Hangtan

A hang fogalma

- rugalmas közegben terjedő hullám; *fizikai jelenség* vákuumban nem terjed!
- füllel érzékelhető külső inger: hangérzet; *élettani jelenség*
- hangélmény (értelmi és érzelmi hatás); *lélektani jelenség*

HANG

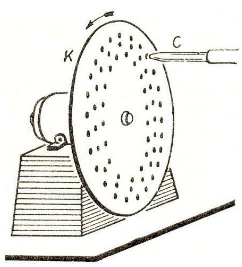
rugalmas közegben terjedő hullám

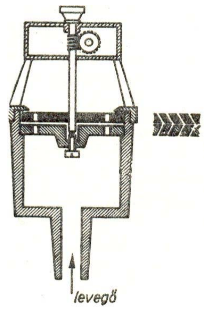
→ érzék-szerv | idegi vezetés | agy-működés →

HANG-ÉRZET

- intenzitás
- rezgésszám
- színkép
- időtartam
- irány

→





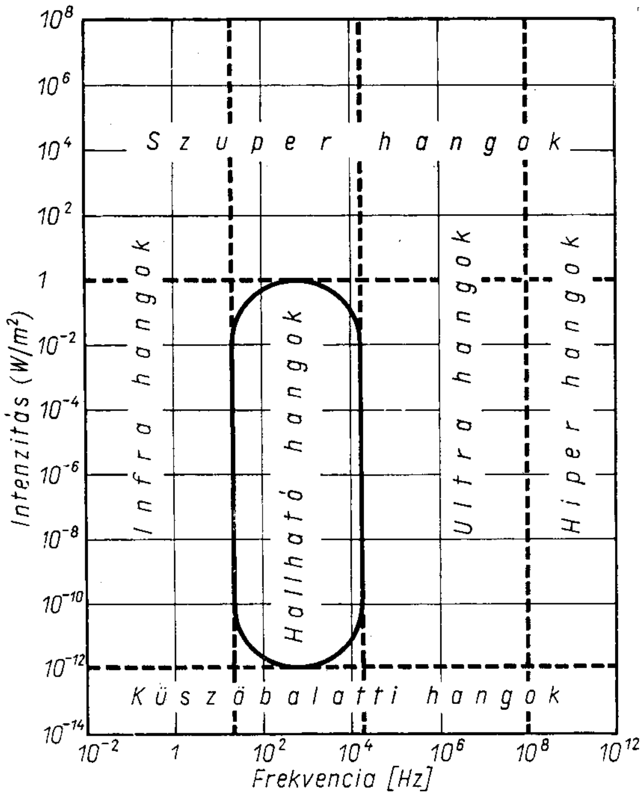
→

- hangosság
- hangmagasság
- hangszín
- érzékelt időtartam
- érzékelt irány

- A kísérletek tanulsága szerint hangérzetet olyan hang hullámok váltanak ki, melyek frekvenciája 20 Hz és 16 000 Hz közötti tartományba esik.
- A hangszínt a rezgés színképében (Fourier-féle felbontásban) fellépő harmonikus rezgések amplitúdóinak aránya határozza. A hangszínre az összetevők kezdő fázisának nincs hatása!

A hangok osztályozásának szempontjai

- **frekvencia**
  infrahangok,
  hallható hangok, és
  ultrahangok
- **intenzitás**
  küszöb alatti hangok,
  gyenge hangok,
  közepes hangok,
  erős és szuperhangok
- **időbeli lefutás** [színképük alapján]
  - **periodikus** hangok
    tiszta hangok: színképe egyetlen vonal
    zenei hangok: színképe vonalas, többnyire egy alaphang és felharmonikusai. (1)
  - **nem periodikus** hangok
    [színképe többnyire folytonos]
    zörejek [hosszabb ideig tart]
    dörejek [rövid ideig tart, lökésserű]



Hangforrások

Legtöbb esetben rugalmas szilárd testek vagy levegővel töltött üregek
- húrok
- pálcák
- hártyák, lemezek
- légoszlopok

Hangforrások sajátrezgései

Mivel a hangforrás minden rezgése a sajátrezgéseinek a szuperpozíciója,
a hangforrások vizsgálatánál az egyik legfontosabb feladat a sajátrezgések meghatározása.

- A sajátrezgések a rendszer azon rezgései, mikor minden pont azonos frekvenciájú harmonikus rezgést végez azonos vagy ellentétes fázisban.
- Rugalmas közeg esetén ezek a közeg állóhullámaival azonosak, hiszen az állóhullámokban a közeg minden pontja
  azonos frekvenciájú harmonikus rezgést végez, azonos vagy ellentétes fázisban.
  - Az ellentétes fázisban rezgő tartományokat a csomópontok választják szét. Ez nyílván csak úgy lehetséges, ha a csomópontokban a rezgés amplitúdója zérus.
  - A csomópontok háromdimenziós közegben csomófelületeket, kétdimenziós közeg csomóvonalakat alkotnak.
- A sajátrezgések frekvenciái a sajátfrekvenciák. A sajátfrekvenciák, és a sajátrezgések egymáshoz viszonyított amplitúdói határozzák meg a hangforrás hangszínét.

Elsődleges és másodlagos hangforrások

- A hangforrások sokszor a rezgési energiának csak töredékét sugározzák a közegbe, így kis intenzitású hangot keltenek.
- Ezért az elsődleges hangforrásokat gyakran kapcsolják össze – velük kényszerrezgést végző – másodlagos hangforrásokkal, amelyek már jó hangsugárzók.
- A másodlagos hangforrások – a rezonancia következtében – megváltoztatják a sajátrezgések amplitúdóinak egymáshoz viszonyított arányát, így befolyásolják a hangforrás színképét!

Húrok, pálcák, hártyák és lemezek rezgései

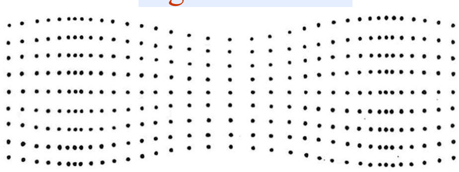
- Kiterjed rugalmas közegben számos hullámfajta alakulhat ki. Ezek közül néhány:

longitudinális hullám

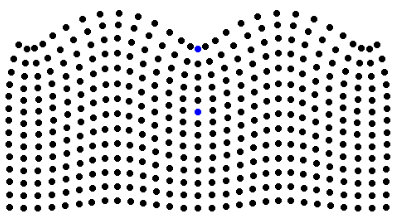
transzverzális hullám

hajlítási hullám

tágulási hullám



Rayleigh-féle (felületi)hullám



Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

A húr rezgései

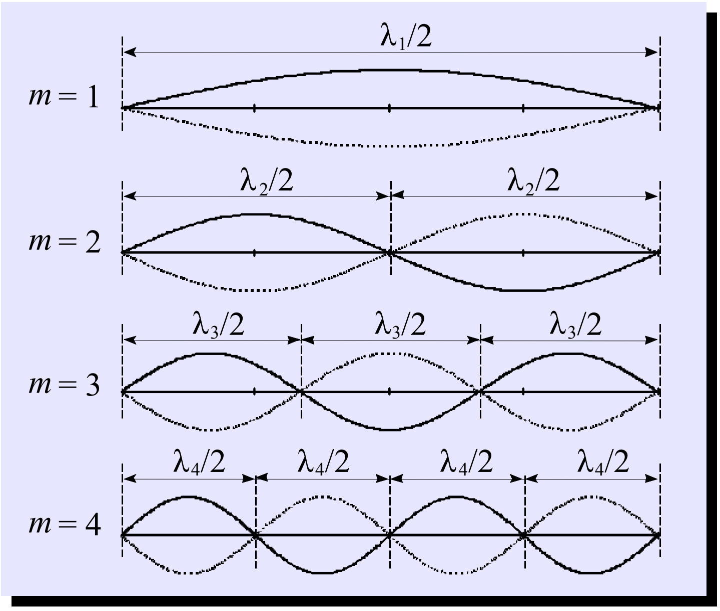
- A húr a kicsi vastagsága miatt gyakorlatilag ellenállás nélkül hajlítható.
- Ezért harántrezgést csak úgy végezhet, ha kifeszítjük.
- Alkalmazásoknál a transzverzális rezgések a lényegesek!

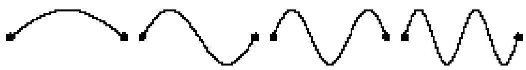
- Transzverzális sajátrezgések

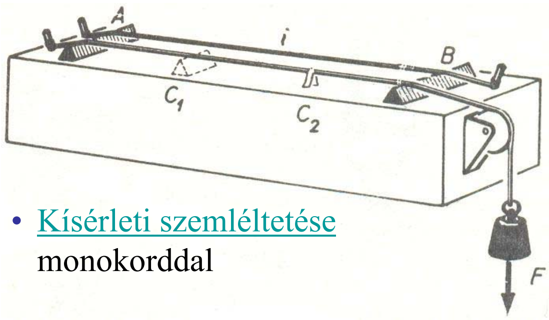
$$l = m\frac{\lambda_m}{2} \qquad \nu_m = m\frac{c}{2l} \qquad c = \sqrt{\frac{F}{q\rho}}$$

$$m = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\boxed{\nu_m = m \cdot \nu_1} \quad \text{ahol} \quad \nu_1 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{q\rho}}$$







- Kísérleti szemléltetése monokorddal

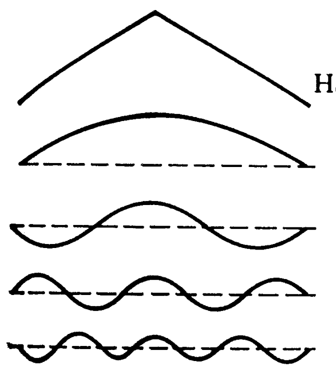
- A húr általános rezgése a sajátrezgések összege.
- Az egyes sajátrezgések amplitúdóit és kezdő fázisait (0 vagy π) a húr kezdeti alakja és kezdeti sebessége határozza meg.
- Ezért a rezgő húr által keltett hang hangszínezetét a kezdeti alak és a kezdeti sebesség befolyásolja.
- Ezek a megállapítások elméletileg levezethetők a hullámegyenletből!
- Az elméleti vizsgálatnál a hullámegyenlet olyan megoldását kell meghatározni, amely kielégíti a kezdeti feltételeket és a peremfeltételeket egyaránt.

- A húr hangszínének függése a pengetés helyétől

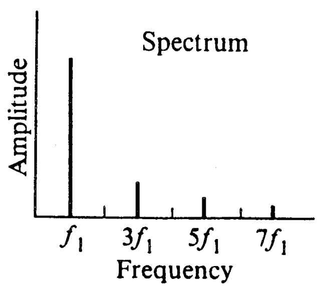
felénél pendített húr

kezdeti alak →

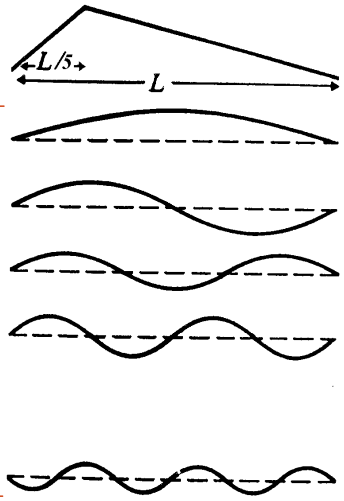
A rezgést létrehozó állóhullámok



Harmonic	Relative amplitude	Phase
1	1	+
2	0	
3	1/9	−
4	0	
5	1/25	+
6	0	
7	1/49	−



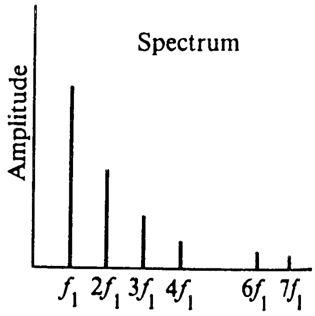
kezdeti alak →



ötödénél pendített húr

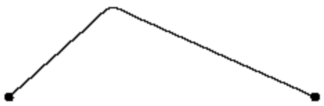
A rezgést létrehozó állóhullámok

Harmonic	Relative amplitude	Phase
1	1	+
2	0.40	+
3	0.18	+
4	0.06	+
5	0	
6	0.03	–

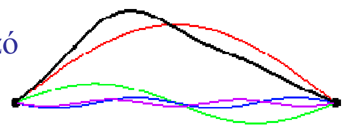


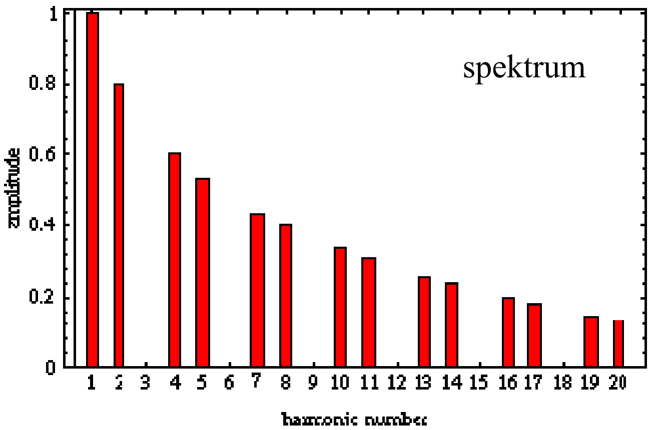
harmadánál pendített húr

kezdeti alak



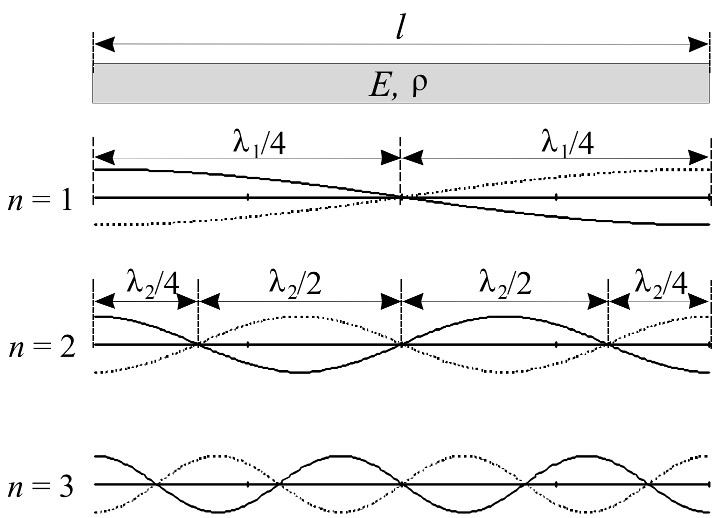
A rezgést létrehozó állóhullámok
(színes görbék)





Pálcák rezgései

- A húrral ellentétben egy pálca vagy lemez feszítő erő hiányában csupán egy pontjában rögzítve is végezhet haránt rezgéseket.
- Az alakváltozástól függően hosszanti, hajlítási és csavarási rezgések is kialakulhat.
- **Középen befogott pálca longitudinális rezgései**



$$l = (2n-1)\frac{\lambda_n}{2}$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\nu_n = (2n-1)\frac{c}{2l}$$

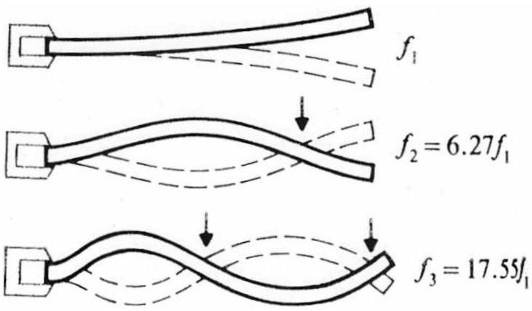
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\boxed{\nu_n = (2n-1)\cdot\nu_1} \quad \text{, ahol} \quad \nu_1 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

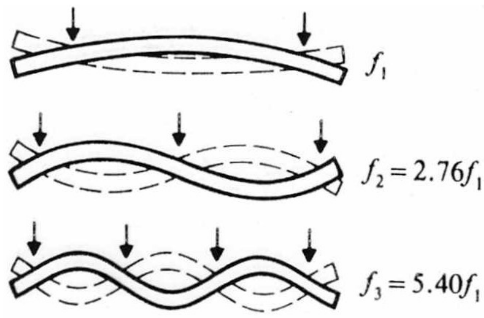
Azaz, középen befogott pálca longitudinális rezgése esetén a felhangok frekvenciái az alaphang páratlan számú többszörösei.

- **Pálcák hajlítási rezgései**

egyik vég rögzített (film)



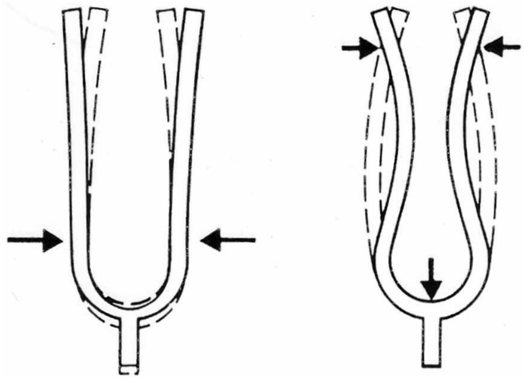
mindkét vég szabad



- A csomópontok nem egyenlő közűek!
- Ezzel összhangban, a felhangok nincsenek harmonikus viszonyban az alaphanggal!

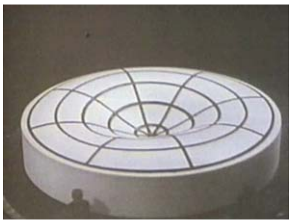
- **Hangvilla rezgései**

Hangvilla meghajlított pálcának tekinthető

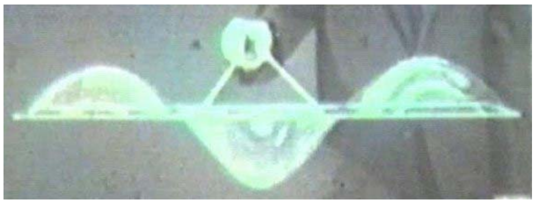


- **Hártyák rezgése**

Teljesen hajlékony vékony hártya – a húrhoz hasonlóan – csak keretre kifeszítve végezhet transzverzális rezgéseket.



dob rezgése

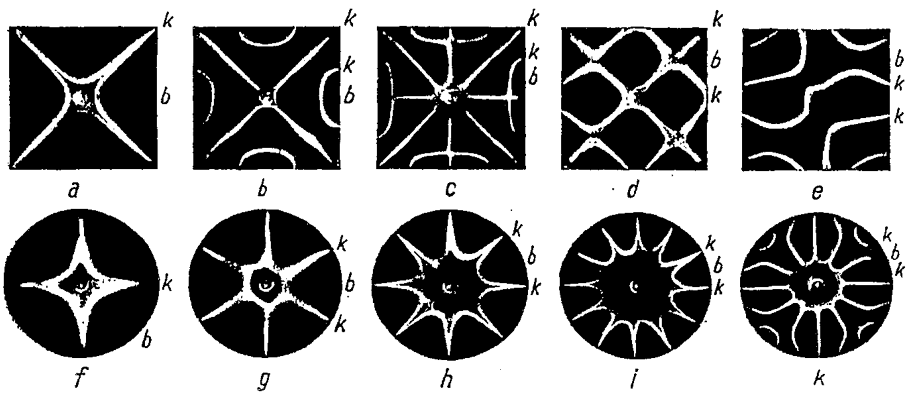


szappanhártya rezgése

- **Lemezek rezgése**

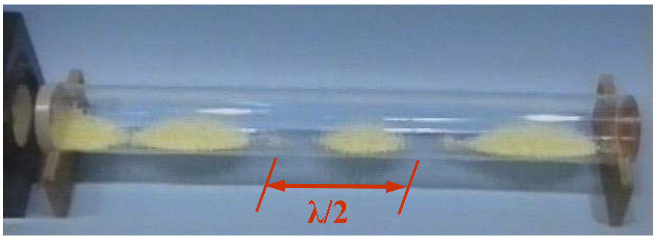
A lemezek ellenállnak a hajlításnak – a pálcákhoz hasonlóan – kifeszítés nélkül is végezhet transzverzális rezgéseket.

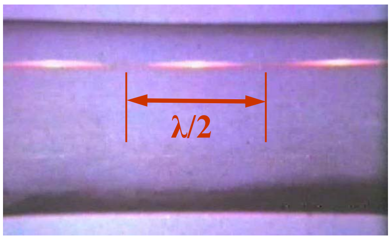
- Az állóhullámokat jellemző csomóvonalak rendszerét a lemezre hintett krétaporral láthatóvá tehetjük.
- Ezek a Chladni-féle hangábrák.



- **Gázoszlopok rezgései. Sípok**

Levegőoszlopok sajátrezgéseinek szemléltetése Kundt-féle csővel.





- A Kundt-féle csővel végzett kísérlettel meghatározhatjuk a hanghullám hullámhosszát, amiből a frekvencia ismeretében a hangsebesség is kiszámítható!
- Relatív méréshez még a frekvenciát sem kell ismerni, hiszen $c_1/c_2 = \lambda_1/\lambda_2$.

Mindkét végén zárt gázoszlop rezgései

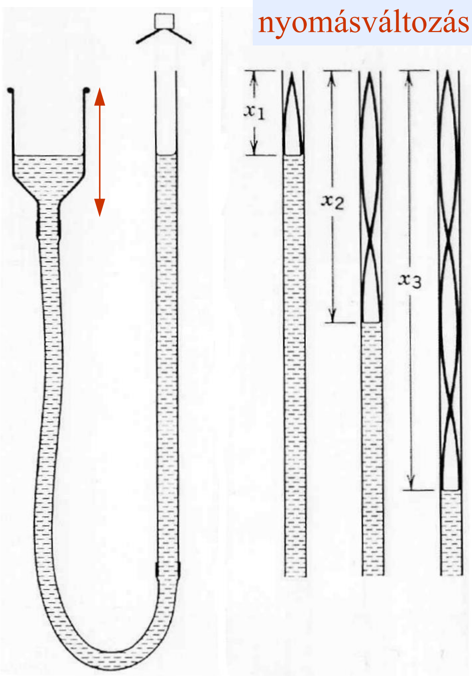
- A Kundt-féle cső gázoszlopának, és általában a mindkét végükön zárt, egyenletes keresztmetszetű gázoszlop sajátrezgései teljesen megfelelnek a mindkét rögzített húr sajátrezgésének.
- Így, a mindkét végükön zárt, egyenletes keresztmetszetű gázoszlop sajátfrekvenciái:

$$\boxed{\nu_n = n\frac{c}{2l} = n\,\nu_1} \quad , \text{ ahol} \quad \nu_1 = \frac{c}{2l}$$

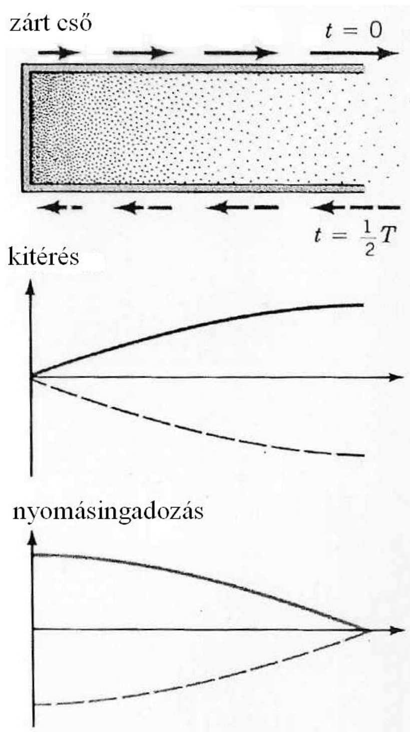
és l a gázoszlop hossza, c a hangsebesség és $n = 1, 2, 3, \ldots$

Egyik végén zárt gázoszlop rezgései (zárt síp)

nyomásváltozás!



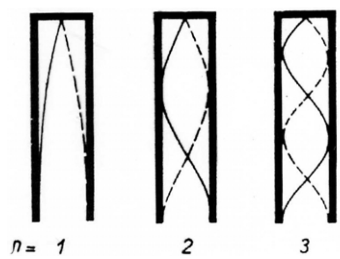
Mozgási csomópontnak nyomási duzzadóhely felel meg!



- Analóg az egyik végén rögzített, a másik végén szabad pontsor sajátrezgéseivel, így

$$\boxed{\nu_n = \left(n-\frac{1}{2}\right)\frac{c}{2l} = (2n-1)\frac{c}{4l} = (2n-1)\,\nu_1} \quad , \text{ ahol} \quad \nu_1 = \frac{c}{4l}$$

l a gázoszlop hossza, c a hangsebesség és $n = 1, 2, 3, \ldots$

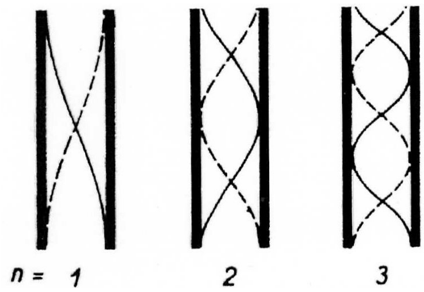


Mindkét végén nyitott gázoszlop rezgései (nyitott síp)

- Analóg a mindkét végén szabad pontsor sajátrezgéseivel, így

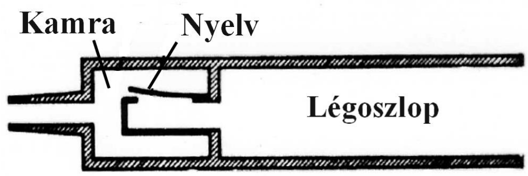
$$\boxed{\nu_n = n\frac{c}{2l} = n\,\nu_1} \quad , \quad \text{ahol} \quad \nu_1 = \frac{c}{2l}$$

l a gázoszlop hossza, c a hangsebesség és $n = 1, 2, 3, \ldots$

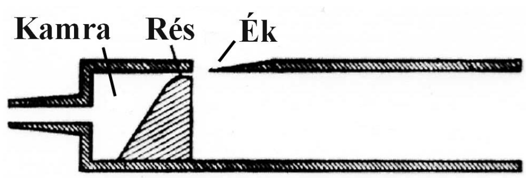


- Az alapfrekvenciákra vonatkozó képletekből látszik, hogy a nyitott síp alapfrekvenciája egy oktávval magasabb (azaz kétszerese) mint az azonos hosszúságú zárt sípé.
- A zárt síp sajátfrekvenciái között csak az alapfrekvencia páratlan számú többszörösei szerepelnek, míg a nyitott sípnál az összes felharmonikus előfordul!
- Ezért a zárt síp hangja fakóbb színezetű a nyitott síphoz képest.

A rezgéskeltés módja szerinti síp típusok



nyelvsíp



ajaksíp

A hang terjedési sebessége

A hangsebesség mérése

- **Közvetlen módszer**

  a hangsebességet a t idő alatt megtett s útból számolják ki a $c = s/t$ képletből.

  Mai technikával igen pontos eredmény nyerhető! (kísérlet)

  Fizika történeti állomások:

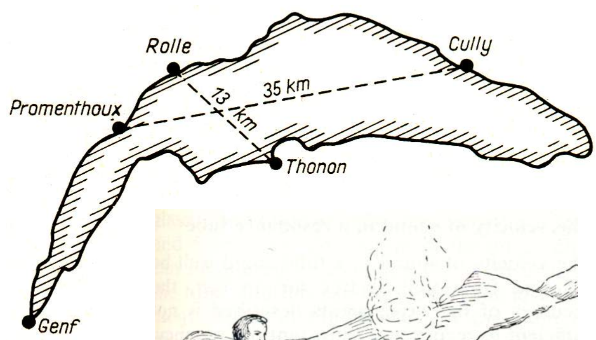
  1660. Lőfegyver torkolattüzével (firenzei akadémia)

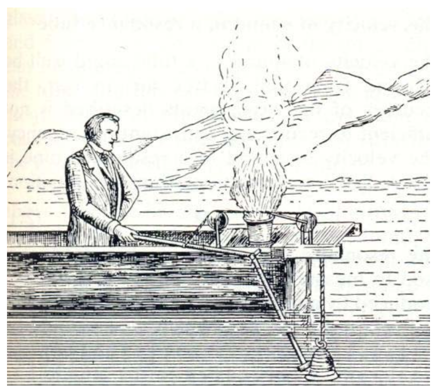
  1738. két ágyú torkolattüzével (párizsi akadémia); az időméréréséhez másodperc ingát használtak (s = 29 km) c = 337,18 m/s (6 ºC).

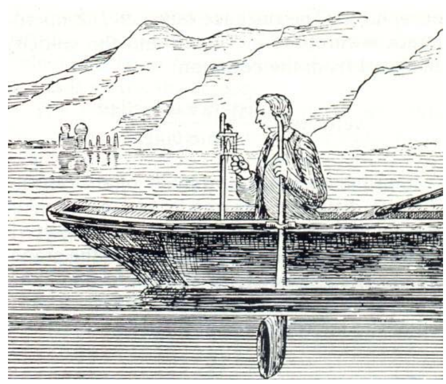
  1822. Laplace kérésére a Francia Tudományos Akadémia megismétli a kísérletet; (0 ºC, 760 Hgmm)

  1826. A hang terjedési sebességének első kielégítő pontosságú mérése vízben: Genfi-tó, Colladon és Sturm. hangforrás: vízbe süllyesztett harang, vevő: sztetoszkóp (c = 1600 m/s, helyes érték: 1460 m/s)

  1841. Colladon nagyobb távolságra megismétli a kísérletet.







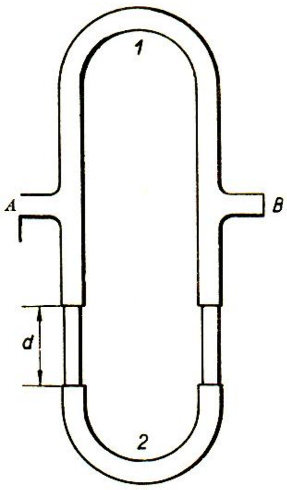
- **Közvetett módszer**

  a hang hullámhosszának (λ) és frekvenciájának (ν) mérésével a hangsebesség a $c = \lambda \cdot \nu$ képletből adódik.

  Néhány kísérleti közvetett módszer:
  - Kundt-féle cső
  - Quincke-féle interferenciacső

Két maximális gyengítés között d távolsággal húztuk ki a csövet, így

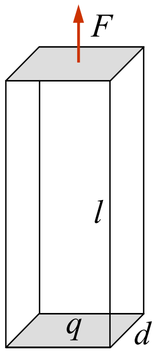
$$\lambda = 2d$$



A hangsebesség kiszámítása

- **A hang terjedési sebessége szilárd rugalmas közegben**

Nyújtás, összenyomás



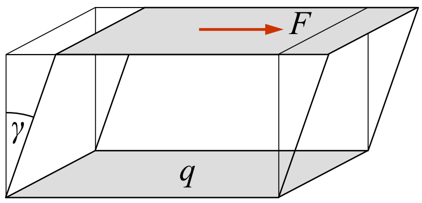
$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{q}$$

$$\mu = \frac{-\Delta d / d}{\Delta l / l}$$

$$(0 \le \mu \le 1/2)$$

E a *Young-féle modolus*
μ a *Poisson-féle szám*

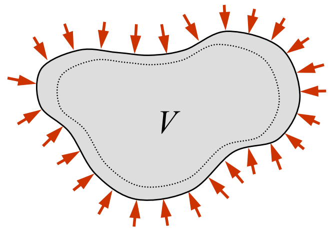
Nyírás



$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \frac{F}{q}$$

G a *nyírási modolus*

Minden oldalú egyenletes összenyomás



$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma}{K} = -\frac{p}{K}$$

K a *kompresszió modolus*.

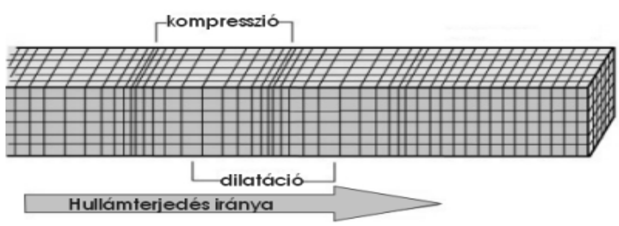
- Az E, μ, G és K rugalmassági állandók az anyagi minőségre jellemzők!
- Homogén és izotróp szilárd közegben közülük csak kettő független, ugyanis közöttük a

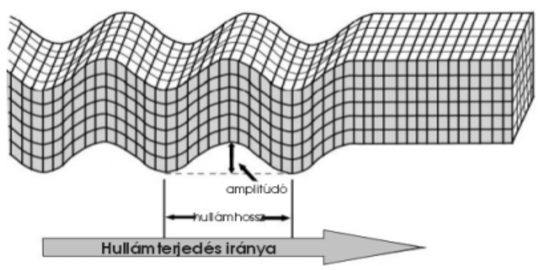
$$K = \frac{1}{3}\frac{E}{1-2\mu} \quad \text{és a} \quad G = \frac{1}{2}\frac{E}{1+\mu}$$

összefüggések állnak fenn.

Rugalmas közegben terjedhet

- az érintőleges – nyíró – mechanikai feszültséggel kapcsolatos transzverzális hullám, és
- a nyomó és húzó mechanikai feszültséggel kapcsolatos longitudinális hullám is.
- **Ha külön nem említik, akkor hangon mindig a longitudinális hullámot értik!**





- Minden irányban nagy kiterjedésű közegben a longitudinális és transzverzális hullámok terjedési sebessége:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}$$

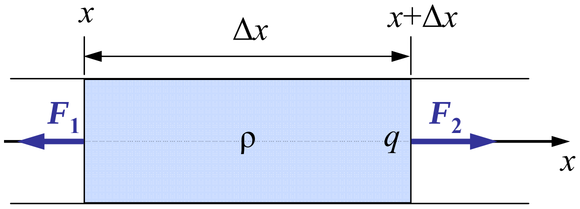
ahol ρ a közeg sűrűsége.

$$c_l > c_t$$

- Már megmutattuk, hogy a longitudinális hullámok terjedési sebessége vékony rúdban kissé más formulával írható le: $\boxed{c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}}$

- **A hang terjedési sebessége folyadékokban**

Folyadékban milyen mennyiség feleltethető meg a Young-féle modulusnak?



szilárd közegben: $\frac{\Delta l}{\Delta x} = \frac{1}{E}\frac{F}{q} = \frac{\sigma}{E} = -\frac{\Delta p}{E}$

folyadékban: $\frac{\Delta l}{\Delta x} = \frac{\Delta l \cdot q}{\Delta x \cdot q} = \frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta p}{K}$

Az analógiából látható: a Young-modulusnak a K kompresszió modulus felel meg.

Így a hang terjedési sebessége folyadékokban: $\boxed{c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}}$

- **A hang terjedési sebessége (ideális) gázokban**

Gázoknál hogyan számítható ki a kompresszió modulus?

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta p}{K} \quad \Rightarrow \quad K = -\frac{\Delta p}{\Delta V}\cdot V \qquad \Delta V \to 0 \quad \text{esetén} \qquad K = -\frac{dp}{dV}\cdot V$$

K kiszámításához tudni kell, hogy hőtani szempontból milyen folyamat a hangterjedés!

A tapasztalat szerint **a hangterjedés adiabatikus folyamat.**

Az adiabatikus (hőcsere nélküli) folyamatokat az adiabatikus állapotegyenlet írja le:

$p \cdot V^{\kappa} = C$ ahol $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ az állandó nyomáshoz és állandó térfogathoz tartozó fajhők hányadosa és C állandó.

$$\frac{dp}{dV} = \frac{d}{dV}\left(\frac{C}{V^{\kappa}}\right) = C\cdot(-\kappa)\cdot V^{-\kappa-1} = -\kappa\frac{C}{V^{\kappa+1}} = -\kappa\frac{p}{V} = \quad \Rightarrow \quad K = -\frac{dp}{dV}\cdot V = \kappa \cdot p$$

Így a hang terjedési sebessége ideális gázokban: $\boxed{c = \sqrt{\kappa\frac{p}{\rho}}}$ Laplace-féle összefüggés

- A hangsebesség általában függ a hőmérséklettől.

Ideális gázokban a p/ρ mennyiség hőmérséklettől való függését egyszerűen kiszámíthatjuk:

T hőmérsékletű, p nyomású, V térfogatú és ν mól anyagmennyiségű ideális gáz esetén

$p \cdot V = \nu R T$, ahol R az egyetemes gázállandó.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \Rightarrow \quad \frac{p}{\rho} = \frac{\nu}{m}RT \quad \Rightarrow \quad c(T) = \sqrt{\kappa\frac{\nu}{m}RT}$$

Legyen T_0 egy adott hőmérséklet (pl. T_0 = 273,15 ºK = 0 ºC), és $c_0 = c(T_0)$

$$\frac{c(T)}{c_0} = \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{c(T) = c_0\sqrt{\frac{T}{T_0}}}$$

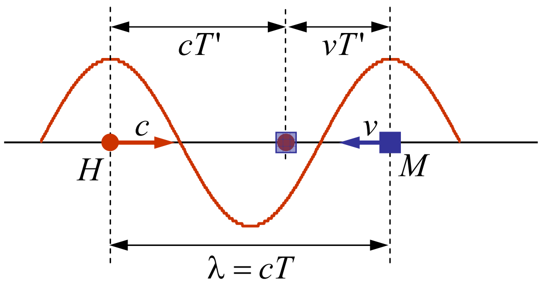
Doppler-hatás, fejhullám

A tapasztalat szerint a forrás és a megfigyelő a közeghez viszonyított mozgása befolyásolja az észlelt rezgésszámot.

- **A megfigyelő mozog, a forrás áll**

Ha a megfigyelő állna, akkor T időközönként találkozna a hullámheggyel, de mivel mozog T' időközönként találkozik a hullámheggyel, így az észlelt rezgésszám megváltozik!

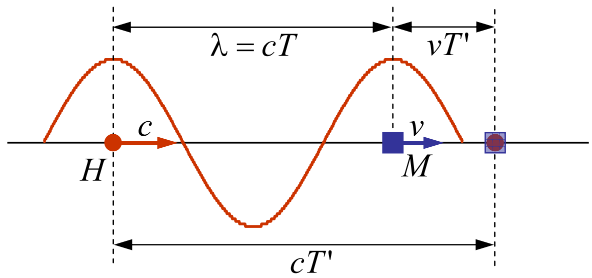
közeledés [+]



$$cT = cT' + vT' = (c+v)T' \Rightarrow \frac{1}{T'} = \frac{c+v}{c}\cdot\frac{1}{T}$$

$$f' = \frac{c+v}{c}\cdot f$$

távoldás ($v < c$) [–]



$$cT' = cT + vT' \Rightarrow \frac{1}{T'} = \frac{c-v}{c}\cdot\frac{1}{T}$$

$$f' = \frac{c-v}{c}\cdot f$$

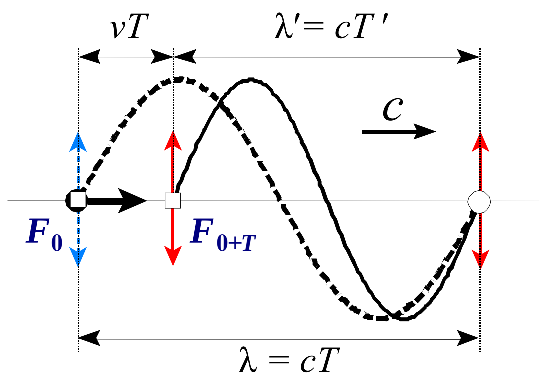
$$\boxed{f' = \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)\cdot f}$$

- **A forrás mozog ($v < c$), a megfigyelő áll**

A zavar miután levált a forrásról, már c sebességgel terjed!

A forrás mozgásának következtében az azonos fázisú helyek távolsága megváltozik, azaz megváltozik a hullámhossz. [kísérlet]

közeledés [–]

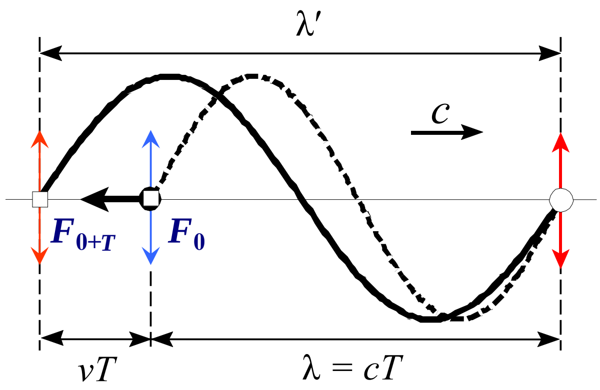


$$\lambda = vT + \lambda'$$

$$cT = vT + cT' \Rightarrow \frac{1}{T'} = \frac{c}{c-v}\cdot\frac{1}{T}$$

$$f' = \frac{c}{c-v}\cdot f$$

távoldás ($v < c$) [+]



$$\lambda' = \lambda + vT$$

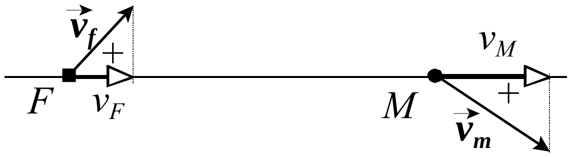
$$cT' = cT + vT \Rightarrow \frac{1}{T'} = \frac{c}{c+v}\cdot\frac{1}{T}$$

$$f' = \frac{c}{c+v}\cdot f$$

$$\boxed{f' = \frac{f}{1 \mp \frac{v}{c}}}$$

- **A forrás és a megfigyelő is mozog**

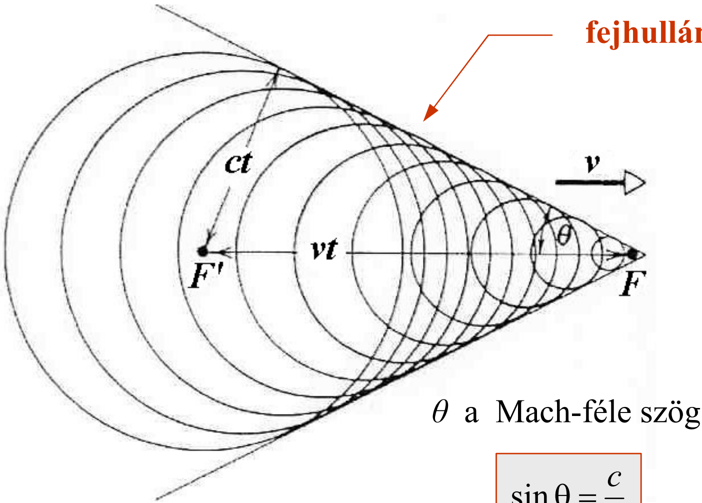
  A forrás és a megfigyelő közeghez viszonyított sebességének az $\overrightarrow{FM}$ irányra eső előjeles vetülete határozza meg az észlelt frekvenciát:



$$f' = \frac{c - v_M}{c - v_F} \cdot f = \frac{1 - v_M/c}{1 - v_F/c} \cdot f$$

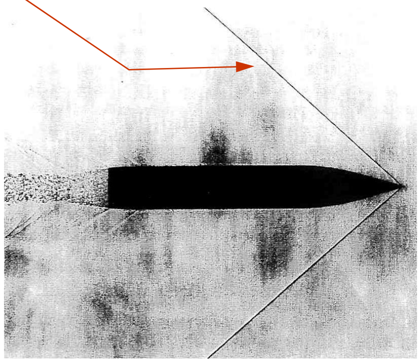
- **A forrás a hangsebességnél nagyobb sebességgel mozog ($v > c$)** [szemléltetés]

fejhullám



θ a Mach-féle szög

$$\boxed{\sin\theta = \frac{c}{v}}$$



Hangrobbanás

- A szuperszonikus mozgást kísérő jelenség. A hangsebesség átlépésekor lép fel.
- A hangsebességgel mozgó forrás előtt a hullámok összetorlódnak. A forrás az adott helyen lévő zavarral egyező fázisú zavart kelt, így az azonos fázisú hullámok erősítő hatása miatt igen nagy nyomásingadozás lép fel.
- Az orrnál nyomásnövekedés, a faroknál nyomáscsökkenés van. A fülünk mindkét hirtelen nyomásingadozást érzékeli, ezért egy kettős robbanást hallunk.

- Néhány példa:

  Concorde utasszállító

  F-18 Hornet vadászrepülő

  A kondenzáció a hirtelen nyomásváltozás hatására jön létre.

Hanghullámok visszaverődése, törése, elnyelődése, interferenciája és elhajlása

- Az általános hullámtan résznél elmondott megállapítások és törvények érvényesek.
- Ezért a témával már itt nem foglalkozunk.
- Önállóan feldolgozandó anyag a Budó Ágoston: *Kísérleti fizika I.* 104. § alapján.

A hangtér jellemzői, energiaviszonyok

- **Hangtér:** a térnek hanghullámokkal kitöltött része

  A hang terjedése során a fizikai mennyiségek egy adott helyen rezgést végeznek.

- A hangteret jellemző fizikai mezők (terek)

a "részecskék" kitérése:	$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{s}(\boldsymbol{r}, t)$	(vektor)
a "részecskék" sebessége:	$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(\boldsymbol{r}, t)$	(vektor)
hangnyomás (nyomásingadozás):	$\Delta p = \Delta p(\boldsymbol{r}, t) = p - p_0$	(skalár)
sűrűségingadozás:	$\Delta\rho = \rho(\boldsymbol{r}, t) = \rho - \rho_0$	(skalár)
hőmérsékletingadozás:	$\Delta T = \Delta T(\boldsymbol{r}, t) = T - T_0$	(skalár)

A hangtér jellemzői szinuszos haladó hullám esetén

- **Kitérés** $\boxed{\Psi(x,t) = \Psi_m \cdot \sin(\omega t - kx + \alpha)}$ $k = \omega/c$

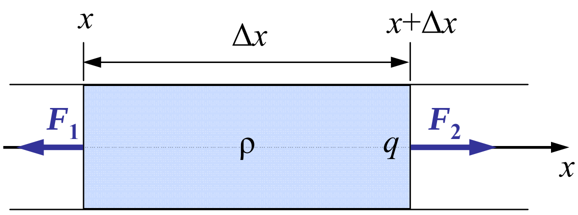
  ahol Ψ_m a mozgási amplitúdó

- **Sebesség** $v(x,t) = \dfrac{\partial \Psi}{\partial t} = \omega \Psi_m \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha)$

  $\boxed{v(x,t) = v_m \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha)}$

  ahol v_m a sebességi amplitúdó $\boxed{v_m = \omega \Psi_m}$

- **Hangnyomás**



- Szilárd közegben: $\sigma(x,t) = E \cdot \dfrac{\partial \Psi}{\partial x}$
- Folyadékban és gázban milyen kapcsolat van a deformáció és a feszültség között?
- Folyadékokban és gázokban a nyomás jellemzi a mechanikai feszültséget

$$\sigma(x,t) = -\Delta p(x,t)$$

- Láttuk, hogy folyadékban és gázban az E Young-féle modulusnak megfelelő mennyiség a K kompresszió modulus, ($E \Leftrightarrow K$).
- Ezért a hangnyomás és a kitérés közötti kapcsolat: $\boxed{\Delta p(x,t) = -K \cdot \dfrac{\partial \Psi}{\partial x} = -\rho_0 c^2 \dfrac{\partial \Psi}{\partial x}}$

$$\Delta p(x,t) = -\rho_0 c^2 \cdot (-\omega/c)\Psi_m \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha) = \rho_0 c \cdot \omega \Psi_m \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha)$$

$\boxed{\Delta p(x,t) = p_m \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha)}$ ahol p_m a nyomási amplitúdó $\boxed{p_m = \rho_0 c \cdot v_m}$

$\boxed{\Delta p(x,t) = \rho_0 c \cdot v(x,t)}$ analóg az elektromosságtan Ohm-törvényével!

$$U = R \cdot I$$

$U \Leftrightarrow \Delta p$

$I \Leftrightarrow v$

$R \Leftrightarrow Z$

$Z = \rho \cdot c$ akusztikai keménység (hullámellenállás)

- **Energiaviszonyok**

Az általános hullámtan résznél elmondott megállapítások és törvények érvényesek.

- Az energiaáramlás erősségét a hangtanban **hangteljesítménynek** nevezik.
- Energiasűrűség

$$w = w_k + w_p = \frac{1}{2}\rho_0 \cdot \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial t}\right)^2 + c^2 \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)^2\right]$$

$$\boxed{w = \frac{1}{2}\rho_0\, \Psi_m^2 \omega^2 + \frac{1}{2}\rho_0\, \Psi_m^2 \omega^2 \cdot \cos\left[2\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) + 2\alpha\right]}$$

Egy periódusra vonatkozó időbeli átlaga:

$$\boxed{\overline{w} = \frac{1}{2}\rho_0\, \omega^2\, \Psi_m^2 = \frac{1}{2}\rho_0\, v_m^2 = \frac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_0 c^2}}$$

- Intenzitás $\quad I = \overline{w} \cdot c$

$$\boxed{I = \frac{1}{2}\rho_0 c\, \omega^2\, \Psi_m^2 = \frac{1}{2}\rho_0 c\, v_m^2 = \frac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_0\, c}}$$

Az intenzitás az amplitúdók négyzetével arányos!

- **A decibel skála (dB)**

A hangteljesítmény és a hangintenzitás több nagyságrendben változhat, ezért igen elterjedt a logaritmikus skálán való összehasonlítás!

Az összehasonlításhoz nyílván alap-pontok szükségesek!

Az 1000 Hz frekvenciájú tisztahangra vonatkozó ingerküszöböt veszik alapul:

$$I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$$

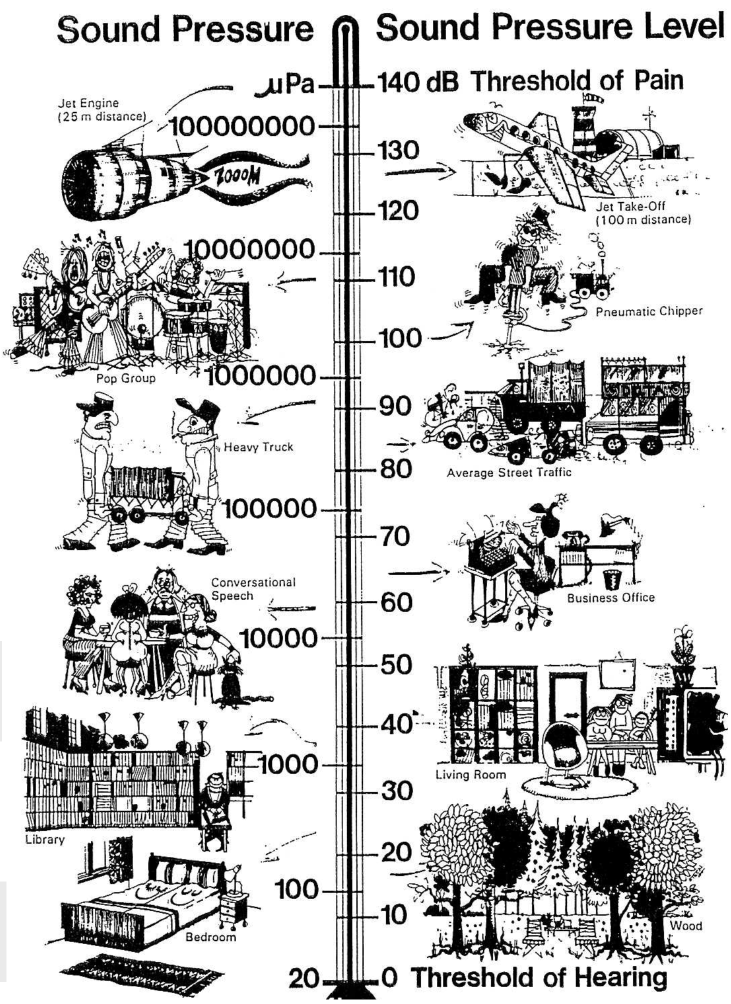
$$P_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W}$$

$$p_0 = 20\ \mu\mathrm{Pa}$$

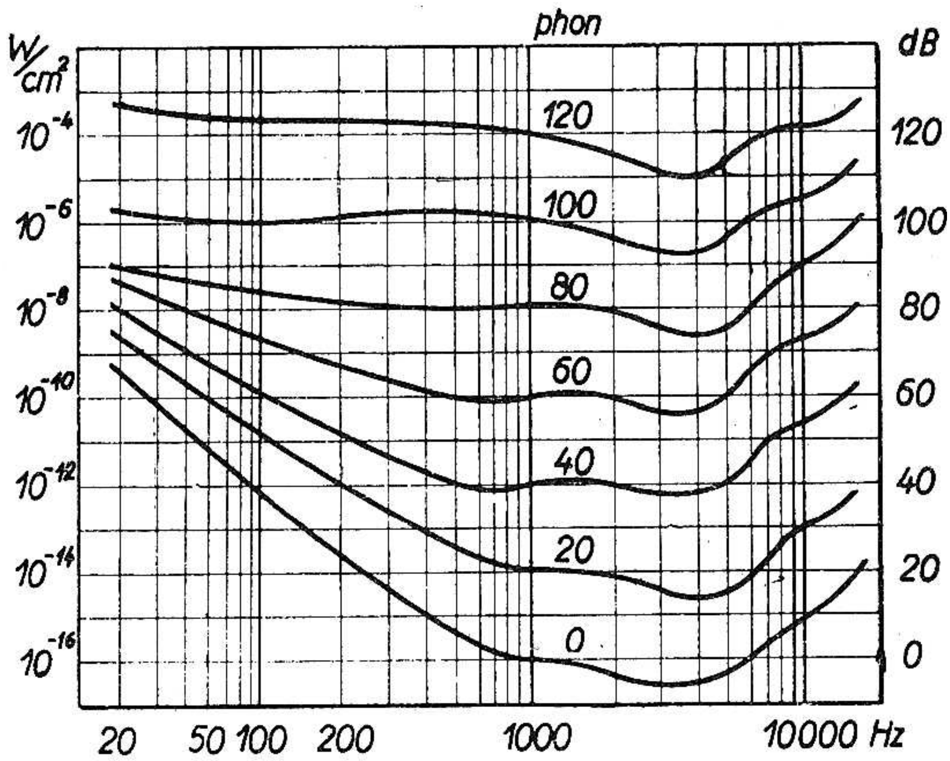
hangteljesítményszint: $L_P = 10\,\lg\dfrac{P}{P_0}$ dB

hangintenzitásszint: $L_I = 10\,\lg\dfrac{I}{I_0}$ dB

hangnyomásszint: $L_p = 20\,\lg\dfrac{p}{p_0}$ dB



Az azonos hangosság görbéi, hangosságszintek



- Az ábráról leolvasható egy adott intenzitású és frekvenciájú hang phon-ban mért hangossága!

Pszichofizikai törvények

- **A Weber-Fechner-féle pszichofizikai törvény**

  Az érzet erőssége (E) arányos a kiváltó fizikai inger intenzitásával (I)

$$E = C \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

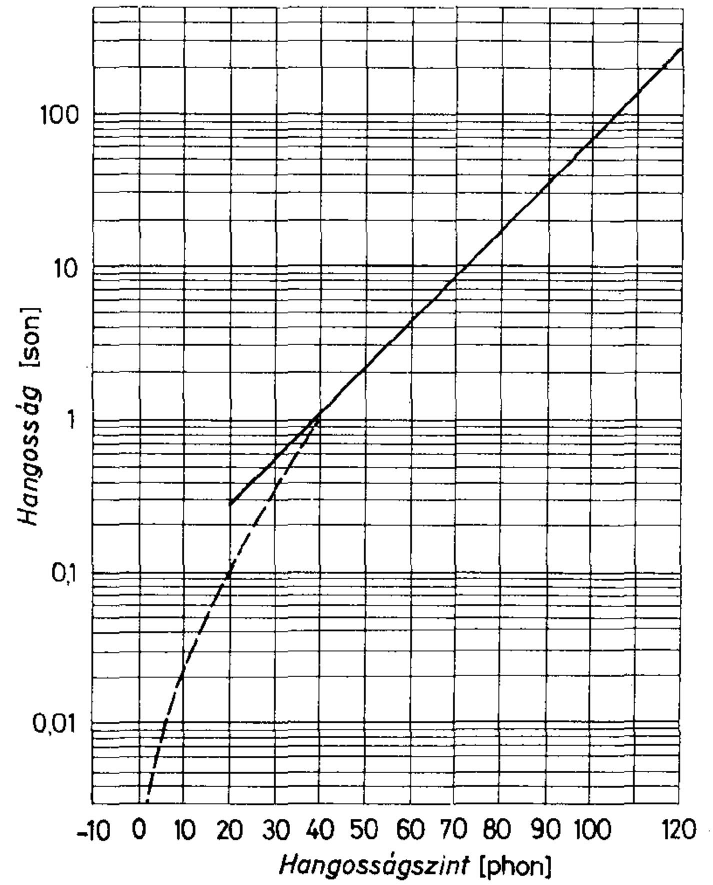
- Erre az elgondolásra alapozták a hangosság phon-ban mért értékét (hangosságszintet).
- A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy a hangérzet – és más fizikai ingerhez tartozó érzetek – erőssége nem követi pontosan a fenti egyenletet.
- A valóságnak jobban megfelel az elgondolás, hogy az érzet erőssége az inger intenzitásának hatványával arányos.
- Ez az u.n. **Stevens-féle pszichofizikai törvény:**

$$E = C \cdot I^{\kappa}$$, ahol hangérzet esetén $\kappa \approx 0{,}3$

(áramütésre $\kappa \approx 3{,}5$)

- Erre az elgondolásra alapozzák a hangosság son-ban mért értékét (hangosság).
- Hányszoros intenzitás szükséges kétszeres érzet erősséghez?

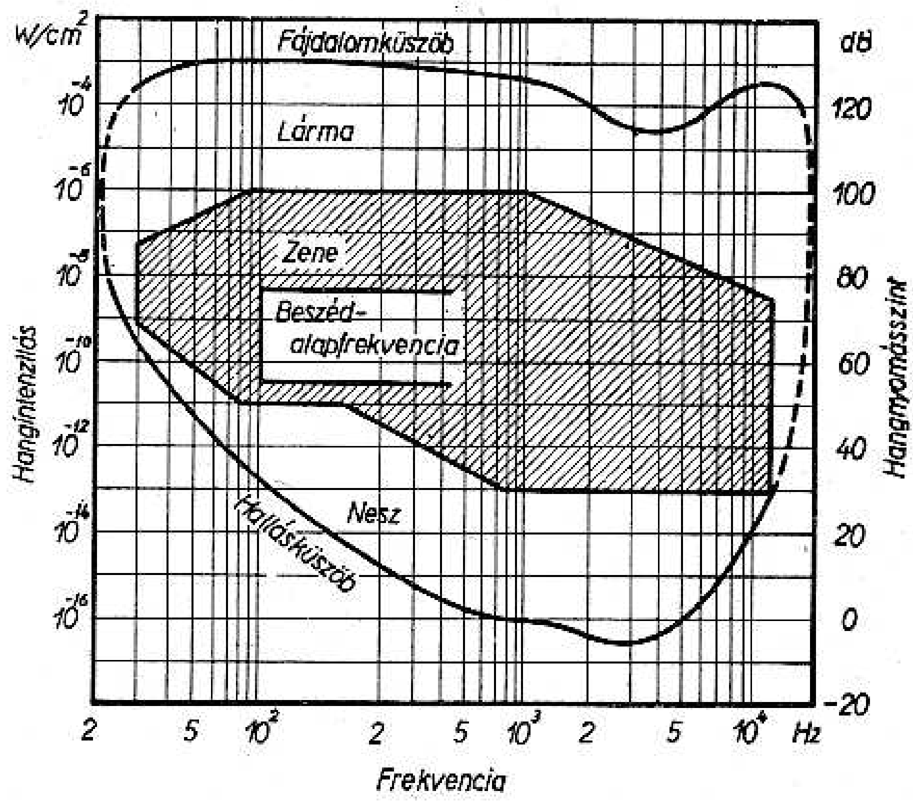
$$E_1 = C \cdot I_1^{\kappa}$$
$$E_2 = C \cdot I_2^{\kappa}$$
$$\rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^{\kappa} \rightarrow \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^{\kappa} = 2 \rightarrow I_2 = 2^{1/\kappa} \cdot I_1 = 10 \cdot I_1$$



A hangosság (son) és hangosságszint (phon) összefüggése (nemzetközi és magyar szabvány)

$$H_S = 0{,}046 \cdot 10^{H_p/30}$$

Az emberi hallástartomány



- A hallásküszöb kialakításában az *elfedés* jelensége játszik szerepet.
- **Elfedés:** egy nagyobb hangosságú hang megnehezíti, illetve megakadályozza egy másik (kisebb hangosságú) hang észlelését.