

A biofizika fizikai alapjai

6. előadás 2022. 09. 22.

Orosz Ádám

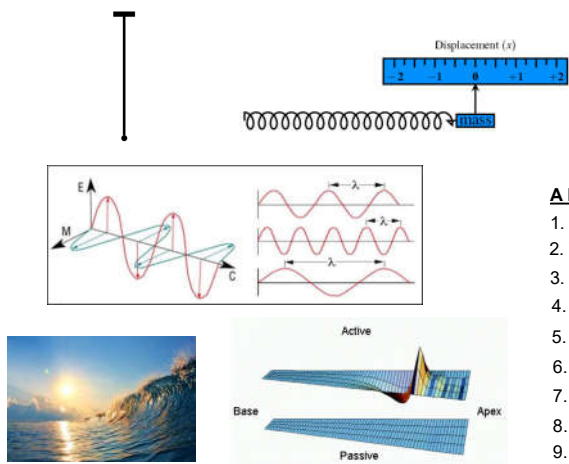
Rezgések és hullámok

A rezgés tan alapfogalmai

1. Rezgések fajtái
2. Harmonikus rezgés
3. Visszatérítő erő
4. Sajátrezgés és sajátfrekvencia
5. Kényszerrezgés
6. Rezonancia

A hullámtan alapfogalmai

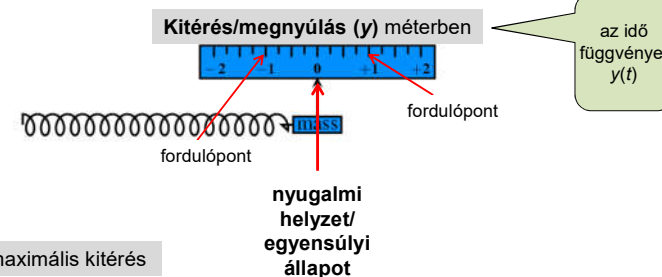
1. Hullámhossz
2. Transzverzális és longitudinális hullámok
3. Hullámjelenségek - Interferencia
4. Huygens-Fresnel-elv
5. Diffrakció
6. Állóhullámok
7. (lineáris) polarizáció
8. Mechanikai hullámok – a hang
9. Elektromágneses hullámok – a fény



A rezgés tan alapfogalmai

Oszcillátor: rezgésre képes fizikai rendszer (pl. egy rugó a ráfüggesztett testtel).

Rezgés (mechanikai): egy test egyensúlyi állapot körüli **periodikus** (ismétlődő) **mozgása**.



Amplitúdó (A): a maximális kitérés

Emlékeztető:

• **Periódusidő/rezgésidő (T):** egy rezgési periódus időtartama.

• **Frekvencia/rezgésszám (f):** időegység alatti periódusok száma. A periódusidő reciproka:

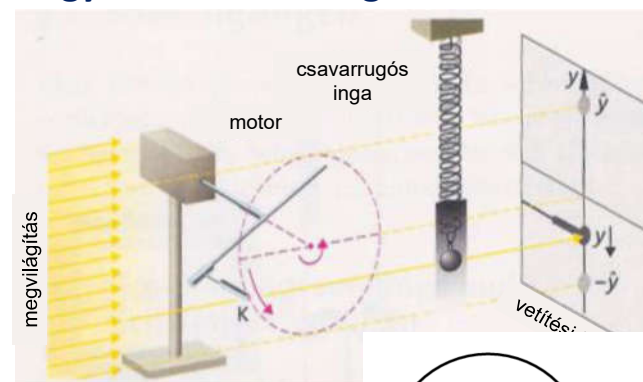
$$f = \frac{1}{T} \quad \left(\frac{1}{s} = \text{Hz} \right)$$

• **Körfrekvencia (ω):** 2π-kénti rezgések száma. A frekvencia 2π-szerese: $\omega = 2\pi f$

A rezgések fajtái

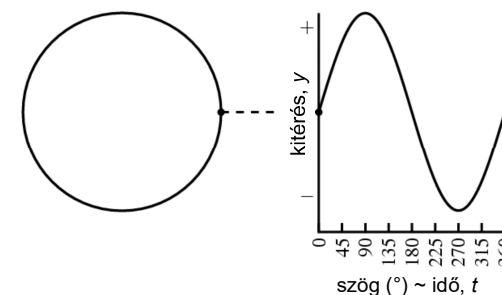
Harmonikus rezgés (szinuszos rezgés)	Nem harmonikus rezgés (nem szinuszos rezgés)
ingóra, rugós inga – rugós oszcillátor	az emberi hangszál rezgései lengéscsillapítók az autókban
Csillapítatlan rezgés	Csillapított rezgés
hangszóró membránja adott hangosságú hang esetén	magára hagyott inga, rezgéscsillapító

Egyenletes körmozgás – harmonikus rezgőmozgás



A kitérés-idő függvény általános alakja:

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$



Kitérés, sebesség, gyorsulás, erő

Sajátrezgés (szabad rezgés)

Előfeltétel:

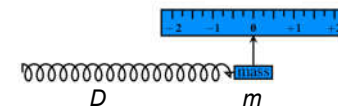
Egyszeri behatás által rezgésbe hozzuk az oszcillátort.

Sajátrezgés: további behatás nélkül lejátszódó rezgés.

Sajátfrekvencia: egy **sajátrezgés frekvenciája**.

Az **oszcillátor tulajdonságai** határozzák meg (tömeg, geometriai adottságok, anyagi tulajdonságok stb.).

Rugós oszcillátor



$$f_{\text{saját}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}$$

Megjegyzés:

Az egyenlet csak ideális esetben érvényes, vagyis a rezgés harmonikus (és nem csillapított). Valójában mindig van energiavesztés (súrlódás, légellenállás, ...), így a rezgés csillapításra kerül.

5

6



Feladat

A testtömeg meghatározása a világűrben egy rugós oszcillátor segítségével történik. A méréshez használt oszcillátor tömege 6,5 kg, periódusideje 0,75 s. Az űrhajóssal együtt a periódusidő 2,7 s-ra emelkedett. Számítsa ki az űrhajós tömegét!

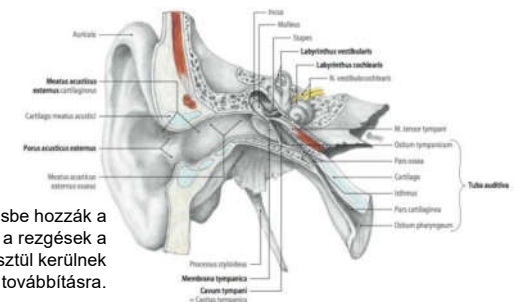
Kényszerrezgés

Egy **periodikus külső erő hatására** létrejövő rezgés.



Ha megütjük az egyik hangvillát, a létrejövő légnemű-ingadozások a másik hangvillát is rezgésbe hozzák (feltéve, hogy mindkét hangvilla azonos hangmagasságra van hangolva).

A légnemű-ingadozások rezgésbe hozzák a dobhártyát, majd ezek a rezgések a hallócsontocskákon keresztül kerülnek továbbításra.



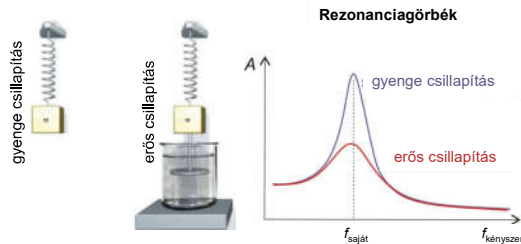
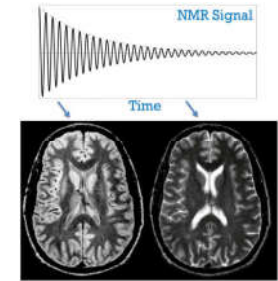
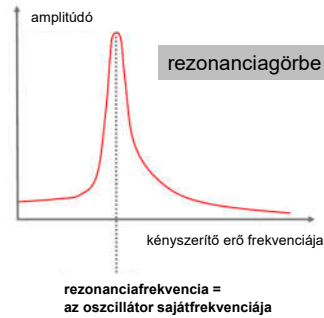
- Kényszerrezgés során a **kényszerítő erővel fenntarthatjuk** a **harmonikus rezgést** állandó amplitúdóval, az energiavesztések ellenére is.
- A **rezgő** rendszer **átveszi** a **rezgető** rendszer frekvenciáját.

7

8

Rezonancia

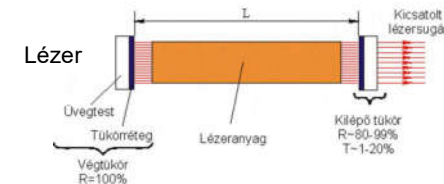
- Ha egy rezgésre képes rendszerrel egy külső gerjesztő rezgéssel periodikusan energiát közlünk, akkor egy bizonyos beállási időt követően **kényszerrezgés** fog kialakulni.
- A kényszerrezgés **frekvenciájától függően** különböző **amplitúdójú** rezgések alakulnak ki.
- Ha a **kényszerrezgés frekvenciája** és a **rendszer sajátfrekvenciája egybeesik**, akkor különösen erős, **nagy amplitúdójú** kényszerrezgés alakul ki.
- Az egy adott frekvencián fellépő különösen nagy amplitúdójú rezgést **rezonanciának** hívjuk, a jelenségre jellemző frekvenciát pedig **rezonanciafrekvenciának**.



Megjegyzés:
A rezonancia jelenségét több technikai eszközben felhasználjuk (pl. mágneses magrezonancia spektroszkópia és képalkotás, lézer, ...)

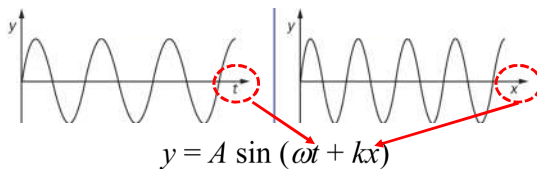
9

Optikai rezonátor

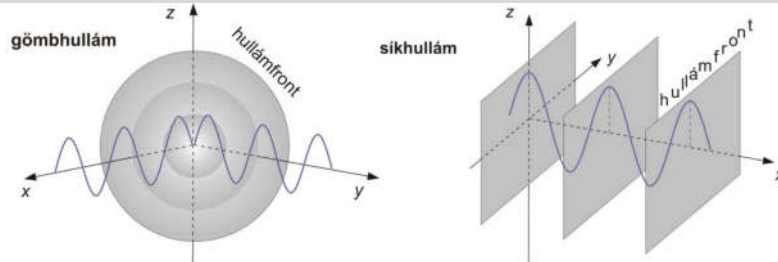


A hullámtan alapfogalmai

- Egy **rezgési állapot terjedése** egy rezgésre képes közegben.
- Egy fizikai mennyiség **időbeli** és **térbeli** periodikus (ismétlődő) változása.



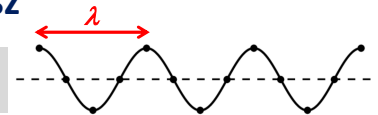
Hullámfelület vagy **Hullámfront**: Ugyanabban a rezgési fázisban – azaz ugyanabban a rezgési állapotban – lévő pontok által meghatározott felület.



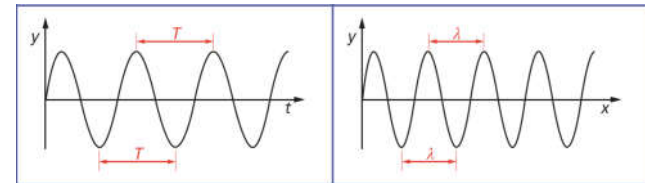
11

Hullámhossz

Hullámhossz (λ): két egymást követő azonos fázisú pont közötti távolság.



- A **hullámhossz** a periódusidővel analóg mennyiség. A **térbeli periodicitást** jellemzi, míg a **periódusidő** az **időbelit**.



A hullámhossz és a periódusidő (ill. frekvencia) közti összefüggés:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

celeritas (lat.) - gyorsaság

A hullám terjedési sebessége

Megjegyzés:
Az összefüggés általánosan érvényes minden hullámfajtára (legyenek ezek mechanikai, elektromágnesen vagy akár anyaghullámok).

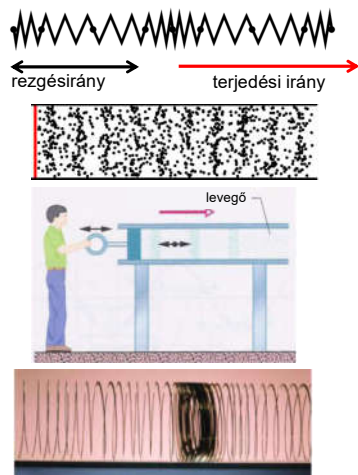
12

Longitudinális és transzverzális hullámok

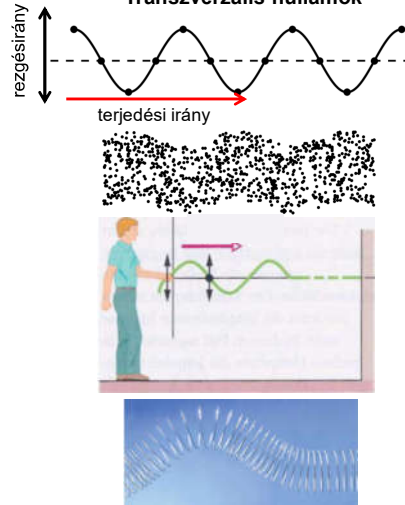
Annak függvényében, hogy a **kitérés (rezgés) iránya** a hullám **terjedési irány** között milyen viszony áll fenn, elkülöníthetünk longitudinális és transzverzális hullámokat:

- **Longitudinális hullámok:** A rezgés iránya **párhuzamos** a terjedés irányával.
- **transzverzális hullámok:** A rezgés iránya **merőleges** a terjedési irányra.

Longitudinális hullámok



Transzverzális hullámok



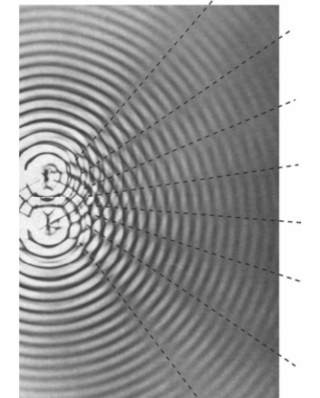
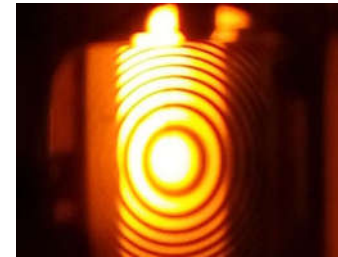
13

Hullámjelenségek

A „vízhullám”: direkt módon megfigyelhető. Mert elég lassan változik (kis f) és elég nagy méretű (nagy λ).

De pl. „fényhullám” nem ilyen.

Azonban bizonyos feltételek mellett **mintázatok** jöhetnek létre, amelyek **időben nem**, vagy csak lassan **változnak**, méretük pedig lényegesen nagyobb lehet, mint λ .

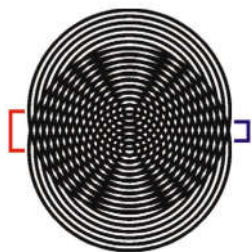


14

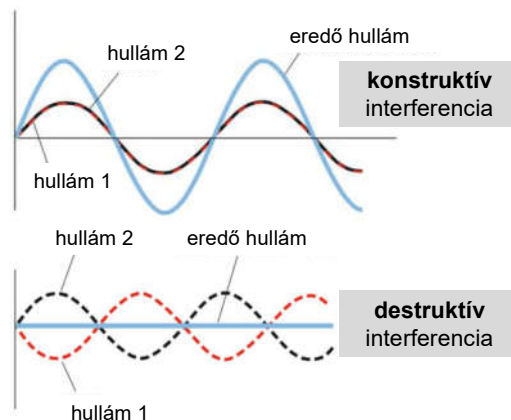
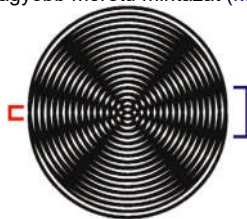
Interferencia

A hullámokkal kapcsolatos **legfontosabb jelenség** az **interferencia**. Két vagy több hullám találkozásakor jön létre. A mintázatok láthatóságának feltételei:

- Koherens hullámok (pl. állandó fáziskülönbség, $\Delta\phi = \text{áll.}$)
- Források távolsága összemérhető a hullámhosszal

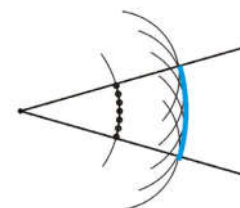
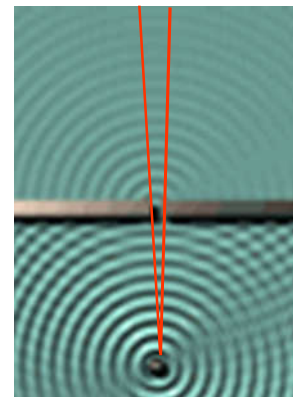


Kisebb forrástávolság (piros jel), nagyobb méretű mintázat (kék jel).

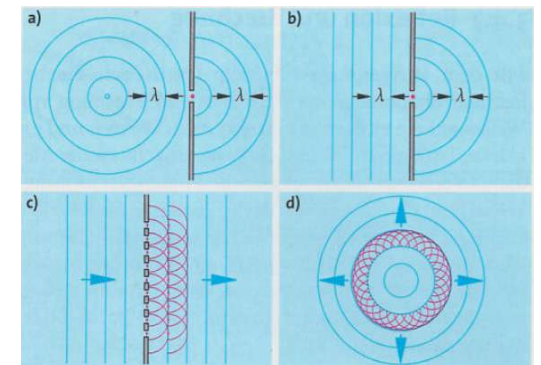


15

Huygens–Fresnel-elv – a hullámoptika alapelve



- Egy **modell** a hullám terjedésének leírására
- **Huygens:** A hullámfront minden pontja egy új gömbhullám, az **elemi hullám** kiindulópontjának tekinthető
- Az elemi hullám ugyanolyan sebességgel és frekvenciával terjed, mint az eredeti hullám
- Az elemi hullámok **közös burkolófelülete** eredményezi az új hullámfrontot
- **Fresnel:** új burkolófelület létrejöttkor érvényesül a **szuperpozíció elve**, áthaladnak egymáson - **interferálnak**

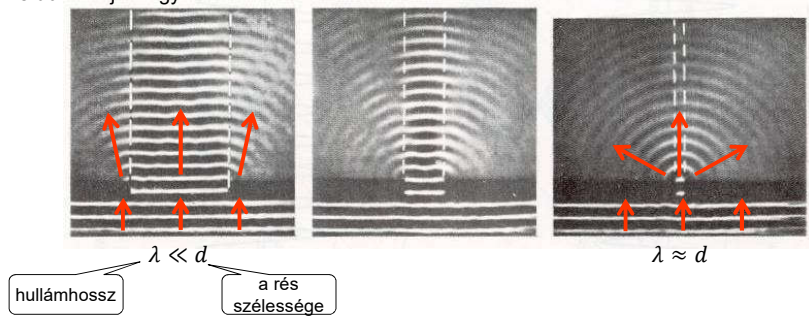


16

Elhajlás (diffrakció)

A hullám **terjedési irányának megváltozása** a hullám útjában álló **akadályokon, nyílásokon** (nem két közeg határfelületén!).

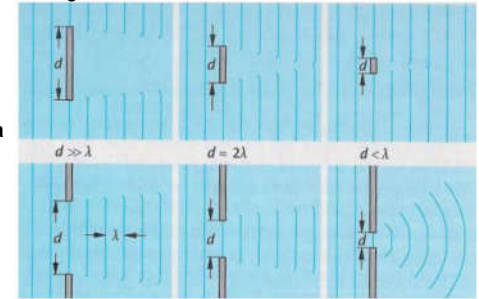
Példa: elhajlás egy résen:



A hullámok egy **nyílás mögött** olyan **tartományba is behatolnak**, amely az egyszerű **geometriai** várakozás alapján „**árnyéktérnek**” minősül.

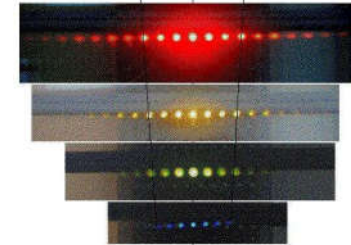
17

- Az **akadály** vagy a **nyílás méretének** és a **hullámhossz** arányának függvényében a **diffrakció többé vagy kevésbé hangsúlyos**
- A diffrakció annál hangsúlyosabban jelenik meg:



- minél **kisebb az akadály vagy a rés** (adott hullámhossz esetén)

- Minél **nagyobb a hullámhossz** (adott résszélesség esetén)



Alkalmazások:

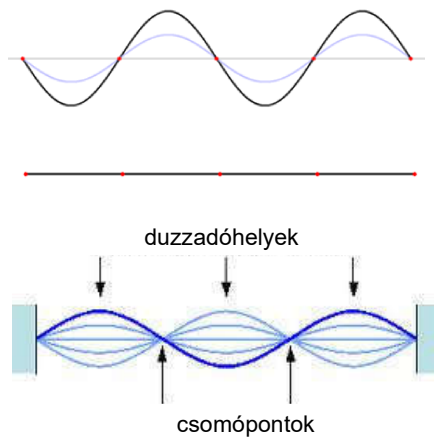
- Diffrakciós módszerek
- A fényelhajlás az oka minden optikai készülék véges felbontóképességének, pl. mikroszkóp, szem.

18

Állóhullámok

Egy hullám visszaverődése

- szabad vég
- rögzített vég

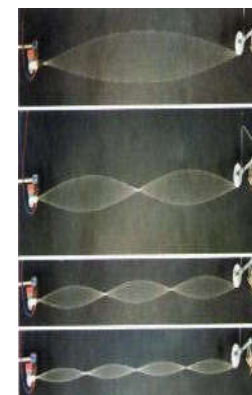


- Két azonos frekvenciájú és amplitúdójú de **ellentétes terjedési irányú síkhullám interferenciájának** eredményeként jön létre (pl. Visszaverődő és beeső hullámok egymásra helyezése) – az eredő hullám állni látszik
- Az egyes pontok eltérő amplitúdóval rezegnek (csomópontokban nulla, duzzadóhelyeken max.)
- Két csomópont között azonos fázis, szomszédos tartományokban ellentétes
- A szabad végen duzzadóhely, a rögzített vég csomópont

19

Állóhullámok

Példa: Egy rendszer két rögzített véggel (mindkettő csomópont). Így a húr hossza meghatározza a lehetséges hullámhosszakat.



alapharmonikus

A húr sajátfrekvenciái

$$\lambda_0 = 2 \cdot l \Rightarrow f_0 = \frac{c}{2l}$$

f_0 - alaphfrekvencia

1. felharmonikus

$$\lambda_1 = l \Rightarrow f_1 = \frac{c}{l} = 2 \cdot f_0$$

2. felharmonikus

$$\lambda_2 = \frac{2}{3} \cdot l \Rightarrow f_2 = \frac{3c}{2l} = 3 \cdot f_0$$

l

Megjegyzés:

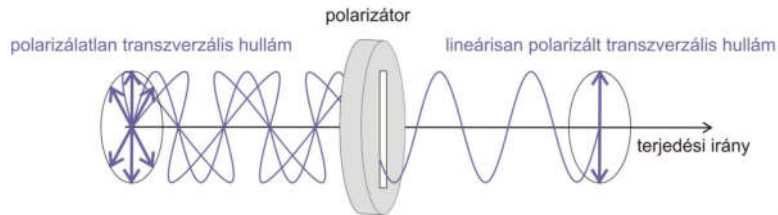
Egy hegedű húrjának alaphfrekvenciáját beállíthatjuk pl.:

- a húr hosszának változtatásával (ha l kisebb, λ is kisebb, f nagyobb, mert c változatlan)
- Az alap és felharmonikusok összessége határozza meg a hangszínt

20

(Lineáris) polarizáció

- **Transzverzális hullámok** esetén a rezgés iránya és a terjedési irány merőleges egymásra
- A **rezgés iránya** ezzel még **nincs pontosan meghatározva**, bár mindig merőleges a terjedési irányra (= polarizálatlan hullám)
- **Egy rezgésirány (rezgéssík) "kiválasztását"** egy polarizátor segítségével lineáris polarizációnak nevezzük. **Csak transzverzális hullám polarizálható.**

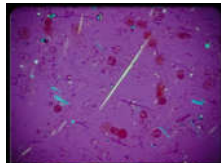


A polarizált fény használata:

Polarizációs mikroszkóp



köszvény

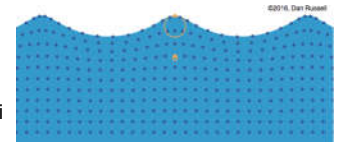


húgsavkristályok polarizációs mikroszkópban

21

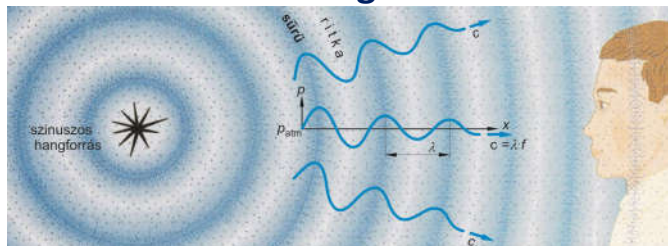
Mechanikai hullámok

- **Anyagi mozgásokhoz kötöttek** (közegre van szükségük a terjedéshez)
- A közeg alkotóelemeinek mozgása pl.:
 - a víz hullámai (víz)
 - hanghullámok (pl. levegő)
- Lehetnek longitudinális és transzverzális hullámok is.
- A mechanikai **longitudinális** hullámok **minden közegben** képesek a terjedésre, a mechanikai **transzverzális** hullámok csak **szilárd anyagokban**. (A víz felületi hullámai azonban részben transzverzálisak).
- A hullámok terjedésével **energiatranszport** jár együtt, de **anyagtranszport nem**.



22

Hang



- A hanghullámok **mechanikai hullámok**, az **emberi hallás alapján négy tartományba** oszthatók:

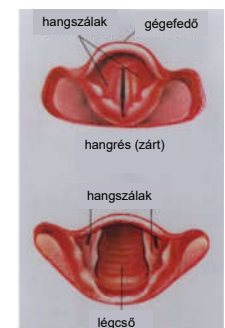
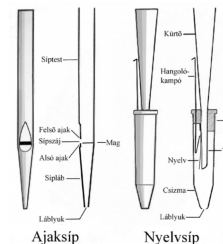
Hangtartományok	infrahang	hallható hang	ultrahang	hiperhang
frekvenciaértékek (Hz)	< 20	20–20 000	20 000–10 ⁹	10 ⁹ <

- A **hangsebesség** általában alacsonyabb gázokban, mint folyadékokban, és alacsonyabb folyadékokban, mint szilárd anyagokban.

közeg	c_{hang} (m/s)
levegő (0°C, 101 kPa)	330
hélium gáz (0°C, 101 kPa)	965
víz (20°C)	1483
zsírszövet	1470
izomszövet	1568
csontszövet (kompakt)	3600
vas	5950

23

Hanghullámok keltése



24

Feladat

A delfin 7 mm hullámhosszúságú hangot bocsát ki.

a) Számítsa ki a frekvenciát vízben!



b) Melyik frekvencia tartományba tartozik ez a hang?

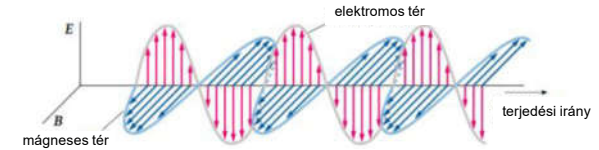
c) A hanghullámok a vízből a levegőbe jutnak. Számítsa ki a frekvenciát a levegőben!

d) Számítsa ki a hullámhosszat levegőben!

25

Elektromágneses hullámok

• Elektromos és mágneses mezők hullámai

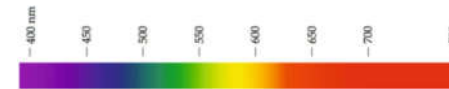


- Az elektromágneses tér a rezgésre képes közeg, így ezek a hullámok **vákuumban is terjedni tudnak**
- **Transzverzális hullámok** (amelyek ezáltal **polarizálhatók** is)
- Minden elektromágneses hullám **vákuumban azonos sebességgel**, a fénysebességgel terjed:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

A fény - a legismertebb elektromágneses hullám

- A látható fény spektruma kb. 380 nm–780 nm közé esik (VIS-tartomány) → **400 nm–800 nm**



26