Akustisches Feld

Feldgrößen (Vergleich mit EM-Feld)

$p = -\rho \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \mathrel{\hat{=}} \mathbf{E}$	Schalldruck $\quad p = \mathbf{c}^2\tilde{\rho} \quad \frac{p}{p_0} = \frac{\tilde{\rho}}{\rho} + \frac{\tilde{T}}{T}$	$\mathbf{v} = \nabla\phi = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}A} \mathrel{\hat{=}} \mathbf{H}$	Schallschnelle
$\kappa = \frac{1}{E} = \frac{1}{\gamma p_0} \approx 7{,}05 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{ms}^2}{\mathrm{kg}} \mathrel{\hat{=}} \varepsilon$	Kompressibilität (bei 20 °C)	$\rho = \frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}V} \approx 1{,}20\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \mathrel{\hat{=}} \mu$	Dichte (bei 20 °C)
	($\gamma = 1{,}4$ bei zweiatomigen Gasen)	$\phi \mathrel{\hat{=}} \phi, \mathbf{A}$	Potential

$Q = \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \oint \mathbf{v} \cdot \mathrm{d}\mathbf{A} \quad \mathbf{Q}_A = \frac{\mathrm{d}\mathbf{s}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{v}$ Schallfluß

Differentialgleichungen

$\nabla p = -\rho \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t}$ Newton-Gesetz der Akustik $\quad \nabla \cdot \mathbf{v} = -\kappa \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$ Hook-Gesetz

Wellen

$w_v = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}V} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{c}} = \frac{1}{2}\kappa p^2 + \frac{1}{2}\rho \mathbf{v}^2$ Energiedichte $\quad \mathbf{I} = \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\mathbf{A}} = p\mathbf{v} = w_v \mathbf{c}$ Intensität $\quad \nabla \cdot \mathbf{I} = -\frac{\mathrm{d}w_v}{\mathrm{d}t}$

Beziehungen mit $\kappa\rho$

$\mathbf{c} = \frac{1}{\sqrt{\kappa\rho}} \frac{\mathbf{k}}{k} = \sqrt{\frac{f+2}{f} \frac{RT}{m_{mol}}} = \sqrt{\frac{f+2}{3f} \overline{v^2}} \approx 20{,}063 \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right] \sqrt{\frac{T}{[\mathrm{K}]}} \approx 344 \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ Schallgeschwindigkeit (bei 20 °C)

$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{v}}{p}$ 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 ($\kappa, \rho = \mathrm{const}$) (gilt für p, v, ϕ)

$\nabla^2 p = \frac{1}{\mathbf{c}^2} \frac{\mathrm{d}^2 p}{\mathrm{d}t^2}$	$p(\mathbf{r}, t) = p_0 \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$
Ebene Welle	Kugelwelle (Quellenradius R)
$\phi = -\frac{\mathrm{i}\mathbf{Q}_{A0}}{\mathbf{k}} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$	$\phi = -\frac{Q_0}{4\pi r} \frac{1}{1 - \mathrm{i}kR} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$
$p = \rho \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q}_{A0} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$	$p = -\frac{i\omega\rho Q_0}{4\pi r} \frac{1}{1 - \mathrm{i}kR} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$
$\mathbf{v} = \mathbf{Q}_{A0} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$	$\mathbf{v} = \frac{Q_0}{4\pi r^2} \frac{1 - \mathrm{i}kr}{1 - \mathrm{i}kR} \exp(\mathrm{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$
$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \frac{\mathbf{k}}{k} = \frac{1}{\rho \mathbf{c}} \approx 2{,}451 \cdot 10^{-3}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{Ns}}$	$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \left(1 + \frac{\mathrm{i}}{kr}\right) \frac{\mathbf{k}}{k} = \frac{1}{\rho \mathbf{c}} \left(1 + \frac{\mathrm{i}}{kr}\right)$

Akustisch-Elektrische Wandler

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

$$F = m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + r\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + sx \qquad \omega_0^2 = \frac{s}{m} \qquad \eta = \frac{\omega_0 r}{s} = \frac{r}{\sqrt{ms}}$$

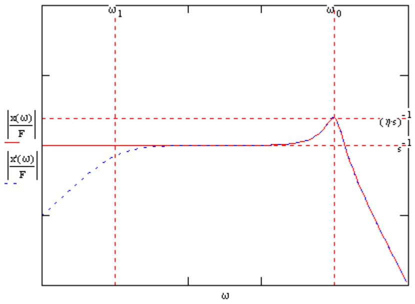
$$x(\omega) = \frac{\frac{F}{s}}{1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}+\mathrm{i}\eta\frac{\omega}{\omega_0}} \qquad v(\omega) = \mathrm{i}\omega x(\omega) \qquad \dot{v}(\omega) = -\omega^2 x(\omega)$$

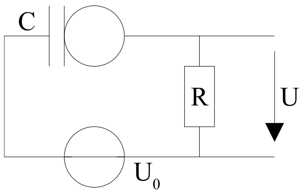
Wandlertyp

$U \sim x$

(z. B. Kondensatormiro)

Übertragungsbereich: $< \omega_0$





$\omega_{l1} = \frac{1}{RC} \approx 2\pi\, 8\mathrm{Hz}$

$\omega_{l2} =$ Druckausgleich

$C = C_0 \frac{1}{1-\frac{x}{d}}$

$U = U_0 \frac{x}{d}$

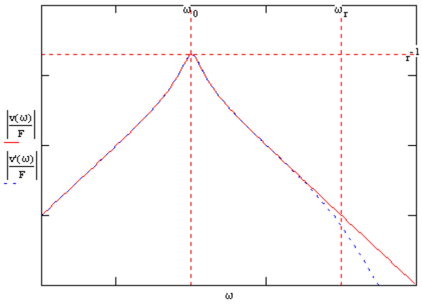
$\ddot{u} = \frac{U}{p} = \frac{U_0 A}{sd}$

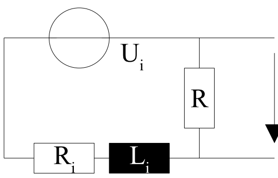
$\omega_0 \sim \frac{1}{\sqrt{A}}$

$U \sim v$

(z. B. dynamisches Mikro)

$\approx \omega_0$





$\omega_r = \frac{R+R_i}{L_i}$

$\omega_l =$ Druckausgleich

$L = L(x)$

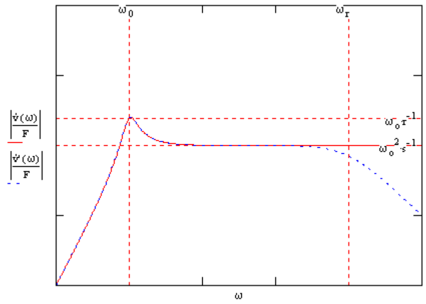
$U = \frac{BlR}{R+R_i} v$

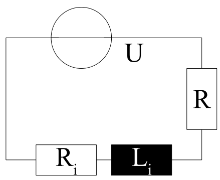
$\ddot{u} = \frac{U}{p} = \frac{BlA}{r}\frac{R}{R+R_i}$

$U \sim \dot{v}$

(z. B. dynamischer Lautsprecher)

$> \omega_0$





$\omega_{r1} = \frac{R+R_i}{L_i} \qquad \omega_{r2} = \frac{c}{r_{\text{Strahler}}}$

$\omega_l =$ Druckausgleich

$L = L(x)$

$\dot{v} = \frac{Bl}{m(R+R_i)} U$

$\ddot{u} = \frac{p}{U} = \frac{Bl}{A(R+R_i)}$

Raumakustik

Nachhallzeit

α: mittlerer Absorbtionskoeffizient, α_L: Luftdämpfung, A: Raumoberfläche, V: Raumvolumen

$I(T_H) = I(0)10^{-6} \;\Rightarrow\; L(T_H) = L(0) - 60\,\mathrm{dB}$	Definition über Intensität	$l = \frac{4V}{A}$	mittlere freie Weglänge
$T_H = \frac{24\ln(10)V}{c(8\alpha_L V - A\ln(1-\alpha))} \approx -0{,}163\,[\mathrm{s}]\,\frac{V}{A\ln(1-\alpha)[\mathrm{m}]}$	Eyringsche Nachhallzeit		
$T_H = \frac{24\ln(10)V}{c(8\alpha_l V + A\alpha)} \approx 0{,}163\,[\mathrm{s}]\,\frac{V}{A_F[\mathrm{m}]}$	Sabinesche Nachhallzeit ($\alpha \ll 1$)		
$T_H \approx 0{,}25\,[\mathrm{s}]\,\frac{V}{n[\mathrm{m}^3]}$	nur n Personen absorbieren		
$A_F = \sum\limits_i \alpha_i A_i = \alpha A$	äquivalente Fensterfläche		

Hallradius / Hallabstand

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

$r_H = \sqrt{\frac{\gamma A_F}{16\pi}} = \sqrt{\frac{3\ln(10)\gamma V}{2\pi c T_H}} \approx 0{,}141\sqrt{A_F} \approx 0{,}0569\,[\mathrm{m}]\sqrt{\frac{V[\mathrm{s}]}{T_H[\mathrm{m}^3]}}$ γ: Bündelungsgrad von Mikrofon/Quelle

$1 \le \gamma_{\text{Quelle}} \le 25,\ \gamma_{\text{Kugel}} = 1,\ \gamma_{\text{Acht}} = \gamma_{\text{Niere}} \approx 3,\ \gamma_{\text{Superniere}} \approx 3{,}6,\ \gamma_{\text{Hyperniere}} \approx 4$

Resonanzfrequenzen

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

Absorber

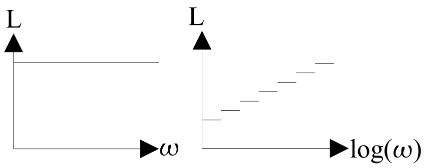
$\omega_0 = c\sqrt{\frac{A_h}{V_h(1+2\Delta l)}} \approx 2\pi\,54{,}7\,[\mathrm{Hz}]\sqrt{\frac{A_h[\mathrm{m}^2]}{V_h(1+2\Delta l)}}$	Helmholtzresonator (A_h: Mündung, V_h: Volumen, l: Hals, $\Delta l \approx 0.8r$ bei kreisf. Mündung)
$\omega_u = c\frac{\pi}{2d} \approx 2\pi\,86\,[\mathrm{Hz}]\,\frac{[\mathrm{m}]}{d}$	Poröser Ansorber (d: Abstand zur Wand)
$\omega_0 = c\sqrt{\frac{\rho A}{md}} \approx 2\pi\,60{,}1\,[\mathrm{Hz}]\sqrt{\frac{A}{md}\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}}\right]}$	Plattenabsorber (d: Anstand zur Wand)

Nahbesprechungseffekt

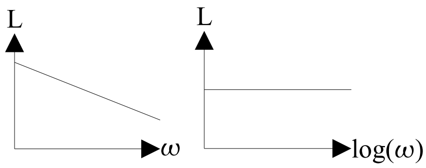
$L_{\text{Acht}} = L_{\text{Kugel}} + \log_{10}\left(1 + \frac{1}{k^2r^2}\right)[\mathrm{B}] \quad L_{\text{Niere}} = L_{\text{Kugel}} + \log_{10}\left(1 + \frac{1}{4k^2r^2}\right)[\mathrm{B}] \overset{r\ll k}{\approx} L_{\text{Acht}} - 0{,}6\,[\mathrm{B}]$

Definitionen

weißes Rauschen



rosa Rauschen (1 dB/Terz = 3 dB/Oktave)



$k(f) = \frac{\sqrt{\sum\limits_{i=2}^{\infty} U_{if}^2}}{U_{\text{ges}}} \approx \sqrt{k_2(f)^2 + k_3(f)^2}$	Klirrfaktor (U_{if}: Effektivwert der i. Oberwelle, U_{ges}: Gesamteffektivwert)
$k_i(f) = \frac{U_{if}}{U_{\text{ges}}}$	Klirrfaktor i. Ordnung
$a_k = -2\log_{10}(k)\,[\mathrm{B}]$	Klirrdämpfungsmaß
$\mathrm{d}E \sim \frac{\mathrm{d}R}{R}$	Gesetz der relativen Empfindungsänderung von Weber/Fechner (E: Empfindung, R: Reiz)
$0\,\mathrm{dB} \mathrel{\hat{=}} 20\,\mu\mathrm{Pa}$	Hörschwelle