

LUFTSCHALL

Auszug aus Vorlesungsnotaten bezüglich Grunddefinitionen und Rechenmethoden, Prof. Witt

1.) Physikalische Grundlagen

Luftschall besteht aus longitudinalen Kompressionswellen im hörbaren Bereich:

$$16 \leq f \leq 20000 \text{ (Hz)}$$

$$2 \cdot 10^{-5} \leq \Delta p \leq 2 \cdot 10^2 \text{ (Pa)}$$

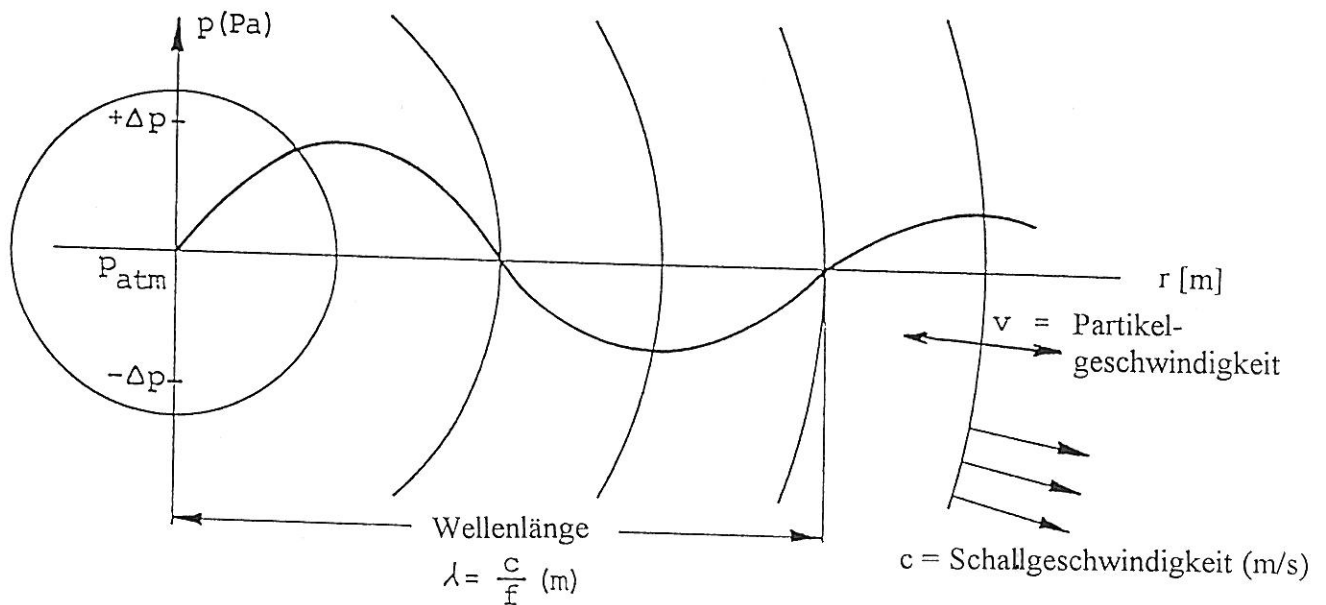


Fig. 1 Ausbreitung von Schallwellen im Freifeld

Die Luft setzt der Schallausbreitung einen Wellenwiderstand entgegen:

$$z = \rho \cdot c = \frac{\text{N}}{\text{m}^3 / \text{s}} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Volumenstrom}}$$

$\rho = \text{Luftdichte in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Die Leistung, die durch eine Kugelschale mit der Fläche A hindurchgeht, beträgt bei kugelförmiger Schallausbreitung:

$$w = \int \frac{p^2}{\rho \cdot c} \cdot dA = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \cdot 4\pi r^2 \quad [\text{Watt}] \quad (1)$$

Dieses ist der physikalische Zusammenhang zwischen Schall-Leistung und Schalldruck. Da der hörbare Bereich acht Zehnerpotenzen umspannt, wird zur Vereinfachung meistens mit logarithmischen Relativwerten gearbeitet.

2. Logarithmische Schallpegel

$$\text{Schalldruckpegel} \quad L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_o^2} = 20 \lg \frac{p}{p_o} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$p_o = 2 \cdot 10^{-5} [\text{Pa}]$ ist der Referenzdruck \cong Hörschwelle bei 1000 Hz

Beispiel:

$$p = 10 \mu\text{bar} = 1 \text{ Pa}$$

$$\begin{aligned} L_p &= 20 \lg \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \lg 50\,000 \\ &= 94 [\text{dB}] \end{aligned}$$

$$\text{Schalleistungspegel} \quad L_w = 10 \lg \frac{w}{w_o} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$w_o = 10^{-12} [\text{Watt}]$ ist die Referenzquelle

Diese physikalischen Pegel werden häufig durch die A-Bewertung modifiziert, welche eine Annäherung an die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres ist. Es wird ein Korrekturwert ΔL_A zuaddiert (VDI 2081, S.3).

$$L_{pA} = L_p + \Delta L_A \quad [\text{dB(A)}]$$

$$L_{wA} = L_w + \Delta L_A \quad [\text{dB(A)}]$$

Da Luft den Schall kaum dämpft, geht durch jede umschließende-Kugelfläche im Freifeld die gleiche Schalleistung.

Gleichung (1) lautet in logarithmischer Form:

$$\lg w = \lg \frac{p^2 \cdot A}{z} \quad (4)$$

Durch Verbindung mit den Pegeldefinitionen (2) und (3) erhält man:

$$L_w = 10 \lg \frac{w}{w_o} = 10 \lg \frac{p^2 \cdot A \cdot z_o}{p_o^2 \cdot A_o \cdot z} = 10 \lg \frac{p^2}{p_o^2} + 10 \lg \frac{A}{A_o}$$

$$L_w = 20 \lg \frac{p}{p_o} + 10 \lg A / 1$$

wobei A_o gleich 1 m^2 gesetzt wurde.

Durch Umstellung ergibt sich hieraus die grundlegende dimensionslose Freifeld-Formel

$$\boxed{L_p = L_w + 10 \lg \frac{1}{4\pi \cdot r^2}} \quad (5)$$

Beispiel: $L_w = 90 \text{ dB}$

Dann beträgt der Schalldruck im Abstand r:

$$r = 0,282 \text{ m} \quad k_p = 90 \text{ dB}$$

$$= 1 \text{ m} \quad = 79 \text{ dB}$$

$$= 2 \text{ m} \quad = 73 \text{ dB}$$

$$= 4 \text{ m} \quad = 67 \text{ dB}$$

$$= 8 \text{ m} \quad =$$

Differenz jeweils 6 dB

3.) Darstellung des Luftschalls

Die meisten Schallquellen sind nicht monofrequent. Der Schalldruck an einem gegebenen Ort kann auf verschiedene Weise dargestellt werden:

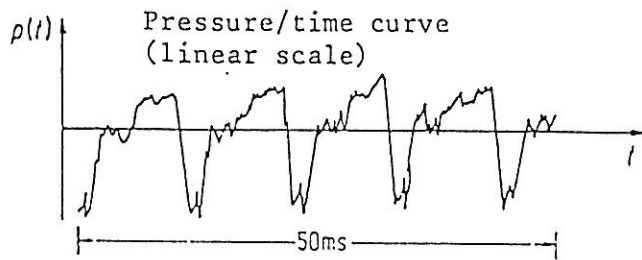


Fig. 2
Druck über Zeit Kurve,
lineare Skala

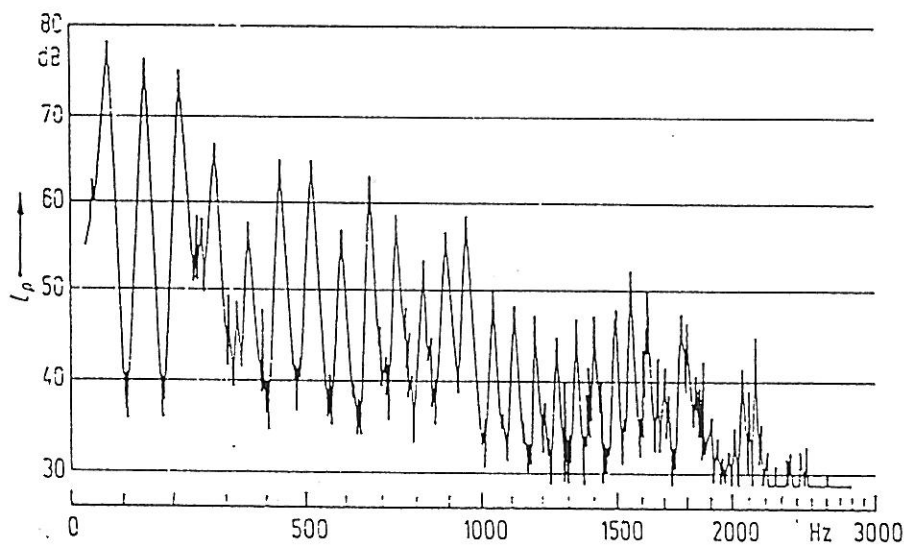


Fig. 3
Schmalbandanalyse
(Bandbreite 20 Hz)

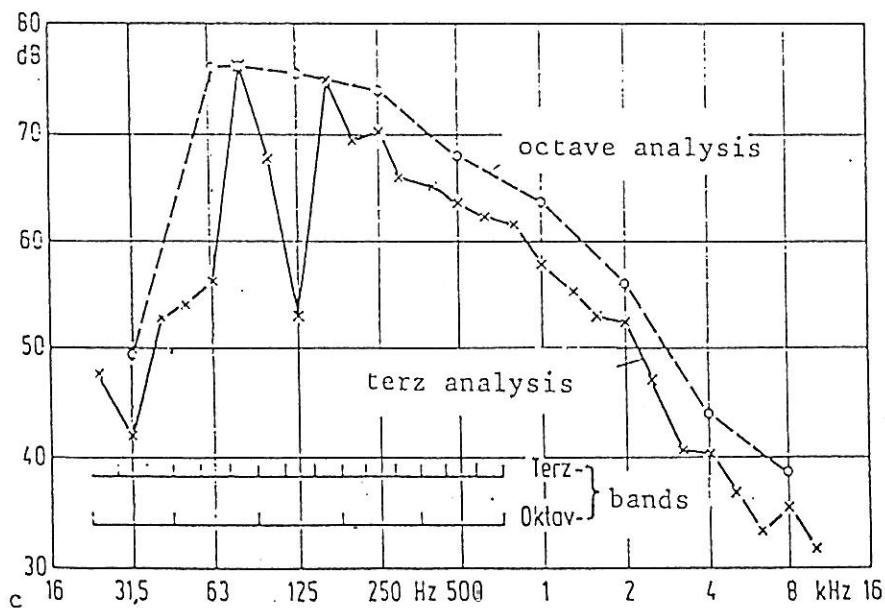


Fig. 4
Terz- und Oktavband-
Analyse

Die Druck- (oder Leistungs-) Kurve hat ein eindeutiges Frequenzspektrum. Aus dem Frequenzspektrum kann die Druck-Zeit-Kurve nicht rekonstruiert werden, da die Phasenwinkel fehlen.

4.) Richtwirkung

In der Praxis haben die meisten Schallquellen keine kugelförmige Schallabstrahlung. Das Bild zeigt das Schallfeld eines Lautsprechers mit Unterschieden von bis zu 30 dB in den verschiedenen Richtungen.

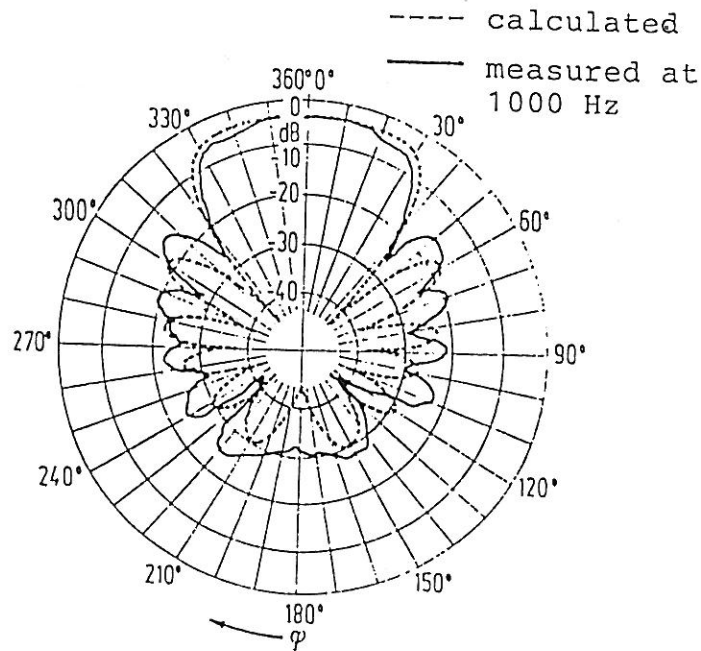


Fig. 5 Schallausbreitung eines Lautsprechers

Man muß und kann einigermaßen korrekte Korrekturfaktoren Q zu Gleichung (5) bestimmen und erhält so Gleichung (6).

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (6)$$

$Q = 2$ bei einer Halbkugel (Schallquelle am Boden)

$Q = 4$ bei einer Viertelkugel

$Q = 8$ bei einer Achtelkugel

Für den Lautsprecher des obigen Bildes könnte man z. B. $Q = 10$ schätzen. Der Fehler bei einer vernünftigen Schätzung ist meistens gering und in der Praxis akzeptabel. Wenn man beim Lautsprecher z. B. $Q = 12$ anstatt $Q = 10$ einsetzen müßte, wäre der Fehler in 4 m Abstand nur ca. 0,8 dB.

5.) Schallquellen

Die Schall-Leistung der Schallquelle(n) muß eindeutig definiert werden, siehe Seite 5. Zu beachten ist dabei:

- Daß die wirkliche Schall-Leistung aufgegeben wird, nicht der niedrigere Schalldruckpegel.
- Daß ein Frequenzspektrum vorliegt, das keine Einzeltöne mit mehr als 5 dB-Spitzen enthält.
- Daß der E-Motor, Drallregler und anderes Zubehör berücksichtigt ist.
- Daß der Schallpegel im wirklichen Betriebspunkt vorliegt.
- Daß bei weiteren Berechnungen auch andere Schallquellen wie Gitter, Jalousien, Strömungsrauschen berücksichtigt wird, VDI 2081.

DIN ISO 9001 certified

CUSTOMER:
Mando Machinery
Corp. / Korea

730, DangDong, Kunpo-Shi, Kyungg

YOUR REF.: Mr. B. S. Yoon



SOUND POWER / - PRESSURE FOR AXIAL FAN
Calculated acc. to VDI 2081

ENQUIRY: from 09.01.1997

PROJECT:

Y/DESC.:

Date: 09.01.1997

Item: TENDER No.:

1 09019705

Units: Handled by: Krauel

52 (+49) 4101 700741

Fan type : S-N8L5/V1.75/630/GD/3

Fan speed	1760 1/min	Flow rate	18000 m3/h
Inlet density	1.2 kg/m3	Rel. flow rate V/Vopt	.98 -
Inlet pressure	101.3 kPa	Blade frequency	235 Hz
Inlet temperature	20 °C		

Basic sound dB 100
Correction V/Vopt dB 0

Octave-band	Hz	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
Blade freq. corr. dB		0	0	5	0	0	0	0	0
Strouhal-number		0,7	1,4	2,7	5,4	11	22	43	87
Rel. spectrum dB		-13	-8	-5	-6	-9	-12	-17	-22
Octave-power-lev. dB		88	92	100	95	92	88	83	78
A-weighting corr. dB		-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1
Octave-power-level in duct dB(A)		62	76	91	92	92	89	84	77

with reference to the definitions in DIN 45 635 Part 38 :

Sound power level radiated into duct 97 dB(A) re 10⁻¹² W

Free inlet/outlet sound power level 97 dB(A) re 10⁻¹² W

Free inlet/outlet sound pressure level, free field 1m/45° 89 dB(A) re 20 µPa

Free inlet/outlet sound pressure level, free field 3m/45° 80 dB(A) re 20 µPa

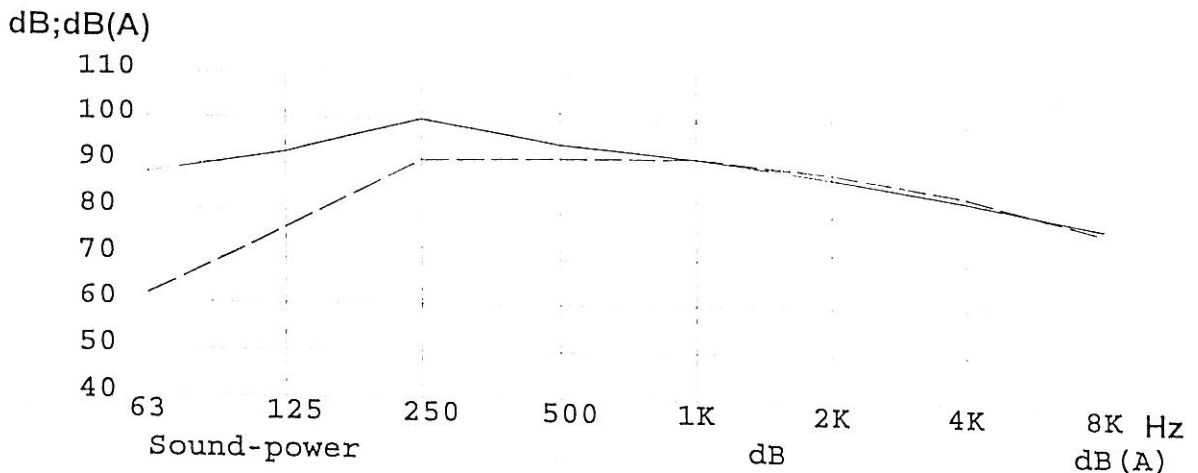
Casing break-out noise, sound power level 59 dB(A) re 10⁻¹² W

Casing break-out noise, sound pressure level, free field 1m 47 dB(A) re 20 µPa

Casing break-out noise, sound pressure level, free field 3m 40 dB(A) re 20 µPa

LP due to casing breakout noise, free field, 1m owing to el. motor: dB(A) re 20 µPa

Uncertainty of total levels at undisturbed inlet flow: Standard deviation 4. dB



6.) Reflexionen

Häufig muß der Schalldruck in (teilweise) geschlossenen Räumen garantiert werden, wobei Reflexionen an den Wänden eine sehr große Rolle spielen können.

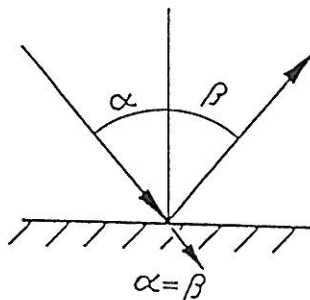


Fig. 6
Reflexion und Eindringen
von Schallwellen

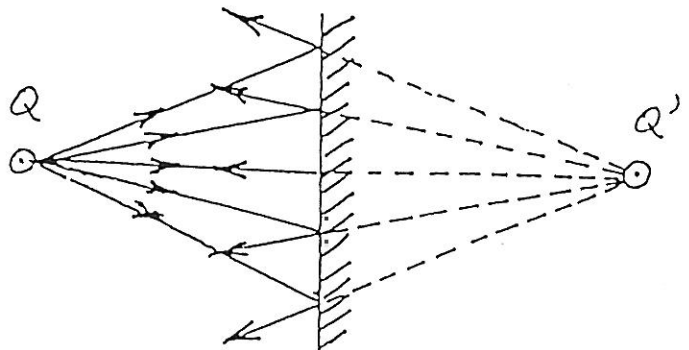


Fig. 7
Reflexionen und Spiegelschaltquelle
hinter einer schallharten Wand

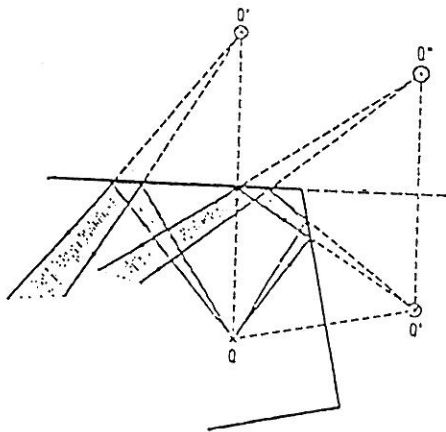


Fig. 8
Spielschallquellen
in einem Meßraum

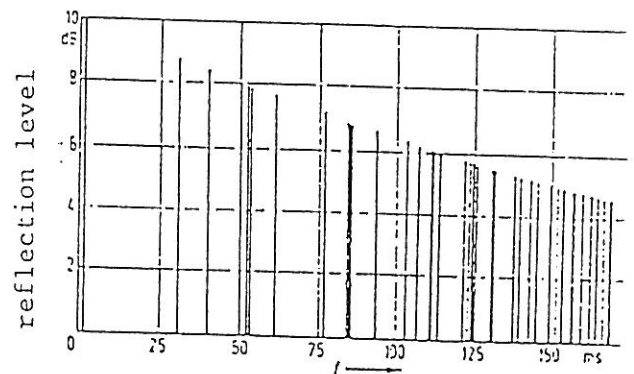


Fig. 9
Reihenreflexionen in einem Raum
mit den Abmessungen 40 x 25 x 8 m

Das ganze System der multiplen Reflexionen wird mit der genialen Sabine'schen Formel einfach und korrekt erfaßt; VDI 2081, S. 16:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{2\pi r^2} + \frac{4}{A_e} \right) \quad (7)$$

A_e ist dabei die äquivalente Absorptionsfläche in m^2 Sabine. Diese Fläche ist relativ einfach zu bestimmen.

Man kann den physikalischen Schalldruckpegel oder den A-bewerteten Pegel oder den Pegel in bestimmten Frequenzbändern bestimmen.

- 7.) Gemäß Fig. 6 und 7 wird ein Teil der einfallenden Schallenergie absorbiert, ein anderer Teil wird reflektiert. Man definiert einen Schallreflexionsgrad R :

$$R = \frac{I_{\text{Ref.}}}{I_{\text{Einf. all}}} \quad \text{wobei } I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \left[\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right] = \text{Schallintensität} \quad (8)$$

Entsprechend ist der ebenfalls dimensionslose Absorptionskoeffizient α definiert als:

$$\alpha = \frac{I_{\text{Abs}}}{I_{\text{Einf. all}}} = 1 - R \quad (9)$$

Der äquivalente Raumabsorptionswert A_e in Formel (7) ist dann definiert als:

$$A_e = \sum \alpha_i \cdot A_i \quad (10)$$

wobei α_i und A_i die Absorptionskonstanten und Flächengrößen der einzelnen Hüllflächen des betrachteten Raumes sind.

Einige Schallabsorptionswerte sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Weitere Werte sind zu beziehen vom Beuth Vertrieb, Schallabsorptionsgrad-Tabellen, herausgegeben vom Deutschen Normausschuß, Fachausschuß Materialprüfung, FNM.

Material	Frequenz – Frequency [Hz]						Material
	125	250	500	1000	2000	4000	
Glasierte Kacheln	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	glazed tiles
Beton, ungeputzt	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	raw concrete
Geputzte Ziegelwand	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	plastered brick
Ziegelwand mit Putz und Tapete	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	plastered brick with wall paper
5 mm Matte auf Beton	0,04	0,04	0,08	0,12	0,13	0,10	5 mm carpet on concrete
25 mm Steinwollmatten	0,09	0,23	0,53	0,72	0,75	0,77	25 mm carpet on concrete
50 mm Steinwollmatten	0,20	0,53	0,74	0,78	0,75	0,77	50 mm carpet on concrete
100 mm Steinwollmatten	0,68	0,64	0,82	0,78	0,75	0,77	100 mm carpet on concrete
Aufgeklebte Holzvertäfelung	0,10	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	wainscotting glued to wall
16 mm Holz auf 50 mm Leisten	0,19	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	16 mm wood on 50 mm ledges
6 mm Sperrholz auf 50 mm Leisten	0,25	0,25	0,19	0,09	0,10	0,11	6 mm plywood on 50 mm ledges
Akustikplatten 20 mm, auf Wand geklebt	0,05	0,15	0,55	0,90	1,00	1,00	20 mm glas fibre boards, glued to wall
Akustikplatten 20 mm, 20 mm Wandabstand	0,10	0,20	0,85	1,00	1,00	1,00	20 mm glas fibre boards, 20 mm distance to wall
Fensterglas	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	window glass
Übergardinen 50% Falten	0,06	0,26	0,45	0,71	0,60	0,48	heavy curtains, 50% folds
Lüftungsgitter mit 50% Durchlaß	0,30	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40	ventilation gratings with 50% free outlet

Anhang 1

SCHALLDÄMMUNG

Das Schalldämm-Maß eines Wandelementes beträgt:

$$R = 10 \lg \frac{w_1}{w_2} = 10 \lg \frac{S \cdot I_1}{A \cdot I_2} = 10 \lg \frac{p_1^2}{p_2^2} + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (\text{A 1})$$

w_1 eingestrahle Schalleistung [w]

w_2 abgestrahle Schalleistung [w]

S Fläche des Wandelementes [m²]

A äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum [m² Sabine]

I_1 w_1/S eingestrahle Schallintensität [w/m²]

I_2 w_2/A abgestrahle Schallintensität [w/m²]

(Im diffusen Schallfeld ist $I = p^2/4\rho c$, die Leistungsdichte, die durch ein beliebiges Flächenelement von einer Seite einfällt. In der fortschreitenden Welle ist $I = p^2/\rho c$, bezogen auf ein Flächenelement winkelrecht auf die Ausbreitungsrichtung.)

Aus Gl. A 1 folgt:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (\text{A 2})$$

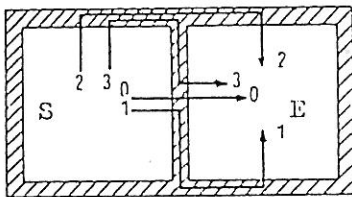


Abb. 1a Prüfstand nach DIN 52 210 mit bauüblichen Nebenwegen für ebenes Wandelement

VDI 2081

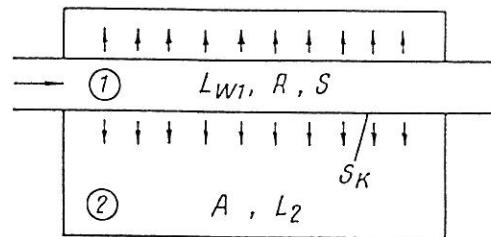


Abb. 1b Schallabstrahlung von einem Kanal in einen Raum

$$L_2 = L_{W1} - R - 10 \lg \frac{S \cdot A}{S_K} + 6 \quad \text{dB} \quad (\text{8.9})$$

- L_2 Schallpegel im Raum in dB (L_{p2})
 L_{W1} Schalleistungspegel im Kanal in dB ($L_{W1} + 6 = L_{p1}$)
 R Schalldämmmaß des Kanals in dB
 A Absorptionsfläche des Raumes in m²
 S Kanalquerschnittsfläche in m²
 S_K Übertragungsfläche in m²
 Es müsste heißen $\frac{SA}{S_K \cdot 1}$

Darstellung 1.41 Schallübertragung mit Nebenwegen.
 0 – direkter Schalldurchgang durch das Bauteil, 1 bis 3 – Nebenwege

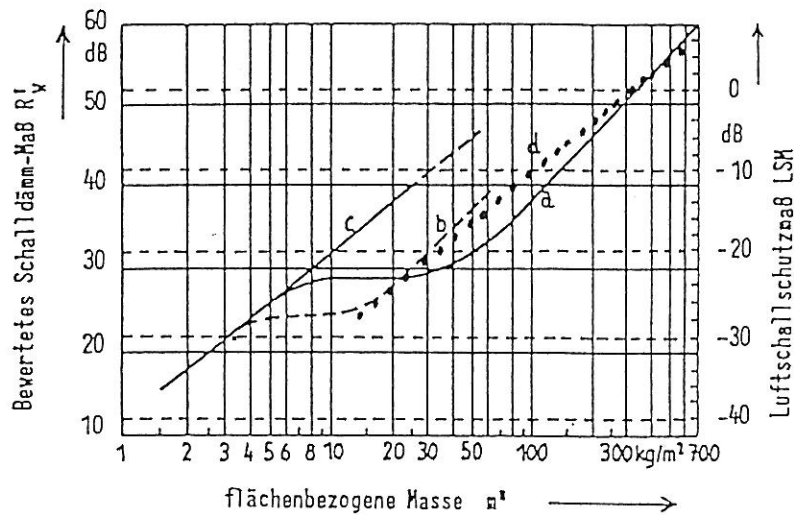
Bei einer einschaligen biegeweichen Wand ist nach dem Bergerschen Massengesetz

$$R = 20 \lg \frac{2,2 \cdot M \cdot f}{Z} \quad (\text{A } 3)$$

wo M Flächenmasse in kg/m^2
 f Frequenz in Hz
 Z Wellenimpedanz (= 408 Ns/m^3 in Luft)

Das Bergersche Gesetz gilt nur mit Einschränkung. Wird die Wand in ihrer Eigenfrequenz angeregt, bricht die Dämmung ein. Bei Stahlblech sind in der Praxis kaum höhere Dämmwerte als 35 dB zu erreichen, Abbildung AII.

Abb. AII



Darstellung 1.39 Schalldämm-Maß R'_w und Luftschallschutzmaß LSM in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse m'' einschaliger Bauteile (nach DIN 4109(E) Teil 2)

- Kurve a: Beton, Mauerwerk, Gips, Glas u. ä.
- Kurve b: Holz und Holzwerkstoffe
- Kurve c: Stahlblech bis 2 mm, Bleiblech
- Kurve d: Näherungsformel $R'_w = 20 \lg m''$ oder $R'_w = 20 \lg m'' + 2$ für Mauerwerk (m'' - Flächenmasse in kg/m^2)

Die Resonanzfrequenz kann man - unter Vernachlässigung von Einspannkraften - berechnen aus

$$f_{\text{Res}} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (\text{A } 4)$$

m Flächenmasse in $\text{kg/m}^2 = \rho \cdot s$, s ist die Plattendicke [m]
 B Biegesteifigkeit = $E s^3/12$ [N/m]
 E ist das Elastizitätsmodul
 c Schallgeschwindigkeit 343 m/s

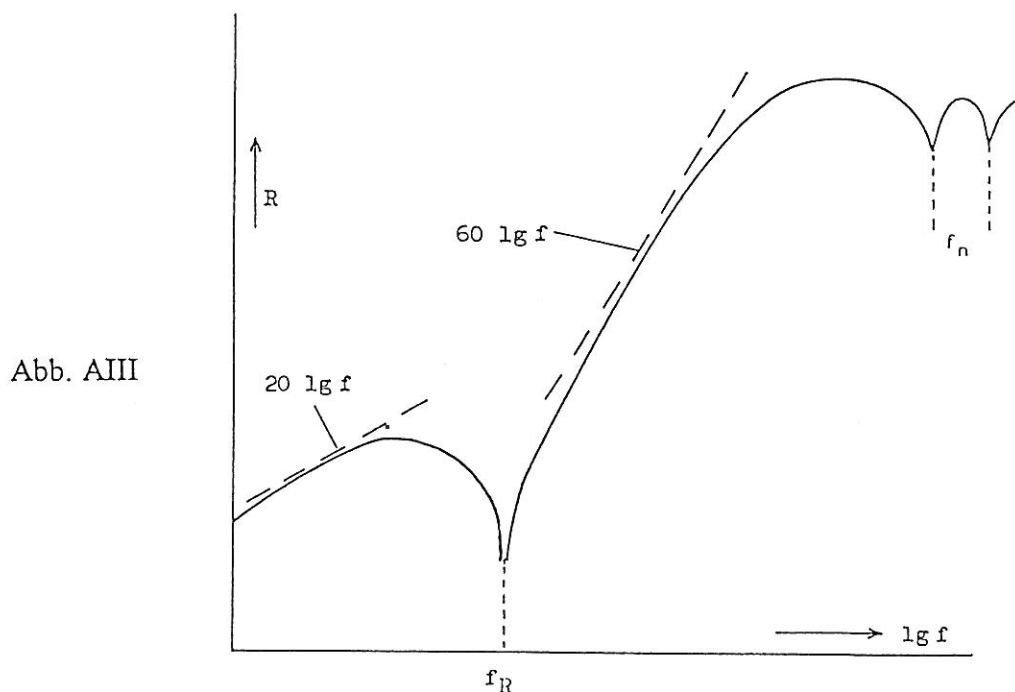
Dieses ergibt

$$f_{\text{Res}} = \frac{6,5 \cdot 10^4}{s} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (\text{A } 5)$$

Beispiel: $s = 10 \text{ mm}$, $E_{\text{Stahl}} = 210\,000 \text{ N/mm}^2 = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$
 $f_{\text{Res}} = 1253 \text{ Hz}$

Zweischalige Dämmelemente

Neben der Eigenresonanz der einzelnen Platten f_n gibt es einen tiefen Einbruch bei der Frequenz f_R . Hierbei schwingen die Wandelemente mit den Flächenmassen m_1 und m_2 mit dem dazwischenliegenden Luftpolster als Feder.



Darstellung 1.40 Prinzipieller Verlauf des Schalldämm-Maßes R eines zweischaligen Bauteiles.

Lehr- und Fachbücher der Akustik

Cremer, L., Hubert M., Vorlesungen über Technische Akustik, Springer, Berlin 1985

Heckl, M., Müller, H. A. (Hsgeb), Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer, Berlin 1975

Henn, H., Sinambari, Ch. R., Faller, M., Ingenieurakustik, Vieweg, Braunschweig 1984

Kraak, W., Weißing, H., Schallpegelmeßtechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1970

Kurtze, G., Schmidt, H., Westphal, W., Physik und Technik der Lärmbekämpfung, Braun, Karlsruhe 1975

Meyer, E., Neumann, E.-G., Physikalische und Technische Akustik, Vieweg, Braunschweig 1967

Meyer, E., Guicking, D., Schwingungslehre, Vieweg, Braunschweig

Reichardt, W., Grundlagen der technischen Akustik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1968

Schirmer, W., Lärmbekämpfung, Verlag Tribüne, Berlin 1974

Zwicker, E., Psychoakustik, Springer, Berlin 1982

Zwicker, E., Zollner M., Elektroakustik, Springer, Berlin 1984

Bohny, H., Borgmann R., Lärmschutz in der Praxis, R. Oldenbourg, 1986