

Akusztika

Dr. Wersényi György

Távokozlási Tanszék
C 609
wersenyi@sze.hu

A tantárgyról...

- Heti 2 óra
 - előadások hétfőnként 7-8. óra
 - Laborbemutató (második félév?)
- Számonkérés: írásbeli vizsga
- Elégséges határa 50%
- Letöltések (pdf):
<http://vip.tilb.sze.hu/~wersenyi/index.html>

Tematika

Bevezetés

a hang műszaki paraméterei, leírási módok
hang és hallás alapjai, tulajdonságai

Zenei hangkeltés

Teremakusztika alapjai

Analóg és digitális technika alapja

Rögzítők

analóg és digitális technika
mikrofonok, hangsugárzók
mágneses és optikai elvű (CD-DVD)
sokcsatornás és nagyfelbontású felvételek

Bevezető

Az átviteli út



A hang

- A hang longitudinális nyomáshullám (hangnyomás).

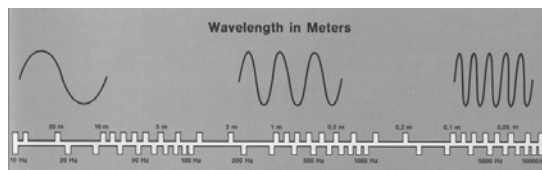
Sűrűség hullám



- A közeg részecskéi egymásnak ütdöve adják tovább az energiát (sűrűsödések és ritkulások).
- Terjedéshez szükség van valamilyen közegre (vákuumban nem terjed a hang).
- Léteznek fizikai mennyiségek, melyekkel a hangteret leírjuk, megragadjuk.

Frekvencia, hullámhossz

- Frekvencia: másodpercenkénti rezgések száma [1/s], [Hz]
- 1 kHz = 1000 Hz = 10^3
- Hullámhossz: egy periódus méterben mért hossza [m]
- $\lambda = c/f$, ahol c a terjedési sebesség, f a frekvencia.
Következmény: más közegben más hullámhosszú ugyanaz a frekvenciájú hullám.



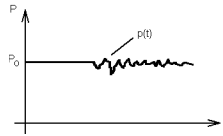
Hangnyomás (amplitúdó)

- $p = f/A$ a hangnyomás [Pa] [N/m^2]
ahol f a levegőrészecskék által kifejtett erő az $A=1 \text{ m}^2$ felületre.

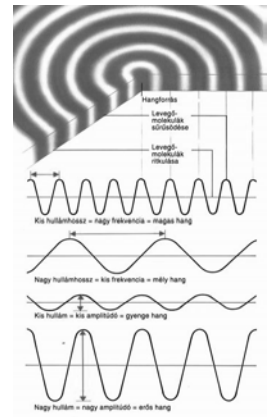
$p(t)$ időfüggvény,
 P_0 atmoszféranyomás $\sim 10^5 \text{ Pa}$

A hangnyomás skalár (nem vektor) mennyiség.

1 Pa hangnyomás nagy érték!



- A magas hangok irányítottabbak, de nem terjednek olyan messzire (villám!)
- A mélyhangok hangszórával nehezen sugározhatók le



Hangintenzitás

- Időegység alatt felületegységen áthaladó (hang)energia $I =$ intenzitás [W/m^2]
- Az intenzitás vektormennyiség: van iránya is.
- Az intenzitás ún. teljesítmény jellegű mennyiség (a hangnyomás négyzetével arányos).
- A hangintenzitás értéke $1/r^2$ szerint csökken a hangforrástól távolodva (r a távolság). A (hang)nyomás azonban csak $1/r$ -szerint változik.
- Ez csak ideális ún. gömbhullámú szabadtéri terjedésnél igaz.

A hang sebessége

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

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

ahol P_0 a 10^5 Pa atmoszféranyomás, ρ pedig a levegő sűrűsége: $1,3 \text{ kg/m}^3$.

Ebből $c = 328 \text{ m/s}$.

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

- A hangsebesség a 1 fokos hőmérséklet emelkedés esetén $0,6 \text{ m/s}$ -al megnő!
- $+20$ fok esetén már 12 m/s , ezért néha találkozhatunk a $328+12=340 \text{ m/s}$ átlagsebességgel is.
- A pontosabb érték 332 m/s -t ad meg a nulla fokos levegőre, és így jön ki a pontosabb 344 m/s .
- $3,6$ -al kell szorozni km/h -hoz: 1240 km/h kb.

Egyéb terjedési sebességek

Substance	Temperature ($^\circ \text{C}$)	Speed (m/sec)
CO ₂	0	258
CO ₂	35	274
Air	0	331.5
Air	20	344
Water Vapor	35	402
Helium	20	927
Hydrogen	0	1,270
Water	15	1,437
Steel	-	5,000

A logaritmus és a decibel

- A hangnyomásnak és az intenzitásnak is létezik dB-ben megadott szintje. Nagyon kell ügyelni arra, hogy ezeket ne keverjük össze egymással.
- A hangnyomásszint:
 $P = 20 \cdot \log(P/p_0)$ [dB]
ahol $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa = 20 μ Pa.
- Az intenzitátszint:
 $I = 10 \cdot \log(I/i_0)$ [dB]
ahol, $i_0 = 10^{-12}$ W/m².

A hangnyomásszint vonatkoztatási értéke p_0 nem ugyanaz, mint az atmoszféranyomás P_0 értéke! A hangnyomásszint angolul Sound Pressure Level, rövidítve SPL.

Mire jó logaritmus és a dB?

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

- Példa:
- $\log 100 = 2$, mert $10^2 = 100$.

Három feszítéserősítőt kapcsolunk egymás után, az első tízszeresére, a második nyolcszorosára, a harmadik kétszeresére erősíti a bementére jutó feszültséget.

$$x10 = +20\text{dB} \quad (20 \cdot \log 10 = 20 \text{ dB})$$

$$x8 = +18\text{dB}$$

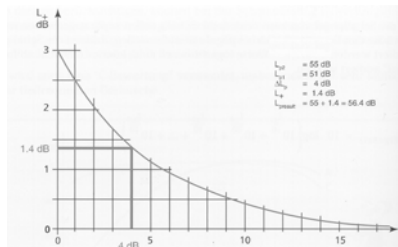
$$x2 = +6\text{dB}$$

$$x160 = +44\text{dB}$$

- Az alábbi értékeket célszerű megjegyezni:
 - +3dB a kétszeres teljesítményhez tartozik
 - +6dB a kétszeres feszültséget (vagy nyomást), azaz a négyszeres teljesítményt jelenti

Hangnyomásszintek összegzése

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



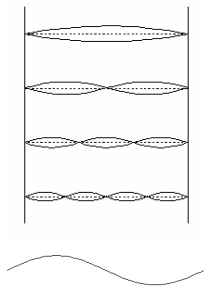
- A frekvenciatengelyt is logaritmikusan ábrázoljuk. A legfontosabb felosztások a következők:
 - oktáv = 2x-es frekvencia
 - dekád = 10x-es frekvencia
 - terc(sáv) = 1/3 oktáv (one-third octave).
- Az egy oktávval feljebb lévő hang az alaphang kétszerese. Pld. tipikus oktávsváros felosztás az 1, 2, 4,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

Zenei hangkeltés

- Hangszerek: vonós, fúvós, membrános, (elektronikus).
- Vonós: megfeszített hurok pengetése megfelelő üregű testen kiképezve.
- Fúvós: légoszlopok rezgése, fújással gerjesztjük és szabályozzuk a légoszlop magasságát.
- A precíz kialakítás fontos: a fémtölcser alakja, felülete; a hegedű teste, anyaga, lakkrétege. A különböző hangszerek felépítése színezi a hangot.

A megfeszített húr

- A megfeszített húr arra törekszik, hogy a lehető legrövidebb legyen, vagyis egyenes "szeretne" lenni.
- A húr hajlékony, nem csak egyszerre tud rezegni az egész, hanem részleteiben is.
- A közönséges módon megpengetett húr hangjának vannak természetes **felhangjai**. Nem vesszük észre őket, mert jól harmonizálnak az alaphanggal, annak felharmonikusai.
- Transzverzális hullámok: vastagság, megfeszítés, hossz.



- A rezgő húr hangmagassága függ tehát a feszítéstől, a hosszától és hosszegységre eső tömegtől (sűrűségtől, vastagságtól). A hosszabb húr alacsonyabb hangot ad ki, a frekvencia fordítottan arányos a hosszal:
- A lazább húr szintén mélyebb hangot ad ki, a frekvencia a megfeszítés négyzetgyökével arányos:
- A sűrűbb, „nehezebb”, vastagabb húr mélyebb hangot ad ki, a frekvencia fordítottan arányos a sűrűség négyzetgyökével:

$$f \propto \frac{1}{l}$$

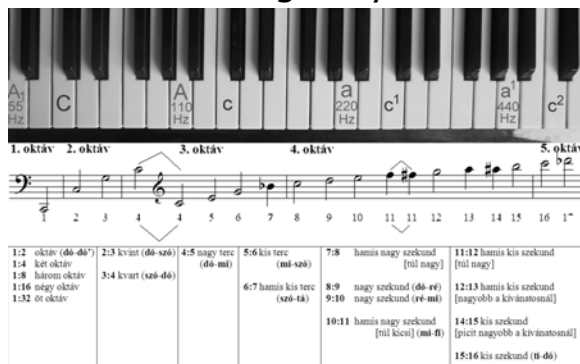
$$f \propto \sqrt{T}$$

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Hangközök és a fizika

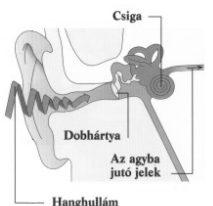
- Ha a frekvenciák aránya 1:2 akkor ez a két hang egy OKTAV hangközt alkot. Az oktav a zeneelmélet legfontosabb hangköze, alapegysége. Az oktav hangközt alkotó hangok nagyon jól szólnak együtt, hasonlítanak egymásra.
- A 2:3 arányú hangköz neve: KVINT. Ez a második legfontosabb hangköz. Ez is nagyon jól szól együtt. A hegedű szomszédos húrjait kvint hangközökre hangolják.
- A 3:4 arányú hangköz neve: KVART. Egy kvint meg egy kvart összesen egy oktávot tesz ki. Kvart hangközre hangolják a nagybőgő és a basszusgitár húrjait, illetve egy-egy hangköz kivételével a lant és a gitár húrjait is.
- A 4:5 arányú hangköz a NAGYTERC, az 5:6 pedig a KISTERC. A két hangköz összege egy kvint.

Felhangarányok

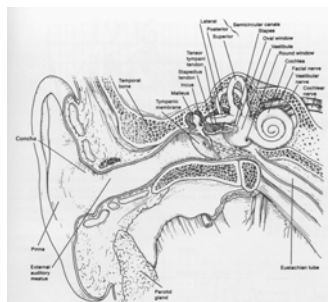


Hallás

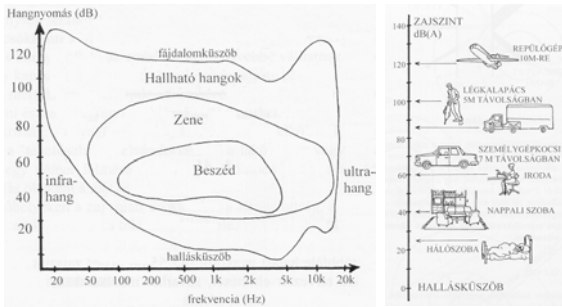
- Agy + fülek
- Hallásküszöb, fájdalomküszöb
20 Hz - 20 kHz, öregséggel romlik
- Skála: logaritmus frekvenciában is: oktav, terc, dekad
- Irányhallás: a fül és a felsőtest hatása, idő és szintkülönbség a dobhártya jelében (sztereó hatás alapja)



A hallórendszer

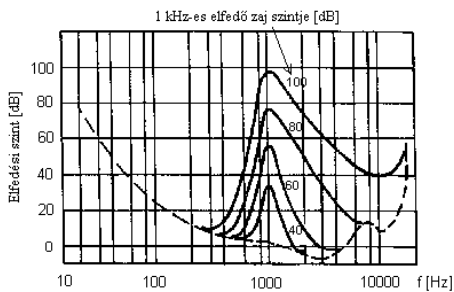


A hallástartomány



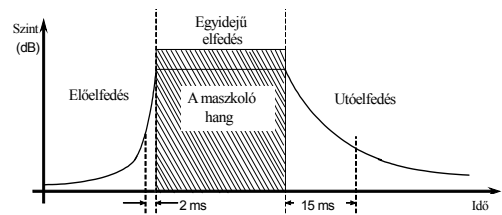
Zajforrás (hangforrás)	Hangtelj. (W)
Suttogás	$1...5 \cdot 10^{-8}$
Kis asztali ventilátor	10^{-5}
Társalgás	$1...1 \cdot 10^{-5}$
Háztartási gépek	10^{-4}
Kiabálás	$6...8 \cdot 10^{-4}$
Hangos kiáltás	$1...3 \cdot 10^{-3}$
Kis szövőszék	10^{-2}
Személygépkocsi (80 km/h)	10^{-1}
Zongora (forte)	$1...2 \cdot 10^{-1}$
Trombita (forte)	$3...4 \cdot 10^{-1}$
Sűrített levegős kalapácsok	1
Autókürt	3...5
Kis mezőgazdasági repülőgép	7...8
Orgona, 75 tagú szimf. zenekar	10
Nagy szimfonikus zenekar (forte)	50...70
Riasztó sziréna	10^3
4 légszűrő repülőgép	10^4
Katonai sug.h rep.gép utánég.	10^5
rakétamotor	10^7

Hangelfedés a frekvenciában



Elfedés az időben

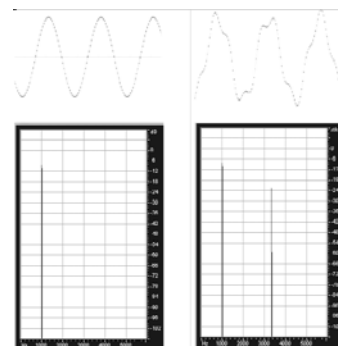
- Időben is van elfedés: előre és utólag is!
- Előre nagyon rövid, oka: hangosabb hang gyorsabban terjed a hallórendszerben.



Spektrum, alaphang és felharmonikusok

- A spektrum megmutatja bármely (hang)jel „alkotóelemeit” a frekvenciák szerint csoportosítva.
- Egyfrekvenciás jel = szinuszos, tiszta hang.
- Hangszeres hangkeltés = alaphang és annak felharmonikusai. (A hang = 440 Hz + felharmonikusok)
- Zene = több hangszer egyszerre szól, az alaphangok és felharmonikusok keveredése (folytonos spektrum).
- Mire jó? Analizálni a hangjeleket, zavarok és torzítások kiszűrése, átvitel és hangminőség megállapítása.
- Van rá matematikai módszer (papíron), számítógépes ill. mérőműszer (ún. spektrumanalizátor) és a fülünk...

Az 1000 Hz, 1000+3330 Hz jel idő- és frekvenciatartománybeli képe

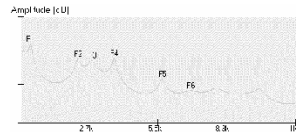


Sávszélesség

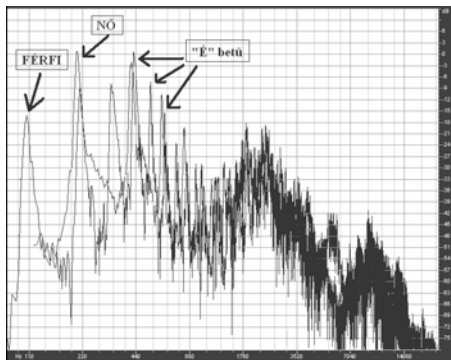
- Sávszélesség az adott jel spektrumának szélessége Hz-ben megadva.
- Pld. a hallásunk 20 Hz – 20000 Hz sávszélességű (kb.)
- A zene ennél valamivel kisebb (bár lehetnek nagyobb felharmonikusok is).
- A beszédjel kisebb sávszélességű (a telefonátvitel pld. csak 3400 Hz-ig terjed).
- A mozgókép-információ (TV adás) nagyon nagy sávszélességű (6 MHz).

A beszéd

- Legfontosabb akusztikai hangjel
- Energiájának 90% 4000 Hz alatt van
- Alaphang + felharmonikusok (mgh) vagy zajszerű hangok
- Formáns: adott mgh-ra jellemző helyi maximum(ok) a spektrumban
- 10 kHz felett egyénre jellemző részek
- A beszéd hibajavítással bír
- Beszédérthetőség mérhető
- A beszéd teljesítmény átlaga kb. 20μW, a kiabálás elérheti a 100mW-ot. A dinamikatartomány (a leghalkabb suttogástól a leghangosabb kiabálás aránya) kb. 50 dB.



- „éjféli”



Koktélparti effektus

- A másik jelenség a *koktélparti effektus*, mely nevét arról kapta, ahol a leggyakrabban tapasztaljuk.
- Egy síkban, élő beszéd esetén az emberi hallás képes arra, hogy a nagy zsivajban (háttérben sok beszélő) egy adott emberi beszédre oda tudjon figyelni, a többit pedig elnyomni és zajként tekinteni.
- Ugyanezt képes váltogatni, tehát másik emberre odafigyelni.
- A gépek erre nem vagy csak nehezen képesek, és az ember sem képes megoldani ezt a problémát, ha hangfelvételtől próbálja kinyerni az információt.

Teremakusztikai alapok

- Süketszoba és zengőszoba a két véglet, a valóságos termék, stúdiók között vannak
- Mennyire visszhangos?
- Visszhanghatár kb. 50 msec. (17 méter útkülönbség)
- Mérhető, számítással becsülhető mértékegysége van annak, milyen egy terem akusztikája?
- A hang falba ütközéskor: elnyelődik, áthatol, visszaverődik.

Utözengési idő

- A legfontosabb mérhető paraméter az *utözengési idő*.
- A hangforrás kikapcsolása utáni hangenergia exponenciális „lecsengése”.
- Értéke akár több másodperc is lehet, de stúdiókban 1-1,5 másodpercnél nem lehet hosszabb.
- A hangnyomásszint 60 dB-el esik
- Ezt mérhetjük ill. számolhatjuk is.
- Kis utözengési idő jó beszédérthetőséget tesz lehetővé, de a cél nem a nulla elérése, mert az túl „szárazzá” teszi a hangfelvételt. A zenei élményhez szükség van reflexiókra is! A stúdióban frekvencia független utözengési idő a cél, beszédhez kb. 0,5 s., zenéhez másfél másodperc ajánlott.

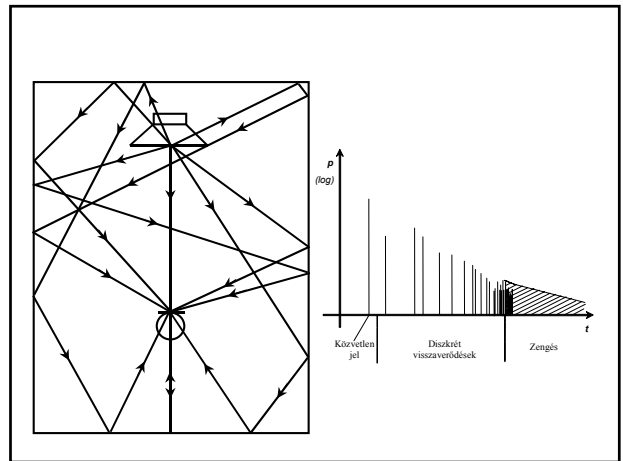
■ Echogram



■ Geometriai számítások



■ Mesterséges mérőszobák: süket, zengő.



Analóg technika

- Analóg technika, ahol az észlelt jelet időben és amplitúdóban egyaránt „folytonosan” kezeljük, rögzítjük.
- „Nincs benne elvi hiba”.
- Érzékeny nagyon a zajokra, zavarokra. Ún. „alakhú” átvitelre van szükség.
- Nincs benne semmiféle hibajavítás.
- Másoláskor a minőség romlik, nem létezik két egyforma másolat.
- Számítógépen és optikai rögzítőkön (CD, DVD) nem tárolható és használható.
- Át kell-e térni a digitális technikára?

A digitális technika

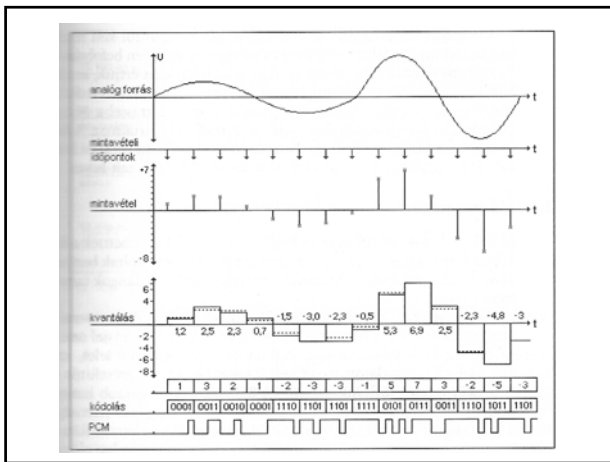
- Digitális technika célja:
 - Nem a minőség javulása (lehet rosszabb az analógnál)
 - Elvi hiba is van benne (kerekítés miatt)
 - Reprodukálhatóság! Minőségkonzerválás!
 - Analóg-Digitális átalakítás után rögzítés és/vagy átvitel, majd a végén Digitális-Analóg átalakítás.
 - Nem cél az alakhú átvitel, csak döntéskor kell jól dönteni. **Hibajavítás mindig része!!!**
 - Copy? Master? Clone?

Analóg-digitális átalakítás (1)

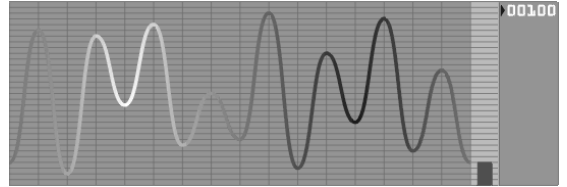
- Mintavétel (sampling): az analóg jelből mintát veszünk adott időközönként. Így **időben diszkrét** mintasorozatot kapunk, amely számsorozat (még) végtelen sok tizedestörtből áll.
- Mintavételi törvény: az analóg jel legnagyobb frekvenciájú tagjánál legalább kétszer gyorsabban kell mintát venni, ekkor a jel a számsorozatból visszaalakítható.
- Ahhoz, hogy rögzíthessünk, ezeket az értékeket kerekíteni kell.

A/D átalakítás (2)

- A kerekítés során a fenti értékeket a legközelebbi lépcsőre kerekítjük. Ezzel véglegesen elvesznek, tehát veszteséget, vissza nem állítható hibát okozunk.
- A kettő együtt működik, és a cél az, hogy ezeket a hibákat már ne vegyük észre, ne lássuk meg a képen, ne halljuk meg a hangban.
- A túl finom felbontásra nincs szükség.



Az analóg jel digitális leírása



D/A átalakítás

- A folyamat végén a digitális jelet analóggá kell visszaalakítani (az erősítő és a hangszóró számára).
- Ehhez egy egyszerű szűrő szükséges.
- A folyamat bonyolultabbá is válhat a minőség javításának érdekében.

Bitsebességek

- CD hang: $44100 \times 16 \times 2 = 1,4$ Mbps.
(stúdióban 48 kHz is van)
 - 20 Hz – 20000 Hz, nagy dinamika (kb. 16x6 dB)
 - PCM (és még 2x ennyi egyéb adat!)
- Beszédátvitel (telefon):
 - Redundancia, hibajavítás, beszédérthetőség paraméter
 - 8 bit x 8 kHz = 64 kbps
 - 300-3400 Hz