



KTH Physics

M. Wiklund



Ultraljud: Fysik och diagnostik



Martin Viklund
KTH Tillämpad fysik

FRL 4
SK1114
4 Sept 2014

Fråga

Blir man vänsterhänt av ultraljud?



KTH Physics

M. Wiklund

Vad är ultraljud?

-Läkarens svar:

"Ett instrument för att avbilda vävnad"



-Biologens svar:

"Ett instrument för att förstöra vävnad"



-Enkelt svar:

"Högfrekvent icke-hörbart ljud"



KTH Physics

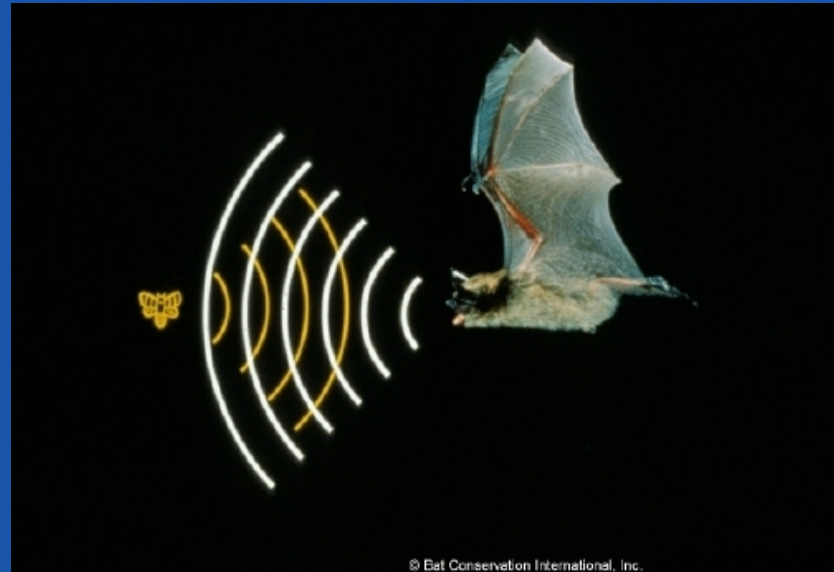
M. Wiklund

Historia: Ultraljud

Första observationen:

Lazzaro Spallanzani (fysiolog), 1794

Studerade fladdermöss, föreslog ekolokalisering som fladdermössens sinne för navigering i mörker

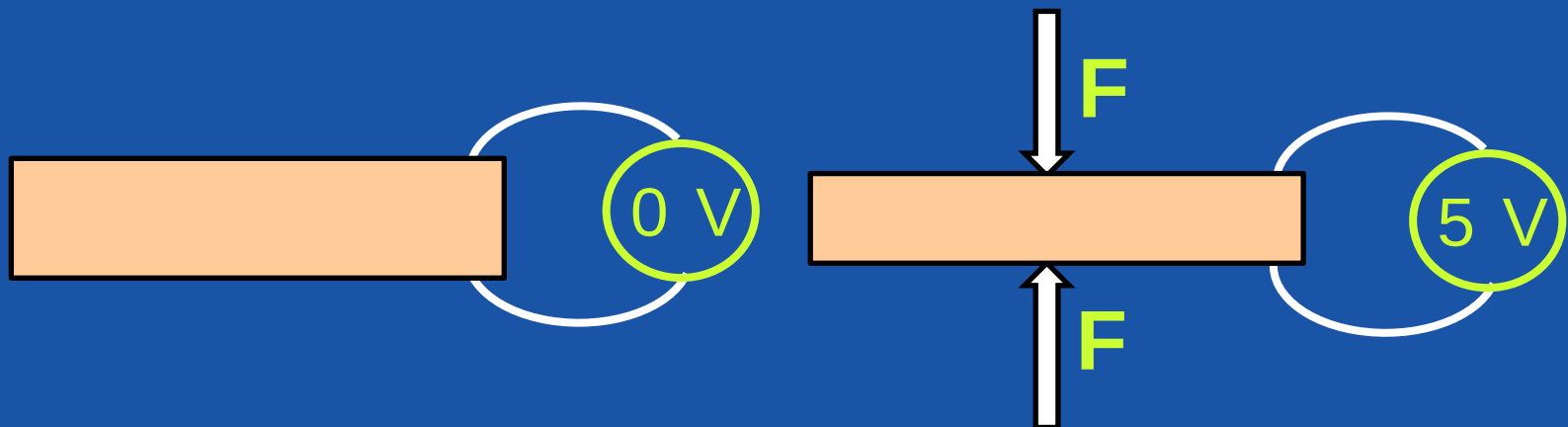
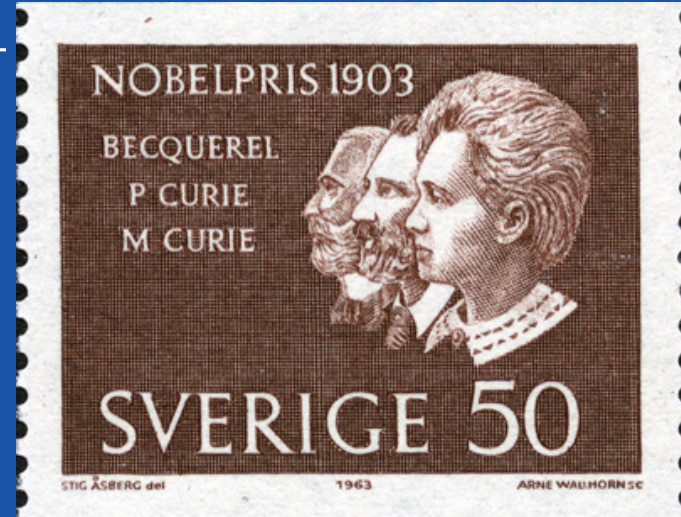


KTH Physics

Historia: Ultraljud

Första steget mot ultraljudsteknik:

Pierre Curie (fysiker), 1880
Upptäckte och studerade piezo-
elektriska effekten hos vissa typer
av kristaller (t ex kvarts). Om man
tryckte på kristallen inducerades det
en elektrisk spänning. Och vice versa!
=> Fenomenet kan användas för att
bygga både **sändare** och **mottagare**.



KTH Physics

M. Wiklund

Historia: Puls-eko ultraljud

Första vetenskapliga arbetet med ultraljudsteknik:

Paul Langevin ("Ultraljudets fader")

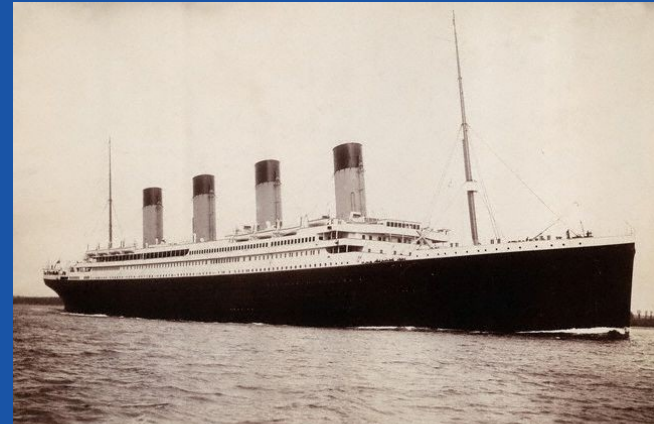
1920-talet, Sorbonne, Paris (>km puls-eko experiment i Seine)



Motivet:

-Titanic 1912

-Ubåtar i WWI
(1914-1918)



Grundprincip:

Transducern är både *sändare* och *mottagare*

Ex: NDT (Non-Destructive Testing), med. avbildn., SONAR

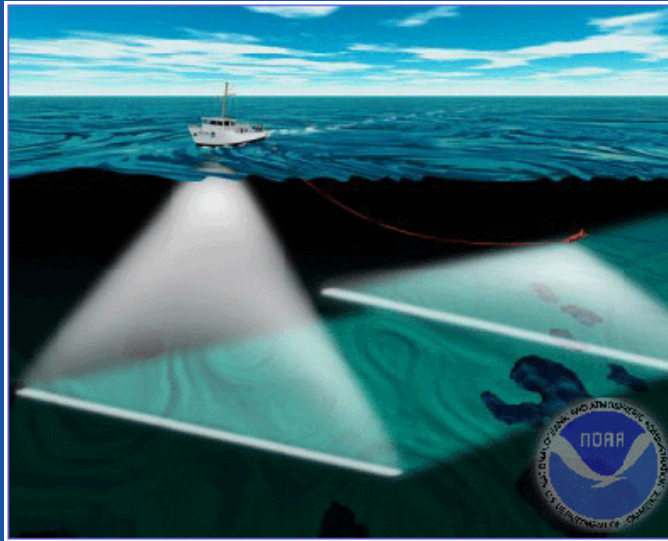


KTH Physics

M. Wiklund

Historia: Puls-eko ultraljud

SONAR (SOund Navigation and Ranging)

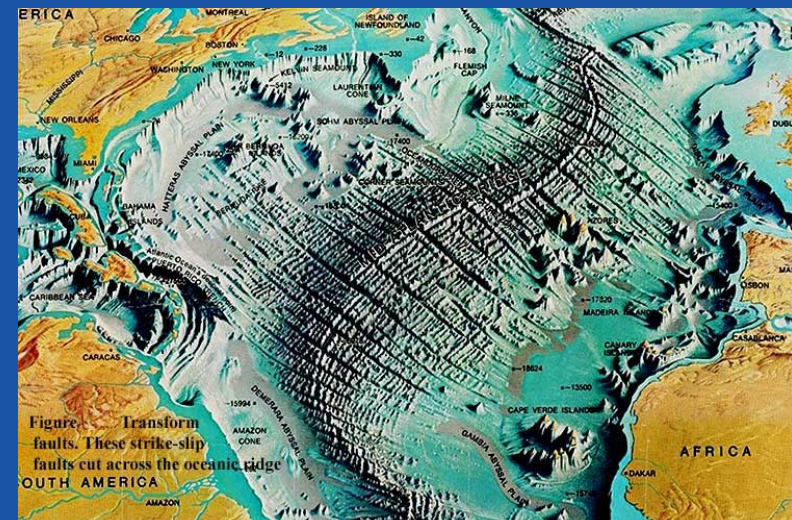
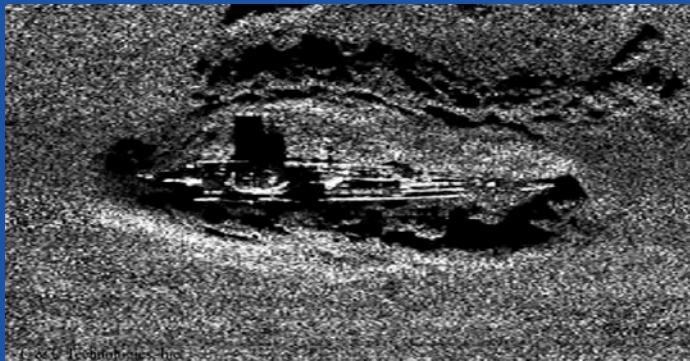


Idag: Köp ditt eget
eko-lod



Kartläggning av havsbotten

Ubåtsspaning, WW2



KTH Physics

M. Wiklund

Historia: Puls-eko ultraljud

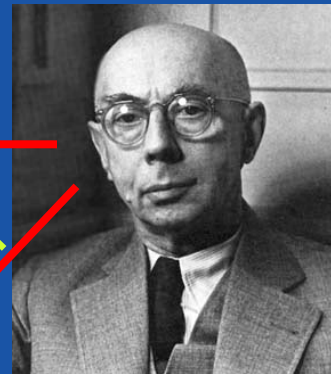
Hellmuth Hertz – Eko-kardiografiets fader (1950-talet)



kompis

son

son



Gustav Hertz:
Akustiskt strålning-
tryck på vätskeytor
(1930-talet)



Prefekt, KTH
Tillämpad fysik



KTH Physics

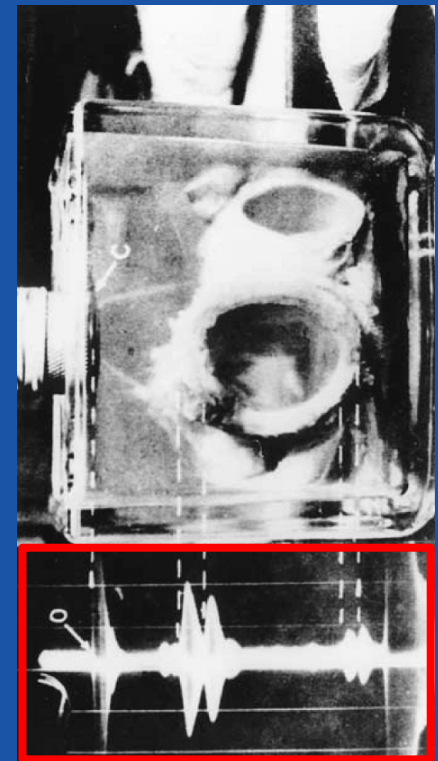
M. Wiklund

Historia: Puls-eko ultraljud

Hellmuth Hertz – Eko-kardiografiets fader (1950-talet)

Första "reflektometern" för
medicinsk användning (1953)

1-D avbildning
Av ett hjärta
(in-vitro)



KTH Physics

M. Wiklund

Historia: Puls-eko ultraljud

Marvin Ziskin –
Pionjär för fosteravbildning (1960-talet)



Ultraljudsdiagnostik,
foster, 1965
(Marvin Ziskin, USA)



Ultraljuds-
diagnostik
idag
($\frac{1}{2}$ sekel senare)



KTH Physics

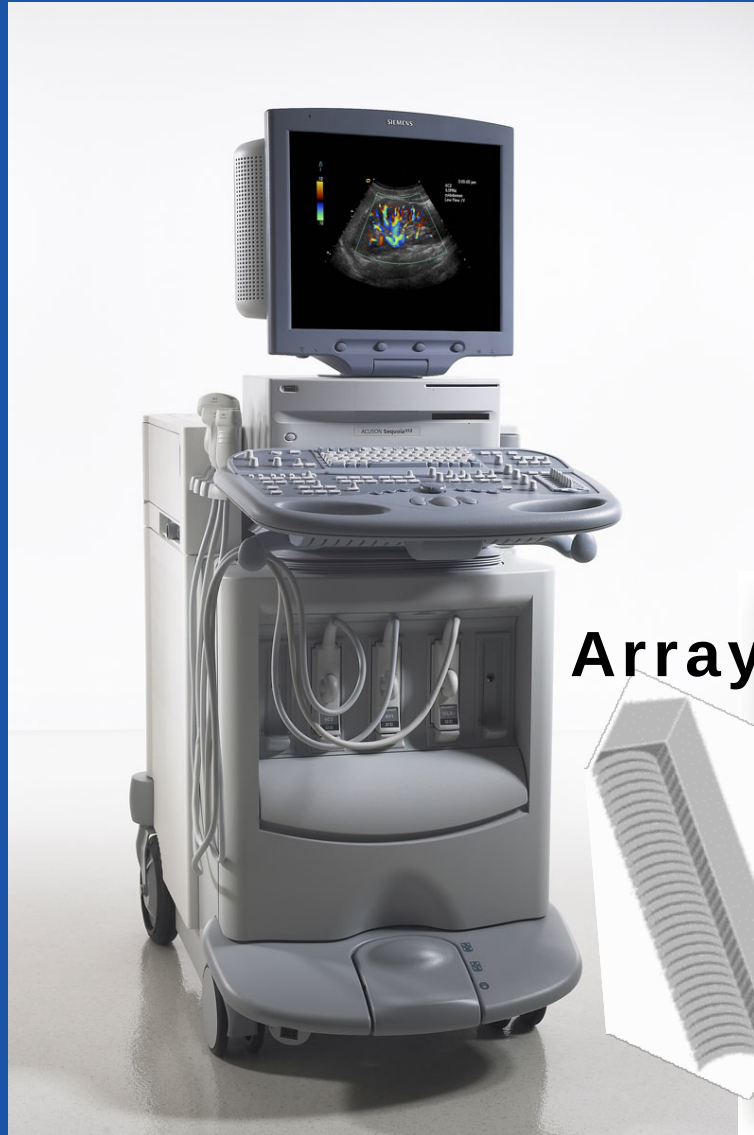
M. Wiklund

Idag: Ultraljuds-diagnostik: "Eko"



KTH Physics

M. Wiklund



Jämför:



Parkerings-sensorer

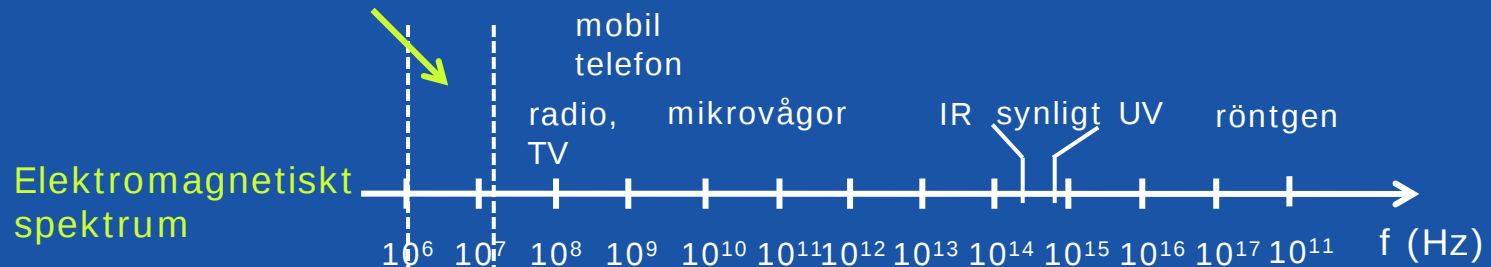


Array transducers!



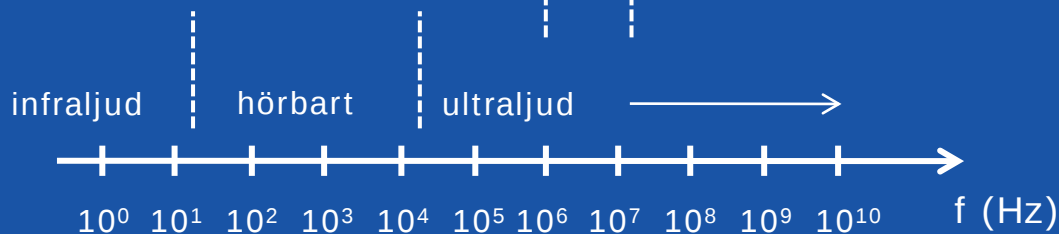
Frekvens-spektrum

Ingen störning för RF förstärkarna!



**DIAGNOSTISKT
ULTRALJUD**
(1-15 MHz)

kavitation
absorption



KTH Physics

M. Wiklund

Ljudhastigheten

$$c = f \cdot \lambda$$

ljudhastighet
(material-egenskap)

frekvens
(input)

våglängd
(output)

Typiska värden:

$c = 300 \text{ m/s}$ (gas)
 $c = 1\,500 \text{ m/s}$ (vätska)
 $c = 2\,500\text{--}10\,000 \text{ m/s}$ (fast)

} Nästan 2 storleksordningar!

$c = 1\,540\text{--}1\,560 \text{ m/s}$ (vävnad)
 $c = 1\,490 \text{ m/s}$ (vatten)

} Liten skillnad

Exempel: $f = 3\text{MHz} \Rightarrow \lambda = 0.5\text{mm}$



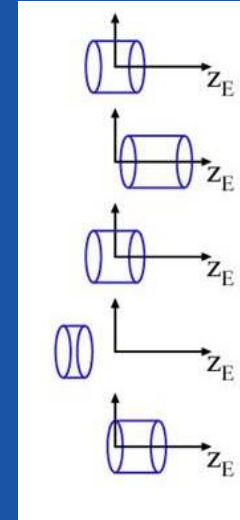
KTH Physics

M. Wiklund

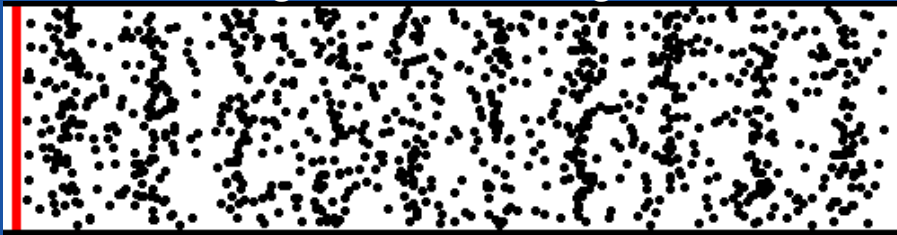
Ljudtryck och vibrationer

Två förlopp sker när ljud utbreder sig:

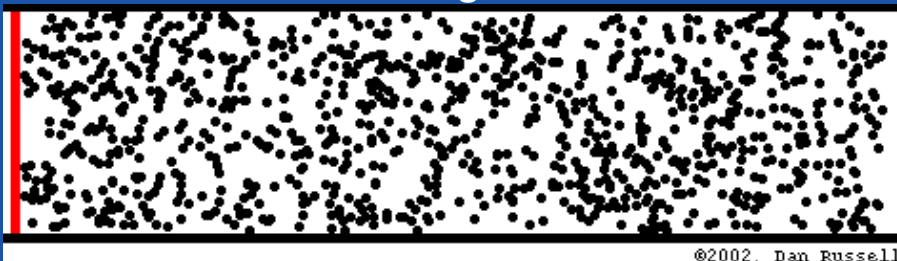
1. Vibrationer: s (= förskjutningar), samt v (= "partikel"-hastigheter)
2. Tryck-fluktuationer, p (= volyms- samt densitets-varianter)



Kontinuerlig akustisk våg:



Pulsad akustisk våg:



Storleksordning på s och p (amplituder) vid 1 MHz:

$$s = 50 \text{ nm}$$

$$p = 1 \text{ Mpa (10 atm)}$$

$$v = ds/dt = 1 \text{ m/s}$$

<http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html>



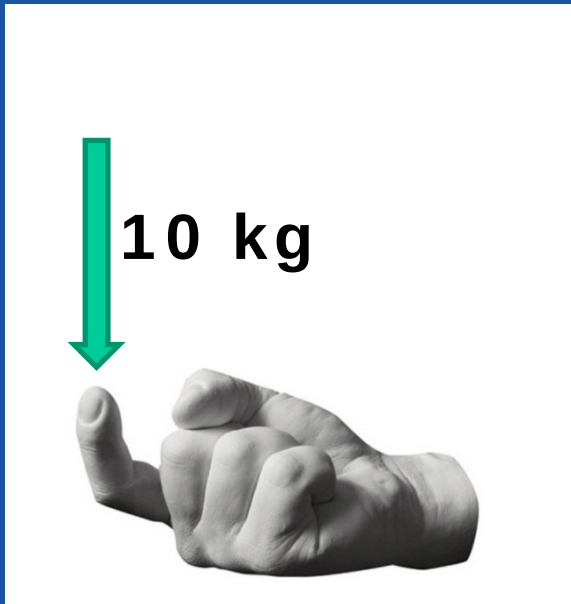
KTH Physics

M. Wiklund

Ljudtryck och vibrationer

Hur mycket är 1 Mpa?

=> 1 000 000 N / m²,
dvs 100 N / cm²,
dvs tyngden av 10 kg
på din fingertopp



Storleksordning på s och p
(amplituder):

$$s = 50 \text{ nm}$$

$$p = 1 \text{ Mpa (10 atm)}$$

$$v = ds/dt = 1 \text{ m/s}$$



KTH Physics

M. Wiklund

Viktiga samband

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

bulkmodul
(Eng: modulus of elasticity,
Young's modulus)

densitet

eller $K = \rho c^2$

Vad är bulkmodul?

→ Proportionalitetskonstant mellan
spänning (F/A) and töjning (V/V_0):

$$\frac{F}{A} = K \cdot \frac{\Delta V}{V_0} = K \cdot \frac{l}{L}$$



om konstant tvärsnittsytta (A)



KTH Physics

M. Wiklund

Viktiga samband

Partikelförskjutning:

$$s(x, t) = s_0 \sin(\omega t - kx)$$

Partikelhastighet
(u här, inte v):

$$u(x, t) = \frac{\partial s}{\partial t} = \omega s_0 \cos(\omega t - kx) =$$
$$\boxed{2\pi f s_0} \cos(\omega t - kx)$$

Akustiskt tryck:

$$p(x, t) = -K \frac{\partial s}{\partial x} = (-K) \cdot (-k) \cdot s_0 \cos(\omega t - kx) =$$
$$\boxed{\frac{2\pi K s_0}{\lambda}} \cos(\omega t - kx)$$

Jämför **amplituder**:

$$u_0 = 2\pi f s_0; \quad p_0 = \frac{2\pi K s_0}{\lambda}; \quad c = f \lambda; \quad c = \sqrt{K/\rho}$$

$$\Rightarrow \frac{p_0}{u_0} = \rho c$$

Denna ekvation definierar den
(karakteristiska) akustiska impedansen, Z !



KTH Physics

M. Wiklund

Viktiga samband

Energidensitet:
$$E(x) = \frac{u_0 p_0}{2c} = \frac{\rho u_0^2}{2} = \frac{p_0^2}{2\rho c^2}$$

Intensitet:
$$I(x) = E(x) \cdot c = \frac{\rho c s_0^2 \omega^2}{2} = \frac{u_0 p_0}{2} = \frac{\rho c u_0^2}{2} = \frac{p_0^2}{2\rho c}$$



KTH Physics

Notera att ρc kan bytas ut mot Z i ekvationerna
(dvs. den akustiska impedansen)

M. Wiklund

Typiska värden, ultraljud

$$p_0 = 1 \text{ MPa}; \quad f = 1 \text{ MHz} \Rightarrow$$

$$u_0 = \frac{p_0}{\rho c} = \frac{10^6 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg / m}^3 \cdot 1500 \text{ m / s}} = 0.7 \text{ m / s}$$

$$s_0 = \frac{u_0}{2\pi f} = \frac{0.7 \text{ m / s}}{2\pi \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 50 \text{ nm}$$

$$E = \frac{\rho u_0^2}{2} = \frac{1000 \text{ kg / m}^3 \cdot (0.7 \text{ m / s})^2}{2} = 220 \text{ J / m}^3$$

$$I = E \cdot c = 220 \text{ J / m}^3 \cdot 1500 \text{ m / s} = 340 \text{ kW / m}^2 = 34 \text{ W / cm}^2$$



KTH Physics

M. Wiklund

Akustisk impedans

Definition av *specifik* akustisk impedans:

$$Z_{\text{spec}} = \frac{p(\mathbf{r}, t)}{u(\mathbf{r}, t)} \quad \text{Jämför med Ohms lag:} \quad Z = \frac{U}{I}$$

Specialfall (plan, harmonisk våg i en dimension):

$$Z_{\text{spec}} = Z_{\text{char}} = \frac{p_0}{u_0} = \rho c \quad \longrightarrow \quad \text{karakteristisk akustisk impedans}$$

$$\text{Enhet, } Z? \quad [Z] = [\rho c] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} = \text{Rayl} \quad (\text{efter Lord Rayleigh})$$

Varför är Z intressant?



För beräkning av reflektion
samt transmission!

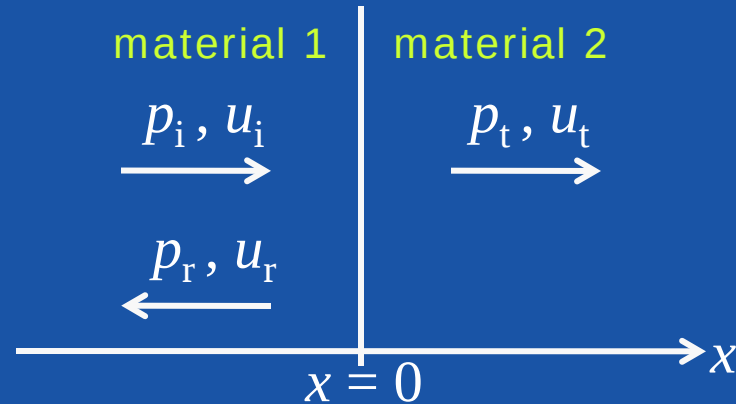


KTH Physics

M. Wiklund

Akustisk reflektion och transmission

Randvärden vid gränsyta mellan två material:



$$p_i + p_r = p_t$$

$$u_i + u_r = u_t$$

(kontinuitet i p och u
över gränsytan)

Dela första med andra ekv., eliminera u via $u=p/Z$



$$R_p = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Reflektionskoefficienten (m.a.p. tryck, } p\text{)}$$

$$T_p = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Transmissionskoefficienten (m.a.p. tryck, } p\text{)}$$



KTH Physics

M. Wiklund

Akustisk reflektion och transmission

Reflekterad och transmitterad intensitet?

$$I = \frac{p^2}{2Z} \Rightarrow R_I = R_p^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad \text{Refl. koeff. (m.a.p. } I \text{)}$$

$$T_I = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) T_p^2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad \text{Transm. koeff. (m.a.p. } I \text{)}$$



KTH Physics

M. Wiklund

Storlek på R_I ?

$$R_I = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2$$

Alltså, stor kontrast i densitet och ljudhastighet: $\Rightarrow$ stor R_I

Storleksordningar:

$Z = 10^2$ Rayls

(gas)

Notera!

4 storl.ordn.
mellan gas och
vätska eller fast!

$Z = 10^6$ Rayls = 1 MRayls

(vätska)

$Z = 10^6 - 10^8 = 1 - 100$ MRayls

(fast mat.)



KTH Physics

M. Wiklund

Storlek på R_I ?

Vätska-till-fast: $R_I \approx 10-90\% \rightarrow$ Stort spann

Gas-till-fast: $R_I > 99.9\%$

Luft-till-vatten: $R_I = 99.86\%$

} Alla fast ämnen och
vätskor är perfekta
speglar rel. en gas!

Vävnad?

Fett-till-lever: $R_I = 1\%$

Muskel-till-blod: $R_I = 0.03\%$

Muskel-till-ben: $R_I = 41\%$

} Bra eller dåligt?



KTH Physics

M. Wiklund

Hur får vi kontrast i en bild?

Kontrast i akustisk impedans:

$$Z_{\text{char}} = \rho c \quad \text{betyder kontrast i densitet och ljudhastighet}$$

Vad är karakteristiskt för ett materials ljudhastighet?

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \Rightarrow Z_{\text{char}} = \rho c = \rho \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\rho K}$$

Alltså, vi avbildar en kontrast i **densitet** och **styvhet** (bulkmodul)

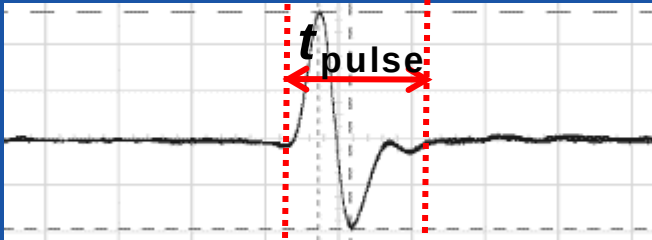


KTH Physics

M. Wiklund

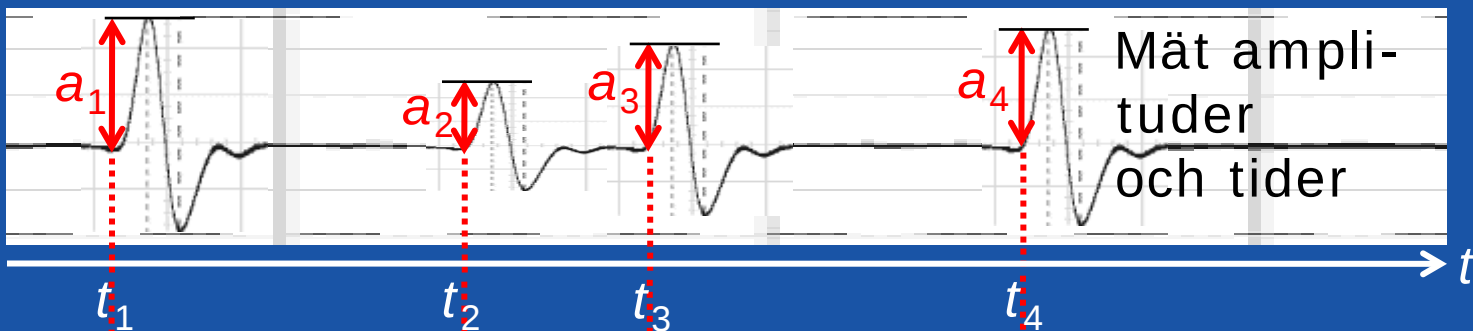
Puls-eko tekniker: Grunder

Skicka in en puls:

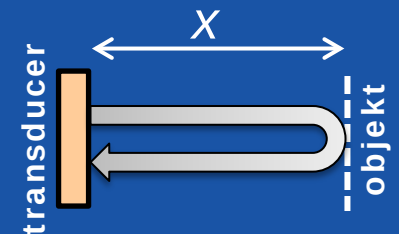


Typiskt, så är en puls en eller ett par perioder lång
($f = 1 \text{ MHz} \rightarrow t_{\text{puls}} \approx 1 \mu\text{s}$),
Och med en repetitions-frekv.
 $\sim 1 \text{ kHz}$

Registrera ekot:



Konstruera en bild genom att plotta
Amplituderna i gråskala och konvertera
tidsskalan till en längdskala (via $x = ct/2$):



Proportionalitetskoeff., c ?

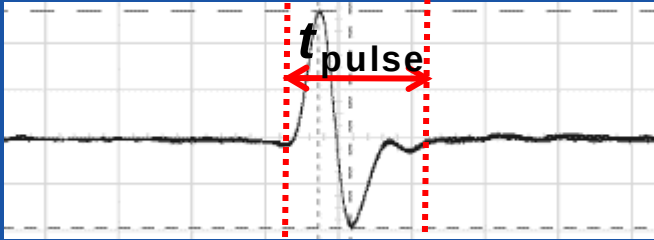


KTH Physics

M. Wiklund

Puls-eko tekniker: Grunder

Hur får vi korta pulser?



Typiskt, så är en puls en eller ett par perioder lång
($f = 1 \text{ MHz} \Rightarrow t_{\text{puls}} \approx 1 \mu\text{s}$),
Och med en repetitions-frekv.
 $\sim 1 \text{ kHz}$

Jämför: Ringklocka (kort excitering $\Rightarrow$ lång efterklang)

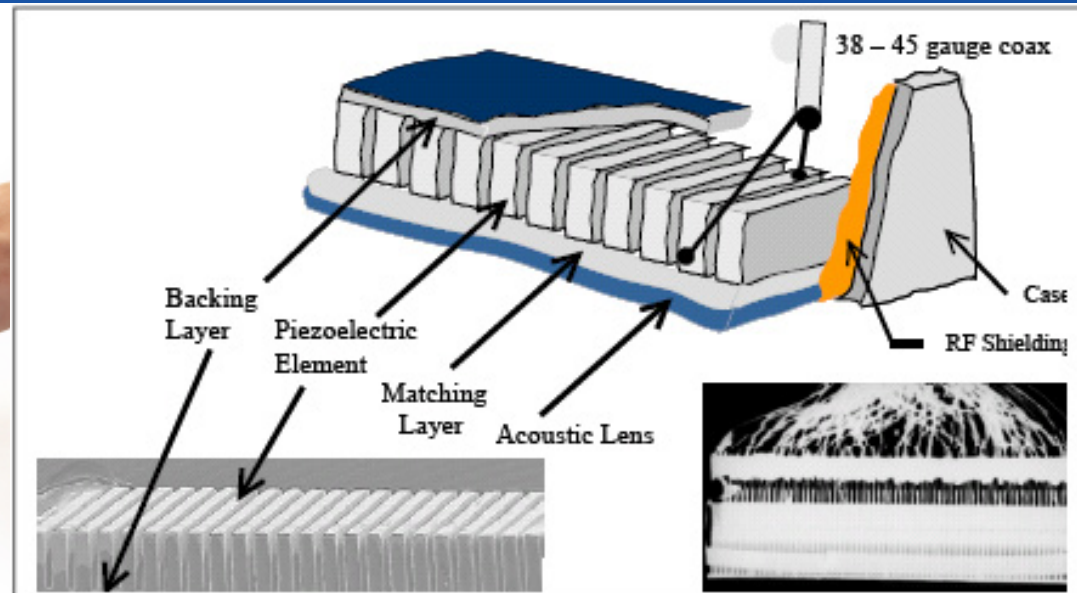
Vi behöver ett dämpande "backing layer" för att minska efterklangen (ofta ett epoxylim blandat med hög-Z metallpulver)



KTH Physics



M. Wiklund



Avbildnings-tekniker, vanligaste

A-mod	("amplitud")
B-mod	("brightness")
M-mod	("motion")
Doppler	

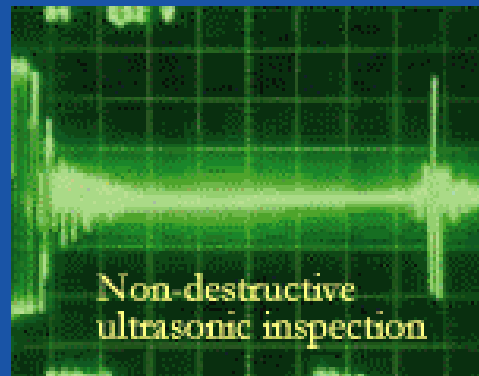
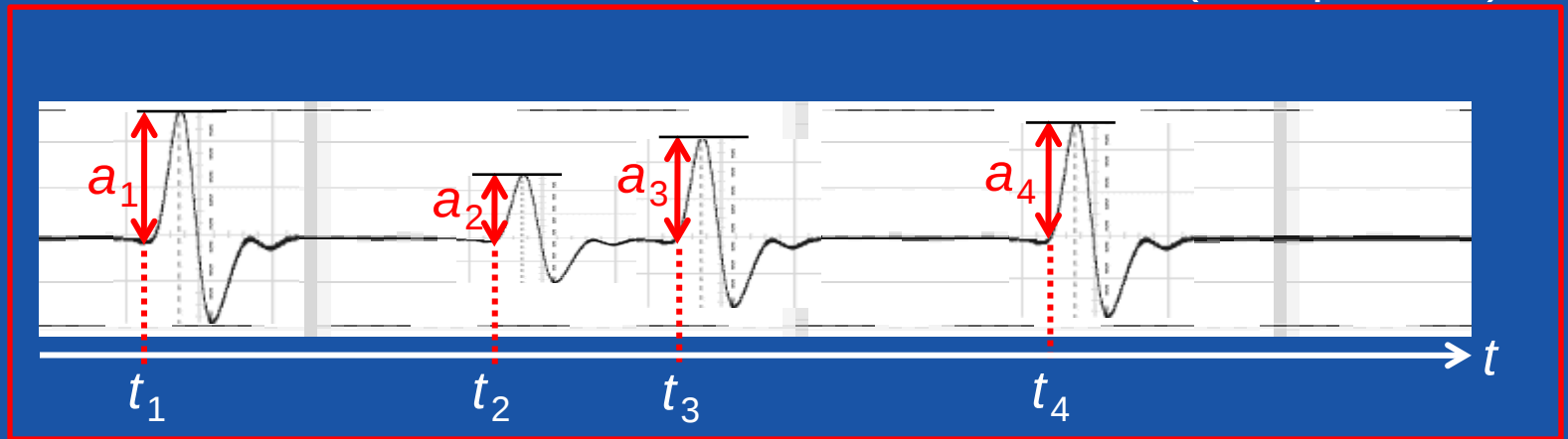


KTH Physics

M. Wiklund

Avbildnings-tekniker

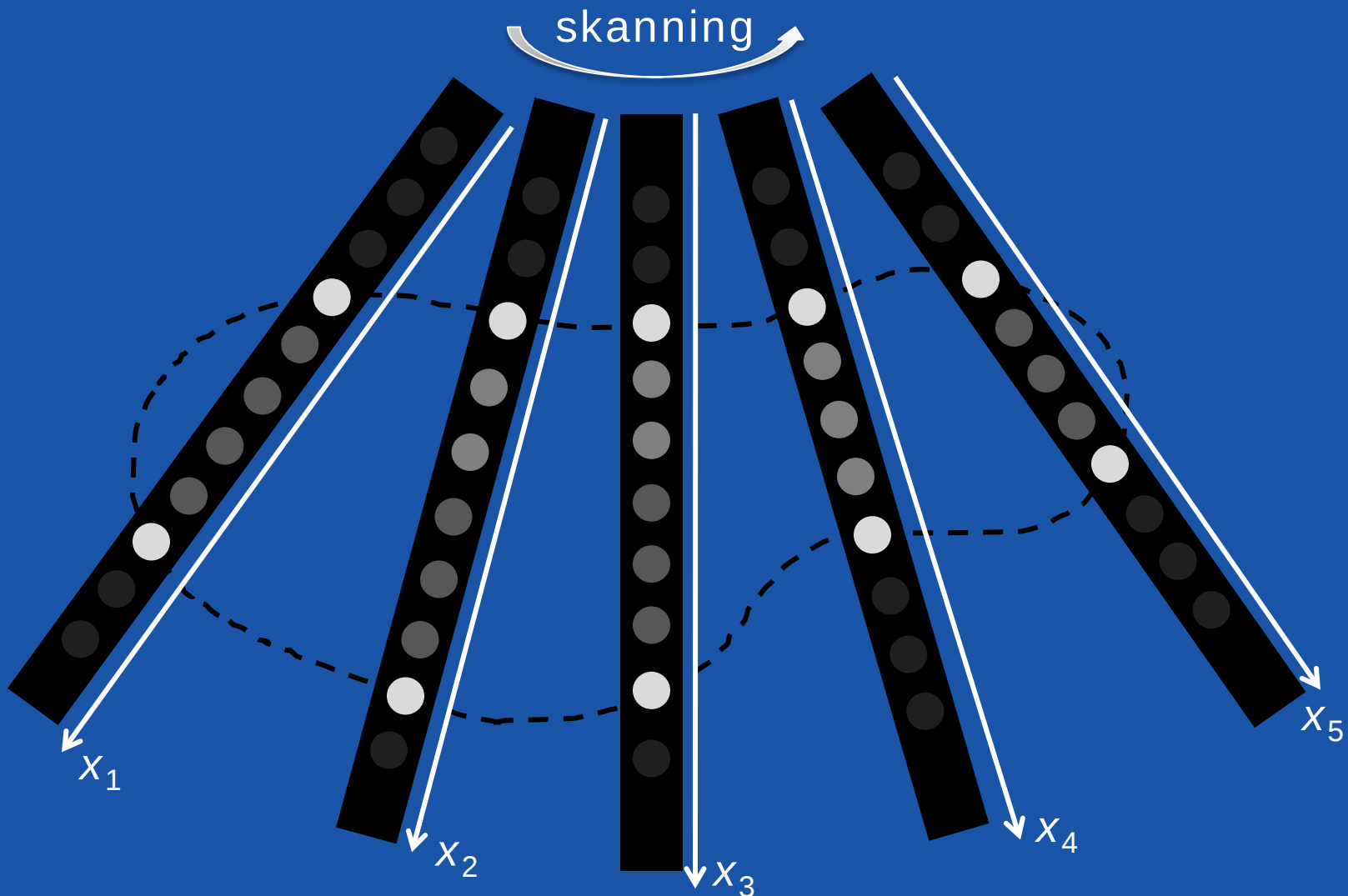
A-mod ("amplitud")



Enbart 1D (djup)
avbildning

Avbildnings-tekniker

B-mod ("brightness")



KTH Physics

M. Wiklund

Avbildnings-tekniker

B-mod ("brightness")

ekokardiogram



KTH Physics

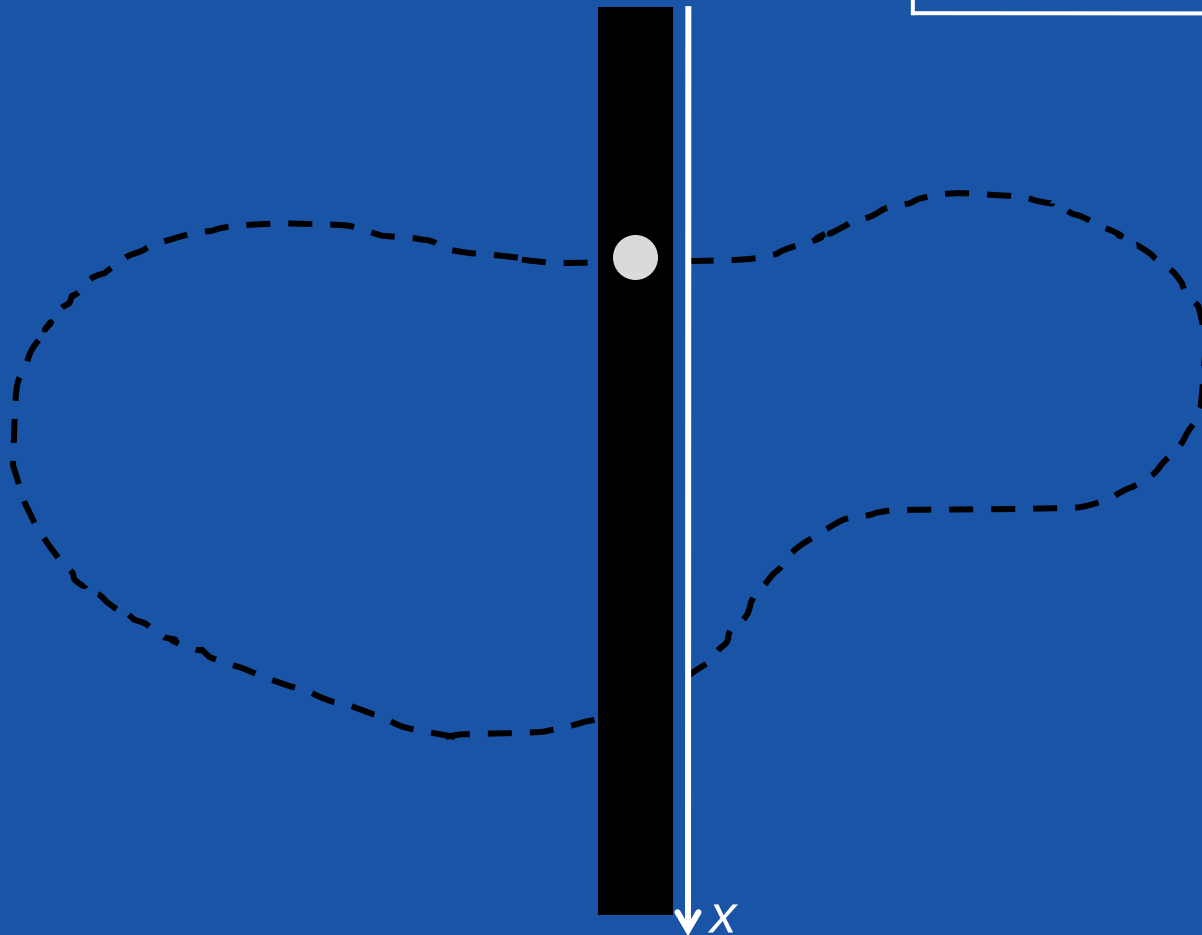
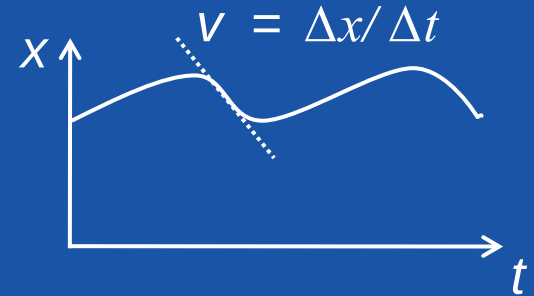
M. Wiklund

Hur fungerar avbildningssnitten?

<http://www.ultrasoundpaedia.com/>

Avbildnings-tekniker

M-mod ("motion")

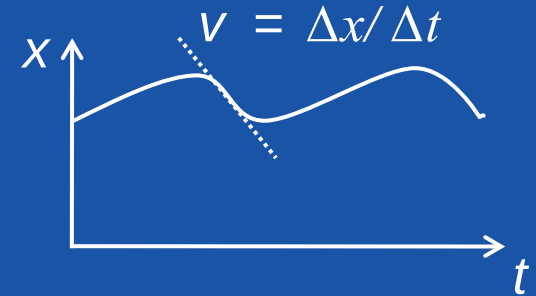


KTH Physics

M. Wiklund

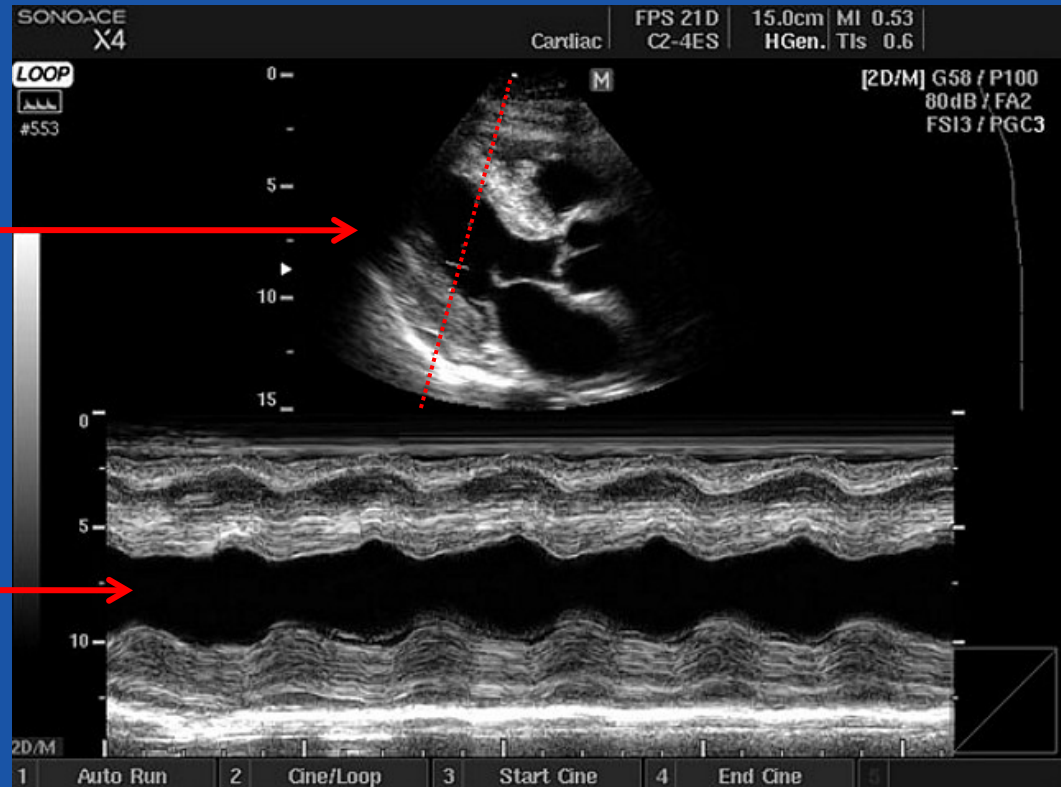
Avbildnings-tekniker

M-mod ("motion")



B-mod

M-mod

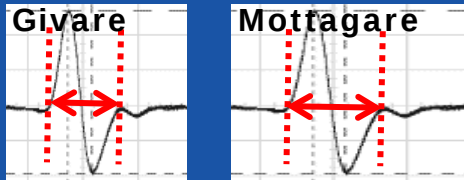


KTH Physics

M. Wiklund

Avbildnings-tekniker

Doppler →



$$f_{\text{doppler}} = f_{\text{givare}} - f_{\text{mottagare}}$$

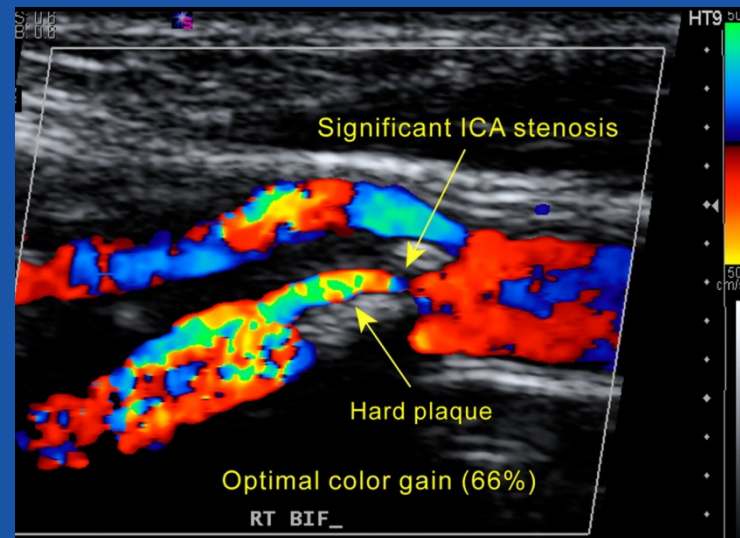
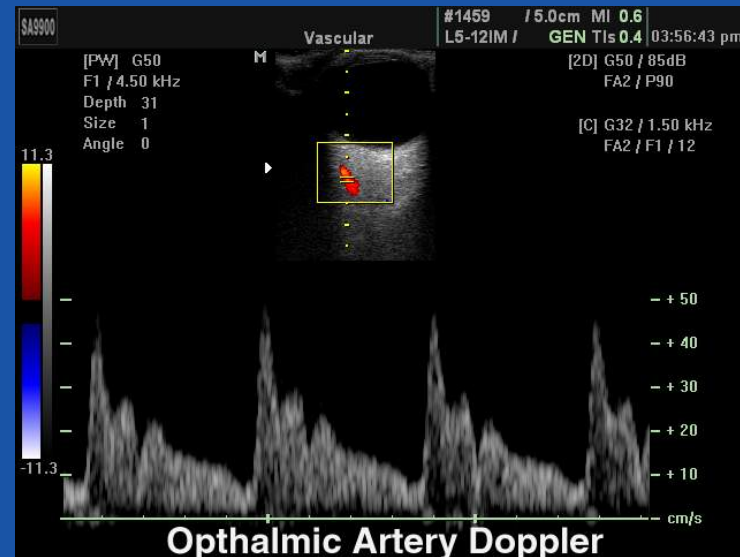
$$= \frac{2 \cdot f_0 \cdot v \cdot \cos \theta}{c}$$



$$f_{\text{doppler}} = 0.1-1 \text{ kHz}$$

(för v upp till 1 m/s)

Duplex →
eller
Färg-doppler



From: <http://radiographics.rsna.org/>



KTH Physics

M. Wiklund

Transducers (givare) för ultraljudsdiagnostik

Linear array

Excitera ett par element,
skanna från ena sidan
till andra



Curvi-linear array

Samma som linjär,
men skanning med
större bildvinkel



Phased array

Excitera alla element
samtidigt, men med
en kontrollerad
tidsfördröjning



Gel
för
transmission

Endo probe (inne i kroppen)

Svårare att komma åt från
utsidan



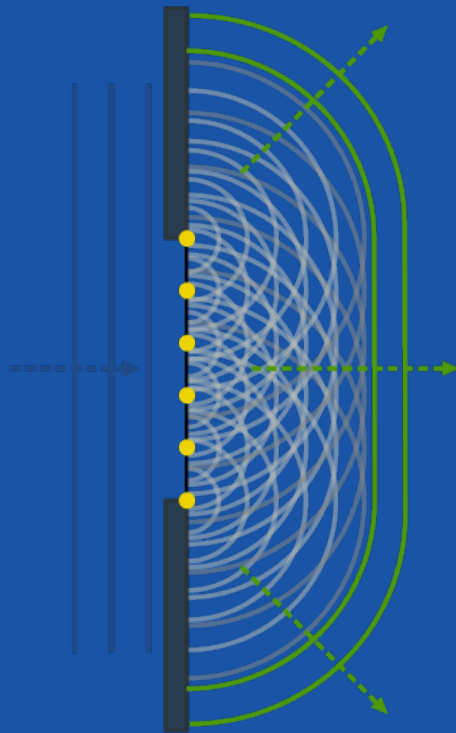
KTH Physics

M. Wiklund

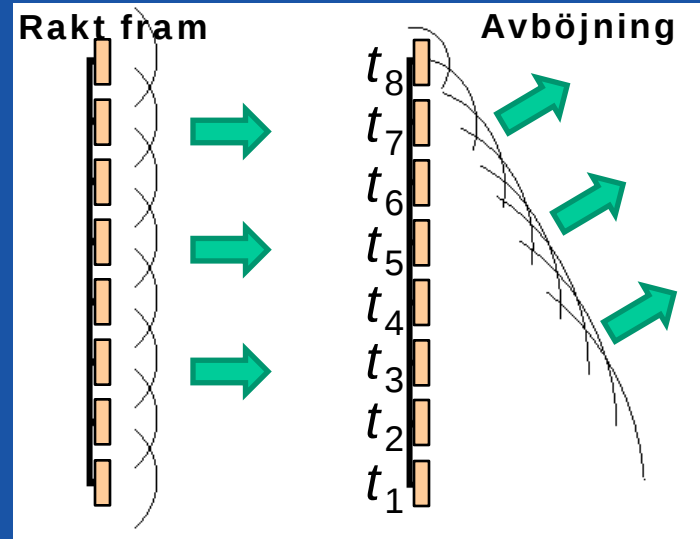
Hur fungerar en "phased-array" transducer?



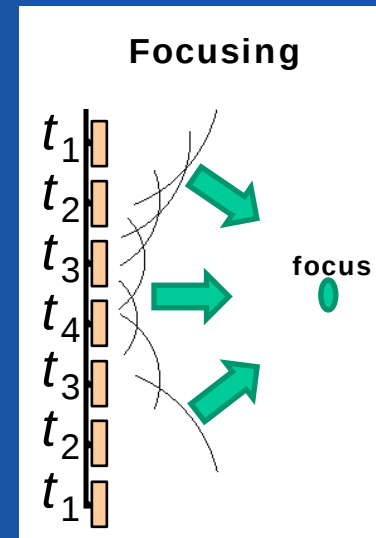
KTH Physics



Huygens princip!



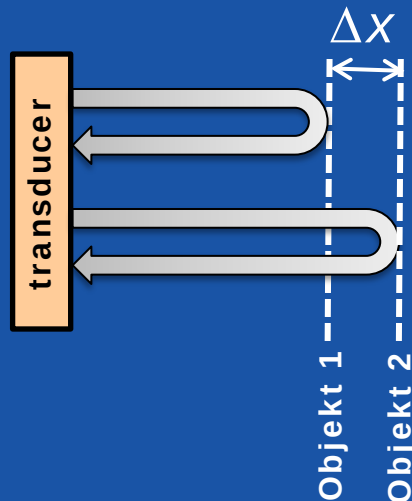
Fördröjning
av excitation
av de olika
kristallerna,
excitations-
ordning:
 $t_1, t_2, t_3, \dots$



M. Wiklund

Upplösning

Beräkningsexempel, **axiell** upplösning:



Uppskatta gränsen till halva pulsens utbredning:

$$\Delta x = t_{pulse} \cdot c / 2 = \left\{ f = 1 \text{ MHz}; t_{pulse} = T = 1 / f \right\} \\ = 1 \mu\text{s} \cdot 1560 \text{ m/s} / 2 \approx 0.8 \text{ mm}$$

Frekvensberoende:

$$f = 1 \text{ MHz} \quad \Rightarrow \quad \sim 0.8 \text{ mm ax. upplösning} \\ f = 10 \text{ MHz} \quad \Rightarrow \quad \sim 0.08 \text{ mm ax. upplösning}$$

Frekvensval:

Kompromiss mellan **upplösning** och **penetrering**
(eftersom absorption ökar med frekvensen)

Ett sista råd

Ultraljudsavbildning är en diagnostisk metod,
Varje undersökning måste vara medicinskt motiverad!

Råd: Gör inte så här:

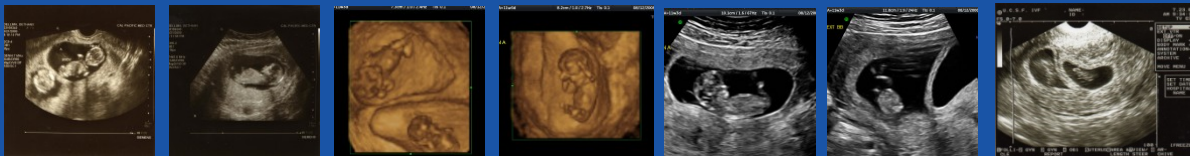


31 veckor.....

27 veckor ... 23 veckor

20 veckor

16 veckor



13 veckor

11 veckor

8 veckor

M. Wiklund