



FESI-DOKUMENT A3
FESI DOCUMENT A3

Eigenschaften von Baustoffen
- Schalldämmung, Absorption,
Dämpfung

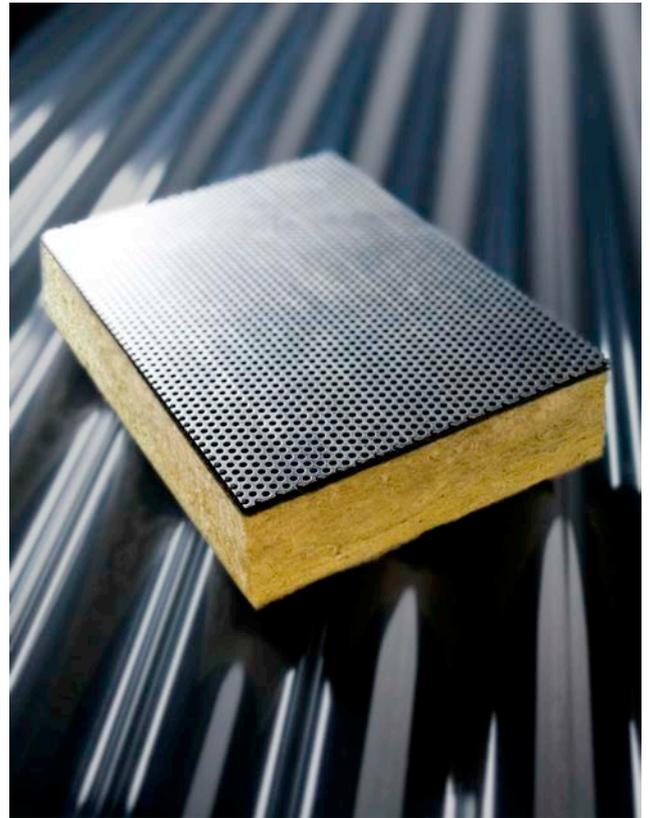
Product Characteristics
- *Acoustic Insulation, Absorption,*
Attenuation

Juli 2013, 1. überarbeitete Version

July 2013, 1st revised edition

FESI Office:

Eiif - European Industrial Insulation Foundation
Mr. Andreas Gürtler
Avenue du Mont-Blanc 33
1196 Gland, Switzerland
Tel.: 0041 22 99 500 70
e-mail: andreas.guertler@eiif.org



Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung
Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation

Inhalt	Contents
A3-0	Absicht3
A3-0	Intention3
A3-1	Einleitung3
A3-1	Introduction3
A3-2	In diesem Dokument benutzte Fachausdrücke und Definitionen3
A3-2	Terms and definitions used in this document3
A3-2.1	Schalldämmung4
A3-2.1	Acoustic insulation4
A3-2.1.1	Luftschalldämmung4
A3-2.1.1	Airborne sound insulation4
A3-2.1.2	Körperschalldämmung4
A3-2.1.2	Structureborne sound insulation4
A3-2.2	Dämpfung4
A3-2.2	Attenuation4
A3-2.2.1	Luftschallabsorption4
A3-2.2.1	Airborne sound absorption4
A3-2.2.2	Körperschalldämpfung4
A3-2.2.2	Structureborne sound attenuation4
A3-3	Luftschalldämmung4
A3-3	Airborne sound insulation4
A3-3.1	Definitionen4
A3-3.1	Definitions4
A3-3.2	Messung der Luftschalldämmung einschaliger Wände6
A3-3.2	Measurement of airborne sound insulation of single walls6
A3-3.3	Verschiedene Wandtypen6
A3-3.3	Different types of walls6
A3-3.3.1	Einschalige Wände6
A3-3.3.1	Single walls6
A3-3.3.1.1	Ebene Wände6
A3-3.3.1.1	Plane walls6
A3-3.3.1.2	Rohrleitungen10
A3-3.3.1.2	Pipes10
A3-3.3.2	Zweischalige Wände11
A3-3.3.2	Double walls11
A3-3.3.2.1	Ebene Wände11
A3-3.3.2.1	Plane walls11
A3-3.3.2.2	Rohrleitungen21
A3-3.3.2.2	Pipes21
A3-4	Körperschalldämmung23
A3-4	Structureborne sound insulation23
A3-4.1	Elastische Zwischenlagen (elastische Lagerung)24
A3-4.1	Elastic intermediate layers (elastic support)24
A3-4.2	Entfernungsabnahme des Schalls25
A3-4.2	Distance decrease of sound25
A3-4.3	Materialwechsel, Querschnittssprünge und Umkehrungen25
A3-4.3	Change of material, cross-section breaches and direction changes25
A3-5	Luftschallabsorption25
A3-5	Airborne sound absorption25
A3-5.1	Definitionen25
A3-5.1	Definitions25
A3-5.2	Berechnungsbeispiele für α_w , mit und ohne Formfaktor26
A3-5.2	Calculation examples for α_w , with and without shape indicator26
A3-5.3	Messung des Absorptionskoeffizienten27
A3-5.3	Measurement of the absorption coefficient27
A3-5.4	Verschiedene Arten von absorbierendem Material28
A3-5.4	Different types of absorbing materials28
A3-5.4.1	Poröses Material28
A3-5.4.1	Porous material28
A3-5.4.2	Systeme zur Resonanzabsorption32
A3-5.4.2	Resonance absorbing systems32
A3-6	Körperschalldämpfung35
A3-6	Structureborne sound attenuation35
A3-6.1	Verlustfaktoren verschiedener Materialien und Konstruktionen35
A3-6.1	Loss factors of different materials and constructions35
A3-6.2	Kombination von Materialien mit hohen und niedrigen Verlustfaktoren38
A3-6.2	Combination of materials with high and low dissipation factors38
A3-6.3	Dämpfung an Kontaktflächen38
A3-6.3	Attenuation at contact surfaces38
A3-6.4	Verminderung des Körperschallpegels durch zusätzliche Dämpfung39
A3-6.4	Structureborne sound level decrease through additional attenuation39
A3-7	Bedeutung der Symbole und Einheiten für Kräfte und Größen39
A3-7	Meaning of symbols and units of forces and quantities39

A3-8	Normen und Literatur / Quellen	41
A3-8	Standards and literature / sources	41

A3-0 Absicht

Das FESI Dokument A3 „Eigenschaften von Dämmstoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung“ ist das zweite einer Gruppe von sechs Dokumenten zu schalltechnischen Problemstellungen und deren Lösung, wie sie sich Bauunternehmern stellen.

Die benutzte Terminologie wurde bei CEN in enger Zusammenarbeit mit dem akustischen Technischen Komitee TC 126 entlehnt.

Die gesamte Gruppe von akustischen Dokumenten wird folgende Titel umfassen:

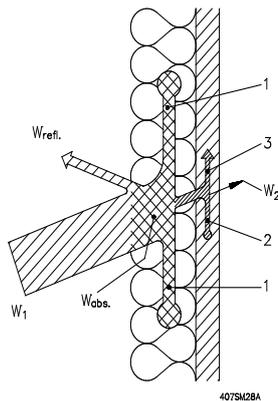
- A2 „Grundlagen der Akustik“ – 4. überarbeitete Auflage, Juli 2013
- A3 „Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung“ – 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013
- A4 „Gebäudeakustik“ - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013
- A5 „Akustik in Räumen“ - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013
- A6 „Akustik in der Industrie“ – 3. überarbeitete Auflage, Juli 2013
- A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013

A3-1 Einleitung

Schallwellen beginnen ihre Ausbreitung an der Schallquelle. Treffen sie auf ein Hindernis, z. B. eine Wand, wird ein Teil der mitgeführten Energie durch das Hindernis reflektiert, ein anderer Teil versetzt das Hindernis in Vibration und wird teilweise von ihm absorbiert. Ein Restanteil wird auf der anderen Seite des Hindernisses als Luftschall abgestrahlt.

Die Aspekte von Schallreflexion, Absorption und Übertragung werden in den FESI-Dokumenten A4 und A6 behandelt.

Das vorliegende Dokument befasst sich mit den Absorptionseigenschaften von Baustoffen sowie der Dämmung und der Dämpfung, die Schallwellen in Bauprodukten erleiden.

A3-2 In diesem Dokument benutzte Fachausdrücke und Definitionen**Bild 1**

- W_1 Schallenergie, die auf ein Hindernis trifft
 $W_{refl.}$ reflektierte Schallenergie
 $W_{abs.}$ absorbierte Schallenergie bestehend aus
 1 - Lutschallabsorption
 2 - Körperschalldämpfung (Streuung – Umsetzung in Wärme)
 3 - Abnahme mit der Entfernung (Energieverteilung)
 W_2 übertragene Schallenergie

A3-0 Intention

The FESI Document A3 “Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation” is the second of a series of six papers on acoustical problems that present themselves to the builder, together with their solutions.

The terminology used has been taken from CEN in close cooperation with the acoustical Technical Committee TC 126.

The total block of acoustical documents will comprise the following titles:

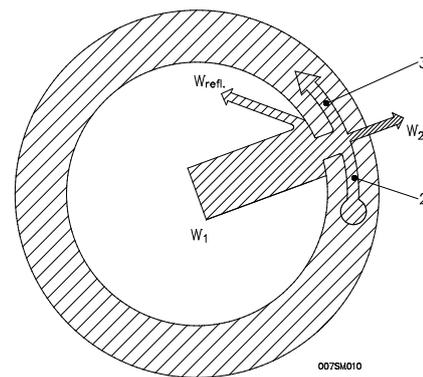
- A2 “Basics of acoustics” – Rev.4, July 2013
- A3 “Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation” – Rev.1, July 2013
- A4 “Acoustics in buildings” – Rev.1, July 2013
- A5 “Acoustics in rooms” – Rev.1, July 2013
- A6 “Industrial acoustics” – Rev. 3, July 2013
- A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - Rev.1, July 2013

A3-1 Introduction

The acoustic sound waves start their propagation at the noise source. When they hit an obstacle, e. g. a wall, part of the energy they carry is reflected by the obstacle, another part causes vibration of the obstacle and is partly absorbed by it. The remainder is radiated from the far side of the obstacle as airborne sound.

The aspects of acoustic reflection, absorption and transmission will be dealt with in the FESI Documents A4 and A6.

The paper presented here will address the building material characteristics of sound absorption, the insulation acoustic waves suffer in building materials and their attenuation.

A3-2 Terms and definitions used in this document**Figure 1**

- W_1 acoustic energy striking an obstacle
 $W_{refl.}$ reflected acoustic energy
 $W_{abs.}$ absorbed acoustic energy containing
 1 - airborne sound absorption
 2 - structureborne sound attenuation (dissipation – transformation into heat)
 3 - decrease with distance (energy spreading)
 W_2 transmitted acoustic energy

A3-2.1 Schalldämmung

Verminderung der Ausbreitung von Luft- und Körperschall.

A3-2.1.1 Luftschalldämmung

Verminderung des Luftschallpegels durch Hindernisse auf seinem Ausbreitungsweg zwischen Quelle und Empfänger.

A3-2.1.2 Körperschalldämmung

Verminderung der Ausbreitung von Körperschall durch teilweise oder vollständige Unterbrechung des Ausbreitungsweges.

A3-2.2 Dämpfung

Abnahme der Amplitude einer Schallwelle über die Zeit. Es findet eine Umwandlung der Schallenergie in andere Energieformen statt. Bei mechanischer Vibration sind Reibungsverluste die Hauptursache der Dämpfung. Bei höheren Frequenzen kommt Dämpfung durch Strahlung hinzu.

A3-2.2.1 Luftschallabsorption

Verminderung von Luftschallenergie durch Umwandlung eines Teils der Energie in Wärme. Während homogene Absorptionsmaterialien die Umwandlung von Schallenergie in Wärme durch innere Reibung bewirken (Verformung des Materials – z. B. Resonanzplatten), wird eine vergleichsweise Umwandlung in porösen Materialien durch äußere Reibung bewirkt (Reibung zwischen den vibrierenden Teilen des schallführenden Mediums und den Strukturelementen des porösen Materials).

A3-2.2.2 Körperschalldämpfung

Körperschalldämpfung ist die Umwandlung von Körperschallenergie in Wärme. Die Mechanismen, die zu Körperschalldämpfung führen, sind molekulare Umwandlungsprozesse und im geringeren Maße Wärmeleitung. An Verbindungspunkten in Konstruktionen geschieht die Körperschalldämpfung durch Reibungsprozesse und Viskositätseffekte in dünnen Zwischenschichten.

A3-3 Luftschalldämmung**A3-3.1 Definitionen**Der Übertragungsfaktor τ einer Wand

Die Übertragung wird durch die Schallenergie charakterisiert, die von der Wand, die den Senderraum vom Empfangsraum trennt, Richtung Empfänger abgestrahlt wird. Die Übertragung wird durch den Übertragungsfaktor τ beschrieben, dem Verhältnis zwischen der übertragenen Schallenergie W_2 und der auf die Wand treffenden Schallenergie W_1 .

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad [1]$$

Die Dämmung von Luftschall zwischen zwei Räumen oder zwischen der Innenseite und der Außenseite einer Rohrleitung wird durch eine Verminderung der übertragenen Energie erreicht. Die Dämmung wird charakterisiert durch den Unterschied zwischen dem erzeugten Schalldruckpegel L_1 und dem empfangenen Schalldruckpegel L_2 . Im Dokument A5 werden verschiedene Übertragungswege für Schallwellen zwischen zwei Räumen aufgezeigt. Wenn die Dämmeigenschaften einer bestimmten Wand festgestellt werden sollen, ist es erforderlich, ausschließlich die Übertragung durch die Wand selbst zu betrachten und alle anderen Übertragungswege auszuschließen. Dies geschieht in Laboratorien z. B. durch Unterbrechung der Nebenwege zu beiden Seiten der Wand, welche die beiden Räume trennt.

A3-2.1 Acoustic insulation

Reducing the spread of airborne and structureborne sound.

A3-2.1.1 Airborne sound insulation

Decreasing the airborne sound level through obstacles of its propagation path between the sound emitter and the sound receiver.

A3-2.1.2 Structureborne sound insulation

Diminishing the propagation of structureborne sound through partial or total interruption of the propagation path.

A3-2.2 Attenuation

Decrease of the amplitude of a sound wave over time. A transformation of the wave energy into other forms of energy occurs. With mechanical vibrations, frictional losses are the main cause of attenuation. At higher frequencies, attenuation through radiation is added.

A3-2.2.1 Airborne sound absorption

Reduction of the energy of airborne sound through the transformation of a part of it into thermal energy. Special absorbing materials may be considered. Whilst homogeneous absorbing materials achieve the transformation of sound energy into thermal energy through internal friction (deformation of the material – e. g. board resonators), the same transformation is achieved with porous absorption materials through external friction (friction between the vibrating particles of the sound-conduction medium and the skeleton elements of the porous material).

A3-2.2.2 Structureborne sound attenuation

Transformation of structureborne sound energy into thermal energy. The mechanisms leading to structureborne sound attenuation are molecular transformation processes and to a lesser degree thermal conductivity. At connection points in constructions, the structureborne sound attenuation occurs through friction processes and through viscosity effects in thin intermediate layers.

A3-3 Airborne sound insulation**A3-3.1 Definitions**The transmission factor τ of a wall

The transmission is characterised by the sound energy emitted into the reception area by the wall dividing the reception area from the emission area. It is characterised by the transmission factor τ , the relation between the sound energy transmitted W_2 and the sound energy striking the wall W_1 .

The insulation of airborne sound between two rooms or between the inside and the outside of a pipe is achieved by attempting a reduction of the energy transmitted. It is characterised by the difference of the level of sound pressure emitted L_1 and the level of sound pressure received L_2 . We will see in Document A5 that there are numerous transmission paths of acoustic energy between two rooms. If one wants to determine the insulation performance of an isolated wall, one must consider only the transmission through the wall itself and eliminate any other transmission path. This is done in laboratories, e. g. by interrupting lateral transmission paths on either side of the wall which separates the two rooms.

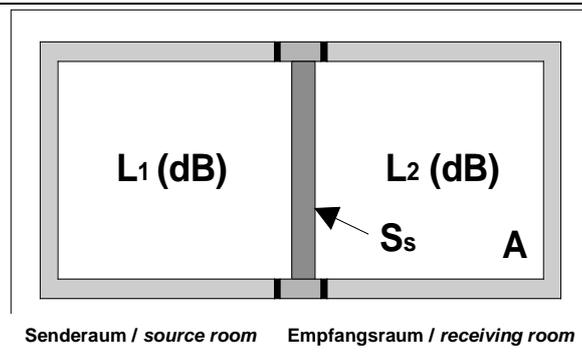


Bild 2: Zur Messung des Schalldämmmaßes einer Wand muss die flankierende Übertragung ausgeschaltet werden

Figure 2: For the measurement of the sound reduction index of a wall, the flanking transmission must be eliminated

Die Übertragung wird durch die Schallenergie charakterisiert, die von der Wand, die den Senderraum vom Empfangsraum trennt, Richtung Empfänger abgestrahlt wird. Die Übertragung wird durch den Übertragungsfaktor τ beschrieben, dem Verhältnis zwischen der übertragenen Schallenergie W_2 und der auf die Wand treffenden Schallenergie W_1 .

The transmission is characterised by the sound energy emitted into the reception area by the wall dividing the reception area from the emission area. It is characterised by the transmission factor τ , the relation between the sound energy transmitted W_2 and the sound energy striking the wall W_1 .

Die Schallenergie, die auf der Sendeseite auf die Wand trifft, ist $W_1 = S_S \cdot I_1$, wobei S_S die Oberfläche der Wand in m^2 und I_1 die Schallintensität entsprechend L_1 in Watt pro m^2 ist.

The acoustic energy which reaches the wall at the source side is $W_1 = S_S \cdot I_1$, where S_S is the surface of the wall in m^2 and I_1 the acoustic intensity corresponding to L_1 in Watt per m^2 .

Die übertragene Schallenergie wird durch Absorption im Empfangsraum vermindert. Diese wird durch die äquivalente Absorptionsfläche A (m^2) beschrieben, was zu der Beziehung führt:

The transmitted acoustic energy is dissipated by the absorption in the receiving room, characterised by the equivalent absorption area A (m^2) leading to the relations:

$$\tau = \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \cdot \left(\frac{A}{S_S} \right) \quad [2]$$

$$\text{und / and } 10 \log_{10} \tau = L_2 - L_1 + 10 \log_{10} \left(\frac{A}{S_S} \right)$$

Das Schalldämmmaß R einer Wand

The sound reduction index R of a wall

Um die Dämmeigenschaften einer Wand zu beschreiben, ist man überein gekommen, dass Schalldämmmaß R als das

To characterise the insulation capacity of a wall, it is agreed to define its sound reduction index R as the equivalent of

Äquivalent von $10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right)$ zu definieren:

$10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right)$:

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) = L_1 - L_2 - 10 \log_{10} \left(\frac{A}{S_S} \right) \quad [3]$$

Die Schalldämmung einer Wand wird im Laboratorium gemessen und gibt nur den Übertragungsverlust für diese spezielle Wand an. Man spricht von der Schalldämmung einer 16 cm Betonwand oder von der Schalldämmung einer zweischaligen Wand, Typ 98/48 mit Mineralwolle.

The sound reduction of a wall is measured in a laboratory and gives the transmission loss only for that specific wall. One speaks of the sound reduction of a wall of 16 cm concrete or the sound reduction of a double wall, type 98/48 with mineral wool.

Der feste Wert eines bewerteten Schalldämmmaßes: $R_W \cdot (C; C_{tr})$ in der Bauakustik

The fixed value of the weighted sound reduction index: $R_W \cdot (C; C_{tr})$ in the building acoustics

Die Schalldämmung einer Wand ist frequenzabhängig, wie alle akustischen Phänomene. Eine europäische Richtlinie für Bauprodukte verlangt obligatorisch die Angabe der akustischen Eigenschaften eines Bauteils mit einem einzigen Wert. Dies wird dadurch erreicht, dass ein für die Dämmeigenschaften der Wand repräsentativer Wert entwickelt wird, indem man die Kurve der in Dritteloktav-Abständen gemessenen Schalldämmmaße benutzt. Seit einigen Jahren werden hierzu in Europa zwei Methoden angewendet. Die erste besteht in dem Vergleich der Kurve mit einer Referenzkurve, die andere besteht darin, das Dämmmaß in dB(A) und zwar ausgehend von den Schalldruckpegeln im Sende- und Empfangsraum, jeweils in dB(A) zu berechnen.

The sound reduction of a wall, as for all acoustic phenomena, is dependent upon the frequency. A European directive concerned with construction products makes the expression of acoustic characteristics of building elements by single values compulsory. This is achieved by developing a value which is representative of the performance of the wall, by using the curve representing the measured indices of sound reduction at intervals of a third-octave. Since several years, two methods have been used in Europe. The first consists of a comparison of the curve to a template or a reference curve, the other consists of calculating the index in dB(A), starting from the levels in the source and reception rooms expressed in dB(A).

Die zweite Methode führt zu einem bewerteten Schalldämmmaß in dB(A) für rosa Rauschen oder Verkehrsgerausche auf der Sendeseite.

The second method leads to a weighted sound reduction index in dB(A) for pink noise or traffic noise on the source side.

Es gibt keine Relation zwischen den mit den beiden Methoden erreichten Ergebnissen. Die einzige Gemeinsamkeit ist die Kurve der in Dritteloktav-Abständen zwischen 100 Hz und 3150 Hz gemessenen Schalldämmmaße.

EN ISO 717-1 verlangt die Benutzung von R_W , führt aber gleichzeitig zwei damit zu verbindende Umwandlungsfaktoren ein, C und C_{tr} , welche die Ermittlung von R -Werten in dB(A) erlauben.

Für eine Wand wird der Einzahlwert $R_W \cdot (C; C_{tr})$ in dB genannt.

$R_W + C$ in dB entspricht dem bewerteten Schalldämmmaß in dB(A) für rosa Rauschen auf der Sendeseite, wird jedoch aus den Messwerten im Dritteloktav-Abstand zwischen 100 Hz und 3150 Hz ermittelt.

$R_W + C_{tr}$ in dB entspricht dem bewerteten Schalldämmmaß in dB(A) für Verkehrslärm auf der Sendeseite, ermittelt aus Messwerten in Dritteloktav-Abständen zwischen 100 Hz und 3150 Hz¹⁾.

Wegen der Vielfalt der Frequenzverteilung von Geräuschen arbeitet die Industrie normalerweise mit frequenzabhängigen Schalldämmwerten. Die Benutzung eines Einzahlwertes ist nicht üblich.

A3-3.2 Messung der Luftschalldämmung einschaliger Wände

Die Methoden der Labormessung für Schalldämmmaße von Wänden werden in EN ISO 140-3 beschrieben. Die Messregeln sind unten angegeben; die zu messenden Wände werden auf einer zentralen Konstruktion montiert, sodass die ausschließliche Messung der Übertragung durch die trennende Wand möglich ist (siehe Bild 2).

A3-3.3 Verschiedene Wandtypen

A3-3.3.1 Einschalige Wände

A3-3.3.1.1 Ebene Wände

Diese Wände bestehen nur aus einer Lage, wie z. B. Wände aus Beton, Gips, Ziegelsteinen, Stahl, Glas oder Plastik.

Das Massegesetz

Je schwerer eine einschalige Wand, desto besser sind ihre Dämmeigenschaften. Im Anhang B der EN 12354-1 wird ein „experimentelles Massegesetz“ vorgeschlagen, welches für Wände mit einem Flächengewicht $m' > 150 \text{ kg/m}^2$ das R_W in der folgenden Formel angibt:

$$R_W = 37,5 \log_{10} m' - 42 \text{ dB} \quad [4]$$

Für Länder, in denen $R_W + C$ oder $R_W + C_{tr}$, die auch R_A bzw. $R_{A,tr}$ genannt werden, benutzt wird, sind die „experimentellen“ Massegesetze wie folgt:

$$\text{für / for } m' < 150 \text{ kg/m}^2 : R_W + C = 17 \log_{10} m' + 3 \text{ und / and } R_W + C_{tr} = 17 \log_{10} m' - 1 \text{ dB}$$

$$\text{für / for } m' < 150 \text{ kg/m}^2 : R_W + C = 40 \log_{10} m' - 47 \text{ und / and } R_W + C_{tr} = 40 \log_{10} m' - 51 \text{ dB}$$

Verhalten des Schalldämmmaßes in Abhängigkeit der Frequenz

Für weiche Wände ohne Elastizität nimmt das theoretische Massegesetz die folgende Form an:

$$R_{th} = 20 \log_{10} m' f - 48 \quad [5]$$

There is no correlation between the results achieved with these two methods. The only common point is the curve of acoustic transmission loss indices at third-octave intervals between 100 Hz and 3150 Hz.

EN ISO 717-1 has made the use of R_W compulsory, but has also introduced two adaptation terms associated with it, C and C_{tr} , which allow for the calculation of R values in dB(A).

For a wall, the single-number value is called $R_W \cdot (C; C_{tr})$ in dB.

$R_W + C$ in dB corresponds to the weighted sound reduction index calculated in dB(A) for pink noise at the source side, but calculated from the values of third-octave measurements between 100 Hz and 3150 Hz.

$R_W + C_{tr}$ in dB corresponds to the weighted sound reduction index calculated in dB(A) for traffic noise on the source side, calculated from the third-octave measurements between 100 Hz and 3150 Hz¹⁾.

Due to the variety of frequency spectra of noises, the industry is normally working with frequency-dependent sound insulation values. The application of a single-number value or index is not usual.

A3-3.2 Measurement of airborne sound insulation of single walls

The methods for the laboratory measurements of the sound reduction index of walls are explained in EN ISO 140-3. The measuring principles are those described below; the walls to be tested are mounted on a central structure so that it is possible to measure only the direct transmission through the dividing wall (see Figure 2).

A3-3.3 Different types of walls

A3-3.3.1 Single walls

A3-3.3.1.1 Plane walls

These are walls of one layer only, such as walls of concrete, gypsum, brick, steel or plastic.

The mass law

The heavier a single wall, the better its isolating characteristic. In Annex B of EN 12354-1, an “experimental mass law” is proposed which gives the R_W of a wall with a surface mass $m' > 150 \text{ kg/m}^2$ in the following form:

For the countries using the $R_W + C$ or $R_W + C_{tr}$, which are also called R_A and $R_{A,tr}$, the “experimental” mass laws are the following:

Behaviour of the sound reduction index as a function of the frequency

For a limp wall without any elasticity, the theoretical mass law takes the following form:

¹⁾ Es ist darauf hinzuweisen, dass für das Schalldämmmaß R in dB(A) in Frankreich die Messungen ebenfalls in Dritteloktav-Abständen, aber zwischen 4000 Hz und 5000 Hz durchgeführt werden. Für eine Reihe von Lautphänomenen kann sowohl der niedrig-frequente Schall von 50 Hz aufwärts als auch der hoch-frequente Schall bis zu 5000 Hz berücksichtigt werden, indem man die in EN ISO 717-1 beschriebenen Berechnungsarten anwendet.

²⁾ It must be noted that for the index R in dB(A) the measurements were achieved in France also with third-octaves centred at 4000 Hz and 5000 Hz. For a variety of noise phenomena, a low-frequency sound from 50 Hz upwards as well as the high-frequency sound up to 5000 Hz can be taken into account, using the calculations described in EN ISO 717-1.

welches $R_W + C = 10 + 20 \log_{10} m'$ und $R_W = 11 + 20 \log_{10} m'$ entspricht.

Der Unterschied zwischen dem theoretischen und dem experimentellen Massegesetz ergibt sich aus der Tatsache, dass das Flächengewicht der Wand nicht der einzige Einflussfaktor ist; ihre Festigkeit und die internen Verluste im Material stellen ebenfalls starke frequenzabhängige Einflüsse dar.

Trifft eine Luftschallwelle unter einem Winkel von $\neq 90^\circ$ auf eine Wand, so bewirkt die Spurlwelle eine Anregung der Wand mit gleicher Frequenz. Es entsteht eine so genannte erzwungene Biegewelle. Die Wellenlänge der erzwungenen Biegewelle entspricht der Spurlwellenlänge der einfallenden Schallwelle.

Erfolgt die Anregung so, dass diese erzwungene und die freie Biegewellenlänge der getroffenen Wand²⁾ übereinstimmen, so kommt es zu resonanzartiger Erhöhung der Schwingamplituden und Verminderung der Wanddämmung. Diese Bedingung ist im Bereich der so genannten kritischen Frequenz oder Koinzidenzfrequenz f_c der Wand erfüllt.

Die Koinzidenzfrequenz ist abhängig vom Flächengewicht, also Masse und Dicke der Wand, und von ihrer Biegefestigkeit.

Unterhalb der kritischen Frequenz f_c benimmt sich die Wand wie eine weiche Wand und verhält sich gemäß dem oben erwähnten theoretischen Massegesetz. Für eine Wand gegebenen Flächengewichts erhöht sich die Schalldämmung pro Dritteloktav-Intervall um 2 dB. Bei einem vorgegebenen Dritteloktav-Abstand erhöht sich das Schalldämmmaß der Wand um 6 dB, sobald ihr Flächengewicht verdoppelt wird.

Bei der kritischen Frequenz f_c richtet sich die Dämmung nach dem inneren Verlust im Wandbaustoff; niedrigere innere Dämpfung bewirkt stärkere Abnahme der Dämmung.

Oberhalb der kritischen Frequenz f_c bestimmen das Flächengewicht der Wand, ihre Festigkeit und ihre inneren Verluste das Ergebnis. Einen ungefähren Ansatz stellt die unten stehende empirische Formel dar:

$$R = R_{th} + 10 \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) + 10 \log_{10} (\eta_{int}) + 5,5 \text{ dB} \quad [5]$$

wobei R_{th} das theoretische Schalldämmmaß ist, η_{int} ist der innere Verlustfaktor des Wandmaterials.

Aus dem Vorstehenden wird deutlich, dass es nützlich ist, die kritische Frequenz einer einschaligen Wand bestimmen zu können.

For a homogeneous wall is the critical frequency

$$f_c = \frac{c^2}{(2\pi t)} \cdot \left(\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E} \right)^{1/2}, \text{ wobei } c \text{ die Schallgeschwindigkeit}$$

keit im die Wand umgebenden Medium, t die Dicke der Wand in m, ρ die Dichte des Wandbaustoffs in kg/m^3 , μ die Poisson-Rate des Materials und E der Young's (Elastizitäts-) Modulus des Materials ist.

Damit ist die kritische Frequenz einer Wand eines bestimmten Materials umgekehrt proportional zur Dicke. Das führt zur Definition der Koinzidenzkonstanten ($f_c \cdot t$), wobei f_c die kritische Frequenz in Hz und t die Dicke der Wand in m ist.

which corresponds to $R_W + C = 10 + 20 \log_{10} m'$ and $R_W = 11 + 20 \log_{10} m'$.

The difference between the theoretical and the experimental mass law is a consequence of the fact that the surface mass of the wall is not the only influence; its stiffness and the internal losses in the construction material also constitute strong frequency-dependent influences.

In case an airborne sound wave hits a wall under an angle $\neq 90^\circ$, its track wave incites the same frequency in the wall. The result is a so-called forced bending wave. The wave length of the forced bending wave is the same as that of the track wave of the airborne sound.

In case the incitement is such that this forced and the free bending wave length of the hit wall²⁾ are identical, a resonance type of increase of the wave amplitude results and a reduction of the wall insulation. This condition occurs in the area of the so-called critical frequency or frequency of coincidence f_c of the wall.

The frequency of coincidence is dependent upon the weight per area unit of the wall, i. e. its mass and thickness, and upon its flexural rigidity.

Below the critical frequency f_c , the wall behaves like a soft wall and is governed by the theoretical mass law mentioned above. For a wall of a given surface mass, the sound reduction increases by 2 dB per third-octave interval. For a given third-octave interval, the index for the wall increases by 6 dB when the mass of the wall is doubled.

At the critical frequency f_c , the insulation is governed by the internal losses in the wall material; lower internal damping causes greater reduction in the insulation.

Above the critical frequency f_c , the wall is governed by its surface mass, its stiffness and its internal losses. A provisional approach is found by the following empirical formula:

where R_{th} is the theoretical sound reduction index and η_{int} is the internal loss factor in the material of the wall.

What has been shown above demonstrates that it is useful to be able to determine the critical frequency for a single wall.

For a homogeneous wall, the critical frequency is

$$f_c = \frac{c^2}{(2\pi t)} \cdot \left(\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E} \right)^{1/2}, \text{ where } c \text{ is the sound speed in the}$$

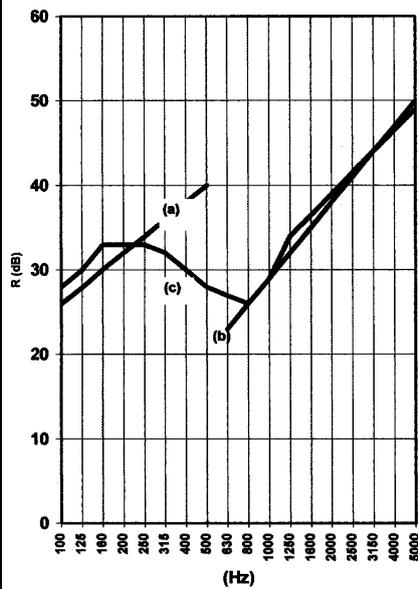
medium surrounding the wall, t the thickness of the wall in m, ρ the density of the wall material in kg/m^3 , μ the Poisson ratio and E the Young's (elasticity) modulus of the material.

Thus, the critical frequency for a wall of a given material is inversely proportional to the thickness of that wall. This leads to the definition of a coincidence constant ($f_c \cdot t$), where f_c is the critical frequency in Hz and t the thickness of the wall in m.

²⁾ Die freie Biegewelle ist die material- und dimensionsabhängige charakteristische Wellenform in Platten und Wänden.

²⁾ The free bending wave is a typical wave form in boards and walls, dependent upon material and dimensions.

³⁾ angepasste Formel aus CSTB „Acoustique“ – Band II / adapted formula from CSTC “Acoustique” – volume II



Gipswand mit einer Dicke von 0,05 m

Gypsum wall of 0,05 m thickness

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_{\text{int}} = 0,004$$

$$\mu = 0,15$$

$$f_c = 770 \text{ Hz}$$

- | | |
|---|---|
| a) theoretisches Schalldämmmaß R_{th} | a) theoretical sound reduction index R_{th} |
| b) Schalldämmmaß R oberhalb der kritischen Frequenz f_c | b) sound reduction index R above the critical frequency f_c |
| c) Messergebnis | c) measured result |

Bild 3: Beispiel für den Gebrauch der Vorhersageformeln

Figure 3: Example for the use of the prediction formulae

In diesem Beispiel ist die Koinzidenzkonstante ($f_c \cdot t$) des benutzten Gipses für diese Zwischenwand $38,5 \text{ Hz} \cdot \text{m}$, was einer kritischen Frequenz f_c von 770 Hz für eine Gipsstrennwand von 0,05 m Dicke entspricht.

In this example, the coincidence constant ($f_c \cdot t$) of gypsum used for that partition is $38,5 \text{ Hz} \cdot \text{m}$ which corresponds to a critical frequency f_c of 770 Hz for a gypsum partition of 0,05 m thickness.

Bewertetes Schalldämmmaß für einschalige Wände

Weighted sound reduction index for single walls

In Tabelle 1 sind die meisten Schalldämmmaße durch Labormessungen ermittelt worden, die gemäß EN ISO 140-3 durchgeführt wurden.

In Table 1, most of the sound reduction indices are based on results obtained in laboratories, measured according to EN ISO 140-3.

Material	Dicke t Thickness t in m	m' in kg/m ²	f _c in Hz	R _w in dB	R _w + C (R _A) in dB	R _w + C _{tr} (R _{A,tr}) in dB
Beton Concrete	0,10	235	200	48	47	42
	0,12	280	170	51	50	45
	0,14	330	145	54	52	48
	0,15	350	135	55	53	49
	0,16	375	125	57	55	51
	0,17	400	118	58	56	52
	0,18	423	112	59	57	53
	0,19	445	106	60	58	54
	0,20	470	100	60	59	54
	0,21	495	96	61	60	55
	0,22	515	92	62	61	56
	0,23	540	87	63	61	57
0,24	565	84	64	63	58	
0,25	590	81	65	63	59	
Nutplatten 160U, nicht beschichtet Socket slabs 160U, not coated	0,16	283		56	54	50
Nutplatten 265W, nicht beschichtet Socket slabs 265, not coated	0,265	350		59	58	55
Nutplatten 200W+0,08 Socket slab 200W+0,08	0,28	430		64	63	59
Nutplatten 265W+0,06 Socket slabs 265W+0,06	0,325	500		63	62	58
Gasbetonblöcke Gas concrete blocks	0,15	110	400	40	39	36
	0,20	145	360	44	43	41
	0,25	180	320	48	47	44
Hohlbetonblöcke Hollow concrete blocks	0,10	150	300	43	42	40
	0,125	185	270	45	44	42
	0,15	220	250	48	47	45
	0,175	250	200	52	51	48
Einfachbetonblöcke Plain concrete blocks	0,10	240	320	50	49	46
	0,125	285	250	53	52	49
Perforierte Betonblöcke Perforated concrete blocks	0,15	330	200	56	55	51
	0,17	375	180	59	57	54
	0,20	420	160	62	61	57
Einfachblöcke aus Leichtbeton Plain blocks of lightweight concrete	0,15	250	250	51	50	45
	0,20	310	200	54	53	49
Hohlziegel Hollow bricks	0,05	60	700	32	32	31
	0,07	70	500	34	34	32
	0,10	150	500	40	40	38
	0,15	200	400	46	45	42
	0,20	250	315	52	51	49
Lochziegel Bricks perforated	0,22	330	160	55	54	51
Einfache Ziegel Plain bricks	0,11	210	400	45	44	42
	0,22	410	250	59	58	55
Gipstrennwände Gypsum partitions	0,05	50	800	32	32	30
	0,07	70	600	35	34	33
	0,10	100	400	38	37	35
Gipstrennwände THD Gypsum partitions THD	0,07	90	600	37	36	34
	0,10	130	400	40	39	37
Stahlblech Steel sheet	0,001	8	12000	32		
	0,0035	28	3400	39		
	0,007	55	1714	35		
Aluminiumblech Aluminium sheet	0,0005	1	24000	19		
	0,002	5	6000	24		
	0,0095	9	4200	29		
Gipsplatten Gypsum board	0,0125	11	3200	30		
	0,018	16	2200	31		

Tabelle 1: Gewichtete Schalldämmmaße, Laborwerte

Table 1: Weighted sound reduction indices, laboratory values

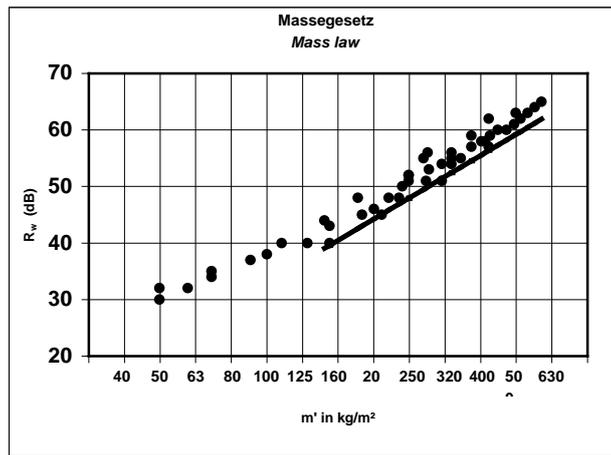


Bild 4: Vergleich zwischen gemessenen R_w [schwarze Punkte gemäß Tabelle 1] und R_w , ermittelt gemäß EN 12354-1 unter Benutzung der Formel [4] [Linie]. Die Berechnungsergebnisse liegen auf der sicheren Seite, d. h. unterhalb der Messwertwolke. Dies gilt auch für die Werte aus Anhang B der EN 12354-1, die ebenfalls um etwa 2 dB unter denen aus Tabelle 1 liegen.

Figure 4: Comparison between measured R_w [black dots according to Table 1] and R_w calculated according to EN 12354-1 using the formula [4] [line]. The calculation results lie on the safe side below the cloud of measured values. This too applies to the values given in Annex B of EN 12354-1 which are also about 2 dB below those of Table 1.

Anmerkung: Wenn eine einschalige Wand das Schalldämmmaß aufweisen soll, welches das Massegesetz erwarten lässt, muss sie luftdicht sein, um alle anderen Möglichkeiten der Schallausbreitung auszuschließen.

Note: If a single wall is intended to give the sound reduction index, which the mass law leads to expect, it must be air-tight to exclude all other avenues of sound propagation.

A3-3.3.1.2 Rohrleitungen

Wie für ebene Wände weisen auch Rohrleitungen natürliche Frequenzen auf, die vom Material, dem Medium und den Abmessungen abhängen.

Entspricht der Rohrumfang der Longitudinalwellenlänge, ergibt sich die so genannte Ringdehnfrequenz wie folgt:

$$f_r = \frac{c_L}{\pi \cdot d_i} \quad [7]$$

wobei c_L die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle in der Rohrwandung in m/s ist (siehe Tabelle 10), d_i ist der innere Rohrdurchmesser in m.

Der Rohrdurchmesser und die Eigenschaften des Fluids führen zu verschiedenen Wellen- bzw. Schwingungsformen mit den so genannten Grenzfrequenzen:

$$f_{ln} = k_n \frac{c_F}{\pi \cdot d_i} \quad [8]$$

wobei f_n die Grenzfrequenz ist, k_n sind modulare Faktoren 1,84 / 3,05 / 3,83 / 4,2 / 5,33 / 6,71, c_F ist die Schallgeschwindigkeit im Fluid innerhalb der Rohrleitung in m/s und d_i ist der innere Rohrdurchmesser in m.

A3-3.3.1.2 Pipes

As for plane walls, pipes have also natural frequencies depending on the material, medium and dimensions.

If the pipe circumference corresponds to the longitudinal wavelength, the so-called circumferential resonance frequency results:

where c_L is the velocity of longitudinal waves in the pipe wall in m/s (see Table 10), d_i is the pipe interior diameter in m.

The pipe diameter and the material characteristics of the fluid medium lead to different forms of waves and vibrations with the so-called limiting frequencies:

where f_n is the limiting frequency, k_n are modular factors 1,84 / 3,05 / 3,83 / 4,2 / 5,33 / 6,71, c_F is the sound speed in the fluid medium inside the pipe in m/s and d_i is the pipe interior diameter in m.

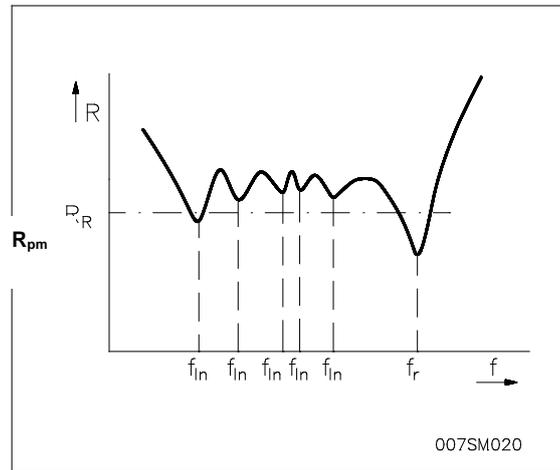


Bild 5: Prinzipielle Kurve der Schalldämmung einer Rohrleitung

Figure 5: Fundamental curve of the sound insulation of a pipe

Die Schalldämmeigenschaften einer Rohrwandung im mittleren Frequenzbereich R_{pm} werden für gasgefüllte Rohre ($d_i/t > 10$) wie folgt ermittelt:

The sound reduction properties of a pipe wall in the medium frequency range R_{pm} is estimated for gas-filled pipes ($d_i/t > 10$) from:

$$R_{pm} \approx C + 10 \log_{10} \frac{c_L \cdot m'_R}{\rho_F \cdot c_F \cdot d_i} \quad [9]$$

mit $C = 10$ dB; c_L ist die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen in der Rohrwandung in m/s, m'_R ist das Flächengewicht der Rohrleitung in kg/m^2 , ρ_F ist die Dichte des Mediums in kg/m^3 , c_F ist die Schallgeschwindigkeit im Fluid in m/s, d_i ist der innere Rohrdurchmesser in m und t die Rohrwandungsdicke in m.

with $C = 10$ dB; c_L is the velocity of longitudinal waves in the pipe wall in m/s, m'_R is the weight per unit area of the pipe in kg/m^2 , ρ_F is the density of the fluid medium in kg/m^3 , c_F is the sound speed in the fluid medium in m/s, d_i is the pipe interior diameter in m and t the pipe wall thickness in m.

Die spektrale Verteilung bei Breitbandstörgeräuschen ergibt sich dann durch:

The spectral distribution in case of broad-band disturbance noise then follows:

$$R = 10 \log_{10} \frac{c_L \cdot \rho_p \cdot t}{c_F \cdot \rho_F \cdot d_i} + A(f) + C \quad [10]$$

$$\text{für } f \leq f_r: A(f) = 20 \log_{10} \frac{f_r}{f} \text{ dB}$$

$$\text{for } f \leq f_r: A(f) = 20 \log_{10} \frac{f_r}{f} \text{ dB}$$

$$\text{für } f > f_r: A(f) = 30 \log_{10} \frac{f_r}{f} \text{ dB}$$

$$\text{for } f > f_r: A(f) = 30 \log_{10} \frac{f_r}{f} \text{ dB}$$

A3-3.3.2 Zweischalige Wände

A3-3.3.2 Double walls

Zweischalige Wände werden aus zwei einschaligen Wänden gebildet, die durch eine Luftschicht oder durch einen Dämmstoff getrennt sind (Mineralwolle, Schäume, usw.).

Double walls are formed by two single walls separated by an air layer or by insulation material (mineral wool, plastic foams, etc.).

A3-3.3.2.1 Ebene Wände

A3-3.3.2.1 Plane walls

Die frequenzabhängige Kurve des Schalldämmmaßes einer zweischaligen Wand zeigt verschiedene Bereiche, in denen eine Abnahme der Dämmleistung (reduzierte Dämmwerte) auftreten:

The frequency-dependent curve of the sound reduction index of a double wall shows several occasions where one notes a reduction in performance (reduced insulation values):

- Reduzierte Dämmwerte ergeben sich in Bereichen der Koinzidenzfrequenzen (kritische Frequenzen f_c) der Einzelschalen. Es sollte beachtet werden, dass die kritische Frequenz für schwere Wände im niedrigeren Frequenzbereich liegt. Für leichte und starre Wände (Gipstrennwände, dünne Hohlziegel, usw.) ergeben sich kritische Frequenzen ungünstigerweise im Mittelfrequenzbereich. Bei sehr leichten Trennwänden (häufig als weiche Trennungen bezeichnet, wie Gipskartonplatten, Bleche) liegen die kritischen Frequenzen deshalb über 2000 Hz.

- Reduced insulation values occur in the areas of the frequencies of coincidence (critical frequencies f_c) of the individual partitions. It should be remembered that for heavy walls the critical frequencies are in the low area. For light and rigid walls (gypsum partitions, thin hollow bricks, etc.), the critical frequencies are badly situated in the medium frequency range. For very light partitions (frequently called limp partitions such as gypsum wall boards, sheets), the critical frequencies are above 2000 Hz.

- Minderung des Dämmeffekts tritt in Bereichen von Resonanzfrequenzen der Luftschicht auf, wenn der Spalt zwischen den Schalen nicht mit einem absorbierenden Material gefüllt ist, welches im Hochfrequenzbereich gut dämmt. Die Luftschichten, deren Dicke über 20 cm liegt, haben tatsächliche Resonanzfrequenzen $f_{dn} = \frac{(170 \cdot n)}{d}$, wobei d die Spaltbreite in m und n eine Konstante mit den Werten 1, 2, 3, ... ist. Mit $d = 0,02$ m tritt eine Resonanz bei der Grundfrequenz $f_{d1} = 8500$ Hz und seinen Vielfachen $f_{d2} = 2 \cdot f_{d1}$, $f_{d3} = 3 \cdot f_{d1}$, ... auf. Wenn ein absorbierendes Material in den Luftraum montiert wird, werden diese Dämmverluste unterdrückt.
- Minderung des Dämmeffekts bei einer Resonanzfrequenz, die von der Tatsache herrührt, dass die zwei Schalen und das Material dazwischen ein „Masse-Feder-Masse“-System bilden. Diese Resonanzfrequenz f_0 hat die Formel $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{M}}$, wobei s' die Steifigkeit der „Feder“, d. h. des Materials zwischen den beiden Schalen und M die äquivalente Masse der zweischaligen Wand ist. Für 1 m^2 der Wand gilt: $s = \frac{E}{d}$ in N/m^3 , wobei E das Elastizitätsmodul des Materials und d der Schalenabstand in m ist. Die äquivalente Masse der zweischaligen Wand ergibt sich aus $\frac{1}{M'} = \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, wobei m'_1 und m'_2 die Flächengewichte in kg/m^2 sind. Bei einer Luftschicht oder einer Dämmmatte, die den Zwischenraum nicht vollständig ausfüllt, wodurch wiederum ein Luftspalt entsteht, gilt:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [11]$$

Diese Formel gilt nur, wenn die Schallwellen eben sind und parallel zur zweischaligen Wand verlaufen, d. h. dass die Schallausbreitungsrichtung senkrecht auf der zweischaligen Wand steht.

Da Schallwellen normalerweise aus vielen verschiedenen Richtungen auf die Wand auftreffen (entspricht dem diffusen Schallfeld in Senderäumen von Laboratorien), wird die folgende Formel benutzt:

$$f_0 = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [12]$$

Um das Schalldämmmaß einer einschaligen Wand zu erhöhen, unabhängig davon, ob sie schwer oder leicht ist, benutzt man akustische Zusatzlagen aus dünnen Platten (häufig Gipskarton), die von der eigentlichen Wand durch eine Schicht Dämmstoff getrennt sind (Mineralwolle oder Weichschaum).

Auf diese Weise entsteht eine zweischalige Wand, deren beide Schalen sowohl bezüglich ihres Flächengewichts als auch ihrer kritischen Frequenz sehr unterschiedlich sind. Wie bei zweischaligen Wänden mit Luftschicht ergibt sich auch hier eine Resonanzfrequenz f_0 eines „Masse-Feder-Masse“-Systems.

Ist die zusätzliche Schale direkt und fest mit der eigentlichen Wand verbunden, folgt:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \cdot \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [13]$$

- Decreases of insulation occur in the area of the resonance frequencies of the air layer, if the space between the partitions is not filled by an absorbing material which is effective at high frequencies. Actually, the air layers, the thickness of which is rarely above 20 cm, have resonance frequencies $f_{dn} = \frac{(170 \cdot n)}{d}$, where d is the width of the space in m and n is an integer which can have the values, 1, 2, 3, For $d = 0,02$ m, a resonance occurs at the fundamental frequency $f_{d1} = 8500$ Hz, and at its multiples $f_{d2} = 2 \cdot f_{d1}$, $f_{d3} = 3 \cdot f_{d1}$, When one places an absorbing material in the air space, these insulation decreases are suppressed.

- Loss of insulation effect at a resonance frequency, resulting from the fact that the two walls and the product in between form a system of the type "mass-spring-mass". This resonance frequency f_0 has the form $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{M}}$, where s' is the stiffness of the "spring", i. e. of the material in between the two partitions and M the equivalent mass density of the double wall. For 1 m^2 of the wall applies: $s = \frac{E}{d}$ in N/m^3 , where E is the Young's (elasticity) modulus of the material and d the width of the space between the partitions in m. The equivalent mass per area of the double wall is $\frac{1}{M'} = \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, where m'_1 and m'_2 are the masses per area in kg/m^2 of the two partitions. In case of an air layer or of a fibre mattress, which does not completely fill the space between the partitions, leaving an open air layer, it is:

This formula is only applicable if the acoustic waves are plane and parallel to the double wall, which means that the direction of the sound propagation is perpendicular to the double wall.

Since sound waves generally arrive from many different directions (reflecting the diffuse acoustic field in laboratories), the following formula is used:

To improve the sound reduction index of a single wall, regardless whether heavy or light, one uses the acoustical covers made of a thin partition (frequently a gypsum wall board) de-coupled from the wall support by an insulation material (mineral wool or soft cellular foam).

In this way, a double wall is constructed, the individual partitions of which are very different both regarding their surface mass and their critical frequency. As for double walls with air spaces, the resonance frequency f_0 of a "mass-spring-mass" system results.

In case the additional wall is directly and firmly cemented to the supporting wall, it follows:

wobei s' die dynamische Steifigkeit der isolierenden Zwischenschicht (siehe auch EN 29052-1), m'_1 und m'_2 die Flächengewichte der eigentlichen Wand und der zusätzlichen Schale sind.

Ist die zusätzliche Schale getrennt von der eigentlichen Wand auf einer Unterkonstruktion montiert, ist:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [14]$$

wobei d die Breite des Zwischenraums in m ist.

Bei diffusem Schallfeld im Senderraum können die Werte für die Resonanzfrequenz f_0 mit 1,4 multipliziert werden.

Normalerweise versucht man, dünne zusätzliche Schichten auszuführen. Das führt jedoch zu Resonanzfrequenzen (Einbrüche in der Dämmung), die sich möglicherweise im interessierenden Frequenzbereich (über 90 Hz) bewegen.

Hinsichtlich der Schalldämmung und für Frequenzen $f < f_0$ verhält sich die Wand wie eine einschalige Wand ohne Elastizität:

$$R_1 = 20 \log_{10} [(m'_1 + m'_2) \cdot f] - 48 \text{ (dB)} \quad [15]$$

Für die Frequenzen $f = f_0$ ergibt sich:

$$R(f_0) = R_1 - F(\eta_{\text{int}}) \text{ (dB)} \quad [16]$$

wobei $F(\eta_{\text{int}})$ ein Faktor ist, der von den inneren Verlusten des Materials zwischen den Schalen abhängig ist.

Einige Beispiele für η_{int} -Werte für Dämmstoffe sind in Tabelle 10 angegeben.

where s' is the dynamic stiffness of the isolating cushions (see also EN 29052-1), m'_1 and m'_2 are the surface masses of the supporting wall and the additional layer.

In case the combination is mounted on a sub-construction independent of the supporting wall, it follows:

where d is the thickness of the hollow space in m.

If the acoustical field in the source room is diffuse, the values of the resonance frequency f_0 may be multiplied by 1,4.

Generally, one tries to use thin systems of lining. This leads possibly to resonance frequencies (breaches in the insulation) in the important area of the frequencies (above 90 Hz).

For the frequencies $f < f_0$, the wall behaves regarding sound insulation like a single wall without elasticity:

For the frequencies $f = f_0$ applies:

where $F(\eta_{\text{int}})$ is a factor dependent upon the internal losses of the material between two walls.

Some examples of η_{int} values for insulation materials are given in Table 10.

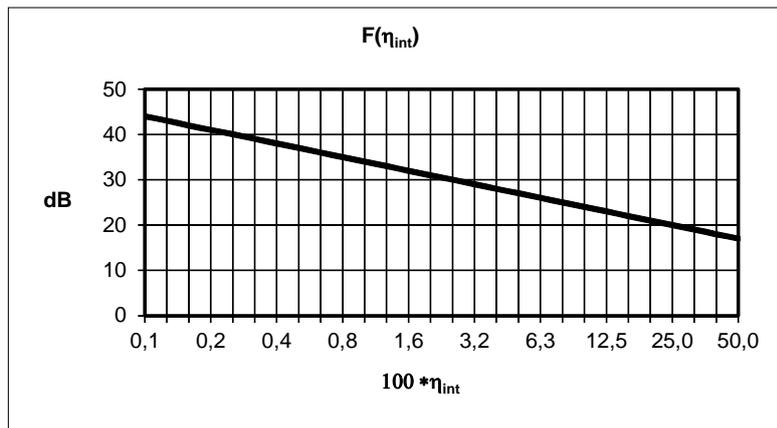


Bild 6:

Für $f > f_0$ nimmt die Schalldämmung rapide zu, so dass sich die Kurve der Schalldämmmaße von zweischaligen Wänden gemäß Bild 7 einstellt.

Figure 6:

For $f > f_0$, the sound reduction increases very rapidly, resulting in a curve of sound reduction indices of a double wall as shown in Figure 7.

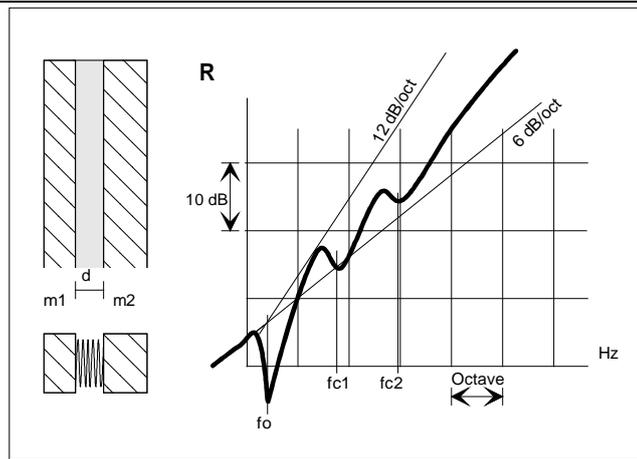


Bild 7: Schalldämmmaß einer zweischaligen Wand – beginnend mit einem Verlauf gemäß dem theoretischen Massegesetz (Linie 6 dB/Oktave) im Bereich der Resonanzfrequenz, liegt die Kurve im Allgemeinen unter der Linie 12 dB/Oktave

Figure 7: Sound reduction index of a double wall – Starting in a form corresponding to the theoretical mass law (line 6 dB/octave) in the area of the resonance frequency, the curve is generally below the line 12 dB/octave

Man kann vier generelle Kategorien von zweischaligen Wänden unterscheiden:

One can distinguish four general categories of double walls:

- Zweischalige Wände mit schweren Schalen: Normalerweise ist das Schalldämmmaß zwischen 2 dB bis 3 dB größer als das berechnete Maß, das sich gemäß dem experimentellen Massegesetz für eine einschalige Wand ergibt, wobei das gesamte Flächengewicht der zweischaligen Wand berücksichtigt werden muss.
- Zweischalige Wände aus zwei leichten und starren Schalen: Dämmverlust im Mittelfrequenzbereich als Konsequenz der kritischen Frequenzen der Schalen resultiert in einem Schalldämmmaß, welches kleiner ist als das einer einschaligen Wand von derselben Masse.
- Zweischalige Wand aus weichen, leichten Schalen: Die kritischen Frequenzen liegen im Hochfrequenzbereich. Dadurch kann das Gesamtschalldämmmaß deutlich über demjenigen liegen, welches aus dem Massegesetz für die beiden Schalen folgen würde. Da die Wand leicht ist, ist das sich aus dem Massegesetz ergebende Schalldämmmaß relativ niedrig. Um die Wirkung dieser Art von zweischaligen Wänden zu verbessern, muss man ihre Masse erhöhen, ohne die kritischen Frequenzen abzusenken, die der Dicke der Wand umgekehrt proportional sind. Um dies zu erreichen, können beide Schalen aus verschiedenen Platten zusammengesetzt werden (Aufkleben „biegeweicher“ Materialien wie Bitumenpappen, usw.). Auf diese Weise behält jede Platte ihre eigene hohe kritische Frequenz und die Masse der Schale ist dennoch ausreichend gesteigert, um deutlich angehobene Schalldämmmaße zu erreichen.
- Zweischalige Wände aus einer schweren oder mittelschweren starren Schale und mit einer leichten Schale: „Vorsatzschalen“ können das Schalldämmmaß der Grundwand erhöhen oder vermindern.
- Double walls with heavy partitions: Generally, the sound reduction index is between 2 dB and 3 dB above that one calculated from the experimental mass law of a single wall, but taking into consideration the surface mass of the entire double wall.
- Double walls with two rigid and light partitions: The loss of insulation in the medium frequencies, as a consequence of the critical frequencies of the partitions, results in a sound reduction index which is smaller than that of a single wall of the same mass.
- Double walls consisting of soft and light partitions: The critical frequencies are at high frequencies. So, the index of overall sound reduction could be much superior to that resulting from the mass law of the two combined wall masses. However, since the wall is light, the index corresponding to the mass law is relatively low. To improve the efficiency of this sort of double walls, one must increase their mass without reducing the critical frequencies which are inversely proportional to the thickness of the material. To achieve this, each partition of the double wall is made of several layers (gluing of soft materials onto the surface such as bitumen cast board, etc.). In this way, each board keeps its own elevated critical frequency and the mass of the partition is sufficiently increased to obtain the results of quite elevated indices of sound reduction.
- Double walls consisting of one partition rigid and heavy or medium-heavy and the other light: “Lining partitions” can increase or decrease the sound reduction index of the partition.

Bestimmung der Schalldämmung zweischaliger Wände

Bei Bestimmung der Schalldämmung zweischaliger Wände gilt:

$$R_1 = R + \Delta R$$

wobei R_1 die Gesamtdämmung der zweischaligen Wand, R die Dämmung der Grundwand gemäß Kapitel A3-3.3.1 und ΔR das Verbesserungsmaß durch die zweite Schale ist.

Zweischalige Wände in Gebäuden

Das frequenzabhängige Schalldämmmaß R_1 einer zweischaligen Wand kann wie folgt abgeschätzt werden:

Determination of the sound insulation of double walls

For the determination of sound insulation of double walls applies:

$$[17]$$

where R_1 is the total insulation of the double wall, R the insulation of the basic wall according to chapter A3-3.3.1 and ΔR the improvement index caused by the second partition.

Double walls in buildings

The frequency-dependent sound reduction index R_1 of a double wall system can be estimated as follows:

EN 12354-1 empfiehlt in ihren informativen Anhängen B und D, das frequenzabhängige Luftschallverbesserungsmaß ΔR der zweiten Schale zu dem frequenzabhängigen Schalldämmmaß R der Grundwand hinzuzufügen.
Dieselbe Methode kann ein Einzahlwerten benutzt werden, wodurch sich die folgende Funktion ergibt:

$$R_{1W} = R_W + \Delta R_W \quad [18]$$

Typische Beispiele für die Luftschallverbesserungsmaße ΔR und ΔR_W sind in den Tabellen 2 und 3 angegeben.

EN 12354-1 recommends in its informative Annexes B and D to add the frequency-dependent airborne sound-improvement index ΔR of the wall lining to the frequency-dependent sound reduction index R of the basic wall.
The same method can be applied to the single-number values which leads to the following function:

Characteristic examples for airborne sound-improvement indices ΔR and ΔR_W are given in Tables 2 and 3.

Aufbau der Vorsatzschale <i>Structure of the wall lining</i>	ΔR [dB] in Oktavbändern [Hz] <i>ΔR [dB] in octave bands [Hz]</i>						ΔR_W [dB]
	63	125	250	500	1 k	2 k	
Grundwand, 100 mm Zementbausteine, 80 kg/m² <i>Reference wall, 100 mm plaster building blocks, 80 kg/m²</i>							
12,5 mm Putzplatte, geputzt; 44 mm Hohlraum mit 25 mm Mineralwolle, ohne Bolzen <i>12,5 mm plasterboard plate, plastered; 44 mm void space with 25 mm mineral wool, without bolts</i>	0	2	14	23	24	19	18
12,5 mm Putzplatte, geputzt; 73 mm Hohlraum mit 50 mm Mineralwolle; Holzschrauben <i>12,5 mm plasterboard plate, plastered; 73 mm void space with 50 mm mineral wool; wood screws</i>	2	8	15	23	25	21	21
12,5 mm Putzplatte, geputzt; 60 mm Hohlraum mit Mineralwolle; metallische Unterkonstruktion ohne Verbindung zur Wand <i>12,5 mm plasterboard plate, plastered; 60 mm void space with mineral wool; metal substructure without connection to wall</i>	2	8	15	24	25	20	21
Grundwand, 175 mm Leichtbeton, geputzt, 135 kg/m² <i>Reference wall, 175 mm lightweight concrete, plastered, 135 kg/m²</i>							
12,5 mm Putzplatte, geputzt; 40 mm Mineralwolle; metallische Unterkonstruktion <i>12,5 mm plasterboard plate, plastered; 40 mm mineral wool; metallic substructure</i>	3	12	14	15	17	15	15
Grundwand, 100 mm Kalksandsteine, 180 kg/m² <i>Reference wall, 100 mm sandlime bricks, 180 kg/m²</i>							
2 mm x 12,5 mm Gipskartonplatte; 20 mm Leichtbeton; ohne Unterkonstruktion <i>2 mm x 12,5 mm plasterboard plate; 10 mm lightweight concrete; without substructure</i>	2	5	19	30	41	42	23

Tabelle 2: Luftschallverbesserungsmaß ΔR von Vorsatzschalen (Beispiele gemäß EN 12354-1)

Table 2: Airborne sound-improvement index ΔR of wall linings (examples according to EN 12354-1)

Resonanzfrequenz f_0 der Vorsatzschale <i>Resonance frequency f_0 of wall lining</i> in Hz	ΔR_W in dB
≤ 80	$35 - \frac{R_W}{2}$
100	$32 - \frac{R_W}{2}$
125	$30 - \frac{R_W}{2}$
160	$28 - \frac{R_W}{2}$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
630 bis / up to 1600	-10
> 1600	-5

Tabelle 3: Bewertetes Luftschallverbesserungsmaß durch eine Vorsatzschale in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz f_0

Table 3: Weighted airborne sound-improvement index by a shell construction in dependence of the resonance frequency f_0

Anmerkung 1: Für Resonanzfrequenzen unter 200 Hz ist der Mindestwert für ΔR_W 0 dB.

Anmerkung 2: Für die Zwischenresonanzfrequenzen können die Werte aus dem Logarithmus der Frequenz durch lineare Interpolation gewonnen werden.

Für Resonanzfrequenzen $f_0 \leq 160$ Hz ist das Verbesserungsmaß eine Funktion des Schalldämmmaßes R_W der Grundwand. Die Verbesserungen sind umso größer, je niedriger f_0 wird.

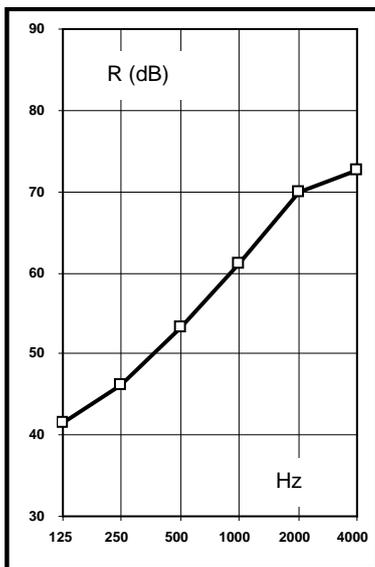
Anders verhält es sich für kritische Frequenzen f_0 oberhalb 160 Hz: dort ist die „Verbesserung“ negativ, d. h. mit zu starren und dünnen Vorsatzschalen riskiert man, das Schalldämmmaß der Grundwand zu verschlechtern. Das geschieht häufig bei Benutzung steifer Dämmstoffe, wie Polyurethan-, Extruder (XPS)-Hartschaum und gelegentlich auch bei expandiertem Polystyrolschaum (EPS). Um jedoch „Verbesserungen anstelle von Verlusten“ zu erreichen, sind Produkte wie Mineralwolle oder flexible Polystyrole zu verwenden. Entsprechende Effekte sind in den nachstehenden Bildern demonstriert.

Note 1: For resonance frequencies below 200 Hz, the minimum value of ΔR_W is 0 dB.

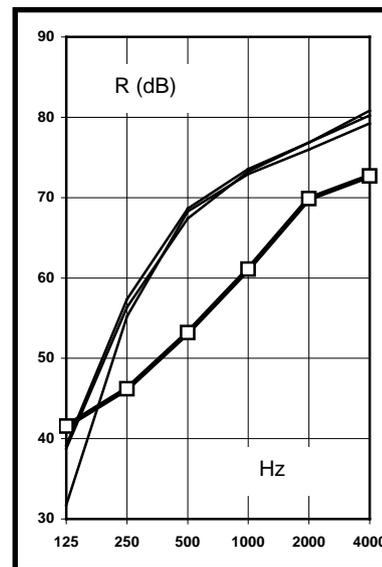
Note 2: For the intermediate resonance frequencies, the values can be derived from the frequency logarithm by linear interpolation.

For resonance frequencies $f_0 \leq 160$ Hz, the improvement index is a function of the sound reduction index R_W of the support. The improvements are the greater, the lower f_0 becomes.

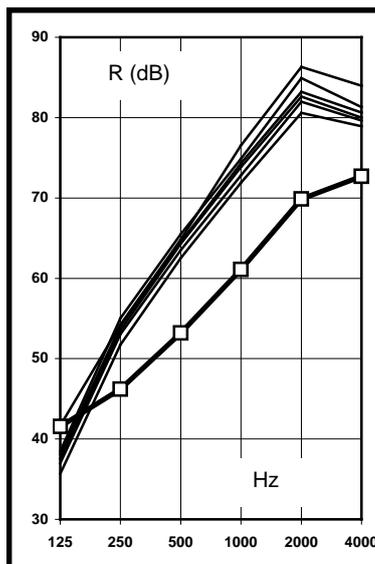
Inversely, for resonance frequencies f_0 above 160 Hz, the „gains“ are negative, i. e. with too rigid and too thin insulation linings, one risks degrading the performance compared to that of the unprotected wall. This frequently happens if one uses rigid insulation materials, such as rigid polyurethane or extruded polystyrene foam (XPS). It also occurs occasionally with expanded polystyrene foam (EPS). To have a chance of „gains instead of losses“, one must select products like mineral wool or flexible polystyrenes. This effect is illustrated in the figures below.



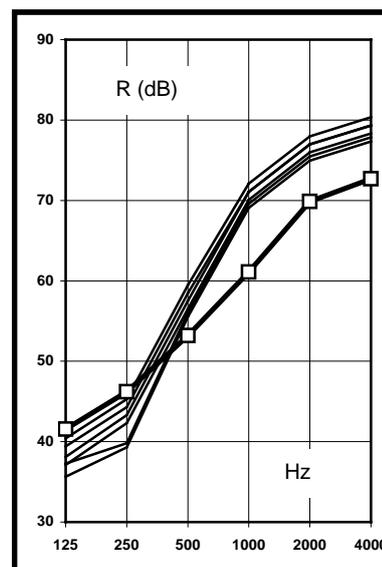
16 cm Beton
16 cm concrete
 $R_W + C = 56$ dB



16 cm Beton und Vorsatzschale mit flexibler Polystyrol-Zwischenlage
16 cm concrete with lining and flexible polystyrene intermediate layer
 $R_W + C = 55$ dB bis / up to 62 dB



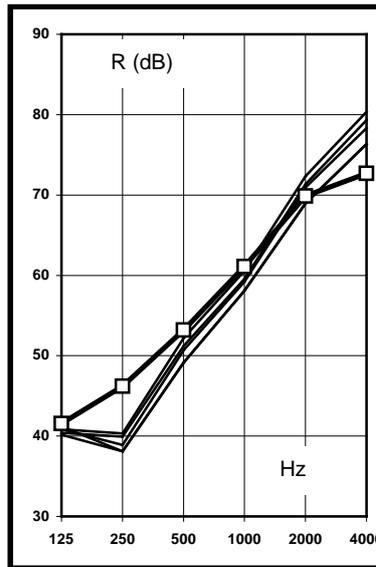
16 cm Beton und Vorsatzschale mit Mineralwolle-Zwischenlage
16 cm concrete with lining and mineral wool intermediate layer
 $R_W + C = 57$ dB bis / up to 63 dB



16 cm Beton und Vorsatzschale mit Standard-Polystyrol-Zwischenlage

16 cm concrete with lining and standard polystyrene intermediate layer

$R_W + C = 52 \text{ dB}$ bis / up to 57 dB



16 cm Beton und Vorsatzschale mit XPS- oder Polyurethan-Zwischenlage
16 cm concrete with lining and XPS or polyurethane intermediate layer

$R_W + C = 50 \text{ dB}$ bis / up to 53 dB

Einen Sonderfall stellt die Wabenkonstruktion: Wand aus zwei Gipskartonplatten, die durch eine Wabenstruktur getrennt sind, dar:

A special case is the honeycomb construction: a wall made of two gypsum boards which are separated by a honeycomb structure:

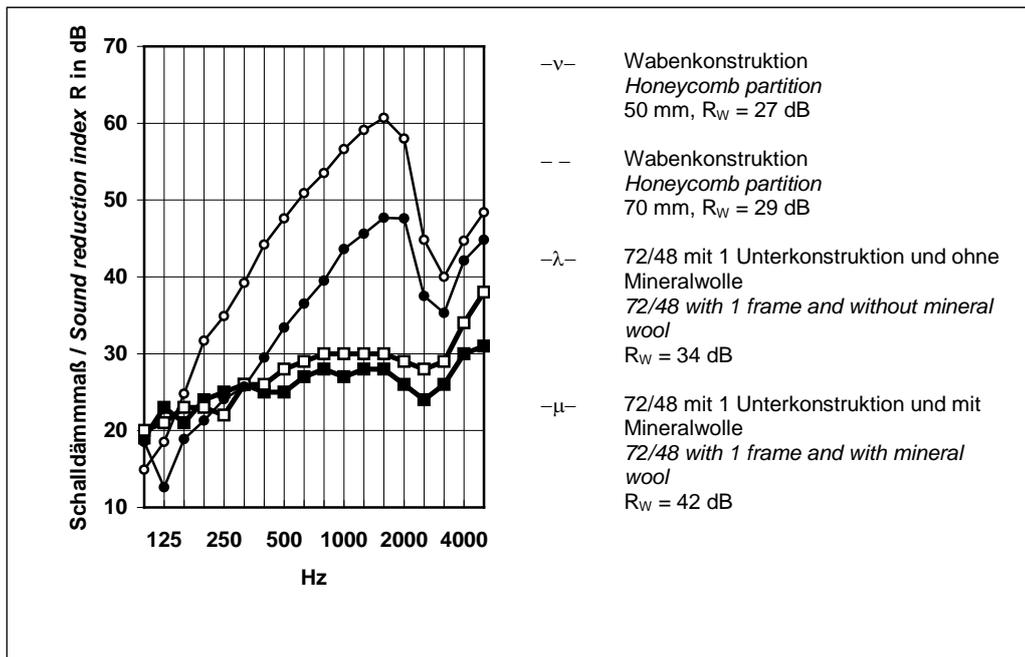


Bild 8: Vergleich zwischen Wabenstruktur-Wand und Doppelwand

Figure 8: Comparison between honeycomb structure and double wall

Hinsichtlich der Schalldämmung zwischen Räumen ergeben sich durch eine ebene Doppelwand mit nur einer Unterkonstruktion, selbst wenn sie ohne Mineralwolle ausgeführt ist, bessere Ergebnisse als durch eine Wabenkonstruktion.

For sound insulation between rooms, a flat double wall with one frame, even without mineral wool, gives a better result than honeycomb partitions.

Bewertete Schalldämmmaße von zweischaligen Wänden

Die Schalldämmmaße in Tabelle 4 sind vornehmlich Ergebnisse von Labormessungen, die gemäß EN ISO 140-3 durchgeführt worden sind.

Die erste Spalte gibt die in Frankreich benutzte generelle Bezeichnung an.

Weighted sound reduction indices of double walls

The sound reduction indices given in Table 4 are predominantly the results of laboratory measurements which have been executed in accordance with EN ISO 140-3.

The first column gives the general denomination used in France.

Eine 1 in der zweiten Spalte bedeutet, dass die beiden Schalen auf einer Unterkonstruktion montiert sind, die sie fest verbindet (Einfachständer-Wand). Die 2 bedeutet, dass jede Schale auf einem unabhängigen Rahmen montiert ist (Doppelständer-Wand), wodurch die beiden Schalen unabhängiger voneinander werden und den oben beschriebenen Bedingungen einer zweischaligen Wand am nächsten kommen.

In den Spalten „Schalen“ ist die Anzahl von Gipskartonplatten pro Schale und ihre Dicke angegeben. Zum Beispiel eine BA 13 ist eine Gipskartonplatte von 13 mm Dicke (tatsächlich 12,5 mm).

Das Gesamtflächengewicht ist das Gewicht der kompletten zweischaligen Wand.

The digit 1 in the second column indicates that the two partitions are mounted on the same frame which combines them firmly (single-frame wall). The digit 2 corresponds to one frame for each partition (double-frame wall) which makes the two partitions more independent of each other, thus coming nearer to the conditions of a double wall outlined above.

In the columns "Partitions" we have given the number of gypsum boards per partition and their thicknesses. For example, a BA 13 is a gypsum board of 13 mm thickness (actually 12,5 mm).

The total surface mass is the complete surface mass of the entire double wall.

Bezeichnung <i>Denomination</i>	Anzahl der Rahmen (1) <i>Number of frames (1)</i>	Schale 1 <i>Partition 1</i>	Schale 2 <i>Partition 2</i>	Gesamtdicke <i>Total thickness</i> in m	Gesamtflä- chengewicht <i>Total surface mass</i> in kg/m ²	R _w in dB	R _w + C in dB
72/36 (leer) <i>(empty)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,072	36	37	35
72/36 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,072	36	44	41
72/48 (leer) <i>(empty)</i>	1	1 BA13	1 BA13	0,072	24	34	33
72/48 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	1 BA13	1 BA13	0,072	24	42	39
84/48 (leer) <i>(empty)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,084	36	38	36
84/48 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,084	36	44	42
96/60 (leer) <i>(empty)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,096	36	40	38
96/60 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	1 BA18	1 BA18	0,096	36	47	44
98/48 (leer) <i>(empty)</i>	1	2 BA13	2 BA13	0,098	48	42	40
98/48 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	2 BA13	2 BA13	0,098	48	49	47
100/70 (leer) <i>(empty)</i>	1	1 BA15	1 BA15	0,1	30	39	37
100/70 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	1 BA15	1 BA15	0,1	30	46	43
120/70 (leer) <i>(empty)</i>	1	2 BA 13	2 BA13	0,12	48	44	43
120/70 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	2 BA13	2 BA13	0,12	48	52	50
140/90 (leer) <i>(empty)</i>	1	2 BA13	2 BA13	0,14	48	46	45
140/90 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	1	2 BA13	2 BA13	0,14	48	53	51
120/70 (leer) <i>(empty)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,12	48	59	57
140/90 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,14	48	61	58
160/110 (mit Mineral- wolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,16	48	62	59

Bezeichnung <i>Denomination</i>	Anzahl der Rahmen (1) <i>Number of frames (1)</i>	Schale 1 <i>Partition 1</i>	Schale 2 <i>Partition 2</i>	Gesamtdicke <i>Total thickness</i> in m	Gesamtflächengewicht <i>Total surface mass</i> in kg/m ²	R _w in dB	R _w + C in dB
180/130 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,18	48	67	64
200/150 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,20	48	66	64
220/170 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,22	48	68	65
240/190 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	2 BA13	2 BA13	0,24	48	68	67
180/120 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	3 BA13	2 BA13	0,18	60	67	64
192/120 (mit Mineralwolle) <i>(with mineral wool)</i>	2	3 BA13	3 BA13	0,19	72	68	66

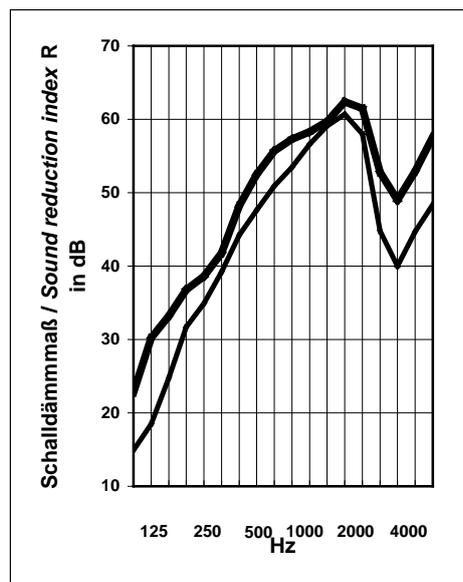
Tabelle 4:**Table 4:**

Anmerkungen:

- Für diese Wände mit 2, 4, 5 oder 6 Gipskartonplatten entspricht die kritische Frequenz derjenigen einer einzelnen Gipskartonplatte (siehe nächstes Bild).
- Für Wände mit Einfachständer, bei denen der Zwischenraum zwischen den Schalen mit Mineralwolle gefüllt ist, erhöht sich das Schalldämmmaß um 7 dB.
- Vergleicht man zwei Wände derselben Dicke mit derselben Anzahl von Gipskartonplatten, wobei jedoch die eine nur eine Unterkonstruktion für beide Schalen aufweist (Einfachständer-Wand), während die andere zwei Unterkonstruktionen (nämlich eine pro Seite) aufweist (Doppelständer-Wand), so erhält man Schalldämmmaße, die ebenfalls in der Größenordnung von etwa 7 dB auseinander liegen (siehe nächstes Bild).

Notes:

- For these walls with 2, 4, 5 or 6 gypsum boards, the critical frequency of the partitions is that of one individual gypsum board (see next figure).
- For single-frame walls, filling the space between the two partitions with mineral wool increases the sound reduction index by 7 dB.
- If one compares two walls having the same thickness and comprising the same number of gypsum wall boards, however, one having one sub-construction for both partitions and the other with two sub-constructions (one per partition), the difference in the sound reduction index is also of the order of about 7 dB (see next figure).

**Bild 9:** Zweischalige Wände mit nur einer Unterkonstruktion (Einfachständer-Wand)**Figure 9:** Double walls with only one frame (single-frame wall)

Obere Kurve: 98/40 mit Mineralwolle - Upper curve: 98/48 with mineral wool -
 R_W (C;Ctr) = 49 (-2;-8) dB , jede Schale hat R_W (C;Ctr) = 49 (-2;-8) dB , each face has two
zwei Gipskartonplatten gypsum boards

Untere Kurve: 72/48 mit Mineralwolle - Lower curve: 72/48 with mineral wool -
 R_W (C;Ctr) = 42 (-3;-9) dB , jede Schale hat R_W (C;Ctr) = 42 (-3;-9) dB , each face has
eine Gipskartonplatte one gypsum board

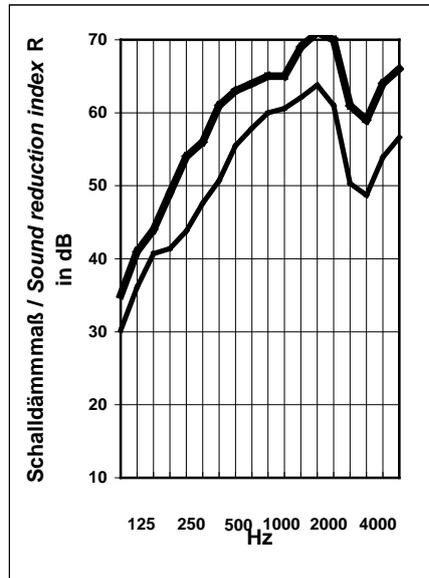


Bild 10: Wände 140/90, mit Mineralwolle

Figure 10: Walls 140/90, with mineral wool

Untere Kurve: nur eine Unterkonstruktion (Einfachständer-Wand), $R_W = 53$ dB

Lower curve: only one frame (single-frame wall), $R_W = 53$ dB

Obere Kurve: zwei Unterkonstruktionen (Doppelständer-Wand), eine pro Schale, $R_W = 61$ dB

Upper curve: two frames (double-frame wall), one for each face, $R_W = 61$ dB

Zweischalige Wände in der Industrie

Gedämmte, glatte Stahlwände und -strukturen genauso wie gedämmte Tanks und Rohrleitungen stellen Doppelwandssysteme dar, die sich bezüglich Funktion und Wirkung nach den vorstehend erörterten Regeln richten. Unter vergleichbaren Voraussetzungen ergeben sich sowohl die oben erwähnten Hohlraumresonanzen mit den Resonanzfrequenzen F_{dn} als auch die Niedrigfrequenzsystemresonanz mit der Resonanzfrequenz f_0 . Die prinzipiellen Dämmungskurven entsprechen denjenigen der Wandsysteme, die im Baubereich benutzt werden. Sie können wie folgt berechnet werden:

Double walls in the industry

Insulated plane steel walls and structures as well as tanks and pipes constitute double-wall systems following the aforementioned rules concerning function and effect. Under comparable assumptions, both the aforementioned cavity resonances with the resonance frequency f_{dn} and the low-frequency system resonance at the frequency f_0 are resulting. Fundamental insulation curves are equivalent to those of the wall systems used in the building field. They can be calculated as follows:

$$R_1 = R + \Delta R$$

wobei $\Delta R = 25 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)$ ist.

where $\Delta R = 25 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)$.

Im Hochfrequenzbereich wird das Verbesserungsmaß ΔR durch die Art der Unterkonstruktion und der äußeren Verkleidung begrenzt:

In the high-frequency range, the improvement index ΔR is limited by the design of the substructure and the exterior cladding.

Folgende Werte werden verwendet:

It is applied:

mit starrer Unterkonstruktion – ΔR max. ca. 22 dB
ohne Entdröhnmaterial

with rigid substructure – without de-booming material ΔR max. about 22 dB

mit starrer Unterkonstruktion – ΔR max. ca. 35 dB
mit Entdröhnmaterial oder mit elastischer Unterkonstruktion – ohne Entdröhnmaterial

with rigid substructure – with de-booming material or with elastic substructure – without de-booming material ΔR max. about 35 dB

mit elastischer Unterkonstruktion – mit Entdröhnmaterial ΔR max. ca. 42 dB

with elastic substructure – with de-booming material ΔR max. about 42 dB

Im Niederfrequenzbereich bzw. im Bereich der Resonanzfrequenz f_0 tritt eine vermehrte Schallabstrahlung auf. Wie die Erfahrung zeigt, ist diese „negative Dämpfung“ ΔR selten größer als 8 dB.

In the low-frequency range, respectively in the range of the resonance frequency f_0 , an increased sound radiation occurs. As experience shows, this “negative insulation” ΔR is seldom more than 8 dB.

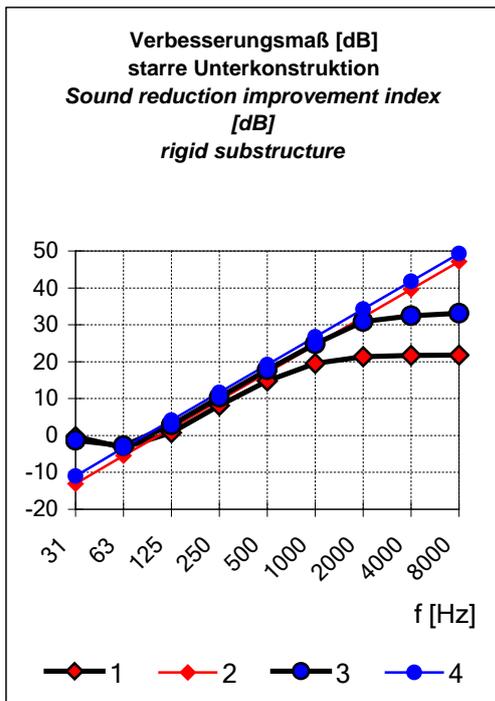


Bild 11: Verbesserungsmaße ΔR verschiedener Dämmaufbauten

Wandkonstruktion:

Grundwand 5 mm Blech, Vorsatzschale 1 mm Blech – Abstand 100 mm – 100 mm Mineralwolle

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1 – starre Unterkonstruktion | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 2 – starre Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 3 – starre Unterkonstruktion | + 5 kg /m ² Entdröhnmaterial auf der 1 mm Platte |
| | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 4 – starre Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 5 – elastische Unterkonstruktion | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 6 – elastische Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 7 – elastische Unterkonstruktion | + 5 kg /m ² Entdröhnmaterial auf der 1 mm Platte |
| | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 8 – elastische Unterkonstruktion | / theoretische Werte |

A3-3.3.2.2 Rohrleitungen

In derselben Weise wie bei der Dämmung an ebenen Wänden bildet auch die Rohrleitung und eine schalldämmende Ummanntelung (Rohrisolierung) ein zweischaliges Wandsystem, dessen Übertragungsverlust demjenigen einer ebenen Wand vergleichbar ist. Die Resonanzfrequenzen bzw. die Niederfrequenzsystemresonanz f_0 kann mittels der Funktionen im Kapitel A3-3.3.2.1 ermittelt werden. Die frequenzabhängige Gesamtdämmung des Systems folgt aus dem Dämmverbesserungsmaß ΔR und der Dämmung der Rohrleitung.

$$R_1 = R + \Delta R$$

Das Verbesserungsmaß ΔR errechnet sich gemäß VDI 3733 wie folgt:

$$\Delta R \approx \frac{40}{1 + \frac{0,12}{d_e}} \log_{10} \frac{f}{2,2 f_0} \quad [19]$$

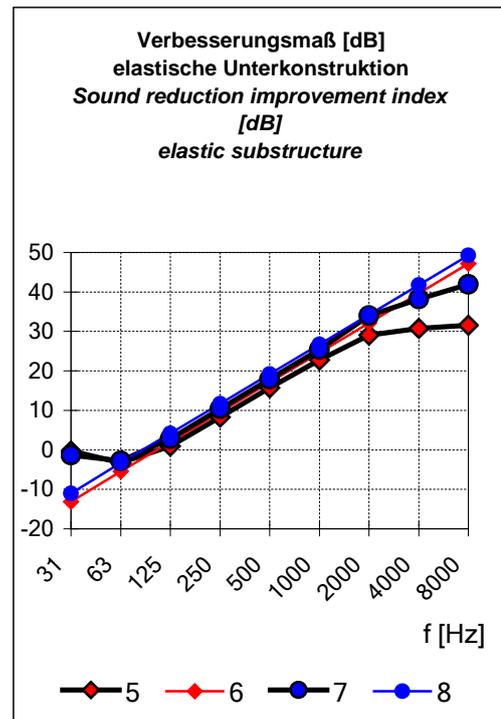


Figure 11: Improvement indices ΔR for different insulation systems

Wall structure:

Basic wall 5 mm sheet metal, lining 1 mm sheet metal – distance 100 mm – 100 mm mineral wool

- | | |
|--------------------------|--|
| 1 – rigid substructure | / maximum possible sound reduction index |
| 2 – rigid substructure | / theoretical values |
| 3 – rigid substructure | + 5 kg/m ² de-booming material on the 1 mm lining |
| | / maximum possible sound reduction index |
| 4 – rigid substructure | / theoretical values |
| 5 – elastic substructure | / maximum possible sound reduction index |
| 6 – elastic substructure | / theoretical values |
| 7 – elastic substructure | + 5 kg/m ² de-booming material on the 1 mm lining |
| | / maximum possible sound reduction index |
| 8 – elastic substructure | / theoretical values |

A3-3.3.2.2 Pipes

In the same way as for the insulation of plane walls, the sound-insulating enclosure of a pipe (pipe insulation) forms a double-wall system, the transmission loss of which is similar to that of a plane wall. The resonance frequencies, especially the low-frequency system resonance f_0 can be determined by the functions given in chapter A3-3.3.2.1. The frequency-dependent total insulation of the system results from the improvement of the sound reduction index ΔR and the insulation of the pipe wall.

The improvement index ΔR according to VDI 3733 is determined by:

Dies gilt allerdings nur bei dem Verhältnis $\frac{d_i}{d_e + h} > 0,7$.

wobei d_i der innere Rohrdurchmesser in m, d_e der äußere Rohrdurchmesser in m und h der Abstand zwischen Rohroberfläche und Ummantelung ist.

Diese Funktion zeigt schon, dass die Verbesserung der Dämmung stark vom Durchmesser abhängt. Kleine Rohrdurchmesser führen zu niedrigen ΔR_w -Werten (Verbesserungsmaße) im Vergleich zu großen Durchmessern. Dies gilt besonders im Mittelfrequenzbereich. Zusätzlich gilt, dass das Hochfrequenzverbesserungsmaß (d. h. der Dämmeffekt) wiederum durch die Art der Unterkonstruktion und der äußeren Ummantelung begrenzt wird.

Anhaltswerte für das höchstens zu erreichende Verbesserungsmaß sind unten angegeben:

mit starrer Unterkonstruktion – ohne Entdröhnmaterial	ΔR max. ca. 20 dB
mit starrer Unterkonstruktion – mit Entdröhnmaterial oder mit elastischer Unterkonstruktion – ohne Entdröhnmaterial	ΔR max. ca. 25 dB
mit elastischer Unterkonstruktion – mit Entdröhnmaterial	ΔR max. ca. 40 dB

Im Niederfrequenzbereich, insbesondere im Bereich der Resonanzfrequenz f_0 , kann eine verstärkte Schallabstrahlung auftreten. Wie die Erfahrung zeigt, ist diese „negative Dämpfung“ ΔR selten größer als 8 dB.

Das Thema „Schalldämmung an Rohren“ wird umfassend in ISO/DIS 15665:2001 „Schalldämmung für Rohre, Ventile und Flansche“ abgehandelt. Für praktische Zwecke sind verschiedene Isolierungsklassen definiert. Auch sind Schalldämmkonstruktionen beschrieben, die die genannten Dämmanforderungen erfüllen.

This applies only if the ratio $\frac{d_i}{d_e + h} > 0,7$ is kept.

where d_i is the inner pipe diameter in m, d_e is the exterior pipe diameter in m and h is the distance between pipe surface and cladding.

This function already shows that the improvement of the insulation is strongly dependent on the diameter. Smaller pipe diameters result in lower ΔR_w values (insulation coefficients) compared to larger pipe diameters, especially in the mid-frequency range. Moreover, the high-frequency improvement index (i. e. the insulation effect) is limited by the design of the substructure and the exterior cladding.

Rough values for maximum obtainable sound reduction improvement indices are given below:

with rigid substructure – without de-booming material	ΔR max. about 20 dB
with rigid substructure – with de-booming material or with elastic substructure – without de-booming material	ΔR max. about 25 dB
with elastic substructure – with de-booming material	ΔR max. about 40 dB

In the low-frequency range, particularly in the range of the resonance frequency f_0 , an increased sound radiation may occur. As experience shows, this “negative insulation” ΔR is seldom more than 8 dB.

The topic “Sound insulation of pipes” is dealt with comprehensively in ISO/DIS 15665:2001 “Acoustic insulation for pipes, valves and flanges”. For practical purposes, different classes of insulation are defined. Also, acoustic insulation constructions, that meet the mentioned insulation requirement, are described.

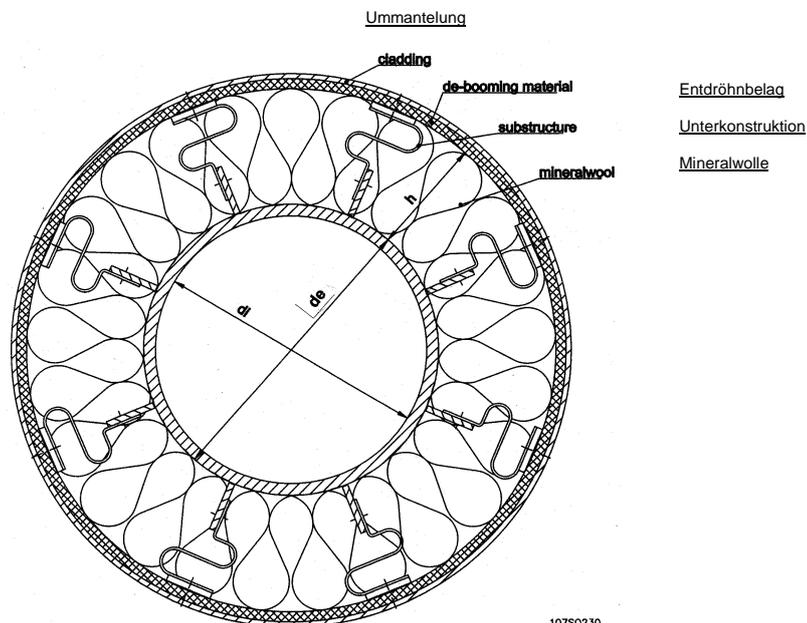


Bild 12:

Figure 12:

10750230

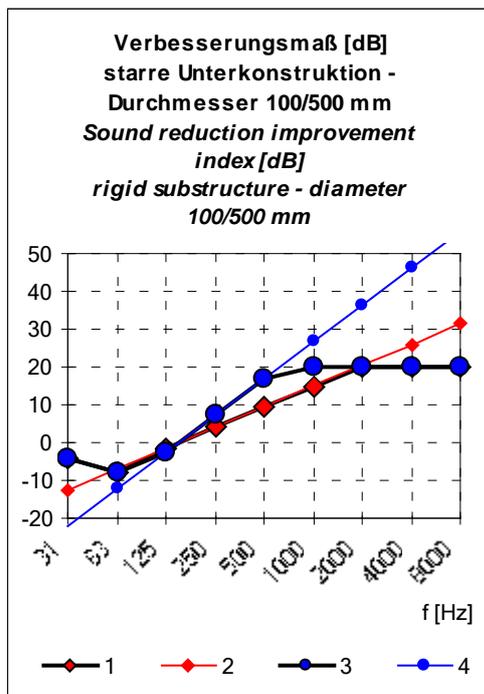


Bild 13: Verbesserungsmaße ΔR verschiedener Dämmaufbauten

Konstruktion:

5 mm Rohrwanddicke, Ummantelung 1 mm Stahlblech – Abstand 100 mm – 100 mm Mineralwolle

- | | |
|---|--|
| 1 – Rohrdurchmesser 100 mm – starre Unterkonstruktion | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 2 – Rohrdurchmesser 100 mm – starre Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 3 – Rohrdurchmesser 500 mm – starre Unterkonstruktion | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 4 – Rohrdurchmesser 500 mm – starre Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 5 – Rohrdurchmesser 500 mm – elastische Unterkonstruktion | / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 6 – Rohrdurchmesser 500 mm – elastische Unterkonstruktion | / theoretische Werte |
| 7 – Rohrdurchmesser 500 mm – elastische Unterkonstruktion | + 5 kg /m ² Entdröhnmaterial auf der Ummantelung / höchstmöglichstes Verbesserungsmaß |
| 8 – Rohrdurchmesser 500 mm – elastische Unterkonstruktion | + 5 kg /m ² Entdröhnmaterial auf der Ummantelung / theoretische Werte |

A3-4 Körperschalldämmung

Nach Durchschreiten eines Bauteils wird der Körperschall an die umgebende Luft abgegeben, wenn er eine Oberfläche anregt, die schwingungsfähig ist wie eine Lautsprechermembran. Wenn diese Übertragung an die das Bauteil umgebende Luft nicht auftreten würde, so könnte das menschliche Ohr Körperschall überhaupt nicht wahrnehmen. (Außer Schall, der durch die Struktur der menschlichen Knochen „übertragen“ wird).

Es ist offensichtlich, dass der Schallpegel umso geringer ist, desto kleiner die vibrierende Oberfläche des Bauteils. Es ist weniger bekannt, dass eine Zunahme der Steifigkeit der Oberfläche der übertragenden Konstruktion den Effekt der Abstrahlung hat und damit den Schallpegel erhöht.

Elemente der Körperschalldämmung sind elastische Zwischenschichten (Federelemente), Wechsel von Medien oder Abmessungen, Sperrmassen oder andere Diskontinuitäten.

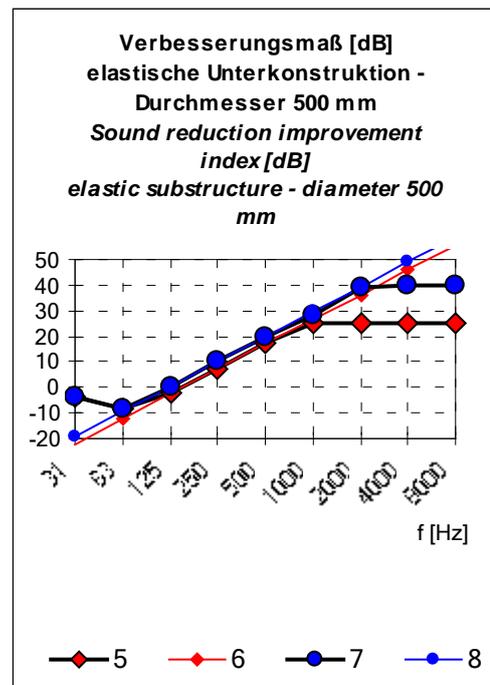


Figure 11: Improvement indices ΔR for different insulation systems

Structure:

5 mm pipe wall thickness, cladding 1 mm sheet metal – distance 100 mm – 100 mm mineral wool

- | | |
|---|--|
| 1 – pipe diameter 100 mm – rigid substructure | / maximum possible sound reduction index |
| 2 – pipe diameter 100 mm – rigid substructure | / theoretical values |
| 3 – pipe diameter 500 mm – rigid substructure | / maximum possible sound reduction index |
| 4 – pipe diameter 500 mm – rigid substructure | / theoretical values |
| 5 – pipe diameter 500 mm – elastic substructure | / maximum possible sound reduction index |
| 6 – pipe diameter 500 mm – elastic substructure | / theoretical values |
| 7 – pipe diameter 500 mm – elastic substructure | + 5 kg/m ² de-booming material on the lining / maximum possible sound reduction index |
| 8 – pipe diameter 500 mm – elastic substructure | + 5 kg/m ² de-booming material on the lining / theoretical values |

A3-4 Structureborne sound insulation

After travelling in the solid structure, the structureborne sound is transmitted to the surrounding air when it excites a surface able to radiate like a loudspeaker membrane. If this transmission to the air surrounding the structure did not occur, the human ear could not hear "structureborne sound". (Except the sound "borne" by the structure of the human bone).

It is self-evident that the smaller the vibrating surface, the smaller the sound level will be. It is less well known that increasing the rigidity of the transmitting structure surface may increase the radiation efficiency and thereby increase the sound level.

Elements for structureborne sound insulation are elastic intermediate layers (spring elements), the change of media or dimensions, separating masses or other discontinuities.

A3-4.1 Elastische Zwischenlagen (elastische Lagerung)

Die elastische Zwischenschicht oder elastische Lagerung besteht aus Federelementen (Gummi- oder Metallfedern, weichen Korkplatten, Fasermatten, Schaumplatten, usw.), auf die entweder das anregende System (Maschine oder dergleichen) oder das vor Körperschall zu schützende Gerät gestellt ist. Bei einer solchen Anordnung bewirkt die Federung oberhalb einer „Abstimmungsfrequenz“ f_0 eine Verringerung der anregenden Kraft, die allerdings mit einer Verstärkung im Resonanzbereich erkauft wird.

Erstes Ziel der Dimensionierung einer elastischen Lagerung ist es, durch geeignete Wahl der Federelemente die Frequenz f_0 unterhalb des interessierenden Frequenzbereichs zu legen. Die zweite Aufgabe besteht dann darin, durch geeignete Materialwahl eine möglichst hohe Dämmung zu erzielen und insbesondere Einbrüche in der Dämmkurve zu vermeiden.

Entscheidende Parameter für die körperschalldämmende Wirkung einer elastischen Lagerung sind die Steife s der verwendeten Federn und die wirksame Masse M des elastisch gelagerten Systems. Aus diesen beiden Größen ergibt sich die Abstimmungsfrequenz eines einfachen Masse-Feder-Masse-Systems.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s/M} \text{ Hz} \quad [20]$$

wobei s die Steifigkeit in N/m und M die Masse in kg ist.

Je tiefer die Abstimmungsfrequenz, desto besser ist die Körperschalldämmung.

Da die Körperschalldämmung von einfachen elastischen Lagerungen manchmal nicht ausreicht, werden bei sehr lauten Aggregaten in der Nähe von Wohnungen oder Arbeitsräumen auch doppelt elastische Lagerungen verwendet. Derartige Lagerungen haben zwei Abstimmungsfrequenzen.

Die Wirkung solcher Systeme ist nur sehr schwer zu berechnen und es besteht die große Gefahr unerwarteter (negativer) Ergebnisse, wenn die relativen Massen der Auflagersysteme nicht genau berücksichtigt werden.

Zur Charakterisierung der Wirkung einer elastischen Lagerung werden verschiedene Größen benutzt. Am einfachsten zu messen ist die Pegeldifferenz ΔL ; man erhält sie dadurch, dass man Terz- oder Oktavanalysen des Körperschalls oberhalb und unterhalb der Federn vornimmt und die Differenz bildet.

$$\Delta L = 10 \log_{10} v_1^2 / v_2^2 \quad [21]$$

wobei v_1 die Schallschnelle der Komponente 1 und v_2 die Schallschnelle der Komponente 2 ist.

Für den Benutzer am interessantesten ist meist die Einfügungsdämmung $\Delta L_{\text{ins.}}$, d. h. die Minderung des ursprünglichen Körperschallpegels durch den Einbau von Federn. Gemessen wird dabei am selben Punkt.

Die Berechnung einzelner Größen erfordert die Kenntnis komplexer Kraft- und Schnellamplituden bzw. der wiederum komplexen und fast stets frequenzabhängigen Impedanz.

Praxisgerechte und ausreichend genaue Abschätzungen der Dämmwirkung von Federelementen sind in der Regel über Datenblätter bzw. Prospektunterlagen der Lieferanten dieser Elemente möglich.

A3-4.1 Elastic intermediate layers (elastic support)

The elastic intermediate layer or the elastic support consists of flexible elements (rubber or metal springs, soft cork boards, fibre mats, foam boards, etc.) onto which either the emitting system (machine or the like) is mounted or else the installation to be protected from structureborne sound. In such an arrangement, the suspension causes a reduction of the insulating force above the "tuning frequency" f_0 which, however, has to be paid for with an increase in the area of the resonance frequency.

The first aim of the dimensioning of an elastic support is to put the frequency f_0 below the frequency area of interest by selecting the suitable suspension elements. The second task is to obtain the highest possible insulation through the selection of suitable material and especially to avoid breaches in the insulation curve.

The defining parameters for the structureborne sound insulation effect of an elastic support are the stiffness s of the suspension used and the mass M of the flexibly supported system. These two values lead to the tuning frequency of a simple mass-spring-mass system.

where s is the rigidity in N/m and M the mass in kg.

The lower the tuning frequency, the better the structureborne sound insulation.

Since the structureborne sound insulation of simple elastic supports is occasionally not sufficient, double elastic supports are used for very noisy aggregates in the vicinity of residence or working locations. Such supports have two tuning frequencies.

The effect of such systems is very difficult to calculate and there are many risks of unexpected (negative) results if relative masses of the supporting systems are not exactly taken into consideration.

To characterise the effect of an elastic support, different values are being used. The level difference ΔL is the easiest to measure; it is obtained by analysing third-octaves or octaves of the structureborne sound above and below the spring and then calculate the difference.

where v_1 is the sound particle velocity at component 1 and v_2 the sound particle velocity at component 2.

Most interesting for the user is frequently the insertion loss $\Delta L_{\text{ins.}}$, i. e. the reduction of the original structureborne sound level obtained through the insertion of springs. The measurement is taken at the same point.

The calculation of individual values requires the knowledge of complex power and velocity amplitudes, respectively of the very complex and almost always frequency-dependent impedance.

Practical assessments of the insulation effect, which are of sufficient precision, can normally be found in the data sheets, respectively product descriptions of the manufacturers of such elements.

A3-4.2 Entfernungsabnahme des Schalls

Die Schallintensität und damit der Geräuschpegel sind eine Funktion des Abstandes zwischen Sender und Empfänger. Dies gilt sowohl für Luft- als auch für Körperschall. Unter Missachtung der Dämpfung durch Schallumwandlung in Wärme gilt hier ausschließlich die Überlegung, dass mit wachsender Entfernung vom Sender die Energie auf eine immer größere Fläche verteilt wird, wodurch die Schallintensität reduziert wird („Energieausbreitung“.)

Auf eindimensionale Gebilde (lange Balken, Rohrleitungen, usw.) angewandt, ergibt sich aus diese Überlegungen, dass Körperschall fast nicht mit der Entfernung abnimmt, wenn nicht Energieableitung an Befestigungspunkten, usw. erfolgt (tatsächlich wird über elastisch gelagerte Rohrleitungen Körperschall fast unverringert über lange Strecken übertragen).

Bei großen zweidimensionalen Gebilden (große Platten oder flächenhafte Gitter) ist, abgesehen von einem sehr begrenzten Nahfeld, die Körperschallabnahme umgekehrt proportional dem Umfang einer „Hülllinie“ und führt damit zu einer Abnahme um 3 dB pro Entfernungsverdoppelung.

Bei großen dreidimensionalen Gebilden (sehr große Körper oder große Gebäude) erfolgt die Abnahme umgekehrt proportional mit der „Hüllfläche“ und damit mit 6 dB pro Entfernungsverdoppelung.

A3-4.3 Materialwechsel, Querschnittsprünge und Umkehrungen

Wenn Wellen auf eine Unstetigkeit im Material oder in den Abmessungen auftreffen, wird ein Teil ihrer Energie reflektiert und damit die Weiterleitung etwas verringert. Dieser Vorgang wurde speziell für Longitudinal- und BiegeWellen auf Platten und Stäben eingehend untersucht, und es wurden die verschiedenen Übertragungsfaktoren und Übertragungsgrade berechnet. Diese Werte sind folgendermaßen definiert:

$$\tau = W_2 / W_1 \quad [22]$$

Das Dämmmaß ist $R = 10 \log_{10} (1/\tau)$ dB oder gemäß Anhang B der EN 12354 = $-10 \log_{10} \tau$. Die Pegeldifferenz auf beiden Seiten der Unstetigkeit ist:

$$\Delta L = 10 \log_{10} \frac{v_1^2}{v_2^2} \text{ dB} \quad [23]$$

wobei W_1, v_1 die Energie bzw. die Schallschnelle vor der Unstetigkeit und W_2, v_2 die entsprechenden Werte hinter der Unstetigkeit sind. Angaben zur Berechnung des Übertragungsmaßes in monolithischen Baukonstruktionen findet man im informativen Anhang B der EN 12354-1 „Gebäudeakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften der Gebäude aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Körperschalldämmung zwischen Räumen“.

Angaben zur Berechnung des Übertragungsmaßes von Körperschall in Industrieanlagen finden sich in der fachbezogenen technischen Literatur.

A3-5 Luftschallabsorption**A3-5.1 Definitionen**

Reflexionsmaß: $r = \frac{W_{\text{refl.}}}{W_1}$ Verhältnis der reflektierten Schallenergie zur auftreffenden Schallenergie.

A3-4.2 Distance decrease of sound

The sound intensity, and thereby the noise level, is a function of the distance between emitter and receiver. This holds for airborne as well as for structureborne sound. Disregarding the attenuation of the energy transformation into heat, the only fact considered is that with increasing distance the energy is dispersed onto an ever larger area, whereby the acoustic intensity is reduced (“energy spreading”).

Applied to one-dimensional components (long beams, pipes, etc.), the considerations explain that structureborne sound does almost not decrease with distance, unless an energy diversion takes place at supporting points, etc. (actually with elastically supported pipe systems, structureborne sound is transmitted over long distances almost undiminished).

For large two-dimensional components (large boards or frameworks), the decrease in structureborne sound is, but for the immediate vicinity of the sound source, inversely proportional to the perimeter and leads to a decrease of 3 dB per doubling of the distance.

With larger three-dimensional objects (very large bodies or buildings), the decrease is inversely proportional to the “outer surface”, which leads to a decrease of 6 dB per doubling of the distance.

A3-4.3 Change of material, cross-section breaches and direction changes

When waves strike a discontinuity in the material or in its dimensions, part of the energy is reflected and the transmission thereby slightly reduced. This phenomenon has been investigated especially for longitudinal and bending waves in boards and struts and different transmission factors and transmission levels have been calculated. these values are defined as follows:

The sound reduction index is $R = 10 \log_{10} (1/\tau)$ dB or according to Annex B of EN 12354 = $-10 \log_{10} \tau$. The level difference on both sides of the discontinuity is:

where W_1, v_1 is the energy, respectively velocity ahead the discontinuity and W_2, v_2 the respective values behind the discontinuity. Advice for the calculation of the degree of transmission in monolithic building structures is given in the informative Annex B of EN 12354-1 “Acoustics in buildings – Calculation of the acoustic properties of buildings from building-component properties – Part 1: Airborne sound insulation between rooms”.

Advice for the calculation of the degree of transmission of structureborne sound in industrial installations can be found in the related technical literature.

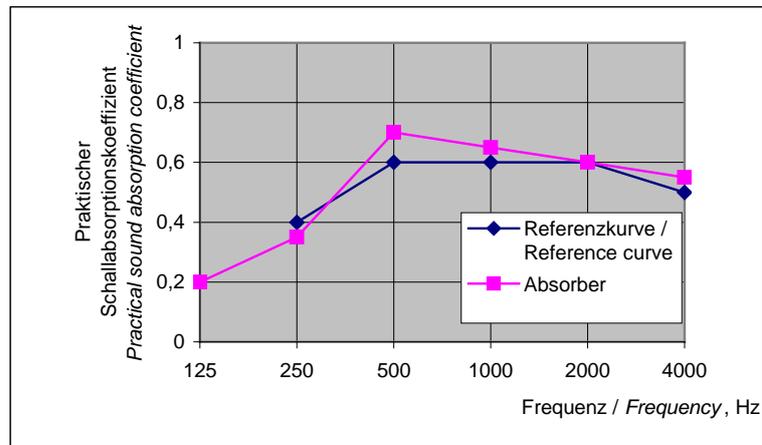
A3-5 Airborne sound absorption**A3-5.1 Definitions**

Reflection factor: $r = \frac{W_{\text{refl.}}}{W_1}$ ratio of the reflected acoustical energy to the arriving acoustical energy.

<p>Absorptionskoeffizient α:</p>	<p>Sobald die Schallwelle auf ein Hindernis trifft, wird die Schalleistung dieser Welle teilweise durch das Hindernis und seine Umman- telung absorbiert. Der Absorptionsgrad ist das Verhältnis zwischen der absorbierten Schalleistung W_{abs} zur ursprünglichen Schallenergie W_1.</p>	<p>Absorption coefficient α:</p>	<p>When a sound wave hits an obstacle, the acoustical power carried by this wave is partly absorbed by the obstacle and its covering. The absorption factor is the ratio of the acoustical absorbed energy W_{abs} to the initial acoustical energy W_1.</p>
$\alpha = \frac{W_{\text{abs.}}}{W_1}$		<p>This absorption factor is commonly called "absorption coefficient".</p>	
<p>Einzahlwert α_w:</p>	<p>Für den Absorptionskoeffizienten ist ein bewerteter Wert α_w in EN ISO 11654 definiert.</p>	<p>Single-digit value α_w:</p>	<p>For the absorption coefficient, a weighted value α_w has been defined in EN ISO 11654.</p>
<p>Übertragungsfaktor:</p>	$\tau = \frac{W_2}{W_1}$ <p>Verhältnis der übertragenden Schalleistung zur ursprünglichen Schalleistung.</p>	<p>Transmission factor:</p>	$\tau = \frac{W_2}{W_1}$ <p>ratio of the transmitted acoustical energy to the initial acoustical energy.</p>
<p>Äquivalente Absorptionsfläche einer Oberfläche, eines Objekts oder eines Raumes:</p>	<p>Entspricht der Fläche A eines ideal absorbierenden Materials ($\alpha = 1$) mit derselben akustischen Absorption der betrachteten Oberfläche, des betrachteten Objekts oder Raumes. Für eine Oberfläche: $A = S \cdot \alpha$ (m^2), wobei S die Fläche des Materials und α der Absorptionskoeffizient des Materials ist. Für einen Raum: $A = \sum S_i \cdot \alpha_i$, wobei S_i die Oberfläche des Materials „i“ mit einem Absorptionskoeffizienten α_i ist.</p>	<p>Equivalent absorption area of a surface, an object or a room:</p>	<p>Equals the area A of perfectly absorbing material ($\alpha = 1$) having the same acoustical absorption as the surface, object or room in question. For a surface: $A = S \cdot \alpha$ (m^2), where S is the area of the material and α the material's absorption coefficient. For a room: $A = \sum S_i \cdot \alpha_i$, where S_i is the surface of the material "i" with an absorption coefficient α_i.</p>
<p>Nachhallzeit in einem Raum:</p>	<p>Wird ein Schallereignis in einem Raum beendet, so bleibt ein mehr oder weniger langer Nachhall, was mit der Reflexion des Schalls von den Wänden begründet ist. Ist die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes groß, ist der Nachhall kurz. Die Nachhallzeit T eines Raumes ist diejenige Zeit, in der die Schallenergie um 60 dB seit Abschalten der Schallquelle gefallen ist. Die Nachhallzeit T eines Raumes in Sekunden hängt von der Größe des Raumes V (m^3) und seiner äquivalenten Absorptionsfläche A (m^2) ab. Die normalerweise benutzte SABINE-Formel lautet: $T = 0,16 \frac{V}{A}$.</p>	<p>Reverberation time of a room:</p>	<p>When a sound emission in a room is stopped, a sound reverberation remains during a period of time, more or less long. This is due to the reflection of sound waves from the walls. When the equivalent absorption area of the room is large, the duration of the reverberation is short. We call the reverberation time T of a room the time needed for the acoustical energy fall by 60 dB from the moment the emission was stopped. The reverberation time T of a room in seconds is dependent upon the volume V (m^3) of the room and its equivalent absorption area A (m^2). The SABINE formula is generally used: $T = 0,16 \frac{V}{A}$.</p>
<p>Der Absorptionskoeffizient α eines Materials, die äquivalente Absorptionsfläche A und die Nachhallzeit T eines Raumes sind frequenzabhängig.</p>	<p>The absorption coefficient α of a material, the equivalent absorption area A and the reverberation time T of a room depend upon the frequency.</p>		
<p>A3-5.2 Berechnungsbeispiele für α_w, mit und ohne Formfaktor</p>	<p>A3-5.2 Calculation examples for α_w, with and without shape indicator</p>		
<p>Tabelle 5 zeigt ein Berechnungsbeispiel für α_w. Die Referenzkurve wird in Schritten von 0,05 in Richtung auf die Messwertkurve bewegt, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen < 0,10 ist. In dem Beispiel tritt eine ungünstige Abweichung bei 250 Hz auf und führte zu $\alpha_w = 0,60$. Hier wird kein Formfaktor benutzt.</p>	<p>Table 5 shows an example of how to calculate α_w. Shift the reference curve in steps of 0,05 towards the measured value until the sum of the unfavourable deviations < 0,10. In the example, an unfavourable deviation occurs at 250 Hz and the result is $\alpha_w = 0,60$. No shape indicators need to be given.</p>		

Tabelle 6 gibt ein Beispiel mit Formfaktor. die ungünstige Abweichung entspricht derjenigen gemäß Bild A.1, wodurch sich derselbe α_w -Wert ergibt. Da jedoch der praktische Schallabsorptionskoeffizient des Absorbers denjenigen der verschobenen Referenzkurve um mehr als 0,25 bei 500 Hz übertrifft, wird ein Mittelfrequenz (M)-Formfaktor hinzugefügt.

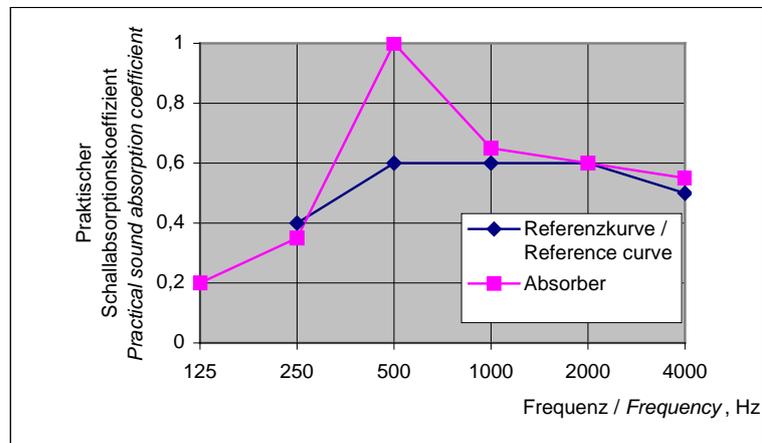
Table 6 gives an example with a shape indicator. The unfavourable deviation is equal to that of Figure A.1 and thus the same α_w value is obtained. However, as the practical sound absorption coefficient of the absorber exceeds that of the shifted reference curve by more than 0,25 at 500 Hz, the mid-frequency (M) shape indicator is added.



Frequenz Frequency Hz	Referenzkurve Reference curve	Absorber
125		0,20
250	0,40	0,35
500	0,60	0,70
1000	0,60	0,65
2000	0,60	0,60
4000	0,50	0,55

Tabelle 5: Berechnungsbeispiel für α_w ($\alpha_w = 0,60$)

Table 5: Calculation example for α_w ($\alpha_w = 0,60$)



Frequenz Frequency Hz	Referenzkurve Reference curve	Absorber
125		0,20
250	0,40	0,35
500	0,60	0,70
1000	0,60	0,65
2000	0,60	0,60
4000	0,50	0,55

Tabelle 6: Berechnungsbeispiel für α_w [$\alpha_w = 0,60$ (M)]

Table 6: Calculation example for α_w [$\alpha_w = 0,60$ (M)]

A3-5.3 Messung des Absorptionskoeffizienten

Die Messung des Absorptionskoeffizienten α_{SAB} eines Materials ist in EN 20354 „Messung der Schallabsorption im Hallraum“ beschrieben.

A3-5.3 Measurement of the absorption coefficient

The measurement of the absorption coefficient α_{SAB} of a material is described in EN 20354 “Measurements of acoustic absorption in a reverberation chamber”.

Die benutzte Formel $T = 0,16 \frac{V}{A}$ wird „SABINE“-Formel genannt.

wobei A die äquivalente Absorptionsfläche, V das Volumen des Hallraumes und T die Nachhallzeit ist.

Das Messprinzip besteht darin, die Nachhallzeit T_0 im leeren Hallraum zu messen. Aus dieser Messung ermittelt man unter Benutzung der SABINE-Formel die äquivalente Absorptionsfläche A_0 und den durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten α_0 , mit der Gesamfläche der Hallraumwände. Dann wird eine Oberfläche S_1 des zu testenden Materials oberhalb des Bodens eingebracht und die neue Nachhallzeit T_1 gemessen, die der neuen äquivalenten Absorptionsfläche A_1 entspricht. Die Differenz $A_1 - A_0$ entspricht dann $S_1 (\alpha_1 - \alpha_0)$, woraus der gesuchte Koeffizient α_1 gefunden werden kann, welcher dann α_{SAB} genannt wird, um anzudeuten, dass zu seiner Ermittlung die SABINE-Formel benutzt worden ist.

A3-5.4 Verschiedene Arten von absorbierendem Material

A3-5.4.1 Poröses Material

Der Schallabsorptionsvorgang in einem porösen Material resultiert aus der Reibung der oszillierenden Luftmoleküle an den inneren Oberflächen der Poren oder Strukturen.

Um als Schallabsorber wirkungsvoll zu sein, muss das Material luftdurchlässig sein. Mineralwolle und offenzellige Kunststoffschäume sind zur Absorption geeignet. Andererseits sind Kunststoffschäume mit geschlossenen Zellen, die keinen Luftdurchgang erlauben, als Schallabsorber nicht wirksam.

Die wichtigsten Parameter für poröse Absorber sind der Strömungswiderstand gegen die Luft, die Porosität und die Dicke des porösen Materials vor einer reflektierenden Oberfläche (Wand oder Decke), auf der es befestigt ist.

Die Absorption in porösem Material nimmt mit dem Strömungswiderstand und der Dicke des Materials bis zu bestimmten Höchstwerten dieser Eigenschaften zu.

- Die Porosität σ ist das Verhältnis des Luftvolumens zu dem Gesamtvolumen des Materials.
- Für homogene Materialien wird der Strömungswiderstand R_S wie folgt definiert:

$$R_S = \Delta p \cdot \frac{A_e}{q_v} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = 0,1 \text{ Rayl} \right] \quad [24]$$

wobei A_e (m^2) der Querschnitt des Probekörpers, Δp (Pa) der Druckabfall über den Abstand d_s und q_v (m^3/s) die Luftmenge ist, die durch den Probekörper strömt.

- Der längenspezifische Strömungswiderstand r durch den Probekörper der Dicke d (m) wird wie folgt definiert:

$$r = \frac{R_S}{d} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^4} = 0,001 \frac{\text{Rayl}}{\text{cm}} \right] \quad [25]$$

The formula used $T = 0,16 \frac{V}{A}$ is called "SABINE" formula.

where A is the equivalent absorption area, V the volume of the reverberation chamber and T the reverberation time.

The principle of measurement consists in measuring the reverberation time T_0 in an empty reverberation chamber. From this measurement, one deduces an equivalent absorption area A_0 using the SABINE formula and hence an average absorption coefficient α_0 , knowing the total surface of the chamber walls. Then, one introduces a surface S_1 of the material to be tested above the ground and measures the new reverberation time T_1 which corresponds to an equivalent absorption area A_1 . The difference $A_1 - A_0$ is equal to $S_1 (\alpha_1 - \alpha_0)$ which allows for a deduction of the sought coefficient α_1 which is then called α_{SAB} to indicate that one has used the SABINE formula to obtain it.

A3-5.4 Different types of absorbing materials

A3-5.4.1 Porous material

The sound absorption process of a porous material results from the friction between the oscillating air molecules and the interior surface of the pores or structures.

In order to be effective as a sound absorber, a porous material must allow air to pass through. Mineral wool and plastic foam with open cell structure are suitable for absorption. On the other hand, plastic foam with closed cells, which do not allow airflow, is not effective as a sound absorber.

The important parameters of porous sound absorbers are resistance against airflow, porosity and the depth of the cavity between the porous material and the reflecting surface (wall or ceiling) on which it is mounted.

The absorption of porous materials increases with the flow resistance and the thickness of the material up to certain optimum values of these characteristics.

- The porosity σ is the ratio of volume occupied by air to the total volume of the material.
- For homogeneous materials, the specific flow resistance to air, R_S , is defined as follows:

where A_e (m^2) is the cross-section of the sample, Δp (Pa) the pressure drop over the distance d_s and q_v (m^3/s) the volume of air flowing through the sample.

- The longitudinal flow resistance r through a sample of the thickness d (m) is defined as follows:

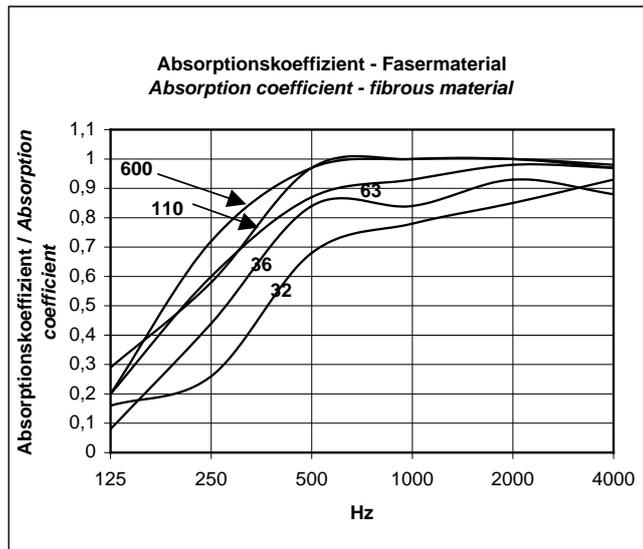


Bild 14: Die Absorption von Mineralwolle konstanter Dicke vor schallharter Wand ist abhängig vom längenspezifischen Strömungswiderstand r in $\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}}$. Der Absorptionskoeffizient nimmt mit der Frequenz zu.

Figure 14: The absorption of mineral wool of constant thickness placed before a sound-reflecting wall is dependent upon the specific flow resistance r in $\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}}$. The absorption coefficient increases with the frequency.

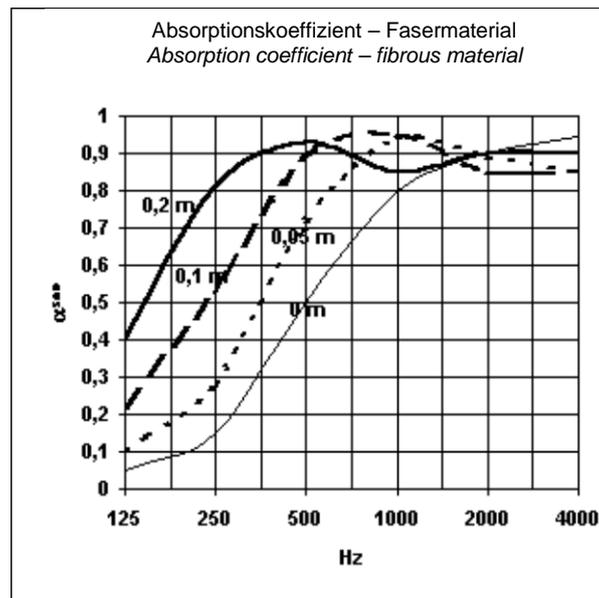


Bild 15: Für identische Mineralwollen ändert sich der Absorptionskoeffizient mit dem Montageabstand. Die beiden unteren Kurven mit den dünnen Linien beziehen sich auf eine 20 mm dicke Mineralwolleplatte ($r = 50 \text{ Rayls/cm}$). Die beiden oberen Kurven in dickeren Linien entsprechen einer 25 mm dicken Mineralwolle ($r = 50 \text{ Rayls/cm}$). (Quelle: Deutscher Normenausschuss)

Figure 15: For identical mineral wools, the absorption coefficient varies with the mounting distance. The two lower curves in thin lines correspond to a 20 mm thick mineral wool board ($r = 50 \text{ Rayls/cm}$). The two upper curves in bold lines correspond to a 25 mm thick layer of mineral wool ($r = 50 \text{ Rayls/cm}$). (Source: Deutscher Normenausschuss)

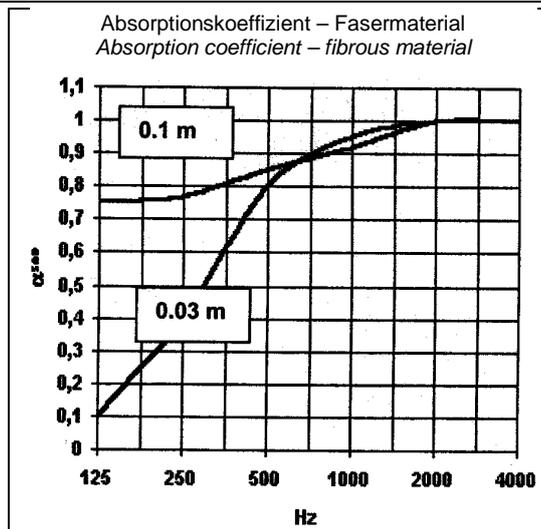


Bild 16: Die Absorption von faserigen Materialien ist abhängig von der Dicke der Faserschicht - Mineralwolle von 120 kg/m^3 Rohdichte in Dicken von 30 mm bzw. 100 mm

Figure 16: The absorption of fibrous materials depends on the thickness of the fibrous layer – mineral wool 120 kg/m^3 , thicknesses 30 mm, respectively 100 mm

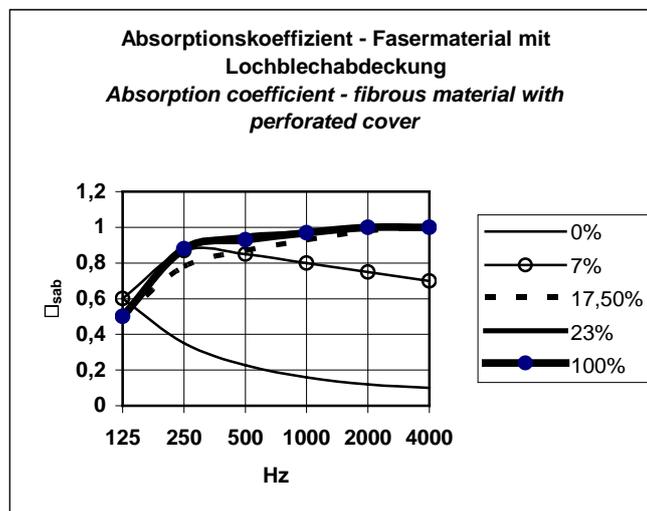
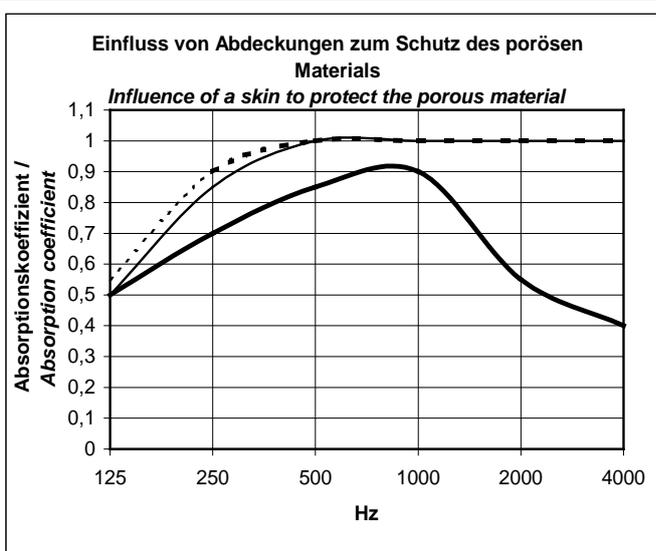


Bild 17: Die Absorption von faserigen Materialien mit Lochblechabdeckung in Abhängigkeit vom Anteil der Lochung

Figure 17: The absorption of fibrous materials with perforated covers is dependent upon the perforation rate

Ein Lochanteil von 0 % entspricht einem nicht perforierten Blech, wodurch die Wirkung einer Membran erzielt wird. Die Perforation von 100 % bedeutet ungeschützte Mineralwolle-Lage.

The perforation rate of 0% corresponds to a non-perforated sheet, producing the effect of a membrane. The perforation rate of 100% corresponds to an unprotected mineral wool layer.



dünne durchgezogene Linie:
Mineralwolle ohne Schutzschicht auf der perforierten Unterlage
thin plain line:
mineral wool without protection on the perforated sheet
gepunktete Linie:
Mineralwolle mit einem dünnen Glasgewebe (ganz ähnliches Ergebnis)
dotted line:
mineral wool with a thin fibre glass tissue (quite the same result)
obere Kurve:
Mineralwolle mit einer dampfdichten Folie (Polyethylen)
a) PE-Folie ca. 50 g/m²
b) PE-Folie ca. 100 g/m²
Hohe Frequenzen werden weniger absorbiert.
untere Kurve:
mineral wool with a steam-tight skin (polyethylene)
a) PE foil about 50 g/m²
b) PE foil about 100 g/m²
High frequencies are less absorbed.

Bild 18: 60 mm Mineralwolle mit verschiedenen Abdeckungen auf Lochblech montiert (23 %)

Figure 18: 60 mm mineral wool with different covering material on a perforated sheet (23%)

In nachstehenden Tabellen und Diagrammen sind weitere Beispiele von Absorptionskoeffizienten dargestellt.

The tables and diagrams below show additional examples of absorption coefficients.

Dichte Density (kg/m ³)	Dicke Thickness (m)	Absorptionskoeffizient α_{SAB} pro Oktave Absorption coefficient α_{SAB} per octave						α_w
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
40	0,1	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,03	0,10	0,30	0,60	0,85	0,95	1,00	0,60
50	0,1	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	0,03	0,10	0,30	0,65	0,85	1,00	1,00	0,60
70	0,03	0,10	0,35	0,75	0,95	1,00	1,00	0,65
100	0,03	0,10	0,35	0,80	0,95	1,00	1,00	0,65
120	0,03	0,10	0,45	0,85	0,95	1,00	1,00	0,75
120	0,1	0,70	0,75	0,90	0,95	0,95	1,00	0,95

Tabelle 7: Mineralwolle verschiedener Dicken ohne Abstand zur schallharten Wand

Table 7: Mineral wool of varying thickness on a sound-reflecting wall

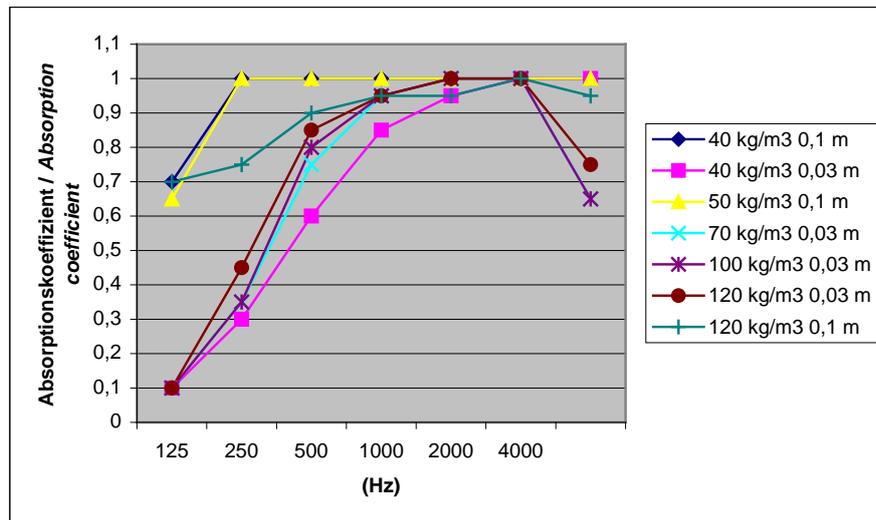


Bild 19:

Figure 19:

Dichte Density (kg/m ³)	Dicke Thickness (m)	Absorptionskoeffizient α_{SAB} pro Oktave Absorption coefficient α_{SAB} per octave						α_w
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
60	0,08	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
66*	0,05	0,45	0,40	0,60	0,50	0,40	0,35	0,45
72	0,025	0,25	0,80	0,90	0,85	0,90	1,00	0,90
72	0,04	0,30	0,80	0,95	0,90	0,90	1,00	0,95
80*	0,025	0,40	0,45	0,40	0,55	0,50	0,45	0,50
80	0,04	0,35	0,85	0,90	0,95	0,90	1,00	0,95
100	0,025	0,35	0,80	0,90	0,95	0,90	1,00	0,95
120	0,1	0,70	0,75	0,90	0,95	0,95	1,00	0,95

Tabelle 8: Mineralwolle verschiedener Dicken mit 0,25 m bzw. 0,30 m Abstand zur schallharten Wand **Table 8: Mineral wool of varying thickness at a distance of 0,25 m or 0,30 m from the sound-reflecting wall**

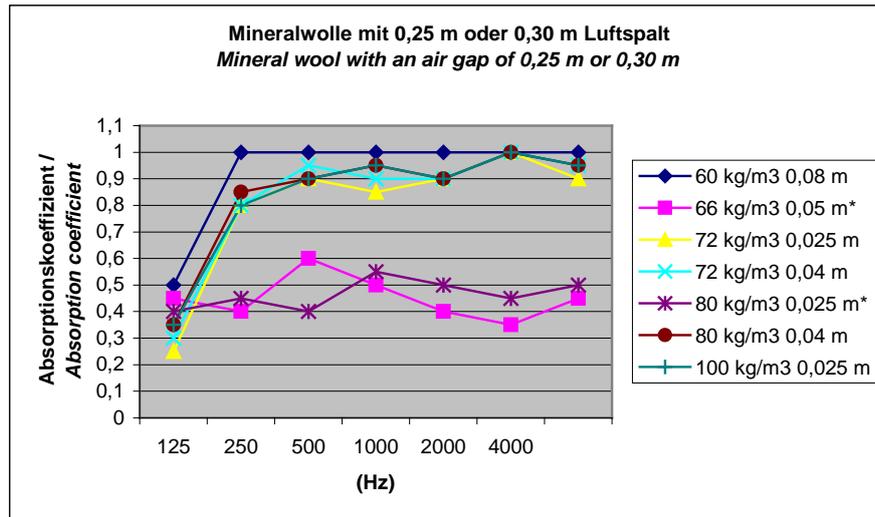


Bild 20:

Die beiden unteren Kurven, die in der Tabelle und der Legende mit einem Stern markiert sind, beziehen sich auf Mineralwolle, die mit einem dünnen aluminiumbeschichteten Glasgewebe geschützt ist.

Figure 20:

The two lower curves, marked with an asterisk in the table and the legend, correspond to mineral wool protected by a thin aluminium-coated glass tissue.

A3-5.4.2 Systeme zur Resonanzabsorption

Resonanzsysteme für Absorptionszwecke bestehen normalerweise aus Membranen, perforiert oder nicht, die in einem bestimmten Abstand vor der zu verbessernden Wand montiert werden. Der Abstand zwischen Membran und Wand wird teilweise mit Mineralwolle ausgefüllt.

Maßgebende Parameter solcher Resonanzabsorptionssysteme sind der Montageabstand d , die Dicke und das Flächengewicht m' in kg/m² der Membran sowie die Lochung der Membran.

A3-5.4.2 Resonance absorbing systems

Resonance systems used for absorption are generally formed of membranes, perforated or not, which are placed in a certain distance before the wall to be improved, the space between the membrane and the wall being partially filled with mineral wool.

The decisive parameters of such resonance absorbing systems are the mounting distance d , the thickness and the mass per surface unit m' in kg/m² of the membrane and the perforations in the membrane and its thickness.

Erster Fall: Die Membran ist nicht perforiert

First case: The membrane is not perforated

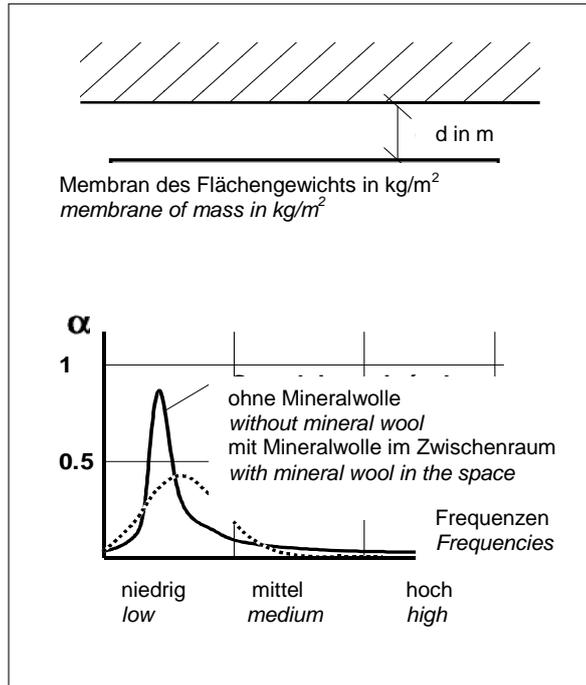


Bild 21: Die Membran bewirkt die Absorption im Niedrigfrequenzbereich. Eine Mineralwolle-Lage im Zwischenraum reduziert die höchstmögliche Absorption, erhöht jedoch die Frequenz-Bandbreite, in der Absorption stattfindet

Figure 21: The membrane gives an absorption at low frequencies. A mineral wool layer in the cavity reduces the maximum absorption, but it increases the effective frequency range of absorption

Bei senkrechtem Schalleinfall nimmt die Resonanzfrequenz der Membran folgende Form an:

Under perpendicular incidence impact, the resonance frequency of the membrane is of the form:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m' \cdot d}} \text{ in Hz} \quad [26]$$

wobei m' das Flächengewicht der Membran in kg/m² und d die Tiefe des Zwischenraumes zwischen Membran und Wand in m ist.

where m' is the mass in kg/m² of the membrane and d the thickness of the space behind the sheet in m.

Im diffusen Schallfeld gilt:

In a diffuse acoustical field, it applies:

$$f_0 = \frac{84}{\sqrt{m' \cdot d}} \text{ in Hz} \quad [27]$$

In tatsächlich vorkommenden Systemen liegt die Resonanzfrequenz häufig zwischen den beiden Werten, die mit den o. g. Formeln ermittelt werden.

In actual systems, the resonance frequency is frequently between the two values obtained using the above formulae.

Beispiele:

Examples:

Tabelle 9 gibt die gemessenen Absorptionskoeffizienten für eine Sperrholzmembran von 6 mm Dicke mit einem Flächengewicht m' von 4.2 kg/m² an. Die Membran ist wegen der Montagestifte in gewisser Weise ausgesteift.

Table 9 gives the measured absorption coefficients for a plywood membrane of 6 mm thickness with a surface mass m' of 4.2 kg/m². The membrane is stiffened to some extent by the brackets supporting it.

Referenzkurve im Bild <i>Reference curve in figure</i>	Montageabstand (Hohlraum) <i>Mounting distance (cavity)</i>	f ₀ in Hz	Abstand der Montagestifte <i>Spacing of brackets</i>	Dicke der Mineralwolle <i>Thickness of mineral wool (100 kg/m³)</i>	Koeffizient α pro Oktave in Hz <i>Coefficient α per octave in Hz</i>						α _w
					125	250	500	1000	2000	4000	
dicke Linie <i>strong line</i>	0,05 m	130 – 180	0,5 m	0,05 m	0,57	0,37	0,13	0,07	0,06	0,03	0,1
dünne Linie <i>fine line</i>	0,1 m	92 – 130	1,05 m	0,05 m	0,75	0,30	0,12	0,05	0,04	0,03	0,05
gepunktete Linie <i>dotted line</i>	0,1 m	92 – 130	1,05 m	0,1 m	0,59	0,38	0,18	0,08	0,05	0,06	0,1

Tabelle 9:

Table 9:

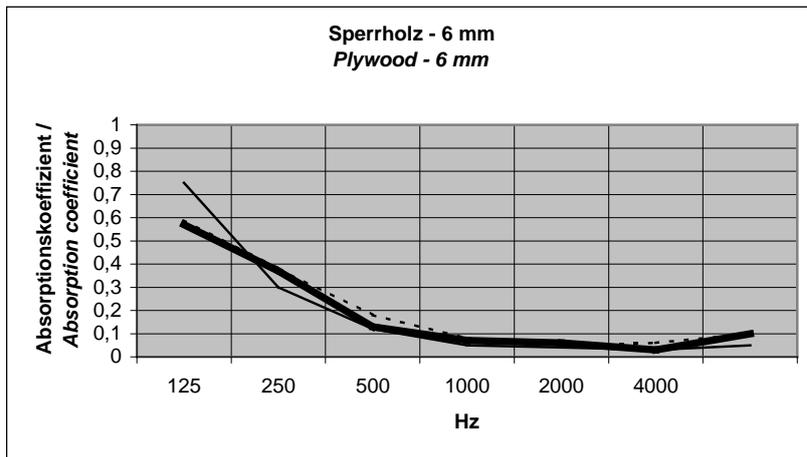


Bild 22: Absorptionskoeffizient von 6 mm Sperrholz mit unterschiedlichem Montageabstand und Mineralwolleeinlage verschiedener Dicken

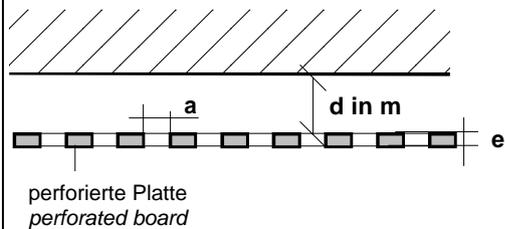
Figure 22: Absorption coefficient of a 6 mm plywood board with several different mineral wool layer thicknesses and mounting distances

Zweiter Fall: Perforierte Platte

Perforierte Platten funktionieren wie eine Ansammlung von kleinen Resonanzkörpern (Helmholtz-Resonatoren), wobei die Frequenz-Bandbreite durch die Perforierung in der Platte und der Hohlraum durch einen Teil des Abstands zwischen der perforierten Platte und der eigentlichen Wand bestimmt wird.

Second case: Perforated board

Perforated boards function like an assemblage of small resonance bodies (Helmholtz resonators) grouped together, where the frequency range is determined by the perforations in the board and the cavity by a fraction of the space between the perforated board and its supporting structure.



- $\rho =$ Perforation in %
perforation in %
- $e =$ Dicke der Platte in m
thickness of the board in m
- $d =$ Abstand von der Wand in m
thickness of the cavity in m
- $a =$ Durchmesser der Löcher in m
diameter of perforations in m

Bild 23:

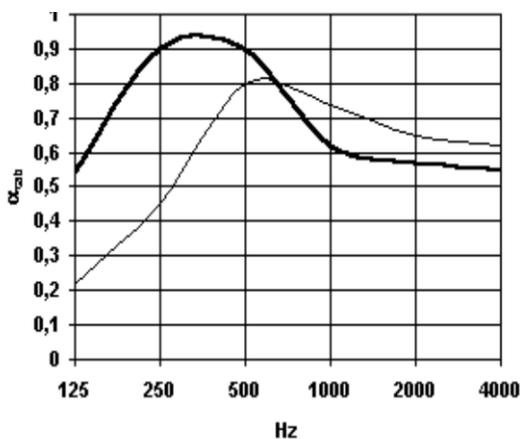
Die Resonanzfrequenz, bei der ein Höchstmaß an Absorption auftritt, ist mit der folgenden Formel angegeben:

Figure 23:

The resonance frequency, at which the maximum of absorption occurs, is given in the following formula:

$$f_0 = 54 \sqrt{\frac{\rho}{d \cdot (e + 0,8 a)}} \text{ [Hz]} \quad [28]$$

Gemessene Absorption für perforierte Gipskartonplatten
Absorption for perforated gypsum boards measured



	e (m)	ρ (%)	d (m)	a (m)
dicke Linie strong line	0,0125	12/100	0,1	0,008
dünne Linie fine line	0,005	15/100	0,05	0,014

Bild 24: Einfluss des Lochanteils des Durchmessers der Löcher einer Gipskartonplatte
Durch Veränderung der Werte aller Faktoren lässt sich der Punkt maximaler Absorption verschieben
A3-6 Körperschalldämpfung

Da Schallenergie, die in Wärme umgewandelt wurde, sicher nicht mehr gehört werden kann, besteht eine sehr wirksame und weit verbreitete Methode der Körperschallminderung in der gezielten Körperschalldämpfung, d. h. man versucht durch geeignete Materialien und Konstruktionen die Körperschallenergie möglichst nahe an der Quelle in Wärme umzuwandeln. Dies geschieht durch die Benutzung von Materialien, die gewisse innere Verluste aufweisen, durch Ausnutzung der Reibung an Berührungsflächen sowie schließlich durch die Verwendung von stark dämpfenden Materialien (hochmolekulare Polymere, Sand) in Verbindung mit Konstruktionen aus schlecht dämpfenden Materialien (Metall). In jedem Fall – solange es sich um lineare Prozesse handelt – ist der maßgebliche Wert für die Beschreibung der Körperschalldämpfung der Verlustfaktor, der wie folgt definiert ist:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\Delta W}{2\pi W_2} \quad [29]$$

wobei ΔW der Schalleistungsverlust pro Zyklus ist und W_2 die erhaltene Energie. Als generelle Regel ist der Verlustfaktor von der Frequenz, der Temperatur und der Art der Wellenausbreitung abhängig.

A3-6.1 Verlustfaktoren verschiedener Materialien und Konstruktionen

Figure 24: The effect of the percentage of perforation and the diameter of the holes in a plaster board
By changing the values of all factors, the point of maximum absorption can be changed
A3-6 Structureborne sound attenuation

Since the sound energy, which has been transformed into thermal energy, most certainly cannot be heard anymore, an effective and widely used method of structureborne sound reduction exists in the directed structureborne sound dissipation, i. g. one attempts through the selection of appropriate materials and constructions to transform the structureborne sound energy into heat as close as possible to its source. This is achieved by using materials that are susceptible to losses and which possess a certain internal loss and by exploiting the friction on the contact surfaces and finally by applying strongly attenuating materials (high-polymers, sand) to constructions of lowly attenuating materials (metals). In each case – as long as these are linear processes – the appropriate value for the characterisation of the structureborne sound attenuation is the loss factor, which is defined as:

where ΔW is the energy loss per cycle and W_2 the energy recovered. As a general rule, the loss factor is dependent upon the frequency, the temperature and the mode of wave expansion.

A3-6.1 Loss factors of different materials and constructions

Material	Dichte Density kg/m ³	Elastizitätsmodulus Elasticity modulus E kN/mm ² 10 ⁹ · N/m ²	Poisson-Zahl Poisson ratio μ	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen Longitudinal wave velocity c_L m/s	Verlustfaktor Loss factor η_{int}	Koinzidenz-Konstante Coincidence constant $f_c \cdot t$ Hz · m	
Baustoffe Fabric material							
Asphalt	1800 – 2300	7,7 – 21 5 – 10	-	1900 – 3200 1600 – 2100	0,05 – 0,3	30 – 38	
verstärkter Beton B25 <i>reinforced concrete B25</i>	2100	29,5	}	3750	0,01- 0,6	17,1	
verstärkter Beton B55 <i>reinforced concrete B55</i>	2400	38,5		0,09	4000	0,01 – 0,6	16,0
Leichtbeton <i>lightweight concrete</i>	1300	3,8		-0,24	1800	$\approx 10^{-2}$	37 – 48
Schwerbeton <i>heavy concrete</i>	2300	26		-	3500	$4 - 8 \cdot 10^{-3}$	17
Ziegelstein <i>brick</i>	1900 – 2100	≈ 26	-	2500 – 3000	$\approx 10^{-2}$	-	
faseriger Dämmstoff <i>fibrous insulation material</i>	50 – 150	-	-	80 – 300	$\approx 0,1$	-	
Gipskartonplatte <i>gypsum board</i>	1000 – 1200	3,5 – 7	-	1900 – 2600	0,004	24 – 35	
Sand	1,3 – 1800	-	-	1000 – 3000	0,05 – 0,2	-	
Glas <i>glass</i>	2500	$(6 - 8) \cdot 10^2$	0,22 – 0,25	4900 – 5700	0,001	11 – 13	
Holzwohleplatte <i>wood fibre board</i>	600 – 1000	20 – 50	-	1750 – 2750	0,03	23 – 36	
Sperrholz <i>plywood</i>	600 – 800	50 – 120	0,01	1800 – 3900	0,02	14 – 35	
Eichenholz <i>oak wood</i>	700	0,2 – 1	-0,2	1500 – 3500	0,01	18 – 32	
Nadelholz <i>fir-tree wood</i>	480	0,1 – 0,5	-	1450 – 3200	0,01	20 – 32	
Hartfaserplatte <i>hard-fibre board</i>	1000	3 – 4,5	-	1700 – 2100	0,015	29 – 37	
Böden, nicht setzend (DIN 4178) Soils, non-setting (DIN 4178)							
Sand, mittlere Dichte <i>sand, medium density</i>	1400	0,06 – 0,15	-	210 – 300	-	-	
silikonhaltiger Sand, inhomogen <i>siliceous sand, inhomogeneous</i>	1800	0,02 – 0,4	-	330 – 470	-	-	

Material	Dichte Density kg/m ³	Elastizitätsmodulus Elasticity modulus E kN/mm ² 10 ⁹ · N/m ²	Poisson-Zahl Poisson ratio μ	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen Longitudinal wave velocity c _L m/s	Verlustfaktor Loss factor η _{int}	Koinzidenz-Konstante Coincidence constant f _c · t Hz · m
8 mm Stahlplatte ohne Sand 8 mm steel board without sand	-	-	-	-	2 · 10 ⁻⁴	-
8 mm Stahlplatte mit Sand- packung 8 mm steel board with sand packing	2 kg/m ²	-	-	-	2,5 · 10 ⁻⁴	-
8 mm Stahlplatte mit Sand- packung 8 mm steel board with sand packing	5 kg/m ²	-	-	-	4,5 · 10 ⁻⁴	-
8 mm Stahlplatte mit Sand- packung 8 mm steel board with sand packing	10 kg/m ²	-	-	-	2,5 · 10 ⁻³	-
8 mm Stahlplatte mit Sand- packung 8 mm steel board with sand packing	20 kg/m ²	-	-	-	2,5 · 10 ⁻²	-
Kies, Steine (gebroche- ne Steine, ohne Sand) gravel, stones (crushed stone, free of sand)	1400	0,3 – 0,6	-	460 – 660	-	-
Schalldämmstoffe Sound insulation materials						
leichte Holzwolleplatten light wood-wool boards	600 – 700	0,1 – 0,2	-	1500 – 1900	0,08	-
Mineralfaserfilze mineral-fibre felts	60 – 80	0,00013 – 0,00016	-	-	-	-
Mineralfaserplatten mineral-fibre boards	80 – 130	0,00015 – 0,0004	-	-	0,1	-
Naturkork natural cork	230 – 280	0,015 – 0,025	-	400 – 450	0,13 – 0,17	-
expandierter Kork (voll expandiert) expanded cork (fully expanded)	80 – 160	0,004 – 0,0045	-	-	-	-
leichte Faserdämmplat- ten soft fibre insulation boards	200 – 300	0,01 – 0,016	-	-	0,14	-
Schaumglas cellular glass	130 – 160	1,3 – 1,6	-	3000 – 3100	0,001	-
PVC-Hartschaum PVC rigid foam	40 – 60	0,001 – 0,0012	-	500 – 700	0,03 – 0,6	-
	9 – 12	0,0006 – 0,0012	-	-	-	-
	12 – 15	0,0012 – 0,002	-	-	-	-
Polystyrolschaum (EPS) polystyrene foam (EPS)	15 – 20	0,002 – 0,004	-	-	-	-
	20 – 25	0,004 – 0,008	-	-	-	-
Luft air						
- bei 20 °C frei beweglich	1,2	0,00014	-	-	-	-
- at 20 °C freely moving						
- zwischen Fasern - between fibres	1,2	0,0001	-	-	-	-
Plastikmaterial bei 20 °C Plastic materials at 20 °C						
Acrylglas (Plexi) acrylic glass (Plexi)	1200	5,6	-	2200	0,02 – 0,6	29
Polypropylen (PP) polypropylene (PP)	1100	3	-	1700	0,1	38
Polyester	1200	4,5	-	1950	0,14	32,5
- Harz mit Glasfa- sern	2200	115	-	2300	0,02	27,4
- resin with glass fibre						

¹⁾ Durchschnittswerte (500 Hz) für gleichmäßig verteilte Sandpackungen (trockener Sand, Kieselgröße 9).
Average values (500 Hz) for evenly distributed sand packings (dry sand, pebble size 9).

Material	Dichte Density kg/m ³	Elastizitätsmodulus Elasticity modulus E kN/mm ² 10 ⁹ · N/m ²	Poisson-Zahl Poisson ratio μ	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen Longitudinal wave velocity c _L m/s	Verlustfaktor Loss factor η _{int}	Koinzidenz-Konstante Coincidence constant f _c · t Hz · m
Polyvinylchlorid, hart (PVC) <i>polyvinyl chloride, rigid (PVC)</i>	1300	2,7	-	1450	0,04	43,5
Polyethylen (PE), hart (geringe Druckfestigkeit) <i>polyethylene (PE), rigid (low pressure)</i>	950	1,7	-	1350	0,04	47
Polyethylen (PE), weich (hohe Druckfestigkeit) <i>polyethylene (PE), soft (high pressure)</i>	920	0,4	-	660	0,1	95,5
Polystyrol (PS) <i>polystyrene (PS)</i>	1050	3	-	1670	0,01	37,6
verstärkt mit 30-35 % Glasfaser <i>reinforced with 30-35% glass fibre</i>	1450	8	-	2350	-	26,8
Hartgummi <i>rubber, rigid</i>	1100	2,3	-	1450	-	-
- Grenzfestigkeit A 65	1200	0,015	-	120	0,12	-
- <i>shore rigidity A 65</i>						
Ah A 55	1200	0,01	-	90	0,08	-
Sh A 40 ≈ Naturgummi <i>Sh A 40 ≈ natural rubber</i>	1000	0,005	-	70	0,04	-

Metalle**Metals**

Aluminium	2700	74	0,34	5200	7 · 10 ⁻⁵	12
Blei <i>lead</i>	11400	18	0,43	1300	0,02	48,5
Messing <i>brass</i>	8500	69	0,33	3400	5 · 10 ⁻⁴	18,6
Stahl, Gussstahl <i>steel, cast steel</i>	7800	200	0,41	5100	1 · 10 ⁻⁴	12,3
schmiedbares Gussei- sen <i>malleable cast iron</i>	7500	170	-	4750	-	13,2
Gusseisen mit Graphit- splintern <i>cast iron with pebble graphite</i>	7250	120	-	4100	0,01	15,4
mit Graphitlamellen <i>with lamella graphite</i>	7500	120	-	4100	0,02	15,4

f_c = kritische Frequenz, f_c · f = Koinzidenz-Konstante, t = Dicke des Materials.

Anmerkung: 1 kN/mm² = 10⁹ N/m² = 10¹⁰ dN/cm² ≈ 10⁴ kp/cm²

f_c = critical frequency, f_c · f = coincidence constant, t = material thickness

Note: 1 kN/mm² = 10⁹ N/m² = 10¹⁰ dN/cm² ≈ 10⁴ kp/cm²

Tabelle 10: Mechanische Werte ausgewählter Materialien unter Normalbedingungen

Table 10: Mechanical data of selected materials under normal conditions

In Tabelle 10 sind die Verlustfaktoren verschiedener Materialien zusammen mit anderen wichtigen Eigenschaften angegeben. Es handelt sich um Materialien, bei denen der Verlustfaktor im allgemein interessierenden Bereich (20 Hz bis 10 kHz; -30 °C bis +100 °C) einigermaßen konstant ist (Ausnahme Asphalt). Bei Benutzung der angegebenen Werte ist jedoch zu beachten, dass die dazugehörigen Messungen an **homogenen Proben unter Laborbedingungen**, also ohne Energieableitung nach außen, vorgenommen wurden. Außerdem bleiben die Unterschiede durch Gefügeänderung, die den Verlustfaktor zu einer wichtigen Messgröße in der Materialforschung machen, unberücksichtigt.

In Table 10, the loss factors of different materials had been given in addition to other important data. These are materials where the loss factor in the generally interesting range (20 Hz to 10 kHz; -30 °C to +100 °C) is fairly constant (exception asphalt). When using the values given, however, it must be taken into consideration that the associated measurements have been executed on **homogeneous specimen under laboratory conditions**, that is to say without energy transfer to the outside. Additionally, the difference through structural changes, which constitute the loss factor's importance in the material research, remain outside the calculation.

Die Werte in Tabelle 10 sind Anhaltswerte für Berechnungen. Sie werden allgemein benutzt und liegen auf der sicheren Seite der Daten, die tatsächlich für einzelne Produkte messtechnisch nachgewiesen wurden.

The data given in Table 10 are approximate values for calculation. They are generally used and lie on the safe side of data actually established for individual products by measurement.

In der Praxis sind alle Konstruktionen aus mehreren Teilen zusammengefügt und irgendwo befestigt, so dass stets **Reibung an Kontaktflächen oder Energieableitung** nach außen vorhanden ist. Dadurch treten immer – abgesehen von Glocken, Gongs, usw. – Verluste auf, die bewirken, dass der Verlustfaktor kaum weniger als 10^{-3} beträgt. Für praktische Konstruktionen kann man mit folgenden Richtwerten für die Verlustfaktoren rechnen, wobei angenommen ist, dass keine besonderen zusätzlichen Dämpfungsmaßnahmen (z. B. Entdröhnung, Sand-schüttung, usw.) getroffen wurden:

- a) Gebäude aus Beton oder Ziegelmauerwerk: $\eta \approx 10^{-2}$, frequenzabhängig;
- b) Metallkonstruktionen aus wenigen dicken Komponenten (z. B. Außenhaut von Schiffen): $\eta_{\text{int}} \approx (1-3) \cdot 10^{-3}$;
- c) Metallkonstruktionen aus vielen dicken und wenigen dünnen Eisenkomponenten (z. B. Motoren, Automobile): $\eta_{\text{int}} \approx 10^{-2}$;
- d) Metallkonstruktionen aus vielen dünnen Teilen (kleine komplizierte Maschinen): $\eta_{\text{int}} \approx (1-5) \cdot 10^{-2}$.

A3-6.2 Kombination von Materialien mit hohen und niedrigen Verlustfaktoren

Materialien mit hohen Festigkeiten (z. B. Metalle) besitzen häufig einen niedrigen Verlustfaktor, und Materialien mit hohen Verlustfaktoren (z. B. hochmolekulare Polymere im Grenzbe-reich) besitzen nicht die benötigte Festigkeit. Aus diesem Grund wird eine Kombination beider Materialarten empfohlen. Das bedeutet in der Praxis, dass Metallplatten, Rohrleitungen oder Stützen, usw. mit Plastiklagen mit hohen Verlustfaktoren kombi-niert werden, entweder vor der Benutzung (z. B. als Sandwich-platte) oder nach dem Einbau (z. B. durch zusätzliche Entdröh-nung).

Dabei ist es natürlich notwendig, nicht nur ein Material mit mög-lichst hohem Verlustfaktor zu verwenden, es muss auch dafür gesorgt werden, dass möglichst viel Körperschallenergie in das dämpfende Material eingeleitet wird. Beispielsweise nützt es wenig, das dämpfende Material dort anzubringen, wo die Bewe-gungsamplituden klein sind, oder ein Material mit sehr hohem Verlustfaktor zu benutzen, das jedoch wegen seines kleinen E-Modulus kaum Körperschallenergie aufnehmen kann.

Bei Entdröhnbelägen gilt es, einen möglichst steifen, dicken, verlustbehafteten Belag zu verwenden, so dass das Produkt $E \cdot \eta$ (Elastizitätsmodulus · Verlustfaktor) des Belages mög-lichst groß ist. Typische Daten für ein gut entdröhntes Blech sind:

$$\frac{E_2}{E_1} \approx 3 \cdot 10^{-3}; E_2 \cdot \eta_{\text{int}2} \approx 10^3 \text{ N/mm}^2; t_2 = t_1; \eta_{\text{int}} \approx 0,08 \quad [30]$$

wobei der Index $_2$ die Entdröhnungslage und der Index $_1$ die metallische Unterlage ist.

A3-6.3 Dämpfung an Kontaktflächen

Bei der Dämpfung an Kontaktflächen treten folgende Phä-nomene auf:

Gasfederung: Luft bewegt sich zwischen angrenzenden Teilen, was zu Fließverlusten und einer Kör-perschalldämpfung führt.

trockene Reibung, Die trockene Reibung und die elastische Verformung der beiden Kontaktflächen, die sich in unterschiedlicher Rich-tung bewegen, führen zu Körperschall-dämpfung.
Minimalbewegung:

In practice, all constructions are combinations of several parts and are fastened somewhere, so that **friction at contact sur-faces or energy transfer** to the outside always occurs. There-fore, losses always take place – setting aside bells, gongs, etc. – which result in a loss factor which is hardly ever less than 10^{-3} . For practical construction, the following design values for the loss factor may be used, assuming that no special additional attenuation measures (e. g. de-booming, sand packings, etc.) had been taken:

- a) buildings of concrete or brick work: $\eta \approx 10^{-2}$, dependent upon the frequency;
- b) metal constructions made of few thick components (e. g. outer skin of ships): $\eta_{\text{int}} \approx (1-3) \cdot 10^{-3}$;
- c) metal constructions made of many thick and few thin iron components (e. g. motors, automobiles): $\eta_{\text{int}} \approx 10^{-2}$;
- d) metal constructions made of many thin parts (small compli-cated machines): $\eta_{\text{int}} \approx (1-5) \cdot 10^{-2}$.

A3-6.2 Combination of materials with high and low dissipation factors

Materials with good compression characteristics (e. g. metals) frequently possess a low loss factor, and materials with high losses (e. g. high-polymers in the fringe area) do not possess the compressive strength required. It is therefore recommended to combine both sorts of material. This means in practice that metal boards, pipes or columns, etc. are combined with strongly dissipating plastic layers, either before use (e. g. as sandwich sheet) or after installation (e. g. through additional de-booming).

In this case it is not only necessary to use a material with a high loss factor, but additionally care must be taken that as much as possible structureborne sound energy is transferred into the dissipating material. It is, for example, fairly useless to apply the attenuating material where the amplitude of movement is low, or to use a material with a high dissipation factor, which can ab-sorb only very little structureborne sound energy because of its low elasticity modulus E .

For de-booming layers it is important to use a stiff, thick layer with a high loss factor so that the product $E \cdot \eta$ (elasticity modulus · loss factor) of the layer is as high as pos-sible. Typical data for a well de-boomed sheet are:

where the index $_2$ is the de-booming layer and the index $_1$ the metal substrate.

A3-6.3 Attenuation at contact surfaces

With the attenuation at contact surfaces, the following effects exist:

gas pumping: Air is being moved between adjacent compo-nents which results in viscous losses and a structureborne sound attenuation.

dry-friction, The dry friction and elastic deformation of two contact surfaces moving in opposite directions lead to structureborne sound attenuation.
micro-slip:

Flüssigfilmreibung:	Wie bei Verbundblechen bewegen sich zwei Oberflächen über ein dazwischen liegendes Material (in diesem Fall der Feuchtfilm von geeigneter kinetischer Festigkeit und Dichte, Viskosität), um die Körperschalldämpfung zu bewirken.	lubricating-film friction:	As with composite sheets, two surfaces move over an intermediate material (in this case the lubricating film with appropriate kinematic toughness and density, viscosity) to achieve structureborne sound attenuation.
Schüttungen:	Grenzt eine schwingende Struktur an ein körniges (Sandschüttung), faseriges (Mineralwolle) oder anderweitig stark verlustbehaftetes Medium, dann wird der Körperschall von der schwingenden Struktur in das Medium „abgestrahlt“ und dort in Wärme umgewandelt.	fillings:	In case a vibrating structure moves onto a granulated (sand packing), fibrous (mineral wool) or otherwise strongly dissipating medium, then the structureborne sound in the vibrating structure is “radiated” into that other medium and transformed into heat there.

A3-6.4 Verminderung des Körperschallpegels durch zusätzliche Dämpfung

Liegt bei einer Breitbandanregung keine Resonanzfrequenz innerhalb des anregenden Frequenzbereiches (z. B. mit kleinen dicken Platten und niedrigen Frequenzen) vor, bewirkt zusätzliche Dämpfung keine Verbesserung, da der Körperschallpegel nur durch die Masse und Festigkeit, aber nicht durch die Dämpfung bestimmt wird. Wenn jedoch – dies ist der Normalfall – eine oder mehrere Resonanzfrequenzen innerhalb des anregenden Frequenzbereiches liegen, werden die Pegel bei diesen Resonanzen um den oben angegebenen Wert abgesenkt. Da die Resonanzkurven jedoch gleichzeitig breiter werden, liegt die Annahme des Körperschallpegels im Frequenzmittel wie folgt:

$$\Delta L_{\text{ins}} \approx 10 \log_{10} \left(\frac{\eta_{\text{int}1\ 2}}{\eta_{\text{int}1}} \right) \text{ dB} \quad [31]$$

wobei der Index $1\ 2$ die Platte mit Entdröhnmaterial und der Index 1 die Platte ohne Entdröhnmaterial darstellt.

Bei kontinuierlicher Anregung (Rauschen) wird die Pegelminderung als Verringerung der Lautstärke, bei impulsförmiger Anregung (einzelne Schläge) mehr als Verringerung der Geräuschkdauer empfunden. Die durch zusätzliche Dämpfung in der Praxis erreichbare Pegelminderung liegt bei 5 dB bis 10 dB.

Wenn eine Platte (oder Balken, Rohr, usw.) so groß ist, dass die Anzahl der Wellenlängen, die auf die Platte passen, multipliziert mit dem Verlustfaktor η_n größer ist als 0,2, dann gilt die obige Betrachtung nicht immer, weil dann keine Resonanzen wahrnehmbar sind. Die Platte verhält sich dann vielmehr so, als ob sie unendlich groß wäre, d. h. bei lokalisierter Anregung ergibt sich gegenüber der ungedämpften Platte eine zusätzliche Pegelabnahme mit der Entfernung.

A3-6.4 Structureborne sound level decrease through additional attenuation

If in case of a wide-band excitation, there is no resonance frequency within the excitation frequency range (e. g. with small thick boards and low frequencies), an additional attenuation will not achieve any improvement, since the structureborne sound level is only determined by the mass or the rigidity, but not by the attenuation. However, if (this is the normal case) one or more resonance frequencies occur within the excitation frequency range, then the levels at these resonances are lowered by the value given above, however, since simultaneously the resonance curves become wider, the structureborne sound level decrease is at the average of frequencies:

where the index $1\ 2$ is the board with de-booming materials and the index 1 the board without de-booming material.

With continuous excitation (random noise), the level decrease is perceived as a decrease of the noise level. With intermittent excitation (individual shocks), it is perceived as a shortening of the duration of the noise. The level decrease practically achievable through additional attenuation is between 5 dB and 10 dB.

If a board (or a beam, pipe, etc.) is so big that the amount of wavelengths fitting onto it, multiplied with the dissipation factor η_n , is large than 0,02, the above observation does not always apply, since no resonances are perceptible. The board then behaves as if it were of unlimited size, i. e. with a limited excitation, an additional level decrease occurs with distance as compared to the untreated board.

A3-7 Bedeutung der Symbole und Einheiten für Kräfte und Größen

A3-7 Meaning of symbols and units of forces and quantities

Symbol	Quantität Quantity	Einheit Unit	Seite Page	Bemerkungen Quelle Remarks Source
a	Lochdurchmesser <i>diameter of perforations</i>	m	39	
A	äquivalente Absorptionsfläche (im Empfangsraum) <i>equivalent absorption area (in the locality of reception)</i>	m ²	6, 31, 33	EN 12354-1 ISO 31-7
A _e	Querschnitt des Probekörpers <i>cross-section of the sample</i>	m ²	33	
c	Schallgeschwindigkeit <i>speed of sound</i>	m/s	9	EN 12354-1
c ₀	Schallgeschwindigkeit in 20 °C Luft bei 1 bar (≈ 340 m/s) <i>speed of sound in air at 20 °C and 1 bar (≈ 340 m/s)</i>	m/s		
c _F	Schallgeschwindigkeit im Fluid <i>speed of sound in fluid medium</i>	m/s	12, 13	
c _L	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen <i>speed of sound of longitudinal waves</i>	m/s	12, 13, 41	
C	Faktor <i>factor</i>	dB	7, 13	
C, C _{tr}	Spektrumsanpassung <i>spectrum adjustment</i>	dB	7, 23	EN ISO 717-1

Symbol	Quantität Quantity	Einheit Unit	Seite Page	Bemerkungen Quelle Remarks Source
d	Tiefe des Zwischenraumes zwischen Platte und eigentlicher Wand <i>depth of air space between board and supporting wall</i>	m	14, 15, 37, 38, 39, 40	EN 12354-1
d _e	äußerer Rohrdurchmesser <i>exterior pipe diameter</i>	m	26	
d _i	innerer Rohrdurchmesser <i>interior pipe diameter</i>	m	26	
d _s	Strecke, die Luft durch einen Probekörper strömt <i>distance air travelling through a sample</i>	m	33	
e	Dicke einer Platte <i>thickness of a board</i>	m	39, 40	
E	Elastizitätsmodulus <i>modulus of elasticity</i>	N/m ²	14, 41, 44	EN 12354-1
f	Frequenz <i>frequency</i>	Hz	15, 16	EN 12354-1
f ₀	Resonanzfrequenz <i>resonance frequency</i>	Hz	14, 15, 18, 19, 24, 26, 28, 39	EN 12354-1
f _c	Grenzkoinzidenzfrequenz <i>limit coincidence frequency</i>	Hz	8, 9, 10, 11, 14, 42	EN 12354-1
f _{in}	Grenzfrequenz <i>limiting frequency</i>	Hz	12	
f _r	Ringdehnfrequenz <i>circumferential resonance frequency</i>	Hz		
h	Abstand zwischen Rohrleitung und Ummantelung <i>distance between pipe surface and cladding</i>	m	26	
i	Zählvariable <i>counting variable</i>		31	
I	Schallintensität <i>acoustic intensity</i>	W/m ²		ISO 31-7
l _f	gemeinsamer Verbindungsabstand zwischen angrenzenden Baukomponenten f und den trennenden Komponenten <i>common connection distance between the flanking building component f and the dividing component</i>	m		EN 12354-1
k _n	Modalfaktor <i>modal factor</i>		12	
L	Schalldruckpegel <i>sound pressure level</i>	dB bzw. / resp. 20 µPa		EN 12354-1
ΔL	Schalldruckpegeldifferenz <i>sound pressure level difference</i>	dB	29	
ΔL _{ins}	Einfügungsdämmmaß <i>insertion loss</i>	dB	29	
M	Masse <i>mass</i>	kg	14, 28, 29	
m'	Flächengewicht <i>mass per area</i>	kg/m ²	8, 11, 37, 38	EN 12354-1
m' _R	Flächengewicht einer Rohrleitung <i>weight per unit area of pipe</i>	kg/m ²	13	
n	Zählvariable <i>counting variable</i>		14	EN 12354-1
p	Lochanteil in % <i>perforation in %</i>		40	
p	Druckabfall <i>pressure drop</i>		33	
r	Reflexionsfaktor; längenspezifischer Strömungswiderstand <i>reflection factor; longitudinal flow resistance</i>		34	
R	Schalldämmmaß <i>sound reduction index</i>	dB	6, 7, 17, 30	EN 12354-1
R ₁	frequenzabhängige Dämmung <i>frequency dependent attenuation</i>	dB	17, 24, 26	
R _{1w}	bewertetes Schalldämmmaß <i>weighted sound reduction index</i>	dB	17	
R _A	R _w + C	dB	8	
R _{A; tr}	R _w + C _{tr}	dB	8	
R _{pm}	Schalldämmung einer Rohrwandung im Mittelfrequenzbereich <i>sound reduction properties of a pipe wall in the mid-frequency range</i>	dB	13	
R _s	Strömungswiderstand <i>specific flow resistance</i>		33	
R _w	bewertetes Schalldämmmaß <i>weighted sound reduction index</i>	dB	7, 8, 11, 12, 18, 21, 22	EN ISO 717-1
ΔR	Luftschallverbesserungsmaß <i>airborne sound improvement index</i>	dB	17, 18, 24, 25, 26, 27	

Symbol	Quantität Quantity	Einheit Unit	Seite Page	Bemerkungen Quelle Remarks Source
ΔR_W	bewertetes Luftschallverbesserungsmaß <i>weighted airborne sound improvement index</i>	dB	17, 18, 26	
s	Steifigkeit <i>stiffness</i>	N/m	28, 29	
s'	dynamische Steifigkeit (flächenbezogen) <i>dynamic stiffness (area related)</i>	N/m ³	14, 15	
S	Fläche eines Materials <i>area of a material</i>	m ²	31	
S _s	Trennwandfläche <i>area of the dividing component</i>	m ²	6	EN 12354-1
t	Dicke <i>thickness</i>	m	9, 11, 13, 42	
T	Nachhallzeit <i>reverberation time</i>	s	31, 33	EN 12354-1
v	Schallschnelle <i>sound particle velocity</i>	dB		
V	Volumen <i>volume</i>	m ³	31, 33	EN 12354-1
W	Schalleistung <i>sound energy</i>	W		EN ISO 3746
ΔW	Schallenergie­differenz <i>sound energy difference</i>	W	40	
W _{refl}	reflektierte Schallenergie <i>sound power (energy) reflected by a component</i>	W		
W _{abs}	absorbierte Schallenergie <i>acoustic energy absorbed in a component</i>	W		
α	Absorptionskoeffizient <i>absorption coefficient</i>			
α_{SAB}	Absorptionskoeffizient gemäß SABINE-Formel <i>absorption coefficient according to SABINE formula</i>			
α_W	bewerteter Absorptionskoeffizient <i>weighted absorption coefficient</i>		2, 31, 32, 36, 37, 40,	
η_{int}	interner Verlustfaktor <i>internal loss factor</i>		9, 10, 15, 41, 43	
μ	Poisson-Zahl <i>Poisson number (ratio)</i>		9, 41	
ρ	Dichte <i>density</i>	kg/m ³	9, 13	EN 12354-1 ISO 31-7
σ	Porosität <i>porosity</i>		33	EN 12354-1
τ	Übertragungsfaktor <i>transmission factor</i>		5, 6, 31	EN 12354-1

A3-8 Normen und Literatur / Quellen**A3-8 Standards and literature / sources**

ISO/DIS 15665:2001		Acoustic insulation for pipes, valves and flanges
EN 12354	1998-04-01	Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound
DIN EN 29053	1993-05-00	Acoustics – Materials for acoustical applications; Determination of airflow resistance ISO 9053:1991; deutsche Fassung / <i>German version</i> EN 29053:1993
VDI 3733	1996-07-00	Noise at pipes
Encyclopédie des Métiers – la maçonnerie et taille de pierre – tome VIII – L'isolation acoustique Autor / <i>Author</i> : M. Meisser		
Les Sciences du Bâtiment – REEF volume II – CDSB		
L'absorption acoustique des matériaux poreux – prédiction et mesures: thèse de doctorat de l'Université du Maine Autor / <i>Author</i> : P. Guignouard		
Taschenbuch der Technischen Akustikkommission Autor / <i>Author</i> : M. Heckl, H. A. Müller		Springer-Verlag Berlin / Heidelberg
Körperschall Autor / <i>Author</i> : L. Cremer, M. Heckl		Springer-Verlag Berlin / Heidelberg
Datenbuch der Isoliertechnik <i>Insulation Engineering Data Book</i>		KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG

Haftungsablehnung

Wir erachten die in diesem Dokument gegebene Information als eine gute Praxis- und Branchenanleitung (**Anleitung**). Diese Richtlinie wurde von einer FESI (www.fesi.eu) Kommission erstellt und ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung korrekt. Obwohl wir zuversichtlich sind, dass die enthaltenen Informationen dem neuesten Stand entsprechen und genau sind, ist dies nur ein Bezugsdokument. Es liegt in der Verantwortung des Nutzers, sein eigenes Wissen um die in dieser Richtlinie angesprochenen Probleme auf dem neuesten Stand zu halten.

Diese Richtlinie soll allgemeinen Zwecken dienen, und ist nicht dazu gedacht, maßgebliche nationale oder internationale Normen, Richtlinien oder (wo zutreffend) gesetzliche Regelungen zu übersteuern. Diese Richtlinie soll keine detaillierten Berechnungen und Einschätzungen vorherrschender physikalischer Bedingungen bei komplexen Bauvorhaben ersetzen.

Diese Richtlinie stellt keine gewerbliche Anweisung dar, und spezielle Fachfragen sollten anerkannten Experten vorgelegt werden. Jedes sich Verlassen auf diese Richtlinie ohne Einholung solchen Rates geschieht absolut auf eigene Gefahr. Wir geben keine irgendwie gearteten Zusicherungen oder Gewährleistungen, ausdrücklich oder dem Sinne nach, bezüglich der Vollständigkeit, Genauigkeit, Verlässlichkeit oder Maßgeblichkeit dieser Richtlinie.

Die Richtlinie wurde ursprünglich in Englisch verfasst. Wir übernehmen keine Verantwortung für irgendwelche Ungenauigkeiten, die in Übersetzungen dieser Richtlinie in andere Sprachen als Englisch enthalten sind.

Die Richtlinie wird kostenlos zur Verfügung gestellt und wir sind daher unter keinen Umständen haftbar für Verluste oder Schäden, einschließlich – ohne jede Einschränkung – indirekter oder Folgeverluste oder –schäden, oder sonstiger Verluste oder Schäden, die aus einem sich Verlassen auf diese Richtlinie herrühren.

Keiner dieser Ausschlüsse oder Beschränkungen zielt jedoch darauf ab, irgendwelche Rechte, die nicht abbedungen werden können, zu begrenzen, oder Haftbarkeiten für Tod oder Personenschäden für Sie auszuschließen oder zu begrenzen, die aus unserer mangelnden Sorgfalt oder anderen Haftungsgründen herrühren, die wir aus gesetzlichen Gründen weder abbedingen noch begrenzen können

Disclaimer

The information contained in this document is considered by us to be good practice and industry guidance (**Guidance**). The Guidance is provided by a commission of FESI (www.fesi.eu), and is considered to be correct at the date of publication. Whilst we are confident the information contained within it is up to date and accurate, it is a reference document only. It is your responsibility to ensure your knowledge of the matters discussed in the Guidance is kept up to date.

The Guidance is intended to be used for general purposes only and is not intended to take precedence over appropriate national and international standards, guidelines or laws (where applicable). The Guidance is not intended to replace detailed calculations and assessments of prevailing physical conditions in complicated building assignments.

The Guidance does not constitute professional advice and specific queries should be referred to qualified professionals. Any reliance placed on the Guidance without seeking such advice is strictly at your own risk. We make no representations or warranties of any kind, express or implied, about the completeness, accuracy, reliability or suitability of the Guidance.

The Guidance in its original form is written in English. We accept no responsibility for any inaccuracies contained in any translation of the Guidance in languages other than English.

The Guidance is provided free of charge and as such in no event will we be liable for any loss or damage including, without limitation, indirect or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from any reliance placed on the Guidance.

None of these exclusions or limitations, however, are intended to limit any rights which may not be excluded, nor to exclude or limit liability to you for death or personal injury resulting from our negligence or for other liability which we cannot exclude or limit by law.