Műszaki akusztika
(NGB_TA_020_1)

jegyzet

Dr. Wersényi György

2010

Tartalom

1. Hangtani alapok

Ebben a fejezetben áttekintjük a hangtani fizikai alapjait bevezető jelleggel. Ide tartoznak a rezgőmozgások matematikai leírásai, csoportosítása, a legalapvetőbb definíciók, mértékegységek és a hallás alapjai.

1.1 A rezgőmozgás

A rezgés valamely mennyiség időben periódikusan ismétlődő változása. Ez általában anyaghoz (a közeghez) kötött, amelyben a rezgésállapot terjed. Hullámterjedés azonban van a vákuumban is (pld. az űrben, műholdak esetén), ahol az elektromágneses hullám „csak úgy” terjed, közvetítő közeg nélkül. Számunkra azonban csak az olyan hullámterjedés a fontos, amely közegben történik, hiszen ettől válik hallható hanggá. Egy 9 kHz-es rezgés csak akkor „hang”, ha valami rezgő tárgy a levegő részecskéit hozza mozgásba és az a fülünkbe jut. Ezért nem halljuk egy 9 kHz-es rezgőkört rezegni. A hangterjedéskor is a mozgásállapot terjed, nem pedig maga az anyag hasonlóan ahhoz, ahogy a parafadugó ring a tenger hullámain fel-le, de nem halad azokkal. A közeg tehát lehet légnemű, tipikusan a levegő, de szilárd és folyékony is. Különböző közeg ellenállása különböző, így benne a hang terjedési sebessége ill. annak távolsága változó.
A rezgés leírása történhet az időtartományban (oszcilloszkóp) és a frekvenciatartományban (spektrum analizátor). Hanghullámnak (akusztikus hullámnak) nevezzük a 20 Hz – 20 kHz közötti rezgéseket és azok összetételét. Azt az eszközt, ami képes az (elektro)mechanikai rezgéseket hanghullámokká és viszont alakítani elektromechanikai átalakítónak nevezzük. Ezekre közismert példa a hangszóró vagy a mikrofon, mely elektromos feszültséghullámokat alakít hanggá illetve viszont.

1.1.1 A harmonikus rezgés

A harmonikus rezgés matematikai alakja:

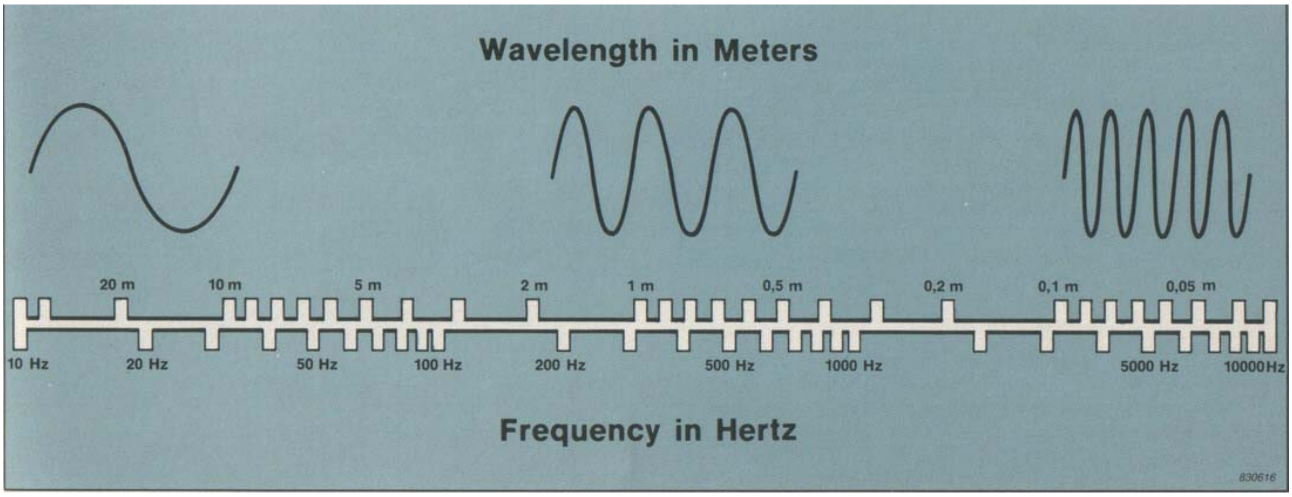
$$y(t) = A\sin(\omega t)$$

ahol $y(t)$ a pillanatérték az idő függvényében, A az amplitúdó, ω a körfrekvencia [rad/sec]-ban, továbbá:

$$\omega = 2\pi f$$

ahol f a frekvencia [Hz]-ben.
A harmonikus rezgőmozgást, mivel egyetlen f frekvencia alkotja, „tiszta” hangnak, vagy szinuszos rezgésnek is nevezzük. Ilyen a természetben nem fordul elő, ezek mesterséges hangok.
Egy szinuszos rezgésnek a frekvenciája megadja a másodpercenkénti rezgések számát, tehát az 1000 Hz-es hang másodpercenként pontosan ezer periódust tartalmaz. A Hz megadható 1/s alakban is. Az amplitúdó a maximális kitérés értéke, amikor a $\sin(\omega t)$ értéke 1 ill. -1. A rezgésnek van φ

fázisa is, amely a környezethez vagy más rezgésekhez való időviszonyt fejezi ki; más néven a függvény értéke a t=0 időpillanatban.



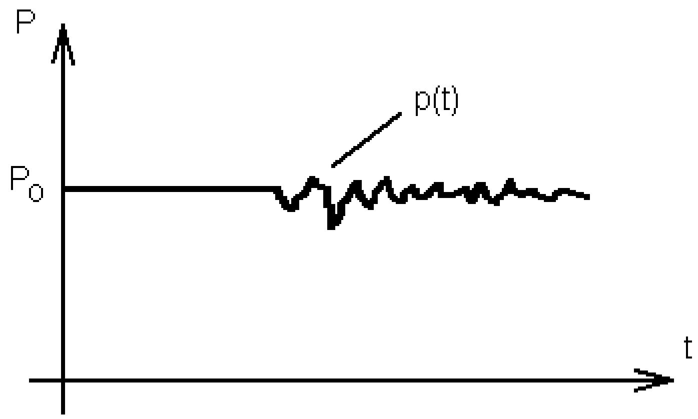
Frekvencia és hullámhossz kapcsolata. A 20 Hz-es jel 17 méteres, míg a 20 kHz-es 1,7 cm hullámhosszú.

Az általános alak:

$y(t) = A_0+A\sin(\omega t+\varphi)$

ahol A_0 az amplitúdó egyenszintje. Levegőben történő hanghullámterjedés esetén ez maga az atmoszféranyomás, értéke $A_0 \approx 10^5$ [Pa] = 1 [atm]. Ebből is látható már, hogy a hanghullámoknál az amplitúdó a hangnyomásnak felel meg, de ez az általános leírás használható a hangszóró kapcsaira adott feszültségnél is, akkor azonban Volt dimenziójú. A számításoknál ezt az értéket nem szoktuk figyelembe venni, hiszen ez egy DC nyomásérték, amire legtöbbször nincs szükségünk, csak az erre rászuperponálódó változásra. Az atmoszféranyomás a levegő paramétereitől, időjárástól, tengerszint feletti magasságtól függ, de egy mikrofon átviteli függvényének megállapításához egyszerűsíthetünk vele. Ez az 1 atmoszféra kiegyenlítésre kerül a fülben is „ellennyomás" segítségével, amikor kinyitjuk a szánkat vagy nyelünk. Ha magas hegyre gyorsan megyünk fel, akkor nincs elég idő a szabályozásra és bedugul a fülünk, mert a belső nyomás még az alsó nagyobb értéken van, és ez kifelé nyomja a dobhártyát. Mivel nyeléskor nyílik a nyomáskiegyenlítő nyílás a fülben (az ún. Eustach-kürt), néhány erősebb nyelés, cukorkaszopogatás ill. a nyitott szájjal való utazás megelőzheti a füldugulást.

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



A hangnyomás időfüggvénye, amelyet fülünk érzékel rászuperponálódik az atmoszféra DC nyomására.

Az y(t) tehát a kitérés időfüggvénye, melynek deriváltja értelmezik a terjedési sebességet és a gyorsulást:

$y(t) = A\sin(\omega t)$
$v(t) = y'(t) = dy/dt = \omega A\cos(\omega t)$
$a(t) = y''(t) = v'(t) = d^2y/dt^2 = -\omega^2 A\sin(\omega t)$.

A v(t) függvény láthatóan $\pi/2$-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. Ügyeljünk arra, hogy bár viszonylag ritkán használjuk a gyorsulást, annak értéke rövid ideig hatva meglehetősen nagy értéket is felvehet!

Példa:
Legyen f=50 Hz, A = 2 mm, $\omega = 2\pi f = 100\pi = 314$ rad/sec.
Ekkor a deriváltak a maximumot akkor veszik fel, ha a szögfüggvény értéke egy. A maximális sebesség $\cos(\omega t)=1$ esetén: $v_{max} = A\omega = 628$ mm/s. Hasonlóan, a gyorsulás maximális értéke $\sin(\omega t)=1$ esetén: $a_{max} = -A\omega^2 = -197\ m/s^2$, ami rendkívül nagy, de valóságos érték egy hangszóró membránja esetén.

1.1.2 A hanghullámok adatai

Most ismerkedjünk meg a hanghullámok leíráshoz használt matematikai alakokkal! Egy hangrezgésnek az alábbi paraméterei lehetnek:

Jelölés	Név	Mértékegység	Kiszámítás	
f	Frekvencia	Hz, 1/s, ciklus/sec	f=c/λ	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	ω = 2πf	
λ	Hullámhossz	méter		Egy periódus méterben mért hossza, a maximumok (az azonos amplitúdójú pontok) távolsága.
k	Hullámszám	1/m	k = ω/c	
c	Terjedési sebesség	m/s	c = λf	A kitérés deriváltja

A hang terjedési sebessége anyagfüggő. Függ a közeg anyagától, hőmérsékletétől, sűrűségtől:

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

ahol P_0 a már megismert atmoszféranyomás, ρ pedig a levegő sűrűsége. Ha behelyettesítjük a 10^5 Pa-t és az 1,3 kg/m^3 adatokat, c = 328 m/s érték jön ki a hangsebességre. 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. Ettől eltérő hőmérsékleten az alábbi képlettel módosíthatunk:

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

ahová a *t* hőmérsékletet Kelvinben kell beírni, a *Δt* hőmérsékletváltozásnál azonban mindegy. Látható, hogy a hangsebesség a 1 fokos hőmérséklet emelkedés esetén 0,6 m/s-al megnő! Ez +20 fok esetén már 12 m/s, ezért néha találkozhatunk a 328+12=340 m/s átlagsebességgel is a könyvekben, holott a pontosabb érték 332 m/s-t ad meg a nulla fokos levegőre, és így jön ki a pontosabb 344 m/s. Ne feledjük, hogy a terjedési sebesség a hullámhossz és a frekvencia szorzata, azaz a frekvencia nem a hullámhossz, hanem a periódusidő reciproka. Jól jegyezzük meg az alábbi összefüggéseket:

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

Ahogy látható, $\omega = kc$, ahol *k* az ún. hullámszám, melyet sokszor használunk a képletekben. Általánosabban így találkozunk vele:

$k = 2\pi/\lambda$.

A táblázatban nem szerepel a nyomás, mint a hanghullám legfontosabb akusztikai paramétere. Mértékegységének az SI egységet, a [Pa]-t használjuk, régebben elterjedt volt a [bar] is. Amit tudni érdemes, hogy 1 bar definíció szerint pontosan 10^5 Pa.

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

Hangsebesség értékek

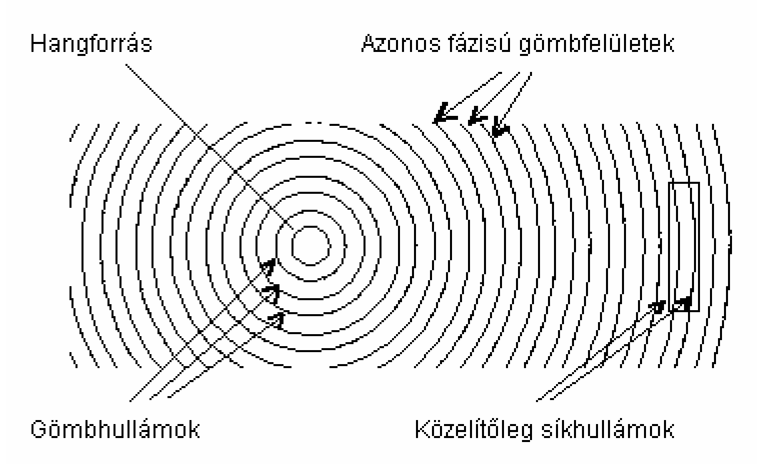
1.1.3 Műszaki paraméterek

A fizikai mennyiségeken kívül a műszaki, elektroakusztikai kezeléshez más mértékekre is szükségünk van. A későbbiekben részletesen tárgyalásra kerül az elektromosságban megismert impedancia különböző fajtái, melyeket hullámokra is értelezünk. 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. Egy speciális esetben, síkhullámoknál az akusztikus impedancia valós, értéke

$Z_{\text{síkhullám}} = \rho c$ $[Ns/m^3]$ vagy $[kg/m^2s]$.



Gömbhullámú forrás hullámai kellő távolságban síkhullámként közelíthetők.

Amennyiben a közeg a levegő, akkor a sűrűséget ρ_0-al jelöljük, és a fenti impedanciát a közeg karakterisztikus impedanciájának, vagy más néven fajlagos akusztikus impedanciának is nevezzük. Síkhullámokra érvényes, hogy a hangnyomás és a részecskesebesség hányadosa állandó:

$Z_{\text{síkhullám, levegő}} = p/v = \rho_0 c = 415$ [Ns/m^3].

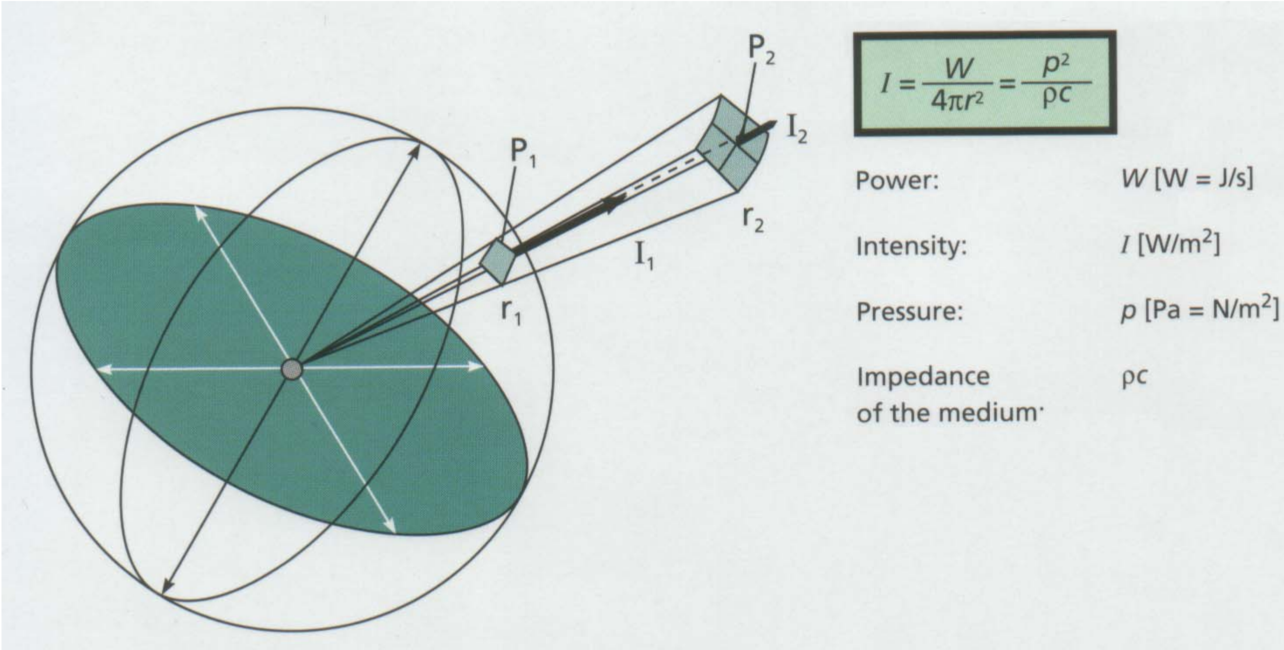
Ez az érték természetesen erősen függ a terjedési sebességtől (közvetve a kőmérséklettől), de ezt az átlagos értéket találjuk a legtöbbször. Állóhullámok és egyéb hullámok esetén Z értéke komplex szám.
A hanghullámok másik nagyon fontos paramétere az intenzitás. Definíció szerint az intenzitás a felületegységen áthaladó (hang)energia átlaga, ahol a felület merőleges a terjedésre, az időegység pedig a másodperc. Más szóval, az intenzitás 1 m^2 felületen, 1 s alatt átáramlott (átlag)energia. A hangnyomással és a részecskesebességgel megadva:

$i = pv$ [W/m^2].

Az intenzitás teljesítmény-jellegű mennyiség (azaz 10-es logaritmussal kell majd szintet számolni, lásd később), továbbá 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, hogy ne keverjük őket össze! A *munka* és az *energia* Joule-ban mérendő, a *teljesítmény* Wattban, ahol 1 Joule = 1 Ws. Szavakba öntve, a teljesítmény a munkavégzés sebessége, az időegység alatt átadott energia: 1 Watt = 1 J/s. Ettől függetlenül az intenzitás definíciójában az energiát és a teljesítményt is bevehetjük, hiszen a kettő arányos egymással. A definíció szerinti mértékegység az energiát helyettesítve: J/m^{2}s lenne, hiszen ez pontosan megfelel a m^2-en másodperc alatt átáramlott energiával. Azonban egyszerűbb a J/s-ot W-al helyettesíteni.
A későbbiekben látni fogjuk majd a bevezetett mennyiségek közötti kapcsolatokat. Két példát mutatva az intenzitás kiszámítására:

$I_{\text{haladó síkhullám}} = P^2/\rho c = \rho c v^2$.
$I_{\text{diffúz hangtér}} = P^2/4\rho c$.

Szintén átfogalmazva, a síkhullámú képletből látható, hogy az intenzitás nem más, mint a levegő fajlagos akusztikai ellenállása (amely a legnagyobb sugárzási ellenállás, lásd később) szorozva a részecskesebesség négyzetével.



Az intenzitás megjelenítése. A hangteljesítmény (W) a kisugárzott teljes energia nagysága másodpercenként. Az intenzitás az energia áramlása felületegységen. A hangteljesítmény 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. Az intenzitás vektoriális mennyiség.

Kézi Brüel&Kjaer zajanalizátor intenzitásmérő páros szondával és a mérőszoftverrel

Ezekben a képletekben *P* a hangnyomás effektív értéke. Az angol szakirodalom az effektív értéket root mean square-nek nevezi és RMS-nek rövidíti. Az effektív értéke egy jelnek közvetlen kapcsolatban áll annak energiatartalmával:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t)dt}$$

ahol a(t) most a hangjel időfüggvénye. A legegyszerűbb szinuszos esetben az effektív érték a csúcsérték gyökketted része. Az effektív érték azonban nem teljesen egyezik meg az átlagértékkel (angolul average, AVG), melyet így tudunk kiszámítani:

$$A_{AVG} = \frac{1}{T}\sqrt{\int_0^T |a(t)|dt}$$

tehát a jel abszolút értékét kell behelyettesíteni, és az 1/T most nincs a gyök alatt. Szinuszos esetben ez is egyszerűsödik:

$$A_{RMS} = \frac{A_{PEAK}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{AVG}.$$

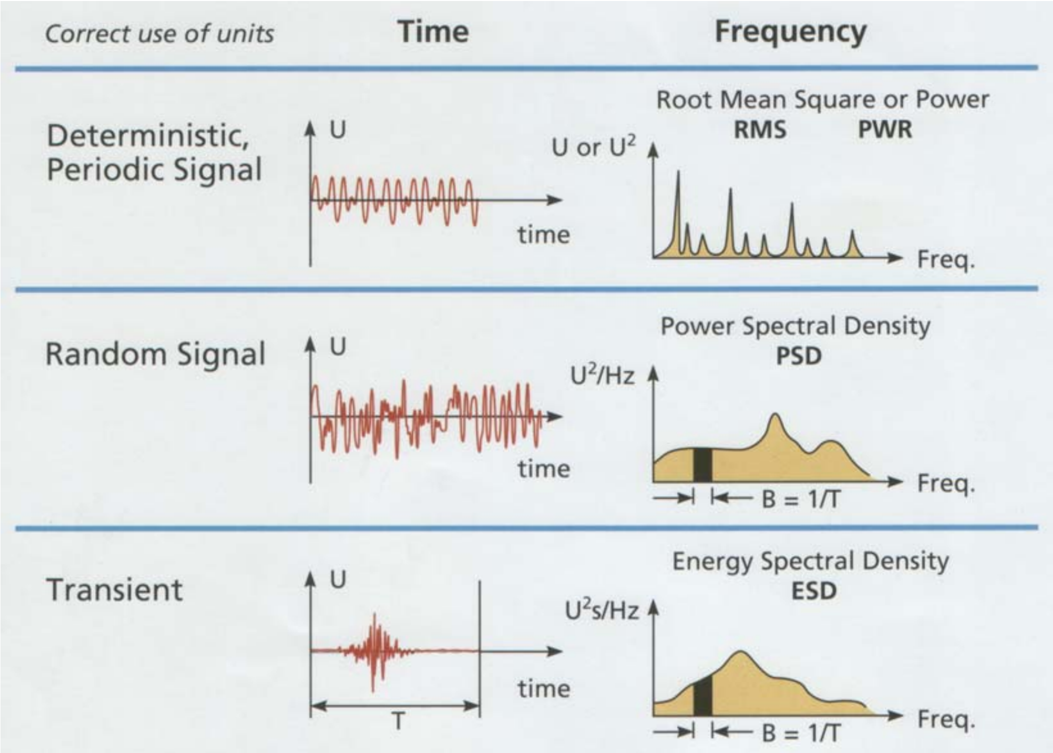
A jel csúcsértéke angolul peak, magyarul ez a maximális amplitúdó. Ahogy látható, óvatosan bánjunk az effektív értékkel, amely energetikai szempontból azt jelenti, hogy pld. egy 220 V effektív értékű forrás ugyanakkor teljesítményt ad le egy adott impedancián, mint egy 220 V DC forrás – ekkor azonban az AC forrás csúcsértéke 311 V, ahogy azt már ismerjük a konnektor esetén.
A hanghullámnak van mozgási energiája (a részecskesebesség miatt) és potenciális energiája is (a nyomás miatt), és ez az energia hangsebességgel terjed. Az energiasűrűség megadja a térfogategységre eső energiát:

E = energia/térfogategység [Ws/m^3].

Síkhullámra a végeredmény egyszerű:

$$E_{síkhullám} = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c^2}$$

Látható, hogy a ρc-szorzat ismét megjelenik.
A jeltől függően a sávszélesség (B) és a mérési idő (T) befolyásolja a spektrum amplitúdóját. Stacioner, determinisztikus jelet az RMS értékkel [U] vagy annak négyzetével, a teljesítménnyel arányosan [U^2] adjunk meg. Véletlen jelek (zajok), nem periodikus rezgések folytonos spektrumúak. Ezeket analizálva, a jelet adott részsávokban vizsgálunk, így az a helyes, ha a szűrő sávszélességétől független amplitúdó értékeket kapunk. Erre való a *teljesítménysűrűség* spektrum (Power Spectral Density), mértékegysége [U^2/Hz]. Ez nem más, mint a fenti teljesítmény osztva a szűrő sávszélességével.
Tranziens (impulzus jellegű) jelek nulláról indulnak és nullára csökkenek le a mérés alatt. Az *energiasűrűség* spektrum (Energy Spectral Density) időfüggetlenné teszi a teljesítménysűrűség spektrumot azáltal, hogy azt elosztjuk a mérési idővel, mértékegysége [U^2s/Hz].



A különböző jeltípusok és paramétereik.

1.2 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, $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2. Látható, hogy az intenzitás teljesítmény jellegű mennyiség, azaz a logaritmus előtti szorzó tíz. Az összes többi decibel, amit használunk, feszültségdecibel, azaz húszas a szorzó. A hangnyomásszint:

$P = 20\log(P/p_0)$ [dB]

, ahol $p_0 = 20$ µPa. Figyeljük meg jól, hogy a szinteket mindig nagybetűvel jelöljük (I, P), a többit pedig hol naggyal, hol kicsivel. Általában az időfüggő mennyiségeket (az időfüggvényeket) kis betűvel, egy adott értéket pedig naggyal. Nagyon fontos látni, hogy a hangnyomásszint vonatkoztatási értéke p_0 nem ugyanaz, mint az atmoszféranyomás P_0 értéke! Előbbi 20 µPa, amely az éppen meghallható 1 kHz-es szinuszhang szabványosított hangnyomás értéke. A hangnyomásszint angol elnevezése Sound Pressure Level, rövidítve SPL, ez az, amit egy mikrofon ténylegesen érzékel, mér, amikor P helyére az effektív értéket helyettesítjük. Viszonylag ritkán használjuk a hangteljesítményszintet (Sound Power Level, SWL):

$SWL = 10\log(W/W_0)$ [dB]

, ahol $W_0 = 10^{-12}$ W.

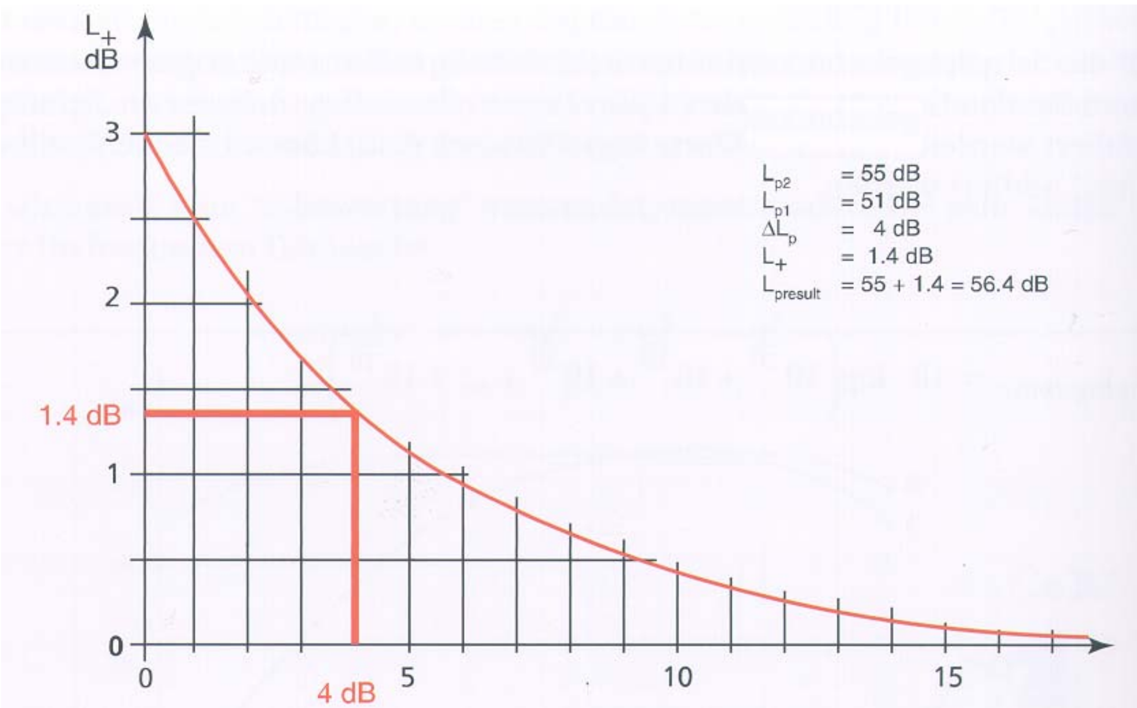
A logaritmikus lépték használata nagyon elterjedt az akusztikában. Egyrészt az érzékelés, a hallásunk logaritmikus jellegű, az ún. szubjektív hangosság érzet a mennyiségek logaritmusával arányos. Másodszor, a minimum és maximum határok nagyon nagyok frekvenciában és amplitúdóban is, ezért a logaritmikus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

Példa:
Három feszültség erősítőt kapcsolunk egymás után, az első tízszeresére, a második nyolcszorosára, a harmadik kétszeresére erősíti a bementére jutó feszültséget.

x10	=	+20dB
x8	=	+18dB
x2	=	+6dB
x160	=	+44dB

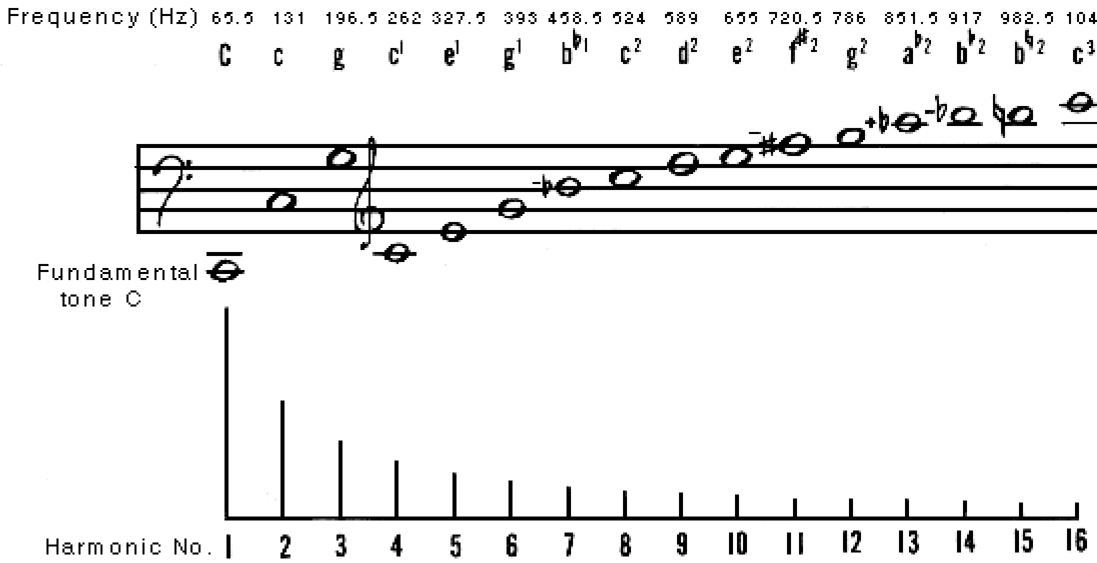
Az alábbi értékeket célszerű megjegyezni:
+1dB erősítés 12% feszültség és 25% teljesítménykülönbséget jelent
+3dB a kétszeres teljesítményhez tartozik
+6dB a kétszeres feszültséget, azaz a négyszeres teljesítményt jelenti.

Az alábbi segédábra mutatja, miként kell két logaritmikus egységet helyesen összegezni. Ha egy 55 dB-es és egy 51 dB-es hang eredőjét akarjuk megkapni, akkor a különbségből kell kiindulni, ami 4 dB. Ha ez a két hang egyszerre szól, akkor annak nem 106 dB lesz az eredménye, hanem lényegesen kevesebb! A vízszintes tengelyen megkeressük a 4 dB-es pontot és kivetítjük a függőleges tengelyre, ahol 1,4 dB-t kapunk. Ezt végül a nagyobb hangnyomásszintű hanghoz adjuk hozzá, a végeredmény tehát 55 dB+51 dB = 56,4 dB!
Hasonlóan, az ábráról is leolvasható, hogy 0 dB eltéréshez 3 dB-es növekedés tartozik, azaz két azonos hangnyomásszintű hang összegzésekor az eredő +3 dB-el nő mindig, bármi is legyen a kiindulási hangnyomásszint: 10 dB + 10 dB = 13 dB, ugyanígy 100 dB+ 100 dB = 103 dB.



Szintkülönbségek összegzése dB-ben.

A frekvenciatengelyt is logaritmikusan ábrázoljuk. A legfontosabb felosztások a következők:
oktáv = 2x-es frekvencia
dekád = 10x-es frekvencia
terc(sáv) =1/3 oktáv (one - third octave).
Azaz, egy oktávval feljebb lévő hang az alaphang kétszerese. Pld. tipikus oktávsávos felosztás az 1, 2, 4, 8, 16 kHz bejelölése a frekvenciatengelyen, amelyek között a lineáris távolság ugyanannyi! Tehát ha 1 cm a papíron az 1 és 2 kHz közötti grafikon, akkor a 8 és 16 kHz közötti is 1 cm, holott az átfogása nyolcszorosa. Hasonlóan a dekádos lépték még nagyobb: 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz stb. A tercsávos felosztást tipikuson zajszintmérés és analízis során használjuk, vagy a zenében. Az angol kifejezésből adódóan „harmadoktávsávnak” is nevezik, hiszen egy oktáv három tercből áll.



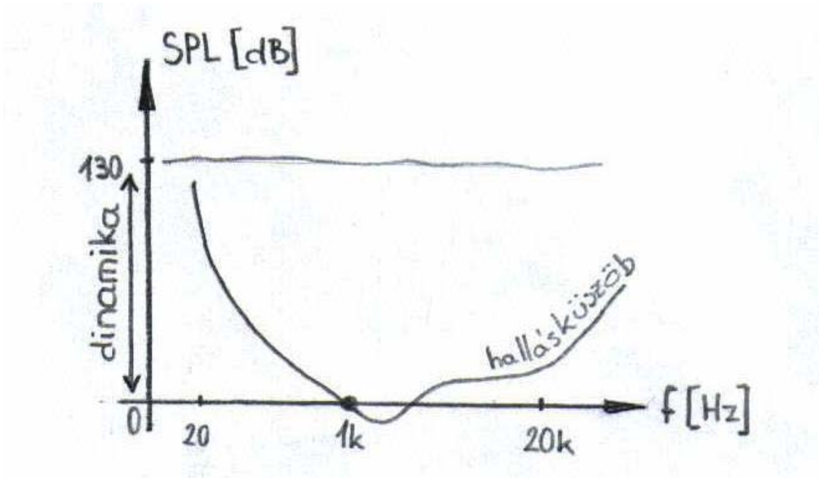
Zenei alaphang és felharmonikusai

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

Zenei hangok elnevezései és frekvencia arányai

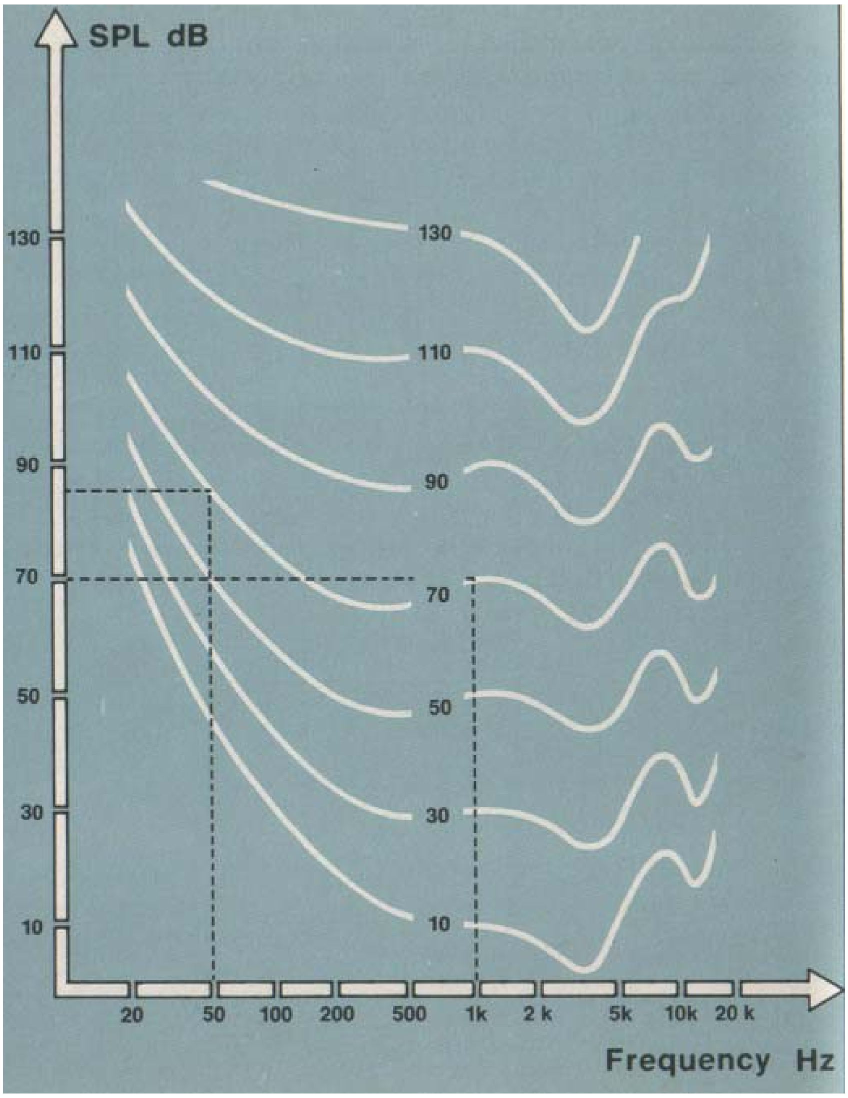
1.3 A hallás alapja

Az akusztikában nem hagyhatjuk ki az emberi hallás alapvető tulajdonságait. Ez a témakör szervesen kapcsolódik a stúdiótechnikához is.
Az emberi hallás részben írható le objektív mérőszámokkal. Kaphatunk képet egy hangról, ha megadjuk a hangnyomásszintjét, frekvenciáját (sávszélességét) stb. A szubjektív élményt azonban nem írják le. Éppen ezért sok kísérletet végeztek és hoztak létre olyan pszichoakusztikus mértékegységeket, definíciókat is, melyek jobban korrelálnak a hallás logaritmikus tulajdonságaival.
A legfontosabb a hallástartomány megállapítása. Ez egy frekvencia-hangnyomásszint diagram, amelynek alsó görbéje látható az alábbi ábrán:

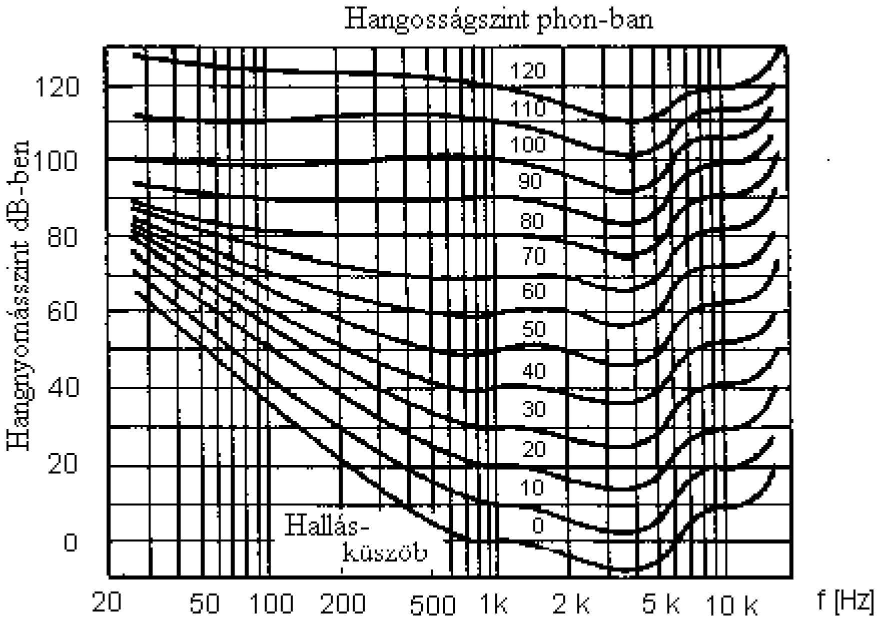


Ahogy már említettük, a hallható hangok tartománya a kb. 20 Hz-es mély hangoktól a kb. 20 kHz-es magas hangokig terjed. Ez egyénenként változó, és az életkor előrehaladtával egyre csökken. Idősebbek már nem hallanak ilyen jó, akár 12-14 kHz-re is leeshet a felső határfrekvencia. Jegyezzük meg azt is, hogy a 20 Hz alatti hangokat érzékelhetjük, de nem a fülünkkel, hanem a csonthallással. A csontvázunk ugyanis kiválóan vezeti a rezgéseket, ezért ez is befolyásolja a szubjektív hangélményt.
Az ábrán látható, hogy kb. 130 dB-es dinamikával számolhatunk. A dinamika a leghangosabb és a leghalkabb észlelhető hangnyomásszint aránya. Magyarán, ha 0 dB-nek rögzítjük az éppen meghallható 1 kHz-es szinuszhangot (amelyhez tartozik az a bizonyos 20 μPa hangnyomás érték), akkor a leghangosabb még elviselhető hang hangnyomásszintje ennél mintegy 130 dB-el nagyobb.
Az ábrán az is látszik, hogy ez a vonal egyenes 130 dB körül és *fájdalomküszöbne*k nevezzük. Nincs jellegzetes frekvenciamenete, hiszen nehéz kimérni és olyan mindegy, hogy a 100 Hz-es szinuszjel vagy az 1000 Hz-es szakítja-e át a dobhártyát…
Sokkal fontosabb a *hallásküszöb*, amely az éppen meghallható különböző frekvenciájú hangokat összekötő görbe. A 0 dB-es tengelyt definíció szerint 1 kHz-nél metszi, azonban a görbe lemegy a negatív tartományba is. Ez azt jelenti, hogy a hallás a 3-4 kHz-es tartományban a legérzékenyebb, ott pár dB-el halkabban is ki lehet adni a hangot, hogy észleljük. A hallásküszöb görbéjéről meg kell még állapítanunk, hogy a középfrekvenciától távolodva romlik az érzékenysége: 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.

Ahhoz, hogy össze tudjuk hasonlítani különböző frekvenciájú hangok szubjektív hangerősségét, a dB-el skálázott hangnyomásszint nem megfelelő. Ugyanis a fentiek alapján nem derül ki az, hogy az 50 dB-es 50 Hz-es jelet még éppen csak meghalljuk, ugyanakkor az 50 dB-es 2 kHz-es hang, kimondottan hangos. Az összehasonlításhoz bevezették a *hangerősség* fogalmát: egy hang hangerőssége annyi [phon], ahány dB a vele azonos hangosságérzetet keltő 1 kHz-es szinuszhang hangnyomásszintje. Jele: L_n. A fent látható hallásküszöb görbe tehát nem más, mint a 0 phon-os görbe, hiszen, az összes ezen található pont azonos hangosságérzetű a 0 dB-es 1 kHz-es szinuszhanggal. Ha tehát ismét elővesszük az 50 dB-es 50 Hz-es jelünket, ami ezen a görbén fekszik, akkor ezentúl azt mondjuk rá, hogy ez az 50 Hz-es jel 0 phon-os. Így már össze tudjuk hasonlítani a phon-ban megadott értékeket. Persze, nem csupán a 0 phon-os görbét tudjuk megrajzolni így, hanem bármelyiket. Ha az 1 kHz-es szinusz jel 10 dB-es, akkor az kijelöli a 10 phonos hasonló görbét és így tovább. A dB érték akkor és csak akkor egyezik meg a phon értékkel definíció szerint, ha 1 kHz-es hangról van szó. 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).



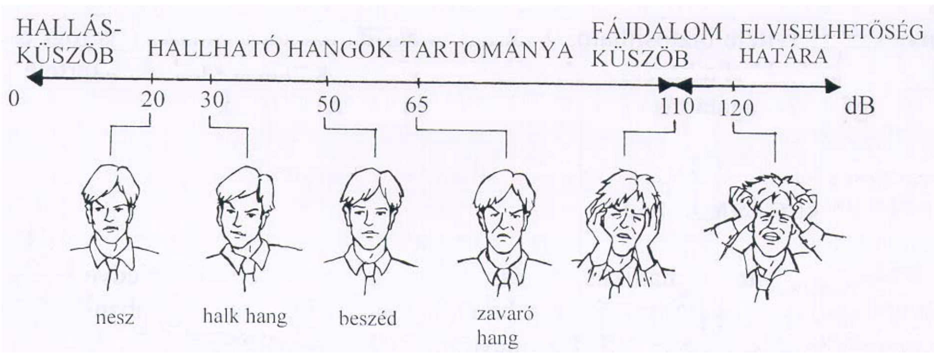
Azonos hangosságú görbék, a phon-értékkel paraméterezve. Ahhoz, hogy azonos 70 phon hangerősségű jelet állítsunk elő, az 1 kHz-es szinuszjelet 70 dB-el, míg az 50 Hz-et 85 dB-el kell kiadni.

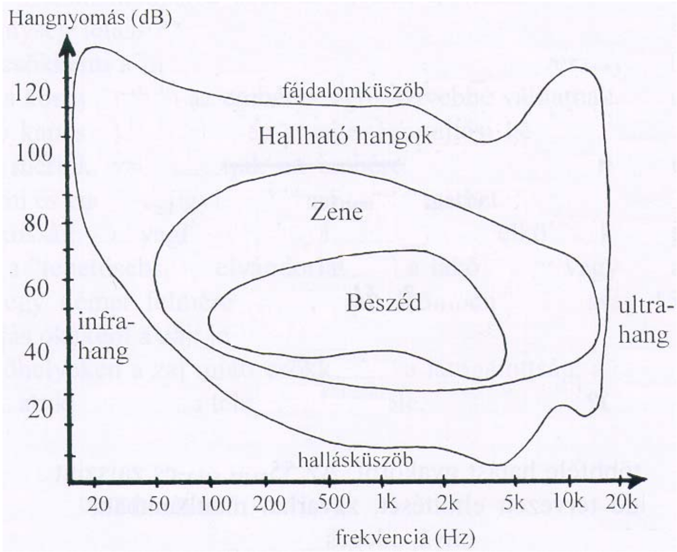


Már csak az a probléma maradt, hogy a phon-értékeket algebrailag nem adhatjuk össze, mert 10 phon + 10 phon által adódó 20 phon nem kétszeres hangosságérzetet kelt. A hallás logaritmikussága miatt ezt át kell számolni az alábbi módon:

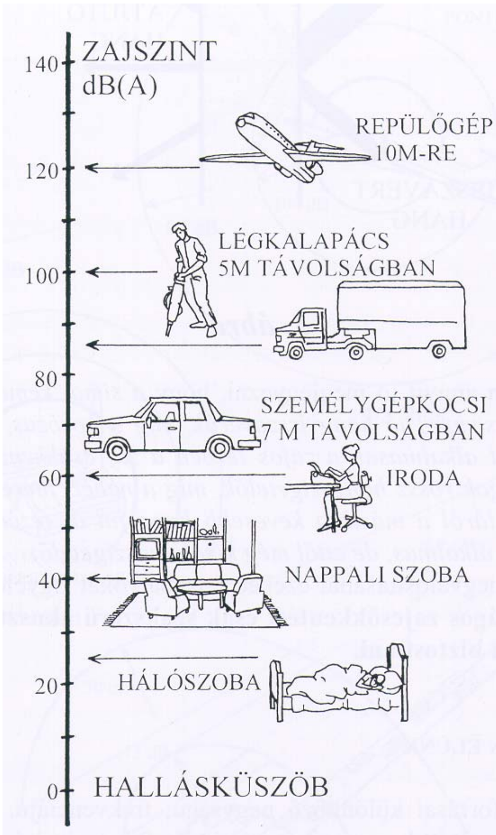
$L_p = 2^{(Ln-40)/10}$

Az L_p mennyiség neve *hangosság* (ne keverjük a hangerősséggel). Mértékegysége a [sone]. Látható a képletből, hogy egy nem lineáris leképezés, megfeleltetés. A definícióból adódik, hogy a 40 phon-hoz tartozik 1 sone. Felette rohamosan nőnek az értékeke, alatta pedig 0 és 1 közé szorulnak. A célja ennek az, hogy az egyre hangosabb hangokat összegezve látható legyen a növekedés hatása is. Ahhoz tehát, hogy két különböző phon-értékű hangot összeadjunk a hangosság szempontjából, előbb át kell váltani sone-ra, és akkor végezhetjük el az összegzést. Az azonban már bizonyos, hogy 1 sone + 1 sone, az 2 sone és kétszer olyan hangos hangot takar. A 10 phon hangerősség-növekedésnek kétszer akkora hangosság felel meg.



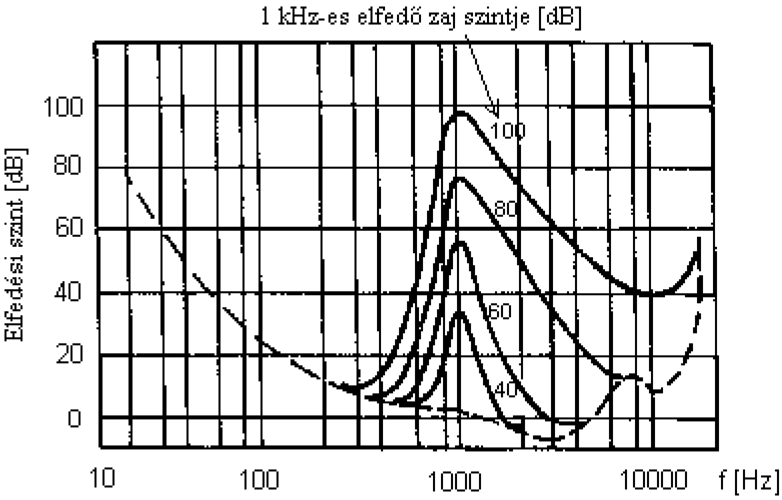


A 20 Hz alatti hangokat infrahangnak, a 20 kHz felettieket ultrahangnak nevezzük. A hangok általában nem használják ki a teljes dinamikát. Az ábrán jól látszik, hogy e beszéd kb. 30-70 dB hangnyomásszintű (suttogás, ordítás), és frekvenciában is korlátos kb. 100 Hz-től pár kHz-ig. Az ének ennél valamivel tágabb, a zene azonban lényegesen nagyobb területű.

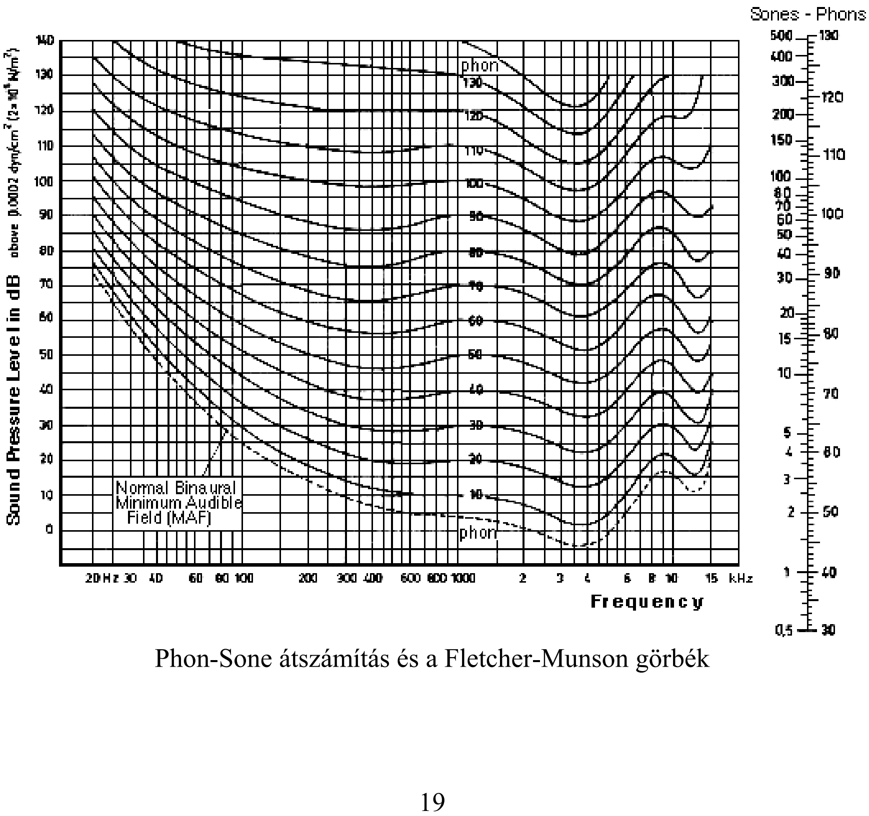


Egy másik ábra mutatja, hogy mekkora zajszintek, hangnyomásszintek tartoznak különböző jelenségekhez (a dBA skáláról későbbiekben lesz szó). Érdemes megjegyeznünk, hogy egy normál, csendesebb nappali szobában is az átlag zajszint 30-40 dB körüli, a forgalmas utak pedig alapban 70-90 dB zajszintet okoznak!

Frekvenciában közeli hangoknál fellép a *hangelfedés* jelensége. Ilyenkor az egyik, zavarónak tekintett hang megemeli a másik, a vizsgálandó hang hallásküszöbét. A hangelfedést megvizsgálhatjuk szinuszos hangokra és zajokra is. 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.



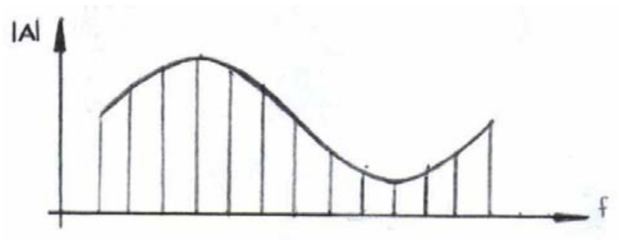
A hangérzet kialakulásában nagyon fontos paraméter a hangforrás helye, iránya, távolsága. Ezt *lokalizációnak* nevezzük, és ez az irányhallás, közvetve pedig a sztereó és egyéb többcsatornás hangtér-leképezés alapja.
A lokalizációban fontos szerepe van a fülkagylónak, mely irányfüggő szűrőhatása mellett 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) érkeznek a két fülben, amely alapján következtetünk azok helyzetére.



Phon-Sone átszámítás és a Fletcher-Munson görbék

2. Stacioner rezgések összetétele

Ebben a fejezetben a *stacione*r (időben állandó amplitúdójú) rezgésekkel foglalkozunk. Ezek a rezgésfajták 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 frekvenciatartományban a valós időfüggvényű jelek spektruma komplex: amplitúdó -és fázisspektrumból áll. Tekintettel arra, hogy a fizikai jelek időfüggvénye mindig valós, a valóságos spektrumok komplexek (matematikailag értelmezhető a komplex idő is, aminek spektruma valós, de ennek fizikai tartalma nincs).
Az amplitúdóspektrum a komplex spektrum abszolút érékének logaritmikusan ábrázolt frekvenciamenete ($|A|$).

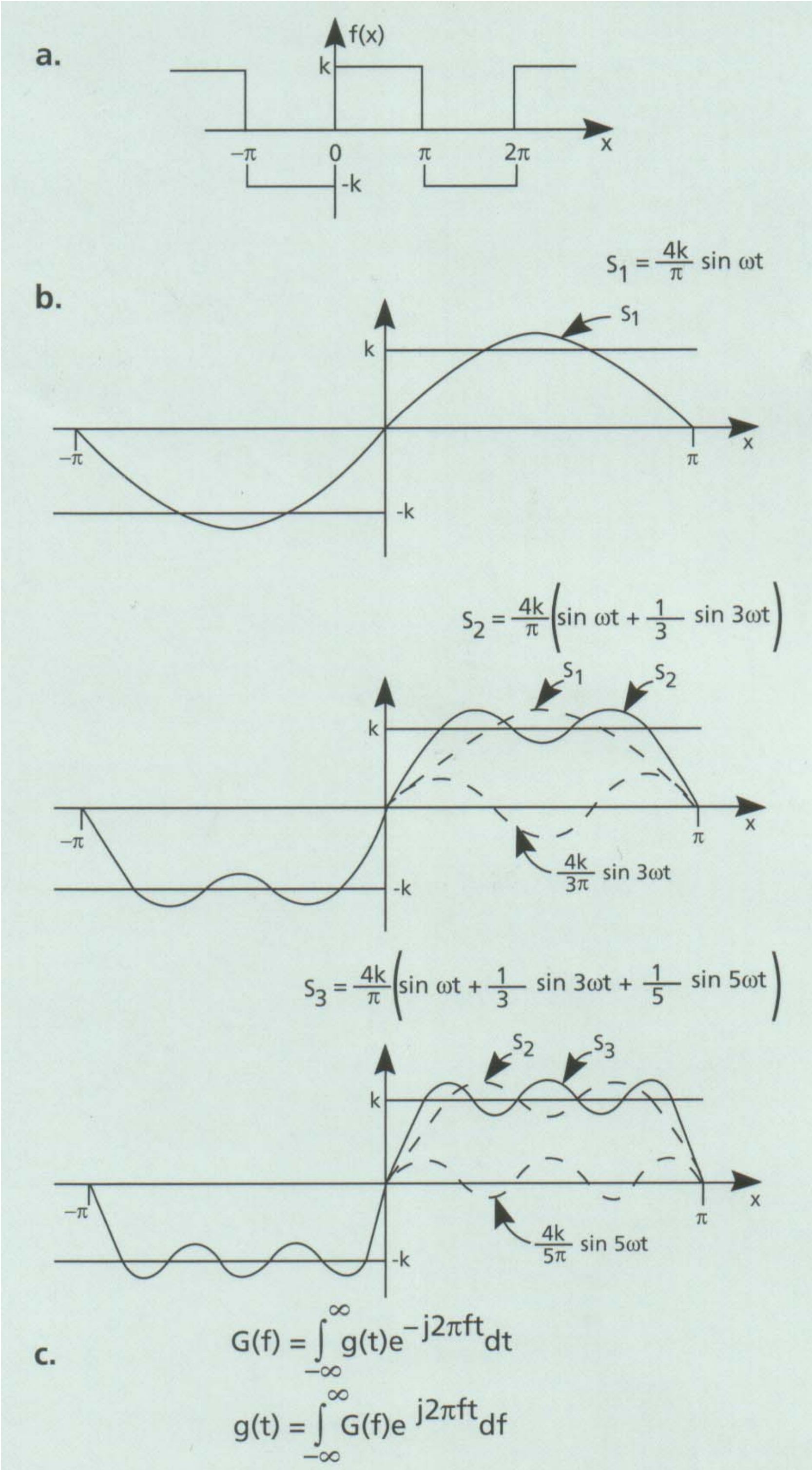


Példa:
Azonos frekvenciájú, de különböző fázisú stacioner rezgések összeadása, ahol
$y_1(t) = A_1\sin(\omega t+\varphi_1)$
$y_2(t) = A_2\sin(\omega t+\varphi_2)$
Az összegjel is szinuszos jel lesz, azonos frekvenciával, de az amplitúdó és az eredő fázis más lesz:
$y_{eredő}(t)= y_1(t)+y_2(t) = A_{eredő}\sin(\omega t+\varphi_{eredő})$, ahol
$A_{eredő}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_1-\varphi_2)$ és
$tg(\varphi_{eredő}) = (A_1\sin\varphi_1+A_2\sin\varphi_2)/(A_1\cos\varphi_1+A_2\cos\varphi_2)$

A fázishelyes összegzésből adódik, hogy az kioltást és erősítést is eredményezhet. Ebből következik, hogy hangvisszaverődéskor az eredeti hangtól lényegesen eltérő hang is keletkezhet.
Ha az összegzendő stacioner rezgések frekvenciája különböző ($f_1 \neq f_2$), a helyzet bonyolódik. 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 ($f_1 \cong f_2$), 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

A Fourier-tétel mondja ki, hogy a különböző frekvenciájú jelek eredője egyértelműen felbontható komponenseire. Elektronikusan ezt a folyamatot (a spektrum előállítását) az FFT (Fast Fourier Transform) végi. Ez stacionárius esetben jó, de impulzus jelek esetén is kielégítő. Ha az összetett rezgés összetevői egymás egészszámú többszörösei (zenénél tipikus), akkor a legkisebbet alaphangnak, annak egészszámú többszöröseit felharmónikusoknak nevezzük, melyek száma a tizet is meghaladhatja.



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

A periodikus rezgések spektruma vonalas, a nem periodikusaké folytonos: egymáshoz végtelen közel eső végtelen számú spektrumvonalból áll. A periodikus rezgések vonalainak számát, méretét a Fourier-együtthatók adják meg, míg a folytonos spektrumot a Fourier-integrállal számíthatjuk ki (általában számítógéppel, numerikus módszerekkel).

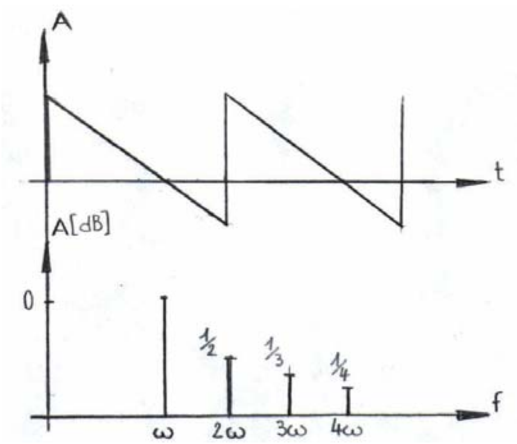
2.1 Mérőjelek

Lássuk most azokat a tipikus, speciális, mesterségesen létrehozott mérőjeleket, amelyekkel az átviteli rendszereket vizsgáljuk. Ezek célja, hogy olyan spektrumot hozzanak létre, amely a hibákat felnagyítva mutatja, hasonlóan a tévé mérőjeleknél megismert monoszkópra, mely nem „értelmes" kép, de a hibák felderítésére alkalmas.

1. Fűrészjel

A pontos spektrum végtelen sok szinuszos összetevőt tartalmaz, a gyakorlatban már megfelelő és elegendő az első 20 is tag is a Fourier-sorban.

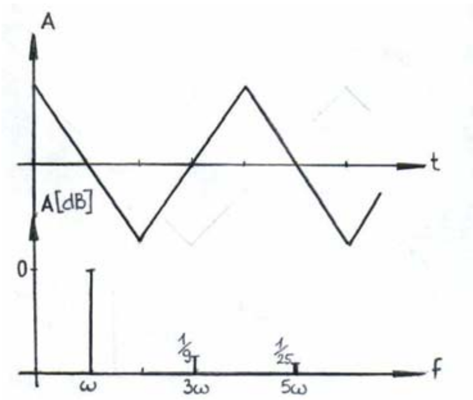
$$A = \frac{2}{\pi}\left(\sin(\omega t) + \frac{1}{2}\sin(2\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \ldots\right)$$



2. Háromszögjel

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

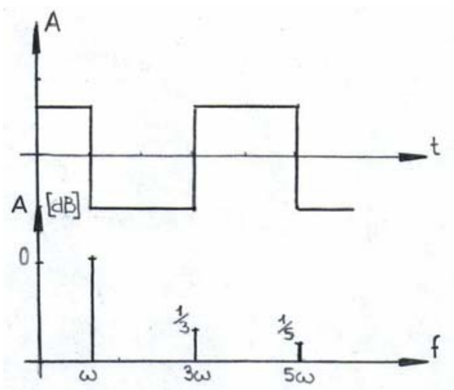
$$A = \frac{8}{\pi^2}\left(\cos(\omega t) + \frac{1}{9}\cos(3\omega t) + \frac{1}{25}\cos(5\omega t) + \ldots\right)$$



3. Négyszögjel

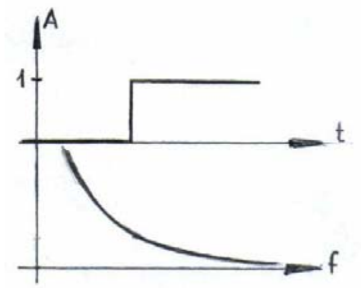
A pontos spektrum végtelen sok szinuszos összetevőt tartalmaz, a gyakorlatban már megfelelő és elegendő az első 10 is tag is a Fourier-sorban. Csak páratlan harmonikusok találhatók meg benne.

$$A = \frac{4}{\pi}\left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \ldots \right)$$



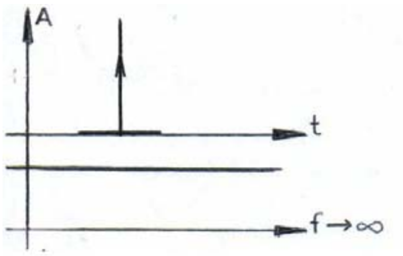
4. Az egységugrás

Az egységugrás, mint „bekapcsoló jel”, nem periodikus, hanem impulzus jellegű, ezért a spektruma végtelen sok összetevőből áll.

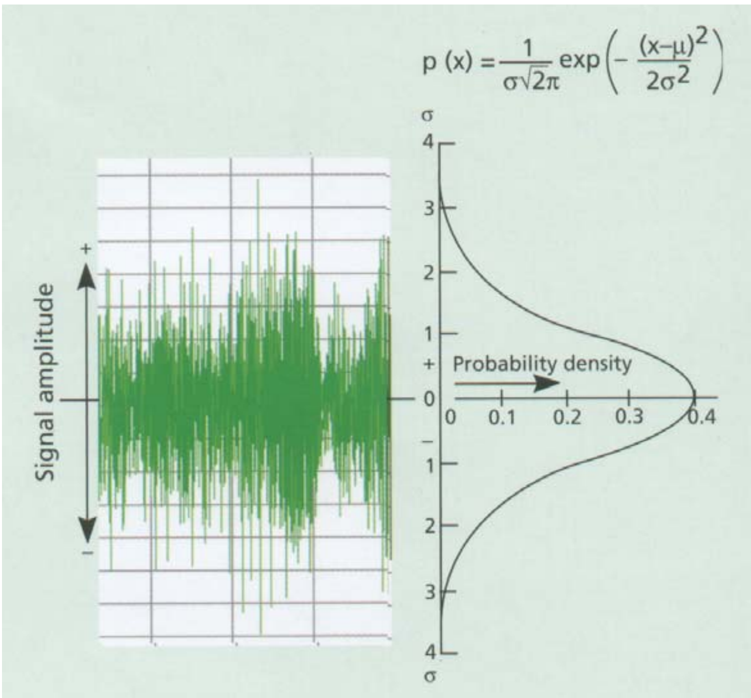


5. A Dirac-delta

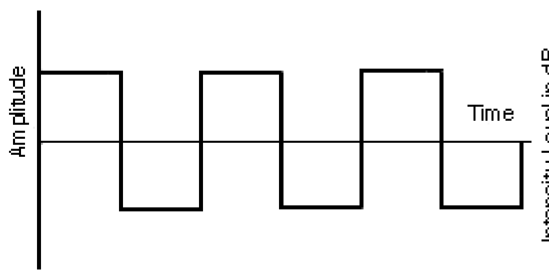
A Dirac-impulzus ideális impulzus matematikailag: végtelenül rövid, nulla ideig tart, és végtelenül magas, végtelen energiájú. A valóságban ez nem realizálható, csak közelítéssel. Azt kell észrevenni, hogy az energia a frekvencia-transzformációval nem vész el, tehát, ha végtelen sok van az időtartományban, ami „függőlegesen végtelen nagy”, akkor ugyanez meg kell jelenjen a spektrumban is, ami „vízszintesen végtelen”. A Dirac-delta spektruma végtelen hosszú egyenletes spektrum. Minél kevésbé igaz az idealizmus a valóságban, annál kevésbbé lesz igaz ez a spektrumára is.



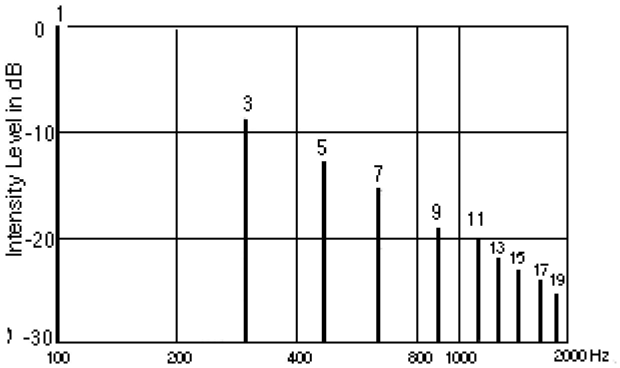
Ennek az esetnek pont ellentéte a szinuszos hang, ahol a spektrum áll egyetlen ideálisan vékony és az energiától függő magasságú vonalból, cserébe az időtartománybeli kép végtelen: a szinuszhullám időfüggvénye.
A mérőjelekhez tartozik még a zaj, különösen a fehérzaj, amely végtelen ideig tartó „sustorgás”, melynek időfüggvénye semmit nem árul el a jelről, spektruma azonban a kívánt frekvenciatartományban egyenletes.

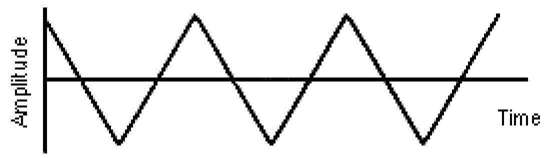


Normál (Gauss) eloszlású zaj sűrűség függvénye és annak képlete.

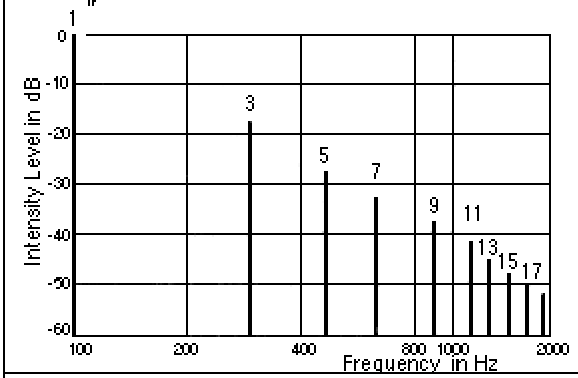


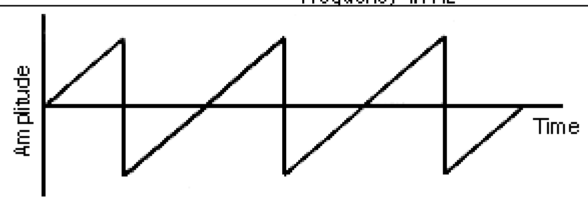
$$\frac{4}{\pi}\left(\sin \omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \dots\right)$$



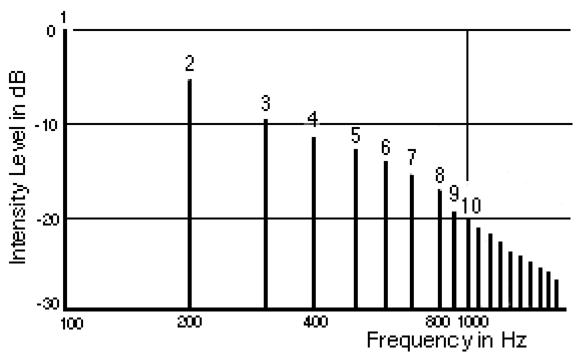


$$\frac{8}{\pi^2}\left(\cos \omega t + \frac{1}{9}\cos 3\omega t + \frac{1}{25}\cos 5\omega t + \frac{1}{49}\cos 7\omega t + \dots\right)$$





$$\frac{2}{\pi}\left(\sin \omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t - \frac{1}{4}\sin 4\omega t + \dots\right)$$



2.2 Nem stacioner jelek esete

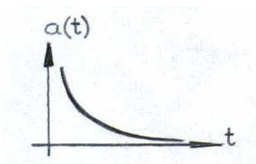
Nem stacioner jelek esetén az amplitúdó és a frekvencia nem elég a leíráshoz, hiszen az amplitúdó önmagában is időfüggő változó: a(t). Ha az átvitel lineáris, a rezgés szinuszos összetevőkre bomlik. A leggyakoribb időben változó amplitúdó az exponenciális lecsengés, amikor a(t) ilyen alakú:

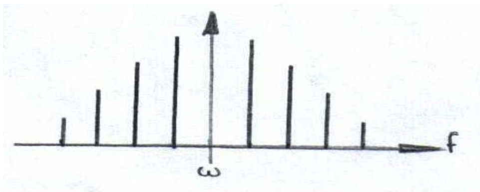
$a(t) = B*e^{-\alpha t}$

a rezgés pedig:

$y(t) = a(t)\sin(\omega t) = B*e^{-\alpha t}\sin(\omega t)$.

Az exponenciális kitevőben lévő alfa neve *csillapítási tényező*. Minél nagyobb, annál hamarabb cseng le az exponenciális függvény, azaz a rezgés burkolója. Minél kisebb ez az érték a kitevőben, annál kisebb sávszélességet foglal el a jel, határesetben pedig, ha nullává válik, visszakapjuk a stacioner rezgést.
Ha az y(t) a fenti alakú, akkor a rezgés nem egyetlen ω-vonalból álló spektrumú, hanem attól jobbra és balra szimmetrikusan elhelyezkedő amplitúdó vonalsereg.



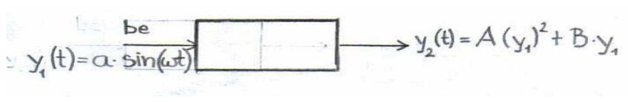


2.3 Lineáris és nem lineáris átvitel

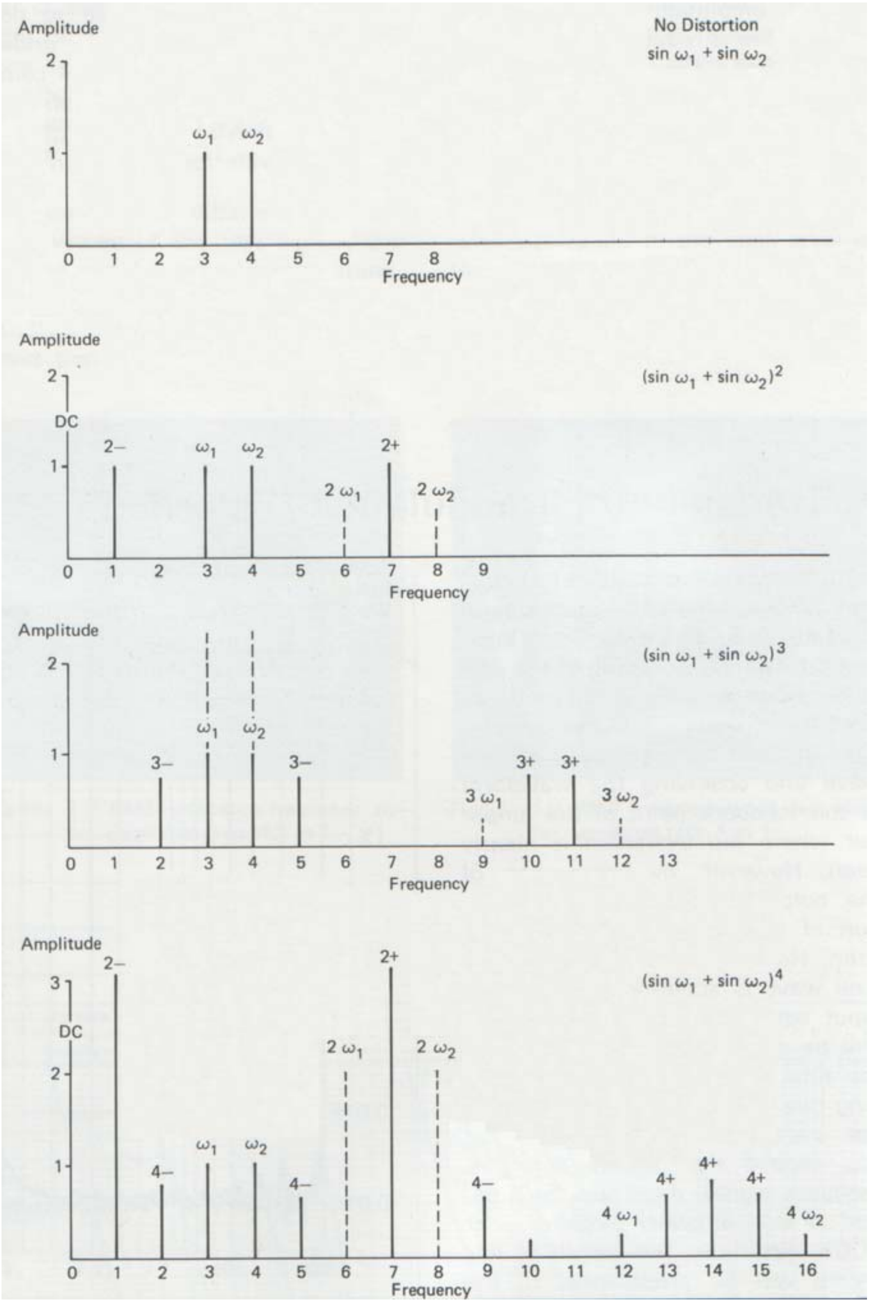
Ha lineáris az átviteli út, akkor nincs torzítás a rendszerben és az átvitt jel formája, időbeni lefutása csak egy konstansban térhet el az eredeti bemenő jeltől. Ha ez egynél nagyobb, erősítőről beszélünk, ha kisebb, csillapítóról. Más szóval, olyan frekvenciájú jel nem jöhet ki belőle, ami nem ment be. Nem lineáris átvitelnél új komponensek is megjelennek, amik az eredeti jelben nem voltak benne. Ilyenkor az átviteli utat leíró átvitel függvényben bizonyosan találhatók hatványozó tagok, négyzetre emelők, köbösek stb. A lineáris torzítás tehát új frekvenciájú komponenseket nem hoz létre, pusztán a konstanssal való szorzást és esetleg időkésleltetést okozhat, melyeket nem is tekintünk hibának, hiszen könnyedén korrigálhatók.

Példa.
Legyen a rezgés $y(t) = a*\sin(\omega t)$ alakú, az átviteli út leírása pedig $y_2 = Ay^2+By$. Azaz, az átviteli út a bejövő y(t) jelet négyzetre emeli és megszorozza az A konstanssal, majd hozzáadja annak B-szeresét is. A lineráis átviteli úton, csak a By-szorzat megengedett. Ezek után:

$$y_2 = Ay^2 + By = A(a\sin(\omega t))^2 + B(a\sin(\omega t)) = (Aa^2)\frac{1-\cos 2\omega t}{2} + Ba\sin(\omega t)$$

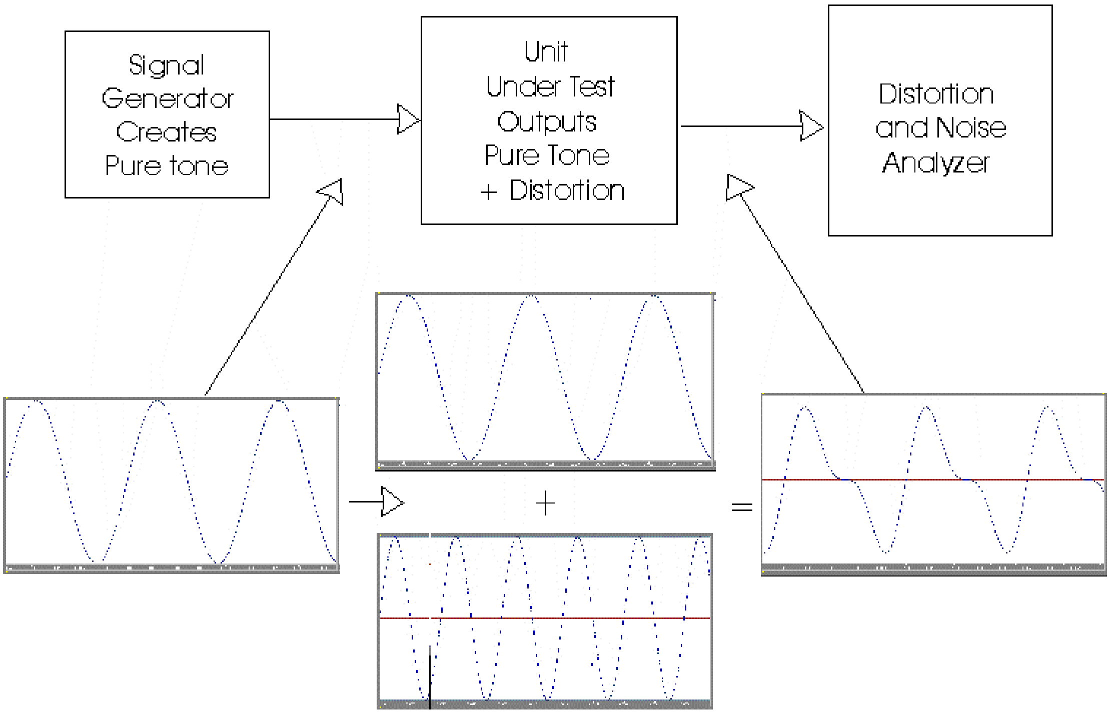


Jól látható, hogy a sin(ωt) négyzete miatt megjelent egy kétszeres frekvenciájú koszinuszos tényező, ez mivel az alapfrekvenciának egész számú többszöröse *harmonikus torzítás*. A harmonikus torzítás tehát nem lineáris torzítás, és elég gyakori jelenség. Minél magasabb rendű a hatvány, annál több és újabb komponensek jelennek meg.



Különböző frekvenciájú jelek összetétele

Ezt számszerűsíteni is tudjuk, ha megadjuk az összes különböző frekvenciájú torzítási komponens összes teljesítményét, osztva az alaphang teljesítményével. Százalékos értékben vagy dB-ben kifejezve, ez a mutató a teljes harmonikus torzítás, angolul a Total Harmonic Distortion (THD). Ezen harmonikusok hallhatósága függ az alaphangtól és a torzítás nagyságától. A fül leginkább az 1-3 kHz-es tartományú kb. 80 dB-es alaphangoknál érzékeny a torzításra. Ügyeljünk arra, hogy ha az alaphang elég nagy frekvenciájú, tipikusan 10 kHz feletti, akkor a harmonikus komponensek már nem hallhatók, gyakran ki is szűrjük azokat (20 kHz felett), aminek az lehet a következménye, hogy alulbecsüljük a THD értékét és a nem linearitás mértékét.



A linearitás matematikai definíciója az alábbi:

$MH(x_1)+nH(x_2) = H(mx_1 + nx_2)$.

Ebben az egyszerű egyenletben *m* és *n* konstansok, *H* pedig egy operátor (műveleti utasítás, mint pld. a szorzás), az x_1 és x_2 pedig „események”. Ha ez igaz, akkor a rendszer lineáris, mert a kimenet felírható a bemenetek ún. lineáris kombinációjaként. Magyarra fordítva, bizonyos műveletek felcserélhetők, ahogy azt a szorzásnál és az összeadásnál megszoktuk, ezek lineáris műveletek és az olyan rendszer ami csak összead és szoroz (nem emel hatványra), az lineáris.

A nem lineáris átvitel jellemzője továbbá, hogy a bementre érkező különböző frekvenciájú jelek esetén nem csupán harmonikus torzítás lesz jelen, hanem létrejönnek „kevert” frekvenciájú összetevők is, amelyek nem egészszámú többszörösei egyik bemenő jelfrekvenciának sem. A fenti példát folytatva, ha a bemenő jel $a_1*\sin(\omega_1 t)+a_2*\sin(\omega_2 t)$ alakú, akkor a kimeneten (a levezetést mellőzve) az alábbi komponensek jelennek meg:

- $\sin(\omega_1 t)$ és $\sin(\omega_2 t)$, az alaphangok (ez a hasznos 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.

A függelékben egy példa is található.

2.4 Jeltranszformációk

A mérőjelekre adott válaszok hordozzák az információt az átviteli rendszerről. Ez tipikusan lehet 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, cserébe sokáig tart.
A köztes megoldás a (fehér)zajjal történő gerjesztés, melynek spektruma frekvenciafüggetlenül egyenletes, és kellően nagy energiájú is ahhoz, hogy viszonylag gyors és pontos eredményt kapjunk az átviteli függvényre. Angolul a frequency response és a time response kifejezéseket használjuk a két tartománybeli válaszra.

2.4.1 A Fourier transzformáció

Ahogy látható, az impulzus gerjesztés nagy előnye, hogy közvetlenül mutatja az időtartománybeli választ (a többi nem), és gyors is. Az átviteli függvényt a már ismert Fourier-transzformációval közvetve kapjuk meg:

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

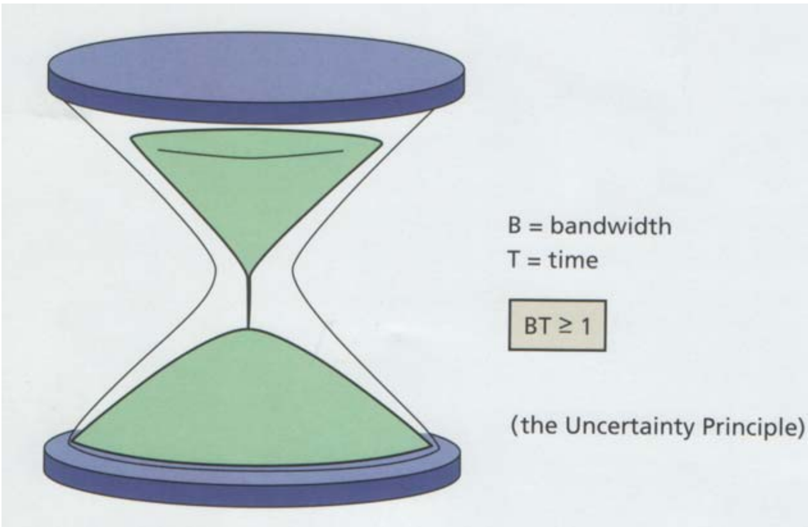
illetve visszafelé:

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

Ügyeljünk a helyes integrálási változóra és a negatív előjelre! Ha ez a két egyenlet igaz, akkor a(t) és A(f) kölcsönösen egyértelműen egymásba leképezhető, a két leírás pedig tökéletesen egyenértékű. A gond a mínusz végtelentől végtelenig tartó integrálással van, mert ez a valóságban nem lehetséges. Ehelyett ún. *ablakolás* van, ami kivág egy részt a végtelen időből – ezáltal hibát visz a számításokba.
Emlékezzünk arra is, hogy a fenti képletben a valóságban előforduló valós a(t) időfüggvény van, amelynek komplex spektruma lesz, de elvi akadálya nincs a negatív időnek sem. Az integrálás periodikus jeleknél egyszerűsödik, mert nullától T-ig kell csak végezni, diszkrét jeleknél pedig szummázássá szelídül.
Csoportfutási időnek, *burkolókésleltetésnek*, angolul group delay-nek hívjuk a fázis spektrum frekvencia szerinti deriváltját:

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

Ez általában tiszta időkésleltetés, másodperc alatti időben mérve, de lehet negatív és pozitív is. Fizikailag azt meséli el, hogy a különböző frekvenciájú komponensek terjedési ideje mekkora. Ha ez egy csökkenő görbe, akkor a mélyfrekvenciák gyorsabban, míg a nagy frekvenciák lassabban terjednek a rendszerben.
Említsük még meg a *bizonytalansági elvet*, ami szervesen kapcsolódik a véges időablakok integrálásával. Érezhető, hogy ha a spektrum számításhoz végtelen időt kéne figyelembe venni a végtelen pontossághoz, akkor minél kisebb időablakból végezzük, annál pontatlanabb lesz. Egy egyszerű példán szemléltetve: egy tiszta szinuszos hang spektrumvonala akkor lesz „vékony”, ha kellően sokáig „szól” az a hang, sok periódusa vesz részt az integrálásban. Ha ez az idő csökken, és már nem ér el egyetlen periódust sem, akkor nyilvánvalóan a spektrumon sem fog látszani ez. 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.



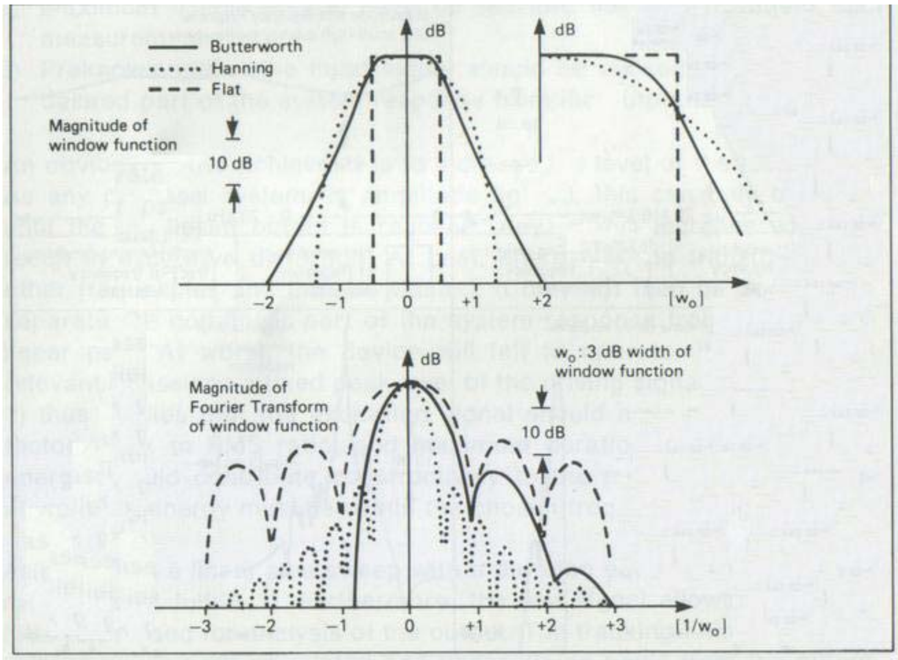
A bizonytalansági elv szimbolizálása. Nagyon keskeny *B* sávszélességhez nagyon nagy *T* mérési idő szükséges. Következménye, hogy ha meg akarjuk határozni, létezik-e egy jelben 1 kHz-es komponens (1 sec. periódus idő), legalább egy teljes periódusidő hosszúságú mérésre szükség van.

2.4.2 Ablaktípusok

Még emlékezhetünk matematikából és elméleti villamosságtanból, hogy a szorzás művelete és a konvolúció (a konvolúciós integrál) egymásnak megfelelő műveletek a Fourier transzformáción keresztül. Két időtartománybeli jel „együttese” nem szorzással adódik, hanem a konvolúciós integrállal számítandó. Ez bonyolult művelet, ezért célszerűbb a jeleket áttranszformálni a frekvencia tartományban, ott szorozni őket, majd visszatranszformálni. Amikor tehát arról beszélünk, hogy a bemenő jel spektruma szorzódik a rendszer átviteli függvényével, a végtermék spektruma pedig a keresett jel, akkor csak „lefordítottuk” azt a jelenséget, hogy a bemenő analóg jel időfüggvénye konvolválódik az átviteli függvény időtartománybeli alakjával (ami az átviteli függvény inverz Fourier tarnszformáltja) és a végeredmény időfüggvény.
Természetesen, az ablakolásnak, az ablakoknak is van átviteli függvénye. Az időtartománybeli ablakolást az időtartományban lehet szemléletesen leírni és ábrázolni. Ez az ablak szorzódik a bemenő jel időfüggvényével. De a fentiek alapján tudhatjuk, hogy az „ablak Fourier transzformáltja” konvolválódni fog a bemenő jel spektrumával, ami szokatlan számunkra. Ez pedig

szűrés, és mint minden szűrőtől elvárjuk a nem túl meredek levágást. Továbbá, azt is szeretnénk, hogy az ablak „ne csináljon semmit” a spektrummal, ez azonban irreális elvárás.
Az ablakokat tehát a bizonytalansági elv értelmében vizsgáljuk: vagy tökéletes ablakolást várunk el tőle, ami nem súlyozza az időfüggvényt, cserébe nagy spektrum változással fogunk fizetni („elkeni” a spektrumot). Ha viszont azt akarjuk, hogy a spektrumot ne kenje el, akkor azzal kell számolnunk, hogy az időtartománybeli ablak bonyolult alakú lesz és súlyozni fogja az időfüggvény mintáit: egyeseket átenged teljesen, másokat csillapít. Ennek következménye, hogy az ablakolás nem tökéletes, mert hamis, csillapított mintákból is történik a számítás. Valamit valamiért.
A legfontosabb frekvenciatartománybeli ablaktípusok tehát az alábbiak:

1. Lapos (flat), amely ideálisan keskeny a frekvenciában de súlyoz az időtartományban.
2. (lineáris fázisú) Hanning, azaz emelt koszinuszos, ami ennek ellentéte: a legkevésbé módosítja az időtartománybeli képet, de súlyozza a spektrum komponenseit.
3. Negyedrendű Butterworth, ami az átmenet a két szélső eset között: kissé módosítja csak a spektrumot és az időmintákat is.



Az ablakoló függvények (fent) transzformáltja különböző módon súlyozza a mintákat a másik tartományban.

2.4.3 A matematikai leírás

A konvolúció tehát a bemenő jelek időtartománybeli „összege”, ún. összegző integrál:

$$x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)y(t-\tau)d\tau$$

Azt jelenti, hogy a jel előélete, a múltja is hatással van a végeredményre. A művelet a frekvenciatartományban szorzás:

$\Im\{x(t) * y(t)\} = X(f)Y(f)$

Az átviteli függvényre tehát: Y(f) = X(f)W(f), ahol W(f) az átviteli függvény.

Létezik még egy transzformáció, matematikai jelentőséggel, mégpedig a Hilbert-transzformáció. A sgn(x), az előjel-függvény, aminek érétke +1, ha egy szám pozitív és -1, ha nullánál kisebb:

$$\operatorname{sgn}(x)\begin{cases}1, x \geq 0 \\ -1, x < 0\end{cases}$$

Ennek Fourier transzformációjára igaz, hogy

$$\operatorname{sgn}(t) \leftrightarrow \frac{-j}{\pi f}.$$

A Hilbert-transzformáció erre vonatkozik, és ez nem más, mint egy a(x) és az (1/πx) konvolúciója:

$$\mathrm{H}\{a(x)\} = a(x) * \frac{1}{\pi x}$$

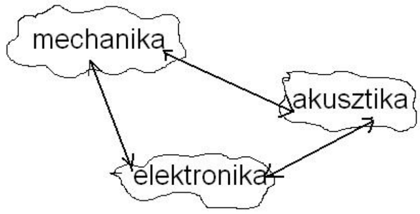
Ellentétben a Fourier transzformációval, ennek eredménye az idő-idő vagy a frekvencia-frekvencia tartományban marad. Valós függvény eredménye is valós függvény lesz.
A másik oldalról közelítve, egy x(t) függvény Fourier-transzformáltja X(f). Ennek Hilbert-transzformáltja:

$$\mathrm{H}\{X(f)\} = -j(\operatorname{sgn}(f))X(f)$$

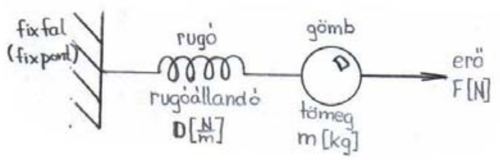
ami megfelel egy +π/2 fázistolásnak a pozitív frekvenciákra és -π/2 tolásnak negatív frekvenciákra.
Felhasználása korreláció függvényeknél, véletlen adatsorozatoknál lehet hasznos (nem diszperzív többutas terjedések becslésénél, burkoló meghatározásban stb.)

3. Mechanikai ismeretek

Amikor hangkeltésről vagy hangrögzítéskor beszélünk, három különböző világ között teremtünk kapcsolatot. Az első világ értelemszerűen az akusztikai, hiszen pld. fülünk akusztikai hullámokat fog fel, alakít át. A kiindulás az elektronikus világ, egy lejátszó berendezés, illetve a hangszóró kapcsaira jutó feszültség. Ez az elektromos rezgés mechanikai mozgássá alakul, amikor a membrán mozgásba jön (a feszültséggel arányosan), majd megmozgatja a levegő részecskéit, amelye a dobhártyán alakulnak újból mechanikai rezgéssé.
Az ilyen rendszereket elektromechanikai átalakítónak nevezzük (trancducer), és feladatuk kettős lehet: vagy elektromos rezgést (feszültséget) alakítanak mechanikaivá, vagy fordítva. Előbbire példa a hangszóró, utóbbira a mikrofon. Bizonyos eszközöket továbbá csak a lezáró impedanciával együtt értelmezhetünk (az átviteli függvényét) és egy átalakítóra hatással van annak szűk akusztikus környezete. Erre tipikus példa egy dobozba épített hangszóró, amelyet hangsugárzónak hívunk és melynek paramétereit nem csupán a hangszóró tulajdonságai szabják meg, hanem az azt körülvevő doboz anyaga, belső kialakítása, kamrái, nyílásai, geometriai mérete. Így a három világ között műszaki, matematikai kapcsolatot tudunk létesíteni, majd egy közös platformra transzformálva az egyenleteket egyszerű számításokat végezhetünk. Ez a közös világ bármelyik lehet a három közül, azonban mérnökként az elektronikai rész a legkellemesebb számunkra.



Hanghullám keltése mechanikai rezgőrendszerrel történik. A mechanikai hálózatok éppúgy alapvető koncentrált paraméterű alapelemekből épülnek fel, mint a villamos hálózatok R, L, C tagja, forrásai. Az egyszerűsített egy dimenziós mozgás modellje az alábbi:



Ezt a rendszert, ha mozgásba hozzuk, egy adott F erővel kitérítjük és magára hagyjuk, végtelen ideig csillapítatlan szinuszos (harmonikus) rezgést fog végezni. A „fix fal" mint végtelen tömegű viszonyítási pont vesz részt a rendszerben, hasonlóan az elektromos hálózatok földeléséhez, földpotenciáljához. A rezgés kitérésének időfüggvénye x(t). Amennyiben a modellbe a súrlódást is belevesszük (mechanikai ellenállás formájában), csillapított rezgést kapunk. Ha csillapítatlan a rezgés, akkor az *m* tömegpont mozgási és helyzeti energiája teljes egészében átalakul egymásba a mozgás során. Kétszeres amplitúdójú rezgéshez négyszeres energia tartozik. A modellben szereplő rugó paramétere a már jól ismert *D* rugóállandó, de az akusztikában ehelyett majd reciprokát, a *C* rugóengedékenységet fogjuk használni.

$x(t) \in [-A;+A]$
$v(t) = x'(t)$
$a(t) = v'(t) = x''(t)$

3.1 A mozgásegyenlet

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

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

ahol

$a(t) = d^2x(t)/dt^2$
$F_{rugalmas} = -Dx(t)$
$F_{fékező} \equiv F_{súrl.} = -konst*v(t)$
$F_{külső}$ = pld a gravitáció, amit általában kihagyunk a számításból.

Tekintettel arra, hogy az F=ma egyenletben a gyorsulás a kitérés második deriváltja, az ilyen egyenletet lineáris, közönséges, állandó együtthatójú, inhomogén másodrendű differenciálegyenletnek nevezzük. A differenciál egyenlet tehát nem más, mint egy olyan egyenlet, amelyben egy függvény található, amit valahány rendben deriválunk. Az ilyen egyenletnek nem egy x-érték, hanem valamilyen x(t) függvény vagy függvények a megoldásai. A differeknciál egyenletnek végtelen megoldása van, amely közül a ténylegest az ún. kezdeti (perem)feltételek határozzák meg, ilyen pld. az, hogy a t=0 pillanatban a kezdősebesség és az amplitúdó értéke is nulla legyen. A differenciál egyenlet megoldásai olyan függvények, amelyeket visszahelyettesítve azonosságot kapunk, ezek gyakran egymástól egy konstansban térnek el (ne feledjük, konstans szám deriváltja zérus!).
Az $F = ma = -Dx$ egyenlet a csillapítatlan harmonikus rezgés egyenlete. Ilyen egyenlet írja le az ideális, veszteségmentes, lineáris, harmonikus oszcillátorokat. Minden olyan dolgot így hívunk, amire a kitérítéskor a kitéréssel arányos és ellenkező irányú erő hat. Megoldása minden olyan függvény, amelynek második deriváltja saját magának negatív számszorosa (sin, cos), tetszőleges konstansokkal számolva:

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

Tehát a fenti egyenletbe bármilyen C_1 és C_2, valamint ω-értéket helyettesíthetünk, megoldása lesz annak. Ha a konstansok bármelyike zérus, akkor csak szinuszos vagy koszinuszos tagokat is előállíthatunk, de a kettő összege is megfelelő. Szinuszos rezgésnél a rezgés frekvenciája f=1/T, ahol

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

A teljes (időfüggetlen) energia:

$$\sum E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Dx^2$$

Csillapított rezgésnél az egyenlet bonyolultabb alakú:

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

Ekkor tehát nem csupán 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 már megismert *k* hullámszámot felhasználva bevezethetjük a *csillapítási együtthatót*:

$$\beta = \frac{k}{2m}$$

Továbbá:

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

és a rezgés (saját) körfrekvenciája:

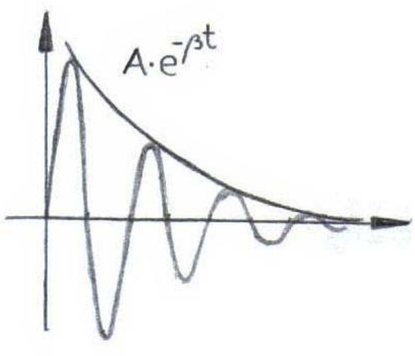
$\omega = D/m = 2\pi f$

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:

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



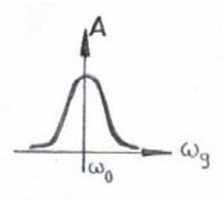
Amennyiben a fékező erő túl nagy, nem tud kialakulni periodikus rezgőmozgás, mert idő előtt elfogy az energia.

3.2 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 tehát egy külső F gerjesztőerő az alábbi harmonikus alakú:

$$F_{külső} = F_0 \cos(\omega_g t)$$

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 rezonanciagörbe harangalakja.



3.3 Rezgések a hangkeltésben

A legalapvetőbb hangkeltő eszköz a hangszóró. A fenti egyszerűsítő elemeket használva elmondhatjuk, hogy az *m* tömeget a membrán, a lengőtekercs és az egyéb mechanikai szerkezetek tömege adja. A rugalmasságot, a rugót a membrán rugalmas felfüggesztése az őt tartó kosárhoz kívül és belül a mágneskörhöz (az ún. pille és a rim). A súrlódási veszteségek mechanikai eredetűek valamint a levegő visszahatásából származik. A kényszerrezgés itt úgy jelentkezik, hogy a hangszóró kapcsaira kapcsolt szinuszos elektromos jel mechanikailag is vele azonos frekvenciájú szinuszos mozgást hoz létre, aminek eredménye szinuszos hangrezgés lesz.
Egy rezgő rendszer jellege lehet tömeg, rugalmasság vagy ellenállás jellegű (ahogy elektronikában is használjuk a kapacitív, induktív, ellenállásos kifejezéseket). A hangszóró mindháromból tartalmaz valamennyit. A rezonanciapontban ellenállás jellegű (valós), mert a súrlódás dominál. Felette tömeg (induktív) jellegű, alatta rugalmas (kapacitív) – tehát minden frekvenciafüggő!

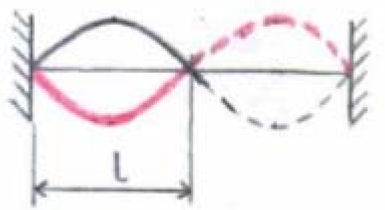
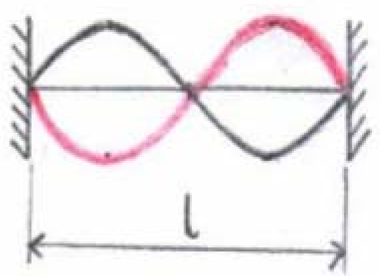
param./jelleg	x(t)	v(t)	a(t)
rugalmas	független	ω	ω^2
ellenállás	$1/\omega$	független	ω
tömeg	$1/\omega^2$	$1/\omega$	független

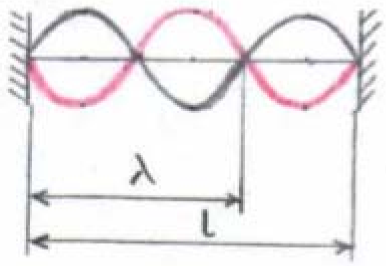
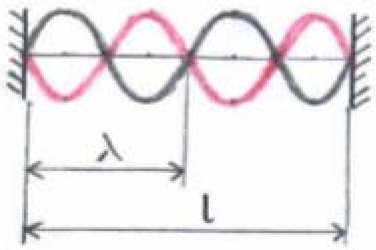
A másik tipikus hangkeltő rendszer a hangszer: több szabadságfokú rezgőrendszer, több rezonanciafrekvenciával. Ennek alapjait a húrok rezgésére vezetjük vissza.

3.3.1 Alapvető rezgések a hangkeltésben

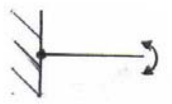
1. Megfeszített húr (pld. gitár, hegedű). A rezgés az alaphangból és a felharmonikusokból áll. Egy dimenziós rezgés.

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: $\lambda n=2L/n$.

n=1	n=2
$\lambda_0=2L$	$\lambda_1=2/2L=L$
$L= \lambda_0/2$	$L= \lambda_1$
	

n=3	n=4
$\lambda_2=2/3L$	$\lambda_3=2/4L=2L$
$L= 3\lambda_2/2$	$L= 2\lambda_3$
	

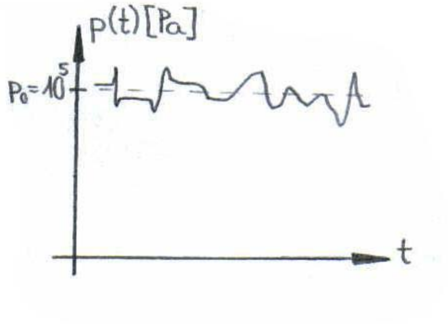
2. Megfeszített membrán (pld. dob). Létrejönnek nem harmonikus komponensek is, amik az alaphangnak nem egész számú többszörösei. Két dimenziós rezgés.
3. Az egyik végén befogott rúd, mely képes harmonikus és nem harmonikus rezgésre is.



4. Elzárt térrész, üreg. Az ilyen képződmény lehet tömeg vagy rugalmas jellegű is, attól függően, hogy a λ hullámhosszhoz képest milyen a térrész geometriája. Példa rá a későbbiekben bemutatott Helmholtz-rezonátor. A hangszereknél az ilyen különböző üregek és nyílások méretének szabályozásával érünk el hanghatást (síp, orgona, fúvós hangszerek).

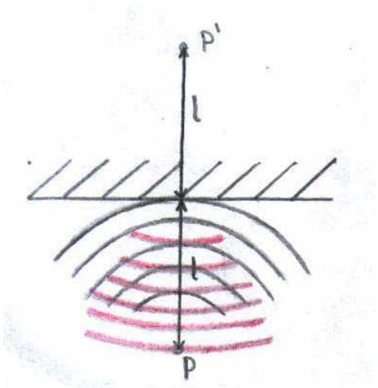
3.3.2 Rezgések terjedése

Ahogy már megismertük, hangnak nevezzük a P_0 nyomásra rászuperponált p(t) hangnyomás időfüggvényt.

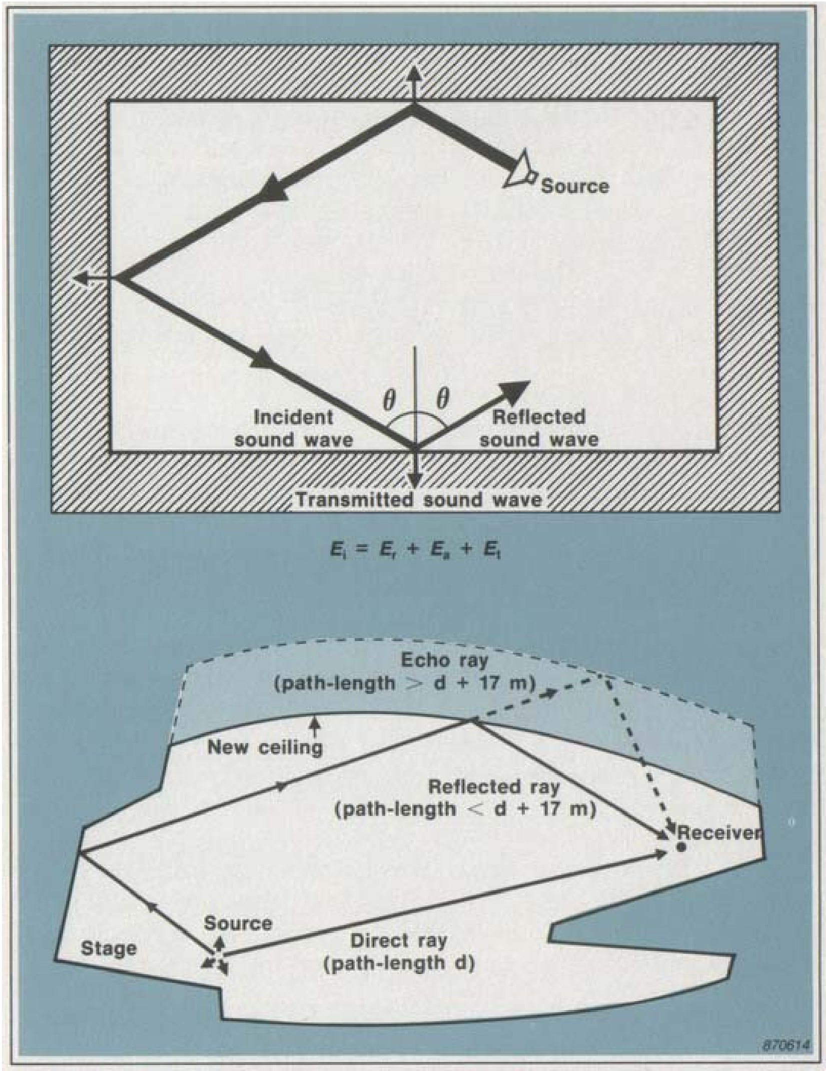


A c = fλ terjedési sebesség a nyomástól független, de a hőmérséklettől nem: minden 1 fokos hőmérsékletemelkedéshez +0,6 m/s sebességnövekedés tartozik. A hang folyadékban és szilárd anyagban is terjed, akár még gyorsabban is: vízben 1440 m/s; fában 2500 m/s; acélban 5000 m/s sebességgel. Ez a terjedés azonban jellemzően nem jut el olyan távolságra, azaz rövid ideig tart és kisebb hatótávolságú (hasonlóan az atlétikában, ahol attól hogy valaki gyorsabban tud futni még nem biztos hogy messzebbre is). A hangenergia egy része veszteség, hő formájában szabadul fel. Általában a nedvesség rontja ezt a hatásfokot, a frekvenciától függően. Ahogy a távolság nő, a nagyobb frekvenciák energiája hamarabb kezd csökkenni. Tapasztalhatjuk is, hogy a messziségben zajló dörgések, robbanások vagy egy rock koncertből először a basszus puffogását észleljük.
A hangterjedés legfontosabb jellemzője az irány. Három alapvető jelenséget ismerünk meg: refrakció, diffrakció és reflexió.
A refrakció magyarul elhajlást jelent, azaz 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 megkerül. Érezhetően más az árnyékoló

hatása egy seprőnyélnek, mint egy hatalmas falnak. A reflexiót más néven visszaverődésnek is nevezzük, részletesen a teremakusztikai részben ismerjük meg. Elég egyelőre annyit tudni, hogy a hangenergia egy része visszaverődik, egy kisebb része áthatol az akadályon, egy legkisebb része pedig a súrlódási veszteség hatására, hő formájában felszabadul. A tökéletesen visszaverő felület, amely mindent visszaver, a modellekben egy a fal másik oldalán lévő azonosan sugárzó „tükörforrás" szokta jelképezni. A tökéletes reflexiókhoz állóhullámok tartoznak, tipikusan szabályos, párhuzamos falú termekben és káros dolognak tartjuk.



Reflexió előfordulhat sűrűségváltozás határán is (a levegőhöz képest a betonfal igencsak erőteljes sűrűségnövekedést jelent). Lényegesebb azonban a jelenség pld. tölcséres hangszórónál (megafon), amelynek szájnyílásánál a nyomás és a hatásfok csökken, reflexiók, visszahajlások jönnek létre.
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 nem más, mint 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 termek tervezésénél igyekeznek tartani, hogy a forrás és a hallgató között sehol ne legyen meg a 17 méteres útkülönbség lehetősége.



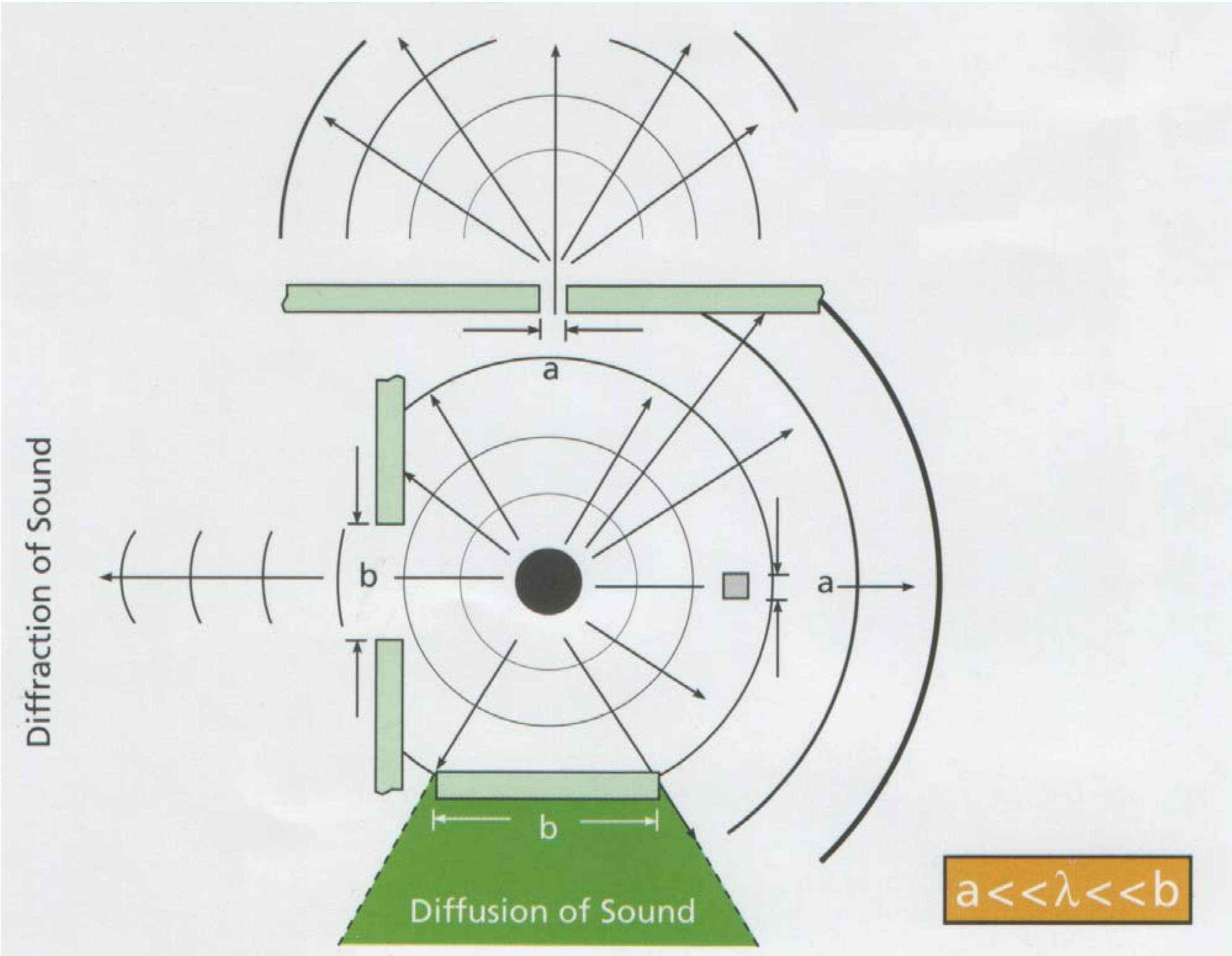
Ha a hullámhossz jóval kisebb a visszaverő felületnél, a geometriai hullámterjedés leírja a hangutakat, a beesési szög megegyezik a visszaverődési szöggel. Ha a hangutak különbsége nem haladja meg a 17 métert, nem keletkezik visszhang (ez a 20 Hz-es jel hullámhossza).

Említsük meg még a mozgó források frekvenciaváltozását, amit Doppler-effektusként ismerünk. Már középiskolában megtanultuk, hogy a közeledő és a távolodó mentőautó szirénájának hangmagassága megváltozik. A jelenség azonban 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.

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

Ahol f a kisugárzott frekvencia, v_f a forrás, v_m a megfigyelő 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.

A diffrakció és a reflexió mértéke attól függ, mekkora a hullámhossz (λ) a geometriai méretekhez képest. Amikor tehát az akusztikában „kicsi” tárgyról beszélünk, az mindig a hullámhossz (a frekvencia) függvénye és *ahhoz képest* értendő.



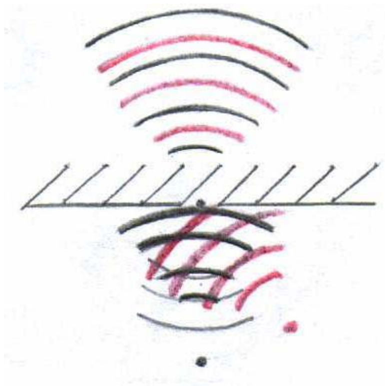
A diffrakció szemléltetése. Diffrakciónál az akadály összemérhető méretű a hullámhosszal. Ha az akadály kisebb, a jelenség elhanyagolható, ha nagyobb, akkor árnyékolás lép a helyébe. Akkor következik be, ha a hang lyukon halad át. Ha az kicsi, akkor a lyuk pontforrásként viselkedik, ha túl nagy, akkor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

Logikus, hogy kis tárgy esetén (pld. a seprűnyél) a diffrakció nagy, a reflexió kicsi. Nagy tárgynál fordítva: a diffrakció gyengül, a reflexió nő.

Négy alapesetet ismerünk terjedő hang akadályba ütközésekor:

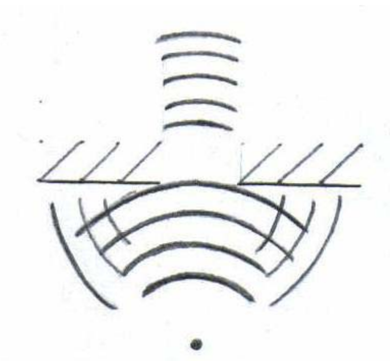
1. Fal kis nyílással

   Egyenletes, gömbhullámú terjedés lép fel a nyílás után is. A nyalás 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 átáramlik és síkhullám jelleggel terjed tova a nyílás másik oldalán. A reflexiók a „tükörforrásból" jönnek.

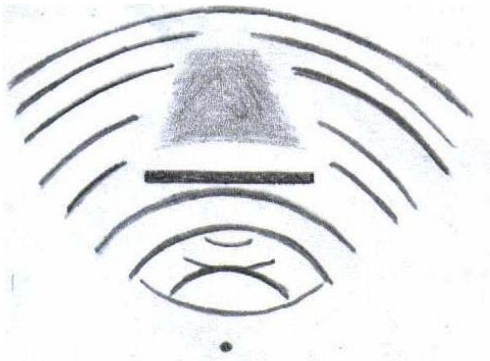


3. Kis méretű korong

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.



3.3.3 A hullámok irányítottsága

Már volt szó gömbhullámról és síkhullámról. Az ideális pontsugárzó, melynek nincs mérete és vesztesége, ideális gömbhullámokat bocsát ki. Ezek 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 pulzálva fúvódik fel. Természetesen, ez csak ideális modell, a valóságban csak bizonyos távolságra és közelítéssel mondhatjuk gömbhullámnak egy hangszóró sugárzását. Léteznek speciális, több hangszóróbál álló gömb alakú sugárzók, melyek ezt próbálják utánozni. Gömbhullámnál a hullámfelületek gömbök, síkhullámnál síkok (a terjedés irányára merőlegesen nézve). Kellően távol, ahol a görbület kicsi, a gömbhullámokat síkhullámúnak tekinthetjük, és ezzel az egyszerűsítéssel a számításokat megkönnyíthetjük.

Gömbhullámokat létrehozó sokhangszórós „pontsugárzó".

A harmonikus síkhullám hullámfelülete a haladás irányára merőleges végtelen sík. Ez csak közelítés, a valóságban nem igaz. Hullámfelületnek nevezzük a tér azon pontjait, melyekben a rezgésállapot (a fázis) azonos. Matematikai alakja a síkhullámnak az alábbi:

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega(t \pm \frac{x}{v}) + \varphi_0\right]$$

Ez a függvény tehát a kitérés és az idő függvénye. A koszinusz argumentumát *teljes fázisnak* nevezzük, amit gyakran a hullámszámmal írunk fel ilyen alakban:

$$k(vt \pm x) + \varphi_0$$

A képletben szereplő x/v hányados a kitérés és a sebesség hányadosa, azaz idő dimenziójú változó (métert osztva m/s-al másodpercet kapunk). Ha a hullám *v*-sebességgel a +x irányban haladó, akkor a + jelet kell használnunk, az x/v pedig tiszta időbeni eltolás, ahol a v az eltolás (a haladás) konstans sebessége.
Az azonos fázisú pontok (a hullámfelület) v=ω/k fázissebességgel haladnak. Ideális esetben a nyomás és az intenzitás független a forrás távolságától.
A harmonikus gömbhullámok pontforrásból érkeznek és három dimenziós hullámok. Az egyenlet felírásához szinte mindig a hullámszámot és az *r* sugarat (a középponttól mért távolságot) használjuk fel:

$$y(r,t) = \frac{A}{r}\cos\left[\omega t \pm kr \pm \varphi_0\right].$$

Fontos észrevenni az A/r változóban, hogy az amplitúdó, azaz a *nyomás* a forrástól távolodva az 1/r összefüggésnek engedelmeskedik. Az *intenzitás* viszont – ebből kifolyólag – az $1/r^2$ törvény szerint csökken. Megfelelően kis térszögben, ahol a görbület elhanyagolható, síkhullámmal közelíthető. Azonos teljesítménynél a síkhullám messzebb terjed el, mint a gömbi.
Mivel a szögfüggvények exponenciális alakokkal is használatosak, gyakran vektoriális mennyiségekkel felírva az alábbi alakokkal is találkozhatunk:

$$y(\bar{x},t) = Ae^{j\left[\omega t \pm \bar{k}\bar{x} + \varphi_0\right]}$$

$$y(\bar{r},t) = \frac{A}{r}e^{j\left[\omega t \pm \bar{k}\bar{r} + \varphi_0\right]}$$

Ahol **x** a helyvektor, **r** a sugár(vektor), és a hullámszám is hullámvektorként szerepel (azért vektoriális, hogy ha egy másik vektorral összeszorozzuk, akkor a szorzat skaláris legyen). Ezek az alakok azért jobbak, mert a differenciál és az integrálszámítás egyszerűbb (ne feledjük, hogy az idő szerinti deriválás jω-val való szorzásnak felel meg, a kétszeres deriválás pedig $-\omega^2$ szorzásnak stb.).

3.4 Hangforrások

A fejezet utolsó részében megismerkedünk az elvi, illetve az alapvető hangsugárzó „alapegységekkel", melyeket matematikailag még (viszonylag) könnyen tudunk kezelni.

3.4.1 Alap hangforrások

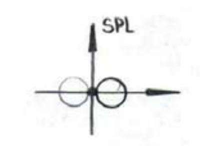
A legegyszerűbb (pontsugárzó) hangforrást, mely harmonikus gömbhullámokat hoz létre, *monopol* sugárzónak nevezzük. A közeget homogénnek és izotrópnak feltételezzük. A valóságban ilyen ideális sugárzó nincs, de kezelhető így egy, ha a forrás mérete jóval kisebb, mint a hullámhossz. A monopol sugárzó intenzitása:

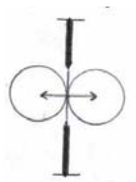
$I = W/4\pi r^2$,

ahol *W* a hangteljesítmény [W], *r* az aktuális sugár, vagyis a forrástól mért távolság [m]. Az intenzitás kifejezhető a már megismert összefüggéssel is:

$I=P^2/\rho c$.

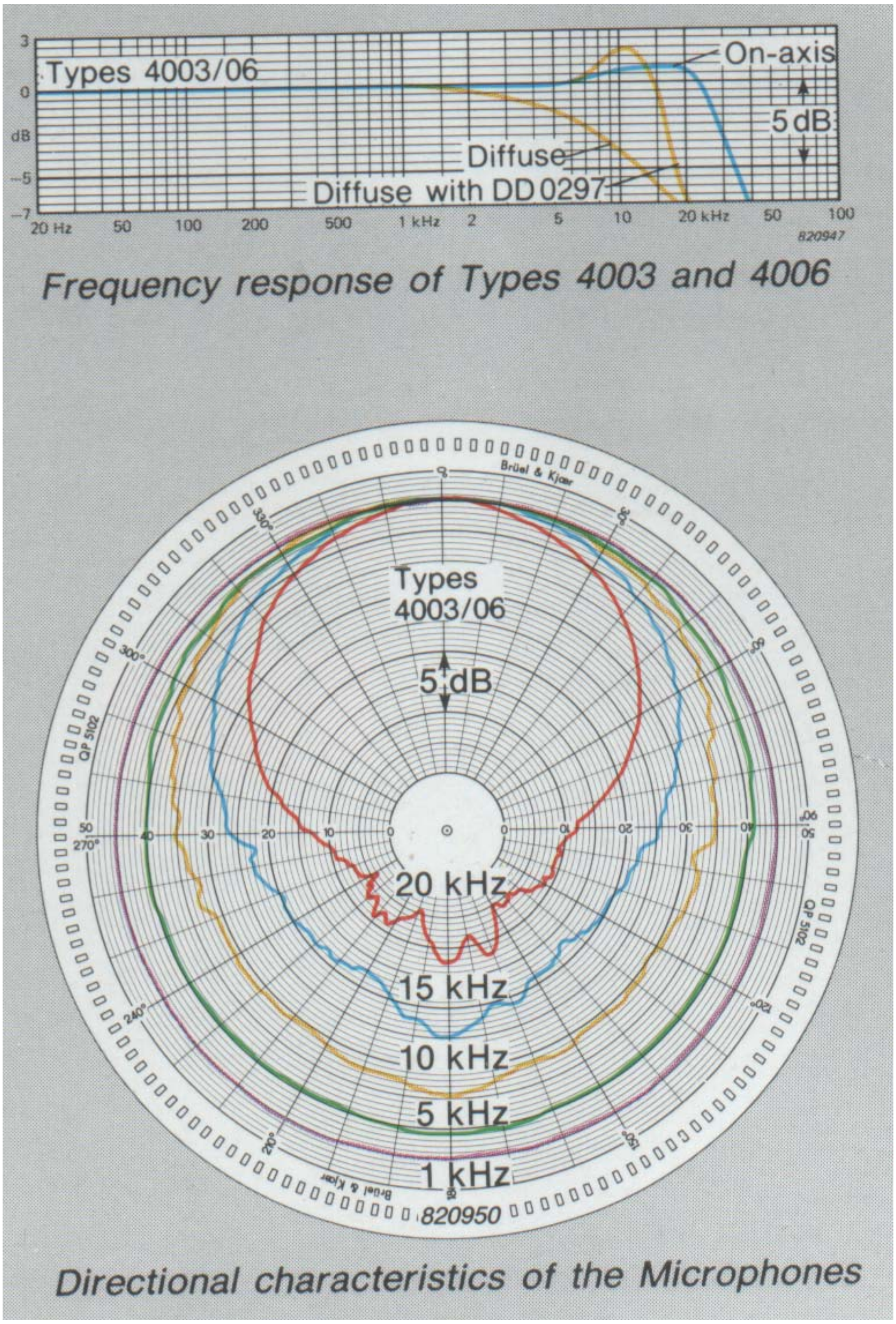
A hangnyomásszint (SPL) 6 dB-lel csökken a távolság duplázódásával. A dobozba helyezett kisméretű hangszóró tekinthető ilyennek.
A dipól sugárzó két monopol „összeragasztása", 180 fokos ellenfázisban. A sugárzóhoz közel a hangnyomásszint $1/r^2$-el csökken (közeltér), távolabb csak 1/r-el (távoltér). Az $I=P^2/\rho c$ képlet itt is érvényes.





Alacsonyabb frekvenciákon a dipól nem olyan jó hatásfokú, mint a monopol. Később látjuk majd a magyarázatot rá, hogy ezért építik dobozba a hangszórókat. Ezzel ugyanis megszűnik az ún. „akusztikus rövidzár" a sugárzó membrán két oldala között (azáltal, hogy egy dobozzal körbezárjuk a hátsó felét), nem tudnak a nagyobb hullámhosszok „hátulról ellenhatni" és kioltani a rezgéseket. Dipólsugárzónak foghatjuk fel a szabadon lévő (dobozva vagy végtelen falba nem helyezett) hangszórót.

A sugárzókat a polár diagrammal, vagy más néven iránykarakterisztikával jellemezzük. Az iránykarakterisztika az érzékenység (átviteli függvény) térbeli eloszlása. Az azonos hangnyomásszintű pontok felülete, amelyeket a térképekhez hasonlóan szintvonalakkal ábrázolunk.



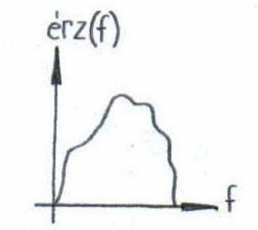
Különböző frekvenciához tartozó iránykarakterisztikák (polár diagramok)

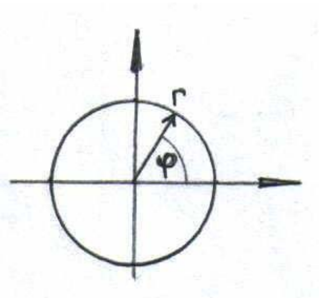
Az érzékenység egy pontban, egy frekvencián (általában 1 kHz-en) értelmezett, az átviteli függvény ennek frekvenciamenete. Általában a magas frekvenciák jobban irányítottak, mint a mélyek. A *d* irányítási tényező:

$$d = 10 \log (I/I_{ref}),$$

ahol I tetszőleges irányban megmért intenzitás, és

$$I_{ref} = W/4\pi r^2.$$

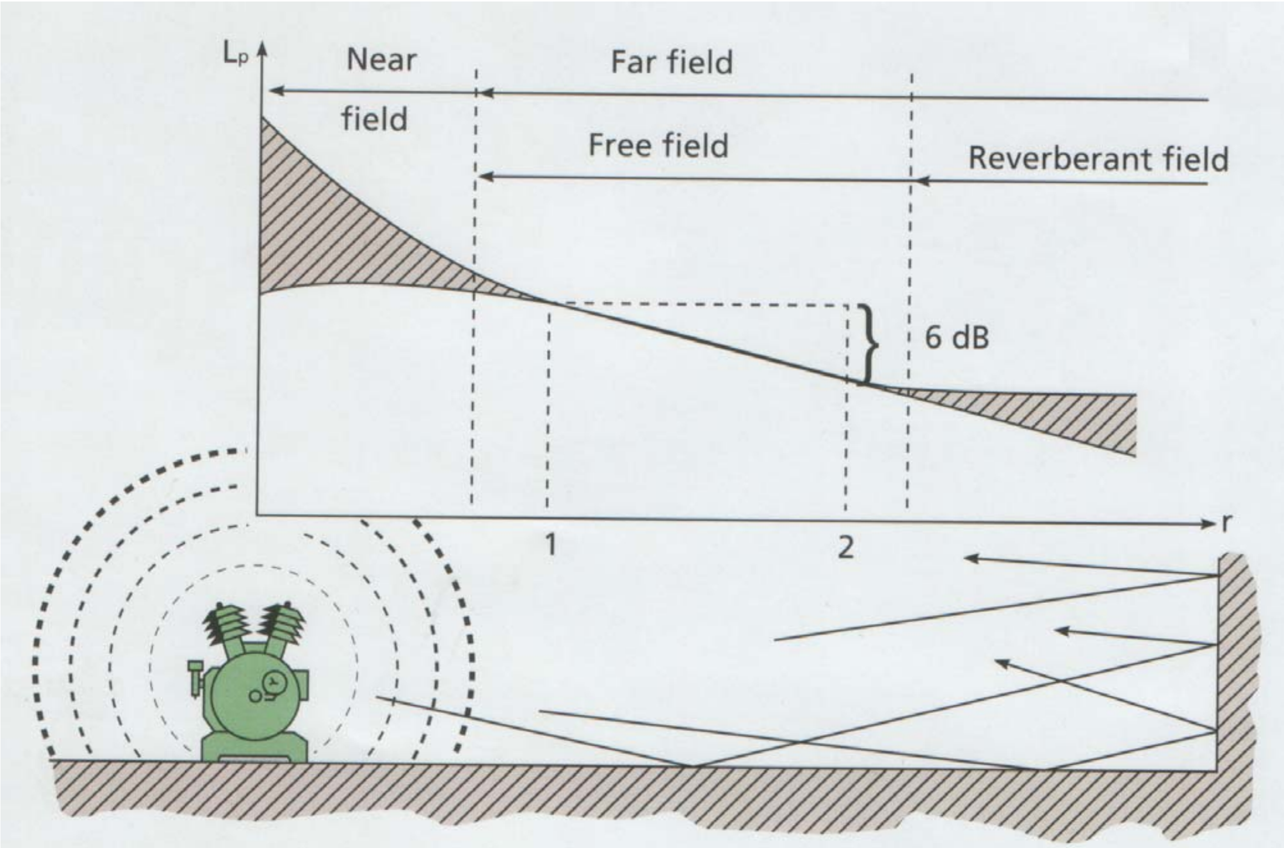




3.4.2 Hangtér a sugárzók közelében

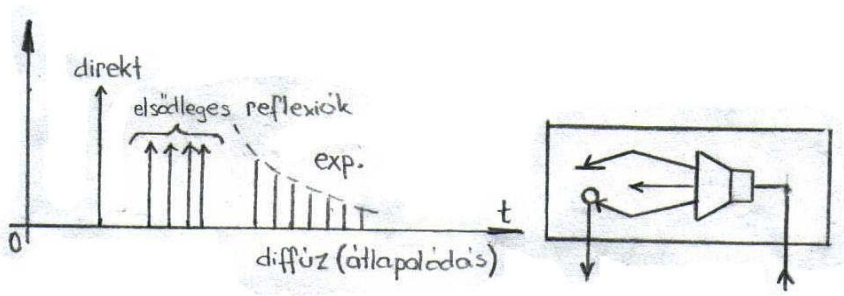
A fentiekben már láttuk, hogy a közeltérben az intenzitás nem egyszerűen arányos a hangnyomással, a hangnyomás változó, a részecskesebesség nem feltétlen mutat a terjedés irányába. Matematikailag nehéz kezelni és leírni. A távoltérben a hangnyomásszint 6 dB-el csökken a távolság duplázódásával, az intenzitás arányos a hangnyomás négyzetével és a részecskesebesség a terjedés irányába mutat.

A hangteret feloszthatjuk direkt (közvetlen, free-field) és reverberációs (visszavert, reverberation) részre. Ez a felosztás inkább időben értendő, mint térben. A közvetlen besugárzási részen a nyelő a forrásból érkező közvetlen hangutakat fogja be, míg a visszavert részen a visszaverődéseket (is). A visszavert tér rászuperonálódik a távoltérre, melynek elnevezése diffúz tér. A diffúz térben bármilyen kis dV-térfogategységben azonos az energiasűrűség és az intenzitás, amennyi energia beáramlik, annyi ki is, nem lehet terjedési irányt kijelölni.



A hangszint változása a forrástól távolodva. A mérést ne végezzük a közeltérben és az utózengési térben sem. Intenzitásmérés lehetséges a közeltérben is.

Azt a távolságot egy adott forrástól, ahol a hangnyomásszint a direkt és a visszavert hullámokból számítva egyenlő *Hall-rádiusznak* nevezzük. Ezzel, és egyszerűbb számításokkal majd a teremakusztikai részben találkozunk részletesen.



3.4.3 Elvi hangsugárzók

Nézzük meg most az elvi hangsugárzók néhány fontos tulajdonságát! Azt már láttuk, hogy a hangszóró, amennyiben elég kicsi, akkor monopol sugárzó. Ez azonban ritka, a szabadon lévő hangszórót dipólsugárzónak fogjuk fel. A probléma ezzel a már említett akusztikus rövidzár, a gyenge kis frekvenciás átvitel. Hogy megszüntessük ezt, a hangszórót dobozba vagy falba építjük. Jegyezzük meg, hogy a hangfal nem egyenlő a hangdobozzal: előbbi egy végtelen, hátlappal nem rendelkező sík falfelület, utóbbi pedig egy teljesen zárt, véges térrész. A boltban kapható hangsugárzók tehát hangdobozok, nem pedig hangfalak.
Ennek alapegysége tehát a „falba épített merev korong". A hangszórók membránja tipikusan körszimmetrikus (innen a korong) és a közelítéseinkben merev is, mozgások, minden pontja azonos irányban és sebességgel mozdul, mint egy merev dugattyú a fecskendőben. Ez a valóságban nem igaz, hiszen a membrán belül és kívül is rugalmasan rögzített, a felfüggesztéseknél csillapított és az a része biztosan nem mozog azonosan a közepével. Ha ennek a korongnak a *d*-átmérője nagyobb a hullámhossznál, akkor az irányítottság megnő, egyre inkább nyúlik és nyalábosodik az iránykarakterisztika. Ha a hullámhossz ennél kisebb, akkor jellemzően gömbkarakterisztikát látunk. Nevezetes még a $\lambda=d/2$ tájék, ahol jellemző a „fürtösödés", a fő nyaláb tövében megjelenő apróbb melléknyalábok.
A vonalforrás ilyen alapelemekből felépített hangoszlop. Erre példa lehet az alagútban haladó kocsioszlop. Itt nagyobb a nyalábosodás mértéke és a fürtök nagysága is. Merőleges irányban az oszlopra nincs hangterjedés. Ez hasonlít legjobban a megvásárolható többutas hangsugárzókra is, melyeknél legalul helyezik el a nagyobb mélysugárzókat, és felette szimmetrikusan az egyre kisebb magas frekvenciás hangszórókat.
A beépített hangszórók általában dinamikus kónusz sugárzók, ezek hasonlítanak leginkább egy merev korongra és inkább az alacsony-közepes frekvenciák lesugárzására alkalmasak. Magas sugárzónak ún. dóm sugárzókat használnak, melyek kifelé púposodnak, jellemzően keményebb fémből, fémhálóból készülnek és merevek. Minél kisebb a membrán felülete, annál magasabb frekvenciákat sugároz le. Mély hangokhoz nagyméretű és nagy felületű membránra van szükség. Ezzel összefüggésben figyeljünk arra is, hogy a kis frekvenciás sugárzás kevésbé nyalábos és irányított, mint a magas (továbbá, a hallásunk is érzéketlenebb a mély hangok irányára).

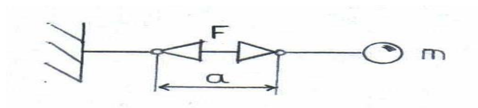
4. Akusztikai hálózatok

Ahhoz, hogy az elektromechanikai átalakítókat tárgyalni tudjuk, az akusztikai és mechanikai hálózatok alapelemeit és kapcsolatait kell megvizsgálnunk. Ahogy léteznek az elektronikában az R, L, C építőkövek, értelmezzük az impedanciát, átviteli függvényt, generátorokat, ugyanúgy megtehetjük ezt az akusztikai és a mechanikai világban is. A három világ között pedig egyszerű képletekkel teremtjük meg a kapcsolatot.
A mechanikai elemeket éppúgy koncentráltnak tekintjük, ahogy az elektronikában használotasakat. Tudjuk, hogy egy R ellenállás egymagában hordozza az összes ellenállás értékét, az összekötő vezetékek ideálisak, ellenállás nélküliek és végtelen gyorsak. Hasonlóan, a mechanikai tömeg vagy a rugó „összesűríti" a jellemzőket, az őket összekötő karok pedig tömeg és rugózásnélküliek, a „kanyarban" derékszögűek és pusztán a kapcsolódást modellezik.

1. Tömeg

A tömeg olyan elem, mely *f* erő hatására adott *a* gyorsulást szenved. A mozgásegyenletből kifejezve tehát

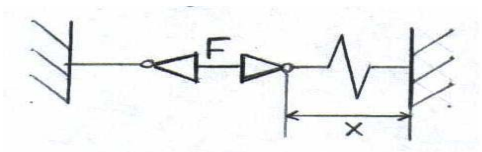
m = f/a [kg].



2. Rugó

A rugó olyan elem, mely *f* erő hatására adott *x* elmozdulással (összenyomódással) rendelkezik. A rugónál a fizikában megszokott *D* rugóállandó helyett az akusztikában a kényelmesebb *C* rugóengedékenységet használjuk. C=1/D, tehát a rugóengedékenység arról ad számot, mennyire könnyű összenyomni egy rugót: minél nagyobb a C, annál engedékenyebb a rugó, annál kisebb erővel lehet ugyanannyi x-összenyomódást okozni rajta.

C = x/f [m/N].

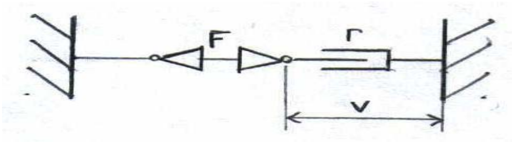


Jegyezzük meg, hogy a számításokban néha előfordul „negatív rugó” is, melynek C-értéke negatív szám. Ez egy olyan a valóságban nem létező képződmény, melyet egyre jobban összenyomva, egyre könnyebbé válik az összenyomás. Valóságos rugóknál ennek ellenkezőjét tapasztaljuk, minél nagyobb az x-kitérés, annál nehezebb összenyomni azt (vagy széthúzni).

3. Mechanikai ellenállás

A mechanikai ellenállás olyan elem, amely *f* erő hatására adott *v* sebességre tesz szert. Gyakorlatilag egy dugattyúnak képzelhetjük el, ami ellenáll a dugattyú benyomásának. Ideális esetben ez rugalmasságmentes, és azonos erő hatására mindig azonos sebességgel válaszol, ami pld. egy a nyílásánál befogott fecskendőnél nem igaz (mert ott a levegő összenyomásával arányosan egyre nehezebb benyomni a dugattyút és elengedéskor az vissza is lökődik). Az ellenállás jele *r*, impedanciája valós, és az elektronikához hasonlóan a veszteségek megjelenítésére hivatott, rajta valós teljesítmény diszipálódik.

$r = f/v$ [Ns/m].

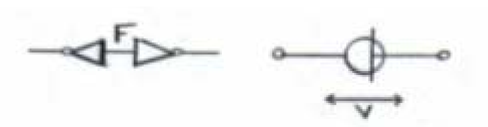


4. Emelő

Az emelő ritkán használatos elem, az akusztikában gyakorlatilag nem fordul elő és elektromos analógja sincsen.

5. Generátorok

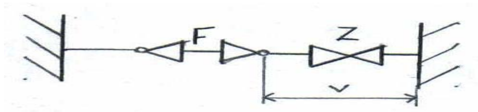
Az elektronikában áram -és feszültséggenerátorokat ismertünk meg, a mechanikában is kétféle típus létezik: az erőgenerátor és a sebességgenerátor. Az erő és a sebesség ugyanis a kétféle (elvben különböző, gyakorlatban hasonló) meghajtás, amire az elemek kitéréssel, sebességgel és gyorsulással válaszolnak (időbeni derivált!).
A generátorok rajzjele:



6. Impedancia

Az impedancia szerepe is ismert: az ellenállás frekvenciafüggését tartalmazza, és közös számítási alapokat nyújt a valós (ellenállás) és a frekvenciafüggő (komplex) elemek kezeléséhez. Periodikus jelek esetén a mechanikai impedancia (ahogy már korábban láttuk):

Z = f/v [Ns/m].



Ez általános esetben komplex, csak a mechanikai ellenállás esetén valós. Az analógia már érezhető az elektronikai elemekkel, az impedanciák viszont azonnal megmutatják, mely elemekről van szó:

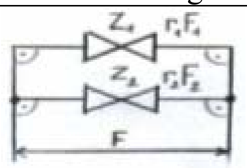
$Z_r = r$
$Z_m = j\omega m$
$Z_c = 1/j\omega c$
$v = j\omega x$
$a = j\omega v$

Látható, hogy a tömeg párja az induktivitás, amit egyébként is elektronikai tehetetlenségnek tekintünk, a tömeg pedig a tehetetlenség mértéke. Amit egy tekercs „csinál” egy elektromos hálózatban, azt teszi egy tömeg a mechanikai hálózatban. Hasonlóan, a kapacitás párja a rugalmasság, a rugó. Tekintettel arra, hogy megszoktuk a kapacitás jól ismert 1/jωC impedanciáját, azért választottuk a rugóengedékenységet a rugóállandó helyett, hogy az impedanciák megegyezzenek.

4.1 Az elemek összekapcsolása

Az elemek kapcsolódásánál azonban nagyon kell ügyelnünk! Egy mérnök ránézésre tudja, hogy két elektromos alkatrész kapcsolása soros-e vagy párhuzamos, és jól tudja, hogy az egymással sorba kapcsolt elemek impedanciáját összeadjuk, a párhuzamosakat repluszoljuk. Egy nagyon fontos szabályt kell megjegyeznünk, hogy ***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). Márpedig az eredő kapcsolásokat ezentúl nem „ránézésre” tesszük meg, hanem az alapján, hogy azok közös áramon vagy feszültségen vannak-e.
Ha két elemet közös áramra kapcsolunk egy elektromos kapcsolásban, akkor azokat egymás után, ténylegesen sorba kötjük: a rajtuk átfolyó áram azonos, a rajtuk eső feszültség különböző (a két feszültség összege). Ha két elemet közös feszültségre kapcsolunk, akkor a rajtuk eső feszültség lesz egyforma, az áramok viszont az impedanciák arányában oszlanak el az elemeken – ezt nevezzük párhuzamos kapcsolásnak.

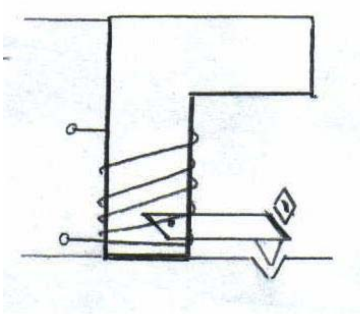
A mechanikában ennek megfelelően közös erőre és közös sebességre kapcsolhatunk elemeket. A közös sebesség jelentése: azonos elmozdulás. Két elemnek akkor lesz közös a sebessége, ha egymás alatt helyezkednek el. Ilyenkor a kapacsaik között ható erő nem egyforma. Mivel a sebességnek az áram a párja, közös 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.
Alaposan vizsgáljuk meg az ábrákat, és látni fogjuk a veszélyt. Soha ne használjuk a soros és párhuzamos kifejezést mechanikai impedanciákra, mert az zavaró és értelmetlen. Helyette a közös sebesség és erő kifejezések helyesek és jól jegyezzük meg, hogy „ránézésre” pont fordítva működik az eredő számítása, mint az elektronikában. A „sorosnak kinéző” kapcsolásban repluszolunk, a „párhuzamosan kinéző” kapcsolásban pedig összegzünk.

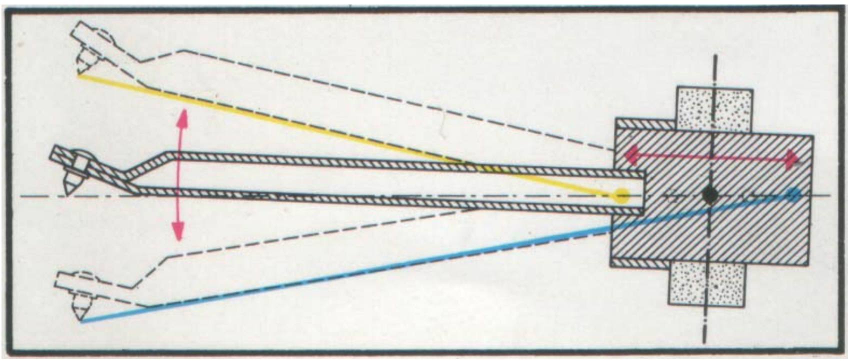
Közös erő	Közös sebesség
	
$F = F_1 = F_2$ $v_1 \neq v_2$ $z_{eredő} = z_1 \times z_2$	$v = v_1 = v_2$ $F_1 \neq F_2$ $z_{eredő} = z_1 + z_2$

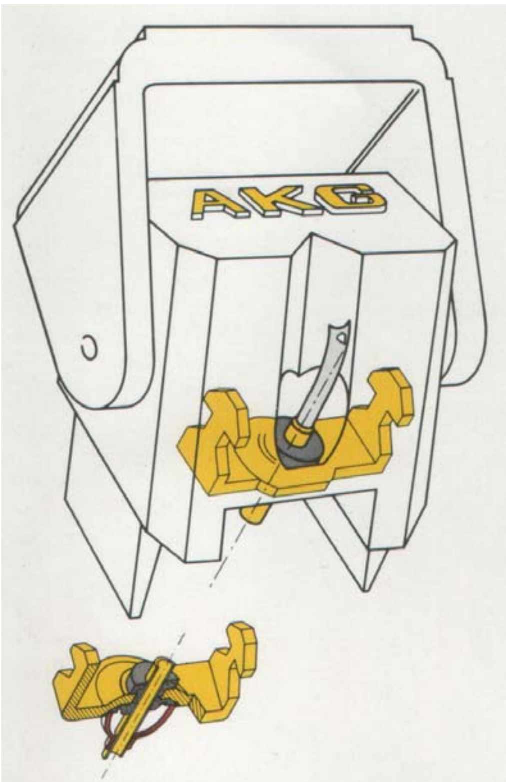
Ezzel el is jutottunk az *elektromos analóg* fogalmához. Minden mechanikai hálózat felírható az analóg elektromos elemek rajzjelével és impedanciáival. Ettől az még mechanikai hálózat marad, mechanikai elemekkel és mennyiségekkel, pusztán a rajzjelet cseréljük le a számunkra kedvesebb és megszokottabb ellenállás, tekercs és kondenzátor rajzjelére. Semmiféle átszámításra nincs szükség, 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. Ennek a célja csupán az, hogy ne kelljen az idegenebb mechanikai elemekkel dolgozni. Természetesen, a két felírás teljesen egyenértékű, és egy adott elemre felírt átviteli függvénynek szükségszerűen meg kell egyeznie a két felírási módban. Már most érdemes megjegyezni, hogy a későbbiekben megismert elektromechanikai transzformáció nem ugyanaz az elektromos analóggal. Mert míg az elektromos analóg mechanikai hálózat, addig a transzformáció után keletkező hálózat elektromos hálózat lesz, ezért az elemek értékéhez számításokra is szükséges.
Az alábbi táblázat mutatja az elemek megfeleltetését az elektromos analógban:

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”)

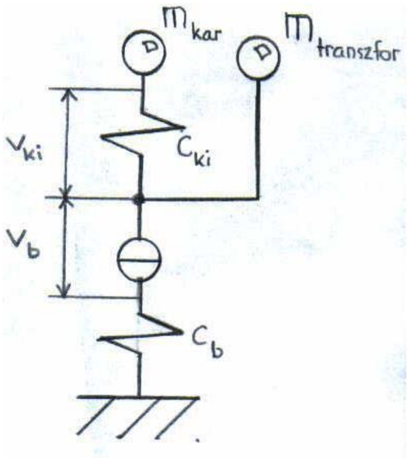
Példa.
Hanglemezjátszók mozgómágneses feje, az ún. pick-up (MM) elektromos analógja. Ez változó légrésű mágneses átalakítóval rendelkezik.

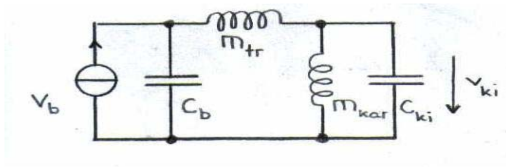




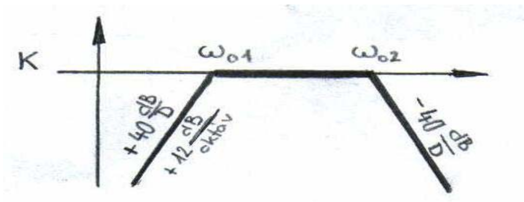


A mechanikai hálózat elemei: m_{kar} a kar tömege, m_{tr} az ún. redukált tömeg, c_b a barázda rugalmassága, v_b a barázda sebessége, v_{ki} pedig a kimeneti mennyiség, a tű mozgási sebessége. Most nem feladatunk elemezni miért így néz ki a hálózat, pusztán annak elektromos analógját fogjuk felírni.





A fenti táblázatból kiderül, hogy minden rugóból kondenzátor lesz, és a „sorosnak kinéző" mechanikai kapcsolatot párhuzamosan kötjük az analógban. Az átviteli függvény (v_{ki}/v_{be}) leolvasása lényegesen egyszerűbb az analógról, mint a mechanikai ábráról.



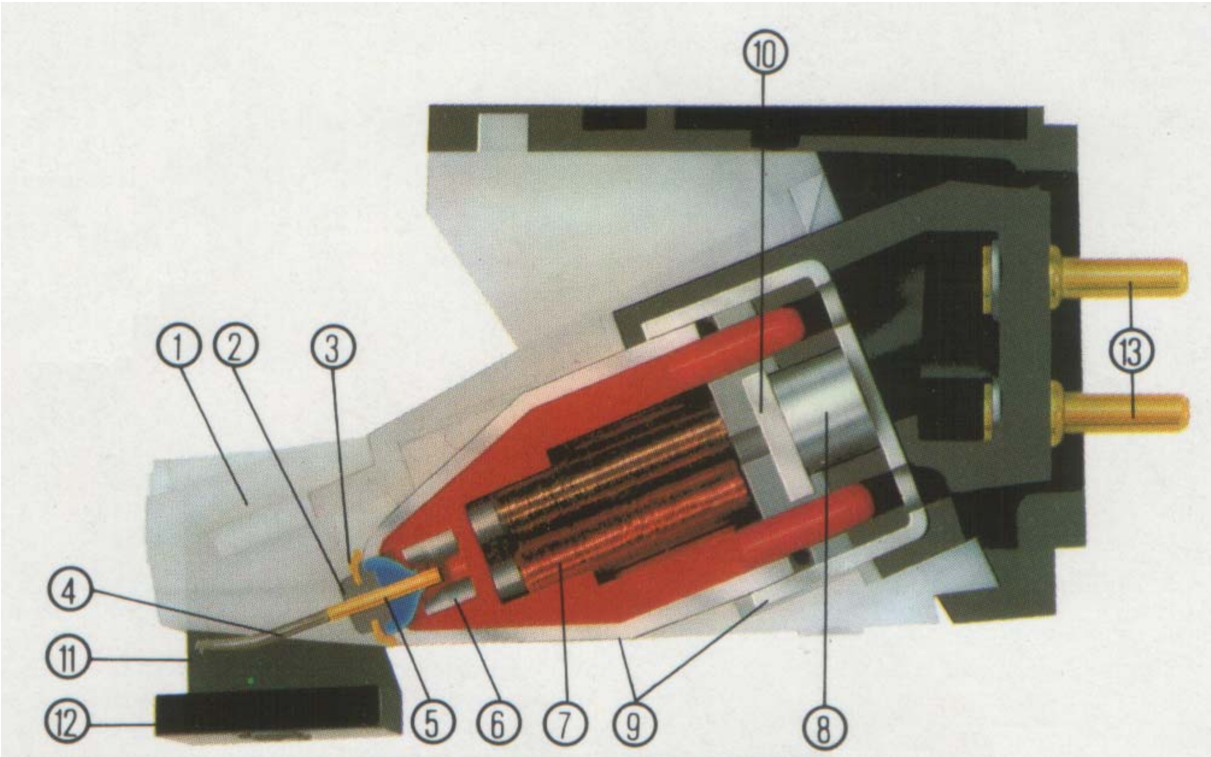
Az akusztikában a Bode-diagramokon gyakran használjuk a 40 dB/dekád helyett a 12 dB/oktáv megjelölést másodfokú meredekségnél, és a 6 dB/oktávot a 20 dB/dekád helyett. A törésponti frekvenciák értéke:

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

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

Figyeljük meg a hasonlóságot az elektronikában használt Thomson-képlettel, ami rezgőkörök rezonanciáját az alábbi képlettel adja meg:

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



AKG TS-hangszedő keresztmetszeti képe. Lényeges része az állandómágnes (8), a mágenskört záró fém (9) és a tekercsek (7) amelyek az érzékenységet és a „vételt" biztosítják (a rajtuk átáramló mágneses tér változásival arányosan). A tényleges átalakítást az (5)-jelű vasrudacska végzi (kis mozgó tömeg).

4.2 Elosztott paraméterű elemek

Az elosztott paraméterű elemeket ritkán használjuk és nehezebb a számítás velük. Az elosztott paraméter annyit jelent, hogy nem koncentrált paraméterű elemekkel dolgozunk. Felsorolás és bemutatás jelleggel nézzük csak meg őket.

1. húr

A húron transzverzális hullám terjed, állóhullámok alakulhatnak ki. Hajlító nyomaték nincs rajta, a fontos paraméter a *feszítés*. A hullámok terjedés sebessége:

$$c = \sqrt{\frac{F}{m}},$$

ahol F a feszítőerő, m pedig a hosszegység tömege.

2. rúd (longitudinális)

A longitudinális (hosszanti irányú) terjedést lehetővé tévő rúd legfontosabb paramétere a rugalmasság:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} ,$$

ahol *E* a rugalmassági (Young) modulus, ρ a sűrűség.

3. rúd (hajlító)

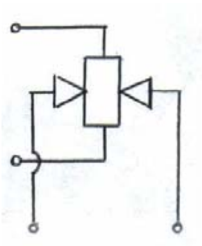
Hajlító rezgésnél van hajlító nyomaték, melynek hatására transzverzális (a hosszúságra merőleges) hullámok alakulnak ki.

4. két dimenziós eszközök

A két dimenziós eszközök legismertebbike a feszített membrán, ahol kihangsúlyozzuk, hogy a feszítés a fontos, nem pedig a hajlítás. A membránról feltételezzük az akusztikai átalakítókban, hogy mereven kapcsolódik a lengőrendszerhez. A másik eszköz, ahol a hajlító nyomaték a paraméter a körlemez, melynek rezgéseit szintén a módusokkal vizsgáljuk.

5. Elektromechanikai átalakítók

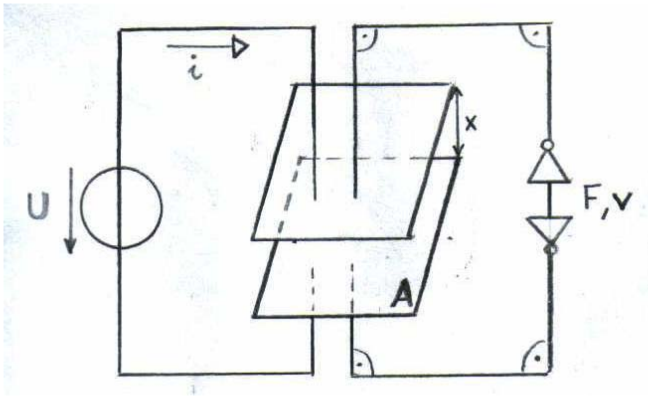
Az elektromechanikai átalakító feladata, hogy az elektromos, változó feszültséget mechanikai rezgéssé alakítsa és viszont. Egy átalakító általában oda-vissza működik, csak eltérő hatásfokkal. Ha rákiáltunk egy hangszóróra, és az megmozgatja a membránt, akkor lesz a kapcsain feszültség, és egy mikrofon is tud hangot kiadni.
Alapjában két nagy csoportja van az átalakítóknak (a működési egyenletek alapján) és azon belül még két félét fogunk megkülönböztetni. 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.



Az átalakítók egy része *vezérléses* elven működik. Ez annyit jelent, hogy például a mechanikai energiával egy külső energiaforrás által leadott energiát befolyásoljuk. A vezérelt energia lényegesen nagyobb is lehet, mint a vezérlőjel energiája, ezért ezeket *aktív* átalakítóknak is szokás nevezni. Ilyen eszköz például a távbeszélők szénmikrofonja.

5.1 Az elektrosztatikus átalakító

Az elektrosztatikus átalítót kapacitív átalakítónak is nevezzük. Lényegében egy lötyögő fegyverzetű „rossz” kondenzátor. A mozgó fegyverzetek következtében változik a légrés nagysága, ezáltal a kapacitás, végeredményben pedig a feszültség. Az átalakítás elve tehát 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:

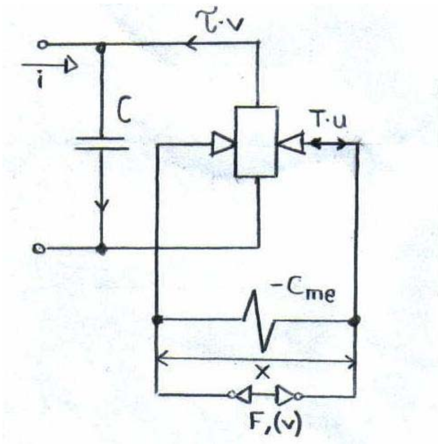
$\tau = CE.$

Ahol *C* az átalakítót alkotó kondenzátor kapacitása, *E* az elektromos térerősség. Számítási feladatok megoldásában ritkán kell ezt kiszámítani, általában adott érték. A leíró egyenletek:

$$f = \tau u - \frac{x}{c_{me}}$$

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

Jól figyeljük meg ezt az egyenletrendszert! A bal oldalon kifejezett mennyiség egyszer mechanikai (f), a másinál elektromos (i). A mechanikai erő két részből áll: egyszer a C_m jelű (negatív) rugó összenyomásából, másrészről a feszültség transzformálásából. Az áram hasonlóan: egyrészt a már ismert C(du/dt)-tagból, ami egy közönséges kondenzátor árama, 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. Tehát abban az egyenletben, ahol mechanikai erők (vagy sebességek) szerepelnek, oda bizonyosan egy transzformált feszültség (vagy áram) tartozik és viszont. A C_{me} a „mechanikai eredő” megnevezésből ered.



Kapacitív átalakítónál:

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

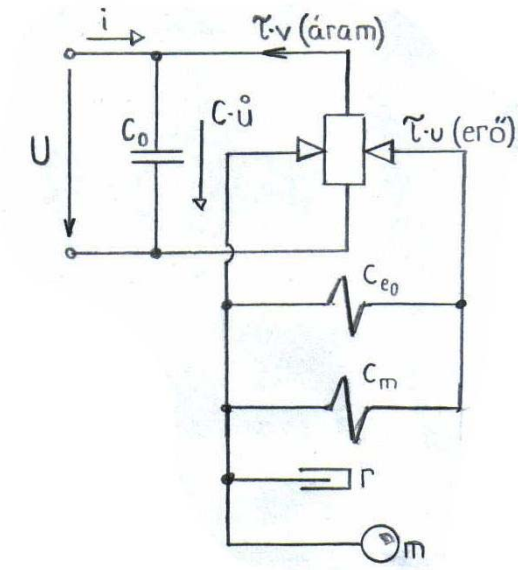
Ebből adódik, hogy transzformáció során előálló elemek, ugyanazok, mint az elektromos analógnál, értékük azonban más! Emlékezzünk rá, hogy analógnál a felrajzolt tekercs és kondenzátor mellé mechanikai szimbólum került, mert azok valójában tömegek és rugók. Itt azonban, ha egy elemet áttranszformálunk, abból valóságos elektromos elemek lesznek és viszont. A transzformáció nagyon egyszerű: az elemek megfeleltetése, azok értékeinek megadása és az összekapcsolás módja. Ehhez segít az alábbi táblázat.

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	τu
Közös sebesség („párhuzamnak látszó”)	Közös áram (soros kapcsolás)

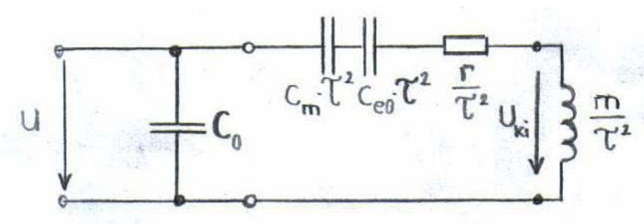
Ez azt jelenti, hogy ha mechanikai elemeket kívánunk áttranszformálni, akkor ebből a táblázatból kikereshetjük, hogy pld. Egy C_m rugóengedékenységű rugónak egy kondenzátor fog megfelelni, melynek kapacitása $C_m\tau^2$. A dolog fordítva is működik, ha villamos hálózatból óhajtunk mechanikait előállítani, akkor egy L induktivitású tekercsből tömeg lesz, melynek értéke (átrendezés után) $L\tau^2$. A generátorokat is transzformálni kell, az f-erőgenerátorból τu értékű feszültségforrás keletkezik.
A megfeleltetés az impedanciák azonosságán alapul. Ha az alap képletet megjegyezzük, akkor bármikor könnyedén előállíthatjuk az impedanciákat és abból könnyen rájövünk milyen elem keletkezik.

Példa
A tömeg és a rugó megfeleltetése.
$Z_{el} = Z_{mech}/\tau^2 = j\omega m/\tau^2$. 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.

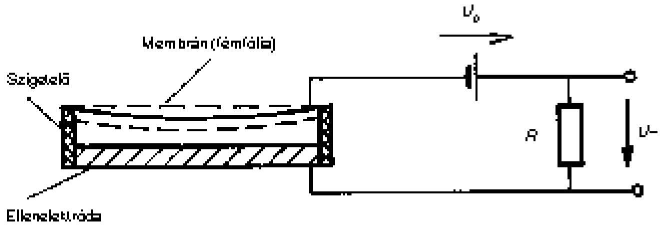
Lássunk egy egyszerű beszédes példát:



Az elektromos oldalra transzformált hálózat:



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 ellenelektródához vonzza.



Mivel a membrán szélei rögzítettek a fólia deformálódik. Járulékos feszültség hatására a sztatikus vonzóerő az előjeltől függően nő vagy csökken. Ezáltal a membrán mozgásba jön, mivel jobban vagy kevésbé deformálódik. Ha hangnyomás éri a membránt, akkor az ismét 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, tehát ezek az egyenletek írják le. A piezóelektromos jelenség alapja, hogy létezik egy kis piezó kristály, mely mechanikai deformáció hatására töltéseket halmoz fel és viszont. Látható, hogy feszültséget mozgássá alakíthatunk és viszont. A deformáció lehet vastagsági, hosszanti vagy homlok irányú nyújtás. Annyit kell tudni a kapacitív átalakítóval szemben, hogy míg utóbbiban jellemzően megjelenik egy negatív rugó, addig piezó eszköznél (kisfrekvencián) pozitív a rugóengedékenység. Mindkét átalakítóban „alapból" benne vagy ilyen rugó, amely a működés elvéből következik és az átalakító lényege.

5.2 Az elektromágneses átalakító

Az elektromágneses átalakító változó légrésű, az elektrodinamikus állandó légrésű. Közös jellemzőjük, hogy azonos a működési egyenletük és a táblázatuk. Ami nehéz, hogy az idáig megtanultakkal pont ellenkezőleg működik minden. Transzformáláskor tehát az első és legfontosabb dolgunk megtudni, hogy milyen az átalakító *elve*: ha kapacitív (kondenzátor mikrofon, piezó-elektrét eszközök), akkor a fentiek, ha dinamikus, akkor az alábbiak érvényesek rá.

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

Ebből az egyenletből már látszik, hogy miért fordul meg minden. Természetesen most „helyreáll" a párhuzamos és soros kapcsolások ránézésre történő átalakítása: a közös erőhöz tartozik a közös áram. A működési egyenletrendszer:

$$f = Ti - \frac{x}{c_{mm}}$$
$$u = L\frac{di}{dt} - Tv$$

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

Példa.
A tömeg és a rugó megfeleltetése.

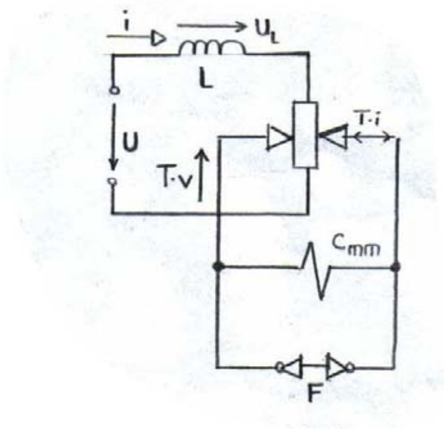
$$Z_{el} = \frac{\tau^2}{Z_{mech}} = \frac{\tau^2}{j\omega m} = \frac{\tau^2}{j\omega m} = \frac{1}{j\omega\frac{m}{\tau^2}}$$

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	$R = \tau^2/r$
τv	U
f	τi
Közös sebesség („párhuzamnak látszó”)	Közös feszültség (párhuzamos kapcsolás)

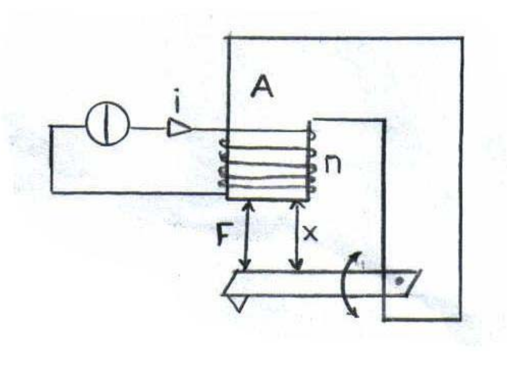


Jól figyeljük meg a mérőirányokat, és miután áttanulmányoztuk a negatív rugó letüntetéséről szóló részt, térjünk ide vissza még egyszer. Jegyezzük meg, hogy akkor nem kell az egyenletek előjeleit megváltoztatni, ha mindig páros számú mérőirányt fordítunk meg. Az itteni ábra irányaihoz tartozó egyenletek ugyanazok, mintha a *Ti*-szorzatot –*Ti*-re változtatnánk (továbbra is széttartó nyilakkal) és vele egyidejűleg a „felfelé eső” *Tv* szorzatot „lefelé esővé” alakítanánk. Egy mérőirányt kétféle képpen változtathatunk ellenkezőjére: vagy meghagyjuk a nyilakat és egy mínusz előjelet rakunk elé, vagy meghagyjuk az előjelet de megfordítjuk a nyilak irányát.
Elektromágneses átalakítónál az elektromechanikai áttétel:

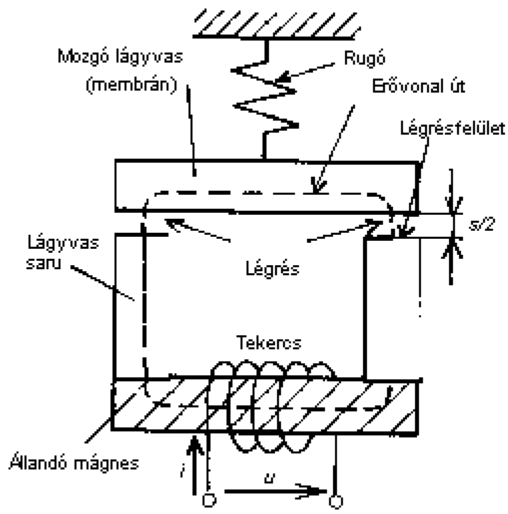
$T = LI/x$

Ahol

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



A μ értéke vasnál végtelennek tekinthető. A T értéke általában adott, és csak a jelölésben különbözik τ^{-}-tól.
Az elektromágneses átalakító 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. Ellentétes irányú áram csökkenti a húzóerőt, ezért a horgony eltávolodik. A jól méretezett átalakítóban 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.



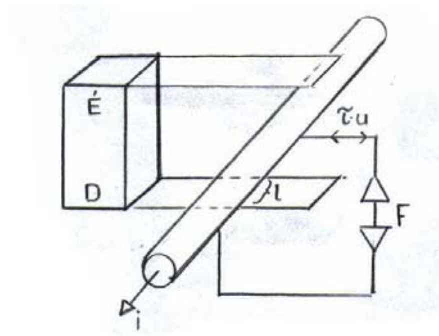
Elektrodinamikus átalakítónál az elektromechanikai áttétel:

T = Bl.

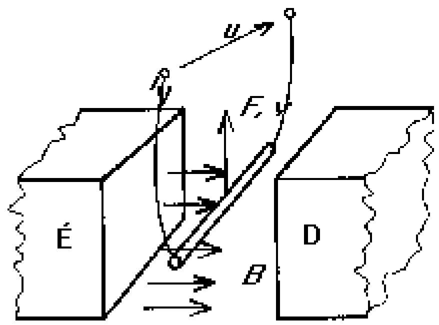
Állandó méretű légréssel rendelkezik. A légrésben mágneses tér van, amelyben egy áramvezető mozog. Az vezető végei között feszültség indukálódik, ami arányos a légrésindukcióval, az áramvezető hosszával és a sebességgel. Ilyen módon képes a mozgási energiát elektromossá alakítani. Ha árammal tápláljuk 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 huzalhossza részt vesz az átalakításban. Az összefüggések egyszerűek:

f = Bli = Ti
u = Blv = Tv.

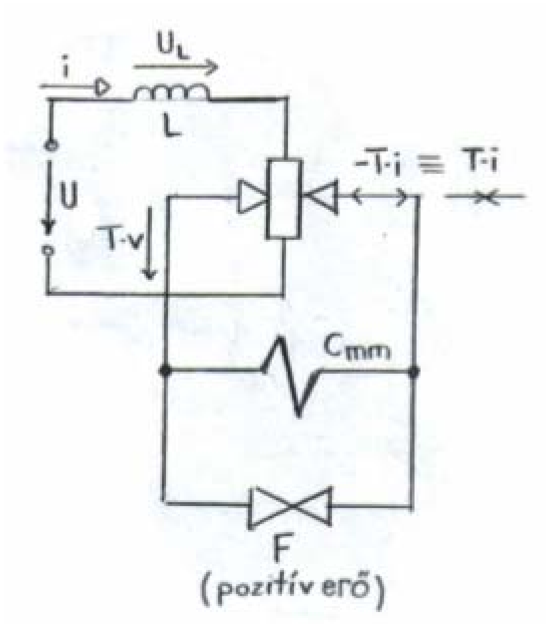
Ahol *B* a mágneses indukció, *l* a vezető hossza.



A példát lásd a dinamikus hangszóró fejezetében.



Végezetül nézzük meg a negatív rugó kapcsolatát a mérőirányokkal. Azt már láttuk, hogy ilyen a valóságban nem létezik, mert egy negatív rugóengedékenység azt vonná maga után, hogy kisebb C értékhez könnyebb összenyomás tartozna. Az egyenletek a megfelelő mérőirányokkal helyesek, de persze 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 x_o nyugalmi légréséből adódik, hiszen nyugalomban lévő átalakító fegyverzeti nem érnek össze. Ez egy kis, pozitív engedékenységű rugó, amely a terhelésben jelenik meg és a tér összehúzó erejét jelképezi. A stabil működés feltétele, hogy betegyünk egy ezzel ellentétes, ezt kiegyenlítő negatív rugót. Hasonló megfontolásokból, és az egyenletek egységes alakjának előállításához a mágneses átalakítókban is negatív rugó szerepel.
Lássuk, miként tűnhet ez el ekvivalens átalakításokkal. Először is, jegyezzük meg, hogy a széttartó nyíllal ábrázolt erő a negatív, az összemutató a pozitív. Ez akkor is igaz, ha az adott erő esetleg transzformált érték és a Ti-szorzat adja meg nagyságát. A széttartó *–Ti* nagyságú erő egyenlő az összetartó *Ti* nagyságú erővektorral. Lássuk az alábbi ábrát a megadott mérőirányokkal:



Az egyenletet könnyedén felírhatjuk, előbb az elektromos körre, majd a mechanikaira. Az elektromos oldal egy egyszerű hurok, amelyre a Kirchoff-törvény értelmében:

$U = U_L + Tv$

Ez egy egyszerű feszültségosztó, a kapcsokon „lefelé" eső feszültség egyenlő a tekercs feszültségével, valamint a mechanikai oldalról transzformált *Tv*-nagyságú feszültség vektoriális összegével. Behelyettesítve U_L-be:

$$U = L\frac{di}{dt} + Tv\,.$$

A mechanikai oldal hasonló, a pozitív *f*-erő felírható a rugóra ható erő és az áramból áttranszformált *Ti*-nagyságú erő vektoriális összegeként:

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

Ebben az egyenletben az *f*-erő pozitív (összemutat), míg a másik oldalon pozitív rugó és negatív erő összege szerepel. Ez a két egyenlet tökéletesen leírja, hibátlan irányokkal az átalakító működését, pozitív rugókkal. Néhány egyszerű átalakítással visszakaphatjuk a már megismert formájukat az egyenleteknek. Szorozzuk meg a második mindkét oldalát -1-el:

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

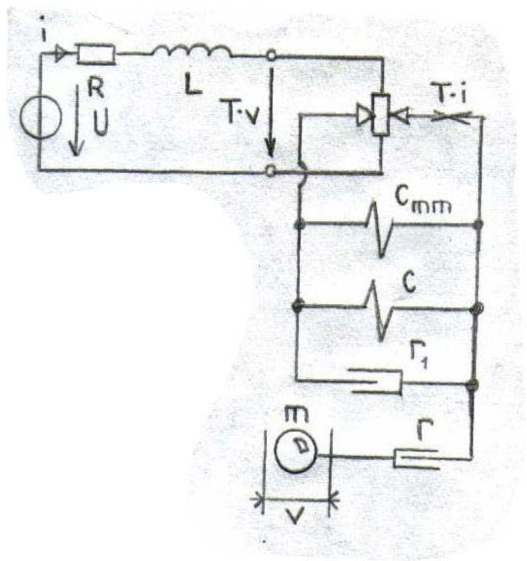
majd átrendezve

$$-f = Ti - \frac{x}{c_{mm}}\,.$$

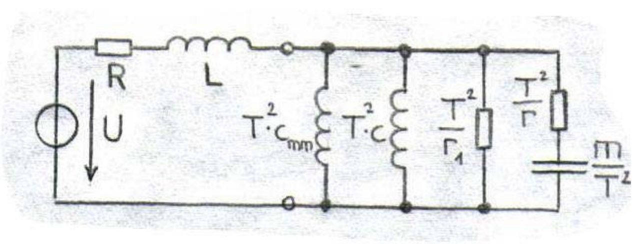
Azaz, az eredeti egyenletünk ettől csak az *f*-erő előtti negatív előjelben különbözik, pontosan abban, ahol annak irányát megfordítottuk. Ha tehát visszarajzoljuk a széttartó nyilakat, elhagyhatjuk a negatív előjelet és visszajutottunk oda, ahonnan elindultunk (annyi különbséggel, hogy az eredeti ábrán a *Ti* erő pozitív előjelű volt széttartó nyilakkal, de egyben a *Tv* feszültség iránya is ellenkező volt).

Példa.

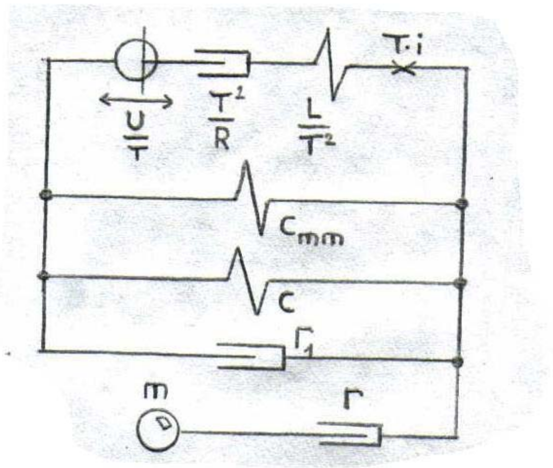
Mágneses átalakítós rendszer transzformáltjai. Lássuk az alábbi, a dinamikus hangszóróhoz nagyon hasonlító hálózatot:



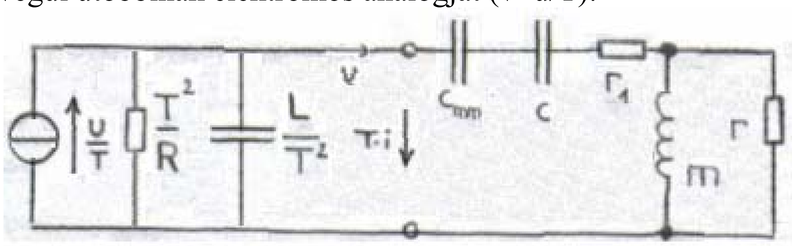
Először transzformáljuk az elektromos oldalra:



A táblázatot azonban a másik irányba is használhatjuk, transzformáljuk az eredeti (vagy a második ábrán látható) hálózatot tisztán mechanikaivá



Majd rajzoljuk fel végül utóbbinak elektromos analógját (v=u/T):



Alaposan hasonlítsuk össze a hálózatokat, különösen a villamos oldalra transzformáltat a mechanikai oldal elektromos analógjával!

5.3 Impedanciák

Tekintsük most át, hogy az elektromechanikai és az akusztika világában milyen impedanciákkal találkozhatunk.

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.
Találkozunk majd még a sugárzási impedancia elnevezéssel, ami 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:

$$Z_m = Z_{spec}A = Z_aA^2$$

5.3.1 Akusztikus elemek impedanciái

A síkhullámmal már foglalkoztunk, olyan egy dimenziós hullámterjedés, melynek csak x-irányú komponense van. Korábban már említettük, hogy ennek specifikus impedanciája konstans:

$Z_{spec} = \rho_0 c$

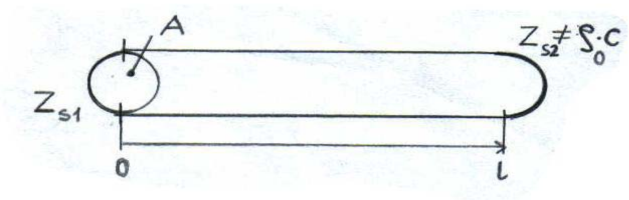
Értéke levegő esetén kb. 410. A *c* terjedési sebesség kiszámítható az alábbi módon is:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa P_0}{\rho_0}}$$

P_0 a már megismert 10^5 Pa körüli érték, a sűrűség 1,2 kg/m^3, a kappa az ún. *fajhőviszony*, amely az állandó térfogaton és az állandó nyomáson mért fajhő hányadosa, levegőre 1,4. Ezeket behelyettesítve c-re 340 m/s adódik. Gömbhullámra is egyszerűen felírható a *k* hullámszámmal és az *r* sugárral (távolsággal):

$Z_{spec} = \rho_0 c[1 \text{ x } jkr]$

Ahol a zárójelben replusz művelet van.
A harmadik, általános elem az ún. akusztikus tápvonal. Gyakorlatilag elvi jelentőségű eszköz, végtelen hosszú cső. A gyakorlatban *l* hosszúságú csővel számolunk, amelynek egyik végén tápláljuk azt (képzeljünk oda egy membránt ami belesugároz), a másik végén pedig lezárás van (vagy nincs). Ez a lezárás a tápvonalak, távvezeték egyenletekhez hasonlóan lehet kisimpedanciás vagy nagyimpedanciás, természetesen akusztikus impedanciáról van szó.



A cső keresztmetszete *A*, térfogata V = lA. A táplálás a Z_{s1} specifikus impedancia, míg a lezárás a másik végen az Z_{s2} specifikus impedancia. Amennyiben $Z_{s2} = \rho_0 c$, akkor illesztett lezárásról beszélünk, ha nem ennyi, akkor lesz reflexió, haladó és reflektált hullám is. A két szélsőséges lezárás a „szakadás" és a „rövidzár", a végtelen és a nulla impedancia, ezt később tárgyaljuk.

$$Z_{s1} = \rho_0 c \frac{Z_{s2} + j\rho_0 c \tan(kl)}{\rho_0 c + jZ_{s2} \tan(kl)}$$

Ezt az általános alakot nem fogjuk használni gyakran, helyette majd közelítésekkel egy lényegesen egyszerűbb alakra hozott egyenlettel dolgozunk. Két nevezetes frekvenciát érdemes megjegyezni, ahol ez a képlet egyszerű alakot ölt:

$l = \lambda/2$ esetén $Z_{s1} = Z_{s2}$.
$l = \lambda/4$ esetén $Z_{s1} = (\rho_0 c)^2/Z_{s2}$.

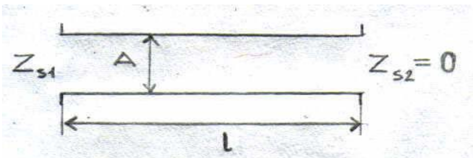
5.3.2 Akusztikai elemek

Az akusztikai elemeket mindig az akusztikus impedanciával adjuk meg, majd szükség esetén átszámítjuk. Akusztikai elem minden akadály, cső, üreg, elzáró felület, amely megváltoztatja a sugárzó (a membrán) által kiadott hang útját. Már megismertük az akusztikus tápvonal általános leírását, most nézzük azt a két egyszerűsített esetet, amivel a valóságban dolgozunk.

1. A végén nyitott rövid akusztikus tápvonal

A zérus akusztikus impedanciának a „semmi" felel meg. Ha egy akusztikus tápvonal végéhez semmit nem illesztünk, akkor $Z_{s2} = 0$. Az egyetlen közelítés, amit megteszünk a továbbiakban, hogy:

$$\mathrm{tg}\, kl \approx kl.$$



Ha a tangens szögfüggvény argumentuma kellően kicsi, akkor annak tangense megegyezik magával az argumentummal. Ha ezt a közelítést megtesszük, a fenti képeltből kihagyhatjuk a túl bonyolult tangens-számítást. E feltétel teljesüléshez vagy a *k* vagy az *l* kell kicsi legyen, így egy „kellően rövid" cső esetén ez igaznak tekinthető. Ekkor

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

Az így felírt eszköz akusztikus impedanciája tehát induktív (tömeg) jellegű, ez az impedanciából következik. Az impedancia 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, ez a tömeg-jelleg szükséges következménye. Ilyenkor a részecskék *Av* térfogatsebessége azonos, az ilyen eszköz impedanciáját összeadjuk a hálózat elemeivel. Ez azt is jelenti, hogy ha egy csőről egyszer eldöntöttük, hogy a fentieknek megfelelően viselkedik, akkor azt mindig így kapcsoljuk. 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 mértezés 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.

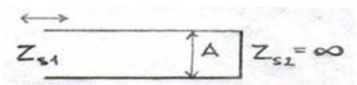
2. A végén lezárt cső

A végtelen lezáró impedanciának a végén fallal lezárt csövet, üreget tekintjük. Ilyenkor Z_{s2} = végtelen. Feltételezve ismét, hogy tg kl ≈ kl, az alábbi módon írjuk fel az akusztikus impedanciát:

$$Z_{a1} = \frac{1}{j\omega C_a}$$

$$C_a = \frac{V}{\kappa P_0}$$

ahol C az üreg kapacitása, V=lA a térfogata, tehát ismét csak a geometriai mértek 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 membránon keresztül repluszolva kapcsoljuk.



A hangszórók dobozában található üregek, sőt a doboz önmaga is ilyen eszköz. A mozgó membrán ugyanis 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!

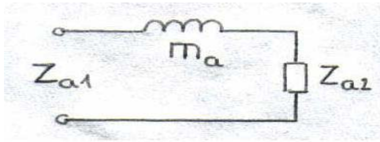
3. Kisimpedanciás lezárás

A valóságban ritka az ilyen ideális lezárás és általában „nagy” illetve „kis” impedanciás lezárásokról beszélünk. Kicsi az impedancia, ha az alábbiak teljesülnek:

$Z_{s2} \ll \rho_0 C$ és
tg kl ≈ kl < 1.

Ekkor

$Z_{a1} = Z_{a2} + j\omega m_a$.



Kisimpedanciás lezárás tömegként viselkedik, és sorba kapcsoljuk az akusztikus impedanciáját.

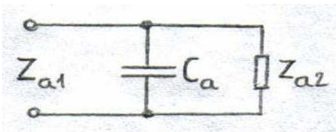
4. Nagyimpedanciás lezárás

Nagyimpedanciás a lezárás, ha

$Z_{s2} >> \rho_0 C$ és
tg kl $\approx$ kl < 1.

Ekkor

$Z_{a1} = Z_{a2}$ x $1/j\omega C_a$.



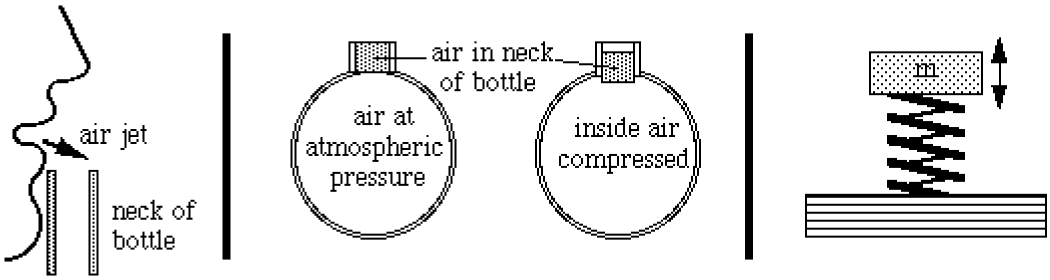
Nagyimpedanciás lezárás rugóként viselkedik, és párhuzamosan kapcsoljuk az akusztikus impedanciáját.

5. Akusztikus ellenállás

Az akusztikus ellenállás (r_a) valós impedancia, a veszteségeket jellemzi. Az átviteli függvény alakját a kis érékű veszteség nem befolyásolja, csak lineáris csillapítást okoz. Ilyen 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. Később látjuk, hogy a keskeny sávú mikrofonok elé helyezett sűrű szövésű fémháló nem csupán a membrán mechanikai védelmét látja el, hanem akusztikus kompenzáló szerepe is van.

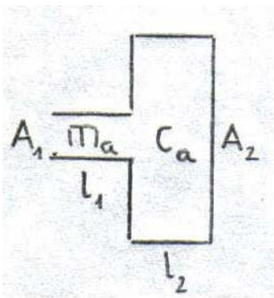
Példa.
A Helmholtz-rezonátor tulajdonságai.
Légoszlopok, üregek a saját frekvenciájukkal megegyező frekvenciájú hangra rezonálnak, a sok frekvenciából „összekevert” hangból felerősítik (kiemelik) a sajátfrekvenciájú hangot. Az ábrák közel gömb alakú, úgynevezett Helmholtz-féle üregrezonátorokat mutatnak. Ha ilyen rezonátort a kisebbik nyílásával a fülünkhöz közelítjük, akkor a külvilág „kevert” hangjából a rezonátor sajátfrekvenciájával megegyezőt halljuk legerősebben.

A Holmholtz-rezonátor olyan akusztikus rezgőkör, amely egy csőből (benne rezgésre képes légdugó) és egy levegővel töltött üregből áll, gyakorlatilag az LC-kör akusztikus megfelelője.Az üregbe zárt levegő rugóként, a nyakban lévő levegő pedig tömegként viselkedik, a rugó rezgeti a tömeget. Az ilyen eszköz, pld az üres üveg („fütyülős barack”) jellemző frekvencián sípol, ah belefújunk. A belefújással a tömegként viselkedő légdugót befelé préseljük, összenyomjuk a rugót, amely igyekszik visszatérni eredeti térfogatára. Ez a visszairányú erő kifelé nyomja a légdugót, amely lendületet kap és kijjebb jön az üveg nyakából, mint eredeti pozíciója. Ettől hiány marad a helyén, és a légritkulás visszaszívja…ez aztán hasonlóan egy rugóra erősített tömeghez, rezgésbe jöhet. Ha folyamatosan fújjuk, fenn tudjuk tartani a rezgést hosszú ideig.



Az üveg nyakába fújva a nyakban lévő légdugót rezgésbe hozhatjuk, mint egy rugóra helyezett tömeget.

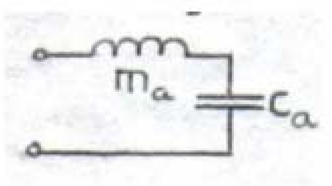
Fontos tulajdonsága még, hogy a rezonancia frekvenciájánál hangelnyelő szerepe van, a bejutó hangok nem jönnek ki. A rezgés frekvenciája a térfogattól és a tömegtől függ. Ilyen alkalmaztak régebben a villamosok plafonjában, ahol sok, adott méretű lyukat fúrtak, melyek a menetzajt csökkentették. A hangszóró dobozok belsejében kialakított rezonátorok szerepes is a rezonanciák csökkentése. A rezonátor hangolása a geometriai méretekkel történik.



A nyílás felé eső cső tömegként viselkedik, az után kapcsolt üreg pedig rugóként. Enenk matematikai feltétele van:

$$\frac{\rho_0 C}{A_1} >> \frac{1}{\omega C_a}$$

Ha ez a feltétel teljesül, akkor a hálózat ilyen formájú:



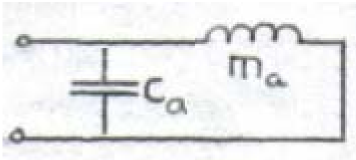
A rezonancia frekvenciát a Thomson-képlet analógiájára állítjuk elő:

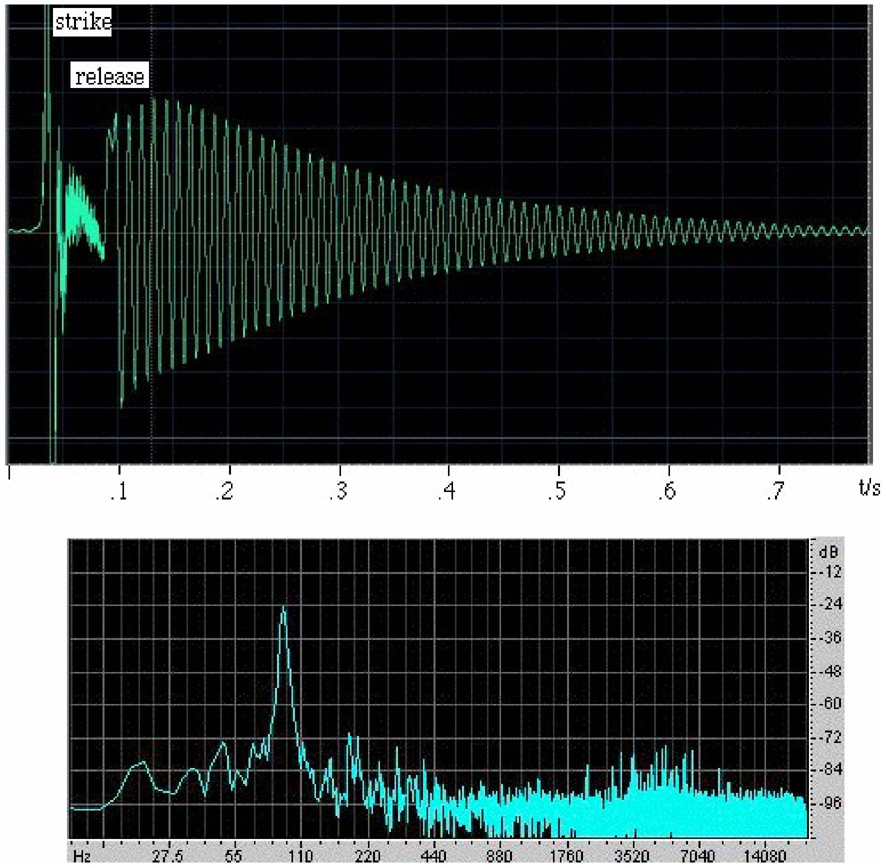
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_a C_a}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0 l}{A_1} \frac{l_2 A_2}{\kappa P_0}}}.$$

Ha a feltétel módosul:

$$\frac{\rho_0 C}{A_1} << \omega m_a$$

Akkor a helyettesítőkép az alábbi formájú:

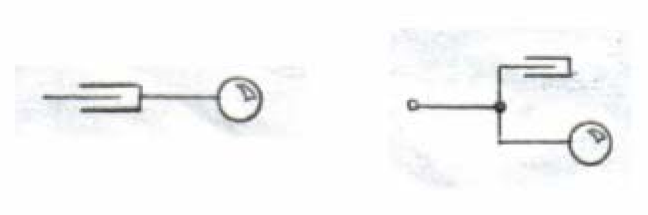




Időfüggvény és spektrum egy gerjesztett és magára hagyott rezonátorban. A számítások szerint a rezonancia frekvencia 90 Hz.

6. Akusztikus eszközök

Az akusztikus eszköz kezelésénél a sugárzási impedancia a legfontosabb. Ez egy mechanikai impedancia, melyet a membránra képzelünk rá, és a légterhelést jellemzi. Két tipikus megadása van: a soros alakú és a párhuzamos alakú.



Balra a soros alakú, jobbra a párhuzamos alakú

Nézzük a már megismert sugárzók kapcsolatát a sugárzási impedanciával.

6.1 A gömbsugárzó

A gömbsugárzónál (gömbhullámoknál) a levezetést mellőzve felírtuk a specifikus impedanciát:

$Z_{spec} = \rho_0 c[1 \text{ x } jkr]$.

A sugárzási impedancia ennek egyszerűen az A-szorosa, ahol *A* a membrán felülete:

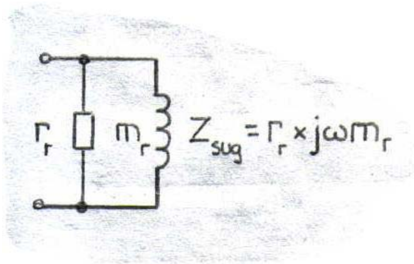
$$Z_{sug} = AZ_{spec} = A\left[\rho_0 C\left(\frac{jkr}{1+jkr}\right)\right] = \frac{A\rho_0 Cjkr}{1+jkr}.$$

Ha jobban szeretnénk látni a végeredményt, használjuk fel a $k=\omega/c$ összefüggést:

$Z_{sug} = AZ_{spec} = A\rho_0 c[1 \text{ x } jkr] = (A\rho_0 c) \text{ x } (A\rho_0 cjkr) = (A\rho_0 c) \text{ x } (A\rho_0 j\omega r) = r_r \text{ x } j\omega m_r$

Erről megállapíthatjuk, hogy a sugárzási impedancia párhuzamos alakú, repluszos, egy valós veszteségi ellenállásból és egy tömegből áll, amelyek értéke:

$r_r = A\rho_0 c$
$m_r = A\rho_0 r$.



A felírt összefüggésekre mindig igaz, hogy az előállított repluszos vagy összegzett alakok egymásba átszámíthatók. Ha tehát soros alakú impedanciával szeretnénk dolgozni, semmi akadálya, de *r* és *m* értéke megváltozik. A fentiekben az r-index a radiáció (sugárzás) rövidítése, de hogy megkülönböztessük a soros alakot, azokat s-index-el látjuk el.

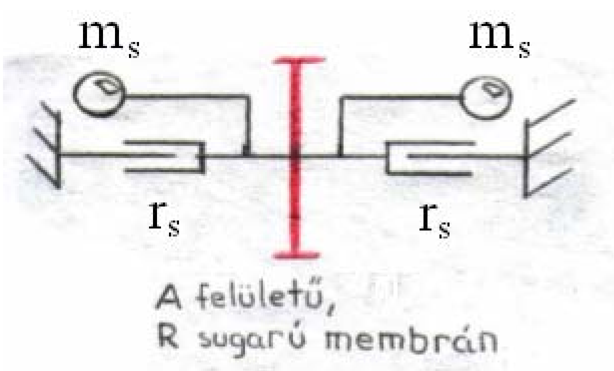
A levezetést mellőzve, ha (kr)<1, akkor az alábbi soros alakú sugárzási impedanciára:

$Z_{sug} = r_s + j\omega m_s$
$r_s = A\rho_0 c(kr)^2$
$m_s = A\rho_0 r.$

A tömeg értéke tehát nem változik, ugyanakkor a veszteségi ellenállás a távolság és a hullámszám négyzetével arányosan nő. Ez a *kr*-szorzattól való hatványozott függés a matematikai megjelenése a már említett akusztikus rövidzárnak. Minél nagyobb ez a hatvány a soros veszteségi ellenállásban, annál erősebben érződik és annál rosszabb a kisfrekvenciás sugárzás.

6.2 Az önálló membrán

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



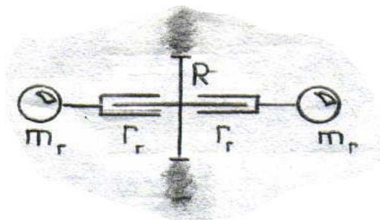
Az ábrázolásnál ügyeljünk arra, hogy a soros és párhuzamos elnevezéseket az elektromos analógra értjük, a mechanika hálózatban ez szokás szerint „fordítva néz ki". A levezetést most is elhagyva, a soros sugárzási impedancia alakja:

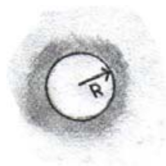
$Z_{sug} = r_s + j\omega m_s$
$r_s = 0{,}03A\rho_0 c(kR)^4$
$m_s = (0{,}85/2)A\rho_0 R.$

Vegyük észre az impedancia megváltozását a gömbsugárzóhoz képest. Egyrészt r_s értéke lecsökkent a 0,03 konstans miatt, másrészt az akusztikus rövidzár értéke megnőtt a negyedik hatvány miatt (R most a membrán sugara). A tömeg értéke is csökkent a 0,425 szorzó miatt. Ami miatt elterjedt a 0,85/2 felírási mód az, hogy ha a hangszórót végetlen falba vagy dobozba helyezzük, akkor könnyen észrevehető legyen a változás. Ott ugyanis ez a szorzó 0,85 értékű, tehát pont kétszeres az itteninek.

6.3 A 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 legegyszerűbb módszer, ha a hangszórót dobozba vagy falba építjük, ezáltal a fallal leszigeteljük a membrán két oldalát egymástól és megszűnik a rövidzár. Ez olyan, mintha az elektronikában elvágnánk egy vezetéket: megszűnik az összeköttetés, a rövidzár. Járulékosan, a dobozba épített hangszóró hátulról egy kapacitív üreggel fog találkozni, ez is befolyásolja az átvitelt. A végtelen falba épített hangszórónál ez nincs így, hiszen ott mindkét térrész végtelen nagy, nincs üreg, csak elszigetelés. Ez a jobb sugárzó, de praktikus okokból nem megvalósítható a túl nagy méret miatt. Végtelen fal esetén a párhuzamos impedancia alakja:



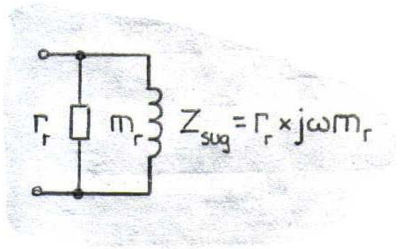


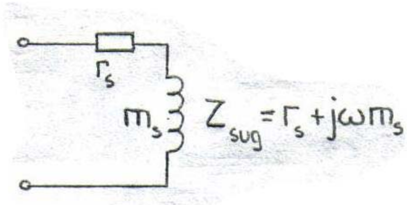
$r_r = 1{,}44{*}A\rho_0 c$
$m_r = 0{,}85{*}A\rho_0 R$
$A = R^2\pi.$

A soros impedancia alakja:

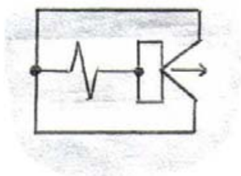
$r_s = 0.5*A\rho_0c(kr)^2$
$m_s = m_r$

Figyeljük meg, hogy az elszigetelés hatására csökkent a *kr*-szorzat hatványa, valamint hogy a tömeg-érték kétszeresére nőtt!



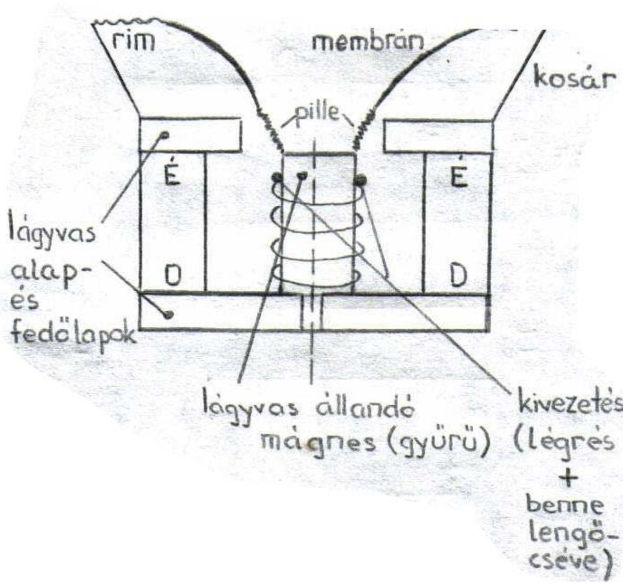


A dobozba helyezett hangszóró ettől annyiban különbözik, hogy a sugárzási impedancia csak egyikoldalról terheli, míg a másik oldalon egy szinte ideális rugó jelenik meg az üreg hatására („keményíti" a hangszórót).

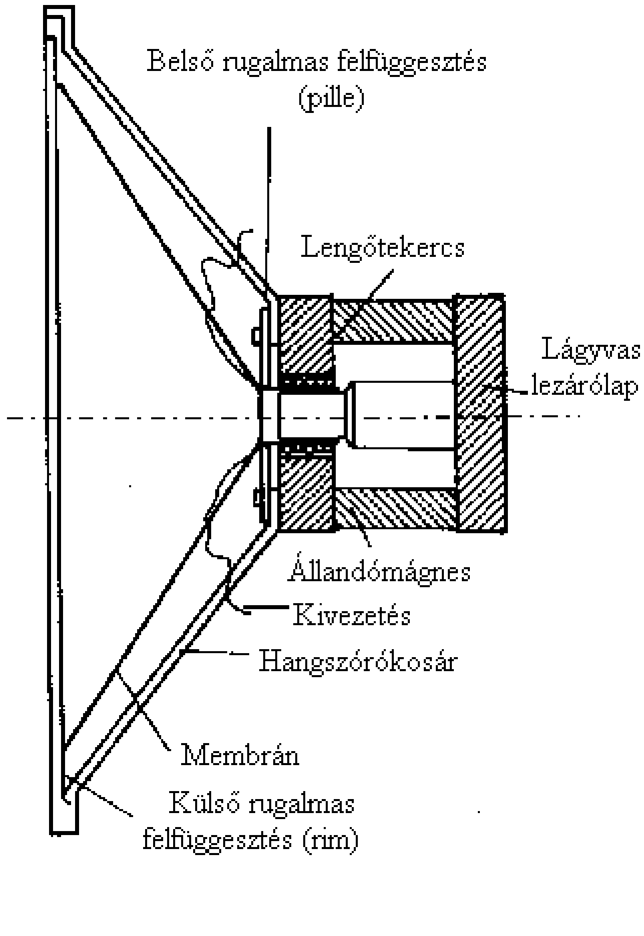


6.4 A dinamikus hangszóró

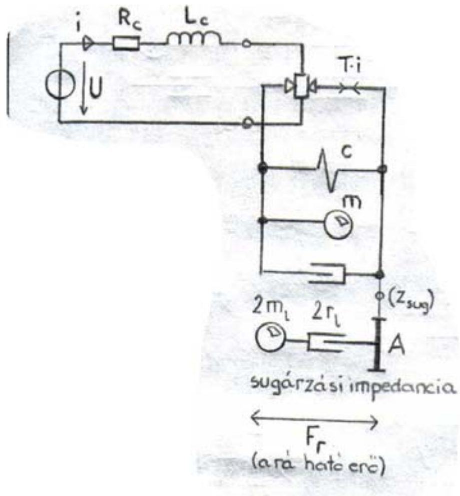
A dinamikus hangszóró a leggyakrabban használt hangsugárzó. Önmagában keskenysávú, ezért dobozba építjük. Állandó légrésű mágneskör található benne, melyben sugárirányú (kifelé mutató) erőtér alakul ki. A lengőcséve, a tekercs ebben tengelyirányú mozgást végez, így a hozzá kapcsolt membrán is. A membrán általában papír, műanyag anyagú. Az állandó mágnest 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.



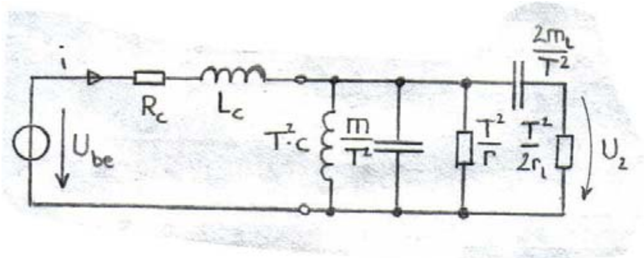
Az elektromechanikai helyettesítő képben megjelenik az U gerjesztés, az R_c cséveellenállás (elektromos veszteségek), az L_c cséveinduktivitás (hiszen a lengőcséve tekercsként is funkcionál), ezért utóbbit a dinamikus hangszóróból sosem szabad kihagyni! A kivezetéseken a tekercsbe áramot bocsátunk. Az áram és a mágnestér kölcsönhatásaként tengelyirányú erő keletkezik. Az erő mozgásba hozza a nagy felületű membránt és ezáltal hanghullámokat kelt.

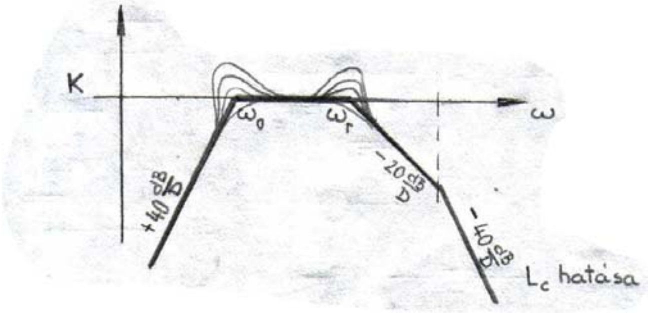


A mechanikai oldalon a C rugó a rim és a pille rugózását szimbolizálja, a tömeg az összes mozgó tömeget (membrán, lengőcséve), az ellenállás pedig a veszteségeket (súrlódás). A membránt a sugárzási impedancia terheli, amelynek értéke egyszeres szorzót kap, ha a hangszórót dobozba építjük, kétszeres szorzót (lásd ábra), 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.



Az elektromos oldalra való transzformáció után a kép:





Az 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:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{c(m+2m_l)}}$$

$$\omega_r = \frac{r_l}{m_l}.$$

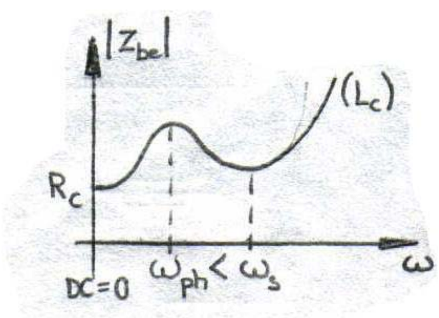
A hangszóró legnagyobb problémája a hatásfoka.

$\eta = P_{akusztikai}/P_{elektromos} \cong 1...2\%$

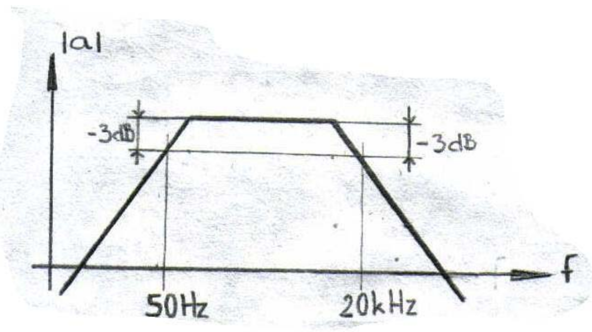
Ez az érték nagyon alacsony, a befektetett villamos teljesítmény alig 1-2%-a alakul akusztikus teljesítménnyé! Óvatosan bánjuk a kifejezésekkel, amikor arról beszélünk „hány wattos” egy hangszóró. A hangszóróknak megadott üzemi paramétere a „maximális megengedett villamos teljesítmény”, amit feltüntetnek rajta. Ez azt mondja meg, hogy mekkora villamos teljesítmény kapcsolható a kapcsaira anélkül, hogy az tönkremenne. Ennek azonban maximum 1-2%-a alakul át hangteljesítménnyé. Egy 100 Wattos hangszóróból akkor jön ki 1 W hangteljesítmény, ha valóban ráadunk 100 Wattot a kapcsaira! A hasznos akusztikai teljesítmény természetesen 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.)

$P_{akusztikai\ hasznos} = f_r^2/2r_l$.

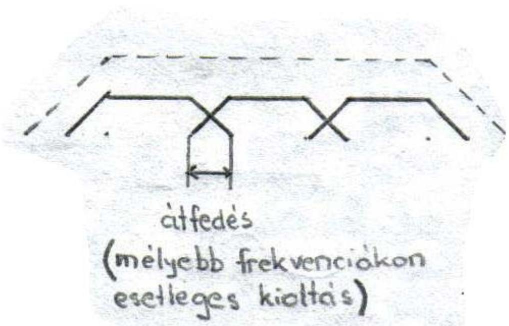
A bemeneti impedancia helygörbéje az abszolútérték frekvenciamenete. DC esetén a hangszóró csak a cséveellenállását mutatja, innen indul a görbe. A két előjelváltási pontot párhuzamos és soros rezonanciának is nevezzük, előbbi a kisebb frekvenciájú érték, de a nagyobb csúcs, utóbbi nagyobb frekvenciához tartozó bevágás. A frekvencia növelésével, ismét dominál a lengőcséve induktivitása és ettől „elszáll” a görbe.



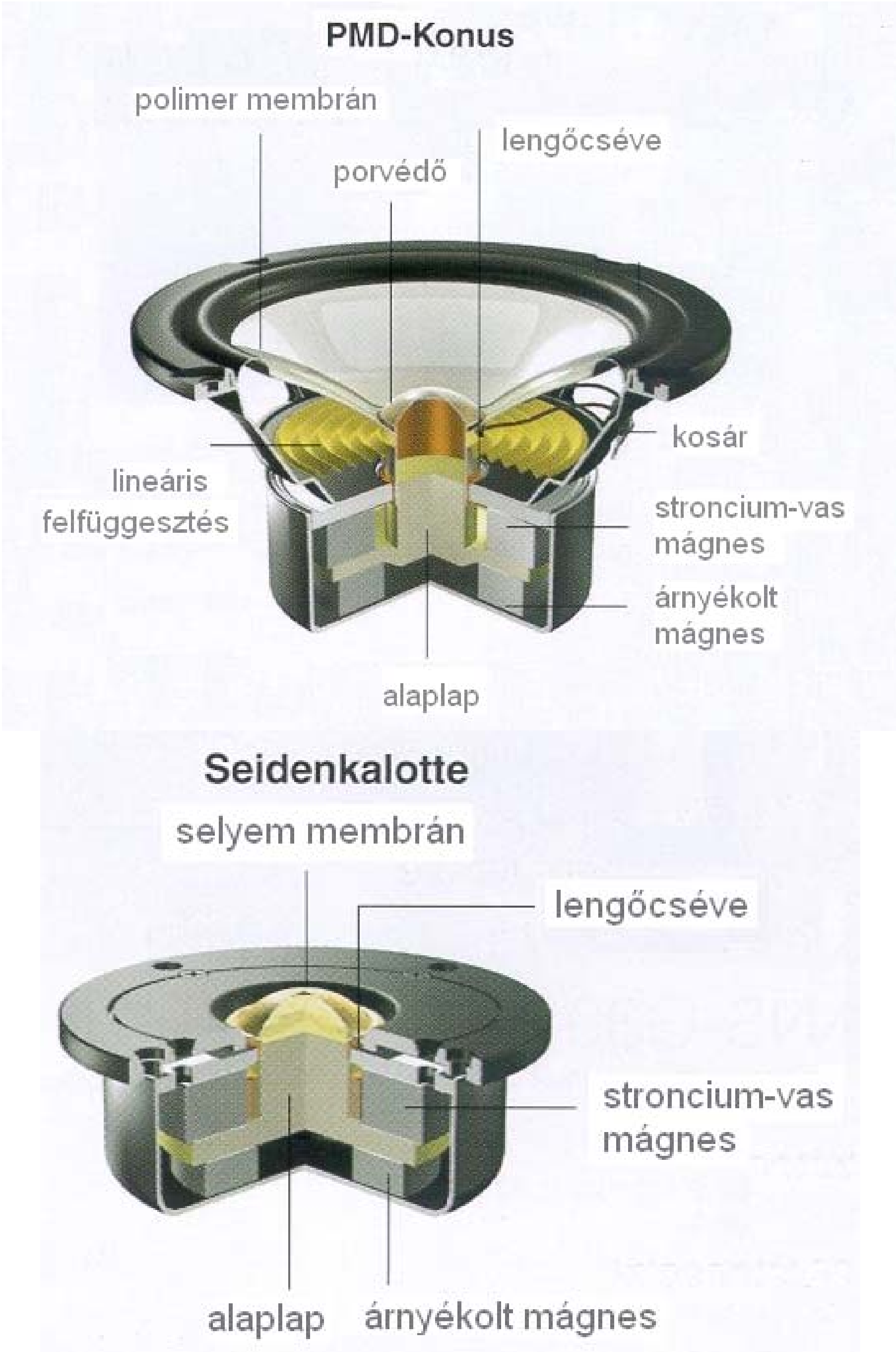
A hangszóró paraméterei közül már megismertük a *terhelhetőséget*. Ez adja meg wattban a kapcsokra adható maximális villamos teljesítményt. Az *átviteli tartomány* a fenti megismert átviteli függvény -3 dB-es pontjai között értelmezett. A dinamikus hangszóró alapjában felüláteresztő-jellegű, és a Bode-közelítésben csak az alsó ω_0 törésponti frekvenciát adjuk meg. Azonban az átvitel a felső töréspont után esik, így gyakorlatilag sáváteresztővé válik: az átviteli függvény sávközépátvitelétől számított -3 dB-es pontok között értelmezzük az átvitelt. A harmadik fontos paraméter a *névleges impedancia*. Definíció szerint ez az 1 kHz-en mutatott impedancia abszolút értékének 4, 6, 8, 16 Ω–ra kerekített értéke. Ha tehát egy hangszóró „négy ohmos", akkor az a fenti impedancia görbe alapján 1 kHz-nél 3-5 Ω körüli értéket mutat. Jegyezzük meg, hogy az impedancia az erősítővel összhangban kell legyen. A mai modern erősítőkre elég széles tartományban 4-16 Ω közötti hangsugárzókat lehet kapcsolni, és garantált mindkét eszköz biztonsága. A mai hangszórók általában 4 vagy 6 ohmosak. Abból nem származik probléma, ha a hangszóró impedanciája nagyobb az erősítő által igényelthez képest, pusztán a hangerőszabályzót kell feljebb tekerni ugyanakkor a hangerősséghez (ugyanaz az a 4 ohmos erősítő, ugyanakkora kivezérlés mellett fele akkora hangerősséget hoz létre egy 8 ohmos hangszórón a 4 ohmoshoz képest). Fordított esetben azonban veszélyeztetjük az eszközöket, hiszen a hangszóróra könnyen túlfeszültség juthat, ha ellenállása kisebb az előírtnál. Ha az erősítő 8 ohmon ad le 100 Wattot, akkor ha oda négy ohmos hangsugárzót kapcsolunk, annak kapcsaira ennél lényegesen nagyobb teljesítmény is juthat.



A hangszórók, mivel korlátozott tartományban sugároznak, nem alkalmasak a teljes 20 Hz-20 kHz-es tartomány lesugárzására. A többutas hangsugárzók ezért rendszerint két vagy három hangszórót tartalmaznak, esetleg reflexnyílással. A hangsávot általában egyszerű, passzív elemekből álló analóg váltószűrővel választják szét, és vezetik rá az egyes „utakra".

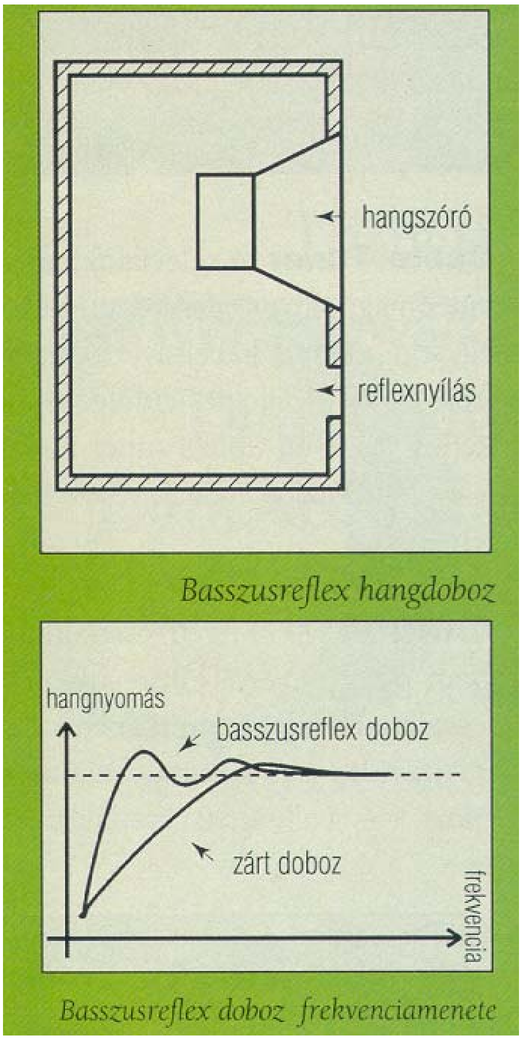


Természetesen a határok nem élesek, az átfedési tartományban hulláminterferenciával kell számolnunk, ez lehet erősítés és kioltás is. Kisfrekvenciát nagy sugárzófelülettel és lágy felfüggesztésű membránnal sugárzunk le (a basszus által megmozgatott membrán szemmel is jól láthatóan rezeg). Ezek a kónusz-sugárzók 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.



Kónusz (fenn) és dóm (lent) sugárzó képe.

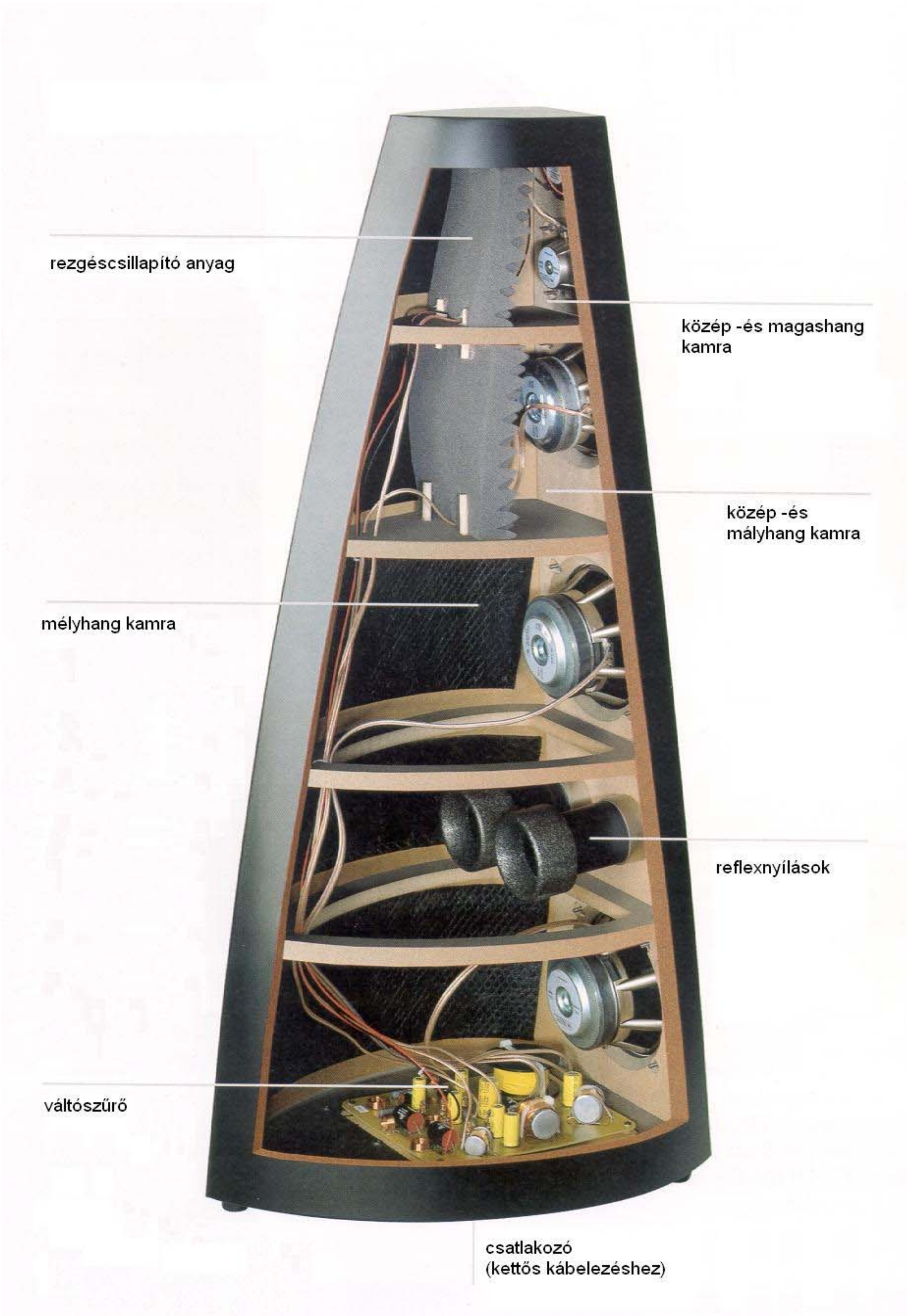
Általában igaz az állítás, hogy a magas frekvenciák lesugárzása nem probléma, könnyedén tudunk 50-100 kHz magasságban sugárzó eszközt gyártani, de a mélyeknél a helyzet sokkal nehezebb. Ezért is van külön „mélynyomó" a házimozi rendszerekben, nagy méret, hatalmas dobozok, nagy felületű membrán és több reflexnyílás is található rajtuk. Tipikus alsó határfrekvenciájuk 80-120 Hz környékén van, az 50 Hz-et is lesugározni képesek már a drágább kategóriába tartoznak, 30 Hz alatt pedig szinte lehetetlen hangot kicsikarni egy hangszóróból. A szubjektív hangzásérzetet azonban drámaian javítja. Nagyon gondos tervezést igényel a hangszórók megválasztása, elhelyezése, a doboz és a reflexnyílás kialakítása!



Basszusreflex hangdoboz

Basszusreflex doboz frekvenciamenete

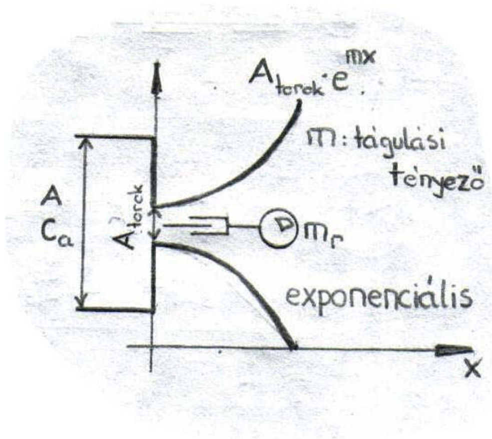
Többutas hangsugárzó hangszórói és a reflexnyílás hatása az átvitelre.

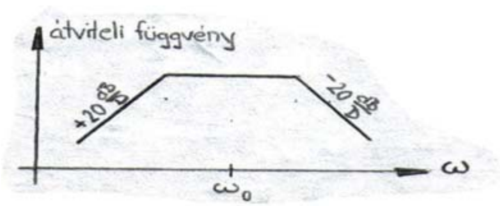


Többutas hangsugárzó belseje váltószűrővel, reflexnyílásokkal és különböző méretű hátsó kamrákkal.

6.4.1 Exponenciális tölcséres hangszóró

A hatásfok növelésének egyszerű módja, ha a hangszóró elé exponenciálisan táguló szájnyílású tölcsért helyezünk. A tölcséres hangszóró tehát dinamikus, csak a membrán nem önmagában sugároz, hanem egy szájnyíláson keresztül. Ezt a trükköt alkalmazzák a megafonok és a szirénák, irányítottabb és nagyobb hatásfokú sugárzást tesznek lehetővé. Az elért hatásfok 25% körüli, ami lényegesen több a tölcsér nélküli 1-2%-hoz képest. Ezeknek az eszközöknek a célja nem a jó hangminőség. Az átviteli sáv ugyanis megsínyli ezt a trükköt, a hangszóró a tölcsér hatására keskenyebb sávú sáváteresztő jellegűvé válik. Ezért nehéz érteni a megafonban kiabáló ember hangját, de a mentőautó szirénájának a célja nyilvánvaló a hallhatóság növelése.





Az átvitelben tehát egy középponti frekvenciát adunk meg, attól jobbra és balra is -20 dB/dekádos elsőfokú szűrés van. A matematikai kezeléshez az *A* felületű membrán elé egy C_a üreget képzelünk. Ez egy szűkülő üreg, melynek másik végén egy kisebb A_{torok} felületű nyílás található. Ide képzeljük bele a sugárzási impedanciát. A tölcsér exponenciálisan „tágul", az alábbi egyenlet szerint:

$A_{torok}e^{mx}$

Ahol *m* a tágulási tényező.

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

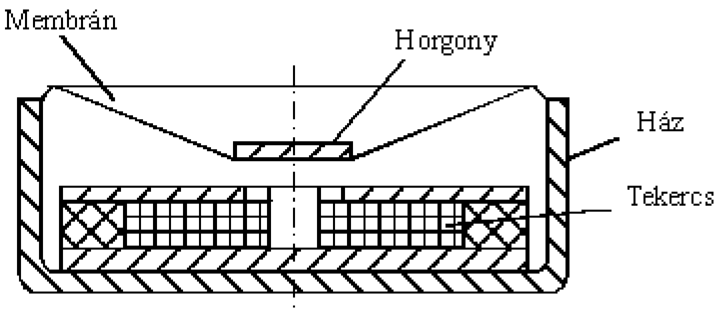
A sugárzási ellenállás, amelyen a hatásfokhoz szükséges teljesítmény esik, a felületek arányának négyzetével arányosan növekszik:

$$r_r' = r_r\left(\frac{A}{A_{torok}}\right)^2$$

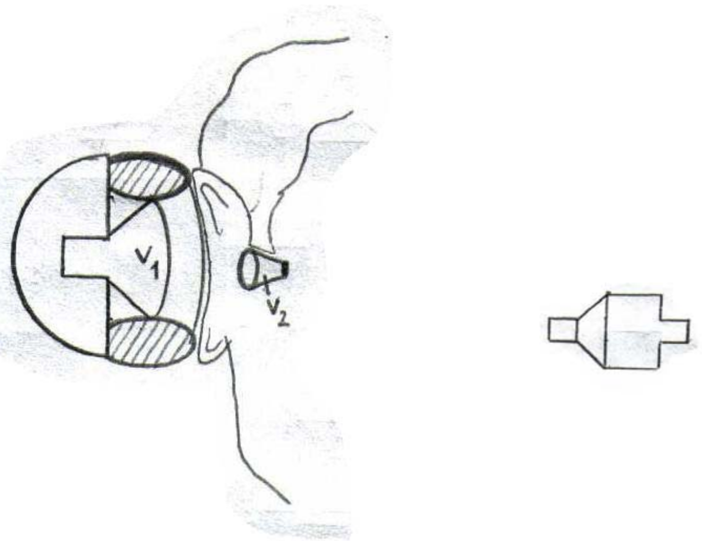
Említsük még meg, hogy a tölcséres hangszórónak van egy alsó töréspontja. Ez alatt a frekvencia alatt megszűnik a sugárzás, a sugárzási impedancia valós része nullává válik. A felett monoton nő, és exponenciálisan tart az $A\rho_0 c$ értékhez (ami a maximális érték, ideális esetben).
Érdekesség, hogy viszonylag ritkán, de készítenek *kondenzátor* hangszórót is. A mélyhangok lesugárzásához nagy felület, a nyugalmi térerő kialakításához külön nagyfeszültségű tápegység és speciális illesztő transzformátor szükséges. Az ilyen felépítésű eszköz kistorzítású, egyenletes frekvenciamenettel rendelkezik, ára miatt azonban nem versenyképes

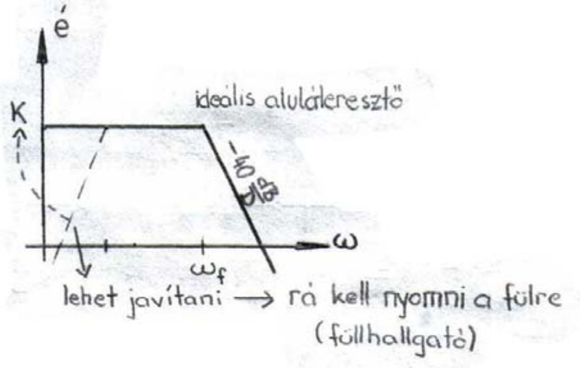
6.4.2 Fejhallgatók

A fejhallgatóknak két típusa van. A ritkábban használatos, nem stúdiótechnikai mágneses fejhallgató, és a hangátvitelhez alkalmasabb, jobb minőségű dinamikus. Utóbbi ugyanolyan dinamikus hangszórót tartalmaz, mint a fentiek, csak kisebb méretben. A mágneses fejhallgató átviteli sávja keskenyebb, ilyen van a telefonkagylókban. 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. Gyártáskor ügyelni kell a megfelelő légrésméret beállítására.



A legfontosabb, hogy a fejhallgatók zárt térbe sugároznak. Ez a zárt tér a valóságban az emberi hallójárat, mérési célokra pedig műfülüreg vagy műfej hallójárata. Magyarán, a fejhallgató átviteli függvénye önmagában nem értelmezett, csak a lezáró impedanciával (az üreggel) együtt! Az ideális lezárás, tisztán kapacitív üreg, egy egyszerű C_a akusztikus elem (mechanikai rugó, elektromos kondenzátor). Az ilyen „szűrő" ideális aluláteresztő jellegű, azaz akár DC-ig is átviheti a mélyfrekvenciás tartományt! A valóságban ez nem így van, hiszen lehetetlen egy fejhallgatót ideálisan a fülre helyezni, arra rányomni. Így a fejhallgató szivacsa és a fej között illesztetlenség 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-taggá változik, és ennek következménye a kisfrekvenciás átvitel romlása. Megszűnik az ideális aluláteresztő jelleg, keletkezik egy alsó töréspont is. Minél nagyobb a veszteség, a kiszuszogás, annál magasabbra kerül ez. Ezt egyszerű kísérlettel igazolhatjuk: tartsuk messzire a fajhallgatót a fülünktől, egyből eltűnnek a mély hangok, csak a magasak cicergése marad meg. Ha közelítjük, egyre erősebben halljuk a mélyeket is, majd minél jobban rányomjuk a fejünkre, annál jobban. Meglepő, de a hallójáratba illeszthető fülhallgatóknak gyakran sokkal jobb az átvitele drágább társainál. Ennek oka a jobb illesztettség. Ne keverjük tehát a fülhallgatót a fejhallgatóval.





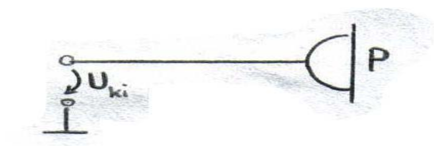
A fejhallgatóknak gyakran használt paramétere az *érzékenység*:

é = $P_{üreg}/U_{gerj}$

ahol, *P* az üregben mért nyomás (méréskor a műfülüreg végén elhelyezett mérőmikrofon méri, halláskor a dobhártyán lép fel), *U* pedig a kapcsokra adott gerjesztés. Nyilvánvalóan, minél nagyobb az érzékenység, annál jobb fejhallgató, mert ugyanakkora villamos feszültség hatására nagyobb nyomást tud létrehozni ill. ugyanahhoz a nyomáshoz (hangerőhöz) kisebb feszültség is elég. A mikrofonoknál majd megismert érzékenység ugyanezen alapul, csak fordítva: a nyomás fog létrehozni kapocsfeszültséget, a kettő aránya a jellemző mennyiség. 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. Utóbbiaknál nincs szükség ún. mágneses előfeszítésre sem. Mindkettő közös jellemzője tehát, hogy ideális esetben tökéletes aluláteresztő átvitelük van. Az átvitel az érzékenység frekvenciamenete, felső töréspont után másodfokú eséssel. Ez különlegességnek számít, hiszen a mély hangok lesugárzása szokott problémát okozni.

6.5 Mikrofonok

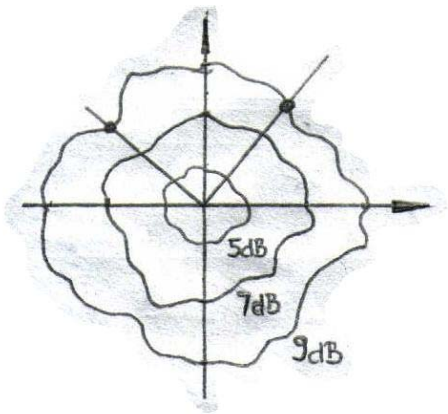
A mikrofonok a hangszórók ellentétei. Feladatuk, hogy a levegő rezgéseit a membránjukkal felfogják és azzal arányos kimenő feszültséget hozzanak létre kapcsaikon. A bemenő mennyiség tehát a membránon fellépő hangnyomás (időfüggvénye), a kimenő pedig az üresjárási (terheletlen) feszültség.

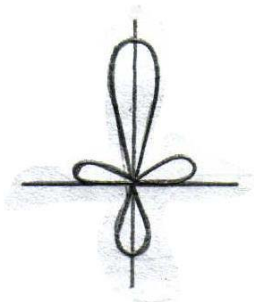


Az átviteli függvény itt is az érzékenység frekvenciamente. Az iránykarakterisztika az átviteli függvény térbeli leírása, eloszlása.

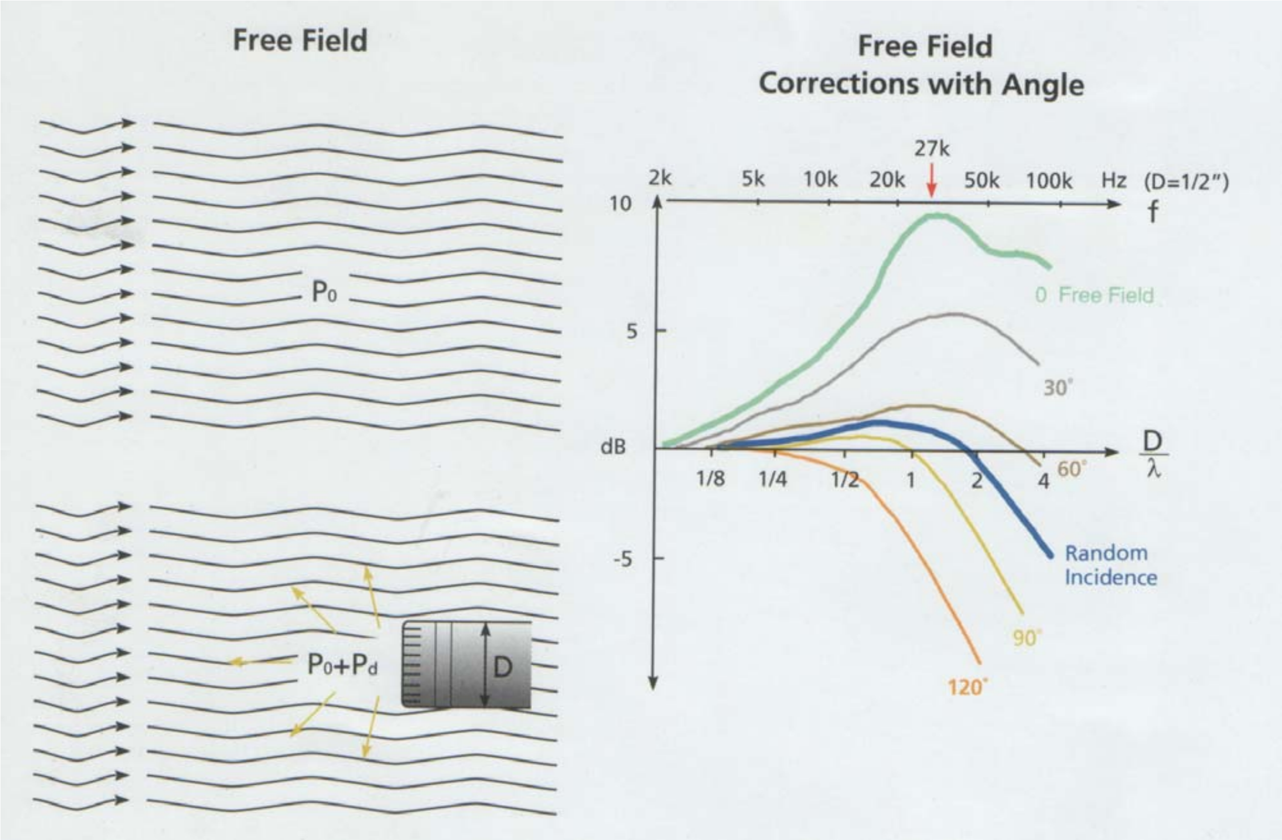
$é(f)=u_{kiüresjárási}/p$.

Az érzékenységet a főtengelyben mérjük, szokásos mértékegységei a [mV/μbar] vagy a modernebb a [mV/Pa].





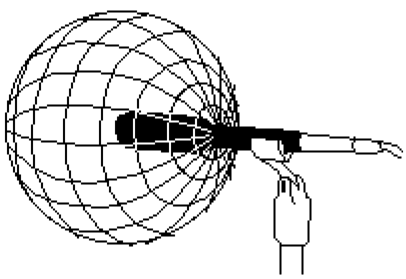
Az érzékenységnek két fajtáját szoktuk megadni:
1. nyomás: a membránon mért nyomás
2. szabadtéri: hangnyomás értéke a membrán helyén, de a mikrofon nélkül.
Utóbbinak az az értelme, hogy ha nő a frekvencia, csökken a hullámhossz, a membrán átmérője összemérhetővé válik a hullámhosszal. Így maga a membrán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



A keresett hangnyomás p_0, de a mikrofon p_0+p_d nyomást mér a jelenléte miatt (helyi reflexiók miatt). Ennek értéke irány- és frekvenciafüggő. Szabadtéri mikrofont a forrásra kell irányítani, hogy p_0-t pontosan mérje. A nyomásmikrofon irányérzéketlen. A véletlen beesésű olyan felépítésű, hogy azonos módon reagáljon szimultán beérkező hangutakra minden irányból (visszaverődéses térben, diffúz hangtérben). A jobb oldalon láthatók a korrekciós diagramok, melyek az átviteli függvényt úgy módosítják, hogy az „pont jó legyen".

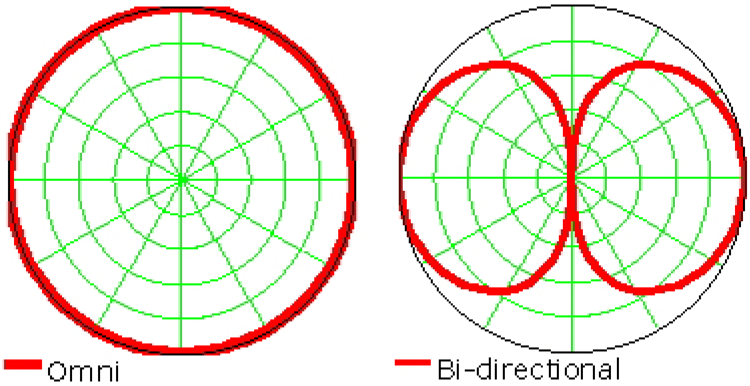
Az iránykarakterisztikák legfontosabbika az alábbi három:

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.

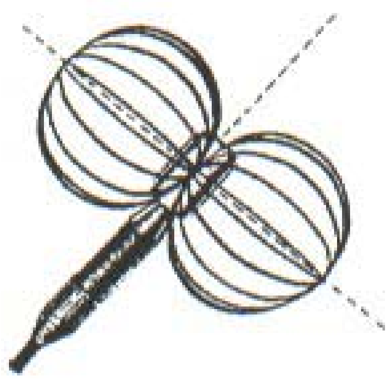


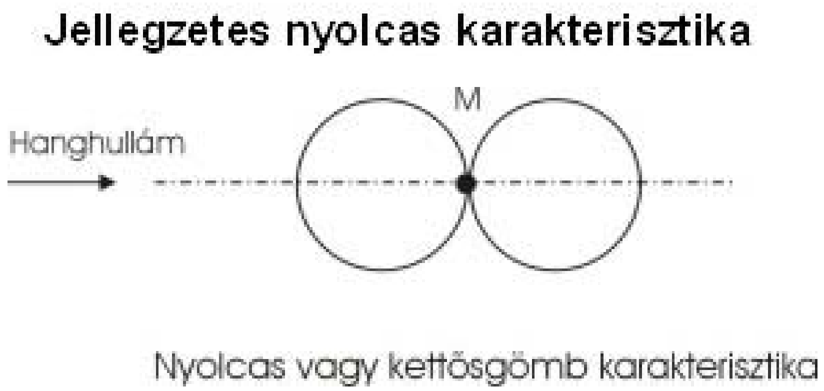
2. nyolcas (gradiens)
Tipikusan a szalagmikrofonok rendelkeznek ilyen karakterisztikával. Két gömb együttese, középen a membránnal. Ezeknek a legjobb „vétel" iránya a membránra merőlegesen, annak

szimmetriatengelyében van, mindkét oldalról. Párbeszédmikrofonnak is nevezik, mert kiválóan alkalmas egymással szemben ülő beszélők számára. Ekkor a hasznos jelet maximális érzékenységgel veszi, ugyanakkor a membránra a másik két irányból érkező hangokra nulla az érzékenysége. Ebből az irányból érkező hangokat zajnak tételezzük fel, tehát természetes jel/zaj viszony javító konstrukció. Egyenlete: $é = e_0 \cos(\theta)$.



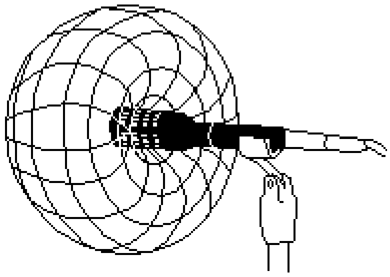
A bi-directional (nyolcas) karakterisztika két gömbi együttese

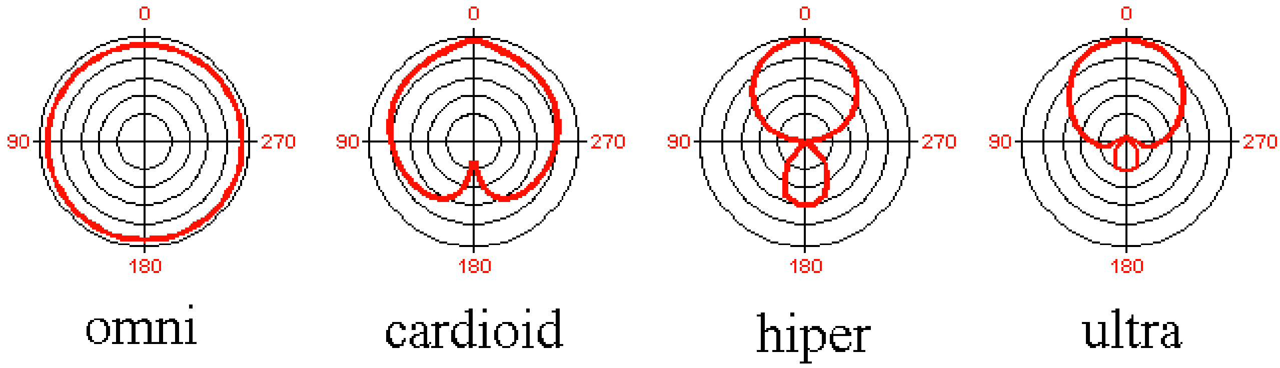




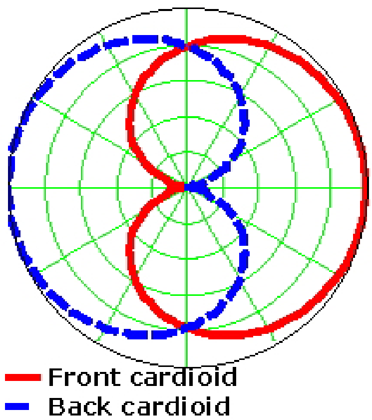
3. kardioid (vese)

A leggyakoribb konstrukció. Nevét alakjáról kapta, az emberi veséhez hasonlít. Előre-irányban maximális érzékenyséfű, de oldalról is csökkentett, hátulról pedig szabályozható. Attól függően, mekkora a hátsó irányból az érzékenység beszélünk különböző alcsoportokról (szuperkardioid, hiperkardioid). Egyes mikrofonoknál a gömbi és a kardioid kapcsolható. A mikrofonok általános jellemzője, hogy két részből állnak: egy „nyélből”, ami az erősítőt, elektronikát tartalmazza; illetve a kapszulából, ami a membránt és a karakterisztikát szabja meg. Ezek könnyen cserélhetők, így elég egy nyelet vásárolni, azon pillanatok alatt lehet kapszulát cserélni.

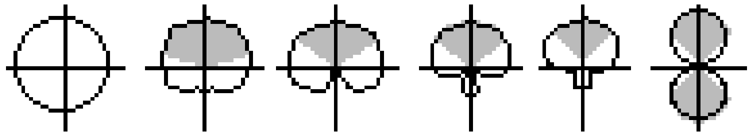




Az ilyen típusoknál meg szokták adni az előre-hátra viszonyt, ami a két irányban mért érzékenység hányadosa (dB-ben is megadható).
Felhasználásnak előnye, hogy irányfüggő, azaz bizonyos irányokból „halkabb”. Így alkalmas sztereó felvételekhez, amikor két darabot elhelyezve, azok iránykarakterisztikája szabja meg a vételt, különböző irányokból eltérően. A szokásos gömb-kapszulát ha hátulról megfúrjuk és nyílást hozunk létre, akkor kardioid mikrofont hozhatunk létre. Egyenlete: $é = e_0(1+\cos(\theta))$. Két vese karakterisztikából ún. multi-pattern eszközt lehet létrehozni: ekkor külön használva őket kardioid eszközt, együtt a kettőt háttal befordítva pedig közel gömbkarakterisztikát kapunk.



Multi pattern mikrofonok



	Omni-directional	Sub-cardioid	Cardioid	Hyper-cardioid	Line	Bidirectional
Acceptance Angle (3 dB down)	—	170°	120°	100°	90°	90°
Null (angle of minimum sensitivity)	none	180°	180°	110°	120°	90°
Distance Factor (DF)	1.0	1.2	1.7	2.0	2.5	1.7

A leggyakoribb kardioid fajták

A következőkben a legfontosabb mikrofontípusokat vizsgáljuk meg.

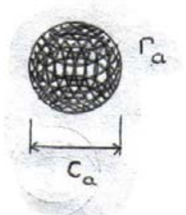
6.5.1 Elektrodinamikus mikrofon

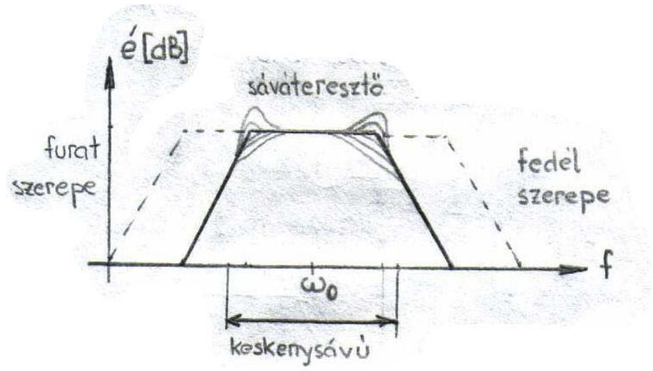
Az elektrodinamikus mikrofon általános hangfelvételi célra készül, mérésekre nem alkalmas. Sáváteresztő jellegű és önmagában elég keskenysávú is. A sávszélesség és az érzékenység szorzata konstans. A sávközép frekvenciát a szokásos képlettel adhatjuk meg:

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

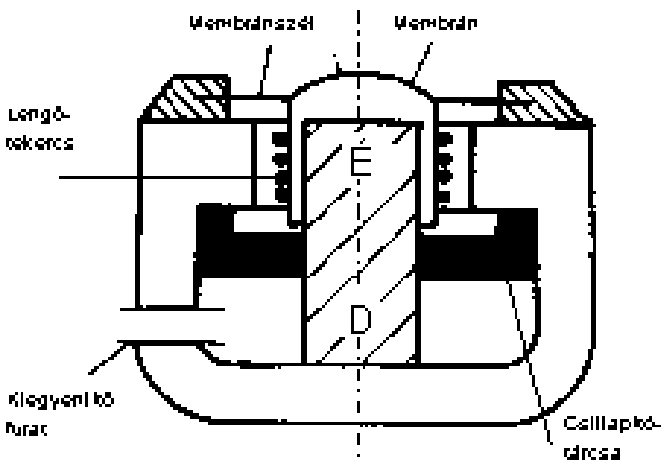
Ahol C_e az üregek által meghatározott eredő kapacitás. Mivel az eszköz keskenysávú, ún. akusztikus kompenzálásra van szükség. Ennek során az átviteli sávot a nagy frekvenciák és a kis frekvenciák felé is kiterjesztjük.

Már korábban volt róla szó, hogy az akusztikus eszközöket védelemmel is ellátjuk. A mikrofonok membránja különösen érzékeny, ezért szabadon sosincs, arra csavaros fémháló-fedelet szerelünk. Ennek elsődleges szerepe a mechanikai védelem, másodlagos pedig az akusztikai. A fedélen lévő lyukak és „akadályok” a méretektől függően tömegként, akusztikus ellenállásként viselkednek, a legfontosabb azonban a membrán és a fedél között keletkezett üreg. Levezetés nélkül jegyezzük meg, hogy az akusztikus kompenzálásnak ez fontos része, mert eredőben a felső határfrekvenciát feljebb tolja, javítja az átvitelt. Kis frekvenciákon kiemelést a mágneskör megfúrásával érhetünk el, amely mélyfrekvenciás (akusztikus) rezgőkört fog létrehozni a tömeggel, amit képvisel.

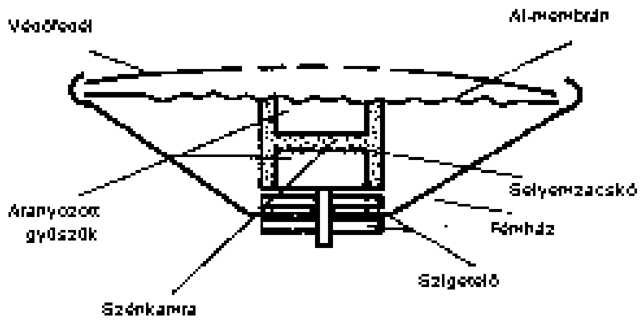




Karakterisztikája általában gömb, érzékenysége 0,1-0,2 mV/Pa körüli, névleges impedancia párszáz ohmos, induktív jellegű. Az állandó mágneskör légrésébe helyezett lengőtekercs kivezetésein jelenik meg az indukált feszültség. A tekercs a membránnal együtt mozog, a hangnyomásnak megfelelően. A mágneskör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

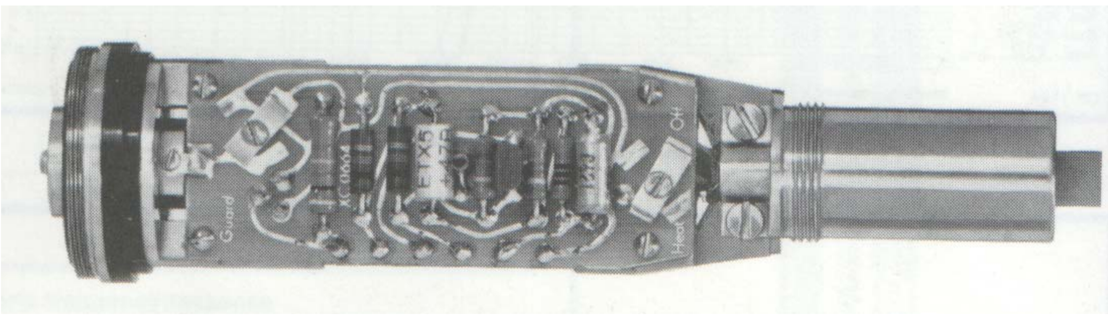


A telefonokban nagy tömegben gyártott, olcsó *szénmikrofonokat* használunk. Elvileg ez egy egyenáramú feszültségforrásra kapcsolt változó ellenállás. Az ellenállásváltozás a membránra jutó hangnyomás hatására lép fel. A középen elhelyezkedő laza szemcséjű szénporhoz két, aranyozott elektróda érintkezik. Az alsó elektróda szigetelten a fémházhoz van erősítve, míg a felső a membránnal együtt mozog. A szénszemcsék közötti átmeneti ellenállás a mozgás ütemében fog változni. Az ellenállás a kitérésnek nem lineáris függvénye, ezért a mikrofon torzítása elég nagy. Széleskörű elterjedését az aktív, nagy jelet eredményező működésének köszönheti. Napjainkban az elektronikus készülékek megjelenésével jelentősége csökkenőben van.



6.5.2 Kondenzátor mikrofon

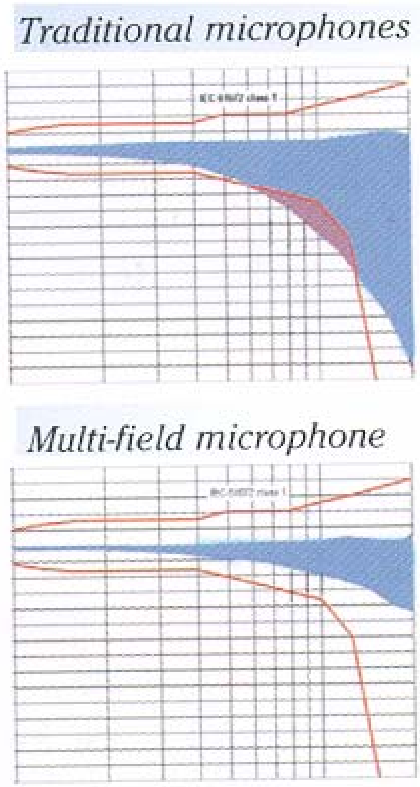
A kondenzátor mikrofonok a legjobb minőségűek. Nem csak hangfelvételi célra, de mérésekre is alkalmasak. A jobb minőségű mérőmikrofonok általában fél collosak, áruk az előerősítővel a fél millió forintot is elérheti. A membrán méretétől erősen függ az érzékenység és a sávszélesség. Minél nagyobb a membrán, annál jobb az érzékenység, annál kisebb tartományban működik az eszköz. Mérésekhez a negyed collos és az egy collos is előfordul.
Kondenzátor mikrofonhoz elengedhetetlen az előerősítő, ami a „nyélben” szokott lenni, erre csavarjuk rá a kapszulát. A kondenzátor mikrofonok ismertetőjele, hogy – eltekintve egy-két modernebb ún. prepolarizált fajtától – tápfeszültséget igényelnek. A mérőerősítők (mikrofonerősítők) feladata, hogy a beledugott mikrofonokat tápfeszültséggel lássa el, valamint a kilépő feszültséget erősítse, ezek ugyanis elég alacsony értékek. A tápfeszültséget gyakran „előfeszítésnek” is hívjuk, pár volttól, 48 V-ig (DC) terjed a manapság használatos eszközök igénye, de régebben a 200 V DC is létezett. Ez kellően nagy feszültség ahhoz, hogy veszélyes legyen az emberre és a mikrofonra egyaránt. Éppen ezért, előfeszített, feszültség alatt lévő kondenzátor mikrofont nem szabad ki/be huzogatni, mert a hirtelen fellépő feszültségváltozás tönkreteheti az előerősítőt. Ezért ha kábelezni kell, és ki kell húzni vagy bekell dugni valahova, mindig le kell kapcsolni róla a feszültséget. A mérőmikrofonok egy része kisebb feszültséggel is elbír, így telepről is működtethető. Különösen a zajszintmérőkhöz alkalmazott mikrofonoknál fordul ez elő. Mindig ügyeljünk arra, hogy üzemi működéskor be legyen kapcsolva ez a polarizációs feszültség, különben a mért értékek hamisak lesznek (lényegesen kisebbek és valótlanok).



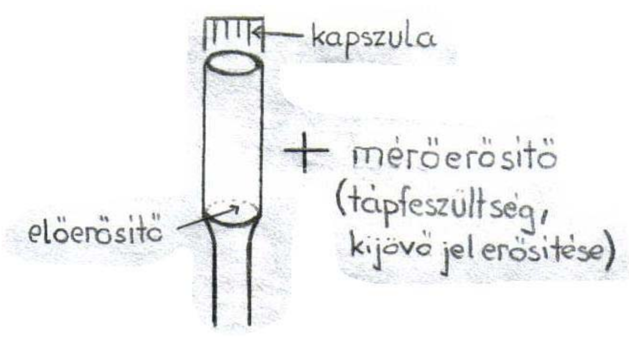
Kondenzátor mikrofon előerősítője a nyélbe építve.

A kondenzátor mikrofonban kapacitív átalakító van, a „lötyögő kondenzátor” egyik fegyverzete, a mozgó, a membrán maga. A membrán tehát fémfóliából készül (nikkel, titán), ez a negatív

elektróda. A pozitív elektróda rögzített, a nyél része. Közöttük a nyugalmi légrés 10 mikron körüli, ennek nagysága változik a membrán mozgásakor. Korábban volt szó az átalakítónál a negatív rugóról: ez jelképezi azt az állapotot, amikor nyugalomban a membrán nem ér össze az ellenelektródával (ami vonzza). Egy „ellenrugót” kell bevetni ahhoz, hogy a nyugalmi légrést fenntartsuk. A fémház kellően szigetelt, földelt, az ellenelektródával azonos anyagból készül a hőtágulás miatt. A házat a légköri nyomás kiegyenlítésének céljából vékonyan megfúrják.
A belső ellenállás a kondenzátor miatt nagy, gigaohm nagyságrendű. Érzékenysége egy nagyságrenddel nagyobb a dinamikusnál, 1-2 mV/Pa. Néveleges impedanciája pF nagyságú, kapacitív jellegű.
Átviteli függvénye, az érzékenység menete aluláteresztő jellegű. A fejhallgatók mellett a kondenzátor mikrofonok azok, melyek nem szenvednek a kisfrekvenciás problémától ideális esetben.



Szokványos mikrofonok karakterisztikájának ingadozása nagyobb a szabadtéri és a diffúz karakterisztika által meghatározott területnél, így alkalmazási területük nem olyan széles mint a multi-field mikrofonoké.



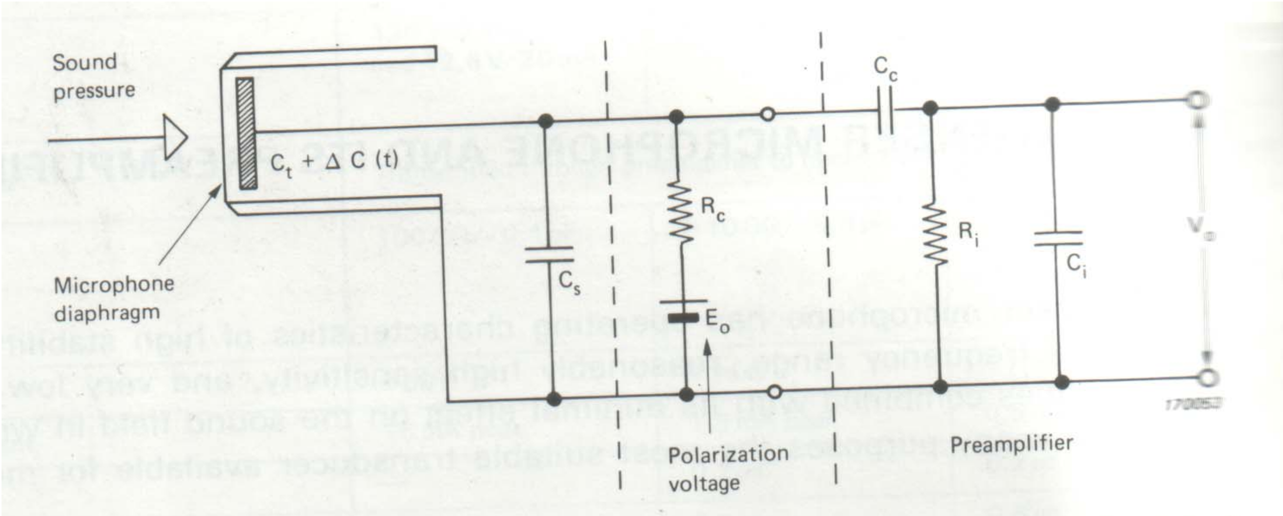
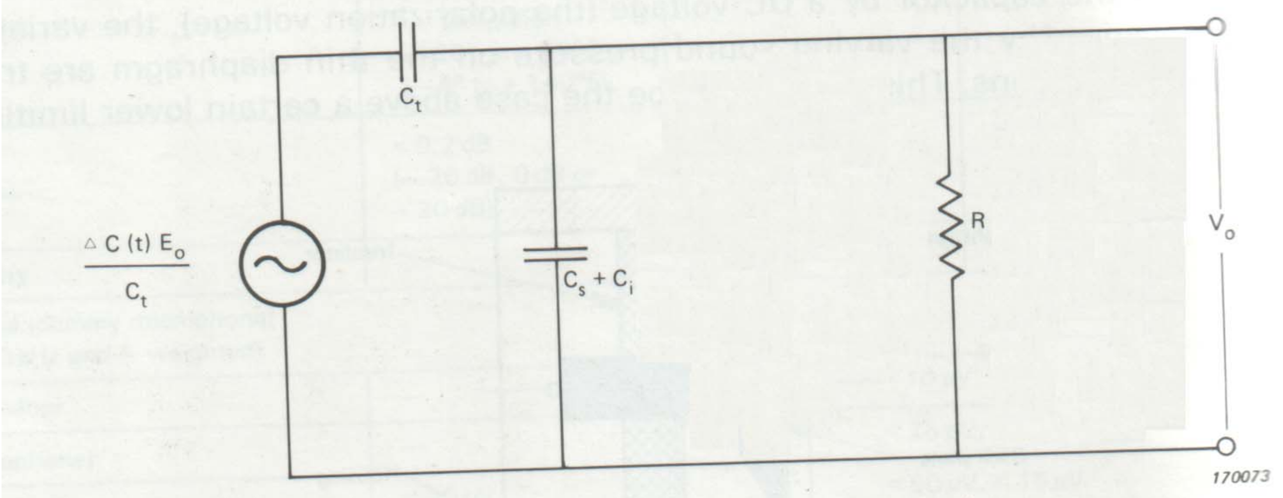
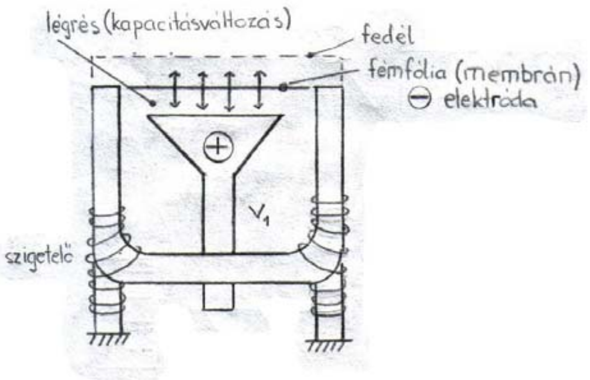
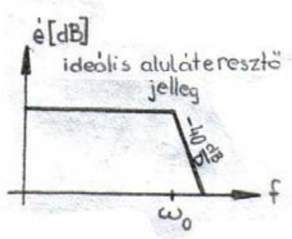


Fig. 2.2. Equivalent circuit of a Condenser Microphone and Preamplifier



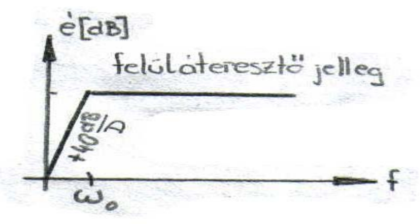
Elektromos helyettesítőkép kondenzátormikrofon és előerősítőjére.



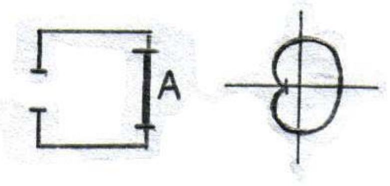


6.5.3 Egyéb mikrofonfajták

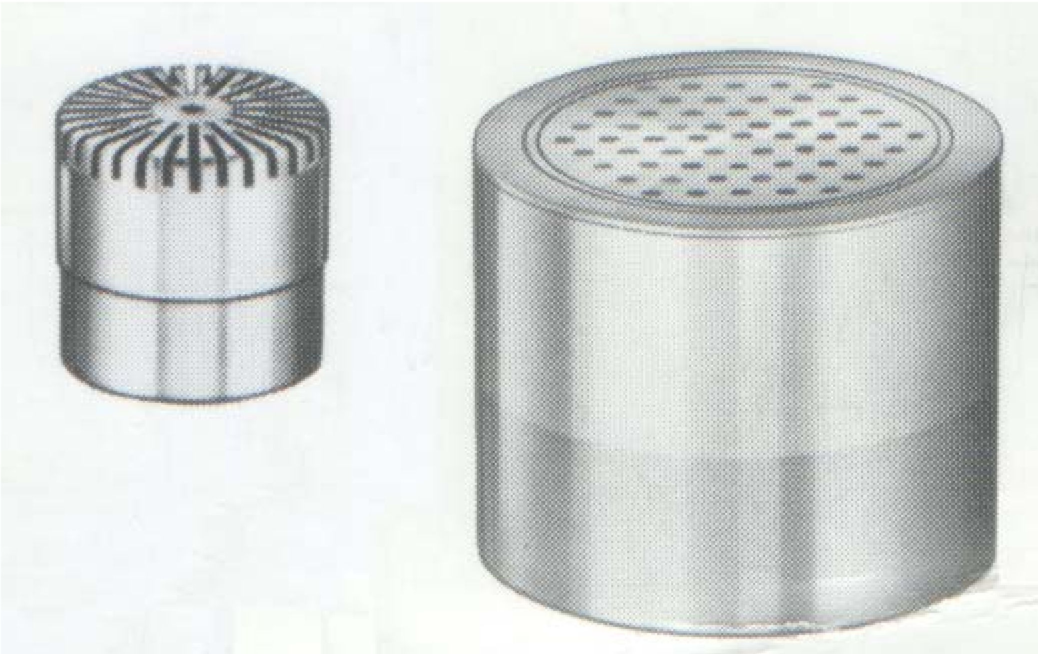
Gyakran találkozunk az ún. gomblyuk-mikrofonnal. Ezek csiptetősek, kisméretűek és általában nem túl jó minőségűek, leginkább beszédhez alkalmasak. Bennük piezó átalakító van (elektrét mikrofon), tehát kapacitív impedancia és átalakítás tartozik hozzá. Gömbkarakterisztika mellé az érzékenység 0,1-2 mV/Pa körüli. Beszédkorrektorra szükség lehet az érthetőség növelésének érdekében és erősítésre is.
A másik, korábban elterjedt dinamikus fajta a szalagmikrofon, melyről már volt szó a nyolcas karakterisztikánál. Párbeszédhez jó, 0,1-0,2 mV/Pa érzékenységűek. Néveleges impedancia kicsi tizedohm nagyságrendű, így impedanciaillesztésre (200 ohm) szükség van, ehhez transzformátort kapcsolunk hozzá. Átviteli függvénye felüláteresztő jellegű.



A kardoid mikrofonok lehetnek dinamikusak és kondenzátor mikrofonok is. A karakterisztika a gömb és a nyolcas eredője. Dinamikus esetben 200 ohm körüli, induktív jellegű névleges impedanciára kell számítanunk, 0.1-0.2 mV/Pa érzékenység mellett. A zárt mikrofonkapszula hátsó megnyitásával érhetjük el a részleges (nem nulla) érzékenységet más irányokból.

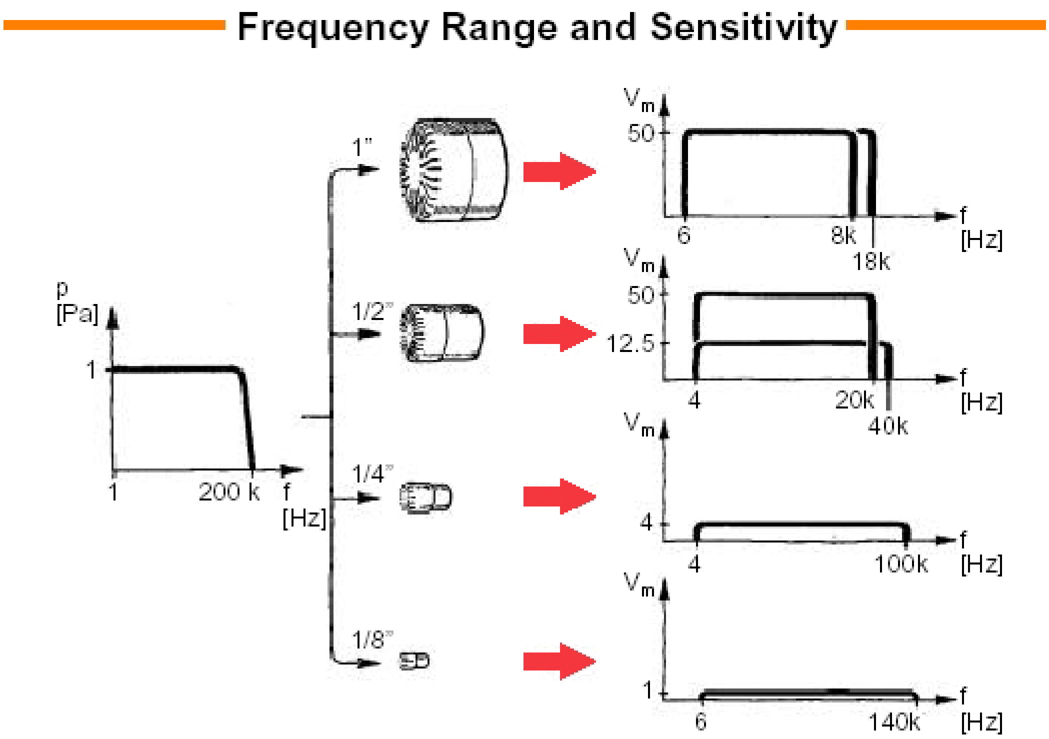


Kondenzátor mikrofonoknál vagy a kapszulát kell kicserélni, vagy két kapszula összegzéséből is nyerhetünk vese alakot. Ilyenkor a DC polarizációs feszültség határozza meg a karakterisztikát, gyakran kapcsolóval ellátott nyélen tudjuk átkapcsolni azt, és ezzel együtt a karakterisztikát.

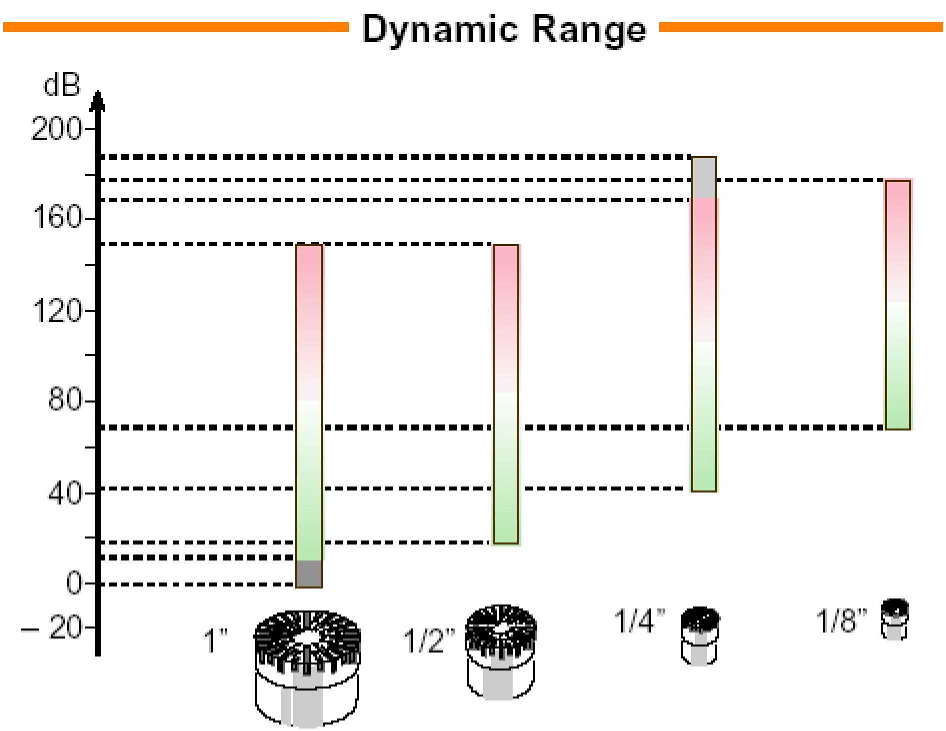


Különböző méretű kondenzátor mikrofonok kapszulái

A méret összefüggésben áll a műszaki paraméterekkel, dinamika tartománnyal.

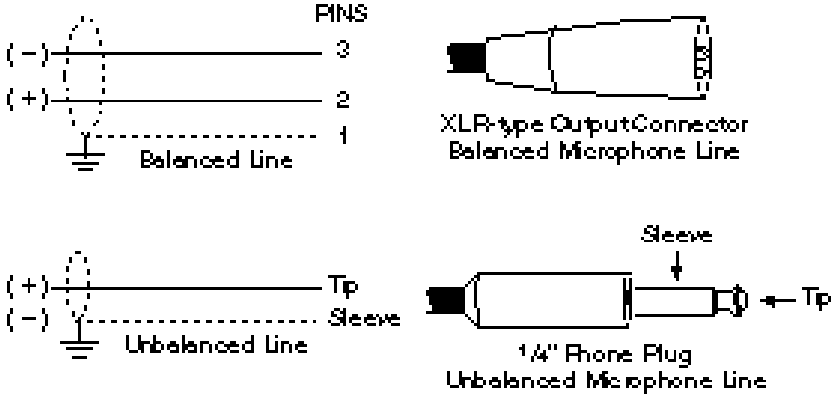


Különböző méretű kapszulák frekvencia –és érzékenységtartománya



Különböző méretű kapszulák dinamikatartománya

A csatlakozók sokfélék lehetnek, elterjedt az ún. mini LEMO, az XLR és a JACK.



XLR és JACK dugó.

6.5.4 Kalibrálás

A mikrofon kalibrálása azt jelenti, hogy megmérjük az érzékenységet egy adott frekvencián, és esetleg a nyomásérzékenység frekvenciamenetét (pressure response) is egy adott amplitúdó szintnél. A kettőből a mikrofon működési tartománya meghatározható. Egyszerű zajszint méréshez csak az első megmérése is elegendő.
A három ismert kalibrálási módszer: a reciprocitás elve, az összehasonlító és a transzfer metódus ismert hangforrással.
Az érzékenységet üresjárásban mérjük, amikor a mikrofon kimeneti feszültségét elosztjuk a membránon fellépő hangnyomással. A lezárás ideális esetben végtelen impedancia. A mikrofon előerősítője, ami mindig részt vesz a mérésben nem végtelen impedanciájú. Ekkor a számításhoz szükség van az erősítésére és a bementi impedanciára, valamint a mikrofon kapacitás értékére is.
A *reciprocitás módszerében* nem kell referencia hangforrás és nagy pontosságú kalibrálás lehetséges (0,05 dB pontosságú a nyomásérzékenység beállítása). Egy kis csőre van szükség, egyik végén az M1 jelű adó mikrofon, a másikon az M2 jelű mérőmikrofon. Az adó mikrofon áramából, a vevő feszültségéből és az üreg térfogatából a két mikrofon érzékenységének a szorzata számolható. Ha egy harmadik, M3 jelűt is beveszünk a folyamatba, és lecseréljük egyszer M1-el aztán M2-vel, három ilyen szorzat fog előállni, amiből az egyes érzékenységek kiszámíthatóak. M3 helyett ismert hangforrás is alkalmazható.

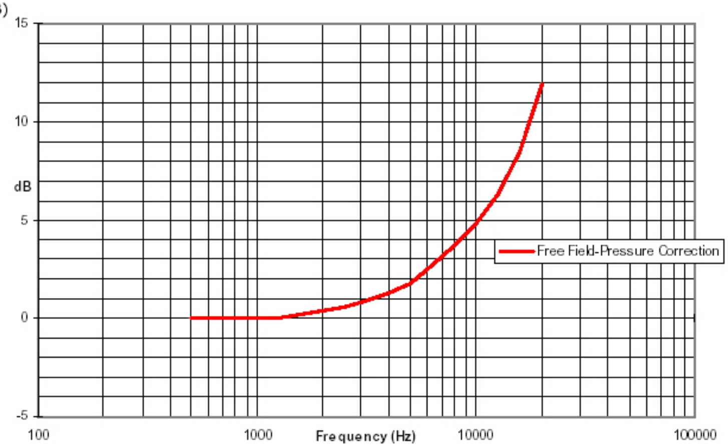
$$S_1 S_2 = \frac{U}{I Z_{akusztikai}}$$

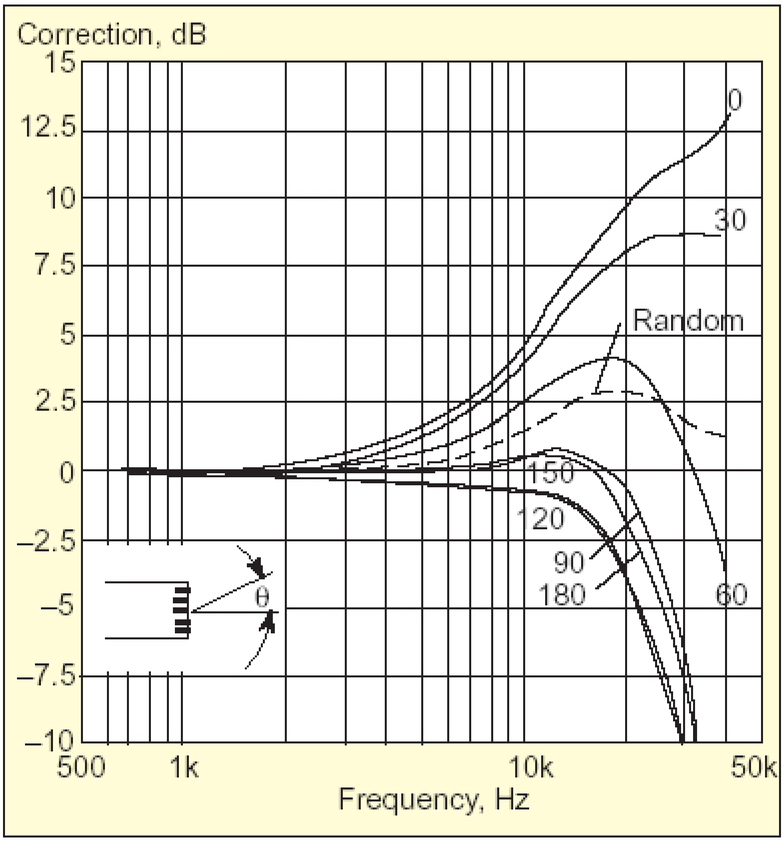
Ez a módszer az üresjárási érzékenységet adja meg, ami nem egyenlő az előerősítővel terhelt mikrofon érzékenységével.
Az *összehasonlító* eljárás a legismertebb módszer ismert mikrofon felhasználásával. Az ismert (standard) mikrofon és az ismeretlen ugyanakkora hangnyomásnak van kitéve, a keresett érzékenység a két kimeneti feszültségből egyszerűen adódik:

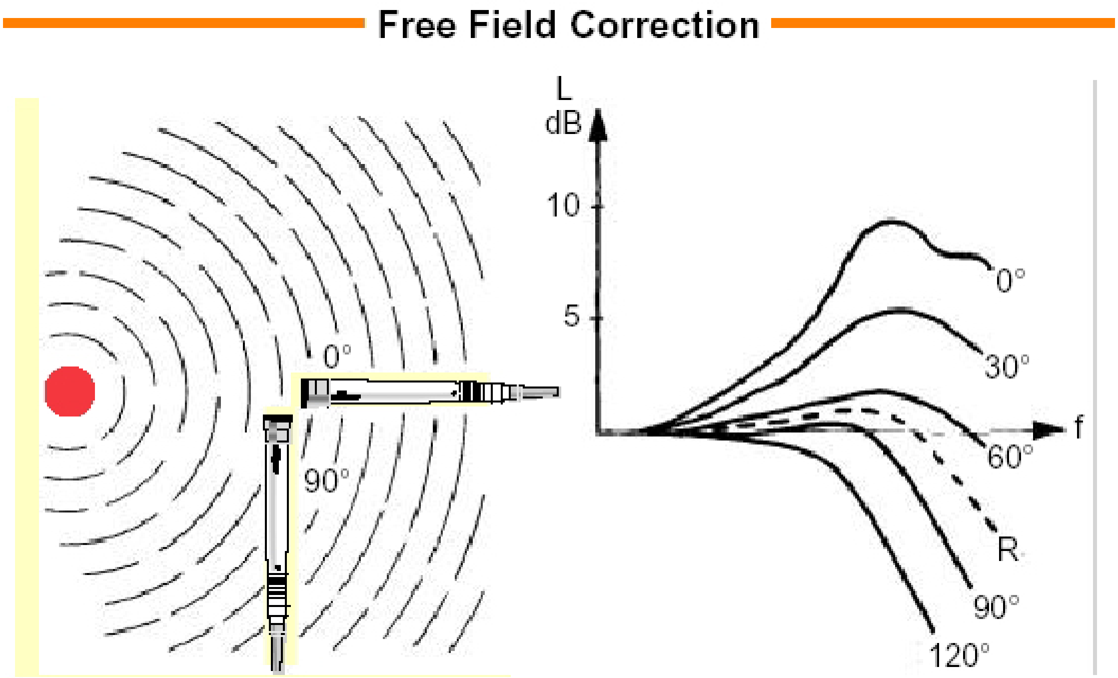
$$S_{ismeretlen} = S_0 \frac{U_{ismeretlen}}{U_{ismert}}$$

Ha az ismert mikrofon egyenes frekvenciamenetű, akkor süketszobában felvehető vele az ismeretlen szabadtéri frekvenciamenete is. A legtöbb kalibráció a nyomásérzékenységet adja meg. Szabadtéri méréseknél a membrán zavarja a teret magasabb frekvenciákon, amitől megnő a nyomás a membránon (nagyobbat mérünk a ténylegesnél). Ennek eltüntetésére a free-field korrekciós görbék gyárilag adottak minden típushoz.

Frequency (Hz)	Correction (dB)	Frequency (Hz)	Correction (dB)
10	0	500	0
12.5	0	630	0
16	0	800	0
20	0	1000	0
25	0	1250	0
31.5	0	1600	0.2
40	0	2000	0.4
50	0	2500	0.6
63	0	3150	0.9
80	0	4000	1.3
100	0	5000	1.8
125	0	6300	2.7
160	0	8000	3.7
200	0	10000	4.8
250	0	12500	6.3
315	0	16000	8.5
400	0	20000	11.9







Free-field kalibrációs adatlap és diagramok.

A *transzfer* módszer egyszerű és gyors megoldás, mely 0,2 dB-es pontosságot tesz lehetővé. A legelterjedtebb az 1000 Hz-es 94 dB-es pisztonfon használata (ld. részletesen a hangszintmérőknél). Létezik egy lehetőség, ami lehetővé teszi az üresjárási mérést úgy, hogy kiküszöbölhető az előerősítő feszültség vesztesége, melynek oka annak bemeneti kapacitása (ún. insert voltage technika). A mikrofont egy ismert hangnyomású térbe rakjuk (üregbe) és lejegyezzük a kimenti feszültségét. Majd a hangforrás leállítjuk, de az üreget nem távolítjuk el és a mikrofon kapszulára a forrás frekvenciájával megegyező frekvenciájú feszültséget kapcsolunk (ez az insert voltage). Addig állítjuk ennek erősségét, amíg ugyanakkor kimeneti feszültséget nem kapunk a mikrofon kivezetésein, mint a hangforrás esetén. Az insert feszültség osztva a hangnyomással adja az üresjárási érzékenységet. A feszültségveszteség az előerősítőn mérhető.
Ahhoz, hogy a relatív kapacitásváltozás nagy legyen, azaz nőjön az érzékenység, a mikrofon és az azt követő erősítő is kis kapacitású kell legyen. Ezért az első erősítőfokozat, a preamp egybe van építve és nagyon közel van az átalakítóhoz. Továbbá, a kis kapacitású mikrofon nagy terhelő impedanciát igényel, hogy alacsony legyen az alsó törésponti frekvenciája. A preamp tehát impedancia konverter is: alacsony impedanciát mutat a kimeneti kábel felé, amelyen keresztül a jel kimegy a következő fokozatba.
Az érzékenység frekvenciamenetének van felső és alsó határfrekvenciája is, noha alapjában csak felsőnek kéne lennie (elvben). Magasabb frekvenciákon, az érzékenység arányos a polarizációs (töltő) feszültséggel, mert ez tölti fel az átalakító fegyverzeteit. Ugyanakkor fordítottan arányos az összkapacitással. Minden járulékos kapacitás, pld. az előerősítő, ami hozzáadódik az átalakítóhoz, rontani fogja az érzékenységet.
Alacsony frekvenciákon az érzékenység frekvenciafüggő és alsó töréspont definiálható a -3 dB-es ponthoz. Alacsonyabb értékhez minél nagyobb bementi impedanciájú előerősítő szükséges. Jobb minőségű eszközök alsó töréspontja 2 Hz körüli, de lejjebb is lehet menni. A DC polarizációs feszültség csökkentése tehát érzékenység veszteséggel jár.
Nagy hangnyomáshoz használatos mikrofonok és kis frekvenciások kalibrálása különleges eljárásokat igényel.

6.5.5 Az átviteli függvények összefoglalása

Összefoglalva a megismert eszközöket, az alábbi csoportosítást tehetjük:

1. aluláteresztő (LPF) jellegű eszközök
   fejhallgatók
   kondenzátor mikrofon
2. sáváteresztő (BPF) jellegű eszközök
   tölcséres (dinamikus) hangszóró
   dinamikus mikrofon
3. felüláteresztő (HPF) jellegű eszközök
   dinamikus hangszóró
   szalagmikrofon

Az aluláteresztők felső törésponttal rendelkeznek, másodfokú eséssel. A sáváteresztőket a sávközép frekvenciával jellemezzük, mindkét oldalon elsőfokú eséssel. A felüláteresztőknek alsó töréspontja van másodfokú eséssel.

$$LPF = K\frac{1}{1 + D\frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

$$BPF = K\frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + D\frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

$$HPF = K\frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{1 + D\frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

A K egy az erősítéstől függő lineáris konstans, a görbe jellegét nem, annak csupán magasságát befolyásolja (a nagyobb K felfelé tolja a görbét). Az s a Laplace-transzformáció betűje, D pedig az ω_0 rezonanciánál lévő kiemelés. Ez határozza meg a pontos menetét a görbének a töréspontnál: lehet monoton eső, vagy kiemelkedéssel rendelkező stb. Jól látható, hogy mindhárom esetében az ω_0 a fontos paraméter, ami LPF és HPF esetben a töréspont, BPF-nél pedig a sávközépfrekvencia értéke.

7. Hangszintmérés

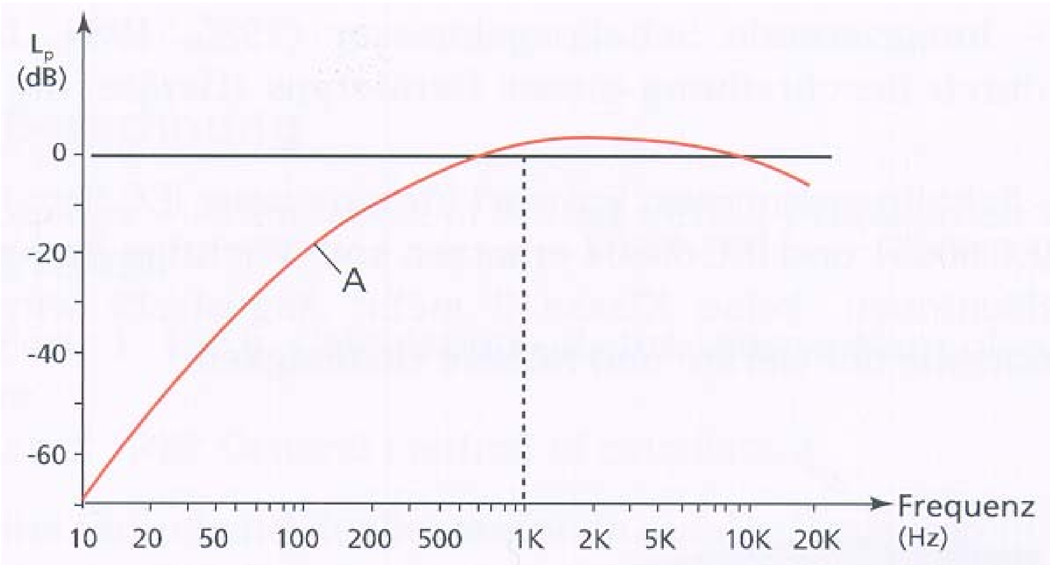
A hangszintmérés feladata a zajvédelemben jelentős (hallásvédelem, teremakusztika, környezetvédelem, noise control). Ezen a területen különösen lényegesek a szabványok, egyetlen mérést sem lehet elvégezni azok ismerte és betartása nélkül. A nemzetközi koordinátor szervezet neve International Noise Control Engineering, (INCE). A készüléket zajszintmérőnek is 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).
A feladat, hogy szubjektív érzetet objektív mérőszámmal adhassunk meg. A hallásnál már láttuk, és itt is figyelembe kell venni, hogy alacsony és magas frekvenciákon érzéketlenebb, azaz kevésbé zavarható, mint közepes frekvenciákon. Ez az állítás egyre kevésbé igaz, ahogy a jelszintet növeljük.
Amikor a hangnyomásszintet mérjük, négy alapvető üzemmódja 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

   A további három nemzetközileg szabványosított súlyozó görbéket használ. Ezek közelítik a hallás érzékenységét, és aszerint súlyozzák a frekvenciakomponenseket. A leggyakrabban használt dB(A) súlyozó görbe a kis frekvenciák felé közelítve egyre kisebb súllyal veszi figyelembe a mélyfrekvenciás komponenseket. Ez egyrészt helyes, hiszen ott érzéketlenebb a fül, és az ott lévő zavarok kevésbé zavaróak. Járulékos következmény, hogy az eredmények jobbak, mint lineáris esetben (amennyiben zajmérésről van szó), ezért gépállapotfelügyelethez, környezetvédelemhez előszeretettel alkalmazzák, mert ugyanazon körülmények között mérve alacsonyabb számértéket ad a lineárisnál. Kis hangnyomásszinteknél használható.

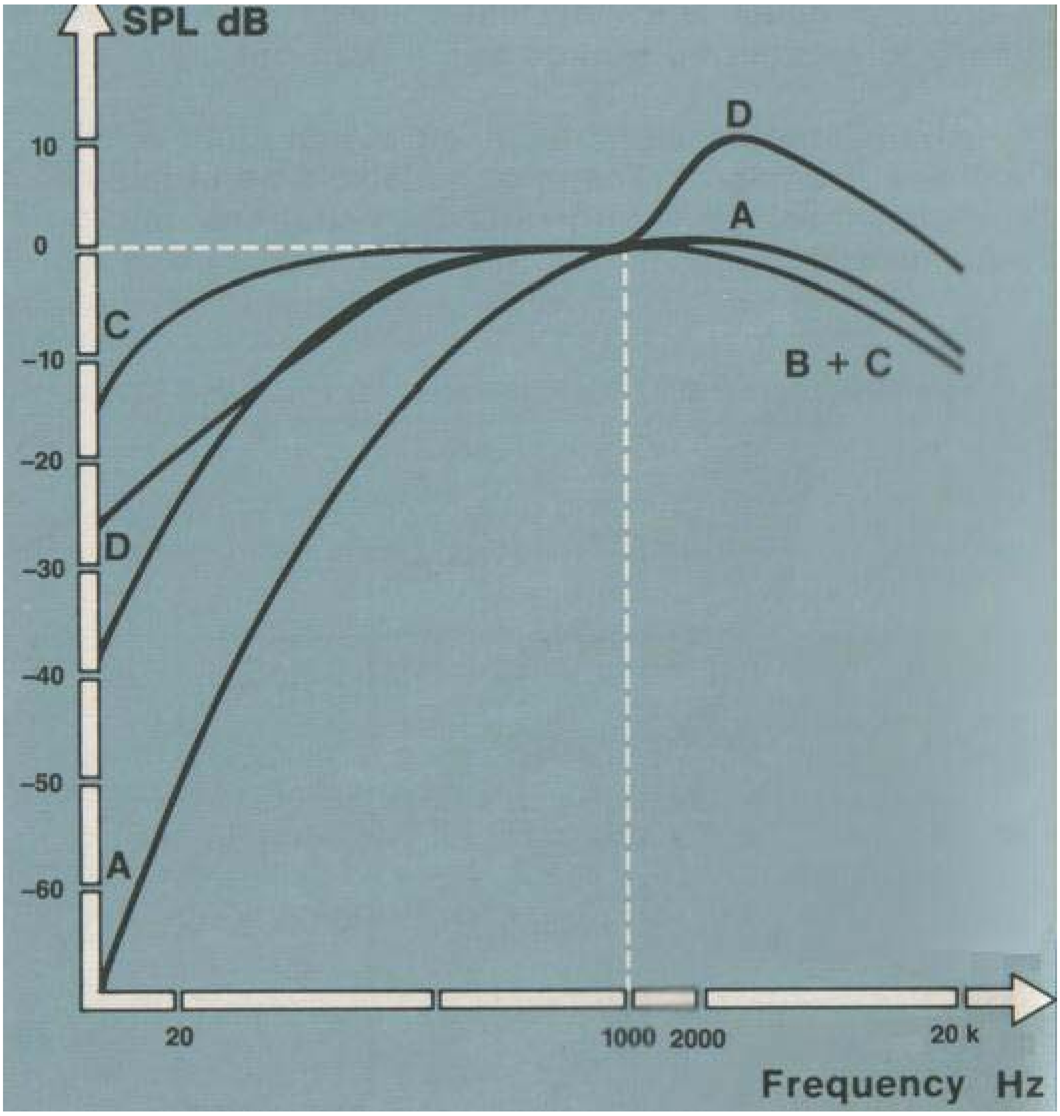


A dB(A) súlyozógörbe.

3. dB(B) súlyozás

   Hasonló célú és lefutású görbe, de közepes hangnyomásszinteknél használható.

4. dB(C) súlyozás
Nagy hangnyomásszinteknél használandó, amikor már a nagyszintű azonos hangosságú görbéket kell közelíteni. Utóbbi kettőt tiszta hangú mérésekre tervezték, zajokra nem pontos az eredményük. Létezik egy ritkán használatos dB(D) skála is repülőgépmérésekhez. A Súlyozott méréseknél is dB a mértékegység, de zárójelben utána írjuk a görbe jelét is.

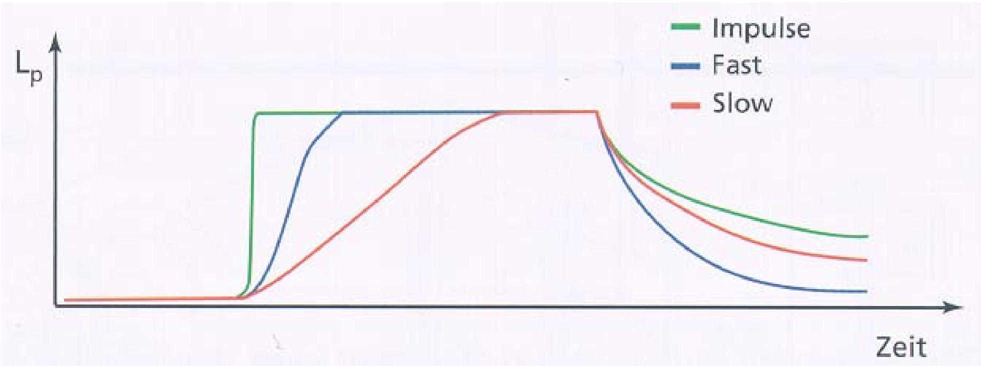


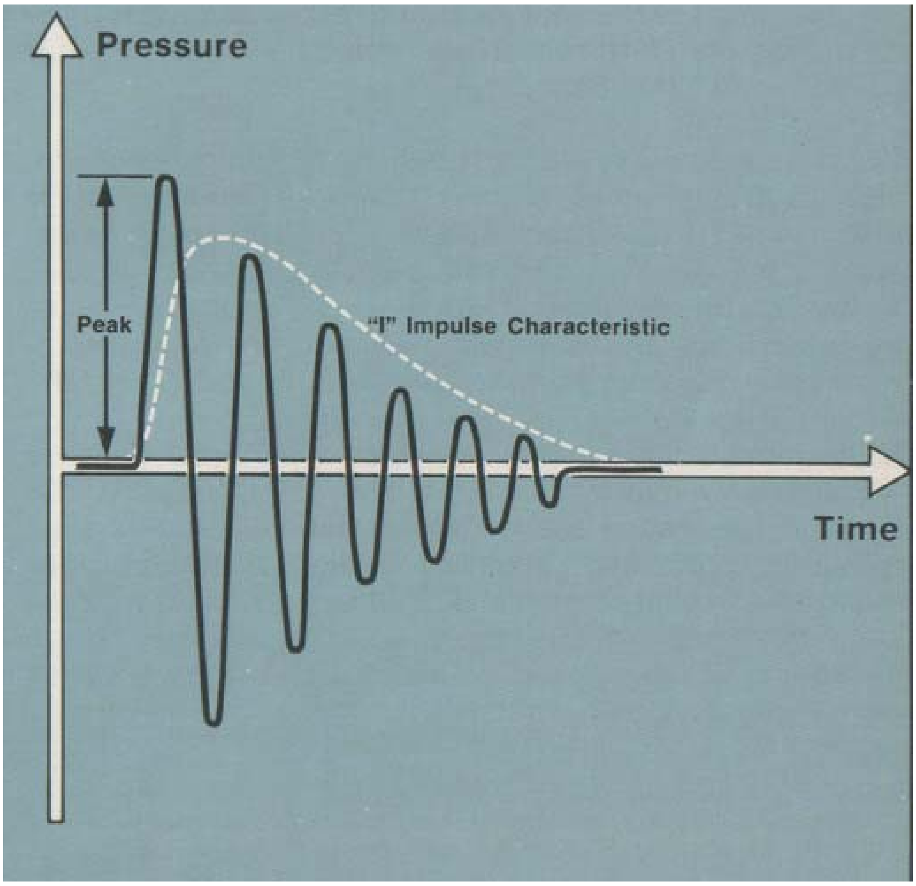
A súlyozógörbék összehasonlítása.

A készülék üzemmódját nem csak frekvenciában kell kiválasztani, hanem időben is. Itt három gyakran használatos üzemmód van:
1. gyors (FAST)
Analóg 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 is ez a helyzet, csak nem a mutató fog ugrálni, hanem a számjegyek.

2. lassú (SLOW)
A gyors üzemmód ellentéte, csillapított mutatómozgással, nagy időállandójú (1 sec.) integrálással (átlagolással).

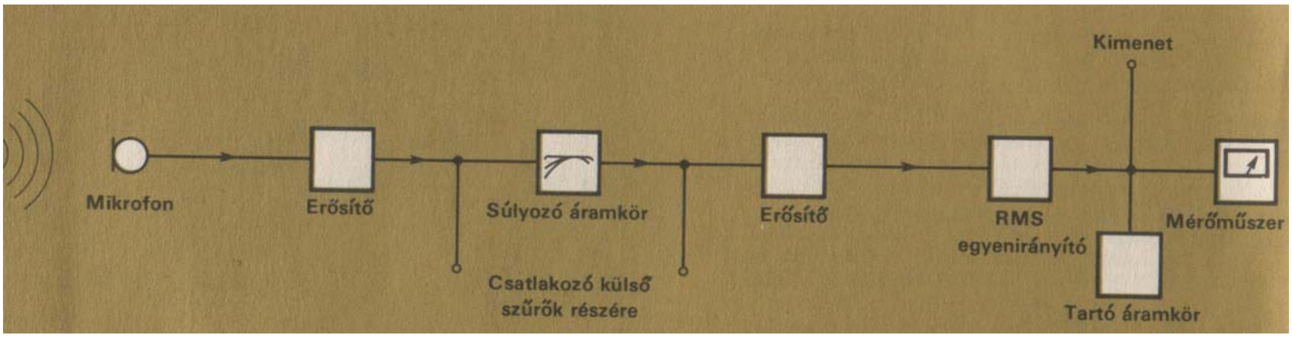
3. impulzus (IMPULSE)
Speciális üzemmód, 1 sec-nál rövidebb jelenségek mérésére. Ilyenkor a fül érzékenysége csökken (nincs elég ideje érzékelni a hangot) és a hangosság érzékelése kisebb a valóságos hangerősségnél. Ilyen jelhez azt szeretnénk, ha a műszer is így viselkedne, ugyanakkor a csúcsértéket mindenképpen mérje és tárolja el (PEAK). Az átlagolás a csúcsérték és/vagy egy 35 ms-os időállandó alapján történik. A régi analóg műszerek hibája volt, hogy effektív és csúcsértéket nem tudtak egy időben mérni, a mai modern digitális analizátorok erre képesek és ez nagy előnyük.





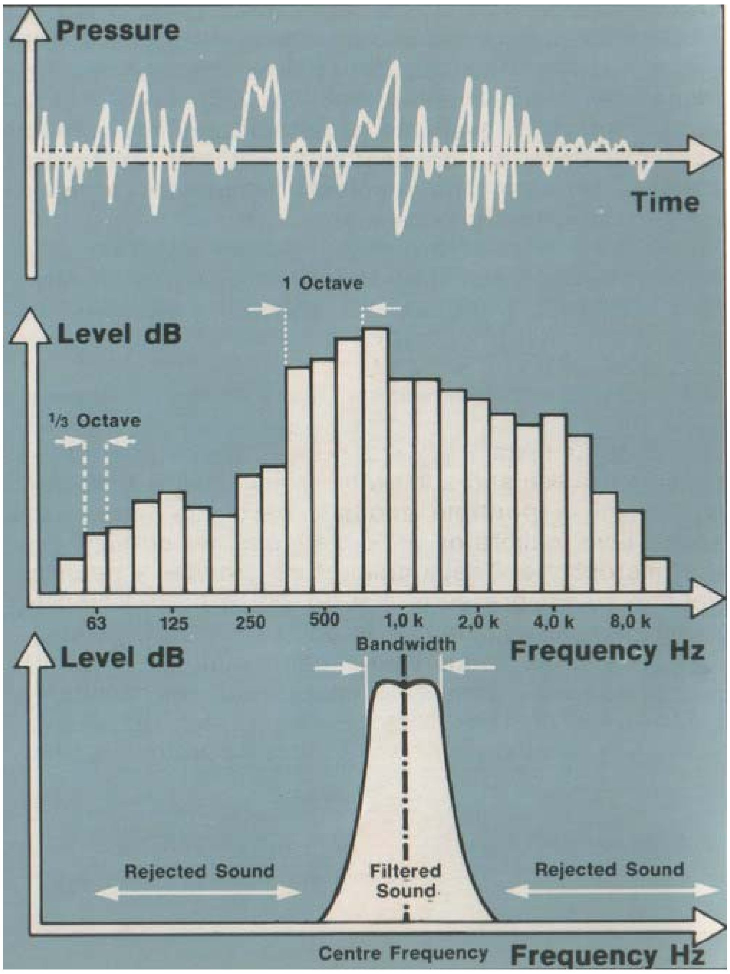
A különböző időablakok lefutása.

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



A hangnyomásszintmérő blokkvázlata.

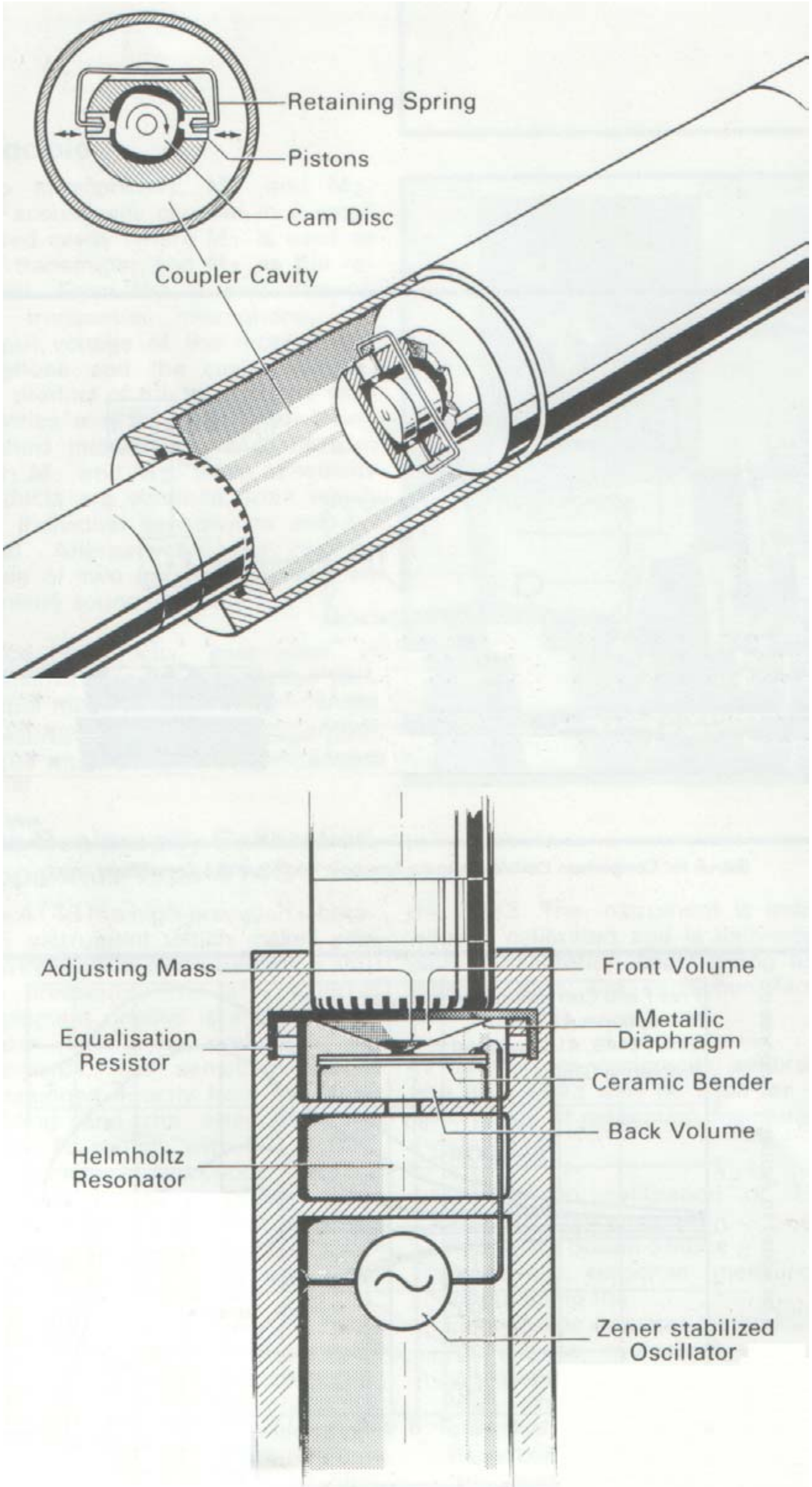
A készülékek az RMS értéket mérik (négyzetes középérték), mely közvetlen összefüggésben áll a jel energiatartalmával. A csúcsszint mérése és tartása manapság alapkövetelmény. A drágább digitális berendezések (melyek meghaladják az 1 millió forintot is) rendelkeznek beépített FFT analizátorral is. A mért jel spektrumát oktávsávban (1/1 octave band) vagy a jobbak már tercsávban (1/3 octave band) is képesek valós időben felrajzolni. Az 1 kHz középfrekvenciájú oktávszűrő 707 és 1414 Hz között enged át.



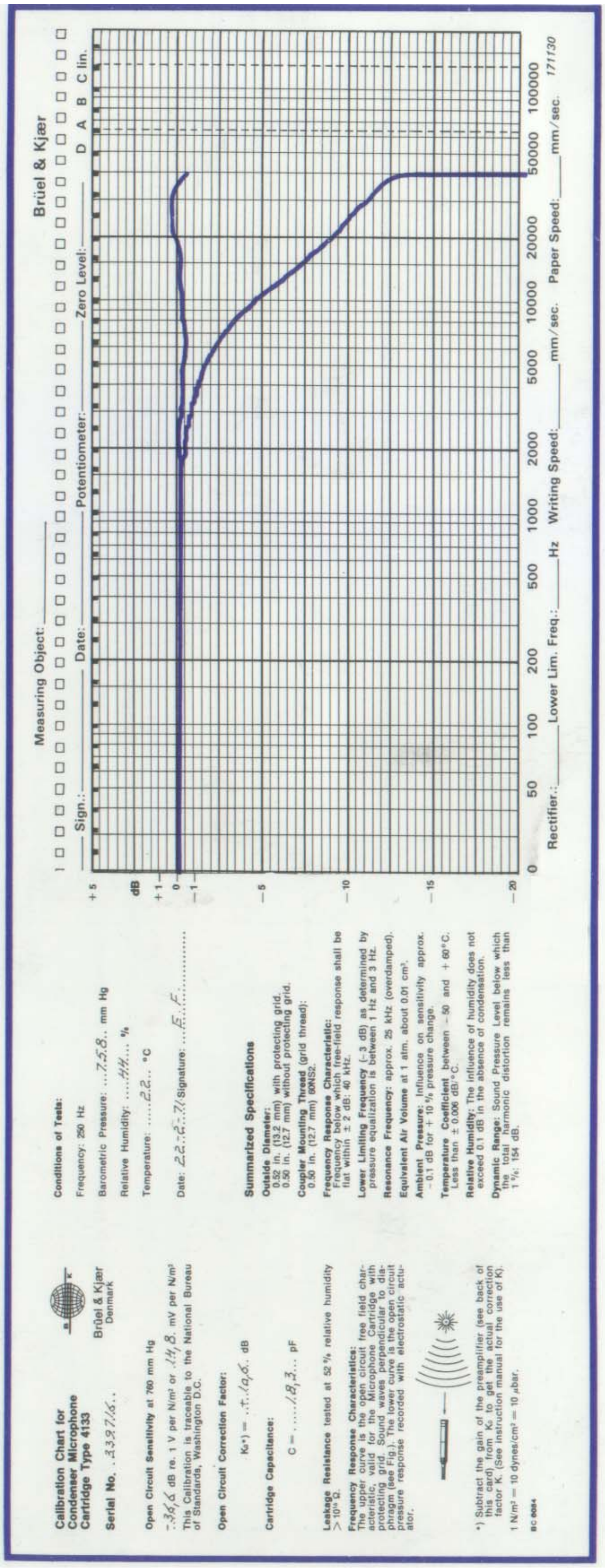
Oktáv -és tercsáv analízis a hangnyomás időfüggvényéből. Alul az esetlegesen alkalmazott szűrő hatása látható.

A műszer és a mikrofon együttesének *kalibrálása* alapvető feladat, különben nem fog hiteles eredményeket szolgáltatni. Ennek egyszerű módja az ún. referencia hangforrás használata (reference sound source), régebbi elnevezésével a *pisztonfon*. Ez egy ökölnyi méretű, elemes eszköz, egyik végén pont a mikrofonnak megfelelő nyílással. Ide kell beilleszteni a készülék mikrofonját, majd a pisztonfont bekapcsolva megmérni annak hangnyomásszintjét. Ezek az eszközök szabványos, általában 94 dB-es 1 kHz-es szinuszjelet bocsátanak ki, tehát ezt kell mérnie a műszernek is. Ha nem, akkor a kalibráció során módosítani kell azt, vagy az értékeket korrigálni. A pisztonfont is hitelesíteni kell, de ez a gyártó dolga, a felhasználó elhiheti, hogy abból megfelelő hang jön ki.

A Brüel&Kjaer 4230 (fent) és a 4220 pisztonfon, kalibrációs adatlappal, légnyomásmérővel, mahagóni dobozban. Utóbbi 250Hz-s jelet ad ki 124 dB±0,2 dB pontossággal. Külső DC forrással 30 Hz-320 Hz között is működtethető és rendelkezik ½, ¼ és 1/8 collos adapterekkel is. A 4230 hasonló pontosságú, 1 kHz-es 94 dB-es forrás.

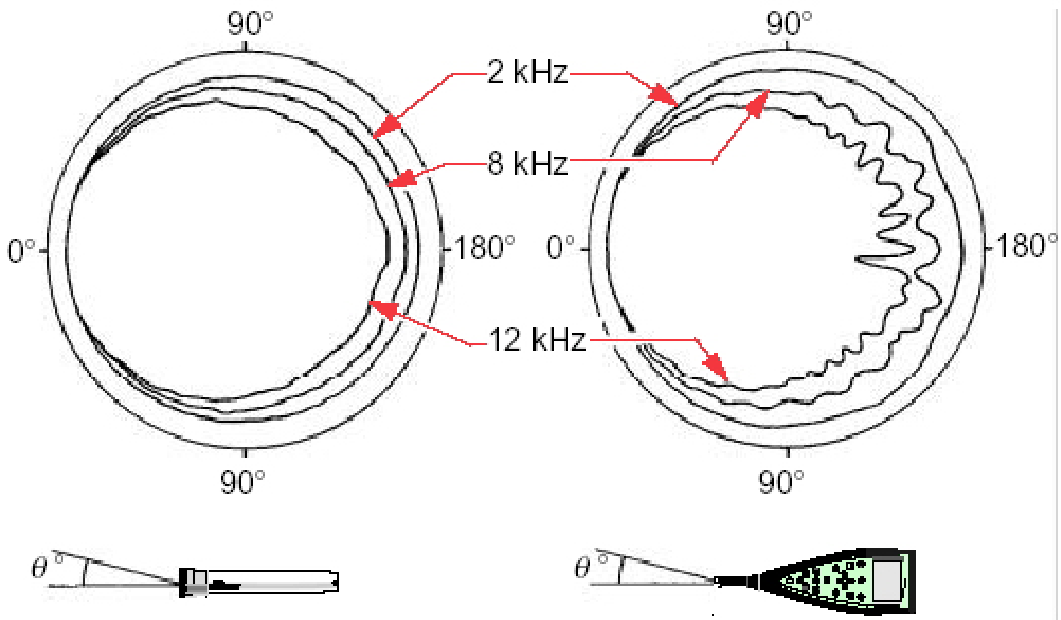


A pisztonfon és a bele illesztett, hitelesítésre váró mikrofon kapcsolata.



Kalibrációs adatlap kondenzátor mikrofonhoz.

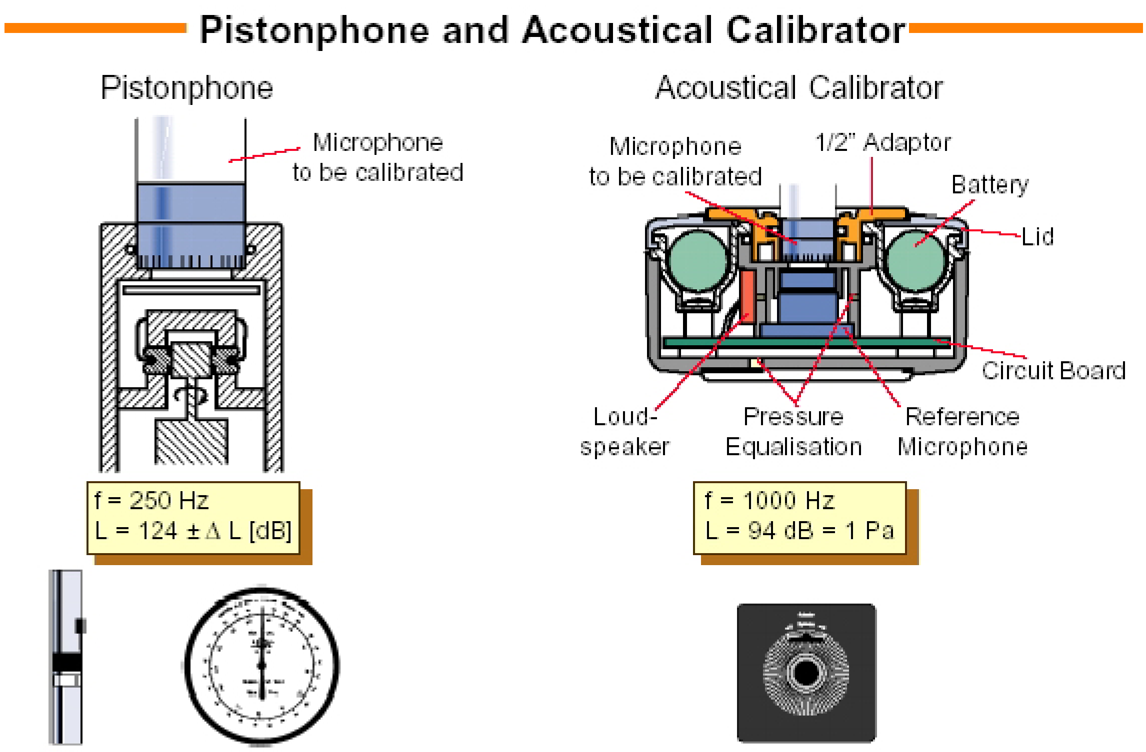
Directional Characteristics



A zajszintmérő hatása az iránykarakterisztikára.

Acoustic Calibration

Kalibrálás elvégzése kalibrátorral vagy pisztonfonnal.



A kalibrátor és a pisztonfon felépítése.

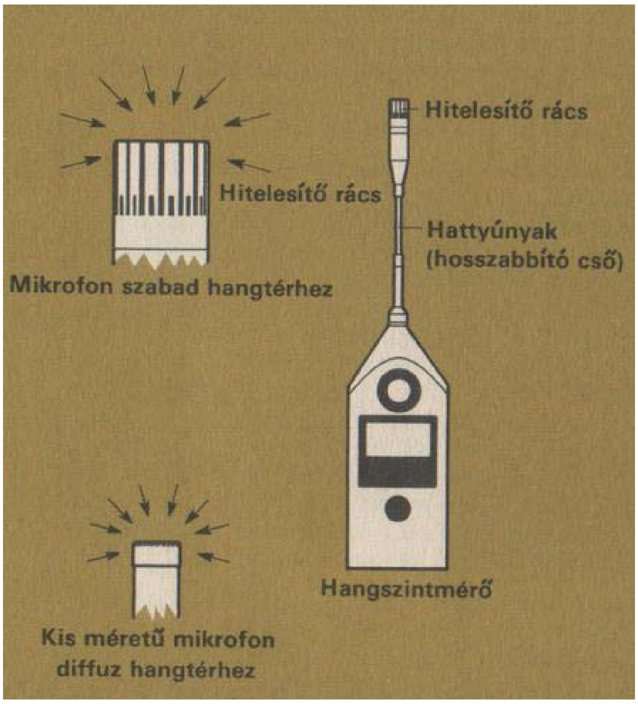
7.1 Hangterjedés a levegőben

Azt már láttuk, hogy kétszeres távolságban a forrástól az SPL-amplitúdó a felére esik (-6 dB). Az ilyen hangteret szabadtérinek (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 helység tetszőleges nagyságú 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 mérőhelység, a hangforrások teljes akusztikai teljesítménye mérhető, gépek zajvizsgálata, mikrofonok diffuse-field átviteli függvénye vagy éppen utózengési idő bemutatókra alkalmas (hiszen nagyon lassan vész el az energia, a mélyfrekvenciák akár 10-15 másodpercig is megmaradhatnak!).
A normál helységek, a két szélső állapot között helyezkednek el. A nappali szobák, ahol sok a kárpitozott bútor, a vastag függönyök, szőnyegek vannak, sok könyv – ott az utózengési idő alacsony, a kicsempézett üres helységek (konyha, fürdőszoba) azonban visszhangos. A legjobb hangszigetelést akkor érhetjük el, ha az elnyelő anyag (pld. a függöny) a visszaverő felülettől (fal,

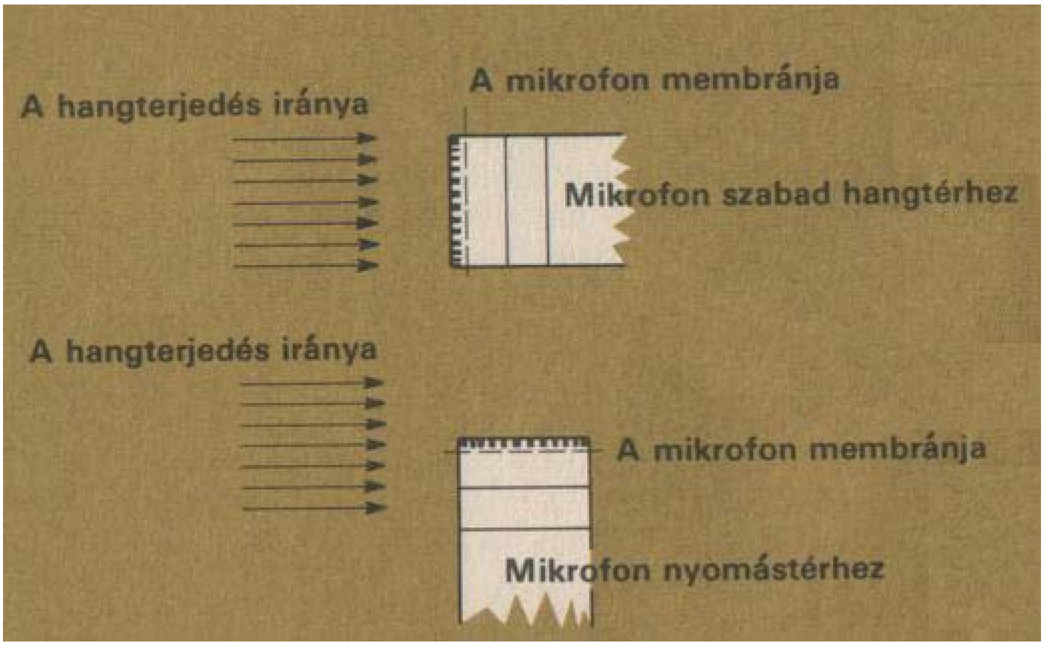
ablak) negyed hullámhossz távolságra van (ebből láthatóan ez frekvenciafüggő és merőleges beesést feltételez). A szőnyegek és függönyök leginkább a magas frekvenciákat csillapítják, mert ott mérhető össze a vastagság a negyed hullámhosszal – ezért a szomszédból inkább a basszusok dübörgése hallatszik át.
Jegyezzük még meg, hogy a közeltérben mérni nem könnyű és gyakran hibás eredményt ad. Túl nagy hullámhossz ugyanis megkerüli a mikrofont, és kisebb értéket mérünk a valóságosnál. Hasonlóan a távoltérben, 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.

7.2 Mérőmikrofonok

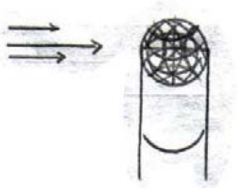
A mérőműszer legfontosabb eleme a mérőmikrofon. Ez szinte kizárólag kiváló minőségű, drága kondenzátor mikrofon. Elvárás a gömb karakterisztika, az egyenletes frekvencia átvitel (érzékenység), ami különösen diffúz méréseknél lényeges. A készülékek általában sok elemet igényelnek, hogy tápfeszültséggel lássák el a mikrofont, de léteznek már modern *prepolarizált* mikrofonok, amelyek ilyet nem igényelnek. Mindig ügyeljünk arra, hogy milyen kapszulát csatlakoztatunk, és ennek függvényében kapcsoljuk rá vagy le a DC feszültséget. A műszereknek szigorú iránykarakterisztikája is van, hiszen a készülék maga befolyásolja a hangteret, amelyben mér. Különböző minőségű osztályokba sorolják a szabványok a készülékeket, a legjobb minősítés a Type 0 osztály, de még az olcsóbbak is a Type 1-be beleférnek. 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 átvitellel. A mikrofon zavarja a hangteret, de saját zavarát kiegyenlíti. A szabadtéri mérésekhez alkalmas, ilyenkor a membránt a forrás felé kell fordítani méréskor.

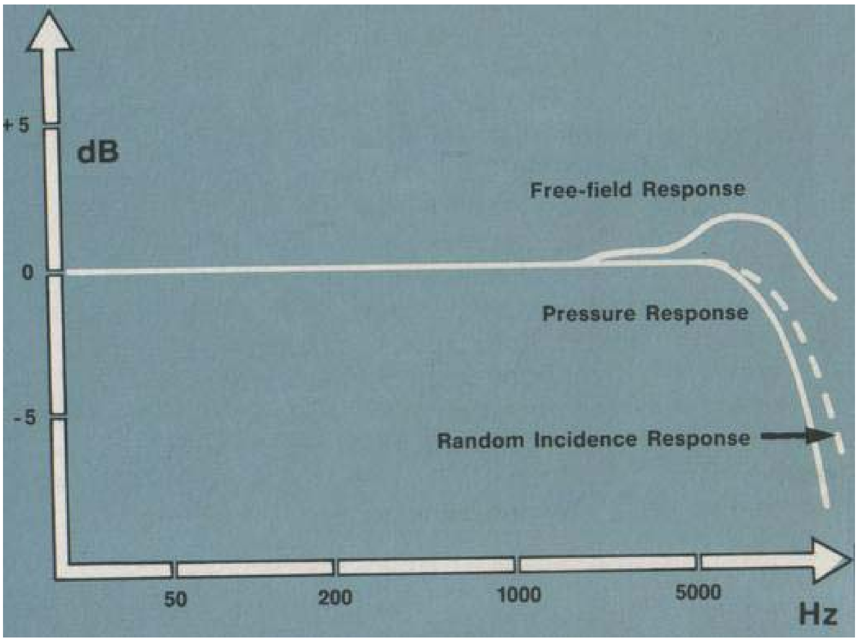


A mikrofonok másik típusa a nyomás érzékeny (pressure-field). Saját zavarát ez is kiegyenlíti és ezt beleszámítva irányfüggetlennek tekinthető. Ez az a típus, amelyet a terjedéssel azonos irányban kell elhelyezni, általában felfelé áll mérés közben. Ilyenkor ugyanis a már megismert „torlódás" hatása csekély, a hanghullámok nem merőleges érkeznek a membránra. Ellenkező esetben nagyobb nyomást mérne a membránon, mint a valóságos hangtér nyomása az adott pontban: a mikrofon méréskor erősen zavarná a teret. A hatás akkor sem nagy, ha a membrán mérete összemérhető a hullámhosszal.

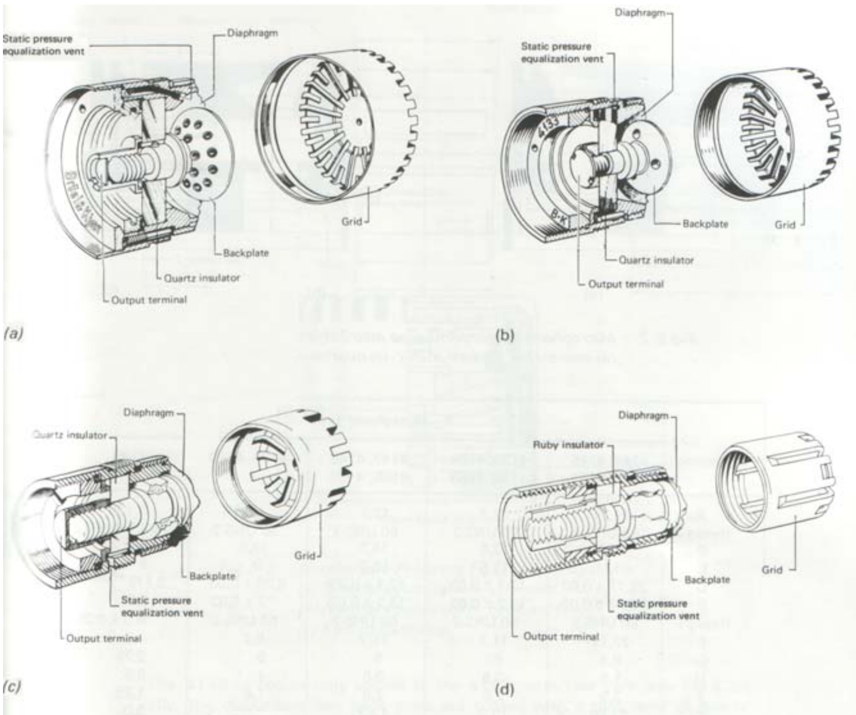



Kondenzátor mikrofon kapszulája

Ritkán használatos, a diffúz hangterekhez készített mikrofontípus a diffuse-field mikrofon, kisebb membránnal, ezáltal érzéketlenebb az irányokra (ami ilyen esetben a legfontosabb), de az érzékenysége is csökken. Általános célra fél collos, speciális diffúz méréshez negyed collos, a legnagyobb szabadterű mikrofonok egy collosak.
A mérőmikrofon tehát általában a három jellemző valamelyikével paraméterezett attól függően, hogy a három karakterisztikája közül melyik a legegyenletesebb. Az ábrán látható mikrofon tehát „random incidence" mikrofon (diffúz), mert a három különböző környezetben mért átviteli függvénye közül ez a legegyenesebb. Legtöbb mikrofonnál a random (diffúz) és a nyomás karakterisztika nagyon hasonló.

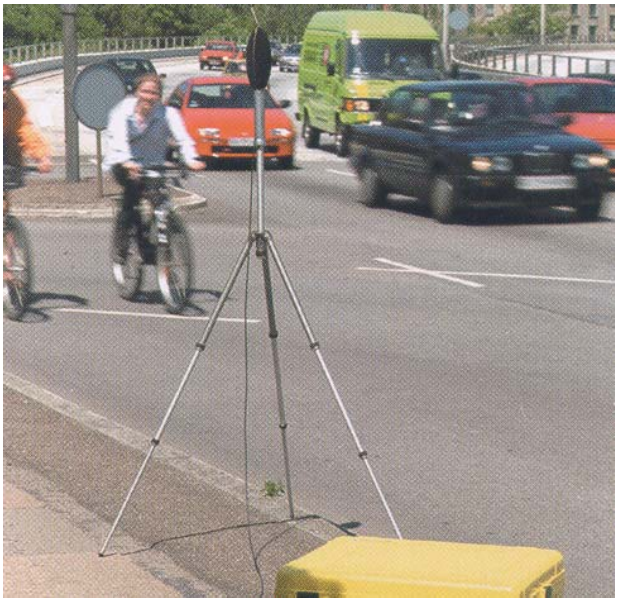


A méréseknél a környezeti hatásokat is figyelembe kell venni. A szél sustorgása ellen a szélvédő szivacs felhelyezésével védekezünk. Az eső veszélyes az elektronikára, így esővédő adapter is kapható. A műszerek kb. 90% relatív páratartalomig használhatók. A hőmérséklet tartomány az adatlapokból derül ki, -10-től +50 fokig azonban semmi probléma nincs. Rezgések vagy a külső elektromágneses tér zavara elhanyagolható.



Cut-away views of the four microphone sizes
(a) one-inch diameter
(b) half-inch diameter
(c) quarter-inch diameter
(d) eighth-inch diameter

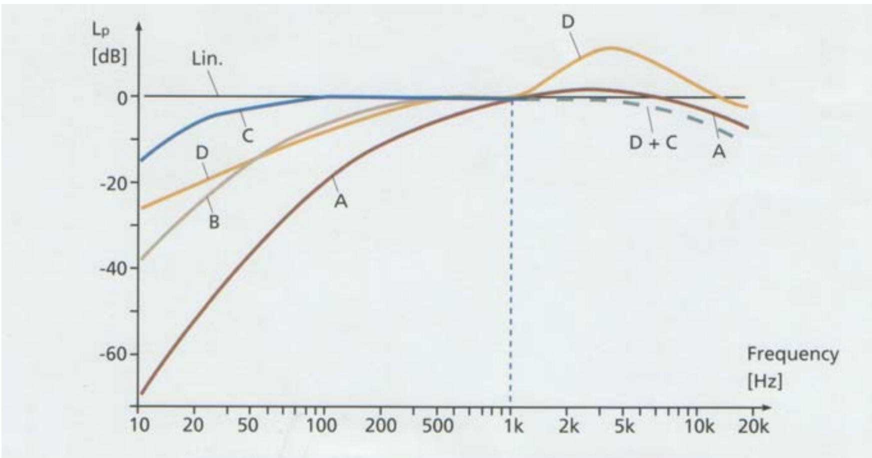
Egy, fél, negyed és 1/8 collos Brüel&Kjaer kondenzátor mikrofonok felépítése



Mikrofonok „in situ” analízis során. A mérések vége mindig a jegyzőkönyv elkészítése.

7.3 Mérhető jellemzők

Egy kombinált, digitális zajanalizátor rengeteg paramétert tud mérni és számítani. A legfontosabbak tekintjük át most.
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).



Change in Sound Level (dB)	Change in Perceived Loudness
3	Just perceptible
5	Noticeable difference
10	Twice (or 1/2) as loud
15	Large change
20	Four times (or 1/4) as loud

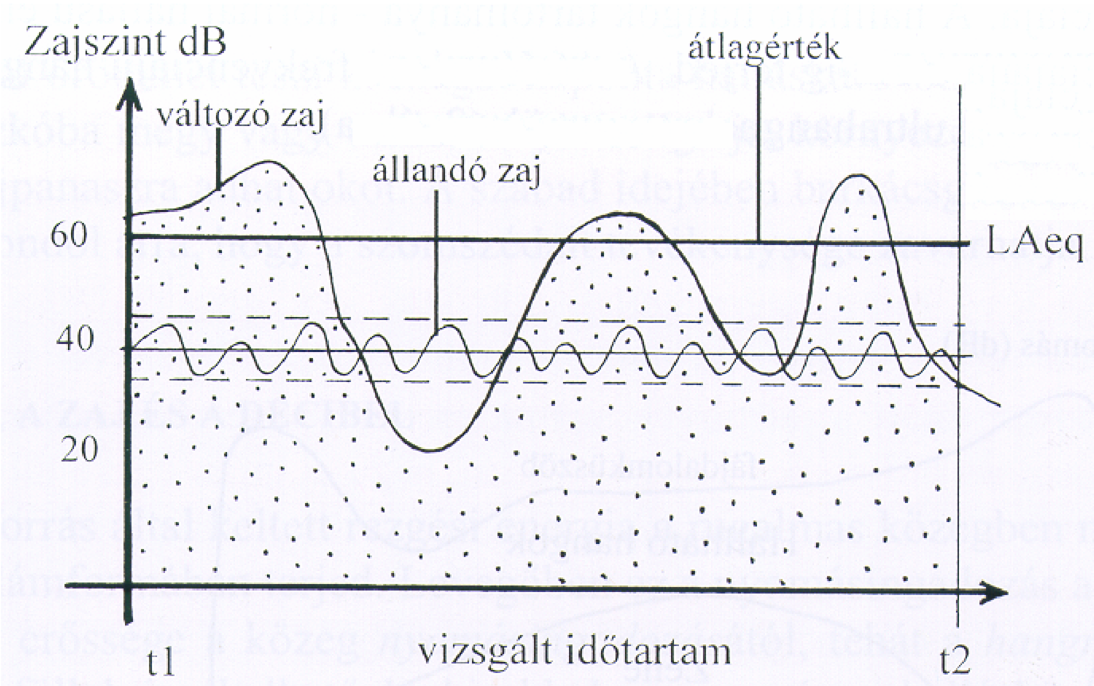
2. spectrogram
A drágább digitális készülékek oktáv és/vagy tercsávban képesek kirajzolni a szabvány által meghatározott módon és tartományokban a bejövő jel spektrumát.

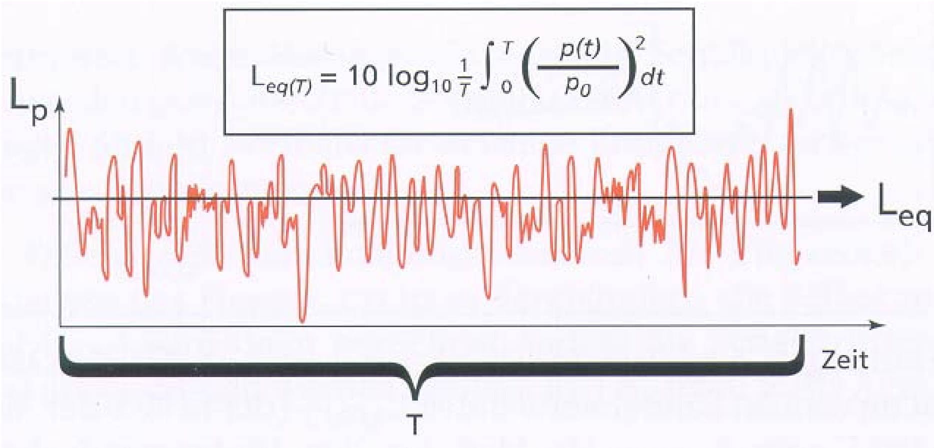
3. zajdózis
A zajdózis a zajszint és a hatásidő szorzata.

4. ekvivalens zajszint
Az egyik legfontosabb környezetvédelmi paraméter. 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 Continous Sound Level):

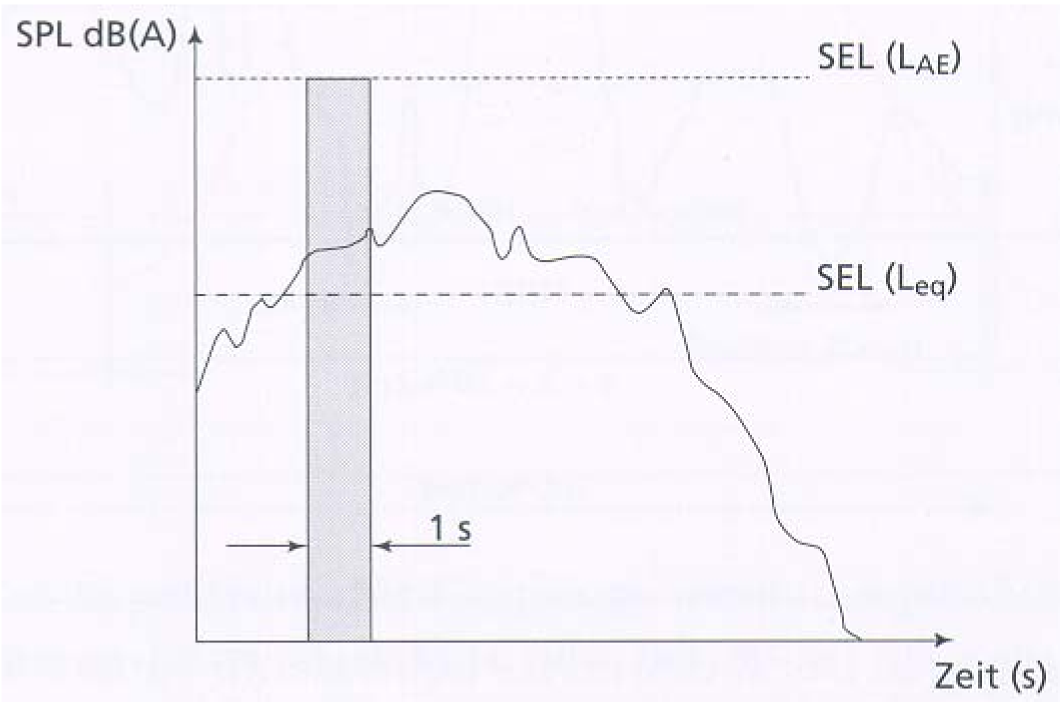
$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} \left(t_i 10^{0,1 L_i} \right) \right]$$

A képletben T a mérési időtartam, L_i az SPL-érték az i-dik időmintában, t_i a mintavételezés ideje, a mértékegység dB(A). 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 egyenzajú forrás szólt volna (ugyanakkora az energiája).





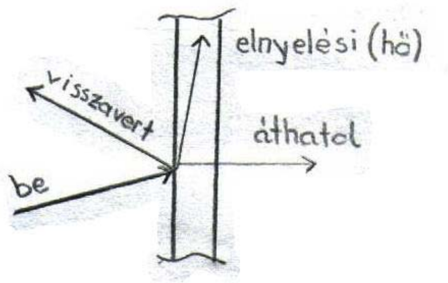
5. SEL
A rövidítés a Sound Exposure Level-ből származik. Az a szint (1 sec. alatt), melynek ugyanakkora az akusztikai energiája, mint az eredeti hangnak (T idő alatt). Magyarul, az egy másodpercre normalizált energia.



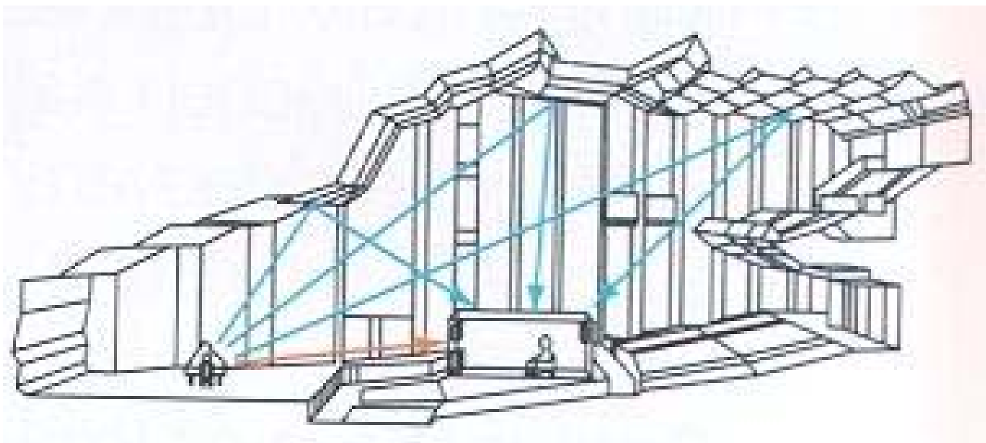
A SEL az 1 másodpercre normalizált zajenergia.

8. Teremakusztika

A teremakusztika külön a termek akusztikájával, hangzásával foglalkozik. A tervezés során a cél egyrészt a jobb hangzás, másrészt a hangszigetelés: zajmentesség ki- és befelé (be se jöjjön, de ki se menjen zaj).
A reflexió tárgyalásánál már láttuk, hogy egy akadályba (fal) ütköző hanghullám egy része visszaverődik, kisebb része áthatol azon, a legkisebb része pedig hő formájában melegíti azt.

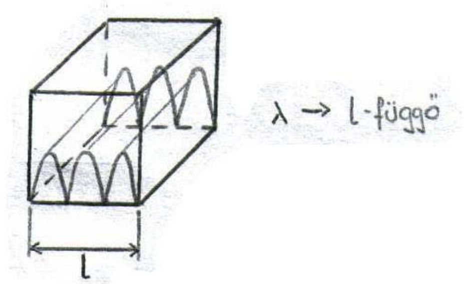


Ha a λ hullámhossz jóval kisebb a fal felületénél, a beesési- és visszaverődési szögekre, a hangutak kiszámításához alkalmazhatók a fénytörési törvények (pld. beesési szög = visszavert szög). Emlékezzünk rá, hogy 50 ms-nál található a visszhang-küszöb (ez kb. 17 méteres távolságnak felel meg), e felett visszhangot fogunk érzékelni. A visszhang káros jelenség, rontja a beszédérthetőséget és a hangzást is. Ugyanakkor a jó hangzáshoz visszaverődésekre szükség van, a süketszobának zeneileg nem jó az akusztikája (nem is ez a célja).

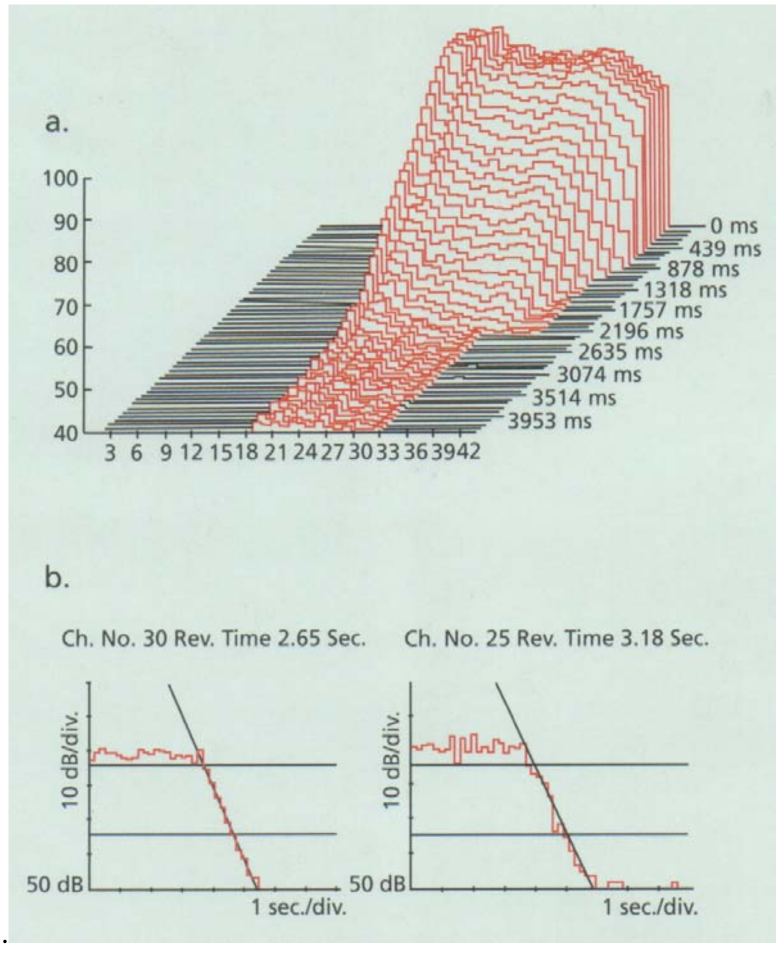


Többutas hangterjedéskor a visszaverődések hozzátartoznak a zeni élményhez.

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 módosukkal. A kialakuló hullámtér elsősorban a hullámhossz és a terem geometriájától függ – a módusai ugyanúgy tárgyalhatók, ahogy egy húr rezgései. A terem természetes módusai (rezonanciái) helyi maximumokat és minimumokat hoznak létre, amelyek a geometriai alaktól és mérettől és a hullámhossztól függ. Érdekessége, hogy nyomás duplázódása lép fel a reflektív felületeknél és nyomásmaximum a sarkokban. Gyakorlatilag a konkurensen, időben eltolódva megjelenő módusok azok, amelyek létrehozzák a diffúz teret.



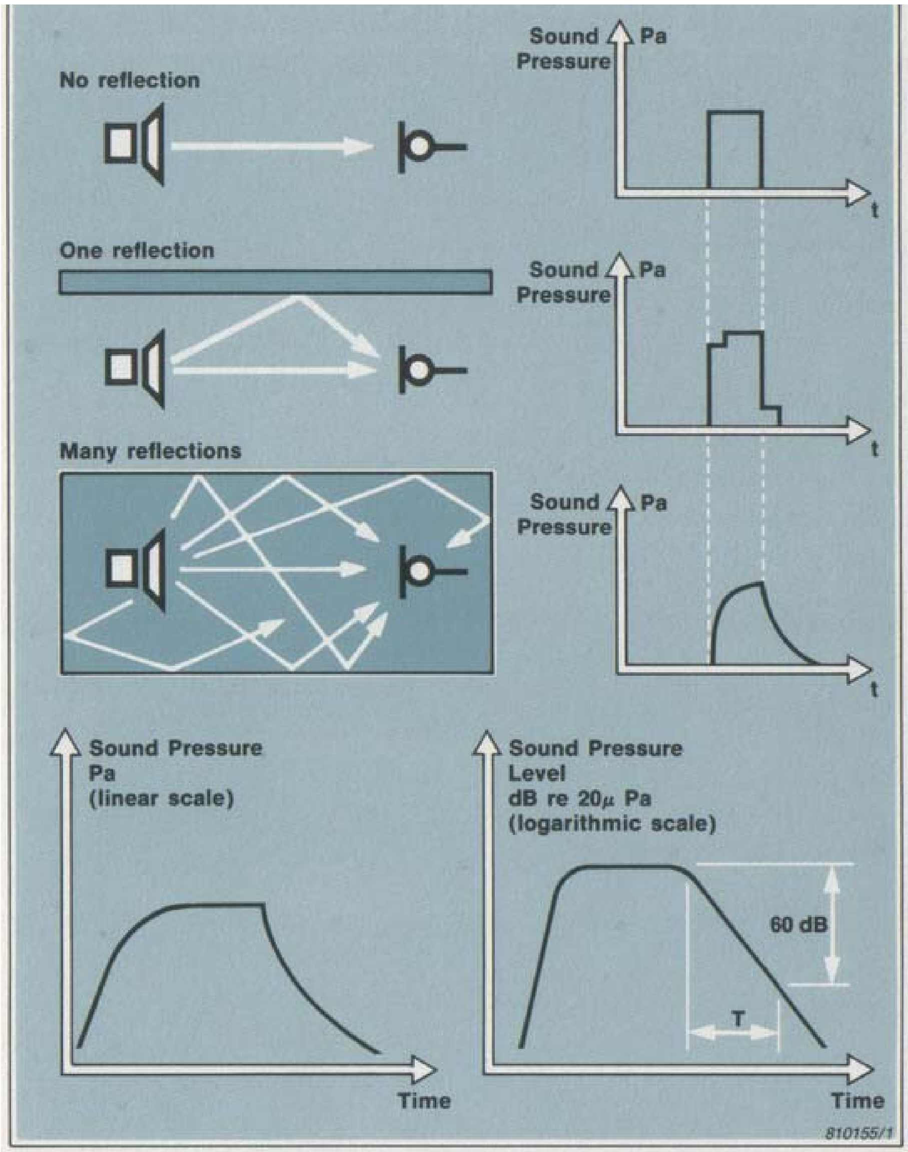
A falban elnyelt hangenergiát általában állandónak tekinthetjük és hő formájában szabadul fel. Mivel tökéletes visszaverődés csak elméletben van, a betáplált hangenergia egy teremben fokozatos elvész, ezért ha ott állandó energiaszintet akarunk tartani, akkor a veszteségeknek megfelelően azt állandóan 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.



Tipikus idő-frekvencia-amplitúdó térkép, mint 3D ábrázolás (a) és tipikus késleltetés-görbék adott csatornához (frekvenciához) adott utózengési idő mellett (b).

8.1 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).

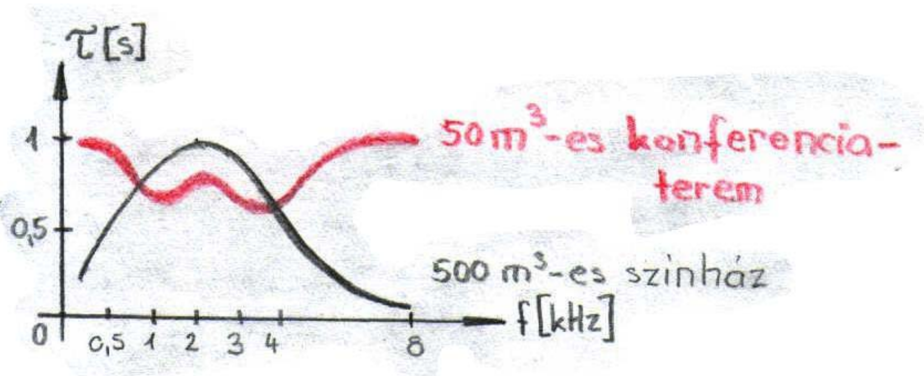


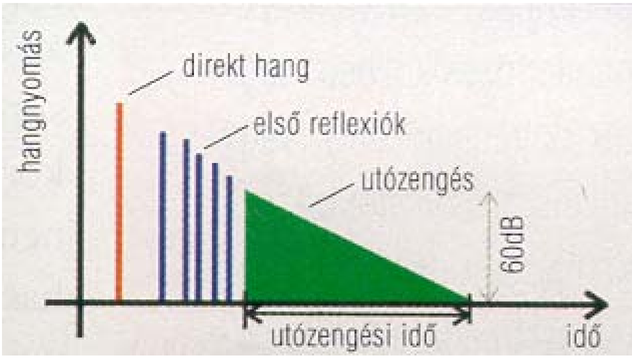
A reflexiók hatása a mért jelben. Az utózengési időt logaritmikus skáláról olvassuk le.

Az utózengési időről elmondhatjuk, hogy

- τ nagy, ha sok a reflexió (pl. fürdőszobában)
- τ kicsi, ha kevés a reflexió (pl. bútorok, könyvek között)
- τ frekvenciafüggő: kis frekvenciáknál hosszabb (nehezebb elnyelni)
- τ határozza meg a terem felhasználhatóságát
- a nagy τ rontja a beszédérthetőséget és a zene élvezhetősége is csökken
- zenéhez kb. τ_{max} = 1...3 s szükséges

Néha diagrammal is megadhatjuk értékét.





Az utózengési idő megadja a terem felhasználhatóságát. Egy TV stúdió, rádió stúdió 1 s alatti utózengési idővel rendelkezik, koncerttermek 1-2 s közöttivel, nagyobb templom belső tere 3 s-nál hosszabb idővel is rendelkezhet.

8.1.1 Az utózengési idő számítása

Az utózengési időt számíthatjuk és mérhetjük is. Létezik két empirikus (megfigyelésen alapuló, tapasztalati, azaz nem egzakt matematikai levezetésből adódó) formula. A τ értéke függ a terem térfogatától (V) és az ún. abszorpciótól (elnyelés). Nem túl kicsi τ esetén alkalmazzuk a *Sabine*-formulát, három lépésben:

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

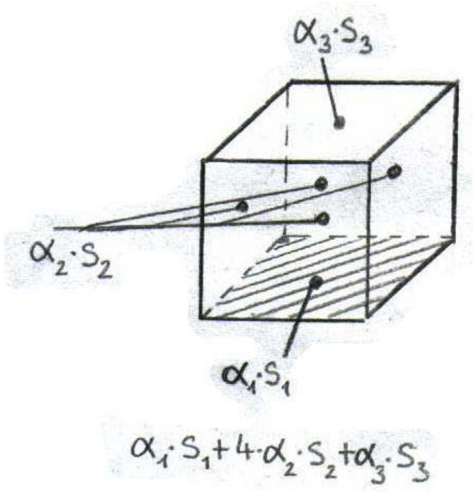
Ahol az utózengési időt sec-ban kapjuk meg, ha *V*-t köbméterben, *A*-t négyzetméterben helyettesítjük, a 0,161-es konstansnak pedig [s/m] a dimenziója.
Az *A* itt nem a felületet jelenti közvetlenül, hanem az abszorpciót:

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

Ebben a képletben az *S* változó már ténylegesen egy adott felületet jelent négyzetméterben, a hozzá tartozó elnyelési tényezővel (alfa). Az elnyelési tényező általában adott, táblázatból kikereshető. Gyakorlatilag arról van szó, hogy a különböző anyagú felületeket súlyozzuk. Így ha van egy betonszoba adott felülettel és alfával, akkor az azon nyitott faajtó felületét is a fa alfájával kell súlyozni. 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 elhanyagoljuk. Nagyobb *A* esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz, és egyre kisebb τ esetén is.
Kisebb τ esetén a másik használatos képlet az *Eyring*-formula:

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

ahol egy átlagos alfával dolgozunk:

$$\overline{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \ldots + \alpha_i S_i}{S_1 + S_2 + \ldots + S_i}$$

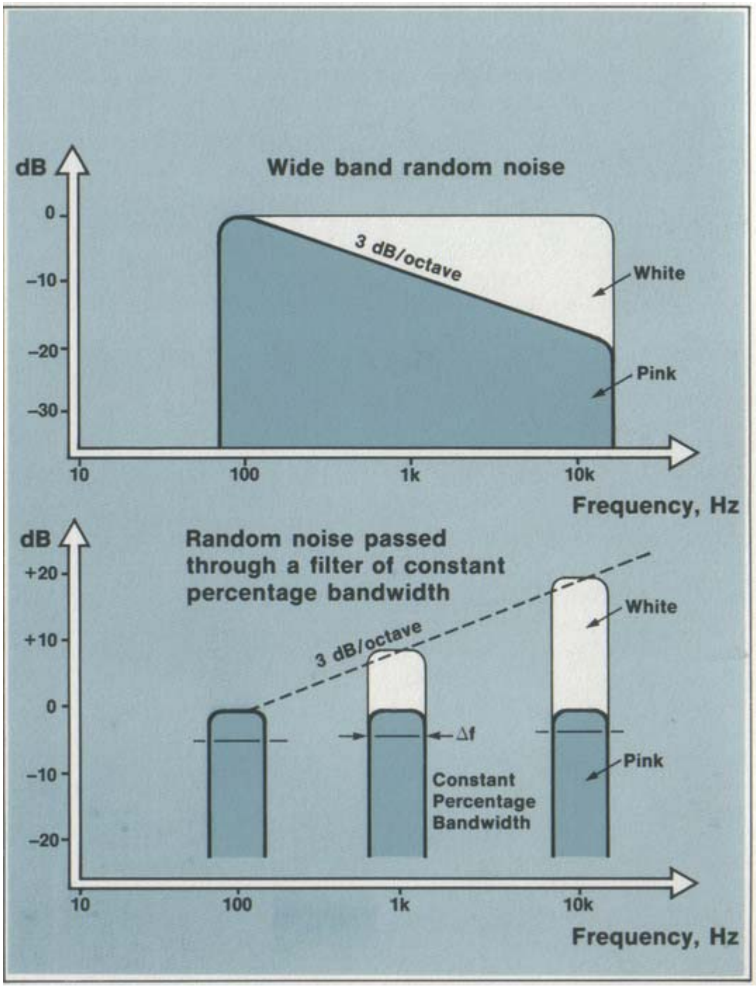
és

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

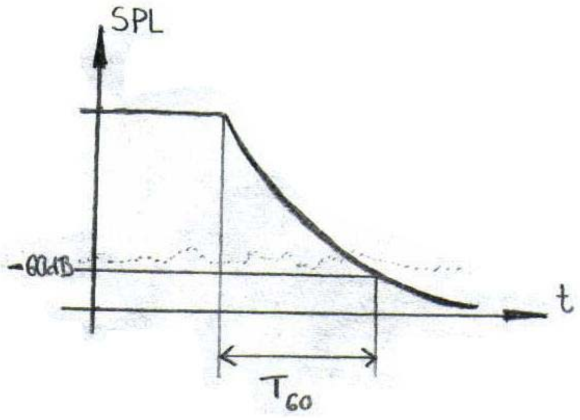
Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az α-k kb. egyelők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert süketszobára, ahol alfa értéke egy, τ-ra zérus jön ki.

8.1.2 Az utózengési idő mérése

Alapjában két módszer létezik a mérésre. A legjobb az *impulzusválaszos* mérés, amikor impulzussal gerjesztjük a termet (létezik kimondottan erre készült pisztoly-hangforrás, de egyszerű papírzacskó durrantás is megfelel). Majd 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 (esetleg rózsaszín zajt, ami a fehérzajnak -3dB/oktávval csökkenő verziója). A rózsaszín zajt akkor használjuk, ha az átvitel olyan szűrőn keresztül történik, melynek sávszélessége a frekvenciával arányosan nő, dupla sávszélességű lesz oktávonként. Ilyen szűrőbe egyre kevesebb energia kell ahhoz, hogy a közölt energia konstans maradjon, méghozzá pontosan -3 dB/oktáv. Az ilyen szűrők sávszélessége a logaritmikus tengelyen egyforma csak (lásd ábra). Ezek tipikus oktáv- vagy tercsávszűrők, melyek értelemszerűn változó szélességűek, ahogy egyre nagyobb frekvenciákon állítjuk elő. A hangforrás legyen 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 fehérzaj és a rózsaszín zaj spektruma (fenn), illetve azok oktávsávra szűrt változata és az energiatartalom.



Lehetőség van arra is, hogy a zajforrással impulzust adunk ki, de ekkor a grafikus eredmény nem elég, számításokra is szükség van. Ezen (ún. Schroeder) módszer előnye, hogy pontos és reprodukálható eredményeket ad, ráadásul gyorsabban mint a fenti „kikapcsolós" módszer.
Az így mért értéket T_{60}-al jelöljük. Azonban ekkor 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 hatvanashoz tartozót. Ilyenkor T_{40}-el ill. T_{20}-al jelöljük az értékeket. Ettől függetlenül a T a -60 dB-es ponthoz tartozik, az index a mérés határát mutatja (tehát 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.
Gyakran a mérés az utózengési idő változására irányul. Ilyenkor a hangelnyelő anyagok mennyiségét kell kiszámítani, ami adott csillapítást okoz egy teremben. Először ki kell számolni alfa segítségével, hogy mekkora felületre van szükség, azt be kell vinni a terembe majd folyamatos mérés mellett annak méretét lehet változtatni (in situ mérés).

8.1.3 Az elnyelés mérése

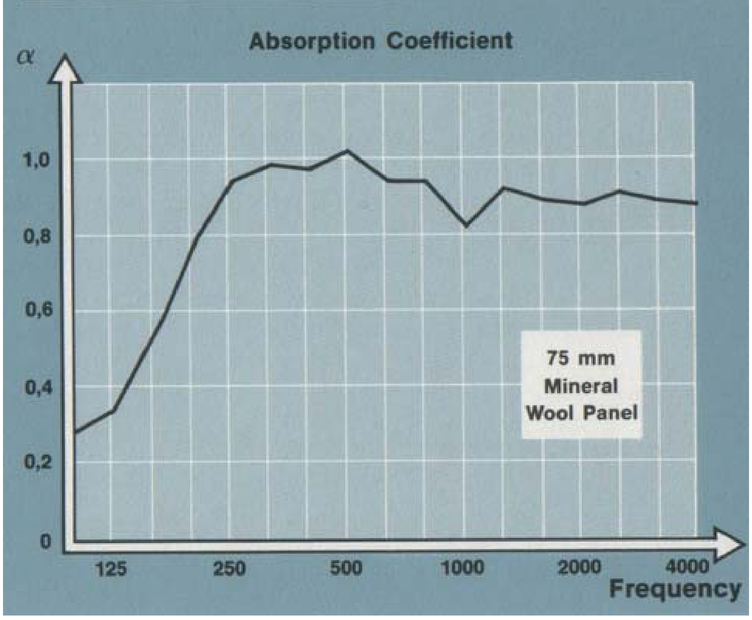
Elnyelési tényezőt tipikusan zengőszobában mérünk. Adott felületű (10 négyzetméteres) mintát kell bevinni, majd mérés után a Sabine-formulából visszaszámolni (ismert, megmért utózengési idejű zengőszobában):

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

A képletben alfa a keresett változó, S a mintaanyag felülete, V a terem térfogata, T_s az utózengési idő a mintaanyaggal, T_e pedig a zengőszoba üres utózengési ideje (a minta nélkül). Ezért van szükség zengőszobára, hogy annak nagy legyen a T_e ideje és ezzel pontosabb méréseket lehessen végezni. A mérést általában a szabvány által előírt oktávsávban vagy tercsávokban 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.

Material	Frequency, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Air, per m³	nil	nil	nil	0,001	0,003	0,007
Acoustic panelling	0,15	0,3	0,75	0,85	0,75	0,4
Plaster	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
Floor, concrete	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,05
Floor, wood	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Floor, carpeted	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3
Brickwall	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Curtains	0,05	0,12	0,15	0,27	0,37	0,50



Az elnyelési tényező frekvenciafüggése különböző anyagokra.

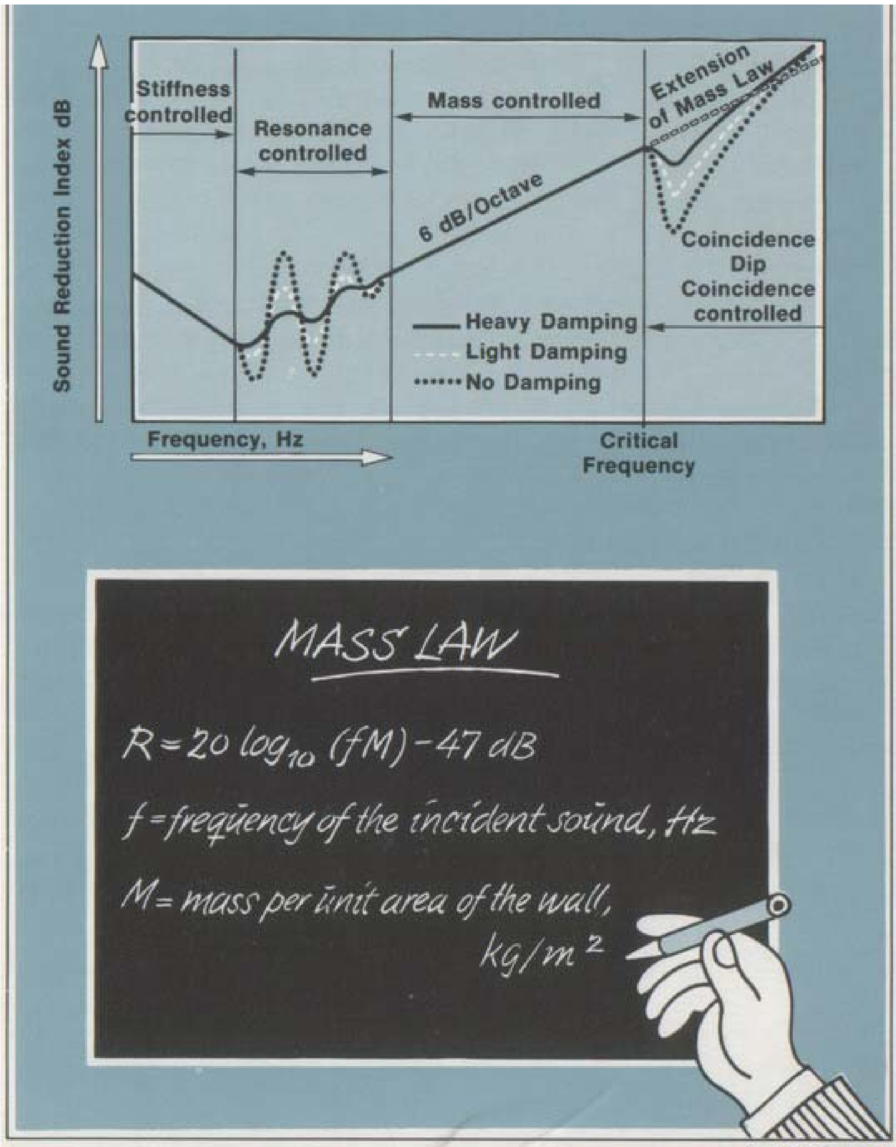
Némileg bonyolultabb módszerrel a beesési irányoktól függő módszer is létezik, ekkor szinusz hullám burstjét bocsátják ki meghatározott helyekről és abból végeznek számítást, melyhez speciális mérőszobára sincs szükség, de sokáig tart és nem olyan pontos.

8.1.4 Hangszigetelés

A levegőben terjedő hangok hangszigetelésének (Sound Insulation) számszerűsítő adata a falra vonatkozik, jele R (Sound Reduction Index). Mértékegysége dB, a beeső hangteljesítmény és az átjutott teljesítmény hányadosa. Függ a frekvenciától és a beesési szögtől.

$$R = 10\log\frac{W_i}{W_t}$$

ahol i az incident (beérkező), míg t a transmitted (átjutott) jele. Egy homogén falfelület indexének diagramja a frekvencia függvényében felosztható részekre. Ez attól függ, hogy a fal mely tulajdonsága fejti ki éppen hatását: merevség, rezonancia, tömeg vagy koincidencia effektus. A tömeg-tartományban érvényes szabály, hogy az index 6 dB-el nő a frekvencia duplázásával (oktávonként), ha a tömeget változatlanul hagyjuk, vagy akkor is, ha a tömeget (a vastagságát) kétszerezzük meg a falnak egy adott frekvencián.



Az *R* index frekvenciafüggése és jellemző tartományai, valamint a tömeg-törvény átfogalmazása.

Ahogy az ábrán is látható, a tömeg-törvény magasabb frekvenciákon megváltozik, a koincidencia hatás következtében. Ez akkor fordul elő, ha a beeső hang hullámhossza megegyezik a fal elhajlásának hullámhosszával. Ezek a hajlító hullámok a falban fel-le terjednek (hullámzik a fal), és mivel a beeső frekvenciák minden irányból érkeznek, lesz olyan kitüntett irány és frekvencia, amikor ezek oszcillálni kezdenek és hangenergia fog átjutni, gyakorlatilag erősítés nélkül. Keletkezik egy vékony frekvenciatartomány, ahol a fal akusztikailag transzparens lesz. Azt a legkisebb frekvenciát, ahol a koincidencia fellép *kritikus frekvenciának* nevezzük – ez akkor lép fel, ha a beeső hang éppen csak súrolja (majdnem párhuzamosan esik be) a falat. Pld. egy 3 cm vastag furnérlemez kritikus frekvenciája 500 Hz, ami éppen a beszédtartomány közepe, így alkalmatlan beszédhang szigetelésére. Ha növelni akarjuk a kritikus frekvenciát anélkül, hogy a szigetelés változzon, dupla falat kell létrehozni. Ilyen esetben a két elem vastagsága meghatározó a frekvencia értékében, ugyanakkor eleve növeli az *R*-t a tömeg-törvény következtében. Érdemes két különböző vastagságú elemet használni, hogy azok kritikus frekvenciája ne egyezzen meg. Ez a módszer azonban a rezonanciafrekvencián nem okoz változást a görbében. A rezonancia tartomány csak akkor használható ki előnyösen, ha a feladat a mélyfrekvenciák elnyelése erősen visszhangos teremben.

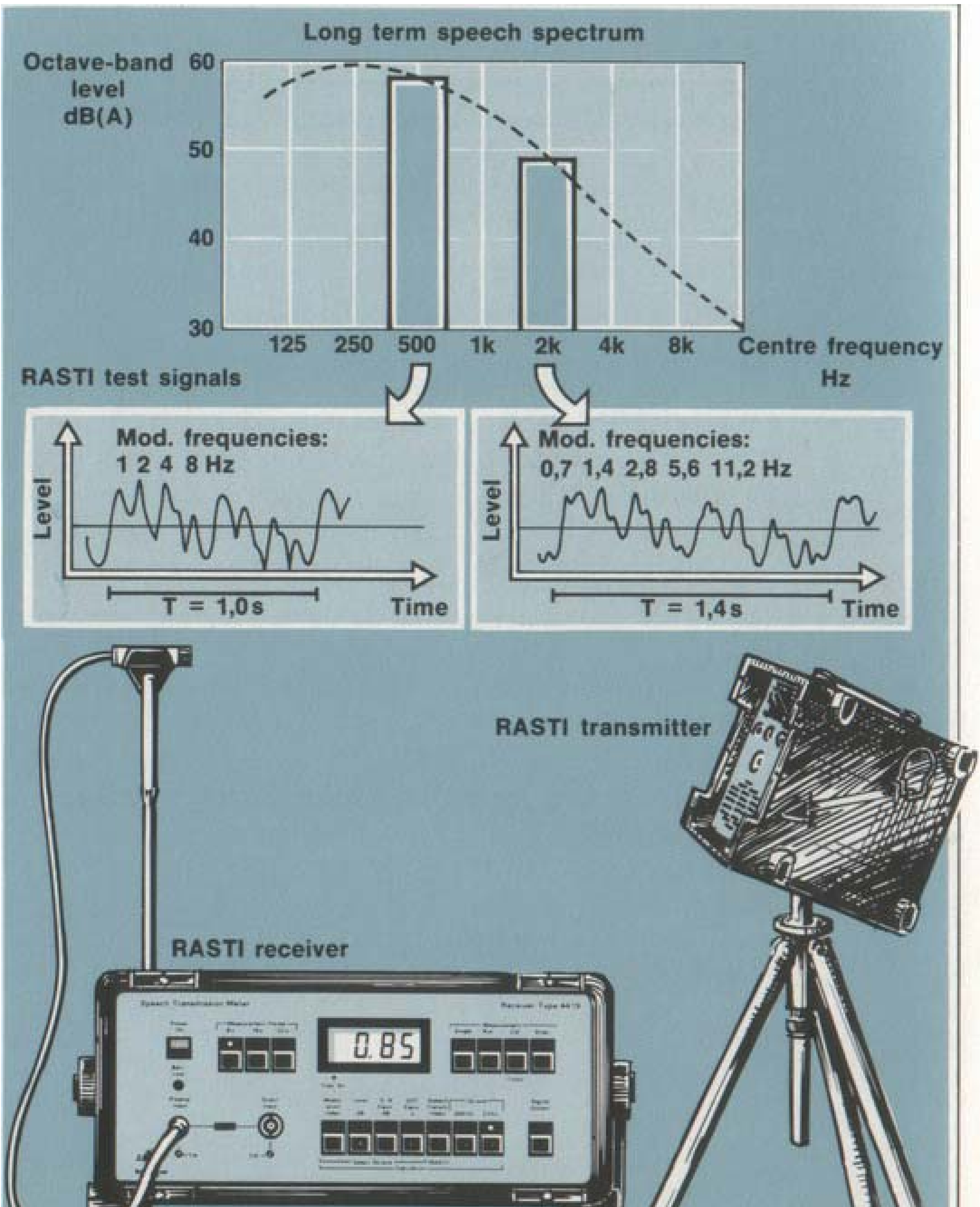
8.2 A beszédérthetőség

Már említettük a beszédérthetőséget (Speech Intelligibility), mint a beszédátvitel mérőszámát. A hallgató által érzékelt hang sosem egyezik meg a beszélő által kiadottal: zaj adódik hozzá, reflexiók befolyásolják. A beszélő általában alkalmazkodik a terem adottságaihoz, lassabban beszél visszhangos teremben, hangosabban egy csillapított helységben. A leggyakoribb probléma a magas háttérzaj és a túl nagy utózengési 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. Előbbinél értelmes mondatok, szavak hangzanak el, és azokat kell visszaadni. Itt nyilvánvalóan működik a hibajavítás, az emberek a szókincsükből merítenek. Az eredmények is jobbak. Logatom-érthetőségnél olyan szótöredékeket kell visszaadni, melyek értelmetlenek (ked, pik, lasz), és amelyeket a nyelvtudás nem javít ki. Ez valósághűbb, de rosszabb eredményeket szolgáltat. A beszédérthetőség általában százalékban adja meg a hibát vagy 0 és1 közötti mérőszámmal.

A használt paraméterek az AI (articulation index), mely 30% alatt rossz, hetven felett kiváló. A másik az STI (Speech Transmission Index), ahol nem emberekkel, hanem gépekkel mérünk és „objektív” eredményeket kapunk. Ennek a legmodernebb, aktuálisan kutatott része a RASTI (Rapid STI). Ez is egy 0 és 1 közötti szám, az ún. Modulációs Átviteli Függvények (MTF) segítségével határozható meg. Ezek leírják, hogy egy jelben található modulációs tartalom miként változik meg az átviteli rendszerben, hét oktávsávban vizsgálva 125 Hz-tők 8 kHz-ig. Nem szükséges hozzá hangszóró és hallgatóság csak két gép. Az STI szám ezzel összefüggésben a teremről is hordoz információt. A RASTI attól gyors, hogy az MTF-t csak két oktávsávban méri meg. A RASTI Transmitter rózsaszín zajt ad ki 59 ill. 50 dB (1 méterre tőle mérve) erősséggel az 500 Hz és a 2000 Hz-es oktávsávban. Ezt a zaj szinuszosan modulálja különböző frekvenciákkal szimultán. Ezzel modellezi a beszédet. A készülék iránykarakterisztikája olyan, hogy a tőle 1 méterre lévő vevő ugyanúgy érzékelje azt, mintha emberi beszélő adná ki. A vevőben egy gömbi mikrofon működik, és a vett hang moduláció változását kiértékeli. Az adó és a vevő nincs szinkronizálva (független eszközök), mert a jel ismétlődő. Az eltérés a vett és a kiadott jel között rögzítésre kerül minden modulációs frekvencián (*m*: modulation reduction factor).

A RASTI ezekből az *m*-számokból számítható ki. Az MTF egy diagram, *m*-t ábrázolja a modulációs frekvencia függvényében. Ha az MTF lapos, a zavar valamilyen zaj, ha csökkenő lefutású, akkor visszaverődések vannak. Mivel a RASTI gyors módszer, sok helyen lehet mérni egy teremben és szintfelületekkel, az azonos pontokat összekötve, kontúrábrát rajzolhatunk.



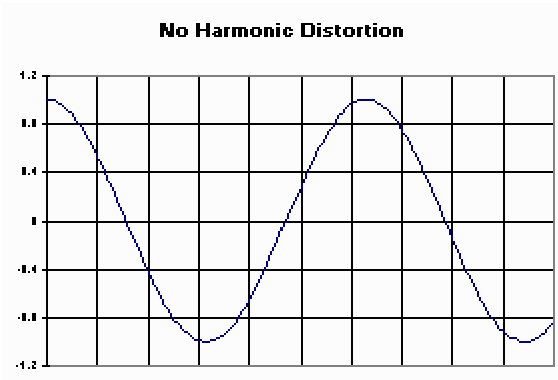
RASTI adó és vevő, valamint a két oktávsáv szintjének megállapítása a modulációs frekvenciák segítségével.

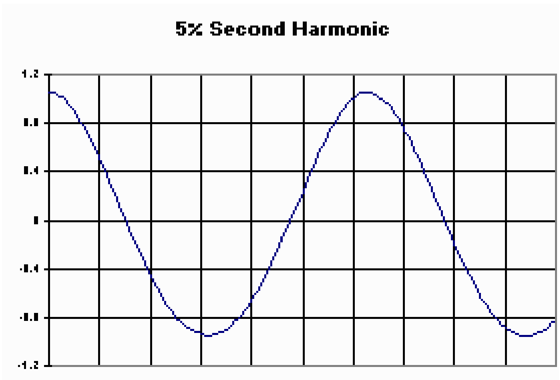
9. Irodalomjegyzék

[1] Valkó Iván Péter: Az elektroakusztika alapjai. Akadémiai Kiadó, 1963.
[2] Budó Ágoston: Kísérleti Fizika I. Tankönyvkiadó, 1981.
[3] Horváthné Gembicky Erzsébet: Műszaki akusztika példatár. Tankönyvkiadó, 1988.
[4] Ferenczy Pál: Hírközléselmélet. Tankönyvkiadó, 1974.
[5] E. Zollner, E. Zwicker: Elektroakustik. Springer Verlag, 1998.
[6] Moldoványi Gyula: Elektrotechnikai számítások. Táncsics Könyvkiadó, 1969.
[7] Lamoth Emil: Elektroakusztika. Műszaki Könyvkiadó, 1962.
[8] Brüel & Kjaer segédanyagok, információs CD
[9] K. Heidermanns: Elektorakustik. Teubner Studienskripten, 1979.
[10] Kurutz Imre, Szentmártony Tibor: A műszaki akusztika alapjai. Műegyetemi kiadó, 2001.
[11] Tarnóczy Tamás: Teremakusztika I. Akadémiai Kiadó, 1986.
[12] W. Reichardt: Grundlagen der Elektroakustik. Akademische Verlaggesellschaft Leipzig, 1960.
[13] I. Veit: Műszaki akusztika. Műszaki Könyvkiadó, 1977.
[14] http://www.hit.bme.hu/people/granat/elak6.htm

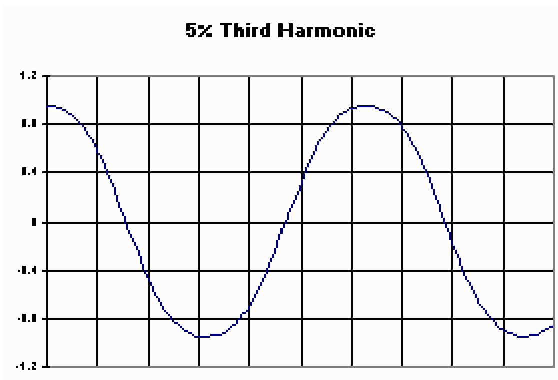
FÜGGELÉK

Példa.

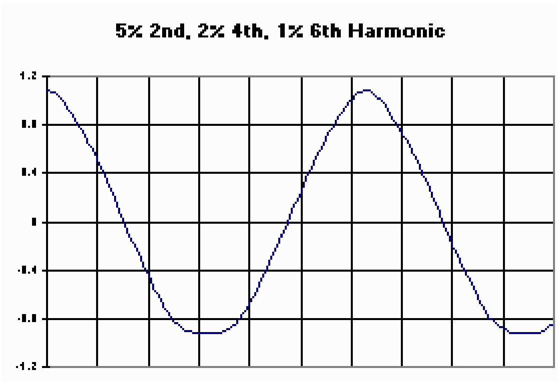




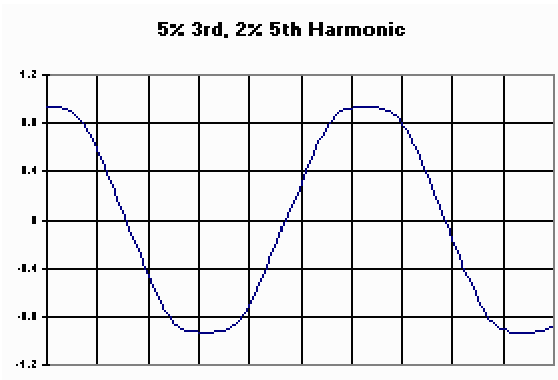
Öt százalékos második felharmonikus hozzáadása már látható a jelen: a csúcsok hegyesednek és a mélyedések „laposodnak”, de nem szimmetrikusan.



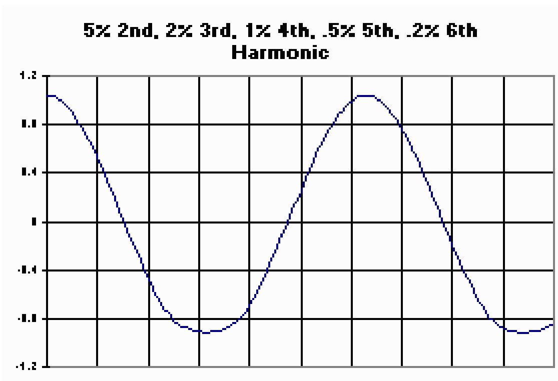
Itt a görbe alja és teteje is szélesedik.



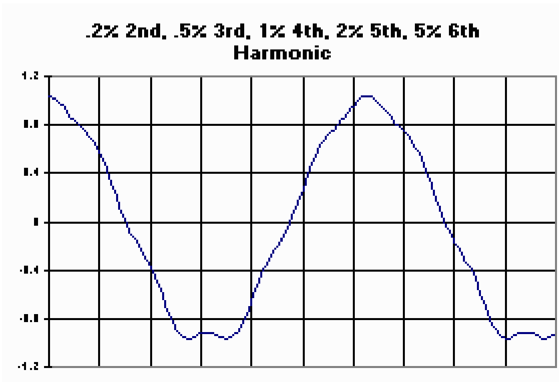
Itt csak a páros komponensek hatása látható. Összehasonlítva a csak másodikat tartalmazó ábrával, jobban látszik az aszimmetria: a csúcsok hegyesednek, a mélyedések laposodnak.



Az erősítők többsége azonban páros és páratlan komponenseket is létrehoznak, tipiksuan maximális kivezérlésnél:



Az ábra meglepően jó, de nézzük meg mi történik, ha az amplitúdókat megváltoztatjuk:



A THD értéke mindkét esetben kb. ugyanannyi. Ebből is látszik, hogy pusztán a kisebb THD érték nem feltétlen jelent jobb átvitelt. Ez lehet az oka annak, amiért egy erősítő jobban szól, ha átviteli függvénye a magasabb frekvenciák felé csökkenő jellegű, mint az, amelyiknél a felső harmonikusok dominálnak.

Kritikus sávok:

Number	Centre Frequency (Hz)	Critical Band (Hz)	Lower Cutoff Frequency (Hz)	Upper Cutoff Frequency (Hz)
1	50	-	-	100
2	150	100	100	200
3	250	100	200	300
4	350	100	300	400
5	450	110	400	510
6	570	120	510	630
7	700	140	630	770
8	840	150	770	920
9	1000	160	920	1080
10	1170	190	1080	1270
11	1370	210	1270	1480
12	1600	240	1480	1720
13	1850	280	1720	2000
14	2150	320	2000	2320
15	2500	380	2320	2700
16	2900	450	2700	3150
17	3400	550	3150	3700
18	4000	700	3700	4400
19	4800	900	4400	5300
20	5800	1100	5300	6400
21	7000	1300	6400	7700
22	8500	1800	7700	9500
23	10500	2500	9500	12000
24	13500	3500	12000	15500