

# **Mechanikai hullámok**

## **(Vázlat)**

### **1. A hullám fogalma, csoportosítása és jellemzői**

- a) A mechanikai hullám fogalma
- b) Hullámfajták
- c) A hullámmozgás jellemzői
- d) A hullámok polarizációja

### **2. Egydimenziós hullámok**

- a) visszaverődése
- b) interferenciája
- c) állóhullámok kialakulása

### **3. Hullámok matematikai leírása**

### **4. Térbeli hullámok**

- a) Huygens-Fresnel-elv
- b) Felületi és térbeli hullámok viselkedése új határfelületen
- c) Interferencia
- d) Az elhajlás jelensége

### **5. A hanghullámok jellemzői**

- a) A hanghullámok keletkezése
- b) A hanghullámok jellemzői
- c) Húrok által keltett hangok
- d) Sípok által keltet hangok
- e) A Doppler-jelenség

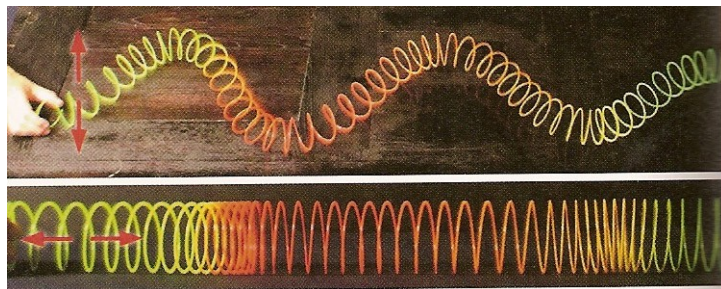
### **6. Fizikatörténeti vonatkozások**

# A mechanikai hullám fogalma, csoportosítása és jellemzői

## a) A mechanikai hullám fogalma

Hullámmozgás akkor alakul, ki ha egy külső erő által létrehozott, deformációs állapot, egy közegben tovább terjed.

Hullámmozgás csak rugalmas és rezgőképes közegben alakul ki. A zavar terjedési sebességét a rugalmas kapcsolat erőssége határozza meg. Rezgőmozgás során impulzus illetve energia terjed a közegben és nem az anyagi részek, végeznek haladó mozgást.



A rugó végét mint két esetben periodikusan mozgatjuk. A belső erők következtében a rugó távolabbi pontjai is átveszik ezt a periodikus mozgást. Így alakul ki a képen látható hullám.

## b) A hullámok csoportosítása

A továbbiakban mi csak harmonikus hullámokkal foglalkozunk. Ilyen hullámok akkor jönnek létre, ha a rugalmas és rezgőképes közegben a deformációs állapotot harmonikus rezgőmozgás hozza létre.

### 1. Kiterjedés szerinti csoportosítás

- **Egydimenziós** hullámok vagy vonal menti hullámok. Pl.: gumikötélen terjedő hullám.
- **Kétdimenziós** hullám vagy felületi hullám. Pl.: víz felületén kialakuló hullám.
- **Háromdimenziós** vagy térbeli hullám. Pl.: hanghullám.

## 2. Rezgésirány szerinti csoportosítás

### ▪ **Transzverzális hullám**

- A részecskék rezgésének iránya merőleges a zavar terjedésének irányára.
- Egy transzverzális hullámban hullámhegyek és hullámvölgyek váltogatják egymást.
- Egy hullámhegy és egy hullámvölgy együttese a hullámhossz ( $\lambda$ ). Amíg a zavar hullámhossznyi utat tesz meg egy periódusidő (T) telik el.
- Csak szilárd közegben alakul ki.
- A zavar terjedési sebessége:  $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

### ▪ **Longitudinális hullám**

- A részecskék rezgőmozgásának iránya megegyezik a zavar terjedésének irányával.
- A longitudinális hullámban egymás mellett lévő sűrűsödés és ritkulás alkotja a hullámhosszt.
- Mindhárom halmazállapotban kialakul.

## c) A hullámmozgás jellemzői

### ▪ **Amplitúdó**

Jele: A

Mértékegysége:  $[A] = \mathbf{m}$

A hullámmozgásban résztvevő részecskék rezgőmozgásának legnagyobb kitérése.

### ▪ **Hullámhossz**

Jele:  $\lambda$

Mértékegysége:  $[\lambda] = \mathbf{m}$

A közegben egymás mellett lévő azonos fázisú pontok távolsága egy adott pillanatban.

### ▪ **Periódusidő**

Jele: T

Mértékegysége:  $[T] = \mathbf{s}$

Az az időtartam, amely alatt a közegben lévő zavar hullámhossznyi utat tesz meg. A periódusidő alatt a közeg minden pontja egy teljes rezgést végez.

- **Rezgésszám**

Jele:  $f$

Mértékegysége:  $[f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$

A hullámmozgásban részt vevő pontok rezgésének a frekvenciája. Ez megegyezik a hullámforrás frekvenciájával.

- **A hullám terjedési sebessége**

A hullám terjedési sebességét fázissebességnek is nevezzük.

Jele:  $c$

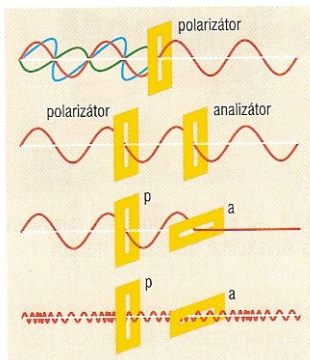
Mértékegysége:  $[c] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

A terjedési sebesség számértéke megmutatja, hogy egy másodperc alatt a közegben terjedő zavar milyen távolságot tesz meg.

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

#### d) A hullámok polarizációja

Polarizációról akkor beszélünk, ha egy alkalmasan megválasztott eszköz segítségével különböző rezgésirányú hullámok közül egyfajta rezgésirányú hullámot kiszűrünk.



- Egy gumikötelet átfűzünk egy függőleges résen.
- A kötéel végét kör mentén periodikusan mozgatjuk.
- Így olyan hullám keletkezik, amelyben a terjedés irányára merőlegesen sokféle rezgésirány megtalálható.
- A résen már csak az a hullám halad át, melynek rezgési iránya a résiránnyal egyezik meg.

Így sikerül a sokféle rezgésirányú hullámok közül egyfajta rezgésirányú hullámot kiszűrni. Az így kiválasztott hullámot **síkban poláros hullámnak** nevezzük.

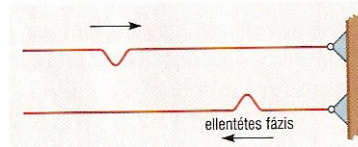
Csak a transzverzális hullám polarizálható.

# Egydimenziós hullámok

## a) Egydimenziós hullámok visszaverődése

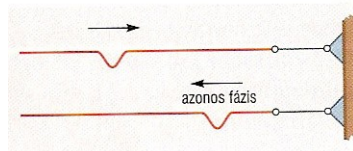
### Rögzített végről:

Rögzített végről a hullám ellentétes fázisban verődik vissza. Ennek az az oka, hogy a hullámban terjedő energiának a visszaverődés után is meg kell maradnia. Amikor a deformációs állapot a rögzített véghez érkezik, akkor a gumikötél erőt fejt ki a falra, a fal ugyanilyen nagyságú, de ellentétes irányú erőt fejt ki a gumikötélre. Ez az erő lesz az, ami a gumikötelet ellentétes fázisba lendíti át.



### Szabad végről:

Szabad végről a hullám azonos fázisban verődik vissza, mert amikor a zavar elérkezik a szabad véghez, akkor a rugalmatlan kapcsolat miatt nincs olyan erő, amely ellentétes fázisba lendítené a gumikötelet.



## b) Hullámok interferenciája

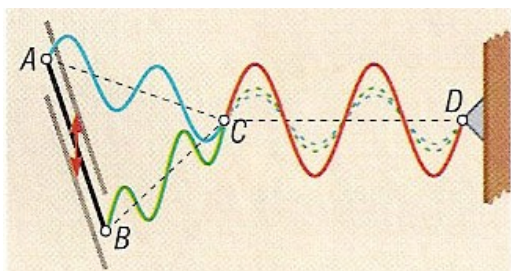
A hullámok találkozásánál tapasztalható fizikai jelenséget **interferenciának** nevezzük.

Az interferencia eredménye lehet a tartósan fennmaradó hullámjelenség, amit **interferenciaképnek** szokás nevezni.

Az interferenciaképet létrehozó hullámokat **koherens hullámoknak** nevezzük.

*Két hullám akkor koherens, ha időben állandó fáziskülönbséggel találkoznak.*

▪ AZONOS FÁZISBAN INDULÓ AZONOS FREKVENCIÁJÚ VONAL MENTI HULLÁMOK INTERFERENCIÁJA



Vonal menti hullámok interferenciája során eredő hullám jön létre. Ilyenkor a pontok kitérése mindenütt és minden pillanatban a találkozó hullámok adott pontbeli kitérésének előjeles összege.

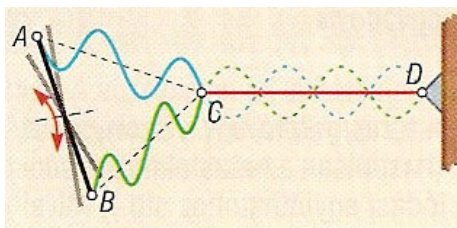
Azonos fázisban induló azonos frekvenciájú hullámok interferenciájuk során akkor erősítik egymást, ha azonos fázisban találkoznak. Ennek az a feltétele, hogy a hullámok által megtett utak különbsége a fél hullámhossz páros számú többszöröse legyen:

$$\Delta s = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Azonos fázisban induló azonos frekvenciájú hullámok akkor gyengítik, vagy oltják ki egymást, ha ellentétes fázisban találkoznak. Ennek az a feltétele, hogy a hullámok által megtett utak különbsége a fél hullámhossz páratlan számú többszöröse legyen:

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

▪ ELLENTÉTES FÁZISBAN INDULÓ AZONOS FREKVENCIÁJÚ HULLÁMOK INTERFERENCIÁJA



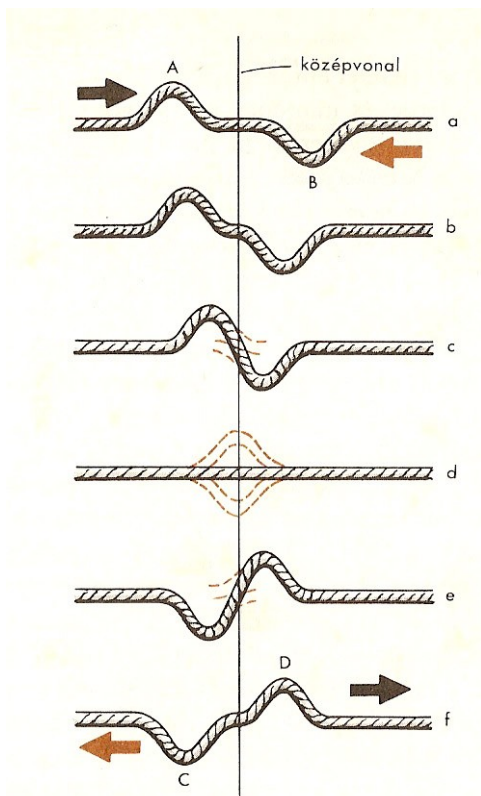
Ellentétes fázisban induló azonos frekvenciájú hullámok interferenciájuk során akkor erősítik egymást, amikor a hullámok által megtett utak különbsége a fél hullámhossz páratlan számú többszöröse.

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Ugyanilyen feltételek mellett induló hullámok akkor gyengítik vagy oltják ki egymást, ha a megtett utak különbsége a fél hullámhossz páros számú többszöröse.

$$\Delta s = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

▪ HALADÓ ÉS VISSZAZERŐDŐ HULLÁMOK INTERFERENCIÁJA

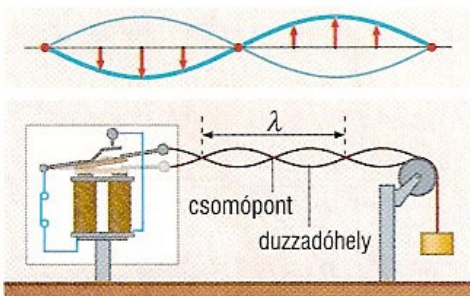


A rögzített végű gumikötélen hullámhegyet indítunk el. Amikor ez a zavar rögzített végről ellentétes fázisban visszaverődik, akkor egy újabb hullámhegyet indítunk vele szemben. Ez a két deformációs állapot közeledik egymáshoz, és úgy tűnik mintha akadály nélkül, áthaladnának egymáson.

Ennek ellentmond az a tény, hogy a gumikötélnak lesz egy olyan pontja, amely nem vesz részt a hullámmozgásban, mert minden pillanatban nyugalomban lesz. Erre a pontra a hullámok közeledésekor két azonos nagyságú, de ellentétes irányú erő hat. Ez a pont rögzített végként viselkedik, és erről az oda érkező hullámok ellentétes fázisban verődnek vissza.

▪ ÁLLÓ HULLÁMOK KIALAKULÁSA

*Állóhullám akkor alakul ki, ha egy haladó és egy visszazérődő periodikus zavar találkozik.*



Ilyenkor lesznek a közegnek olyan pontjai, amelyekre minden pillanatban két ellentétes irányú, de azonos nagyságú erő hat. Ezeket **csomópont**oknak nevezzük, amelyek mindig nyugalomban lesznek.

Két szomszédos csomópont távolsága a hullámhossz fele. A csomópont két oldalán a részecskék rezgésének iránya ellentétes.

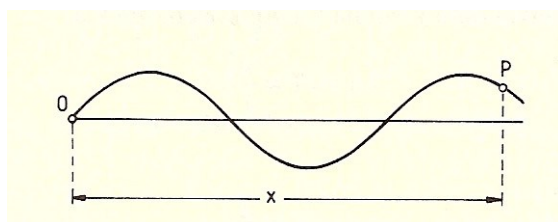
A maximális kitérésű helyeket **duzzadási helyek**nek nevezzük és ezek távolsága is fél hullámhossz.



## A hullámok matematikai leírása

A hullámok matematikai leírásánál olyan egyenleteket kell felírni, amelyekből bármely pillanatban ki tudjuk számolni a hullámban résztvevő részecskék kitérését, sebességét, gyorsulását.

Próbáljuk meghatározni a hullámforrástól  $x$  távolságra lévő részecske a hullámkeltés kezdetétől számított  $t$  idő múlva mekkora kitéréssel rendelkezik!



Vizsgáljuk a hullámforrástól  $x$  távolságra lévő pont mozgását. Ha a zavar terjedési sebessége  $c$  akkor a hullámforrás által elindított zavar  $t' = \frac{x}{c}$  idő múlva érkezik el a vizsgált  $P$  ponthoz.

*Tehát adott pillanatban a hullámforrástól  $x$  távolságra lévő pont ugyanazt a mozgást végzi, mint amelyet a hullámforrás végzett  $t'$  idővel korábban.* A hullámforrástól  $x$  távolságra lévő pont kitérését a következő egyenletekkel számoljuk ki:

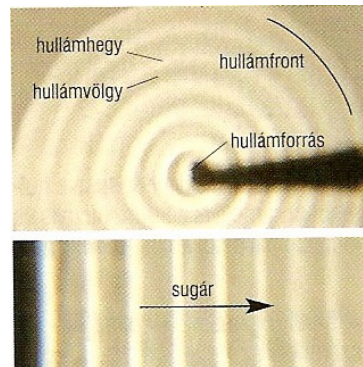
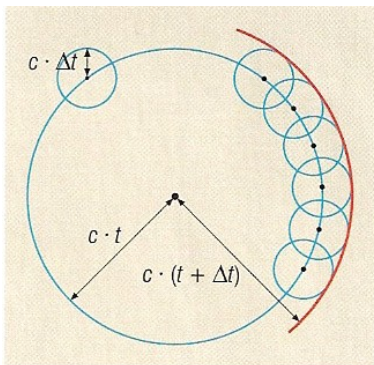
$$y = A \cdot \sin \omega (t - t') = A \cdot \sin 2\pi \cdot f(t - t')$$

$$y = A \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{c} \right) = A \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{T \cdot c} \right) = A \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

# Felületi és térbeli hullámok

## a) Huygens-Fresnel-elv

A térbeli hullámok kialakulásának magyarázatát **Huygens** fogalmazta meg 1678-ban.



A hullámok úgy terjednek, hogy a hullámfelület minden pontjából elemi hullámok indulnak, ezen elemi hullámok burkolófelülete lesz az új hullámfelület.

**Fresnel** 1819-ben a Huygens-elvben szereplő burkolófelületnek az interferencia jelenséggel adott értelmet.

A **Huygens-Fresnel-elv** szerint a hullámtér minden pontja az elemi hullámok kiindulópontja. A hullámtérben megfigyelhető jelenségek az elemi hullámok interferenciája miatt jönnek létre.

## b) Felületi és térbeli hullámok viselkedése új határfelületen

A térbeli hullámok új határfelülethez érkezve

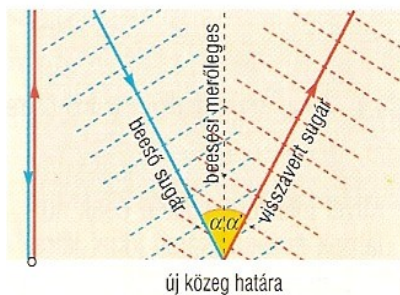
1. részben elnyelődnek,
2. részben visszaverődnek,
3. részben megtörnek.

## 1. A hullámok elnyelődése

A hullámok elnyelődése során az új közeghatárhoz érkező hullám energiájának egy részét átadja az új közegnek. Így az új közeg részecskéi is rezgőmozgásba kezdenek.

## 2. A hullámok visszaverődése

Ha a hullám egy olyan közeg határfelületéhez érkezik, amely nem rugalmas és rezgőképes, akkor erről a határfelületről visszaverődik.



### Néhány elnevezés

#### ▪ Beesési pont

A sugár és a visszaverő felület találkozási pontja.

#### ▪ Beesési merőleges

A beesési pontba képzelt, a közeghatárra merőleges egyenes.

#### ▪ Beesési szög

A beeső sugár és a beesési merőleges által bezárt szög.

#### ▪ Visszaverődési szög

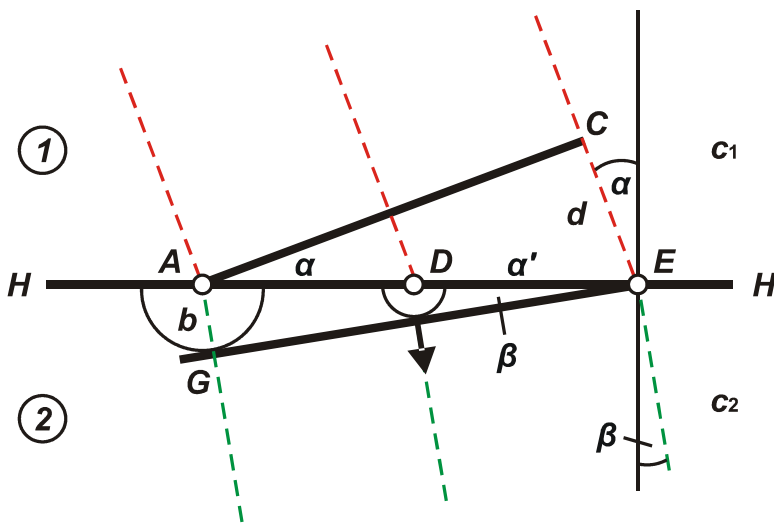
A visszavert sugár és a beesési merőleges által bezárt szög.

Célszerű egy keskeny, egyenes hullám visszaverődését vizsgálni az új közeg határáról. Pl. vízfelületen egy vonalzó periodikus mozgásával indítunk el egy felületi hullámot. A közegben a zavar terjedési sebessége  $c$ .

- A haladó és a visszaverődő hullám frekvenciája is  $f$ , így visszaverődés során a hullám hullámhossza ( $\lambda$ ) sem változik.
- Ha a hullámfelület minden pontja egyszerre éri el a visszaverő felületet, akkor a hullám ugyanazon az úton verődik vissza, mint amelyen érkezett. *Tehát, a merőlegesen beeső hullám merőlegesen verődik vissza.*
- *Ha a hullámfelület pontjai nem egyszerre érik el a visszaverő felületet, akkor a beesési szög megegyezik a visszaverődési szöggel.*



## Bizonyítás



Amikor az első közegben a hullámfelület első pontja eléri a közeghatárt, akkor elemi hullámok, indulnak a második közeg felé. Ilyenkor a legtávolabbi pontnak  $c_1 \cdot t$  utat kell megtenni ( $t$  jelölje azt az időt, ami a hullámfelület első és utolsó pontjának a felülethez való érkezése között eltelt).

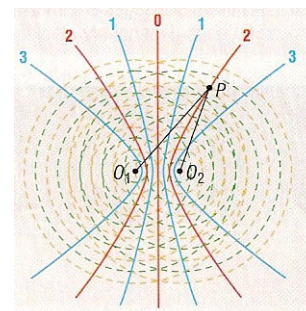
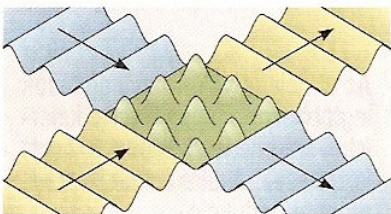
Mire ez a deformációs állapot is elérkezik a közeghatárhoz, addigra a legelső pontból kiinduló elemi hullámok már  $c_2 \cdot t$  távolságra jutottak az új közegben. Hullám törésekor frekvenciája nem változik.

$$\sin \alpha = \frac{c_1 \cdot t}{d} \qquad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{2;1}$$

$$\sin \beta = \frac{c_2 \cdot t}{d}$$

## c) Felületi és térbeli hullámok interferenciája

Felületi és térbeli hullámok is létrehozhatnak interferenciaképet, ha a találkozó hullámok koherensek.



Az interferenciakép létrejöttének azonban itt is szigorú feltételei vannak. Pl. a vízfelületen két egymástól távol lévő, de együtt mozgó tüvel keltett körhullámok interferenciája hiperbolák mentén hoz létre hullámhegyeket és hullámvölgyeket.

Két hullám a hullámtér azon pontján hoz létre **maximális erősítést**, ahol a hullámok azonos fázisban találkoznak (hullámhegy hullámhegygel, hullámvölgy hullámvölgygel, sűrűsödés sűrűsödéssel, ritkulás ritkulással)

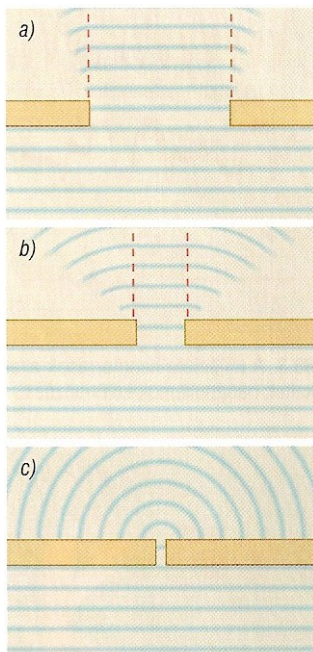
Ilyen feltételek mellett induló hullámok akkor találkoznak azonos fázisban, ha a hullámok által megtett utak különbsége a félhullámhossz páros számú többszöröse.

$$\Delta s = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Két azonos frekvenciájú, azonos fázisban induló hullám **maximális gyengítése** akkor következik be, ha a hullámok által megtett utak különbsége a félhullámhossz páratlan számú többszöröse.

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

#### d) Az elhajlás jelensége



Hullámok elhajlásáról akkor beszélünk, hogyha a hullám útjába egy olyan akadályt helyezünk, amelyben lévő nyílás közel hasonló méretű, mint a hullámhossz. Ilyenkor az akadály mögötti térrészben is észlelünk hullámjelenséget.

Ennek, az az oka, hogy az akadály nyílásánál lévő részecskék, a belső erők következtében átveszik a rezgőmozgást, és elemi hullámokat indítanak el. Ezek burkoló felülete lesz az akadály mögötti részben észlelhető új hullámfelület.

A hullám elhajlása során a hullám intenzitása jelentősen csökken.

# A hanghullámok jellemzői

## a) A hanghullámok keletkezése

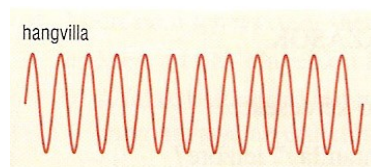
A hang rugalmas és rezgőképes közegben terjedő olyan hullám, ami hallószervünkben hangérzetet kelt. Az emberi fül 20-20000 Hz-ig terjedő mechanikai rezgéseket képes érzékelni.

Ha a frekvencia kisebb, mint 20 Hz, akkor hangot **infrahang**nak nevezzük. Néhány halfajta ez alapján tájékozódik.

Ha a frekvencia nagyobb, mint 20000 Hz akkor **ultrahang**okról beszélünk. Ez alapján tájékozódnak a denevérek, és a kutyák is hallják.

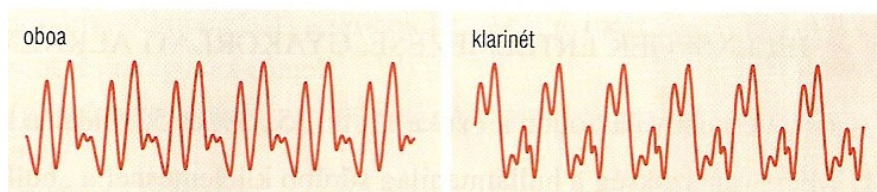
### 1. Tiszta zenei hang

- a hangforrás rezgése szinuszos,
- a keltett hullámok rezgése periodikus és szinuszos,
- csak egyfajta frekvenciájú hangból áll,
- pl.: a hangvilla által keltett hang (440Hz).



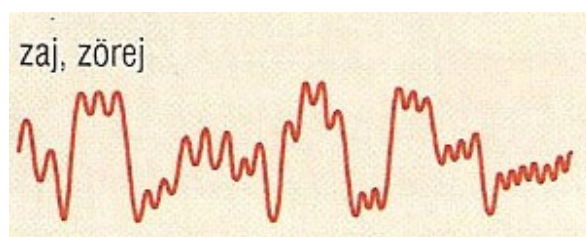
### 2. Zenei hang

- az alaphangok mellett a felhangok is megszólalnak különböző intenzitással,
- a **felhangok** frekvenciája az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösei,
- zenei hangnak nem feltétlenül szükséges szinuszosnak lennie csak az a fontos, hogy periodikus legyen.



### 3. Zörej

- szabálytalan nem szinuszos és nem periodikus rezgésű hanghullámok



## b) A hang jellemzői

### 1. Hangintenzitás, hangerősség

Egységnyi idő alatt egységnyi felületre jutó hangenergia, függ a rezgéskeltő amplitúdójától.

Jele: I

$$[\mathbf{I}] = \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m}^2}$$

### 2. Hangmagasság

A rezgésszámtól függ, minél nagyobb a rezgésszám, annál magasabb a hang.

### 3. Hangköz

Két hang viszonylagos magasságát a rezgésszámok hányadosa méri.  
A 2:1 arányú hangköz neve oktáv.

### 4. Hangszín

Attól függ, hogy az alaphangok mellett milyen más felhangok szólalnak meg, és milyen intenzitással. A hangszeres doboza, a fej csak bizonyos felhangokat erősít fel, ezért egyediek a hangszínek.

### 5. Hangterjedési sebesség

A mechanikai hullámok terjedéséhez közegre van szükség. A hang terjedési sebessége függ a hőmérséklettől és az anyag minőségétől.

## c) Húrok által keltett hangok

**Monochordon** az az eszköz, amelyen egyetlen húr található. A húron csak olyan hullámhosszúságú hullámok alakulnak ki, amelyek a fél hullámhossz egész számú többszörösei.





## Alaphang

A húr által kibocsátott olyan hang, amikor a húron fél hullámhossz alakul ki.

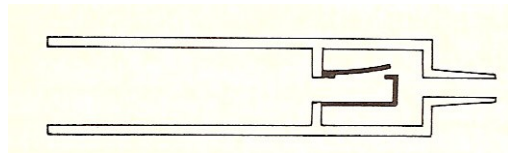
## Felhangok

Az alaphangnál kisebb hullámhosszúságú hangok.

## d) Sípok által keltett hangok

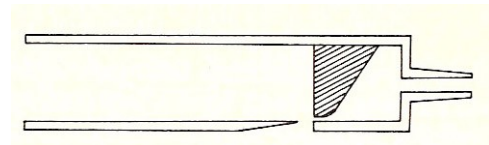
### Nyelvsíp

A nyelvsípban található a befűvés helyén egy olyan könnyen mozgó lemez, amely az áramló levegőben fellépő nyomáskülönbségek miatt hol nyit, hol zár. Ez a periodikus mozgás indítja el a hanghullámot.



### Ajaksíp

Ajaksípban a levegő útjának jelentős részét akadály zárja el, így örvények keletkeznek. Az örvények leválása indítja el a hullámokat.

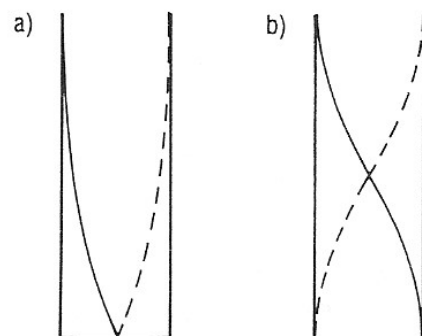


### Zártsíp

A befűvés helyével szemben a síp zárt, alaphang kibocsátása esetén a síp hossza a hullámhossz negyede.

### Nyitott síp

A befűvés helyével szemben a síp nyitott, alaphang kibocsátása esetén a síp hossza a hullámhossz fele.



## e) Doppler-jelenség

**Doppler 1842-ben** elsőként írta le, hogy a hangforrás és a megfigyelő egymáshoz viszonyított mozgása, hogyan befolyásolja a hullámok észlelt frekvenciáját.

Ezt a jelenséget Doppler jelenségnek nevezzük.

A leírás során használt jelölések:

$c$  zavar terjedési sebessége a közegben,

$v_m$  a megfigyelő sebessége,

$v_f$  a forrás sebessége,

$f_0$  1s alatt indult periodikus hullámok.

Különböző eseteket vizsgálva meghatározható a megfigyelő által észlelt frekvencia. Ettől függ, hogy milyen magasságú hangot hall a megfigyelő.

### 1.) A megfigyelő nyugalomban van ( $v_m=0$ )

— és a hullámforrás közeledik a megfigyelőhöz  $v_f$  sebességgel

A közegben időegység alatt (pl. 1 secundum alatt) kialakult  $f_0$  hullám  $c-v_f$  szakaszon helyezkedik el, így egyetlen hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c - v_f}{f_0}.$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\frac{c - v_f}{f_0}} = f_0 \cdot \frac{c}{c - v_f}$$

Ha a hangforrás közeledik a megfigyelő felé, az egyre magasabbnak észleli a hangot, mivel  $f > f_0$ .

— és a hullámforrás távolodik a megfigyelőtől  $v_f$  sebességgel

A közegben időegység alatt kialakult hullám  $c+v_f$  szakaszon helyezkedik el, így egyetlen hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c + v_f}{f_0}$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\frac{c + v_f}{f_0}} = f_0 \cdot \frac{c}{c + v_f}$$

Ha a hangforrás távolodik a megfigyelőtől, az egyre mélyebbnek észleli a hangot, mivel  $f < f_0$ .

## 2.) A hullámforrás nyugalomban van ( $v_f=0$ )

— és a hullámforráshoz közeledik a megfigyelő

A hullámforrás által kibocsátott hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

A megfigyelőhöz viszonyítva a zavar terjedési sebessége:

$$c' = c + v_m$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$f = \frac{c'}{\lambda} = \frac{c + v_m}{\frac{c}{f_0}} = f_0 \cdot \frac{c + v_m}{c}$$

Ha hangról van szó, akkor azt magasabbnak, észleljük, mivel  $f > f_0$ .

— és a hullámforrástól távolodik a megfigyelő

A hullámforrás által kibocsátott hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

A megfigyelőhöz viszonyítva a zavar terjedési sebessége:

$$c' = c - v_m$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$f = \frac{c'}{\lambda} = \frac{c - v_m}{\frac{c}{f_0}} = f_0 \cdot \frac{c - v_m}{c}$$

Ha hangról van szó, akkor azt mélyebbnek észleljük, mivel  $f < f_0$ .

### 3.) Nyugvó közegben a forrás és megfigyelő

— *közelednek egymáshoz*

A hullámforrás által kibocsátott hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c - v_f}{f_0}$$

A megfigyelőhöz viszonyítva a zavar terjedési sebessége:

$$c' = c + v_m$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$f = \frac{c'}{\lambda} = \frac{c + v_m}{\frac{c - v_f}{f_0}} = f_0 \cdot \frac{c + v_m}{c - v_f}$$

Tehát az észlelő magasabb hangot hall, mivel  $f > f_0$ .

— *távolodnak egymástól*

A hullámforrás által kibocsátott hullám hullámhossza:

$$\lambda = \frac{c + v_f}{f_0}$$

A megfigyelőhöz viszonyítva a zavar terjedési sebessége:

$$c' = c - v_m$$

A megfigyelő által észlelt frekvencia:

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{c}'}{\lambda} = \frac{\mathbf{c} + \mathbf{v}_m}{\mathbf{c} - \mathbf{v}_f} = \mathbf{f}_0 \cdot \frac{\mathbf{c} - \mathbf{v}_m}{\mathbf{c} + \mathbf{v}_f}$$

Ilyen esetben a megfigyelő mélyebb hangot hall, mivel  $f < f_0$ .

## Fizikatörténeti vonatkozások

### **DESCARTES, RENÉ (1596-1650)**

Francia matematikus, fizikus, filozófus



Nyolcéves korától egy jezsuita líceumba járt, később orvostudományt és jogot tanult, majd hadmérnöki képesítést szerzett. 1619-ben hosszú utazásra indult, eközben kezdett filozófiával foglalkozni. Járt Koppenhágában, Lengyelországban, Magyarországon, Ausztriában és Csehországban.

Descartes a fizikában elsősorban optikával foglalkozott: kidolgozta a fénytörés elméletét, és gyakorlati útmutatást adott a lencsék csiszolására.

### **HUYGENS, CHRISTIAN (1629 – 1695)**

Holland matematikus, fizikus és politikus



Németországban, Angliában és Franciaországban tanult, hazatérve Hágába matematikai problémák foglalkoztatták. 1657 feltalálta az ingaórát. Kidolgozta a matematikai és fizikai inga elméletét és 1673-ban adta ki Az ingaóra című könyvét, melyet sokévi számítások és töprengések során alkotott.

A körmozgást vizsgálva bevezette a centrifugális erő fogalmát. 1669-ben megadta a rugalmas ütközés törvényeit és megalapozta a fény és a mechanikai hullámok elméletét. Tökéletesített távcsövével 1655-ben fölfedezte a Szaturnusz legnagyobb holdját, a Titánt, és felismerte, hogy a bolygót gyűrű övezi.

## **FRESNEL, AUGUSTIN-JEAN (1788-1827)**

**Francia fizikus**



Úttörő szerepet játszott az optikában. Sokat tett azért, hogy a fény hullámelmélete, amelyet Thomas Young vetett föl, elfogadottá váljék. Tanulmányozta a fényelhajlást, több eszközt is alkotott az interferenciacsíkok létrehozására. Eredményeit matematikai elemzésnek alávetve, több akadályt hárított el a hullámelmélet útjából.