Je härter das Material ist, desto höher ist die Steifigkeit, desto weniger werden die Vibrationen gedämpft.

Die dynamische Steifigkeit ist definiert mit:

$$s' = (F/A) / \Delta L \quad [\text{MN/m}^3]$$

wobei F die auf den Prüfkörper normal wirkende Kraft in Newton ist; A ist die Fläche des Prüfkörpers und ΔL ist die Längenänderung der Stärke des Prüfkörpers in Metern.

Damit ein schwimmender Bodenaufbau eine gute Schalldämmung gewährleistet, muss dessen Resonanzfrequenz nieder sein, die schwimmende Platte muss schwer genug sein; die Trittschalldämmung ist sowohl elastisch als auch dämpfend, somit werden die Vibrationen im Inneren des Bauteils aufgefangen und verteilen sich nicht in die umgebenden Bauteile.



Die dynamische Steifigkeit ermöglicht eine rechnerische Abschätzung der Wirkung einer Trittschallmatte zusammen mit den Massen der Materialien darüber und darunter. Der Wert der dynamische Steifigkeit allein sagt noch nichts über die Dämmwirkung des konstruktiven Elements aus. Der Wert der Trittschallminderung ΔL kann nur für den Vergleich von Materialien oder Komponenten verwendet werden.

Aus den Vergleichen zwischen den Messungen und den rechnerischen Schätzungen wachsen Zweifel an der Korrektheit der Angaben der dynamischen Steifigkeit in den technischen Datenblättern mancher Materialien von Seiten der Hersteller, auch weil diese nicht immer die gleichen Messverfahren verwenden. Wenn zwei verschiedene Trittschall-Dämmmatten übereinander gelegt werden, kann die dadurch erzielte Verbesserung rechnerisch nicht nachvollzogen werden.

Vereinfacht formuliert bedeutet dies, dass die Werte der dynamischen Steifigkeit mit großer Vorsicht verwendet werden müssen und dass die Druckfestigkeit, Zusammendrückbarkeit und leichte und sichere Verlegung auch bei der Wahl der Trittschall-Dämmmatte berücksichtigt werden müssen.



Wesentliche Fehler bei der Ausführung

Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler bei der Trittschalldämmung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Keine Trittschalldämmung verwendet	15-25 dB	1. Im Senderaum (am effektivsten und zugleich teuersten): Rückbau bis zur Rohdecke, Aufbau eines schwimmenden Bodenaufbaus mit Trittschalldämmung. 2. Überdecken des Bodenaufbaus mit schwimmendem Bodenbelag oder Teppich. 3. Im Empfangsraum (weniger effektiv, da die Vibrationen sich über die statischen Strukturen verteilen, wie Wände und Decken, aber billiger): abgehängte Decke montieren.
Schlechte Auswahl bzw. Verlegung der Trittschalldämmung	10-15 dB	1. Im Senderaum (am effektivsten): Rückbau bis zur Rohdecke, Aufbau eines schwimmenden Bodenaufbaus mit Trittschalldämmung. 2. Überdecken des Bodenaufbaus mit schwimmendem Bodenbelag oder Teppich. 3. Im Empfangsraum (weniger effektiv, da die Vibrationen sich über die statischen Strukturen verteilen, wie Wände und Decken): abgehängte Decke montieren.



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Starre Verbindung über die Sockelleiste	5-15 dB	1. Die Sockelleisten sorgfältig verlegen, erst nachdem die Bodenfliesen verlegt wurden. Es muss ein Abstand von 1-2 mm gehalten werden, welcher dann mit Silikon verschlossen wird. 2. Entfernen der Sockelleiste, Wiedermontage mit elastischer Fuge.

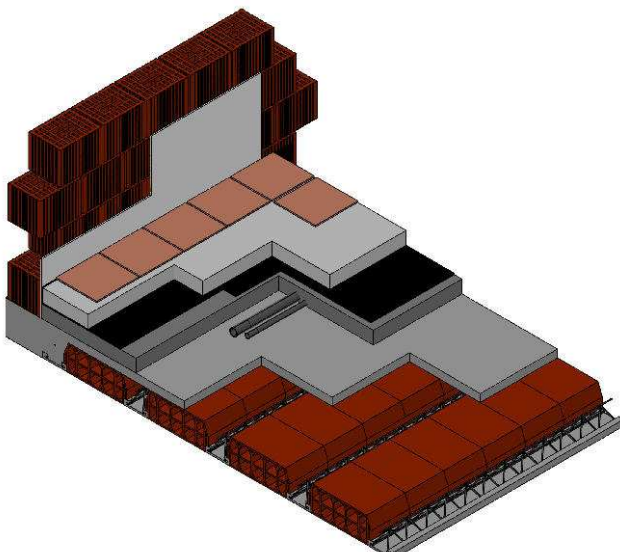
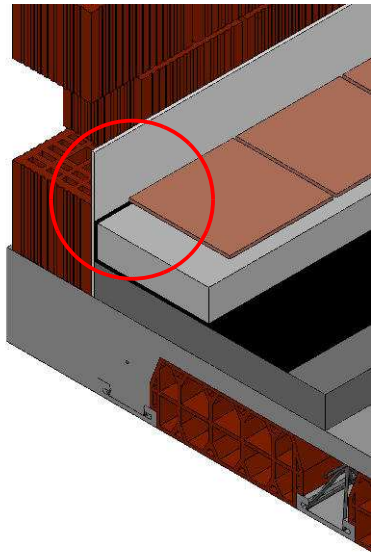



Tabelle 14: $L'_{n,w}$ – wesentliche Ausführungsfehler bei der Trittschalldämmung. Quelle: TBZ GmbH



Lärmbelästigung durch Installationen

Die italienische Gesetzgebung unterscheidet im Ministerialdekret DPCM 5/12/1997 zwei verschiedenen Lärmbelästigungen durch Installationen:

1. Schallpegel von nicht kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie sanitären Zu- und Abflüssen, Aufzügen, usw.
2. Schallpegel von kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie Heizung, Kühlung, Lüftung, usw.

Das Dekret setzt die maximal zulässigen Schallpegel für folgende Gebäudearten fest:

Cat	Nutzung	Installations- geräusche diskontinuierlich $L_{AS\ max}$	Installations- geräusche kontinuierlich L_{Aeq}
A	Wohngebäude und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
B	Büros und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
C	Hotels Pensionen und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
D	Krankenhäuser, Kliniken, Pflegeanstalten und Ähnliches	≤ 35	≤ 25
E	Schulen jeden Typs und Ähnliches	≤ 35	≤ 25
F	Kultur- und Freizeiteinrichtungen und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
G	Handel und Ähnliches	≤ 35	≤ 35

Tabelle 15: Quelle: D.P.C.M. 05/12/97

Sanitärinstallationen

Die Sanitärinstallationen bestehen aus Zuleitungen für Kalt- und Warmwasser, Abwasserleitungen sowie Sanitärgegenständen.

Die in den Leitungen entstehenden Vibrationen durch die Strömung werden an Wände und Decken übertragen und diese strahlen sie dann als Luftschall ab.

Plötzliche Unterbrechungen des Wasserflusses verursachen Phänomene der Kavitation (Bildung und Auflösung von mit Dampf gefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten, siehe auch [Wikipedia](#)) oder auch so genannte Druckstoßphänomene (siehe auch [Wikipedia](#)), und können laute impulsive Geräusche erzeugen.

Normalerweise sind Geräusche durch Sanitärinstallationen durch zu kleine Leitungsquerschnitte und damit durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten, zu enge Kurven oder durch fehlende Ausdehnungsgefäße bedingt.



Um dem Abhilfe zu schaffen, können abgesehen von der Ursachenbehebung die Leitungen mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden, sowie auch glatte mehrschichtige Leitungen verwendet werden.

Weiters können die Leitungen in Vormauerungen oder auch in eigenen Installationsschächten verlegt werden. Auch in diesem Fall müssen die Leitungen mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden.

Es ist generell ratsam, Bäder nicht neben Schlafzimmern zu planen. Es empfiehlt sich, Toilettenspülungen mit Spülkästen zu wählen und die WCs gleich neben die vertikalen Abwasserstränge zu legen.



Ausführungsbeispiel eines Installationsschachtes mit Leitungen, welche mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden, um die Übertragung von Vibrationen auf die Struktur zu vermeiden.

Fig. 29: Quelle: TBZ GmbH

Aufzüge

Aufzüge sollen generell möglichst weit von Ruhezonen positioniert werden. Es gibt elektrische Aufzüge und solche, die mit Öldruck funktionieren. Der Motor kann in eigenen Räumen aufgestellt oder in die Fahrzugaufkabinen integriert werden.

Bei elektrischen Aufzügen wird der Lärm vorwiegend durch den Motor und Keilriemen verursacht, durch die Führungsschienen und die Schiebetüren. Sinnvolle Maßnahmen sind das Auswählen von vom Hersteller zertifizierte, geräuscharme Motoren, Schalldämmung des Raumes, wo sich der Motor befindet, regelmäßiges Schmieren der beweglichen Komponenten und generell eine regelmäßige Wartung aller Teile der Anlage.

Bei Aufzügen mit Öldruck sind sinnvolle Maßnahmen: elastische Auflager bei der Ölpumpe montieren, die Ölpumpe in einen schallgedämmten Raum geben und generell eine regelmäßige Wartung aller Teile der Anlage durchführen.

Wenn der Motor in die Fahrzugaufkabinen integriert wird, muss er speziell leise sein. Die Wände des Aufzugsschachtes sollen von der restlichen tragenden Struktur akustisch getrennt sein.

Heizungen

Grundsätzlich wird zwischen luft- und wassergeführten Heizsystemen unterschieden.

Bei wassergeführten Heizungssystemen erfolgt die Heizung über einen Wärmeerzeuger und Pumpen, welche das warme Wasser zwischen den Heizkörpern und dem Wärmeerzeuger zirkulieren lassen. Hauptlärmquelle bei dieser Art von Heizung ist sicher die Heizzentrale selbst. Diese sollte daher möglichst weit von den Ruhezonen entfernt sein und schalldämmende Wände und Decken aufweisen. Der Heizkessel soll auf elastischen Lagern stehen.

In der Nacht sollten die Pumpen ausgeschaltet werden, wenn die thermische Isolierung des Gebäudes dies zulässt.

Auch die Heizleitungen sollen mit elastischem Material ummantelt werden, im Mauerwerk sollen Dehnmöglichkeiten vorgesehen werden, um die natürliche Ausdehnung zu ermöglichen.

Bei luftgeführten Heizsystemen sind die Hauptlärmquellen die Kompressoren, die Pumpen und die Luftzirkulation im Inneren der Kanäle. Werden die Anlagen direkt in den Räumen aufgestellt, so ist es wichtig, dass diese sehr ruhig sind. Wird eine Heizzentrale verwendet, so ist mehr darauf zu achten, dass diese von der Gebäudestruktur akustisch isoliert wird. Oft wird der Lärm bei diesen Anlagen direkt durch die Lüftungskanäle übertragen. Daher ist es wichtig, dass die Leitungen einen ausreichenden Querschnitt haben, damit laute Geräusche durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten vermieden werden. Schalldämpfer können nach den Ventilatoren und kurz vor den Austrittsöffnungen eingebaut werden. Bei Wärmepumpen und Kompressoren sollen diese auf elastischen Federn montiert werden und am besten in einem eigenen schallgedämmten Raum montiert sein.

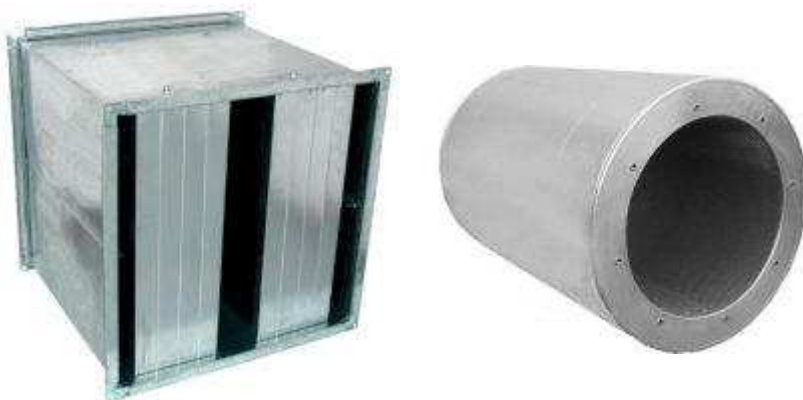


Fig. 30: Beispiele von Schalldämpfern. Quelle: MP3 S.r.l. www.MP3-air.com



Lüftungsanlagen

Für zentrale Lüftungsanlagen bzw. kontrollierte Lüftung gilt dasselbe wie für luftgeführte Heizsystemen. Telefonie-Schall zwischen zwei Räumen kann durch Schalldämpfer verhindert werden. Überström-Öffnungen oberhalb des Türstockes können mit absorbierendem Material ausgekleidet werden. Lüftungskanäle sollen in schallgedämmten Installationsschächten bzw. schallgedämmten abgehängten Decken verlegt sein.

Es gibt derzeit noch keine dezentralen Lüftungsanlagen am Markt, die ohne Zusatzmaßnahmen eine ausreichende Luftleistung ohne störende Schallemission erbringen ($L_{\text{aeq}} \leq 25\text{dB}$). Deshalb können derzeit nur zentrale kontrollierte Lüftungsanlagen empfohlen werden.

Kühlanlagen

Es gibt kleine Kühlanlagen mit Außen-Einheit und zentrale Kühlanlagen, welche meist auf dem Dach positioniert werden.

Bei kleinen Kühlanlagen soll die Außen-Einheit, welche den Ventilator beinhaltet, möglichst weit weg von Fenstern angebracht werden. Die Strömungsgeräusche können vor allem in der Nacht jene stören, die bei offenem Fenster schlafen wollen. Das Gerät selbst soll auf elastischen Lagern montiert werden.

Bei zentralen Kühlanlagen gibt es Kompressoren und Ventilatoren, welche auf elastischen Lagern montiert werden sollen. Es sind absorbierende Flächen und Schalldämpfer vorzusehen.



Gesetze und Normen

Das derzeit gültige Gesetz

Das Ministerialdekret D.P.C.M. 5/12/1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici” definiert die akustischen Anforderungen an die Bauteile sowie die Begrenzung der internen Schallquellen, je nach Gebäude-Typologie (DPCM 5/12/1997, Art. 2 + Tabelle B):

Cat	Nutzung	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	L'_{nw}
A	Wohngebäude und Ähnliches	≥ 50	≥ 40	≤ 63
B	Büros und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55
C	Hotels Pensionen und Ähnliches	≥ 50	≥ 40	≤ 63
D	Krankenhäuser, Kliniken, Pflegeanstalten und Ähnliches	≥ 55	≥ 45	≤ 58
E	Schulen jeden Typs und Ähnliches	≥ 50	≥ 48	≤ 58
F	Kultur- und Freizeiteinrichtungen und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55
G	Handel und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55

Tabelle 16: Quelle: Tabelle B des Anhangs A des D.P.C.M. 05/12/97

R'_w Bau-Schalldämm-Maß wohnungstrennender Elemente

L'_{nw} Norm-Trittschallpegel der Decken

$D_{2m,nT,w}$ Standard-Schallpegeldifferenz der Fassade

Die gültige technische Norm

Das Ministerialdekret vom 5/12/1997 ist eine gesetzliche Norm, mit allen ihren Stärken und Schwächen. Im Jahr 2010 wurde eine technische Norm verabschiedet, die UNI 11367, welche eine akustische Klassifizierung der Gebäude eingeführt hat und die Grundlage für eine neue gesetzliche Norm werden kann. Da es diese neue gesetzliche Norm noch nicht gibt, gilt weiterhin das Ministerialdekret vom 5/12/1997, die technische Norm UNI 11367 hat nur freiwilligen Charakter.

Die Norm **UNI 11367:2010** “Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera” wurde von ca. 60 Technikern unter Einbeziehung der wesentlichen Branchen des Bauwesens erarbeitet (Baufirmen, Planer, Hersteller von Materialien, Haustechnik und Fensterbau, Akustik-Techniker, Universitäten).

Die akustische Zertifizierung wird auf Grundlage von Schallmessungen vor Ort erstellt, von welchen ein energetisches Mittel errechnet wird. Da es nicht realistisch ist, alle Bauteile zu messen, wird noch ein „Unsicherheitsfaktor“ berücksichtigt.



Klasse	Index der Bewertung				
	a) Standard- Schallpegeldifferenz der Fassade $D_{2m,2Tw}$ dB	b) Bau-Schalldämm- Maß von vertikalen und horizontalen Elementen zwischen verschiedenen Immobilien- Einheiten R'_w dB	c) Norm- Trittschallpegel der Decke zwischen verschiedenen Immobilien- Einheiten L'_{nw} dB	d) korrigierte Installations- geräusche kontinuierlich L_{ic} dB(A)	e) korrigierte Installations- geräusche diskontinuierlich L_{id} dB(A)
I	≥ 43	≥ 56	≤ 53	≤ 25	≤ 30
II	≥ 40	≥ 53	≤ 58	≤ 28	≤ 33
III	≥ 37	≥ 50	≤ 63	≤ 32	≤ 37
IV	≥ 32	≥ 45	≤ 68	≤ 37	≤ 42

Tabelle 17: Die Parameter für die akustische Klassifizierung der Immobilien-Einheiten. Quelle: Ansicht 1 Norm UNI 11367

Die Norm sieht vor, dass mindestens 10% der Elemente, aber mindestens 3 jeder Bauteilart, gemessen werden müssen. Das reduziert die Kosten für die Klassifizierung besonders der großen Gebäude (mit mehr als 50 Einheiten), wo sich die Bauteile wiederholen. Bei kleinen Gebäuden (10-20 Einheiten) müssen damit beinahe alle Bauteile gemessen werden.

Um auch die Kosten für die Klassifizierung kleinerer Gebäude zu reduzieren, wurde im Mai 2012 die Norm **UNI 11444** veröffentlicht: „Anleitung für die Auswahl der Immobilien-Einheiten in Gebäuden mit nicht seriellen Eigenschaften“ (Original-Titel: “Linee guida per la selezione delle unità immobiliari in edifici con caratteristiche non seriali”). Danach werden mindestens 2 Immobilien-Einheiten („IE“) vermessen, für Gebäude mit 3 bis 50 IE werden mindestens 3 IE vermessen, für größere Gebäude mindestens 10% der IE. Bei der Auswahl der Immobilien-Einheiten müssen jene mit den schwerwiegenden Schallbrücken ausgewählt werden. Die Klassifizierung wird nur für die gemessenen Immobilien-Einheiten ausgestellt, die pessimistischste Klasse kann für das ganze Gebäude angewandt werden.

Es müsste Aufgabe und Verantwortung des Bauleiters sein, mit Unterstützung des Akustik-Technikers die akustisch schwächsten Bauteile zu identifizieren. Allein der Bauleiter kennt die kritischen Punkte während der Ausführung des Gebäudes.

Rechenmodelle für die Planung

Laut UNI EN 12354-1

Das Modell gründet auf der Annahme, dass die Summe der Schallübertragung aus der direkten Übertragung und der Übertragung über die diversen Nebenwege besteht. Bei zwei getrennten Räumen, einem Senderaum und einem Empfangsraum, ist jeder Schallweg durch ein Element charakterisiert, welches den Schallwellen ausgesetzt ist (i) und ein weiteres, welches jene im Empfangsraum abgibt (j). In folgendem Bild sind diese Schallwege skizziert.

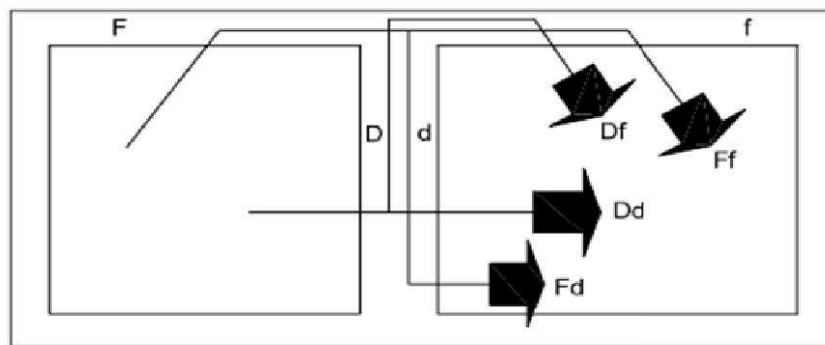


Fig. 31: Schallwege der Flankenübertragung. Quelle: UNI EN 12354

Im Senderaum ist das Element (i) mit der Schallübertragung auf Nebenwegen mit F gekennzeichnet, bei direkter Übertragung mit D . Im Empfangsraum ist das Element (j) mit f gekennzeichnet, wenn der Empfang der Schallwellen über einen Nebenweg erfolgt und mit d wenn der Empfang direkt über das trennende Element erfolgt.

Laut UNI EN 12354-2

Die UNI EN 12354-2 erläutert ein vereinfachtes Rechenmodell, in dem die Schalldämmung über die Massen der einzelnen Schichten, die schallschluckenden Eigenschaften bzw. die dynamische Steifigkeit der Feder errechnet werden kann. Damit können auch die Resonanz-Frequenzen ermittelt werden.

Im Rechenmodell der Norm UNI EN 12354-2:2002 wird ein Raum über dem anderen angenommen, wobei eine homogene Rohdecke und eine mittlere Dämpfung der Struktur zu Grunde liegt. Die Flankenübertragung kommt im Technischen Bericht UNI/TR 11175:2005 zur Sprache.

Der Korrekturfaktor K der die Decke flankierenden Elemente wird über deren Massen ermittelt, laut Tabelle 1 der Norm UNI EN 12354-2:2002 (siehe weiter oben).

Laut UNI EN 12354-3

Der Gesamt-Wert der Schalldämmung einer Fassade wird als energetisches Mittel zwischen den einzelnen Komponenten errechnet: die Wand / das Dach, die Fenster, die Rollläden, eventuelle Öffnungen z.B. für die Lüftung, usw. Die Schallbrücken haben einen überproportionalen Einfluss, was mit dem energetischen Mittel berücksichtigt wird.



Kommerzielle Software

Es existieren am Markt viele kommerzielle Softwarepakete zur Berechnung der Schalldämmung. Deren Basis sind die Normen UNI EN 12354 und UNI TR 11175. In vielen Programmen gibt es zahlreiche weitere Berechnungs-Beziehungen verschiedenster Autoren aus Italien bzw. Europa. Zudem verfügen alle diese Programme über eine Datenbank mit den Materialien und deren technischen Eigenschaften, sowie auch über Aufbauten mit den Laborwerten.

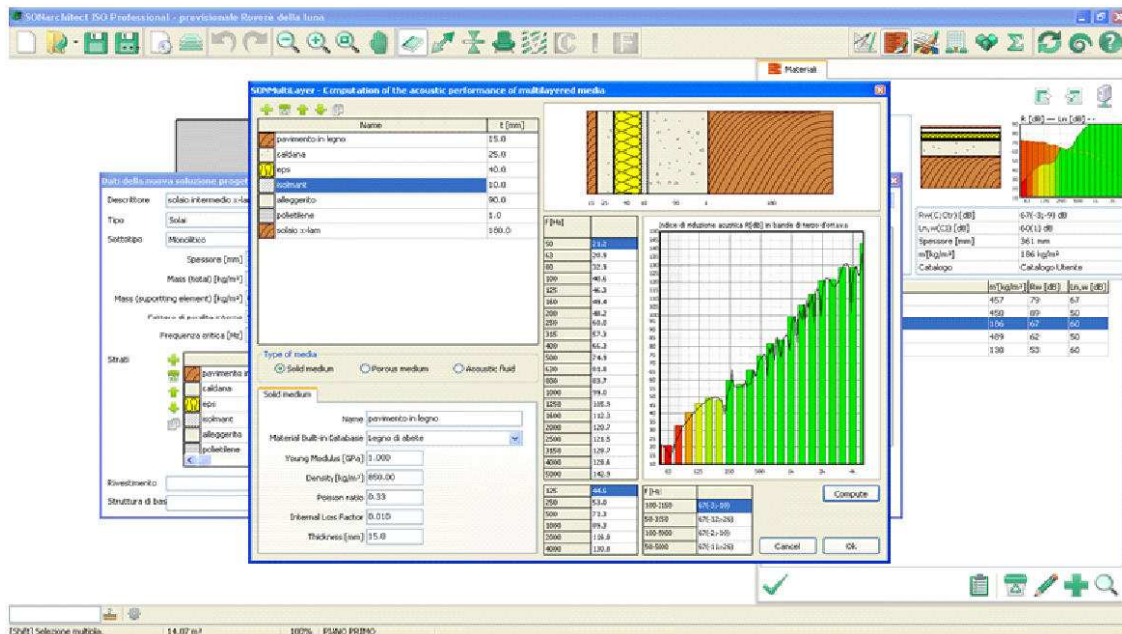


Fig. 32: Beispiel einer kommerziellen Software zur Berechnung der Schalldämmung. Quelle: 1BZ GmbH

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Software liegen im besonderen:

- in der Anzahl der möglichen Berechnungs-Beziehungen;
- in der Möglichkeit, komplexe oder vereinfachte Geometrien nachzubilden;
- im Umfang der Datenbank der Materialien und Konstruktionen;
- in der Möglichkeit, die Datenbank einzubauen.

Alle diese Software-Lösungen können eine Orientierung geben, meistens aber kommen überschätzte Ergebnisse heraus, weil die Mängel bei der Ausführung nicht ausreichend berücksichtigt werden. Deshalb sind die Berechnungen stets mit einem kritischen Auge und nur als „rechnerische Schätzungen“ zu betrachten und mit der Erfahrung auf dem Gebiet zu begleiten, sowohl bei den Messungen am Bau wie auch bei der Bauleitung.

Der Sinn dieses vorliegenden Katalogs liegt auch darin, reale Beispiele aufzuzeigen, mit denen die berechneten Ergebnisse verglichen werden können.



AKUSTISCHER BAUTEILKATALOG

Inhaltsverzeichnis

Wie der Katalog zu lesen ist.....	3
Zusammenfassung der Ergebnisse, Aufbau, Raum-Geometrie – Seite 1.....	4
Das Diagramm und der Einzahl-Wert – Seite 2.....	7
Fachbegriffe und Definitionen.....	9
Akustische Grundlagen.....	13
Der Schall - Definition.....	13
Ausbreitung des Schalls im Gebäude.....	17
Akustische Absorption und Schalldämmung.....	18
Die Nachhallzeit.....	19
Der Einfluss der Anschlüsse / Stöße.....	20
Strategien für eine gute Schalldämmung.....	23
Akustische Qualität der angrenzenden Räume: die Kontrolle des Nachhalls.....	24
Luftschall.....	25
Das Schalldämm-Maß und das Bau-Schalldämm-Maß.....	25
Standard-Schallpegeldifferenz Luftschall.....	26
Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes.....	27
Die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w und	
Bau-Schalldämm-Maßes $R'w$	28
Mechanismen der Ausbreitung des Luftschalls.....	29
Einschalige Wände/Bauteile.....	29
Zweischalige Wände.....	30
Wesentliche Fehler in der Ausführung.....	32
Schalldämmung der Fassade.....	36
Die Bestimmung der Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade $D_{2m,nT,w}$	37
Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen.....	38
Die Dämpfung des Schalls durch Absorption: der Schalldämpfer.....	41
Wesentliche Fehler bei der Ausführung.....	43
Zusammenfassung Fassade.....	45
Körperschall.....	46
Trittschallpegel.....	46
Die Messung des Norm-Trittschallpegels.....	48
Die Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels $L_{n,w}$ und $L'_{n,w}$	50
Mechanismen der Ausbreitung des Körperschalls.....	51
Die dynamische Steifigkeit.....	52
Wesentliche Fehler bei der Ausführung.....	54



Lärmbelästigung durch Installationen.....	56
Sanitärinstallationen.....	56
Aufzüge.....	57
Heizungen.....	58
Lüftungsanlagen.....	59
Kühlanlagen.....	59
Gesetze und Normen.....	60
Das derzeit gültige Gesetz.....	60
Die gültige technische Norm.....	60
Rechenmodelle für die Planung.....	62
Laut UNI EN 12354-1.....	62
Laut UNI EN 12354-2.....	62
Laut UNI EN 12354-3.....	62
Kommerzielle Software.....	63



Wie der Katalog zu lesen ist

Die Autonome Provinz Bozen hat den vorliegenden akustischen Bauteil-Katalog erstellt, um ein leicht verständliches, frei verfügbares Werkzeug für Planer, Akustiktechniker und alle anderen im Bauwesen Tätigen zur Verfügung zu stellen. Die im Katalog dargestellten Lösungen dienen dabei als Hilfe und Orientierung. Die erzielbaren Schalldämmungen hängen jedoch stark von der Planung und insbesondere von der Ausführung ab, und wir empfehlen, kompetente Techniker in Akustik von Anfang an mit einzubeziehen.

Die gesammelten und dargestellten Messungen sind keine Labormessungen, sondern Messungen vor Ort. Damit enthalten sie auch Schwachstellen, wie Flankenübertragungen und andere Fehler oder notwendige Kompromisse. Bei manchen Datenblättern war es trotz maximaler Sorgfalt nicht möglich zu überprüfen, ob die in der Planung vorgesehenen Materialien und Stärken auch tatsächlich so ausgeführt wurden. Insofern dürfen die angegebenen Werte nicht als absolut betrachtet werden. Da die akustische Eigenschaft jedes Elements auch von den umgebenden Bauteilen ("Flanken") und deren Verbindungen abhängt, ist deren Einfluss und jener eventueller Schallbrücken im geometrischen Kontext wesentlicher Bestandteil des Ergebnisses. Als Beispiel dafür kann der Schall-Nebenweg über die Dachkonstruktion die Schalldämmung einer Wohnungstrennwand im Dachgeschoss wesentlich mindern.

Wo es möglich war, wurde dieser Einfluss auch in den Datenblättern im Vergleich dargestellt mit den entsprechenden Hinweisen auf andere Datenblätter. Dadurch werden Zusammenhänge begreiflich gemacht.

Der Katalog enthält über 150 Bauelemente mit verschiedenen Lösungen. Die konstruktiven Elemente im Katalog betreffen Decken, Trennwände zwischen verschiedenen Wohnungen oder verschiedenen genutzten Räumen, Fassaden und Dächer, sowohl in Massivbauweise als auch Leichtbauweise (Holzbau und Trockenbau).

Zusätzlich zu den Aufbauten, welche die gesetzlichen Mindestanforderungen des Ministerialdekrets vom 05.12.1997 erfüllen, sind auch einige enthalten, die diese Grenzwerte nicht einhalten. Diese sollen dem Vergleich dienen, da sie entweder typische Fehler enthalten oder den Status quo vor der Sanierung darstellen.

Der Katalog ist so aufgebaut, dass er ständig erweitert werden kann, sodass auch zukünftige am Markt verwendete Techniken und Aufbauten integriert werden können.

Die Akustiktechniker und die Planer, welche über Messungen von Aufbauten verfügen, die hier noch nicht dargestellt sind, sind eingeladen diese zur Verfügung zu stellen. Diese neuen Datenblätter werden vom Amt für Luft und Lärm der Umweltagentur genehmigt und in den Katalog integriert.



Zusammenfassung der Ergebnisse, Aufbau, Raum-Geometrie – Seite 1

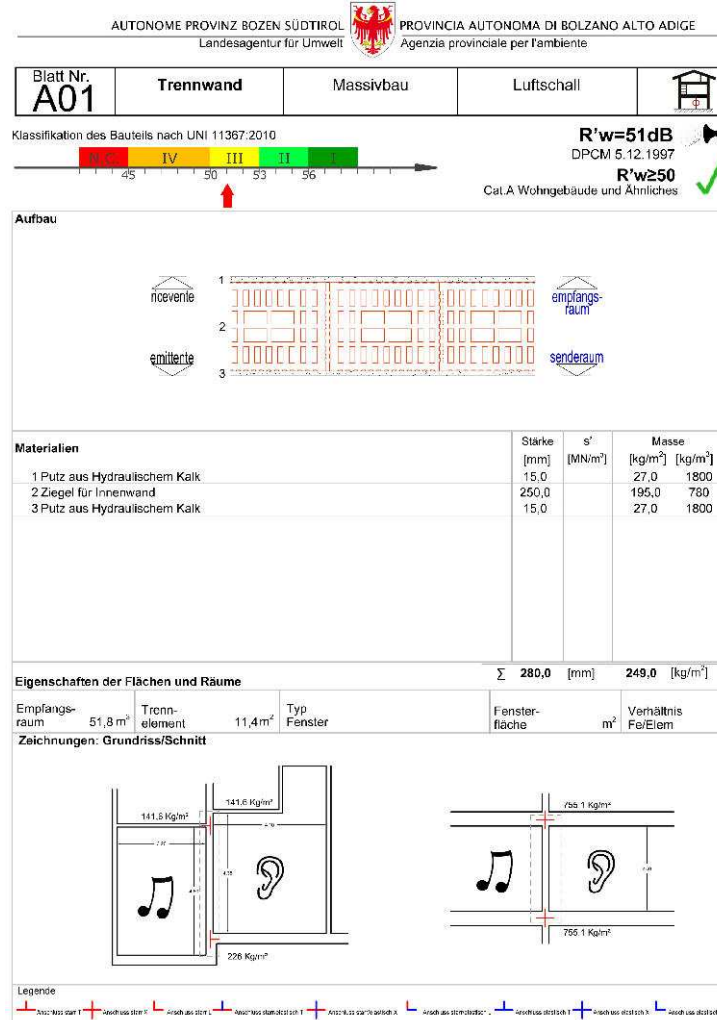


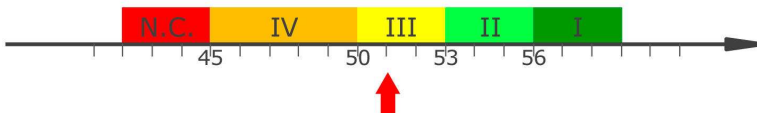
Fig. 1 Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Die Datenblätter sind nach Art der Elemente (Trennwand, Decke,...) sortiert, im dargestellten Beispiel mit der Nummer "A01"; weiters wird die Art des Bauteils, der Messung und der Bauweise angegeben. Das Ergebnis wird als kurzer Einzahlwert und die Klassifizierung laut UNI 11367 dargestellt, die Farben der Bewertung sind an die energetische Zertifizierung angelehnt.



Blatt Nr. A01	Trennwand	Massivbau	Luftschall	
-------------------------	------------------	-----------	------------	--

Klassifikation des Bauteils nach UNI 11367:2010

**R'_w=51dB**

DPCM 5.12.1997

R'_w≥50

Cat.A Wohngebäude und Ähnliches



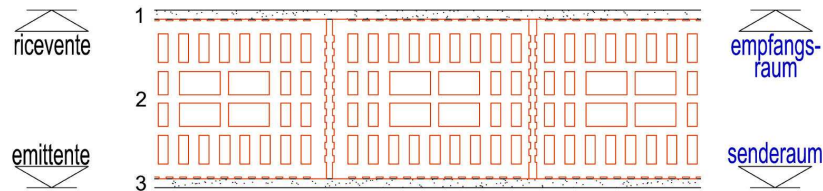
Fig. 2 oberer Teil Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Im mittleren Teil wird der Bauteil mit Zeichnung, Materialien, deren Stärken, eventueller dynamischer Steifigkeit s' und Masse pro Fläche bzw. Volumen (Rohdichte) dargestellt. An dieser Stelle möchten wir darauf erneut hinweisen, dass es in der Ausführung oft Änderungen insbesondere bei der Rohdichte gibt, die nicht ausreichend dokumentiert werden.

Für die dynamische Steifigkeit s' wird der vom Hersteller bereit gestellte Wert verwendet, falls in den Bemerkungen im Datenblatt nicht anders angegeben. Dieser Wert muss allerdings kritisch und mit Vorbehalt verwendet werden, da die Technischen Daten mancher Hersteller Werte mit Abweichungen von der Messmethode der UNI 29052-1 enthalten.



Aufbau



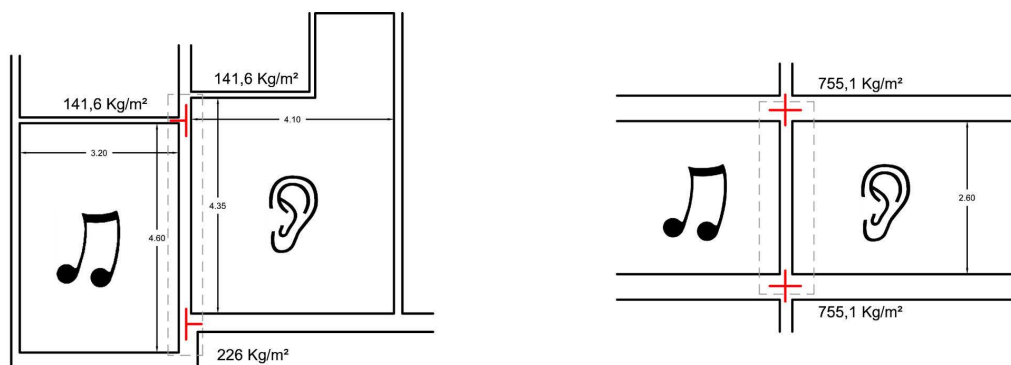
Materialien

	Stärke [mm]	s' [MN/m³]	Masse [kg/m²] [kg/m³]	
1 Putz aus Hydraulischem Kalk	15,0		27,0	1800
2 Ziegel für Innenwand	250,0		195,0	780
3 Putz aus Hydraulischem Kalk	15,0		27,0	1800
		Σ 280,0	[mm]	249,0 [kg/m²]
Eigenschaften der Flächen und Räume				
Empfangs- raum	51,8 m³	Trenn- element	11,4 m²	Typ Fenster
		Fenster- fläche		Verhältnis Fe/Elem
		m²		

Fig. 3 mittlerer Teil Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Der untere Teil beschreibt die geometrische Situation zwischen Senderraum und Empfangsraum, sowie die flächenspezifischen Massen der umgebenden Bauteile und die Art der Verbindungen.

Zeichnungen: Grundriss/Schnitt



Legende

Anschluss starr T
 Anschluss starr X
 Anschluss starr L
 Anschluss starr/elastisch T
 Anschluss starr/elastisch X
 Anschluss starr/elastisch L
 Anschluss elastisch T
 Anschluss elastisch X
 Anschluss elastisch L

Fig. 4 unterer Teil Datenblatt, 1.Seite. Quelle: TBZ GmbH



Das Diagramm und der Einzahl-Wert – Seite 2

Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Schalldämmung bzw. des Schallpegels bei den unterschiedlichen Frequenzen an, sowie das Einzahl-Ergebnis, welches der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz entspricht (siehe auch UNI 717 1/2).

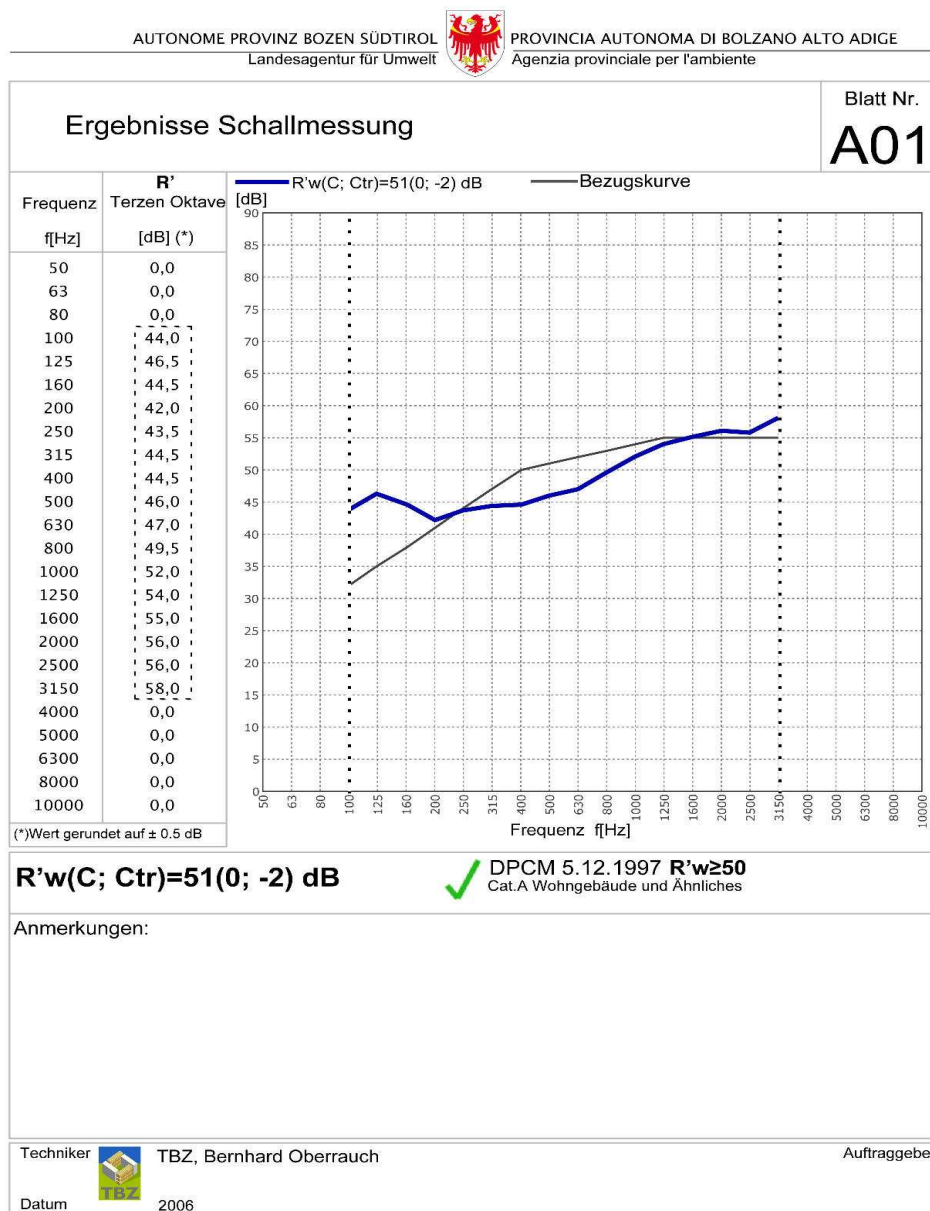


Fig. 5 Datenblatt, 2.Seite. Quelle: TBZ GmbH

Die Korrekturspektren C und C_{tr} werden in Italien, Österreich und Deutschland noch nicht angewandt, in der Schweiz aber sehr wohl. C wird für die internen Elemente verwendet, C_{tr} für die



Fassaden, wobei für den Verkehrslärm besonders die tieferen Frequenzen berücksichtigt werden (tr = "traffic").

Mit Hilfe des Diagrammes lassen sich eventuell auch jene Frequenzen bestimmen, bei denen das Bauteil Schwachstellen aufweist (z.B. hervorgerufen durch Resonanzeffekte oder steife Anschlüsse). Auch wenn Bauteile den gleichen Einzahl-Wert aufweisen, können sie sich akustisch unterschiedlich verhalten, wenn sich der Frequenzverlauf unterscheidet.

Es sei darauf hingewiesen, dass sehr tiefe Frequenzen (unter 100 Hz) nicht in die Berechnung des Einzahl-Wertes mit einfließen, auch wenn sie vom Menschen wahrgenommen werden. Wo verfügbar werden aber auch die tiefen Frequenzen in den Datenblättern dargestellt.

Im Abschnitt "Anmerkungen" werden weitere Hinweise, mögliche Fehler oder Sonstiges angegeben.

Ganz unten ist der Messtechniker und das Jahr der Messung eingetragen, sowie fakultativ der Auftraggeber der Messung. Diese Angabe soll auch ein Anreiz für den Messtechniker und den Auftraggeber der Messung sein, weitere Messungen zur Verfügung zu stellen, um die vorliegende Sammlung im Laufe der Zeit zu erweitern.



Fachbegriffe und Definitionen

In dieser Tabelle werden die Fachbegriffe, die im Katalog verwendet werden, zusammengefasst und erklärt:

Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Periode	T	s	Die zeitliche Dauer einer Wellenlänge, um eine ganze Schall-Welle zu vollenden.
Wellenlänge	λ	m	Abstand einer Schallwelle in der Periode T .
Frequenz	f	Hz	Die Anzahl der Wellen pro Zeiteinheit. Die unterschiedlichen Frequenzen werden als tiefe, mittlere und hohe Töne wahrgenommen.
Resonanz-Frequenz	f_0	Hz	Frequenz, bei der das Element stark mitschwingt und deshalb die Schalldämmung wesentlich reduziert. Sie ist bedingt durch die Stärke, das Flächengewicht und die Steifigkeit. Das konstruktive Element soll so dimensioniert werden, dass die Resonanz-Frequenz unterhalb der relevanten Frequenzen liegt.
Koinzidenz-Frequenz	f_c	Hz	Frequenz, bei der das Element stark mit schwingt und deshalb die Schalldämmung wesentlich reduziert. Das konstruktive Element soll so dimensioniert werden, dass die Koinzidenz-Frequenz oberhalb der relevanten Frequenzen liegt.
Schalldruck	P	Pa	Amplitude der Schallwelle.
Bezugsdruck	P_0	Pa	Schalldruck von 20 μPa , Hörgrenze (entspricht 0 Dezibel).
Dezibel	dB	dB (bez. 20 μPa)	Numerische Darstellung des Schall-Pegels, Quotient aus gemessenem Schalldruck P und Bezugsdruck P_0 . Durch diese Darstellung sind die Zahlen leichter zu vergleichen und zu gebrauchen.
Schallpegel in einem Raum	L	dB (bez. 20 μPa)	Mittlerer Schallpegel in Dezibel.
Schallpegel im Senderaum	L_1	dB (bez. 20 μPa)	Schallpegel im Senderaum, der durch das konstruktive Element vom Empfangsraum getrennt ist.
Schallpegel im Empfangsraum	L_2	dB (bez. 20 μPa)	Schallpegel im Empfangsraum, der durch das konstruktive Element vom Senderaum getrennt ist.
Schallpegel bei 2 m Entfernung	$L_{1,2m}$	dB (bez. 20 μPa)	Schallpegel in einer Entfernung von 2 Metern vor der Fassade.
Absorptionsgrad	α	-	Der Schallabsorptionsgrad α ist ein Maß für die offensichtlich absorbierte Schallenergie. Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallenergie. $\alpha+r=1$; damit liegt α zwischen 0 (absorbiert nichts) und 1 (absorbiert alles).
Äquivalente Absorptionsfläche	A	m^2	Multipliziert man die Fläche eines Bauteils mit dessen Absorptionsgrad α , so erhält man die Äquivalente Absorptionsfläche A .



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Äquivalente Bezugs-Absorptionsfläche	A_0	m^2	Äquivalente Absorptionsfläche von 10 m^2 .
Volumen	V	m^3	Volumen eines Raumes.
Schallquelle	S	-	Elektroakustisches oder mechanisches Gerät, um Schall zu erzeugen.
Schallreflexions-faktor	r	-	Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallenergie.
Absorptions-Koeffizient	δ	-	Schallenergie, welche vom Material absorbiert wird.
Schalltransmissions-grad	τ	-	Der Schalltransmissionsgrad τ ist ein Maß für die durchgelassene Schallintensität
Nachhallzeit	T_{60}	s	Ist definiert als die Zeit, in welcher der Pegel des Ausgangssignals um 60 dB abnimmt. Allerdings wird für diese Messung nur die Zeit berücksichtigt, die für einen Abfall von 0 dB auf -20 dB bzw. -30 dB benötigt wird. Die gemessene Zeit wird dann auf einen Abfall um 60 dB extrapoliert.
Bezugs-Nachhallzeit	T_0	s	Für Wohnräume wird mit einer Bezugs-Nachhallzeit $T_0 = 0,5 \text{ s}$ gerechnet.
Stoßstellendämm-Maß	K_{ij}	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Stoßstellendämm-Maß für jeden Übertragungsweg zwischen dem Bauteil i und dem Bauteil j an einer Stoßstelle, nach EN12354-2000.
Dichte	m	kg/m^3	Masse pro Volumeneinheit.
Flächengewicht	m'	kg/m^2	Flächenbezogene Masse eines Bauteils.
Schallpegel-Differenz	D	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Differenz zwischen den Schallpegeln L_1 und L_2 , welche zwischen dem Senderaum und Empfangsraum gemessen wurden.
Norm-Schallpegel-differenz	D_n	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Schallpegeldifferenz D bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche.
Standard-Schallpegel-differenz	$D_{n,T}$	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Schallpegeldifferenz D bezogen auf einen Bezugswert der Nachhallzeit im Empfangsraum T_{60} .
Schalldämm-Maß	R	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Norm-Schallpegeldifferenz zwischen L_1 und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A und die Fläche des konstruktiven Elements (als Labormessung) ohne Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewertetes Schalldämm-Maß	R_w	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Einzahl-Angabe des Schalldämm-Maßes als Labormessung, bezogen auf 500 Hz.
Bau-Schalldämm-Maß	R'	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Norm-Schallpegeldifferenz zwischen L_1 und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A und die Fläche des konstruktiven Elements als Messung vor Ort, mit Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	R'_w	dB (bez. $20 \mu\text{Pa}$)	Einzahl-Angabe des Bau-Schalldämm-Maßes als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Standard Schallpegeldifferenz einer Fassade	$D_{2m,nT}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade zwischen L_1 (in 2 m Entfernung von der Fassade) und L_2 , bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A , als Messung vor Ort.
bewertete Standard-Schallpegeldifferenz einer Fassade	$D_{2m,nT,w}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.
Norm-Trittschallpegel, Labormessung	L_n	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Trittschallpegel L_2 bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A ohne Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewerteter Norm-Trittschallpegel, Labormessung	L_{nw}	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe des Norm-Trittschallpegels als Labormessung, bezogen auf 500 Hz.
Norm-Trittschallpegel, Messung vor Ort	L'_n	dB (bez. 20 μ Pa)	Norm-Trittschallpegel L_2 bezogen auf die Äquivalente Absorptionsfläche A mit Berücksichtigung der Schallbrücken durch Flankenübertragung.
bewerteter Norm-Trittschallpegel, Messung vor Ort	$L'_{n,w}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Einzahl-Angabe des Norm-Trittschallpegels als Messung vor Ort, bezogen auf 500 Hz.
Spektrum-Anpassungswert C und C_{tr}	C / C_{tr}	dB (bez. 20 μ Pa)	Korrekturwert für die Einzahl-Angaben für Luftschallmessungen, um das Ergebnis besser dem Höreindruck anzupassen, relativ auf die verwendete Schallquelle (C : bei typischem „Wohnlärm“ wie Sprechen, normal lauter Musik aus Stereoanlagen oder TV, C_{tr} : Verkehrslärm).
Spektrum-Anpassungswert C_1 , $C_{1,50-2500}$	C_1 $C_{1,50-2500}$	dB (bez. 20 μ Pa)	Korrekturwert für die Einzahl-Angaben für Trittschallmessungen. Mit Hilfe der Spektrum-Anpassungswerte C_1 , $C_{1,50-2500}$ sollen die Geräusche, die beim Begehen verschiedener Arten von Decken entstehen, besser nachgebildet werden, wegen mangelhafter Abbildung von Gehgeräuschen bei Betondecken ohne wirkungsvolle Deckenauflage oder bei Holzbalkendecken (tieffrequente Spitzenpegel); bei Betondecken mit wirkungsvollen Deckenaufgaben ergibt sich der Spektrum-Anpassungswert zu $C_1 = 0$. $C_{1,50-2500}$ berücksichtigt dabei auch die tiefen Frequenzen von 50-100 Hz, die für das subjektive Hörempfinden wesentlich sind.
Dynamische Steifigkeit	s'	MN/m ³	Elastizität eines Materials bei dynamischer Belastung.
Schallpegel Installations-geräusche kontinuierlich	L_{Aeq} L_{ic}	dB(A) (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel von kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie Heizung, Kühlung, Lüftung, usw.
Schallpegel Installations-geräusche diskontinuierlich	L_{ASmax} L_{id}	dB(A) (bez. 20 μ Pa)	Schallpegel von nicht kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie sanitären Zu- und Abflüssen, Aufzügen, usw.



Parameter	Symbol	Einheit	Beschreibung
Rosa Rauschen	-	-	Das Rosa Rauschen (auch $1/f$ -Rauschen) bezeichnet ein Rauschen, wo der Schallpegel mit steigender Frequenz proportional abnimmt, die Rauschleistungsdichte halbiert sich bei Verdopplung der Frequenz. Praktisch heißt dies, dass der Schallpegel zu höheren Frequenzen hin um 3 Dezibel pro Oktave abnimmt.
Weisses Rauschen	-	-	Beim weißen Rauschen hingegen ist der Schallpegel auf allen Frequenzen gleich, er hat die konstante Amplitude A_f .
Sine Sweep	-	-	Dies ist ein Geräusch, wo die Tonhöhe dauernd ansteigt, ausgehend von 50 Hz bis 5000 Hz. Dieses Geräusch wird vorwiegend für die Messung der Nachhallzeiten verwendet. Die Nachhallzeit T_{60} kann damit sehr genau gemessen werden, sowie auch weitere akustische Eigenschaften des Raumes.

Tabelle 1: Akustische Begriffe und Definitionen. Quelle: TBZ GmbH

Akustische Grundlagen

Der Schall - Definition

Der Schall wird über vibrierende, in Schwingung versetzte Körper erzeugt und gelangt über die Luft oder über andere elastische Materialien zum Ohr, wobei sich Kompression und Expansion abwechseln. Durch den wechselnden Druck der Schallwellen wird das Trommelfell in Schwingungen versetzt, die von den Gehörknöchelchen im Mittelohr zum Innenohr weitergeleitet werden. Dort werden die Schwingungen über die Nervenzellen in einen Höreindruck umgewandelt und vom Gehirn mit Erlebnissen verknüpft, gespeichert und eventuell in Handlungen umgesetzt.

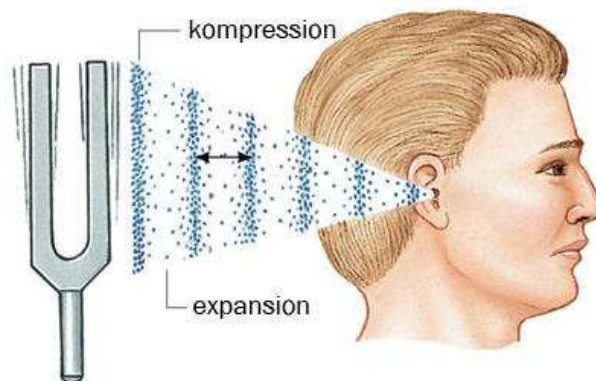


Fig. 6: Ausbreitung des Schalls. Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Auch starre Materialien leiten die Schallwellen, indem auch diese in Schwingung versetzt werden. Je starrer ein Material ist, desto schneller ist die Schallgeschwindigkeit darin:

<i>Material</i>	<i>Schallgeschwindigkeit c [m/s]</i>
Trockene Luft (15°C)	341
Wasser	1460
Ziegel	3650
Glas	5000
Stahl	6000
Kork	500
Elastisches Gummi	30 ÷ 70

Tabelle 2: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien. Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Um ein Schall-Ereignis zu definieren, werden neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit auch die Eigenschaften der Schallwelle angegeben: die Frequenz, die Periode und die Wellenlänge.

Die **Frequenz** f gibt die Anzahl der Schwingungen in der Zeit an, ausgedrückt in Hertz [Hz].

$$f = 1/T \quad [\text{Hz}]$$

Die **Periode** T ist der Kehrwert der Frequenz und gibt an, wieviel Zeit für eine komplette Schwingung vergangen ist (Kompression und Expansion), ausgedrückt in Sekunden [s].

$$T = 1/f \quad [\text{s}]$$

Die **Wellenlänge** λ gibt den Abstand zwischen zwei Wellen an, ausgedrückt in Metern [m].

Die Wellenlänge des Schalls λ kann mit seiner Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c über folgende Beziehung berechnet werden:

$$\lambda = c/f = cT \quad [\text{m}]$$

Je tiefer die Frequenz ist, desto länger ist die Wellenlänge.

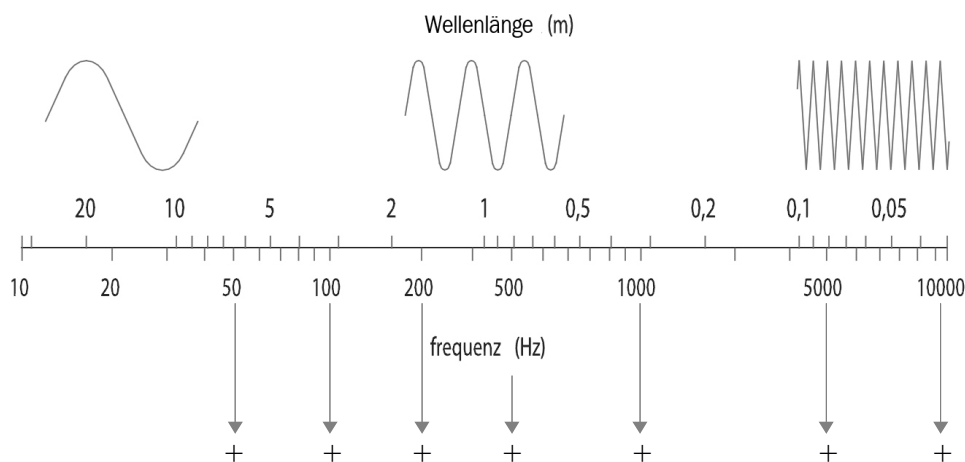


Fig. 7: Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara

Das menschliche Ohr kann Frequenzen von 16 bis 20.000 Hz wahrnehmen. Frequenzen unter 16 Hz werden als Vibrationen wahrgenommen, Frequenzen über 20.000 Hz sind Ultraschall und werden noch von manchen Tieren gehört. Im Laufe des Alters wird der wahrgenommene Frequenzbereich immer kleiner. Auch übermäßige Belastung hoher Lärmpegel z.B. durch Kopfhörer oder Diskotheken reduziert vorzeitig den wahrgenommenen Frequenzbereich.

Der Höreindruck hat keine lineare, sondern logarithmische Beziehung zum Schalldruck. Deshalb werden sämtliche Schallgrößen als Verhältnis zum Basiszustand angegeben, nämlich als **Decibel** [dB], und wären damit eigentlich einheitslos. Der Schallpegel [dB] definiert sich damit wie folgt:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad [\text{dB}]$$



wo P der gemessene Schalldruck ist und P_0 der Druck des Basiszustandes, unterhalb dessen das menschliche Ohr nichts mehr wahrnehmen kann, mit $20 \mu\text{Pa}$. Der Bezugswert ($20 \mu\text{Pa}$) entspricht dem minimalen Schalldruck bei einer Frequenz von 1000 Hz, und damit 0 dB. Rein mathematisch ergibt sich dann bei einem 10-fachen Schalldruck eine Erhöhung des Schallpegels um 20dB. 200 μPa entsprechen also 20 dB, 2000 μPa sind 40 dB, 20.000.000 μPa sind 120 dB, usw. Die logarithmische Skalierung wurde gewählt, damit man nicht mit immens großen Zahlen hantieren muss. In der folgenden Tabelle werden einige typische Schallereignisse in dB und in Pascal aufgelistet.

Schallquelle	Schallpegel [dB]	Schalldruck [Pa]
Rakete beim Start	180	20000
Düsenflugzeug	160	2000
Presslufthammer	130	63
Sirene	120	20
Motorsäge 1 m entfernt	110	6
Diskotheek	100	1
Lastwagen	90	0,6
starker Straßenverkehr	80	0,20
Staubsauger in 1 m Entfernung	70	0,063
Büroarbeit	60	0,020
Gespräch	50	0,0063
Bibliothek	40	0,0020
Flüstern	25	0,00036
Ticken einer Uhr	20	0,00020
Grundgeräusch im Wald	15	0,00011
Hörschwelle	0	0,000020

Tabelle 3: Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di acustica Università di Ferrara



Das Hörempfinden der Schallintensität hängt auch von der Umgebung ab. In einer ruhigen Umgebung kann auch ein leises Geräusch als störend empfunden werden, bei einem leicht höheren Grundgeräusch-Pegel wird dasselbe Geräusch nicht mehr wahrgenommen.

Das menschliche Ohr nimmt einen Unterschied in der Lautstärke wahr, wenn die Differenz des Schallpegels +3 dB beträgt. Ein offensichtlicher Unterschied in der Lautstärke wird bei +5 dB wahrgenommen, während das Lautstärke-Empfinden (loudness) bei +10 dB eine Verdoppelung wahrnimmt.

Das Lautstärke-Empfinden kann mit folgendem Hör-Beispiel erlebt werden:

	+ 1 dB	+ 3 dB	+ 5 dB	+ 10 dB
Rosa Rauschen	+	+	+	+
Männliche Stimme	+	+	+	+

Tabelle 4: Quelle: TBZ GmbH

Wie in diesen Beispielen zu beobachten ist, wird bei einem gleichbleibenden Geräusch und großer Konzentration ein Unterschied beim Schallpegel schon bei 1 dB spürbar, während er bei einer verändernden Schallquelle (z.B. der männlichen Stimme) bei 1 dB nicht hörbar ist, und auch bei einer Verdoppelung der Schallleistung bei 3 dB nur schwer wahrgenommen wird. Erst bei 5 oder 10 dB ist der Unterschied deutlich.

Der mittlere Hörbereich des menschlichen Ohrs ist im folgenden Diagramm dargestellt.

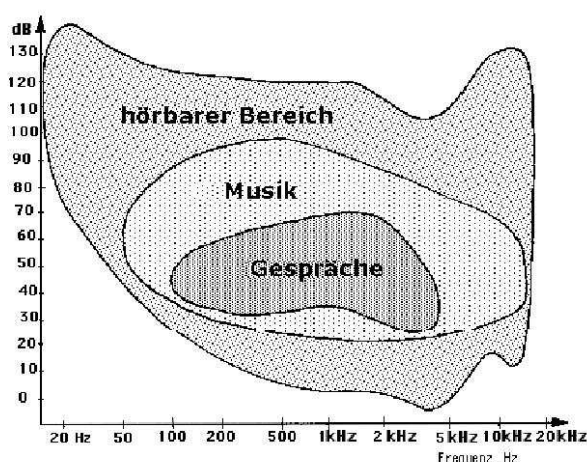


Fig. 8: Diagramm des mittleren Hörbereichs des menschlichen Ohrs.
Quelle: Unterrichtsmaterial Scuola di Acustica di Ferrara



Ausbreitung des Schalls im Gebäude

Wie vorher schon erwähnt, braucht der Schall zu seiner Ausbreitung ein flüssiges, festes oder gasförmiges Medium. Im Inneren des Gebäudes breitet sich der Schall über die konstruktiven Elemente wie Wände und Decken aus, und zwar entweder indirekt als Luftschall oder direkt als Körperschall.

- Luftschall sind Schallwellen, die sich über die Luft ausbreiten, wie zum Beispiel im Falle von Gesprächen, Musik, usw. In Gebäuden breiten sich diese Schallwellen zwischen einem und dem anderen Raum über die Trennelemente aus, indem diese zum Schwingen gebracht werden. Dadurch wird ein Teil der Schallenergie in den Nachbarraum übertragen.

- Körperschall ist Schall, der sich in einem Festkörper ausbreitet, wie zum Beispiel die Geräusche durch Gehen auf dem Boden, Klopfen an der Wand oder Decke, wenn auf der Anrichte Fleisch gehackt, in der Wand ein Loch gebohrt wird, usw. In diesem Fall wird der Festkörper direkt angeregt. Im Empfangsraum schwingen wiederum die Oberflächen der umgebenden Bauteile. Dadurch wird die Luft zum Schwingen gebracht und das hören wir dann. Starke Vibrationen nehmen wir auch körperlich wahr, wenn z.B. ein Lastwagen vorbei fährt, die Bässe einer potenten Musikanlage durchdringen oder die Erde bebt.

Wenn also in einem Raum (Senderraum) die Schallwellen von einer Schallquelle zur Wand gelangen, so wird davon ein Teil wieder zurück reflektiert, ein Teil von der Wand absorbiert bzw. in andere Teile des Gebäudes weitergeleitet und der restliche Teil gelangt in den anderen Raum dahinter (Empfangsraum).

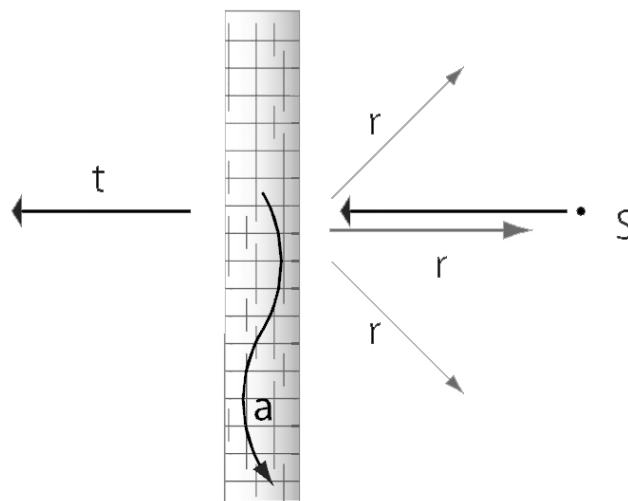


Fig. 9: Quelle: Unterrichtsmaterialien Scuola di acustica Università di Ferrara

S) Schallquelle; r) reflektierte Energie; a) absorbierte/weitergeleitete Energie; t) übertragene Energie

Diese übertragene Energie t wird als direkte Schallübertragung bezeichnet, da sie nur über das

trennende konstruktive Element übertragen wird (Wand oder Decke).

In der Praxis wird der Schall auch über die angrenzenden Bauteile übertragen.

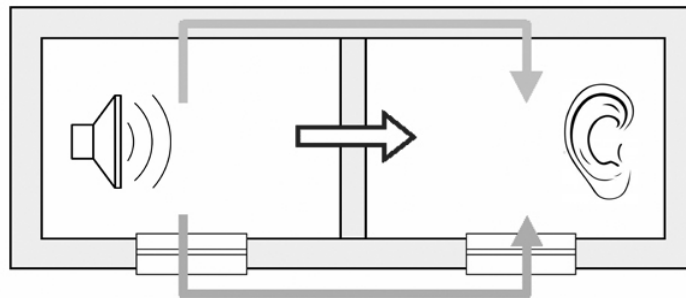


Fig. 10: Quelle TBZ GmbH

Teile der Schallenergie werden als Vibrationen über die Flanken weitergeleitet. Diese seitlichen Bauelemente werden also in Schwingung versetzt und bringen wiederum die Luft zum Schwingen, wodurch sie hörbar werden.

Akustische Absorption und Schalldämmung

Wie vorher erwähnt, wird ein Teil der Energie der Schallwellen absorbiert. Die Schallwellen bringen dabei das Material selbst oder die in den Poren enthaltene Luft zum Schwingen. In beiden Fällen gibt es Reibungsverluste, wodurch dieser Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird.

Der **Schallabsorptionsgrad** α ist ein Maß für die offensichtlich absorbierte Schallenergie. Der Schallreflexionsgrad r ist ein Maß für die reflektierte Schallintensität. $\alpha + r = 1$; damit liegt α zwischen faktisch 0 bzw. 0,01 absorbiert nichts, alles wird reflektiert und 1 absorbiert alles, nichts wird reflektiert, wie z.B. ein offenes Fenster. Der Schalltransmissionsgrad τ ist ein Maß für die durchgelassene Schallintensität. Die Summe aus Schalldissipationsgrad δ und Schalltransmissionsgrad τ ergibt den Schallabsorptionsgrad α : $\delta + \tau = \alpha$; bei den Messungen vor Ort ist es schwer, den Schalltransmissionsgrad zu messen, deshalb wird allgemein der Absorptionsgrad verwendet.

Somit errechnet sich der Schallabsorptionsgrad α aus:

$$\alpha = 1 - r = \delta + \tau = 1 - (W_r / W_i)$$

δ = Schalldissipationsgrad = W_δ / W_i ;

r = Schallreflexionsgrad = W_r / W_i ;

τ = Schalltransmissionsgrad = W_τ / W_i ;

W_i = Gesamte einfallende Energie;

W_δ = Teil der absorbierten Energie;

W_r = Teil der reflektierten Energie;

W_τ = Teil der durchgelassenen Energie.



Das **Schalldämm-Maß R** indessen zeigt an, inwieweit der Schalldurchgang in dB behindert wird, und gibt damit die Dämm-Leistung des konstruktiven Elements zwischen Senderaum und Empfangsraum an:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad [\text{dB}]$$

Beide Parameter sind unabhängig voneinander.

Die Nachhallzeit

Wenn in einem Raum eine Schallquelle plötzlich abgeschaltet wird, geht der Schallpegel nicht sofort auf Null, da die Schallwellen, die mit Schallgeschwindigkeit noch unterwegs sind, von mehreren Flächen mehrfach reflektiert werden. Abhängig vom Volumen des Raumes und von den schallschluckenden Eigenschaften der Oberflächen nimmt der Schallpegel mehr oder weniger langsam ab.

Der amerikanische Wissenschaftler Wallace Clement Sabine (1868-1919) hat dieses Phänomen untersucht und den Begriff der Nachhallzeit geprägt. Die Nachhallzeit ist definiert als die Zeit, in welcher der Pegel des Ausgangssignals um 60 dB abnimmt. Allerdings wird für diese Messung nur die Zeit berücksichtigt, die für einen Abfall von 0 dB auf -20 dB bzw. -30 dB benötigt wird. Die gemessene Zeit wird dann auf einen Abfall um 60 dB extrapoliert.

Wenn ein Raum vollkommen reflektiert, so ist die Nachhallzeit in allen Punkten gleich und es gilt:

$$T_{60} = 0,161 V / A \quad [\text{s}]$$

dabei ist V das Volumen des Raumes und A die Äquivalente Absorptionsfläche:

$$A = \alpha S \quad [\text{m}^2]$$

darin ist α der mittlere Absorptionsgrad des Empfangsraumes und S die Summe der rauminternen Oberflächen des Empfangsraumes.

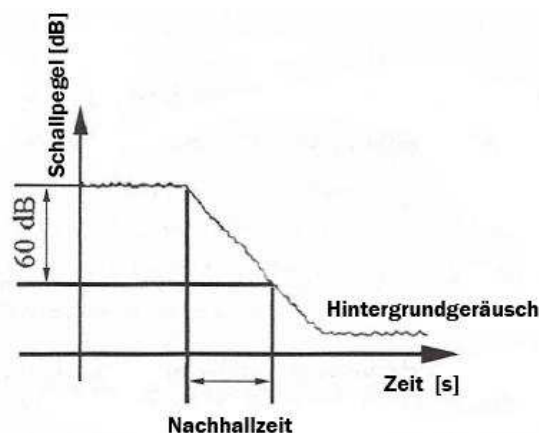


Fig. 11: Nachhallzeit. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Der Einfluss der Anschlüsse / Stöße

Der Einfluß der Anschlüsse der Verbindungen zwischen den trennenden konstruktiven Elementen und den angrenzenden Elementen (Decken, Fassaden, Trennwände) wird meist unterschätzt und bleibt deshalb oft unberücksichtigt. Somit passiert es, dass für eine vermeintlich bessere Schalldämmung mehrere zusätzliche Schichten angebracht werden, die Erwartungen dabei aber nicht erfüllt werden. Die seitlichen Schallbrücken (Flankenübertragungen) übertragen den Schall als Vibrationen, die vibrierenden Flächen erzeugen dann im Empfangsraum wieder einen Luftschall.

Durchgehende starre Materialien wie Betonstrukturen oder Holzbalken, oder auch Hohlräume wie Kamine geben dem Schall dabei eine Vorzugsspur. Durch elastische Materialien können diese Wege getrennt werden. Auch die Schallwellen suchen sich den Weg des geringsten Widerstandes. Wenn es Ausweichwege gibt, so wird auch die beste Schalldämmung daneben wirkungslos. Schallbrücken haben überproportionale Auswirkungen.

Beispiele von starren Stößen mit der Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes (UNI TR 11175).

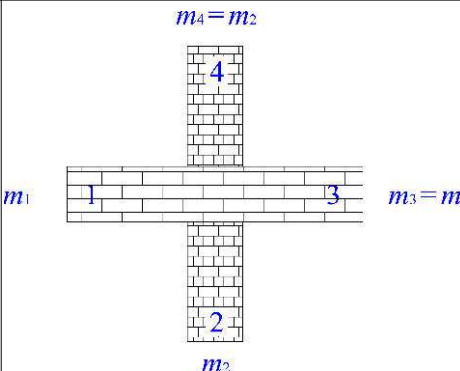
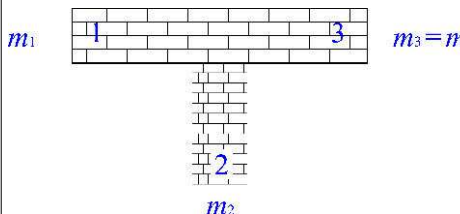
Typische Transmission von Stoßstellen K_{ij} für typische Anschlüsse				
Stoßstelle		Transmission		Werte K_{ij} [dB]
a) Starrer Kreuzstoß		Direkt	$\longleftrightarrow$	$K_{13} = 8,7+17,1M+5,7M^2$
		Winkel	$\swarrow \searrow$	$K_{12} = 8,7+5,7M^2$
				$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$
b) Starrer T-Stoß		Direkt	$\longleftrightarrow$	$K_{13} = 5,7+14,1M+5,7M^2$
		Winkel	$\swarrow \searrow$	$K_{12} = 5,7+5,7M^2$
$M=\lg m'_{\perp i} / m'_i$ mit: $m'_{\perp i}$ ist das Flächengewicht des Elements i in der Flanke ij [kg/m ²]; m'_i ist das Flächengewicht des dazu rechtwinklig stehenden Elements der Flanke [kg/m ²].				

Tabelle 5: Beispiel starrer Stöße. Quelle UNI TR 11175



Die Berechnung des Beitrags der Flankenübertragungen über die Stöße kann mit den Normen UNI EN ISO 12354 und UNI TR 11175 abgeschätzt werden. Nachfolgend werden einige Beispiele starrer Stöße tabellarisch wiedergegeben.

Korrekturfaktor K für die Flankenübertragung für Trittschall [dB]									
Flächengewicht der Decke [kg/m²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente ohne Vorsatzschalen [kg/m²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tabella 6: Quelle UNI TR 11175 Tabelle 5

Globaler Beitrag der Flankenübertragung K' für starre Kreuzstöße und gleichmäßig verteilte Flächengewichte [dB]									
Flächengewicht der Trennwand [kg/m²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente [kg/m²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
150	3,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
200	4,5	2,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
250	5,0	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
300	6,0	4,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
350	7,0	5,0	3,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
400	7,5	5,5	3,5	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0
450	8,0	6,0	4,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5
500	8,5	6,5	4,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5

Tabelle 7: Quelle UNI TR 11175 Tabelle A.7



Globaler Beitrag der Flankenübertragung K' für starre T-Stöße und gleichmäßig verteilte Flächengewichte [dB]									
Flächengewicht der Trennwand [kg/m ²]	Mittleres Flächengewicht der seitlichen homogenen Elemente [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	3,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
150	5,0	3,0	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
200	6,5	4,5	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
250	8,0	5,5	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
300	9,0	6,5	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
350	10,0	7,5	6,0	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5
400	10,5	8,5	6,5	5,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0
450	11,5	9,0	7,5	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5
500	12,0	9,5	8,0	6,5	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0

Tabelle 8: Quelle UNI TR 11175 Tabelle A.8

Die Verteilung des Körperschalls in einer Struktur hängt von der Kraft des Schall-Erregers, der Masse und den Eigenschaften von Elastizität/Dämpfung der Struktur ab. Bei gleich starren Stößen vibriert eine leichte Struktur mehr als eine schwere, die mehr Energie absorbiert, bis sie in Schwingung kommt. Eine leichte Struktur gibt dabei auch wieder mehr Luftschall ab, sobald sie in Schwingung versetzt ist.

Aus den abgebildeten Tabellen ist ersichtlich, dass der beste Kompromiss erzielt wird, wenn Elemente mit ähnlichem Flächengewicht verbunden werden. Dabei wird die Schallenergie gleichmäßig verteilt. Wenn hingegen Wände mit unterschiedlichem Flächengewicht verbunden sind, dann konzentriert sich die Schallenergie auf das schwächere, leichtere Element.

Elastische Stöße erhält man, indem zwischen zwei Strukturen federnde Materialien gegeben werden. Es ist aber zu beachten, dass ein Stoß als nicht elastisch betrachtet werden kann, wenn:

- das elastische Material übermäßig vom Gewicht der Struktur belastet wird;
- ein Verputz oder andere starre Verbindungen kein ausreichend freies Schwingen der Struktur ermöglichen.

Somit können als elastische Verbindungen nur massive Elemente betrachtet werden, die mit leichten Strukturen, mit Trockenbau oder mit Systemen, die zur Gänze in Trockenbauweise hergestellt wurden (Gipskarton), verbunden sind.



Strategien für eine gute Schalldämmung

Wenn ein konstruktives Element einen Senderraum von einem Empfangsraum trennt, dann hören wir das Geräusch des Senderraumes umso leiser, je besser die Schall dämmende Wirkung des trennenden Elements ist. Beim Luftschall wird die Schalldämmung als Schalldämm-Maß R oder für die Fassade als Standard-Schallpegeldifferenz D angegeben. Je höher R oder D sind, desto besser. Für den Trittschall wird (derzeit noch) nicht die Schalldämmung angegeben, sondern der Schallpegel: je leiser das Geräusch, das im Empfangsraum eintrifft, je niedriger also der bewertete Norm-Trittschallpegel L_{nw} , desto besser ist es.

In beiden Fällen geht es de facto um die Schall dämmende Wirkung. Um diese zu verbessern, gibt es mehrere Strategien.

Wenn die Masse des trennenden Elements erhöht wird, braucht es mehr Energie, um es in Schwingung zu versetzen.

Wenn zwischen zwei Massen ein weiches elastisches Element gegeben wird, eine „Feder“, dann wird die Schallübertragung in diesem mehrschichtigen Element abgetrennt. Das ist dann das bekannte „Masse-Feder-Masse“-Prinzip. Wenn allerdings mehr oder weniger kleine starre Verbindungen zwischen beiden Massen bestehen bleiben, z.B. Schrauben, dann wird die Wirkung der Feder stark beeinträchtigt oder gar aufgehoben. Dann spricht man von „Schallbrücken“. Wenn die Masse des trennenden mehrschichtigen Elements erhöht wird, braucht es auch hier mehr Energie, um es in Schwingung zu versetzen.

Systeme der Schalldämmung: einschichtiges Element mit weniger (Bild A) oder mehr (Bild B) Masse; mehrschichtiges Element „Masse-Feder-Masse“ (Bild C) und mehrschichtiges Element mit Schallbrücke (Bild D)

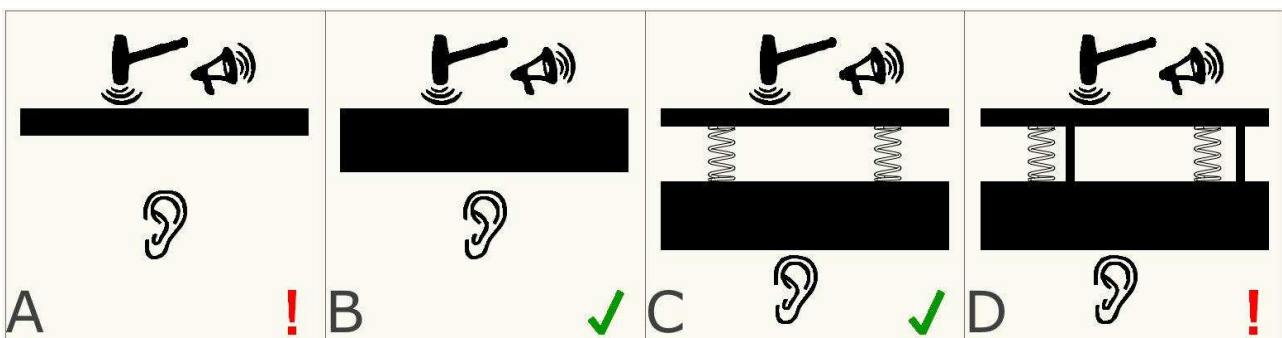


Fig. 12: Systeme der Schalldämmung, gute und weniger gute. Quelle: TBZ GmbH

Beide Systeme der Schalldämmung funktionieren sowohl im Massivbau als auch im Leichtbau. Es scheinen banale Konzepte zu sein, aber sie verdienen die volle Beachtung auch bei der Ausführung auf der Baustelle und oft gibt es statische oder konstruktive Hinderungsgründe, sodass diese Konzepte nicht zu 100% verwirklicht werden können. Schallbrücken beeinflussen dann das Endergebnis wesentlich.



Akustische Qualität der angrenzenden Räume: die Kontrolle des Nachhalls

Die Nachhallzeit wird für den akustischen Komfort oft nicht ausreichend berücksichtigt, und es werden Materialien eingesetzt, die den Schall nicht ausreichend absorbieren. Es gibt zwei gute Gründe:

1. In einem halligen Raum wird jedes Geräusch gewaltig verstärkt, unabhängig davon, ob es von außen oder vom Inneren des Gebäudes stammt, weil es von allen Oberflächen reflektiert wird. Dies kann in komplett leeren Wohnungen erlebt werden. Sobald die Wohnung eingerichtet ist, wird der Nachhall stark reduziert.
2. In einem halligen Raum werden auch die selber erzeugten Geräusche als unangenehm und übertrieben stark erlebt. Wenn sich viele Personen gleichzeitig in einem großen halligen Raum aufhalten, werden die Gespräche sehr mühsam und der Aufenthalt unangenehm.

In kleineren Räumlichkeiten, wie sie in den meisten Wohnungen vorkommen, ist der Nachhall begrenzt, weil die vielen Einrichtungsgegenstände die Schall-Reflexion behindern und den Schall absorbieren. In großen Räumlichkeiten mit harten und glatten Oberflächen wird der Nachhall zum Problem. Ein klassisches Beispiel sind die Stiegehäuser. Darin entstandener Lärm verbreitet sich über alle Geschosse, und da die meisten Wohnungseingangstüren schlecht Schall dämmen, ist der Lärm dann auch in allen Wohnungen zu hören.

Als Gegenmaßnahme können Schall absorbierende Decken eingebaut werden. Zur Bestands-Sanierung können optisch ansprechende und zugleich schallschluckende Gegenstände an den Wänden und Decken angebracht werden.

Es folgt ein Hörbeispiel von Kindern in einer Mensa mit kleinem, mittlerem und großem Nachhall:

Umgebung	Kleiner Nachhall (T_{60} Mittel 0.5 Sekunden)	Mittlerer Nachhall (T_{60} Mittel 1 Sekunde)	Starker Nachhall (T_{60} Mittel > 4 Sekunden)
Schulmensa	+	+	+

Tabelle 9: Beispiel des Höreindrucks von verschiedenem Nachhall. Quelle: TBZ GmbH



Luftschall

Das Schalldämm-Maß und das Bau-Schalldämm-Maß

Wie im vorigen Kapitel erläutert, gibt das **Schalldämm-Maß** an, wie groß die akustische Dämm-Leistung eines konstruktiven Elements ist, welches zwei Räume trennt.

Dieser Wert wird im Labor nach den Richtlinien der Norm UNI EN ISO 140-3 gemessen. Das zu messende Element wird zwischen zwei Räume eingebaut, wobei durch elastische Verbindungen alle Schallbrücken ausgeschaltet werden. Das Element wird also in seiner Reinheit gemessen. In beiden Räumen werden die Schallpegel in allen Frequenzen gemessen und im Empfangsraum wird die Nachhallzeit bestimmt.

Das Schalldämm-Maß wird dann mit folgender Formel berechnet:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad [\text{dB}]$$

Dabei ist S die Fläche des konstruktiven Elements und A die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes.

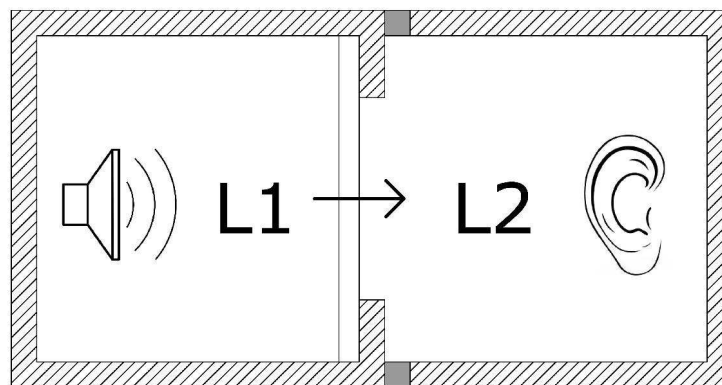


Fig. 13: Labormessung Schalldämm-Maß. Quelle: TBZ GmbH

Am Bau hingegen können Schallbrücken nicht wie im Labor vermieden werden. Die Flankenübertragungen reduzieren das Schalldämm-Maß.

Der Wert der Luft-Schalldämmung, gemessen unter realen Bedingungen, wird als **Bau-Schalldämm-Maß** bezeichnet.

Die Messung und Berechnung erfolgt analog zum Schalldämm-Maß:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad [\text{dB}]$$

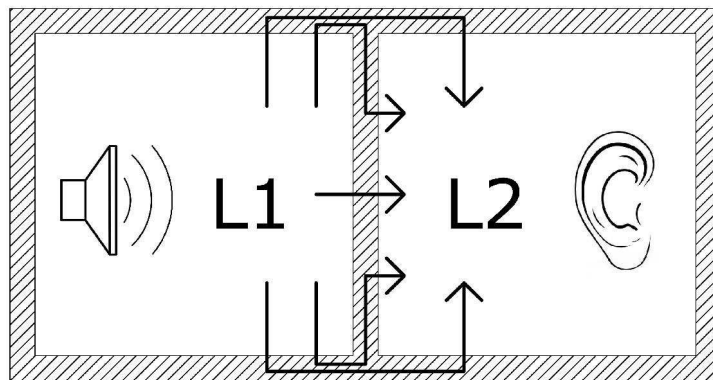


Fig. 14: Messung Bau-Schalldämm-Maß. Quelle: TBZ GmbH

Es ist klar, dass hier auch Schall über die Flanken übertragen wird, sodass der Schallpegel im Empfangsraum L_2 höher als im Labor mit den elastischen Stößen sein wird, und somit ist das Bau-Schalldämm-Maß auch geringer.

Am Bau sind keine Laborwerte erreichbar.

Standard-Schallpegeldifferenz Luftschall

Die Bestimmung der **Schallpegeldifferenz** D eines Elements erfolgt ähnlich wie beim Schalldämm-Maß nach folgender Formel:

$$D = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}]$$

wobei L_1 der Schallpegel des Senderraumes ist und L_2 jener des Empfangsraumes.

Für die Bewertung wird noch die Nachhallzeit berücksichtigt, somit ist die **Norm-Schallpegeldifferenz** D_n oder die **Standard-Schallpegeldifferenz bezogen auf die Bezugs-Nachhallzeit** D_{nT} : $D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$

wobei A die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes ist und A_0 die äquivalente Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m^2 .

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei T die Nachhallzeit des Empfangsraumes ist und T_0 die Bezugs-Nachhallzeit, bei normalen Wohnräumen $0,5 \text{ s}$.

Der Unterschied zum Schalldämm-Maß R besteht darin, dass hier die Fläche des trennenden Elements S nicht berücksichtigt ist, weil dies für gewisse Fälle nicht möglich oder sinnvoll ist.

Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes

Die Messung des Bau-Schalldämm-Maßes $R'w$ erfolgt laut den Richtlinien der UNI EN ISO 140 Teil 4 und 14 (besondere Situationen für die Messungen).

Im Senderraum wird ein akustisches Signal erzeugt (rosa oder weißes Rauschen), mit einer Schallquelle, die ein gleichmäßiges Schallfeld bewirkt, z.B. mittels Dodekaeder. Es werden die Schallpegel L_1 im Senderraum und L_2 im Empfangsraum gemessen. Im Senderraum sind mindestens zwei Positionen der Schallquelle vorgesehen. Im Empfangsraum sollen an mindestens 5 Punkten mit diffusem Schallfeld gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass:

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.

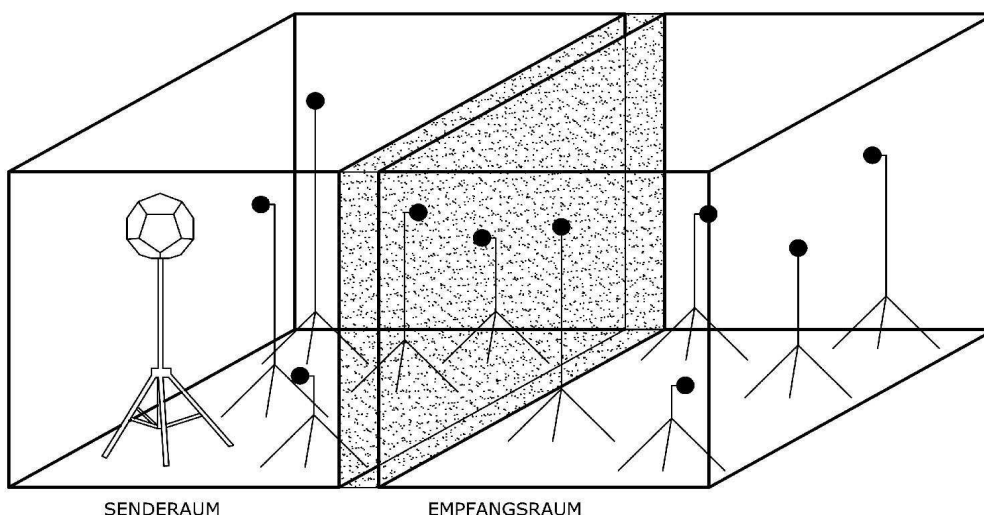


Fig. 15: Schema zur Messung von $R'w$. Fonte: TBZ GmbH

Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen.

Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf den zu messenden Pegel nicht überdecken, und muss deshalb in allen Frequenzbereichen 6-10dB niedriger sein als der Schallpegel L_2 .

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe), oder auch mit einem Geräusch, bei dem die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep), im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert.

Die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w und Bau-Schalldämm-Maßes R'_w

Zur schnelleren und bequemerem Vergleichbarkeit wird ein Einzahl-Wert berechnet, das bewertete Schalldämm-Maß R_w für die Labormessungen und das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w für die Messungen am Bau.

Die Berechnung ist in der Norm UNI EN ISO 717-1 beschrieben und wird als Methode des Vergleichens bezeichnet. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe.

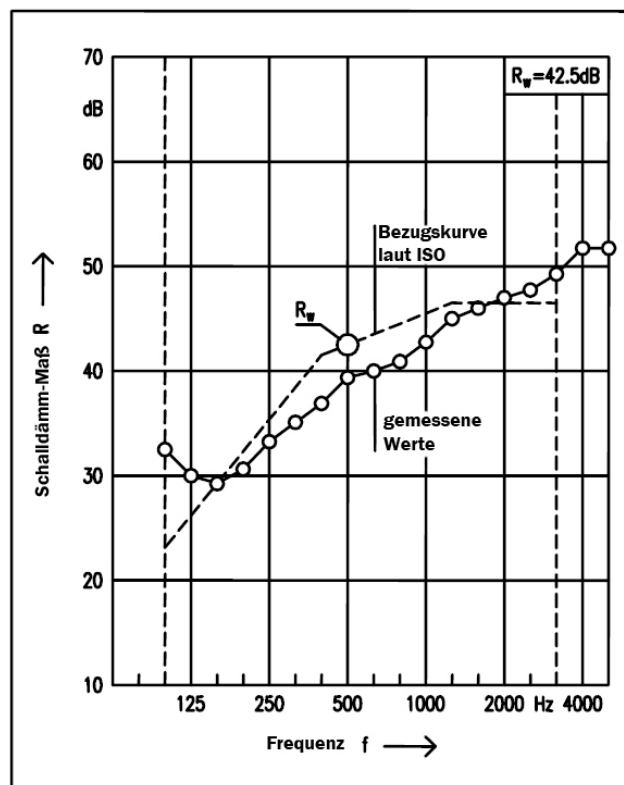


Fig. 16: Bestimmung der Einzahl-Angabe. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Es ist trotzdem sinnvoll, nicht nur den Einzahl-Wert zu betrachten, sondern den gesamten Frequenzverlauf. Deshalb wird dieser in den Datenblättern auch dargestellt.

Um die Mängel der Einzahl-Werte ein wenig auszugleichen und das Ergebnis je nach Schallquelle besser dem Höreindruck anzupassen, wurde der Spektrum-Anpassungswert C und C_{tr} für den Luftschall eingeführt.

Beim Luftschall betrifft der Spektrum-Anpassungswert C dem typischen „Wohnlärm“ wie Sprechen, normal laute Musik aus Stereoanlagen oder TV, der Spektrum-Anpassungswert C_{tr} den Verkehrslärm.

Mechanismen der Ausbreitung des Luftschalls

Je nach Art des trennenden Elements beobachten wir verschiedene Phänomene.

Einschalige Wände/Bauteile

Im folgenden Bild betrachten wir die Abhängigkeit der Schalldämmung vom Frequenzverlauf.

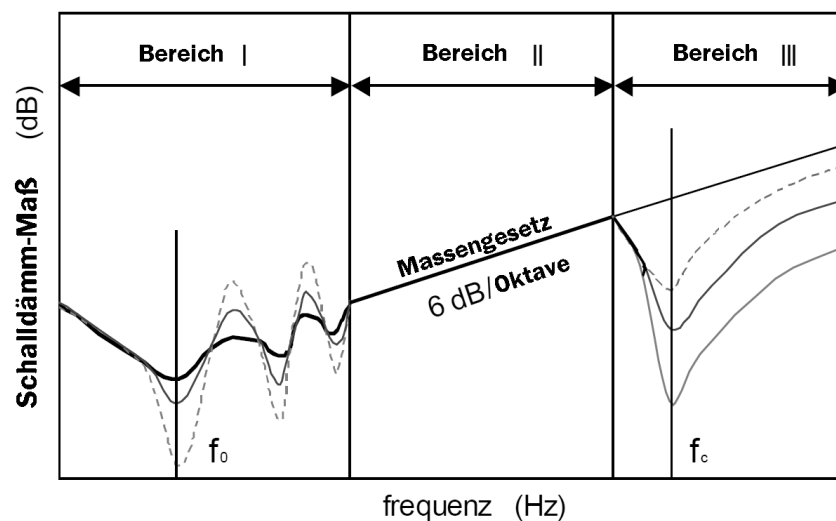


Fig. 17: Verlauf der Schalldämmung für einschalige Wände. Quelle: Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Im Bereich I ist die Resonanz-Frequenz des Bauteils zu beobachten, bei der die Frequenz der eintreffenden Schallwelle gleich hoch ist wie die Eigenfrequenz des Bauteils. Deshalb geht das Bauteil in besonders starke Schwingung, was die Schalldämmung wesentlich reduziert. Normalerweise ist dieser Effekt bei sehr tiefen Frequenzen unter 50 – 100 Hz zu beobachten. Dieses Phänomen kann beim Fensterglas gut beobachtet werden: es klirrt, wenn ein Auto in der Nähe vorbeifährt.

Im Bereich II wirkt das **Masse-Gesetz**: je höher die Frequenz ist, desto höher ist die Schalldämmung, es gibt eine lineare Beziehung. Die tiefen Töne sind also schwerer abzuschirmen als hohe.

Im Bereich III gibt es wieder eine Frequenz, bei der das Element stark mitschwingt und dabei die Schalldämmung wesentlich reduziert. Die tiefste dieser Frequenzen wird als Koinzidenz-Frequenz (f_c) bezeichnet.

Für die einschaligen Bauteile nimmt die Schalldämmung zwar mit zunehmender Masse zu, dabei sinkt aber auch die Koinzidenz-Frequenz bis in die Bereiche von 100 bis 500 Hz, welche für den Höreindruck am wichtigsten sind.

Wenn die Bauteilstärke zu hoch wird, treten auch Resonanzeffekte durch die Longitudinalwellen und Transversalwellen auf, die sich im Inneren des Bauteils bilden. Dadurch kann die Schalldämmung bei den hohen Frequenzen stark abnehmen. Dieses Phänomen tritt bei Stärken über 15-20cm auf und betrifft Frequenzen über 5000 Hz.

Zweischalige Wände

Im Unterschied zu den einschaligen Bauteilen, wo die Schalldämmung durch hohe Massen erreicht wird, wird bei den mehrschaligen Bauteilen die Schalldämmung durch Schalldämpfung erreicht.

Bei zweischaligen Wänden wird der Zwischenraum mit einem Faser-Dämmstoff gefüllt, welcher den Schall absorbiert und dadurch Reflexion verhindert. Durch dieses Prinzip kann die Schalldämmung erhöht werden, ohne das Gewicht des Bauteils zu erhöhen.

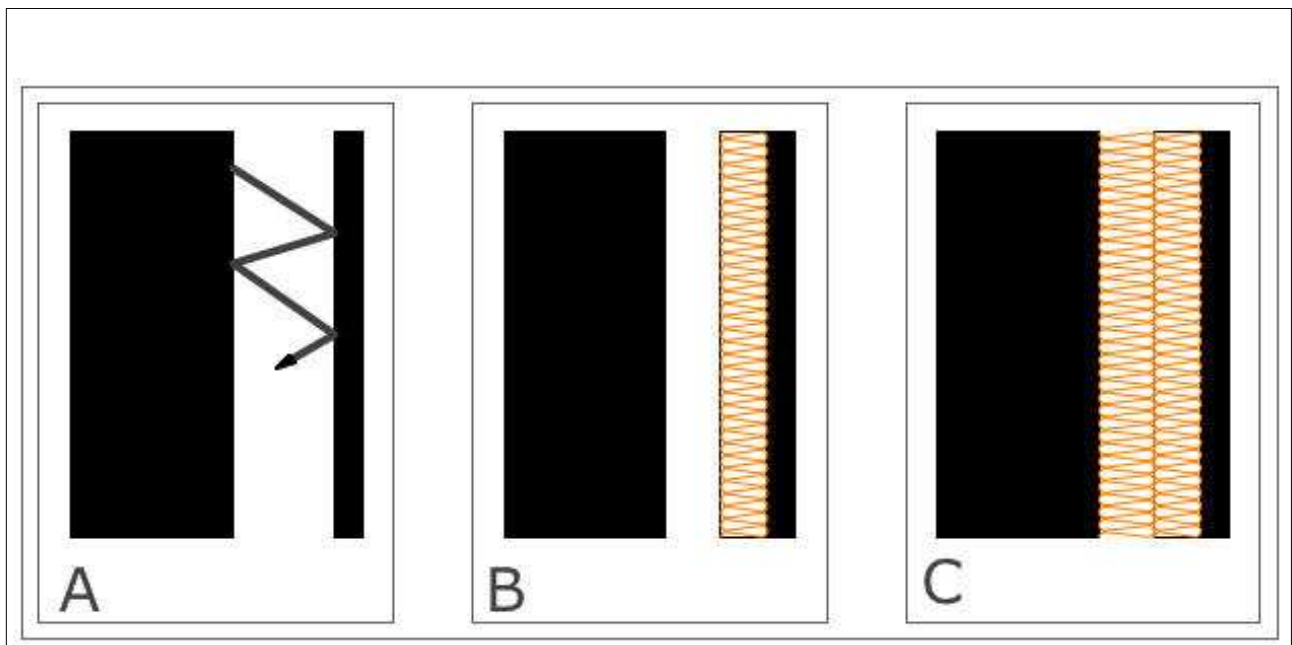


Fig. 18 Die Hohlraumdämmung im mehrschichtigen Aufbau. Quelle: TBZ GmbH

Ein Hohlraum funktioniert wie der Klangkörper einer Gitarre: die Schallwellen werden reflektiert und dadurch verstärkt (Bild A). Wenn der selbe Hohlraum zumindest auf einer Seite mit absorbierendem Material bekleidet wird, wird eine Reflexion wesentlich reduziert (Bild B). Wenn der Hohlraum zur Gänze mit absorbierendem Material gefüllt wird, wird die Schalldämmung weiter, aber nur leicht verbessert (Bild C).

Dieses System funktioniert nach dem „**Masse-Feder-Masse**“-Prinzip. Sollten zu viele Schallbrücken vorhanden sein, reduziert sich die Wirkung auf die Masse des einschaligen Bauteils.



Auch bei den mehrschaligen Bauteilen gibt es Einbrüche der Schalldämmung bei gewissen Frequenzen. Der erste taucht bei der Resonanz-Frequenz des gesamten Aufbaus auf. Andere Einbrüche sind durch die Koinzidenz-Frequenz der einzelnen Schichten bestimmt. Ein letzter Einbruch entsteht durch die Resonanz-Frequenz des Hohlraumes, wo sich stehende Schallwellen ausbilden.

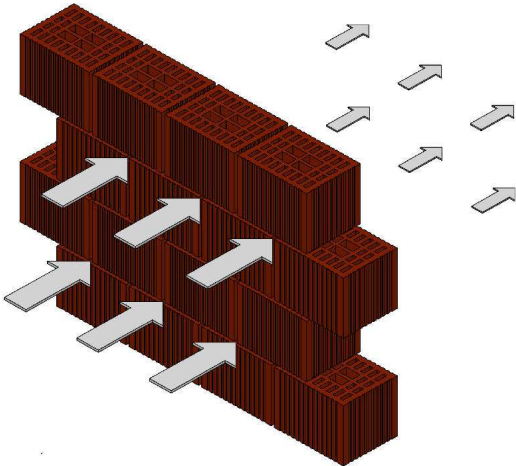
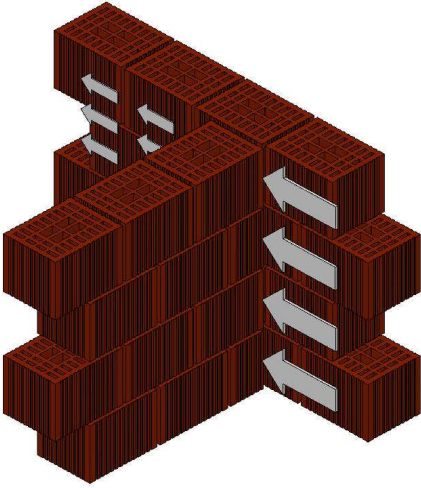
Durch Veränderung des Abstandes der beiden Schalen kann der Einbruch bei der Resonanz-Frequenz ausgeglichen werden, sodass diese unterhalb des störenden Frequenzbereichs bleibt.

Die Koinzidenz-Frequenz der einzelnen Schichten kann durch die Wahl verschiedener Materialien mit verschiedenem Flächengewicht und verschiedener Steife beeinflusst werden, sodass die Schwächen der einen Schicht von den Stärken der anderen aufgefangen werden.

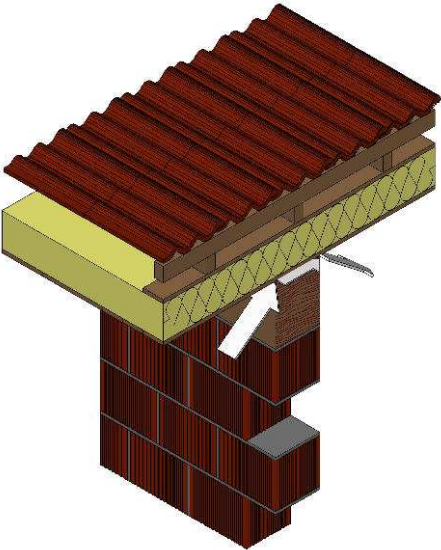
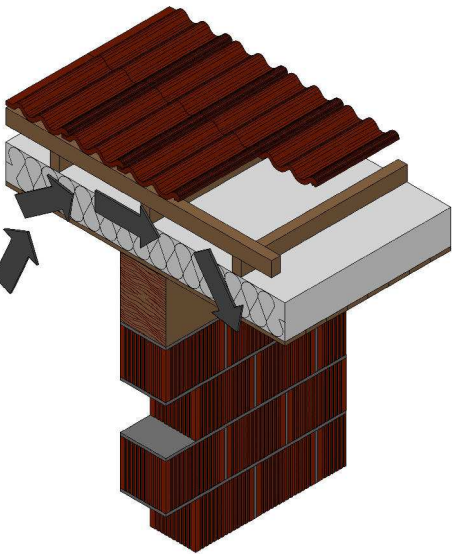
Dem letzten Einbruch wird durch das Einbringen von faserigem absorbierendem Material begegnet und indem Schallbrücken vermieden bzw. reduziert werden.

Wesentliche Fehler in der Ausführung

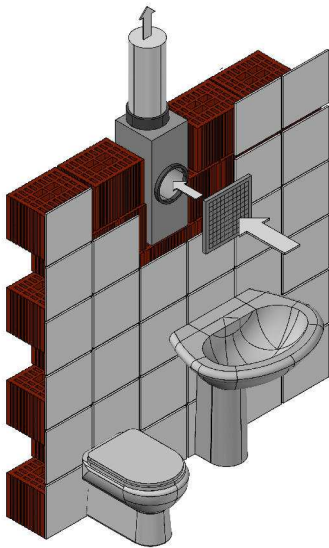
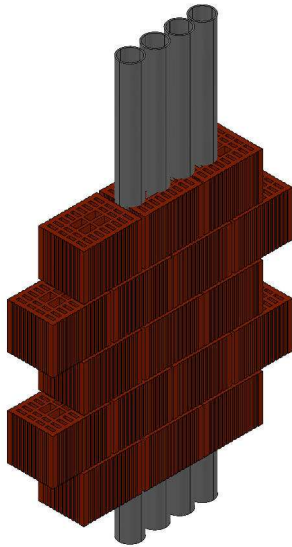
Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler (ohne Anspruch auf Vollständigkeit), bei vertikalen und horizontalen trennenden Elementen:

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Die Stoßfugen der Ziegel sind nicht vollständig vom Verputz überdeckt, sodass teilweise das Licht durchscheint. Es gibt viele kleine Stellen, wo Luft durchströmt.	3-6 dB	1. Mehr Sorgfalt bei der Ausführung der Stoß- und Lagerfugen. 2. Zusätzlicher Verputz. 3. Vorsatzschale aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		
Fugen bei den Anschlussstellen zwischen der Trennwand und den seitlichen Wänden bzw. anderen Elementen wie dem Kamin.	1-3 dB	1. Mehr Sorgfalt bei der Ausführung der Stoß- und Lagerfugen. 2. Zusätzlicher Verputz mit Einlage eines Netzes. 3. Vorsatzschale aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Schalldurchgang über das Dach, durchgehende Schalung.	1-10 dB	1. Schalung von oben durchtrennen. Andere Möglichkeiten der akustischen Trennung zusätzlich betrachten. 2. Abgehängte Decke aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		
Schalldurchgang über das Dach, Wärmedämmung aus zu leichter und starrer Wärmedämmung wie EPS.	3-6 dB	1. Trennung der Schalung und der Sparren. Austausch der Wärmedämmung bzw. Zusatz von faserhaltiger Wärmedämmung. 2. Abgehängte Decke aus Gipskarton und Schalldämmung mit Faserdämmstoff.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Schalldurchgang aus Lüftungsleitungen aus Bad und Küche.	1-9 dB	1. Verwendung von mehrschichtigen Rohrleitungen. Diese mit elastischem Dämmstoff ummanteln und anschließend Mörtel dazwischen gießen, um eine Masse-Feder-Masse-System zu erzeugen. 2. Den starren Kontakt zwischen mehreren Leitungen vermeiden. 3. Schalldämpfer beim Auslass einbauen.
		
Schwächung der Struktur durch Leitungen, indem die Struktur als Installationsebene missbraucht wird.	1-9 dB	1. Vorsatzschale/Vorsatzwand für die Leitungen verwenden. 2. Für den Spülkasten eine Vormauerung bis 1m Höhe vorsehen.
		



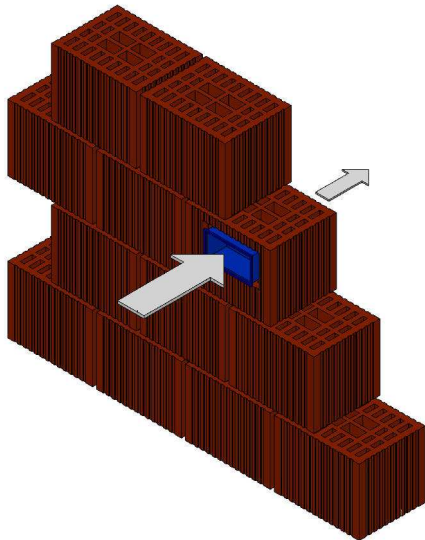
kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Elektrodosen	1-3 dB	1. Gegenüberliegende Elektrodosen vermeiden. 2. Die Rückseite der Elektrodose mit Faserdämmstoff ausstopfen. 3. Durchgehende Leerrohre vermeiden, bzw. diese luftdicht absperren und mit Faserdämmstoff schließen.
		

Tabelle 10: R'_w – die wichtigsten Ursachen für die Schwächung. Quelle: TBZ GmbH

Schalldämmung der Fassade

Die Messung der Standard-Schallpegeldifferenz $D_{n,T}$ der Fassaden-Elemente wird in der Norm UNI EN ISO 140-5 beschrieben. Die Schallquelle kann ein Lautsprecher oder auch der Verkehrslärm selbst sein. Berechnet wird der Wert dann mit folgender Gleichung:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log (T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei $L_{1,2m}$ als Schallpegel des „Senderraumes“ 2 m vor der Fassade gemessen wird; L_2 ist der Schallpegel im Empfangsraum; T ist die Nachhallzeit im Empfangsraum und T_0 ist die Bezugs-Nachhallzeit, mit 0,5 s.

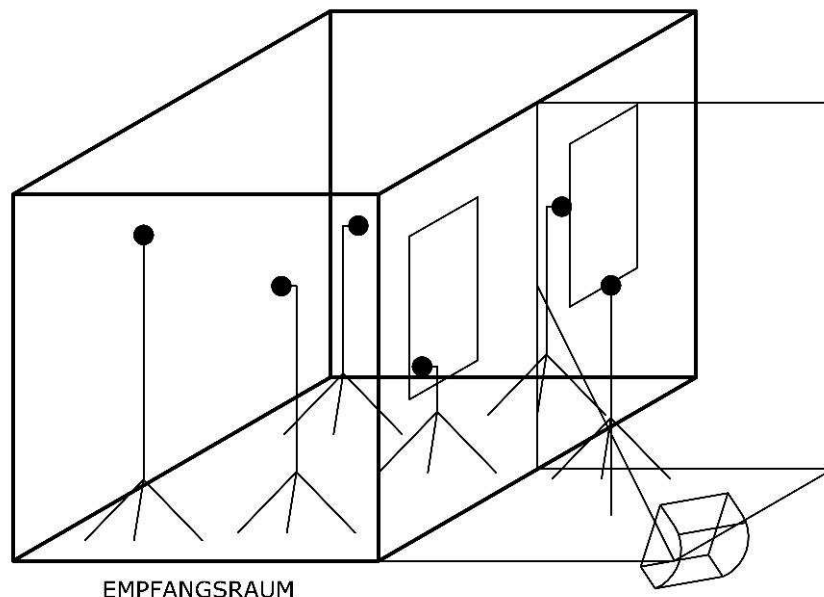


Fig. 19: Schema für die Messung der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$. Quelle: TBZ GmbH

Wenn ein Lautsprecher verwendet wird, so wird dieser in einem Mindest-Abstand von 5m mit 45° zur Fassade aufgestellt. In diesem Winkel ist die Fassade am schwächsten für den Schalldurchgang. Das Mikrofon für die Messung des Schallpegels außen wird 2 m vom Zentrum der Fassade bei einer Höhe von 1,5 m über dem Fußboden aufgestellt.

Im Empfangsraum soll an mindestens 5 Punkten mit diffusem Schallfeld gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.



Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen.

Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf den zu messenden Pegel nicht überdecken, und muss deshalb in allen Frequenzbereichen 6-10 dB niedriger sein als der Schallpegel L_2 .

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, oder einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe), oder auch mit einem Geräusch, wo die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep) im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert. Dies ist wichtig, weil der Schall in einem Raum sehr stark von den akustischen Eigenschaften des Raumes abhängt. So hört man den Schall in einem leeren Raum (mehr Reflexionen) viel länger als in einem vollständig eingerichteten Raum. Durch diese Mehrfachreflexionen wird der Schallpegel im leeren Raum bedeutend höher als im eingerichteten Raum, wo der Schall von den Oberflächen absorbiert wird. Damit dadurch aber nicht die Bestimmung des Luftschalldämmmaßes beeinflusst wird, werden die Ergebnisse der Messungen auf eine Standartnachhallzeit bezogen. Diese beträgt bei Wohnbauten 0,5 s.

Die Bestimmung der Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade $D_{2m,nT,w}$

Die Methode um die Einzahl-Angabe der Norm-Schallpegeldifferenz einer Fassade $D_{2m,nT,w}$ zu bestimmen, ist die gleiche wie jene, welche in der Norm UNI EN ISO 717-1 für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes und des Bau-Schalldämm-Maßes beschrieben wird. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe. Auch in diesem Fall kann zur Einzahl-Angabe der Spektrum-Anpassungswert C bzw. C_{tr} addiert werden, um das Ergebnis dem menschlichen Hörempfinden in Bezug auf die Art der Lärmquelle anzupassen.



Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen.

Wenn die Fassade außer dem Mauerwerk noch Fenster, Türen, Lüftungsöffnungen oder Rollläden enthält, dann geht ein Teil der Schallenergie auch durch diese Elemente, welche meist schwächer als das Mauerwerk selbst sind. Für das Gesamt-Ergebnis wird das energetische Mittel über alle beteiligten Elemente gebildet:

$$R'_w = -10 \log \left(\sum \frac{S_n}{S_{\text{Gesamt}}} \cdot 10^{\frac{R_n}{10}} + \sum \frac{S_{n(\text{kleine Elemente})}}{S_{\text{Gesamt}}} \cdot 10^{\frac{-D_{\text{kleine Elemente}}}{10}} \right) \quad [dB]$$

[dB]

$$D_{2m,nT,w} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{0,163 \cdot V}{T_0 \cdot S} \right)$$

S_n sind die Flächen der

verschiedenen Komponenten (Wand, Fenster, Türen);

R_n sind das Schall-Dämm-Maß der verschiedenen Komponenten;

$S_{n \text{ kleine Elemente}}$ sind die Flächen der kleinen technischen Komponenten wie Rollläden, Lüftungsöffnungen, usw.;

$D_{\text{kleine Elemente}}$ sind das Schalldämm-Maß der technischen Komponenten;

ΔL_{fs} Korrekturfaktor für die Form der Fassade.

Die Fenster sind ohne Zweifel das Element, das am meisten das Gesamtergebnis bestimmt, beeinflusst vom Schalldämm-Maß des Fensters und der Fläche.

Je mehr Fensterglas in der Fassade vorhanden ist, desto mehr nähert sich das Gesamtergebnis dem Schalldämm-Maß der schwächeren Komponente, des Fensterglases an.

Ein Beispiel: Außenwand mit $R'_w=50$ dB, Fenster mit $R'_w=38$ dB, Anteil der Verglasung zwischen 5% und 98% (Eckzimmer mit den Maßen 3,38 m x 3,65 m und Netto-Höhe 2,61 m). Aus der Grafik ist ersichtlich, wie das Gesamtergebnis von $D_{nT,w}=48$ dB bzw. $R'_w=50$ dB (Wand beinahe ohne Fenster) bis zu $D_{2m,nT,w}=36$ dB bzw. $R'_w=38$ dB für die vollständig verglaste Fassade absinkt.

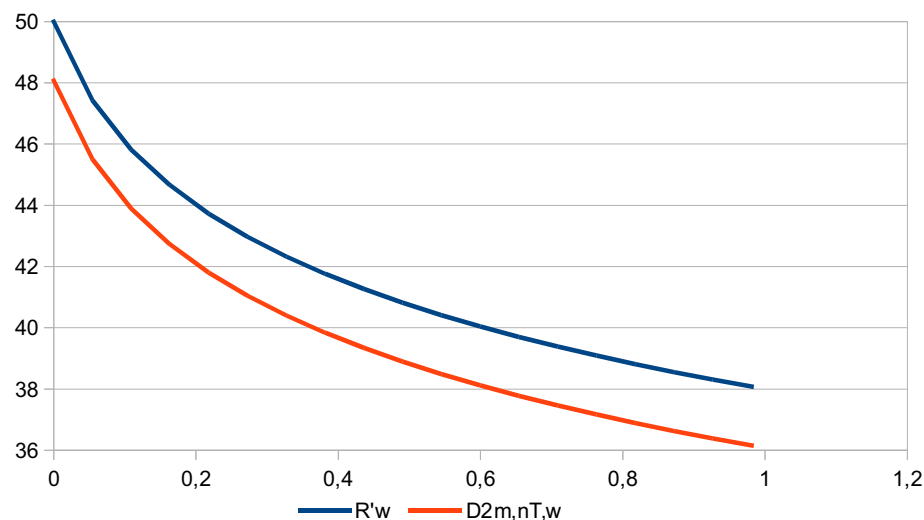


Fig. 20: Verlauf des Bau-Schalldämm-Maßes R'_w und der Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$ abhängig vom Anteil der Verglasung. Quelle: TBZ GmbH

Der numerische Unterschied zwischen R'_w und $D_{2m,nT,w}$ hängt von der Geometrie des Empfangsraumes ab, die Kurven verlaufen parallel. Zur Erinnerung: Die Standard-Schallpegeldifferenz $D_{2m,nT,w}$ unterscheidet sich vom Bau-Schalldämm-Maß R'_w darin, dass hier die Fläche des trennenden Elements S nicht berücksichtigt ist, weil dies für Fälle wie diesen nicht möglich oder sinnvoll ist. Für die Bewohner hinter einer Fassade ist es unerheblich, wie groß die Schalldämmung pro m^2 ist, wesentlich ist die gesamte Schalldämmung. Auf der anderen Seite bedeutet das für Planer und Ausführende, dass sie Räume mit größerer Fassadenfläche mit größerer Aufmerksamkeit behandeln müssen. Das betrifft besonders Eckzimmer.

Es gibt jedenfalls ausreichend Produkte am Markt, um sowohl eine gute Schalldämmung als auch eine gute Wärmedämmung verwirklichen zu können.

Von den Fensterherstellern sind bisher meist vorwiegend Laborwerte weiter gegeben worden, die am Bau gemessenen Werte hängen stark von der Ausführung und dem Einbau der Fenster ab, oft werden die Mindestwerte der italienischen Norm unterschritten.

Ein Schwachpunkt der Montage der Fenster liegt am Blindrahmen. Oft werden Fugen zwischen Mauerwerk und Blindrahmen von 3-5cm mit Polyurethanschaum verschlossen, der akustisch schlechte Eigenschaften hat. Als Masse bleibt an diesen Stellen nur mehr der Innenputz übrig und das reicht nicht aus. Die Überdeckung mit einem Vollwärmeschutz aus EPS ist akustisch irrelevant.

Ein Beispiel: für eine Fassade mit den Maßen $4 \times 2,7 \text{ m}$ ($10,8 \text{ m}^2$) mit einer Fenstertür $2,2 \times 1,0 \text{ m}$ ($2,2 \text{ m}^2$) und rundherum an 3 Seiten eine Fuge von 3 cm kann das folgende Bau-Schalldämm-Maß geschätzt werden:



Element	Fläche m ²	% Fläche	R'_w [dB]	% Einfluss auf das Gesamt-Ergebnis
Mauerwerk	8,4	77,9	50	4,1%
Fenstertür	2,2	20,5	36	17,2%
verschlossene Fugen	0,16	1,6	20	78,7%
Gesamt-Ergebnis			37,2 dB	
erwartetes Ergebnis ohne Fugen			43,9 dB	
Verlust			- 6,7 dB	

Tabelle 11: Beispiel des Einflusses von kleinen Schallbrücken auf die Fassade. Quelle: TBZ GmbH

Dieses Beispiel zeigt den großen Einfluss der Ausführung auf das Gesamt-Ergebnis. Es ist sicher billiger, auf eine gute Ausführung zu achten, als mit teureren Fenstern oder Dämmsystemen eine schlechte Bauausführung auszugleichen.

Ein weiterer Schwachpunkt sind Lüftungsöffnungen. Wenn die Luft durchströmt, kommt auch der Schall durch. Abhilfe können Schalldämpfer schaffen.

Die Dämpfung des Schalls durch Absorption: der Schalldämpfer

Wenn eine Schallwelle auf eine absorbierende Oberfläche trifft, wird die mechanische Energie des Schalls in Wärme umgewandelt, und das Geräusch wird damit „absorbiert“. Die Schalldämpfer funktionieren nach diesem Prinzip. Die Luft wird in einem Rohr an schallschluckenden Oberflächen wie Holzwolle, Holzweichfaser, Mineralwolle, Schafwolle, oder elastischen Schaumstoffen, vorbeigeführt.

Natürlich funktioniert die Schalldämpfung nur, wenn das schallschluckende Material in direktem Kontakt mit der vorbei streifenden Luft ist. Deshalb sollen nur gesundheitlich unbedenkliche Materialien für die Absorption verwendet werden.



Fig. 21: Flexibler Schalldämpfer. Quelle: TBZ GmbH

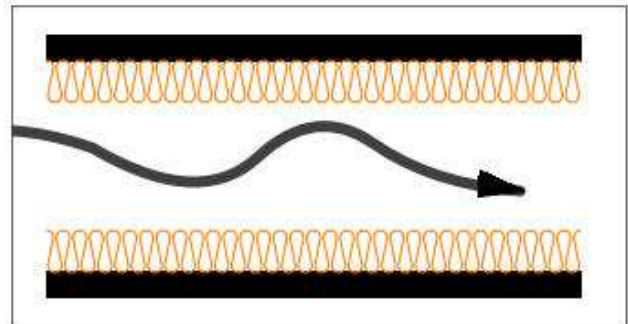


Fig. 22: Funktionsprinzip des Schalldämpfers . Quelle: TBZ GmbH

Ein Forschungsprojekt über Schalldämmung von Holzdächern hat spannende Erkenntnisse über Lecks bei schallschluckenden Wärmedämmstoffen aus Holzweichfaser gebracht: das Dach wurde mit Löchern von 20-100mm Durchmesser durchbohrt, ohne dass die Schalldämmung des Daches wesentlich abgenommen hat. Kaum wurde aber ein Plastik-Rohr, welches den Schall reflektiert, in das Loch durch die Holzweichfaser geführt, konnte der „Schalldämpfer“ nicht mehr wirken, und die Schalldämmung wurde schlagartig reduziert. Dieses Experiment zeigt die Vorzüge von schweren Faserdämmstoffen im Vergleich zu leichten Schaumdämmstoffen.

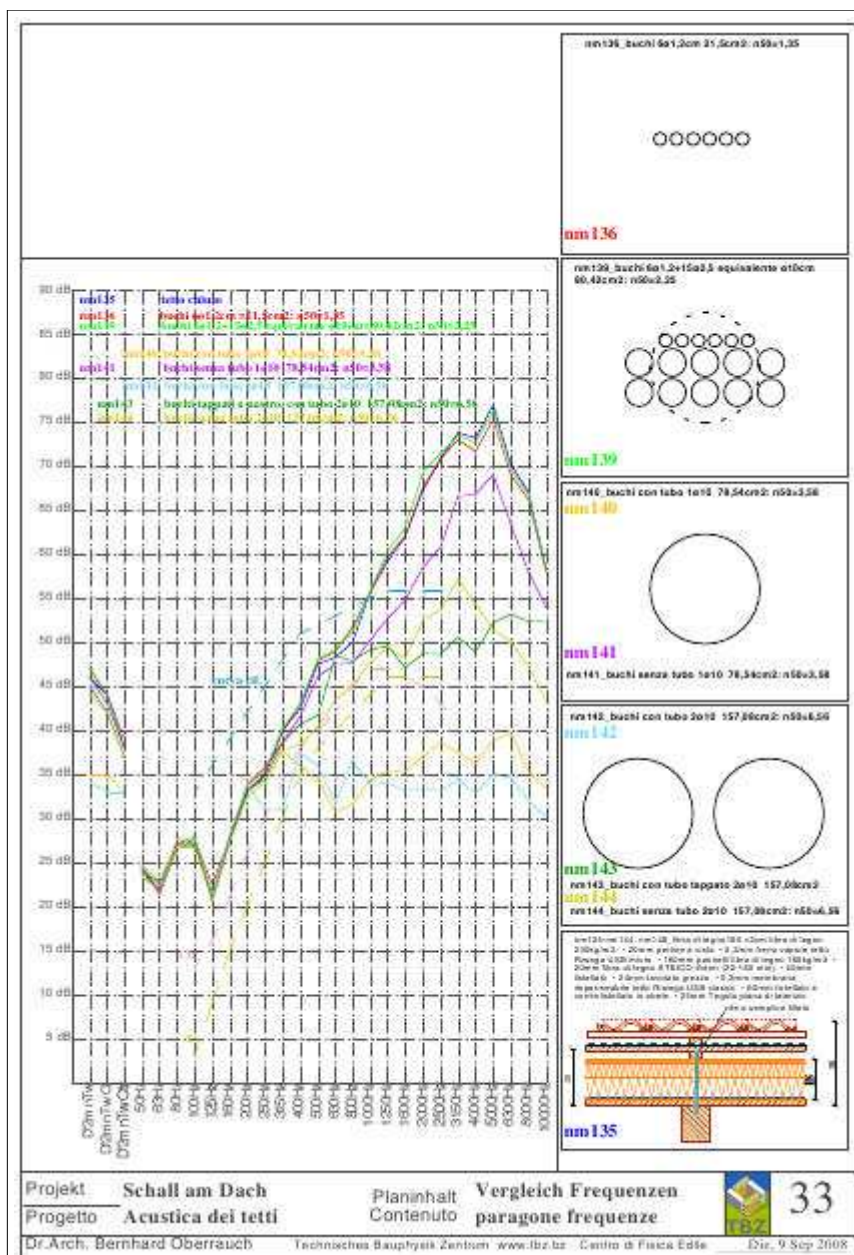
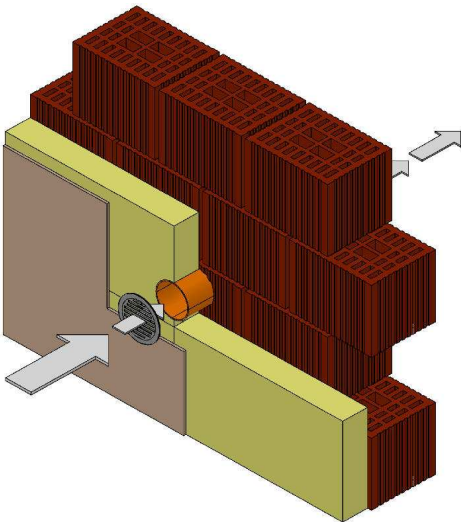
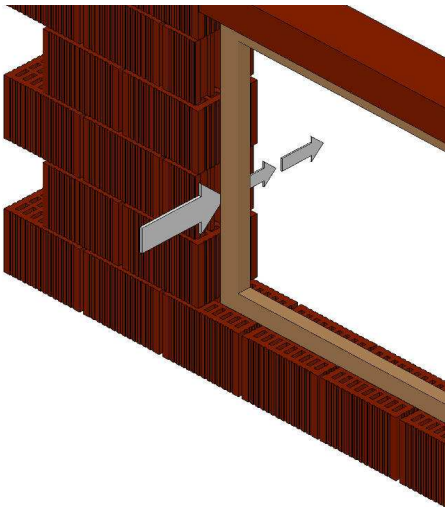


Fig. 23: Experiment beim Forschungsprojekt "Schall am Dach". Quelle: TBZ GmbH



Wesentliche Fehler bei der Ausführung

Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler von Fassaden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Lüftungsöffnungen ohne Schalldämpfer	5-15 dB	1.Schallschluckendes Material einführen. 2.Schalldämpfer montieren.
		
Montage der Fenster mit zu großem Abstand zwischen Blindrahmen und Mauerwerk	3-9 dB	1.Die großen Fugen mit Mörtel statt mit Montage-Schaum schließen. 2.Die kleinen Fugen mit Faserdämmstoff schließen. 3.Den Fensterrahmen mit Stein oder anderem schwerem Material überdecken.
		



kritischer Punkt	Verlust	Lösung
Ungenügender Druck auf die Fensterdichtungen	1-3 dB	1. Einstellung des Drucks auf die Fensterdichtungen. 2. Regelmäßige Kontrolle/ Austausch der Fensterdichtungen.
Nicht isolierter Rollokasten	3-6 dB	1. Einbau eines massiven Überlegers hinter den Rollokasten. 2. Einbau von schallschluckender Isolierung in den Rollokasten.

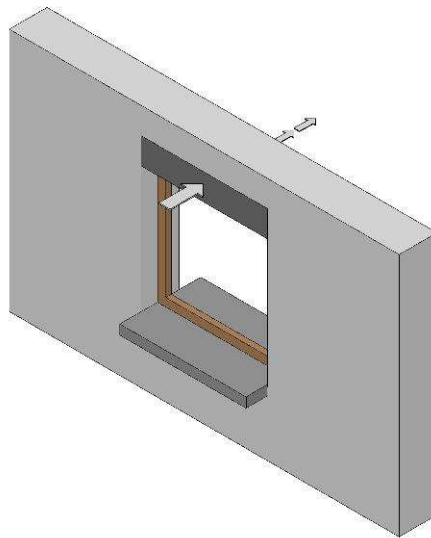


Tabelle 12: $D_{2m,nt,w}$ – wesentliche Schwachstellen der Fassade. Quelle: TBZ GmbH



Zusammenfassung Fassade

Die folgenden Punkte fassen allgemein die Erfahrungen aus den Messungen zusammen:

1. Das Prinzip Masse-Feder-Masse funktioniert auch bei leichten Dächern.
2. Schwere Bauteile braucht es vor allem, um die tiefen Frequenzen in den Griff zu bekommen (z.B. aus Verkehrslärm oder Fluglärm)
3. Leichte und zugleich starre Wärmedämmungen (z.B. expandiertes oder extrudiertes Polystyrol) bieten keinen ausreichenden Schallschutz und brauchen zusätzliche schwere Materialien.
4. Luftundichtigkeiten und Fugen nach außen beeinträchtigen die Schalldämmung wesentlich, wenn diese nicht mit absorbierenden Materialien ausgekleidet werden. Hier eignen sich insbesondere Faserdämmstoffe.
5. Fassadenelemente, wie Fenster und Lüftungsöffnungen haben einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Das schwächste Element hat den größten Einfluss und ist entscheidend für die Schalldämmung der gesamten Fassade (siehe die Beispiele im Kapitel "Faktoren, die das Gesamtergebnis der Fassade beeinflussen"). Sowohl für den Schallschutz als auch vom ökonomischen Standpunkt aus gesehen kann es kontraproduktiv sein, besonders effiziente Elemente (z.B. Fenster) mit schlecht isolierenden (z.B. Lüftungsöffnungen oder nicht isolierte Rolllädenkästen) zu kombinieren. Es ist viel mehr vorteilhafter, die akustischen Eigenschaften der verschiedenen Elemente abzugleichen, bzw. für einen gleichmäßigen Schallschutz zu sorgen, indem man mehr in die schwächeren Elemente investiert.
6. Auch das Dach kann nicht als Bauteil allein betrachtet werden, denn auch die Außenwand hat einen großen Einfluss auf die Schalldämmung für den Innenraum. Als Grundregel gilt auch hier wie unter Punkt 5, die "Außenhaut" als Ganzes zu betrachten und zu vermeiden, nur einzelne Elemente zu berücksichtigen. Elemente, welche von außen nach innen führen (Sparren, Balken, Balkone...) übertragen den Schall gut und vermindern damit den Schallschutz. Die thermische und akustische Trennung ist fundamental.
7. Bei rechnerischer Schätzung in der Planung ist eine Reserve von mindestens 5dB zu den gesetzlichen Mindestwerten sinnvoll, da es in der Ausführung immer zu unvorhergesehenen Schwierigkeiten kommen kann.

Körperschall

Trittschallpegel

Der Trittschallpegel ist definiert als der Schallpegel, der sich im Empfangsraum einstellt, wenn im Senderraum ein normalisierter Trittschall-Klopfer seine Hämmerchen auf den Boden fallen lässt.

Wie beim Luftschall gibt es auch hier Labormessungen nach der Norm UNI EN ISO 140-6 oder Messungen am Bau nach der Norm UNI EN ISO 140-7.

Der gemessene **Norm-Trittschallpegel** hängt wiederum von den akustischen Eigenschaften des trennenden Elements, der Decke, ab, und von der äquivalenten Absorptionsfläche des Empfangsraumes in Bezug auf die Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m²:

$$L_n = L + 10 \log(A/A_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei L der Trittschallpegel im Empfangsraum ist, wenn die Decke von einem normalisierten Trittschall-Klopfer ins Schwingen gebracht wird; A ist die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes; A_0 ist die Bezugs-Absorptionsfläche von 10 m².

Der Norm-Trittschallpegel L_{nT} in Bezug auf die Nachhallzeit ist hingegen:

$$L_{nT} = L + 10 \log(T/T_0) \quad [\text{dB}]$$

wobei T die Nachhallzeit im Empfangsraum ist und T_0 die Bezugs - Nachhallzeit von 0,5 s.

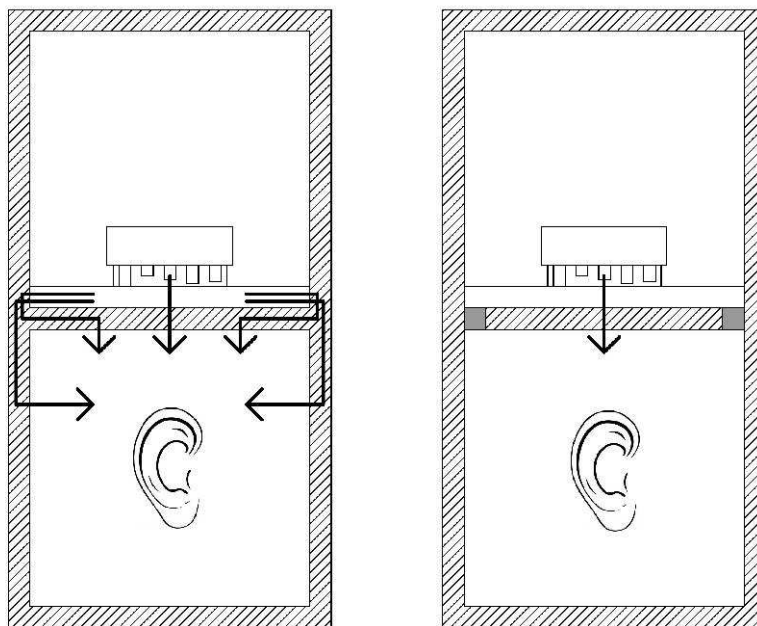


Fig. 24: Trittschallmessung am Bau (sx) und im Labor (dx). Quelle: TBZ GmbH



In den Labormessungen ist die Decke von den seitlichen Wänden isoliert, um die Schallübertragung bei den Flanken zu minimieren, damit die direkte Schallleitung durch das konstruktive Element gemessen werden kann. Das Auflager, welches die zu messende Decke trägt, sowie auch die seitlichen Wände müssen aus schwerem Stahlbeton und in ausreichender Stärke errichtet sein, um die Vibrationen zu begrenzen.

Die Labormessung ergibt den Norm-Trittschallpegel L_n , während bei der Messung am Bau der Apex ' des Norm-Trittschallpegels L'_n auf die möglichen Schallbrücken und Flankenübertragung durch Vibrationen hinweist.

Die Messung des Norm-Trittschallpegels

Die Messung des Norm-Trittschallpegels wird laut den Normen UNI EN ISO 140 Teil 7 und Teil 14 (besondere Mess-Situationen) durchgeführt.

Bei zwei übereinander liegenden Räumen, welche durch die zu messende Decke getrennt sind, wird der Körperschall durch einen Trittschall-Klopfer erzeugt. Dies ist ein elektromechanisches Gerät, wo 5 Hämmerchen mit jeweils 500 g Gewicht aus 4 cm Höhe in einer zeitlichen Distanz von 100 ms auf den Boden fallen gelassen werden. Das Gerät muss die Bestimmungen laut UNI EN ISO 10140-5 einhalten, wodurch auch Geräte verschiedener Hersteller als „normalisiert“ bezeichnet werden können.



Fig. 25: Trittschallklopfer. Quelle: TBZ GmbH

Hörbeispiel für den Trittschall bei verschiedenen Bodenbelägen		
	Holz	Fliesen
Senderraum (oben)	+	+
Empfangsraum (unten)	+	+
	L'_{nw} : 53 dB	L'_{nw} : 62 dB

Tabella 13: Hörbeispiel für den Trittschall. Quelle: TBZ GmbH

Der Trittschall-Klopfer muss in mindestens 4 Positionen auf der Decke verteilt werden, am besten indem der Trittschall-Klopfer um 45° zu den Balken gedreht wird. Im Empfangsraum sollen mindestens 6 Messungen des Schallpegels bei laufendem Trittschall-Klopfer durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass

- nicht zu nahe an der Schallquelle bzw. am trennenden Element gemessen wird (direktes Schallfeld);
- nicht zu nahe an reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen gemessen wird;
- die Höhe des Mikrofons zum Boden nach dem Zufallsprinzip verändert wird.

Für große Räume oder Räume mit komplexer Geometrie wird die Anzahl der Messungen erhöht, um ein genaueres Mittel der Schallpegel zu erreichen. Es werden auch der Grundpegel und die Nachhallzeit gemessen.

Der Grundpegel darf während der Messung nicht den zu messenden Pegel beeinflussen und muss deshalb in allen Frequenzbereichen um 6 – 10 dB niedriger sein als der Schallpegel $L_{2..}$

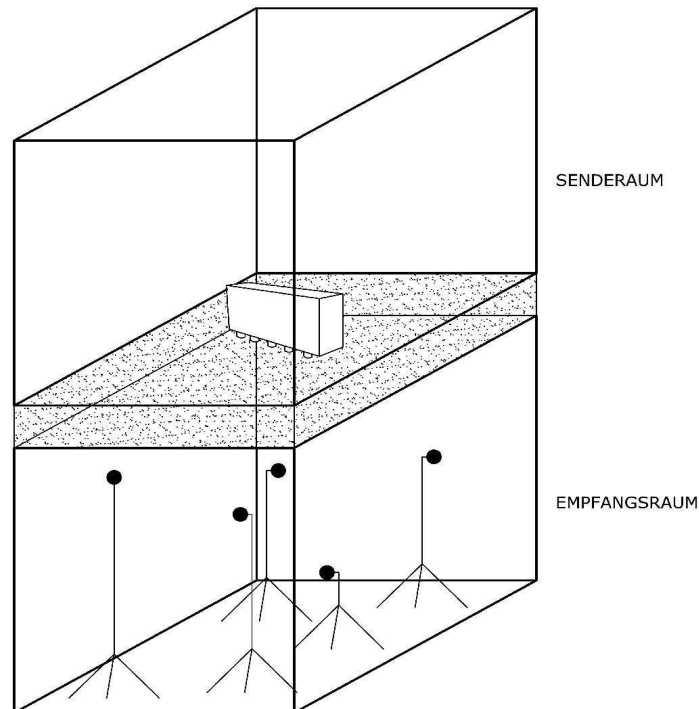


Fig. 26: Schema für die Messung des bewerteten Trittschallpegels $L'w$. Quelle: TBZ GmbH

Die Nachhallzeit kann mit einem kontinuierlichem Geräusch (rosa Rauschen), welches dann plötzlich unterbrochen wird, oder einem impulsiven Geräusch (platzender Luftballon, Pistole, Klappe) oder auch mit einem Geräusch, wo die Tonhöhe kontinuierlich ansteigt (sine sweep), im Empfangsraum gemessen werden. Auch für die Nachhallzeit müssen die Positionen der Schallquelle und der Mikrofone gewechselt werden. Mit der Nachhallzeit werden dann die Ergebnisse der Messung aufgrund der verschiedenen Einrichtung korrigiert. Dies ist wichtig, weil der Schall in einem Raum sehr stark von den akustischen Eigenschaften des Raumes abhängt. So hört man den Schall in einem leeren Raum (mehr Reflexionen) viel länger als in einem vollständig eingerichteten Raum. Durch diese Mehrfachreflexionen wird der Schallpegel im leeren Raum bedeutend höher als im eingerichteten Raum, wo der Schall von den Oberflächen absorbiert wird. Damit dadurch aber nicht die Bestimmung des Luftschalldämmmaßes beeinflusst wird, werden die Ergebnisse der Messungen auf eine Standartnachhallzeit bezogen. Diese beträgt bei Wohnbauten 0,5 s.

Die Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels $L_{n,w}$ und $L'_{n,w}$

Wie auch beim Luftschall kann das Ergebnis einer Schallmessung als Einzahl-Angabe erfolgen: $L_{n,w}$ im Labor und $L'_{n,w}$ am Bau.

Die Berechnung ist in der Norm UNI EN ISO 717-2 beschrieben und wird als Methode des Vergleichens bezeichnet. Dabei wird die Bezugskurve im Vergleich zur Messkurve so lange verschoben, bis die Summe der negativen Abweichungen kleiner oder gleich 32 dB ist. Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ergibt dann die Einzahl-Angabe.

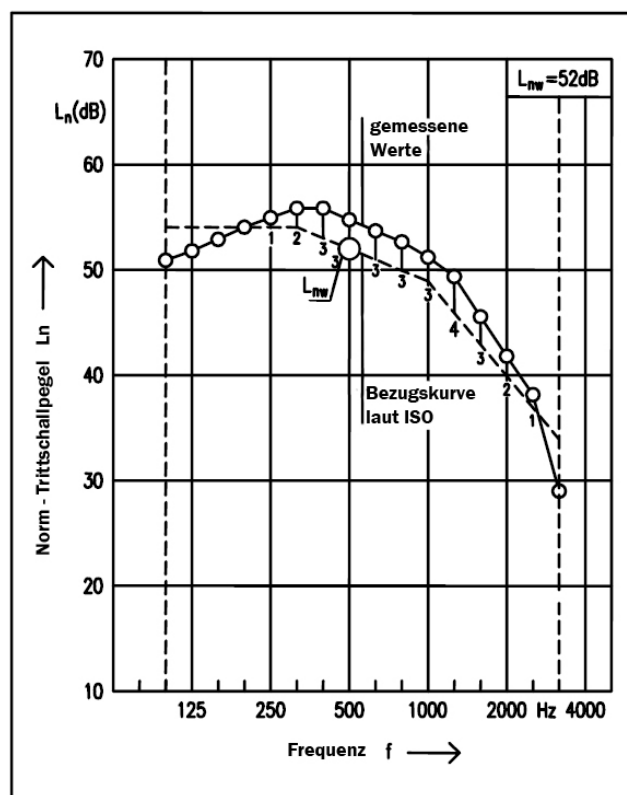


Fig. 27: Bestimmung des bewerteten Trittschallpegels. Quelle:
Unterrichtsmaterial der Scuola di acustica Università di Ferrara

Mit Hilfe der Spektrum-Anpassungswerte C_1 , $C_{1,50-2500}$ kann man den Trittschallpegel an die Betondecken mit / ohne wirksamen Deckenauflage bzw. Holzboden anpassen. Betonböden mit einer wirksamen Auflage haben einen Wert von $C_1 = 0$. C berücksichtigt die tiefen Frequenzen von 50 – 100 Hz, die für das menschliche Hörempfinden wesentlich sind. Derzeit werden die Spektrum-Anpassungswerte nur in wenigen Ländern angewendet. In Italien werden sie noch nicht zur Überprüfung der Einhaltung der gesetzlichen Normen herangezogen.

Mechanismen der Ausbreitung des Körperschalls

Die Quellen des Körperschalls sind vorwiegend die Schritte der Personen, das Fallen von Gegenständen, das Verschieben von Stühlen oder anderen Möbeln. Die Geräusche dieser Tätigkeiten breiten sich als **Vibrationen** sowohl vertikal als auch horizontal über die Strukturen aus, bringen Wände und Decken zum Schwingen, und diese erzeugen damit dann den Luftschall den wir hören.

Der effektiv wiedergegebene Schall hängt auch von der Dämpfungsfähigkeit der Strukturen und den Stößen zwischen Decken und Wänden ab.

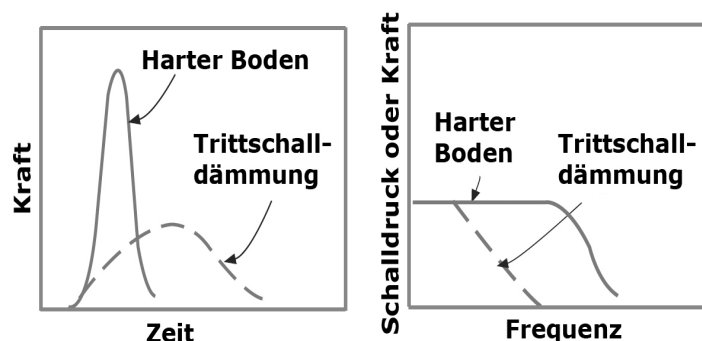


Fig. 28: Reaktion der Bodenbeläge auf Schläge. Quelle: "Manuale di acustica applicata" (R. Spagnolo)

Das Bild oben zeigt, dass ein Schlag auf eine harte Oberfläche ein lautes aber kurzes Geräusch hervorruft, derselbe Schlag auf eine weichere, nachgiebige Oberfläche ein leiseres Geräusch, wobei die Energie auf einen größeren Zeitraum verteilt wird. Deshalb ist auch der damit verursachte Schallpegel im Empfangsraum geringer.

Die beste und effektivste Lösung, um den Durchgang von Trittschall zu begrenzen, liegt im mehrschichtigen Aufbau mit dem „schwimmenden“ Bodenaufbau bzw. Estrich. Die zwei Platten werden durch eine elastische Feder getrennt nach dem „Masse-Feder-Masse“ Prinzip, wobei die obere Platte durch die Schwerkraft allein fixiert ist, wodurch der Schall von der statisch tragenden Struktur getrennt bleibt und in der Trittschalldämmung gedämpft wird.

Im folgenden Bild ist ein solcher Aufbau schematisch dargestellt.

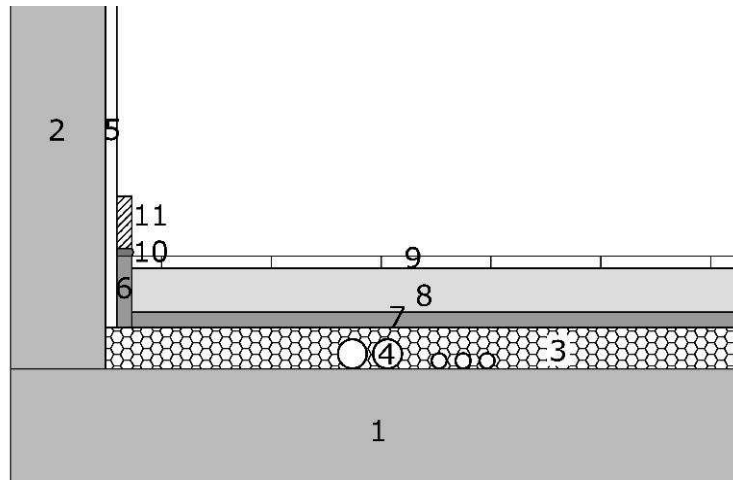


Fig. 29: Schwimmender Fußboden. Quelle: TBZ GmbH

1. Boden – 2. Wand – 3. Ausgleichsestrich – 4. Leitungen – 5. Putz – 6. Randdämmstreifen – 7. Trittschallmatte – 8. schwimmender Estrich – 9. Bodnebelag – 10. Elastische Füllung – 11. Sockelleiste

Die Verlegung von sehr dünnen Trittschall-Dämmmatten kann in der Realität der Baustellen zu wesentlich schlechteren Ergebnissen führen, als es aufgrund der Laborwerte zu erwarten wäre. Steinchen können die Trittschall-Dämmmatten durchdringen oder zerreißen, wodurch Schallbrücken entstehen.

Die dynamische Steifigkeit

Beim schwimmenden Estrich erfolgt die akustische Trennung durch eine Trittschallmatte. Die Elastizität dieser wird durch die **dynamische Steifigkeit** beschrieben. Je härter das Material ist, desto höher ist die Steifigkeit, desto weniger werden die Vibrationen gedämpft.

Die dynamische Steifigkeit ist definiert mit:

$$s' = (F/A) / \Delta L \quad [\text{MN/m}^3]$$

wobei F die auf den Prüfkörper normal wirkende Kraft in Newton ist; A ist die Fläche des Prüfkörpers und ΔL ist die Längenänderung der Stärke des Prüfkörpers in Metern.

Damit ein schwimmender Bodenaufbau eine gute Schalldämmung gewährleistet, muss dessen Resonanzfrequenz nieder sein, die schwimmende Platte muss schwer genug sein; die Trittschalldämmung ist sowohl elastisch als auch dämpfend, somit werden die Vibrationen im Inneren des Bauteils aufgefangen und verteilen sich nicht in die umgebenden Bauteile.



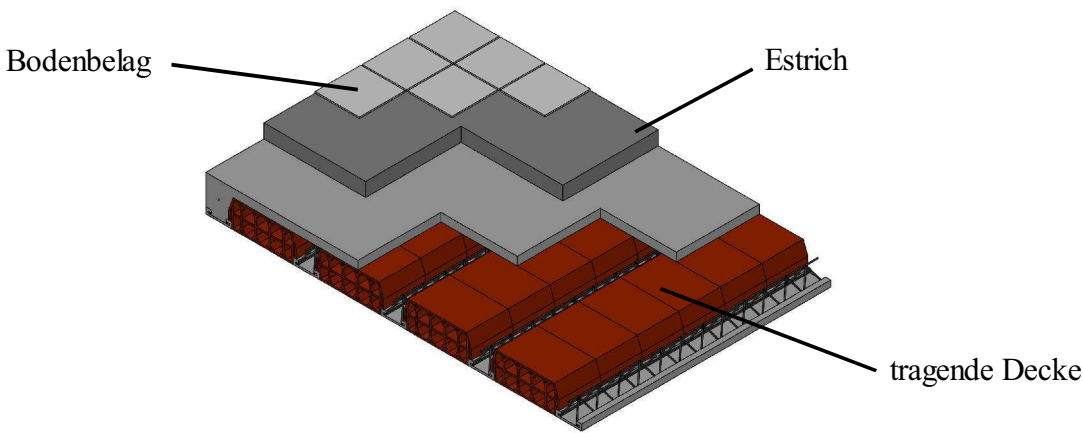
Die dynamische Steifigkeit ermöglicht eine rechnerische Abschätzung der Wirkung einer Trittschallmatte zusammen mit den Massen der Materialien darüber und darunter. Der Wert der dynamische Steifigkeit allein sagt noch nichts über die Dämmwirkung des konstruktiven Elements aus. Der Wert der Trittschallminderung ΔL kann nur für den Vergleich von Materialien oder Komponenten verwendet werden.

Aus den Vergleichen zwischen den Messungen und den rechnerischen Schätzungen wachsen Zweifel an der Korrektheit der Angaben der dynamischen Steifigkeit in den technischen Datenblättern mancher Materialien von Seiten der Hersteller, auch weil diese nicht immer die gleichen Messverfahren verwenden. Wenn zwei verschiedene Trittschall-Dämmmatten übereinander gelegt werden, kann die dadurch erzielte Verbesserung rechnerisch nicht nachvollzogen werden.

Vereinfacht formuliert bedeutet dies, dass die Werte der dynamischen Steifigkeit mit großer Vorsicht verwendet werden müssen und dass die Druckfestigkeit, Zusammendrückbarkeit und leichte und sichere Verlegung auch bei der Wahl der Trittschall-Dämmmatte berücksichtigt werden müssen.

Wesentliche Fehler bei der Ausführung

Die folgende Liste zeigt Ausführungsfehler bei der Trittschalldämmung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Keine Trittschalldämmung verwendet	15-25 dB	1. Im Senderaum (am effektivsten und zugleich teuersten): Rückbau bis zur Rohdecke, Aufbau eines schwimmenden Bodenaufbaus mit Trittschalldämmung. 2. Überdecken des Bodenaufbaus mit schwimmendem Bodenbelag oder Teppich. 3. Im Empfangsraum (weniger effektiv, da die Vibrationen sich über die statischen Strukturen verteilen, wie Wände und Decken, aber billiger): abgehängte Decke montieren.
		
Schlechte Auswahl bzw. Verlegung der Trittschalldämmung	10-15 dB	1. Im Senderaum (am effektivsten): Rückbau bis zur Rohdecke, Aufbau eines schwimmenden Bodenaufbaus mit Trittschalldämmung. 2. Überdecken des Bodenaufbaus mit schwimmendem Bodenbelag oder Teppich. 3. Im Empfangsraum (weniger effektiv, da die Vibrationen sich über die statischen Strukturen verteilen, wie Wände und Decken): abgehängte Decke montieren.



kritischer Punkt	Verlust	Lösung (Reihenfolge nach Priorität)
Starre Verbindung über die Sockelleiste	5-15 dB	1. Die Sockelleisten sorgfältig verlegen, erst nachdem die Bodenfliesen verlegt wurden. Es muss ein Abstand von 1-2 mm gehalten werden, welcher dann mit Silikon verschlossen wird. 2. Entfernen der Sockelleiste, Wiedermontage mit elastischer Fuge.

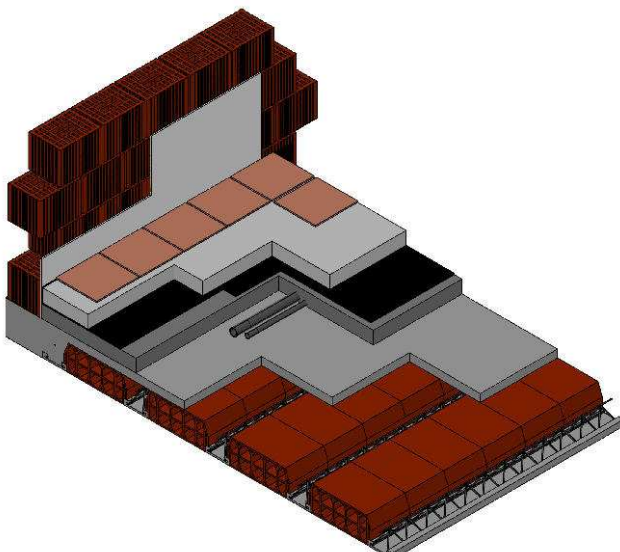
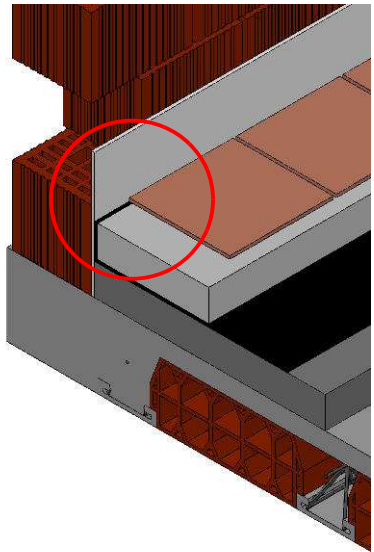



Tabelle 14: $L'_{n,w}$ – wesentliche Ausführungsfehler bei der Trittschalldämmung. Quelle: TBZ GmbH



Lärmbelästigung durch Installationen

Die italienische Gesetzgebung unterscheidet im Ministerialdekret DPCM 5/12/1997 zwei verschiedenen Lärmbelästigungen durch Installationen:

1. Schallpegel von nicht kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie sanitären Zu- und Abflüssen, Aufzügen, usw.
2. Schallpegel von kontinuierlichen Installationsgeräuschen, wie Heizung, Kühlung, Lüftung, usw.

Das Dekret setzt die maximal zulässigen Schallpegel für folgende Gebäudearten fest:

Cat	Nutzung	Installations- geräusche diskontinuierlich $L_{AS\ max}$	Installations- geräusche kontinuierlich L_{Aeq}
A	Wohngebäude und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
B	Büros und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
C	Hotels Pensionen und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
D	Krankenhäuser, Kliniken, Pflegeanstalten und Ähnliches	≤ 35	≤ 25
E	Schulen jeden Typs und Ähnliches	≤ 35	≤ 25
F	Kultur- und Freizeiteinrichtungen und Ähnliches	≤ 35	≤ 35
G	Handel und Ähnliches	≤ 35	≤ 35

Tabelle 15: Quelle: D.P.C.M. 05/12/97

Sanitärinstallationen

Die Sanitärinstallationen bestehen aus Zuleitungen für Kalt- und Warmwasser, Abwasserleitungen sowie Sanitärgegenständen.

Die in den Leitungen entstehenden Vibrationen durch die Strömung werden an Wände und Decken übertragen und diese strahlen sie dann als Luftschall ab.

Plötzliche Unterbrechungen des Wasserflusses verursachen Phänomene der Kavitation (Bildung und Auflösung von mit Dampf gefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten, siehe auch [Wikipedia](#)) oder auch so genannte Druckstoßphänomene (siehe auch [Wikipedia](#)), und können laute impulsive Geräusche erzeugen.

Normalerweise sind Geräusche durch Sanitärinstallationen durch zu kleine Leitungsquerschnitte und damit durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten, zu enge Kurven oder durch fehlende Ausdehnungsgefäße bedingt.



Um dem Abhilfe zu schaffen, können abgesehen von der Ursachenbehebung die Leitungen mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden, sowie auch glatte mehrschichtige Leitungen verwendet werden.

Weiters können die Leitungen in Vormauerungen oder auch in eigenen Installationsschächten verlegt werden. Auch in diesem Fall müssen die Leitungen mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden.

Es ist generell ratsam, Bäder nicht neben Schlafzimmern zu planen. Es empfiehlt sich, Toilettenspülungen mit Spülkästen zu wählen und die WCs gleich neben die vertikalen Abwasserstränge zu legen.



Ausführungsbeispiel eines Installationsschachtes mit Leitungen, welche mit weichem elastischem Material für eine Schall-Entkoppelung umgeben werden, um die Übertragung von Vibrationen auf die Struktur zu vermeiden.

Fig. 29: Quelle: TBZ GmbH

Aufzüge

Aufzüge sollen generell möglichst weit von Ruhezonen positioniert werden. Es gibt elektrische Aufzüge und solche, die mit Öldruck funktionieren. Der Motor kann in eigenen Räumen aufgestellt oder in die Fahrzugaufkabinen integriert werden.

Bei elektrischen Aufzügen wird der Lärm vorwiegend durch den Motor und Keilriemen verursacht, durch die Führungsschienen und die Schiebetüren. Sinnvolle Maßnahmen sind das Auswählen von vom Hersteller zertifizierte, geräuscharme Motoren, Schalldämmung des Raumes, wo sich der Motor befindet, regelmäßiges Schmieren der beweglichen Komponenten und generell eine regelmäßige Wartung aller Teile der Anlage.

Bei Aufzügen mit Öldruck sind sinnvolle Maßnahmen: elastische Auflager bei der Ölpumpe montieren, die Ölpumpe in einen schallgedämmten Raum geben und generell eine regelmäßige Wartung aller Teile der Anlage durchführen.

Wenn der Motor in die Fahrzugaufkabinen integriert wird, muss er speziell leise sein. Die Wände des Aufzugsschachtes sollen von der restlichen tragenden Struktur akustisch getrennt sein.

Heizungen

Grundsätzlich wird zwischen luft- und wassergeführten Heizsystemen unterschieden.

Bei wassergeführten Heizungssystemen erfolgt die Heizung über einen Wärmeerzeuger und Pumpen, welche das warme Wasser zwischen den Heizkörpern und dem Wärmeerzeuger zirkulieren lassen. Hauptlärmquelle bei dieser Art von Heizung ist sicher die Heizzentrale selbst. Diese sollte daher möglichst weit von den Ruhezonen entfernt sein und schalldämmende Wände und Decken aufweisen. Der Heizkessel soll auf elastischen Lagern stehen.

In der Nacht sollten die Pumpen ausgeschaltet werden, wenn die thermische Isolierung des Gebäudes dies zulässt.

Auch die Heizleitungen sollen mit elastischem Material ummantelt werden, im Mauerwerk sollen Dehnmöglichkeiten vorgesehen werden, um die natürliche Ausdehnung zu ermöglichen.

Bei luftgeführten Heizsystemen sind die Hauptlärmquellen die Kompressoren, die Pumpen und die Luftzirkulation im Inneren der Kanäle. Werden die Anlagen direkt in den Räumen aufgestellt, so ist es wichtig, dass diese sehr ruhig sind. Wird eine Heizzentrale verwendet, so ist mehr darauf zu achten, dass diese von der Gebäudestruktur akustisch isoliert wird. Oft wird der Lärm bei diesen Anlagen direkt durch die Lüftungskanäle übertragen. Daher ist es wichtig, dass die Leitungen einen ausreichenden Querschnitt haben, damit laute Geräusche durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten vermieden werden. Schalldämpfer können nach den Ventilatoren und kurz vor den Austrittsöffnungen eingebaut werden. Bei Wärmepumpen und Kompressoren sollen diese auf elastischen Federn montiert werden und am besten in einem eigenen schallgedämmten Raum montiert sein.

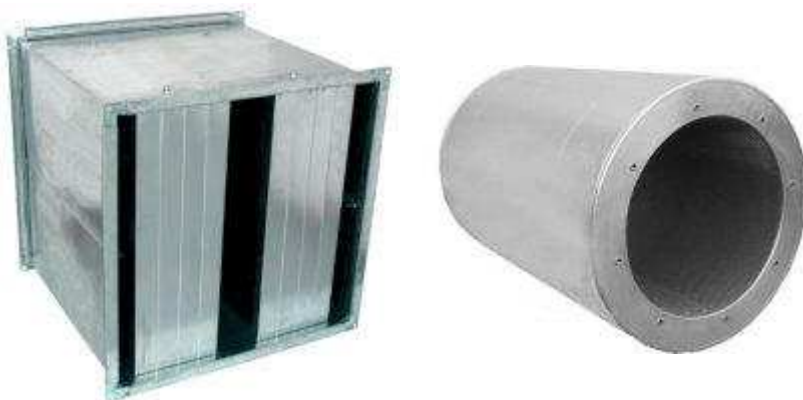


Fig. 30: Beispiele von Schalldämpfern. Quelle: MP3 S.r.l. www.MP3-air.com



Lüftungsanlagen

Für zentrale Lüftungsanlagen bzw. kontrollierte Lüftung gilt dasselbe wie für luftgeführte Heizsystemen. Telefonie-Schall zwischen zwei Räumen kann durch Schalldämpfer verhindert werden. Überström-Öffnungen oberhalb des Türstockes können mit absorbierendem Material ausgekleidet werden. Lüftungskanäle sollen in schallgedämmten Installationsschächten bzw. schallgedämmten abgehängten Decken verlegt sein.

Es gibt derzeit noch keine dezentralen Lüftungsanlagen am Markt, die ohne Zusatzmaßnahmen eine ausreichende Luftleistung ohne störende Schallemission erbringen ($L_{\text{aeq}} \leq 25\text{dB}$). Deshalb können derzeit nur zentrale kontrollierte Lüftungsanlagen empfohlen werden.

Kühlanlagen

Es gibt kleine Kühlanlagen mit Außen-Einheit und zentrale Kühlanlagen, welche meist auf dem Dach positioniert werden.

Bei kleinen Kühlanlagen soll die Außen-Einheit, welche den Ventilator beinhaltet, möglichst weit weg von Fenstern angebracht werden. Die Strömungsgeräusche können vor allem in der Nacht jene stören, die bei offenem Fenster schlafen wollen. Das Gerät selbst soll auf elastischen Lagern montiert werden.

Bei zentralen Kühlanlagen gibt es Kompressoren und Ventilatoren, welche auf elastischen Lagern montiert werden sollen. Es sind absorbierende Flächen und Schalldämpfer vorzusehen.



Gesetze und Normen

Das derzeit gültige Gesetz

Das Ministerialdekret D.P.C.M. 5/12/1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici” definiert die akustischen Anforderungen an die Bauteile sowie die Begrenzung der internen Schallquellen, je nach Gebäude-Typologie (DPCM 5/12/1997, Art. 2 + Tabelle B):

Cat	Nutzung	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	L'_{nw}
A	Wohngebäude und Ähnliches	≥ 50	≥ 40	≤ 63
B	Büros und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55
C	Hotels Pensionen und Ähnliches	≥ 50	≥ 40	≤ 63
D	Krankenhäuser, Kliniken, Pflegeanstalten und Ähnliches	≥ 55	≥ 45	≤ 58
E	Schulen jeden Typs und Ähnliches	≥ 50	≥ 48	≤ 58
F	Kultur- und Freizeiteinrichtungen und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55
G	Handel und Ähnliches	≥ 50	≥ 42	≤ 55

Tabelle 16: Quelle: Tabelle B des Anhangs A des D.P.C.M. 05/12/97

R'_w Bau-Schalldämm-Maß wohnungstrennender Elemente

L'_{nw} Norm-Trittschallpegel der Decken

$D_{2m,nT,w}$ Standard-Schallpegeldifferenz der Fassade

Die gültige technische Norm

Das Ministerialdekret vom 5/12/1997 ist eine gesetzliche Norm, mit allen ihren Stärken und Schwächen. Im Jahr 2010 wurde eine technische Norm verabschiedet, die UNI 11367, welche eine akustische Klassifizierung der Gebäude eingeführt hat und die Grundlage für eine neue gesetzliche Norm werden kann. Da es diese neue gesetzliche Norm noch nicht gibt, gilt weiterhin das Ministerialdekret vom 5/12/1997, die technische Norm UNI 11367 hat nur freiwilligen Charakter.

Die Norm **UNI 11367:2010** “Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera” wurde von ca. 60 Technikern unter Einbeziehung der wesentlichen Branchen des Bauwesens erarbeitet (Baufirmen, Planer, Hersteller von Materialien, Haustechnik und Fensterbau, Akustik-Techniker, Universitäten).

Die akustische Zertifizierung wird auf Grundlage von Schallmessungen vor Ort erstellt, von welchen ein energetisches Mittel errechnet wird. Da es nicht realistisch ist, alle Bauteile zu messen, wird noch ein „Unsicherheitsfaktor“ berücksichtigt.



Klasse	Index der Bewertung				
	a) Standard- Schallpegeldifferenz der Fassade $D_{2m,2Tw}$ dB	b) Bau-Schalldämm- Maß von vertikalen und horizontalen Elementen zwischen verschiedenen Immobilien- Einheiten R'_w dB	c) Norm- Trittschallpegel der Decke zwischen verschiedenen Immobilien- Einheiten L'_{nw} dB	d) korrigierte Installations- geräusche kontinuierlich L_{ic} dB(A)	e) korrigierte Installations- geräusche diskontinuierlich L_{id} dB(A)
I	≥ 43	≥ 56	≤ 53	≤ 25	≤ 30
II	≥ 40	≥ 53	≤ 58	≤ 28	≤ 33
III	≥ 37	≥ 50	≤ 63	≤ 32	≤ 37
IV	≥ 32	≥ 45	≤ 68	≤ 37	≤ 42

Tabelle 17: Die Parameter für die akustische Klassifizierung der Immobilien-Einheiten. Quelle: Ansicht 1 Norm UNI 11367

Die Norm sieht vor, dass mindestens 10% der Elemente, aber mindestens 3 jeder Bauteilart, gemessen werden müssen. Das reduziert die Kosten für die Klassifizierung besonders der großen Gebäude (mit mehr als 50 Einheiten), wo sich die Bauteile wiederholen. Bei kleinen Gebäuden (10-20 Einheiten) müssen damit beinahe alle Bauteile gemessen werden.

Um auch die Kosten für die Klassifizierung kleinerer Gebäude zu reduzieren, wurde im Mai 2012 die Norm **UNI 11444** veröffentlicht: „Anleitung für die Auswahl der Immobilien-Einheiten in Gebäuden mit nicht seriellen Eigenschaften“ (Original-Titel: “Linee guida per la selezione delle unità immobiliari in edifici con caratteristiche non seriali”). Danach werden mindestens 2 Immobilien-Einheiten („IE“) vermessen, für Gebäude mit 3 bis 50 IE werden mindestens 3 IE vermessen, für größere Gebäude mindestens 10% der IE. Bei der Auswahl der Immobilien-Einheiten müssen jene mit den schwerwiegenden Schallbrücken ausgewählt werden. Die Klassifizierung wird nur für die gemessenen Immobilien-Einheiten ausgestellt, die pessimistischste Klasse kann für das ganze Gebäude angewandt werden.

Es müsste Aufgabe und Verantwortung des Bauleiters sein, mit Unterstützung des Akustik-Technikers die akustisch schwächsten Bauteile zu identifizieren. Allein der Bauleiter kennt die kritischen Punkte während der Ausführung des Gebäudes.

Rechenmodelle für die Planung

Laut UNI EN 12354-1

Das Modell gründet auf der Annahme, dass die Summe der Schallübertragung aus der direkten Übertragung und der Übertragung über die diversen Nebenwege besteht. Bei zwei getrennten Räumen, einem Senderaum und einem Empfangsraum, ist jeder Schallweg durch ein Element charakterisiert, welches den Schallwellen ausgesetzt ist (i) und ein weiteres, welches jene im Empfangsraum abgibt (j). In folgendem Bild sind diese Schallwege skizziert.

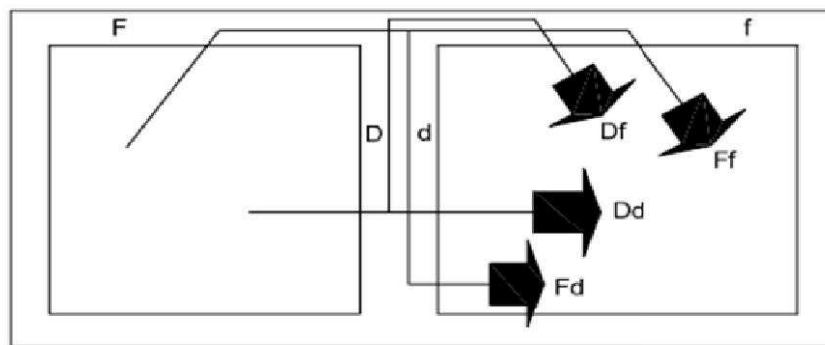


Fig. 31: Schallwege der Flankenübertragung. Quelle: UNI EN 12354

Im Senderaum ist das Element (i) mit der Schallübertragung auf Nebenwegen mit F gekennzeichnet, bei direkter Übertragung mit D. Im Empfangsraum ist das Element (j) mit f gekennzeichnet, wenn der Empfang der Schallwellen über einen Nebenweg erfolgt und mit d wenn der Empfang direkt über das trennende Element erfolgt.

Laut UNI EN 12354-2

Die UNI EN 12354-2 erläutert ein vereinfachtes Rechenmodell, in dem die Schalldämmung über die Massen der einzelnen Schichten, die schallschluckenden Eigenschaften bzw. die dynamische Steifigkeit der Feder errechnet werden kann. Damit können auch die Resonanz-Frequenzen ermittelt werden.

Im Rechenmodell der Norm UNI EN 12354-2:2002 wird ein Raum über dem anderen angenommen, wobei eine homogene Rohdecke und eine mittlere Dämpfung der Struktur zu Grunde liegt. Die Flankenübertragung kommt im Technischen Bericht UNI/TR 11175:2005 zur Sprache.

Der Korrekturfaktor K der die Decke flankierenden Elemente wird über deren Massen ermittelt, laut Tabelle 1 der Norm UNI EN 12354-2:2002 (siehe weiter oben).

Laut UNI EN 12354-3

Der Gesamt-Wert der Schalldämmung einer Fassade wird als energetisches Mittel zwischen den einzelnen Komponenten errechnet: die Wand / das Dach, die Fenster, die Rollläden, eventuelle Öffnungen z.B. für die Lüftung, usw. Die Schallbrücken haben einen überproportionalen Einfluss, was mit dem energetischen Mittel berücksichtigt wird.

Kommerzielle Software

Es existieren am Markt viele kommerzielle Softwarepakete zur Berechnung der Schalldämmung. Deren Basis sind die Normen UNI EN 12354 und UNI TR 11175. In vielen Programmen gibt es zahlreiche weitere Berechnungs-Beziehungen verschiedenster Autoren aus Italien bzw. Europa. Zudem verfügen alle diese Programme über eine Datenbank mit den Materialien und deren technischen Eigenschaften, sowie auch über Aufbauten mit den Laborwerten.

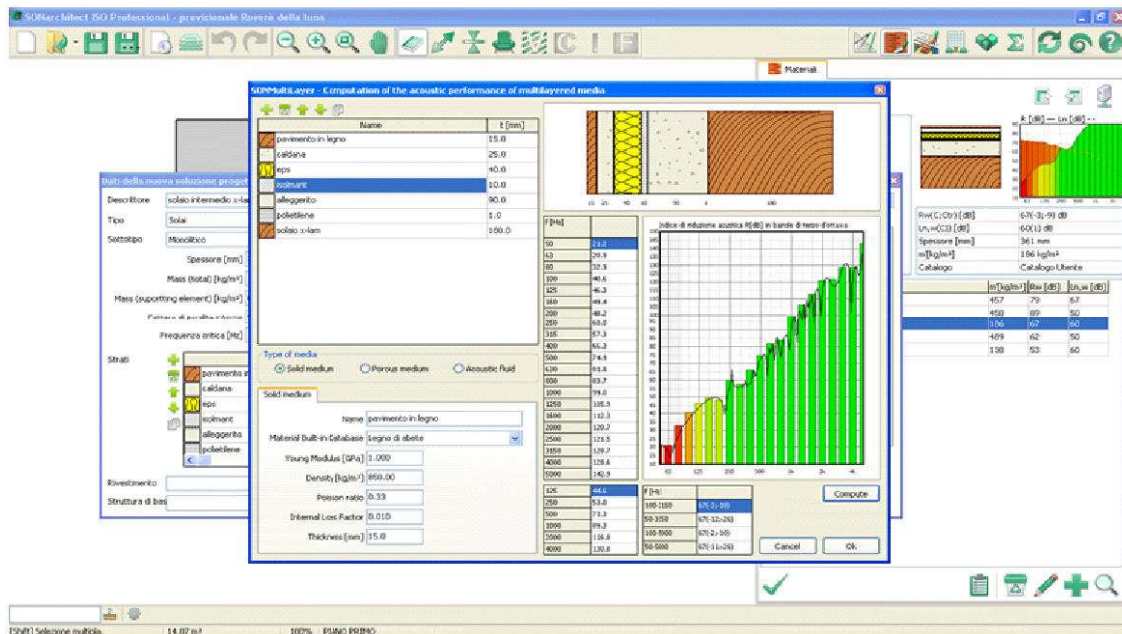


Fig. 32: Beispiel einer kommerziellen Software zur Berechnung der Schalldämmung. Quelle: 1BZ GmbH

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Software liegen im besonderen:

- in der Anzahl der möglichen Berechnungs-Beziehungen;
- in der Möglichkeit, komplexe oder vereinfachte Geometrien nachzubilden;
- im Umfang der Datenbank der Materialien und Konstruktionen;
- in der Möglichkeit, die Datenbank einzubauen.

Alle diese Software-Lösungen können eine Orientierung geben, meistens aber kommen überschätzte Ergebnisse heraus, weil die Mängel bei der Ausführung nicht ausreichend berücksichtigt werden. Deshalb sind die Berechnungen stets mit einem kritischen Auge und nur als „rechnerische Schätzungen“ zu betrachten und mit der Erfahrung auf dem Gebiet zu begleiten, sowohl bei den Messungen am Bau wie auch bei der Bauleitung.

Der Sinn dieses vorliegenden Katalogs liegt auch darin, reale Beispiele aufzuzeigen, mit denen die berechneten Ergebnisse verglichen werden können.