

Középületek akusztikai tervezése

BMEEPES0614

Mesterházy Beáta

bmesterhazy@epsz.bme.hu

Nagy Attila Balázs

anagy@epsz.bme.hu

Iroda: Stoczek épület fszt. 1.

Labor: DCS épület – a Stoczek oldalkijáratával szemben

A zárt helyiségekben kialakuló hangtér – 2: Pontforrás alapú, diffúztéri modell

Feltevések:

- A teremben lévő hangenergiát a *hangenergia-sűrűség* írjuk le.
- A teremben lévő hangenergia a falak hangelnyelő képessége miatt csökken („csap”).
- Az eredő hangtér két tagból tevődik össze:
 - a forrás közvetlen teréből – pontforrás közelítés, távolságfüggés –, és
 - a visszaverődések következtében kialakuló zengő hangtérből (diffúz térből)
- A zengőtéri hangenergia eloszlása egyenletes (független a pozíciótól).

Új jellemző: helyfüggés

Kritikus sugár (kritikus távolság):

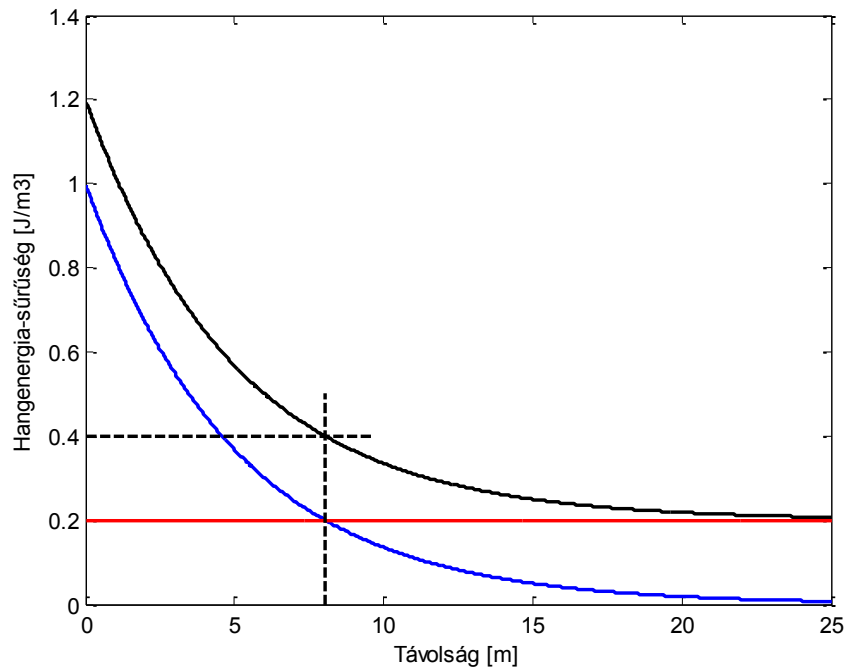
$$r_0 = \left(\frac{R_{rc} D \theta}{16\pi} \right)^{1/2}$$

Teremállandó:

$$R_{rc} = \frac{\bar{\alpha} s}{1 - \bar{\alpha}}$$

Köztér, távotér fogalma

Bevezethető a *beszédérthetőség* fogalma



Az impedancia

A hanghullám bármilyen változása esetén a hullám szállította térfogatáram (Av) nem változik. (vö.: áramkör pontján feszültség és áramerősség)

Általános impedancia: $Z = \frac{p}{Av}$

Ha nincs keresztmetszet változás: **specifikus impedancia:** $z = Z_s = \frac{p}{v}$

Síkhullám esetén $z_0 = \rho_0 c_0 \approx 414 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

Végtelenül merev felület impedanciája: $z = \infty$

Hang terjedési sebessége levegőben

$$c_0 = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} \quad \text{m/s}$$

ahol κ az adiabatikus kitevő (fajhőviszony), levegőre kb. $\kappa = 1,4$ (kétatomos gázok).

Kényelmesebb képlet:

$$c_0 = 331.3 \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273.15}} \quad \text{m/s}$$

ahol ϑ a hőmérséklet Celsius fokban kifejezve.

Milyen tartományban mozog a hangsebesség?

ν	ρ_0	c_0
35 °C	1.1455 kg/m ³	351.88 m/s
20 °C	1.2041 kg/m ³	343.21 m/s
0 °C	1.2922 kg/m ³	331.3 m/s
-10 °C	1.3414 kg/m ³	325.18 m/s
-20 °C	1.3943 kg/m ³	318.94 m/s

Hang terjedési egyéb közegekben

anyag	sűrűség (g/cm ³)	$c_{\text{longitudinális}}$ (m/s)	$c_{\text{nyíró}}$ (m/s)
Acél	7.9	5790	3100
Alumínium	2.7	6420	3040
Arany	19.7	3240	1200
Ezüst	10.4	3650	1610

Víz (deszt.) 0.998 1496.7

Argon 1.783 g/l 319 m/s

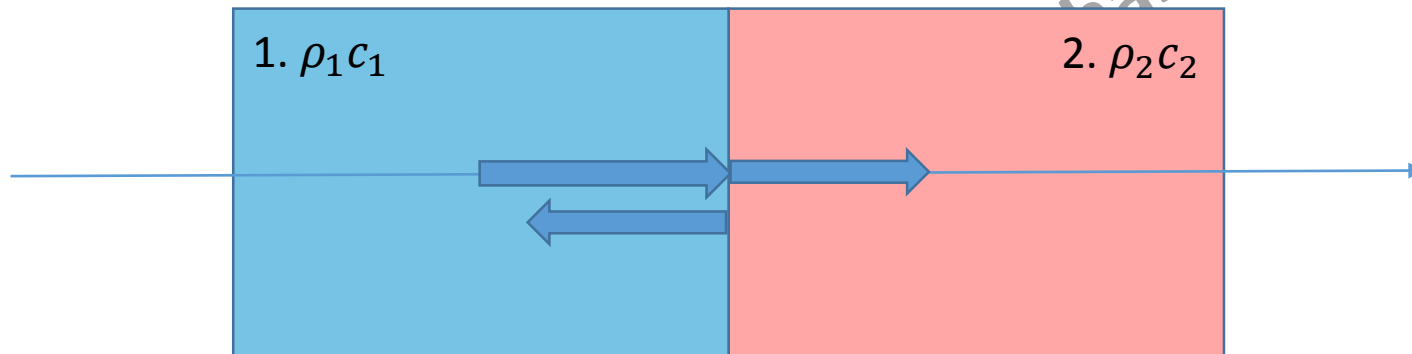
Hullámterjedés két különböző impedanciájú közegben

Az 1D hullámegyenlet általános megoldása:

$$p(t, x) = \hat{p}e^{j(\omega t - kx)}$$

Ahol k a hullámszám:

$$k = \omega/c$$



Beeső:

$$p_b = \hat{p}_b e^{j(\omega t - k_1 x)}$$

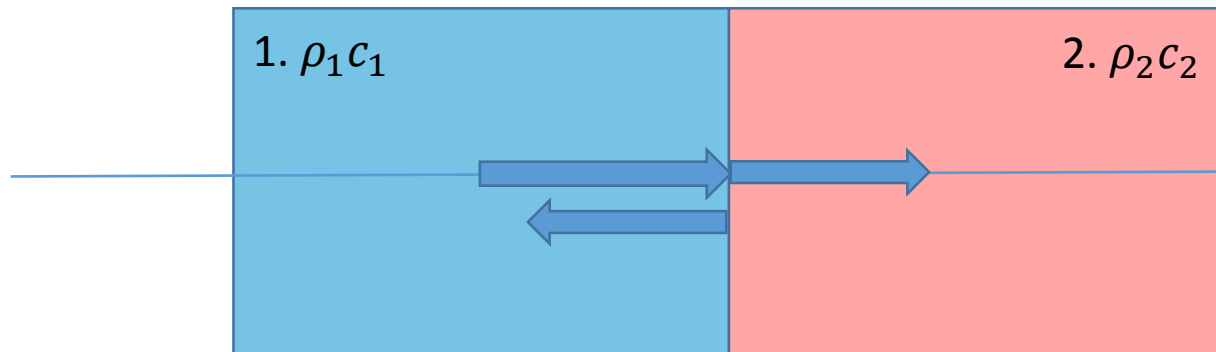
Visszavert:

$$p_v = \hat{p}_v e^{j(\omega t + k_1 x)}$$

Továbbhaladó:

$$p_t = \hat{p}_t e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

Részecskesebességek



Beeső:

$$v_b = p_b / \rho_1 c_1$$

Visszavert:

$$v_v = -p_v / \rho_1 c_1$$

$$v_t = p_t / \rho_2 c_2$$

Az $x = 0$ helyen:

$$p_b + p_v = p_t$$

$$v_b + v_v = v_t$$

Ebből következik:

$$\hat{p}_b + \hat{p}_v = \hat{p}_t$$

$$\frac{\hat{p}_b - \hat{p}_v}{\rho_1 c_1} = \frac{\hat{p}_t}{\rho_2 c_2}$$

Kifejezhető a továbbhaladás és a visszaverődés mértéke:

$$\frac{\hat{p}_v}{\hat{p}_b} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$

$$\frac{\hat{p}_t}{\hat{p}_b} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$

A hullám reflexiója a közegek karakterisztikus impedanciájával kifejezve:

$$\frac{\hat{p}_v}{\hat{p}_b} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

A reflexiós tényező:

A visszavert és a beeső hullám intenzitásának aránya

$$r = \frac{I_v}{I_b} = \frac{|\hat{p}_v|^2 / (2\rho_1 c_1)}{|\hat{p}_b|^2 / (2\rho_1 c_1)} = \left| \frac{\hat{p}_v}{\hat{p}_b} \right|^2 = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2$$

A transzmissziós tényező:

A továbbhaladó és a beeső hullám intenzitásának aránya

$$\tau = \frac{I_t}{I_b} = \frac{|\hat{p}_t|^2 / (2\rho_2 c_2)}{|\hat{p}_b|^2 / (2\rho_1 c_1)} = \left| \frac{\hat{p}_t}{\hat{p}_b} \right|^2 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = \frac{4z_1 z_2}{(z_2 + z_1)^2}$$

A zárt helyiségekben kialakuló hangtér – 3: Hullámegyenlet felírása

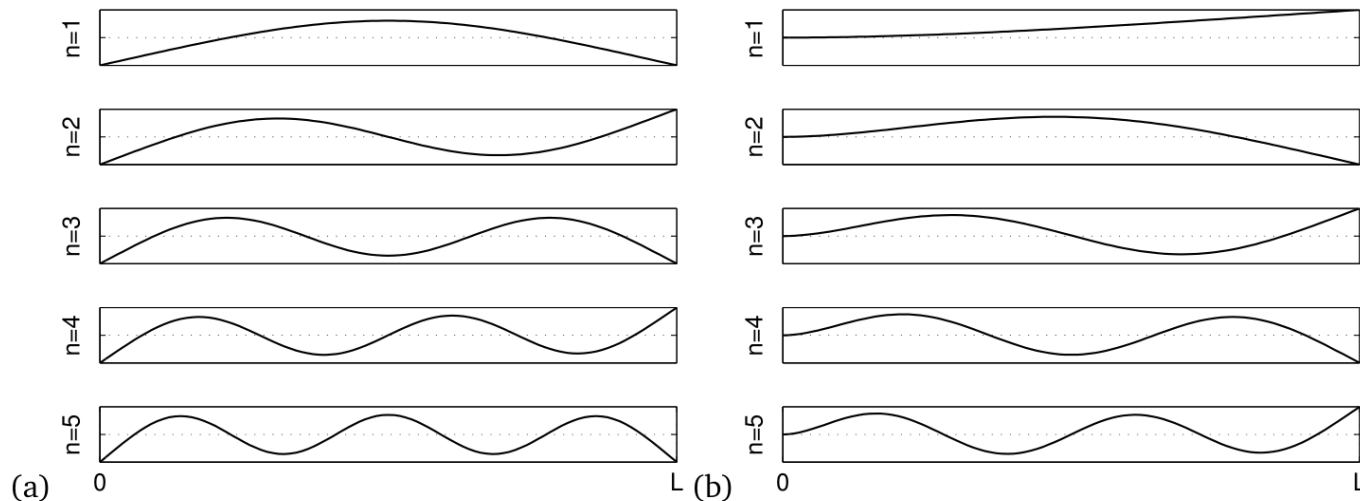
Téglatest alakú helyiségre felírható a hullámegyenlet.

A hullámegyenlet megoldásai háromdimenziós állóhullámok (ún. módusok) – az időfüggést leíró $\exp(i\omega t)$ tag nélkül alakjuk:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = a_{n_x n_y n_z} \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$

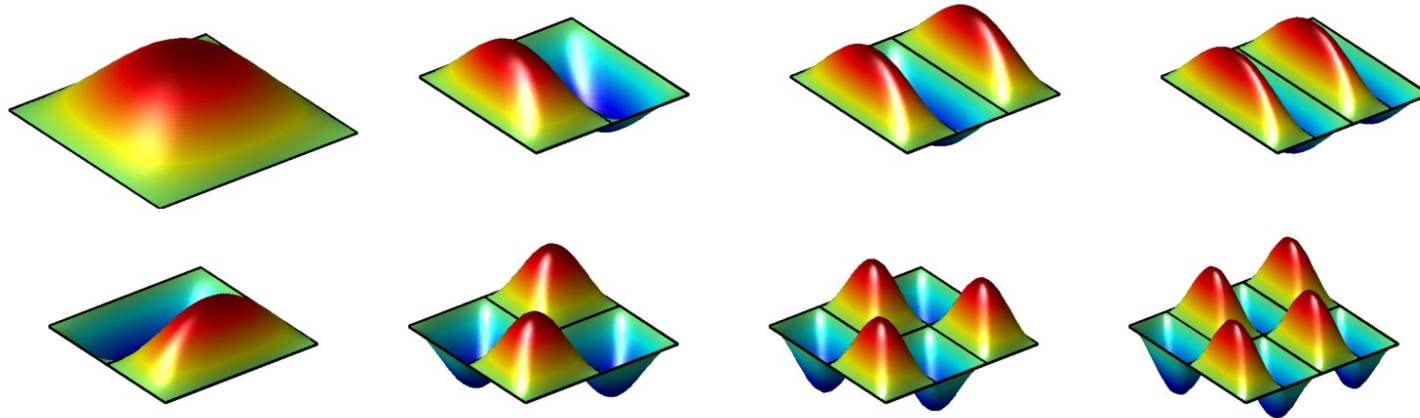
Az eredő hangtér ezek szuperpozíciójaként írható fel.

A módusukhoz tartozó frekvenciák a *sajátfrekvenciák*.

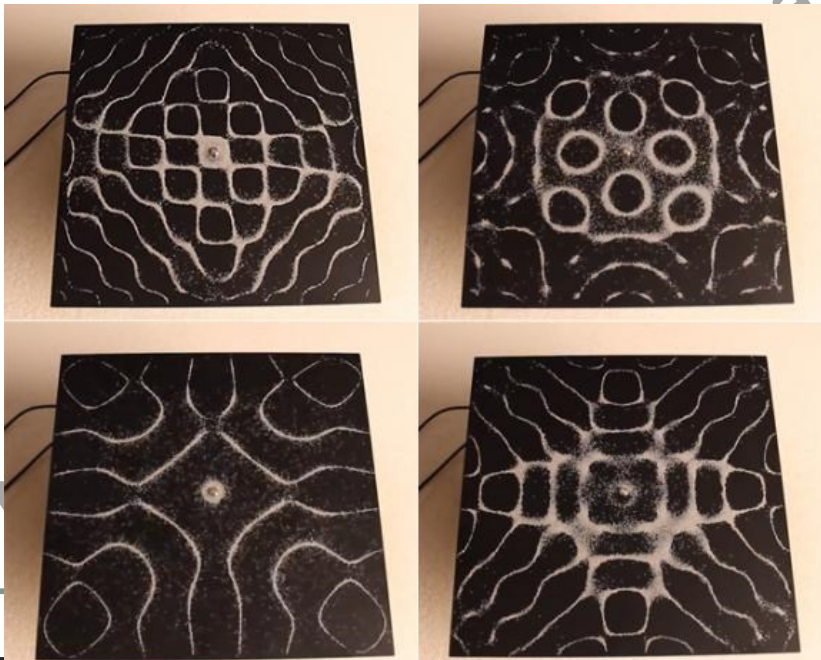


(a) A mindkét végén szabadon hagyott rúd hajlítómódusai. (b) A bal oldalon megfogott, jobb oldalon szabadon hagyott rúd hajlítómódusai. Forrás: Fiala Péter, A hangszerek fizikája, egyetemi jegyzet

A zárt helyiségekben kialakuló hangtér – Hullámegyenlet felírása

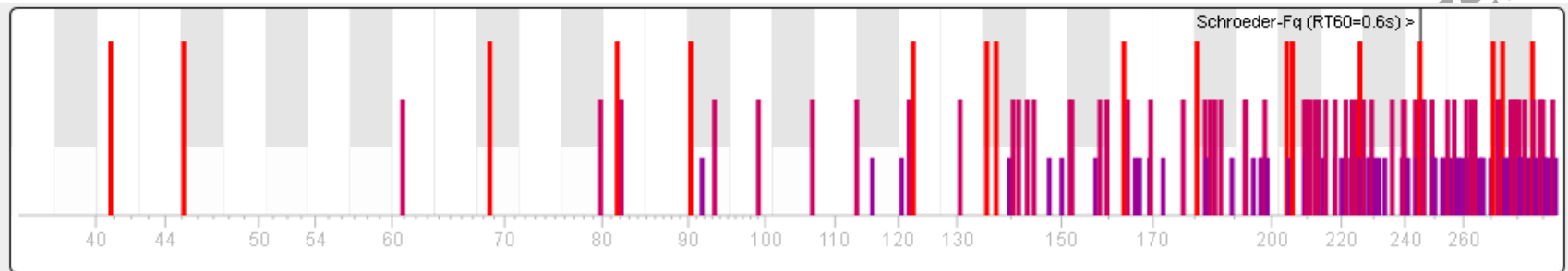


Téglalap alakú membrán módusalakjai $n = 1 \dots 4$ és $m = 1 \dots 2$ értékekre. Forrás: Fiala Péter, A hangszerek fizikája, egyetemi jegyzet



Képek forrása: Internet

A zárt helyiségekben kialakuló hangtér – 3: Hullámegyenlet felírása



Egy 3,8 x 4,2 x 2,5 m élhosszú, téglatest alakú szoba módusfrekvenciái.

Problémák:

- Bonyolultabb geometriájú helyiség módusai nem írhatók fel ilyen egyszerűen.
- A módusok száma végtelen, nagyfrekvenciás számításokhoz a magasabbrendű módusok meghatározására is szükség van.

Schroeder-féle vágási frekvencia

Ezen frekvencia fölött a módussűrűség már olyan nagy, hogy a hangteret nem a modális viselkedés határozza meg, a hangtér statisztikusan, nagyfrekvenciás módszerekkel közelíthető.

$$f_{Schroeder} = \left(\frac{c^3}{4 \ln 10} \right)^{1/2} \left(\frac{RT}{V} \right)^{1/2} = c \left(\frac{6}{A_s} \right)^{1/2}$$