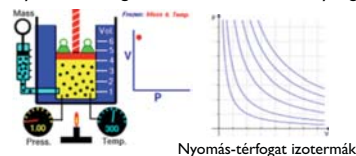


# A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

## Releváns fizikai és fizikai-kémiai törvények

**1. Egyetemes gáztörvény** (Clausius-Clapeyron, Boyle-Mariotte, Charles törvények alapján): Összefüggés az ideális gáz nyomása, térfogata, hőmérséklete és mennyisége között.



$$PV = nRT$$

$P$  = nyomás (Pa)  
 $V$  = térfogat ( $m^3$ )  
 $n$  = anyagmennyiség (moles)  
 $R$  = gázállandó ( $8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ )  
 $T$  = abszolút hőmérséklet (K)

**2. Dalton-törvény** (John Dalton, 1801): Egy nemreaktív gázkeverék teljes nyomása egyenlő az egyes gázok parciális nyomásainak összegével.

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^r p_i$$

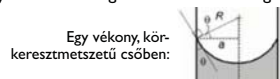
$p_i$  =  $i$ -edik gáz parciális nyomása  
 $n$  = gázok száma a keverékben  
 $[p_i = P_{\text{total}} \cdot r, r = \text{gáz részaránya a keverékben}]$

**3. Henry-törvény** (William Henry, 1803): Állandó hőmérsékleten egy adott gáz folyadékban oldott mennyisége egyenesen arányos ugyanazon, a folyadékkal egyensúlyban levő gáz parciális nyomásával.

$$p = k_H \cdot c$$

$p$  = parciális nyomás (Pa; atm)  
 $k_H$  = Henry-állandó ( $l \cdot \text{atm}/\text{mol}$ )  
 $c$  = oldott gáz koncentrációja (mol/l)

**4. Young-Laplace egyenlet:** Leírja két sztatikus folyadék (pl. levegő, víz) határfelületén fellépő kapilláris nyomáskülönbséget a felületi feszültség függvényében.



$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

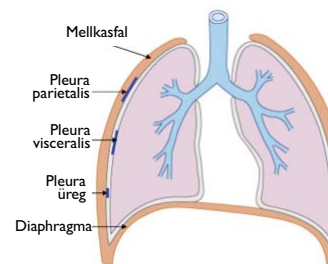
$p$  = nyomás ( $\text{Nm}^{-2}$ )  
 $\gamma$  = felületi feszültség ( $\text{Nm}^{-1}; \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ )  
 $R$  = görbületi sugár (m)

## Légzésbiofizika története

- Aristoteles (300 BC): a légzés hűti a szívet és a vért
- Galenus (170 BC): a légzés valamit hozzászít a vérhez ("spiritus vitalis")
- Leonardo da Vinci (1452-1519): a levegő felfrissülésétől elzárt kamrába zárt állatok elpusztulnak.
- Vesalius (1543): az emlőállat elpusztul, ha mellkasát felnyitjuk; azonban ha tüdejét ekkor ritmusosan felfújjuk, életben marad.
- Gáztörvények (17-18. sz., Clausius, Clapeyron, Boyle, Mariotte, Gay-Lussac, Charles)
- Black (1754): széndioxid felfedezése. Priestley (1771): oxigén felfedezése
- "Vérgázok": Magnus (1837), Haldane (1900)
- Surfactant: Neergaard (1920-es évek), Pattle és Clements (1950-es évek)

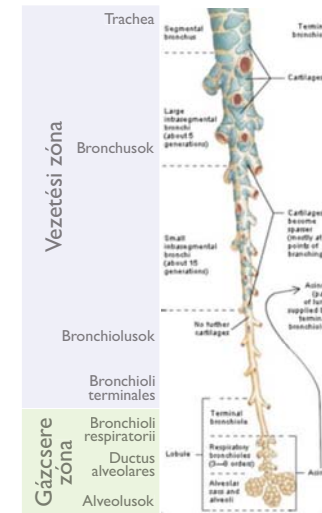
## Egyszerűsített légzőrendszer

### 1. Doboz



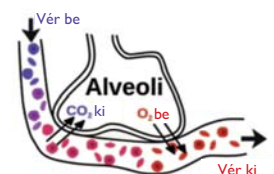
- Intrapulmonáris nyomás ( $P_{\text{pulm}}$ ): atmoszferikus nyomás körül ingadozik
- Mellúri vagy intrapleurális nyomás ( $P_{\text{pl}}$ ): "negatív" (szubatmoszferikus); az atmoszferikus nyomás, az adhéziós és szöveti kontrakciós egyensúlya alakítja ki)
- Transzmurális (transpulmonáris) nyomás ( $P_{\text{tm}}$ ): a mellkasfal két oldala közötti nyomás
- \*Pneumothorax!**

### 2. Csőrendszer



- 23-25 dichotom faágszerű kettéoszlás
- Gáz (mint folyadék) áramlási szabályai (Hagen-Poiseuille!)

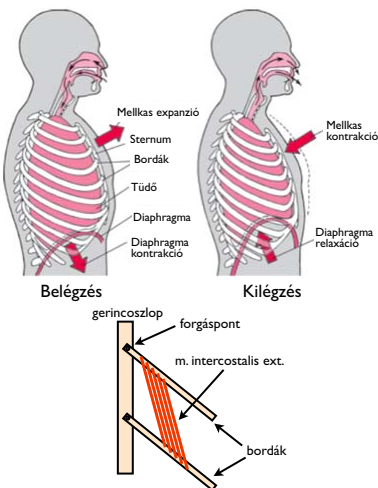
### 3. Gázcseré felület



- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A gázcseré felületét alakítja ki.
- Számuk: ~300 millió (N.B.:  $2^{25} = 33,554,432$ )
- Méret ( $d \sim 200 \mu\text{m}$ ), felület ( $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{alveolus}$ )
- Teljes alveoláris felület: ~100  $\text{m}^2$
- Alveolus fal ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ): alveoláris epithelium ( $\sim 0.2 \mu\text{m}$ ) membrana basalis ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ) kapilláris endothelium ( $\sim 0.2 \mu\text{m}$ )
- Gázcseré hajtóereje: diffúzió (Fick törvényei!)
- A gázterek parciális nyomásai igyekeznek kiegyenlítődni a vérplazma gázok tenzióival.

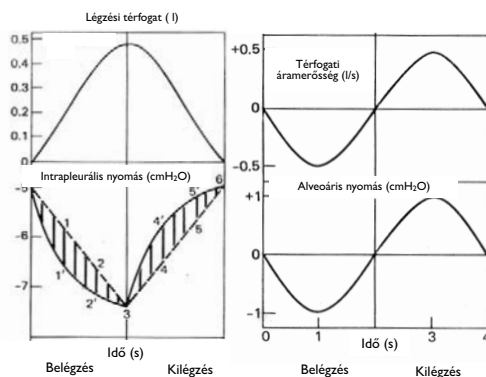
# A légzési ciklus

## I. Mechanikai vezérlés



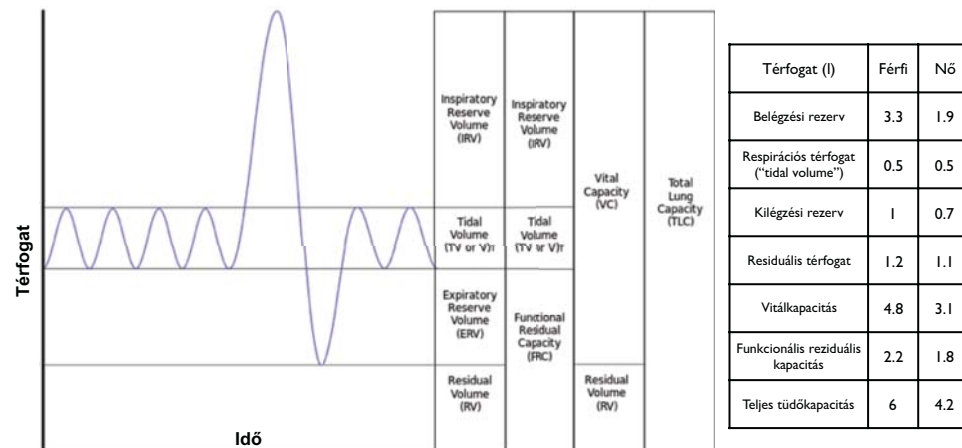
- Eupnoe: nyugodt légzés (14-16/min)
- Polypnoe, tachypnoe: légvételek száma >16/min
- Dyspnoe: nehezlégzés

## 2. Fizikai paraméterek változásai



1 cmH<sub>2</sub>O = 0.1 kPa = 0.7 mmHg

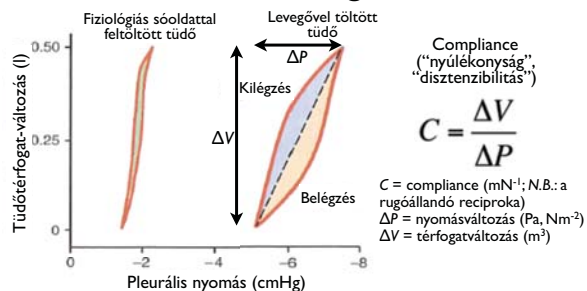
# Légzési térfogatok és kapacitások



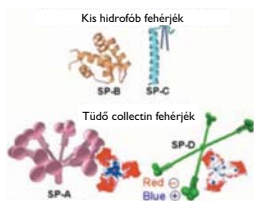
Kapacitás: térfogatok összege

# A légzési ciklus eseményei

## I. A tüdő ciklikusan tágul-összehúzódik

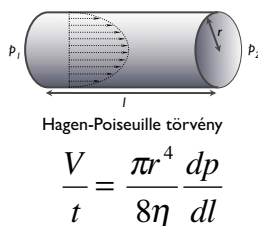


### Tüdő surfactant



- Felületaktív lipoprotein komplex (foszfolipoprotein), II. típusú alveoláris sejtek termelik.
- 90% lipid, 10 % fehérje ("surfactant protein" SP-A, SP-B, SP-C, SP-D)
- Szerepe: a felületi feszültséget csökkenti.
- Hatása: minél kisebb a felületi feszültség, annál kisebb nyomáskülönbség elegendő ahhoz, hogy az alveolusok nyitott állapotban maradjanak (Young-Laplace egyenlet!).
- Restriktív tüdőbetegségek:** a tüdő compliance csökkent (fibrózis, csökkent surfactans termelés, stb.).

## 2. A légutakban gáz áramlik



Hagen-Poiseuille törvény  

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

V = térfogat  
t = idő  
(W/t = Q = térfogati áramerősség)  
r = cső sugara  
η = viszkozitás  
p = nyomás  
l = cső hossza  
(dp/dl = nyomásgradiens, fenntartója p<sub>1</sub>-p<sub>2</sub>)

- Normális légzés (eupnoe): lamináris áramlás.
- Tachypnoe, pathologia: turbulens áramlás.
- Obstruktív tüdőbetegségek:** pulmonáris légáramlási sebesség csökkent (COPD - "chronic obstructive pulmonary disease").

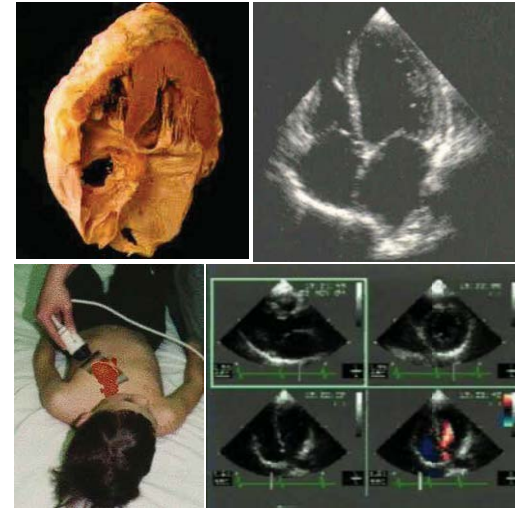
# Légzési munka

- Átlagos transzmurális nyomás ellenében végzett térfogtváltozás
- Légzési perctérfogat = 7 l
- Légzési frekvencia = 14/min
- Nyomás (P<sub>tm</sub>) = 0.7 kPa
- Respirációs térfogat (V) = 0.5 l (5x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>)
- Munka (W) = P<sub>tm</sub> x V = 0.35 J/belégzés (294 J/h)
- Nagy megterhelésnél elérhet 8400 J/h értéket is

# A SZÍVMŰKÖDÉS BIOFIZIKÁJA

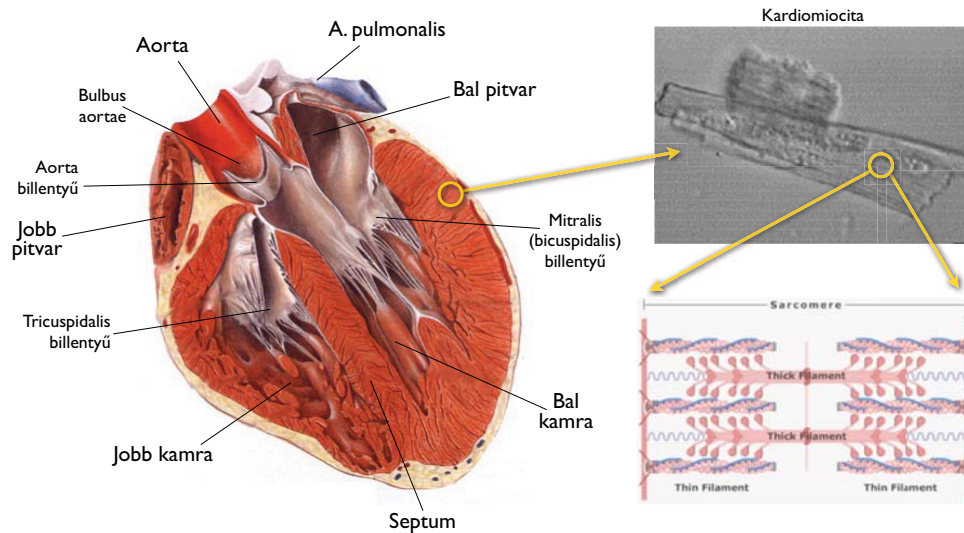
## Szív:

A keringési rendszer pumpája

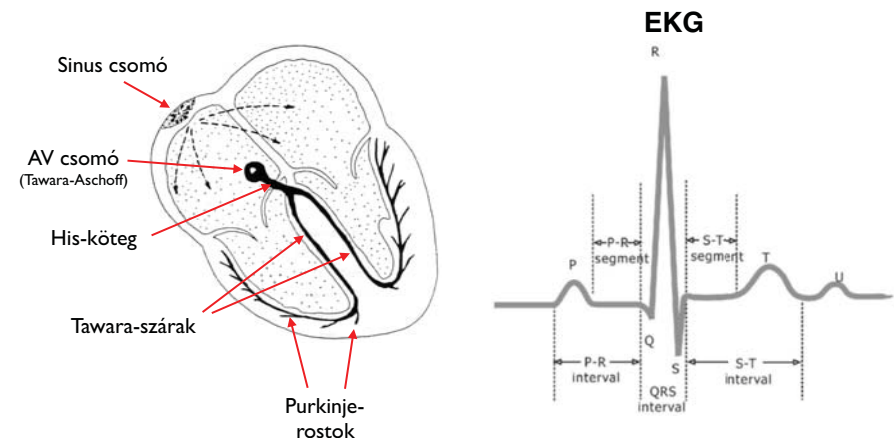


	Összehúzódások száma	Továbbított vértérfogat
1 perc	~70	~6 l
1 nap	~100.000	~8600 l
Élet (70 év)	~2.5 × 10 <sup>9</sup>	~220 × 10 <sup>6</sup> l

## A szív vázlatos felépítése



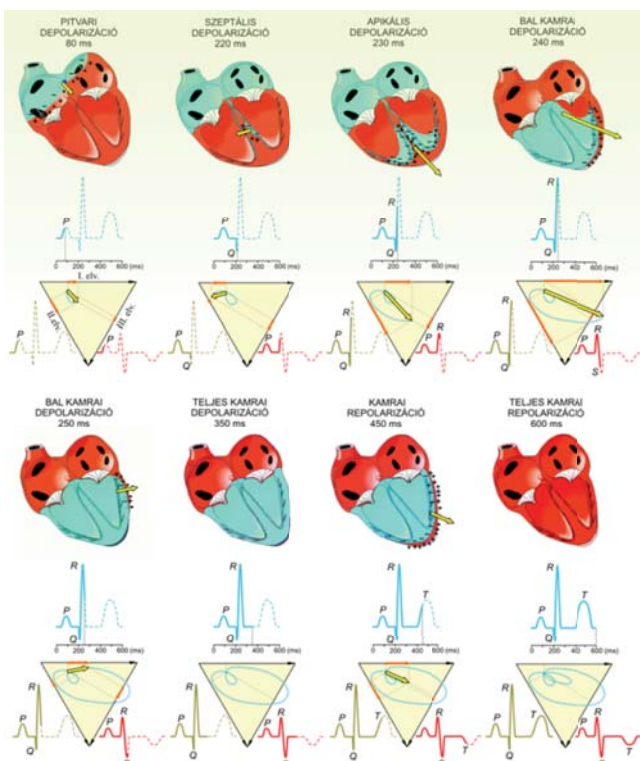
## Koordinált mechanikai működés aktiválása





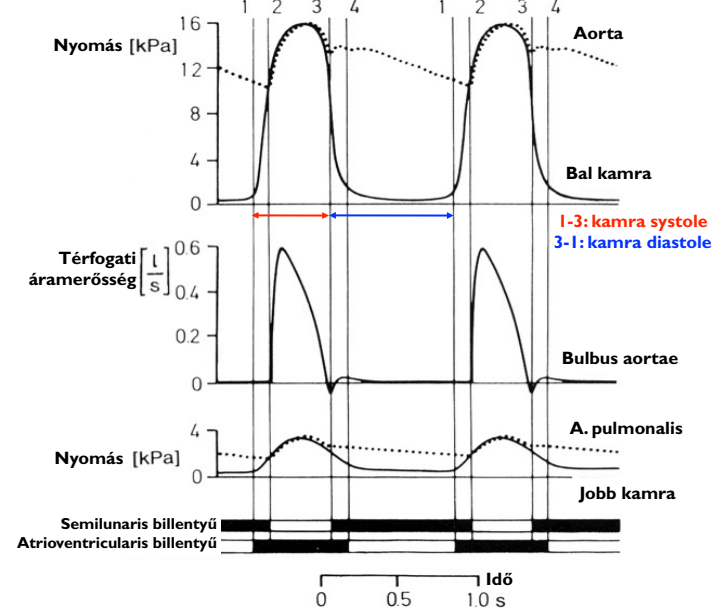
## EKG:

A szívizom depolarizációja és repolarizációja során térben és időben változó eredő dipólus (integrálvektor) adott irányú (elvezetések szerinti) vetületei.

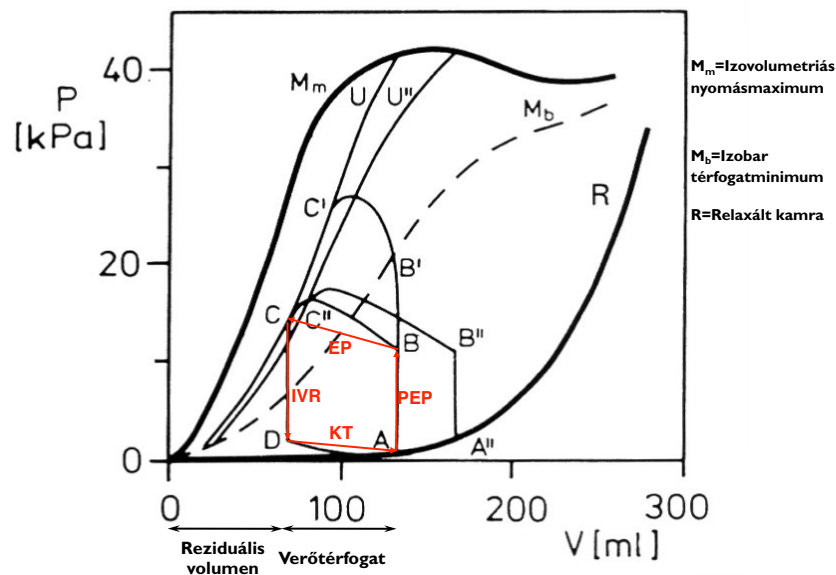


## A szívciklus eseményei

1-2: pre-ejekciós periódus (PEP) 2-3: ejekciós periódus (EP) 3-4: izovolumetriás relaxáció (IVR) 4-1: kamratelődés (KT)



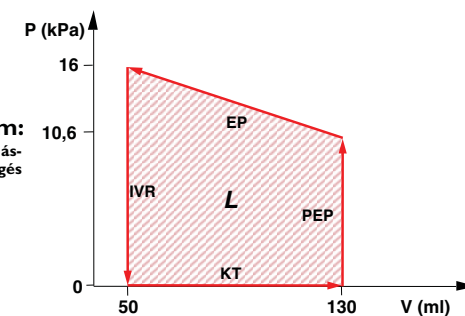
## A bal kamra nyomás-térfogat diagramja



## A szív munkája

(bal kamra munkája)

Indikátordiagram:  
egyszerűsített nyomás-  
térfogat összefüggés



$$L = p\Delta V + \frac{1}{2}mv^2$$

$p\Delta V$  = térfogati munka (statikus komponens)  
 $\frac{1}{2}mv^2$  = sebességi munka (dinamikus komponens)  
 $p$  = nyomás  
 $\Delta V$  = verőtérfogat (pulzustérfogat)

$$13,3 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 \times 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 + \frac{1}{2} 0,08 \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})^2 = 1,06 \text{ Nm} + 0,04 \text{ Nm} = 1,1 \text{ J}$$

# A FIZIKÁLIS VIZSGÁLAT BIOFIZIKAI ALAPJAI

## Fizikális vizsgálat

- Megtekintés (inspectio)
- Tapintás (palpatio)
- Kopogtatás (percussio)
- Hallgatózás (auscultatio)

## Megtekintés (Inspectio)

Mi ez?

A beteg vizuális vizsgálata

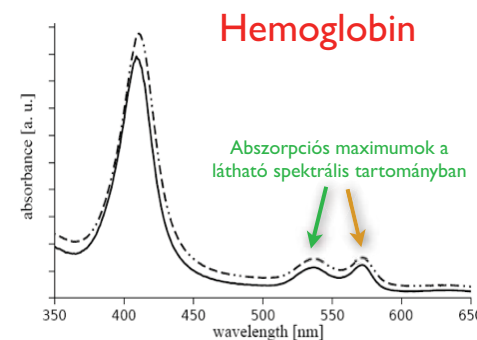
Mit vizualizálunk?

Viselkedés, morfológia, szerkezet, **szín**

Kapcsolat a biofizikával:

Abszorpciós spektroszkópia

## Fényabszorpció



$$J = J_0 e^{-\mu x}$$
$$\lg \frac{J_0}{J} = \mu x \lg e$$

$$\lg \frac{J_0}{J} \approx \mu$$

abszorbancia, optikai sűrűség

$$\lg \frac{J_0}{J} = \epsilon_{\lambda} c x$$

Lambert-Beer törvény

$\epsilon_{\lambda}$  = moláris extinkciós együttható

$c$  = koncentráció

# Példák



Cyanosis (plazma deoxihemoglobin megemelkedett)



Icterus (sárgaság, hyperbilirubinaemia)



Erythema (bőrpír)

# Tapintás (palpatio)

## Mi ez?

A beteg vizsgálata közvetlen, kézzel történő tapogatás révén

## Mit tapintunk?

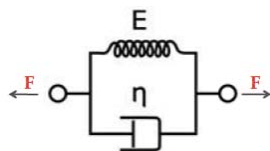
Méret, alak, lokalizáció, **rugalmasság**

## Kapcsolat a biofizikával:

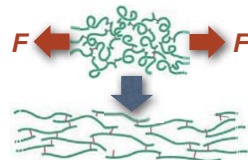
Biomechanika

# Viszkoelaszticitás

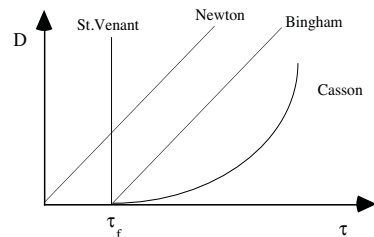
## Rugó-dugattyú model



## Egyszerűsített mechanizmus



Sebesség-grádiens a nyíróerő függvényében newtoni és nem-newtoni folyadékokban



Példa: oedema (ujjbenyomatot tartó, tésztatapintat)

# Kopogtatás (percussio)

## Mi ez?

A beteg vizsgálata éles, rövid, lokális ütések, koppantások segítségével

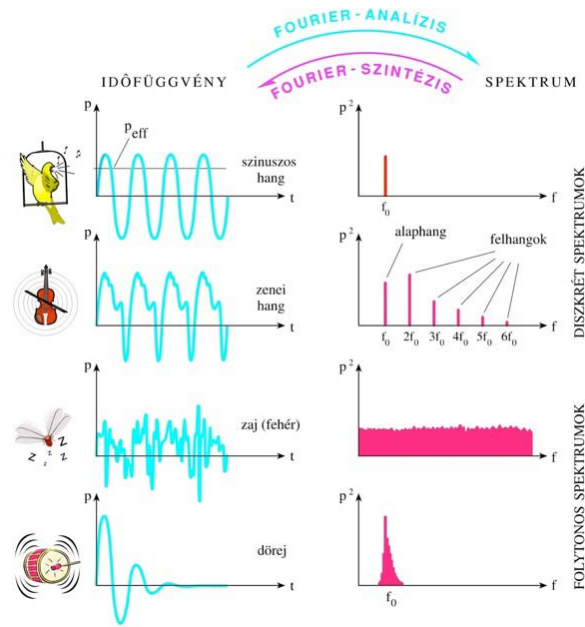
## Mit kopogtatunk?

Anyagi tartalom, alak, határok

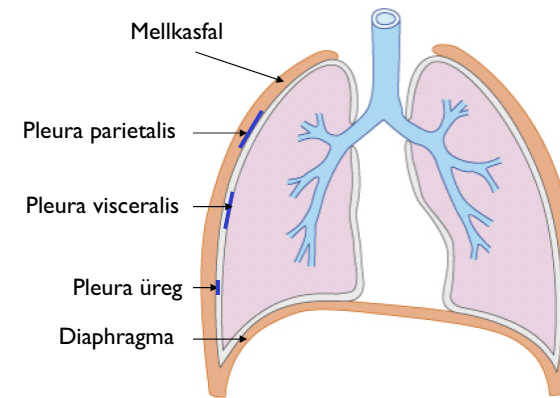
## Kapcsolat a biofizikával:

Hang generálása, terjedése és detektálása

# Hangok és spektrumaik



# A légzőrendszer mint doboz



1. Tompa (izom, máj)
2. Éles nem dobos (tüdő)
3. Dobos (üreg)

A rekesz, szív, máj (és más parenchymás szervek) határait detektálhatjuk kopogtatással.

# Hallgatózás (auscultatio)

## Mi ez?

Beteg vizsgálata a benne keletkezett hangok és zörejek meghallgatásával (sztetoszkóppal)

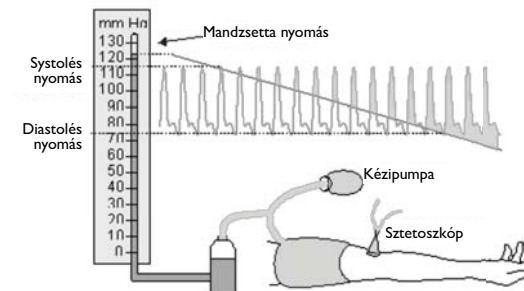
## Mit hallgatunk?

Hangosság, hangmagasság, hangszín, időtartam, időbeli változás (ritmus)

## Kapcsolat a biofizikával:

Hang generálása és terjedése, folyadékáramlás, turbulencia

# Korotkow-féle hang

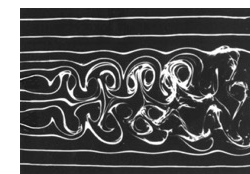


1. toppanás
2. surranás
3. koppanás
4. tompulás

## Reynolds-szám:

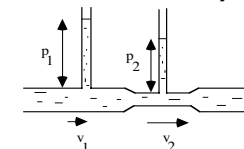
$$R = \frac{vr\rho}{\eta}$$

$v$ =áramlási sebesség (m/s)  
 $r$ =cső sugara (m)  
 $\rho$ =sűrűség (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\eta$ =viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)



Turbulens áramlás ( $R > \sim 1000$ )  
 hangeffektussal jár

## Bernoulli-törvény

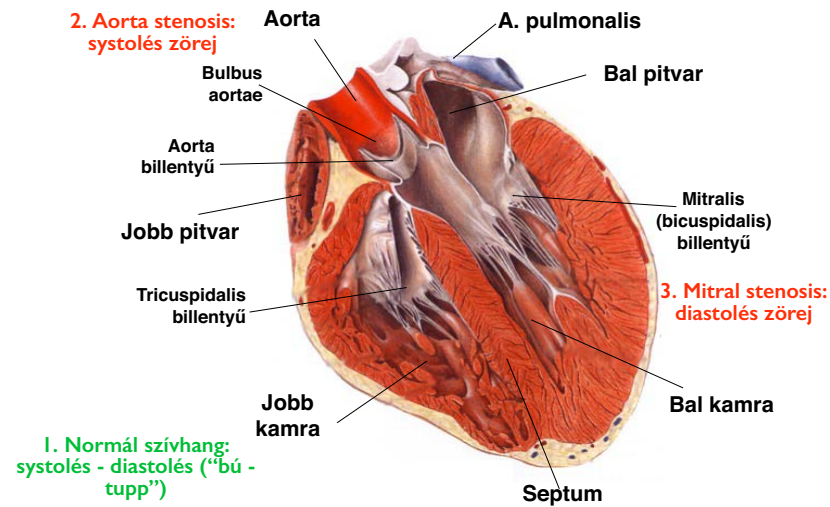


A sztatikus és dinamikus nyomások közötti fluktuáció az a. brachiális gyors záródásával-nyílásával jár.



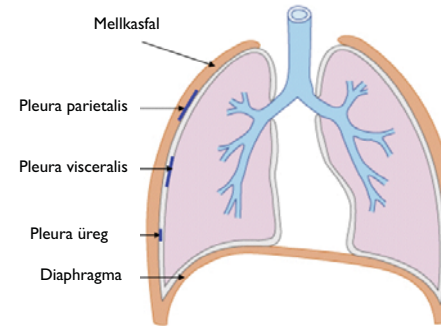
# Szívhangok és zörejek

**Forrás:** mechanikai vibráció (pl., billentyű záródás), turbulens áramlás  
**Vezetődés:** vérrel telt üregek irányába



# Légzési hangok

**Forrás:** mechanikai rezonancia (orgonasíp), mechanikai vibráció (dörzsölés), buborékáramlás folyadékban



**-pleurális dörzszöreje**  
 (pleuralemezek közötti súrlódás)

Tracheobronchialis hangok

**Vezetési zóna**

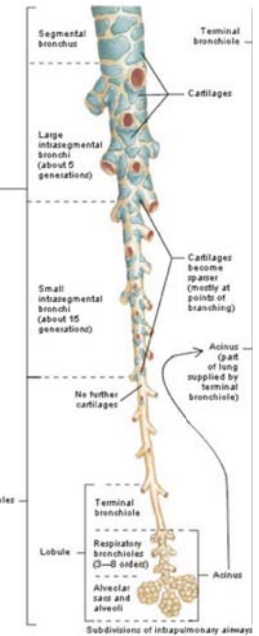
Trachea  
 Bronchusok  
 Bronchiolusok  
 Bronchioli terminales

**-sípolás**  
 (légúti obstrukció)

**Gázcsere zóna**

Bronchioli respiratori  
 Ductus alveolares  
 Alveolusok

**-szőrészöreje**  
 (apró-, közép-, nagyhólyagú; csöveken történő átbuborékolás)  
**-crepitatio**  
 (alveolus nyílás-záródás)



“Az idő lassan elszivárog,  
 nem lógok a mesék tején,  
 hörpintek valódi világot,  
 habzó éggel a tetején.”

József Attila: Ars Poetica (részlet)