

Akustisches Feld

Feldgrößen (Vergleich mit EM-Feld)

$$\begin{aligned}
 p &= -\rho \frac{d\phi}{dt} \hat{=} \mathbf{E} & \text{Schalldruck} & \quad p = \mathbf{c}^2 \tilde{\rho} & \quad \frac{p}{p_0} = \frac{\tilde{p}}{\rho} + \frac{\tilde{T}}{T} & \quad \mathbf{v} = \nabla \phi = \frac{d\mathbf{Q}}{dA} \hat{=} \mathbf{H} & \quad \text{Schallschnelle} \\
 \kappa &= \frac{1}{E} = \frac{1}{\gamma p_0} \approx 7,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ms}^2}{\text{kg}} \hat{=} \varepsilon & \text{Kompressibilität (bei } 20^\circ\text{C)} & & & \quad \rho = \frac{dm}{dV} \approx 1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \hat{=} \mu & \quad \text{Dichte (bei } 20^\circ\text{C)} \\
 & & (\gamma = 1,4 \text{ bei zweiatomigen Gasen)} & & & \quad \phi \hat{=} \phi, \mathbf{A} & \quad \text{Potential} \\
 Q &= \frac{dV}{dt} = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} & \mathbf{Q}_A &= \frac{ds}{dt} = \mathbf{v} & \text{Schallflu\ss} & &
 \end{aligned}$$

Differentialgleichungen

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

Wellen

$$w_v = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{c} = \frac{1}{2} \kappa p^2 + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Energiedichte} \quad \mathbf{I} = \frac{dP}{dA} = p\mathbf{v} = w_v \mathbf{c} \quad \text{Intensit\at} \quad \nabla \cdot \mathbf{I} = -\frac{dw_v}{dt}$$

Beziehungen mit $\kappa\rho$

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

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{v}}{p} \quad \text{akustische Admittanz}$$

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

Wellengleichungen ($\kappa, \rho = \text{const}$) (gilt f\u00fcr p, v, ϕ)

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \quad p(\mathbf{r}, t) = p_0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$

$$\text{Ebene Welle} \quad \text{Kugelwelle (Quellenradius } R)$$

$$\phi = -\frac{i\mathbf{Q}_{A0}}{\mathbf{k}} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)) \quad \phi = -\frac{Q_0}{4\pi r} \frac{1}{1-ikR} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$

$$p = \rho \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q}_{A0} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)) \quad p = -\frac{i\omega\rho Q_0}{4\pi r} \frac{1}{1-ikR} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{Q}_{A0} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)) \quad \mathbf{v} = \frac{Q_0}{4\pi r^2} \frac{1-ikr}{1-ikR} \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \frac{\mathbf{k}}{k} = \frac{1}{\rho c} \approx 2,451 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{Ns}} \quad \mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \left(1 + \frac{i}{kr}\right) \frac{\mathbf{k}}{k} = \frac{1}{\rho c} \left(1 + \frac{i}{kr}\right)$$

Akustisch-Elektrische Wandler

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

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

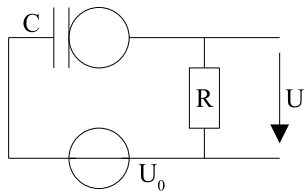
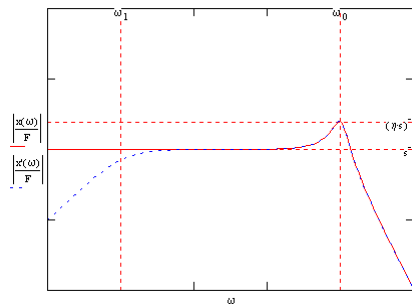
$$x(\omega) = \frac{\frac{F}{s}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + i\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \quad v(\omega) = i\omega x(\omega) \quad \dot{v}(\omega) = -\omega^2 x(\omega)$$

Wandlertyp

$U \sim x$

(z. B. Kondensatormiro)

Übertragungsbereich: $< \omega_0$



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

$\omega_{l2} = \text{Druckausgleich}$

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

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

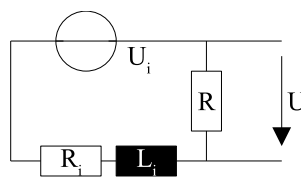
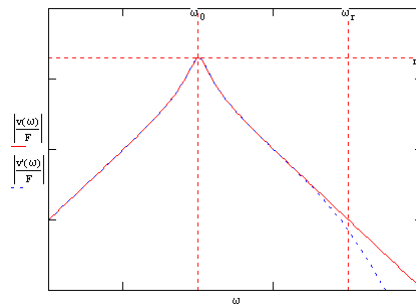
$$\ddot{u} = \frac{U}{p} = \frac{U_0 A}{sd}$$

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

$U \sim v$

(z. B. dynamisches Mikro)

$\approx \omega_0$



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

$\omega_l = \text{Druckausgleich}$

$$L = L(x)$$

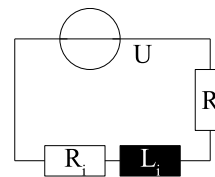
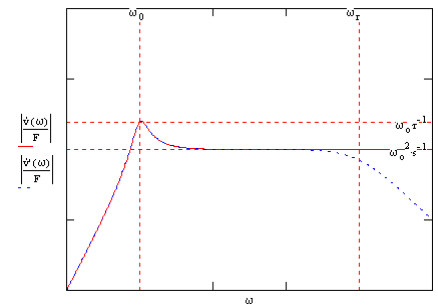
$$U = \frac{BlR}{R+R_i} v$$

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

$U \sim \dot{v}$

(z. B. dynamischer Lautsprecher)

$> \omega_0$



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

$\omega_l = \text{Druckausgleich}$

$$L = L(x)$$

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

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

Raumakustik

Nachhallzeit

α : mittlerer Absorptionskoeffizient, α_L : Luftdämpfung, A : Raumboberfläche, V : Raumvolumen

$$I(T_H) = I(0)10^{-6} \Rightarrow L(T_H) = L(0) - 60 \text{ dB} \quad \text{Definition über Intensität} \quad l = \frac{4V}{A} \quad \text{mittlere freie Weglänge}$$

$$T_H = \frac{24 \ln(10)V}{c(8\alpha_L V - A \ln(1-\alpha))} \approx -0,163 \text{ [s]} \frac{V}{A \ln(1-\alpha) [\text{m}]} \quad \text{Eyringsche Nachhallzeit}$$

$$T_H = \frac{24 \ln(10)V}{c(8\alpha_l V + A\alpha)} \approx 0,163 \text{ [s]} \frac{V}{A_F [\text{m}]} \quad \text{Sabinesche Nachhallzeit } (\alpha \ll 1)$$

$$T_H \approx 0,25 \text{ [s]} \frac{V}{n [\text{m}^3]} \quad \text{nur n Personen absorbieren}$$

$$A_F = \sum_i \alpha_i A_i = \alpha A \quad \text{äquivalente Fensterfläche}$$

Hallradius / Hallabstand

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

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

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

Resonanzfrequenzen

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

Absorber

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{A_h}{V_h(1+2dl)}} \approx 2\pi 54,7 \text{ [Hz]} \sqrt{\frac{A_h [\text{m}^2]}{V_h(1+2dl)}} \quad \text{Helmholtzresonator } (A_h: \text{Mündung, } V_h: \text{Volumen, } l: \text{Hals, } dl \approx 0,8r \text{ bei kreisf. Mündung})$$

$$\omega_u = c \frac{\pi}{2d} \approx 2\pi 86 \text{ [Hz]} \frac{[\text{m}]}{d} \quad \text{Poröser Absorber } (d: \text{Abstand zur Wand})$$

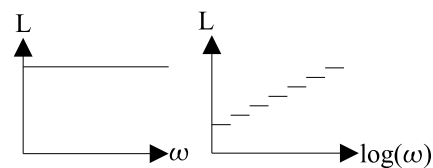
$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{\rho A}{md}} \approx 2\pi 60,1 \text{ [Hz]} \sqrt{\frac{A}{md} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]} \quad \text{Plattenabsorber } (d: \text{Anstand zur Wand})$$

Nahbesprechungseffekt

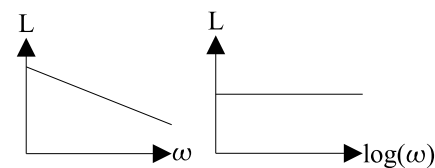
$$L_{\text{Acht}} = L_{\text{Kugel}} + \log_{10} \left(1 + \frac{1}{k^2 r^2} \right) [\text{B}] \quad L_{\text{Niere}} = L_{\text{Kugel}} + \log_{10} \left(1 + \frac{1}{4k^2 r^2} \right) [\text{B}] \stackrel{r \ll k}{\approx} L_{\text{Acht}} - 0,6 [\text{B}]$$

Definitionen

weißes Rauschen



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



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

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

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

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

$$0 \text{ dB} \hat{=} 20 \mu\text{Pa} \quad \text{Hörschwelle}$$