Akustisches Feld

Feldgrößen (Vergleich mit EM-Feld)

$p=-\rho\frac{d\phi}{dt}\hat{=}\vec{E}$ Schalldruck

$\vec{v}=\nabla\phi=\frac{dQ}{dA}\hat{=}\vec{H}$ Schallschnelle

$\kappa=\frac{1}{E}=\frac{1}{\gamma p_0}\approx 7.05\cdot 10^{-6}\frac{m s^2}{kg}\hat{=}\varepsilon$ Kompressibilität (20°C)

(γ=Adiabatenexponent, =1,4 bei zweiatomigen Gasen)

$\rho=\frac{dm}{dV}\approx 1.20\frac{kg}{m^3}\hat{=}\mu$ Dichte (20°C)

$\phi\hat{=}\phi,\vec{A}$ Potential

$p=\vec{c}^2\tilde{\rho}$ $\quad\frac{p}{p_0}=\frac{\tilde{\rho}}{\rho}+\frac{\tilde{T}}{T}$ Verknüpfung von p, $\tilde{\rho}$, $\tilde{T}$

$Q=\frac{dV}{dt}=\oint\vec{v}\cdot d\vec{A}$ $\quad\vec{Q}_A=\frac{d\vec{s}}{dt}=\vec{v}$ Schallfluß

Differentialgleichungen

$\nabla p=-\rho\frac{d\vec{v}}{dt}$ Newton-Gesetz der Akustik

$\nabla\cdot\vec{v}=-\kappa\frac{dp}{dt}$ Hook-Gesetz

Wellen

$w_v=\frac{dW}{dV}=\frac{\vec{I}}{\vec{c}}=\frac{1}{2}\kappa p^2+\frac{1}{2}\rho\vec{v}^2$ Energiedichte

$\vec{I}=\frac{dP}{d\vec{A}}=p\vec{v}=w_v\vec{c}$ Intensität

$\nabla\cdot\vec{I}=-\frac{dw_v}{dt}$

Beziehungen mit $\kappa\rho$ $\vec{c}=\frac{1}{\sqrt{\kappa\rho}}\frac{\vec{k}}{k}=\sqrt{\frac{f+2}{f}\frac{RT}{m_{mol}}}=\sqrt{\frac{f+2}{3f}\overline{v^2}}\approx 20\left[\frac{m}{s}\right]\sqrt{\frac{T}{[K]}}\approx 344\frac{m}{s}$ Schallgeschwindigkeit

(20°C) $\vec{Y}=\frac{\vec{v}}{p}$ akustische Admittanz

$Y_S=\frac{v}{F}$ Strahlungsadmittanz $\quad P_a=\frac{v^2}{\Re(Y_S)}$ $\quad m_S=\frac{1}{\omega\Im(Y_S)}$

Wellengleichungen (κ,ρ = const) (gilt für p, v, ϕ)

$$\nabla^2 p=\frac{1}{\vec{c}^2}\frac{d^2p}{dt^2}$$

$$p(\vec{r},t)=p_0\exp\left(i\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)\right)$$

Ebene Welle

$$\phi=-\frac{i\vec{Q}_{A0}}{\vec{k}}\exp\left(i\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)\right)$$

$$p=\rho\vec{c}\cdot\vec{Q}_{A0}\exp\left(i\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)\right)$$

$$\vec{v}=\vec{Q}_{A0}\exp\left(i\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)\right)$$

$$\vec{Y}=\sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}\frac{\vec{k}}{k}=\frac{1}{\rho\vec{c}}\approx 2.42\cdot 10^{-3}\frac{m^2 s}{kg}\quad(20°C)$$

Kugelwelle (Quellradius R)

$$\phi=-\frac{Q_0}{4\pi r}\frac{1}{1-ikR}\exp\left(i\left(k(r-R)-\omega t\right)\right)$$

$$p=-\frac{i\omega\rho Q_0}{4\pi r}\frac{1}{1-ikR}\exp\left(i\left(k(r-R)-\omega t\right)\right)$$

$$\vec{v}=\frac{Q_0}{4\pi r^2}\frac{1-ikr}{1-ikR}\exp\left(i\left(k(r-R)-\omega t\right)\right)$$

$$\vec{Y}=\sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}\left(1+\frac{i}{kr}\right)\frac{\vec{k}}{k}=\frac{1}{\rho\vec{c}}\left(1+\frac{i}{kr}\right)$$

Akustisch-Elektrische Wandler

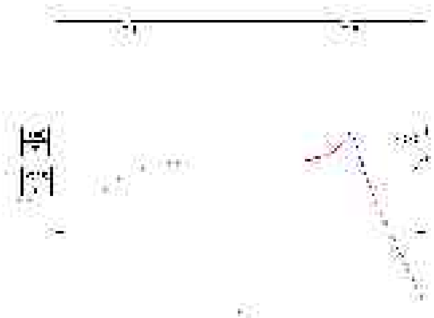
$$\begin{pmatrix} U \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z & -\overline{M} \\ M & z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ v \end{pmatrix}$$

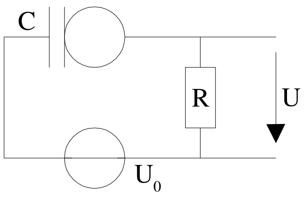
$$F = m\frac{d^2x}{dt^2} + r\frac{dx}{dt} + s\,x \qquad \omega_0^2 = \frac{s}{m} \qquad \eta = \frac{\omega_0 r}{s} = \frac{r}{\sqrt{m\,s}}$$

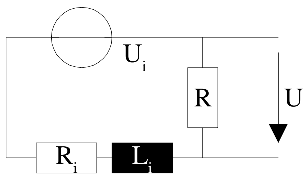
$$x(\omega) = \frac{\frac{F}{s}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + i\,\eta\frac{\omega}{\omega_0}} \qquad v(\omega) = i\,\omega\,x(\omega) \qquad \dot{v}(\omega) = -\omega^2 x(\omega)$$

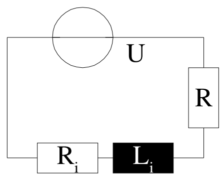
Wandlertyp

$U \sim x$	$U \sim v$	$U \sim \dot{v}$
(z.B. Kondensatormikro)	(z.B. dynamisches Mikro)	(z.B. dynamischer Lautsprecher)
Übertragungsbereich: $<\omega_0$	$\approx \omega_0$	$>\omega_0$









$$\omega_{l_1} = \frac{1}{RC} \approx 2\pi\,8\,\text{Hz} \qquad \omega_r = \frac{R+R_i}{L_i} \qquad \omega_{r_1} = \frac{R+R_i}{L_i} \qquad \omega_{r_2} = \frac{c}{r_{\text{Strahler}}}$$

$$\omega_{l_2} = \text{Druckausgleich} \qquad \omega_l = \text{Druckausgleich} \qquad \omega_l = \text{Druckausgleich}$$

$$C = C_0 \frac{1}{1-\frac{x}{d}} \qquad L = L(x) \qquad L = L(x)$$

$$U = U_0 \frac{x}{d} \qquad U = \frac{B\,l\,R}{R+R_i} v \qquad \dot{v} = \frac{Bl}{m(R+R_i)} U$$

$$\ddot{u} = \frac{U}{p} = \frac{U_0 A}{s\,d} \qquad \ddot{u} = \frac{U}{p} = \frac{B\,l\,A}{r}\frac{R}{R+R_i} \qquad \ddot{u} = \frac{p}{U} = \frac{B\,l}{A(R+R_i)}$$

$$\omega_0 \sim \frac{1}{\sqrt{A}}$$

Raumakustik (α=mittlerer Absorbtionskoeffizient, α_L=Luftdämpfung, A=Raumoberfläche, V=Raumvolumen)

Nachhallzeit

$I(T_H)=I(0)10^{-6} \quad \Rightarrow \quad L(T_H)=L(0)-60\,\mathrm{dB}$ Definition

$l=\frac{4V}{A}$ mittlere freie Weglänge

$T_H=\frac{24\ln(10)V}{c(8\alpha_L V-A\ln(1-\alpha))}\approx-0.161[s]\frac{V}{A\ln(1-\alpha)[m]}$ Eyringsche Nachhallzeit

$T_H=\frac{24\ln(10)V}{c(8\alpha_L V+A\alpha)}\approx 0.161[s]\frac{V}{A_F[m]}$ Sabinesche Nachhallzeit ($\alpha \ll 1$)

$T_H\approx 0.25[s]\frac{V}{n[m^3]}$ nur n Personen absorbieren

$A_F=\sum_i \alpha_i A_i=\alpha A$ äquivalente Fensterfläche

Hallradius / Hallabstand

$I_{direkt}(r_H)=I_{diffus}(r_H) \qquad I_{direkt}=\frac{P}{4\pi r^2} \qquad I_{diffus}=\frac{4P}{A_F}$ Definition

$r_H=\sqrt{\frac{\gamma A_F}{16\pi}}=\sqrt{\frac{3\ln(10)\gamma V}{2\pi c T_H}}\approx 0.141\sqrt{\gamma A_F}\approx 0.0565[m]\sqrt{\frac{\gamma V[s]}{T_H[m^3]}}$ (γ=Bündelungsgrad von Mikrofon/Quelle)
$1\leq\gamma_{Quelle}\leq 25$; $\gamma_{Kugel}=1$, $\gamma_{Acht}=\gamma_{Niere}\approx 3$, $\gamma_{Superniere}\approx 3.6$, $\gamma_{Hyperniere}\approx 4$

Resonanzfrequenzen

$\omega_{xyz}=c\pi\sqrt{\frac{x^2}{X^2}+\frac{y^2}{Y^2}+\frac{z^2}{Z^2}}\approx 2\pi\,172[Hz]\frac{x[m]}{X}$ Eigenschwingungen (X,Y,Z=Raumgröße, x,y,z=Indizes der Schwingung)

Absorber

$\omega_0=c\sqrt{\frac{A_h}{V_h(l+2\Delta l)}}=2\pi\,54.7[Hz]\sqrt{\frac{A_h[m^2]}{V_h(l+2\Delta l)}}$ Helmholtzresonator (A_h=Mündung, V_h=Volumen, l=Hals, $\Delta l\approx 0.8$ r bei kreisf. Mündung)

$\omega_u=c\frac{\pi}{2d}\approx 2\pi\,86[Hz]\frac{[m]}{d}$ Poröser Absorber (d=Abstand von Wand)

$\omega_0=c\sqrt{\frac{\rho A}{m d}}\approx 2\pi\,60.1[Hz]\sqrt{\frac{A[kg]}{m d[m]}}$ Plattenabsorber (d=Abstand von Wand)

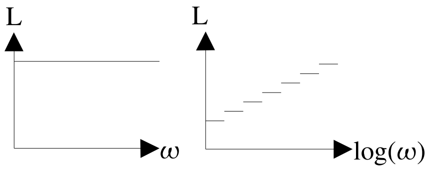
Nahbesprechungseffekt

$L_{Acht}=L_{Kugel}+\log_{10}\left(1+\frac{1}{k^2r^2}\right)[B]$

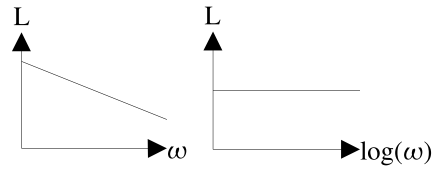
$L_{Niere}=L_{Kugel}+\log_{10}\left(1+\frac{1}{4k^2r^2}\right)[B]\overset{r\ll k}{\approx}L_{Acht}-0.6[B]$

Definitionen

Weißes Rauschen



Rosa Rauschen (1 dB/Terz = 3 dB/Oktave = 10 dB/Dekade)



$k(f)=\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty}U_{if}^2}}{U_{ges}}\approx\sqrt{k_2(f)^2+k_3(f)^2}$ Klirrfaktor (U_{if}=Effektivwert der i. Harmonischen, U_{ges}=Gesamteffektivwert)

$k_i(f)=\frac{U_{if}}{U_{ges}}$ Klirrfaktor i. Ordnung

$a_k=-2\log_{10}(k)[B]$ Klirrdämpfungsmaß

$0\,\mathrm{dB}\,\hat{=}\,20\,\mu\mathrm{Pa}$ Hörschwelle

$dE\sim\frac{dR}{R}$ Gesetz der relativen Empfindungsänderung von Weber/Fechner (E=Empfindung, R=Reiz)