

Materialsammlung zur Vorlesung „Technische Akustik und Lärmbekämpfung“

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

Wintersemester 2014/15
v.1.0

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Akustik und Lärmbekämpfung	3
1.1	Was ist Lärm?	3
1.2	Straßenverkehrslärm	3
1.3	Fluglärm	4
1.4	Prinzipien der Lärminderung	4
1.5	Schallfeldgrößen	4
1.6	Addition von Schallen	7
2	Entstehung und Ausbreitung von Schallen	9
2.1	Einfache Schwinger	9
2.2	Schallfelder	10
2.3	Ebene Wellen (plane waves)	10
2.4	Kugelwellen (spheric waves)	10
2.5	Strahlerarten	11
2.6	Schwingende Luftsäulen	11
2.7	Resonatoren und Absorber	11
2.8	Geometrische Akustik	13
2.9	Geometrische Raumakustik	17
2.10	Statistische Raumakustik	17
2.11	Raumsimulationstechniken	18
2.12	Perzeptive Aspekte in Räumen	19
2.13	Schalldämmung	20
3	Schallmesstechnik und Schallwirkungen	24
3.1	Bewerteter Schallpegel	24
3.2	Äquivalenter Dauerschallpegel	25
3.3	Schallanalyse mit konstanter, absoluter Bandbreite	25
3.4	Schallanalyse mit konstanter, relativer Bandbreite	29
3.5	Anwendung der Terzanalyse bei der Bestimmung des Einfügungsdämm-Maßes	29
3.6	Berechnungsverfahren: Zwicker-Lautheit	32
3.7	Psychoakustische Lautheit N [sone]	32
3.8	Psychoakustische Lästigkeit	33
3.9	Hörschwellenverschiebung	34
4	Schallabwehr, Vorschriften, Normen	35
4.1	Arbeitslärm	35
4.2	Maschinenlärm	35
4.3	Gewerbelärm	36
4.4	Straßenverkehrslärm	38
4.5	Schienenlärm	39
4.6	Fluglärm	39

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

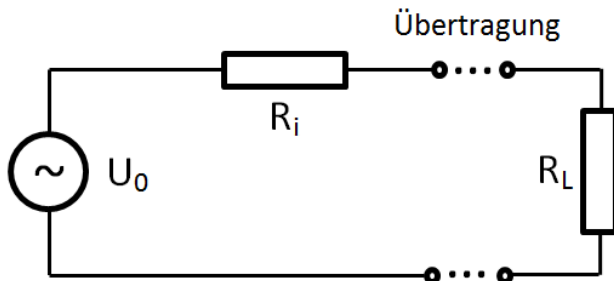


Abbildung 1.2: Systemtheoretischer Ansatz der Lärminderung.

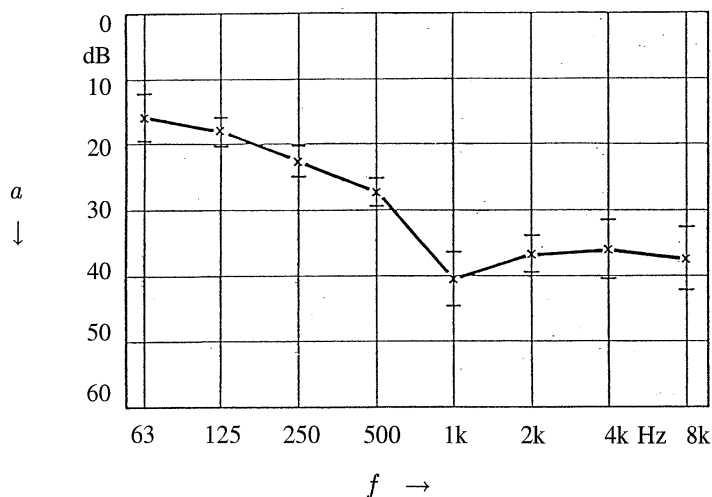


Abbildung 1.3: Schalldämmung eines Kapsel-Gehörschutzes.

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:

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

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

mit R_S der spez. Gaskonstante von Luft in $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$, T der absoluten Temperatur in [K] und κ dem Adiabatenexponenten von Luft $[-]$.

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)

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

Bezugsschalldruck:

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

Schallintensitätspegel (sound intensity level)

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

Bezugsschallintensität:

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

Schallleistungspegel (sound power level)

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

Bezugsschallleistung:

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

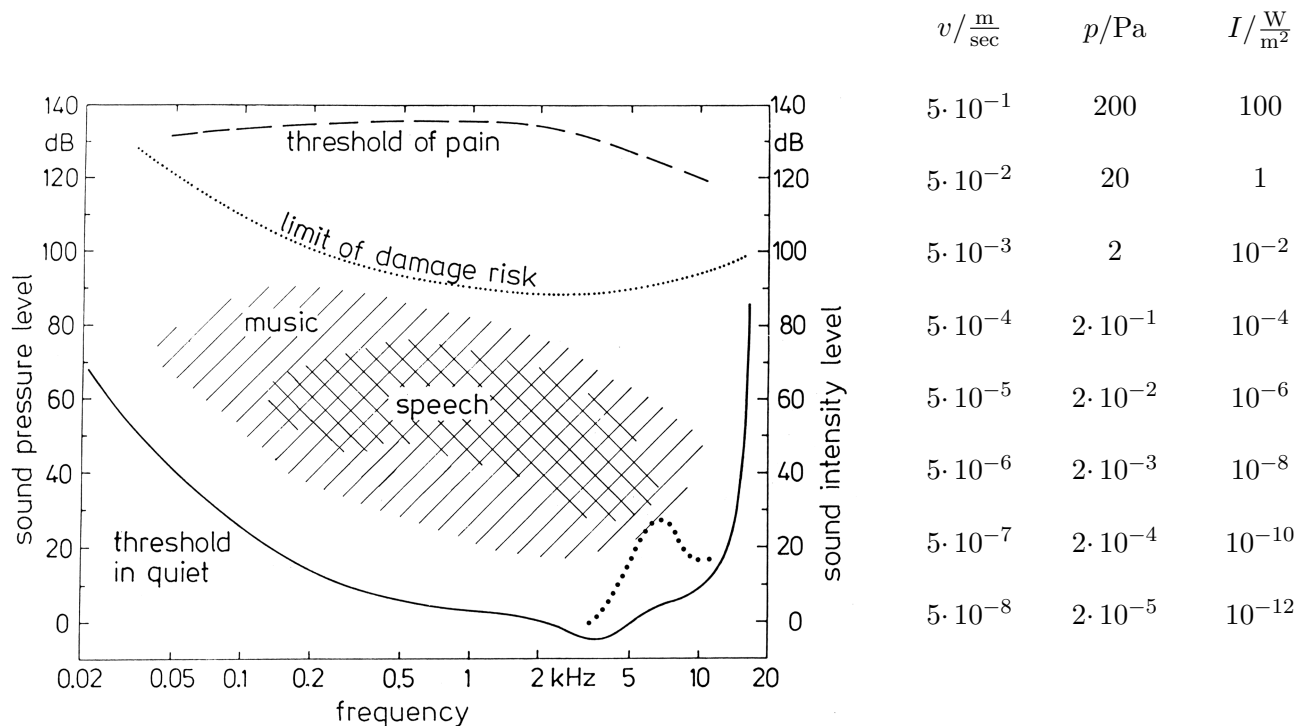


Abbildung 1.4: Hörfläche und Schallgrößen.

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 einen zweiten, inkohärenten Schall mit dem Pegel $L_{I,2}$ als Funktion der Pegeldifferenz $L_{I,1} - L_{I,2}$ zwischen beiden Schallen:

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

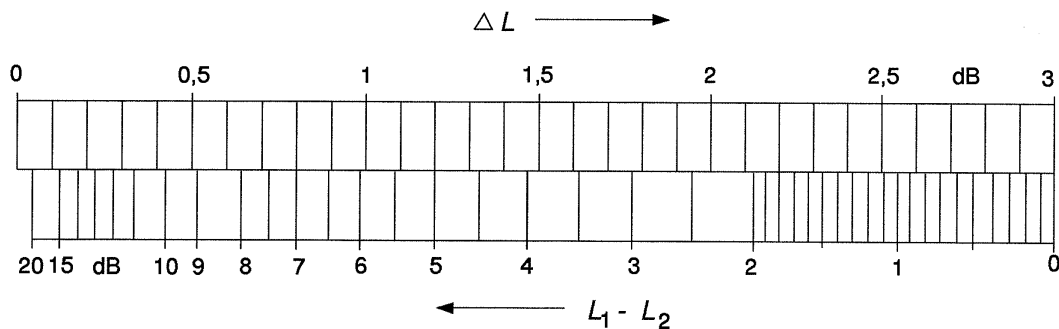


Abbildung 1.5: Nomogramm: Pegelerhöhung in Abhängigkeit der Pegeldifferenz zweier inkohärenter Schalle.

Tabelle 1.4: Näherungen für die Summation inkohärenter Schalle.

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

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 (law of elasticity)

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

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

Bewegungsgesetz/Trägheitsgesetz (law of motion/law of inertia)

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

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

Kontinuitätsgleichung (continuity equation)

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

Wellengleichung (wave equation)

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

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

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 waves)

$$Z_s = Z_0 = \frac{p}{v} = \rho \cdot c$$

2.4 Kugelwellen (spheric waves)

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

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

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

2.5 Strahlerarten

Punktstrahler (point source)

6 dB Abnahme bei Entfernungsverdopplung.

Linienquellen (line source)

3 dB 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 und Absorber

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 und S der Fläche zwischen schwingender Masse und Steifigkeit in $[m^2]$ entsprechen.

Plattenresonator

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

wobei D dem Abstand der Platte von der Wand in $[m]$ und d der Plattendicke in $[m]$ entsprechen.

Mikroperforationsabsorber

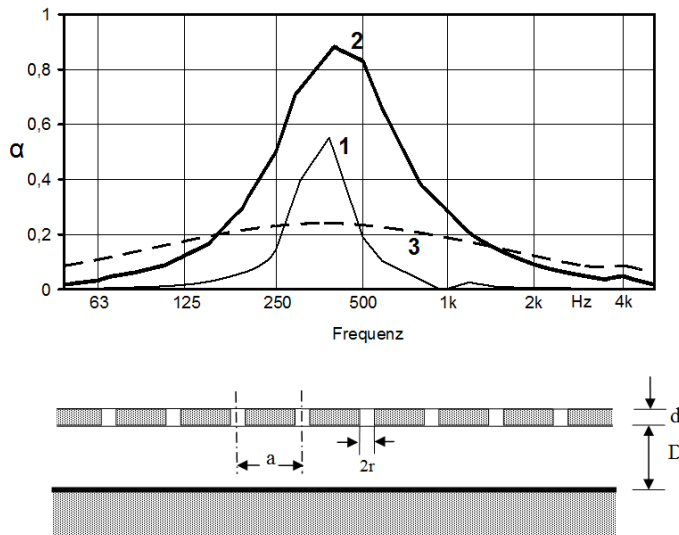


Abbildung 2.1: Typischer Verlauf des Absorptionsgrads eines einschaligen Mikroperforationsabsorbers (MPA). Lochflächenverhältnis 0.014, Wanddicke $d = 3$ mm, Wandabstand $D = 50$ mm. (1) $2r = 3$ mm, scharfes Resonanzspektrum, mittlere Absorption, Mischung aus Platten- und Helmholtzresonator, (2) $2r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

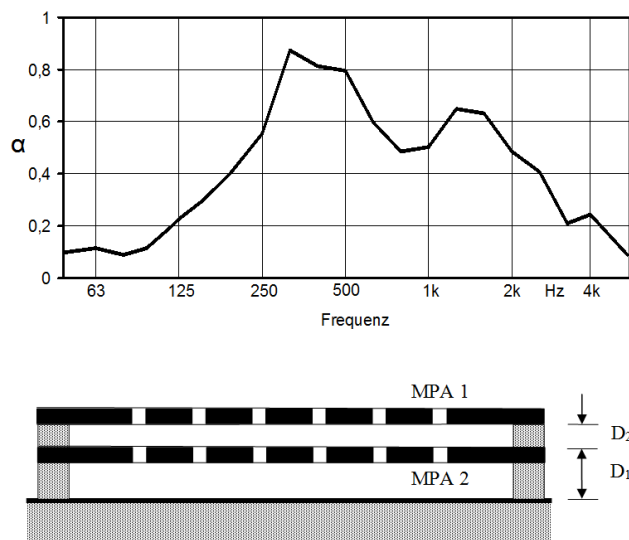


Abbildung 2.2: Typischer Verlauf des Absorptionsgrads eines zweischaligen Mikroperforationsabsorbers. Wandabstände $D_1 = 50$ mm und $D_2 = 18$ mm. Vorteil: Die beiden Hauptresonanzen sind individuell einstellbar, wodurch ein breites Absorptionsspektrum erreicht werden kann.

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:

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

Schallfeldimpedanzen üblicher Begrenzungsflächen

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

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

mit w'' Strömungswiderstand des porösen Materials in $\left[\frac{\text{N} \cdot \text{sec}}{\text{m}^3}\right]$ und d Abstand der Masse von der Wand in $[m]$.

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

- a) Laufzeitkomponente:

$$Z = -j \cdot Z_0 \cot kd \quad (2.19)$$

- b) Addiere Masse bei $x = 0$

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

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

$$Z = w'' - j \left(\omega m'' - \frac{Z_0 c}{\omega d} \right) \quad (2.21)$$

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)

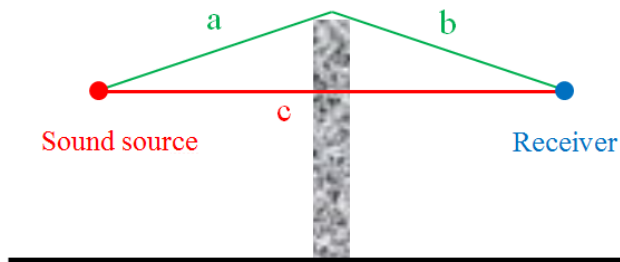
Streuungskoeffizient:

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

Gestrene Schallenergie:

$$E_s = (1 - \alpha) s \quad (2.24)$$

Beugung (diffraction)



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

$$\Delta L = 10 \lg \left(2\pi^2 - \frac{d}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (2.25)$$

Abbildung 2.3: Schallbeugung am Beispiel von Schallschutzwänden.

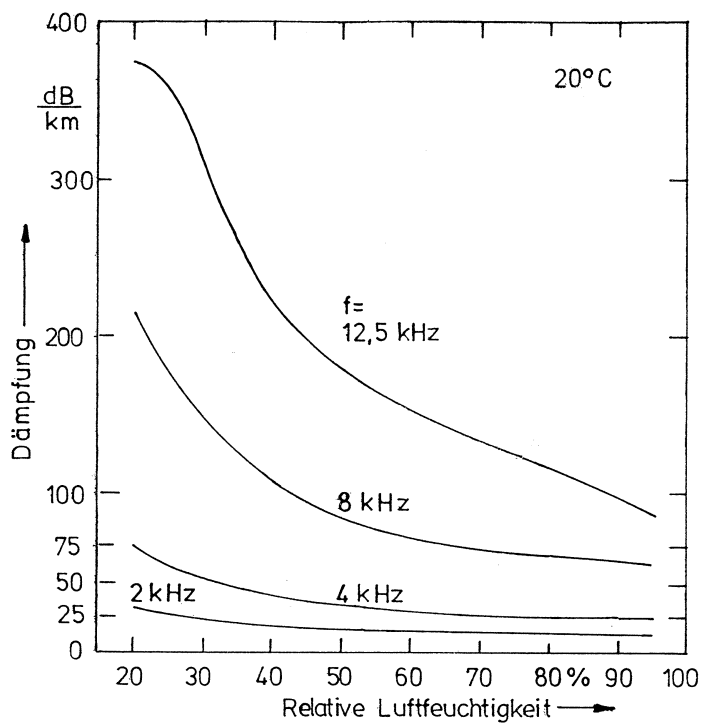


Abbildung 2.4: Frequenzabhängige Schallabsorption in Luft. Je höher die Luftfeuchtigkeit, desto geringer die Dämpfung. Höhere Frequenzen erfahren eine stärkere Dämpfung.

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

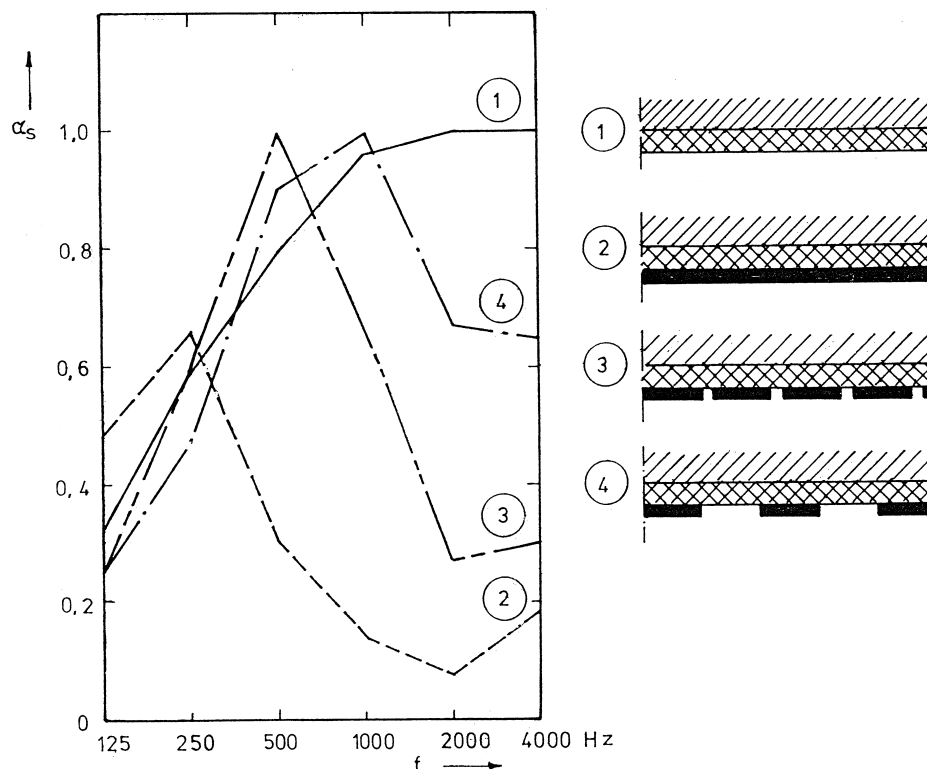


Abbildung 2.5: Absorptionsgrad einer 45 mm dicken Mineralfaserplatte bei verschiedener Abdeckung mit Holz. (1) Hohe Absorption an hohen Frequenzen durch direkt akustisch „sichtbares“ Absorbermaterial. (2) Plattenresonator. Durch die reflektierende Wirkung der Holzoberfläche werden hohe Frequenzen weniger 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)

$$f_{x,y,z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \text{ [Hz]} \quad (2.26)$$

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

$$M(f) = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 \cdot V \text{ [-]} \quad (2.27)$$

Raummodendichte (room mode density)

$$\frac{\Delta M}{\Delta f} \approx \frac{dM}{df} = \frac{4\pi}{c} \left(\frac{f}{c}\right)^2 \cdot V \left[\frac{1}{\text{Hz}}\right] \quad (2.28)$$

Schröder-Frequenz (Schroeder frequency)

$$f_s = \sqrt{\frac{c^3 \cdot T_{60}}{4V \cdot \ln 10}} \text{ [Hz]} \quad (2.29)$$

$$\text{Praxisformel : } f_s \gg 2100 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \text{ [Hz]} \quad (2.30)$$

Mittlere Reflexionsrate (mean reflection rate)

$$\bar{n} = \frac{c \cdot S}{4V} \left[\frac{1}{\text{sec}}\right] \quad (2.31)$$

Mittlere freie Weglänge (mean free path)

$$\bar{l} = \frac{4V}{S} \text{ [m]} \quad (2.32)$$

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 60 dB abgefallen ist.

Eyring-Formel

$$T_N = -0.163 \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ [sec]} \quad (2.33)$$

Sabine-Formel

$$\text{Näherung für } \alpha \ll 1 : T_N = 0.163 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \text{ [sec]} \quad (2.34)$$

Offene Fensterfläche

$$\bar{\alpha}S = 0.163 \frac{V}{T_N} [\text{m}^2] \quad (2.35)$$

Hallradius (critical distance)

$$r_H = 0.14 \sqrt{\bar{\alpha}S} [\text{m}] \quad (2.36)$$

2.11 Raumsimulationstechniken

Spiegelschallquellenmethode

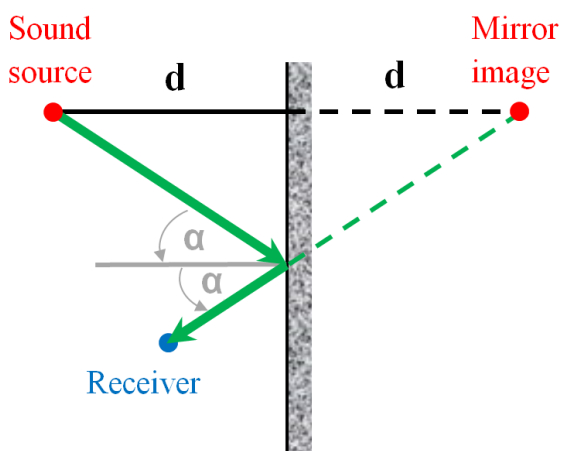


Abbildung 2.6: Schematik der Spiegelschallquellenmethodik mit Schallquelle (sound source), Spiegelquelle (mirror image) und Empfänger (receiver).

2.12 Perzeptive Aspekte in Räumen

Präzedenzeffekt (precedence effect)

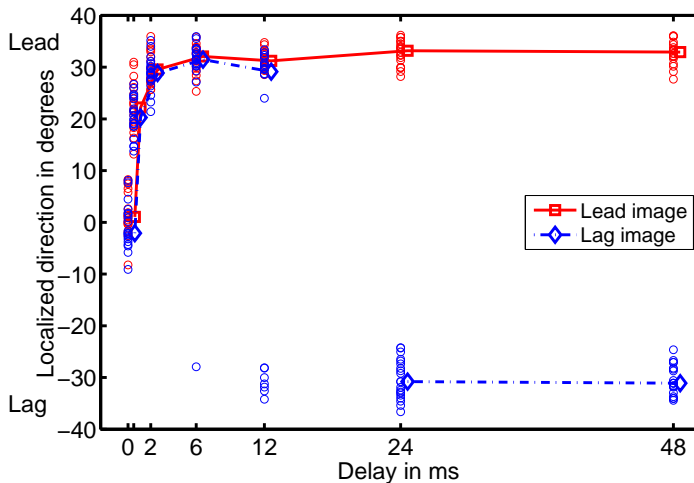


Abbildung 2.7: Wahrgenommene Position der Hörobjekte eines gesprochenen Wortes in Abhängigkeit von der Verzögerung zwischen zwei Lautsprechern ($\pm 30^\circ$, „Lead” und „Lag”). Der Stimulus wird von beiden Lautsprechern mit einer variablen Verzögerung des Signals wiedergegeben. Bei simultaner Wiedergabe, d.h. 0 ms Verzögerung, wird ein Hörobjekt in der Mitte beider Lautsprecher wahrgenommen („Phantomquelle”). Wird die Verzögerung bis 1 ms erhöht, wandert dieses Hörobjekt zur Richtung des Lautsprechers, aus dem zuerst abgespielt wird („Lead”). Bis 1 ms Verzögerung tritt Summenlokalisierung auf. Zwischen 1 ms und 12 ms Verzögerung wird ebenfalls nur eine Schallquelle am Ort des führenden Lautsprechers wahrgenommen, man spricht vom Präzedenzeffekt (auch „Gesetz der ersten Wellenfront”). Ab ca. 24 ms Verzögerung werden zwei separate Schallquellen an den jeweiligen Lautsprecherpositionen wahrgenommen, eine am führenden Lautsprecher und ein Echo vom verzögerten Lautsprecher, siehe oberen und unteren Ast. Dazwischen befindet sich die „Echoschwelle” (engl. echo threshold), ab der die Reflexion als Echo hörbar wird.

Klarheitsmaß (clarity index)

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (2.37)$$

Nach DIN EN ISO 3382. Bildet das Verhältnis aus der Energie des Direktschalls und aller einfallenden Reflexionen innerhalb der ersten Messperiode (Integrationszeit bei Sprache 50 ms, bei Musik 80 ms), sowie aller restlichen Reflexionen eines Messraums.

2.13 Schalldämmung

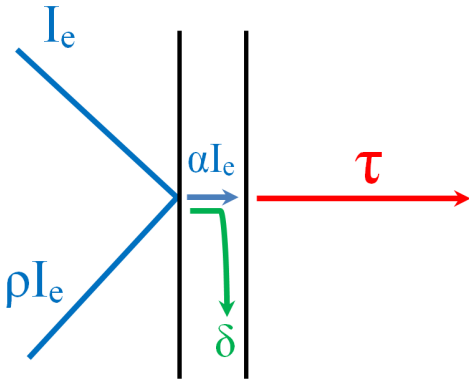


Abbildung 2.8: Beispielhafte Reflexion an einer Unstetigkeitsstelle mit τ Transmissionsgrad, δ Dissipationsgrad, α Absorptionsgrad und ρ Reflexionsgrad.

Luftschalldämmung (airborne sound reduction)

Messung des Luftschalldämm-Maßes

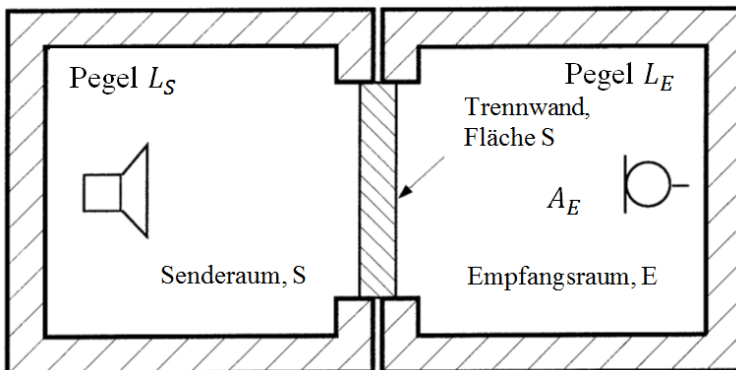


Abbildung 2.9: Messung des Luftschalldämm-Maßes.

$$R = 10 \lg \frac{L_S}{L_E} = 10 \lg \frac{I_e}{\tau \cdot I_e} \text{ [dB]} \quad (2.38)$$

$$R = D + 10 \lg \frac{S}{A_E} \text{ [dB]} \quad (2.39)$$

mit

$$D = L_S - L_E = 20 \lg \frac{p_S}{p_0} + 20 \lg \frac{p_E}{p_0} \text{ [dB]} \quad (2.40)$$

und Korrektur der Absorption im Empfangsraum durch die offene Fensterfläche:

$$A_E = \bar{\alpha} \cdot S_E \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.41)$$

Sollkurve des Luftschalldämm-Maßes

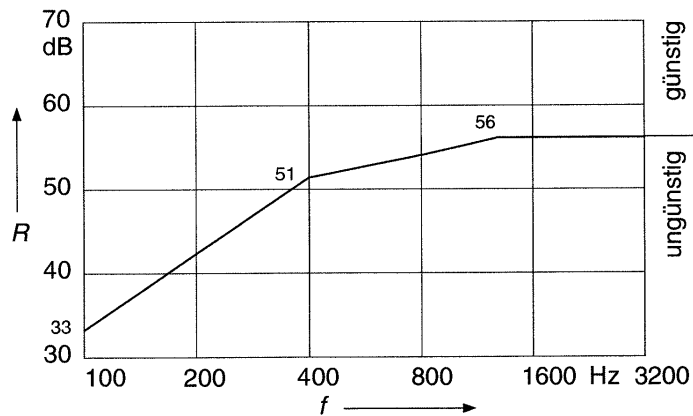


Abbildung 2.10: Sollkurve des Luftschalldämm-Maßes nach DIN EN ISO 717-1.

Mittelwert von R im Frequenzbereich 100 Hz ... 3200 Hz:

$$\bar{R} \approx \frac{R_{100} + R_{200} + R_{400} + R_{800} + R_{1600} + R_{3200}}{6} \text{ [dB]} \quad (2.42)$$

Tabelle 2.3: 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 Prüfstand (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

Ein- und mehrschalige Wände

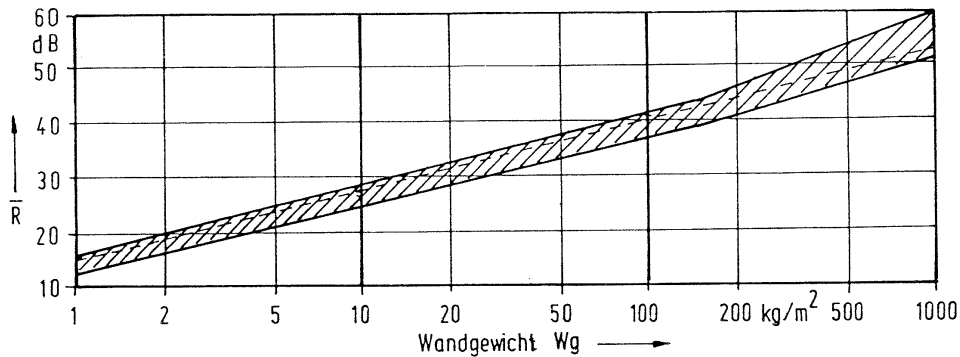


Abbildung 2.11: Mittleres Luftschalldämm-Maß einschaliger Wände in Abhängigkeit vom Wandgewicht pro m^2 .

Näherungsgerade für das Luftschalldämm-Maß:

$$\bar{R} \approx 13 \lg(W_g) + 15 \text{ [dB]} \quad (2.43)$$

Tabelle 2.4: 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

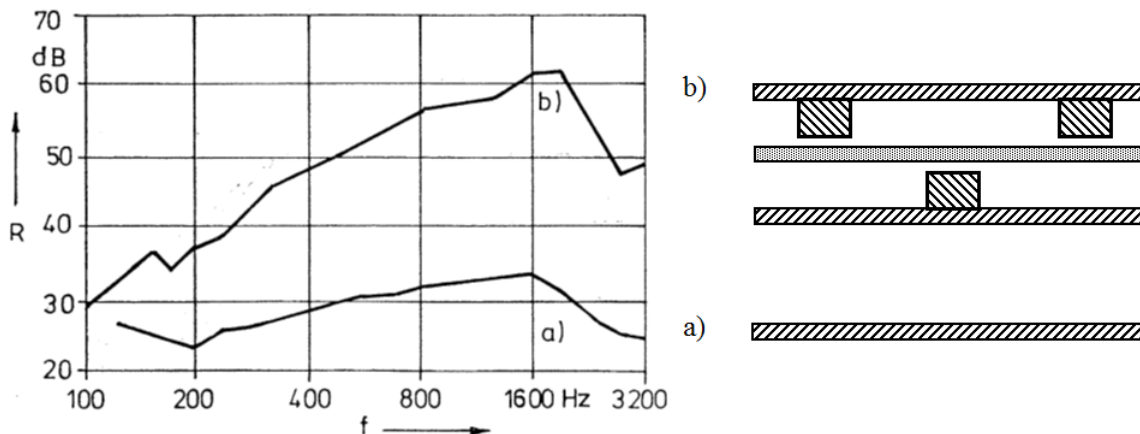


Abbildung 2.12: Luftschalldämmung von Mehrfachwänden. a) Einfachwand aus 12 mm Gipskartonplatten: $\bar{R} = 28$ dB. b) Doppelwand aus 12 mm Gipskartonplatten: $\bar{R} = 48$ dB.

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

Körperschalldämmung (body-borne sound reduction)

Normhammerwerk

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

$$L_N = L_{p, \text{Terz}} - 10 \lg \left(\frac{10 \text{ m}^2}{\bar{\alpha} S} \right) \text{ [dB]} \quad (2.44)$$

Sollkurve des Norm-Trittschallpegels

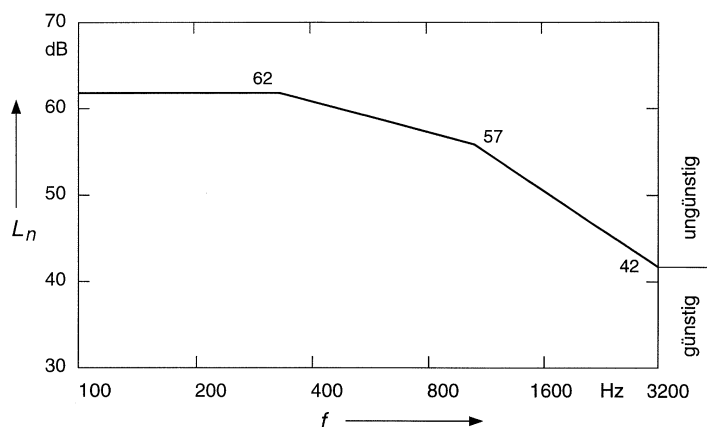


Abbildung 2.13: Sollkurve für Norm-Trittschallpegel je Terz nach DIN EN ISO 717-2.

3 Schallmesstechnik und Schallwirkungen

3.1 Bewerteter Schallpegel

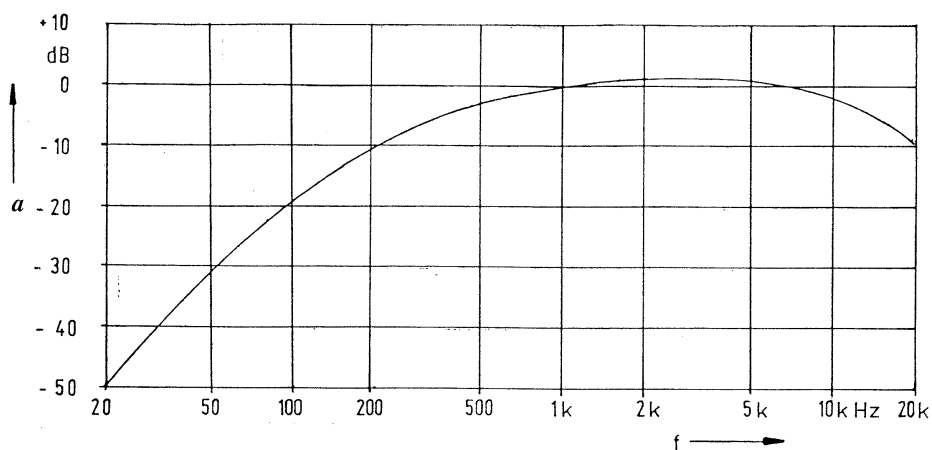


Abbildung 3.1: A-Bewertungsfilter. Starke Dämpfung an tiefen Frequenzen (-19.1 dB an 100 Hz), keine Pegeländerung an 1 kHz.

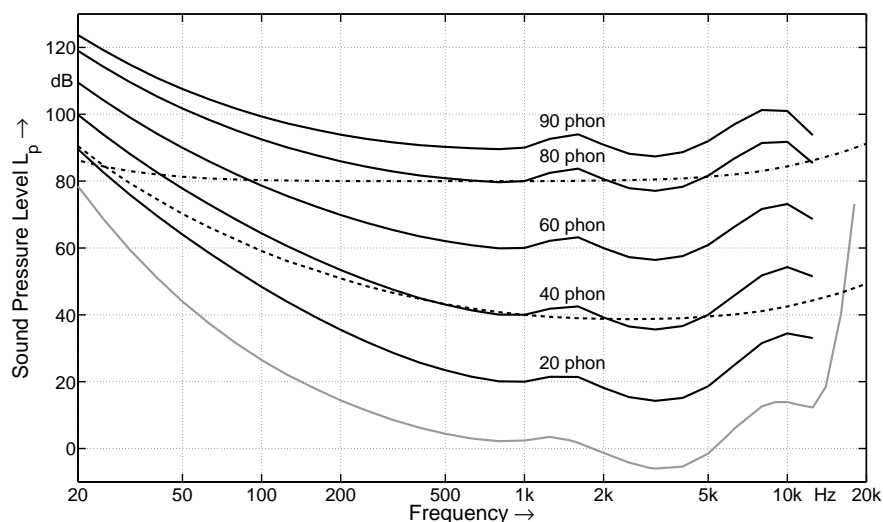


Abbildung 3.2: Kurven gleicher Lautstärkepegel nach ISO 226:2003 (durchgezogen) im Vergleich zur A-Bewertung (gestrichelt) an 40 dB SPL und C-Bewertung (strichpunktiert) an 80 dB SPL (beide nach DIN EN 61672-1). Untere, graue Kurve: Ruheshwelle im Freifeld nach ISO 389-7:2005.

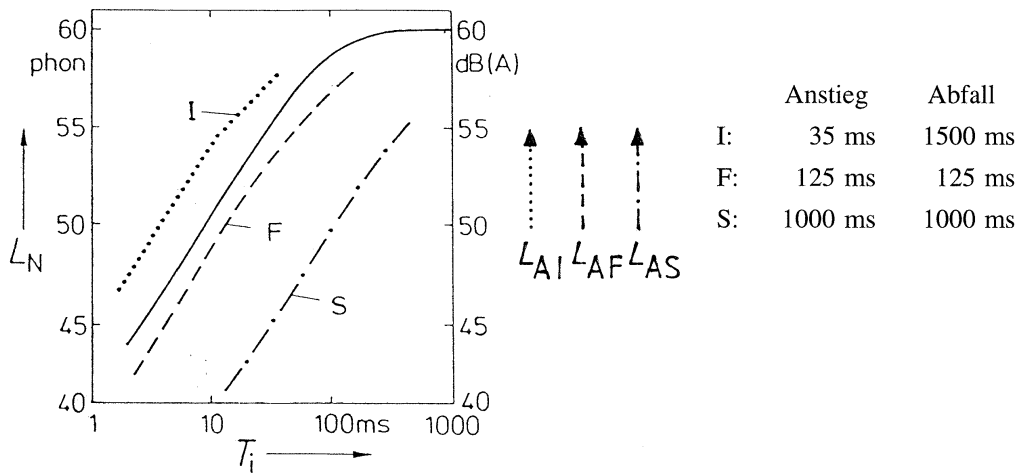


Abbildung 3.3: Lautstärkepegel L_N von einzelnen 1 kHz-Tonimpulsen (durchgezogen) der Dauer T_i im Vergleich zur Pegelanzeige L_A eines Schallpegelmessers bei Verwendung der Zeitkonstanten I (impulse), F (fast) oder S (slow).

3.2 Äquivalenter Dauerschallpegel

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad [\text{dB}], \quad (3.1)$$

auch als Mittelungspegel L_M bezeichnet.

3.3 Schallanalyse mit konstanter, absoluter Bandbreite

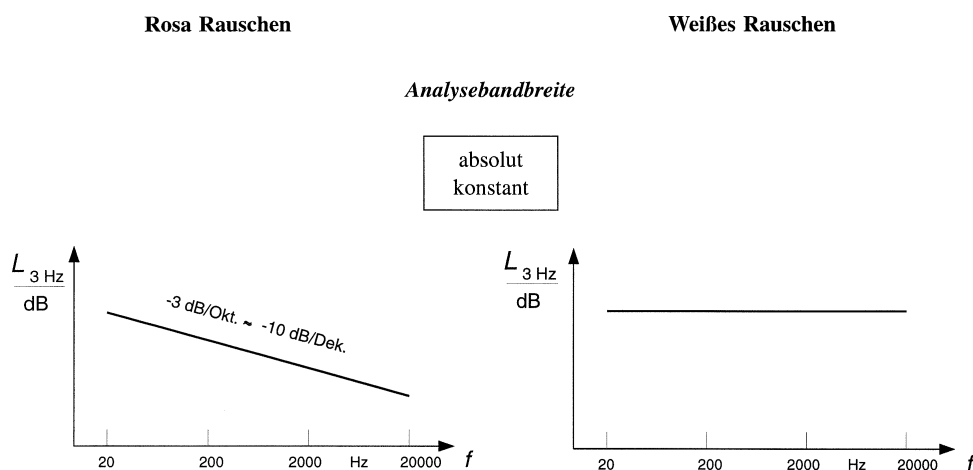
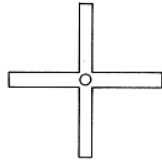


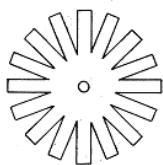
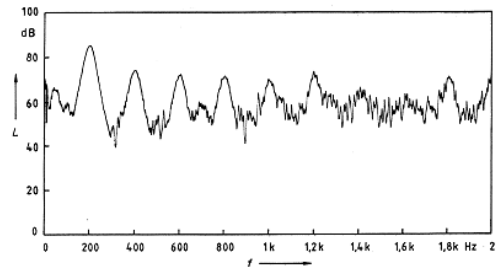
Abbildung 3.4: Analysebandbreiten bei konstanter, absoluter Bandbreite. Weißes Rauschen ist definiert als ein Rauschen, welches dieselbe Leistung pro Hertz aufweist (konstante spektrale Leistungsdichte).

Drehklang

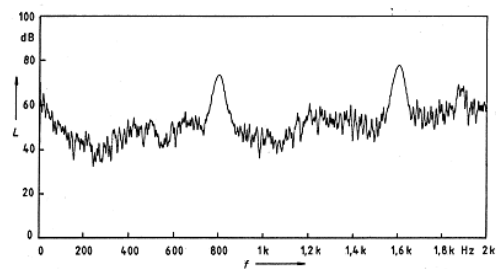
Drehzahl konstant



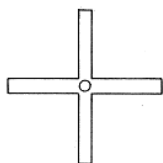
$$n=3000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$



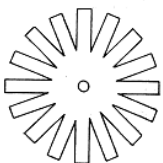
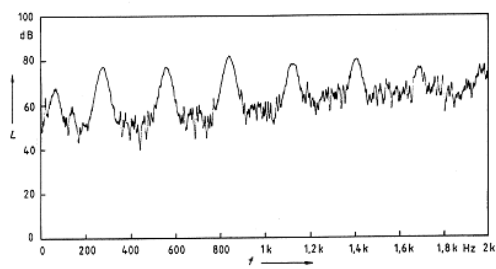
$$n=3000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$



Grundfrequenz konstant



$$n=4200 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$



$$n=1050 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

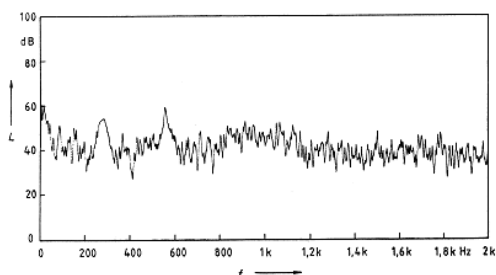


Abbildung 3.5: Charakteristische Spektren von Lüftern mit 4 oder 16 Flügeln und unterschiedlichen Umdrehungsraten. Bei gleicher Drehzahl weist der Lüfter mit 4 Flügeln eine 4-fach niedrigere Grundfrequenz der tonalen Komponenten auf, so dass im hörbaren Spektralbereich deutlich mehr Komponenten aus dem Rauschen ragen. Derselbe Luftdurchsatz kann (theoretisch) bei einem Viertel der Umdrehungsrates mit einem Lüfter mit 16 Flügeln erreicht werden (Zielvorgabe Design!). Bei dieser Umdrehungsrates hat der 16-Flügler dieselbe Grundfrequenz wie der 4-mal höher drehende 4-Flügler, jedoch ist der abgestrahlte Schalldruckpegel deutlich geringer und die tonalen Komponenten verschwinden in den rauschhaften Komponenten, was eine deutlich geringere psychoakustische Lästigkeit zur Folge hat.

Ordnungsanalyse

Anwendung

Zur Analyse von Geräuschkomponenten an allen Arten von rotierenden Maschinen (Motoren, Getriebe, Lüfter, ...). Dadurch wird eine Auswertung der periodischen Frequenzanteile, die direkt mit der Drehzahl in Zusammenhang stehen, vereinfacht.

Prinzip

Die zeitsynchrone Abtastung des Audiosignals wird ersetzt durch eine winkelsynchrone Abtastung. Das kann geschehen durch entsprechende Sensoren an rotierenden Teilen, oder durch spezielle Berechnungsverfahren aus Drehzahl und (konstanter) Abtastfrequenz.

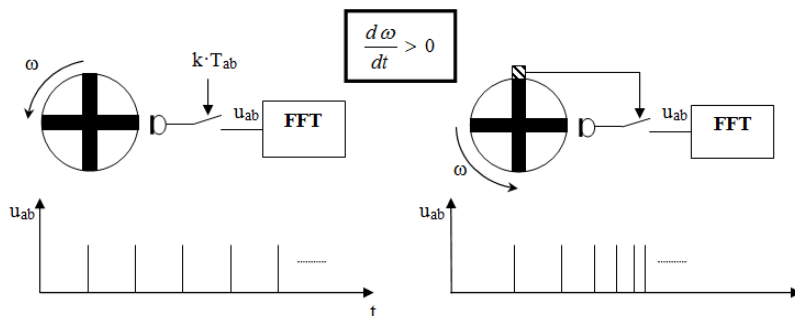


Abbildung 3.6: Verfahren zur Bestimmung der Drehzahl von rotierenden Lüftern. *Links*: Verwendung eines Berechnungsverfahrens unter Hinzunahme einer konstanten Abtastfrequenz. *Rechts*: Verwendung eines (Licht-)Sensors zur Bestimmung der Abtastmomente, die damit drehzahlabhängig sind.

Das Spektrogramm geht dadurch in ein Ordnungsspektrogramm über, bei welchem die Frequenzachse durch eine Ordnungsachse ersetzt wird. Diese Ordnungsachse gibt nun nicht mehr die Ereignisse pro Zeit, sondern die Ereignisse pro Umdrehung an und ist damit wesentlich unempfindlicher gegenüber Drehzahlschwankungen. Die analysierbare Ordnungszahl ist abhängig von der Anzahl der Abtastwinkel pro Umdrehung (meist 2^n Punkte).

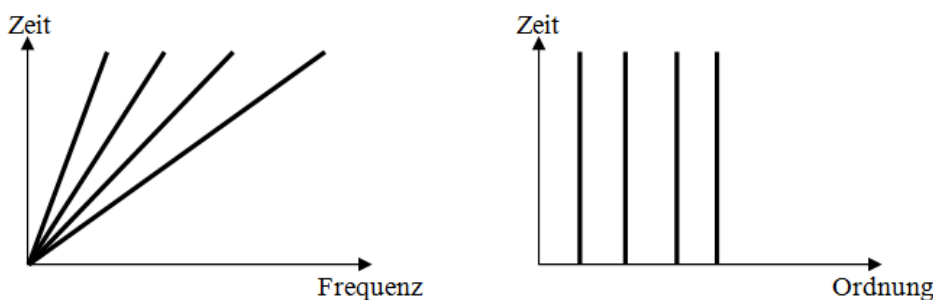


Abbildung 3.7: *Links*: Schematische Darstellung eines Motorhochlaufs in einem klassischen Spektrogramm. Bei höheren Drehzahlen (nach mehr verstrichener Zeit) sind Grundfrequenz neben allen Harmonischen angestiegen.

Rechts: Darstellung des Motorhochlaufs nach der Ordnungsanalyse. Der zeitabhängige Anstieg der Grundfrequenz tritt in dieser ordnungsnormierten Darstellung nicht in Erscheinung.

Hochlaufen eines Motors

Umdrehungen: 1000 - 6000 U/min
6 - Zylinder Benzinmotor
3 - Gang unter Volllast

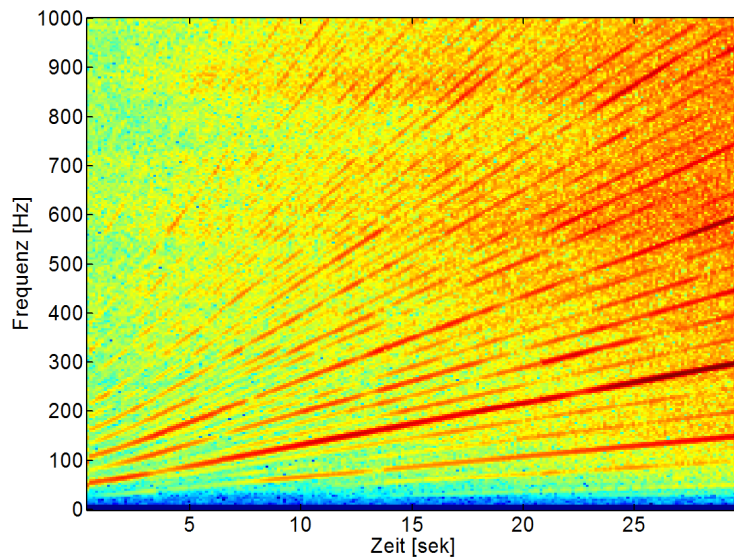


Abbildung 3.8: Spektrogramm zur Aufnahme eines hochlaufenden Motors. Deutlich bilden sich die Frequenzlinien über der Zeit heraus.

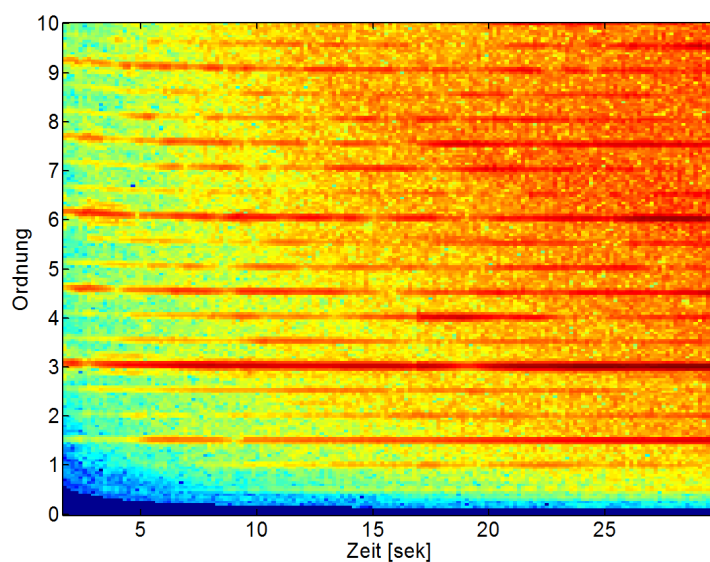


Abbildung 3.9: Darstellung der Aufnahme eines hochlaufenden Motors in Ordnungen über der Zeit. Horizontale Ordnungslinien deutlich erkennbar.

3.4 Schallanalyse mit konstanter, relativer Bandbreite

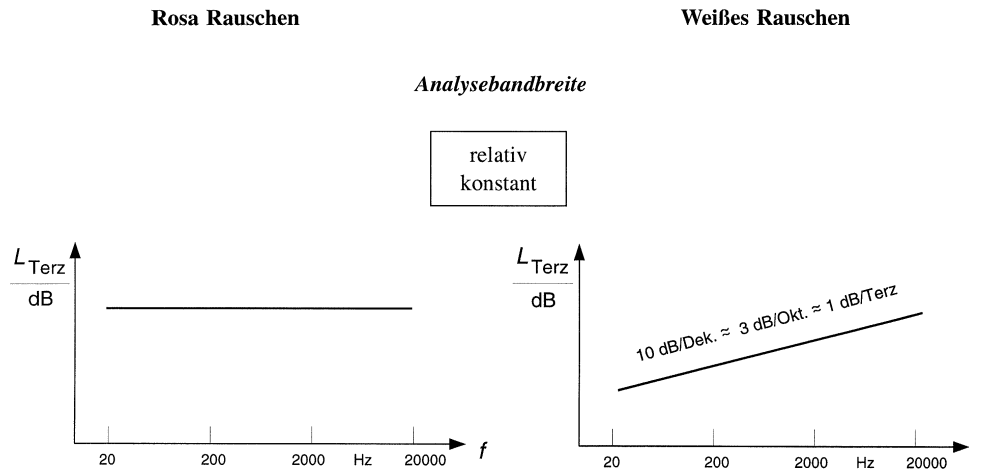


Abbildung 3.10: Analysebandbreiten bei konstanter, relativer Bandbreite. Rosa Rauschen weist dieselbe Leistung in jedem Terzband auf. Da die Terzbänder mit zunehmender Mittenfrequenz linear breiter werden, ist die Energie bei relativer Betrachtung der Bandbreiten konstant.

Schalldruckpegel von Rosa Rauschen (31 Terzen im Hörbereich)

$$L_{\text{ges}} = L_{p,\text{Terz}} + 10 \lg 31 = L_{p,\text{Terz}} + 15 \text{ [dB]} \quad (3.2)$$

Schalldruckpegel von Rosa Rauschen bei A-Bewertung

$$L_{\text{ges}} = L_{p,\text{Terz}} + 12 \text{ [dB]}, \quad (3.3)$$

wobei mit dem unbewerteten Terzschalldruckpegel $L_{p,\text{Terz}}$ gerechnet wird.

3.5 Anwendung der Terzanalyse bei der Bestimmung des Einfügungsdämm-Maßes

Das Einfügungsdämm-Maß D_e ist definiert als die Differenz der Schalldruckpegel vor und nach der Durchführung einer akustischen Messung, beispielsweise das Einbringen von Dämmmaterial oder eines Schallhindernisses.

Vorgehen

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

$$D_e = L_{p,\text{Terz}} - L_A + k \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

$L_{p, Terz}$: gemessener Terzschalldruckpegel

L_A : gewünschter A-bewerteter Schallpegel

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

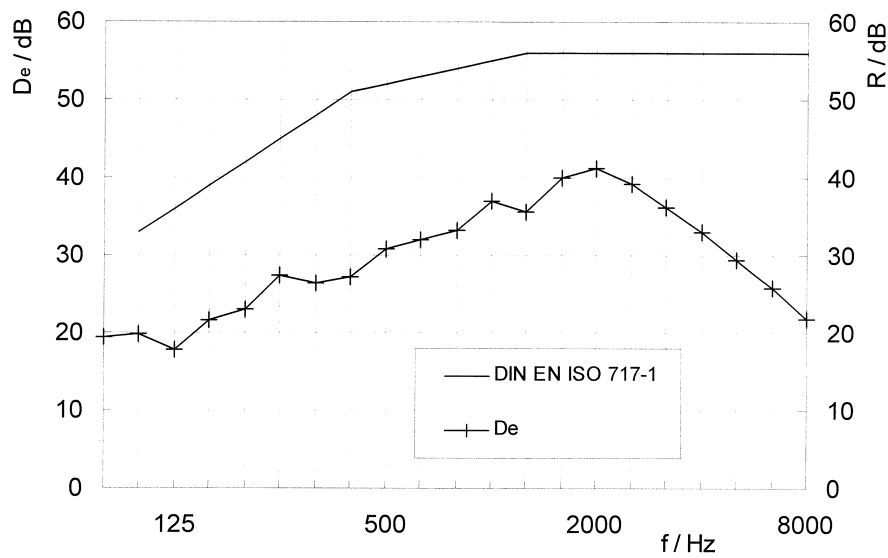


Abbildung 3.11: Einfügungsdämm-Maße der nachfolgenden Tabelle eines Schallschutzfensters zur Einhaltung der geforderten Werte der Sollkurve nach DIN EN ISO 717-1.

Tabelle 3.1: Terzpegelverteilung eines Geräusches (außen), gewünschter $L_A = 55$ dB (innen) und nötiges Schalldämm-Maß D_e für jede Terz, um die Zielvorgabe zu erreichen. Für positive Werte des Einfügungsdämm-Maßes ist eine zusätzliche Schalldämmung erforderlich, für negative Werte werden die Mindestwerte eingehalten.

f_m [Hz]	$L_{p, Terz}$ [dB]	$L_{p, Terz} - L_A$ [dB]	a_A [dB]	k [dB]	D_e [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

3.6 Berechnungsverfahren: Zwicker-Lautheit

DIN 45631:1991-03 Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum; Verfahren nach E. Zwicker.

DIN 45631/A1 Änderung A1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche.

- Basierend auf Terzschalldruckpegel, Terzbreite: $\Delta f = 0.23 \cdot f_m$ [Hz]
- Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Lautheit und Terzschalldruckpegeln
- Berücksichtigt obere Flanken der Mithörschwellen (Verdeckung höherer Frequenzen durch tieferen)
- Unterschiedlicher Beitrag der Terzschalldruckpegel zur Gesamtlautheit an verschiedenen Frequenzen

Durchführung mittels Lautheits-Schablone

1. Messung der Terzschalldruckpegel $L_{p, Terz}$ [dB]
2. Eintragen der Werte in die Schablone, Linien verbinden
 - a) Aufsteigende Linien direkt
 - b) Absteigende Linien entlang der Kurven aus Mithörschwellen
3. Integration der eingetragenen Fläche und Ablesen der Lautheit N [sone] bzw. des Lautstärkepegels L_N [phon] auf gleicher Höhe

3.7 Psychoakustische Lautheit N [sone]

Tabelle 3.2: Schalldruckpegel und Lautheit eines 1 kHz Sinustons. Eine Verdopplung der Lautheit entspricht einem 10 dB-Pegelanstieg an 1 kHz.

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

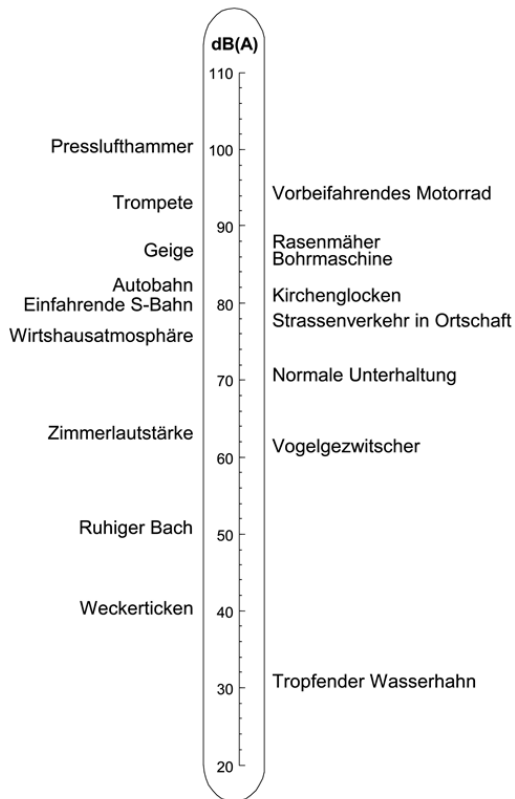
Umrechnungsvorschrift (gilt nur oberhalb 40 phon)

$$N = 2^{\frac{L_N - 40 \text{ dB}}{10}} \text{ [sone]} \quad (3.5)$$

$$L_N = 33.22 \lg(N) + 40 \text{ [phon]} \quad (3.6)$$

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

Pegel-Thermometer



Lautheits-Thermometer

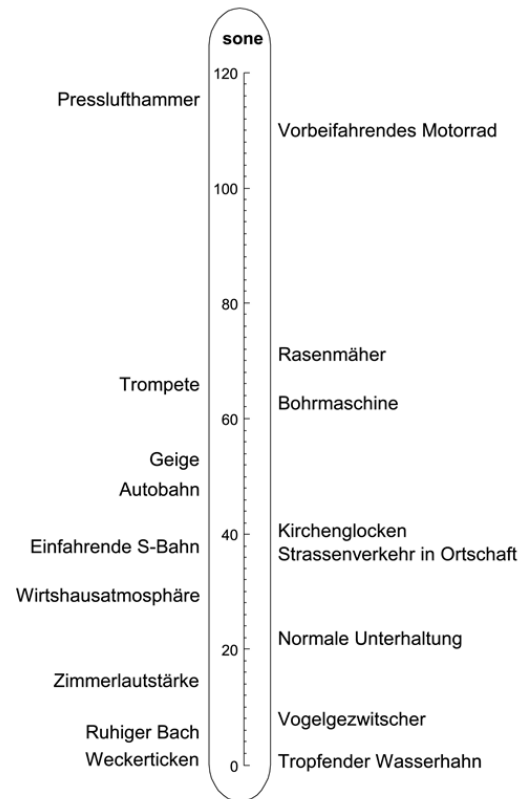


Abbildung 3.12: Pegel- und Lautheits-Thermometer.

3.8 Psychoakustische Lästigkeit

Faktoren, die die Lästigkeit von Schallen beeinflussen

- Frequenzanteile (hohe Frequenzen lästiger)
- Periodizität (periodische Schalle lästiger)
- Bezug zur Schallquelle
- Tageszeit
- Finanzielle Aspekte

Einflussgrößen auf die psychoakustische Lästigkeit

Wichtige Komponenten im Sound Quality Design

- Lautheit N [sone] (Träger von 80 % der Varianz in der Lästigkeit)
- Schärfe (sharpness) S [acum]
- Schwankungsstärke (fluctuation strength) F [vacil]

- Rauigkeit (harshness) R [asper]
- Ausgeprägtheit der Tonhöhe (pitch strength) ATH [Hz]

3.9 Hörschwellenverschiebung

Temporäre Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift, TTS)

- Unter Einfluss von Lärm hoher Intensität kommt es zu einer temporären Hörschwellenverschiebung (TTS)
- Nach etwa 4 - 6 Stunden Lärmexposition erfährt die TTS eine Sättigung (Asymptotic Threshold Shift (ATS)), je nach Einwirkung kann die Hörschwelle bis zu 30 dB verschoben sein
- Ab etwa 74 dB Oktavschalldruckpegel an 4 kHz erhöht sich die ATS um etwa 1.7 dB pro 1 dB Lärmerhöhung
- Abklingen der TTS auf 0 dB unter der Voraussetzung, dass keine neue Lärmbelastung in der Abklingphase hinzukommt
- Häufige Akkumulation der ATS führt zu einer permanenten Hörschwellenverschiebung (PTS)

Permanente Hörschwellenverschiebung (Permanent Threshold Shift, PTS)

- Altershörverlust (u.a. Verlust der Haarzellen im Innenohr)
- Akkumulierte TTS
- Schädigende Einzelereignisse
- Genetische Prädisposition
- Kognitive Einschränkungen

4 Schallabwehr, Vorschriften, Normen

4.1 Arbeitslärm

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV)

Vorgaben zum Tragen von Gehörschutz am Arbeitsplatz

Der Arbeitgeber hat festgelegte Schutzmaßnahmen zur Lärminderung nach dem Stand der Technik durchzuführen, um die Gefährdung der Beschäftigten auszuschließen oder so weit wie möglich zu verringern. Sofern diese Maßnahmen nicht ausreichen, um die unten stehenden Auslösewerte zu unterschreiten, ist das Tragen oder das zur Verfügung Stellen eines persönlichen Gehörschutzes Vorschrift.

- $L_A \geq 80 \text{ dB(A)}$ (8 h Mittelungspegel), $L_{C,peak} \geq 135 \text{ dB(C)}$

Der Arbeitgeber hat den Beschäftigten einen geeigneten persönlichen Gehörschutz zur Verfügung zu stellen.

- $L_A \geq 85 \text{ dB(A)}$ (8 h Mittelungspegel), $L_{C,peak} \geq 137 \text{ dB(C)}$

Der Arbeitgeber hat dafür Sorge zu tragen, dass die Beschäftigten den persönlichen Gehörschutz bestimmungsgemäß verwenden.

4.2 Maschinenlärm

Hüllflächenverfahren

DIN 45635-1 Geräuschmessung an Maschinen; Luftschallemission, Hüllflächenverfahren; Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen

- Geltungsbereich: Alle Maschinen mit Ausnahme von Kraftfahrzeugen
- Bestimmung des A-bewerteten Schallleistungspegels $L_{W,A}$
- Verschiedene Genauigkeitsklassen, je nach Messumgebung
- Messung unter Volllast und bei Betriebstemperatur, inklusive aller Fremdgeräusche
- Messabstand 1 m, mindestens 5 Messpunkte (Erfassung der Richtungscharakteristik), Messung des A-bewerteten Schalldruckpegels
- $L_{A,max} - L_{A,min} > \text{Anzahl der Messpunkte}$, sonst Anzahl der Messpunkte erhöhen

Messflächenmaß

$$L_S = 10 \lg \frac{S_{Mess}}{1 \text{ m}^2} \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

A-bewerteter Schalleistungspegel

$$L_{W,A} = \bar{L}_A + L_S \quad [\text{dB}] \quad (4.2)$$

mit $\bar{L}_A = 10 \lg \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i}{I_0}$ [dB], energetische Mittelung (Intensitätsaddition).

4.3 Gewerbelärm

Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)

Anwendungsbereich

Die Technische Anleitung Lärm dient zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche, sowie der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Geräusche. Sie ist Teil des Genehmigungsverfahrens für Gewerbe- und Industrieanlagen. Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne der Technischen Anleitung sind Geräuschimmissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder Nachbarschaft herbeizuführen.

Beurteilungspegel L_r

Der Beurteilungspegel L_r setzt sich zusammen aus den folgenden Punkten:

- A-bewerteter Mittelungspegel $L_{A,eq}$ in jeweiligen Betrachtungszeiträumen, tagsüber (6-22 Uhr) oder nachts (22-6 Uhr)
- Zuschlag für Impulshaltigkeit mit Hilfe des Takt-Maximal-Verfahrens, $L_{AFT,eq} - L_{A,eq}$
Hinweis: Effektiv ist der Beurteilungspegel lediglich der Mittelungspegel aller Pegelklassen nach dem Takt-Maximal-Verfahren, $L_r = L_{A,eq} + (L_{AFT,eq} - L_{A,eq}) = L_{AFT,eq}$!
- Tonzuschlag bis 5 dB(A) (Gutachterentscheid)
- Messunsicherheit -3 dB(A)

Messorte: 0.5 m vor geöffnetem Fenster mit stärkster Belastung oder 3 m vor Werksgrenze in 1.2 m Höhe oder im Raum (z.B. Hausmeisterwohnung) in 1.2 m Höhe und 1.2 m Entfernung von den Wänden bei geschlossenen Fenstern und Türen

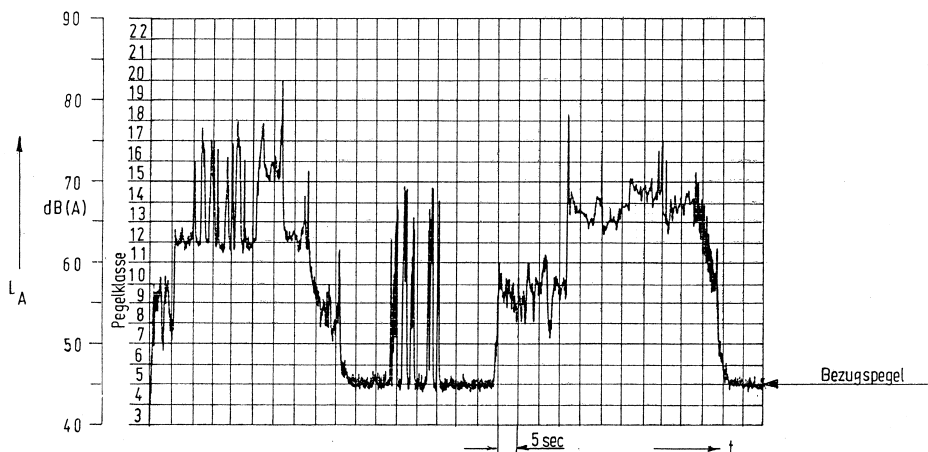


Abbildung 4.1: Schallaufnahme aus einer Schreinerei zur Auswertung nach dem Takt-Maximal-Verfahren, Pegelklassen in 2.5 dB(A)-Schritten und 5sec Zeitfenster. Der Taktmaximal-Mittelungspegel $L_{AFT,eq}$ ist gleich dem Mittelungspegel der Pegelklassen über alle 5-s-Zeitfenster, in welche der Maximalpegel innerhalb des jeweiligen Zeitfensters fällt.

Tabelle 4.1: Immissionsrichtwerte nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG).

	Richtwerte in dB(A)	
	Tag	Nacht
a) Industriegebiete	70	70
b) Gewerbegebiete	50	65
c) Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete	45	60
d) Allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete	40	55
e) Reine Wohngebiete	35	50
f) Kurgebiete, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	35	45
in Gebäuden	25	35

- Für die Gebiete d) bis f) ist bei der Ermittlung des Beurteilungspegels die erhöhte Störwirkung von Geräuschen durch einen Zuschlag von 6 dB(A) zu berücksichtigen:
 - an Werktagen 06.00 - 07.00 Uhr und 20.00 - 22.00 Uhr
 - an Sonn- und Feiertagen 06.00 - 09.00 Uhr, 13.00 - 15.00 Uhr und 20.00 - 22.00 Uhr
- Für die Gebiete a) bis f) dürfen kurzzeitige Geräuschspitzen am Tage die Immissionsrichtwerte um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten
- Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen in Gebäuden dürfen die Immissionsrichtwerte um nicht mehr als 10 dB(A) überschreiten

4.4 Straßenverkehrslärm

DIN ISO 362:2005 Akustik-Messverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch.

- Maximal beschleunigte Vorbeifahrt im 2. Gang über 20 m mit einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h nach 10 m
- Mikrofone in 1.2 m Höhe, in einem seitlichen Abstand von 7.5 m nach 10 m in Fahrtrichtung
- Zulässiger A-bewerteter Maximalpegel am linken oder rechten Mikrofon: PKW 74 dB(A), Motorrad 80 dB(A), LKW 80 dB(A)

DIN ISO 5130:2008-06 Messungen des Standgeräusches von Straßenfahrzeugen.

- Messung hinter dem Auspuff auf Beton, Freifläche oder in mindestens 3 m Abstand zur Bebauung
- Messung in 0.5 m Abstand unter einem 45°-Winkel ($\pm 5^\circ$)

Tabelle 4.2: Immissionsgrenzwerte für Straßen- und Schienenwege nach 16. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) - Lärmvorsorge.

	Immissionsgrenzwerte in dB(A)	
	Tag	Nacht
	6-22 Uhr	22-6 Uhr
Krankenhäuser, Schulen	57	47
Reine Wohngebiete	59	49
Kerngebiete, Dorf- und Mischgebiete	64	54
Gewerbegebiete	69	59

Tabelle 4.3: Immissionsgrenzwerte für Straßen nach 16. BImSchV - Lärmsanierung.

	Immissionsgrenzwerte in dB(A)	
	Tag	Nacht
	6-22 Uhr	22-6 Uhr
Krankenhäuser, Schulen, reine Wohngebiete	70	60
Kerngebiete, Dorf- und Mischgebiete	72	62
Gewerbegebiete	75	65

4.5 Schienenlärm

- Immissionsgrenzwerte $L_{A,eq}$ dieselben für Straße und Schiene, jedoch werden vom Beurteilungspegel für Schienenlärm 5 dB(A) abgezogen („Schienenbonus“)
- Bei gleicher subjektiver Belastung ist der Immissionswert der Straße 5 dB(A) höher verglichen mit dem Schienenimmissionswert, was überwiegend durch die spektrale Gewichtung der A-Bewertung erklärt werden kann.

4.6 Fluglärm

Tabelle 4.4: Fluglärm - Immissionsgrenzwerte.

	Immissionsgrenzwerte in dB(A)	
	tags	nachts
	6-22 Uhr	22-6 Uhr
Schutzzone 1	$L_{eq} = 60$	$L_{eq} = 50$
Schutzzone 2	$L_{eq} = 55$	$L_{max} = 6 \cdot 53$

Normenverzeichnis

- DIN 45631:1991-03** Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum;
Verfahren nach E. Zwicker
- DIN 45631/A1:2010-03** Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum
- Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche
- DIN 45635-1:1984-04** Geräuschmessung an Maschinen; Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren;
Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen
- ISO 226:2003** Acoustics - Normal equal-loudness-level contours
- ISO 389-7:2005** Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 7:
Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions
- DIN ISO 362-2:2010-05** Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte
Geräusch - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 - Teil 2: Fahrzeuge der Klasse L
- DIN ISO 5130:2008-06** Akustik - Messungen des Standgeräusches von Straßenfahrzeugen
- DIN EN 61672-1:2014-07** Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen
- DIN EN ISO 717-1** Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil
1: Luftschalldämmung
- DIN EN ISO 717-2** Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil
2: Trittschalldämmung
- DIN EN ISO 3382-2:2008-09** Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nach-
hallzeit in gewöhnlichen Räumen
- DIN EN ISO 11654:1997-07** Akustik - Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung
der Schallabsorption

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kreislauf Straßenlärm	3
1.2	Systemtheoretischer Ansatz der Lärminderung	4
1.3	Schalldämmung eines Kapsel-Gehörschutzes	4
1.4	Hörfläche und Schallgrößen	7
1.5	Nomogramm: Pegelerhöhung bei Pegeldifferenz	8
2.1	Verlauf Absorptionsgrad <u>einschaliger</u> Mikroperforationsabsorbers	12
2.2	Verlauf Absorptionsgrad <u>zweischaliger</u> Mikroperforationsabsorbers	12
2.3	Schallbeugung am Beispiel von Schallschutzwänden.	14
2.4	Frequenzabhängige Schallabsorption in Luft	14
2.5	Absorptionsgrad Mineralfaserplatte mit Holzabdeckung	16
2.6	Spiegelschallquellenmethode	18
2.7	Präzedenzeffekt	19
2.8	Absorption	20
2.9	Messung des Luftschalldämm-Maßes	20
2.10	Sollkurve des Luftschalldämm-Maßes	21
2.11	Mittleres Luftschalldämm-Maß einschaliger Wände	22
2.12	Luftschalldämmung von Mehrfachwänden	23
2.13	Sollkurve Norm-Trittschallpegel	23
3.1	A-Bewertungsfilter	24
3.2	Kurven gleicher Lautstärkpegel	24
3.3	Zeitkonstanten	25
3.4	Schallanalyse mit konstanter, absoluter Bandbreite	25
3.5	Drehklang	26
3.6	Aufnahmeverfahren Drehzahl	27
3.7	Darstellung Ordnungsanalyse	27
3.8	Hochlaufen eines Motors, Spektrogramm	28
3.9	Hochlaufen eines Motors, Ordnung über Zeit	28
3.10	Schallanalyse mit konstanter, relativer Bandbreite	29
3.11	Einfügungsdämm-Maß	30
3.12	Pegel- und Lautheits-Thermometer	33
4.1	Takt-Maximal-Verfahren	37

Tabellenverzeichnis

1.1	Repräsentative Umfrage UBA	3
1.2	Internetumfrage UBA	3
1.3	Werte zur Pegelrechnung	8
1.4	Näherungen Summation inkohärenter Schalle	8
2.1	Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien	15
2.2	Schallabsorptionsgrade üblicher Akustikplatten	15
2.3	Schallschutzklassen von Fenstern	21
2.4	Beispiele für Luftschalldämm-Maße von Wänden	22
3.1	Einfügungsdämm-Maß am Beispiel eines Schallschutzfensters	31
3.2	Schalldruckpegel und Lautheit 1 kHz Sinustons.	32
4.1	Immissionsrichtwerte nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	37
4.2	Immissionsgrenzwerte Straßen- und Schienenwege nach 16. BImSchV - Lärmvorsorge	38
4.3	Immissionsgrenzwerte Straßen nach 16. BImSchV - Lärmsanierung	38
4.4	Fluglärm - Immissionsgrenzwerte	39

Versionshinweise

v.0.7

Drehklang unter Kapitel 3.3 hinzugefügt.
Unterkapitel 3.8 bis 4.2 hinzugefügt.

v.0.8

Überarbeitung der Materialien von Kapitel 2.12 bis Kapitel 4.2.

v.0.9

Einfügen von Kapiteln bis 4.6 und Normenverzeichnis.

v.1.0

Überarbeitung aller Kapitel; Änderung von \log auf \lg , um den dekadischen Logarithmus eindeutig zu kennzeichnen.