

Materialsammlung zur Vorlesung „Technische Akustik und Lärmbekämpfung“

Prof. Dr.-Ing. Bernhard U. Seeber
Audio Information Processing
Technische Universität München

Wintersemester 2014/15
v.0.5

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Akustik und Lärmbekämpfung	4
1.1	Was ist Lärm?	4
1.2	Straßenverkehrslärm	4
1.3	Fluglärm	5
1.4	Prinzipien der Lärminderung	5
1.5	Schallfeldgrößen	5
1.6	Addition von Schallen	8
1.7	Wie wird Schall gemessen?	9
2	Entstehung und Ausbreitung von Schallen	10
2.1	Einfache Schwinger	10
2.2	Schallfelder	11
2.3	Ebene Wellen (plane wave)	11
2.4	Kugelwellen (spheric wave)	11
2.5	Strahlerarten	12
2.6	Schwingende Luftsäulen	12
2.7	Resonatoren	12
2.8	Geometrische Akustik	14
2.9	Geometrische Raumakustik	17
2.10	Statistische Raumakustik	18
2.11	Raumsimulationstechniken	18
2.12	Perzeptive Aspekte in Räumen	19
2.13	Schalldämmung	19
3	Schallmesstechnik und Schallwirkungen	23
3.1	Bewerteter Schallpegel	23
3.2	Äquivalenter Dauerschallpegel	24
3.3	Schallanalyse mit konstanter, <u>absoluter</u> Bandbreite	24
3.4	Schallanalyse mit konstanter, <u>relativer</u> Bandbreite	24
3.5	Anwendung der Terzanalyse bei der Bestimmung des Einfügungsdämm-Maßes	24
3.6	Berechnungsverfahren: Zwicker-Lautheit	26
3.7	Psychoakustische Lautheit N [sone]	26
3.8	Psychoakustische Lästigkeit	28
3.9	Hörschwellenverschiebung	28
4	Schallabwehr, Vorschriften, Normen	29
4.1	Arbeitslärm	29
4.2	Maschinenlärm	29
4.3	Gewerbelärm	29
4.4	Arbeitslärm	29
4.5	Straßenverkehrslärm	29

4.6	Schienenlärm	29
4.7	Fluglärm	29
4.8	Freizeitlärm	29

1 Einführung in die Akustik und Lärmbekämpfung

1.1 Was ist Lärm?

Tabelle 1.1: Repräsentative Umfrage des Umweltbundesamtes „Was stört im Wohnumfeld“; 2012.

stark	mittelmäßig	etwas	
6%	20%	28%	Straßenlärm
3%	14%	25%	Nachbarschaftslärm
3%	12%	19%	Schiene
2%	11%	19%	Industrie
1%	5%	17%	Flugverkehr

Tabelle 1.2: Internetumfrage des Umweltbundesamtes; seit 2000, Stand 2011.

„Wie stark fühlen Sie sich in der letzten Zeit persönlich von folgenden Lärmquellen in Ihrem Wohnfeld gestört?“

stark + äußerst stark	\geq mittel	
36%	59%	Straße
18%	32%	Nachbarn
20%	30%	Fluglärm
16%	31%	Baulärm
10%	21%	Industrie
12%	22%	Schiene
5%	11%	Sportanlage

1.2 Straßenverkehrslärm



Abbildung 1.1: „Kreislauf“ des Straßenverkehrslärms.

1.3 Fluglärm

1.4 Prinzipien der Lärminderung

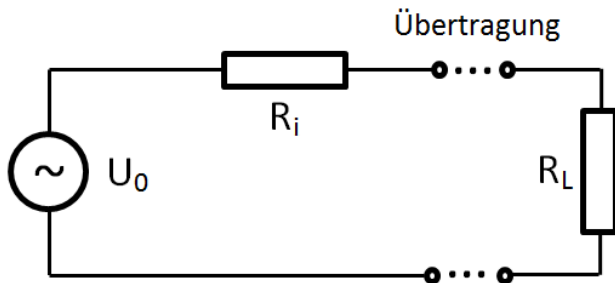


Abbildung 1.2: Systemtheoretischer Ansatz der Lärminderung.

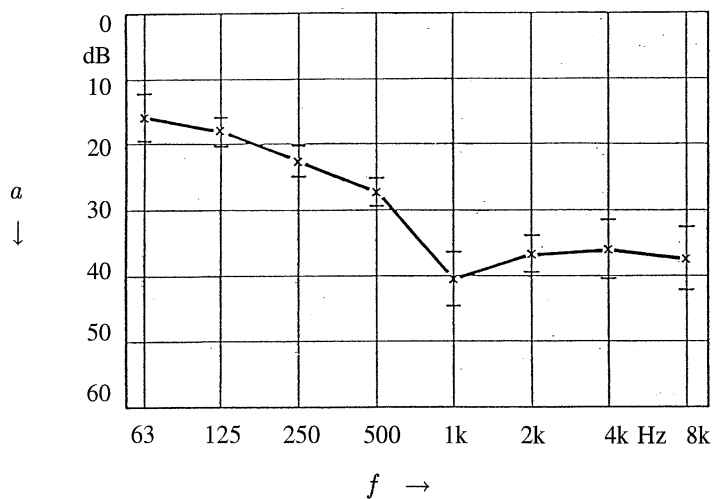


Abbildung 1.3: Schalldämmung eines Kapsel-Gehörschutzes.

1.5 Schallfeldgrößen

Schalldruck (sound pressure)

$$p = \frac{F}{S} \left[\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.1)$$

Schallschnelle (particle velocity)

Die Teilchenauslenkung δ ist die dem Schall zugeordnete Wechselwirkung der Fluideilchen im Schallfeld, d.h. der Schwingweg der Fluidteilchen um eine Ruhelage. Sie ist im Gegensatz zum Schalldruck eine vektorielle Größe.

$$\vec{v} = \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (1.2)$$

In Ausbreitungsrichtung:

$$v(x, t) = \frac{d\xi}{dt} \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right] \quad (1.3)$$

Typischer Wertebereich: 10^{-8} bis 10^{-12}

Schallgeschwindigkeit (speed of sound)

$c \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$; Typischer Wertebereich: Luft 10^2 ... 10^3 Wasser

Temperaturabhängigkeit:

$$c \approx 331.5 + 0.6 \cdot T / ^\circ\text{C} \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right] \quad (1.4)$$

$$c = \sqrt{R_S \cdot T \cdot K} \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right] \quad (1.5)$$

Wellenlänge (wavelength)

$$\lambda = \frac{c}{f} [\text{m}] \quad (1.6)$$

Abgeleitete Größen:

Schallintensität (sound intensity)

Die Energieflussdichte eines Schallfeldes ist das Produkt aus momentanen Schalldruck und der momentanen Schallschnelle. Sie beschreibt den Energietransport der Fluidteilchen an einem bestimmten Punkt, zu einem bestimmten Zeitpunkt und ist eine vektorielle Größe.

$$\vec{i} = p \cdot \vec{v} \quad (1.7)$$

Die Schallintensität stellt die Energieflussdichte des Schallfeldes über einen bestimmten Zeitraum dar und ist somit eine zeitlich veränderliche Größe. Sie ist ebenfalls eine vektorielle Größe, deren Richtung durch den Vektor der Schallschnelle bestimmt ist. Zur Charakterisierung nicht periodischer, stationärer (also „dauernder“) Quellen wird der zeitliche Mittelwert der Energieflussdichte angegeben.

$$\vec{I} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p \cdot \vec{v} dt \quad (1.8)$$

In der Praxis werden meist die Effektivwerte von Schalldruck und Schallschnelle angegeben, wobei ϕ der Phasenwinkel zwischen Schalldruck und Schallschnelle ist.

$$I = \tilde{p} \cdot \tilde{v} \cdot \cos \phi \quad (1.9)$$

Für die Schallintensität der ebenen, fortschreitenden Welle entfällt der Phasenwinkel, da keine Phasenverschiebung zwischen Schalldruck und Schallschnelle vorliegt.

$$I = \tilde{p} \cdot \tilde{v} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.10)$$

Schallleistung (sound power)

$$P = I \cdot S \text{ [W]} \quad (1.11)$$

Schallfeldimpedanz (sound field impedance)

DEGA Empfehlung 101: spezifische Schallimpedanz, Z_s

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{F}{S \cdot v} \left[\frac{\text{N sec}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.12)$$

Schallkennimpedanz für die ebene, fortschreitende Welle, auch „Wellenwiderstand“:

$$Z_0 = \rho \cdot c = 414 \left[\frac{\text{N sec}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.13)$$

Mechanische Impedanz (mechanic impedance)

$$Z_m = Z_s \cdot S = \frac{F}{v} \left[\frac{\text{N sec}}{\text{m}} \right] \quad (1.14)$$

Schalldruckpegel (sound pressure level)

$$L_p = 20 \log \frac{\tilde{p}}{p_0} \text{ [dB]} \quad (1.15)$$

Bezugsschalldruck:

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

Schallintensitätspegel (sound intensity level)

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (1.16)$$

Bezugsschallintensität:

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Schallleistungspegel (sound power level)

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} \text{ [dB]} \quad (1.17)$$

Bezugsschallleistung:

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

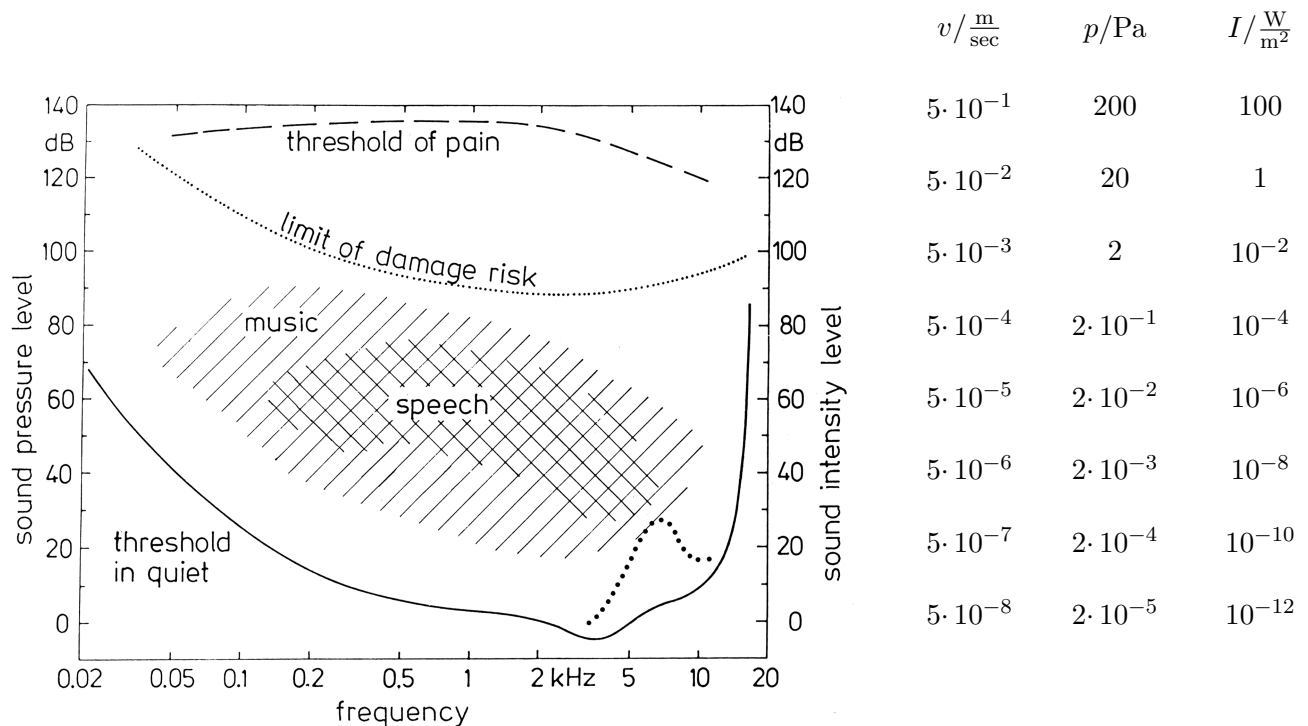


Abbildung 1.4: Hörfläche und Schallgrößen.

1.6 Addition von Schallen

Kohärente und inkohärente Schalle

Zwei identische Schalle, die sich nur im Pegel unterscheiden, sind kohärent. Bei deren Überlagerung summieren sich die Schalldrücke, d.h. die Amplituden addieren sich. Ein Beispiel hierfür sind zwei nebeneinander angeordnete Tieftöner mit derselben Ansteuerung in großer Entfernung. Unterscheiden sich diese Schalle in der Phase, kommt es zu Auslöschungen beispielsweise löschen sich Schalle bei 180 Grad Phasenverschiebung (theoretisch) vollständig aus, die Grundlage für Active Noise Control.

Zwei Schalle mit zufälligen Frequenzen und Phasen sind inkohärent und addieren sich zufällig, was einer Addition der Schallintensitäten gleich kommt. Schalle unterschiedlicher Quellen, beispielsweise eines Rasenmähers und eines Radios sind inkohärent.

Tabelle 1.3: Rechnen mit Faktoren des Schalldrucks p oder der Schallschnelle v , bzw. mit Graden der Leistung P oder der Intensität I , sowie mit Schallpegeln L bzw. Schallpegeldifferenzen ΔL .

I/I_0 bzw. P/P_0	L bzw. ΔL	p/p_0 bzw. v/v_0
1	0dB	1
2	$\approx 3\text{dB}$	$\sqrt{2}$
4	$\approx 6\text{dB}$	2
10	10dB	$\sqrt{10}$
25	$\approx 14\text{dB}$	5
100	20dB	10
1000	30dB	≈ 31.6
10000	40dB	100

Erhöhung ΔL_I des Pegels $L_{I,1}$ eines Schalles durch ein zweiter, inkohärenter Schall mit dem Pegel $L_{I,2}$ als Funktion der Pegeldifferenz $L_{I,1} - L_{I,2}$ zwischen beiden Schallen:

$$\Delta L_I = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{-(L_{I,1} - L_{I,2})}{10}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.18)$$

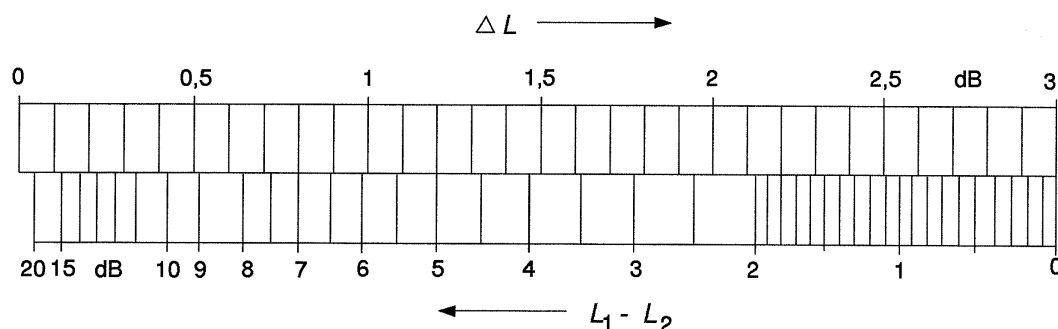


Abbildung 1.5: Nomogramm: Pegelerhöhung in Abhängigkeit der Pegeldifferenz zweier inkohärenter Schalle.

Tabelle 1.4: Näherungen für die Summation inkohärenter Schalle.

$0\text{dB} \leq (L_{I,1} - L_{I,2}) \leq 1\text{dB}$	$\Delta L_I \approx 3\text{dB}$
$1\text{dB} \leq (L_{I,1} - L_{I,2}) \leq 4\text{dB}$	$\Delta L_I \approx 2\text{dB}$
$4\text{dB} \leq (L_{I,1} - L_{I,2}) \leq 9\text{dB}$	$\Delta L_I \approx 1\text{dB}$
$9\text{dB} \leq (L_{I,1} - L_{I,2})$	$\Delta L_I \approx 0\text{dB}$

1.7 Wie wird Schall gemessen?

2 Entstehung und Ausbreitung von Schallen

2.1 Einfache Schwinger

Dichtewelle, Longitudinalwelle (longitudinal wave)

Transversal, Schub-/Scherwelle (transverse/shear wave)

Biegewelle (bending wave)

Torsionswelle (torsional wave)

2.2 Schallfelder

Elastizitätsgesetz

$$p(t) = c^2 \cdot \rho(t) \quad (2.1)$$

$$\Delta p = c^2 \cdot \Delta \rho \quad (2.2)$$

Bewegungsgesetz/Trägheitsgesetz

$$\text{in } x - \text{Richtung} : -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\text{allgemein} : -\text{grad } p = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.3)$$

Kontinuitätsgleichung

$$\rho_0 \cdot \text{div } \vec{v} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.4)$$

Wellengleichung

$$\text{div grad } p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Allgemeines Kompressionsgesetz (Gase)

$$\text{in } x - \text{Richtung} : \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\text{allgemein} : \text{div } \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.6)$$

2.3 Ebene Wellen (plane wave)

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho \cdot c$$

2.4 Kugelwellen (spheric wave)

$$Z_s = \rho \cdot c \cdot \frac{j \cdot 2\pi \cdot \frac{r}{\lambda}}{1 + j \cdot 2\pi \cdot \frac{r}{\lambda}}$$

$$\text{mit } k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ [-]}, \text{ Wellenzahl} \quad (2.7)$$

$$\rightarrow Z_s = \rho \cdot c \cdot \frac{jkr}{1 + jkr} \quad (2.8)$$

2.5 Strahlerarten

Punktstrahler (point emitter)

6dB Abnahme bei Entfernungsverdopplung.

Linienquellen (line source)

3dB Abnahme bei Entfernungsverdopplung, wenn unendlich lang.

Beispiel: Autobahnen.

Flächenquellen (plane source)

Keine Abnahme bei Entfernungsverdopplung, wenn unendlich ausgedehnt.

Beispiel: Fassade mit vielen Fenstern eines großen Fabrikgebäudes.

2.6 Schwingende Luftsäulen

Einseitig offenes Rohr, $\frac{\lambda}{4}$ -Resonator

$$f = \frac{c \cdot (2n - 1)}{4 \cdot l} \text{ [Hz]} \quad (2.9)$$

Beidseitig offenes Rohr, $\frac{\lambda}{2}$ -Resonator

$$f = \frac{c \cdot n}{2 \cdot l} \text{ [Hz]}, \quad (2.10)$$

wobei $l = l_0 + \frac{d}{2}$, mit Rohrdurchmesser d und Rohrlänge l_0 , die Mündungskorrektur berücksichtigt.

2.7 Resonatoren

Helmholtzresonator

$$\omega = \sqrt{\frac{s}{m}} \left[\frac{1}{\text{sec}} \right] \quad (2.11)$$

$$\text{mit der Steifigkeit } s = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S^2}{V_{\text{Bauch}}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right], \quad (2.12)$$

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_{\text{Bauch}} \left(l_0 + \frac{\pi}{2} r \right)}} \text{ [Hz]}, \quad (2.13)$$

wobei $\frac{\pi}{2} r$ der Mündungskorrektur entspricht.

Plattenresonator

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Platte}} \cdot D \cdot d}} \text{ [Hz]} \quad (2.14)$$

Mikroperforationsabsorber

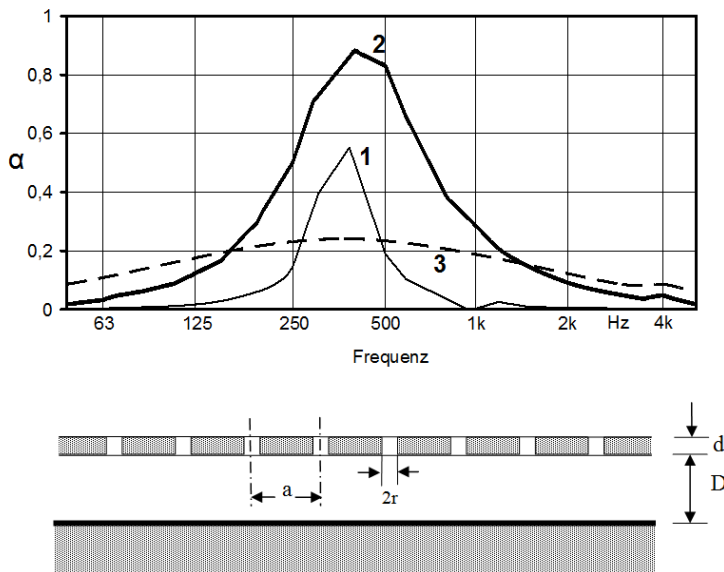


Abbildung 2.1: Typischer Verlauf des Absorptionsgrads eines einschaligen Mikroperforationsabsorbers (MPA). Lochflächenverhältnis 0.014, Wanddicke $d = 3\text{mm}$, Wandabstand $D = 50\text{mm}$. (1) $2r = 3.00\text{mm}$, scharfes Resonanzspektrum, mittlere Absorption, Mischung aus Platten- und Helmholtzresonator, (2) $2r = 0.45\text{mm}$, hohe Absorption und ausgebildetes Resonanzmaximum durch optimalen Mikroperforationsabsorber, (3) $2r = 0.15\text{mm}$, Lochdurchmesser zu klein: breites Absorptionsspektrum, jedoch keine hohe Wirkung.

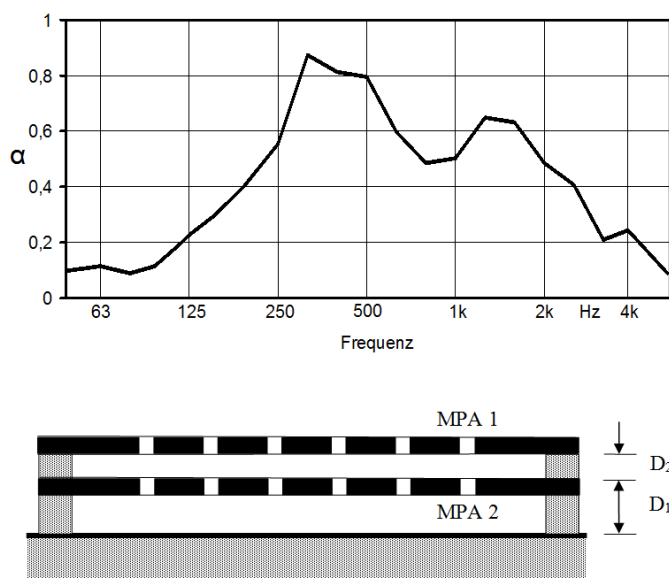


Abbildung 2.2: Typischer Verlauf des Absorptionsgrads eines zweischaligen Mikroperforationsabsorbers. Wandabstände $D_1 = 50\text{mm}$ und $D_2 = 18\text{mm}$. Vorteil: Die beiden Hauptresonanzen sind individuell einstellbar, wodurch ein breites Absorptionsspektrum erreicht werden kann.

2.8 Geometrische Akustik

Reflexionsfaktor (reflection coefficient)

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z \cdot \cos(\alpha) - Z_0}{Z \cdot \cos(\alpha) + Z_0} [-] \quad (2.15)$$

Absorption

Statistischer Absorptionsgrad:

$$\alpha_s = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{einfallende Energie}} = \frac{|p_i^2| - |p_r^2|}{|p_i^2|} = 1 - |r|^2 [-] \quad (2.16)$$

Impedanzen blcher Begrenzungsflächen (impedances of common boundary surfaces)

1. Impedanz einer Wand mit nicht-unendlicher Masse:

$$Z = Z_0 + j\omega m'' \quad (2.17)$$

mit m'' Flächengewicht der Wand in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]$

2. Masse vor einer harten Wand (z.B. Vorhang oder Vorsatzschale):

- a) Laufzeitkomponente:

$$Z = -j \cdot Z_0 \cot kd \quad (2.18)$$

mit d Abstand der Masse von der Wand in $[m]$.

- b) Addiere Masse bei $x = 0$

$$Z = j \left(\omega m'' - \frac{Z_0 c}{\omega d} \right) \quad (2.19)$$

- c) Füge poröses Material zwischen Massenvorhang und schallharter Wand:

$$Z = w'' - j \left(\omega m'' - \frac{Z_0 c}{\omega d} \right) \quad (2.20)$$

mit w'' Strömungswiderstand des porösen Materials in $[m^2]$.

3. Poröses Material vor einer harten Wand, ohne Massebelag (z.B. Absorbermaterial):

$$Z = w'' - j \cdot Z_0 \cot kd \quad (2.21)$$

Brechung (refraction)

Brechungsgesetz nach Snellius:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.22)$$

mit α und β Einfallswinkel bzw. Austrittswinkel zur Normalen, c_1 und c_2 Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium.

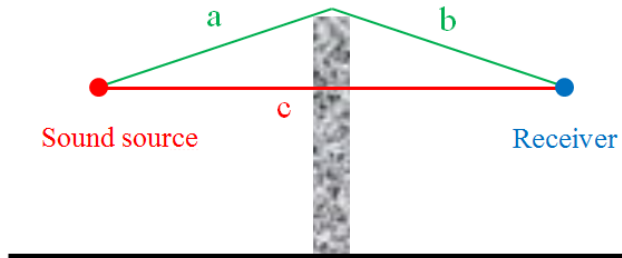
Streuung (dispersion)

Streuungskoeffizient:

$$s = 1 - \frac{E_{\text{geom. Reflexion}}}{E_{\text{gesamt}}} \quad (2.23)$$

Voraussetzung: Material absorbiert keine Schallenergie!

Beugung (diffraction)



$$d = a + b - c \text{ [m]}$$

$$\Delta L = 10 \log \left(2\pi^2 - \frac{d}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (2.24)$$

Abbildung 2.3: Schallbeugung am Beispiel von Schallschutzwänden.

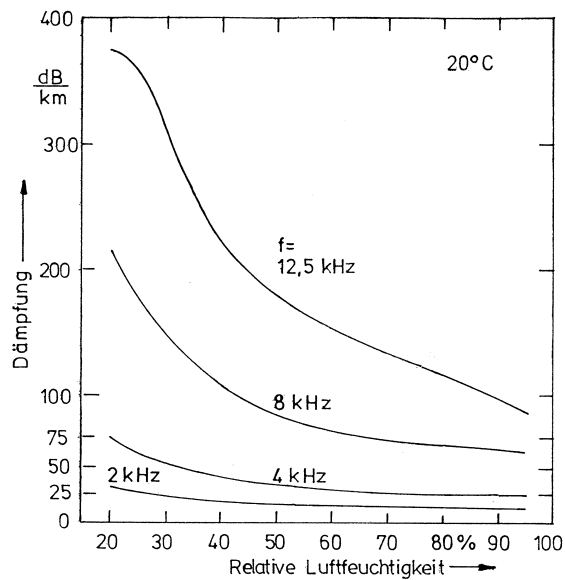


Abbildung 2.4: Frequenzabhängige Schallabsorption in Luft. Je höher die Luftfeuchtigkeit, desto geringer die Dämpfung. Höhere Frequenzen erfahren eine stärkere Dämpfung.

Tabelle 2.1: Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien.

Material	Absorptionsgrad α_s					
	f = 125	250	500	1000	2000	4000 Hz
glatter Verputz	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
Holz 16mm auf Lattenrost	0.20	0.10	0.05	0.05	0.05	0.10
Teppich mittlerer Dicke	0.05	0.08	0.20	0.30	0.35	0.40
Vorhänge mittlerer Dicke	0.10	0.15	0.30	0.40	0.50	0.60
geschlossene Fenster	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02

Tabelle 2.2: Schallabsorptionsgrade üblicher Akustikplatten.

Material	Absorptionsgrad α_s					
	f = 125	250	500	1000	2000	4000 Hz
Holzfaserplatten aufgeklebt	0.15	0.25	0.40	0.50	0.50	0.40
Holzfaserplatten auf Lattenrost	0.30	0.50	0.65	0.70	0.70	0.60
Akustikputz 10mm	0.05	0.20	0.40	0.60	0.60	0.50
gelochte Metallplatten mit poröser Schicht	0.30	0.60	0.85	0.85	0.80	0.70

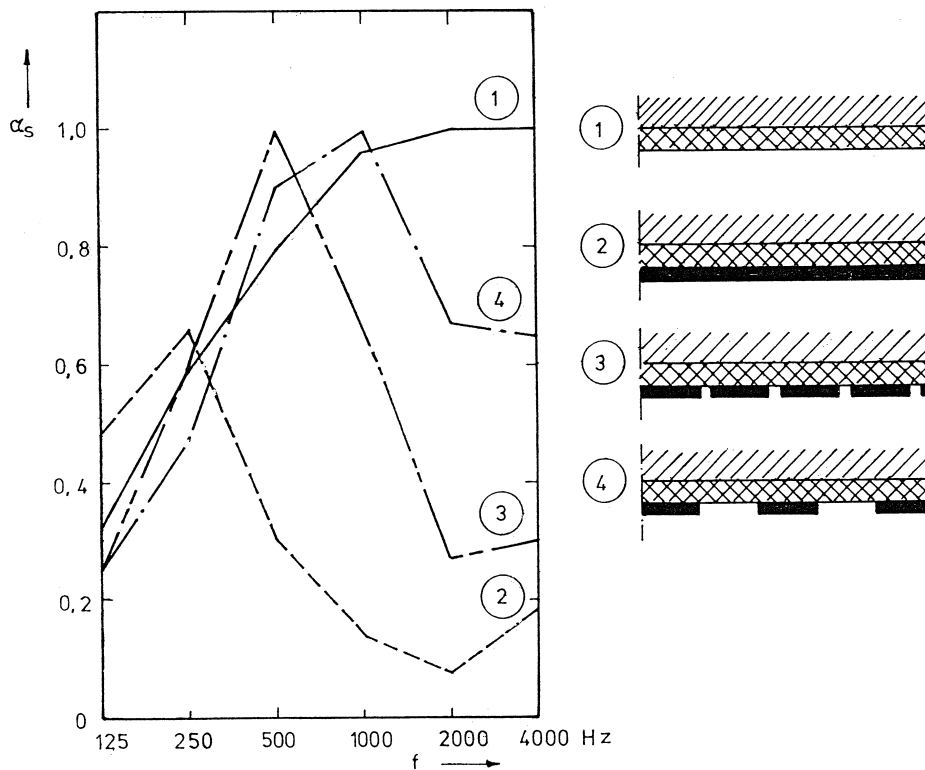


Abbildung 2.5: Absorptionsgrad einer 45 mm dicken Mineralfaserplatte bei verschiedener Abdeckung mit Holz. (1) Hohe Absorption an hohen Frequenzen durch direkt akustisch „sichtbares“ Absorbermaterial. (2) Plattenresonator. Durch die reflektierende Wirkung der Holzoberfläche werden hohe Frequenzen weniger gedämpft. (3) Helmholtzresonator. Durch geschickte Wahl der Lochdurchmesser im Holz kann eine tiefe Resonanzfrequenz und somit hohe Absorption eingestellt werden. (4) Wie (3), jedoch erhöhte Absorption an hohen Frequenzen durch größere Fläche akustisch „sichtbaren“ Absorbermaterials.

2.9 Geometrische Raumakustik

Eigenfrequenzen eines quaderförmigen Raumes (eigen frequencies of a box-shaped room)

$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \text{ [Hz]} \quad (2.25)$$

Anzahl Raummoden bis Frequenz f (number of room modes up to f)

$$M(f) = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 \cdot V \text{ [-]} \quad (2.26)$$

Raummodendichte (room mode density)

$$\frac{\Delta M}{\Delta f} \approx \frac{dM}{df} = \frac{4\pi}{c} \left(\frac{f}{c}\right)^2 \cdot V \left[\frac{1}{\text{Hz}}\right] \quad (2.27)$$

Schröder-Frequenz (Schroeder frequency)

$$f_s = \sqrt{\frac{c^3 \cdot T_{60}}{4V \cdot \ln 10}} \text{ [Hz]} \quad (2.28)$$

$$\text{Praxisformel : } f_s \gg 2100 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \text{ [Hz]} \quad (2.29)$$

Mittlere Reflexionsrate (mean reflection rate)

$$\bar{n} = \frac{c \cdot S}{4V} \left[\frac{1}{\text{sec}} \right] \quad (2.30)$$

Mittlere freie Weglänge (mean free path)

$$\bar{l} = \frac{4V}{S} \text{ [m]} \quad (2.31)$$

2.10 Statistische Raumakustik

Definition Nachhallzeit (reverberation time)

Die Nachhallzeit T_{60} ist definiert als die Zeit, in der der Schalldruckpegel L_p in einem Raum nach Beenden der Schallfeldanregung auf das Eintausenste der Energie bzw. um 60dB abgefallen ist.

Eyring-Formel

$$T_N = -0.163 \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ [sec]} \quad (2.32)$$

Sabine-Formel

$$\text{Näherung für } \alpha \ll 1 : T_N = 0.163 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \text{ [sec]} \quad (2.33)$$

Offene Fensterfläche

$$\bar{\alpha} S = 0.163 \frac{V}{T_N} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.34)$$

Hallradius (critical distance)

$$r_H = 0.14 \sqrt{\bar{\alpha} S} \text{ [m]} \quad (2.35)$$

2.11 Raumsimulationstechniken

Spiegelschallquellenmethode

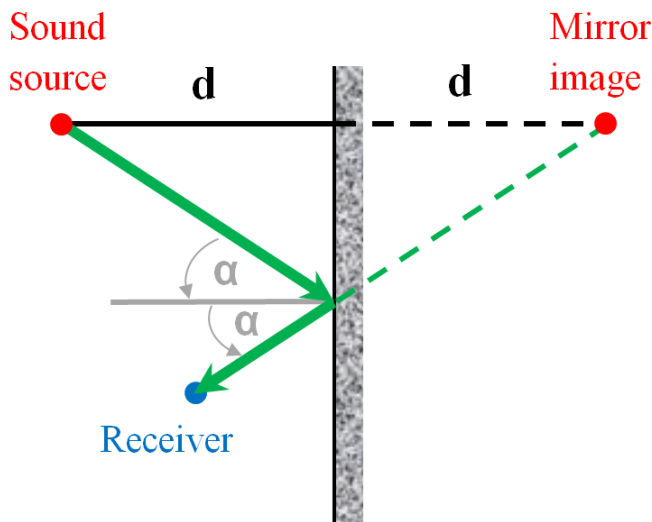


Abbildung 2.6: Schematik der Spiegelschallquellenmethodik mit Schallquelle (sound source), Spiegelquelle (mirror image) und Empfänger (receiver).

2.12 Perzeptive Aspekte in Räumen

Clarity

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_{-50\text{ms}}^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.36)$$

2.13 Schalldämmung

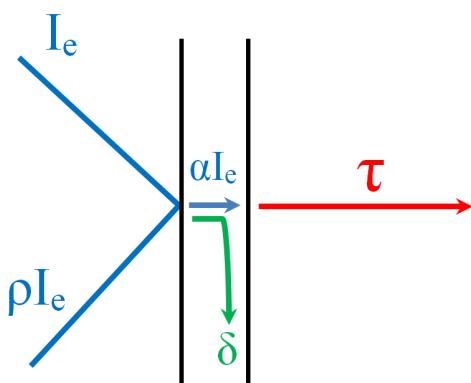


Abbildung 2.7: Beispielhafte Reflexion an einer Unstetigkeitsstelle mit τ Transmissionsgrad, δ Dissipationsgrad, α Absorptionsgrad und ρ Reflexionsgrad.

Luftschalldämmung (airborne sound reduction)

Messung des Luftschalldämm-Maßes

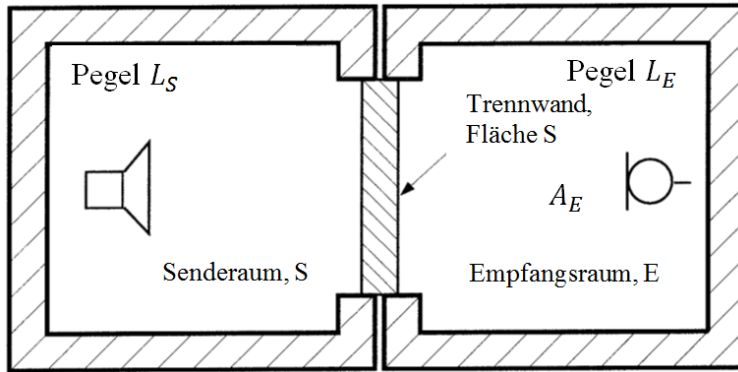


Abbildung 2.8: Messung des Luftschalldämm-Maßes.

$$R = 10 \log \frac{L_S}{L_E} = 10 \log \frac{I_e}{\tau \cdot I_e} \text{ [dB]} \quad (2.37)$$

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_E} \text{ [dB]} \quad (2.38)$$

mit

$$D = L_S - L_E = 20 \log \frac{p_S}{p_0} + 20 \log \frac{p_E}{p_0} \text{ [dB]} \quad (2.39)$$

und Korrektur der Absorption im Empfangsraum:

$$A_E = \bar{\alpha} \cdot S_E \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.40)$$

Sollkurve

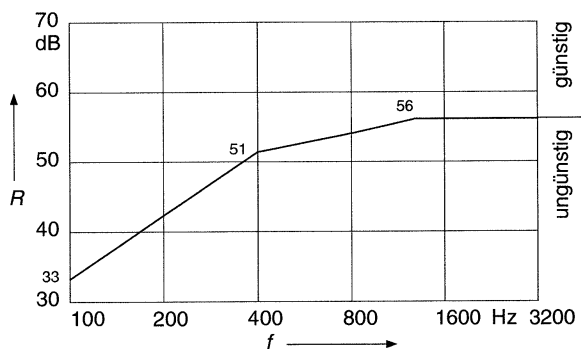


Abbildung 2.9: Sollkurve des Luftschalldämm-Maßes nach DIN EN ISO 717-1.

Mittelwert von R im Frequenzbereich $100\text{Hz} \dots 3200\text{Hz}$:

$$\bar{R} \approx \frac{R_{100} + R_{200} + R_{400} + R_{800} + R_{1600} + R_{3200}}{6} \text{ [dB]} \quad (2.41)$$

Ein- und mehrschalige Wände

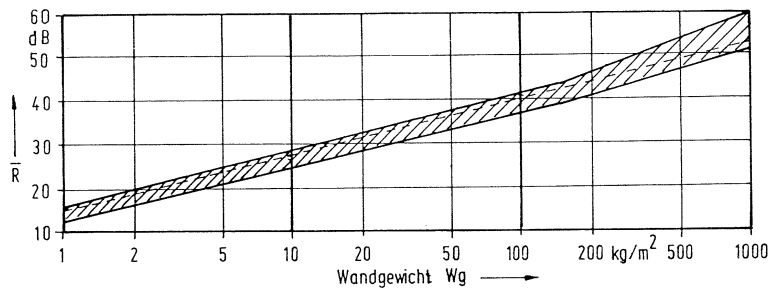


Abbildung 2.10: Mittleres Luftschalldämm-Maß einschaliger Wände in Abhängigkeit vom Wandgewicht pro m^2 .

Näherungsgerade des mittleren Luftschalldämm-Maßes:

$$\bar{R} \approx 13 \log(W_g) + 15 \text{ [dB]} \quad (2.42)$$

Tabelle 2.3: Beispiele für Luftschalldämm-Maße von Wänden.

Art der Wände	Stärke [cm]		\bar{R} [dB]
Ytong Steine	10	beidseitig verputzt	38
Bimsbetonsteine	11.5		40
Bimshohlblocksteine	25		47
Ziegelsteine	25		55
Gipskartonplatten	1		26
Glasscheibe	1.2		34

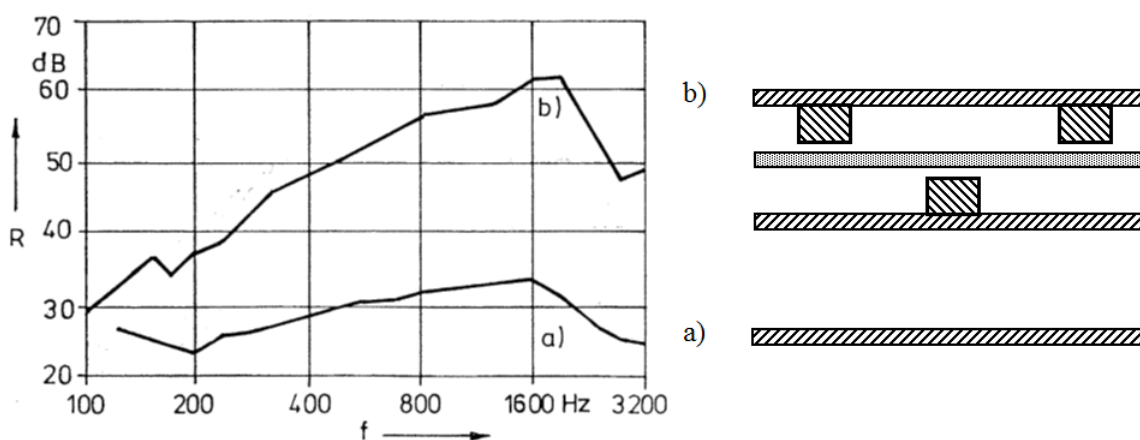


Abbildung 2.11: Luftschalldämmung von Mehrfachwänden. a) Einfachwand aus 12mm Gipskartonplatten: $\bar{R} = 28\text{dB}$. b) Doppelwand aus 12mm Gipskartonplatten: $\bar{R} = 48\text{dB}$.

Bei einer einschaligen Wand erfordert die Erhöhung von $\bar{R} = 28\text{dB}$ auf $\bar{R} = 48\text{dB}$ eine Zunahme des Wandgewichtes um den Faktor 35.

Körperschalldämmung (body-borne sound reduction)

Normhammerwerk

5 Hämmer je 500g
Zylinder $\varnothing 3\text{cm}$
Verrundet mit 50cm Radius
Fallhöhe 4cm
Schlagabstand max 100ms
Messung in Raum 2

$$L_N = L_{Terz} - 10 \log \left(\frac{10\text{m}^2}{\bar{\alpha}S} \right) \text{ [dB]} \quad (2.43)$$

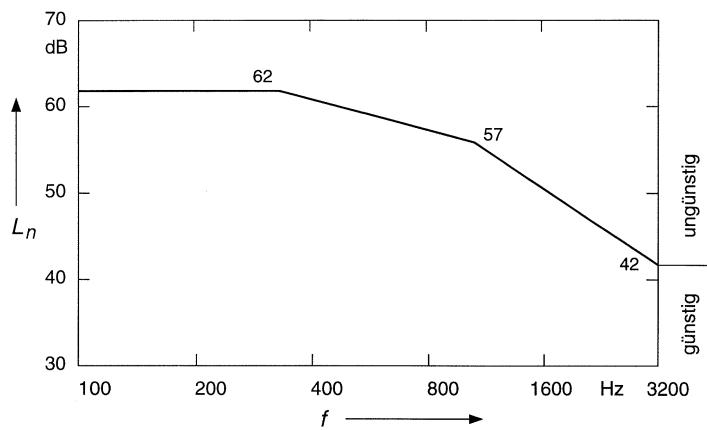


Abbildung 2.12: Sollkurve für Norm-Trittschallpegel je Terz nach DIN EN ISO 717-2.

3 Schallmesstechnik und Schallwirkungen

3.1 Bewerteter Schallpegel

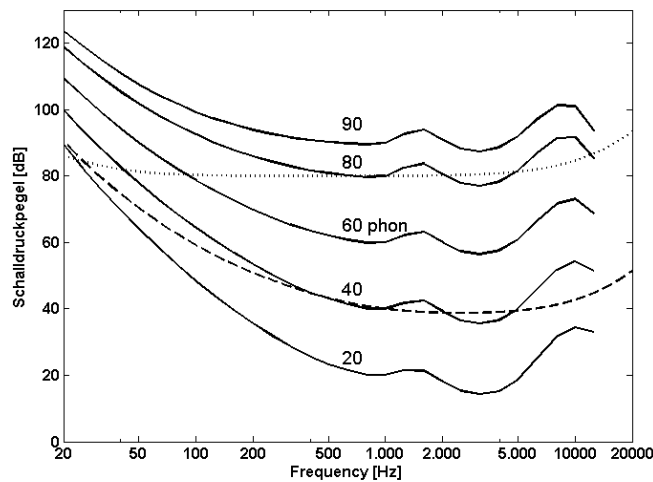


Abbildung 3.1: Kurven gleicher Lautheit (durchgezogen) im Vergleich zur A-Bewertung (gestrichelt) und C-Bewertung (punktiert).

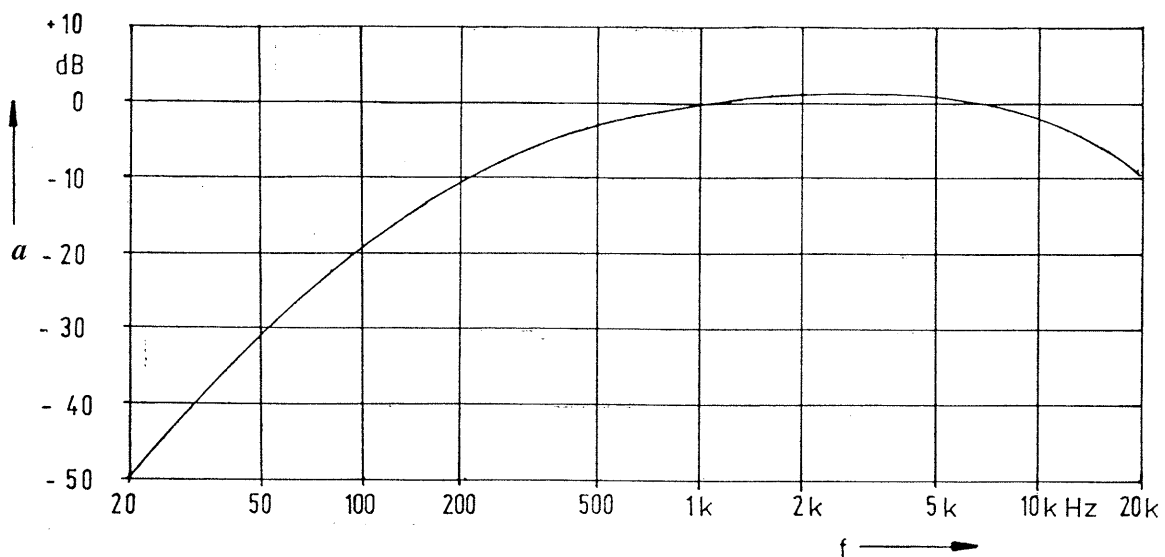


Abbildung 3.2: A-Bewertungsfilter.

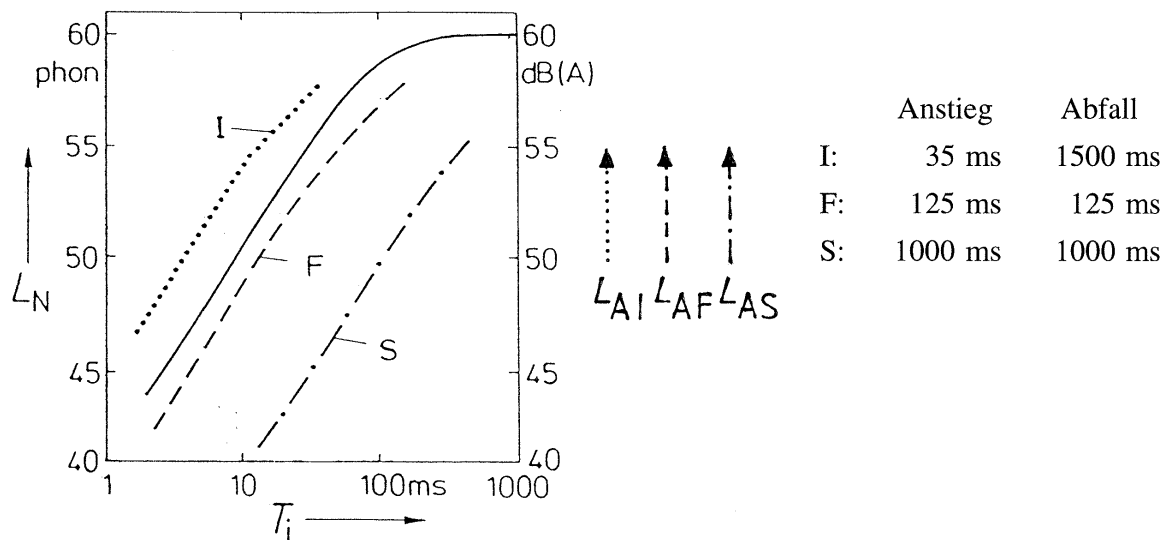


Abbildung 3.3: Lautstärkepegel L_N von einzelnen 1kHz-Tonimpulsen (durchgezogen) der Dauer T_i im Vergleich zur Pegelanzeige L_A eines Schallpegelmessers bei Verwendung der Zeitkonstanten I (impulse), F (fast) oder S (slow).

3.2 Äquivalenter Dauerschallpegel

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (3.1)$$

3.3 Schallanalyse mit konstanter, absoluter Bandbreite

3.4 Schallanalyse mit konstanter, relativer Bandbreite

3.5 Anwendung der Terzanalyse bei der Bestimmung des Einfügungsdämm-Maßes

Vorgehen:

1. Terzpegelanalyse ($f_m = 16\text{Hz} \dots 16\text{Hz}$)
2. Berechnung des Einfügungsdämm-Maßes D_e für jede Terz:

$$D_e = L_{Terz} - L_A + k \text{ dB} \quad (3.2)$$

L_{Terz} : gemessener Terzpegel

L_A : gewünschter A-bewerteter Schallpegel

k : Korrekturfaktor $k = 15\text{dB} + a_{A\text{-Bewertung}}$

Tabelle 3.1: Terzpegelverteilung eines Geräusches (außen), gewünschter $L_A = 55\text{dB}$ (innen).

$f_m[\text{Hz}]$	$L_{Terz}[\text{dB}]$	$L_{Terz} - L_A[\text{dB}]$	$a_A[\text{dB}]$	$k[\text{dB}]$	$D_e[\text{dB}]$
16	80	25	-56.7	-41.7	-16.7
20	84	29	-50.5	-35.5	-6.5
25	85	30	-44.7	-29.7	0.3
31.5	86	31	-39.4	-24.4	6.6
40	87	32	-34.6	-19.6	12.4
50	86	31	-30.2	-15.2	15.8
63	84	29	-26.2	-11.2	17.8
80	82	27	-22.5	-7.5	19.5
100	79	24	-19.1	-4.1	19.9
125	74	19	-16.1	-1.1	17.9
160	75	20	-13.4	1.6	21.6
200	74	19	-10.9	4.1	23.1
250	76	21	-8.6	6.4	27.4
315	73	18	-6.6	8.4	26.4
400	72	17	-4.8	10.2	27.2
500	74	19	-3.2	11.8	30.8
630	74	19	-1.9	13.1	32.1
800	74	19	-0.8	14.2	33.2
1000	77	22	0	15	37
1250	75	20	+0.6	15.6	35.6
1600	79	24	+1.0	16	40
2000	80	25	+1.2	16.2	41.2
2500	78	23	+1.3	16.3	39.3
3150	75	20	+1.2	16.2	36.2
4000	72	17	+1.0	16	33
5000	69	14	+0.5	15.5	29.5
6300	66	11	-0.1	14.9	25.9
8000	63	8	-1.1	13.9	21.9
10000	61	6	-2.5	12.5	18.5
12500	55	0	-4.3	10.7	10.7
16000	50	0	-6.6	8.4	3.4

Tabelle 3.2: Schallschutzklassen von Fenstern.

Spalte	1	2	3
Zeile	Schall- schutz- klasse	Bewertetes Schalldämm-Maß R'_w des am Bau funktionsfähigen eingebauten Fensters, gemessen nach DIN 52210 Teil 5 in dB	Erforderliches bewertetes Schalldämm-Maß R_w des im Prfstand (P-F) nach DIN 52210 Teil 2 eingebauten funktionsfähigen Fensters in dB
1	1	25 bis 29	≥ 27
2	2	30 bis 34	≥ 32
3	3	35 bis 39	≥ 37
4	4	40 bis 44	≥ 42
5	5	45 bis 49	≥ 47
6	6	≥ 50	≥ 52

3.6 Berechnungsverfahren: Zwicker-Lautheit

3.7 Psychoakustische Lautheit N [sone]

Tabelle 3.3: Schalldruckpegel und Lautheit eines 1kHz Sinustons. Eine Verdopplung der Lautheit entspricht einem 10dB Pegelanstieg.

Schalldruckpegel L_P eines 1kHz Sinustons	Lautheit
40 dB	1 sone
50 dB	2 sone
60 dB	4 sone
70 dB	8 sone

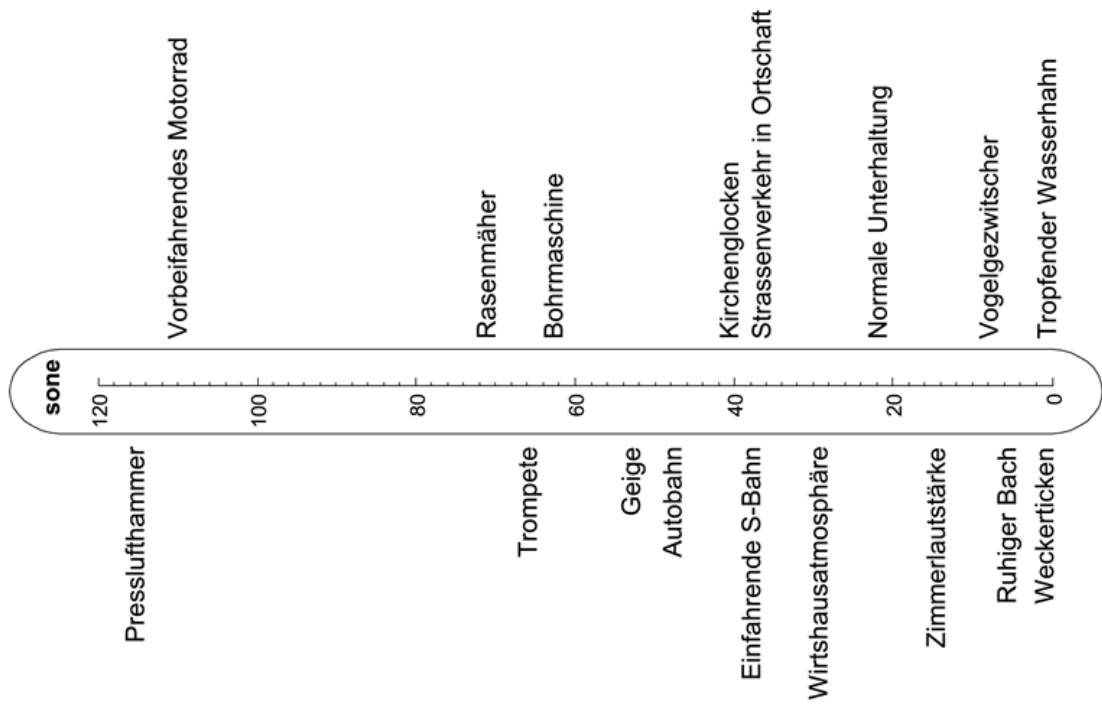
Umrechnungsvorschrift (gilt nur oberhalb 40 phon):

$$N = 2^{\frac{L_N - 40 \text{ dB}}{10}} \text{ [sone]} \quad (3.3)$$

$$L_N = 33.22 \log(N) + 40 \text{ [phon]} \quad (3.4)$$

Merke: Bei gleichen A-bewerteten Schallpegeln sind breitbandige Schalle lauter als schmalbandige!

Lautheits-Thermometer



Pegel-Thermometer

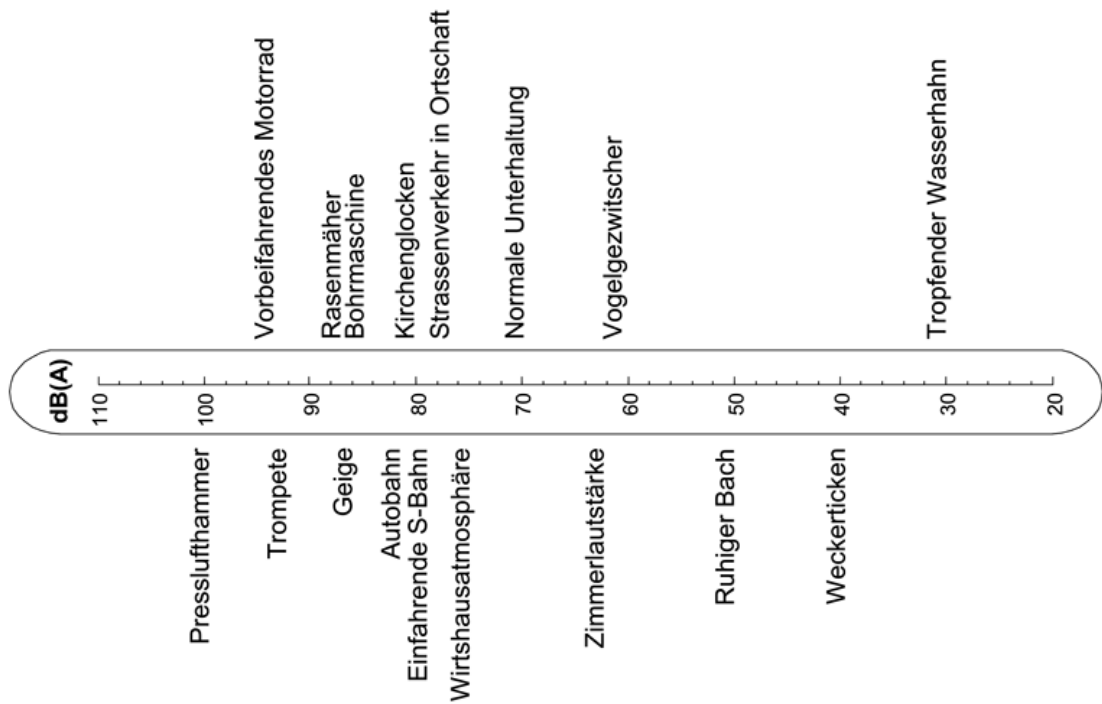


Abbildung 3.4: Pegel- und Lautheits-Thermometer.

3.8 Psychoakustische Lästigkeit

3.9 Hörschwellenverschiebung

4 Schallabwehr, Vorschriften, Normen

4.1 Arbeitslärm

4.2 Maschinenlärm

4.3 Gewerbelärm

4.4 Arbeitslärm

4.5 Straßenverkehrslärm

4.6 Schienenlärm

4.7 Fluglärm

4.8 Freizeitlärm

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kreislauf Straßenlärm	4
1.2	Systemtheoretischer Ansatz der Lärminderung	5
1.3	Schalldämmung eines Kapsel-Gehörschutzes	5
1.4	Hörfläche und Schallgrößen	8
1.5	Nomogramm: Pegelerhöhung bei Pegeldifferenz	9
2.1	Verlauf Absorptionsgrad <u>einschaliger</u> Mikroperforationsabsorbers	13
2.2	Verlauf Absorptionsgrad <u>zweischaliger</u> Mikroperforationsabsorbers	13
2.3	Schallbeugung am Beispiel von Schallschutzwänden.	15
2.4	Frequenzabhängige Schallabsorption in Luft	15
2.5	Absorptionsgrad Mineralfaserplatte mit Holzabdeckung	17
2.6	Spiegelschallquellenmethode	19
2.7	Absorption	19
2.8	Messung des Luftschalldämm-Maßes	20
2.9	Sollkurve des Luftschalldämm-Maßes	20
2.10	Mittleres Luftschalldämm-Maß einschaliger Wände	21
2.11	Luftschalldämmung von Mehrfachwänden	21
2.12	Sollkurve Norm-Trittschallpegel	22
3.1	Kurven gleicher Lautheit	23
3.2	A-Bewertungsfilter	23
3.3	Zeitkonstanten	24
3.4	Pegel- und Lautheits-Thermometer	27

Tabellenverzeichnis

1.1	Repräsentative Umfrage UBA	4
1.2	Internetumfrage UBA	4
1.3	Werte zur Pegelrechnung	9
1.4	Näherungen Summation inkohärenter Schalle	9
2.1	Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien	16
2.2	Schallabsorptionsgrade üblicher Akustikplatten	16
2.3	Beispiele für Luftschalldämm-Maße von Wänden	21
3.1	Terzpegelverteilung eines Geräusches	25
3.2	Schallschutzklassen von Fenstern	26
3.3	Schalldruckpegel und Lautheit 1kHz Sinustons.	26