

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

Nem publikus változat, kizárólag a tárgy hallgatói részére!

Irodalom

Hunyadi Zoltán – Juharyné Koronkay Andrea – Reis Frigyes:
Építészeti Akusztika, Műegyetemi Kiadó, 1996, 85017

Reis Frigyes: *Az épületakusztika alapjai*, Terc Kft., 2003

P. Nagy József: *A hangszigetelés elmélete és gyakorlata*, Akadémiai Kiadó, 2004

Tarnóczy Tamás: *Akusztikai tervezés*, Műszaki Könyvkiadó, 1966

C. Smetana: *Zaj- és rezgésmérés*, Műszaki Könyvkiadó, 1975

Kurutz Imre, Szentmártony Tibor:
A műszaki akusztika alapjai, Műegyetemi Kiadó, 2001, 40970



Félév beosztása, követelmények

- Nincs óra:
 - október 24.: vázlattervi hét
- Követelmény:
 - Két ZH
 - november 7.
 - december 5.
 - Mindkét ZH-n minimum 40 %-ot kell elérni, külön-külön.
 - Érdemjegy: összes százalék alapján.
 - Összes százalék = $0.5 * [1. \text{ZH-n elért eredmény} + 2. \text{ZH-n elért eredmény}] +$
+ egyéb „jutalomszázalékok”
 - Skálázás:
 - 0-40 %: elégtelen (1)
 - 40 %-tól: elégséges (2)
 - 55 %-tól: közepes (3)
 - 70 %-tól: jó (4)
 - 85 %-tól: jeles (5)

Akusztika

Hanggal és rezgésekkel (keletkezésükkel és terjedésükkel) foglalkozó interdiszciplináris tudomány.

Rezgés

Oszcilláló mozgás egy nyugalmi állapot körül. (véletlen-periodikus; lengés-rezgés)

Hang

Mechanikai zavar, ami valami közvetítő közegben terjedve az élőlények fülébe jutva ott hangérzetet kelt(het).

Zaj

Zavaró hang vagy rezgés (önmagában vagy más hang/rezgés észlelésében zavar). Információtartalommal nem bíró hang vagy rezgés.

Akusztika területei

- Fizikai akusztika
 - Lineáris akusztika
 - Nemlineáris akusztika
- Aeroakusztika
- Vízalatti akusztika
- Ultrahangok, kvantumakusztika
- Biológiai akusztika
- Pszichoakusztika
- Fiziológiai akusztika
- Orvosi akusztika
- Beszédakusztika
- Numerikus akusztika
- Rezgésakusztika
- Építészeti akusztika
 - **Épületakusztika**
 - Teremakusztika
- Elektroakusztika
- Zenei akusztika

Épületakusztika

- Bevezetés, alapfogalmak
 - Hang, frekvencia, amplitúdó, jel-zaj-viszony
 - Hangnyomás és hangnyomásszint
 - Oktáv- és tercsávok, A-súlyozott szint, stb.
- Épületakusztika
 - Lég- és lépéshanggátlás fogalma
 - Szabályozás
 - Hangterjedés és kerülőutas hangterjedés, rezgésterjedés
 - Hang- és rezgésszigetelési megoldások
 - Tervezés, méretezés
- Teremakusztika
 - Diffúz-téri modell, hangelnyelés fogalma
 - Fejlettebb, helyfüggő modellek (MIMO rendszer)
 - Akusztika paraméterek
 - Teremakusztikai burkolatok
 - Tervezés, méretezés, modellezés
- Akusztikai mérések

Hang

Légköri nyomásra szuperponálódott nyomásváltozás

$$P_{\text{total}} = P_0 + p$$

$$\rho_{\text{total}} = \rho_0 + \rho$$

$$\mathbf{v}_{\text{total}} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{v}$$

(közegsűrűség)
(részecskesebesség)

Hullámegyenlet

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

Megoldásai: harmonikus függvények

$$p(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{\hat{p}(\mathbf{r})e^{j\omega t}\}$$

Helmholtz-egyenlet

$$\nabla^2 p - \frac{\omega^2}{c^2} p = \nabla^2 p - k^2 p = 0$$

Síkhullám

A hangnyomás változása egydimenziós (nincs veszteség -> állandó nyomásamplitúdó):

$$p(\mathbf{r}, t) = \hat{p} \cdot e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$$

ahol $\mathbf{k} = n \cdot 2\pi/\lambda$

Pozitív x-irányba haladó síkhullám:

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

Jellemzése: effektív-értékkel

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(x, t) dt$$

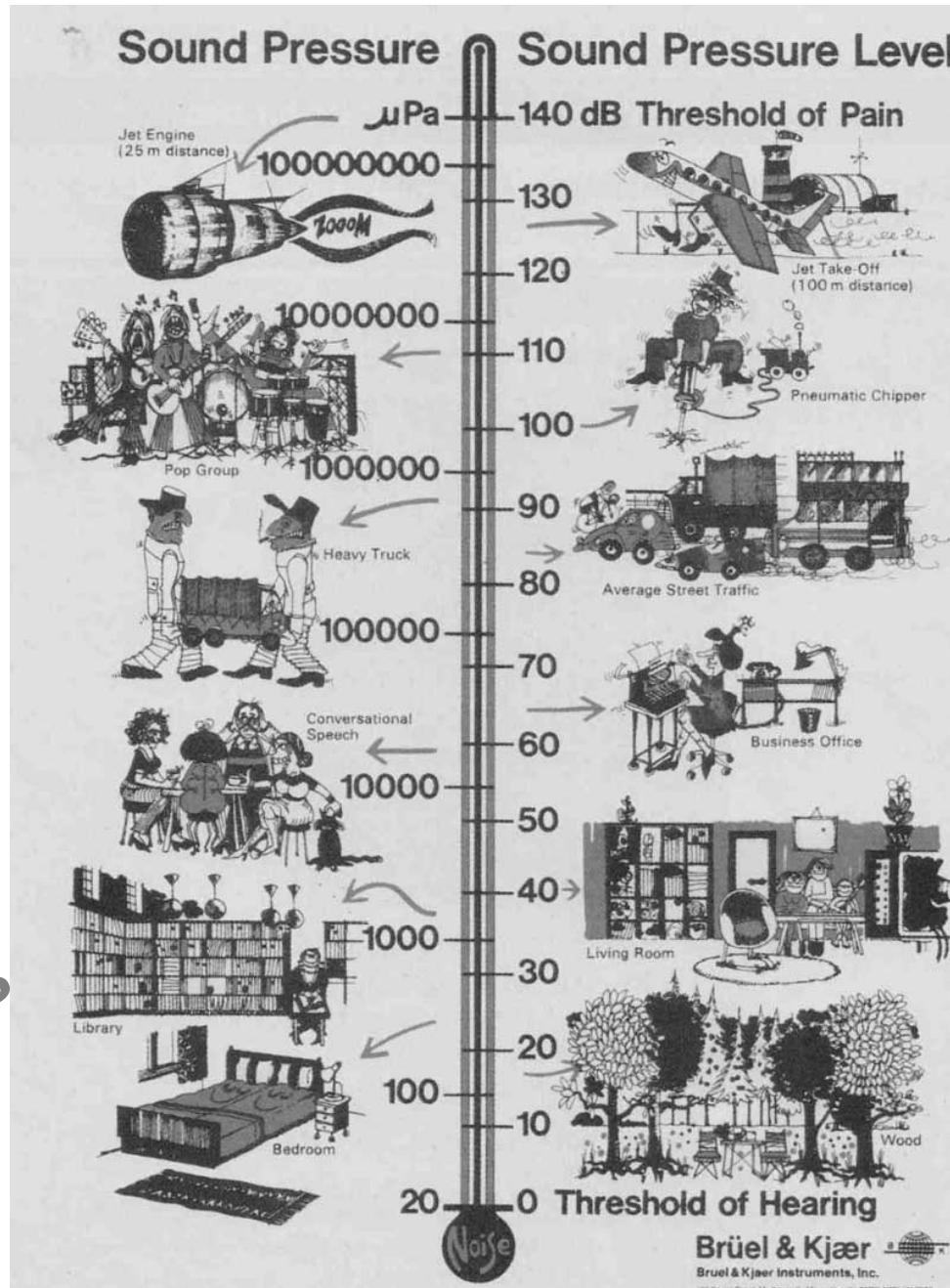
Hangnyomásszint

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{dB})$$

ahol $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

Demo: műveletek szintekkel – kétszeres hangnyomás, fele hangnyomás, 10-szeres hangnyomás

Nem publikus



toí részére!

Forrás: B&K

Gömbhullám

A hangnyomás változása csak a távolságtól függ, gömbszimmetrikus:

$$p(r, t) = \frac{\hat{p}}{r} \cdot e^{j(\omega t - k \cdot r)}$$

Impedancia

Közegre jellemző, karakterisztikus:

$$Z = \rho_0 c_0$$

(Specifikus) akusztikai impedancia:

$$Z_s = \frac{p}{v}$$

Gömbhullámban, ha $kr \gg 1$:

$$Z_s \approx \rho_0 c_0$$

A levegő mint terjedési közeg

A hangsebesség:

$$c_0 = 331,5 + 0,59 T_C$$

(T_C : hőmérséklet Celsiusban kifejezve)

A levegő sűrűsége:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R_d T}$$

(R_d : egyetemes gázállandó)

Levegő karakterisztikus impedanciája

$$\rho_0 c_0 \approx 410 - 420 \text{ (Pa s / m)}$$

Intenzitás

Hangnyomás és részecskesebesség szorzata, vektoriális:

$$I = p \cdot v$$

Intenzitás: egységnyi felületen átáramlott hangteljesítmény.

Intenzitásszint és teljesítményszint

Minden szint jele L – level (EN)

Hangnyomásnál az index p, intenzitásnál I, teljesítménynél (hogy egyértelmű legyen): W

Minden szint relatív – van viszonyítási alap.

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0}, \text{ ahol } W_0 = 10^{-12} \text{ W, azaz 1 pW}$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \text{ ahol } I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \text{ azaz 1 pW/m}^2$$

(Mindkét jellemző teljesítménnyel arányos, ezért nincs négyzetre emelve)

Intenzitás és hangnyomásszint változása pontforrás esetén

Pontforrásnál gömbszimmetrikus terjedés.

Milyen felületet alkot a hullámfront?

- t_1 idő múlva r_1 sugarú gömb,
- t_2 idő múlva r_2 sugarú gömb,
- t_3 idő múlva r_3 sugarú gömb, stb.

és $r_1 < r_2 < r_3$

A hangforrás által kibocsátott teljesítmény fix, ez halad át egyre nagyobb sugarú gömbfelületeken, ezért az egységnyi felületen átáramló teljesítmény egyre kisebb (egyre kisebb az egységnyi felület aránya a teljes gömbfelülethez képest):

$$I_1 > I_2 > I_3$$

A hangnyomás és intenzitás kapcsolata (a forrástól távol):

$$I = p v \text{ és } Z = \frac{p}{v}$$

azaz

$$I = p^2 / Z$$

Intenzitás és hangnyomásszint változása pontforrás esetén - folytatás

$$I = p^2 / Z$$

Az r sugarú gömb felülete $4r^2\pi$, ezért:

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Mivel Z állandó, ezért:

$$p^2 \sim \frac{1}{r^2}$$

$$L_p @ r = L_p @ r_0 - 20 \lg r / r_0$$

Pontforrás esetén a hangnyomásszint a távolság kétszerezésével 6 dB-lel csökken.

Intenzitás és hangnyomásszint változása síkhullám esetén

Síkhullám: végtelen kiterjedésű dugattyú mozog ☺

Síkhullámban a felületen átáramló teljesítmény változatlan (ideális esetben), tehát a távolság függvényében nem fog változni sem az intenzitás, sem a hangnyomásszint.

Természetesen a levegőben terjedés veszteségekkel jár -> erről a későbbiekben tanulunk.

Megjegyzések a mennyiségek mérés technikájához

Hangnyomás: könnyen, közvetlenül mérhető, kézi hangnyomásszintmérő

Hangteljesítmény: hangnyomásmérésre visszavezethető

Intenzitásmérés: létezik intenzitásmérő készülék (alapvetően kétféle elven működhet), de nem gyakori a felhasználása

Részecskesebbség mérése: létezik (pl. microflown), egyáltalán nem gyakori.

Hangmagasság

A harmonikus zavarnál a másodpercenkénti periódusok száma a frekvencia. (f), Hz

Az emberi fül kb. 20 Hz-től 20 kHz-ig érzékel hangot.

20 Hz-en INNEN van az infrahang

20 kHz-en TÚL az ultrahang.

Az épületakusztikában jellemzően (50) 100 Hz-től 4000 (8000) Hz-ig vizsgálódunk*

*Itt a frekvenciatartomány megadásánál volt egy kis ferdítés: ezek nem konkrét frekvenciák, hanem sávközépi frekvenciák, sávokról beszélünk, ezeket később tisztázzuk.

A zenében a fülünk számára legkellemesebb hangköz az oktáv: „ugyanannak” a hangnak halljuk, csak magasabban/alacsonyabban.

Az oktáv hangköznek megfelelő frekvenciaarány: 1:2

A normál zenei „A” hang frekvenciája 440 Hz (divatfüggő érték)

Ennek oktávja 880 Hz, ennek 1760 Hz, ennek 3520 Hz...

Illetve lefele is lépegethetünk: 220 Hz, 110 Hz, 55 Hz...

Férfi énekes nem nagyon szokta a normál A hangot kiénekelni, ez magas.

Hagyományos 6 húros gitár „A” húrja 110 Hz-re van hangolva.

Hangmagasság – logaritmikus és lineáris frekvenciatengely vs. hangszerek

A gitár esetében a fogólap vége felé emelkedik a hangmagasság (nő a frekvencia), és egyre rövidebb távolságra vannak egymástól a bundok (érintők), egyre kisebbet kell lépni a következő magasabb hangig.

A zongora esetében egy oktávra van egy billentyűzetminta, és ez ismétlődik. (2 fekete, 3 fekete). Egy oktáv könnyedén átfogható egy kézzel, egy oktáv fix távolságot jelent.

A fizikai oldalon pedig egyre nagyobb távolságra vannak az oktávok.

Ellentmondás ez?

A gitár esetében a rezgő húr hossza határozza meg a hangmagasságot: minél kisebb a hossz, annál magasabb a frekvencia, fordítottan arányos, rendben van.

A zongora azonban más: ott az exponenciális növekedés logaritmusát látjuk, így adódik a lineáris lépték, azaz a fix oktáv távolság (oktáv méret). Ugyanez van az akusztikában is. (A zongoránál a különböző vastagságú és hosszúságú húrokkal oldják meg a megfelelő frekvenciamenetet.)

Oktávsávok, harmadoktávsávok

Az akusztikában a hangjelenségeket jellemzően

- a) szélessávban vizsgáljuk – ilyenkor a hangnyomásszintet például egyetlen számmal jellemezhetjük.
- b) Oktávsávokban vizsgáljuk: a frekvenciatartományt oktavokra bontjuk (mint a zongorán) – ilyenkor a hangnyomásszintet oktávsávonként jellemezzük egy-egy sávval.

Az akusztikában elfogadott oktávsávok sávközépi frekvenciái:

16, 31.5, (63, [125, 250, 500, 1000, 2000, 4000], 8000), 16000

[]: leggyakrabban használt tartomány, 6 oktávsáv

(): gondosabb vizsgálat során használt tartomány, 8 oktávsáv

Összesen 10 (11) oktávsáv.

A sávok alsó/felső határa az adott sáv sávközépi frekvenciájának és az alatta/felette lévő sáv sávközépi frekvenciájának geometriai közepe:

$$f_{x,\text{felső határ}} = \sqrt{f_x \cdot f_{x+1}}$$

$$f_{x,\text{alsó határ}} = \sqrt{f_{x-1} \cdot f_x}$$

Látható, hogy a sávok egyre szélesebbek -> kitekintés: fehérzaj és rózsazaj

Oktávsávok, harmadoktávsávok - folytatás

c) Harmadoktávsávonként (tercsávonként): ilyenkor az oktávtávolságot 3 lépésre osztjuk, hasonlóan az oktávsávokhoz.

Az akusztikában elfogadott oktávsávok sávközépi frekvenciái:

16*, 20, 25, **31.5**, 40, 50, **63**, 80, 100, **125**,
160, 200, **250**, 315, 400, **500**, 630, **800**, **1000**, 1250,
1600, **2000**, 2500, 3150, **4000**, 5000, 6300, **8000**, 10000, 12500,
16000, 20000**

Összesen: 30(32) tercsáv

*: infrahang tartomány

** : ultrahang tartomány

Itt is igaz: A sávok alsó/felső határa az adott sáv sávközépi frekvenciájának és az alatta/felette lévő sáv sávközépi frekvenciájának geometriai közepe.

d) Hatod-, kilenced-, tizenketted, huszonnegyed-oktávsávonként

e) Keskenysávosan (fix sáv szélességgel -> FFT)

Hangerősség érzékelése, hallásküszöb

Az emberek számára szubjektíven érzékelhető hangerősség nem egyenesen arányos a fizikailag mérhető hangnyomással (sem a hangnyomásszinttel).

A hangerősség frekvenciafüggő: azonos hangnyomású, de különböző frekvenciájú szinuszos jelet nem feltétlenül érzünk ugyanolyan hangosságúnak.

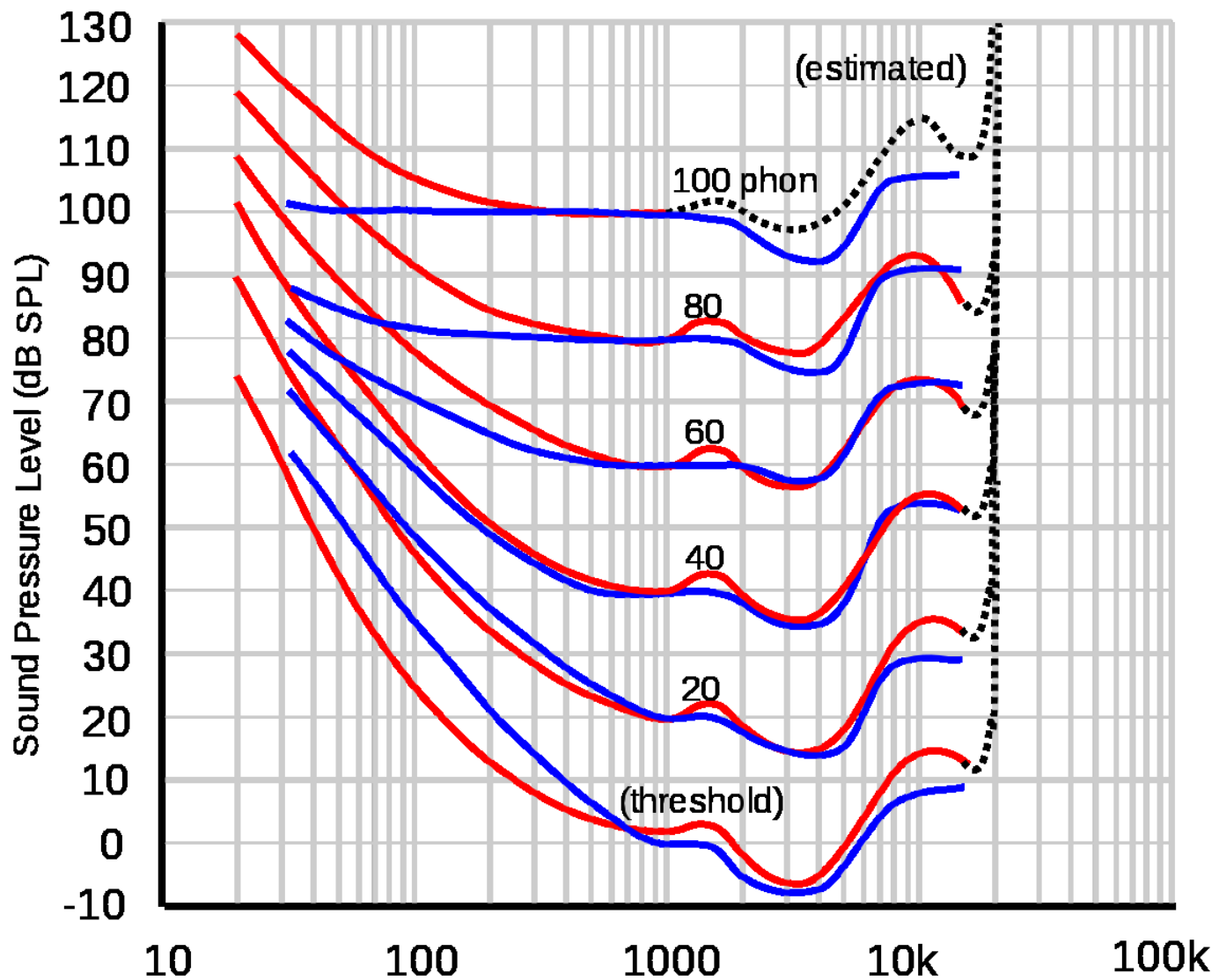
Hallásküszöb

Annak az adott frekvenciájú szinuszos jelnek az effektív értéke, amit egy (átlagos, egészséges hallású, felnőtt) ember már éppen meghall (feltéve, hogy nincs más zavaró zaj).

Fletcher és Munson ezt 1933-ban felmérték (Harvey Fletcher, Wilden A. Munson, *Loudness, its definition, measurement and calculation*, Journal of Acoustic Society of America), ez alapján lett a hangnyomásszint vonatkoztatási alapja a $p_0 = 2^{-5}\text{Pa}$ szint: az 1 kHz-es szinuszos jelhez tartozó hallásküszöb.

A hallásküszöb frekvenciafüggését a következő ábrán láthatjuk.

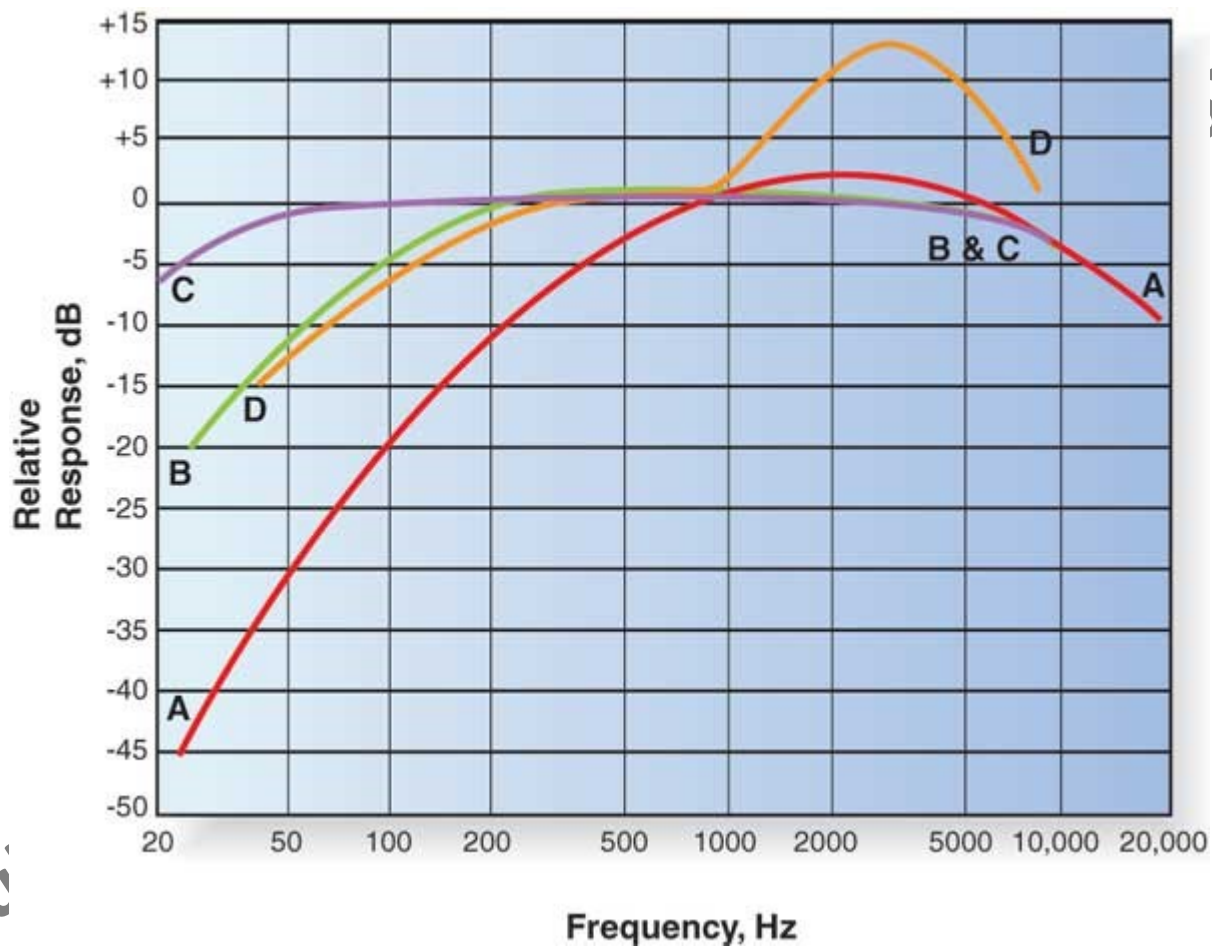
Emellett ugyanitt láthatóak az isophon görbék: azok a görbék, amelyek az azonos hangosságérzetű pontokat kötik össze. Egy adott hang hangossága a vele azonos hangosságérzetű 1 kHz-es szinuszos hang hangnyomásszintje. A hangosság mértékegysége a *phon*.



Equal-loudness contours (red) (from ISO 226:2003 revision)
Fletcher–Munson curves shown (blue) for comparison

Forrás: Wikipedia

Hangnyomásszint-súlyozógörbék

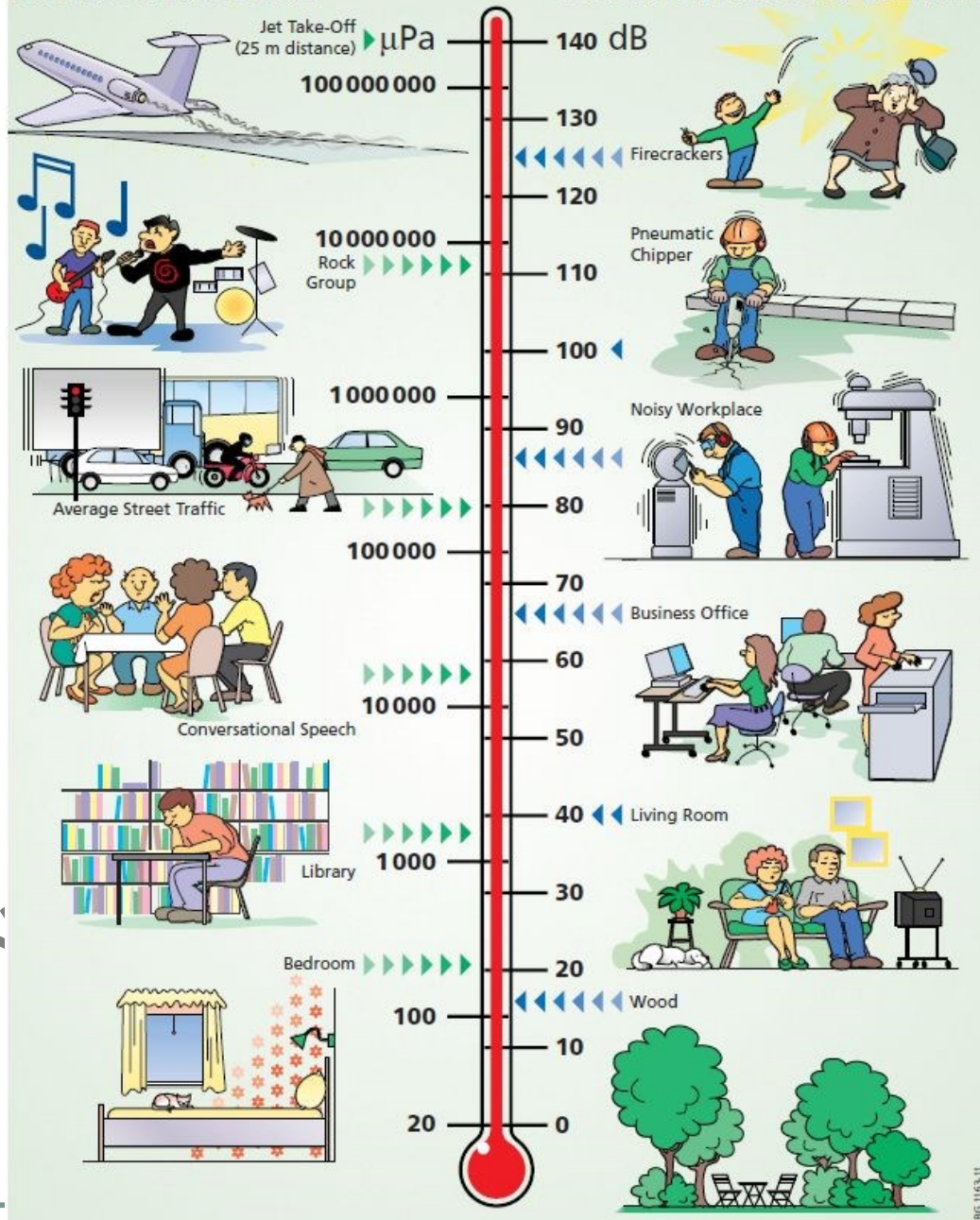


Forrás: extron.de



SOUND PRESSURE

SOUND PRESSURE LEVEL



óí részére!

Nem publik



Egyenértékű szint (folyamatos egyenértékű szint) (Equivalent Continuous Sound Pressure Level)

Az a konstans zajszint, ami a zajeseménnyel azonos energiájú (egy adott időintervallumon belül)

$$L_{eqT} = 10 \lg \frac{1}{T} \left[\int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ dB}$$

Egyenértékű szintek összeadása

$$L_{eqT} = 10 \lg \left(\frac{10^{0.1 L_{eq,1}} + 10^{0.1 L_{eq,2}} + \dots + 10^{0.1 L_{eq,n}}}{n} \right)$$

Különböző hangnyomásszintek

Történelem: A lengőtekerceses mérőműszer (Deprez-műszer) mutatójának gyors kilengését lassították, hogy leolvasható legyen.

A használt ablakszélesség (integrálási idő) szabványos értékei:

„Slow”	$T = 1 \text{ s}$	Időben lassan változó, állandósult zajjelek
„Fast”	$T = 125 \text{ ms}$	Gyorsabban változó zajjelek
„Impulse”	$T = 35 \text{ ms}$	Impulzusszerű hangok pillanatnyi szintjének

minősítésére használjuk.

Csúcsszint (Peak level)

Csúcsszint-detektorral ellátott műszerrel meghatározott maximumszint.
Időállandója: $T < 100 \mu\text{s}$ (I. pontossági osztályú műszer esetén $T = 40 \mu\text{s}$)

Minimum és maximum szintek

Jellemzően Fast időállandóval mért szint (de lehet mással is)

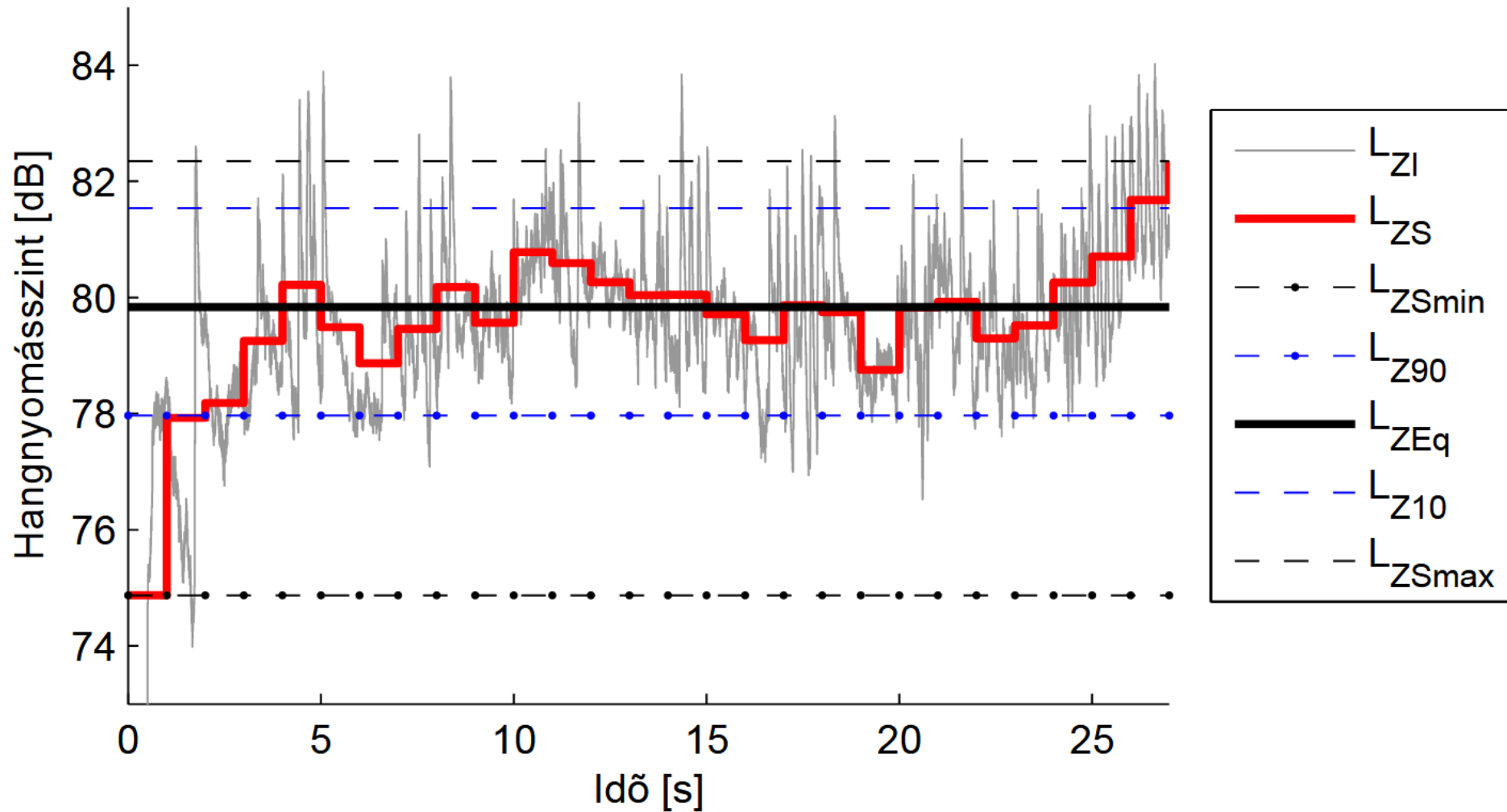
Statisztikai szintek

L_N : az az érték, amit a hangnyomásszint a mérési idő N százalékában meghaladt.

Nem publikus változat, kizárólag a tárgy hallgatói részére!

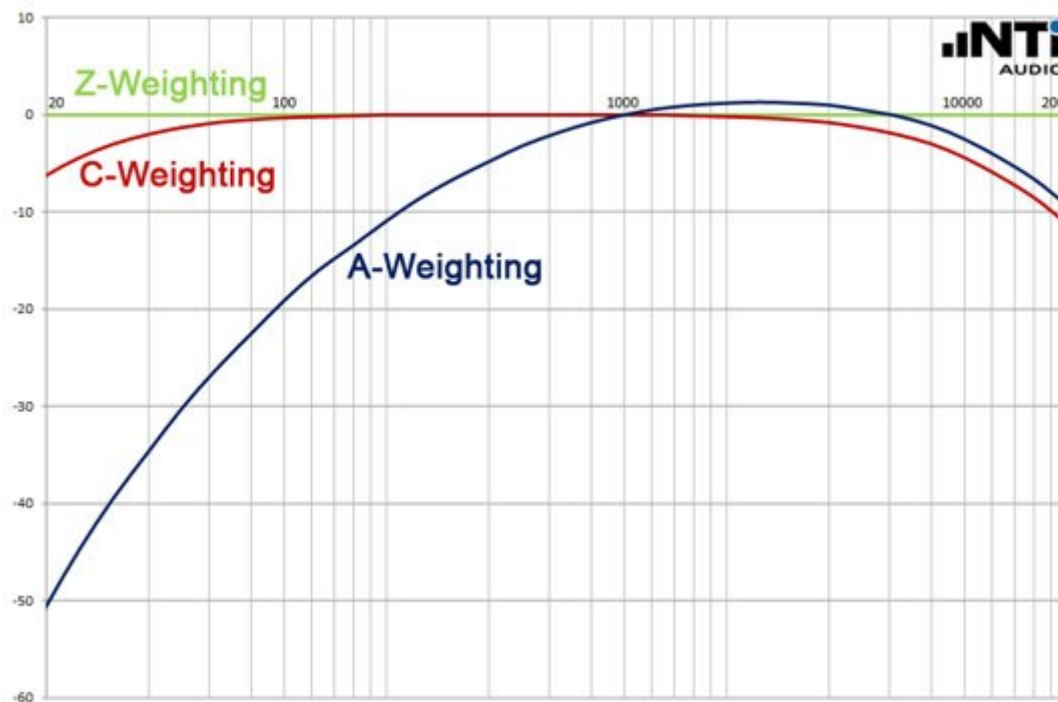


Különböző szintek szemléltetése



Forrás: Fiala, Rucz, „Hangjelek digitális feldolgozása az akusztikai gyakorlatban” – mérési leírás, BME HIT, 2017

Frekvenciasúlyozások



IEC 61672:2014 szabvány adja meg

Frekv.	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
A-súly	-50.5	-44.7	-39.4	-34.6	-30.2	-26.2	-22.5	-19.1	-16.1	-13.4
Frekv.	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
A-súly	-10.9	-8.6	-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0.00	0.6	1.00
Frekv.	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000
A-súly	1.20	1.30	1.20	1.00	0.5	-0.1	-1.1	-2.5	-4.3	-6.6