

Műszaki akusztika

Dr. Wersényi György

Távközlési Tanszék
C 609

A tantárgyról...

- Heti 2+ óra előadás (hétfő 1-2 óra, másik??)
- Labor (bemutató) L1-120
- Számonkérés: írásbeli vizsga, ZH nincs
- Elégséges határa 50%, összesen 3 lehetőség (IV-díj, Neptun jelentkezés!)
- Előadások látogatása nem kötelező
- Írásos jegyzet letölthető
- Letöltések (pdf):
<http://tilb.sze.hu/~wersenyi/index.html>

Tematika

Hanghullámok és rezgés
Fourier-transzformáció, komplex átviteli függvények
Elektroakusztika
Fizikai akusztika
Mechanikai rendszerek és tulajdonságai
Elektromágneses átalakítók fajtái (dinamikus, elektrosztatikus) és működésük
Elektromos-mechanikai-akusztikai analógok és transzformációk
Elektromechanikai számítások
Méréstechnika, hangszint –és zajmérés
Teremakusztikai alapfogalmak

Hangtani alapok

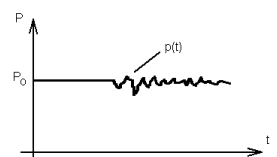
- Rezgőmozgások matematikai leírásai, csoportosítása, a legalapvetőbb definíciók, mértékegységek és a hallás alapjai
- A **rezgés** valamely mennyiség időben periodikusan ismétlődő változása. Ez általában anyaghoz (a közeghez) kötött, amelyben a rezgésállapot terjed
- A közeg lehet légnemű, tipikusan a levegő, de szilárd és folyékony is. Különböző közegben a hang terjedési sebessége ill. annak megtett útja különböző.
- A rezgés leírása
 - az időtartományban (oszilloszkóp)
 - a frekvenciatartományban (spektrum analízátor)
 - hanghullám (akusztikus hullám): 20 Hz – 20 kHz

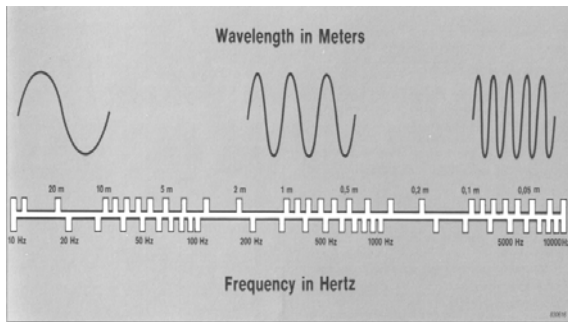
A harmonikus rezgés

- Pillanatérték: $y(t) = A \sin(\omega t)$
- Körfrekvencia: $\omega = 2\pi f$ [rad/sec]
- A az amplitúdó, f a frekvencia [Hz][1/s]
- „tisztá”, „szinuszos” hang, mesterséges
- A rezgésnek van A_0 egyenszintje és φ fázisa amely a környezethez vagy más rezgésekhez való időviszonyt fejezi ki; más néven a függvény értéke a $t=0$ időpillanatban:
 $y(t) = A_0 + A \sin(\omega t + \varphi)$

- Levegőben történő terjedés esetén $A_0 \approx 10^5$ [Pa] = 1 [atm]
- Hanghullámoknál az amplitúdó a hangnyomás
- Az atmoszféranyomás a levegő paramétereitől, időjárástól, tengerszint feletti magasságtól függ
- Kiegyenlítés fülben, mikrofonban!

$$P(t) = P_0 + p(t)$$





- $y(t)$ a kitérés időfüggvénye, melynek deriváltja alapján értelmezik a terjedési sebességet és a gyorsulást:
 - $y(t) = A \sin(\omega t)$
 - $v(t) = y'(t) = dy/dt = \omega A \cos(\omega t)$
 - $a(t) = y''(t) = v'(t) = d^2y/dt^2 = -\omega^2 A \sin(\omega t)$.
- $v(t)$ függvény $\pi/2$ -vel siet, míg az $a(t)$ π -vel késik a kitérés időfüggvényéhez képest, de mindkettő harmonikus, egyfrekvenciás, tiszta szinuszos rezgés, amely a késés mellett csupán amplitúdóban különbözik a kitéréstől

■ Példa:

Legyen $f=50$ Hz, $A = 2$ mm, $\omega = 2\pi f = 100\pi = 314$ rad/sec.

A deriváltak a maximumot akkor veszik fel, ha a szögfüggvény értéke 1.

A maximális sebesség $\cos(\omega t)=1$ esetén: $v_{\max} = A\omega = 628$ mm/s.

A gyorsulás maximális értéke $\sin(\omega t)=1$ esetén: $a_{\max} = -A\omega^2 = -197$ m/s², ami rendkívül nagy, de valóságos érték egy hangszóró membránja esetén!

Hanghullámok megadása

Jelölés	Név	Mertekegység	Kiszámítás	
f	Frekvencia	Hz, 1/s, ciklus/sec	$f=c/\lambda$	Másodpercenként rezgések száma
A	Amplitúdó	általában méter		A kitérés maximuma
T	Periódusidő	sec	$T = 1/f$	Mennyi ideig tart egy teljes periódus
ω	Körfrekvencia	rad/sec	$\omega = 2\pi f$	
λ	Hullámhossz	méter		Egy periódus méterben mért hossza, a maximumok (az azonos amplitúdójú pontok) távolsága.
k	Hullámszám	1/m	$k = \omega/c$	
c	Terjedési sebesség	m/s	$c = \lambda f$	A kitérés deriváltja

A hang sebessége

- A hang terjedési sebessége függ a közeg anyagától, hőmérsékletétől, sűrűségétől.

$$c = \sqrt{\frac{1,4P_0}{\rho}}$$

- ahol P_0 a 10^5 Pa atmoszféranyomás, ρ pedig a levegő sűrűsége: $1,3$ kg/m³.

Ebből $c = 328$ m/s.

Ettől azonban lényegesen is eltérhet a valóságos érték, különösen a hőmérséklet függvényében változó. Szobahőmérsékleten (20°C) a **344 m/s** átlagos értékkel számolhatunk, ha más nincs megadva.

- Más hőmérsékleten:

$$c_2 = 332 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} = 332 * 0,6 \Delta t$$

ahová a t hőmérsékletet Kelvinben kell beírni

- a hangsebesség a 1 fokos hőmérséklet emelkedés esetén 0,6 m/s-al megnő!
- +20 fok esetén már 12 m/s, ezért néha találkozhatunk a $328+12=340$ m/s átlagsebességgel is
- a pontosabb érték 332 m/s-t ad meg a nulla fokos levegőre, és így jön ki a pontosabb 344 m/s

Speed of Sound in Various Substances

Substance	Temperature (°C)	Speed (m/sec)	Speed (ft/sec)
CO ₂	0	258	816
CO ₂	35	274	900
Air	0	331.5	1,087
Air	20	344	1,130
Water Vapor	35	402	1,320
Helium	20	927	3,040
Hydrogen	0	1,270	4,165
Water	15	1,437	4,714
Steel	-	5,000	16,400

- a terjedési sebesség a hullámhossz és a frekvencia szorzata, azaz a frekvencia nem a hullámhossz, hanem a periódusidő reciproka

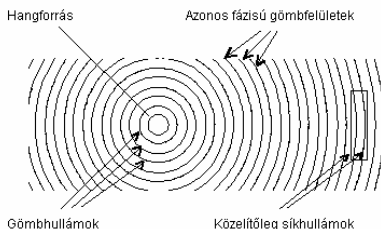
$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{kc}{2\pi}$$

- $\omega = kc$, ahol k az ún. *hullámszám*, melyet sokszor használunk a képletekben. Általánosabban így találkozunk vele: $k = 2\pi/\lambda$.

Műszaki paraméterek

- A legfontosabb az ún. specifikus vagy más néven *akusztikus impedancia*: $Z = p/v$
- Ez általában komplex mennyiség, és a p hangnyomás valamint a v részecskesebesség hányadosa
- Ha a hang forrása pontszerű, és a térben a hang minden irányban akadálytalanul terjedhet, akkor *gömbhullámok* jönnek létre
- Kellően nagy távolságra a forrástól az azonos fázisú gömbfelületek már alig görbülnek, így ezeket már *síkhullámoknak* tekinthetjük
- Speciális esetben, síkhullámoknál az akusztikus impedancia *valós*, értéke: $Z_{\text{síkhullám}} = \rho c$ [Ns/m³] vagy [kg/m²s]

- Levegő esetén a sűrűséget ρ_0 -al jelöljük, és a fenti impedanciát a közeg *karakterisztikus impedanciájának*, vagy más néven *fajlagos akusztikus impedanciájának* is nevezzük
- Síkhullámokra érvényes, hogy a hangnyomás és a részecskesebesség hányadosa állandó: $Z_{\text{síkhullám, levegő}} = p/v = \rho_0 c = 415$ [Ns/m³].
- Ez az érték erősen függ a terjedési sebességtől (közvetve a hőmérséklettől), de ezt az átlagos értéket találjuk a legtöbbször
- Állóhullámok és egyéb hullámok esetén Z értéke komplex szám



- Másik nagyon fontos paraméter: az *intenzitás*
- Definíció: a felületegységen áthaladó (hang)energia átlaga, ahol a felület merőleges a terjedésre, az időegység pedig a másodperc.
- Más szóval, az intenzitás 1 m² felületen, 1 s alatt átáramlott (átlag)energia. A hangnyomással és a részecskesebességgel megadva: $i = pv$ [W/m²]
- Az intenzitás
 - teljesítmény-jellegű mennyiség (10*log)
 - vektoriális, iránya is van
 - az irány a részecskesebességből öröklődik, hiszen a nyomás skaláris mennyiség
 - ha a terjedés iránya nem egyezik meg az intenzitás vektor irányával, akkor az eltérés szögének koszinuszával is be kell szorozni az értéket

■ **Ügyeljünk a fizikai mennyiségek mértékegységére:**

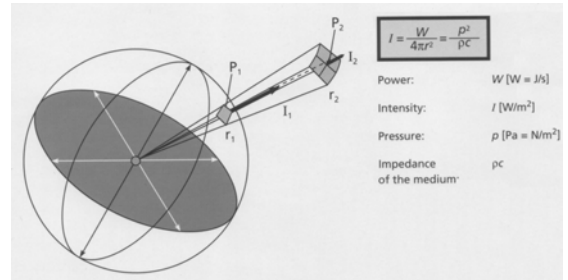
- a *munka* és az *energia* Joule
- a *teljesítmény* Watt, ahol 1 Joule = 1 Ws
- szavakkal: a teljesítmény a munkavégzés sebessége, az időegység alatt átadott energia: 1 Watt = 1 J/s
- az intenzitás definíciójába az energiát és a teljesítményt is bevehetjük, hiszen a kettő arányos egymással. A definíció szerinti a mértékegység J/m²s lenne, hiszen ez pontosan megfelel a m²-en másodperc alatt átáramlott energiával. Azonban egyszerűbb a J/s-ot W-al helyettesíteni.

■ **Az intenzitás kiszámítása:**

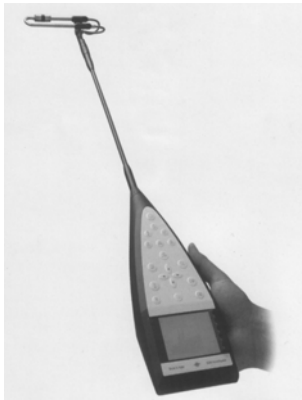
- $I_{\text{haladó síkhullám}} = P^2/\rho c = \rho c v^2$
- $I_{\text{diffúz hangtér}} = P^2/4\rho c$
- a síkhullámú képletből látható, hogy az intenzitás a levegő fajlagos akusztikai ellenállása (amely a legnagyobb sugárzási ellenállás, lásd később) szorozva a részecskesebesség négyzetével
- A hangteljesítmény (W) a kisugárzott teljes energia nagysága másodpercenként, mely a forrásra jellemző és független a mérési pont távolságtól ellentétben a hangnyomásszinttel és az intenzitással
- Szabadtéri terjedésnél a sugár (távolság) duplázásával az intenzitás negyedére, a hangnyomásszint felére esik

Hangminta

- **Intenzitás és hangerősség:** két példa hajóácsolás közben, az első kalapálás fán egy kis teremben, a második acélon egy nagy teremben. Mindkettő kb. azonos intenzitásszintű, mégis eltérő az érzékelt hangerősség.



- Kézi Brüel&Kjaer zajanalizátor intenzitásmérő páros szondával és a mérőszoftverrel



A logaritmus

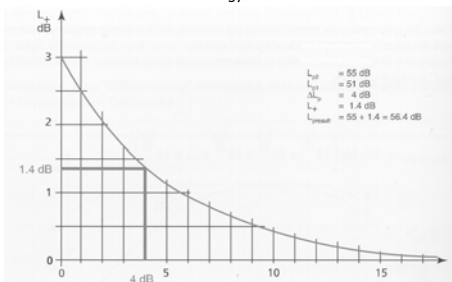
- A hangnyomásnak és az intenzitásnak is létezik dB-ben megadott szintje. Nagyon kell ügyelni arra, hogy ezeket ne keverjük össze se egymással, se a skalár mennyiségekkel
 - Az intenzitásszint:
 $I = 10 \log(I / I_0)$ [dB]
 ahol, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.
 - A hangnyomásszint:
 $P = 20 \log(P/p_0)$ [dB]
 ahol $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$.
- A hangnyomásszint vonatkoztatási értéke p_0 nem ugyanaz, mint az atmoszféranyomás P_0 értéke! A hangnyomásszint angolul Sound Pressure Level, rövidítve SPL.

- A logaritmusikus lépték használata nagyon elterjedt az akusztikában:
 - az érzékelés, a hallásunk logaritmusikus jellegű, az ún. szubjektív hangosság érzet a mennyiségek logaritmusával arányos
 - a minimum és maximum határok nagyon nagyok frekvenciában és amplitúdóban is, ezért a logaritmusikus skálázás könnyebb
 - a számolás egyszerűbb a mennyiségek összeadásával, kivonásával, mint szorzással és osztással, pld. erősítők esetén.

- Példa:
Három feszültségérősítőt kapcsolunk egymás után, az első tízszeresére, a második nyolcszorosára, a harmadik tízszeresére erősíti a bemenőre jutó feszültséget.
 $x_{10} = +20\text{dB}$
 $x_8 = +18\text{dB}$
 $x_2 = +6\text{dB}$
 $x_{160} = +44\text{dB}$
- Az alábbi értékeket célszerű megjegyezni:
+1dB erősítés 12% feszültség és 25% teljesítménykülönbséget jelent
+3dB a kétszeres teljesítményhez tartozik
+6dB a kétszeres feszültséget, azaz a négyszeres teljesítményt jelenti

Hangnyomásszintek összegzése

- 55 dB + 51 dB nem 106 dB, csak 56,4 dB!
- két azonos hangnyomásszintű hang összegzésekor az eredő +3 dB-el nő:
 - 10 dB+10 dB = 13 dB vagy 100 dB+100 dB = 103 dB.



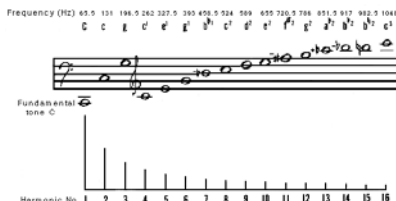
- A frekvenciategelyt is logaritmikusan ábrázoljuk. A legfontosabb felosztások a következők:
oktáv = $2x$ -es frekvencia
dekád = $10x$ -es frekvencia
terc(sáv) = $1/3$ oktáv (one-third octave).
- Az egy oktávval feljebb lévő hang az alaphang kétszerese. Pld. tipikus oktávsváros felosztás az 1, 2, 4, 8, 16 kHz bejelölése a frekvenciategelyen, amelyek között a lineáris távolság ugyanannyi.
- A dekádós lépték még nagyobb: 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz stb.
- A tercásvos felosztást tipikusan zajszintmérés és analízis során használjuk, vagy a zenében. Az angol kifejezésből adódóan „harmadoktávsvárosnak” is nevezik, hiszen egy oktáv három tercából áll.

Hangminta

- Decibel lépcső: 6 dB-es lépésekben csökkenő hangsorozat, amelyet egy 3 dB-es követ.



- Harmonikus sorozat: 16 harmonikus



Hangminta

- Oktáv: két hang egy oktáv távolságra külön, majd együtt



- Különbségi hang: 1500 Hz és 2000 Hz szinusz, majd egy 500 Hz-es (referenciának). Ha két szinusz szól egyszerre, gyakran a különbségi hangot is halljuk. (Ha az eredeti hangok legalább 50 dB intenzitásúak)



Interval Name	Just Intonation		Equal Temperament	Number of Semitones
	Freq. Ratio	Cents	Cents	
Unison	1/1	0	0	0
Semitone (minor second)	16/15	112	100	1
Second (major)	9/8	204	200	2
Third (minor)	6/5	316	300	3
Third (major)	5/4	386	400	4
Fourth	4/3	498	500	5
Fifth	3/2	702	700	7
Sixth (minor)	8/5	814	800	8
Sixth (major)	5/3	884	900	9
Seventh (minor)	9/5	1018	1000	10
Seventh (major)	15/8	1088	1100	11
Octave	2/1	1200	1200	12

Hangminta

- Kritikus sávok: két szinuszhang, az egyik 400 Hz-es, a másik 400 Hz-től emelkedik 510 Hz-ig, ahol is elkülönül az elsőtől (melyek már más kritikus sávba esnek)

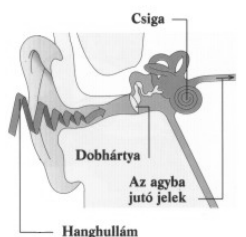


- Férfi és női egyszólamú ének, de oktáv különbség (visszhangos templom)



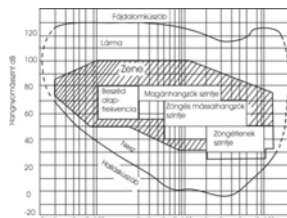
A hallás alapja

- Az emberi hallás részben írható le objektív mérőszámokkal:
 - hangnyomásszint
 - frekvencia (sávzélesség) stb.
- Szubjektív élmény
 - pszichoakusztikus mértékegységek
 - jobban korrelálnak a hallás logaritmikus tulajdonságaival

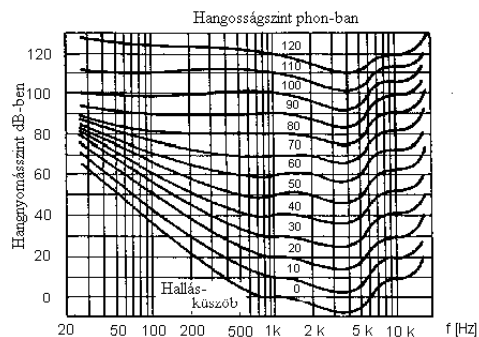


Hallástartomány

- frekvencia-hangnyomásszint diagram
- 20 Hz - 20 kHz (az életkorral egyre csökken)
- 20 Hz alatti rezgéseket csonthallással
- kb. 130 dB-es dinamika (A leghangosabb és a leghalkabb észlelhető hangnyomásszint aránya.)
- 0 dB-nek rögzítjük az éppen meghallható 1 kHz-es szinuszhangot (amelyhez tartozik a bizonyos 20 µPa hangnyomás), akkor a leghangosabb még elviselhető hang hangnyomásszintje ennél mintegy 130 dB-el nagyobb.
- ez a vonal egyenes 130 dB körül és *fájdalomküszöbnek* nevezzük.

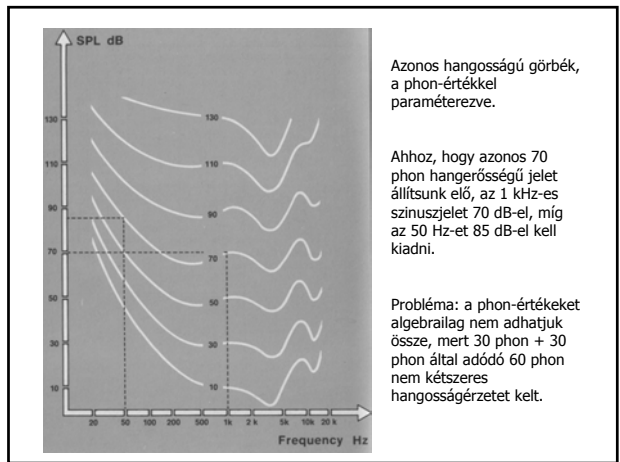


- A *hallásküszöb*, az éppen meghallható különböző frekvenciájú hangokhoz tartozó hangnyomásszint értékeket összekötő görbe
- A 0 dB-es tengelyt definíció szerint 1 kHz-nél metszi, azonban a görbe lemegy a negatív tartományba is
- A hallás a 3-4 kHz-es tartományban a legérzékenyebb, ott pár dB-el halkabban is ki lehet adni a hangot, hogy észleljük
- A középfrekvenciától távolodva romlik az érzékenység: minél kisebb vagy nagyobb a frekvencia, annál hangosabban (nagyobb dB-el) kell kiadni, hogy meghalljuk azt
- Például egy 50 Hz-es hangot több, mint 50 dB-el nagyobb szinten kell kiadni, hogy észleljük, mint az 1 kHz-et.



Azonos hangosságú görbék

- Különböző frekvenciájú hangok szubjektív hangerősségének összehasonlítása
- A *hangerősség*: egy hang hangerőssége annyi [phon], ahány dB a vele azonos hangosságérzetet keltő 1 kHz-es szinuszhang hangnyomásszintje Jele: Ln
- A hallásküszöb görbe a 0 phon-os görbe, hiszen, az összes ezen található pont azonos hangosságérzetű a 0 dB-es 1 kHz-es szinuszhanggal
- Pld. az 50 dB-es 50 Hz-es jel, ami ezen a görbén fekszik is 0 phon-os
- Ha az 1 kHz-es szinusz jel 10 dB-es, akkor az kijelöli a 10 phonos hasonló görbét. Ezeket a görbéket aztán a phon-al paraméterezve ábrázolhatjuk és megkapjuk az azonos hangosságú görbéket, szabványosítójukról elnevezve a *Fletcher-Munson* görbéket (angolban használatos még az Equal Loudness Level is)

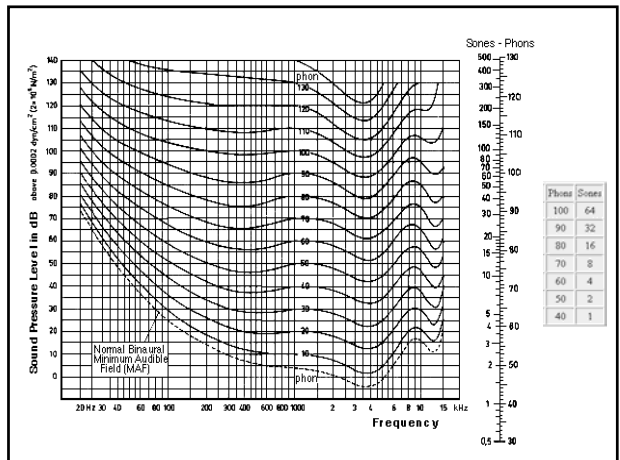


Hangosság

- A hallás logaritmikusága miatt ezt át kell számolni a phon-értékeket alábbi módon:

$$L_p = 2(L_n - 40)/10$$

- Az L_p mennyiség neve *hangosság* (ne keverjük a hangerősséggel)
- Mértékegysége a [sone]
- Nem lineáris leképezés, megfeleltetés
- 40 phon-hoz tartozik 1 sone. Felette rohamosan nőnek az értékek, alatta pedig 0 és 1 közé szorúlnak.
- Az egyre hangosabb hangokat összegezve látható legyen a növekedés hatása is
- 1 sone + 1 sone, az 2 sone és kétszer olyan hangosságú hangot takar
- A 10 phon hangerősség-növekedésnek kétszer akkora hangosság felel meg



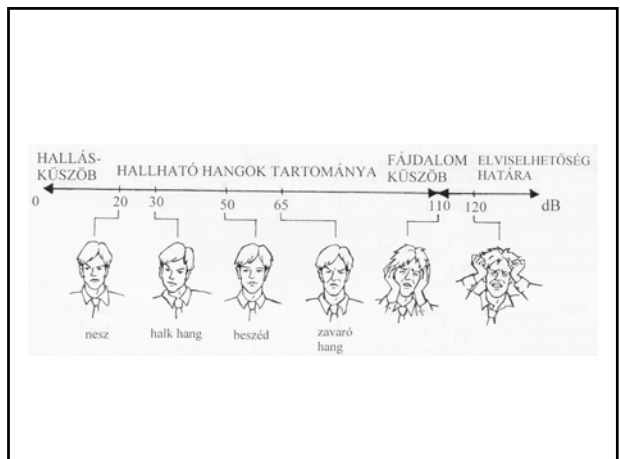
Hangminta

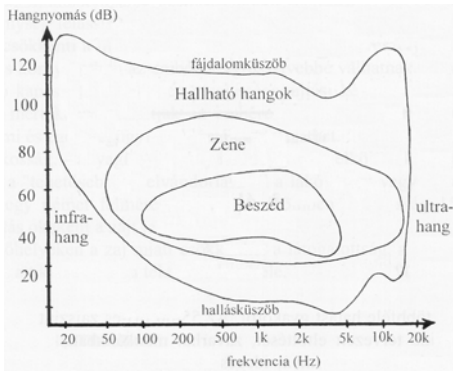
- Azonos hangosság:
12 fokozatú, 3 dB-es
lépcsőjű hangsorozatok.

- 50 Hz;
- 500 Hz;
- 4000 Hz.



Számold meg, hány lépcsőt hallasz, 4000 Hz-nél a legérzékenyebb a fül.





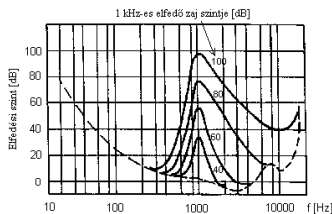
Zajszintek

- Zajok db(A) – később
- egy normál nappali szobában is az átlag zajszint 30-40 dB körüli, a forgalmas utak pedig alacsony 70-90 dB zajszintet okoznak!



Hangelfedés (maszkolás)

- Frekvenciában közeli hangoknál fellép a *hangelfedés*
- Ilyenkor az egyik, zavarónak tekintett hang megemeli a másik, a vizsgálandó hang hallásküszöbét
- Az ábra különféle hangnyomásszintű 1000 Hz-es zavaró hangok által megnövelt hallásküszöböket mutat, annak hangnyomásszintjével paraméterezve
- A hangelfedés nem szimmetrikus: a magasabb frekvenciákon szélesebb tartományban és erősebben jelentkezik



Hangminta

- Szökőkút maszkoló hatása: a hangelfedés jelensége nő (erősödik), ahogy a felvételt készítő közeledik hozzá.



Lokalizáció

- A hangérzet kialakulásában nagyon fontos paraméter a hangforrás helye, iránya, távolsága
- Az irányhallás, közvetve pedig a sztereó és egyéb többcsatornás hangtér-leképezés alapja
- Fontos szerepe van a fülkagylónak, mely irányfüggő szűrőhatása mellett árnyékol, reflektál is, és az antennákhoz hasonlóan iránykarakterisztikával rendelkezik
- A másik fontos tény, hogy két fülünk van, így a hanghullámok eltérő időben (időkülönbséggel) és hangerősséggel (hangnyomásszint különbséggel) érkezik a két fülben, amely alapján következtetünk azok helyzetére

Stacioner rezgések összetétele

- *Stacioner* = időben állandó (amplitúdójú) rezgésekű
- Végtelen ideig tartó, csillapítatlan szinuszos hangok és azok összetételéből állnak
- A szinuszos rezgések előjel- és fázishelyesen, algebrailag összeadhatók, ha azok amplitúdója és frekvenciája független
- A fázishelyes összegzésből adódik, hogy az kioltást és erősítést is eredményezhet. Hangvisszaverődéskor az eredeti hangtól lényegesen eltérő hang is keletkezhet
- A frekvenciatarományban a valós időfüggvényű jelek spektruma komplex: amplitúdó- és fázisspektrumból áll
- Az amplitúdóspektrum a komplex spektrum abszolút értékének logaritmikusan ábrázolt frekvenciamenete $|A|$

- Példa: azonos frekvenciájú, de különböző fázisú stationer rezgések összeadása, ahol

$$y_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Az összegjel is szinuszos jel lesz, azonos frekvenciával, de az amplitúdó és az eredő fázis más lesz:

$$y_{\text{eredő}}(t) = y_1(t) + y_2(t) = A_{\text{eredő}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{eredő}}), \text{ ahol}$$

$$A_{\text{eredő}}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ és}$$

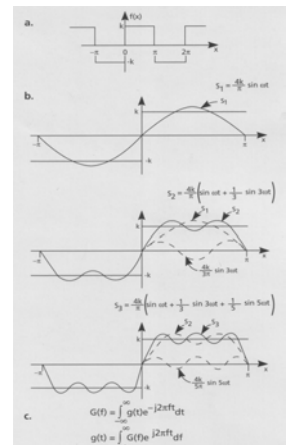
$$\tan(\varphi_{\text{eredő}}) = (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) / (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2)$$

- Ha az összeadandó stationer rezgések frekvenciája különböző ($f_1 \neq f_2$), a helyzet bonyolult
- Az eredményről elmondhatjuk, hogy:
 - ha f_1 és f_2 racionális viszonyban áll, az eredő jel periodikus marad
 - ha f_1 és f_2 aránya nem racionális, bármilyen eredmény kijöhet
 - ha f_1 és f_2 egymáshoz közeli frekvenciák ($f_1 \approx f_2$), akkor *lebegés* lesz, az eredő jel közel szinuszos alakú:
 - az amplitúdó $A_2 + A_1$ és $A_2 - A_1$ között $f_2 - f_1$ ütemében változik
 - frekvenciája $f_2 - f_1$ körül ingadozik
 - a fázisa változó

Fourier-tétel és sorfejtés

- A különböző frekvenciájú jelek eredője egyértelműen felbontható komponenseire
- Elektronikusan: FFT (Fast Fourier Transform)
- Ha az összetett rezgés összetevői egymás egészszámú többszörösei (zenénél), akkor a legkisebbet *alaphang*nak, annak egészszámú többszöröseit *felharmónikus*oknak nevezzük, melyek száma a tízet is meghaladhatja
- Lehet a spektrum folytonos (integrál) vagy digitális, periodikus jel esetén vonalas (szumma)

- Egy periodikus jel (a) leírható szinuszos és koszosinus függvények végtelen összegeként
- Ennek a folyamatnak az első három elemét mutatja a (b) ábra, miként közelít a sorfejtés az eredeti négyyszögjelhez
- Folytonos és nem periodikus jeleknél az összegzés helyett integrálás szerepel (c)

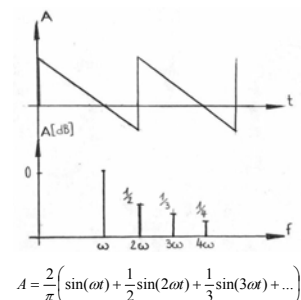


Mérőjelek

- Tipikus, speciális, mesterségesen létrehozott mérőjelek
- Az átviteli rendszereket vizsgáljuk velük
- Célja, hogy olyan spektrumot hozzanak létre, amely a hibákat felnagyítva mutatja
- Fűrész, négyszög, háromszög rezgés, zajok, Dirac-delta (impulzus)

Fűrészjel

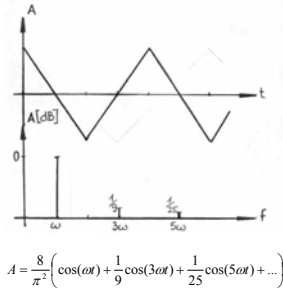
- A pontos spektrum végtelen sok szinuszos összetevőt tartalmaz
- A gyakorlatban elegendő az első 20 is tag is a Fourier-sorban



$$A = \frac{2}{\pi} \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \dots \right)$$

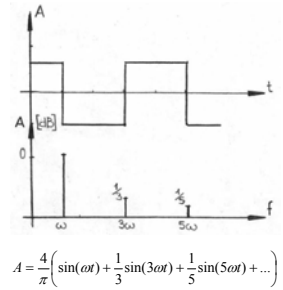
Háromszögjel

- A pontos spektrum végtelen sok koszinuszos összetevőt tartalmaz
- A gyakorlatban elegendő az első 10 is tag is a Fourier-sorban
- Csak páratlan harmonikusok találhatók meg benne



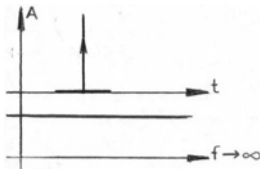
Négyszögjel

- A pontos spektrum végtelen sok szinuszos összetevőt tartalmaz
- A gyakorlatban elegendő az első 10 is tag is a Fourier-sorban
- Csak páratlan harmonikusok találhatók meg benne.



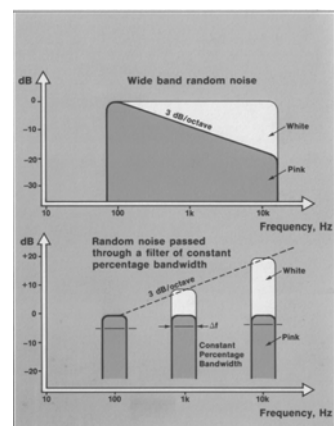
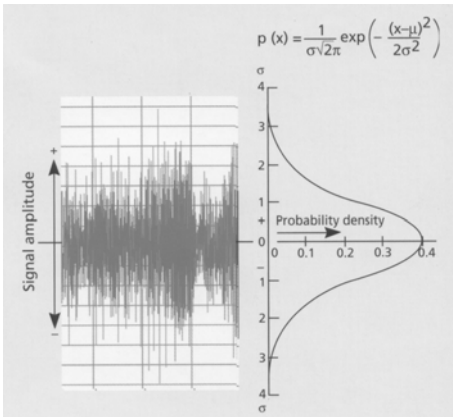
Dirac-delta

- A Dirac-impulzus ideális matematikailag: végtelenül rövid, nulla ideig tart, és végtelenül magas, végtelen energiájú
- A valóságban ez nem realizálható
- A Dirac-delta spektruma végtelen hosszú egyenletes spektrum
- Minél kevésbé igaz az idealizmus a valóságban, annál kevésbé lesz igaz ez a spektrumára is



Zajok

- Fehérzaj (white noise), végtelen ideig tartó „sustorgás”, melynek időfüggvénye semmit nem árul el a jelről, spektruma azonban a kívánt frekvenciatartományban egyenletes – vö. szélessávú zaj (broadband noise)
- Rózsaszín zaj (pink noise), fehérzaj -3 dB/oktáv-al csökkenő verziója
- Tercsávra szűrt zajok, filtered random noise (ált. fehérzajból szűrt)
- Gauss-zaj



Hangminta

- Fehérzaj
- Gauss-zaj (4000 Hz)
- Szinuszhang (100 Hz)
- Négyszögjel (100 Hz)
- Fűrészjel (100 Hz)
- Pulzussorozat
- Háromszög jel (100 Hz)
- Klikk: 1 kHz 40 ms jelből készített 2 ms-os



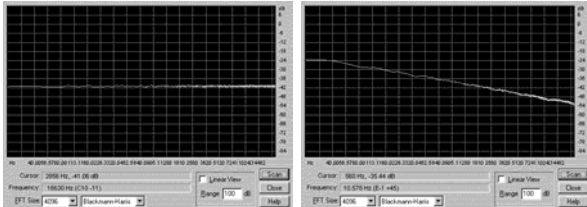
Hangminta

- Négy példa szűrt fehérzajra:
 - low-pass filtered with a cutoff of 1 kHz (aá)
 - high-pass filtered with a cutoff of 1 kHz (fá)
 - band-pass filtered with a centre frequency of 1 kHz (sá)
 - band-reject filtered with a centre frequency of 1 kHz (sz)
- Harmonikus spektrum (cselló)
- Nem harmonikus spektrum



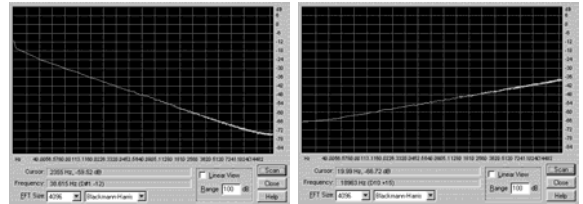
Hangminta

- Fehér zaj
- Rózsaszín zaj ($1/f$ zaj)



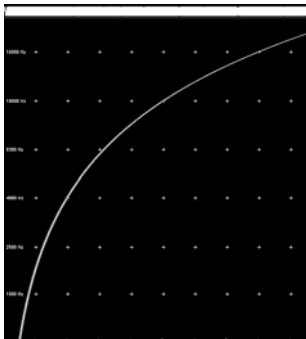
Hangminta

- Barna zaj ($1/f^2$) Brown-mozgás -6dB/oktáv
- Kék zaj (inverz rózsaszín, +3dB/oktáv)



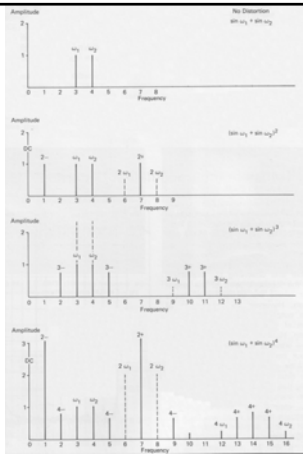
Hangminta

- Lineáris Sweep
20 Hz – 20 kHz



Lineáris és nem lineáris átvitel

- Ha lineáris az átviteli út, akkor nincs torzítás a rendszerben és az átvitt jel formája, időbeni lefutása csak egy konstansban térhet el az eredeti bemenő jeltől (és időkéseletetést szenvedhet)
- Ha ez egynél nagyobb, erősítőről beszélünk, ha kisebb, csillapítóról
- Olyan frekvenciájú jel nem jöhet ki belőle, ami nem ment be
- Nem lineáris átvitelnél új komponensek is megjelennek, ilyenkor az átviteli utat leíró átvitel függvényben bizonyosan találhatóak hatványozó tagok



Torzítási komponensek

- Az alapfrekvenciának egész számú többszörösei jelennek meg: *harmonikus torzítás*.
- A harmonikus torzítás nem lineáris torzítás. Minél magasabb rendű a hatvány, annál több és újabb komponensek jelennek meg.
- Ha megadjuk az összes különböző frekvenciájú torzítási komponens összes teljesítményét, osztva az alaphang teljesítményével és százalékos értékben vagy dB-ben kifejezzük: teljes harmonikus torzítás, Total Harmonic Distortion (THD).
- A harmonikusok hallhatósága függ az alaphangtól és a torzítás nagyságától.
- **Komponensek:**
 $\sin(\omega_1 t)$ és $\sin(\omega_2 t)$, az alaphangok (ez a hasznos bemenő jel)
 $\cos(2\omega_1 t)$ és $\cos(2\omega_2 t)$, melyek a harmonikus torzítás komponensek
 $\sin(\omega_1 - \omega_2)t$ és $\sin(\omega_1 + \omega_2)t$, melyek az ún. intermodulációs torzítási komponensek.

Jeltranszformációk

- Az impulzusválasz (impulzusgerjesztésre), melynek Fourier-transzformáltja maga az átviteli függvény. Ez a leggyorsabb, de nem a legpontosabb módja az átviteli függvény meghatározásának.
- Lineáris rendszereknél elfogadott módszer, és bizonyos jelenségek csak időtartománybeli analízissel figyelhetők meg jól (pld. reflexiók, visszaverődések).
- A legpontosabb, viszont a leglassabb, ha szinuszos jelekkel mérjük végig a tartományt (sweep), amely pontos, jó jel/zaj viszonyú mérést tesz lehetővé, de sokáig tart.
- A köztes megoldás a (fehér)zajjal történő gerjesztés, melynek spektruma frekvenciától függetlenül egyenletes, és kellően nagy energiájú is ahhoz, hogy viszonylag gyors és pontos eredményt kapjunk az átviteli függvényre.

Fourier-transzformáció

- Képlet:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) e^{j2\pi ft} df$$

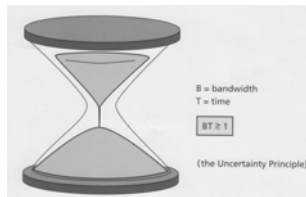
- Végtelentől végtelenig tartó integrálás helyett ún. *ablakolás* van
- Valós időfüggvény spektruma komplex (amplitúdó- és fázis spektrum)
- Az integrálás periodikus jeleknél egyszerű, mert nullától T-ig kell csak végezni, diszkrét jeleknél pedig szummázás
- Csoportfutási időnek, *burkolókésleltetésnek*, angolul group delay-nek hívjuk a fázis spektrum frekvencia szerinti deriváltját:

$$GD(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(f)}{df}$$

Ez általában tiszta időkésltetés (< 1 sec), lehet negatív és pozitív is: a különböző frekvenciájú komponensek terjedési ideje mekkora.

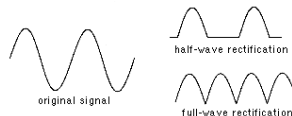
Bizonytalansági elv

- A *bizonytalansági elv* kapcsolódik a véges időablakok integrálásával
- Minél kisebb időablakból végezzük, annál pontatlanabb lesz
- A bizonytalansági elv tehát azt mondja ki, hogy minél rövidebb az integrálási idő (az időablak), annál pontatlanabb lesz az eredmény és viszont, minél pontosabb spektrumot akarunk kapni, annál hosszabb ideig kell az integrálást végezni
- Nagyon keskeny B sáv szélességhez nagyon nagy T mérési idő szükséges (legalább egy teljes periódusidő hosszúságú mérés kell)



Hangminta

- Bizonytalansági elv: rövid szinuszhang, 20 ms kezdetben, majd lecsökkentve 2 ms-ra (szélessávú klikk) és vissza
- Csúshatárolás: szinuszhullám torzítása, amikor analóg erősítőn túlévezérlük
- Egyenirányítási torzítás:
 - 100 Hz szinuszhang
 - félhullámú egyenirányítás
 - teljes egyenirányítás (egy oktávval feljebbinek tűnik)



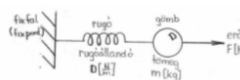
Mechanikai ismeretek

- Elektromechanikai átalakító (transzducer): vagy elektromos rezgést (feszültséget) alakít mechanikává, vagy fordítva.
- Példa: hangszóró, mikrofon
- Leírja az átviteli függvényt, de egy átalakítóra hatással van annak szűk akusztikus környezete is
- Példa: dobozba épített hangszóró (hangsugárzó), melynek paramétereit nem csupán a hangszóró tulajdonságai szabják meg, hanem az azt körülvevő doboz anyaga, belső kialakítása, kamrái, nyílásai, geometriai mérete
- A három „világ” között matematikai kapcsolatot tudunk létesíteni, majd egy közös platformra transzformálunk



Egydimenziós rezgés

- Hanghullám keltése mechanikai rezgőrendszerrel történik.
- Koncentrált paraméterű alapelemekből épülnek fel
- Az egyszerűsített egy dimenziós mozgás modellje az alábbi:



$$\begin{aligned} x(t) &\in [-A, +A] \\ \dot{x}(t) &= \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) &= \ddot{x}(t) \end{aligned}$$

- Adott F erővel kitérítve és magára hagyva, végtelen ideig csillapítatlan szinuszos (harmonikus) rezgést fog végezni
- Az m tömegpont mozgási és helyzeti energiája teljes egészében átalakul egymásba a mozgás során
- A rugó paramétere a D rugóállandó, de az akusztikában ehelyett majd reciprokát, a C rugóengedékenységet fogjuk használni
- Ha van súrlódás: csillapított rezgés

A mozgásegyenlet

- A fizikából már ismerjük ennek a rendszernek a működési egyenletét, amit *mozgásegyenletnek* nevezünk:

$$\Sigma F = F_{\text{rugalmas}} + F_{\text{fékező}} + F_{\text{külső}} = ma$$

ahol

$$a(t) = d^2x(t)/dt^2$$

$$F_{\text{rugalmas}} = -Dx(t)$$

$$F_{\text{fékező}} = F_{\text{súrl.}} = -\text{konst} \cdot v(t)$$

$$F_{\text{külső}} = \text{pld a gravitáció, amit általában kihagyunk a számításból}$$

- Lineáris, közönséges, állandó együtthatójú, inhomogén másodrendű differenciálegyenlet
- Valamilyen $x(t)$ függvény vagy függvények a megoldásai (végtelen sok – ld. Peremfeltételek a $t=0$ pillanatban)

A harmonikus rezgés egyenlete

- Az $F = ma = -Dx$ (csillapítatlan harmonikus rezgés)
- Ilyen egyenlet írja le az ideális, veszteségmentes, lineáris, harmonikus oszcillátorokat.
- Minden olyan dolgot így hívunk, amire a kitéréstkor a kitéréssel arányos és ellenkező irányú erő hat.
- Megoldása minden olyan függvény, amelynek második deriváltja saját magának negatív számszorosa ($\sin$, $\cos$), tetszőleges konstansokkal számolva:

$$x(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t)$$

- Ha a konstansok bármelyike zérus, akkor csak szinuszos vagy koszinuszos tagokat is előállíthatunk
- Szinuszos rezgésnél a rezgés frekvenciája $f=1/T$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$$

Csillapított rezgés egyenlete

- Csillapított rezgésnél az egyenlet bonyolultabb alakú:

$$ma = m \frac{d^2x}{dt^2} = -Dx(t) - K \frac{dx}{dt}$$

- Nem csak a második derivált, hanem egy (konstanssal szorozott) elsőrendű tag is szerepel benne, ez írja le a súrlódási erőt, amely a kitérés deriváltjával (sebesség) arányos, és ellentétes irányú (negatív előjel).
- A *csillapítási együttható* és a *hullámszám*:

$$\beta = \frac{k}{2m} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

- A rezgés (saját) körfrekvenciája: $\omega = D/m = 2\pi f$

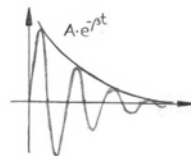
- A rezgés amplitúdója exponenciálisan cseng le. Az egyenletet átrendezve az alábbi egyenlethez jutunk:

$$0 = \frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x$$

- Ennek megoldása kis fékező erő esetén:

$$x(t) = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi)$$

- Nagy fékező erő esetén nem tud kialakulni periodikus rezgőmozgás.



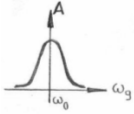
Kényszerrezgés, rezonancia

- Kényszerrezgésnek nevezzük a mozgást, ha egy rezgő rendszer a vele kapcsolatban álló másikra „rákényszeríti” a mozgását, azaz ugyanolyan frekvenciájú rezgésbe hozza azt.
- Ha egy külső F gerjesztőerő az alábbi harmonikus alakú:

$$F_{\text{külső}} = F_0 \cos(\omega_g t)$$

akkor ω_g a rendszerre rákényszerített körfrekvencia.

A rezgés amplitúdója akkor lesz maximális, ha ω_g a rendszer saját ω_0 frekvenciájához közeli érték (rezonancia). Minél kisebb a β -együttható, annál keskenyebb a rezonancia görbe harangalakja.



Rezgések a hangkeltésben

- Egy rezgő rendszer jellege lehet tömeg, rugalmasság vagy ellenállás jellegű
- A *hangszóró* mindhárom: a rezonanciapontban ellenállás jellegű (valós), a súrlódás dominál. Felette tömeg (induktív) jellegű, alatta rugalmas (kapacitív)

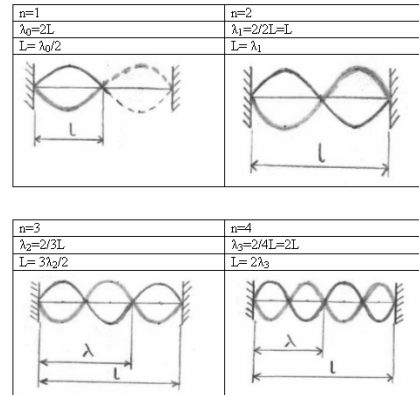
param./jelleg	$x(t)$	$v(t)$	$a(t)$
rugalmas	független	ω	ω^2
ellenállás	$1/\omega$	független	ω
tömeg	$1/\omega^2$	$1/\omega$	független

- A *hangszer* több szabadságfokú rezgőrendszer, több rezonanciafrekvenciával. Ennek alapjait a húrok rezgésére vezetjük vissza

Alapvető rezgések és módusai

- 1. Megfeszített húr (pld. gitár, hegedű). A rezgés az alaphangból és a felharmonikusokból áll. Egy dimenziós rezgés.

Példa: l hosszúságú, mindkét végén befogott húr lehetséges állóhullámú rezgésformái (ún. módusok). A módusok mondják meg, hogy l -re hány állófélhullám fér rá. Az általános képlet az n -dik módusra: $\lambda_n = 2L/n$



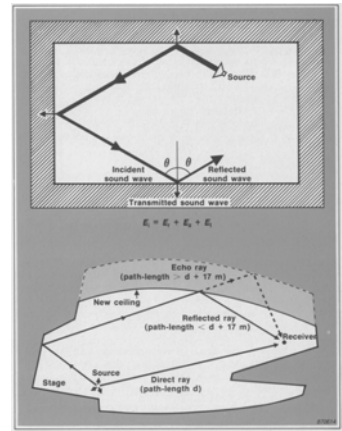
- 2. Megfeszített membrán (pld. dob). Létrejönnek nem harmonikus komponensek is, amik az alaphangnak nem egész számú többszörösei. Két dimenziós rezgés.
- 3. Az egyik végén befogott rúd, mely képes harmonikus és nem harmonikus rezgésre is.
- 4. Elzárt térrész, üreg. Lehet tömeg vagy rugalmas jellegű is, attól függően, hogy a λ hullámhosszhoz képest milyen a térrész geometriája. (Helmholtz-rezonátor, síp, orgona, fúvós hangszerek).

Hangterjedés

- Három alapvető jelenség: refrakció, diffrakció és reflexió.
- A refrakció magyarul elhajlás.
A hang, ha különböző sűrűségű anyagok határára érkezik, a sűrűbb anyag felé hajlik el.
- A diffrakció az „árnyékba hatolás” jelensége
A hang az útjába kerülő tárgyat annak méretétől valamint a frekvenciától függően megkerüli.
- A reflexió a visszaverődés (ld. teremakusztika)
A hangenergia egy része visszaverődik, egy kisebb része áthatol az akadályon, egy legkisebb része pedig a súrlódási veszteség hatására, hő formájában felszabadul.

Reflexió

- Reflexió előfordulhat sűrűségváltozás hatásán is (levegő vs. betonfal)
- A *visszhang* a reflexió speciális esete. Kb. 50 ms az a határ, amit echóküszöbnek nevezünk, ehhez minimum 17 méter távolság szükséges a forrás és a visszaverő felület között.
- A visszhang az eredeti hang és annak késleltetett, csillapított verzióinak a fülbe érkezése.
- Ha ez az időkülönbség jóval meghaladja az 50 ms-t, nem visszhangot fogunk érzékelni, hanem két különböző hangforrást; ha lényegesen kisebb nála, akkor pedig egy „zengőbb” hangérzetet.
- Nagyobb termék tervezésénél igyekeznek tartani, hogy a forrás és a hallgató között sehol ne legyen meg a 17 méteres útkülönbség lehetősége



Doppler effektus

- Doppler-effektus: a mozgó források frekvenciaváltozása
- A jelenség hangszóróknál is meg van, különösen, ha egy utas a hangsugárzó, és azonos membránnak kell lesugároznia mély és magas frekvenciákat is. Ilyenkor a nagy teljesítményű kis frekvenciás mozgás mintegy „modulálja” a kisfrekvenciás hullámokat azzal, hogy előre-hátra mozog, miközben sugároz.

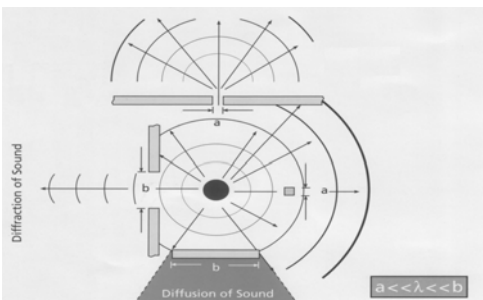
$$f_{ij} = \frac{c \pm v_m}{c \pm v_f} f$$

- Ahol f a kisugárzott frekvencia, v_f a forrás, v_m a megfigyelt sebessége. A képletben szereplő + és – jelek használatához azt vegyük figyelembe, hogy közeledéskor nő a frekvencia, tehát azt az előjelet kell választani, ami növeli a frekvencia értékét.

Diffrakció és refrakció

- A diffrakció és a reflexió mértéke attól függ, mekkora a hullámhossz (λ) a geometriai méretekhez képest.
- Az akusztikában „kicsi” tárgy mindig a hullámhossz (a frekvencia) függvénye és *ahhoz képest* értendő
- Kis tárgy esetén (pld. a seprűnyél) a diffrakció nagy, a reflexió kicsi. Nagy tárgynál fordítva: a diffrakció gyengül, a reflexió nő.

- Diffrakciónál az akadály összemérhető méretű a hullámhosszal. Ha az akadály kisebb, a jelenség elhanyagolható, ha nagyobb, akkor árnyékolás lép a helyébe. Akkor következik be, ha a hang lyukon halad át. Ha az kicsi, akkor a lyuk pontforrásként viselkedik, ha túl nagy, akkor zavartalanul áthatáramlik



1. Fal kis nyílással
Egyenes, gömbhullámú terjedés lép fel a nyílás után is. A nyílás új pontforrásként működik, azaz „elfelejti” honnan jött. Csak kis energia jut át a nyíláson, a nagy része annak faláról visszaverődik.
2. Fal nagy nyílással
Ekkor az energia nagy része áthatáramlik és síkhullám jelleggel terjed tovább a nyílás másik oldalán. A reflexiók a „tűkőforrásból” jönnek.
3. Kis méretű korong (akadály)
A kis méretű akadályt a hang kikerüli (diffrakció), kicsi a hangárnyék és a reflexió is.
4. Nagy méretű korong
Ebben az esetben a hangárnyék és a reflexió is nagy, a diffrakció azonban csökken.

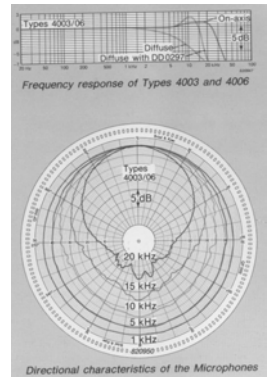
Írányítottság

- Az ideális pontsugárzó, melynek nincs mérete és vesztesége, ideális gömbhullámokat bocsát ki. A hullámok a középpontból indulnak és attól azonos távolságra mindig azonos fázisúak, olyan mint egy a közepéből táguló, felfúvódó gömb.
- Amennyiben szinuszos a rezgés, „lélegző gömbnek” is nevezzük, mert a szinuszos hullámok a középpontból pulzálnak fúvódik fel.
- Léteznek speciális, több hangszóróból álló gömb alakú sugárzók, melyek ezt próbálják utánozni.
- Kellően távol, ahol a görbület kicsi, a gömbhullámokat síkhullámnak tekinthetjük.



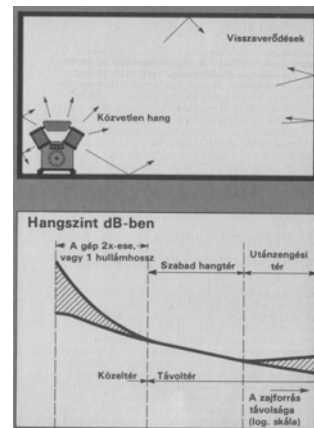
Íránykarakterisztika

- A sugárzókat a polár diagrammal, vagy más néven iránykarakterisztikával jellemezzük.
- Az iránykarakterisztika az érzékenység (átviteli függvény) térbeli eloszlása, az azonos hangnyomásszintű pontok felülete.
- Az érzékenység egy pontban, egy frekvencián (általában 1 kHz-en) értelmezett.
- Általában a magas frekvenciák jobban irányítottak, mint a mélyek.



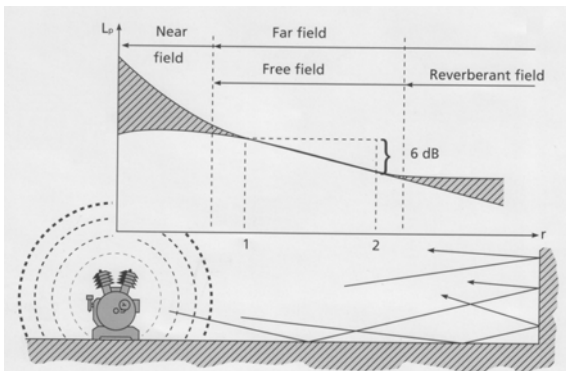
Hangtér a hangforrásoknál

- A köztérben az intenzitás nem egyszerűen arányos a hangnyomással, a hangnyomás változó, a részecskesebesség nem feltétlen mutat a terjedés irányába. Matematikailag nehéz kezelni és leírni.
- A távöltérben a hangnyomásszint 6 dB-el csökken a távolság duplázódásával, az intenzitás arányos a hangnyomás négyzetével és a részecskesebesség a terjedés irányába mutat.
- A hangteret feloszthatjuk direkt (közvetlen, free-field) és reverberációs (visszavert, reverberation) részre.
- A visszavert tér rázsperonálódik a távöltérre, melynek elnevezése diffúz tér. A diffúz térben bármilyen kis dV-tér fogategységben azonos az energiasűrűség és az intenzitás, amennyi energia beáramlik, annyi ki is, nem lehet terjedési irányt kijelölni.



Hangminta

- Doppler eltolódás szirénahangban
- Beszéd felvétel minőségjavítása: először rossz minőségű felvétel, majd a középfrekvenciák erősítésével (4-6 kHz)
- Cocktail-party effektus: két hang ugyanabból az irányból monóban és különböző irányokból sztereóban.



Hangminta

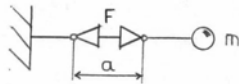
- Echo: visszavert hang egy tő túlszartjáról
- Többszörös visszaverődések egy parabola alakú híd alatt. A hang bottal ütött fémhordóé.
- Komp kürtjének hangja 0.25 mp-es visszhanggal
- Kopogás egy cselló rezonátoros testén, mely a húrok rezonátora is egyben.



Akusztikai hálózatok

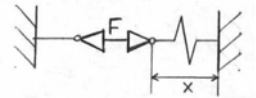
- Az akusztikai és mechanikai hálózatok alapelemei, kapcsolatai
- Értelmezzük az impedanciát, átviteli függvényt, generátorokat
- A három világ között pedig egyszerű képletekkel teremtjük meg a kapcsolatot
- A mechanikai elemeket éppúgy koncentrálnak tekintjük, ahogy az elektronikában használatosakat: a mechanikai tömeg vagy a rugó „összesűriti” a jellemzőket, az őket összekötő karok pedig tömeg és rugózásnélküliek, a „kanyarban” derékszögűek és pusztán a kapcsolódást modellezzik.

- 1. A tömeg olyan elem, mely F erő hatására adott a gyorsulást szenved. A mozgásegyenletből kifejezve:

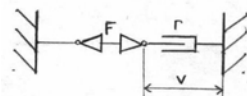


$$m = F/a \text{ [kg]}$$

- 2. A rugó olyan elem, mely F erő hatására adott x elmozdulással (összenyomódással) rendelkezik.
- A megszokott D rugóállandó helyett az akusztikában a C rugóengedékenységet használjuk.
- $C=1/D$, mennyire könnyű összenyomni egy rugót: minél nagyobb a C , annál engedékenyebb a rugó
 $C = x/F \text{ [m/N]}$
- A számításokban néha előfordul „negatív rugó” is, melynek C -értéke negatív szám. Ez a valóságban nem létezik, melyet egyre jobban összenyomva, egyre könnyebbé válik az összenyomás.



- A mechanikai ellenállás olyan elem, amely F erő hatására adott v sebességre tesz szert.
- Gyakorlatilag egy dugattyúnak képzelhetjük el, mely azonos erő hatására mindig azonos sebességgel válaszol.
- Az ellenállás jele r , impedanciája valós, és az elektronikához hasonlóan a veszteségek megjelenítésére hivatott, rajta valós teljesítmény disszipálódik.

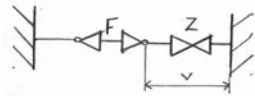


$$r = F/v \text{ [Ns/m]}$$

- A mechanikában kétféle generátor típus létezik:
 - az erőgenerátor
 - a sebességgenerátor
 - az erő és a sebesség a kétféle (elvben különböző, gyakorlatban hasonló) meghajtás, amire az elemek kitéréssel, sebességgel és gyorsulással válaszolnak (időbeni derivált!).
- A generátorok rajzjele



- Az impedancia az ellenállás frekvenciafüggését tartalmazza, és közös számítási alapokat nyújt a valós (ellenállás) és a frekvenciafüggő (komplex) elemek kezeléséhez.



- Periodikus jelek esetén a mechanikai impedancia (már láttuk):

$$Z = f/v \text{ [Ns/m]}$$

- Ez általános esetben komplex, csak a mechanikai ellenállás esetén valós.

- Analógia:

$$Z_r = r$$

$$Z_m = j\omega m$$

$$Z_c = 1/j\omega c$$

$$v = j\omega x$$

$$a = j\omega v$$

- A tömeg párja az induktivitás, amit egyébként is elektronikai tehetetlenségnek tekintünk, a tömeg pedig a tehetetlenség mértéke.
- A kapacitás párja a rugalmasság, a rugó. Azért választottuk a rugóengedékenységet a rugóállandó helyett, hogy az impedanciák megegyezzenek.

Az elemek összekapcsolása

- **A feszültségnek az erő a párja, az áramnak a sebesség** (A memorizálást talán segíti, hogy a feszültség f-kezdőbetűje megegyezik az erő (force) f betűjével).
- Az elemek közös áramon vagy feszültségen vannak
- A **közös sebesség** jelentése: azonos elmozdulás. Két elemnek akkor lesz közös a sebessége, ha egymás alatt helyezkednek el. Ilyenkor a kapcsaik között ható erő nem egyforma. Mivel a sebességnek az áram a párja, közös sebességű kapcsolásnál az elemek impedanciája összeadódik.
- **Közös erőn** lévő elemeknek a sebességük különböző, ekkor egymás után kapcsoljuk őket és mivel a közös erőnek a közös feszültség az analógja, az eredő impedancia a tagok repluszából adódik.
- Soha ne használjuk a soros és párhuzamos kifejezést mechanikai impedanciákra, „ránézésre” pont fordítva működik az eredő számítása, mint az elektronikában.

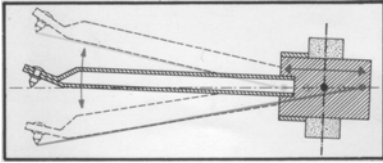
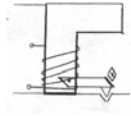
Közös erő	Közös sebesség
$F = F_1 = F_2$ $v_1 \neq v_2$ $Z_{\text{eredő}} = Z_1 + Z_2$	$v = v_1 = v_2$ $F_1 \neq F_2$ $Z_{\text{eredő}} = Z_1 \times Z_2$

Elektromos analóg

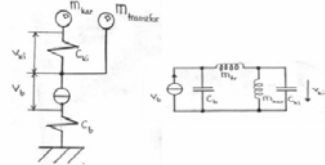
- Minden mechanikai hálózat felírható az analóg elektromos elemek rajzjelével és impedanciáival.
- Ettől az még mechanikai hálózat marad, mechanikai elemekkel és mennyiségekkel, pusztán a rajzjelet cseréljük le
- Csak arra kell ügyelni, hogy a közös sebességű elemeket az analóg kapcsolásban sorba kössük, a közös erőn lévőket pedig párhuzamosan.
- Ha a generátorokat is lecseréltük, az előálló hálózatot a szokásos villamos ismereteinkkel kezelhetjük, szimulálhatjuk, gépi számításnak vethetjük alá, modellezhetjük, átviteli függvényeket számolhatunk stb.
- A későbbiekben megismert elektromechanikai transzformáció nem ugyanaz az elektromos analóggal.

Elektromos	Mechanikai
u	f
i	v
$p = ui$	$p = fv$
$Z = u/i$	$Z = f/v$
L	m
C	c
R	r
közös feszültség (párhuzamos)	közös erő („sorosnak kinéző”)

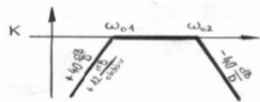
- Példa: Hanglemezjátszó mozgó mágneses feje, az ún. pick-up (MM) elektromos analógja. Ez változó légrésű mágneses átalakítóval rendelkezik.



- A mechanikai hálózat elemei: m_{kar} a kar tömege, m_{tr} az ún. redukált tömeg, C_b a barázda rugalmassága, v_b a barázda sebessége, v_{ki} pedig a kimeneti mennyiség, a t_u mozgási sebessége.
- Elektromos analógját fogjuk felírni és az átviteli függvényt (v_{ki}/v_{be})



- Az akusztikában a Bode-diagramokon gyakran használjuk a 40 dB/dekád helyett a 12 dB/oktáv megjelölést másodfokú meredekségnél, és a 6 dB/oktávot a 20 dB/dekád helyett.

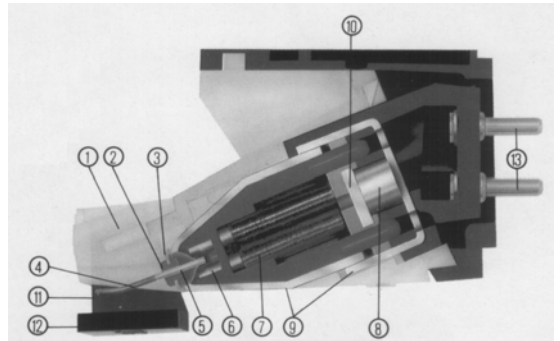


$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{m_{kar} C_b}}$$

$$\omega_{02} \approx \frac{1}{\sqrt{m_{tr} C_b}}$$

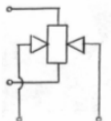
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- AKG hangszedő keresztmetszeti képe. Lényeges része az állandó mágnes (8), a mágneskört záró fém (9) és a tekercsek (7) amelyek az érzékenységet és a „vételt” biztosítják (a rajtuk átfolyó mágneses tér változásával arányosan). A tényleges átalakítást az (5)-jelű vasrudacska végzi (kis mozgó tömeg).



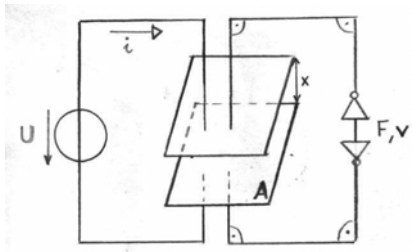
Elektromechanikai átalakítók

- Feladata, hogy az elektromos, változó feszültséget mechanikai rezgéssé alakítsa és viszont.
- Egy átalakító általában oda-vissza működik, csak eltérő hatásokkal.
- Alapjában két nagy csoportja van az átalakítóknak (a működési egyenletek alapján).
- Minden átalakítót két egyenlet ír le, amely kapcsolatot teremt a mechanikai elemek és paraméterek, valamint az elektromos paraméterek között. A transzformációhoz hozzá tartozik minden esetben elektromechanikai áttétel, amely a kapcsolatot matematikailag leírja.



Elektrosztatikus (kapacitív) átalakító

- Egy lötyögő fegyverzetű „rossz” kondenzátor.
- A mozgó fegyverzetek következtében változik a légrés nagysága, ezáltal a kapacitás, végeredményben pedig a feszültség.
- Az átalakítás elve egyszerű: mozgatni kell a fegyverzeteket (ez a mechanikai rezgés), melynek hatására ezzel arányos feszültség keletkezik a kondenzátor kapcsain.
- Elvben ez visszafelé is így működik, de ne egyszerű kondenzátort képzeljünk el ilyen esetben.



■ Az elektromechanikai áttétel:

$$\tau = CE$$

ahol C az átalakítót alkotó kondenzátor kapacitása, E az elektromos térerősség. (általában adott)

$$f = \mathcal{U}_d - \frac{x}{C_{me}}$$

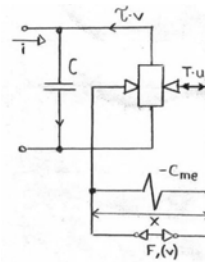
A leíró egyenletek:

$$i = C \frac{du}{dt} - \tau v$$

- A bal oldalon kifejezett mennyiség egyszer mechanikai (f), a másinál elektromos (i). A mechanikai erő két részből áll: egyszer a C_{me} jelű (negatív) rugó összenyomásából, másrésztől a feszültség transzformálásából.
- Az áram hasonlóan: egyrészt a már ismert $C(du/dt)$ -tagból, másrészt a transzformált sebességből.
- Az előjeleket a megállapított mérőirányok szerint kell helyesen beírni. Nem csak az áramnak és a feszültségnek van iránya, hanem az erőnek és a sebességnek is, attól függően, hogy azok „szét” vagy „össze” mutatnak.
- A C_{me} a „mechanikai eredő” megnevezésből ered

$$f = \mathcal{U}_d - \frac{x}{C_{me}}$$

$$i = C \frac{du}{dt} - \tau v$$



$$f = \mathcal{U}_d - \frac{x}{C_{me}}$$

$$i = C \frac{du}{dt} - \tau v$$

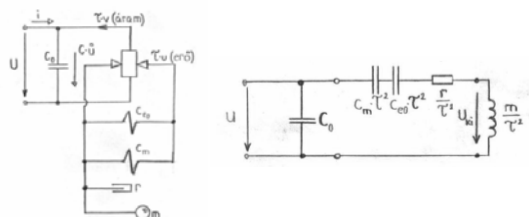
■ Kapacitív átalakítónál: $Z_{el} = Z_{mech}/\tau^2$

- A transzformáció során előálló elemek, ugyanazok, mint az elektromos analógnál, értékük azonban más!
- Ha egy elemet átranzformálunk, abból valóságos elektromos elemek lesznek és viszont.

Z_{mech}	$Z_{el} = Z_{mech}/\tau^2$
m	$L = m/\tau^2$
C_m	$C = C_m/\tau^2$
r	$R = r/\tau^2$
τv	i
f	$\mathcal{U}$
Közös sebesség („párhuzamnak látszó”)	Közös áram (soros kapcsolás)

Példa

$Z_{el} = Z_{mech}/\tau^2 = j\omega m/\tau^2$. Ez pedig nem más, mint egy $L = m/\tau^2$ értékű tekercs impedanciája. Hasonlóan $Z_{el} = 1/j\omega c$ osztva τ^2 -el, ami egy $C = c/\tau^2$ kapacitású kondenzátor.



- Az átalakító lineáris működéséhez szükség van egy egyenfeszültségű telepre, amely egy nagyértékű R ellenállással sorban kapcsolódik az elektródákra. Az elektrosztatikus erő a vékony membránt az ellenelektrodához vonzza.
- Ha hangnyomás éri a membránt, akkor az jobban vagy kevésbé deformálódik. A méretváltozás eredményeképpen nő vagy csökken a kapacitás. Gyors változások közben a kondenzátor töltése nem tud megváltozni, ezért a feszültsége változik meg. A feszültségeltérés az ellenálláson jelenik meg.

- Az ún. piezó átalakító is kapacitív elven működik
- A piezoelektromos jelenség alapja, hogy létezik egy kis piezó kristály, mely mechanikai deformáció hatására töltéseket halmoz fel és viszont.
- A deformáció lehet vastagsági, hosszanti vagy homlok irányú nyújtás.
- A kapacitív átalakítóval szemben, hogy míg utóbbiban jellemzően megjelenik egy negatív rugó, addig piezó eszköznél (kisfrekvencián) pozitív a rugóengedékenység.

Elektromágneses átalakító

- Az elektromágneses átalakító változó légrésű, az elektrodinamikus állandó légrésű.
- Közös jellemzőjük, hogy azonos a működési egyenletük és a táblázatuk.
- Fordítva minden!
- A működési egyenletrendszer:

$$Z_{el} = \tau^2 / Z_{mech}$$

$$f = T_i - \frac{x}{c_{mm}}$$

$$u = L \frac{di}{dt} - T_V$$

A C_{mm} a „mechanikai mágneses” megnevezésből ered.

Példa.

A tömeg és a rugó megfeleltetése.

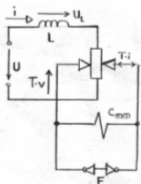
$$Z_{el} = \frac{\tau^2}{Z_{mech}} = \frac{\tau^2}{j\omega m} = \frac{\tau^2}{j\omega \frac{m}{\tau^2}}$$

Ez pedig nem más, mint egy $C = m/\tau^2$ értékű kondenzátor impedanciája. Hasonlóan

$$Z_{el} = \frac{\tau^2}{Z_{mech}} = \frac{\tau^2}{\frac{1}{j\omega c}} = j\omega c \tau^2$$

, ami egy $L = c\tau^2$ induktivitású tekercs.

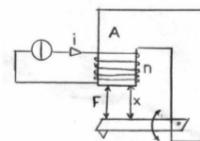
Z_{mech}	$Z_{el} = \tau^2 / Z_{mech}$
m	$C = m/\tau^2$
c_m	$L = c_m \tau^2$
r	$R = \tau^2/r$
τ_V	U
f	T_i
Közös sebesség („párhuzamnak látszó”)	Közös feszültség (párhuzamos kapcsolás)



$$f = T_i - \frac{x}{c_{mm}}$$

$$u = L \frac{di}{dt} - T_V$$

- Elektromágneses:
- Állandó mágnesből, lágyvas saruból, gerjesztő tekercsből, membránból és feszítőrugóból áll.
- Nyugalmi helyzetben az állandó mágnes keltette húzóerő és a rugóerő vannak egyensúlyban. Ha a tekercsen áram folyik át, ami növeli a mágneskör fluxusát, akkor a húzóerő megnő, a légrés pedig lecsökken. A tekercs áramával arányos lesz a horgony nyugalmi helyzetéből való elmozdulása. Fordított működésnél a hangnyomás keltette eredő erő elmozdítja a horgonyt. Az elmozdulás irányának megfelelően a fluxusváltozás feszültséget indukál a tekercsben.



$$T = LI/x$$

$$A \text{ hol}$$

$$L = \mu_0 n^2 A/x$$

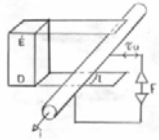
- Elektrodinamikus:
- Állandó méretű légrés, benne mágneses tér, amelyben egy áramvezető mozog.
- Az vezető végei között feszültség indukálódik, ami arányos a légrésindukcióval, az áramvezető hosszával és a sebességgel.
- Ilyen módon képes a mozgási energiát elektromossá alakítani. Ha árammal tápláljuk ezt a vezetőt, akkor ugyancsak az indukcióval, az vezető hosszával, valamint az árammal arányos erőhatás lép fel. A gyakorlati megvalósítás során nem egyetlen szál vezetőt, hanem egy úgynevezett lengőtekercset használunk, amelynek a teljes húzalhossza részt vesz az átalakításban. (dinamikus hangszóró)

$$T = Bl$$

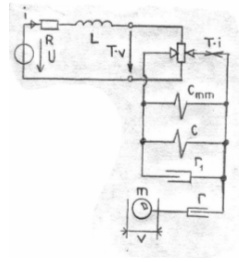
$$f = Blv = Tl$$

$$u = Blv = Tl$$

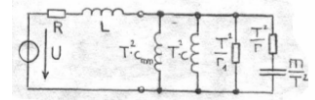
Ahol B a mágneses indukció, l a vezető hossza



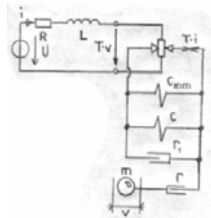
- Példa: Mágneses átalakító rendszer transzformáltjai



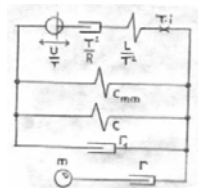
Transzformáljuk az elektromos oldalra:



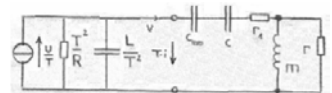
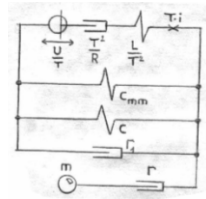
- Példa: Mágneses átalakító rendszer transzformáltjai



Transzformáljuk a mechanikai oldalra:



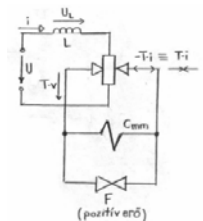
- A mechanikai oldal elektromos analógja:



A negatív rugó és a mérőirányok

- Negatív rugóengedékenységet azt vonná maga után, hogy kisebb C értékhez könnyebb összenyomás tartozna.
- Az egyenletek átalakíthatók oly módon, hogy eltüntessük a zavaró negatív rugóengedékenységet, cserébe meg kell fordítanunk bizonyos mérőirányokat.
- Fizikai jelentése azonban van a negatív rugónak is. Ez kapacitív átalakító nyugalmi légréséből adódik, hiszen a nyugalomban lévő átalakító fegyverzeti nem érnek össze. Ez egy kis, pozitív engedékenységu rugó, amely a tér összehúzó erejét jelképezi. A stabil működés feltétele, hogy betegyünk egy ezzel ellentétes, ezt kiegyenlítő negatív rugót.

- Ekvivalens átalakításokkal eltüntethető.
- A széttartó nyíllal ábrázolt erő a negatív, az összemutató a pozitív.
- Pld. a széttartó $-Tl$ nagyságú erő egyenlő az összetartó Tl nagyságú erővektorral.



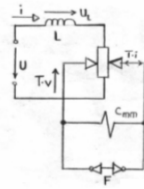
$$U = U_L + T_v = L \frac{di}{dt} + T_v$$

$$f = \frac{x}{C_{mm}} - Tl$$

- Az átalakításokkal (-1-el szorozva mindkét oldalt):

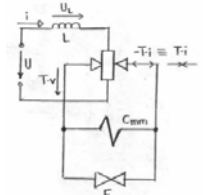
$$f = \frac{x}{c_{mm}} - T_i \quad -f = -\frac{x}{c_{mm}} + T_i = T_i - \frac{x}{c_{mm}}$$

- Azaz, az eredeti egyenletünk ettől csak az f -erő előtti negatív előjelben különbözik, pontosan abban, ahol annak irányát megfordítottuk. Ha tehát visszarajzoljuk a széttartó nyilakat, elhagyhatjuk a negatív előjelet és visszajuttatunk oda, ahonnan elindultunk



$$f = T_i - \frac{x}{c_{mm}}$$

$$u = L \frac{di}{dt} - T_v$$



(pozitív erő)

$$-f = -\frac{x}{c_{mm}} + T_i = T_i - \frac{x}{c_{mm}}$$

$$U = U_L + T_v = L \frac{di}{dt} + T_v$$

Impedanciák

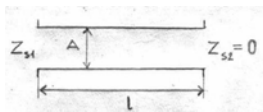
- Az elektromechanikai és az akusztika világában használt impedanciák:
Mechanikai impedancia: $Z_m = f/v$
Specifikus impedancia: $Z_{spec} = p/v$
ahol a p nyomásra: $f = pA$
Akusztikus impedancia: $Z_a = p/Av$
ahol az Av -szorzatot térfogatsebességnek nevezzük.
- A sugárzási impedancia teljes értékű mechanikai impedancia, amely mozgó felülethez kapcsolódó légterhelésre vonatkozik. Magyarán, a membránhoz kapcsolódó légterhelés, az a tömeg és veszteségi ellenállás, ami mechanikai impedancia, elneveztük sugárzási impedanciának.
- A három impedancia a membrán A -felületén keresztül kapcsolódik egymáshoz:
 $Z_m = Z_{spec}A = Z_aA^2$

Akusztikai elemek

- Az akusztikai elemeket mindig az akusztikus impedanciával adjuk meg
- Akusztikai elem minden akadály, cső, üreg, elzáró felület, amely megváltoztatja a sugárzó (a membrán) által kiadott hang útját.
- Két egyszerűsített eset: a végén nyitott tápvonal és a végén lezárt cső.

A végén nyitott rövid akusztikus tápvonal

- A zérus akusztikus impedanciának a „semmi” felel meg, $Z_{sz} = 0$.
- Az egyetlen közelítés: $tg \quad kl \approx kl$
- E feltétel teljesüléséhez vagy a k vagy az l kell kicsi legyen, így egy „kellően rövid” cső esetén ez igaznak tekinthető



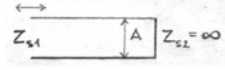
$$Z_{a1} = j\omega\rho_0 \frac{l}{A} = j\omega m_a$$

- Az akusztikus impedancia induktív (tömeg) jellegű
- Értékét a közeg, de levegő esetén gyakorlatban csak a geometriai méretek határozzák meg: a hosszúság és a keresztmetszet.
- Az ilyen eszközben mozgó levegő részecskéi együtt mozognak, úgy, mintha dugó lenne az üveg nyakában. Ezért légdugónak is szoktuk nevezni
- Ilyenkor a részecskék Av térfogatsebessége azonos, az ilyen eszköz impedanciáját összeadjuk a hálózati elemeivel.
- A hangdobozokon közismert reflex-nyílás pontosan így működik: a benne lévő levegő tömeg-jellegű és erőteljesen megváltoztatja a sugárzó átviteli függvényét. Ezzel a módszerrel, pontos tervezés és mértékezés után jobb kisfrekvenciás lesugárzást érhetünk el. A célja tehát ennek a nyalásnak, hogy a benne lévő levegő membránként funkcionáljon, maga előtt tolja a „dugó” a levegőt és mélyhangokat bocsásson ki.

A végén lezárt cső

- A végtelen lezáró impedanciának a végén fallal lezárt csövet, üreget tekintjük.
- Ilyenkor $Z_{s2} =$ végtelen. ($\tan kl \approx \infty$)
- Az akusztikus impedanciát:

$$Z_{a1} = \frac{1}{j\omega C_a} \quad C_a = \frac{V}{\kappa P_0}$$



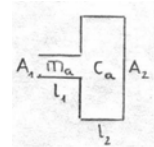
- C az üreg kapacitása, $V=IA$ a térfogata, tehát ismét csak a geometriai mérték a meghatározóak.
- Ilyenkor az üregben lévő levegő rugóként viselkedik, rugalmasan összenyomható és kitágul, ahogy a végén befogott fecskendő dugattyúján látható.
- Az ilyen eszköz kapacitív, rugójellegű képződmény és kapacitív üregnek is szoktuk nevezni. Az ilyen eszköz impedanciáját a hálózat többi részéhez a membránra keresztül repluszolva kapcsoljuk.
- A hangszórók dobozában található üregek, sőt a doboz önmaga is ilyen eszköz. A mozgó membrán a háta mögött lévő, a dobozban lévő levegőt rugóként nyomja össze, az pedig visszahat a membránra. Ez igaz akkor is, ha a dobozon reflexnyílás található, ekkor mindkét elem hatását figyelembe kell venni a hangszóró átviteli függvényének kiszámításához, és alapos tervezést igényel a doboz méreteinek helyes megállapítása!

Akusztikus ellenállás

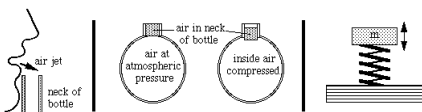
- Az akusztikus ellenállás (r_a) valós impedancia, a veszteségeket jellemzi.
- Az átviteli függvény alakját a kis értékű veszteség nem befolyásolja, csak lineáris csillapítást okoz.
- Pld. a hangszórók elé helyezett szövet, ami leginkább a dizájnt szolgálja, de nem befolyásolja akusztikailag az eszközt.
- A másik oldalról azonban a mechanikai védelmet ellátó részek akusztikai tartalommal is bírhatnak. Pld. a keskeny sávú mikrofonok elé helyezett sűrű szövésű fémháló nem csupán a membrán mechanikai védelmét látja el, hanem akusztikus kompenzáló szerepe is van.

Helmholtz-rezonátor

- A Holmholtz-rezonátor olyan akusztikus rezgőkör, amely egy csőből és egy üregből áll, gyakorlatilag az LC-kör akusztikus megfelelője.
- Fontos tulajdonsága, hogy a rezonancia frekvenciájánál hangelnyelő szerepe van, a bejutó hangok nem jönnek ki.
- A rezonátor hangolása a geometriai méretekkel történik
- A rezonancia frekvenciát a Thomson-képlet analógiájára állítjuk elő:



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_a C_a}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0 l_1 A_1}{A_2} \frac{l_2 A_2}{\kappa P_0}}}$$



Akusztikus eszközök és sugárhók

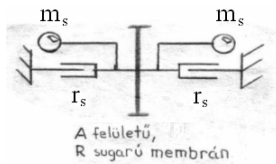
- Az akusztikus eszköz kezelésénél a sugárhási impedancia a legfontosabb. Ez egy mechanikai impedancia, melyet a membránra képzelünk rá, és a légtérhelést jellemzi. Két tipikus megadása:



- Balra a soros alakú, jobbra a párhuzamos alakú
- A sugárhók kapcsolata a sugárhási impedanciával nagyon fontos!

Az önálló membrán

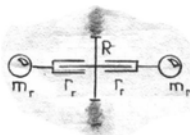
- A szabadon lévő hangszóró vagy membrán az összes hangsugárzó alapja.
- „szabadban lóg”, mindkét oldalát terheli sugárzási impedancia, melyek értéke teljesen egyforma.
- Az ilyen membrán minden pontja egyszerre mozog.



Beépített membrán

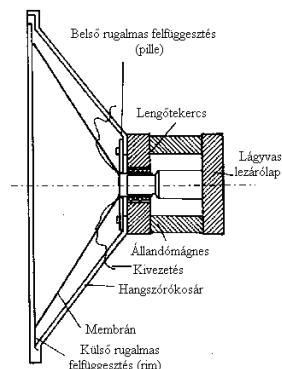
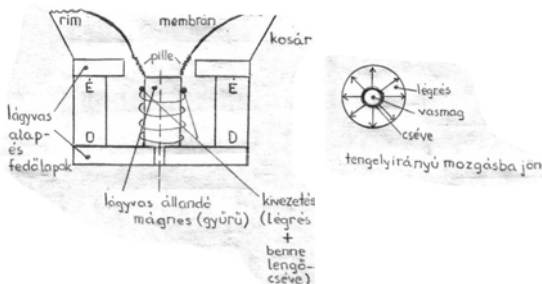
- Az akusztikus rövidzár azt jelenti, hogy a sugárzó membrán által kibocsátott kisfrekvenciás hullámok „visszahajlanak”, megkerülik a membránt és ellendolgoznak a sugárzásnak. Ezáltal kioltás jön létre, megszűnik (legyengül) a mélyhangok átvitele.
- Ellene: a hangszórót dobozba vagy falba építjük, ezáltal fallal elszigeteljük a membrán két oldalát egymástól
- Járulékosan, a dobozba épített hangszóró hátulról egy kapacitív üreggel fog találkozni, ez is befolyásolja az átvitelt.
- A végtelen falba épített hangszórónál ez nincs így. Ez a jobb sugárzó, de praktikus okokból nem megvalósítható a túl nagy méret miatt.

- Végtelen fal esetén a párhuzamos impedancia alakja:
 $r_r = 1,44 \cdot A p_0 c$
 $m_r = 0,85 \cdot A p_0 R$
 $A = R^2 n$
- A soros impedancia alakja:
 $r_s = 0,5 \cdot A p_0 c (kr)^2$
 $m_s = m_r$
- Az elszigetelés hatására csökkent a kr -szorzat hatványa, valamint a tömeg-érték kétszeresére nőtt!

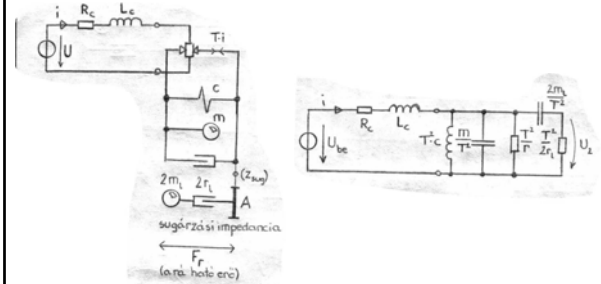


A dinamikus hangszóró

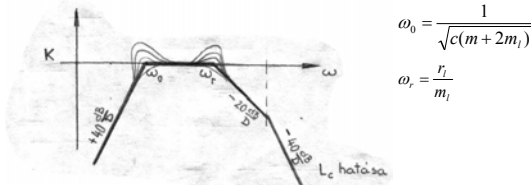
- A dinamikus hangszóró a leggyakrabban használt hangsugárzó.
- Önmagában keskenysávú, ezért dobozba építjük.
- Állandó légrésű mágneskör található benne, melyben sugárirányú (kifelé mutató) erőtér alakul ki.
- A lengőcséve, a tekercs ebben tengelyirányú mozgást végez, így a hozzá kapcsolt membrán is.
- A membrán általában papír, műanyag anyagú.
- Az állandó mágneset alul és felül lágyvas lemezek tartják, melyek mágnesesen vezetők. Ehhez van rögzítve a vas *kosár*, amelyhez a membránt rugalmasan rögzítjük: felül a *rim*, alul a *pille* biztosítja a rugalmas elmozdulást. Ez általában hajlított papír vagy gumi.
- A lengőcséve kivezetéseire kerül az elektromos gerjesztés, a kivezetések általában a membránra vannak ragasztva.



- Az elektromechanikai helyettesítő képben megjelenik az U gerjesztés, az R_c cséveellenállás (elektromos veszteségek), az L_c cséveinduktivitás
- A kapocsáram és a mágnes tér kölcsönhatásaként tengelyirányú erő keletkezik. Az erő mozgásba hozza a nagy felületű membránt és ezáltal hanghullámokat kelt
- A mechanikai oldalon a C rugó a rim és a pille rugózását szimbolizálja, a m tömeg az összes mozgó tömeget (membrán, lengőcséve), az ellenállás pedig a veszteségeket (súrlódás).
- A membránt a sugárzási impedancia terheli, amelynek értéke egyszeres szorzót kap, ha a hangszórót dobozba építjük, kétszeres szorzót, ha falba, vagy ha szabadon hagyjuk.
- A kimeneti mennyiség a sugárzási impedanciára ható (azon „eső”) erő, a bementi a feszültség, az átviteli függvény a kettő hányadosa.



- Átviteli függvény u_2/u_{be}
- A meredekség a bal oldalon másodfokú, a jobb oldalon először első fokú, majd aztán válik másodfokúvá, miután a nagy frekvencia miatt az L_c induktív hatása érvényesülni kezd.
- A rezonancia frekvenciák értéke:

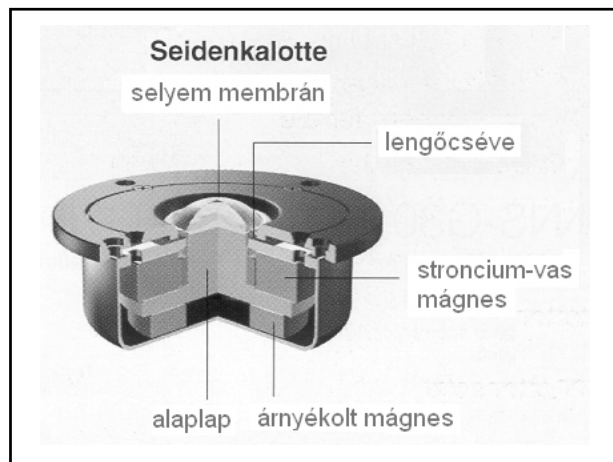
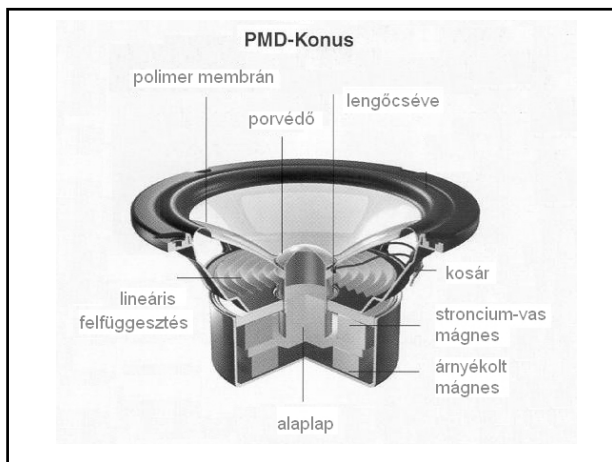


- A legnagyobb probléma a hatásfoka:
 $\eta = P_{\text{akusztikai}}/P_{\text{elektromos}} \approx 1...2\%$
- Ez nagyon alacsony, a befektetett villamos teljesítmény alig 1-2%-a alakul akusztikus teljesítménnyé!
- A hangszóróknak megadott üzemi paramétere a „maximális megengedett villamos teljesítmény”, amit feltüntetnek. Ez mondja meg, hogy mekkora villamos teljesítmény kapcsolható a kapcsaira anélkül, hogy az tönkremenne. Egy 100 Wattos hangszóróból akkor jön ki 1 W hangteljesítmény, ha valóban ráadunk 100 Wattot a kapcsaira.
- A hasznos akusztikai teljesítmény a valós veszteségi mechanikai ellenálláson vehető le, ez a sugárzási impedancia $2r_l$ jelű eleme. (Ha dobozban van a hangszóró, mindenhol el kell hagyni a kettes előjelet.)
 $P_{\text{akusztikai hasznos}} = f_r^2/2r_l$

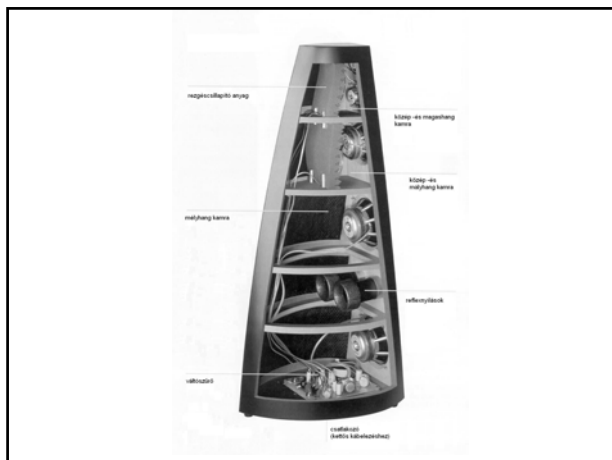
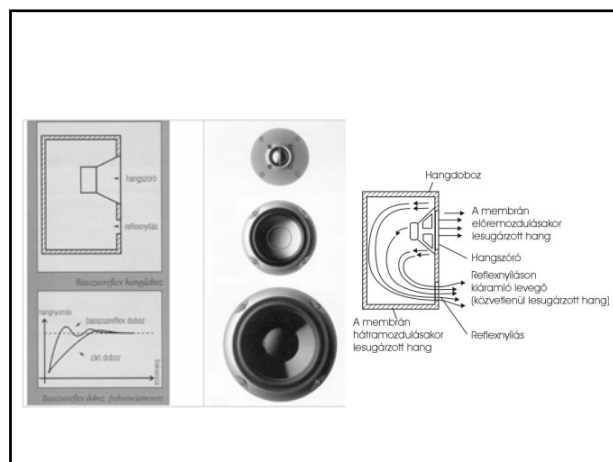
Paraméterek

- **Terhelhetőség** adja meg wattban a kapcsokra adható maximális villamos teljesítmény.
- **Az átviteli tartomány** a fenti megismert átviteli függvény -3 dB-es pontjai között értelmezett. A dinamikus hangszóró alapjában felülatérezető-jellegű, és a Bode-közelítésben csak az alsó törésponti frekvenciát adjuk meg.
- A **névtelen impedancia**: az 1 kHz-en mutatott impedancia abszolút értékének 4, 6, 8, 16 Ω -ra kerekített értéke.
- Az impedancia az erősítővel összhangban kell legyen. Abból nem származik probléma, ha a hangszóró impedanciája nagyobb az erősítő által igényelthez képest, pusztán a hangerőszabályzót kell feljebb tekerni ugyanakkor a hangerősséghez. Fordított esetben azonban veszélyeztetjük az eszközöket, hiszen a hangszóróra könnyen túlfeszültség juthat, ha ellenállása kisebb az előírtnál.
- A hangszórók, mivel korlátozott tartományban sugároznak, nem alkalmasak a teljes 20 Hz-20 kHz-es tartomány le sugárzására. A többutas hangszórók ezért rendszerint két vagy három hangszórót tartalmaznak, esetleg reflexnyílással. A hangszóvot általában egyszerű, passzív elemekből álló analóg váltószűrővel választják szét, és vezetik rá az egyes „utakra”.

- A kónusz-sugárzók általában kis teljesítménnyel dolgoznak, ezért gyakran a mélysugárzókból kettőt is beleraknak a dobozba a teljesítmény növeléséhez.
- A magas frekvenciákhoz dóm-sugárzókat (kalotta) használnak, jellemzően fémből készült, merev felfüggesztésű, szemmel nem látható módon rezgő membránt alkalmaznak.



- A magas frekvenciák lesugárzása nem probléma, könnyedén tudunk 50-100 kHz magasságban sugárzó eszközt gyártani
- A mélyeknél a helyzet sokkal nehezebb (mélynyomó), nagy méret, hatalmas dobozok, nagy felületű membrán és több reflexnyílás is található rajtuk.
- Tipikus alsó határfrekvenciájuk 80-120 Hz környékén van, az 50 Hz-et is lesugározní képesek már a drágább kategóriába tartoznak
- A szubjektív hangzásérzetet azonban drámaian javítja.
- Nagyon gondos tervezést igényel a hangszórók megválasztása, elhelyezése, a doboz és a reflexnyílás kialakítása!



Exponenciális tölcésrűsugárzó

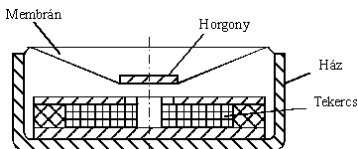
- A hatásfok növelésének egyszerű módja, ha a hangszóró elé exponenciálisan táguló szájnyílású tölcserűt helyezünk.
- A tölcserűs hangszóró dinamikus, csak a membrán nem önmagában sugároz, hanem egy szájnyíláson keresztül.
- Pld. megafonok és a szirénák, irányítottabb és nagyobb hatásfokú sugárzást tesznek lehetővé.
- Az elért hatásfok 25% körűli
- Ezeknek az eszközöknek a célja nem a jó hangminőség.
- Az átviteli sáv megsínyli ezt a trükköt, a tölcserű hatására keskenyebb sávú sáváteresztő jellegűvé válik. Ezért nehéz érteni a megafonban kiabáló ember hangját.

Fejhallgatók

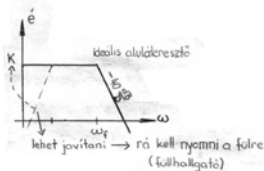
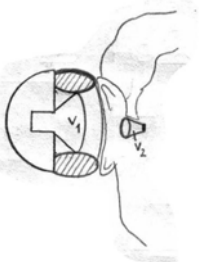
- Két típus:
 - ritkábban használatos, nem stúdiótechnikai mágneses fejhallgató
 - a hangátvitelhez alkalmasabb, jobb minőségű dinamikus
- Utóbbi kis méretű dinamikus hangszórót tartalmaz
- A mágneses fejhallgató átviteli sávja keskeny, ilyen van a telefonkagylókban.

Mágneses fejhallgató

- A mágneskör légrése szándékosan nagy, ezért a mágneses erővonalak a mozgó horgonyon keresztül záródnak. A lágyvas horgonyt a rugalmas membrán tartja. A tekercs áramával gerjesztett tér növeli vagy csökkenti az állandó teret, így a horgony a nyugalmi helyzetéhez képest elmozdul. Ez a mozgás a fül zárt üregében nyomásváltozást produkál.



- A fejhallgatók zárt térbe sugároznak (hallójárat, műfülűreg)
- A fejhallgató átviteli függvénye önmagában nem értelmezett, csak a lezáró impedanciával (az üreggel) együtt
- Az ideális lezárás, tisztán kapacitív üreg, C_a akusztikus impedancia
- Az ilyen „szűrő” ideális aluláteresztő jellegű, azaz akár DC-ig is átviheti a mélyfrekvenciás tartományt
- A valóságban a fejhallgató szivacsa és a fej között illetetlenség lép fel, levegő fog „kiszuszogni”, veszteség fog fellépni. Az ideális tiszta kapacitív lezárás helyett egy valós veszteség fog bejönni a képbe, a C-tag RC-tagga változik, és ennek következménye a kisfrekvenciás átvitel romlása (alsó töréspont)
- A hallójáratba illeszthető fülhallgatóknak gyakran sokkal jobb az átvitele. Ennek oka a jobb illesztettség. Ne keverjük tehát a fülhallgatót a fejhallgatóval



- A fejhallgatók paramétere az *érzékenység*:

$$\epsilon = P_{\text{üreg}} / U_{\text{gerj}}$$

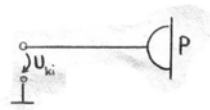
ahol, P az üregben mért nyomás, U a kapcsolra adott gerjesztés. Nagyobb az érzékenység, jobb a fejhallgató. Az *érzékenység* az egységnyi hangnyomás hatására leadott feszültséget jelenti.

- A mágneses fejhallgatók jellemzően 3-4 kHz-ig visznek csak át, a HiFi dinamikus eszközök 20-30 kHz-ig is képesek rá.
- Az átviteli függvény az érzékenység frekvenciamenete $\epsilon(f)$, a felső töréspont után másodfokú eséssel. Ez különlegességnak számít, hiszen a mély hangok lesugárzása szokott problémát okozni.

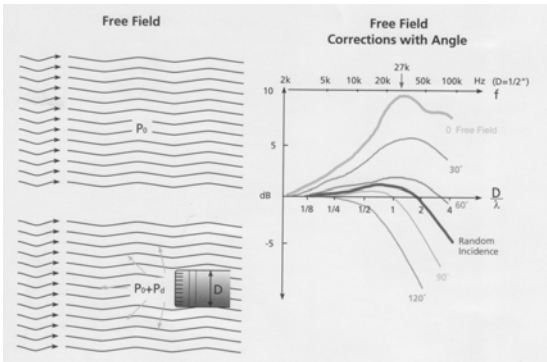
Mikrofonok

- A levegő rezgéseit a membránjukkal felfogják és azzal arányos kimenő feszültséget hoznak létre kapcsaikon.
- Az átviteli függvény itt is az érzékenység frekvenciamenté. Az iránykarakterisztika az átviteli függvény térbeli leírása, eloszlása:

$$E(f) = U_{ki} / p$$
- Az érzékenységet a főtengelyben mérjük, szokásos mértékegységei a [mV/μbar] vagy a [mV/Pa].



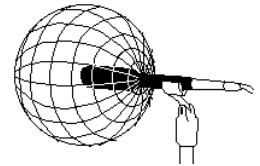
- Az érzékenységnek két fajtáját szoktuk megadni:
 1. nyomás: a membránon mért nyomás
 2. szabadtéri: hangnyomás értéke a membrán helyén, de a mikrofon nélkül.
- Utóbbinak az az értelme, hogy ha nő a frekvencia, csökken a hullámhossz, a membrán átmérője összemérhetővé válik a hullámhosszal. Így maga a membrán zavarja a teret, nagyobb lesz rajta a nyomás, ha ott van (kompenzálásra van szükség).



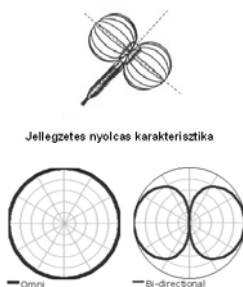
- A keresett hangnyomás p_0 , a mikrofon $p_0 + p_d$ nyomást mér. Szabadtéri mikrofont a forrásra kell irányítani. A nyomásmikrofon irányérzékeny. A véletlen beesésű olyan felépítésű, hogy azonos módon reagáljon szimultán beérkező hangutakra minden irányból

Íránykarakterisztikák

- Az iránykarakterisztikák legfontosabbika az alábbi három:
 1. gömbi (irányfüggetlen)
 A nyomásmikrofonok tipikus karakterisztikája, legfontosabb jellemzője, hogy az átviteli függvény, az érzékenység minden irányból egyforma. Ezért is nevezzük irányfüggetlennek, mert mindegy, miként helyezzük el a térben. Ez mérési céloknál lehet fontos.

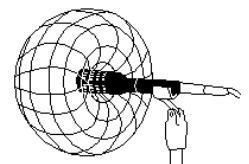


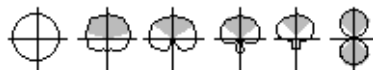
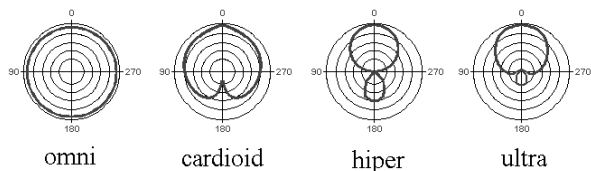
- 2. nyolcas (gradiens)
- A szalagmikrofonok karakterisztikája. Két gömb együttese, középen a membránnal. Ezeknek a legjobb „vétel” iránya a membránra merőlegesen, annak szimmetriatengelyében van, mindkét oldalról.



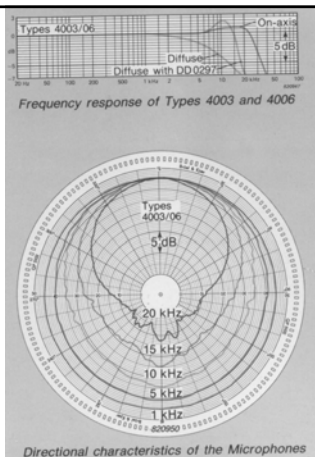
Párbeszédmikrofonnak is nevezik.

- 3. kardioid (vese)
- A leggyakoribb konstrukció. Előre-irányban maximális érzékenységű, de oldalról is csökkentett, hátulról pedig szabályozható.
- Alcsoportok: superkardioid, hiperkardioid
- Egyes mikrofonoknál a gömbi és a kardioid kapcsolható
- Az előre-hátra viszony a két irányban mért érzékenység hányadosa (dB)





	Omnidirectional	Subcardioid	Cardioid	Hypercardioid	Line	Bidirectional
Acceptance Angle (3 dB down)	—	170°	120°	100°	90°	90°
Null (angle of minimum sensitivity)	none	160°	180°	110°	120°	90°
Distance Factor (DF)	1.0	1.2	1.7	2.0	2.5	1.7



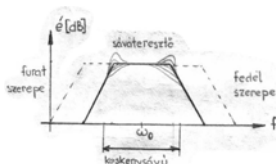
Elektrodinamikus mikrofon

- Általános hangfelvételi célra készül, mérésekre nem alkalmas.
- Sáváteresztő jellegű és önmagában elég keskenysávú is.
- A sáv szélesség és az érzékenység szorzata konstans.
- A sávközép frekvenciát a szokásos képlettel adhatjuk meg:

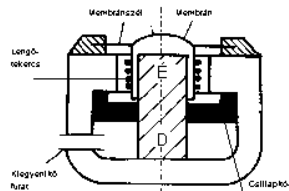
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mC_e}}$$

ahol C_e az üregek által meghatározott eredő kapacitás. Mivel az eszköz keskenysávú, ún. akusztikus kompenzálásra van szükség. Ennek során az átviteli sávot a nagy frekvenciák és a kis frekvenciák felé is kiterjesztjük.

- A mikrofonok membránja különösen érzékeny, arra csavaros fémháló-fedelelet szerelünk.
- Elsődleges szerepe mechanikai védelem, másodlagos akusztikai
- A fedélén lévő lyukak és „akadályok” a méretektől függően tömegként, akusztikus ellenállásként viselkednek, a legfontosabb a membrán és a fedél között keletkezett üreg.
- Eredőben a felső határfrekvenciát feljebb tolja, javítja az átvitelt. Kis frekvenciákon kiemelés a mágneskör megfűrésével érhető el, amely mélyfrekvenciás (akusztikus) rezgőkört fog létrehozni a tömeggel.

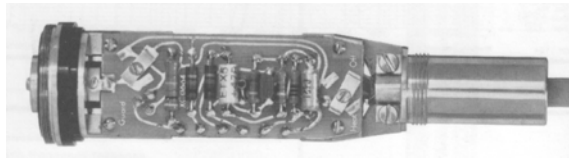


- Karakteristikája általában gömb, érzékenysége 0,1-0,2 mV/Pa körüli, névleges impedancia párszáz ohmos, induktív jellegű.
- Az állandó mágneskör légrésébe helyezett lengőtekercs kivezetéseinek jelenik meg az indukált feszültség. A tekercs a membránnal együtt mozog, a hangnyomásnak megfelelően. A mágneskör és a membrán a mikrofonházban helyezkedik el, amelyet előlről védőrács zár le.

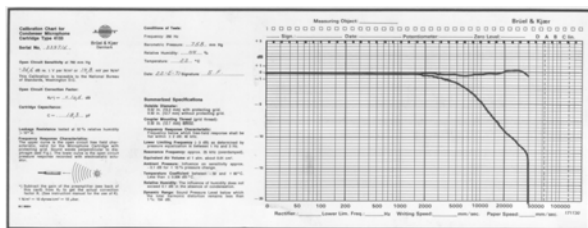
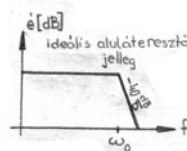
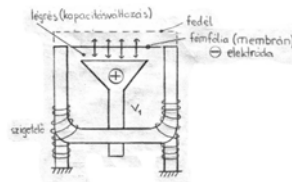


Kondenzátor mikrofon

- A legjobb minőségűek
- Hangfelvételi célra, és mérésekre is alkalmasak
- Általában fél collosak, a membrán méretétől erősen függ az érzékenység és a sávzélesség. Minél nagyobb a membrán, annál jobb az érzékenység, annál kisebb tartományban működik az eszköz. Mérésekhez a negyed collos és az egy collos is előfordul.
- Az előerősítő (preamp) a „nyélben” szokott lenni, erre csavarjuk rá a kapszulát.
- Tápfeszültséget igényelnek (kivétel a prepolarizált).
- A mérőerősítők (mikrofonerősítők) feladata, hogy a mikrofonokat tápfeszültséggel lássa el, valamint a kilépő feszültséget erősítse
- A tápfeszültséget gyakran „előfeszítésnek” is hívjuk, pár voltól, 48 V-ig (DC) terjed, de régebben a 200 V DC is létezett.
- Kábelezéskor mindig le kell kapcsolni róla a feszültséget.
- Mindig ügyeljünk arra, hogy üzemi működéskor be legyen kapcsolva ez a polarizációs feszültség, különben a mért értékek hamisak lesznek (lényegesen kisebbek és valótlanok).



- A kondenzátor mikrofonban kapacitív átalakító van
- A membrán fémfóliából készül (nikkel, titán), ez a negatív elektroda. A pozitív elektroda rögzített, a nyél része. Közöttük a nyugalmi légrés 10 mikron körüli, ennek nagysága változik a membrán mozgásakor.
- A fémház kellően szigetelt, földelt, az ellenelektrodával azonos anyagból készül a hőtágulás miatt. A házat a légköri nyomás kiegyenlítésének céljából vékonyan megfűrik.
- A belső ellenállás a kondenzátor miatt nagy, gigaohm nagyságrendű. Erzékenysége egy nagyságrenddel nagyobb a dinamikusnál, 1-2 mV/Pa. Néveleges impedanciája pF nagyságú, kapacitív jellegű.
- Átviteli függvénye, az érzékenység menete aluláteresztő jellegű.



Calibration Chart for
Condenser Microphone
Cartridge Type 4133



Serial No. 1337161

Open Circuit Sensitivity at 760 mm Hg

136.6 dB re. 1 V per N/m² or 14.8 mV per N/m²
This Calibration is traceable to the National Bureau of Standards, Washington D.C.

Open Circuit Correction Factor:

$$K(f) = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}}$$

Cartridge Capacitance:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^9} \text{ pF}$$

Leakage Resistance tested at 50% relative humidity > 10¹² Ω

Frequency Response Characteristics:

The upper curve is the open circuit free field characteristic, valid for the Microphone Cartridge with protecting grid. Sound waves perpendicular to diaphragm (see Fig.). The lower curve is the open circuit pressure response recorded with electrostatic actuator.



*) Subtract the gain of the preamplifier (see back of this card) from K(f) to get the actual correction factor K. (See instruction manual for use of K).
1 N/m² = 10 dynes/cm² = 10 µbar.

80 000

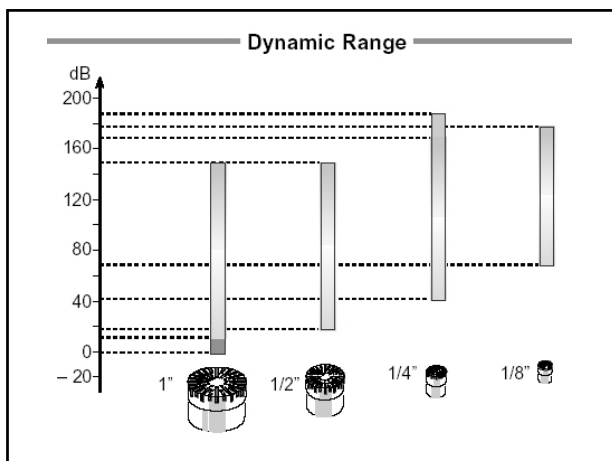
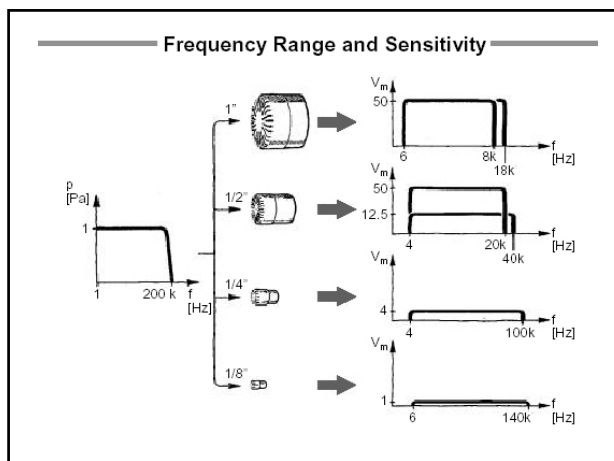
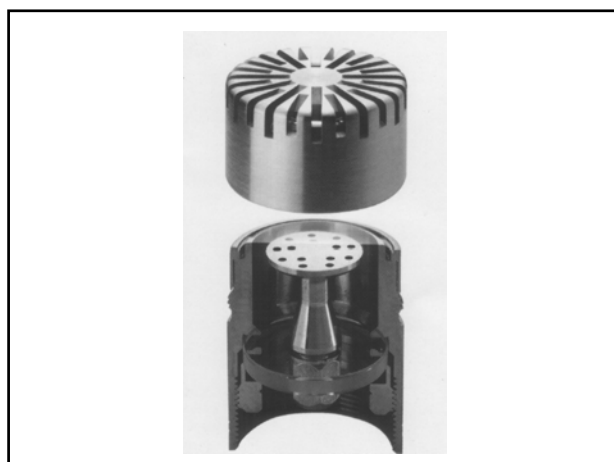
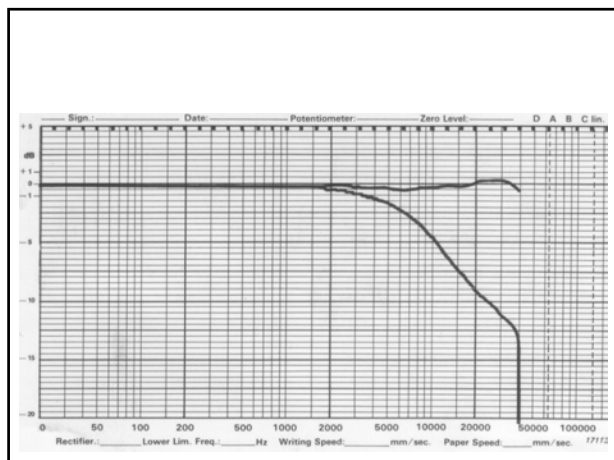
Conditions of Tests:

Frequency: 250 Hz
Barometric Pressure: 755.8 mm Hg
Relative Humidity: 44%
Temperature: 22.0 °C

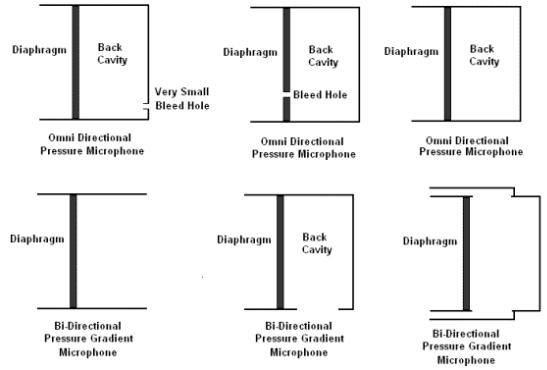
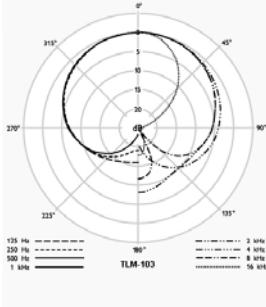
Date: 22-2-71 Signature: E.F.

Summarized Specifications

Outside Diameter: 9.52 in. (242 mm) with protecting grid.
9.50 in. (241 mm) without protecting grid.
Coupler Mounting Thread (grid thread): 0.50 in. (12.7 mm) UNF-2A.
Frequency Response Characteristics: Frequency below which free-field response shall be flat within ± 2 dB, 40 kHz.
Lower Limiting Frequency (± 3 dB) as determined by pressure equalization is between 1 Hz and 3 Hz.
Resonance Frequency: approx. 25 kHz (overdamped).
Equivalent Air Volume at 1 atm. about 0.01 cc.
Ambient Pressure: Influence on sensitivity approx. -0.1 dB for + 10% pressure change.
Temperature Coefficient between -50 and +40 °C. Less than 0.005 dB/°C.
Relative Humidity: The influence of humidity does not exceed 0.1 dB in the absence of condensation.
Dynamic Range: Sound Pressure Level below which the total harmonic distortion remains less than 1%, 154 dB.

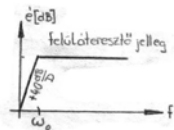


Neumann kondenzátor stúdiómikrofon hangfelvételhez



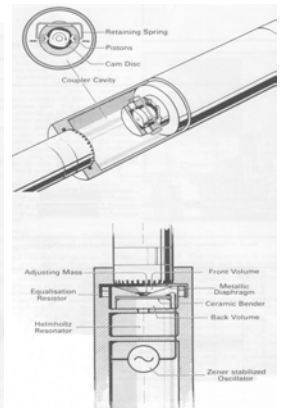
Egyéb mikrofonok

- Gomblyuk-mikrofon. Kisméretűek és általában nem túl jó minőségűek, leginkább beszédhez alkalmasak. Bennük piezo átalakító van (elektrét mikrofon), tehát kapacitív impedancia és átalakítás tartozik hozzá. Gömbkarakterisztika mellé az érzékenység 0,1-2 mV/Pa körüli. Beszédkorrektorra szükség lehet az érthetőség növelésének érdekében és erősítésre is.
- A szalagmikrofon dinamikus, nyolcas karakterisztikájú. Párbeszédhez jó, 0,1-0,2 mV/Pa érzékenységűek. Néveleges impedancia kicsi tízedohm nagyságrendű, így impedanciaillesztésre (200 ohm) szükség van, ehhez transzformátort kapcsolunk hozzá. Átviteli függvénye felüláteresztő jellegű.

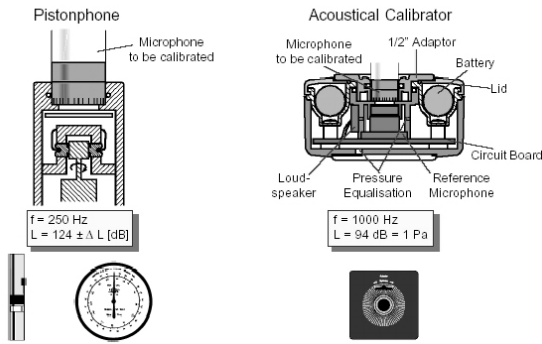


Átviteli függvények összefoglalása

- Összefoglalva a megismert eszközöket, az alábbi csoportosítást tehetjük:
- aluláteresztő (LPF) jellegű eszközök: fejhallgatók, kondenzátor mikrofon
- sáváteresztő (BPF) jellegű eszközök: tölcseres (dinamikus) hangszóró, dinamikus mikrofon
- felüláteresztő (HPF) jellegű eszközök: dinamikus hangszóró, szalagmikrofon



Pistonphone and Acoustical Calibrator



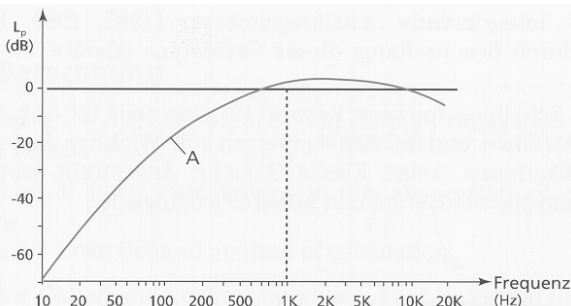
Hangszintmérés

- A hangszintmérés feladata a zajvédelemben jelentős (hallásvédelem, teremakusztika, környezetvédelem, noise control).
- Lényegesek a szabványok, egyetlen mérést sem lehet elvégezni azok ismerte és betartása nélkül. (INCE)
- A készüléket zajszintmérőnek nevezzük (Sound Level Meter)
- Zajnak tekintünk minden olyan hangot, ami nem kellemes (nem hasznos jel). Nem kell hangosnak sem lennie, hogy zavaró legyen, de ha hangos, károsodást okozhat (fülben, műszerben).
- Szubjektív érzetet objektív mérőszámmal adunk meg. Figyelembe kell venni, hogy alacsony és magas frekvenciákon kevésbé zavaró, mint közepes frekvenciákon.

Hangnyomásszint mérés

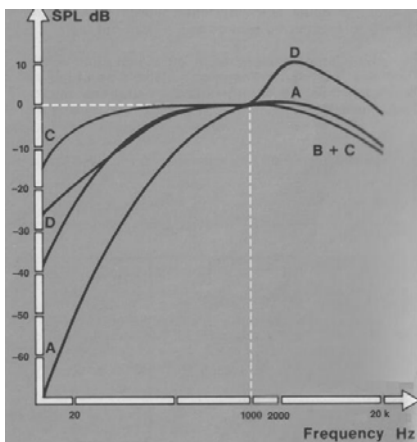
- Amikor a hangnyomásszintet (SPL) mérjük, négy alapvető üzemmód közül kell választanunk egyet:
- 1. lineáris (LIN)
Lineáris üzemmódban semmiféle frekvenciasúlyozást nem alkalmazunk, a műszer a mikrofon membránján fellépő nyomás (RMS) értékét méri, az eredményeket dB-ben kapjuk meg.

- 2. dB(A) súlyozás
Nemzetközileg szabványosított súlyozó görbék
- A hallás érzékenysége szerint súlyozzák a frekvenciaalkomponenseket.
- A leggyakrabban használt dB(A) súlyozó görbe a kis frekvenciák felé közelítve egyre kisebb súllyal veszi figyelembe a mélyfrekvenciás komponenseket.
- Ott érzékletlenebb a fül, és az ott lévő zavarok kevésbé zavaróak.
- Az eredmények jobbák, mint lineáris esetben (amennyiben zajmérésről van szó), ezért környezetvédelemhez előszeretettel alkalmazzák
- Kis hangnyomásszinteknél használható.



- dB(B) súlyozás
Hasonló célú és lefutású görbe, de közepes hangnyomásszinteknél használható.
- dB(C) súlyozás
Nagy hangnyomásszinteknél használandó
Utóbbi kettőt tiszta hangú mérésekre tervezték, zajokra nem pontos az eredményük.

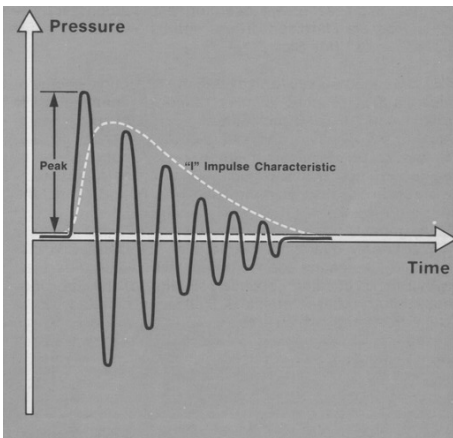
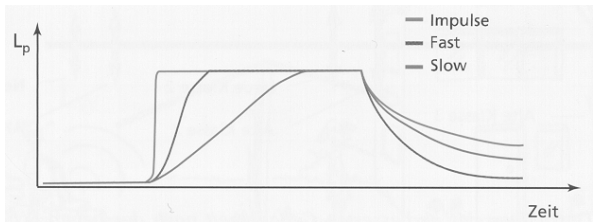
Létezik egy ritkán használatos dB(D) skála is repülőgépmérésekhez.



- A készülék üzemmódját nem csak frekvenciában kell kiválasztani, hanem időben is.
- Itt három gyakran használatos üzemmód van:
- 1. gyors (FAST)
Analog mutatós műszernél ilyen állásban a mutató átlagolási ideje rövid, a mutató gyorsan mozog, nincs mechanikailag csillapítva, nehéz leolvasni.
Lassan változó jelekhez alkalmazható, az időállandó 125 ms. (szabványosított értékek).
Digitális műszernél nem a mutató fog ugrálni, hanem a számjegyek.

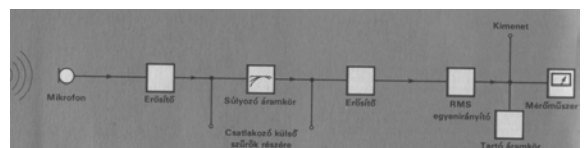
- 2. lassú (SLOW)
A gyors üzemmód ellentéte, csillapított mutatómozgással, nagy időállandójú (1 sec.) integrálással (átlagolással).
- 3. impulzus (IMPULSE)
Speciális üzemmód, 1 sec.-nál rövidebb jelenségek mérésére. Ilyenkor a fül érzékenysége csökken (nincs elég ideje érzékelni a hangot) és a hangosság érzékelése kisebb a valóságos hangerősségnél.
A csúcserőket mindenképpen méri és tárolja (PEAK).
Az átlagolás a csúcserő és/vagy egy 35 ms-os időállandó alapján történik.
A régi analog műszerek hibája volt, hogy effektív és csúcserőket nem tudtak egy időben mérni, a mai modern digitális analizátorok erre képesek és ez nagy előnyük.

Az átlagolási időablakok

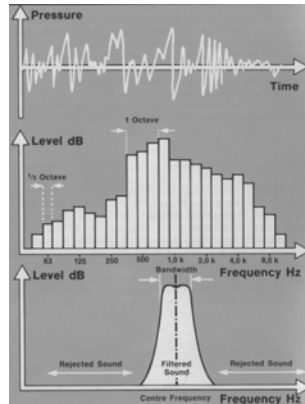


A készülék

- A hangnyomásméző készülék feladata, hogy objektív és reprodukálható méréseket tegyen lehetővé.
- Általános blokkvázlata az alábbi:



- A készülékek az RMS értéket mérik (négyzetes középérték),
- A csúcscsint mérése és tartása manapság alapkövetelmény.
- A drágább digitális berendezések rendelkeznek beépített FFT analízátorral is.
- A mért jel spektrumát oktávsvanban (1/1 octave band) vagy a jobbak már tercávban (1/3 octave band) is képesek valós időben felrajzolni.
- Pld. az 1 kHz középfrekvenciájú oktávsvűrő 707 és 1414 Hz között enged át.



Acoustic Calibration



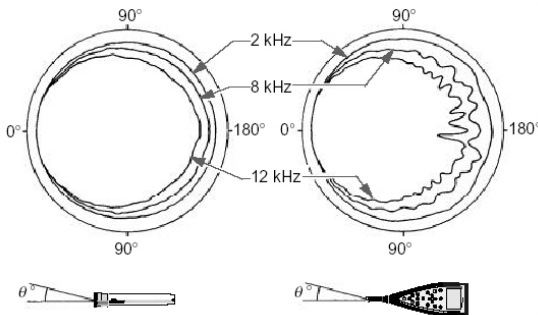
Acoustical Calibrator



Pistonphone

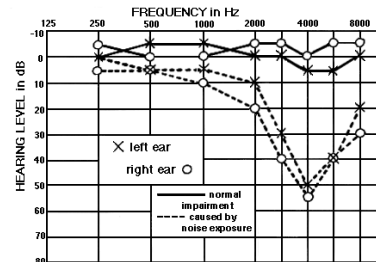


Directional Characteristics



Hangminta

- Audiogram: hangkárosodás szimulálása. Először a normál hallás, majd a sérült hallás, amely zajhatás eredménye.

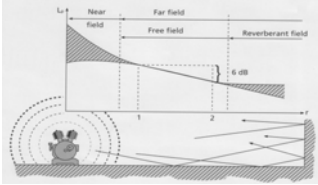


Hangterjedés a levegőben

- Kétszeres távolságban a forrástól az SPL-amplitúdó a felére esik (-6 dB). Az ilyen hangteret szabadterinek (free-field) nevezzük. Ennek mesterséges előállítása a süketszoba, ahol a szabványosító méréseket végezzük.
- Ha a hanghullám akadályba ütközik, elnyelődés és visszaverődés jön létre (a hullámhossz függvényében). Hangszigetelés a mély frekvenciákra nehezebb, mert ekkor a hullámhossz nagy, amely könnyen megkerüli az akadályokat

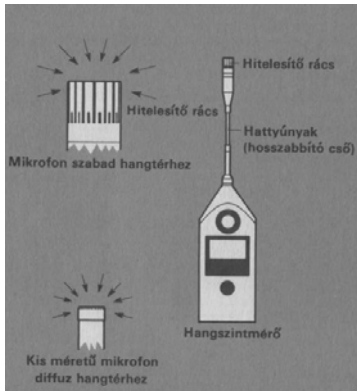
- A teljes visszaverődés esete, amikor a betáplált hangenergiából semmi nem szökik meg, diffúz térnek nevezzük.
- Ilyenkor a helyiség tetszőleges térfogategységeiben az energiasűrűség egyforma, amennyi beáramlik, annyi ki is, nincs kitüntetett terjedési irány.
- A hangnyomásszint egy pontban való mérése értelmetlen.
- Mesterségesen épp olyan nehéz előállítani, mint a süketszobát. Az ilyen ún. zengőszobák falai nem párhuzamosak (szabálytalan alakú), vasból, csempéből, erősen visszaverő anyagokból áll a felülete is.
- Gyakran különböző geometria elemekkel növelik a visszaverődéseket: kúpok, gömbök lógnak a falakról.
- Ritkábban használatos mérőhelyiség, a hangforrások teljes akusztikai teljesítménye mérhető, gépek zajvizsgálata, mikrofonok diffuse-field átviteli függvénye vagy éppen utóhangsúlyozó idő bemutatókra alkalmas (hiszen nagyon lassan vesz el az energia, a mélyfrekvenciák akár 10-15 másodpercig is megmaradhatnak!).

- A normál helységek, a két szélső állapot között helyezkednek el.
- A legjobb hangszigetelést akkor érhetjük el, ha az elnyelő anyag (pld. a függöny) a visszaverő felülettől (fal, ablak) negyed hullámhossz távolságra van.
- A szőnyegek és függönyök leginkább a magas frekvenciákat csillapítják, mert ott mérhető össze a vastagság a negyed hullámhosszal.
- A közel térben mérni nem könnyű és gyakran hibás eredményt ad. Túl nagy hullámhossz megkerüli a mikrofont, és kisebb értéket mérünk a valóságosnál. A távol térben, ahol sok a reflexió, ott sem jó mérni, mert ott a mért érték nagyobb lesz a valóságosnál. Igyekezzünk a kettő közötti szabad hangtérben mérni, ahol igaz a -6dB-es szabály.

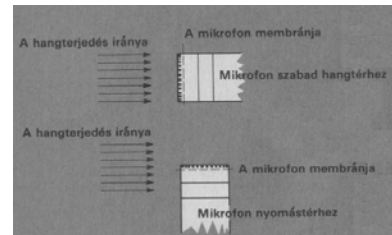


Mérőmikrofonok

- A mérőműszer legfontosabb eleme a mérőmikrofon.
- Ez kizárólag kiváló minőségű, drága kondenzátor mikrofon.
- Elvárás a gömb karakterisztika, az egyenletes frekvencia átvitel (érzékenység), ami különösen diffúz méréseknél lényeges.
- A készülékek általában sok elemet igényelnek, hogy tápfeszültséggel lássák el a mikrofont, de léteznek már modern *prepolarizált* mikrofonok, amelyek ilyen nem igényelnek.
- A műszereknek szigorú iránykarakteristikája is van, hiszen a készülék maga befolyásolja a hangteret, amelyben mér. (Type 0)
- A mikrofonhoz tartozik szélvédő szivacs és gyakran hosszabbító „nyak” is, amellyel messzebb lehet tartani a készülék testétől, ez pedig csökkenti a mérő személy és a készülék okozta zavarokat.

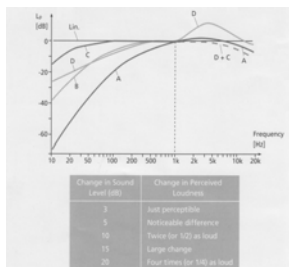


- A mikrofon lehet *szabad hangterű* (free-field), egyenletes átvitelrel. A szabadterei mérésekhez alkalmas, ilyenkor a membránt a forrás felé kell fordítani mérésakor.
- A mikrofon lehet *nyomás érzékeny* (pressure-field). A terjedéssel azonos irányban kell elhelyezni, általában felfelé áll mérés közben. Ilyenkor a „torlódás” hatása csekély, a hanghullámok nem merőleges érkezik a membránra.



Mért paraméterek

- Egy zajanalizátor rengeteg paramétert tud mérni és számítani.
- 1. hangnyomásszint
Az SPL érték dB-ben megadott szám. Mérhetjük lineárisan vagy súlyozó görbével, különböző időbeni átlagolásokkal (lásd fenn) és lehet RMS (effektív), PEAK (csúcs) vagy AVG (átlag).



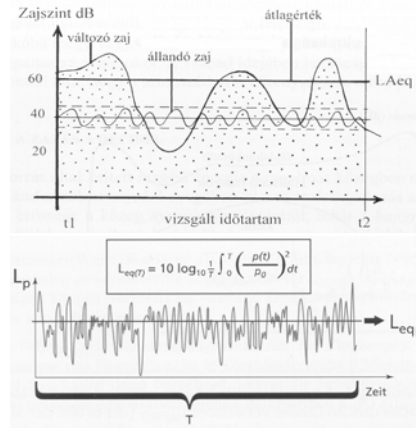
- 2. spectrogram
A drágább digitális készülékek oktáv és/vagy tercsávban képesek kirajzolni a szabvány által meghatározott módon és tartományokban a bejövő jel spektrumát.
- 3. zajdózis
A zajdózis a zajszint és a hatásidő szorzata.
- 4. ekvivalens zajszint
A mérés során a zajt periodikusan mintavételezi a műszer és kiírja az értéket. Ha a zaj „egyenzaj”, akkor könnyű megadni egy számmal az értékét, ha azonban változó zaj, akkor már nehezebb. Erre találták ki az ekvivalens zajszint fogalmát (Equivalent Continuous Sound Level):

Leq

- A képletben T a mérési időtartam, L_i az SPL-érték az i -dik időmintában, t_i a mintavételezés ideje, a mértékegység dB(A).

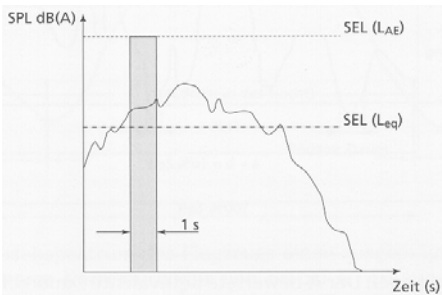
$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (t_i 10^{0.1 L_i}) \right]$$

- Jelentése: az a zajszint dB(A)-ban, amely ugyanakkora halláskárosodással (terheléssel) jár, mint változó esetben.
- Ezt a zajszintmérő automatikusan kiszámítja, adott időtartományban. Ha tehát az L_{eq} értéke egy változó zajú forrás esetén, 1 perc mérés után 90 dB(A), akkor az olyan károsító az emberi hallás számára, mintha 1 percig egy 90 dB(A)-s egyenazajú forrás szólt volna (ugyanakkora az energiája).



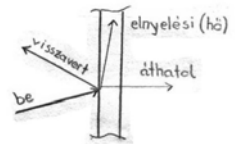
5. SEL

Sound Exposure Level: az a szint (1 sec. alatt), melynek ugyanakkora az akusztikai energiája, mint az eredeti hangnak (T idő alatt). Az egy másodpercre normalizált energia

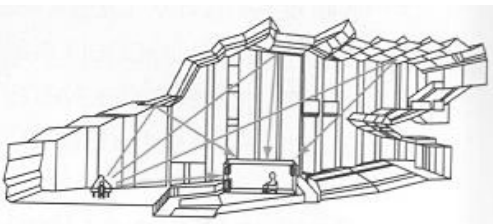


Teremakusztika

- A teremakusztika a terem akusztikájával, hangzásával foglalkozik.
- A tervezés során a cél egyrészt a jobb hangzás, másrészt a hangszigetelés: zajmentesség ki- és befelé
- A reflexiónál már láttuk, hogy egy akadályba (fal) ütköző hanghullám egy része visszaverődik, kisebb része áthatol azon, a legkisebb része pedig hő formájában melegíti azt.

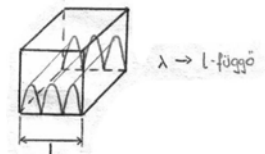


- Ha a λ hullámhossz jóval kisebb a fal felületénél, a beesési- és visszaverődési szögekre, a hangutak kiszámításához alkalmazhatók a fénytörési törvények
- Ísm: 50 ms-nál található a visszhang-küszöb (ez kb. 17 méteres távolságnak felel meg), e felett visszhangot fogunk érzékelni.
- A visszhang káros jelenség, rontja a beszédérthetőséget és a hangzást is. A jó hangzashoz visszaverődésekre is szükség van.

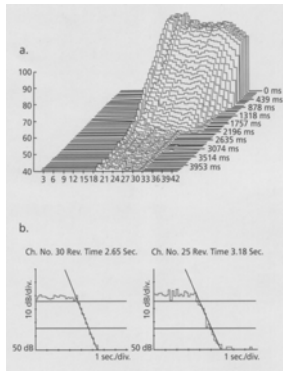


Energia és módusok

- A hangenergia egy pontban a direkt és a visszavert hullámok energiájának az összege. Ez lehet erősítés és kioltás is (interferencia).
- A terem komplex rezonátor, természetes rezgő módusokkal.
- A terem természetes módusai (rezonanciái) helyi maximumokat és minimumokat hoznak létre, amelyek a geometriai alaktól és mérettől és a hullámhossztól függ.
- Nyomásmaximum van a sarkokban.
- A konkurensen, időben eltolódva megjelenő módusok hozzák létre a diffúz teret.

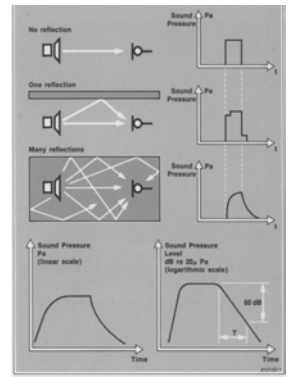


- A falban elnyelt hangenergiát állandó
- A betáplált hangenergia egy teremben fokozatosan elvész, ezért ha ott állandó energiaszintet akarunk tartani, akkor a veszteségeknek megfelelően azt állandóan pótolni kell.
- Ha ez a betápláló forrás leáll, az energia exponenciálisan esni kezd.
- Ennek mértéke függ az anyagtól, a frekvenciától és a beesési szögtől is.

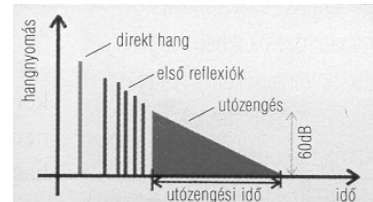
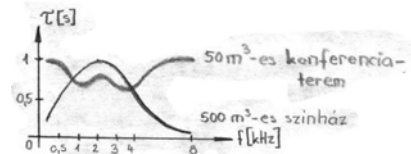


Az utózengési idő

- A legfontosabb paramétere egy teremnek az **utózengési idő** (reverberation time), jele a τ .
- Az az időtartam, ami alatt adott, kezdeti hangnyomásszint szint 60 dB-t esik (1000-ed részére csökken a nyomás).



- Az utózengési időről elmondhatjuk, hogy
 - τ nagy, ha sok a reflexió (pl. fürdőszobában)
 - τ kicsi, ha kevés a reflexió (pl. bútorok között)
 - τ frekvenciafüggő: kis frekvenciánál hosszabb (nehezebb elnyelni)
 - τ határozza meg a terem felhasználhatóságát
 - a nagy τ rontja a beszédérthetőséget és a zene élvezhetősége is csökken
 - zenéhez kb. $\tau_{\max} = 1...3$ s szükséges
 - a stúdió 1 s alatti utózengési idővel rendelkezik, koncerttermek 1-2 s közöttivel, nagyobb templom belső tere 3 s-nál hosszabb idővel is rendelkezhet
 - diagrammal is megadhatjuk értékét



Az utózengési idő számítása

- Az utózengési időt számíthatjuk és mérhetjük is.
- Két empirikus formula létezik
- A τ értéke függ a terem térfogatától (V) és az ún. abszorpciótól (elnyelés). Nem túl kicsi τ esetén alkalmazzuk a *Sabine*-formulát, három lépésben:

$$\tau = \frac{0,161V}{A}$$

ahol az utózengési időt sec-ban kapjuk meg, ha V -t köbméterben, A -t négyzetméterben helyettesítjük, a 0,161-es konstansnak pedig [s/m] a dimenziója.

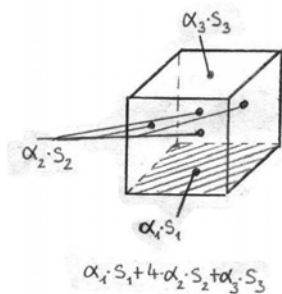
- Az A itt nem a felületet jelenti közvetlenül, hanem az abszorpciót:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i$$

itt az S változó már ténylegesen egy adott felületet jelent négyzetméterben, a hozzá tartozó elnyelési tényezővel (alfa). Az elnyelési tényező általában adott, táblázatból kikereshető. Alfa mérhető is, és számolható is:
 α = elnyelt energia/beeső energia.

- Az elnyelési tényező frekvenciafüggő.
- Ez a képlet nagy utózengési időknél használatos, és egyenletes terjedést feltételez minden irányban (izotróp), a terem módusait elhanyagolva.
- Nagyobb A esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz, és egyre kisebb τ esetén is.

A Sabine-formula szemléltetése



- Kisebbs τ esetén a másik használatos képlet az *Eyring*-formula:

$$\tau = \frac{0,161V}{S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

ahol egy átlagos alával dolgozunk:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_i}$$

és

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_i$$

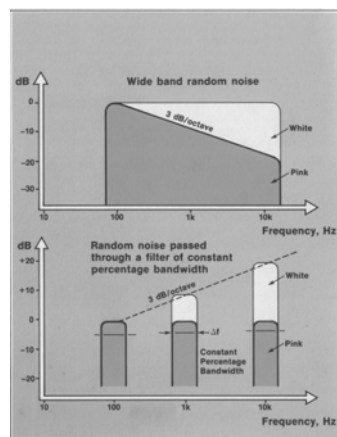
- Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az α -k kb. egyelők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert sűketskobára, ahol alfa értéke egy, τ -ra zérus jön ki.

Az utózungési idő mérése

- Alapjában két módszer létezik a mérésre.
- A legjobb az *impulzusválaszos* mérés, amikor impulzussal gerjesztjük a termet
- Kimondottan erre készült pisztoly-hangforrással, de egyszerű papírzacskó durrantás is megfelel
- Mérjük azt az időt, amikor a kezdeti „bumm” szintje hatvan dB-t esik.
- Hátránya a módszernek, hogy kevés energiát közöl kis frekvenciákon, nem reprodukálható és nem biztos, hogy elég sokáig tart az impulzus.

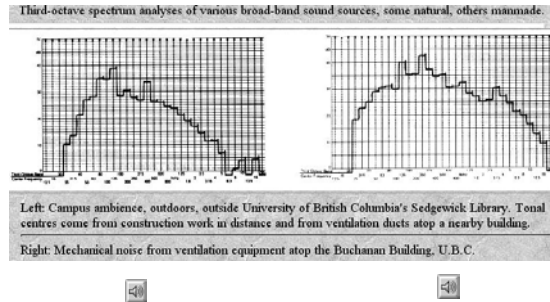
- A másik módszer *zajgerjesztéssel* dolgozik.
- A zajgenerátor fehérzajt ad ki magából (vagy rózsaszín zajt).
- A hangforrás hangos, mely általában hangszóró vagy ún. referencia zajgenerátor
- Miután ezt bekapcsoltuk és feltöltöttük a hangteret energiával beáll egy állandó szint, kikapcsoljuk, és nézzük, mennyi idő alatt esik az a szint hatvan dB-t.

- A rózsaszín zajt akkor használjuk, ha az átvitel olyan szűrőn keresztül történik, melynek sáv szélessége a frekvenciával arányosan nő, dupla sáv szélességű lesz oktávonként.
- Ilyen szűrőbe egyre kevesebb energia kell ahhoz, hogy a közölt energia konstans maradjon, méghozzá pontosan -3 dB/oktáv.
- Az ilyen szűrők sáv szélessége a logaritmikus tengelyen egyforma csak (lásd ábra).
- Ezek tipikus oktáv- vagy tercsáv szűrők, melyek értelem szerűn változó szélességűek, ahogy egyre nagyobb frekvenciákon állítjuk elő.



Hangminta

■ Két zajminta



$$T_{60}, T_{40}, T_{20}$$

- Az így mért értéket T_{60} -al jelöljük.
- Azonban ekkora csökkenés nem mindig mérhető az alapzaj miatt. Ha ez a helyzet, akkor a -40 dB-es pontot vagy csak a -20 dB-es pontot mérjük meg, és ebből interpolációval számítjuk ki a hatvánashoz tartozót.
- Ilyenkor T_{40} -el ill. T_{20} -al jelöljük az értékeket (A T_{40} nem a -40 dB-es pont ideje, hanem annak a -60 dB-es pontnak, amihez a mérést csak 40 dB-ig végeztük).
- Az ilyen méréshez tehát nem csak mikrofon hanem pontos óra is kell.
- A mikrofon és a hangforrás helyzete is befolyásolja a mérést a módusok miatt, ezért érdemes a forrást a sarok felé tenni, ahol a módusoknak nyomás maximuma van, illetve több helyen is mérni, majd átlagolni.

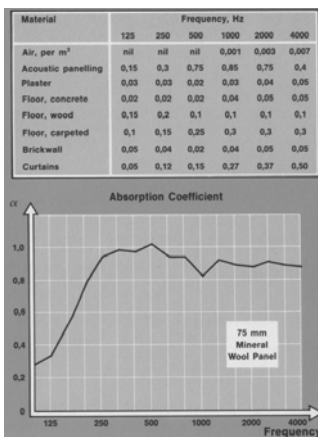
Az elnyelés mérése

- Elnyelési tényezőt tipikusan zengőszobában mérünk. Adott felületű (10 négyzetméteres) mintát kell bevinni, majd mérés után a Sabine-formulából visszaszámolni (ismert, megmért utözengési idejű zengőszobában):

$$\alpha = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_e} \right)$$

- A képletben alfa a keresett változó, S a mintaanyag felülete, V a terem térfogata, T_s az utözengési idő a mintaanyaggal, T_e pedig a zengőszoba üres utözengési ideje (a minta nélkül).
- Azért van szükség zengőszobára, hogy annak legyen a T_e ideje és ezzel pontosabb méréseket lehessen végezni.
- A mérést általában a szabvány által előírt oktávsvábván vagy tercsvábvokban végezzük és így frekvenciafüggő diagramot rajzolhatunk

- Létezik egy másik, az *állóhullám* módszer is.
- Ekkor egy csőre van szükség, egyik végében hangszóró, a másik végében a minta zárja le azt. A hangszóró állóhullámokat hoz létre a csőben, és az alfa kiszámítható a létrejövő nyomás maximumok és a minimumok arányából (összehasonlítva a tökéletes reflektorral való lezárás esetével)
- Ehhez egy mozgó mikrofont kell végigvinni a cső hosszában.
- Előnye, hogy gyors módszer, reprodukálható és csak kis méretű mintára van szükség.
- Hátránya, hogy alfa a normál merőleges beesés esetére jön ki és csak akkor lesz igaz, ha az a kis mintadarab jellemző a nagyobb felületre is.



Beszédérthetőség

- A beszédérthetőség (Speech Intelligibility) a beszédátvitel mérőszáma.
- A beszélő általában alkalmazkodik a terem adottságaihoz, lassabban beszél visszhangos teremben, hangosabban egy csillapított helyiségben.
- A leggyakoribb probléma a magas háttérzaj és a túl nagy utözengési idő.
- A beszédben természetes hibajavítás és redundancia van. A lassabb és hangosabb beszéd jobban érthető.
- A mérések általában szubjektív lehallgatási tesztek, ahol az alanyok beszéd (mondat, szó) vagy szótag (logatom) érthetőséget vizsgálnak.
- A beszédérthetőség általában százalékban adja meg a hibát vagy 0 és 1 közötti mérőszámmal.

- AI (articulation index), mely 30% alatt rossz, hetven felett kiváló.
- STI (Speech Transmission Index), ahol nem emberekkel, hanem gépekkel mérünk és „objektív” eredményeket kapunk.
- Ennek a legmodernebb módja a RASTI (Rapid STI). Ez is egy 0 és 1 közötti szám. A RASTI Transmitter rőzsaszín zajt ad ki 59 ill. 50 dB (1 méterre tőle mérve) erősséggel az 500 Hz és a 2000 Hz-es oktávsvágban. Ezt a zaj szinuszosan modulálja különböző frekvenciákkal szimultán. Ezzel modellezi a beszédet.
- A készülék iránykarakterisztikája olyan, hogy a tőle 1 méterre lévő vevő ugyanúgy érzékeli azt, mintha emberi beszélő adná ki. A vevő a vett hang moduláció változását kiértékeli. Az adó és a vevő nincs szinkronizálva (független eszközök).
- Mivel a RASTI gyors módszer, sok helyen lehet mérni egy teremben és szintfelületekkel, az azonos pontokat összekötve, kontúrábrát rajzolhatunk.

- RASTI adó és vevő, valamint a két oktávsvág szintjének megállapítása a modulációs frekvenciák segítségével.

- Ha az MTF lapos, a zavar valamilyen zaj, ha csökkenő lefutású, akkor visszaverődések vannak

