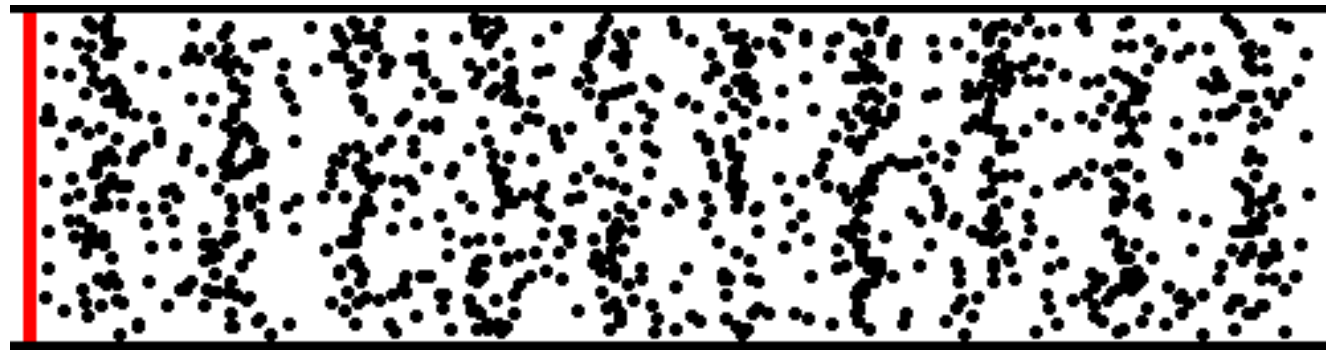
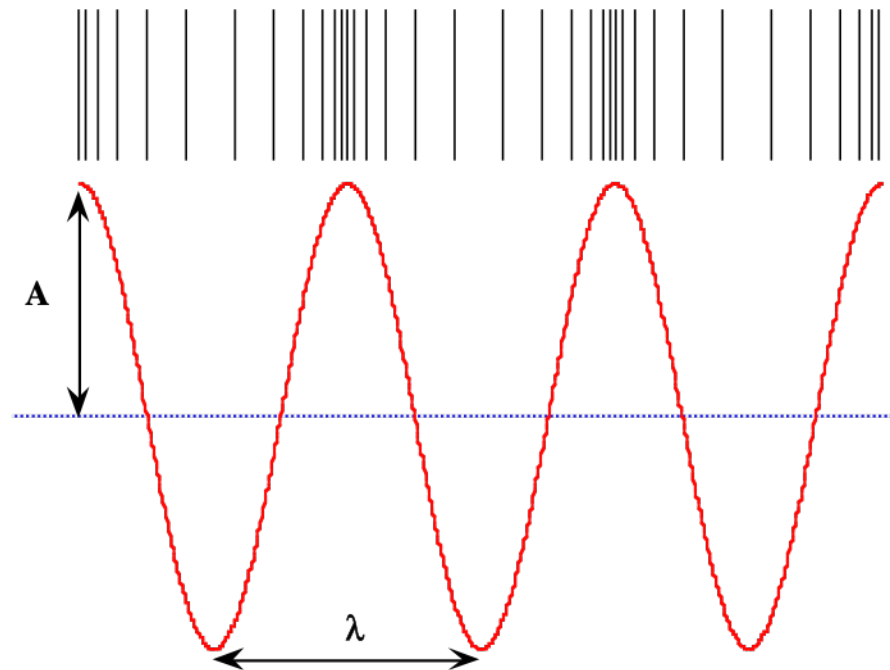


HANG, ULTRAHANG

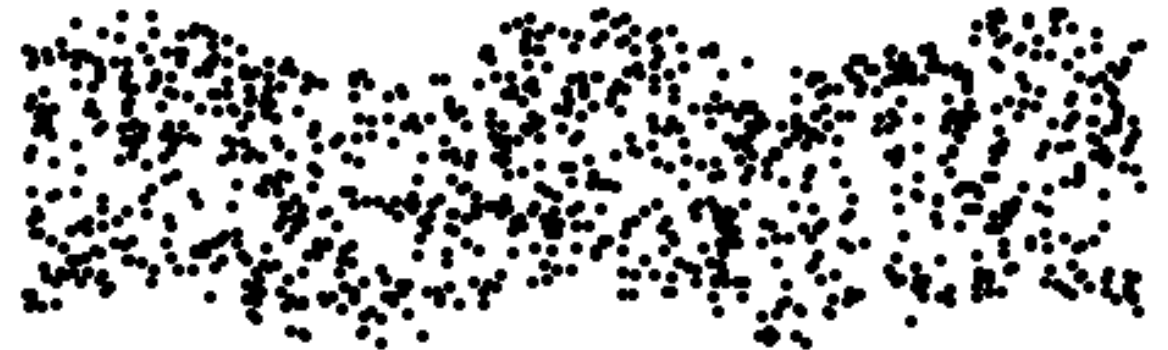
KELLERMAYER MIKLÓS

HANG

Longitudinális
mechanikai hullám
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám

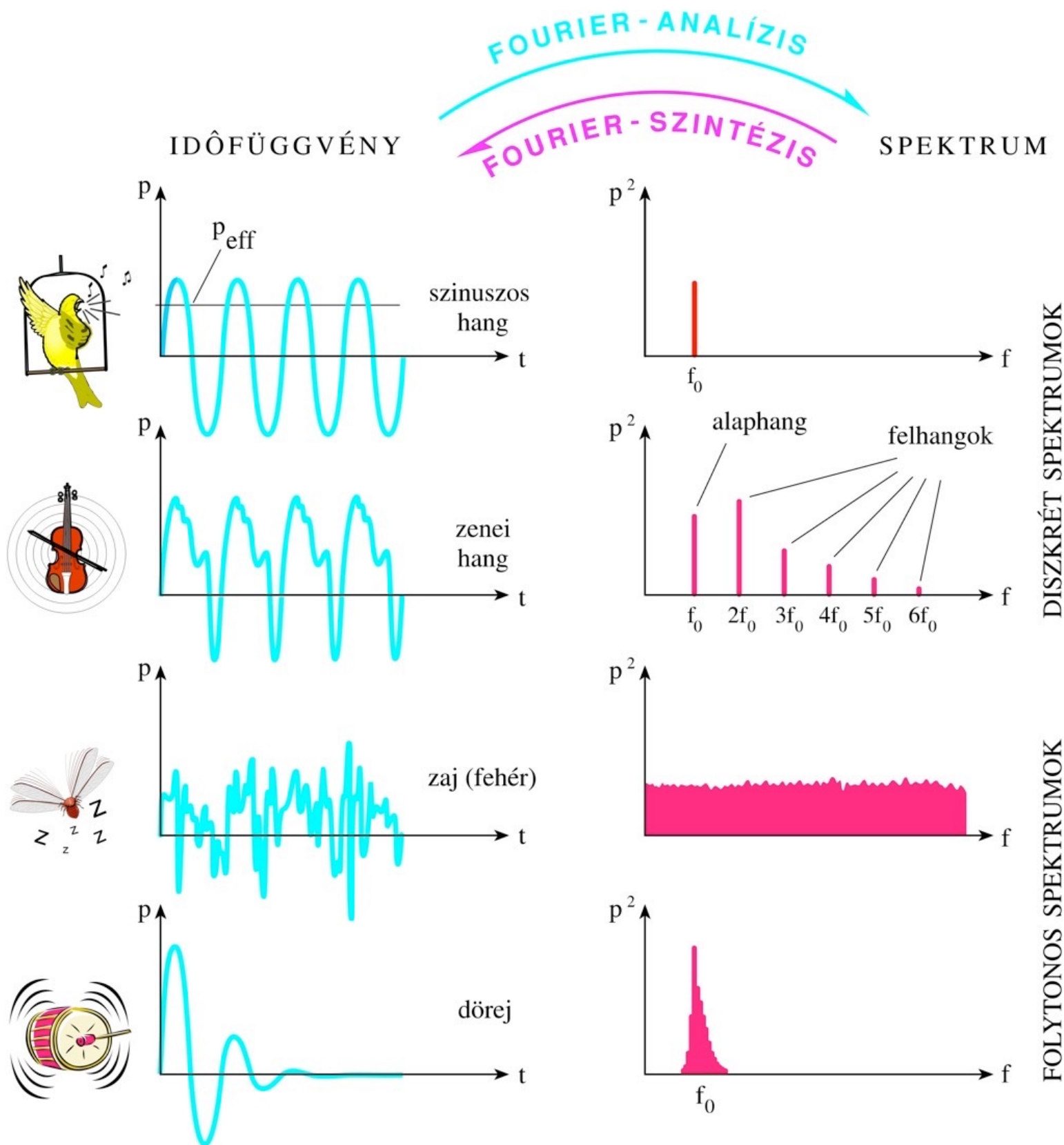


Tranzverzális hullám

Harmonikus rezgés: $y(t) = A \sin(ft + \varphi)$

y =aktuális nyomás; t =idő
 f =frekvencia (Hz); A =amplitudó
 φ =fáziseltolódás

HANGOK ÉS SPEKTRUMAIK



Fourier-tétel:
bármely függvény felbontható
egy szinuszos alapfüggvény
és felharmonikusai összegére

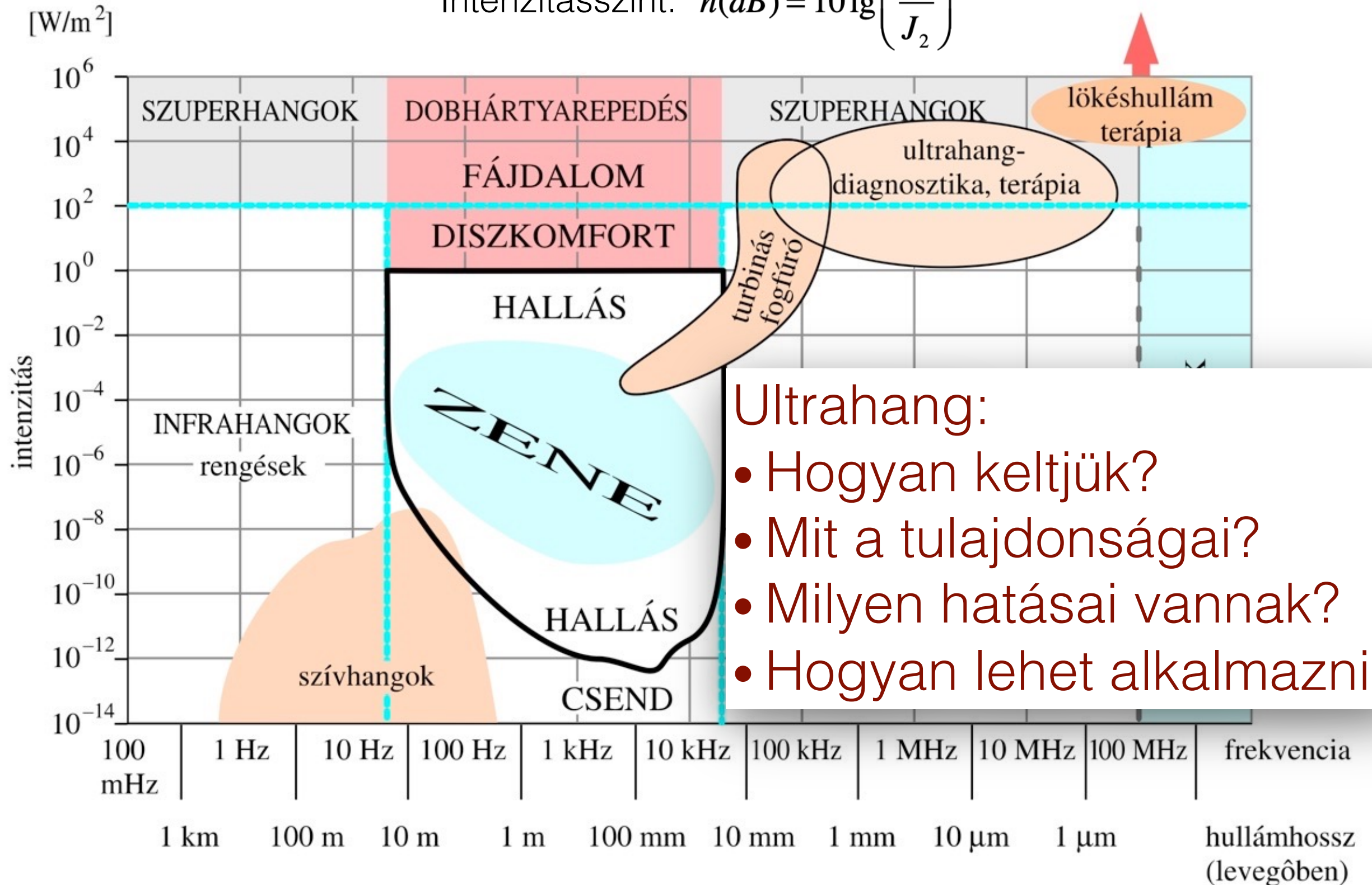
A Fourier analízis
lépései:



Oktáv - 2:1
arányú
frekvenciaköz

HANGOK FREKVENCIÁJA ÉS INTENZITÁSA

Intenzitásszint: $n(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{J_1}{J_2} \right)$



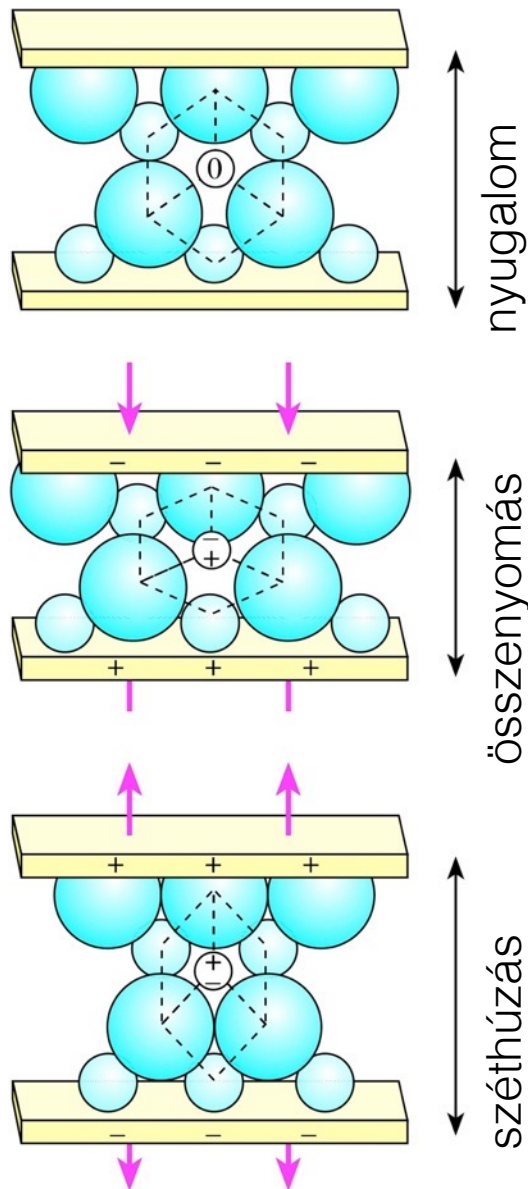
Ultrahang:

- Hogyan keltjük?
- Mit a tulajdonságai?
- Milyen hatásai vannak?
- Hogyan lehet alkalmazni?

ULTRAHANG KELTÉSE ÉS DETEKTÁLÁSA:

PIEZOELEKTROMOS HATÁSSAL

Piezoelektromosság (Pierre és Jacques Curie, 1880): "nyomás elektromosság"



Elektromos polarizáció mechanikai deformáció hatására. Alapja: + és - töltések súlypontjai térben szétválnak.

1. Direkt piezoelektromos hatás: elektromos polarizáció (P), amely bizonyos kristályokban mechanikai deformáció hatására lép fel:

$$P = d \times \frac{F}{A}$$

d =piezoelektromos együttható (m/V)
 F/A =feszültség

Alkalmazás: ultrahang detektálása, piezoelektromos gázgyújtó



Akár kV-os feszültség

2. Inverz piezoelektromos hatás: elektromos tér hatására fellépő alakváltozás, deformáció:

$$\frac{\Delta l}{l} = E \times d$$

$\Delta l/l$ =megnyúlás
 E =elektromos tér
 d =piezoelektromos együttható

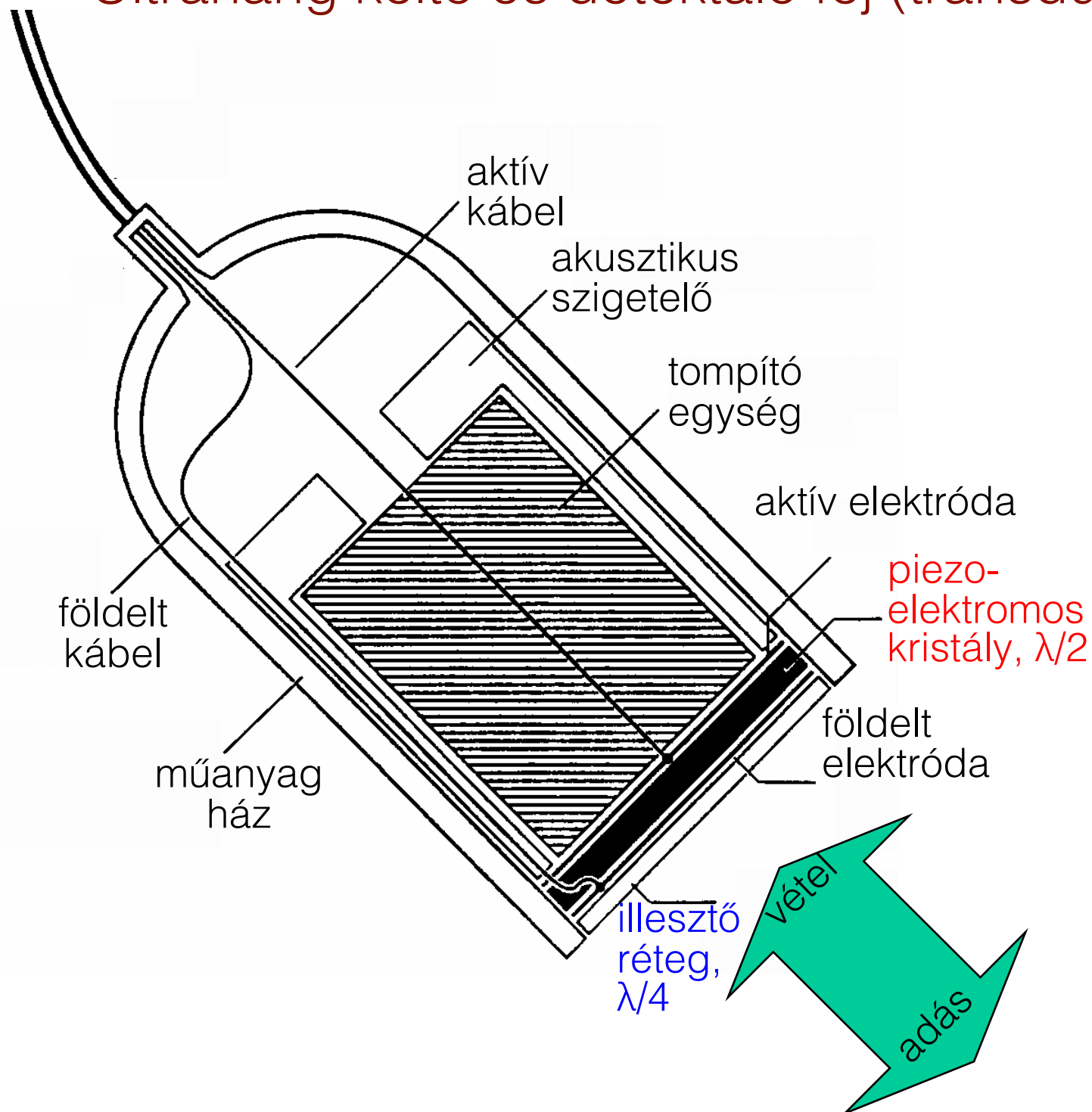
Alkalmazás: ultrahang keltése

Rezonancia: a váltófeszültség frekvenciája megegyezik a kristály saját frekvenciájával. Típusos ultrahang frekvencia >1 MHz.

Gyakran használt piezoelektromos kristályok: kvarc ($d=3 \times 10^{-12}$ m/V), ammónium-dihidrogén foszfát, ólom-cirkónium-titanát (PZT), stb.

AZ ULTRAHANG TRANSZDUCER

Ultrahang keltő és detektáló fej (transducere ~ átvinni, átalakítani)



Alkalmazás függvényében változatos alakú és szerkezetű UH transzducerek.

AZ ULTRAHANG TULAJDONSÁGAI:

TERJEDÉS

Feltétel: rugalmas közeg!

Terjedési sebesség (S , v , c):

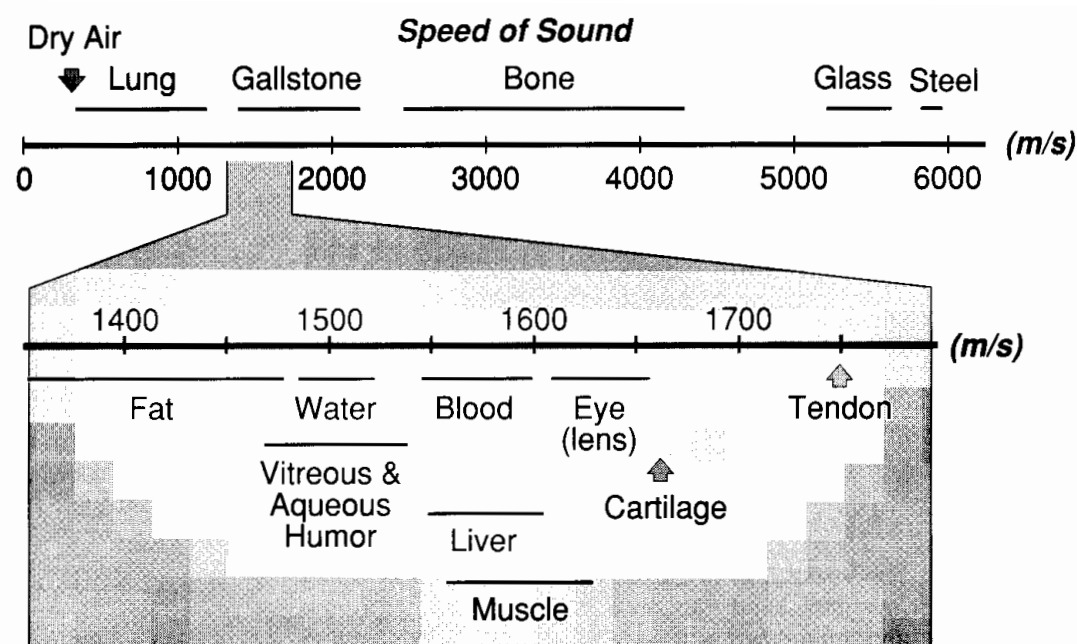
$$S = f\lambda = \frac{\lambda}{T}$$

Gázokban és folyadékokban kizárólag longitudinális hullámként, szilárd közegben tranzverzális hullámként is terjedhet.

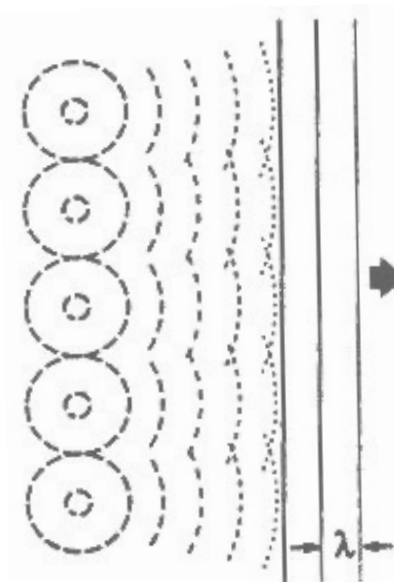
A sebesség a közeg tulajdonságaitól függ:

$$S = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa\rho}}$$

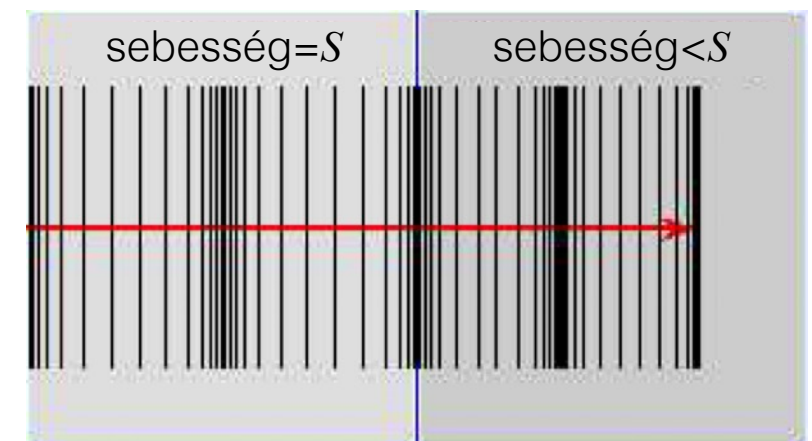
Y = Young-féle modulus
 ρ = a közeg sűrűsége
 κ = a közeg összenyomhatósága (kompresszibilitás)



Ultraszhang terjedési sebessége különböző közegekben



Hullámfront kialakulása: Huygens-elv alapján



Terjedés során a frekvencia nem változik. Csökkent sebesség esetén a hullámhossz csökken.

AZ ULTRAHANG TULAJDONSÁGAI:

ATTENUÁCIÓ

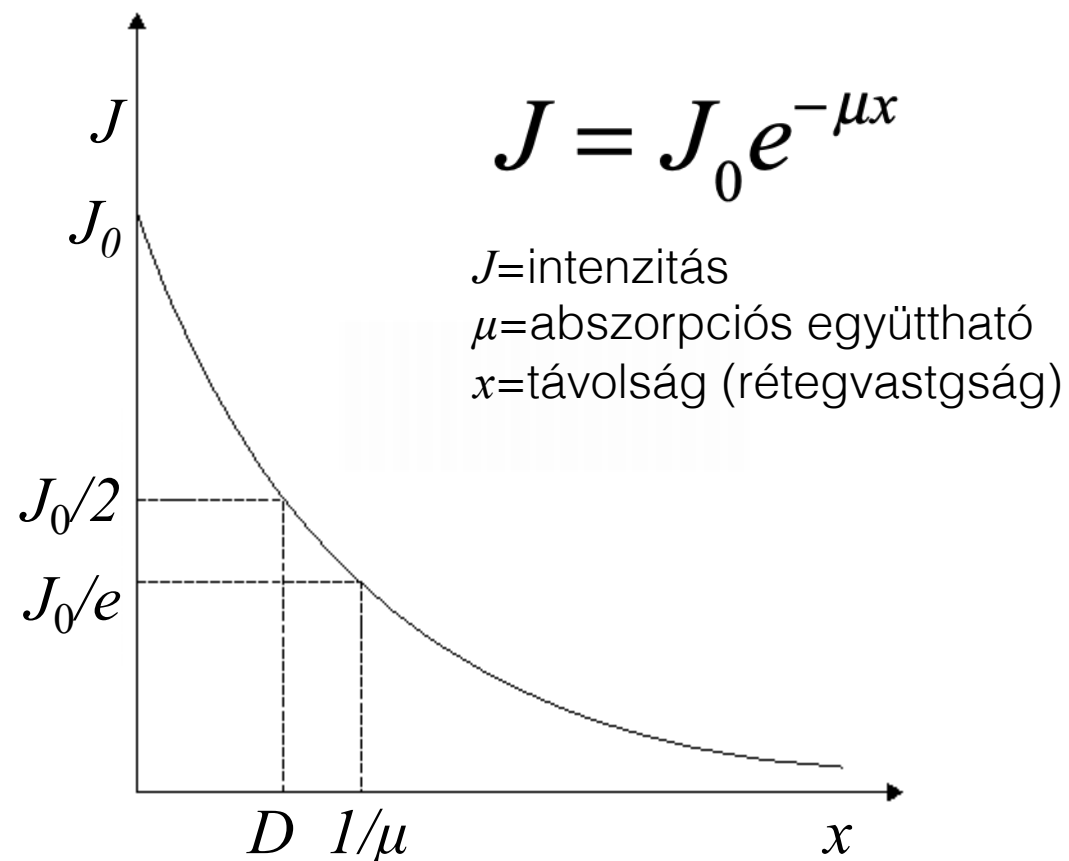
Attenuáció: Intenzitás csökkenése, “gyengülés”

1. $1/r^2$ törvény ("inverz négyzetes törvény"): az intenzitás a távolság négyzetével fordított arányban csökken (a hangteljesítmény gömbfelületen oszlik el).

2. Abszorpció:

Mechanizmus: a. inkoherens molekuláris mozgások (hő), b. közeg viszkozitása

A frekvenciával nő.



Anyag	D ($f=1$ MHz)
Levegő	~ 1 cm
Víz	néhány m

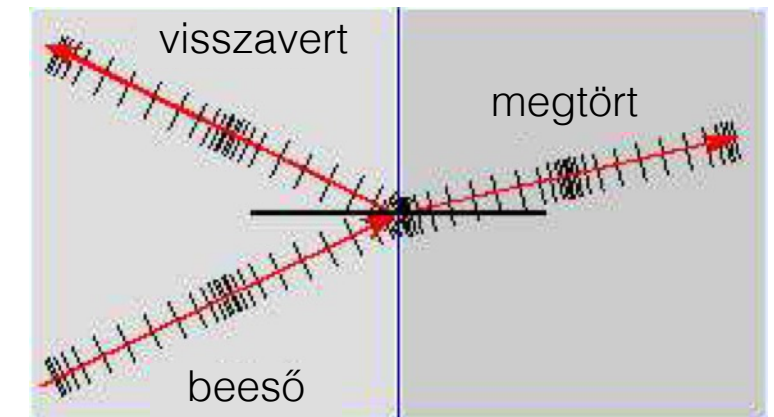
AZ ULTRAHANG TULAJDONSÁGAI:

REFRAKCIÓ ÉS REFLEXIÓ

Refrakció

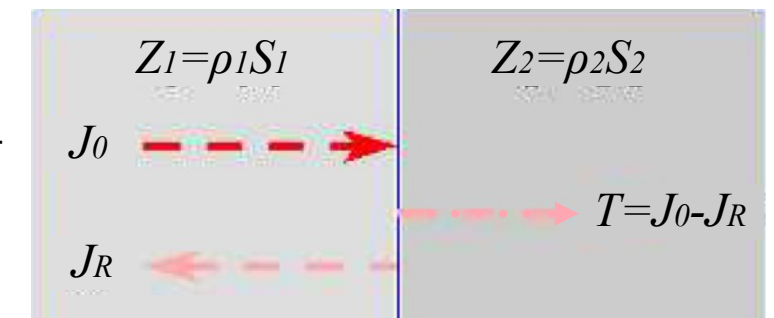
Törés olyan közegek határán, amelyekben a terjedési sebesség különbözik. A refrakció nő a beesési szöggel. Snellius-Descartes törvény:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{S_1}{S_2}$$



Reflexió

Az akusztikus energia egy része visszaverődik olyan közegek határáról, amelyek akusztikus impedanciái eltérnek. A visszavert energia nő az akusztikus impedancia-különbséggel. Bizonyos közeghatárokon teljes visszaverődés léphet fel.



Reflektivitás (reflexiók együttható):

$$R = \frac{J_R}{J_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad Z = \rho S$$

Z = akusztikus impedancia (rayl)
 ρ = sűrűség
 S = terjedési sebesség

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

“Teljes” visszaverődés:
 $Z_1 \ll Z_2, R \approx 1$

Optimális csatolás:

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



AZ ULTRAHANG TULAJDONSÁGAI:

DOPPLER-EFFEKTUS

Mozgó hangforrás esetében az érzékelt frekvencia megváltozik:

- közeledő hangforrás esetében: érzékelt frekvencia nő.
- távolodó hangforrás esetében: érzékelt frekvencia csökken.

Frekvencia eltolódás: Doppler-féle eltolódás (Doppler shift)

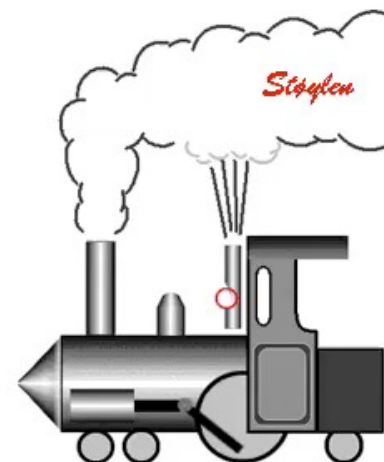


Christian Andreas Doppler
(1803 - 1853)

A Doppler eltolódás mértéke:

$$f_o = f_s \frac{S + v_o}{S - v_s}$$

f_o : érzékelt frekvencia
 f_s : forrás frekvenciája
 S : hang terjedési sebessége
 v_o : a megfigyelő sebessége
 v_s : a hangforrás sebessége



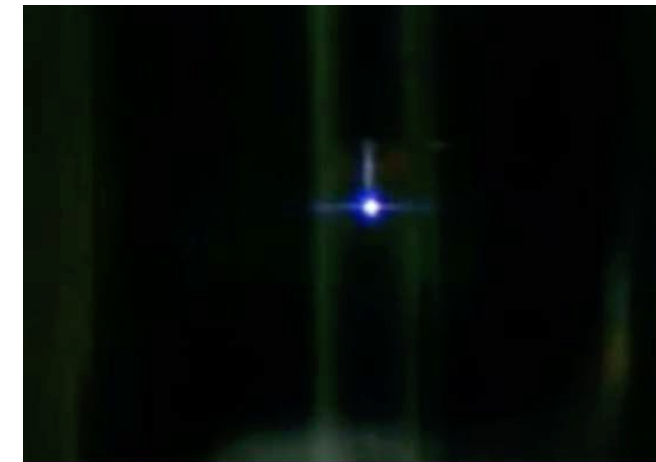
AZ ULTRAHANG HATÁSAI

Primer hatások

1. Kavitáció:(üregképződés; cavum = üreg) molekulák közötti kohéziós erők leküzdésekor keletkező, rövid élettartamú üregek.

Szonolumineszcencia: az üreg összeesése során fellépő fényemiszió. Mechanizmusa:

- hanghullám nyomáscsökkenéssel járó fázisában (expanzív fázis) buborékképződés (5-70 μm).
- a nyomásnövekedés fázisában (kompresszív fázis) a buborék zsugorodik.
- a buborék belső hőmérséklete a 20.000-30.000 °K-t is elérheti.
- a buborékban maradt, gerjesztett nemesgázok (Ar, Xe) fényt emittálnak.



Világító buborék ultrahanggal besugárzott folyadékban (több MHz)

2. Hangsugárnyomás: a hullám terjedése útjában álló akadályra (pl. víz-levegő határfelület) ható, a hangintenzitással egyenesen arányos nyomás.

3. Abszorpció: a közeg általi energia-elnyelés, mely a közeg felmelegedéséhez vezet (távolsággal és frekvenciával nő).

Szekunder hatások

1. Mechanikai: közegben levő részecskék együttrezgése révén (diszperzió, tisztítás...)
2. Kémiai: abszorpció -> gerjesztés kémiai folyamatokat indukálhat (oxidáció, pl. jód kiválása KI oldatból).
3. Biológiai: komplex - baktericid, fungicid, virucid, stb.

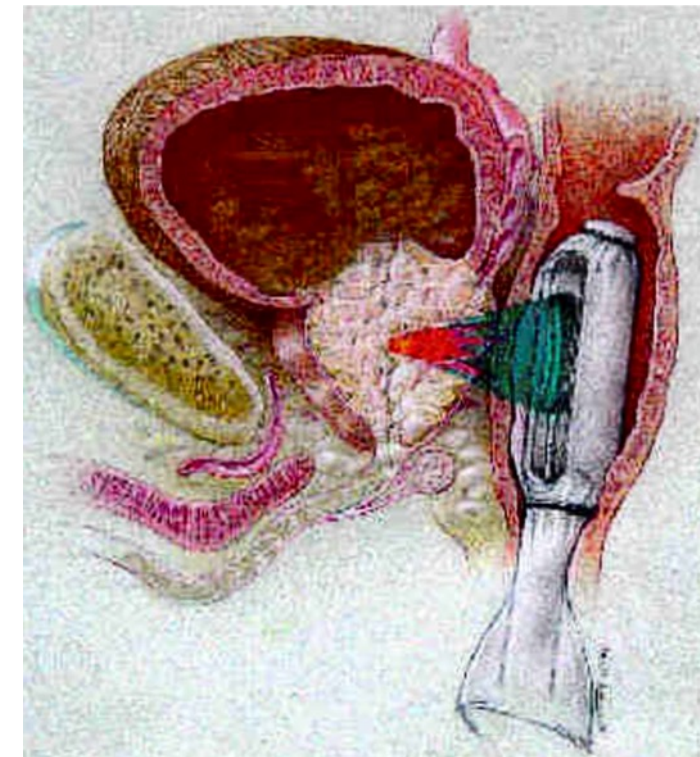
A ULTRAHANG TERÁPIÁS ALKALMAZÁSAI

Az ultrahang terápiás hatásai elsősorban a fizikai hatásaira épülnek.

1. Lokális melegítés

2. Mikromassázs

3. High Intensity Focused Ultrasound (HIFU):
Prosztata tumor összeűzése

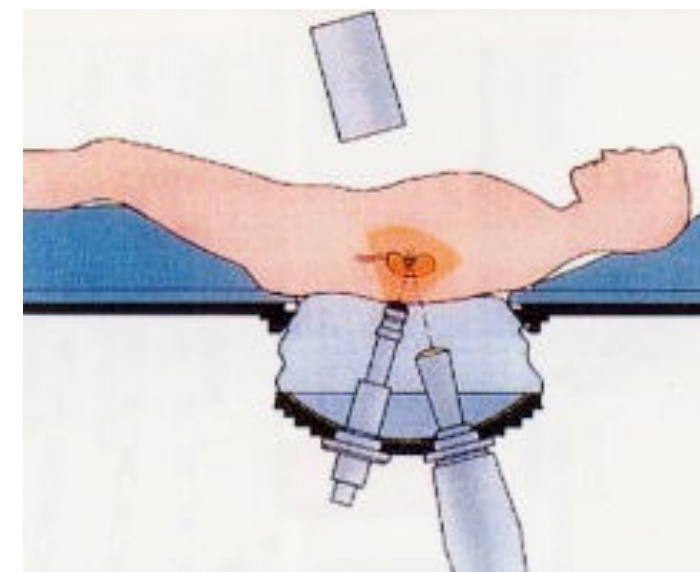


HIFU

Lökéshullám terápia (nem UH!)

ESWL (Extracorporeal Shockwave Lithotripsy) Vesekőzúzás

4. Fizikoterápia

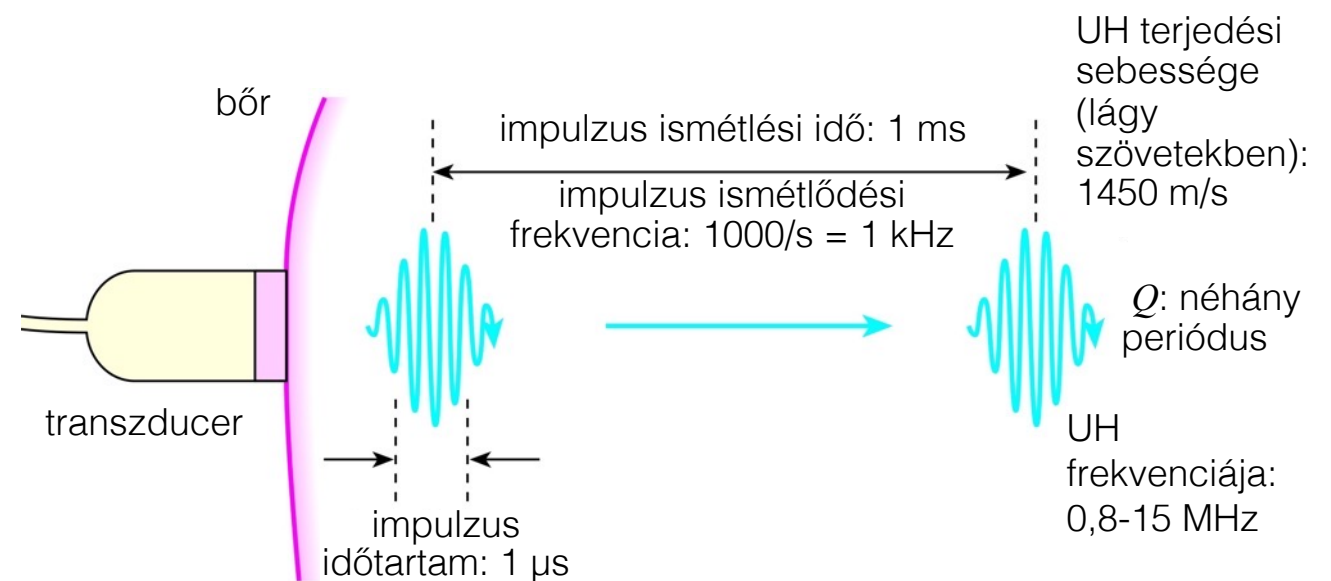
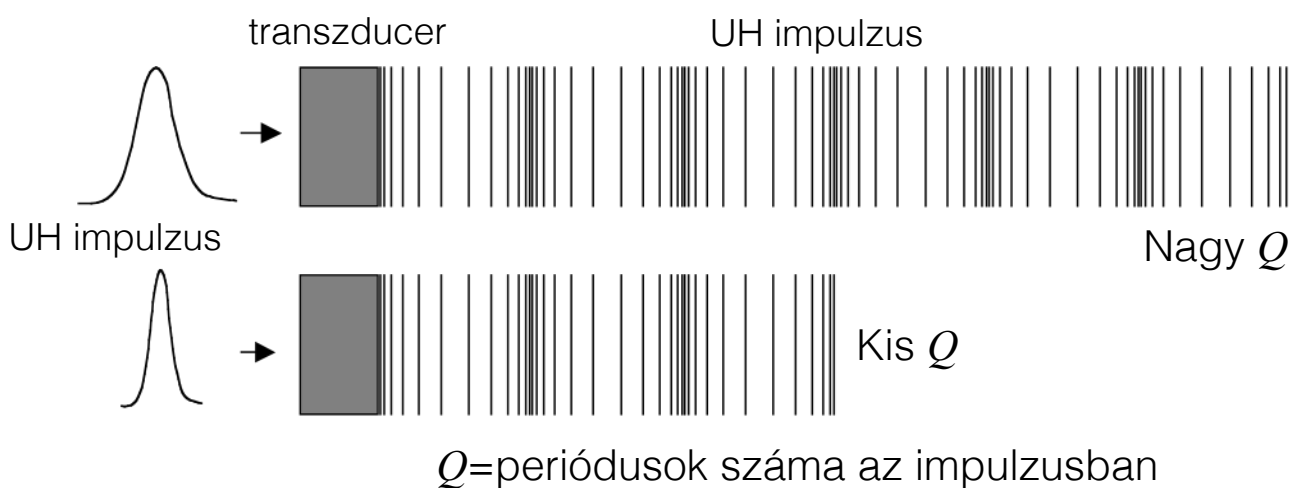


ESWL

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

Képalkotó eljárás. Alapja a szövetek, határfelületek differenciális abszorpciója és reflexiója (a szövetek különböző akusztikus impedanciája).

1. Impulzus-visszhang elv



2. Távolságmérés ultrahanggal

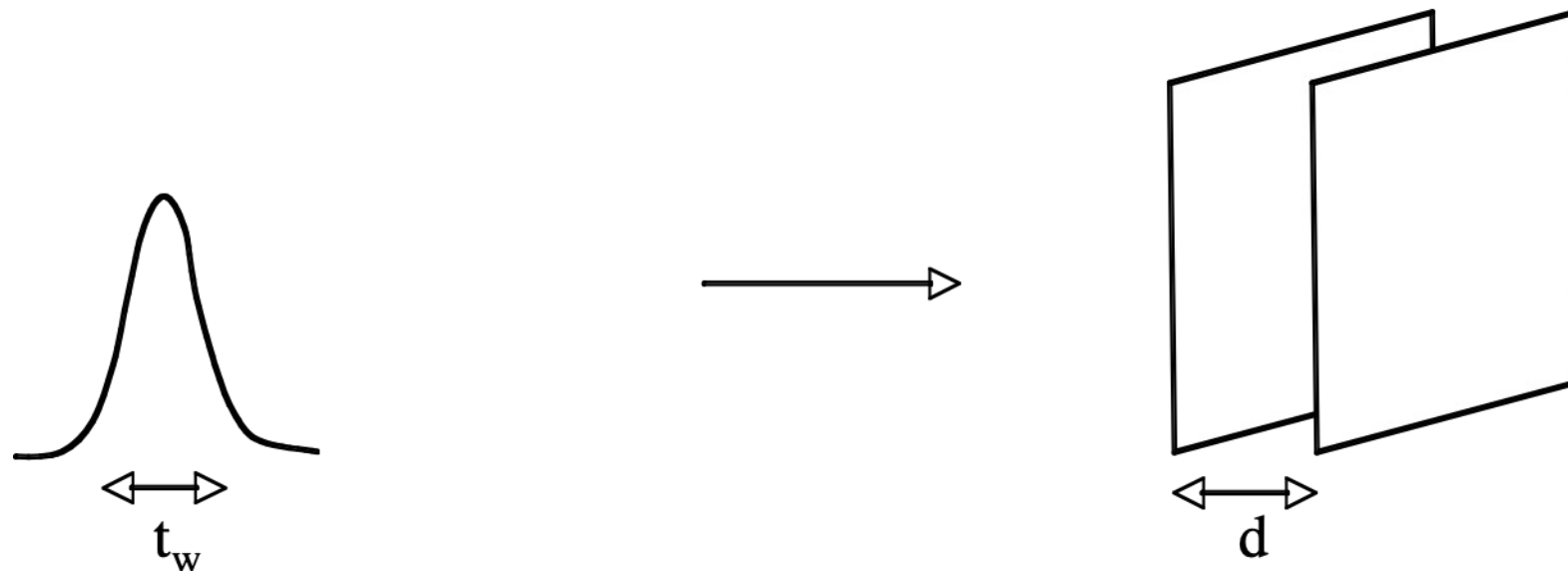


Távolság:
$$D = \frac{ST}{2}$$

D =transzducer és visszaverő felület közötti távolság
 S =UH terjedési sebessége a közegben
 T =impulzus emissziója és visszaérkezése között eltelt idő

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

3. Axiális (tengelyirányú) felbontás



A d axiális távolság felbontásának feltétele: $St_w < 2d$

Adott frekvencia esetében az axiális feloldás javul Q csökkenésével.
Adott Q esetében az axiális feloldás javul a frekvencia növelésével.

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

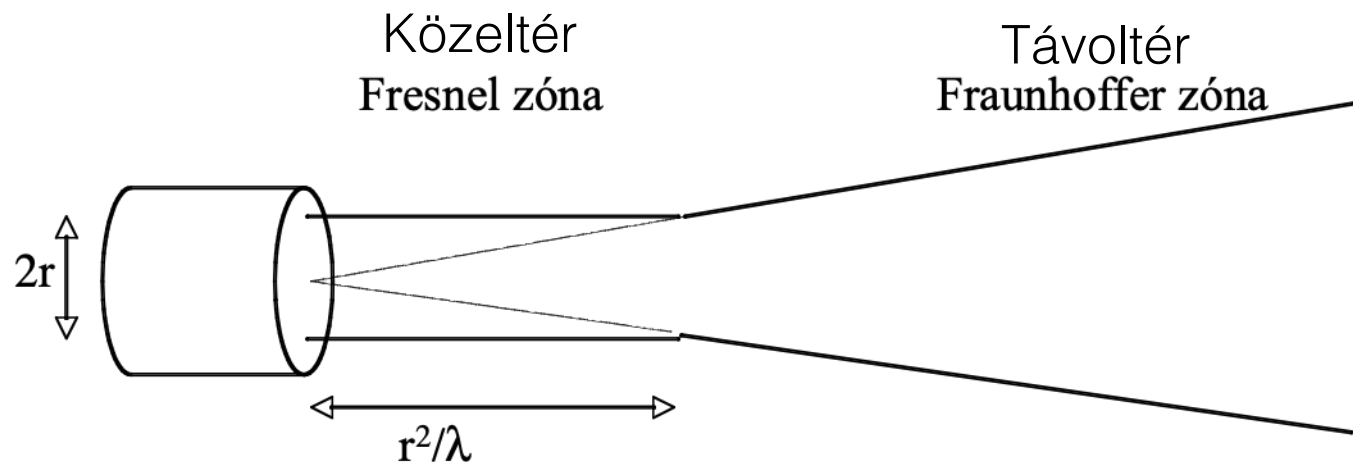
4. Idő-erősítés kompenzáció

Az intenzitás a távolsággal csökken (attenuáció).

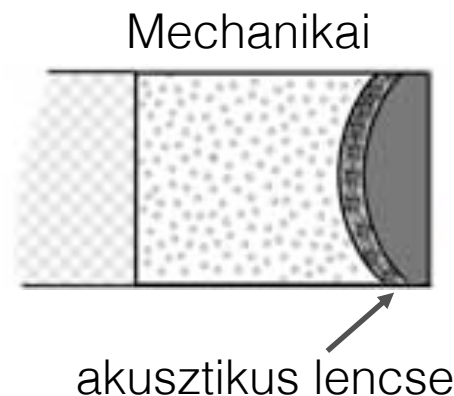
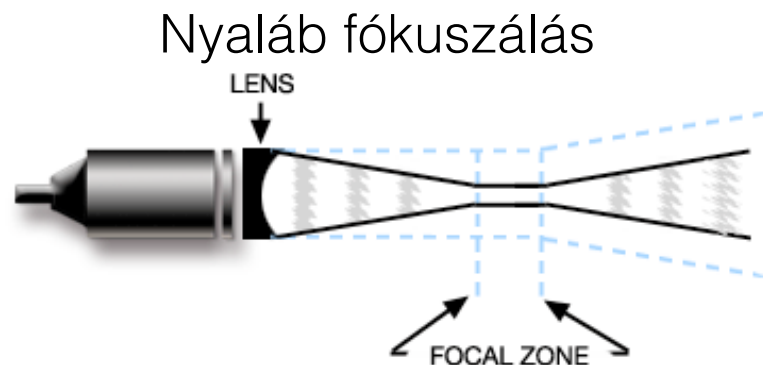
Az akusztikus attenuáció részlegesen kompenzálható a detektált jel felerősítésével.

Az ultrahang impulzus után az erősítés az eltelt idő függvényében nő.

5. Az ultrahang nyaláb



A frekvencia növelésével a Fresnel zóna hosszabbodik, a divergencia csökken: a nyaláb jobban fókuszálható.



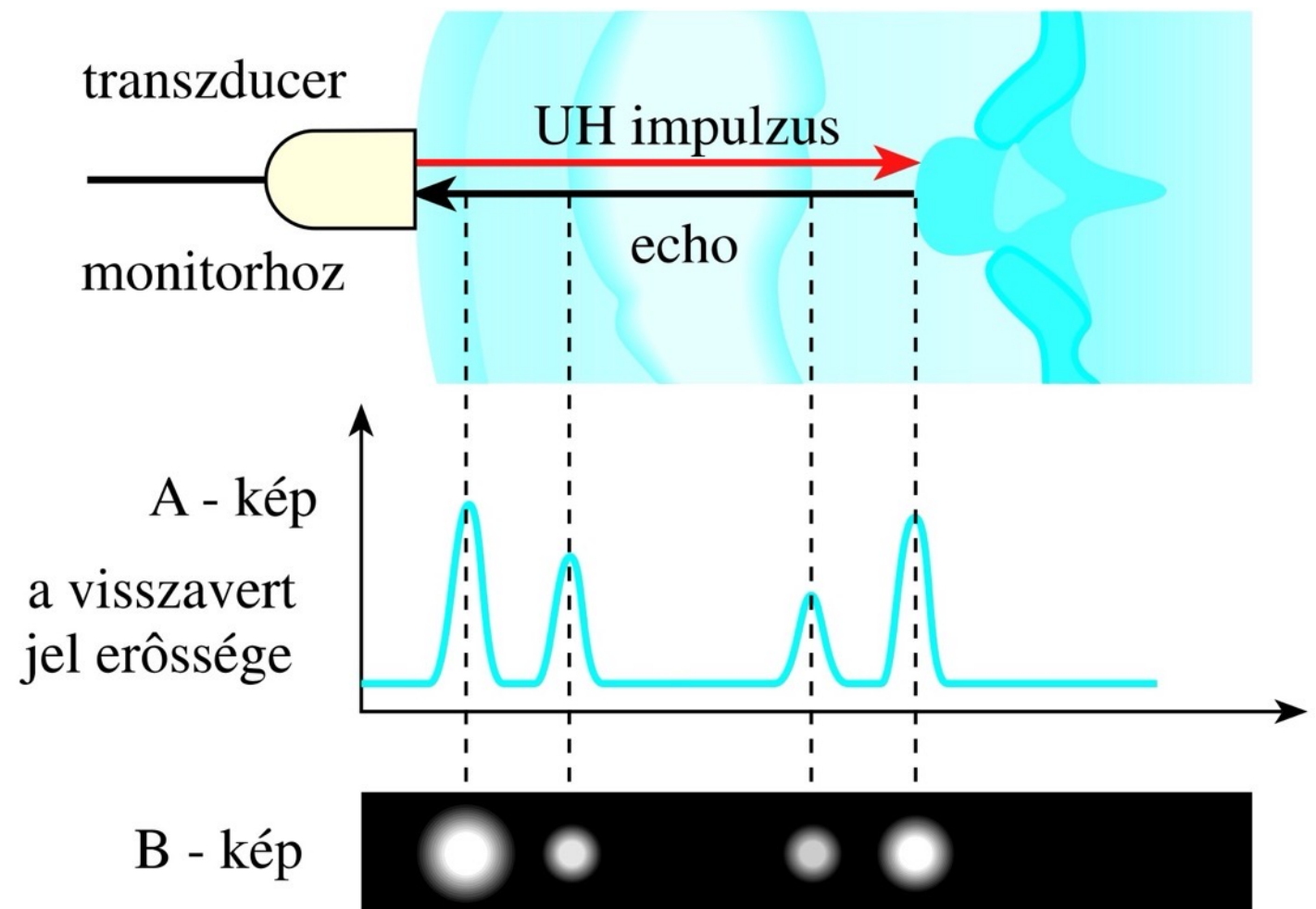
AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

6. Ultrahang képalkotó üzemmódok:

A-mód (Amplitúdó-modulált):

Egyetlen transzducer, egy vonalban terjedő UH nyaláb.

A visszhangot mint feszültségimpulzust jelenítjük meg oscilloszkópon:



B-mód (Brightness):

A feszültség impulzusokat szürke pontokként jelenítjük meg.

A szürke intenzitás a feszültséggel arányos.
Nagyobb az amplitudó, világosabb a pont.

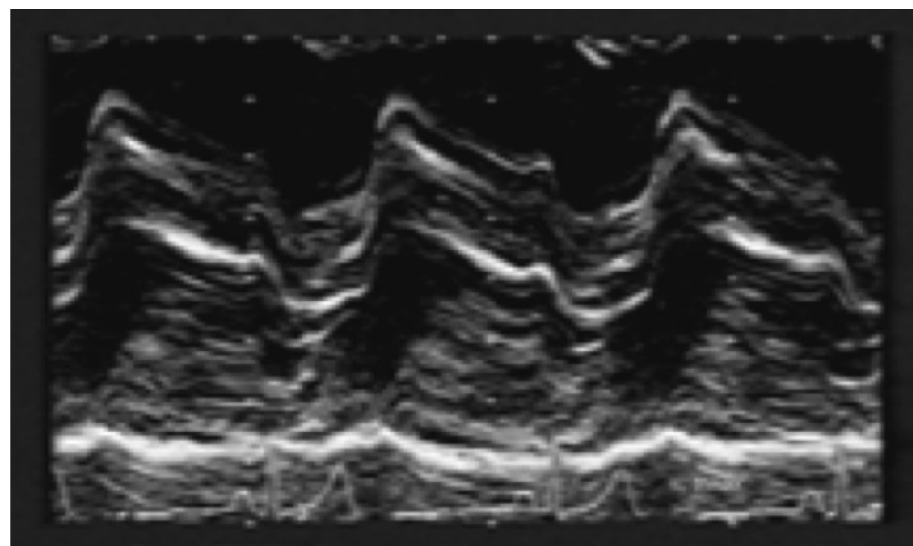
AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

M-mód (time Motion)

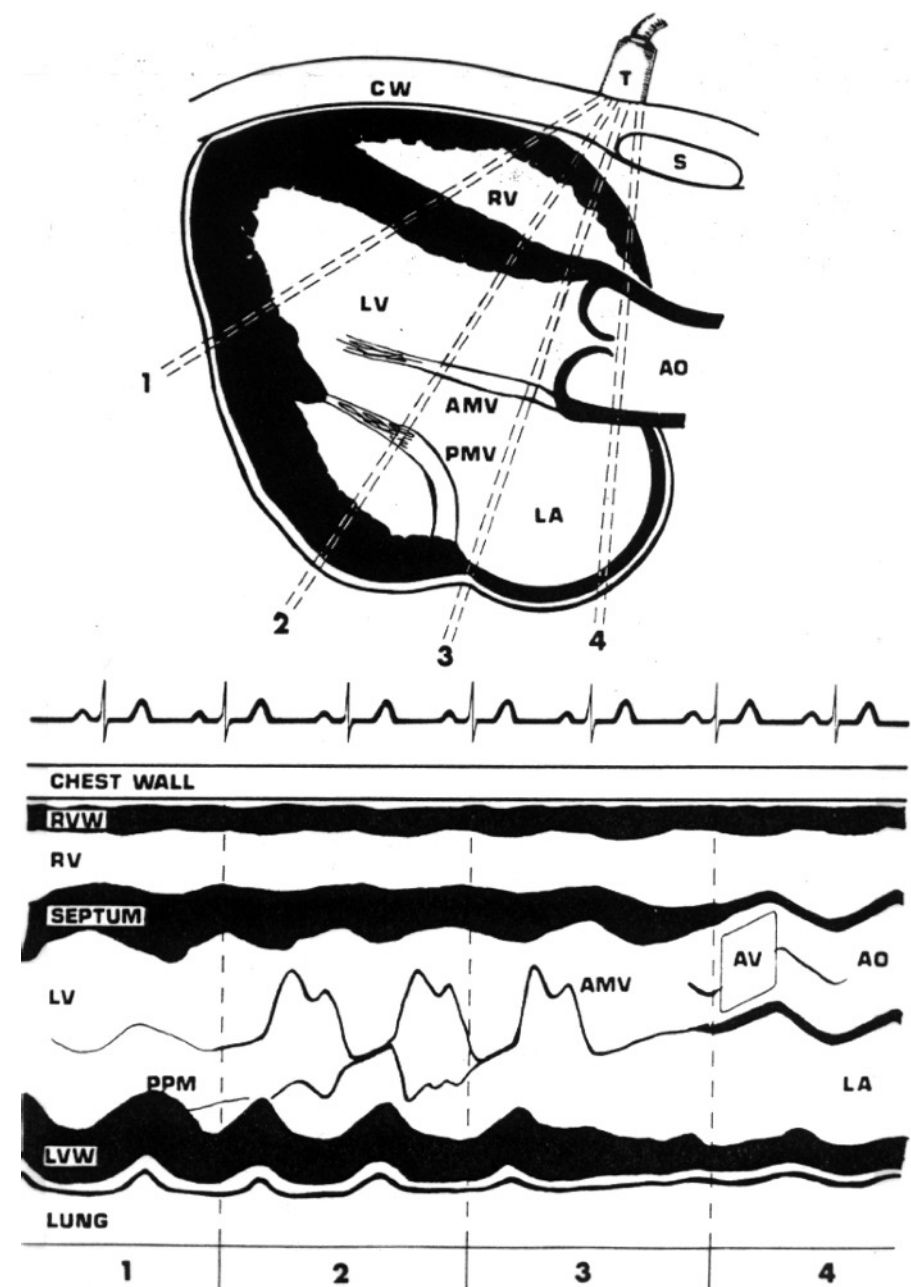
Periódikus mozgás időbeliségének
ábrázolása (pl. echokardiográfia)

X-tengelyen: idő

Y-tengelyen: 1D B-módú kép
(vonal)

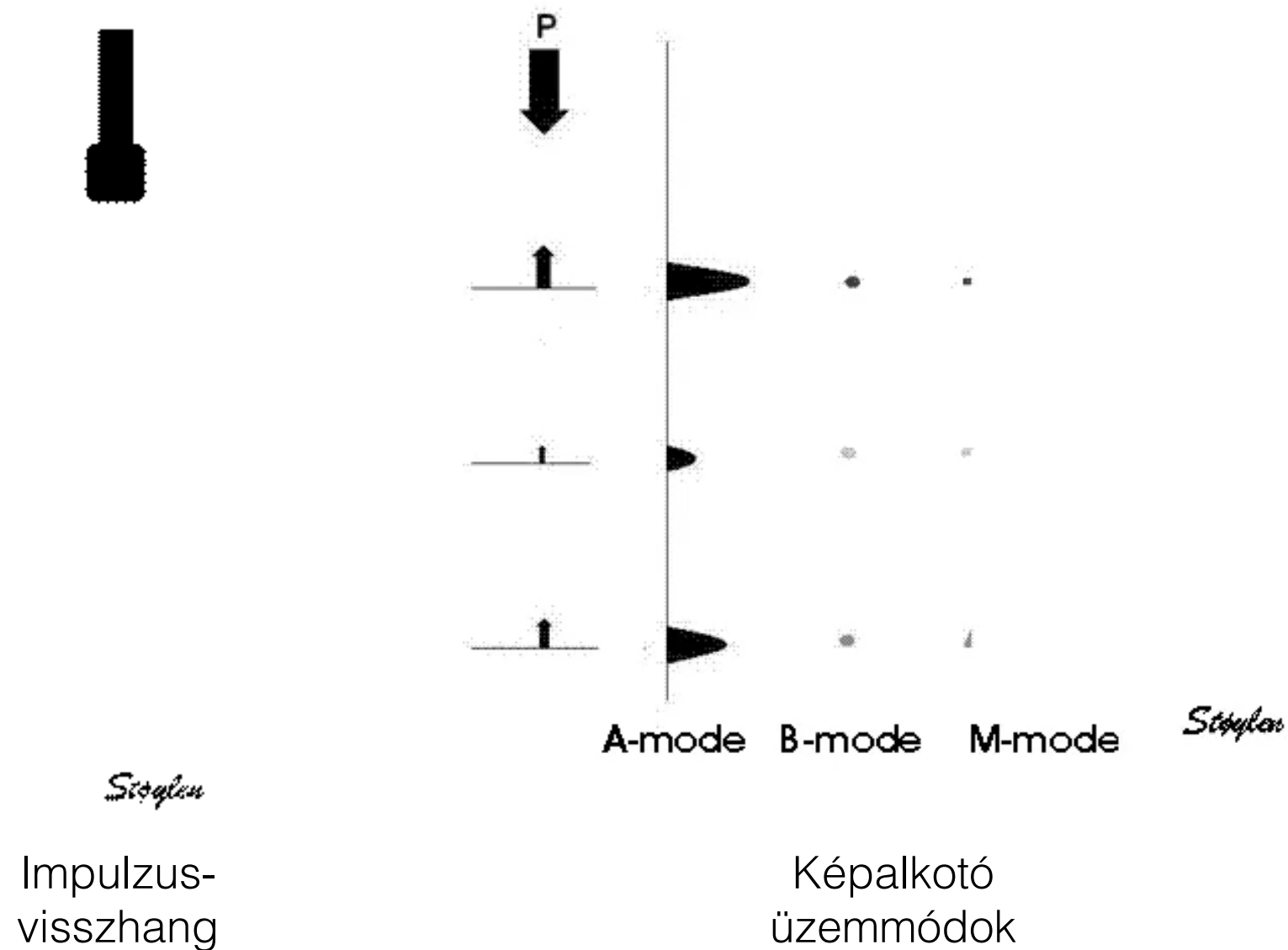


Mitral stenosis



AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

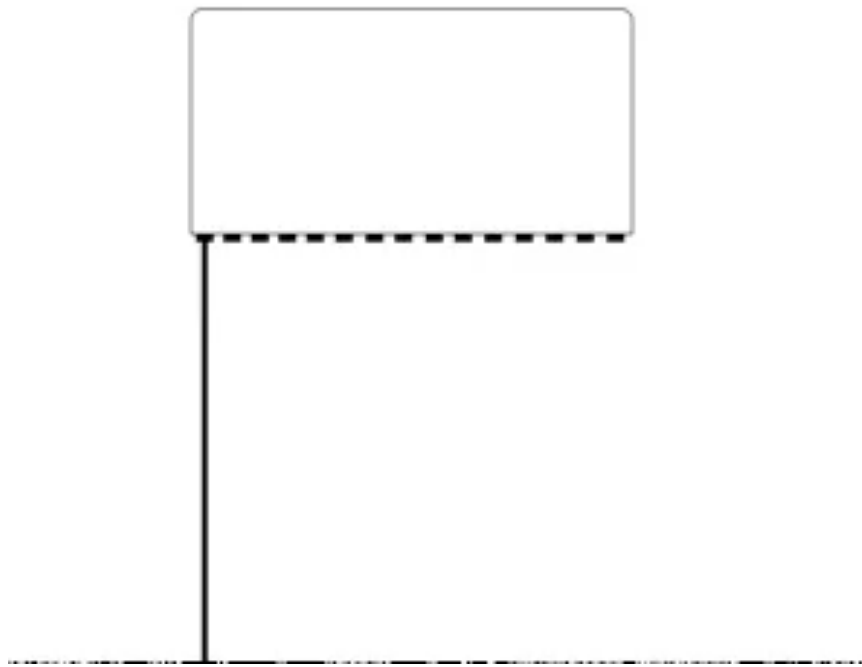
Egy-dimenziós képalkotó üzemmódok: Összehasonlítás



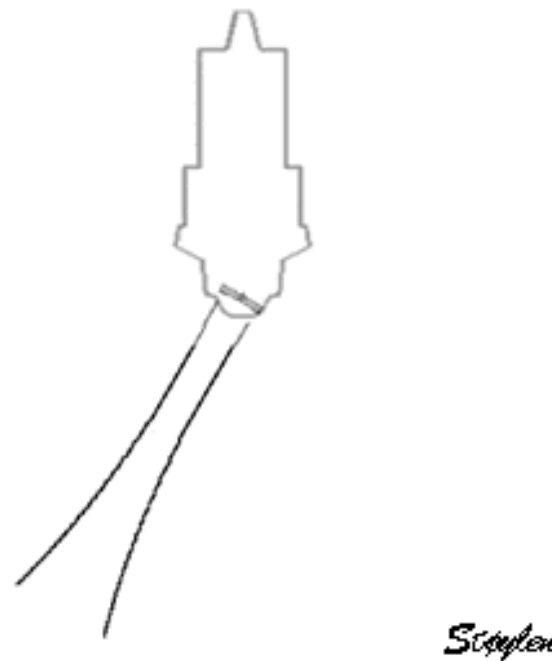
AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

2-dimenziós B-mód (Brightness)

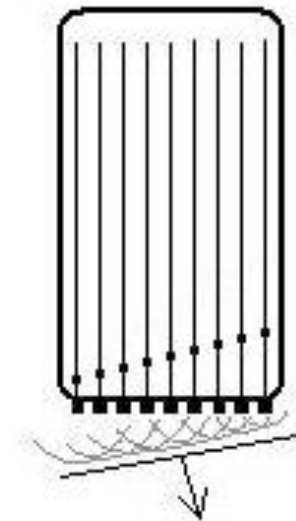
Két-dimenziós sík pásztázása történik.



“Linear array”
(vonalba rendezett apró piezo
kristályok százai)



Mechanikai pásztázás
(egyetlen piezo kristály
vonalmonti pásztázása)

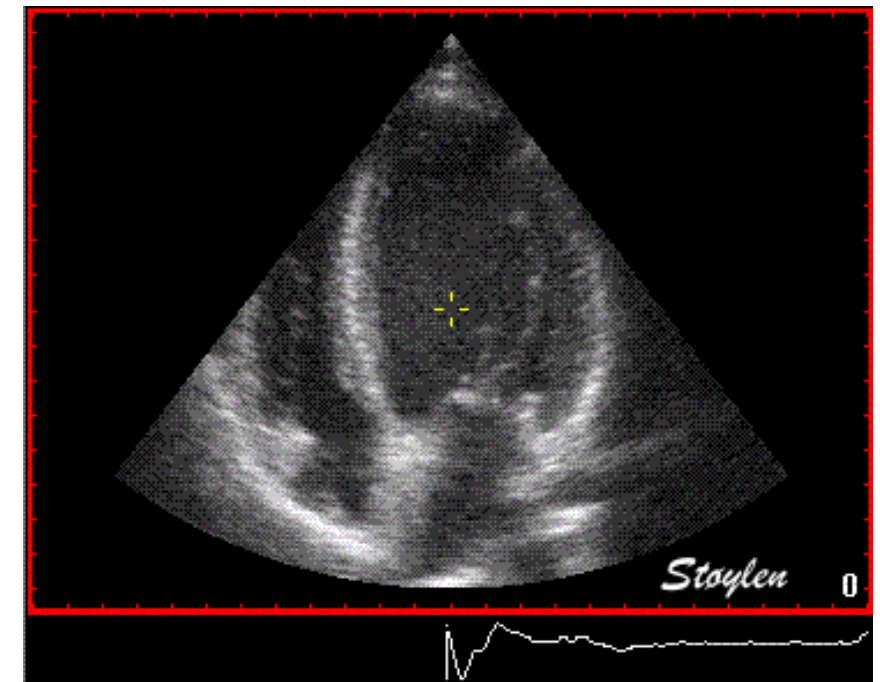
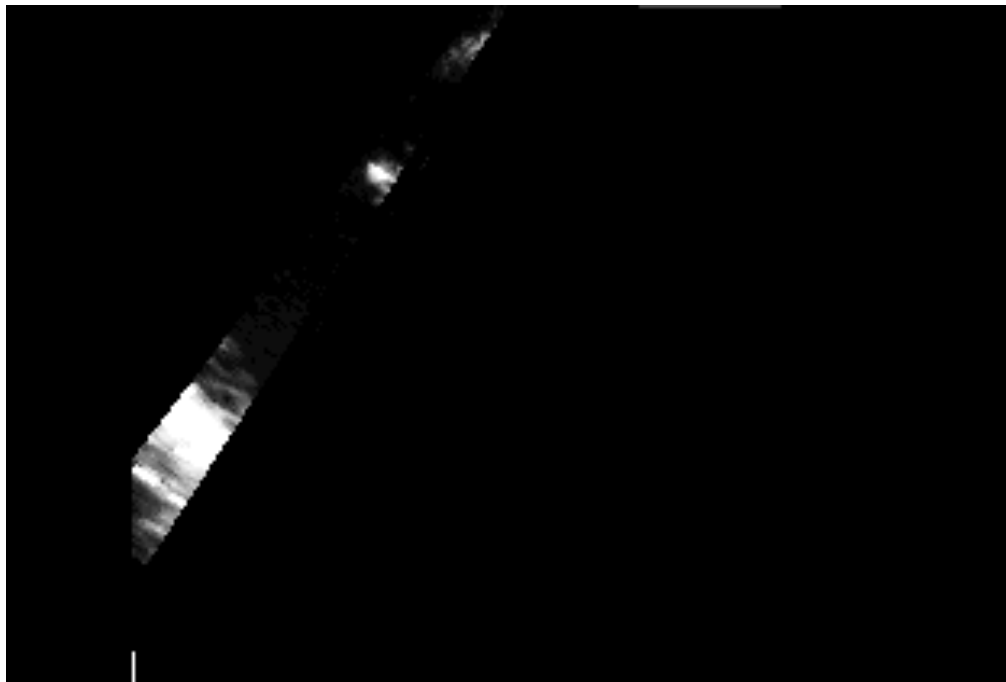


Elektronikus pásztázás
(fázis array)

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

2-dimenziós B-mód (Brightness)

Gyors pásztázással valós idejű képek rögzítése lehetséges.



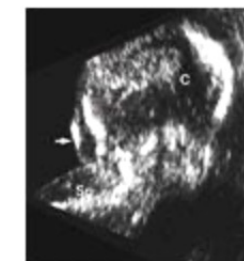
AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

A 2D B mód alkalmazása szülészetben

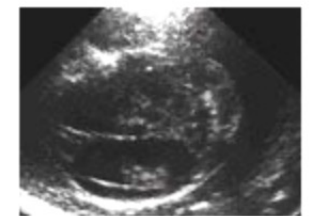
Gesztációs kor, placenta elhelyezkedés, foetus pozíció

„Genetikai” ultrahang:
Genetikai betegségek, kromoszóma-
rendellenességek morfológiai jegyeinek elemzése

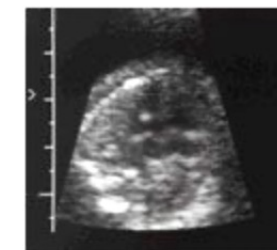
21-es triszómia (Down szindróma)



Tarkóredő vastagodás



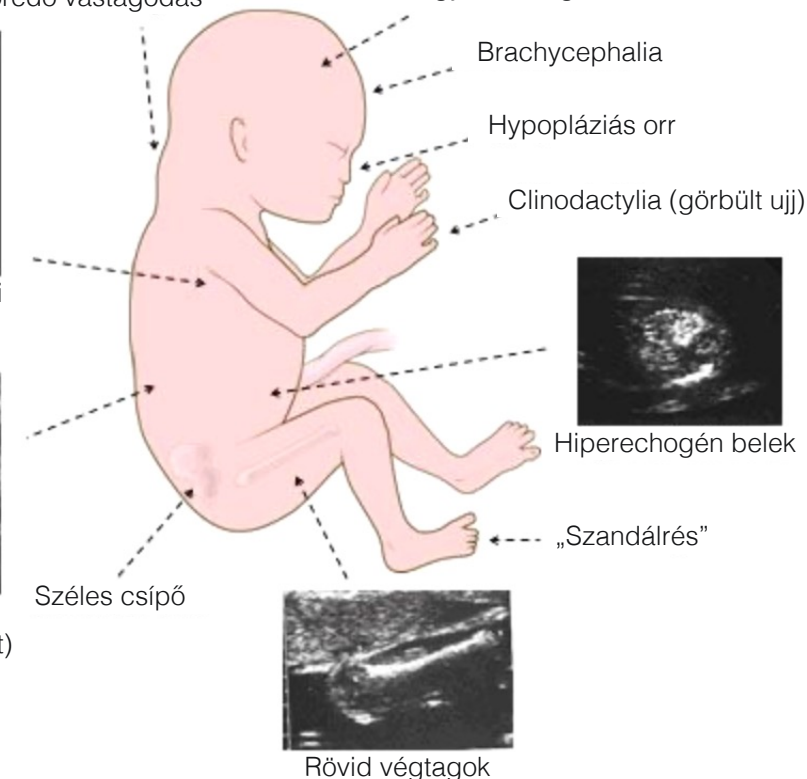
Agykamratágulat



Hiperechogén szívüregi
reflexiók



Pyelectasia
(vesemedence tárgulat)



Biparietális átmérő



Femur hossz



12-hetes magzat



7-hetes ikerterhesség

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

A 2D B mód alkalmazása kardiológiában

Apikális helyzet



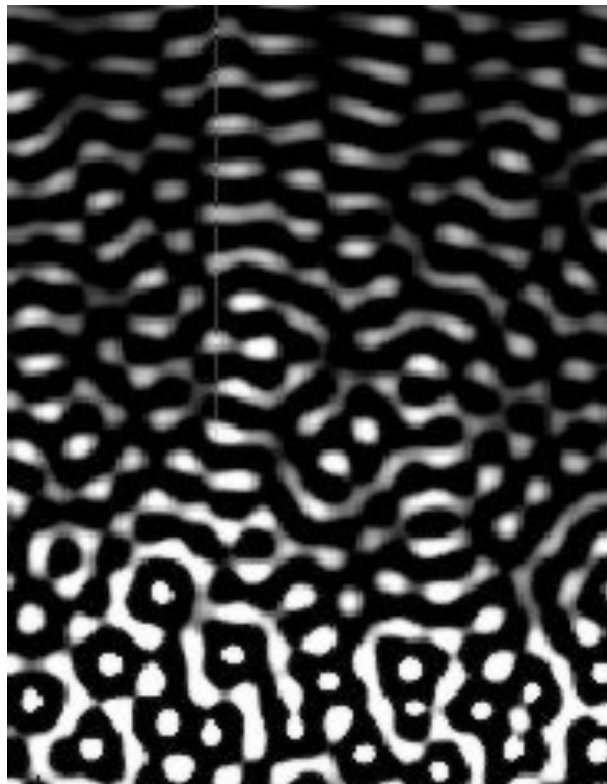
Bal parasternális
longitudinális
helyzet



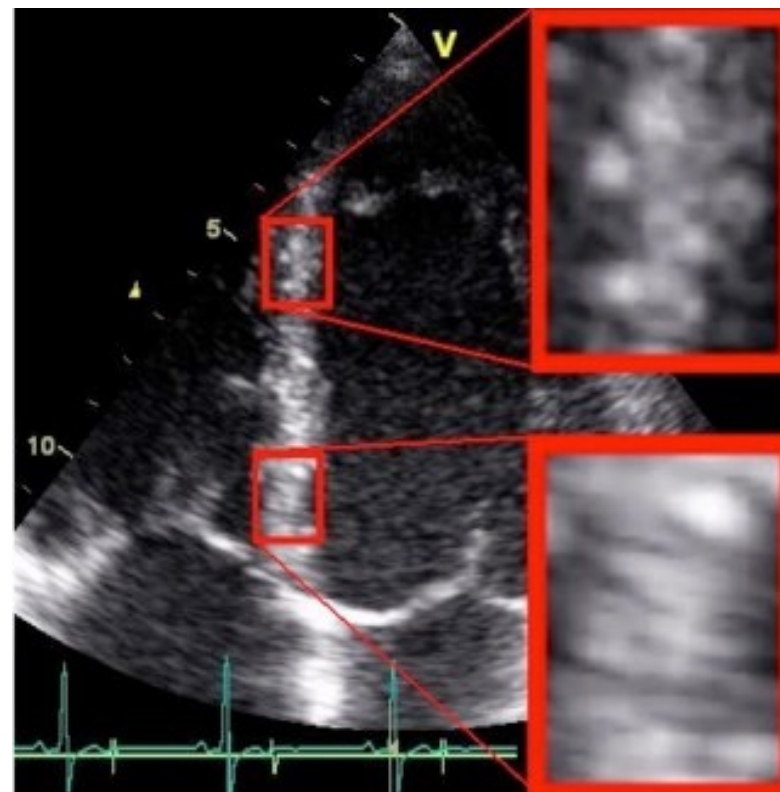
AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

A 2D B mód alkalmazása kardiológiában

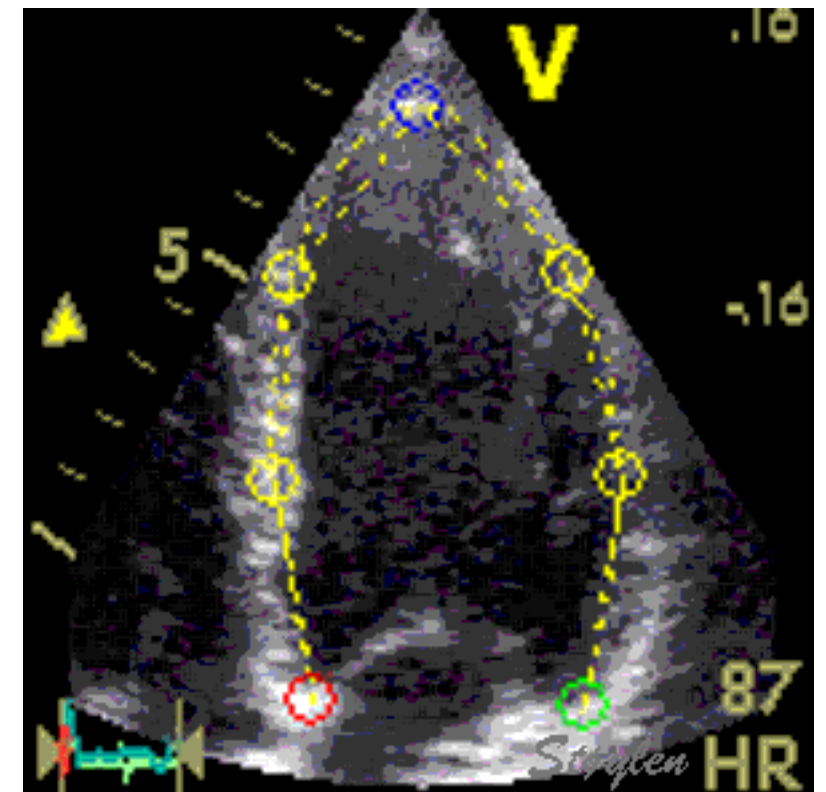
Speckle tracking; folt követés



Ultrahang interferencia
mintázat



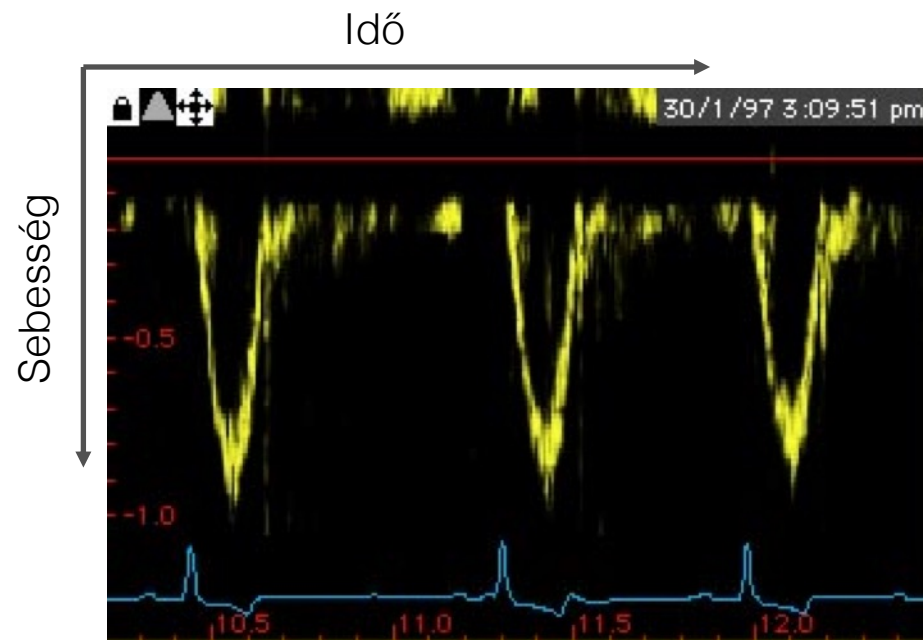
Az interferencia mintázat stabil és
követhető



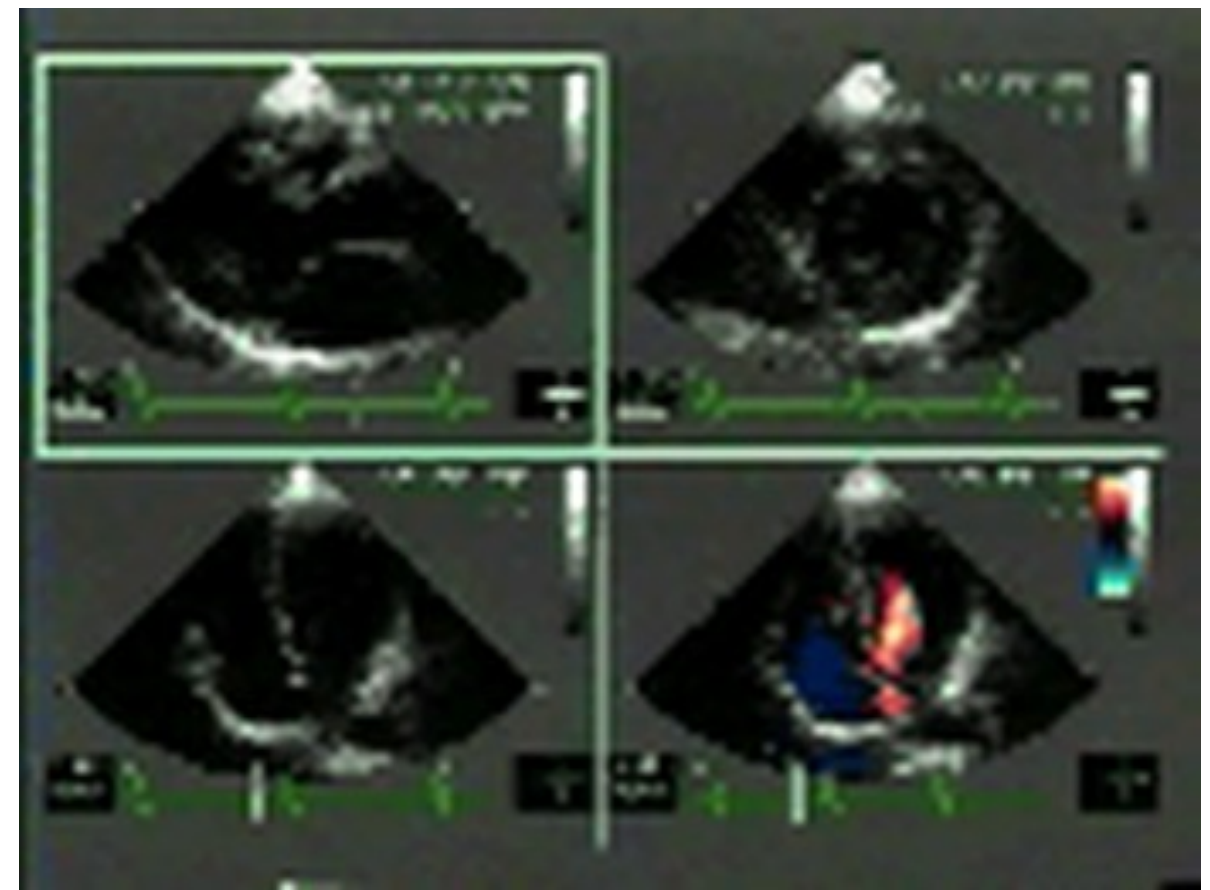
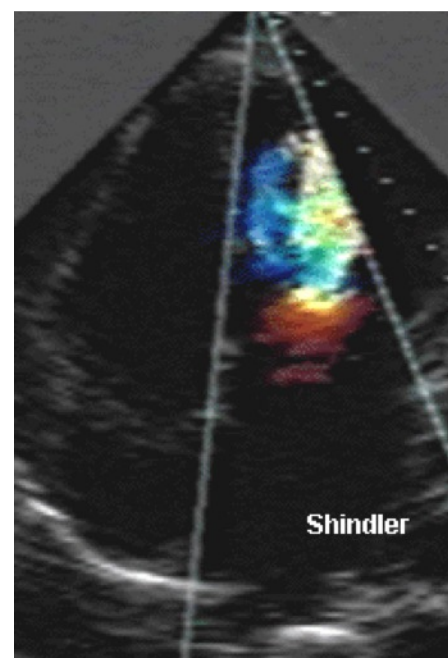
Foltok követése képanalízis
algoritmusok segítségével

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

Kardiológiai alkalmazások: Doppler kardiográfia



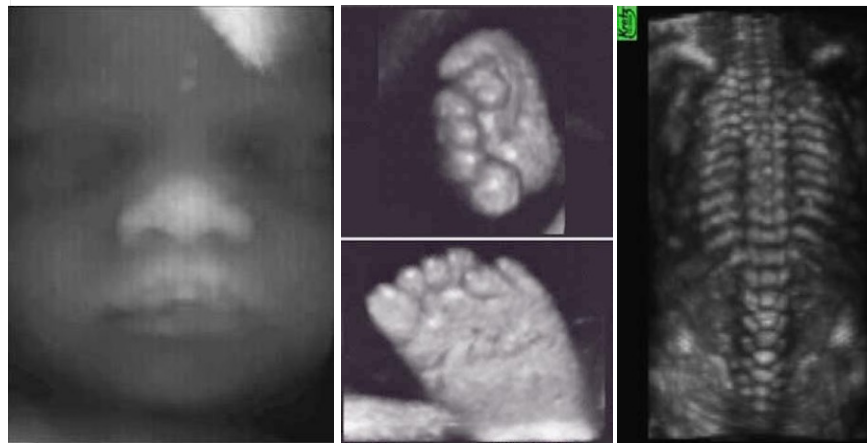
„Flow mapping”:
2D B-mód és M-mód
szuperponálása
Vörös: közeledő véráram,
Kék: távolodó véráram



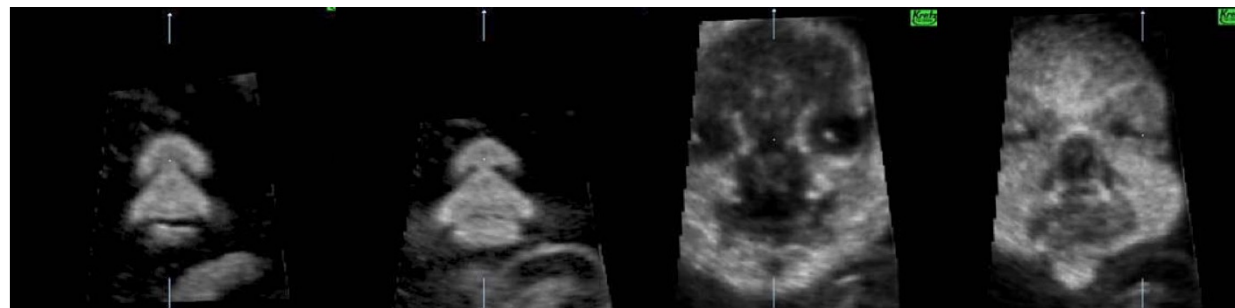
BART: Blue Away Red Towards

AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

3-dimenziós ultrahang: gyors, legyezőszerűen elforduló pásztázó egység.
Számítógépes képrekonstrukció.



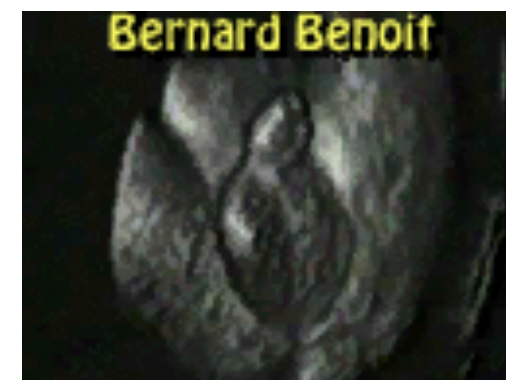
A térbeli információ tetszés
szerint prezentálható,
manipulálható.



Képszeletek



3D rekonstrukció



AZ ULTRAHANG DIAGNOSZTIKUS ALKALMAZÁSAI

4-dimenziós ultrahang: időfüggő 3D ultrahang



Ásító magzat



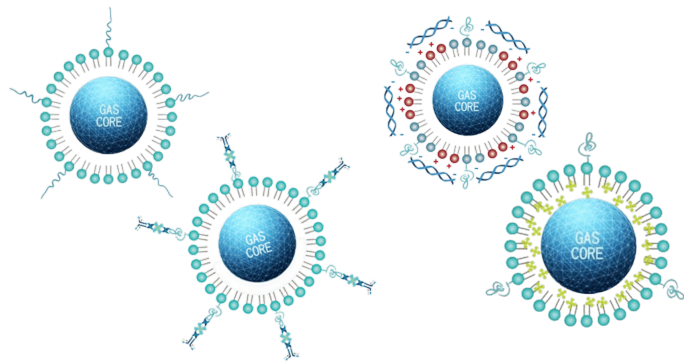
Mosolygó magzat



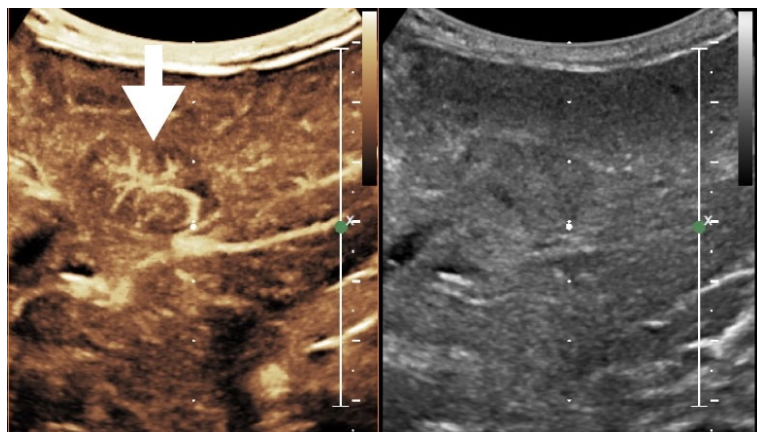
ULTRAHANG

KONTRASZTANYAGOK

Gázzal (levegő, perfluorokarbon, nitrogén) telt mikrobuborékok (1-2 μm)

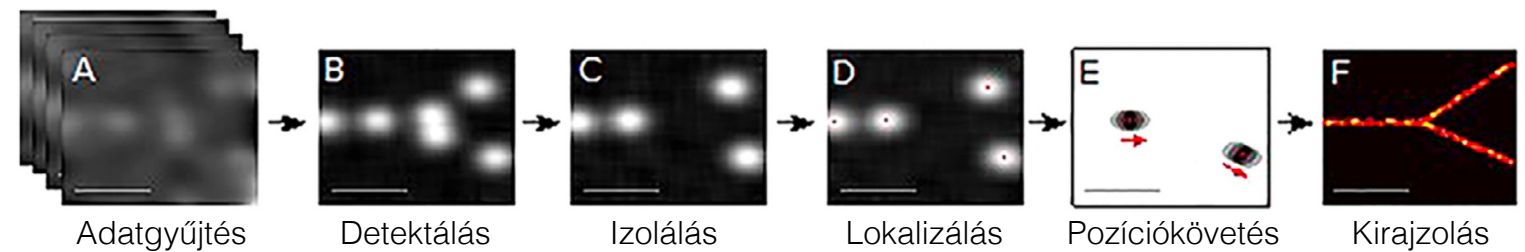


- Gázzal telt mag („core”): levegő, perfluorokarbon, nitrogén
- Funkcionalizálható héj („shell”): fehérjék, cukrok, lipidek, polimérek
- Méret: 1-2 μm
- Nagy reflexiós együttható

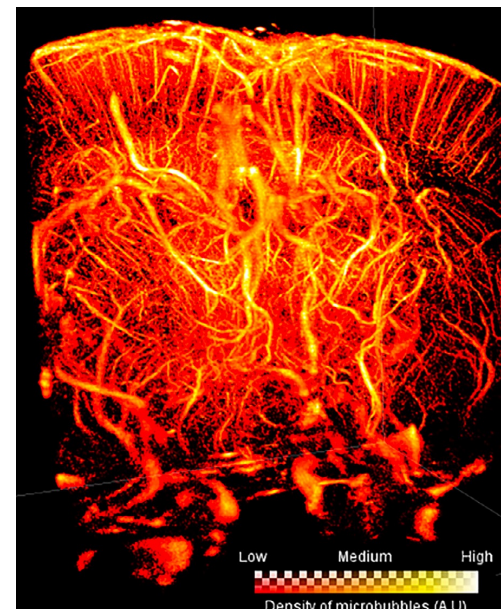


Érrajzat a májban

Szuperfelbontás lehetősége



- Nagyobb felbontás érhető el, mint a hullám-elhajlásból adódna
- Kapilláris áramlás változásából funkcionális képalkotás lehetősége



Patkány agy kapilláris hálózata



Bajusz stimuláció hatása egér agyban

OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qc=OKZ9XROMCQ5YE82P>