

5 Schallmessungen

D. Otto

Begriffe

Schall	Mechanische Schwingungen und Wellen eines Mediums, insbesondere im Frequenzbereich des menschlichen Hörens von etwa 16 Hz bis 16 000 Hz
Luftschall	In Luft sich ausbreitender Schall
Körperschall	In festen Stoffen sich ausbreitender Schall
Ton	Schallschwingung mit sinusförmigem Verlauf
Geräusch	Schall, der aus vielen Einzeltönen zusammengesetzt ist, deren Frequenzen nicht in einfachen Zahlenverhältnissen zueinander stehen
Frequenz	Anzahl der Schwingungen je Sekunde
Oktave	Die Verdoppelung der Frequenz entspricht einer Oktave
Terz	Frequenzbereich von der Breite einer Drittel-Oktave
Schallstrahlertypen	Schallquellen werden nach ihrer Richtcharakteristik unterschieden
Monopolstrahler	Der Monopol strahlt gleichmäßig in alle Richtungen
Dipolstrahler	Der Dipol ist ein Strahler aus zwei Monopolen, die mit gleicher Amplitude gegenphasig schwingen
Quadrupolstrahler	Ein Quadrupolstrahler entsteht, wenn zwei benachbarte Dipole mit gleicher Amplitude in Gegenphase schwingen

Formelzeichen

c	Schallausbreitungsgeschwindigkeit
D	Schalldämpfung oder Absorption
f	Frequenz
I	Schallintensität, Produkt aus den Effektivwerten von Schalldruck und Schallschnelle $I = \tilde{p} \cdot \tilde{v}$
L_p	Schalleistungspegel $L_p = 10 \lg(P / P_0)$
L_p	Schalldruckpegel $L_p = 10 \lg(\tilde{p}^2 / \tilde{p}_0^2)$
$L_{pA...B}$	Bewerteter Schalldruckpegel
LS	Lautstärkepegel, zahlenmäßig gleich dem Schalldruckpegel eines gleich laut wahrgenommenen 1000 Hz-Tones
p	Schalldruck
\tilde{p}	Effektivwert des Schalldruckes
\tilde{p}_0	Bezugswert für den Schalldruckpegel $\tilde{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$
S	Lautheit
St	Strouhal-Zahl, Frequenz der Wirbelablösung bei laminarer Anströmung
v	Schallschnelle

5.1 Schall und Schallfeld

Die Ausbreitung einer Schallwelle in Gasen und Gasgemischen wie z.B. Luft erfolgt mit räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Dichte, des Druckes und der Geschwindigkeit der Mediumteilchen um die ohne Schall vorhandenen Mittelwerte.

Die Größen Dichte ρ , Druck p und der Vektor der Geschwindigkeit \vec{v} können in räumlich und zeitlich konstante Werte ρ_- , p_- , \vec{v}_- und in veränderliche Schallfeldgrößen Wechseldichte ρ_{\sim} , Schalldruck p_{\sim} und Wechselgeschwindigkeit \vec{v}_{\sim} aufgespalten werden

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_- + \rho_{\sim} \\ p &= p_- + p_{\sim} \\ \vec{v} &= \vec{v}_- + \vec{v}_{\sim}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Die Wechselgeschwindigkeit \vec{v}_{\sim} ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wellenzustandes und wird in der Akustik als Schallschnelle bezeichnet. Für die ebene Welle hat der Vektor der Schallschnelle \vec{v}_{\sim} nur eine Komponente $\vec{v}_{\sim,x}$ in x-Richtung.

Die Gleichungen für die Erhaltung der Masse und des Impulses und die Zustandsgleichung für Gase bilden das Gleichungssystem für die theoretische Behandlung der Schallausbreitung:

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + \frac{dv}{dx} = 0\tag{5.2}$$

Impulsgleichung

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{dp}{dx} = 0\tag{5.3}$$

Zustandsgleichung

$$p \cdot \rho^{-\kappa} = konst.\tag{5.4}$$

Mit der Annahme kleiner Amplituden

$$\rho_{\sim} \ll \rho_-, p_{\sim} \ll p_-, \vec{v}_{\sim} \ll \vec{v}_-$$

folgt aus den Gleichungen (5.2) und (5.3)

$$\frac{d\rho_{\sim}}{dt} + \rho_{\sim} \cdot \frac{dv_{\sim}}{dx} = 0 \quad (5.5)$$

und

$$\rho_{\sim} \cdot \frac{dv_{\sim}}{dt} + \frac{dp_{\sim}}{dx} = 0. \quad (5.6)$$

Die Zustandsgleichung (5.4) führt zu folgender Beziehung

$$p_{\sim} = \kappa \cdot \frac{p_{\sim}}{\rho_{\sim}} \cdot \rho_{\sim} \quad (5.7)$$

Mit der Schallgeschwindigkeit für Gase

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p_{\sim}}{\rho_{\sim}}} \quad (5.8)$$

ergibt sich aus Gleichung (5.7) folgende Abhängigkeit

$$p_{\sim} = c^2 \cdot \rho_{\sim} \quad (5.9)$$

Die Kontinuitätsgleichung lautet mit Gleichung (5.9)

$$-\frac{dv_{\sim}}{dx} = \frac{1}{(\rho_{\sim} \cdot c^2)} \cdot \frac{dp_{\sim}}{dt} \quad (5.10)$$

Aus den Gleichungen (5.6) und (5.10) folgen nach partieller Differentiation die Wellengleichungen für den ebenen, ungedämpften Fall

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 p_{\sim}}{dt^2} \quad (5.11)$$

$$\frac{d^2 v_{\sim}}{dx^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 v_{\sim}}{dt^2} \quad (5.12)$$

Eine Lösung der Wellengleichung (5.11) ist die Sinuswelle

$$p_{\sim} = \hat{p} \cdot \cos \left\{ \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \Phi \right\} \quad (5.13)$$

mit dem Scheitelwert \hat{p} der Druckamplitude und Φ als Nullphasenwinkel.

Die Lösung für die Schallschnelle v_{\sim} führt zu

$$v_{\sim} = \frac{\hat{p}}{(\rho_{-} \cdot c)} \cdot \cos \left\{ \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \Phi \right\} \quad (5.14)$$

Aus Schalldruck p_{\sim} und Schallschnelle v_{\sim} folgt die Schallkennimpedanz, bzw. der Wellenwiderstand des Mediums

$$Z_0 = \frac{p_{\sim}}{v_{\sim}} = \rho_{-} \cdot c \quad (5.15)$$

5.1.1 Schallkenngrößen

Die Hauptkenngröße der Schallemission einer Schallquelle ist ihre Schalleistung. Der Messung zugänglicher ist jedoch der Schalldruck, über den indirekt die Schalleistung ermittelt werden kann.

5.1.1.1 Schalldruck

Der Schalldruck ist ein dem Gleichdruck überlagerter kleiner Wechseldruck

$$p = p_{-} + p_{\sim} \quad (5.16)$$

Hierbei ist p_{-} der Mittelwert des Druckes ohne Schall. Der Schalldruck $p_{\sim}(t)$ ist eine zeitabhängige Größe (Bild 5.1). Zur Kennzeichnung des Wechseldruckes wird der Effektivwert des Wechseldruckes verwendet

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_{\sim}^2 \cdot (t) dt} \quad (5.17)$$

In technischen Meßgeräten beträgt die Integrationszeit T etwa 1s.

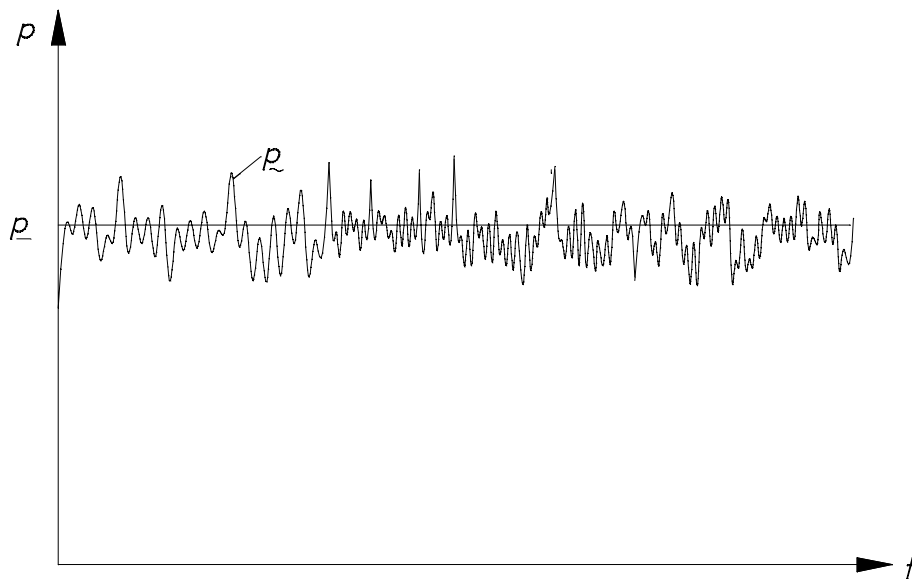


Bild 5.1: Schalldruckverlauf $p_{\sim}(t)$ eines Geräusches

5.1.1.2 Schalleistung

Unter Freifeldbedingungen ohne Reflexionen wird die Schalleistung P durch eine Integration der Schallintensität J längs einer geschlossenen Meßfläche S (Hüllfläche) bestimmt

$$P = \int_S J \cdot dS \quad (5.18)$$

wobei J der Vektor der Schallintensität ist.

$$J = \overline{p_{\sim}(t) \cdot v_{\sim}(t)} \quad (5.19)$$

der als zeitlicher Mittelwert aus dem Schalldruck p_{\sim} und der Schallschnelle v_{\sim} gebildet wird.

Kann davon ausgegangen werden, daß eine der Schallfeldstruktur konforme Meßfläche vorliegt, so ist die Schallintensität J , die normal zum Oberflächenelement dS steht, durch eine Schalldruckmessung

$$\frac{1}{\rho_0 \cdot c} \cdot \overline{p_{\sim}^2} \quad (5.20)$$

am Ort von dS zu ermitteln. Hierin ist $\rho_0 \cdot c$ die Schallkennimpedanz, das Produkt aus Dichte ρ_0 und Schallgeschwindigkeit c der Luft im Bereich der Meßfläche. Mit der Annahme, daß die Schallkennimpedanz als konstant angesehen werden kann, folgt, daß die Schalleistung P dem Quadrat des Schalldruckes proportional ist.

$$P \sim \overline{p^2} \quad (5.21)$$

Aufgrund dieses Zusammenhanges kann an Stelle der Schallintensität der Schalldruck, bzw. der Schalldruckpegel, der meßtechnisch weit einfacher zu erfassen ist, zur Beurteilung der Schallemission herangezogen werden.

5.1.2 Schallausbreitung

Die Schallquellenart, ihre Richtcharakteristik und ihre Verteilung bestimmen die Schallfeld- bzw. die Schallenergiegrößen. Die Richtcharakteristik der elementaren Schallstrahler ist zum Teil typisch für bestimmte Geräuschquellen, wie z.B. beim Verbrennungsgeräusch turbulenter Gasflammen.

5.1.2.1 Elementare Schallstrahler

Zu den elementaren Schallstrahlern zählen der Monopol-, Dipol- und der Quadrupolstrahler. Unter einem Monopolstrahler kann eine radial pulsierende Kugel angenommen werden, die in alle Richtungen Schall abstrahlt (Bild 5.2). Monopollärm wird durch Volumen- bzw. Massenstromschwankungen bewirkt.

Der Dipolstrahler kann durch zwei Kugelstrahler beschrieben werden, die in geringem Abstand in Gegenphase zueinander schwingen. In der Symmetrieachse folgt hieraus eine Auslöschung der gegenphasigen Schalldruckanteile. Die Abstrahlungscharakteristik ist, wie in Bild 5.2 dargestellt, achtförmig. Dipolquellen verursachen keine Volumen- oder Massenstromänderungen, sondern Schubschwankungen.

Als weitere Schallquelle tritt der Quadrupolstrahler auf. Er läßt sich mit zwei Dipolen realisieren, die im Fall des transversalen Quadrupols dicht nebeneinander stehen und mit gleicher Amplitude, aber in Gegenphase zueinander schwingen. In beiden Symmetrieebenen erfolgt die Auslöschung der gegenphasigen Schalldruckanteile. Da jeder Dipol sich mit zwei Monopolen darstellen läßt, ergeben vier Monopole einen Quadrupol mit den Phasenwinkeln 0° für (+) und 180° für (-).

Der longitudinale Quadrupol läßt sich durch vier Monopolstrahler, die auf einer Linie liegen, beschreiben. Das Geräusch turbulenter Freistrahlen hat zum Beispiel Quadrupolcharakter.

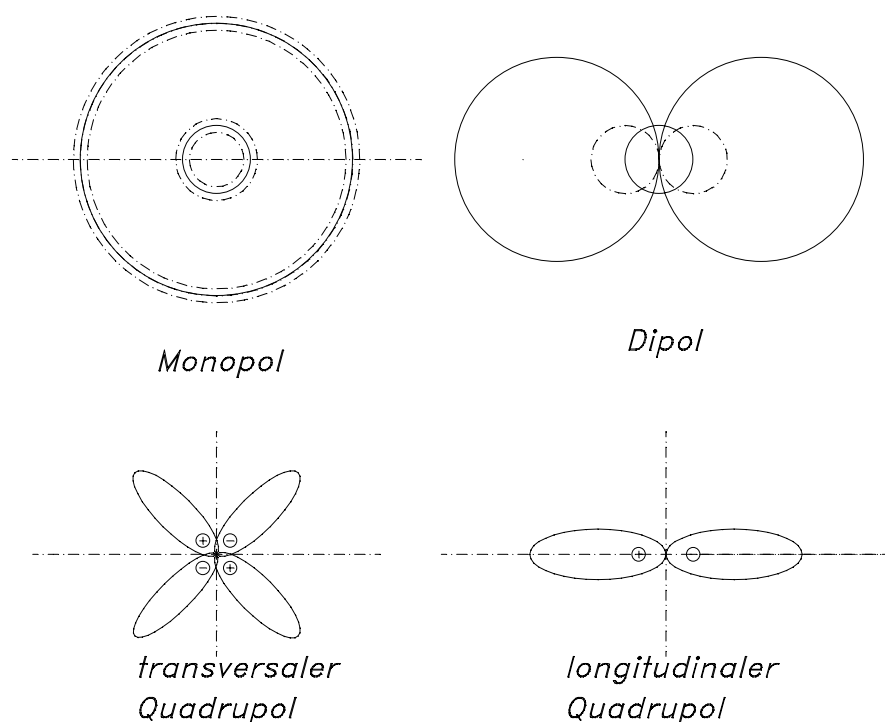


Bild 5.2: Richtcharakteristik elementarer Schallstrahler

Für die Berechnung der Schalleistung sind die Schallintensitäten erforderlich. Die Schalleistung im Fernfeld einer Schallquelle mit der Oberfläche S folgt aus Gleichung 5.18.

$$P \sim |x_i|^2 \cdot J \quad (5.22)$$

Für die Schalleistung des gesamten schallerzeugenden Gebietes sind die Intensitäten der Schallstrahler zu betrachten. Außerdem geht die Dimension des Schallgebietes in diese Betrachtung mit ein. Ein dem Schallgebiet zugeordnetes Volumen V , eine Fläche A oder eine Länge L kann durch einen charakteristischen Längenmaßstab L_e ausgedrückt werden:

$$V \sim L_e^3; A \sim L_e^2; L \sim L_e \quad (5.23)$$

Mit der Gleichung für die Schallintensität des Monopols läßt sich die Schalleistung schreiben als

$$P_M \sim \frac{\rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^4}{c_0} = \rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^3 \cdot \left(\frac{U}{c_0}\right) \quad (5.24)$$

Für den Dipolstrahler ist die Schalleistung

$$P_D \sim \frac{\rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^6}{c_0^3} = \rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^3 \cdot \left(\frac{U}{c_0}\right)^3 \quad (5.25)$$

Die Schalleistung für den Quadrupol ist proportional

$$P_Q \sim \frac{\rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^8}{c_0^5} = \rho_0 \cdot L_e^2 \cdot U^3 \cdot \left(\frac{U}{c_0}\right)^5 \quad (5.26)$$

Die Monopol- und Dipolstrahler sind intensivere Strahler als der Quadrupolstrahler, wie ein Vergleich der Schalleistungen zeigt.

Bezogen auf den Energiestrom

$$\dot{E} = \frac{\dot{m}}{2} \cdot U^2 \sim \rho_0 \cdot \dot{V}_0 \cdot U^2 \sim \rho_0 \cdot L^2 \cdot U^3 \quad (5.27)$$

folgt für den akustischen Wirkungsgrad des Monopolstrahlers

$$\eta_M \sim \frac{\rho_0 \cdot L^2 \cdot U^3 \cdot \left(\frac{U}{c_0}\right)}{\rho_0 \cdot L^2 \cdot U^3} = \left(\frac{U}{c_0}\right) = M \quad (5.28)$$

und entsprechend für den Dipol- und Quadrupolstrahler

$$\eta_D \sim \left(\frac{U}{c_0}\right)^3; \eta_Q \sim \left(\frac{U}{c_0}\right)^5 \quad (5.29)$$

Da in diesen Betrachtungen die Machzahl $M < 1$ ist, folgt hieraus, daß die Effizienz der Quadrupolstrahlung wesentlich geringer ist, als die der Monopolstrahlung und auch die der Dipolstrahlung.

5.1.2.2 Kolbenstrahler

Die Kugelschallwellen des Monopolstrahlers lassen sich durch schwingende Kolben oder Membranen erzeugen, deren Kolben- oder Membrandurchmesser klein gegenüber der Wellenlänge λ ist. Ein in einer unendlich ausgedehnten starren Schallwand schwingender Kolben wie in Bild 5.3 erzeugt Kugelschallwellen oder in einer endlichen Wand, wenn die Rückseite schalldicht abgeschlossen ist (Lautsprecher in einem schalldicht abgeschlossenen Gehäuse).

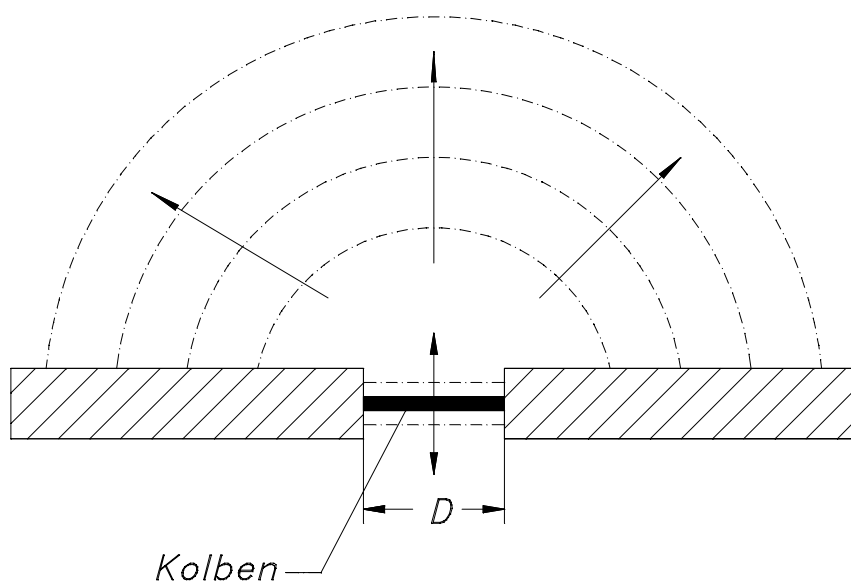


Bild 5.3: Kugelschallwellen eines schwingenden Kolbens in einer starren Schallwand

5.1.2.3 Stehende Schallwellen

Die ebene Schallwellenausbreitung in geschlossenen Räumen, z.B. in Rohren oder Kanälen, führt zu stehenden Wellen, wenn die Schallwellen am schallharten Rohrende total reflektiert werden und sich rückläufig mit gleicher Wellenlänge ausbreiten. Aus der vor- und rücklaufenden Welle entsteht eine stehende Welle mit Knoten und Schwingungsbäuchen für Schalldruck und Schallschnelle. Die Knoten der Schnelle liegen in Abständen von $l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) vor dem harten Abschluß, die Schnellbäuche an den Stellen $l = n \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$. Die Maximalwerte des Schalldrucks sind um eine viertel Wellenlänge gegen die der Schnelle verschoben, Bild 5.4.

Der Schalldruck p steigt an der total reflektierenden Grenzfläche auf das doppelte seines Wertes in der fortschreitenden Welle. Für die Überlagerung beider Wellen hat das Vorzeichen in Gleichung 5.13 folgende Bedeutung:

$$p_{\sim} = \hat{p} \cdot \cos \left\{ \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \Phi \right\}$$

- Vorzeichen: Ausbreitungsrichtung der Welle in Richtung $x > 0$

+ Vorzeichen: Ausbreitungsrichtung der Welle in Richtung $x < 0$.

Der Schalldruck p_1 der vorlaufenden Welle ist damit

$$p_1 = \hat{p}_1 \cdot \cos \left(\omega \cdot t - \frac{\omega \cdot x}{c} \right). \quad (5.30)$$

Der Schalldruck p_2 der rücklaufenden Welle ist

$$p_2 = \hat{p}_2 \cdot \cos \left(\omega \cdot t + \frac{\omega \cdot x}{c} \right). \quad (5.31)$$

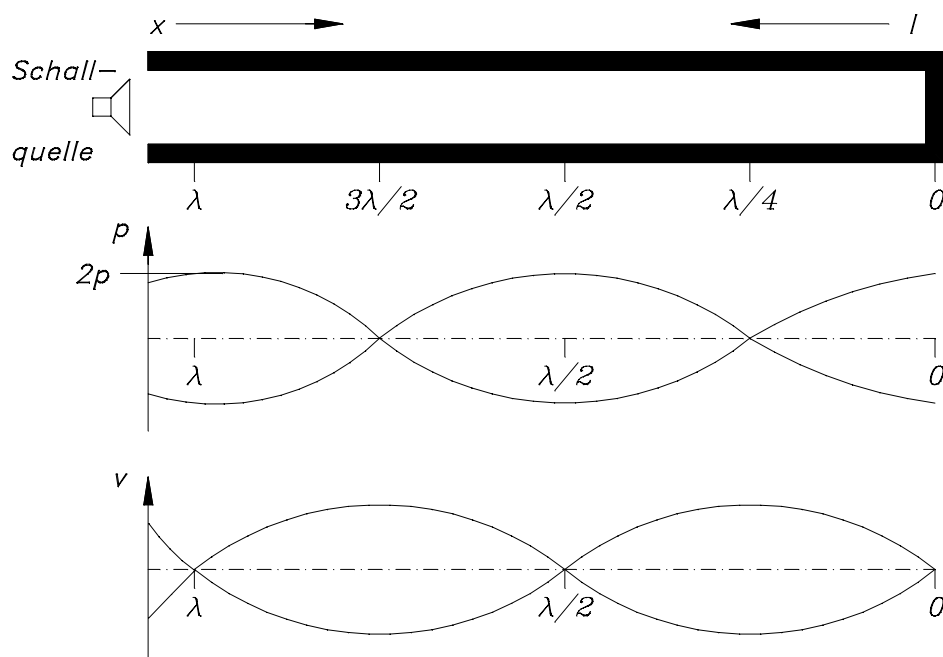


Bild 5.4: Extremwerte von Schalldruck und Schallschnelle in einem schallhart abgeschlossenen Rohr

Aus der Totalreflexion folgt mit $\hat{p}_1 = \hat{p}_2$ und $\frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ und der Einführung der Wellenausbreitungsrichtung $l = -x$, also in Richtung der Schallquelle, daß der

resultierende Schalldruck innerhalb der stehenden Welle sich nach Gleichung 5.32 berechnen läßt

$$p_{\sim} = 2 \cdot \hat{p}_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda}\right) \quad (5.32)$$

Stehende Wellen bilden sich auch an Grenzschichten aus, die schallweich sind. Diese Grenzschichten können Dichteänderungen des gleichen Mediums oder Übergänge verschiedener Medien sein. Die Schwingungsgrößen verhalten sich in diesem Fall umgekehrt wie bei der schallharten Wand.

Das Druckminimum mit $p_{\sim} = 0$ befindet sich jetzt an der Grenzschicht und die Schallschnelle hat hier den doppelten Wert, bzw. ihr Maximum.

In einseitig offenen Rohren, wie z.B. Schornsteinen oder Brennern mit entsprechend Bild 5.5 ausgebildetem Brennraum, bilden sich Eigenschwingungen aus, deren Frequenzen f_n von der Rohrlänge l abhängen, bzw. um ein ungradzahliges Vielfaches der Viertelwellenlänge höher sind.

$$f_n = \frac{(2 \cdot n - 1)}{4 \cdot l} \cdot c \quad (5.33)$$

$n = 1, 3, 5, \dots$

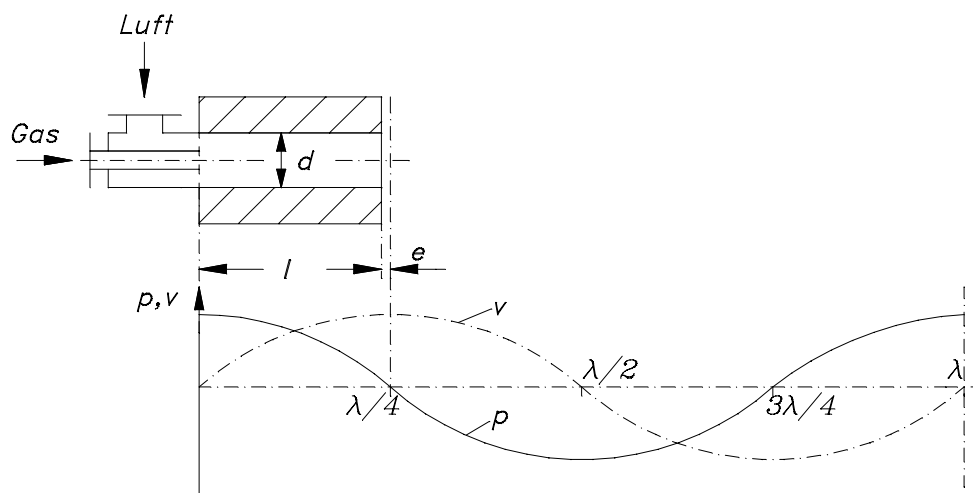


Bild 5.5: Verlauf von Schalldruck und Schallschnelle in einem Brenner mit einseitig offenem Brennraum

Am offenen Rohrende (Brennraumende) ist zudem noch eine Korrektur e der Wellenlänge nach Bild 5.6 erforderlich, mit der berücksichtigt wird, daß der Druckknoten etwas außerhalb des Rohrendes (Brennermündung) liegt. Der Korrekturwert ist frequenz-, bzw. wellenzahlabhängig. Die Wellenzahl k folgt aus

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (5.34)$$

In der vorausgegangenen Behandlung der stehenden Wellen wurde davon ausgegangen, daß sich die Wellen in einem ruhenden Medium ausbreiten. In strömenden Medien wird der Knotenabstand der stehenden Welle kleiner und die Frequenz f_s entsprechend höher

$$f_s = \frac{f_0}{1 - M^2} \quad (5.35)$$

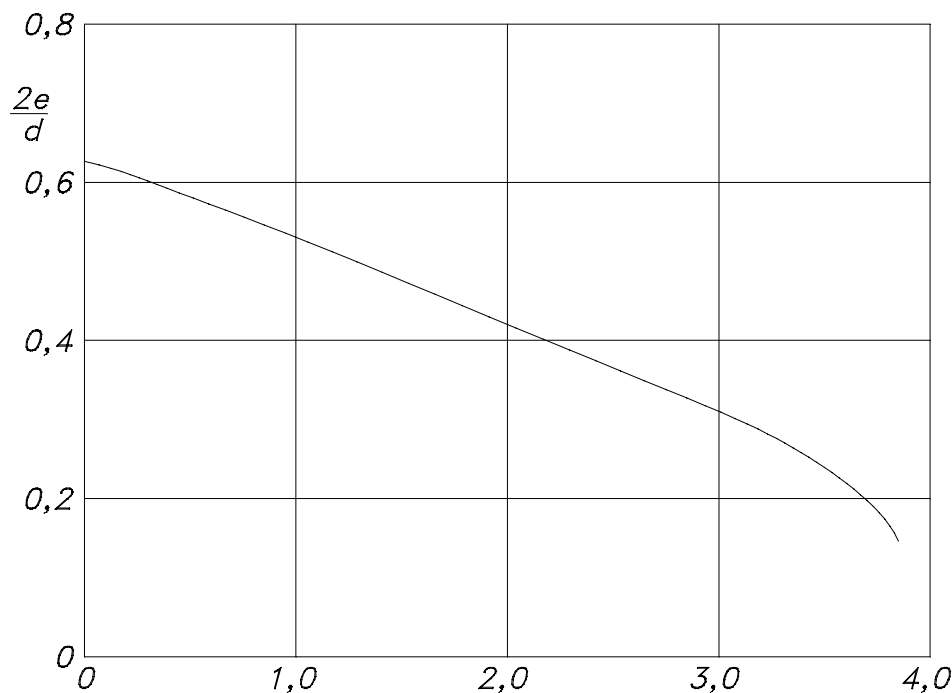


Bild 5.6: Korrekturterm für die Wellenlänge des offenen Rohrendes in Abhängigkeit von Wellenzahl und Rohrdurchmesser

Hierin ist M die Machzahl, gebildet aus der Strömungsgeschwindigkeit v und der Schallgeschwindigkeit c des Mediums. Die Frequenz f_0 ist die Frequenz der stehenden Welle ohne Strömung. Dieser Zusammenhang ist zu berücksichtigen, wenn z.B. die mittlere Schallgeschwindigkeit des Mediums indirekt aus der Frequenzmessung bestimmt werden soll.

5.1.2.4 Nahfeld und Fernfeld

Dem Schallfeld eines Schallstrahlers, dessen Schall durch Strömungsvorgänge erzeugt wird, sind im Nahbereich möglicherweise Strömungsvorgänge überlagert, die in größerer

Entfernung nicht mehr nachweisbar sind. In diesem sogenannten Nahbereich der Schallquelle sind Messungen des Schalldruckes, die zur Auswertung der Schalleistung verwendet werden sollen, nicht sinnvoll. Das Nahfeld ist dadurch gekennzeichnet, daß Schalldruck und Schallschnelle nicht in Phase schwingen. Das Nahfeld geht mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle in das Fernfeld über, in dem die Schallausbreitung unbeeinflusst von sonstigen Strömungsvorgängen des Schallerzeugers ist und in dem Schalldruck und Schallschnelle in Phase schwingen. Der eine Schallquelle kennzeichnende Schalldruck muß im Fernfeld gemessen werden.

5.1.2.5 Freies Schallfeld und diffuses Schallfeld

Die Schallausbreitung kann ungehindert im freien Gelände erfolgen oder durch einen umgebenden Raum oder auch durch reflektierende Hindernisse beeinflusst werden. Die freie Schallausbreitung ist durch folgende Gesetze gekennzeichnet:

$$\tilde{p} \sim \frac{1}{r}, \quad J \sim \frac{1}{r^2}, \quad P = \int_S J \cdot dS .$$

In einem geschlossenen Raum werden die von einer Schallquelle ausgehenden Schallwellen an den Wänden reflektiert, so daß nach kurzer Zeit die Schallintensität an jedem Ort im Raum gleich ist. Dies kennzeichnet ein diffuses Schallfeld, an dessen Ausbildung jedoch die Voraussetzung geknüpft ist, daß die Raumabmessungen in allen Richtungen größer als die Wellenlängen der betrachteten Schallwellen sind.

5.1.3 Schalldruckpegel

Die Hörschwelle des menschlichen Gehörs liegt bei einem Schalldruck von etwa $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Die obere Gehörempfindungsgrenze wird durch die obere Schmerzgrenze charakterisiert und liegt bei 20 Pa für einen 1000 Hz -Ton.

Dieser große Wertebereich ist unübersichtlich und hat dazu geführt, Pegelmaße einzuführen. Die Einheit für das Pegelmaß ist die Größe dB (Dezibel). Der Schalldruckpegel L_p ist definiert als

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{\tilde{p}^2}{\tilde{p}_0^2} \quad (5.36)$$

mit der Bezugsgröße $\tilde{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Das Dezibel (dB) ist keine Maßeinheit, sondern nur eine Verhältnisangabe in einem logarithmischen Maßstab. Die Bezugsgrößen für Schalldruck und Schalleistung sind unterschiedlich.

Einige typische Schalldrücke und Schalldruckpegel sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

5.1.3.1 Bewertung von Schalldruckpegeln

Für das Hörempfinden ist nicht allein der Schalldruck eines Tones maßgebend, sondern auch dessen Frequenz. So werden Töne gleichen Schalldruckes mit unterschiedlicher Frequenz verschieden laut empfunden. Die Kurven gleicher Lautstärke werden als Isophonen bezeichnet. Der Phon-Wert eines 1000 Hz-Tones in Bild 5.7 entspricht hierbei dem Dezibel-Wert des Schalldruckpegels gleicher Höhe.

Tabelle5-1: Schalldrücke und Schalldruckpegel verschiedener Geräuschquellen

Geräusch	Schalldruck \tilde{p} <i>Pa</i>	Schalldruckpegel L_p <i>dB</i>
Hörschwelle	$2 \cdot 10^{-5}$	0
Unterhaltungssprache	$2 \cdot 10^{-3}$	40
Staubsauger im Wohnraum	$2 \cdot 10^{-2}$	60
lautes Rufen in 1m Entfernung	$2 \cdot 10^{-1}$	80
Hochleistungsbrenner in 1m Entfernung	2	100

Eine Schallpegeländerung von 1 dB ist vom Gehör noch wahrnehmbar.

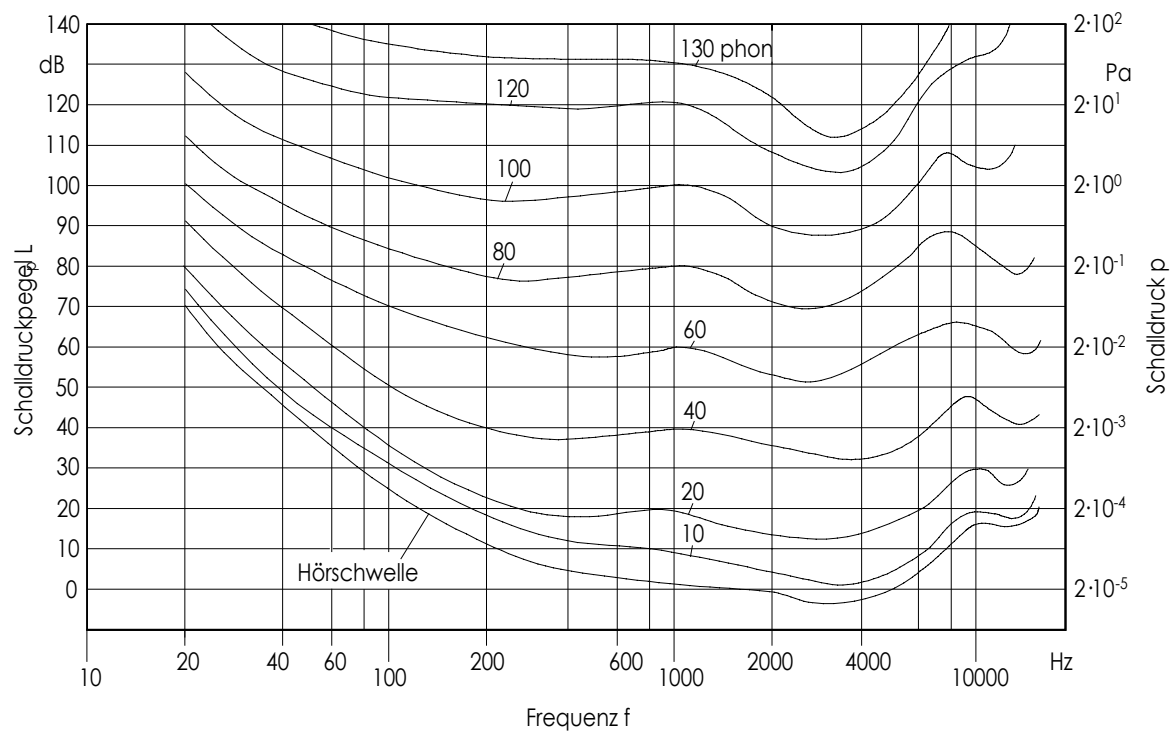


Bild 5.7: Isophonen, Kurven gleicher Lautstärke-Empfindung

Die Schalldruckpegelmessung berücksichtigt ebenfalls die Frequenzabhängigkeit des Ohres, indem Filter das Signal manipulieren. Die Schalldruckmessungen mit diesen Filtern, z.B. dem A -Filter, werden im Ergebnis mit $dB(A)$ gekennzeichnet. Diese Filterung entspricht jedoch nur an der Hörschwelle dem Hörempfinden. Bei den üblichen Lautstärken ist die Abschwächung im unteren Frequenzbereich zu stark, wie die Isophonen zeigen. Aus gerätetechnischen Gründen hat sich jedoch die Messung mit diesen Filtern durchgesetzt.

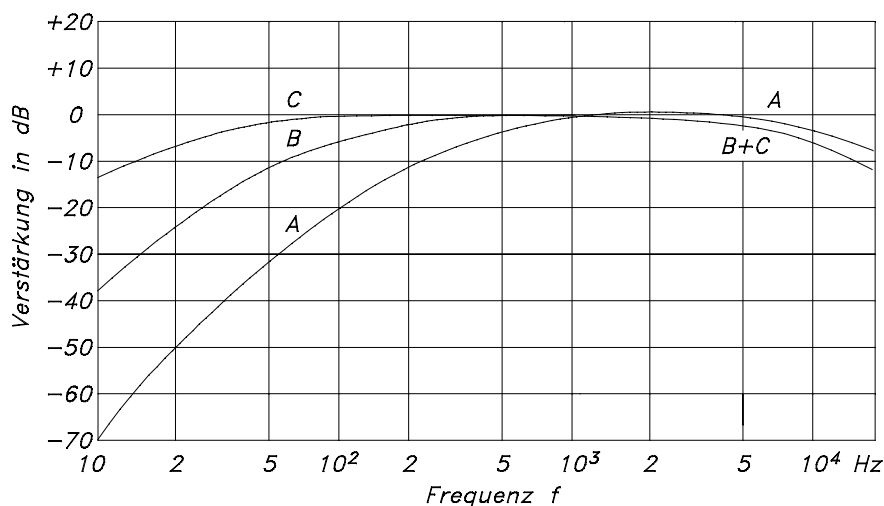


Bild 5.8: Bewertungskurven für A-, B- und C-Bewertung

5.1.3.2 Mittelung von Schalldruckpegeln

Überlagern sich die Schalldrücke verschiedener Geräuschquellen, so müssen die Schallintensitäten, die Schalleistungen oder entsprechend Gleichung 5.21 die ihnen proportionalen Schalldruckquadrate nach Gleichung 5.33 addiert werden. Hierbei ist es gleich, ob es sich um bewertete oder unbewertete Schalldruckpegel handelt.

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \lg \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{p}_i^2}{\tilde{p}_0^2} \quad (5.37)$$

n = Anzahl der Geräuschquellen

Der Schalldruck der einzelnen Geräuschquelle ergibt sich aus dem gemessenen Schalldruckpegel $L_{p,i}$ durch delogarithmieren des Schalldruckpegels

$$\tilde{p}^2 = \tilde{p}_0^2 \cdot 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (5.38)$$

Damit läßt sich Gleichung 5.37 wie folgt schreiben

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (5.39)$$

Es folgen Beispiele zur Rechnung mit Pegelwerten.

Beispiel 1:

Die Geräusche zweier gleicher Pumpen überlagern sich. Gesucht ist der resultierende Gesamtschalldruckpegel. Der Schalldruckpegel einer Pumpe wurde in 1 m Abstand mit 50 dB ermittelt.

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{50}{10}} + 10^{\frac{50}{10}} \right) \text{ dB}$$

$$L_{ges} = 53 \text{ dB}$$

Der Gesamtschalldruckpegel in 1 m Abstand gemessen beträgt 53 dB, d.h. eine Verdoppelung der Schalleistung führt zu einer Schalldruckpegelerhöhung von 3 dB.

Beispiel 2:

Ein Spezial-Heizkessel kann in zwei Leistungsstufen betrieben werden. Das überwiegend von der Verbrennung verursachte Geräusch wird in 1 m Abstand mit 80 dB in der hohen Leistungsstufe ermittelt. Welcher Schalldruckpegel ist zu erwarten, wenn die Schalleistung, bzw. das Quadrat des Schalldruckes in der niedrigen Leistungsstufe nur halb so hoch ausfällt?

$$\tilde{p}_{\max}^2 = \tilde{p}_0^2 \cdot 10^{\frac{L_{p,\max}}{10}} = 4 \cdot 10^{-10} \cdot 10^8 \text{ Pa}^2$$

$$\tilde{p}_{\max}^2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}^2$$

$$\tilde{p}_{\min}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}^2$$

$$L_{p,\min} = 10 \cdot \lg \frac{\tilde{p}_{\min}^2}{\tilde{p}_0^2} = 77 \text{ dB}.$$

Der Schalldruckpegel nimmt in gleichem Abstand zur Schallquelle gemessen bei Halbierung der Schalleistung um 3 dB ab.

5.1.3.3 Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche

Für zeitlich schwankende Geräusche wird entsprechend Bild 5.9 ein zeitlich gemittelter Schalldruckpegel $L_{p,m}$ errechnet, der einem zeitlich konstanten Geräusch äquivalent ist.

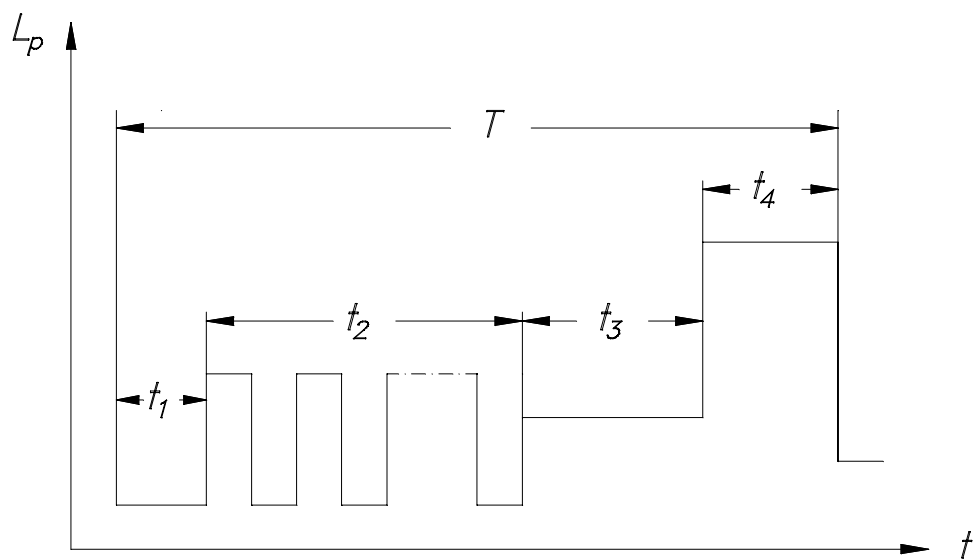


Bild 5.9: Zeitlich schwankendes Geräusch

Die einzelnen Schalldruckpegel $L_{p,i}$ werden nach Gleichung 5.36 mit den zugehörigen Zeiten gewichtet

$$L_{p,m} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \cdot t_i \right) \quad (5.40)$$

5.2 Messung der Schallkenngrößen

5.2.1 Schallpegelmesser

Die Schallpegelmesser sind Präzisionsmeßgeräte, die nach der TA-Lärm eine Meßgenauigkeitsklasse entsprechend DIN IEC 651 erfüllen müssen. Der vereinfachte Aufbau einer Meßkette für eine Schallpegelmessung ist in Bild 5.10 zu sehen.

Der Schalldruck wird durch das Mikrofon in ein analoges elektrisches Signal umgewandelt. Dieses Signal wird verstärkt und je nach Meßaufgabe mit einem Bewertungsfilter mit den Bewertungskurven A , B oder C gefiltert. Überwiegend kommt die A -Bewertung zum Einsatz. Die Effektivwertbildung berücksichtigt unterschiedliche Integrationszeiten und läßt

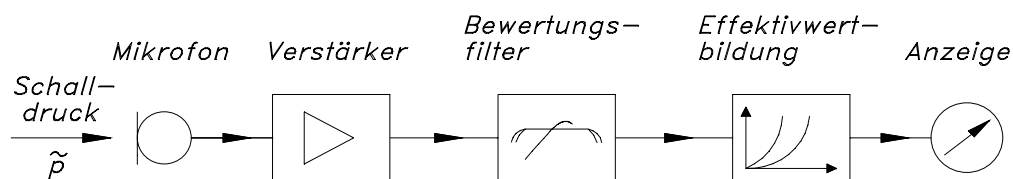


Bild 5.10: Meßkette für eine Schalldruckpegelmessung

die Anzeige nach DIN 45 633 im sog. Fast-, Slow- oder Impulsbetrieb zu. Impulsgeräusche sind nach VDI 2058 Geräusche, deren Pegel schnell um mehr als 5 dB(A) über den mittleren Pegel des übrigen Geräusches ansteigt und deren Dauer kurz ist (z.B. Geräusche von Hämmern oder Schreibmaschinen).

Die Integrationszeiten für die Effektivwertbildung betragen für die verschiedenen Anzeigearten:

<i>Slow</i>	Anzeigeart <i>Langsam</i> nach DIN 45 633 (1) bzw. <i>Slow</i> nach IEC 179 Integrationszeit $\approx 1\text{ s}$
<i>Fast</i>	Anzeigeart <i>Schnell</i> nach DIN 45 633 (1) bzw. <i>Fast</i> nach IEC 179 Integrationszeit $\approx 125\text{ ms}$
<i>Impuls</i>	Anzeigeart <i>Impuls</i> nach DIN 45 633 (2) Integrationszeit $\approx 35\text{ ms}$.

5.2.1.1 Mikrofon

Zur Schalldruckmessung in gasförmigen Medien werden als elektroakustische Wandler vorwiegend Kondensatormikrofone verwendet, die zur Gruppe der elektrostatischen Wandler zählen. Der schematische Aufbau eines Kondensatormikrofons ist in Bild 5.11 zu sehen.

Die wesentlichen Bestandteile des Kondensatormikrofons sind eine am Gehäuse befestigte dünne Metallmembran und eine starre Gegenelektrode. Als Dielektrikum befindet sich das Medium, in dem die Schalldruckmessung erfolgt, zwischen Membran und Gegenelektrode. Das Dielektrikum gelangt über die Druckausgleichsbohrung in das Gehäuse. Über diese Bohrung findet auch der Druckausgleich zum Umgebungsdruck statt. Die Schallwellen bewirken durch ihren Wechseldruck eine Bewegung der Membran aus

ihrer Gleich-gewichtslage heraus und ändern so die Kapazität des Mikrofons. Die dadurch entstehende Wechselspannung ist in einem weiten Frequenzbereich dem Schalldruck proportional.

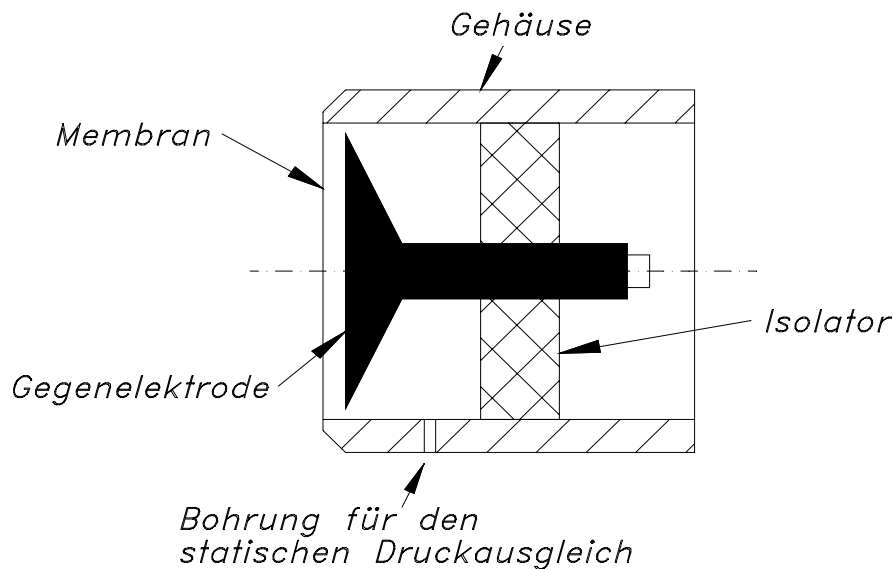


Bild 5.11: Schematischer Aufbau eines Kondensatormikrofons

Gegen Berührung ist die Membran durch ein Schutzgitter geschützt. Strömungsgeräusche, die unmittelbar am Mikrofon entstehen können, werden durch einen Windschirm ferngehalten. Von dem Membrandurchmesser hängt es ab, in welchem Druck- und Frequenzbereich gemessen werden kann. In Bild 5.12 wird der typische Frequenzgang eines Kondensatormikrofons mit 1“ Durchmesser gezeigt. Mit kleineren Durchmessern, z.B. 1/2“-Mikrofonen, können höhere Schalldrücke und höhere Frequenzen erfaßt werden. Sie haben

jedoch eine geringere Meßempfindlichkeit und aufgrund ihrer geringeren Kapazität einen höheren Störpegel. Für technische Messungen im Freifeld hat das 1“-Mikrofon den günstigsten Arbeitsbereich.

5.2.1.2 Kalibrierung

Einfache Kalibratoren liefern jeweils nur einen einzigen Schalldruck bei einer einzigen

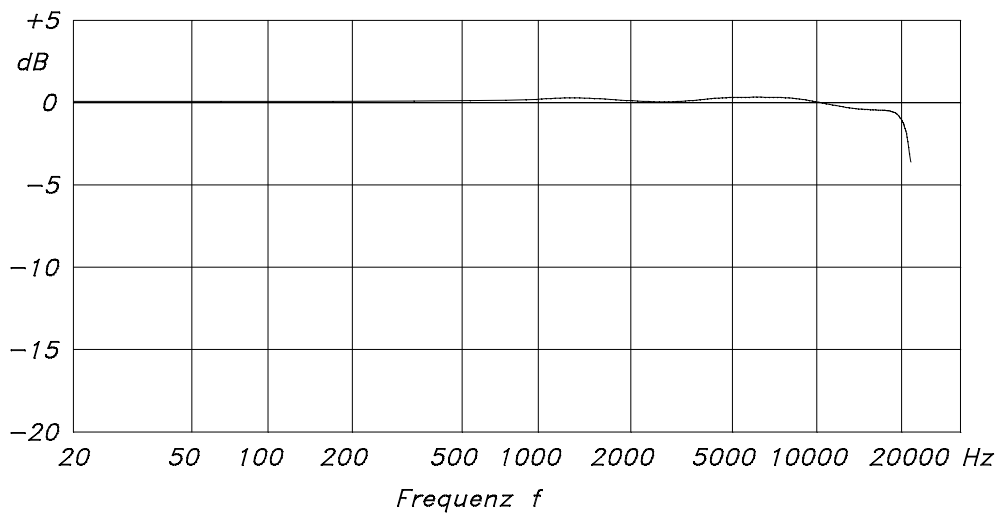


Bild 5.12: Frequenzgang eines 1“-Mikrofons im Freifeld

Frequenz. Dadurch ist nur eine punktuelle Kontrolle der vom Hersteller angegebenen Meßempfindlichkeit möglich. Kalibriert wird die gesamte Meßkette.

- akustische Kalibrierung

Der Schalldruck wird durch eine schwingende Membran erzeugt, die ein piezoelektrischer Wandler antreibt. Der Schalldruck beträgt z.B. 94 dB bei 1000 Hz.

- mechanische Kalibrierung mit Pistonphon

Der Schalldruck wird durch einen oszillierenden Kolben (Piston) erzeugt, der in einer

abgeschlossenen Kammer einen Wechseldruck erzeugt. Der Schalldruck läßt sich durch konstruktive Maßnahmen beeinflussen und liegt z.B. bei einem Wert von 124 dB und einer Frequenz von 250 Hz. Das Ergebnis ist luftdruckabhängig, und vom Normzustand abweichende Luftdrücke sind zu korrigieren.

5.2.2 Schalleistungsmessung

Die Schalleistung W einer Schallquelle ist nach Gleichung 5.18 das Produkt aus Schallintensität J und der schalldurchströmten Fläche S .

$$W = J \cdot S = \frac{\tilde{p}^2}{\rho \cdot c} \cdot S \quad (5.41)$$

Für die Schalleistung wurden ebenso wie für den Schalldruck Pegelmaße eingeführt. Der Bezugspegel für die Schalleistung beträgt $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$. Der Schalleistungspegel ist wie folgt definiert:

$$L_W = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0}. \quad (5.42)$$

Mit der gewählten Bezugsgröße W_0 stimmen die Zahlenwerte des Schalleistungspegels L_W mit denen des Schalldruckpegels überein, wenn der Schalldruck auf einer Fläche S_0 von 1 m^2 um die Schallquelle ermittelt wird. Damit reduziert sich die Schalleistungsmessung auf eine Schalldruckmessung. In der Tabelle 5.2 sind einige charakteristische Schallquellen und ihre Schalleistungen, bzw. ihre Schalleistungspegel angegeben.

Tabelle 5.2: Schallquellen und ihre Schalleistungspegel

Schallquelle	W Watt	L_W dB
Sprache	$1 \cdot 10^{-5}$	70
Schreibmaschine	$3 \cdot 10^{-5}$	75
Preßlufthammer	1	120
Großlautsprecher	100	140
Düsenflugzeug	10^5	170

Je nach Größe und Art der Schallquelle und den vorherrschenden Randbedingungen lassen sich für die Schalleistungsmessung zwei Verfahren anwenden, das Hüllflächen-Verfahren und das Hallraum-Verfahren.

5.2.2.1 Hüllflächenverfahren

Beim Hüllflächenverfahren nach DIN 45 635 wird um die Schallquelle eine gedachte Hüllfläche gelegt. Auf dieser Meßfläche A wird der gemittelte und von Fremdgeräuschen und Rückwirkungen des Raumes bereinigte A-Schalldruckpegel \bar{L}_A ermittelt. Unterscheiden sich die einzelnen Meßwerte um weniger als 6 dB, so wird das arithmetische Mittel gebildet, ansonsten ist eine räumliche Mittelung nach DIN 45 635 Blatt 1 vorzunehmen.

Die Meßfläche S wird ins Verhältnis zu der Bezugsfläche S_0 gesetzt und durch logarithmieren das Meßflächenmaß L_S gebildet

$$L_S = 10 \cdot \lg \frac{S}{S_0}. \quad (5.43)$$

Für den A-Schalleistungspegel L_{WA} folgt mit \bar{L}_A und L_S

$$L_{WA} = \bar{L}_A + L_S \quad (5.44)$$

Der Abstand der Hüllfläche zur Schallquelle ist so zu wählen, daß der Meßflächen-Schalldruckpegel \bar{L}_A im Fernfeld gemessen wird. Fremdgeräusche sind nach Tabelle 5.3 zu korrigieren. Zusätzlich ist bei kleinen Räumen und je nach Beschaffenheit der Wände eine Raumkorrektur vorzunehmen, hierzu wird auf DIN 45 635 Blatt 1 verwiesen.

Tabelle 5.3: Korrekturwert für die Berücksichtigung des Fremdgeräusches nach DIN 45 635

Unterschied in dB	3	4...5	6...9
Korrekturwert in dB	3	2	1

Beispiel:

An einem Gasheizkessel mit 15 kW Feuerungsleistung und sog. atmosphärischem Brenner (Brenner ohne Gebläse) werden auf einer quaderförmigen Hüllfläche im Stillstand und im Betrieb in den Flächenschwerpunkten der Hüllfläche die folgenden A-bewerteten Schalldruckpegel gemessen:

Meßpunkt	Stillstand $dB(A)$	Betrieb $dB(A)$	Meßflächen- Schalldruckpegel in $dB(A)$
MP1	40	45	43
MP2	40	46	45
MP3	40	44	42
MP4	40	45	43
MP5	39	48	47

Gesucht ist der Schalleistungspegel, die Schalleistung und der akustische Wirkungsgrad dieser Schallquelle.

Lösung:

Da sich die Meßflächen-Schalldruckpegel um maximal 5 dB(A) unterscheiden, reicht die arithmetische Mittelung der Meßwerte aus.

$$\bar{L}_A = \frac{43 + 45 + 42 + 43 + 47}{5} = 44 \text{ dB(A)}$$

Das Meßflächenmaß L_S wird nach Gleichung 5.39 berechnet

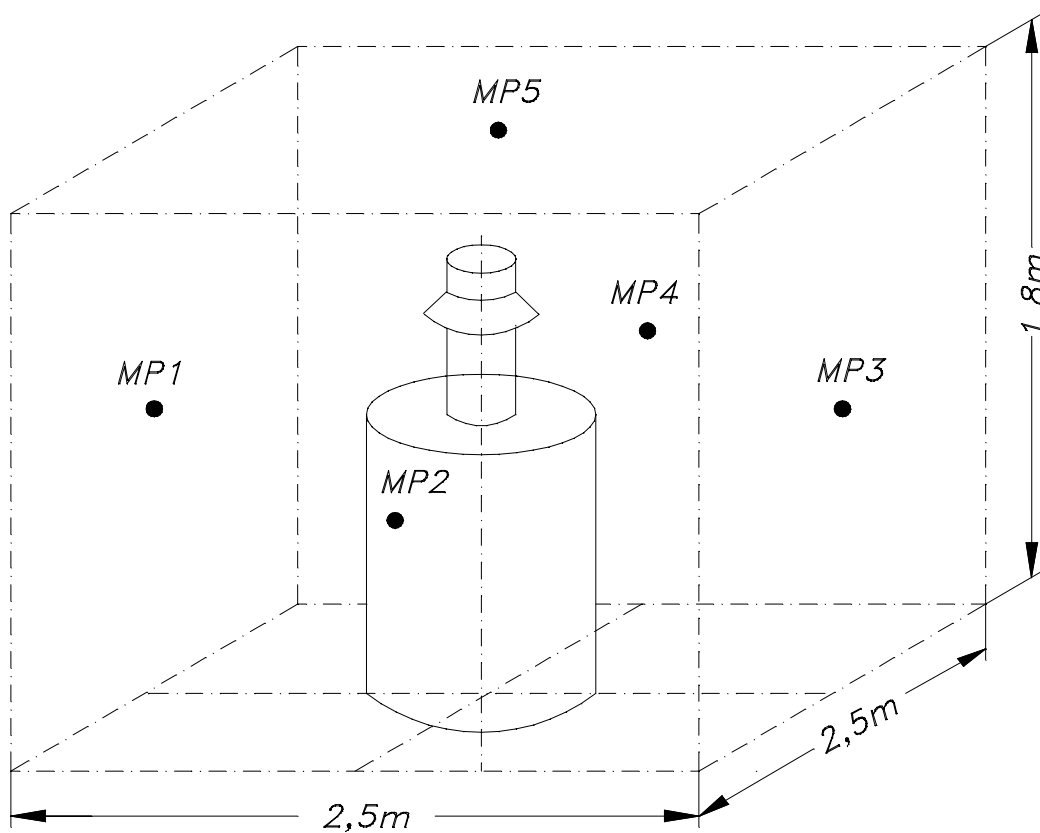


Bild 5.13: Geräuschmessung an einem Gasheizkessel nach dem Hüllflächenverfahren

$$L_S = 10 \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,5\text{m} \cdot 1,8\text{m} + 2,5\text{m} \cdot 2,5\text{m}}{1\text{m}^2} = 13,7 \text{ dB}$$

Der A-Schalleistungspegel des Gasheizkessels beträgt somit

$$L_{WA} = \bar{L}_A + L_S = 57,7 \text{ dB(A)}.$$

Daraus folgt mit Gleichung 5.38 die Schalleistung P

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L_{WA}}{10}} = 10^{-12} \text{ W} \cdot 10^{\frac{57,7}{10}} = 5,88 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

Der akustische Wirkungsgrad $\eta_{Ak} = \frac{P_{Schall}}{P_{Kessel}}$

$$\eta_{Ak} = \frac{5,88 \cdot 10^{-7} \text{ W}}{15.000 \text{ W}} = 3,92 \cdot 10^{-11}$$

5.2.2.2 Hallraum-Verfahren

Der Hallraum ist ein Raum, dessen Begrenzungsflächen hart und gut reflektierend ausgebildet sind. Die Schallwellen werden ständig reflektiert und so entsteht ein diffuses Schallfeld. Charakteristische Größen des Hallraums sind seine Abmessungen und seine Nachhallzeit.

Die Nachhallzeit ist die Zeit, die vergeht, bis der Schalldruckpegel in einem akustisch angeregten Raum nach dem Abschalten der Geräuschquelle um 60 dB abgesunken ist. Die Anregung sollte mit einem breitbandigen Rauschen erfolgen, kann aber auch mit einer Impulsschallquelle, z.B. mit einer Schreckschußpistole, vorgenommen werden. Zur Messung der Nachhallzeit wird ein schnelles Aufzeichnungsgerät verwendet. So z.B. ein Schallpegelschreiber oder ein Speicheroszilloskop. Eine andere Möglichkeit ist die Aufzeichnung des Schallsignals mit einem Tonbandgerät, daß nach der Aufnahme zur Auswertung langsam abgespielt wird.

Hallräume zur Messung des Schalleistungspegels sollten eine große Nachhallzeit von 10s und mehr haben. Die optimalen Nachhallzeiten von Hörsälen liegen bei etwa 1s. In Bild 5.14 wird der idealisierte Verlauf einer Nachhallkurve gezeigt.

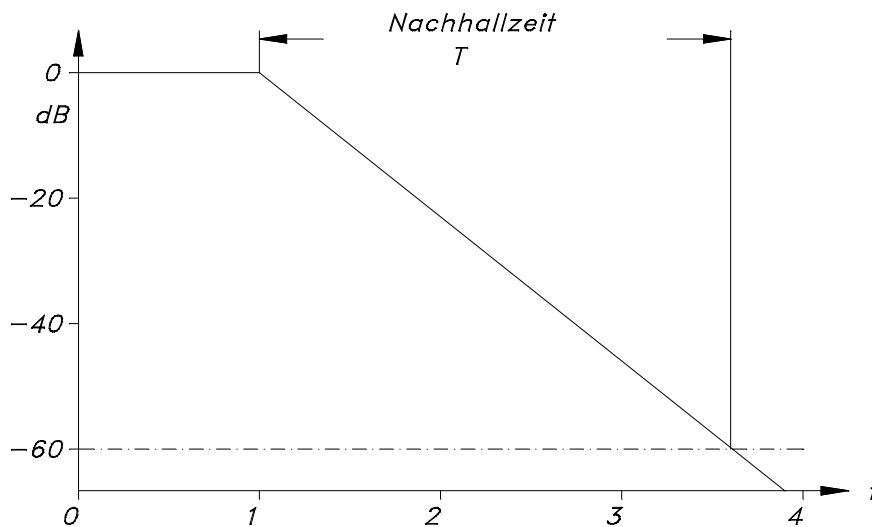


Bild 5.14: Ideale Nachhallkurve zur Bestimmung der Nachhallzeit

Die Abmessungen eines Hallraumes müssen in allen Richtungen größer sein als die Wellenlängen der interessierenden Frequenzen. Die untere Grenzfrequenz für ein diffuses Schallfeld kann nach Gleichung 5.41 vom Volumen des Hallraumes abgeleitet werden.

$$f_g \cdot \sqrt[3]{V} = 1000 \quad (5.45)$$

Daraus resultieren die in Tabelle 5.4 angegebenen Mindestraumvolumina für verschiedene Grenzfrequenzen

Tabelle 5.4: Mindestraumvolumina für verschiedene untere Grenzfrequenzen nach DIN 45 635 Teil 2

untere Grenzfrequenz	Raumvolumen
124 Hz Oktave bzw. 100 Hz Terz	200 m ³
125 Hz Terz	150 m ³
160 Hz Terz	100 m ³
250 Hz Oktave oder 200 Hz Terz und höher	70 m ³

Der Schalleistungspegel L_W wird nach dem Hallraum-Verfahren wie folgt berechnet

$$L_W = L_p - 10 \cdot \lg \frac{T}{T_0} + 10 \cdot \lg \frac{V}{V_0} + 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{S \cdot \lambda}{8 \cdot V} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (5.46)$$

Hierin bedeuten:

L_p	korrigierter, mittlerer Schalldruckpegel
T	Nachhallzeit des Hallraumes in s
T_0	1s
V	Hallraumvolumen
V_0	1m ³
λ	Wellenlänge der Mittenfrequenz des anregenden Geräusches
S	Gesamtoberfläche des Hallraumes
B	Luftdruck in mbar

Die Berechnung des bewerteten Schalleistungspegels L_{WA} ist in DIN 45 635 Blatt 2 näher beschrieben.

5.3 Frequenzanalyse

Der Schalldruckpegel ist nicht die einzige ein Geräusch kennzeichnende Größe. Zusätzlich wird das Frequenzspektrum zur Kennzeichnung eines Geräusches herangezogen. Das Spektrum eines Geräusches wird durch eine Frequenzanalyse festgestellt. Je nach der Breite des erfaßten Frequenzbereiches ist es eine Schmalband-, Terz- oder Oktavanalyse.

Schmalbandanalysen sind notwendig, um tonale Komponenten, wie z.B. Eigenfrequenzen, in einem Geräusch herauszufiltern. Üblicherweise reicht eine Terz- oder Oktavanalyse aus, um ein Geräusch zu charakterisieren.

Terz- und Oktavfilter haben ein konstantes Verhältnis von oberer zu unterer Grenzfrequenz des erfaßten Frequenzbereiches.

Terzfilter:

$$f_o = \sqrt[3]{2} \cdot f_u \quad (5.47)$$

Oktavfilter:

$$f_o = 2 \cdot f_u \quad (5.48)$$

Die Bandbreite von drei Terzen entspricht einer Oktave. Die Mittenfrequenzen der Terz- und Oktavspektren nach ISO-Empfehlung R 266 sind auszugsweise in Tabelle 5.5 aufgeführt.

Aus den Terz- bzw. Oktavspektren lassen sich die Schalldruckpegel und auch die bewerteten Schalldruckpegel ermitteln.

Beispiel:

Aus den Terzspektren des Geräusches eines Erdgasbrenners nach Bild 5.15 sind der Schalldruckpegel und der A-bewertete Schalldruckpegel zu ermitteln.

Der Gesamtschalldruckpegel folgt aus den Terzspektren mit 108 dB und der A-bewertete Schalldruckpegel mit 106 dB(A) .

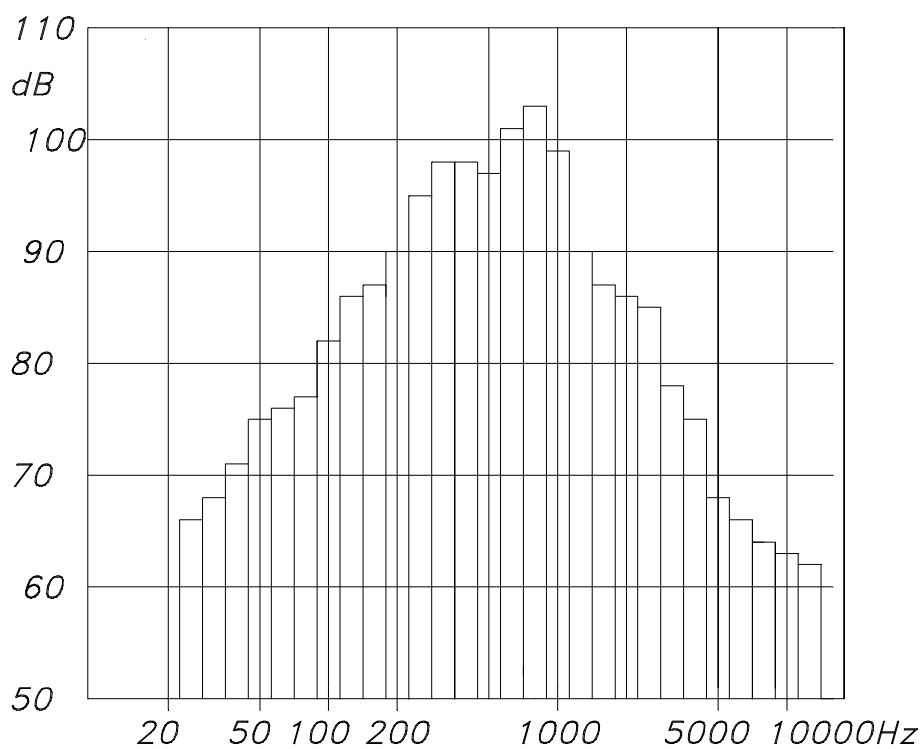


Bild 5.15: Terzspektrum eines Hochgeschwindigkeitsbrenners

Tabelle 5.5: Mittenfrequenzen für Terz- und Oktavspektren

Mittenfrequenz f_m in Hz	f_u Hz	f_o Hz	Terzfilter	Oktavfilter
31,5	28	35,5	+	+
40	35,5	45	+	
50	45	56	+	
63	56	71	+	+
80	71	89	+	
100	89	112	+	
125	112	141	+	+
160	141	178	+	
200	178	223	+	
250	223	280	+	+
315	280	355	+	
400	355	450	+	
500	450	560	+	+
630	560	710	+	
800	710	890	+	
1000	890	1120	+	+
1250	1120	1410	+	
1600	1410	1780	+	
2000	1780	2230	+	+
2500	2230	2800	+	
3150	2800	3550	+	
4000	3550	4500	+	+
5000	4500	5600	+	
6300	5600	7100	+	
8000	7100	8900	+	+
10000	8900	11200	+	

Literaturverzeichnis

- [1] Meyer, E. und Neumann, E.-G.: Physikalische und Technische Akustik, 2. Auflage, Verlag Friedr. Vieweg u. Sohn 1974
- [2] Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch, 2. Auflage, VDI-Verlag 1976
- [3] Veit, I.: Technische Akustik, Vogel-Verlag 1974
- [4] Günther, B. C.; Hansen, K.-H. und Veit, I.: Technische Akustik, Lexika-Verlag 1978
- [5] Otto, D.: Geräuschemission von Industriegasbrennern, gas wärme international 26 (1977) Nr.5
- [6] VDI 2058, Blatt 1: Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft
- [7] Fleischer, G.: Lärm- der tägliche Terror, Georg Thieme Verlag 1990
- [8] Schirmer, W. und Autorenkollektiv: Lärmbekämpfung, Verlag Tribüne Berlin 1979
- [9] Brockmeyer, H.: Akustik für den Lüftungs- und Klimatechniker, 2. Auflage, Verlag C. F. Müller 1978
- [10] Brüel & Kjaer: Bedienungsanleitung für Präzisions-Impulsschallpegelmesser
- [11] Geräuschemission von Maschinen, VDI Berichte 900, VDI-Verlag 1991
- [12] Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik: Handbuch der Klimatechnik, Band 1, Verlag C. F. Müller 1989.