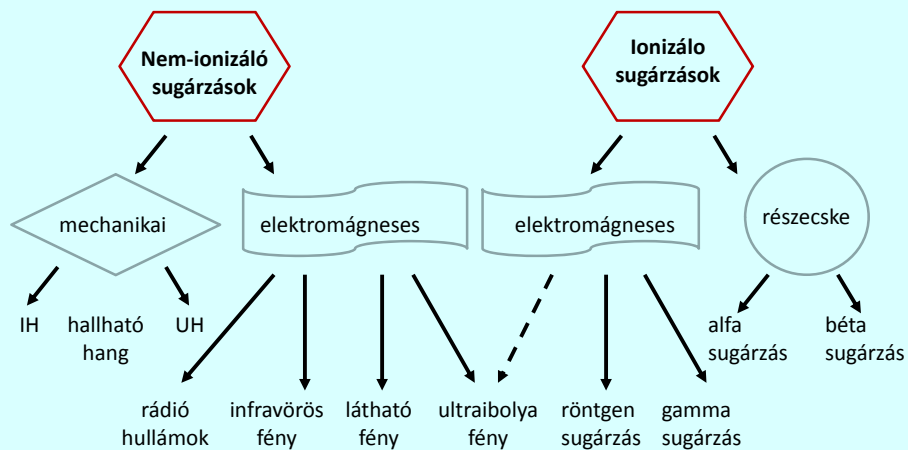


Sugárzások



Hang

és

ultrahang

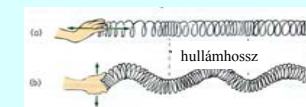


A hang/ultrahang mint hullám

A hang *mechanikai hullám*

Terjedéséhez közegre van szükség – vákuumban nem terjed

Longitudinális vs. transzverzális hullám



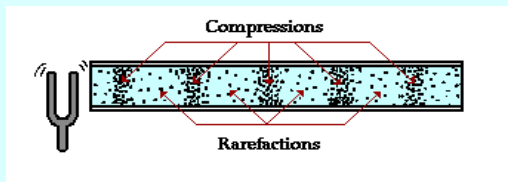
longitudinális hullám
(gázokban és folyadékok belsejében csak ilyen)



transzverzális hullám is kialakulhat
szilárd testekben, folyadékok felszínén

A nyomás periódikus változása

A közeg részecskéinek sűrűsödése és ritkulása a terjedési irány mentén



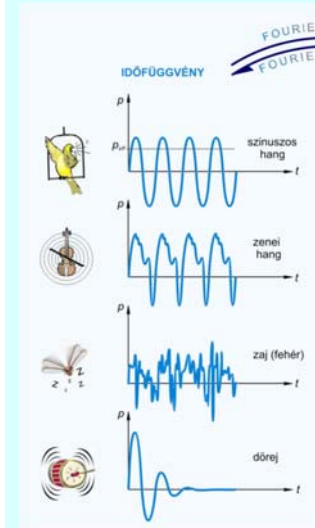
hidrosztatikainyomás

nyomásváltozás,
hangnyomás

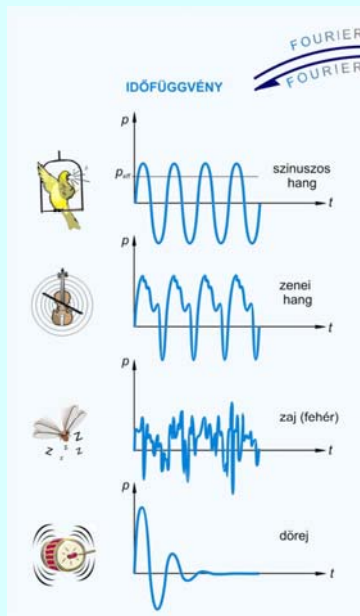
$$p_{\text{teljes}} = p_{\text{hidrosztat}} + \Delta p$$

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

amplitúdó fázis



A nyomás periódikus változása



alaphang
frekvenciája

hangmagasság

felhangok aránya
(spektrum)

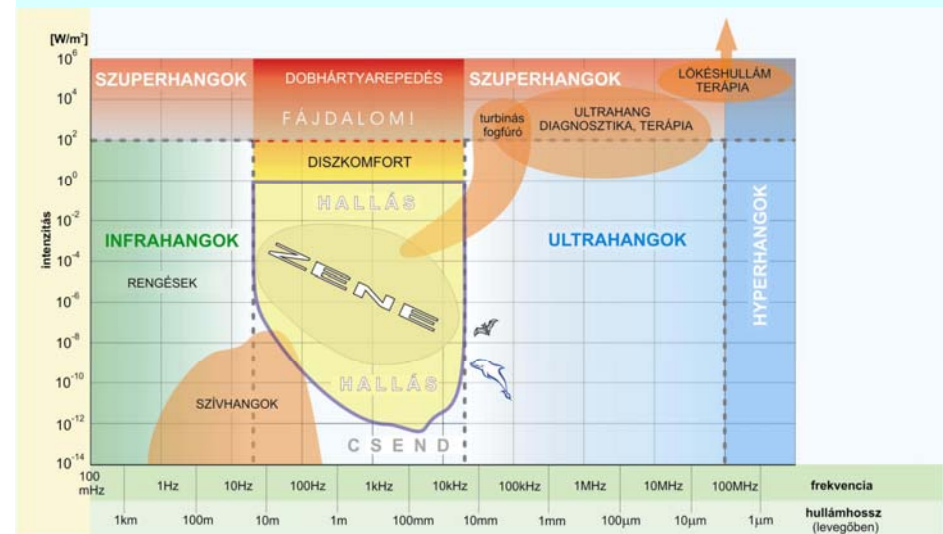
hangszín

nyomás / intenzitás

hangosság

Tkv. IV.23. ábra.

Mechanikai hullámok tartományai frekvencia és intenzitás alapján



Tkv. IV.24. ábra.

A hang/ultrahang terjedése

A hang *terjedési sebessége* – a rugalmas közeg szerepe

$$c = f\lambda$$



$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta p} \right)$$

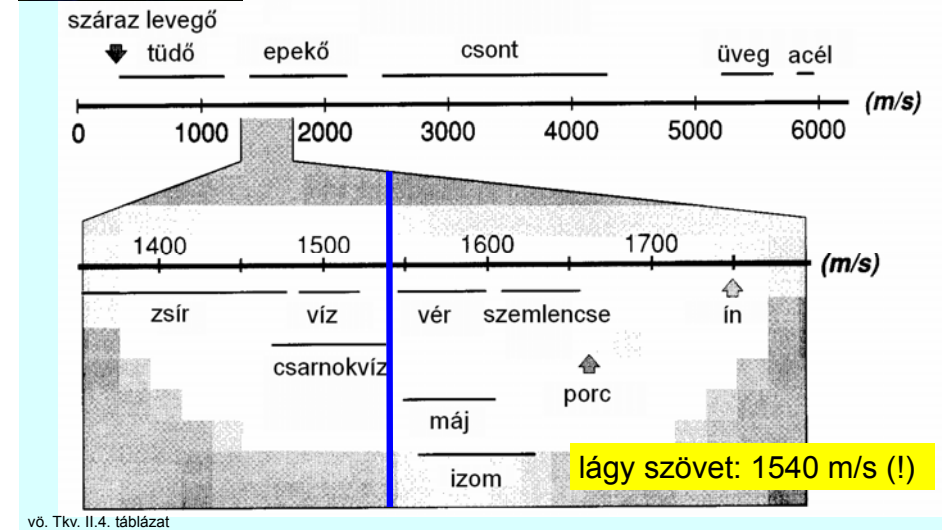
$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \kappa}}$$

κ a közeg kompresszibilitása
 ρ a közeg sűrűsége

Szilárd anyagokban nagyobb a terjedési sebesség, mint gázokban, mert

$$\rho \uparrow \quad \kappa \downarrow$$

A hang/UH sebessége különféle közegekben



Az akusztikus impedancia

ennyire áll ellen a részecske annak, hogy részecskéit rezgésbe hozzuk.

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

akusztikus impedancia/
akusztikus ellenállás/
akusztikus keménység
(definíció)

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

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

Mértékegység:

$$[kg / m^2 s]$$

anyag	ρ [kg/m ³]	κ [1/GPa]	c [m/s]	Z [kg/(m ² ·s)]
levegő	1,3	7650	331	0,00043·10 ⁶
víz, 20°C	998	0,45	1492	1,49·10 ⁶
aluminium	2700	0,009	6400	17,28·10 ⁶
kvarc	2650	0,011	5736	15,2·10 ⁶

Példa:

Egy 3 MHz-es, 50 mW/cm² intenzitású hullám terjed vérben. Mekkora a nyomás, a rezgő részecskék maximális kitérése és sebessége ebben a hullámban?

$$Z_{\text{vér}} = 1,66 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

Megoldás:

Intenzitás:

$$J = \frac{p_{\max}^2}{2Z}$$

$$p = \sqrt{2IZ} = 40,74 \text{ kPa}$$

Részecske sebessége:

$$v = \frac{p}{Z} = \frac{40,74 \cdot 10^3}{1,66 \cdot 10^6} = 0,0245 \text{ m/s} = 24,5 \text{ mm/s}$$

Kitérés:

$$A = \frac{v}{\omega} = \frac{24,5}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^6} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm} = 1,3 \text{ nm}$$

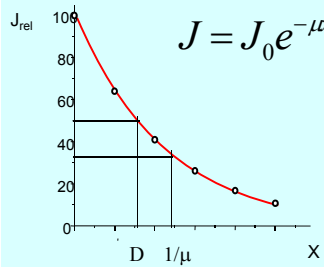
A hang/ultrahang intenzitása

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

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

Elektromos analógia

Intenzitásgyengülés terjedés közben

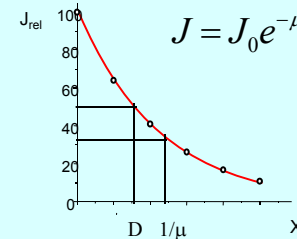


$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

csillapítás (dB) $\alpha = 10 \lg \frac{J_0}{J} \text{ dB}$

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

Intenzitásgyengülés terjedés közben



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

csillapítás (dB) $\alpha = 10 \lg \frac{J_0}{J} \text{ dB}$

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

μ a diagnosztikai frekvencia tartományban arányos a frekvenciával

$f = 1 \text{ MHz-re}$

$D_{\text{levegő}} \sim 1 \text{ cm}$

$D_{\text{víz}} \sim 1 \text{ m}$

fajlagos csillapítás

$$\frac{\alpha}{f \cdot x}$$

μ a diagnosztikai frekvencia tartományban arányos a frekvenciával

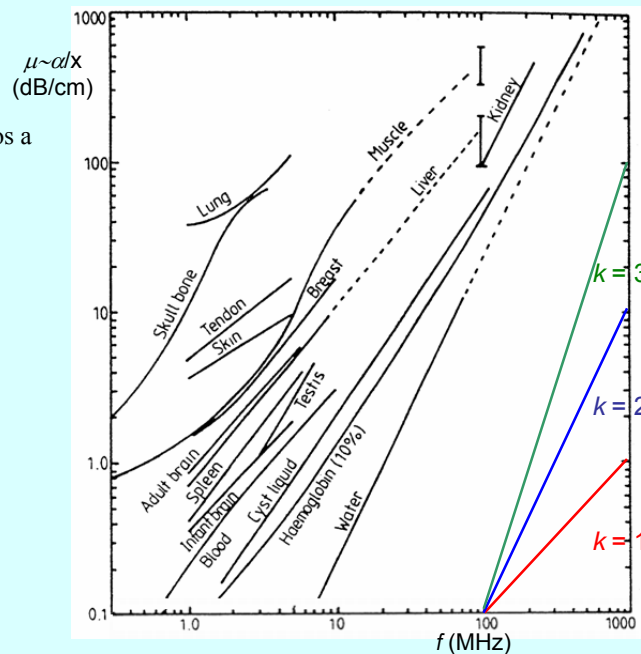
$$\mu \sim f^k, \quad k \sim 1(?)$$

$$\log \mu \sim k \log f$$

ha egyenest kapunk, akkor jó a hatványfüggvény közelítés

fajlagos csillapítás lágy szövetre:

$$\frac{\alpha}{f \cdot x} \sim 1 \frac{\text{dB}}{\text{cm MHz}}$$

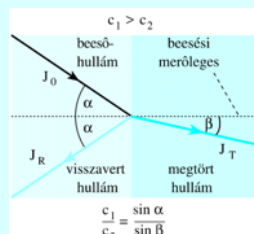


$$\frac{\alpha}{f \cdot x}$$

szövet	fajlagos csillapítás
Máj	0,6 – 0,9
Vese	0,8 – 1,0
Zsír	1,0 – 2,0
Vér	0,17 – 0,24
csont	16 – 23

A hang/ultrahang terjedése

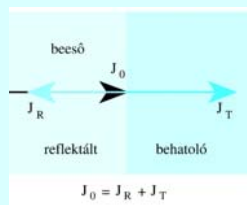
Törés



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

Snellius-Descartes

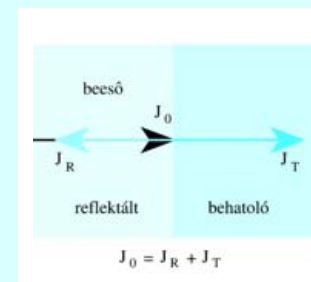
Visszaverődés



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

Az ultrahang reflexiója

Visszaverődés



$$R = \frac{J_R}{J_0}$$

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

Ha $R \approx 1 \implies$ teljes visszaverődés

Hang - ultrahang

Hallható hangok frekvenciatartománya



20 Hz – 20 kHz

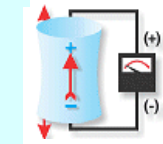
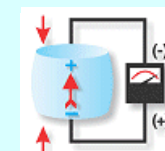
Ultrahang: $f > 20 \text{ kHz}$

Gyakorlatban: 0,8 – 15 MHz

Infrahang: $f < 20 \text{ Hz}$

Ultrahang előállítása

Piezelektromos hatás



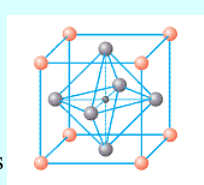
Mechanikai deformáció (nyomás) hatására

elektromos feszültség

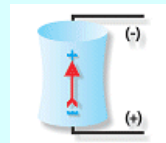
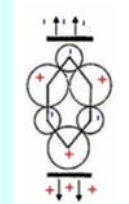
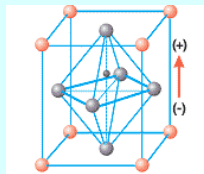
Ultrahang előállítás

Inverz piezoelektromos hatás

Piezoelektromos
kristály tipikus
szerkezet

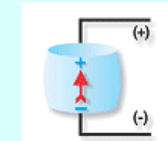
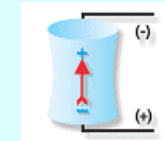


Az elektromos
potenciál- különbség
deformációt okoz



Ultrahang előállítás

Inverz piezoelektromos hatás



periodikus (szinuszos) elektromos jel

periodikus deformáció rezgés

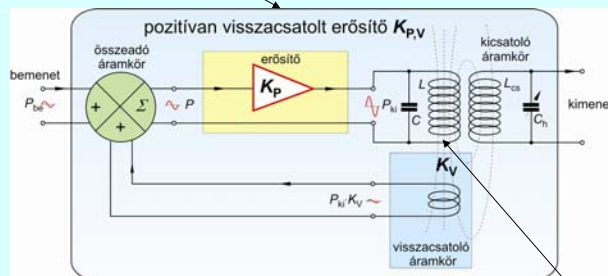
mechanikai rezgés

Elektromos jelforrás: szinuszoszcillátor

$$K_{p,v} = \frac{P_{ki}}{P_{be}} = \frac{K_p}{1 - K_p K_v}$$

erősítés= „végtelen” \Rightarrow szinuszoszcillátor
bemenő jel: nincs, kimenet: szinuszos feszültség

$$K_p K_v = 1$$

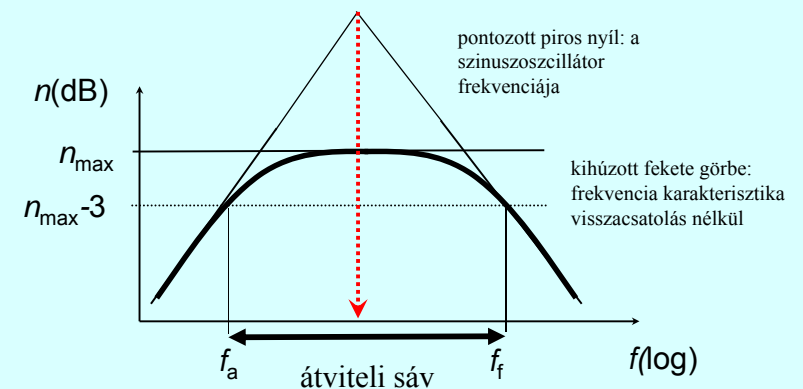


$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Elektromos jelforrás: szinuszoszcillátor

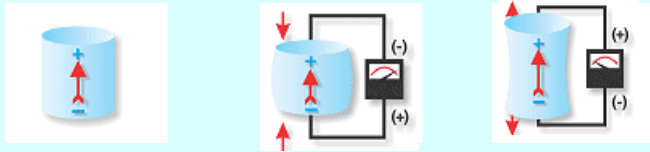
pozitív módon visszacsatolt erősítő

$$K_{p,v} = \frac{P_{ki}}{P_{be}} = \frac{K_p}{1 - K_p K_v}$$



Ultrahang detektálása

Piezelektromos hatás



Mechanikai deformáció (nyomás) hatására

elektromos feszültség

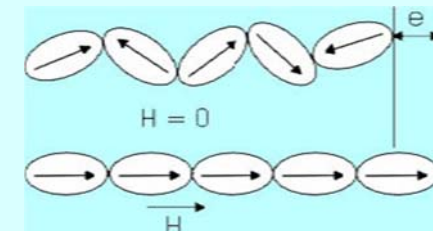
Ultrahang transzducer kettős funkciója:

Adás – elektromos jelből ultrahang (inverz piezelektromos hatás)

Vétel – ultrahangból elektromos jel (piezelektromos hatás)

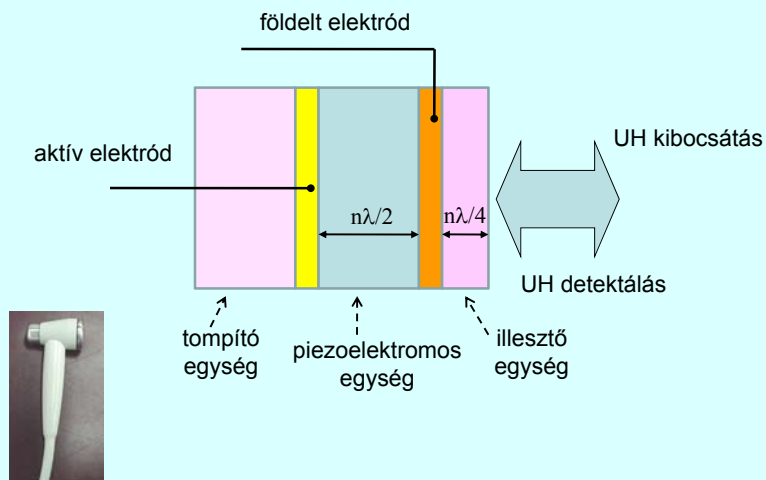
Ultrahang előállítás

Magnetostrikció



ferromágneses anyagok (pl. Co) viselkedése
mágneses térben.

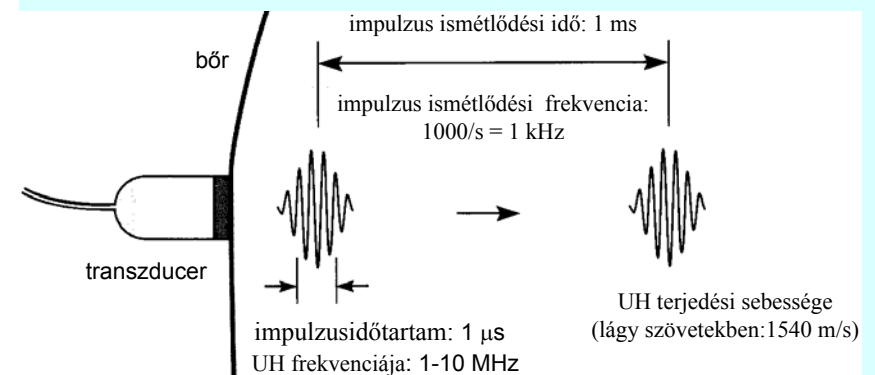
Az ultrahang-fej felépítése



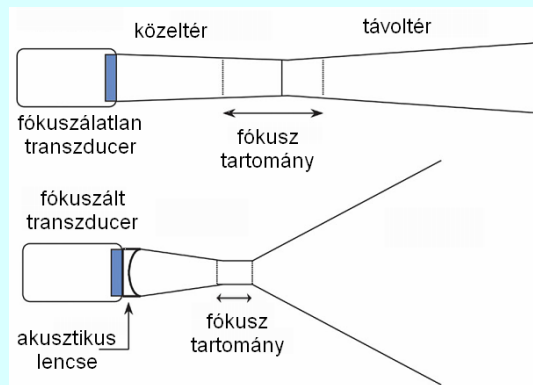
Az UH impulzusok jellemzői

transzducer: adó és vevő egyben

időbeli szétválasztás – folyamatos hullám helyett impulzusok



Fókuszálás



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

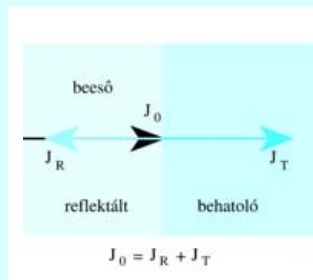
Az ultrahang orvosi alkalmazásainak alapjai

Terápia – alapja az ultrahang elnyelődése

Diagnosztika – alapja az ultrahang reflexiója

Az ultrahang reflexiója

Visszaverődés



$$R = \frac{J_R}{J_0}$$

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

Ha $R \approx 1 \implies$ teljes visszaverődés

Az ultrahang reflexiója

anyag	ρ [kg/m ³]	κ [1/GPa]	c [m/s]	Z [kg/(m ² ·s)]
levegő	1,3	7650	331	0,00043·10 ⁶
tüdő	400	5,92	650	0,26·10 ⁶
zsír	925	0,51	1470	1,42·10 ⁶
lágyszövet	1060	0,40	1540	1,63·10 ⁶
szemlencse	1140	0,34	1620	1,84·10 ⁶
csontvelő	970	0,36	1700	1,65·10 ⁶
csont, porózus	1380	0,08	3000	2,2 – 2,9·10 ⁶
csont, tömör	1700	0,05	3600	6,12·10 ⁶

Ha $R \approx 1 \implies$ teljes visszaverődés

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

Az ultrahang reflexiója

anyag	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z (kg/m ² s)
pulpa	1570	1000	$1,6 \cdot 10^6$
dentin	3800	2000	$7,6 \cdot 10^6$
zománc	6250	3000	$18,8 \cdot 10^6$
Al	6300	2700	$17 \cdot 10^6$
boroszilikát	5300	3570	$18,9 \cdot 10^6$
amalgám	4350	7750	$33,7 \cdot 10^6$

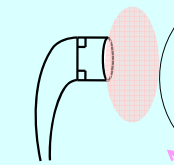
határfelület	R
zománc/dentin	0,18
dentin/pulpa	0,43
amalgám/dentin	0,40

Az ultrahang reflexiója

anyag	ρ [kg/m ³]	κ [1/GPa]	c [m/s]	Z [kg/(m ² ·s)]	határfelület	R
levegő	1,3	7650	331	$0,00043 \cdot 10^6$	izom/vér	0,0009
tüdő	400	5,92	650	$0,26 \cdot 10^6$	zsír/máj	0,006
zsír	925	0,51	1470	$1,42 \cdot 10^6$	zsír/izom	0,01
lágyszövet	1060	0,40	1540	$1,63 \cdot 10^6$	csont/izom	0,41
szemlencse	1140	0,34	1620	$1,84 \cdot 10^6$	csont/zsír	0,48
csontvelő	970	0,36	1700	$1,65 \cdot 10^6$	lágyszövet/levegő	0,99
csont, porózus	1380	0,08	3000	$2,2 - 2,9 \cdot 10^6$		
csont, tömör	1700	0,05	3600	$6,12 \cdot 10^6$		



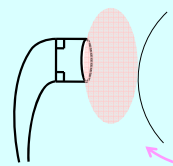
Ha $R \approx 1 \Rightarrow$ teljes visszaverődés



csatoló közeg szükséges

Az ultrahang reflexiója

Ha $R \approx 1 \Rightarrow$ teljes visszaverődés

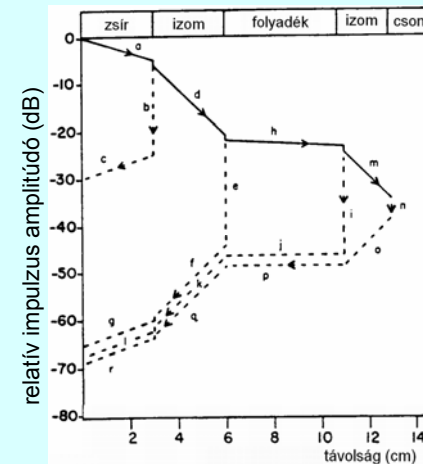


csatoló közeg szükséges

Optimális csatolás:

$$Z_{csat} = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

$$Z_{csatológél} \sim 6,5 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$



Abszorpció és reflexió

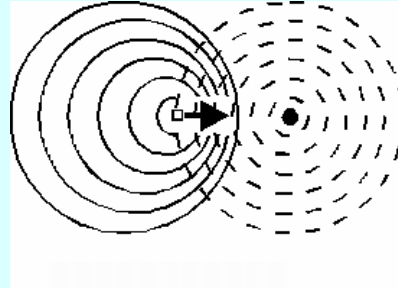
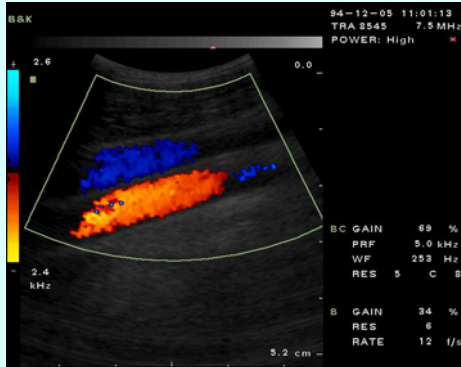
minél később/ minél mélyebbről
érkezik vissza a reflexió, annál
gyengébb a reflektált intenzitás
visszaverődési idő függő erősítés

TGC: time gain compensation

DGC: depth gain control

határfelület	R	10lgR (dB)	T	10lgT (dB)
zsír/izom	0.01	-20.0	0.990	-0.044
izom/vér	0.001	-30.0	0.999	-0.004
izom/cson	0.41	-3.9	0.590	-2.291

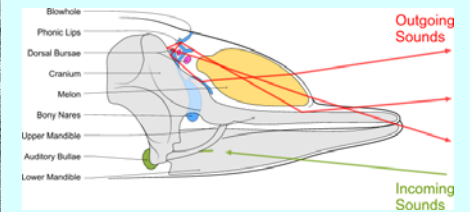
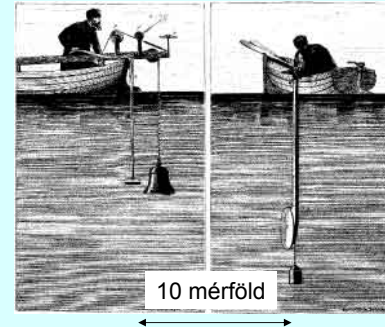
Az ultrahangos képalkotás, A-, B- és M-képek. Doppler-echo



Echo elv

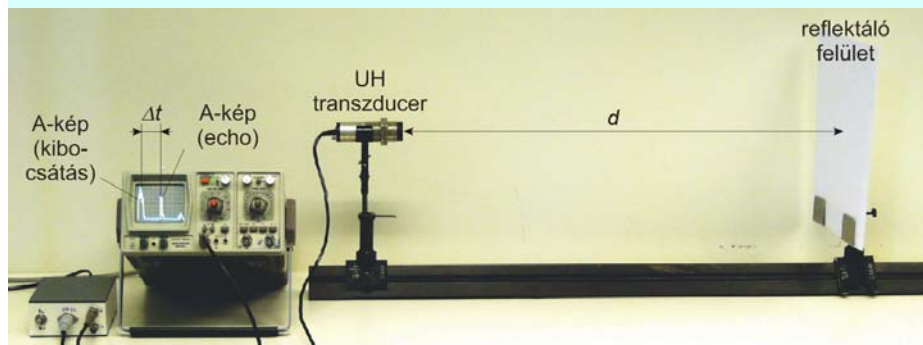
1794 - Spallanzani:
denevérek tájékozódása

1822 - Colladen megméri a
hang terjedési sebességét



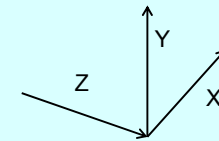
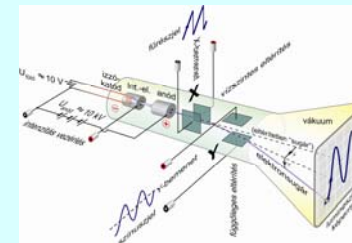
palackorrú delfin

Echo elv - képalkotás



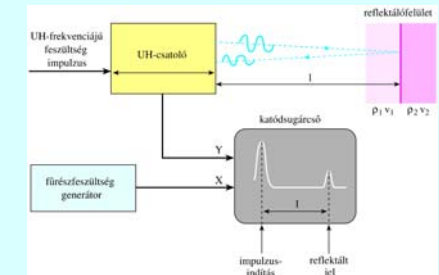
$$c\Delta t = d + d = 2d$$

speciális transzducerből levegőbe is kicsatolható az UH
intenzitás egy része

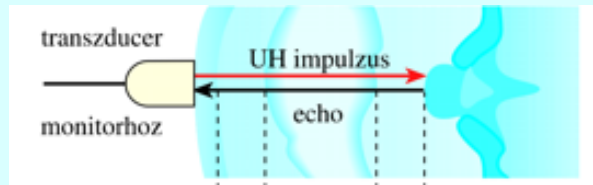


Eltérítés /
szabályozás A-kép

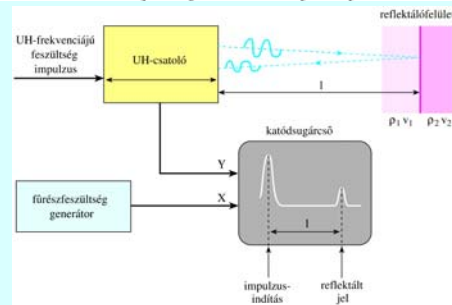
- | | |
|---|-----------------------------|
| X | Idő (→ axiális
távolság) |
| Y | Amplitúdó (→ I_{ref}) |
| Z | (Fényesség) |



A-kép - Amplitúdó

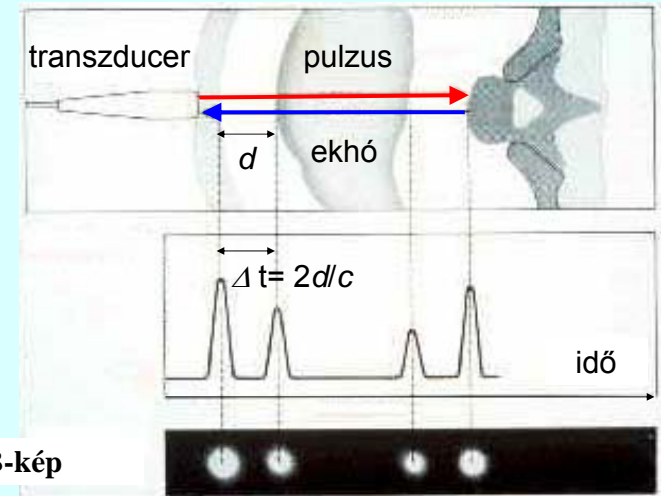


csak egydimenziós lehet



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

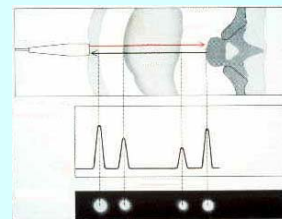
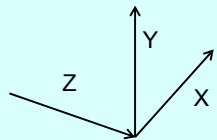
B-kép - Brightness=fényesség



A-kép

egydimenziós B-kép

vő. Tkv. VIII.33. ábra



Eltérítés /
szabályozás

A-kép

egydimenziós B-kép

X

Idő (\rightarrow axiális
távolság)

Idő (\rightarrow axiális
távolság)

Y

Amplitúdó ($\rightarrow I_{\text{refl}}$)

-

Z

(Fényesség)

Fényesség ($\rightarrow I_{\text{refl}}$)

A hét kérdése

Mi a szerepe a csatoló közegeknek (pl. csatoló gél) az
UH diagnosztikában?

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

II. 2.4.

VIII. 4.2.