

Az ultrahang diagnosztika fizikai alapjai

Schay G. 2016

témák :

- A hang mint mechanikai hullám
- Frekvencia tartományok - ultrahang
- Ultrahang keltése
- Ultrahang transducerek – technikai kérdések
- Távolságmérés ultrahanggal
- Doppler -effektus
- Ultrahangos képalkotás, szonográfia

Transzverzális hullám – Idővel a fény, vagy mech.hullámok bizonyos anyagokban

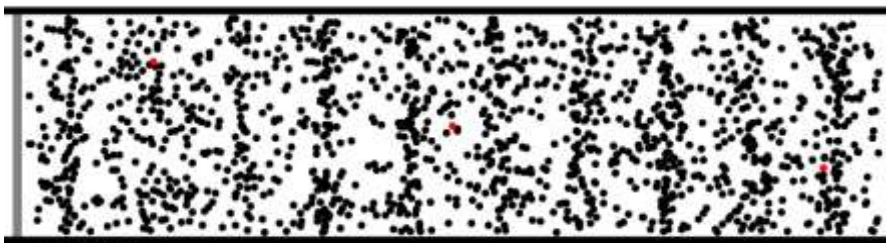


Transzverzális: hullám terjedés iránya merőleges a "mozgásra"



Longitudinális hullámok:

hullám terjedés iránya párhuzamos a "mozgással"

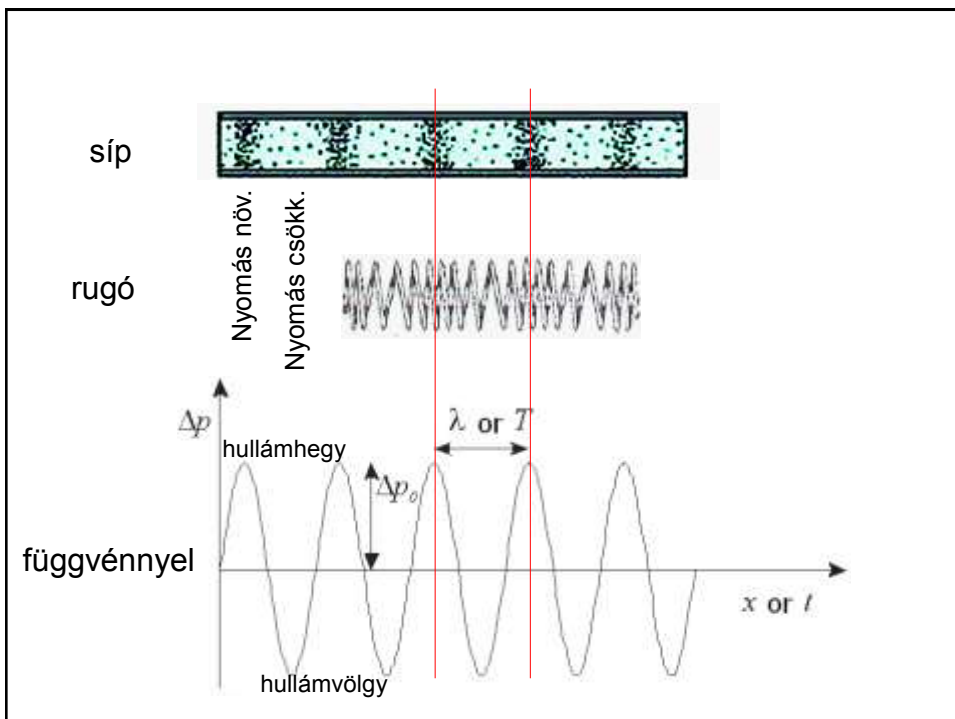
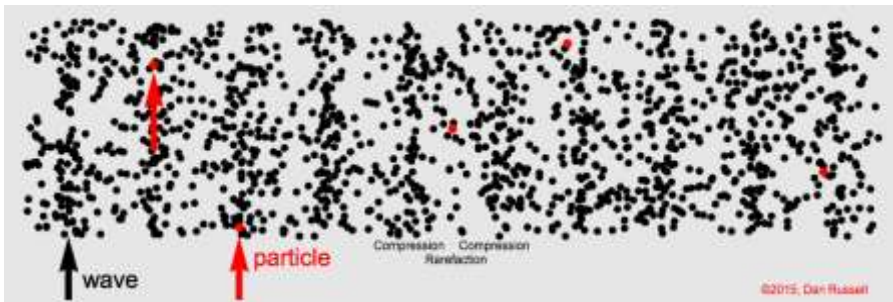


©2011, Dan Russell



Mozgó felszín (hullámforrás)

Compression: összenyomódás, nyomás (és sűrűség) növekedés
 Rarefaction: kitágulás, nyomás (és sűrűség) csökkenés



hidrosztatikai
nyomás

nyomásváltozás,
hangnyomás

$$p_{\text{total}} = p_{\text{hidro}} + \Delta p$$

DC + AC

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

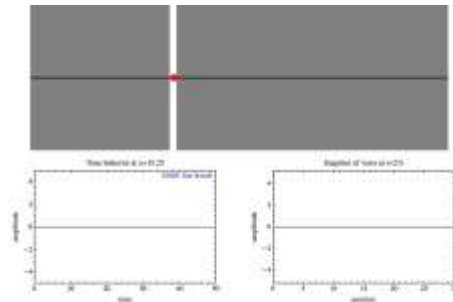
$$c \cdot T = \lambda, \quad c = f \cdot \lambda$$

(elektromos analógia:

DC=direct current, egyenáram

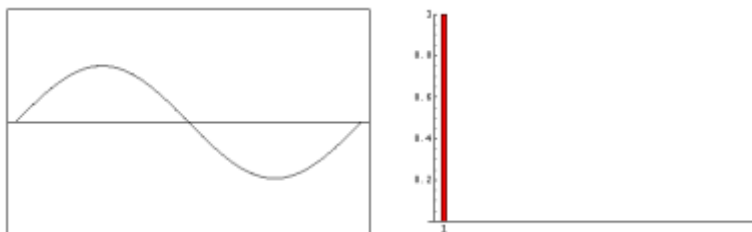
AC=alternating current, váltóáram)

általában $p_{\text{hidro}} \gg \Delta p$

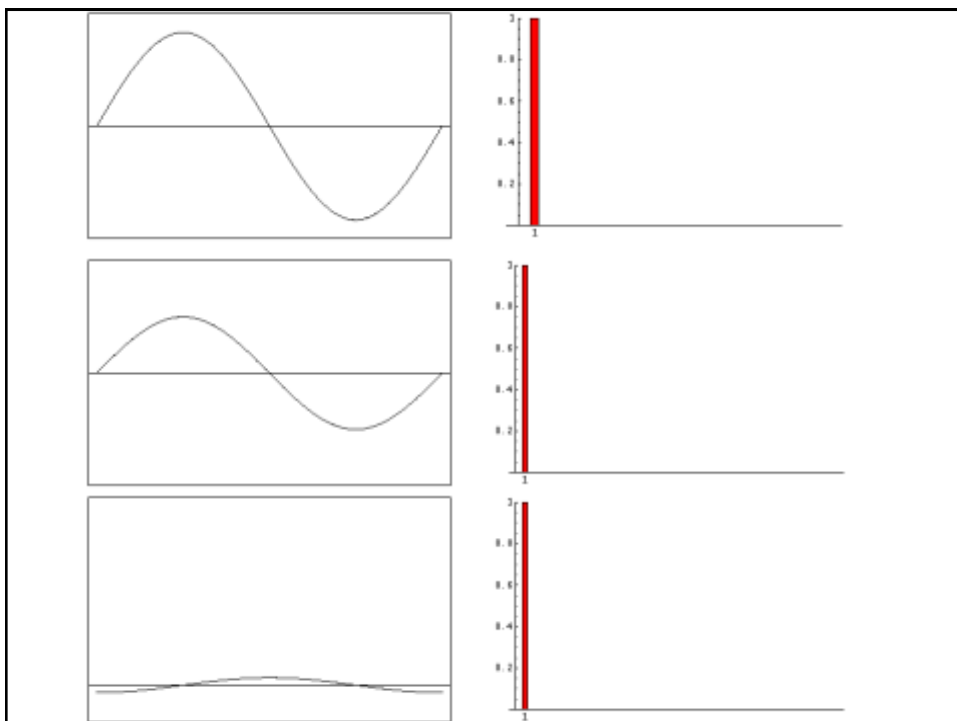
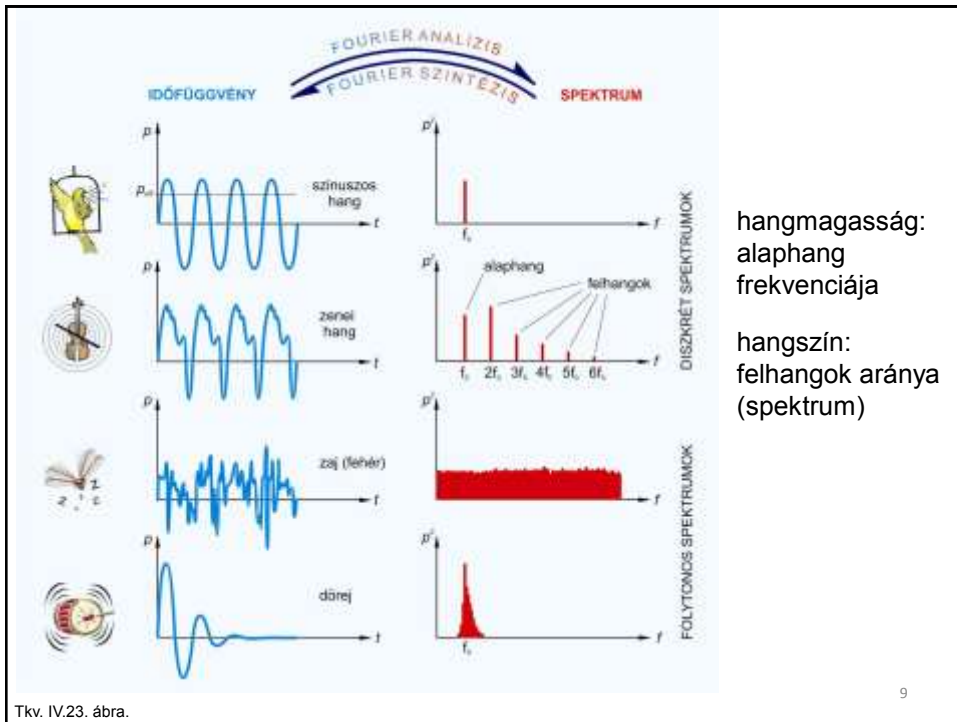


Frekvencia tartományok – Fourier tétel

$$Jel(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

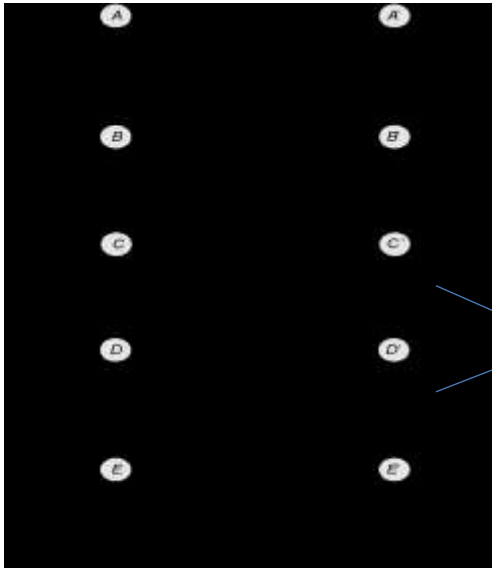


Minél több sin/cos függvényt adunk össze, annál pontosabban közelíthető meg bármilyen jel alakja



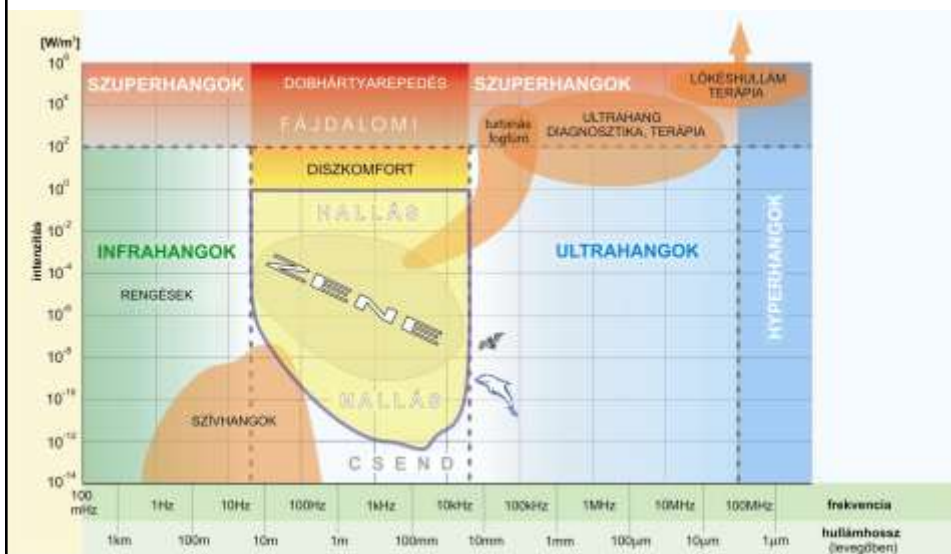
$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$

Ha a jel nem periódikus, akkor az összegzés helyett integrálni kell



Ha a pulzus rövidebb időben, akkor „cserében” szélesebb a frekvencia-tartománya

Mechanikai hullámok tartományai frekvencia és intenzitás alapján



Hanghullámok terjedése

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

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

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{K\rho}}$$

E : Young modulus, ld Hooke-törvény !

Néhány fontosabb összefüggés, az elasztikus közeg szerepe

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

kompresszibilitás

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

hangsebesség

$$Z = \frac{p}{v} = \frac{p_{\max}}{v_{\max}}$$

akusztikus impedancia
(definíciós egyenlet)

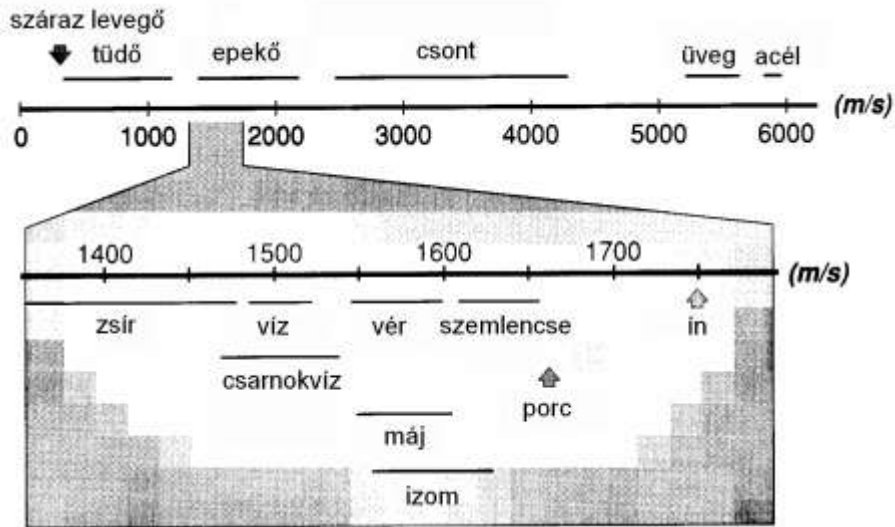
Vigyázat, v itt a térfogat, és nem a sebesség!
Több fogalom, mint lehetséges betű...

$$Z_{\text{el}} = \frac{U}{I}$$

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

Hasznos számítási formája Z-nek

Hangsebesség néhány közegben
Lágy szövetben átlagosan kb. 1540 m/s

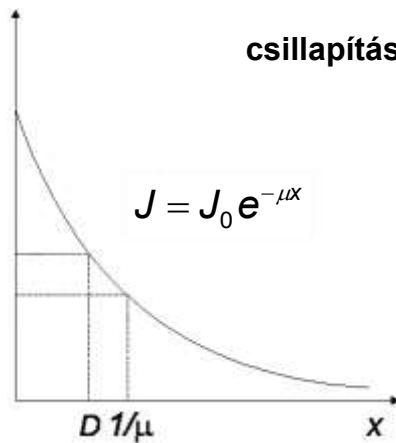


$$J = \frac{1}{Z} \Delta p_{eff}^2$$

intenzitás = energia-áram sűrűség

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

Az intenzitás gyengülését az ismert függvény írja le



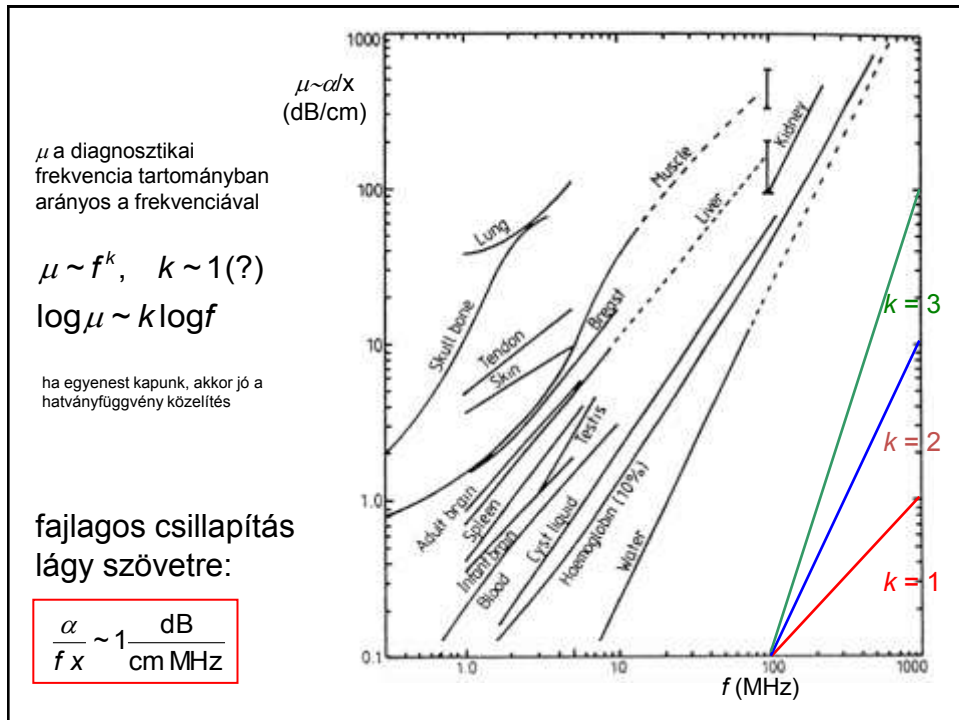
csillapítás

$$\alpha = 10 \cdot \lg \frac{J_0}{J} \text{ dB}$$

$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

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

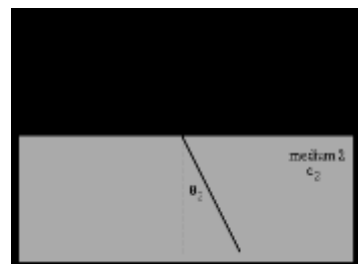
μ a diagnosztikai
frekvencia tartományban
arányos a frekvenciával!



Reflexió és törés – természetesen a határfelületeken, mint a fény esetében is

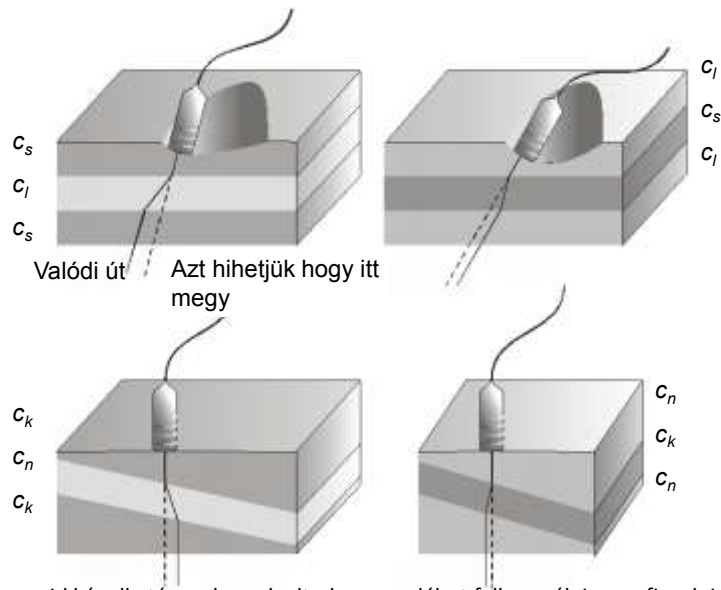
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Snellius-Descartes

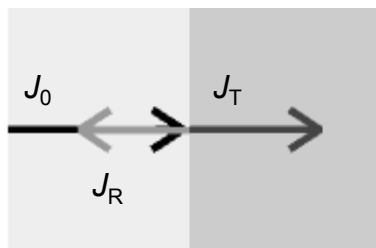


Frekvencia állandó!

Ultrahang nyalábok (v.ö. Fénysugarak) eltérülése



Reflexió (merőleges beesés esetére)



$$J_0 = J_R + J_T$$

reflexióképesség:

$$R = \frac{J_{\text{refl.}}}{J_{\text{be}}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Analógia a fénnel: Z helyett ott a törésmutató van a képletben

<i>határfelület</i>	<i>R</i>
izom/vér	0.001
zsír/máj	0.006
zsír/izom	0.01
csont/izom	0.41
csont/zsír	0.48
lágyszövet/levegő	0.99

$$Z_1 \ll Z_2, \quad R \approx 1$$

optimális csatolás:

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



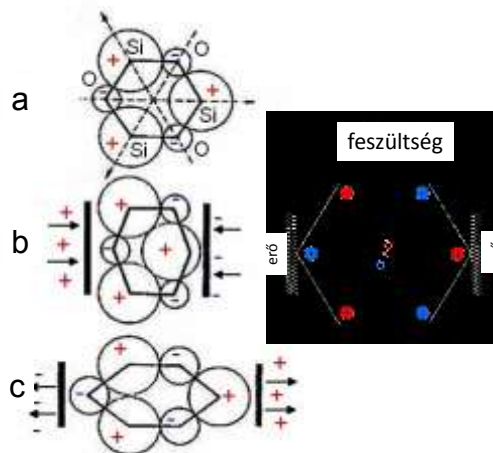
Csatoló közegre van szükség!

Generation of ultrasound - Piezoelectric effect

Elektromos jelforrás (szinuszoszcillátor)+ transducer (piezokristály).

(a) A pozitív és negatív töltések súlypontja egymásba esik.

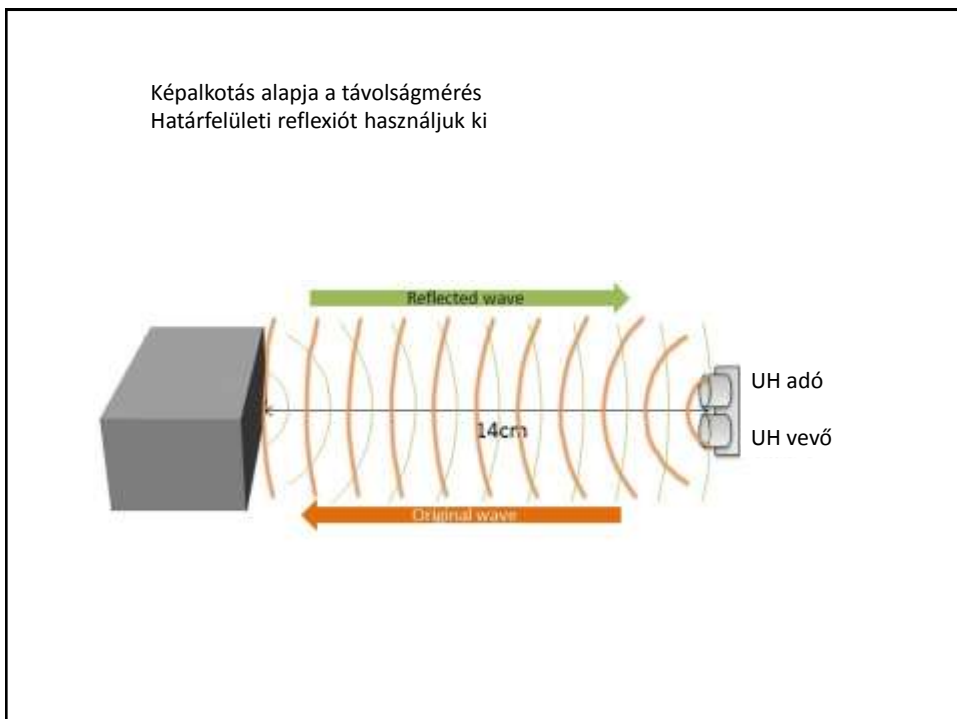
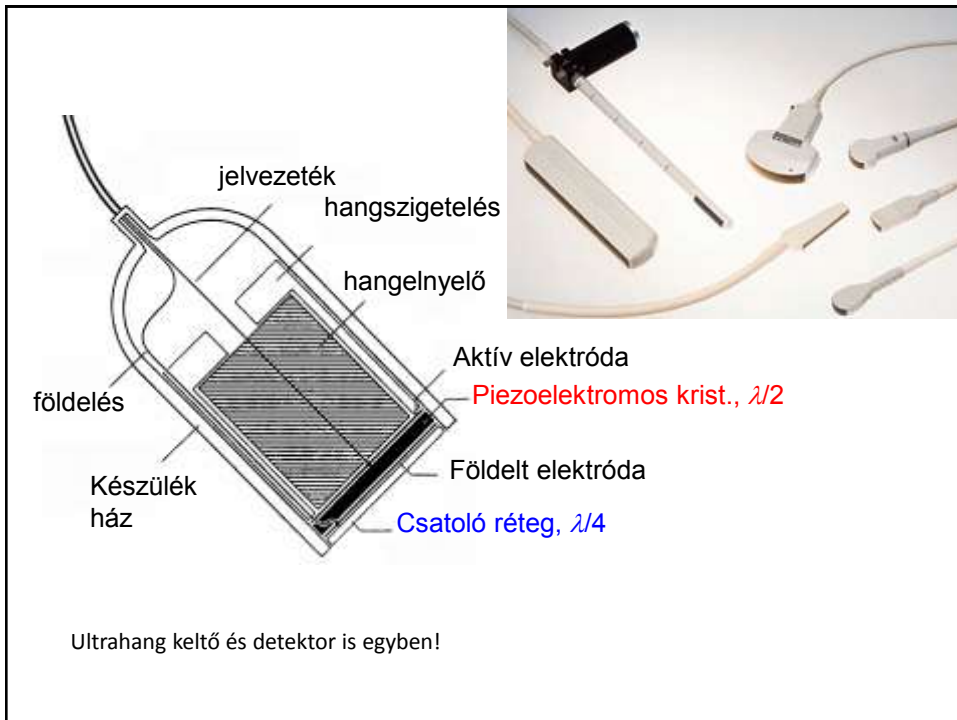
(b) és (c) Nyomás hatására a töltések súlypontja szétválik, azaz feszültség keletkezik (direkt ~) ill. feszültség hatására a kristály deformálódik (inverz ~).



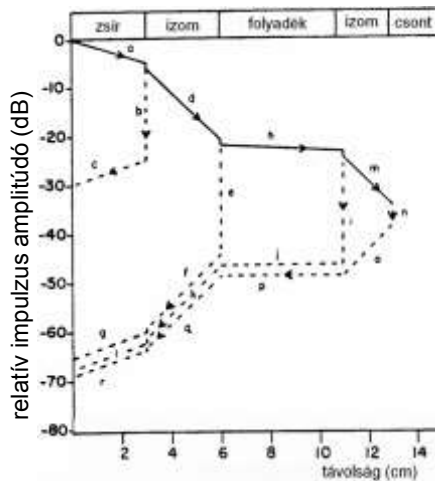
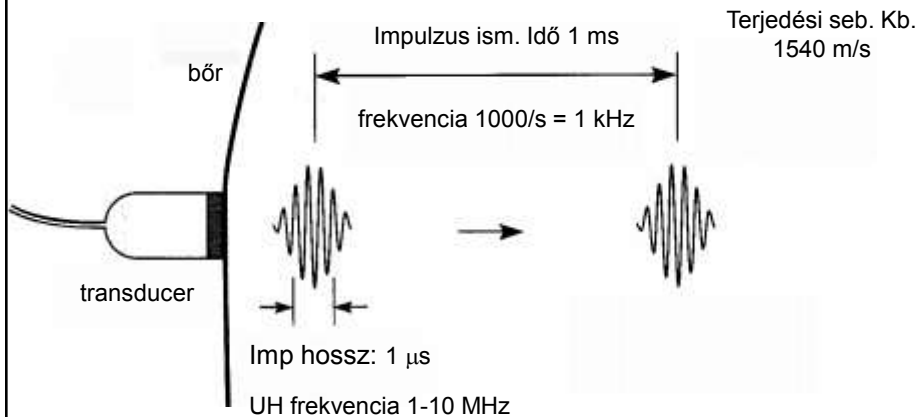
Otthon:
gázgyújtó



csipogo



transzducer: adó és vevő egyben
időbeli szétválasztás – folyamatos hullám helyett impulzusok



minél később/ minél mélyebbről érkezik
vissza a reflexió, annál gyengébb a reflektált
intenzitás

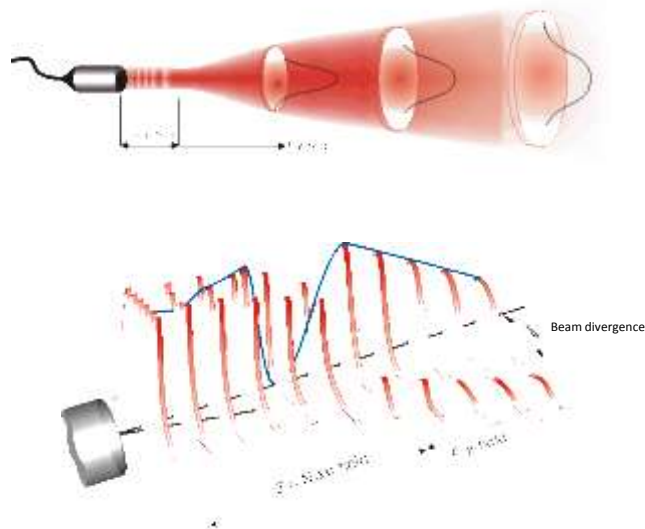
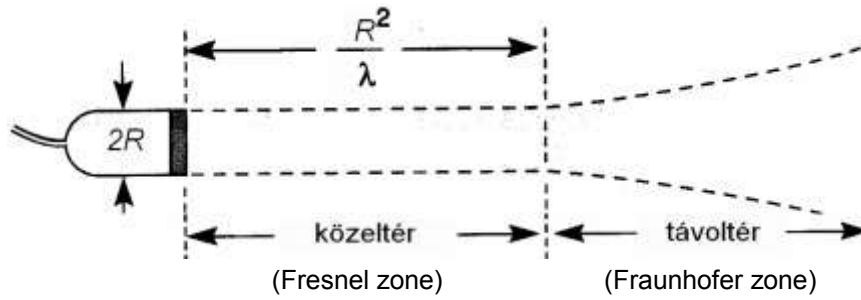
visszaverődési idő függő erősítés

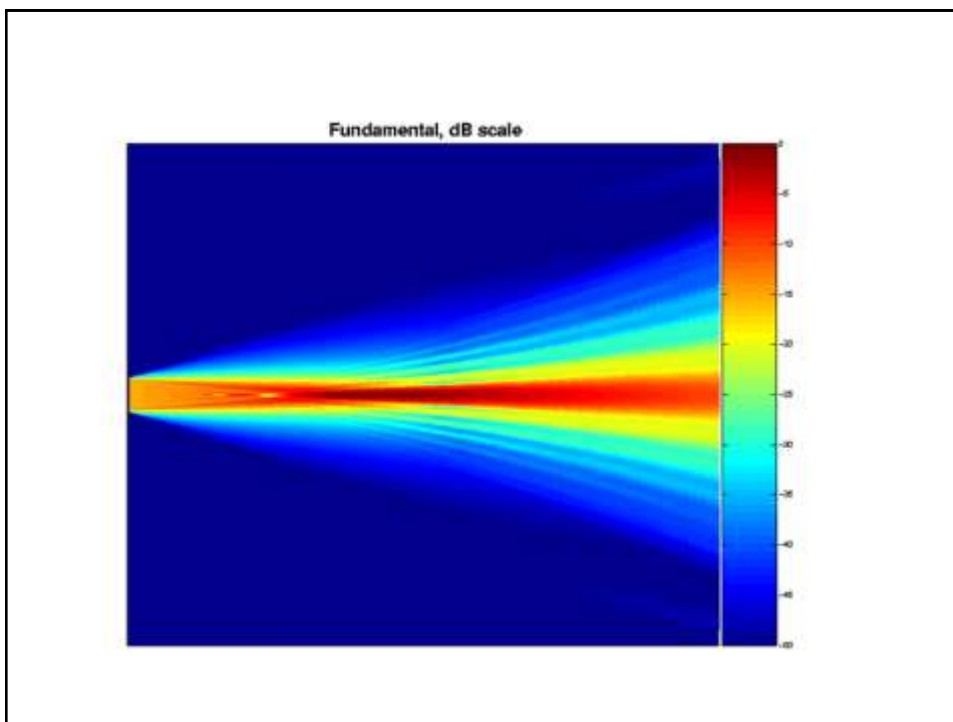
TGC: time gain compensation

DGC: depth gain control

határfelület	R	$10\lg R$ (dB)	T	$10\lg T$ (dB)
zsír/izom	0.01	-20.0	0.990	-0.044
izom/vér	0.001	-30.0	0.999	-0.004
izom/csont	0.41	-3.9	0.590	-2.291

Nyalábprofil és felbontás





Feloldási határ, feloldóképesség

A feloldási határt ama két pont közötti távolsággal jellemezhetjük, amelyeket az UH segítségével még különálló pontokként detektálhatunk (minél nagyobb az értéke, annál rosszabb a helyzet).

Felbontóképesség: a feloldási határ reciproka.

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

Az impulzushossz fordítottan arányos a frekvenciával.

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

Jellemző értékek

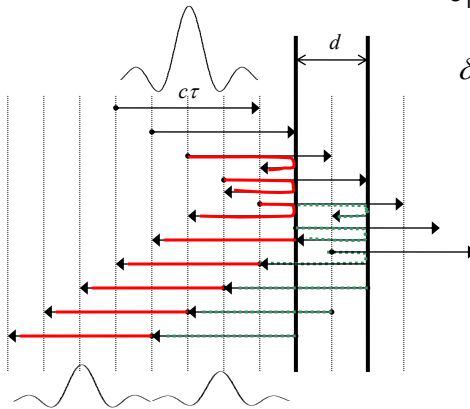
frekvencia (MHz):	2	15
hullámhossz (izomban) (mm):	0.78	0.1
behatolási mélység (cm):	12	1.6
laterális feloldási határ (mm):	3.0	0.4
axiális feloldási határ (mm):	0.8	0.15

Axiális feloldási határ

τ : impulzusidő

$c_1\tau \cong c_2\tau = c\tau$ impulzushossz

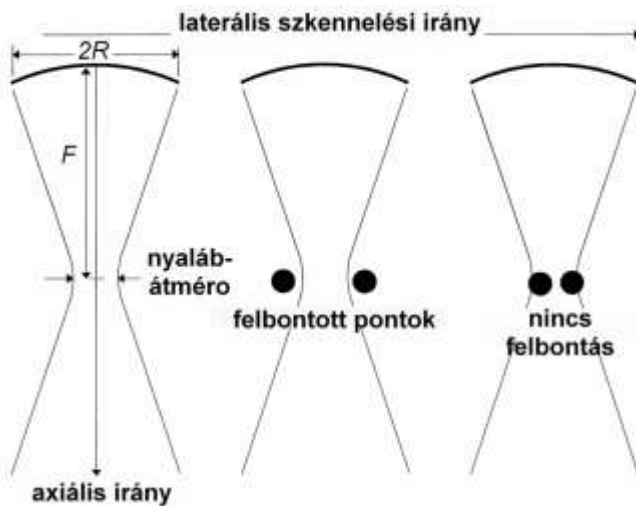
$$\delta_{ax} = d = \frac{c\tau}{2} \text{ feloldási határ}$$



Az impulzushossz fele az axiális feloldás határa, mivel ekkor éppen érintik egymást az egymás mögötti helyekről induló echók.

$$\tau \sim T = \frac{1}{f}$$

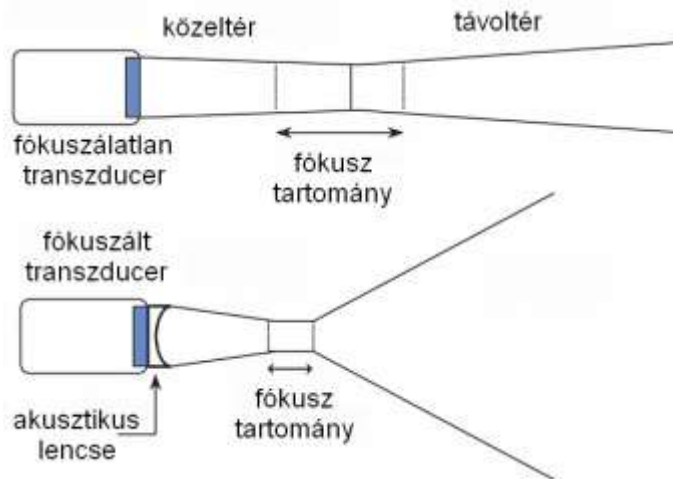
Laterális feloldási határ



$$\left(\delta_{lat} \sim \frac{F}{2R} \cdot \lambda \right)$$

F : fókusz távolság
 $2R$: transzducer átmérő
 λ : hullámhossz

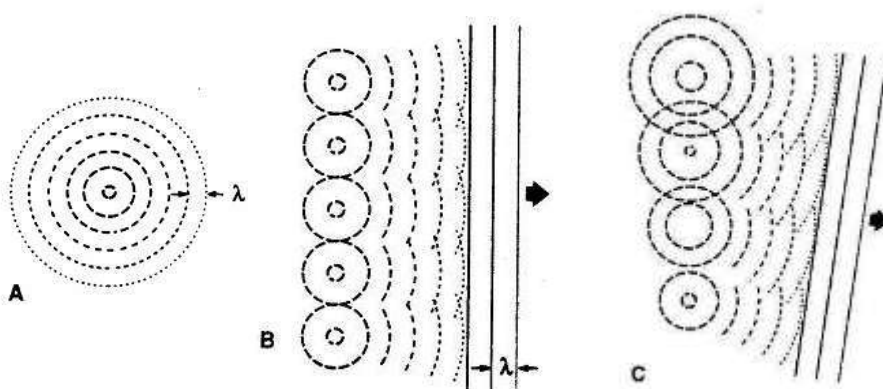
Fókuszálás



Fókuszáláskor a nyaláb divergenciája nő a távoltérben és romlik a mélységélesség.

Vö. Tkv. 500.o. 1. ábra

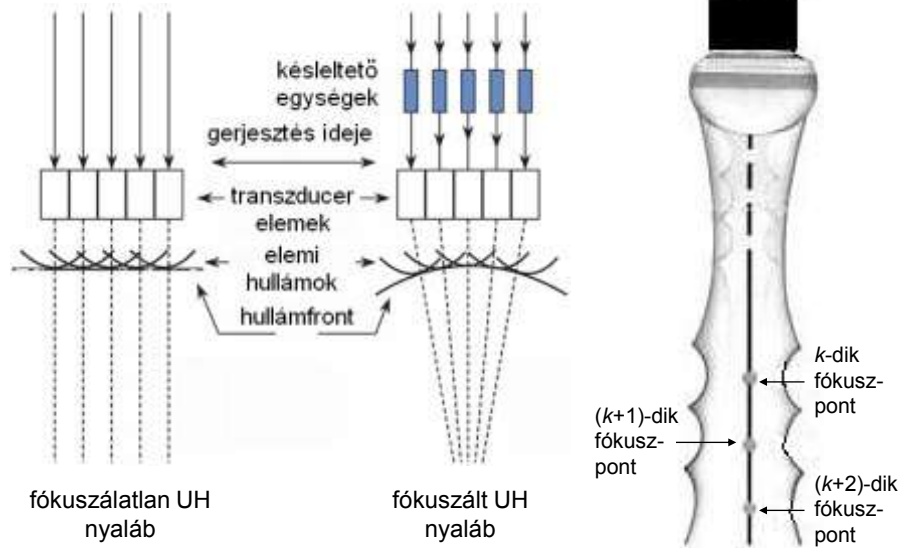
Huygens elv



A hullámfront minden pontja elemi hullámok kiindulópontjának tekinthető. Az új hullámfront ezen elemi hullámok burkológörcbéje.

34

Elektronikus fókuszálás

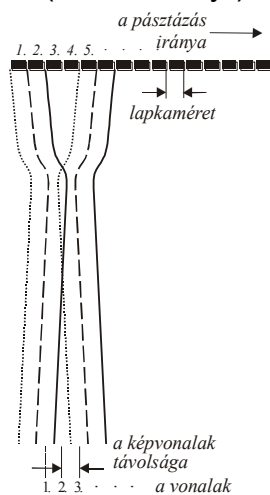


vö. Tkv. 501.o. 2. ábra

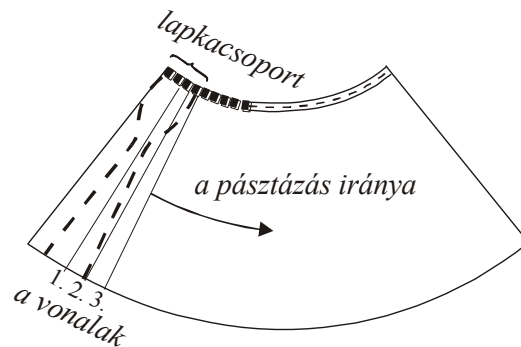
35

Pásztázás

sokelemes lineáris lapkacsoport
("linear array")

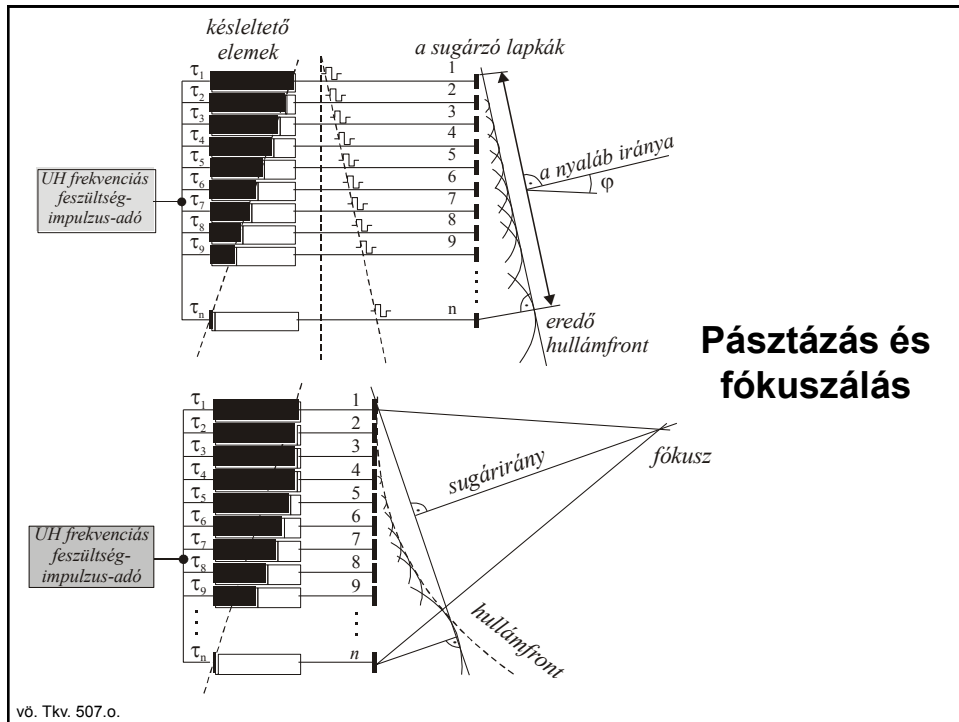


sokelemes íves lapkacsoport
("curved array")



vö. Tkv. VII. 36-37. ábrák

36



Doppler-effektus : hogyan mérjük sebességet?

Álló forrás
Állandó frekvencia
 f

Mozgó forrás
Megváltozott észlelhető frekv.
 f'

Ha az ultrahang egy mozgó határfelületről verődik vissza, akkor az egyrészt egy mozgó megfigyelő, de egyben egy mozgó forrás is!

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 $v_R \ll c$)

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

Doppler frekvencia = frekvencia változás = fr. eltolódás

ha $v_i, v_R \ll c$ ($i=M$ vagy F)

- átrendezésével
 a frekvencia változás
 (Doppler frekvencia, f_D)

$$\Delta f = f_D = \pm \frac{v_i}{c} f$$

- (d) átrendezésével
 a frekvencia változás
 (Doppler frekvencia, f_D)

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

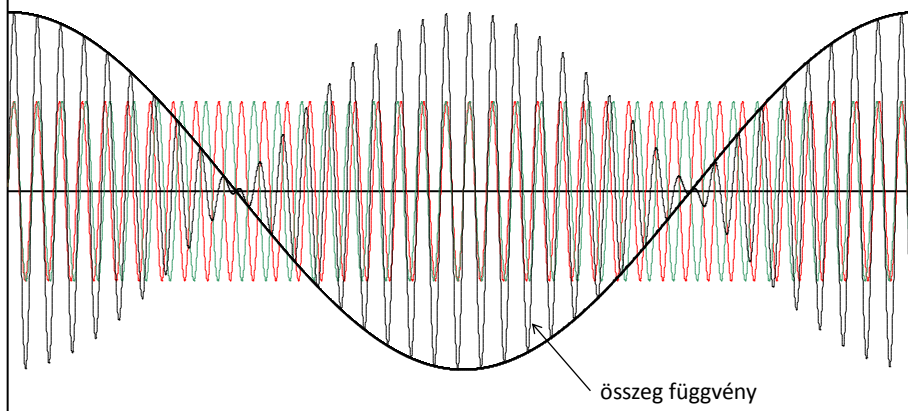
ha v és c nem párhuzamosak, akkor v helyett $v \cos \Theta$
 írandó képletbe

Lebegés

Ha két közeli frekvenciájú szinuszos jelet összeadunk (összekeverünk) akkor megjelennek új frekvenciák is.

$$f_{\text{piros}} \geq f_{\text{zold}}$$

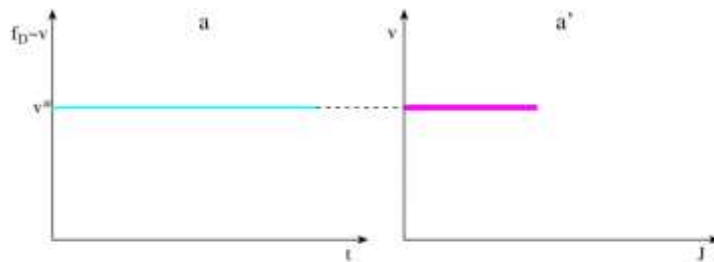
Pl. a különbségi frekvencia, amit szintén megfigyelhetünk (fekete burkoló görbe)



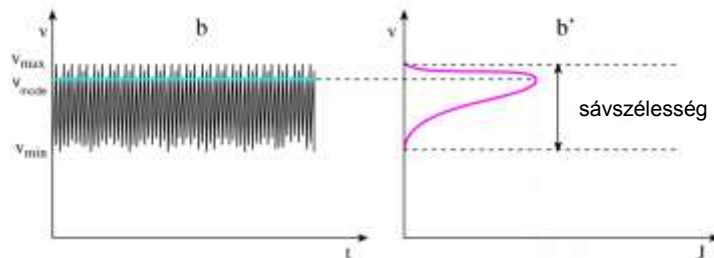
emlékeztető: $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$

Doppler görbék

egy állandó
sebesség
(v^*)



sebesség-
eloszlás
($v_{\text{módus}}$ -sal)

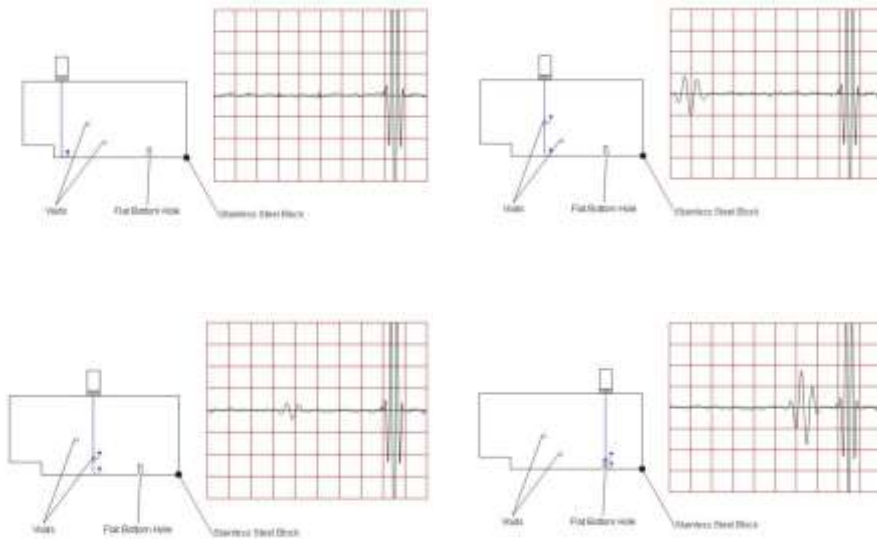
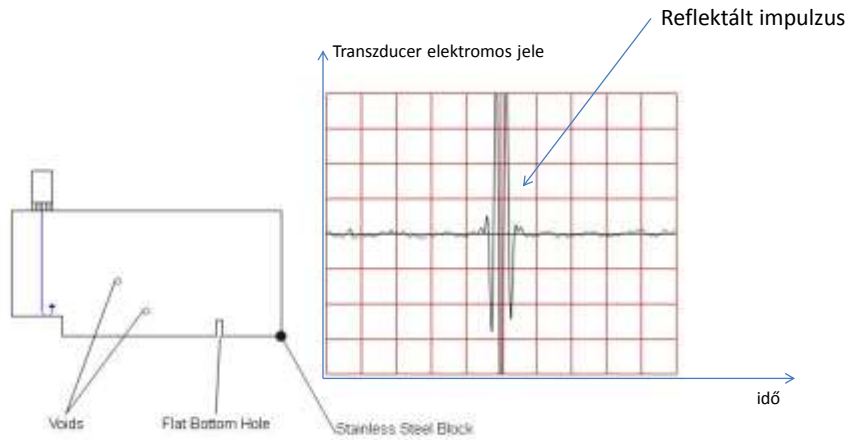


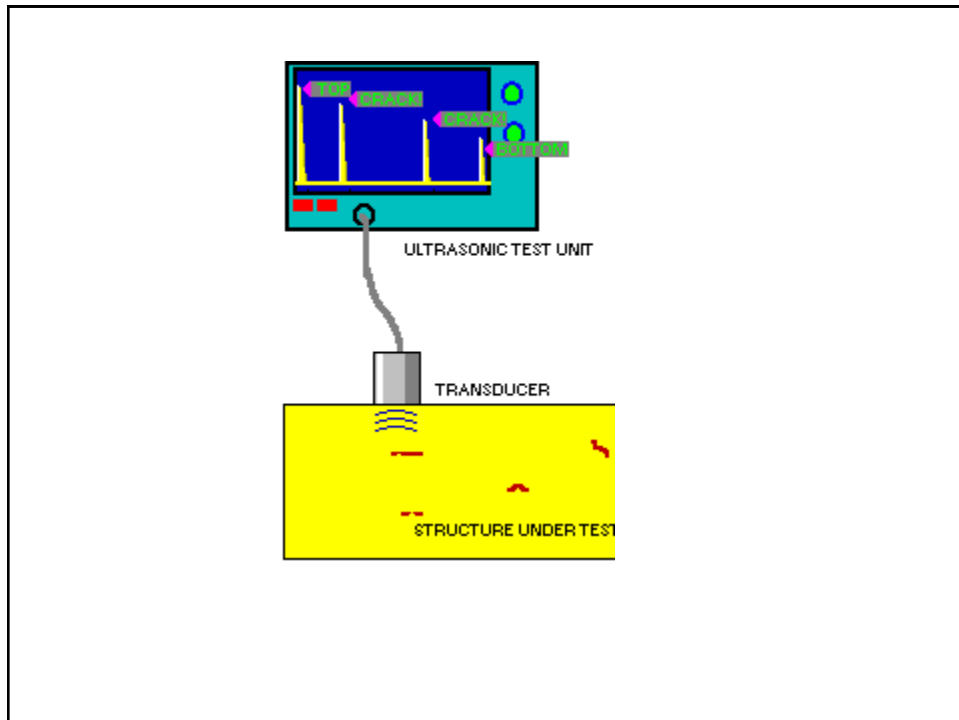
sebességek

eloszlásfüggvény egy
időpillanatban

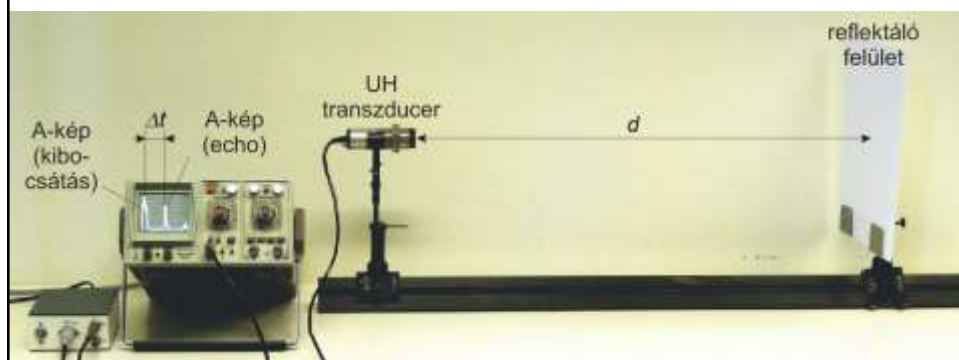
Tkv. VIII.42. ábra

Felület leképezése ultrahang impulzusokkal

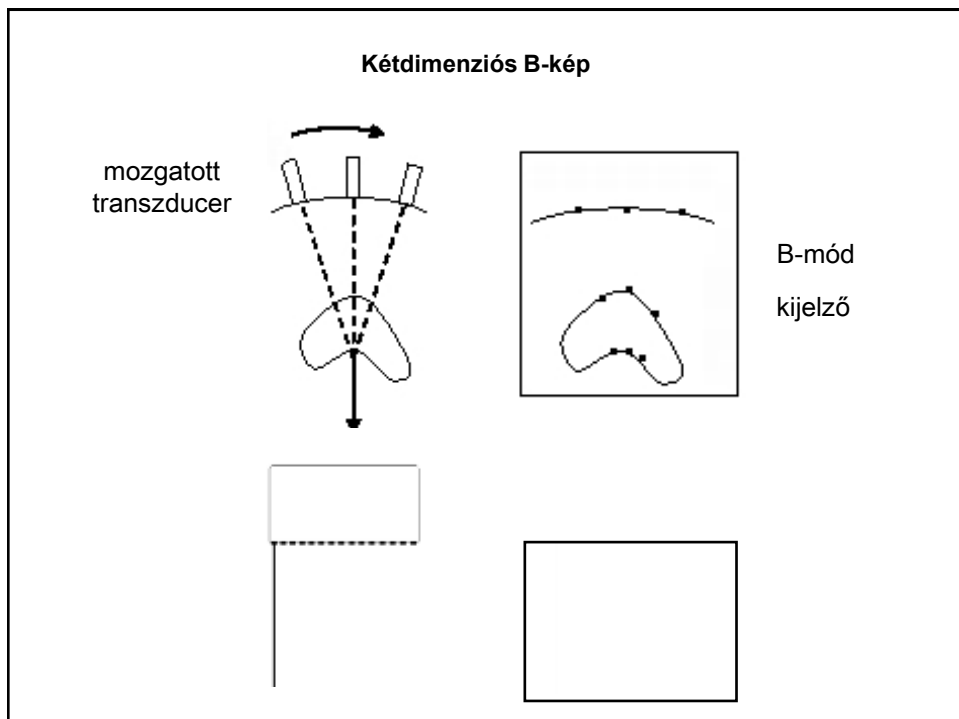
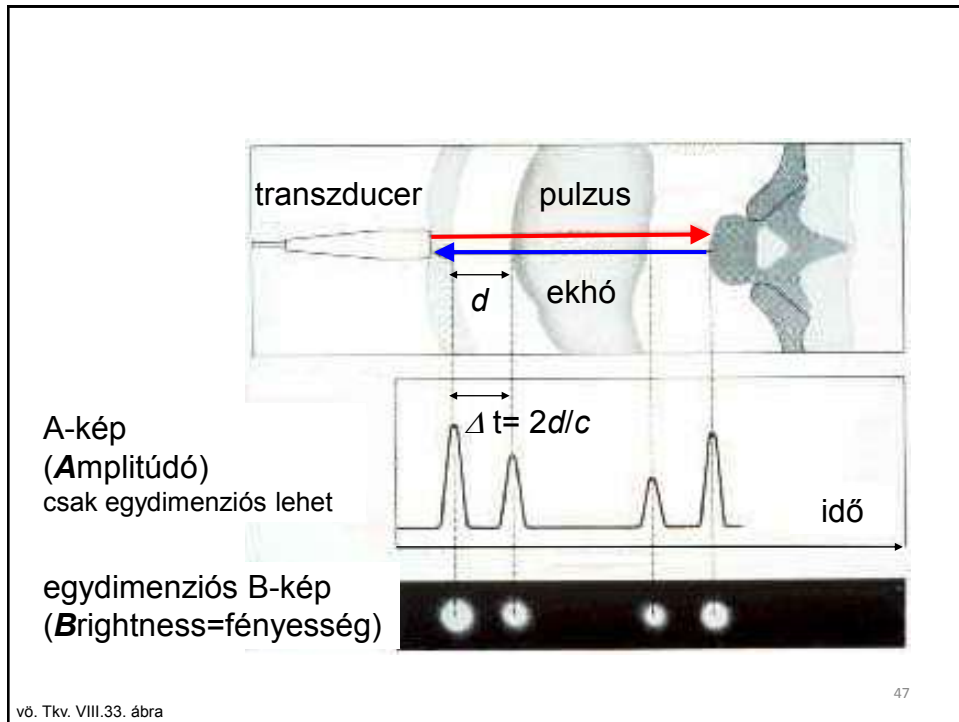




Órai kísérlet



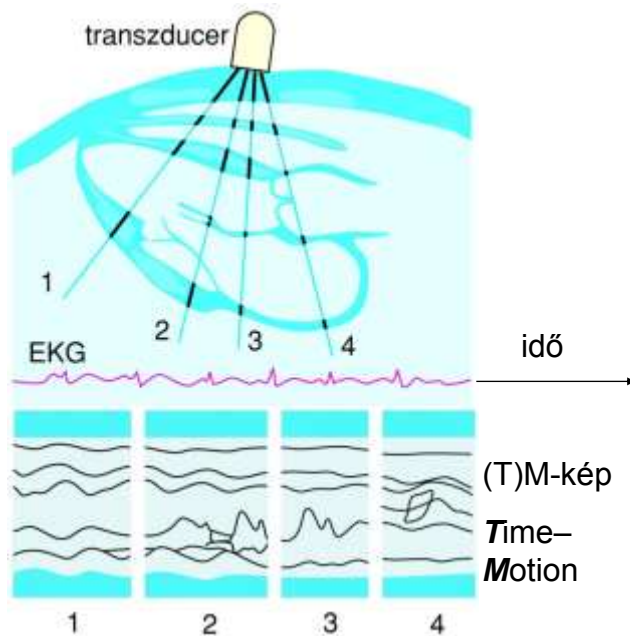
$$c\Delta t = d + d = 2d$$



TM-kép

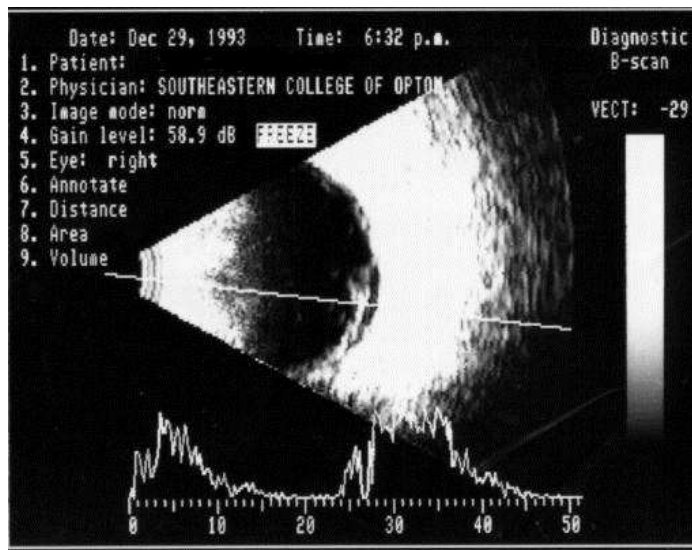
EKG jel
referenciaként

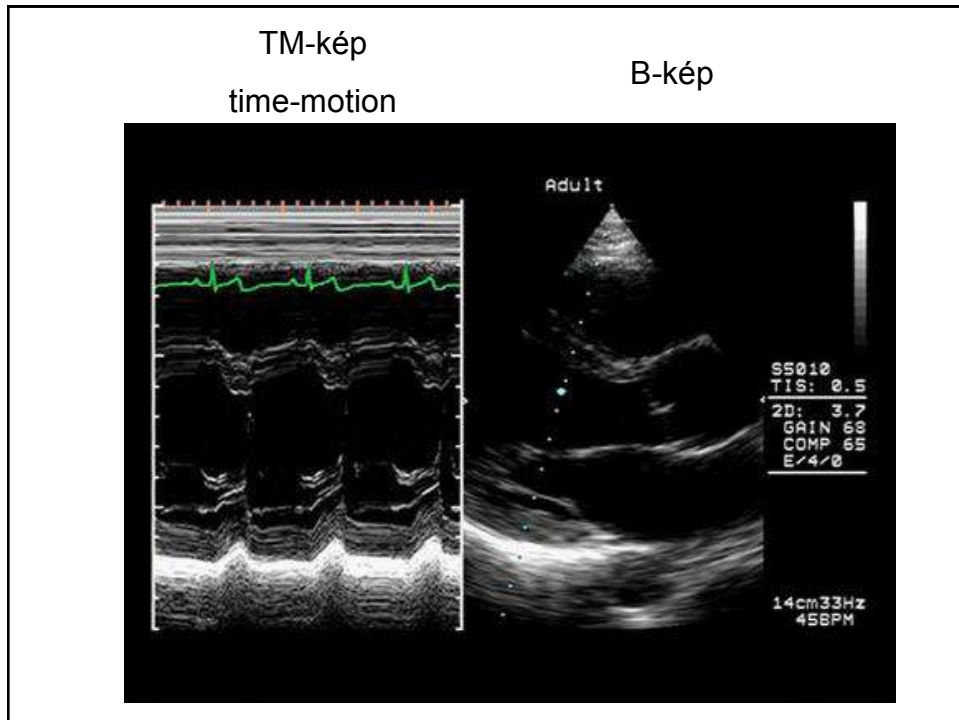
(függőleges)
egydimenziós
B-kép időbeli
változása



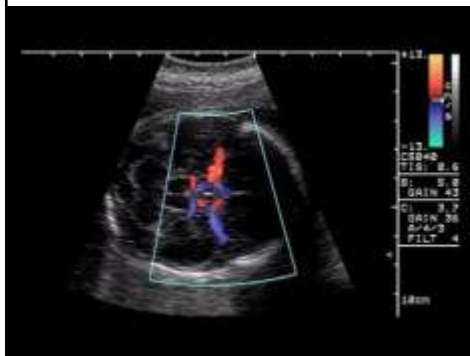
Tkv. VIII.34. ábra

Kétdimenziós B-kép és A-kép



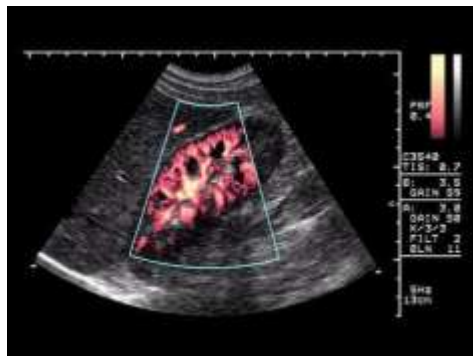


Doppler: bimodális képalkotás, kétféle információ egymásra helyezve egy képben



BART: **Blue** Away **Red** Towards

A színekódolás a sebesség-információt mutatja



power Doppler

A doppler jelben levő teljesítményt mutatja meg

CW: folyamatos hullámú
adó és vevő különválasztva
(egymás mellett)

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

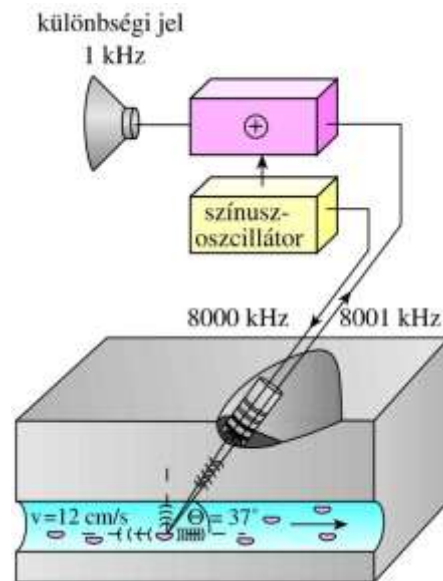
pl. $f=8000$ kHz

$v=12$ cm/s

$c=1600$ m/s

$\theta = 37^\circ$

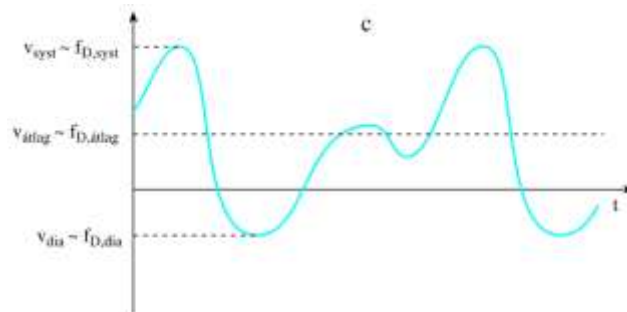
$\Rightarrow f_D=1$ kHz
(lebegés jelensége)



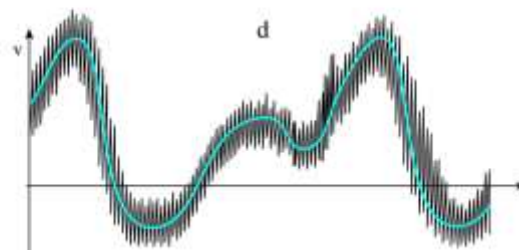
Tkv. VIII.41. ábra

Doppler görbék

minden
időpillanatban egy
sebességgel
jellemezhető áramlás

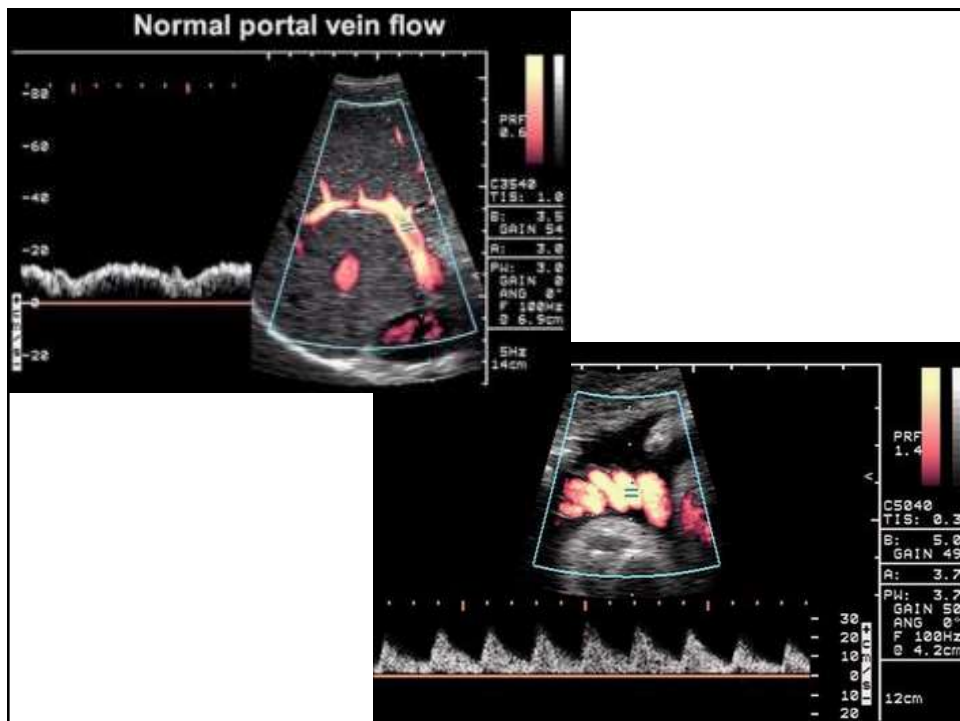
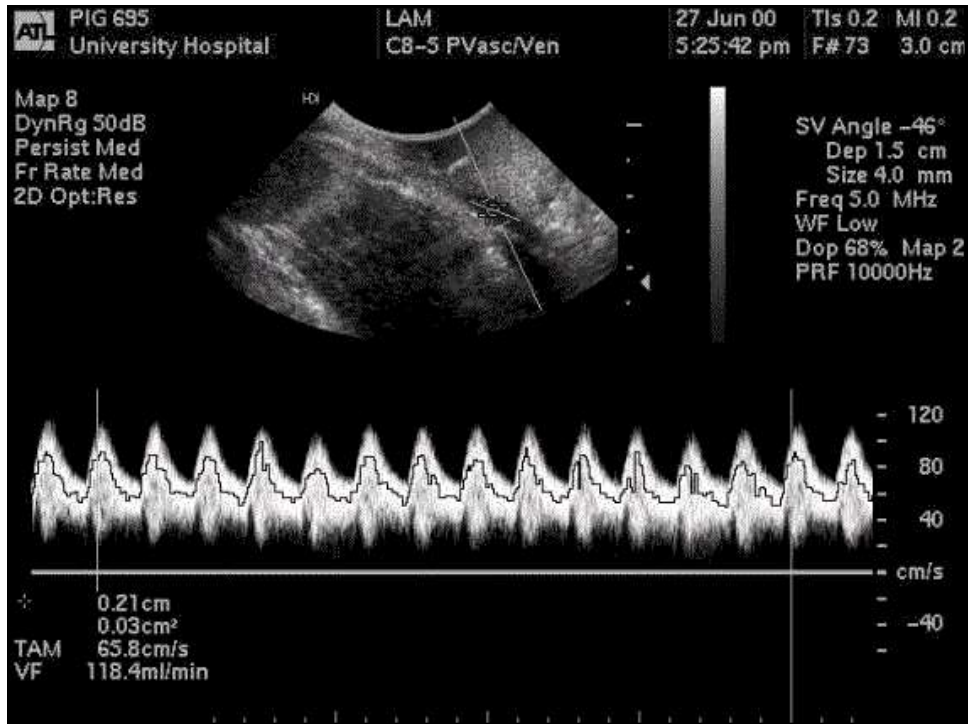


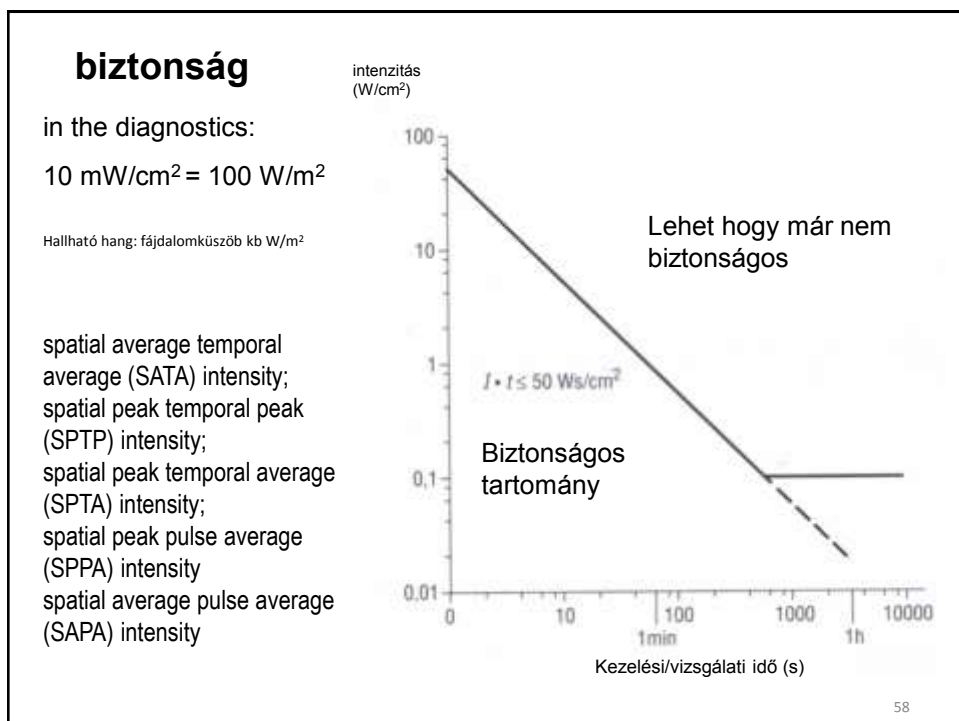
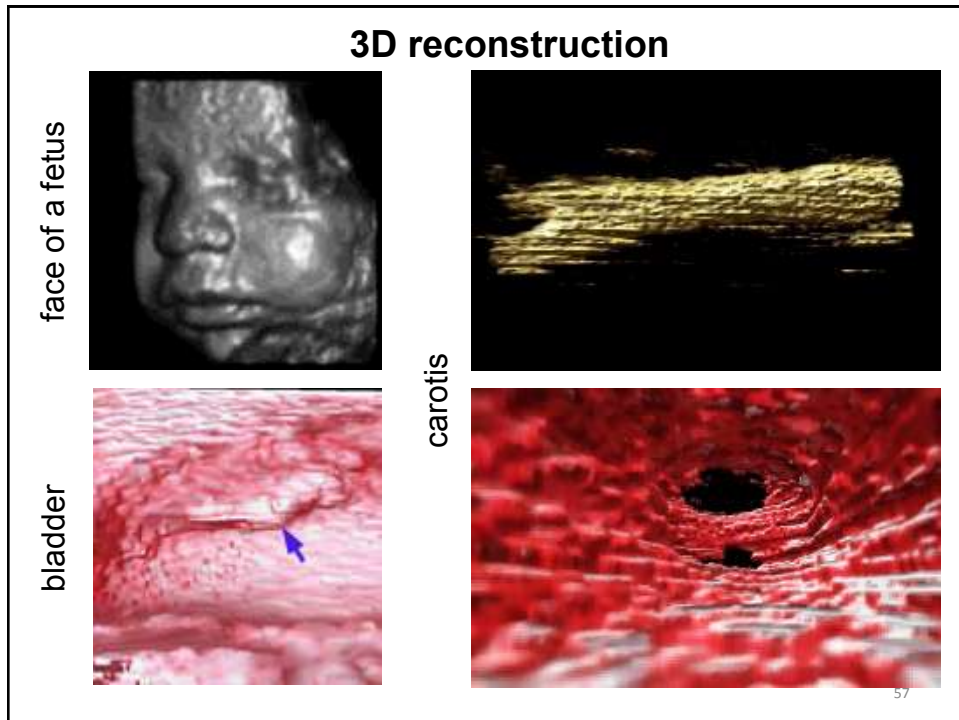
minden időpillanatban egy
sebességeloszlással
jellemezhető áramlás



sebességeloszlásTM-képe

Tkv. VIII.42. ábra





Mechanikai index = legkisebb negatív nyomásérték / \sqrt{UH} középfrekvencia

hőindex = W_p / W_{deg}

W_p : hangteljesítmény az adott mélységben

W_{deg} : becsült teljesítmény ami 1°C hőmérséklet emelkedéshez kell (1s alatt)

terápia: 1 W/cm²

