

Bild 16. Raumwinkel Ω in Abhängigkeit von der Position der Leitungsmündung

Figure 16. Solid angle Ω depending on location of duct outlet

Lage der Kanalmündung:	
1 im Raum	$\Omega = 4 \cdot \pi$
2 in der Fläche	$\Omega = 2 \cdot \pi$
3 an Kante	$\Omega = 1 \cdot \pi$
4 in Ecke	$\Omega = 0,5 \cdot \pi$

Location of duct outlet:	
1 in the room	$\Omega = 4 \cdot \pi$
2 in a surface	$\Omega = 2 \cdot \pi$
3 at an edge	$\Omega = 1 \cdot \pi$
4 in a corner	$\Omega = 0,5 \cdot \pi$

$$\Delta L_w = 10 \cdot \lg \left[1 + \left(\frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f_m} \right)^2 \cdot \frac{\Omega}{S_{\text{Durchlass}}} \right] \tag{43}$$

Dabei ist

where

- ΔL_w Schalleistungsminderung in dB
- c Schallgeschwindigkeit in m/s
- f_m Oktavmittenfrequenz in Hz
- Ω Raumwinkel in sr; siehe Bild 16
- $S_{\text{Durchlass}}$ Austrittsfläche des Luftdurchlasses in m^2 (siehe auch Bild 19 in Abschnitt 12.1.2)

- ΔL_w sound power reduction, in dB
- c speed of sound, in m/s
- f_m octave band centre frequency, in Hz
- Ω solid angle, in sr; see Figure 16
- $S_{\text{Durchlass}}$ air outlet area, in m^2 (see also Figure 19 in Section 12.1.2)

12 Schallausbreitung

12 Sound propagation

12.1 Schallfelder in Räumen

12.1 Sound fields in rooms

Das durch eine Schallquelle in einem Raum hervorgerufene Schallfeld setzt sich aus dem Direktschall, dem Reflexionsschall an den Raumbegrenzungsflächen und gegebenenfalls Streuschall an den Einrichtungen im Raum zusammen. In der Praxis werden aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten der Räume die folgenden grundlegenden Fälle zu unterscheiden sein.

The sound field created by a sound source in a room consists of direct sound, sound reflected from the room boundary surfaces and, possibly, sound scattered by furnishings in the room. In practice, the following basic cases are to be distinguished according to different room conditions.

12.1.1 Schallausbreitung in idealen kubischen Räumen (Sonderfall Hallraum)

12.1.1 Sound propagation in ideal cubic rooms (special case reverberation room)

Wenn die von einer Quelle in einem Raum abgestrahlten Schallanteile so oft und so reflektiert werden, dass an allen Beobachtungsorten Schall aus allen Raumrichtungen mit annähernd gleicher Intensität einwirkt und dass der Schalldruckpegel räumlich konstant ist, so liegt ein diffuses Schallfeld vor. Der Schalldruckpegel in Räumen mit diffusem Schallfeld

If the sound components radiated from a source into a room are reflected so many times and in such a manner that all observation points receive sound from all directions and with about the same intensity and the sound pressure level is spatially constant, then the sound field is diffuse. The sound pressure level in rooms with diffuse sound field is composed of direct

setzt sich aus dem Direktschall und dem Reflexionschall im Diffusschallfeld zusammen.

Ein diffuses Schallfeld kann angenommen werden, wenn die Dimensionen (Höhe H , Länge L , Breite B) des Raums in der gleichen Größenordnung liegen und durch Streuungen eine hohe Diffusität zu erwarten ist oder wenn das Verhältnis von größter zu kleinster Raumabmessung nicht mehr als 3 beträgt und

- kein mittlerer Absorptionsgrad einer der sechs Begrenzungsflächen größer als 0,3 ist oder
- bei großen Unterschieden in der Absorption einzelner Raumbegrenzungsflächen (z.B. schallharter Boden – Akustikdecke) ausreichend streuende Einbauten (z.B. Einrichtungsgegenstände) vorhanden sind.

Für ergänzende Hinweise wird auf VDI 3760 verwiesen.

Für den Schalldruckpegel im diffusen Schallfeld eines Raums gilt:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{4 \cdot A_{\text{ref}}}{A} \right) \quad (44)$$

Dabei ist

L_p Schalldruckpegel in dB

L_w Schalleistungspegel, verursacht durch Zu- oder Abluftdurchlässe, in dB

A_{ref} Bezugsfläche $A_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$

A äquivalente Absorptionsfläche in m^2

12.1.2 Schallausbreitung in realen kubischen Räumen

Büroräume, Betriebsräume und Werkhallen sind in der Regel Räume, die die Bedingungen für ein diffuses Schallfeld nicht erfüllen.

Im Gegensatz zum Diffusfeld, in dem der Schalldruckpegel unabhängig von der Entfernung zur Schallquelle konstant bleibt, nimmt in einem Raum ohne diffuses Schallfeld der Schalldruckpegel mit zunehmendem Abstand zur Quelle ab. Dies geschieht sowohl durch räumliche Divergenz als auch durch den Einfluss eventueller Streukörper.

Die Schallabsorption wird bei der Reflexion an den Raumbegrenzungsflächen und bei der Streuung an den Einrichtungen berücksichtigt und führt zu einer höheren Schalldruckpegelabnahme im Raum. Aufgrund der Reflexion an Einrichtungen (z.B. Möbeln, Deckenträgern, geneigten Dächern) wird der Pegel in Quellennähe erhöht, wodurch der Schalldruckpegel bei größeren Entfernungen von der Quelle stärker abnimmt.

sound and reflected sound in the diffuse sound field.

A sound field can be assumed to be diffuse if the room dimensions (height H , length L , width B) are of the same order of magnitude and high diffusivity is to be expected due to scattering effects or if the ratio of largest to smallest room dimension is not greater than 3 and

- if none of the six boundary surfaces have an average sound absorption coefficient greater than 0,3 or
- if, in the case of large differences in absorption between single room boundary surfaces (e.g. reverberant floor – acoustic ceiling), sufficiently scattering fittings (e.g. items of furniture) are available.

For supplementary information refer to VDI 3760.

The sound pressure level in the diffuse sound field of a room is calculated as:

where

L_p sound pressure level, in dB

L_w sound power level due to supply or extract air terminal devices, in dB

A_{ref} reference area $A_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$

A equivalent sound absorption area, in m^2

12.1.2 Sound propagation in real cubic rooms

Offices, mechanical equipment rooms, and workshops do not normally satisfy the conditions for a diffuse sound field.

Unlike a room with diffuse field, where the sound pressure level remains constant regardless of the distance from the sound source, in a room without diffuse sound field, the sound pressure level decreases with increasing distance from the source. This is owing to spatial divergence and also to the effect of any scattering bodies.

Sound absorption is taken into account in the reflection from the room boundary surfaces and in the scattering by furnishings. It leads to a higher sound pressure level reduction in the room. Due to reflection from furnishings (e.g. furniture, ceiling beams, slanted roofs), the level is increased near the source so that the sound pressure level decreases more strongly at greater distances from the source.

Die Schallausbreitungskurve erfasst den Einfluss der Absorption und gegebenenfalls auch der Streuung auf die Schallausbreitung im Raum. Die Berechnung der Schallpegelabnahme für Räume ohne diffuses Schallfeld erfordert die Sachkenntnis eines Raumakustikers und erfolgt z.B. nach VDI 3760.

Die durch einen Luftdurchlass in einen Raum gelangende Schallleistung erzeugt in diesem lokal einen bestimmten Schalldruckpegel nach Gleichung (45), der abhängig ist von der Raumabsorption, dem Abstand vom Luftdurchlass und seinem Richtungsfaktor. Dieser Zusammenhang ist durch folgende Beziehung gegeben, die in Bild 17 dargestellt ist:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q \cdot r_{ref}^2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4 \cdot A_{ref}}{A} \right) \tag{45}$$

Dabei ist

- L_p Schalldruckpegel in dB
- L_w Schalleistungspegel, verursacht durch Zu- oder Abluftdurchlässe, in dB
- Q Richtungsfaktor
- r_{ref} Bezugsabstand $r_{ref} = 1$ m
- r Abstand zwischen Auslassöffnung und Raumpunkt in m
- A_{ref} Bezugsfläche $A_{ref} = 1$ m²
- A äquivalente Absorptionsfläche in m²

Aus der Mündung des Luftdurchlasses tritt der Schall meist nicht als Kugelwelle in den Raum, sondern strahlt bevorzugt in eine Richtung senkrecht zum Öffnungsquerschnitt. Der Richtungsfaktor Q gibt das Verhältnis der tatsächlichen Schallintensität einer solchen gerichteten Schallquelle in einer bestimmten Abstrahlrichtung zur Schallintensität des Kugelstrahlers gleicher Leistung in der gleichen Abstrahlrichtung an (somit $Q \geq 1$).

Je kleiner eine Durchlassöffnung im Verhältnis zur Wellenlänge der Schallwelle ist, desto ungerichteter strahlt sie. Umgekehrt steigt mit zunehmender Schallausbreitungsfläche $S_{Durchlass}$ und abnehmender Wellenlänge λ der Richtungsfaktor Q an. Ferner ist der Richtungsfaktor noch abhängig von der Lage des Durchlasses im Raum. Diese Zusammenhänge sind in Bild 18 dargestellt.

The sound propagation curve includes the effect of absorption and also of any scattering on indoor sound propagation. Calculation of the sound level reduction for rooms without diffuse sound field requires the expertise of a room acoustics expert and is performed according to, e.g., VDI 3760.

The sound power reaching a room through an air terminal device creates a certain local sound pressure level in the room as per Equation (45), which is dependent on the room absorption, the distance from the air terminal device, and its directivity factor. This relation is described by the following equation, which is illustrated in Figure 17:

where

- L_p sound pressure level, in dB
- L_w sound power level due to supply or extract air terminal devices, in dB
- Q directivity factor
- r_{ref} reference distance $r_{ref} = 1$ m
- r distance between outlet opening and point in room, in m
- A_{ref} reference area $A_{ref} = 1$ m²
- A equivalent sound absorption area, in m²

Sound from the outlet of the air terminal device seldom enters the room as spherical wave but is radiated preferably in one direction normal to the opening cross-section. The directivity factor Q describes the ratio of the actual sound intensity of such a directional sound source in one specific direction of sound radiation to the sound intensity of a monopole of equal sound power in the same direction of sound radiation (hence $Q \geq 1$).

The smaller an outlet opening compared to the sound wavelength, the lower its directivity. Vice versa, the directivity factor Q increases with increasing sound propagation area $S_{Durchlass}$ and decreasing wavelength λ . Furthermore, the directivity factor also depends on the location of the air terminal device in the room. These relations are illustrated in Figure 18.

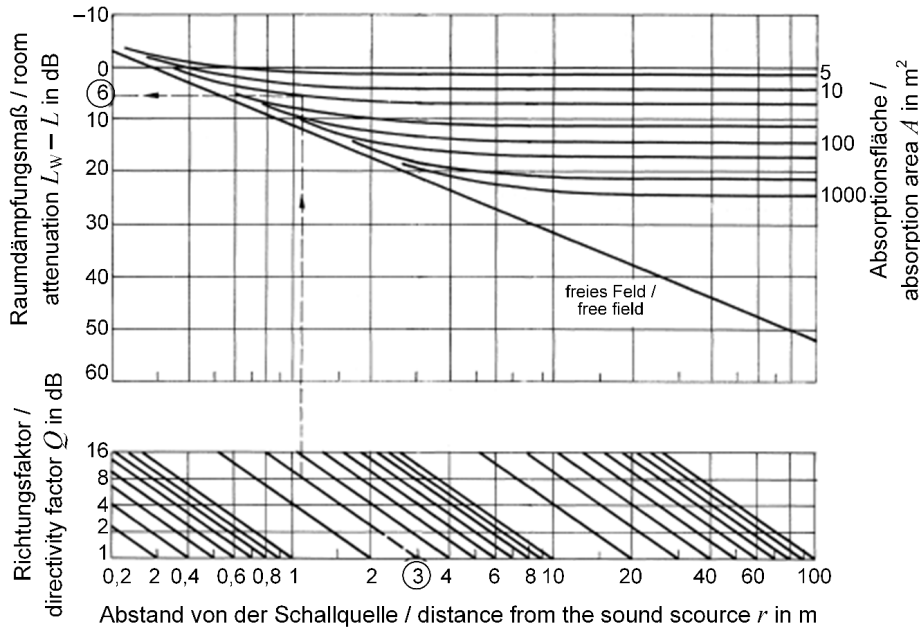


Bild 17. Raumdämpfung in Abhängigkeit von der äquivalenten Absorptionsfläche, vom Abstand von der Schallquelle und von der Richtungscharakteristik der Schallquelle

Figure 17. Room attenuation as a function of equivalent absorption area, distance from sound source, and directional pattern of sound source

Beispiel: $A = 20 \text{ m}^2$, $r = 3 \text{ m}$, $Q = 8$, $L_w - L = 6 \text{ dB}$

Example: $A = 20 \text{ m}^2$, $r = 3 \text{ m}$, $Q = 8$, $L_w - L = 6 \text{ dB}$

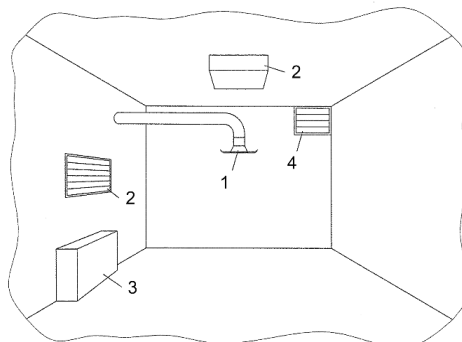
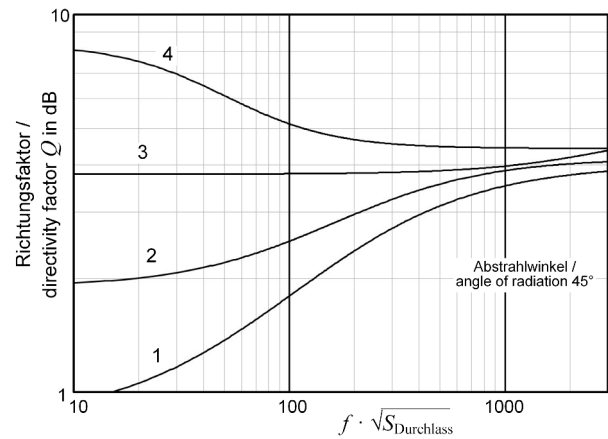
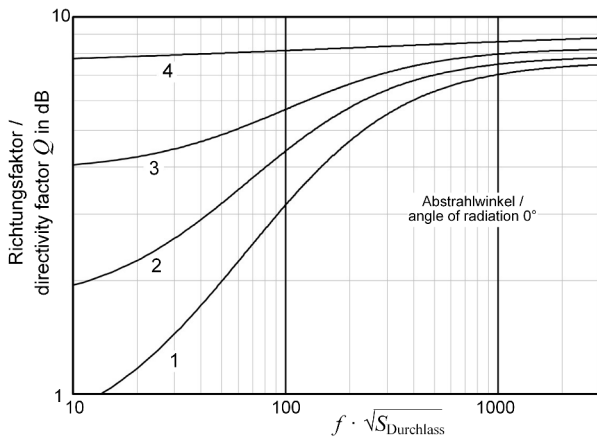


Bild 18. Richtungscharakteristik Q als Funktion des Produkts aus Frequenz in Hz und Quadratwurzel der Schallaustrittsfläche $S_{\text{Durchlass}}$ in m^2

Figure 18. Directivity factor Q as a function of the product of frequency, in Hz, and the square root of the sound outlet area $S_{\text{Durchlass}}$, in m^2

- Die Schallquellenöffnung befindet sich
- 1 in Raummitte
 - 2 in Wandmitte
 - 3 in der Mitte einer Raumkante
 - 4 in einer Raumecke

- The sound source opening is located
- 1 in the centre of the room
 - 2 in the centre of a wall
 - 3 in the centre of an edge
 - 4 in a corner

$$Q = B_2 + \frac{B_1 - B_2}{1 + \left[\frac{f_m \cdot \sqrt{S_{\text{Durchlass}}}}{x_0} \right]^p} \tag{46}$$

Dabei ist

Q Richtungsfaktor
 f_m Oktavmittenfrequenz in Hz
 $S_{\text{Durchlass}}$ geometrische Fläche, die die Durchlassöffnungen gerade umschließt (inklusive der geschlossenen Verbindungssegmente, siehe Bild 19) in m^2

where

Q directivity factor
 f_m octave band centre frequency, in Hz
 $S_{\text{Durchlass}}$ geometrical area precisely enclosing the outlet openings (including the closed connecting segments, see Figure 19), in m^2

B_1, B_2, x_0, p Koeffizienten gemäß Tabelle 15

B_1, B_2, x_0, p coefficients as per Table 15

Aus Gleichung (45) ist zu erkennen, dass mit entsprechend großem Abstand r von der Schallquelle das Glied $4/A \gg Q/4 \cdot \pi \cdot r^2$ wird, der Schallpegel also mit zunehmender Entfernung nicht weiter abfällt (siehe auch Bild 17). Für diesen Bereich (dem Nachhallfeld) vereinfacht sich Gleichung (45) zu:

For suitably large values of distance r from the sound source, Equation (45) shows $4/A \gg Q/4 \cdot \pi \cdot r^2$, i.e., the sound level no longer decreases as the distance increases (see also Figure 17). For this area (the reverberant field), Equation (45) can be simplified as follows:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \lg \frac{4 \cdot A_{\text{ref}}}{A} \tag{47}$$

$$L_w - L_p = -10 \cdot \lg \frac{4 \cdot A_{\text{ref}}}{A} \tag{48}$$

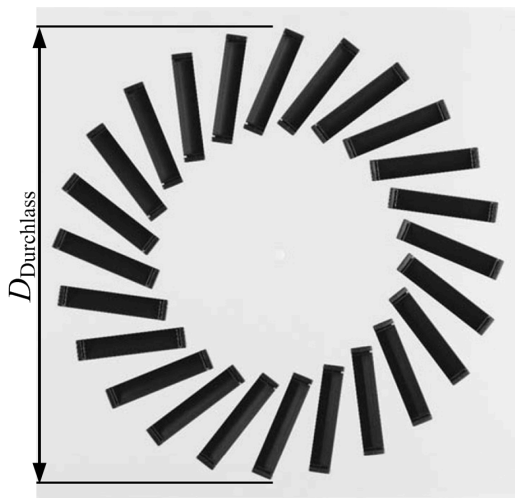


Bild 19. Beispiel für die Ermittlung von $S_{\text{Durchlass}}$
 ($S_{\text{Durchlass}} = \pi \cdot D_{\text{Durchlass}}^2 / 4$)

Figure 19. Example of determination of $S_{\text{Durchlass}}$
 ($S_{\text{Durchlass}} = \pi \cdot D_{\text{Durchlass}}^2 / 4$)

Tabelle 15. Koeffizienten für die Berechnung des Richtungsfaktors Q /
 Table 15. Coefficients for calculating the directivity factor Q

Koeffizienten Gleichung (46) / Coefficients Equation (46)	Lage Schallquellenöffnung Abstrahlwinkel / Location of sound source opening angle of radiation							
	1 0°	2 0°	3 0°	4 0°	1 45°	2 45°	3 45°	4 45°
B_1	0,73	1,70	3,90	7,28	0,84	1,90	3,78	8,35
B_2	7,62	7,88	8,28	9,42	4,01	4,16	5,23	4,42
x_0	158,51	121,19	133,97	298,46	213,89	221,72	3957,71	42,28
p	1,29	1,28	1,27	0,37	1,10	1,25	1,38	1,75

Dabei ist

L_p Schalldruckpegel in dB
 L_W Schallleistungspegel in dB
 A_{ref} Bezugsfläche $A_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$
 A äquivalente Absorptionsfläche in m^2
 Hierbei wird $L_W - L_p$ auch als Raumdämpfung bezeichnet.

Der Nachhallbereich beginnt bei halbkugelförmiger Schallausbreitung in einer Entfernung, die größer ist als der Hallradius $r_H = 0,2\sqrt{A} \approx 0,08\sqrt{V/T}$ in m.

Die äquivalente Absorptionsfläche A des Raums lässt sich mit der Nachhallzeit T nach Gleichung (49) bestimmen.

$$A = \frac{24 \cdot \ln(10)}{c} \cdot \frac{V}{T} = 0,163 \cdot \frac{V}{T} \quad (49)$$

Dabei ist

A äquivalente Absorptionsfläche in m^2
 c Schallgeschwindigkeit in Luft, $c = 340 \text{ m/s}$
 V Raumvolumen in m^3
 T Nachhallzeit in s

Gleichung (47) lässt sich damit schreiben als Gleichung (50) zu:

$$L_p = L_W - 10 \cdot \lg\left(\frac{V}{V_{\text{ref}}}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right) + 14 \quad (50)$$

Dabei ist

A äquivalente Absorptionsfläche in m^2
 L_p Schalldruckpegel in dB
 L_W Schallleistungspegel in dB
 V Raumvolumen in m^3
 V_{ref} Bezugsvolumen $V_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^3$
 T Nachhallzeit in s
 T_{ref} Bezugszeit $T_{\text{ref}} = 1 \text{ s}$

Liegen keine definierten Angaben über die äquivalente Absorptionsfläche eines Raums vor, können diese mit meist hinreichender Genauigkeit mit den Richtwerten der mittleren Nachhallzeit, entsprechend Tabelle 5, abgeschätzt werden¹⁾.

Die Absorptionsfläche A kann auch mithilfe der Schallschluckgrade der einzelnen Wandflächen, Einrichtungsgegenstände und Personen nach Gleichung (51) errechnet werden:

where

L_p sound pressure level, in dB
 L_W sound power level, in dB
 A_{ref} reference area $A_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$
 A equivalent sound absorption area, in m^2
 $L_W - L_p$ is also termed room attenuation.

For hemispherical sound propagation, the reverberant area begins at a distance which is greater than the reverberation radius $r_H = 0,2\sqrt{A} \approx 0,08\sqrt{V/T}$, in m.

The equivalent sound absorption area A of the room can be determined by entering the reverberation time T in Equation (49):

where

A equivalent sound absorption area, in m^2
 c speed of sound in air, $c = 340 \text{ m/s}$
 V volume of room, in m^3
 T reverberation time, in s

Equation (47) can thus be rewritten to give Equation (50):

where

A equivalent sound absorption area, in m^2
 L_p sound pressure level, in dB
 L_W sound power level, in dB
 V volume of room, in m^3
 V_{ref} reference volume $V_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^3$
 T reverberation time, in s
 T_{ref} reference time $T_{\text{ref}} = 1 \text{ s}$

If no specific data of the equivalent sound absorption area of a room is available, it can be estimated with mostly sufficient accuracy using the guide values for the average reverberation time according to Table 5¹⁾.

The absorption area A can also be calculated by entering the sound absorption coefficients of each wall surface, furnishing item and person in Equation (51):

¹⁾ Mit einer Normschallquelle, deren Schallleistung L_{WN} bekannt ist, kann die Raumdämpfung $L_W - L$ auch direkt durch die Messung des von der Normschallquelle im Raum erzeugten Schalldruckpegels L_N bestimmt werden, entsprechend $L_W - L = L_{WN} - L_N$. / Using a standard sound source of known sound power L_{WN} , the room attenuation $L_W - L$ can also be determined by direct measurement of the sound pressure level L_N generated by the standard sound source in the room; hence $L_W - L = L_{WN} - L_N$.

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m A_j \tag{51}$$

Dabei ist

- A äquivalente Absorptionsfläche des Raums in m^2
- α_i Absorptionsgrad der i -ten Fläche
- S_i i -te Fläche in m^2
- A_j äquivalente Absorptionsfläche des j -ten Einrichtungsgegenstands oder der j -ten Person in m^2

where

- A equivalent sound absorption area of room, in m^2
- α_i sound absorption coefficient of i -th area
- S_i i -th area, in m^2
- A_j equivalent sound absorption area of j -th furnishing item or j -th person, in m^2

Die Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit von der Frequenz können entsprechenden Katalogen entnommen werden. In der Regel sind in Räumen mehrere Luftdurchlässe und damit mehrere Schallquellen installiert. Um für den maßgeblichen Immissionsort den sich daraus ergebenden Gesamtschalldruckpegel angeben zu können, ist eine ausführliche Berechnung erforderlich. Zunächst muss für jeden Luftdurchlass der sich ergebene Einzelschalldruckpegel entsprechend Gleichung (45) ermittelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass alle Luftdurchlässe einen anderen Abstand zum maßgeblichen Immissionsort haben. Anschließend wird mithilfe der Pegeladdition der Gesamtschalldruckpegel berechnet. Meistens sind die im Lüftungsgerät und im Luftleitungsnetz entstehenden Geräusche soweit gedämpft, dass das in den Raum abgestrahlte Geräusch durch die Geräuscentstehung im Luftdurchlass dominiert wird. In diesem Fall wird, wenn man getrennt für Zu- und Abluftdurchlässe vorgeht, von allen Luftdurchlässen nahezu dieselbe Schalleistung in den Raum abgestrahlt. Dann kann der durch alle Zu- und alle Abluftdurchlässe erzeugte Gesamtschalldruckpegel näherungsweise gemäß Gleichung (52) berechnet werden:

The sound absorption coefficients as a function of frequency can be obtained from pertinent catalogues. As a rule, several air terminal devices and thus several sound sources are installed in rooms. A detailed calculation is required for declaring the resultant overall sound pressure level for the relevant point of exposure. First, the resultant sound pressure level shall be determined separately for each air terminal device according to Equation (45). These calculations shall take into account that each air terminal device is located at a different distance from the relevant point of exposure. The overall sound pressure level is then calculated by means of level summation.

In most cases, the noise generated in the ventilation device and in the air duct system is attenuated to such an extent that the noise radiated into the room is dominated by the noise generated in the air terminal device. In that case, when making separate calculations for supply and extract air terminal devices, almost the same sound power is radiated into the room from all air terminal devices. The overall sound pressure level generated by all supply and extract air terminal devices can then be approximated using Equation (52):

$$L_{p,ges} = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q \cdot r_{ref}^2}{4 \cdot \pi \cdot r_{min}^2} + \frac{4 \cdot n \cdot A_{ref}}{A} \right) \tag{52}$$

Dabei ist

- $L_{p,ges}$ Gesamtschalldruckpegel in dB
- L_W Schalleistungspegel, verursacht durch einen Zu- oder Abluftdurchlass, in dB
- Q Richtungsfaktor
- r_{ref} Referenzabstand $r_{ref} = 1$ m
- r_{min} kleinster Abstand einer der Durchlassöffnungen zum maßgeblichen Immissionsort in m
- n Anzahl der Zu- und Abluftdurchlässe im Raum
- A_{ref} Referenzfläche $A_{ref} = 1$ m^2
- A äquivalente Absorptionsfläche in m^2

where

- $L_{p,ges}$ overall sound pressure level, in dB
- L_W sound power level due to a supply or extract air terminal device, in dB
- Q directivity factor
- r_{ref} reference distance $r_{ref} = 1$ m
- r_{min} shortest distance of one of the outlet openings from the relevant point of exposure, in m
- n number of supply and extract air terminal devices in room
- A_{ref} reference area $A_{ref} = 1$ m^2
- A equivalent sound absorption area, in m^2

Bei der Schallausbreitung in Aufenthaltsräumen ist der maßgebliche Immissionsort durch die Lage des menschlichen Ohrs gegeben. Geht man von einer stehenden Person aus, bedeutet dieses, dass er sich innerhalb des Aufenthaltsbereichs in einer Höhe von 1,8 m über dem Fußboden befindet. Demnach ergibt sich bei Deckenluftdurchlässen der kleinste Abstand r_{\min} aus der lichten Raumhöhe abzüglich 1,8 m.

In einer Untersuchung [1] wurde ermittelt, dass in Räumen mit Deckenluftdurchlässen die Abweichung zwischen der ausführlichen Methode und der näherungsweise erfolgten Berechnung gemäß Gleichung (52), bezogen auf einzelne Oktavschalldruckpegel sowie den Gesamtschalldruckpegel, bis zu 3 dB betragen kann.

12.2 Schallausbreitung im Freien

Ist die Schallquelle punktförmig²⁾, bildet sich um sie ein kugelförmiges Schallfeld aus, sodass für die Schallausbreitung entsprechend Gleichung (53) gilt:

$$L_p = L_W - 10 \cdot \lg \frac{S}{S_{\text{ref}}} = L_W - 10 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{r_{\text{ref}}^2} = L_W - 20 \cdot \lg \frac{r}{r_{\text{ref}}} - 11 \quad (53)$$

Dabei ist

L_p Schalldruckpegel in dB

L_W Schalleistungspegel in dB

S Hüllfläche senkrecht zur Schallausbreitung in m^2

S_{ref} Bezugsfläche $S_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$

r Abstand zur Schallquelle in m

r_{ref} Bezugsabstand $r_{\text{ref}} = 1 \text{ m}$

Demnach verringert sich im akustisch freien Feld (Freifeld) der Schalldruck bei Verdopplung der Entfernung um 6 dB ($20 \cdot \lg(2) = 6$). Dieser Zusammenhang wird auch als Freifeldgesetz bezeichnet.

Bei dieser vereinfachten Betrachtungsweise bleibt unberücksichtigt, dass technische Schallquellen ihre Energie nicht gleichmäßig über die Oberfläche abstrahlen. Sie haben häufig eine Richtwirkung. Weiterhin bleibt unberücksichtigt, dass der Schall nur in einen Teil des Raums abgestrahlt wird.

Allgemein kann die Schallausbreitung im Freien nach Gleichung (54) berechnet werden:

$$L_p = L_W + K_C - D_{\text{div}} \quad (54)$$

mit / with

$$K_C = DI + K_0$$

In the case of sound propagation in occupied areas, the position of the human ear defines the relevant point of exposure. Assuming a standing person, this means that the relevant point of exposure in the occupied area lies at a height of 1,8 m above the floor. Accordingly, the shortest distance r_{\min} from ceiling-mounted air terminal devices is obtained by subtracting 1,8 m from the clear ceiling height.

A study [1] established that in rooms with ceiling-mounted air terminal devices, the deviation between the detailed calculation method and the approximate calculation as per Equation (52) can be up to 3 dB for single octave band sound pressure levels and the overall sound pressure level.

12.2 Outdoor sound propagation

For a point-like sound source²⁾, the sound field forming around it is spherical; sound propagation is therefore calculated according to Equation (53):

where

L_p sound pressure level, in dB

L_W sound power level, in dB

S enveloping surface area normal to sound propagation, in m^2

S_{ref} reference area $S_{\text{ref}} = 1 \text{ m}^2$

r distance from sound source, in m

r_{ref} reference distance $r_{\text{ref}} = 1 \text{ m}$

Hence, in a free sound field, the sound pressure decreases by 6 dB ($20 \cdot \lg(2) = 6$) per distance doubling. This relation is also termed free-field law.

This simplified approach ignores the fact that energy radiation from the surface of technical sound sources is not uniform but often shows a directional pattern. Furthermore, it does not take into account that the sound is only radiated into part of the room.

Generally, outdoor sound propagation can be calculated using Equation (54):

²⁾ Wird Schall über eine größere Fläche abgestrahlt, so kann diese Schallquelle näherungsweise als punktförmige Schallquelle behandelt werden, wenn der Abstand zu dieser Schallquelle größer als die Hauptabmessungen der schallabstrahlenden Fläche ist. / If sound is radiated over a larger surface, the sound source can be treated approximately as a point source if the distance from this sound source is greater than the main dimensions of the sound-radiating surface.

$$D_{\text{div}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_{\text{ref}}}\right) + 11$$

Dabei ist

- L_p Schalldruckpegel in dB
- L_W Schallleistungspegel in dB
- K_C Richtwirkungskorrektur in dB
- D_{div} Ausbreitungsdämpfung in dB
- DI Richtwirkungsmaß in dB
- K_0 Raumwinkelmaß in dB
- r Abstand zur Schallquelle in m
- r_{ref} Bezugsabstand $r_0 = 1$ m

K_C ist dabei die Richtwirkungskorrektur in dB, die sich aus dem Richtwirkungsmaß DI und dem Raumwinkelmaß K_0 zusammensetzt. Das Richtwirkungsmaß DI gibt an, um wie viel dB der von einer Schallquelle erzeugte Schalldruckpegel in der betrachteten Richtung von dem Schalldruckpegel einer ungerichteten punktförmigen Schallquelle gleicher Schallleistung abweicht. Es ist frequenzabhängig und muss in der Regel experimentell ermittelt werden. Das Richtwirkungsmaß kann auch auf die Eigenabschirmung von Gebäuden angewendet werden. In Bild 20 sind Näherungswerte für die Richtwirkungsmaße von schallabstrahlenden Gebäudeflächen angegeben. Sie gelten nur für mittlere Frequenzen. Es ist auch zu beachten, dass eine volle Richtwirkung nur gegeben ist, wenn die kleinste Begrenzungslänge der schallabstrahlenden Fläche größer als die Wellenlänge des Schalls ist.

Mit dem Raumwinkelmaß K_0 wird berücksichtigt, dass die Schallausbreitung nicht immer in den ganzen Raum, also mit einem Raumwinkel $\Omega = 4 \cdot \pi$ erfolgt. Es gilt nach Gleichung (55):

$$K_0 = 10 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi}{\Omega}\right) \tag{55}$$

Dabei ist

- K_0 Raumwinkelmaß in dB
- Ω Raumwinkel in sr

In Tabelle 16 sind für Schallquellen, die unmittelbar vor reflektierenden Flächen angeordnet sind, die Raumwinkel Ω und die dazugehörigen Raumwinkelmaße K_0 angegeben.

Für die ungerichtete punktförmige Schallquelle, die nicht vor Flächen angeordnet ist, ergibt sich somit für die Richtwirkungskorrektur der Wert $K_C = 0$, was bedeutet, dass Gleichung (54) in Gleichung (53) übergeht.

where

- L_p sound pressure level, in dB
- L_W sound power level, in dB
- K_C directivity correction, in dB
- D_{div} propagation loss, in dB
- DI directivity index, in dB
- K_0 solid angle index, in dB
- r distance from sound source, in m
- r_{ref} reference distance $r_0 = 1$ m

K_C is the directivity correction, expressed in dB, which is obtained by adding the directivity index DI and the solid angle index K_0 . The directivity index DI indicates the amount, in dB, by which the sound pressure level from a sound source in the direction under consideration deviates from the sound pressure level of an omnidirectional point source of equal sound power. It is frequency-dependent and usually has to be determined experimentally. The directivity index can also be applied to the self-shielding of buildings. Figure 20 shows approximate values for the directivity indices of sound-radiating building surfaces. They only apply to medium frequencies. It is also worth noting that full directivity only occurs if the shortest length delimiting the sound-radiating surface is longer than the sound wavelength.

The solid angle index K_0 allows for the fact that sound does not always propagate into the entire room, i.e. at a solid angle $\Omega = 4 \cdot \pi$. It applies according to Equation (55):

where

- K_0 solid angle index, in dB
- Ω solid angle, in sr

Table 16 lists the solid angles Ω and associated solid angle indices K_0 for sound sources arranged immediately in front of reflecting surfaces.

Hence, the directivity correction for an omnidirectional point source not arranged in front of any surfaces is $K_C = 0$, which means that Equation (54) turns into Equation (53).

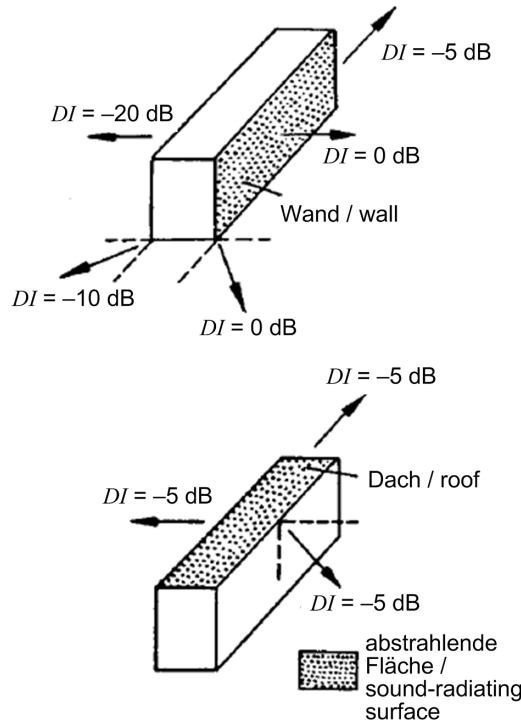


Bild 20. Näherungswerte für die Richtwirkungsmaße von schallabstrahlenden Flächen bei mittleren Frequenzen

Figure 20. Approximate directivity indices for sound-radiating surfaces at medium frequencies

Tabelle 16. Raumwinkel Ω und Raumwinkelmaß K_0 für Schallquellen in unmittelbarer Nähe von reflektierenden Flächen

Lage der Geräuschquelle	Raumwinkel Ω in sr	Raumwinkelmaß K_0 in dB
Frei im Raum, hoch über dem Boden	$4 \cdot \pi$	0
In oder unmittelbar vor (über) einer stark reflektierenden Fläche (z.B. Dach, Boden)	$2 \cdot \pi$	+3
Vor zwei aufeinander senkrecht stehenden Flächen (auch Wandfläche über Boden)	π	+6
Vor drei aufeinander senkrecht stehenden Flächen	$\pi/2$	+9

Table 16. Solid angles Ω and solid angle indices K_0 for sound sources in the immediate vicinity of reflecting surfaces

Location of sound source	Solid angle Ω , in sr	Solid angle index K_0 , in dB
Free-field, high above floor level	$4 \cdot \pi$	0
In or immediate in front of (above) a strongly reflecting surface (e.g. roof, floor)	$2 \cdot \pi$	+3
In front of two perpendicular surfaces (also wall surface above floor)	π	+6
In front of three perpendicular surfaces	$\pi/2$	+9

In DIN ISO 9613-2 wird gegenüber der Gleichung (54) neben der Ausbreitungsdämpfung D_{div} noch die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption, Bodeneffekten, Abschirmung und aufgrund sonstiger Effekte berücksichtigt. Diese zusätzlichen Dämpfungseffekte sind in der Haustechnik wegen der hier nur betrachteten geringen Abstände zur Schallquelle (Abstand Schallquelle zur Grundstücksgrenze) in der Regel vernachlässigbar.

Ist der Abstand zu einer Schallquelle kleiner als eine der Hauptabmessungen dieser Schallquelle, so kann

Unlike Equation (54), DIN ISO 9613-2 considers the attenuation due to air absorption, floor attenuation, shielding and other effects in addition to the propagation loss D_{div} . In the building services, these additional attenuation effects are usually negligible because only short distances from the sound source (distance of sound source from property boundary) are considered here.

If the distance from a sound source is smaller than one of the main dimensions of this sound source,