



## Az élő anyag rugalmas tulajdonságainak felhasználása diagnosztikában és terápiában: ultrahang - módszerek

2015 Május 6  
Prof. Fidy Judit

1

Mai kérdés:

Milyen folyadékokat nevezünk „newtoni folyadékok”-nak?

2



Dr. Leopold Augenerbruger (grazi kocsmáros orvos fia) 1761:

**perkusszió orvosi alkalmazása**

kocsmai kérdés: mennyi bor van a hordóban?

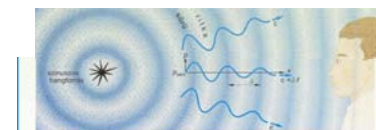


## Hang: mechanikai hullám

**Mechanikai:** kinetikai energia terjed benne : a közeg részecskéi egyensúlyi helyzetük körül vibrációs mozgást végeznek – a mozgásállapot terjed

**Hullám:** található olyan fizikai jellemző, amely a jelenség során időben és térben periodikusan változik - **hullámfüggvénnyel írható le**

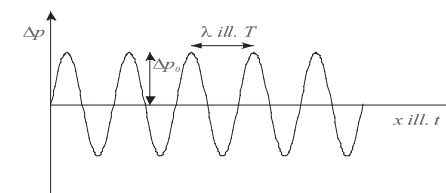
Mechanikai hullám terjedéséhez **közegre van szükség**



**Mire írjuk fel a hullámfüggvényt?**

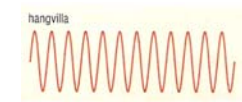
- **Sűrűség**
- **Elmozdulás az egyensúly körül**
- **Nyomás**

**A nyomásváltozásra felírt hullám-függvény**

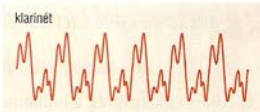


4

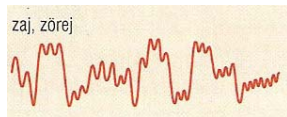
## A „hangok” hullámfüggvényei többnyire összetettek



Adott frekvenciájú „tisza” hang



Zenei hangok – több komponens



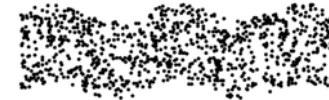
Nagy amplitudó, széles tartományban előforduló frekvenciák, fázisok

5



## longitudinális hullám

(folyadékokban, lágy szövetben, gázokban csak ilyen)



## transzverzális hullám

(szilárd testekben pl. csontban mind longitudinális, mind transzverzális)

hidrosztatikai  
nyomás

nyomásváltozás  
hang-nyomás

$$p_{\text{teljes}} = p_{\text{hidrosztat}} + \Delta p$$

amplitúdó

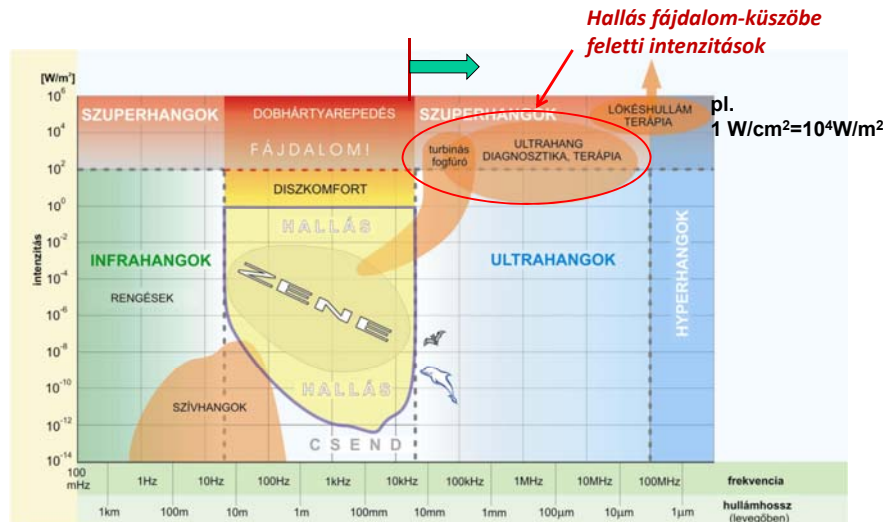
fázis

$$\Delta p(t, x) = \Delta p_{\text{max}} \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \phi \right]$$

$$c \cdot T = \lambda, \quad c = f \cdot \lambda$$

Nem fénysebesség!

## Ultrahang: 20 kHz feletti frekvenciájú hanghullámok



7

Az ultrahang-diagnosztika az orvosi diagnosztikának egyik vezető és állandóan továbbfejlesztett módszere.

Terápiai szempontból is jelentős.

8

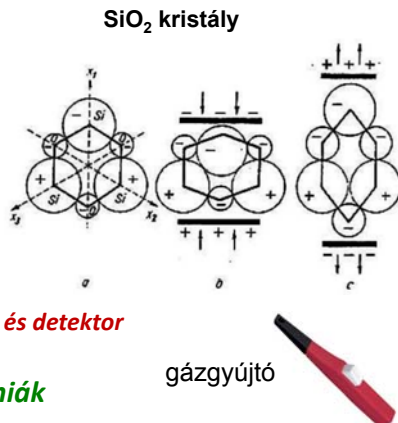
## Hogyan keltsünk ultrahangot?

### Piezelektromos jelenség

(a) Alapállapot: a pozitív és negatív töltések súlypontja egybe esik.

(b) és (c) : Nyomás hatására a töltések súlypontja szétválak, feszültség keletkezik (direkt hatás)

ill. feszültség hatására a kristály deformálódik.



**UH keltés: inverz effektus**

**UH detektálás: direkt effektus**

**ugyanazon kristály forrás és detektor**

### Elektro/magneto-strikció: kerámiák

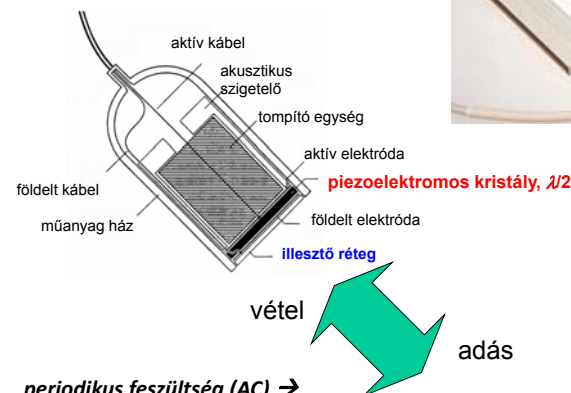
Elektromos /mágneses dipólus-egységekből álló szilárd fázisú anyagok

Dipólusok periódikusan változó elektromos/mágneses térben átrendeződnek → méretváltozás (inverz effektus is)

- Anyaguk mechanikailag ellenállóbb
- Alacsonyabb frekvenciák: 20-40 kHz → fogköeltávolítás

9

## Az UH forrás felépítése



**periodikus feszültség (AC) →  
→ periodikus méretváltozás  
azonos frekvenciával**



10

## Mi a szerepe az UH jel intenzitásának?

intenzitás = energia-áram sűrűség v. teljesítménysűrűség

$$J = \frac{\Delta E}{\Delta t * \Delta A} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

(elektromos analógia -- teljesítmény

$$P_{el} = \frac{1}{Z_{el}} U_{eff}^2$$

AC- körben)

### akusztikai fogalmakkal – teljesítmény-sűrűség

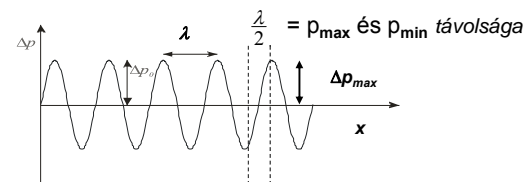
$$J = \frac{1}{Z_{akuszt}} \Delta p_{eff}^2 = \frac{1}{2Z_{akuszt}} \Delta p_{max}^2$$

$$\text{effektív érték: } 2\Delta p_{eff}^2 = \Delta p_{max}^2$$

**Nagy intenzitás nagy nyomásfluktuációt jelent  
(Z-től függ)**

11

## Az UH intenzitást orvosi alkalmazásokban limitálni szükséges



**Terápia:** f= 0.5 – 1 MHz

Pl. c<sub>izom</sub>=1600m/s

$$\lambda = c/f$$

$$\lambda = 3.2 - 1.6 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \lambda/2 = 1.6 - 0.8 \text{ mm}$$

**Javasolt felső határ J<sub>átlag</sub> = 1W/cm<sup>2</sup>**

(Z=Z<sub>izom</sub>) →

$$\rightarrow 2\Delta p_{max} \sim 3.2 \times \text{atm.}$$

**Dilatáció és kompresszió mértéke ~ 1 mm-en belül!**

**Veszélyek: kavitáció, kémiai reakciók indukciója**

Terápiás hatás: kisebb intenzitásoknál belső súrlódás dominál → hőterápia

12

## Az UH intenzitást limitálni szükséges

**Diagnosztika:**  $f = (1) 2 - 10 \text{ MHz} \rightarrow \lambda/2 = 800 - 160 \mu\text{m}$  izomban  
~sejtek mérete!!

A képképzéshez szükséges jelek  
nagyobb intenzitást kívánnak meg:  $10 \text{ W/cm}^2$

???

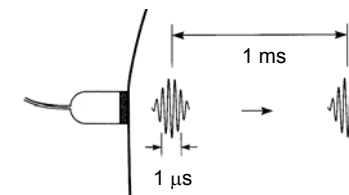
13

## Az UH intenzitást limitálni szükséges

**Diagnosztika:**  $f = (1) 2 - 10 \text{ MHz} \rightarrow \lambda/2 = 800 - 160 \mu\text{m}$  izomban  
~sejtek mérete!!

A gyakorlatban szükséges  $J$  magasabb:  $10 \text{ W/cm}^2$

**Megoldás: rövid UH impulzusok  $\rightarrow$  átlagos  $J$  lecsökken**



$J_{\text{átlag}} = 10 \text{ mW/cm}^2$

14

## Hogyan terjed az UH szövetekben?

$$J = \frac{1}{2Z_{\text{akuszt}}} \Delta p_{\text{max}}^2$$

$$Z = c\rho = \sqrt{\frac{\rho}{\kappa}}$$

akusztikus impedancia

/ellenállás/keményység

$$\kappa = \frac{-\Delta V/V}{\Delta p}$$

kompesszibilitás

relatív térfogat csökkenés per nyomás-növekedés

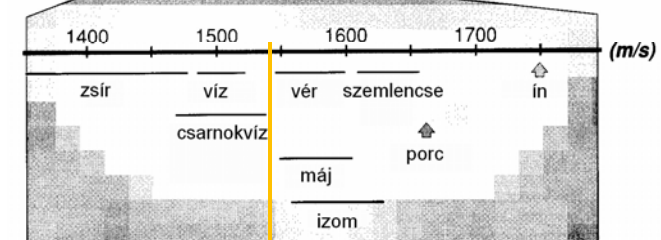
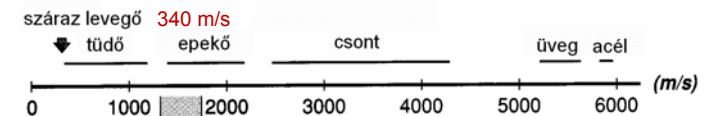
$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\kappa}}$$

terjedési sebesség,  $\rho$ -sűrűség

15

## Az UH sebessége testszövetekben

A sebesség nem függ a frekvenciától  $\rightarrow$  = hangsebesség



átlagos lágy szövet: 1540 m/s (!)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\kappa}}$$

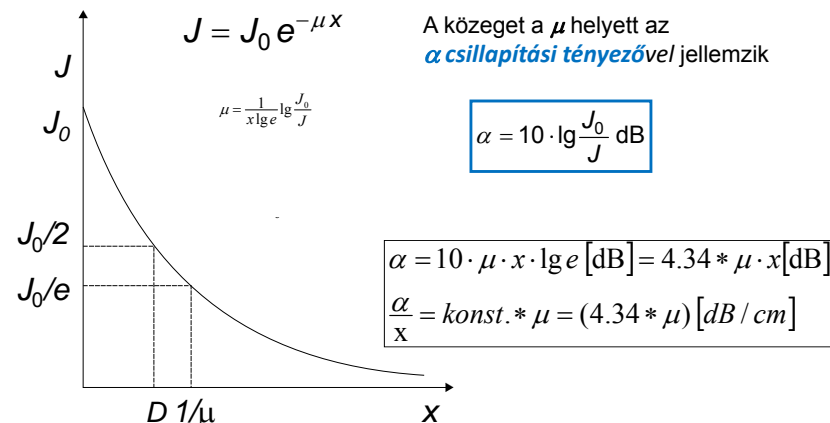
16

| anyag                     | $\rho$<br>sűrűség<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\kappa$<br>kompresszi-<br>bilitás<br>[1/GPa] | $c$<br>terjedési<br>sebesség<br>[m/s] | $Z$<br>akusztikus<br>impedancia<br>[kg/(m <sup>2</sup> s)] | $\alpha(fx)$<br>fajlagos<br>csillapítás<br>[dB/(cm·MHz)] |
|---------------------------|---|---|---------------------------------------|--|--|
| levegő                    | 1,3                                       | 7650  | 331                                   | 430 =<br>0,00043·10 <sup>6</sup>                           | 1,2  |
| tüdő                      | 400                                       | 5,92  | 650                                   | 0,26·10 <sup>6</sup>                                       |  |
| zsír                      | 925                                       | 0,51  | 1470                                  | 1,42·10 <sup>6</sup>                                       | 0,63   |
| víz, 20°C                 | 998                                       |   | 1492                                  | 1,49·10 <sup>6</sup>                                       | 0,0022   |
| víz, 36°C                 | 994                                       |   | 1530                                  | 1,53·10 <sup>6</sup>                                       |  |
| agv                       | 1025                                      |   | 1530                                  | 1,56·10 <sup>6</sup>                                       | 0,85   |
| lágyszövet                | 1060                                      |   | 1540                                  | 1,63·10 <sup>6</sup>                                       | 0,3 – 1,7  |
| máj                       | 1060                                      | 0,38  | 1549–1570                             | 1,65·10 <sup>6</sup>                                       | 0,94   |
| vese                      | 1040                                      | 0,40  | 1560                                  | 1,62·10 <sup>6</sup>                                       | 1,0  |
| lép                       | 1060                                      |   | 1566                                  | 1,64·10 <sup>6</sup>                                       |  |
| izom                      | 1040–1080                                 |   | 1568                                  | 1,63·10 <sup>6</sup>                                       | 1,3 – 3,3  |
| vér                       | 1060                                      | 0,38  | 1570                                  | 1,61 – 1,66·10 <sup>6</sup>                                | 0,18   |
| szemlencse                |   |   | 1620                                  | 1,84·10 <sup>6</sup>                                       | 2,0  |
| csontvelő                 | 970                                       |   | 1700                                  | 1,65·10 <sup>6</sup>                                       |  |
| csont, porózus            | 1380                                      | 0,08  | 3000                                  | 2,2 – 2,9·10 <sup>6</sup>                                  |  |
| csont, tömör              | 1700                                      | 0,05  | 3600                                  | 6,12·10 <sup>6</sup>                                       | 20,0   |
| aluminium                 | 2700                                      | 0,009   | 6400                                  | 17,28·10 <sup>6</sup>                                      |  |
| csatoló gél               |   |   |                                       | 6,5·10 <sup>6</sup>  |  |
| ólom-cirkonát-<br>titanát | 7650                                      |   | 3791                                  | 29·10 <sup>6</sup>   |  |
| kvarc                     | 2650                                      |   | 5736                                  | 15,2·10 <sup>6</sup>                                       |  |

17

## Szövetekben az UH intenzitása gyengül: abszorpció

Érvényes az exponenciális sugárgyengülési törvény



18

## $\mu$ a diagnosztikai tartományban nő a frekvenciával

Milyen függvény szerint?

$$\mu = \text{konst} \cdot f^k$$

$$\log \mu = \log(\text{konst}) + k \log f$$

$k = 1 \rightarrow$  lineáris kapcsolat, arányosság

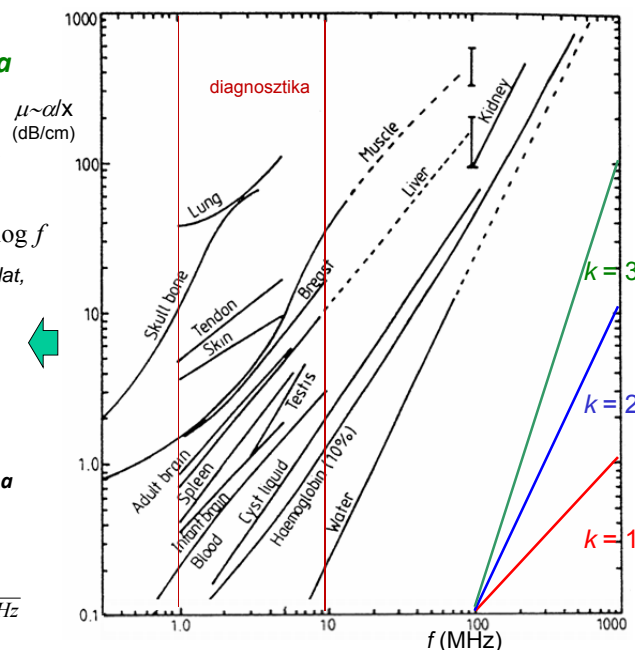
Jó közelítés!

$$\alpha_{\text{fajl}} = \frac{\alpha}{f \cdot x}$$

fajlagos csillapítás: csak a közegre jellemző

pl. lágyszövetre:

$$\alpha_{\text{fajl}} = 1 \frac{\text{dB}}{\text{cm} \cdot \text{MHz}}$$



## Az UH diagnosztika alapja a UH visszaverődése

különböző közegek határán

A diagnosztikai mérés koncepciója

- kiválasztott irányok mentén
- UH impulzusokat juttatunk a szervezetbe
- mérjük a bejuttatás és a reflexió között eltelt időt
- a terjedési sebesség ismeretében
- a reflektált impulzus visszaérkezési ideje alapján
- a reflektáló felület távolsága a kibocsátás helyétől meghatározható

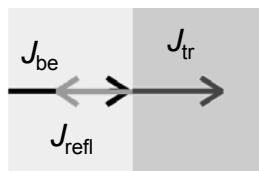
A reflexiók irányok megfelelő megválasztásával metszeti síkokban a szervek (és eltérő szöveti tartományok) körvonalai kirajzolódnak

Tomográfiai adatgyűjtés  $\rightarrow$  anatómiai információ



## Az UH diagnosztika alapja a UH visszaverődése különböző közegek határán

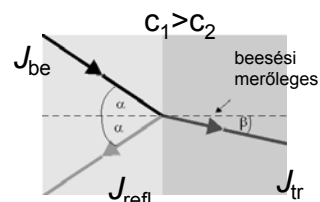
merőleges beesés



$$J_{be} = J_{tr} + J_{refl}$$

reflexió és transzmisszió

ferde beesés



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

irányváltás: Snellius-Descartes  
törvény

## Milyen szöveti tulajdonság okoz határfelületi reflexiót?

reflexióképesség

$$R = \frac{J_{visszavert}}{J_{bejövő}} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

az akusztikus impedanciák  
különbségétől függ

| határfelület      | R      |
|-------------------|--------|
| izom/vér          | 0,0009 |
| zsír/máj          | 0,006  |
| zsír/izom         | 0,01   |
| csont/izom        | 0,41   |
| csont/zsír        | 0,48   |
| lágyszövet/levegő | 0,99   |

“teljes” visszaverődés:

$$Z_1 \ll Z_2, R \approx 1 \text{ kerülendő!}$$



csatoló közeg szükséges!

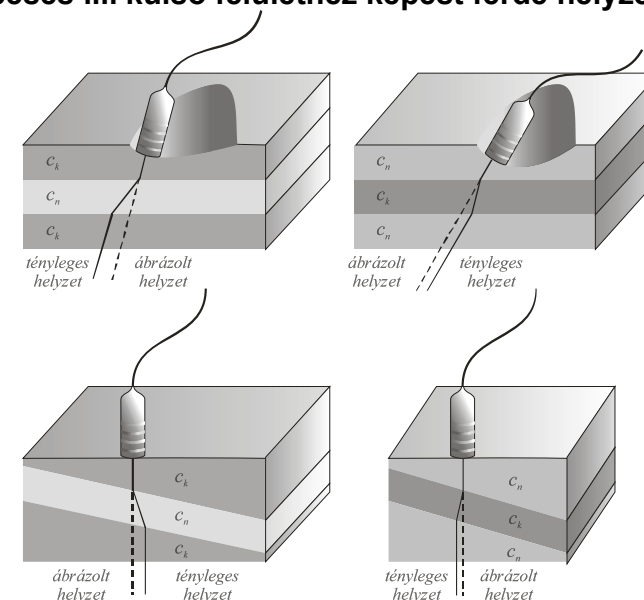
$$Z_{csatoló} \approx \sqrt{Z_{forrás} Z_{bőr}}$$



Sok esetben a víz is lehet jó  
csatoló közeg



## Ferde beesés ill. külső felülethez képest ferde helyzetű réteg



| anyag                 | $\rho$<br>sűrűség<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\kappa$<br>kompresszi-<br>bilitás<br>[1/GPa] | c<br>terjedési<br>sebesség<br>[m/s] | Z<br>akusztikus<br>impedancia<br>[kg/(m <sup>2</sup> ·s)] | $\alpha(f_x)$<br>fajlagos<br>csillapítás<br>[dB/(cm·MHz)] |
|-----------------------|---|---|-------------------------------------|---|---|
| levegő                | 1,3                                       | 7650  | 331                                 | 430 =<br>0,00043·10 <sup>6</sup>                          | 1,2   |
| tüdő                  | 400                                       | 5,92  | 650                                 | 0,26·10 <sup>6</sup>                                      |   |
| zsír                  | 925                                       | 0,51  | 1470                                | 1,42·10 <sup>6</sup>                                      | 0,63  |
| víz, 20°C             | 998                                       |   | 1492                                | 1,49·10 <sup>6</sup>                                      | 0,0022  |
| víz, 36°C             | 994                                       |   | 1530                                | 1,53·10 <sup>6</sup>                                      |   |
| agv                   | 1025                                      |   | 1530                                | 1,56·10 <sup>6</sup>                                      | 0,85  |
| lágyszövet            | 1060                                      |   | 1540                                | 1,63·10 <sup>6</sup>                                      | 0,3 – 1,7   |
| máj                   | 1060                                      | 0,38  | 1549–1570                           | 1,65·10 <sup>6</sup>                                      | 0,94  |
| vese                  | 1040                                      | 0,40  | 1560                                | 1,62·10 <sup>6</sup>                                      | 1,0   |
| lép                   | 1060                                      |   | 1566                                | 1,64·10 <sup>6</sup>                                      |   |
| izom                  | 1040–1080                                 |   | 1568                                | 1,63·10 <sup>6</sup>                                      | 1,3 – 3,3   |
| vér                   | 1060                                      | 0,38  | 1570                                | 1,61 – 1,66·10 <sup>6</sup>                               | 0,18  |
| szemlencse            |   |   | 1620                                | 1,84·10 <sup>6</sup>                                      | 2,0   |
| csontvelő             | 970                                       |   | 1700                                | 1,65·10 <sup>6</sup>                                      |   |
| csont, porózus        | 1380                                      | 0,08  | 3000                                | 2,2 – 2,9·10 <sup>6</sup>                                 |   |
| csont, tömör          | 1700                                      | 0,05  | 3600                                | 6,12·10 <sup>6</sup>                                      | 20,0  |
| aluminium             | 2700                                      | 0,009   | 6400                                | 17,28·10 <sup>6</sup>                                     |   |
| csatoló gél           |   |   |                                     | 6,5·10 <sup>6</sup>                                       |   |
| ólom-cirkonát-titanát | 7650                                      |   | 3791                                | 29·10 <sup>6</sup>  |   |
| kvarc                 | 2650                                      |   | 5736                                | 15,2·10 <sup>6</sup>                                      |   |

25

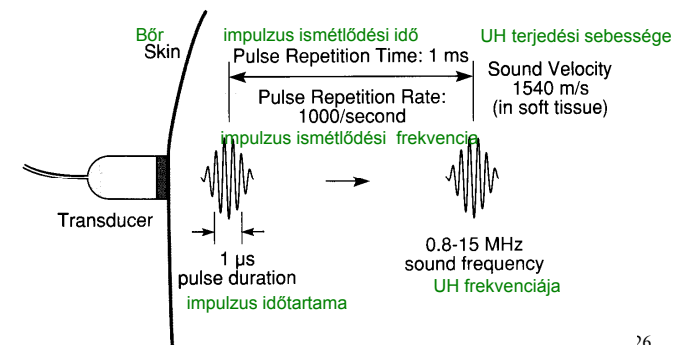
## Milyen UH impulzust alkalmaznak?

transzducer: adó és vevő egyben

időbeli szétválasztás – folyamatos hullám helyett impulzusok

Milyen távolra jut a rövid impulzus az 1 ms ismétlődési idő alatt?

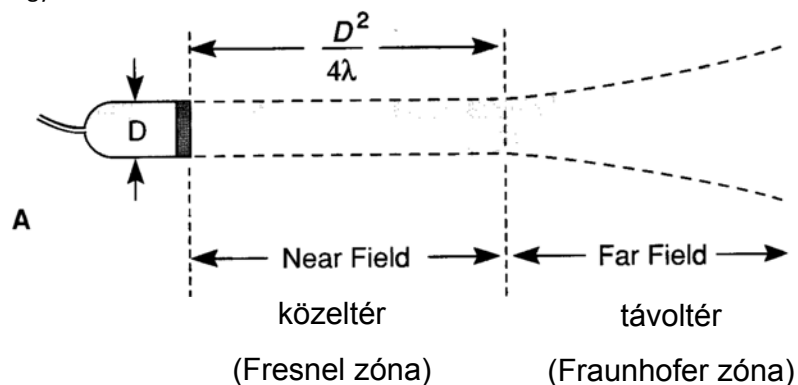
***l = 1.5 m ! Van ideje oda-vissza átjárni az emberi testet!***



26

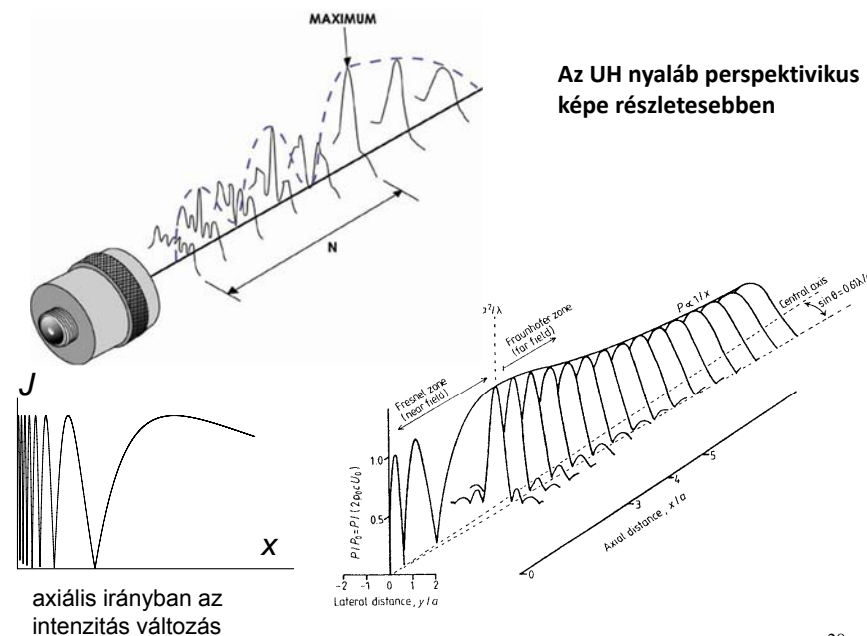
## Az UH nyaláb valódi jellemzői mérés technikai problémákat vetnek fel – tájékoztató információk

Egyszerűsített ábra



27

## Az UH nyaláb perspektivikus képe részletesebben



axiális irányban az intenzitás változás

28

## Az UH-os képalkotás feloldási határa

A **feloldási határ** : ama két pont közötti távolság, amelyeket az UH reflexióban még különálló pontokként detektálhatunk

**Felbontóképesség**: a feloldási határ reciproka.

A sugárirányú (**axiális**) feloldási határ az impulzushossztól függ, azzal arányos.

Az impulzushossz fordítottan arányos a frekvenciával.

A **laterális** feloldási határt a nyálábátmérő szabja meg.

Az axiálisnál kb. 10x nagyobb

29

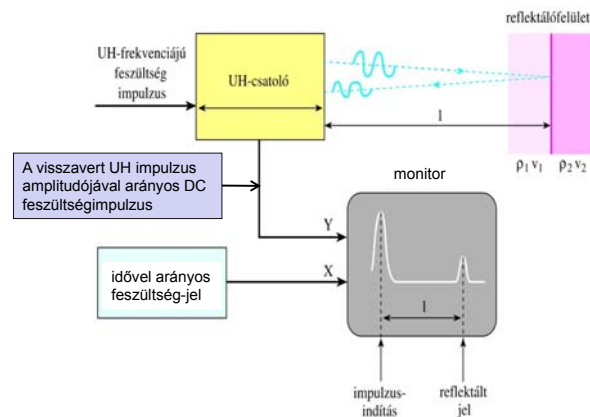
## Jellemző értékek

|                                 |      |      |
|---------------------------------|------|------|
| frekvencia (MHz):               | 2    | 15   |
| hullámhossz (izomban) (mm):     | 0.78 | 0.1  |
| behatolási mélység (cm):        | 12   | 1.6  |
| laterális feloldási határ (mm): | 3.0  | 0.4  |
| axiális feloldási határ (mm):   | 0.8  | 0.15 |

30

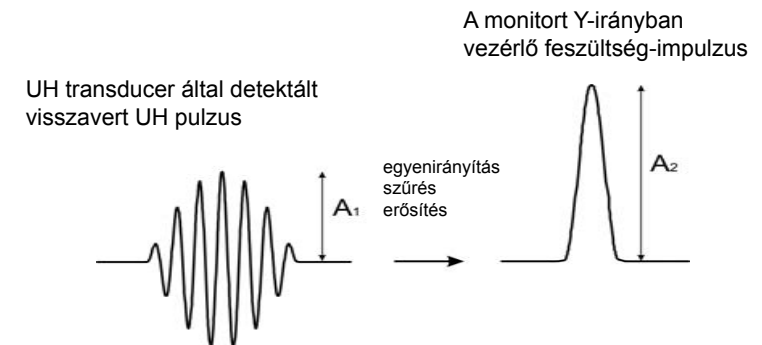
## Az ultrahangos diagnosztika módszerei

### A (amplitude) - képek



31

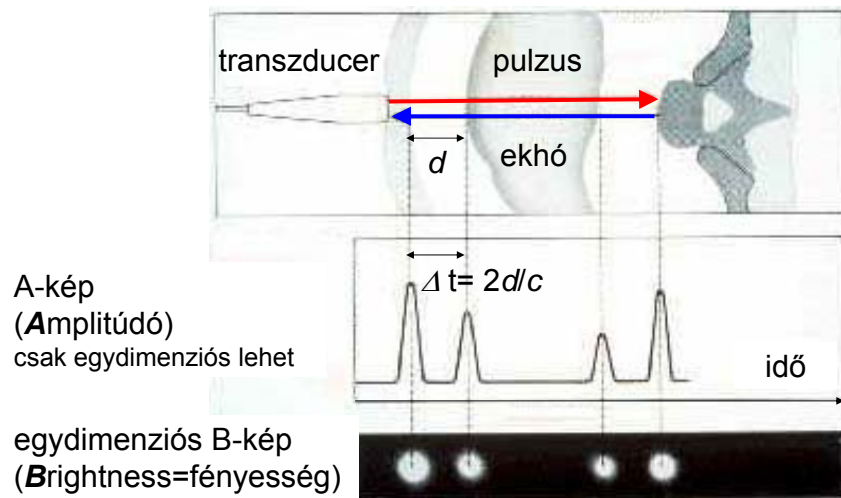
### Jelátalakítás a megjelenítés előtt



32



## A – képek transzformálása B (brightness)-képbe

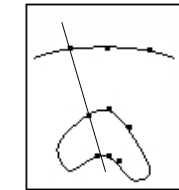
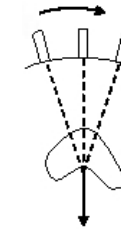


33

vö. Tkv. VIII.33. ábra

## Kétdimenziós B-kép

mozgatott  
transzducer

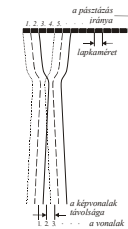


B-mód  
kijelző

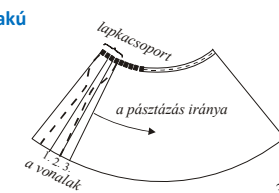
A fényes pontok a mérési irányoknak  
megfelelően kerülnek a kijelzőre → 2D ábrázolás

Detektor-sorok (array)

Parallel pásztázás

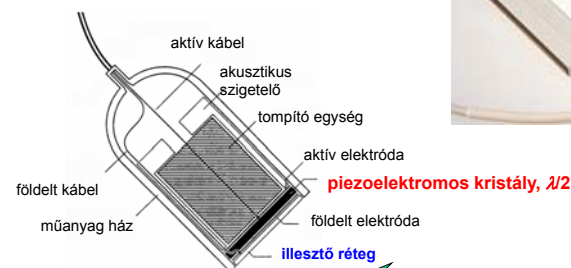


Legyező alakú  
pásztázás



34

## Az UH forrás felépítése



vétel → adás

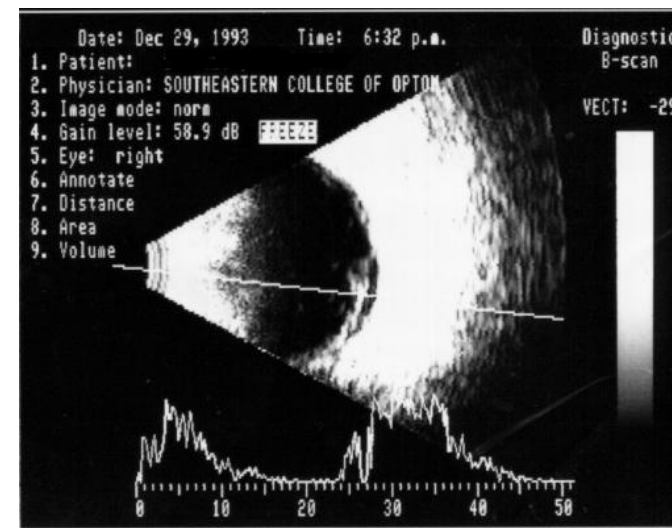
periodikus feszültség (AC) →  
→ periodikus méretváltozás  
azonos frekvenciával



35

## Kétdimenziós B-kép és A-kép

(szemészeti alkalmazás)



Terjedési  
sebesség  
figyelembe-  
vétele pontos  
távolságok  
meghatáro-  
zására:

cornea: 1641  
m/s

csarnokvíz:  
1532 m/s

humán  
szemlencse:  
1641 m/s

üvegtest: 1532  
m/s

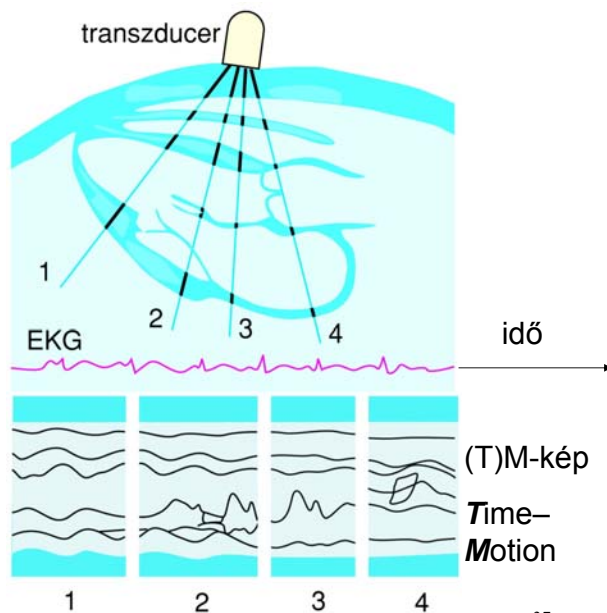
36

## TM-kép

(Time – Motion)

EKG jel  
referenciaként

(függőleges)  
egydimenziós  
B-kép időbeli  
változása

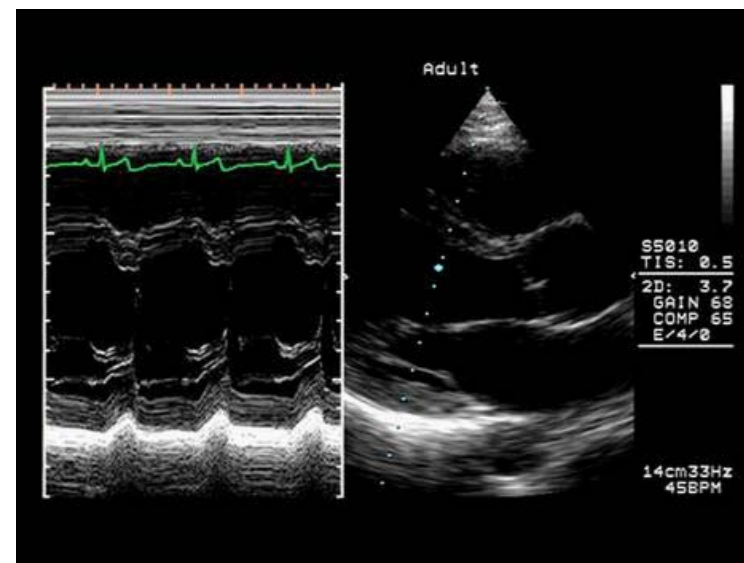


37

Tkv. VIII.34. ábra

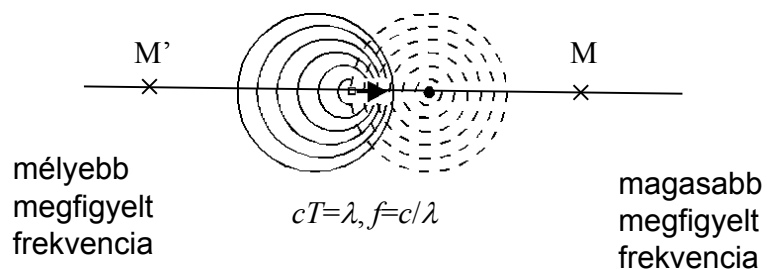
TM-kép

B-kép



## Doppler jelenség

„Ha a sípoló vonat közeledik, akkor az álló megfigyelő az igazinál magasabb hangot észlel, ha pedig távolodik, akkor mélyebbet.” (C. Doppler, 1842)



39

$f'$ : megfigyelt frekvencia,  $f$ : eredeti frekvencia

- (a) álló forrás és mozgó megfigyelő  
 +: megfigyelő közeledik a forráshoz  
 -: megfigyelő távolodik a forrástól

$$f' = f \left( 1 \pm \frac{v_M}{c} \right)$$

- (b) mozgó forrás és álló megfigyelő  
 (ha  $v_F \ll c$ , akkor „ugyanaz”, mint (a))

$$f' = \frac{f}{1 \mp \frac{v_F}{c}}$$

- (c) mozgó forrás és mozgó megfigyelő

$$f' = f \frac{1 \pm \frac{v_M}{c}}{1 \mp \frac{v_F}{c}}$$

- (d) mozgó reflektáló tárgy (felület),  
 (ha  $v_R \ll c$ )

$$f' = f \left( 1 \pm \frac{2v_R}{c} \right)$$

40

**Doppler frekvencia** = frekvencia változás = fr. eltolódás

$$f - f' = \Delta f = f_D = \pm 2 \frac{v_R}{c} f$$

ha  $v$  és  $c$  nem párhuzamosak, akkor  $v$  helyett  $v \cos \Theta$  írandó képletbe

A frekvenciaváltozás előjele a véráramlás irányától függ

41

## Vörösvértetek, mint szórócentumok. CW Doppler berendezés áramlási átlagsebesség mérésére

CW: folyamatos hullámú

adó és vevő különválasztva

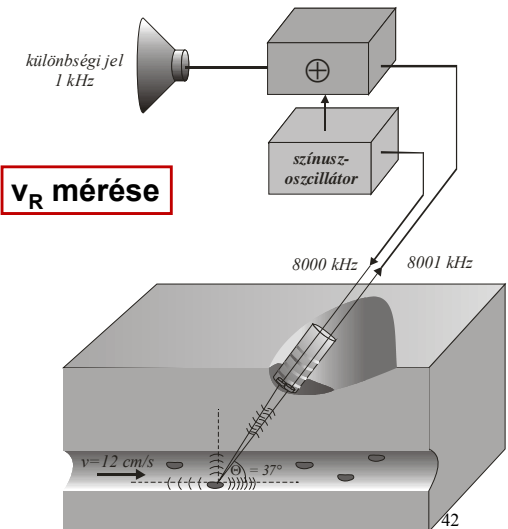
$$|f_D| = 2 \frac{v_R \cos \theta}{c} f$$

→  **$v_R$  mérése**

pl.  $f = 8000$  kHz  
 $v = 12$  cm/s  
 $c = 1600$  m/s  
 $\Theta = 37^\circ$

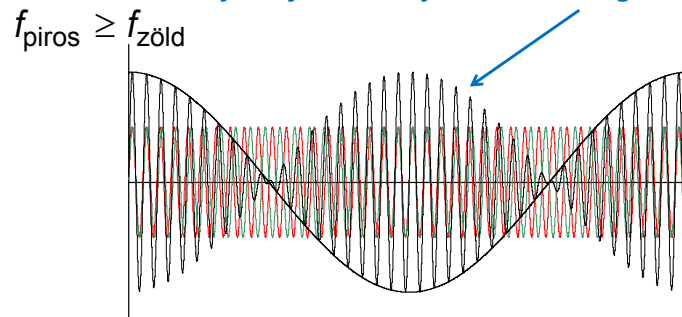
⇒  $f_D = 1$  kHz *kis változás!*  
 (lebegés jelensége)

Leválasztva: *Hallható hang*



**Lebegés: két kicsit eltérő frekvenciájú hullám interferenciájakor**

*a lebegés frekvenciája megegyezik az interferáló jelek frekvenciájának különbségével*

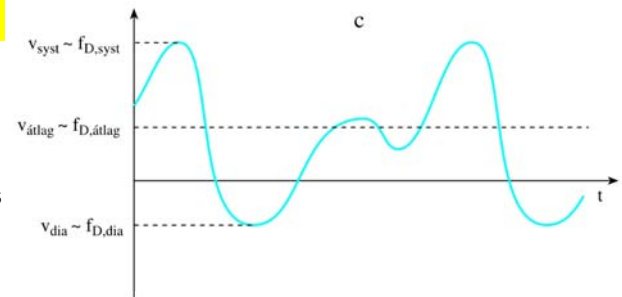


emlékeztető:  $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$

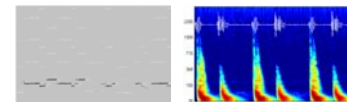
43

## Doppler görbék

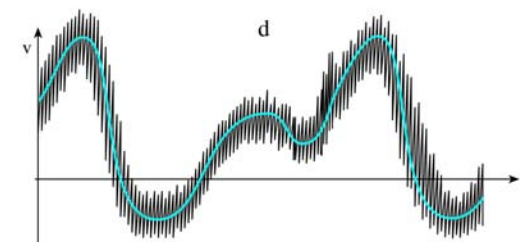
minden időpillanatban egy sebességgel jellemezhető áramlás



minden időpillanatban egy sebességeloszlással jellemezhető áramlás



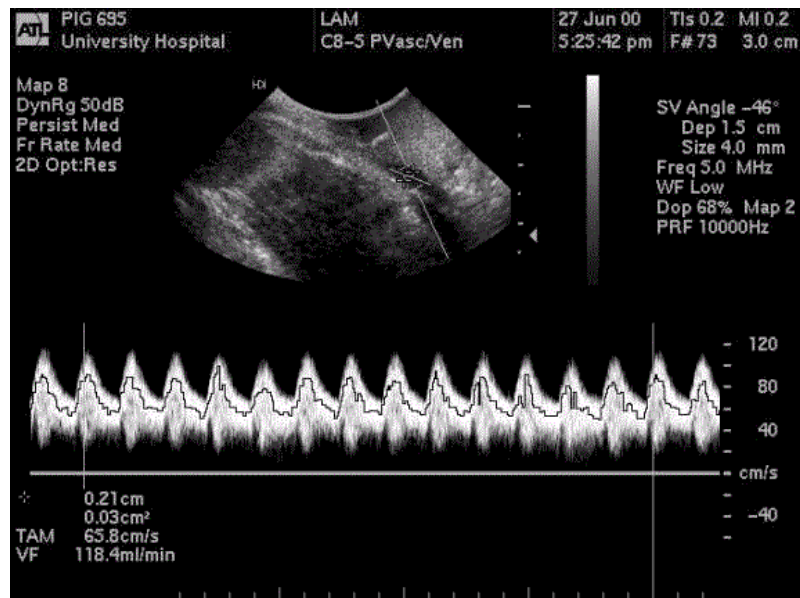
vő. zene/szívhangok  
 idő-fr. reprezentációban



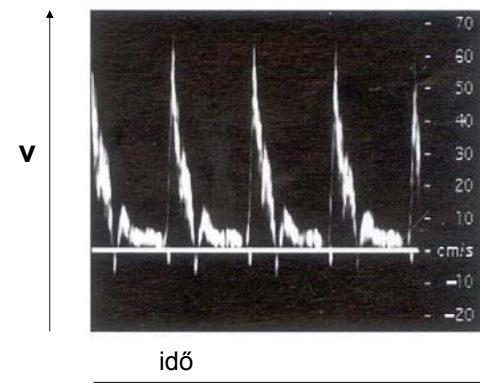
sebességeloszlás TM-képe

44

Tkv. VIII.42. ábra



### „Spectral Doppler display”

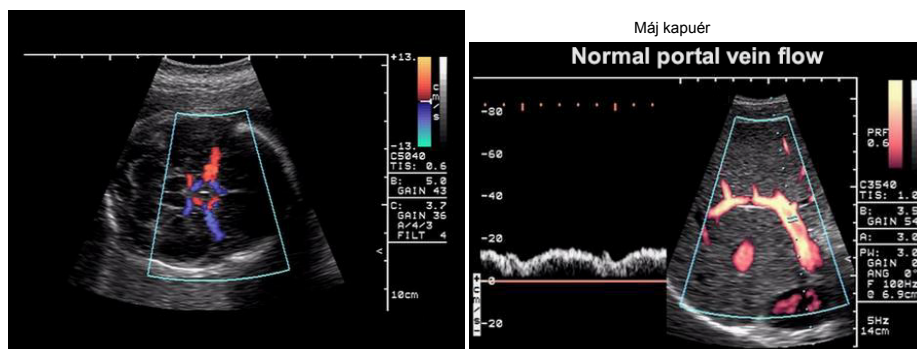


A fényesség a reflektált jel intenzitását mutatja

A sebesség nagysága fluktuációt mutat - összevetés az EKG jellel

### $\Delta f$ előjele a véráramlás *irányára* jellemző → Szinkódolás

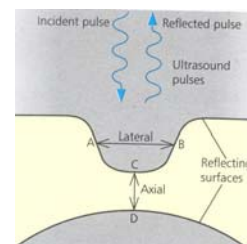
transzducer felé: meleg színek,  
transzducertől elfelé: hideg színek



BART: Blue Away Red Towards

Színek ~ vénás - artériás áramlás  
örvénylés - szűkületek

### Az UH-kép felbontása



**Axiális felbontás** = CD távolság

**CD > 0.5 pulzushossz**

Pl. 12 MHz, lágy szövet ( $c=1500$  m/s)  
3 periodusból álló pulzus  
pulzushossz =  $c \times$  (pulzus időtartama)  
= 375  $\mu$ m  
→ CD > 188  $\mu$ m

**Laterális felbontás** = AB távolság

**AB ~ 10 x axiális felbontás**

### Optimalizálás:

- nagy frekvencia (de elnyelés!)
- keskeny nyáláb - fókuszálás

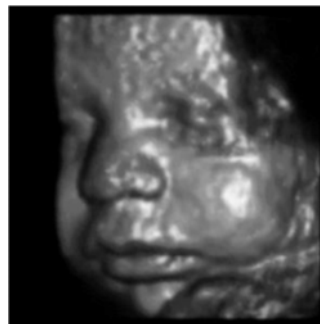


**$f = 3 - 10$  MHz**

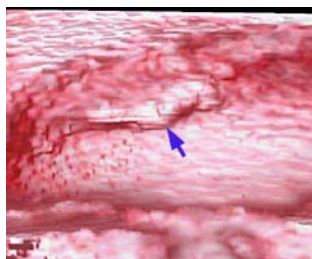


### 3D rekonstrukció

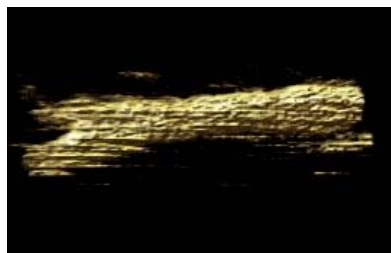
magzat arca



húgyhólyag



nyaki verőér



49

### UH terápia

#### *mechanikai és/vagy hőhatás*

- kis intenzitás: mikromassázs
- nagy intenzitás: roncsoló hatás  
sejtállományt fenntartó kötőterek legyőzése  
(szabad gyökök,  $H_2O_2$ , DNS lánc törések), kavitáció
- hipertermiás kezelés  
abszorpció – hővé alakul az energia
- fogászat: fogkőeltávolítás (20-40 kHz)  
rezgő fémcsúcs közvetlenül adja át a rezgési energiát a fogkönek
- tisztítás: diszpergáló hatás alapján

tkv. 6.4.2(3) példája:  
1 MHz, 1 W/cm<sup>2</sup>  
izomban 400 kPa a  $\Delta p$ (!)  
-100 és +300 kPa között változik a  $p$

50

### Lökéshullám terápia (nem UH!)

#### ESWL (extracorporeal shockwave lithotripsy)

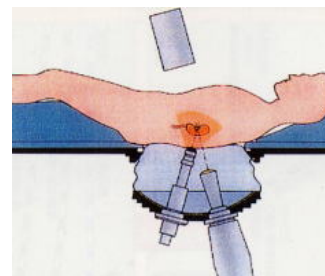
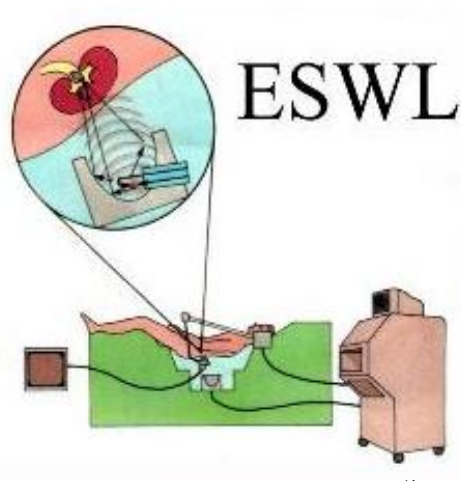
#### *kövek non-invazív törése (vese, epe, ...)*

kb. 20 kV-os kondenzátor víz alatti elektródapáron kisütve



nyomásimpulzus, fókuszálás a kő helyére elliptikus tükörrel

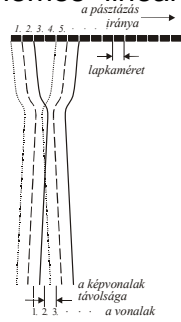
*röntgen és/vagy UH képalkotóval követik a kezelés előrehaladtát*



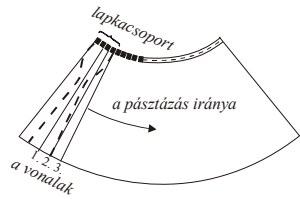
52

## Pásztázás

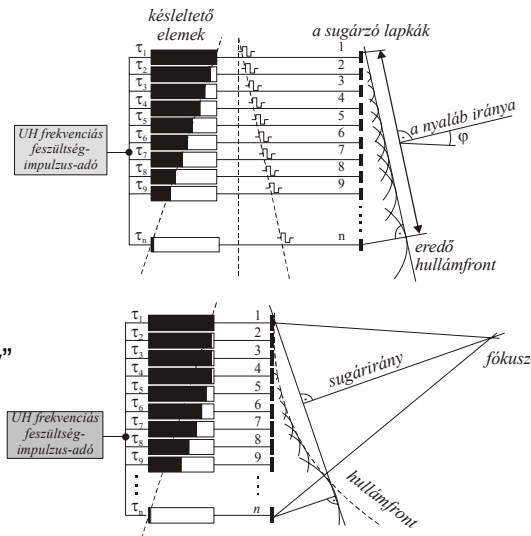
### sokelemes "linear array"



### sokelemes "curved array"



## Pásztázás és fókuszálás



53

Vége

Köszönöm a figyelmet!



54