ENKLE SVAR PÅ ABSOLUTT ALT

ULTRALYD

FOR

DUMMIES

En idiotisk enkel bok for leger

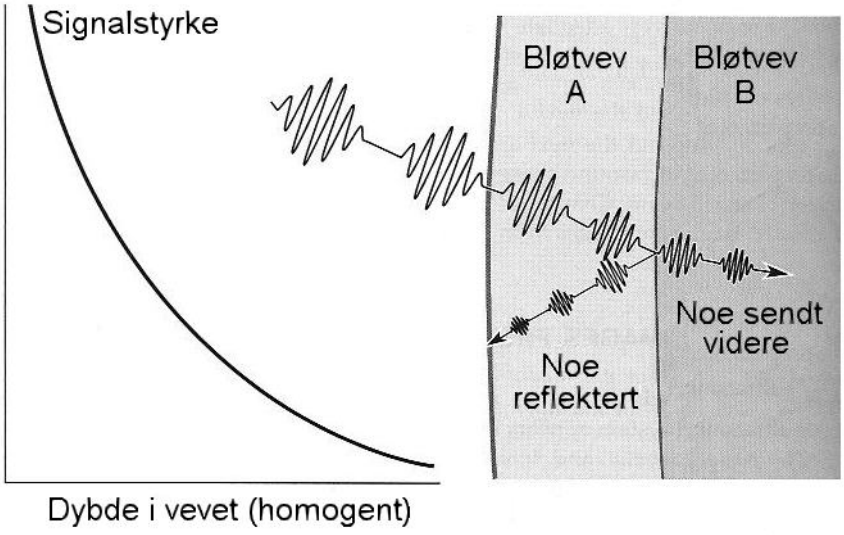
Sven Weum MD PhD

LYD

Lyd er mekaniske bølger som går gjennom et medium. Hørbar lyd har mellom 20 og 20.000 svingninger per sekund (Hz) og disse bølgene overføres ved bevegelser i luften. Når man for eksempel slår på en tromme, vibrerer trommeskinnet slik at luften rundt settes i tilsvarende bevegelse. Disse bevegelsene sprer seg ut som bølger i luften lengre unna. Lyden oppfattes ved at bølgene i luften overføres til trommehinnen i øret.

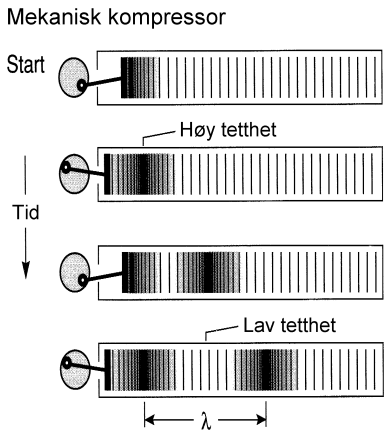
ULTRALYD

Ultralyd er lydbølger som svinger mye raskere enn øret klarer å oppfatte. Ultralyd som brukes klinisk har mellom 1 og 15 millioner svingninger per sekund (MHz). Bølgene av ultralyd sprer seg i væske og bløtdeler på samme måte som vanlige lydbølger. Når ultralydbølgene treffer ulike strukturer dannes det ekko som reflekteres tilbake. Ultralyd fungerer etter samme prinsipp som sonar, en teknologi som ble utviklet under 2. verdenskrig for å påvise ubåter. En sender produserer et tog av korte pulser av høyfrekvente elektriske svingninger. Transduceren fungerer som en høyttaler som omformer de elektriske svingningene til høyfrekvente mekaniske vibrasjoner som går inn i kroppen. I et homogent medium som for eksempel vann, vil ultralydstrålen bare svekkes gradvis etter hvert som den penetrerer dypere og dypere. Men hvis strålen passerer gjennom ulike vev, vil noe av strålen reflekteres tilbake. Tiden det tar før impulsen kommer tilbake er direkte proporsjonal med avstanden fra transduceren. Styrken på ekkoet er avhengig av forskjellen i de fysiske egenskapene til de to typene vev som grenser til hverandre og avstanden fra transduceren.



LYD ER MEKANISK VIBRASJON

Membranen på en høyttaler er en form for mekanisk luftkompressor. Når membranen beveger seg ut og inn blir bevegelsene overført til luften som omgir membranen, og det dannes lydbølger som brer seg videre lengre ut. Jo mer elektrisk energi som tilføres høyttaleren, desto større amplitude får lydbølgene.



Ultralyd fungerer på nøyaktig samme måte. Transduceren omdanner elektriske impulser til mekaniske vibrasjoner som forplanter seg gjennom vevet med mikroskopiske bevegelser.

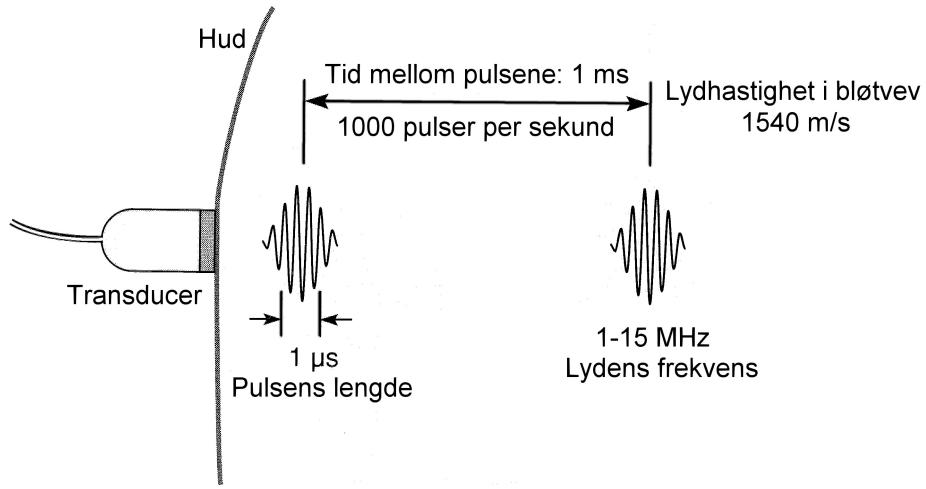
Bølgelengden λ er den fysiske avstanden mellom to bølger og er omvendt proporsjonal med frekvensen (antall svingninger per sekund).

Frekvens · bølgelengde = lydhastigheten

Lydhastigheten i vevet er omkring 1540 m/s.

Lydhastigheten er altså uavhengig av bølgenes frekvens og bølgelengde. Lydhastigheten i et bestemt materiale bestemmes av materialets tetthet og komprimerbarhet.

Transduceren sender ut omkring 1000 impulser i sekundet, men hver puls har ikke mer enn omkring et mikrosekunds varighet. De resterende 999 mikrosekundene mellom hver impuls fungerer transduceren som en mikrofon og fanger opp ekkoene som kommer tilbake fra vevet.

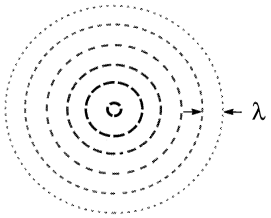


Ekkoene blir forsterket i en mottaker og bearbeidet slik at en computer kan konstruere et bilde på grunnlag av styrken og returtidspunktet til de enkelte ekkoene.

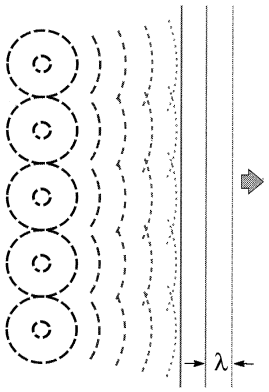
DANNELSE AV ULTRALYDBØLGER

Bølger som dannes fra et enkelt punkt sprer seg som ringer i vannet. Dette kalles sfæriske bølger. Ved å plassere mange bølgekilder tett ved siden av hverandre, får man dannet en bølgefront i følge *Huygens prinsipp.* Ved å aktivere mange små piezoelektriske krystaller samtidig i en transducer, kan man få dannet en slik bølgefront av ultralyd som går gjennom vevet i kroppen.

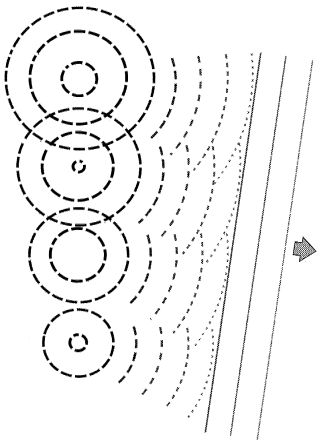
Ved å aktivere et og et krystall med et visst tidsintervall, kan man få bølgefronten til å forandre vinkel, slik figuren nedenfor viser.



Sfæriske bølger
utgår fra ett punkt



Dannelse av en bølgefront



Vinkling av bølgefront

REFLEKSJON AV ULTRALYDBØLGER

Ved overgangen mellom to materialer som har ulike fysiske egenskaper, vil det dannes ekko av ultralydpulsene. På samme måte som når en ball treffer en vegg, eller en lysstråle treffer et speil, så vil signalet reflekteres tilbake med tilsvarende vinkel som det kom inn med. Ved ultralydundersøkelser er det transduceren som fungerer både som sender og mottaker. Dette betyr at det bare er vev som ligger vinkelrett på strålegangen som gir ekko og som dermed bidrar til å danne bildet.

Mengden energi som reflekteres er avhengig forskjellen på *den akustiske impedansen* til de ulike vevene. Impedansen Z uttrykkes ved produktet av vevets tetthet ρ og lydhastigheten c i vevet: $Z = \rho \cdot c$

Dette betyr at vi får et kraftig ekko når de to materialene har ulik tetthet eller lydhastighet.

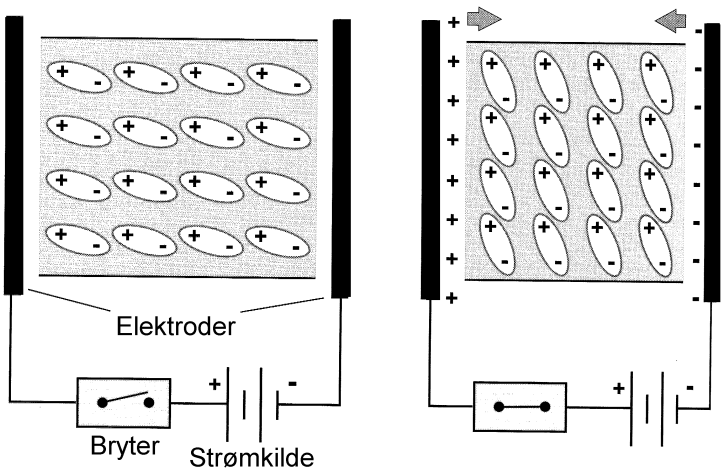
PIEZOELEKTRISKE KRYSTALLER

Det såkalte piezoelektriske krystallet utgjør selve ”hjertet” i transduceren. Det finnes naturlige piezoelektriske krystaller som kvarts og kunstig fremstilte krystaller. Et enkelt krystall kan bestå av en plate som er 1 cm stor, eller det kan være mye mindre krystaller som bestanddeler av en matrise i en moderne transducer. Hvert krystall er bare en brøkdel av en millimeter tykt. Et piezoelektrisk materiale har to viktige egenskaper:

1. Elektrisk spenning over krystallet forårsaker en liten mekanisk deformering
2. Mekanisk deformering av krystallet forårsaker en liten elektrisk spenning

Det piezoelektriske materialet består av polariserte molekyler som har et lite underskudd av elektroner på den ene enden og et lite overskudd på den andre. Når det kommer et elektrisk felt over krystallet, vil alle molekylene vri seg litt rundt. Når materialet utsettes for mekanisk påvirkning, vil det skje en tilsvarende forandring av det elektriske potensialet.

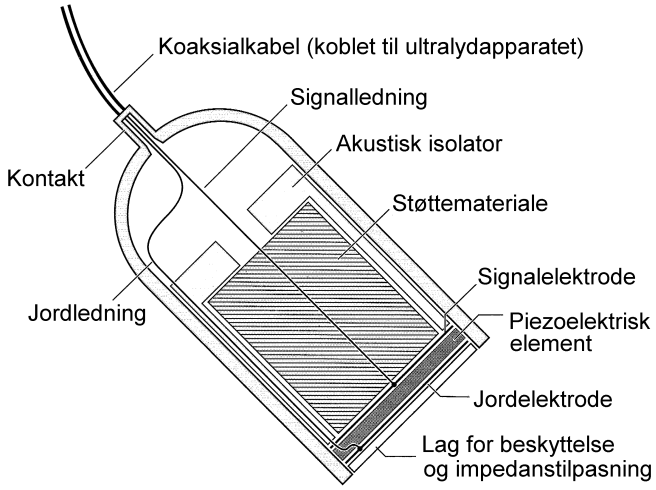
Krystallets *resonansfrekvens* bestemmes av krystallets tykkelse.



TRANSDUCEREN

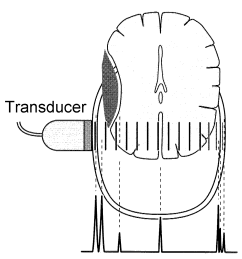
En svært enkel transducer kan bestå av et enkelt piezoelektrisk krystall.

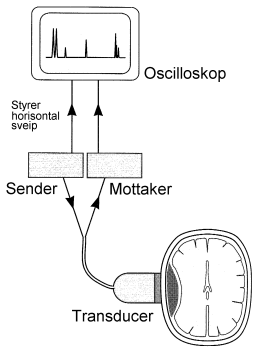
Enkel transducer for ultralyd



Ved å tilføre vekselstrøm med samme frekvens som krystallets resonansfrekvens, oppstår det kraftige svingninger. På samme måte som når man slår på en klokke, vil krystallet fortsette å svinge lenge etter at strømpulsen har opphørt. For at krystallet ikke skal fortsette å svinge så lenge er det lagt inn et dempende materiale bak krystallet (for eksempel wolfram). Dempningen kan også gjøres elektronisk ved å sende en ny vekselstrømpuls som er 180 grader faseforskjøvet i forhold til den første pulsen.

Når impulsen er sendt ut fungerer krystallet som mikrofon og fanger opp ekkoene fra vevet. Med en slik enkel transducer kan man lage et bilde i såkalt ***A-mode***.

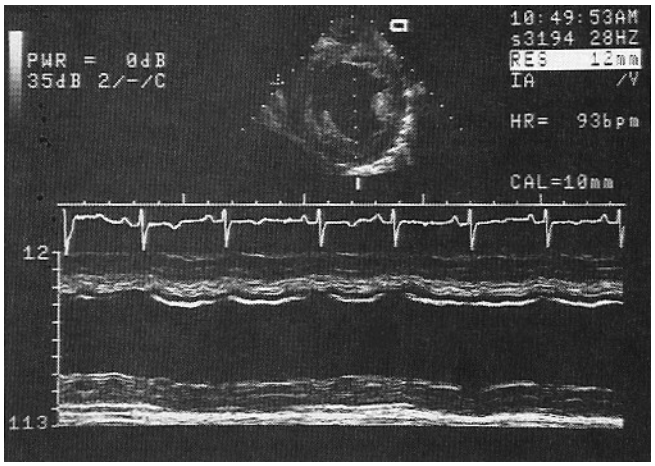




Hver gang transduceren sender en ny impuls trigges oscilloskopet til å tegne en ny linje, og ekkoene som oppfanges av transduceren tegnes som spenningstopper langs denne linjen. Høyden på hver topp forteller hvor kraftig det enkelte ekkoet er.

Ultralydapparatet inneholder en forsterker som kompenserer for dempningen av signalene som skyldes økt avstand fra transduceren.

En slik transducer kan også brukes til å lage bilder i ***M-mode*** (M står for *motion*). Transduceren ”ser” da bare langs en enkel linje gjennom kroppen som ved A-mode. Men i stedet for å fremstille topper for hvert enkelt ekko, viser M-mode bevegelsene langs denne linjen.



Ved M-mode sveiper ikke strålen på skjermen horisontalt som ved A-mode, men vertikalt. I stedet for topper på en linje, fremstilles ekkoet som et punkt med lysstyrke som er proporsjonal med ekkoets styrke. Det betyr at punktene på skjermen blir svarte der det ikke er noe ekko, og at de blir hvite hvis det kommer et kraftig ekko. I stedet for å tegne en ny linje ved hver nye impuls, flytter linjen som beveger seg vertikalt litt til høyre på skjermen. Strukturer som ikke beveger seg gir da opphav til rette, horisontale linjer på skjermen, mens strukturer i bevegelse gir linjer som beveger seg opp og ned i sitt forløp fra venstre mot høyre.

B-MODE

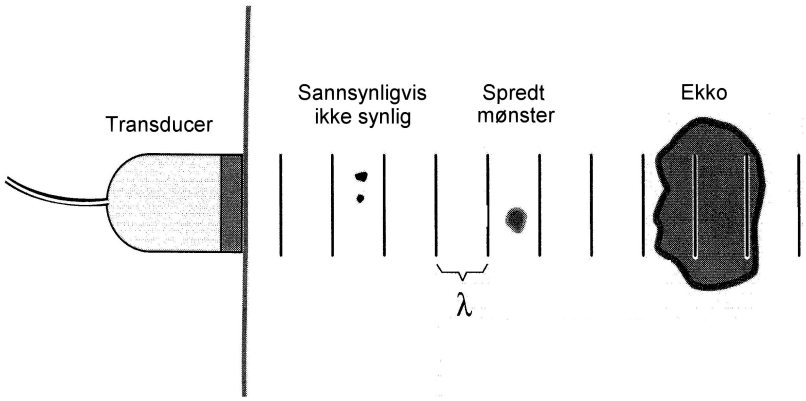
B står for *Brightness modulation* og er den vanligste typen ultralydundersøkelse. På samme måte som CT fremstiller B-mode et *snitt* av vevet, ikke bare en linje. Ved B-mode flyttes strålen systematisk gjennom vevet og hvert ekko fremstilles som et punkt med ulik lysstyrke på samme måte som ved M-mode.

Strålen styres elektronisk av ultralydapparatet og sveiper frem og tilbake opptil flere titalls ganger i sekundet. Avhengig av hvor strålen er til enhver tid, tegner computeren en tilsvarende linje av punkter med ulik lysstyrke på skjermen.

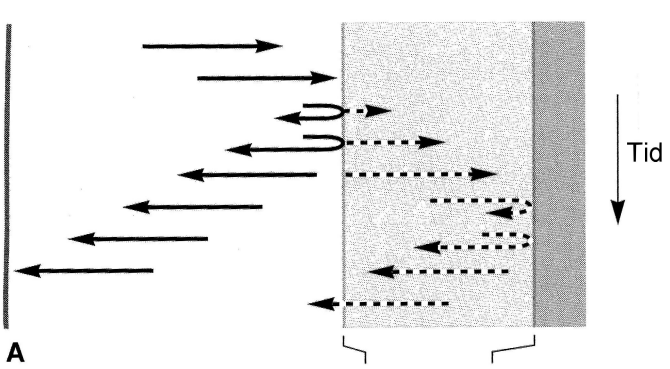
Bildets *laterale oppløsning* er avhengig av den tomografiske tykkelsen på skiven som blir fremstilt. Dette avhenger blant annet av bredden på den fokuserte ultralydstrålen i vevet.

Den *aksiale oppløsningen* avgjøres av pulsfrekvensen og varigheten av pulsene.

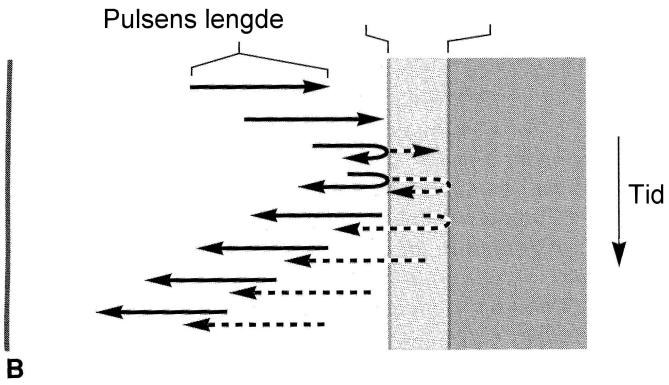
Jo høyere pulsfrekvens, desto kortere bølgelengde. Ved lydhastighet 1540 m/s blir bølgelengden ved 1 MHz 1,54 millimeter og ved 10 MHz 0,15 millimeter. For å få et ekko må strålen treffe objekter som er større enn 1 bølgelengde. Dette er grunnen til at en 10 MHz transducer gir et mer detaljrikt bilde enn en transducer på for eksempel 4 MHz.



Den aksiale oppløsningen blir også begrenset av pulslengden. For at ultralydapparatet skal kunne oppfatte forskjell på to overflater, må avstanden mellom disse være lengre enn halvparten av den avstanden lyden beveger seg i løpet av en puls.



Når avstanden mellom de to overflatene er større enn en halv pulslengde, kan mottakeren registrere to ekko. Først kommer ekkoet fra den ene overflaten, deretter kommer ekkoet fra den andre (figur A).



Når avstanden blir mindre enn en halv pulslengde, kommer ekkoet fra overflate 2 så tidlig at det blandes med ekkoet fra overflate 1 og det blir ikke mulig for mottakeren å skille de to ekkoene fra hverandre (figur B).

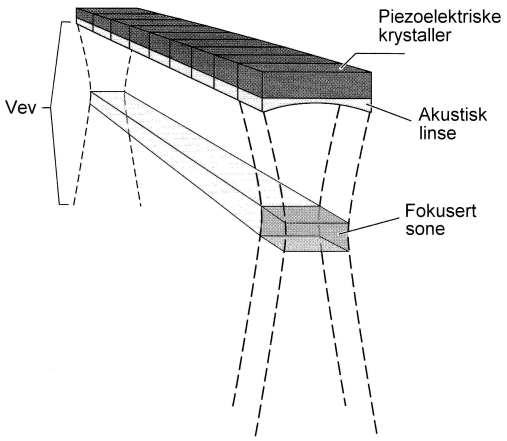
Høyfrekvente signaler dempes raskere i vevet enn lavfrekvente. På samme måte som bassen fra stereoanlegget kan høres ned til naboen i underetasjen, har ultralyd med lav frekvens større evne til å trenge dypt ned i vevet enn høyfrekvent ultralyd. Derfor blir valget av transducerens frekvens et kompromiss mellom ønsket om fin detaljoppløsning (høy frekvens) og evne til dyp penetrasjon i vevet (lav frekvens).

Ved vanlig abdominal ultralyd er pulslengden oftest i størrelsesorden 1 μs hvilket tilsvarer en avstand i vevet på 1,5 millimeter.

For å produsere et bilde i B-mode kan man bruke en transducer som raskt vipper det piezoelektriske krystallet frem og tilbake slik at vevet dekkes i en vifteform. Ved at ultralydapparatet hele tiden har informasjon om vinkelen til krystallet, kan computeren konstruere et bilde av et snitt gjennom vevet.

Moderne transducere har ingen bevegelige deler, men består i stedet av en rekke mange små piezoelektriske krystaller som står tett ved siden av hverandre. Hvis bare ett av disse krystallene sendte ut en impuls, ville det dannes sfæriske bølger i vevet. Men hvis alle krystallene sendte ut en impuls samtidig, ville det dannes en bølgefront i følge *Huygens prinsipp*.

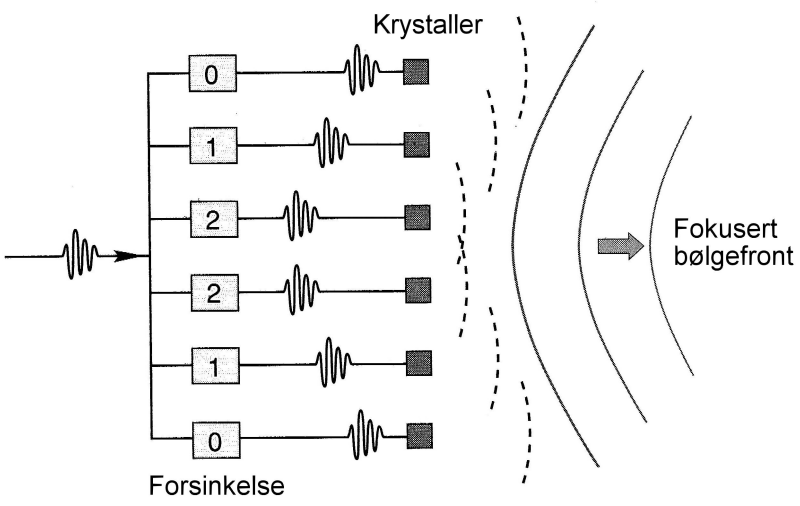
Ved å sende ut impulser fra de enkelte krystallene med en liten forsinkelse mellom dem, kan man styre bølgefronten i den retningen man vil. På denne måten kan man elektronisk styre ultralydstrålen uten å bevege selve krystallene.



Ved å plassere en *akustisk linse* foran raden med krystaller, kan strålen fokuseres slik at den blir smalere i det området man ønsker å fremstille.

På denne måten reduseres tykkelsen på ”skiven” av ultralyd som sendes ut og som det mottas ekko fra, og den laterale oppløsningen øker.

Strålen kan også fokuseres elektronisk innenfor planet av den tomografiske skiven.



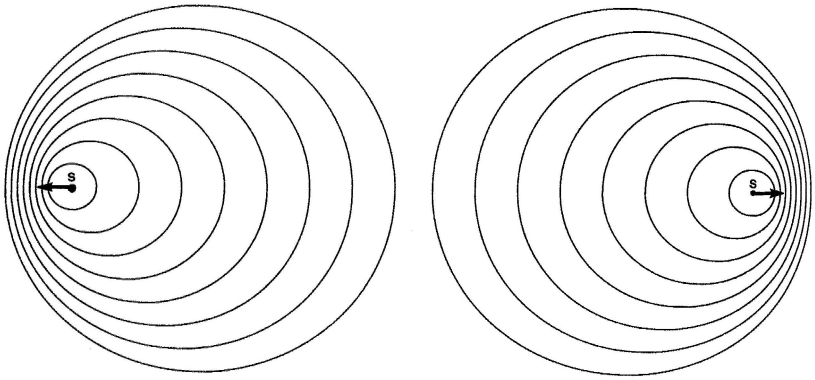
Først sendes en impuls ut samtidig fra det øverste og nederste krystallet. Et kort øyeblikk senere sendes tilsvarende signal ut fra det nest øverste og nest nederste krystallet og så videre. På denne måten får man dannet en konkav bølgefront som har et fokus bestemt av hvor skarp krumning bølgefronten har.

Ved å endre forsinkelsen mellom de ulike krystallene, kan man elektronisk forflytte fokusets avstand fra transduceren. Dette danner grunnlaget for at vi med moderne ultralydapparater selv kan stille inn både hvor vi vil at strålen skal fokusere, og hvor mange fokus vi vil ha.

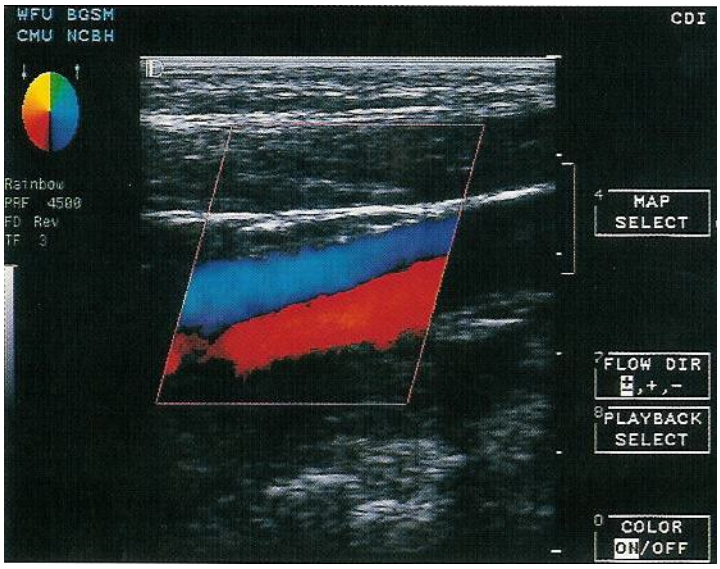
DOPPLER

Når et tog kjører forbi, hører man at frekvensen på lyden faller idet toget passerer. Det er dette fenomenet som kalles Doppler-effekten.

Doppler-effekten er en direkte konsekvens av lydens bølgenatur. Hvis lydkilden beveger seg mot mottakeren, vil antallet lydbølger som når frem til mottakeren per sekund øke. Dette oppfattes som økt frekvens. Når lydkilden beveger seg vekk fra mottakeren, reduseres antallet bølger som når frem til mottakeren per sekund, altså en reduksjon i frekvensen.



Det samme fenomenet utnyttes ved ultralyddiagnostikk. Ved å sende ultralyd med en kjent frekvens mot et vev i bevegelse (for eksempel røde blodlegemer), vil impulsene som reflekteres ha høyere frekvens når vevet beveger seg mot transduceren, og lavere frekvens når vevet beveger seg bort.



Ved fargedoppler kan denne forskjellen i frekvens fremstilles med en farge som projiseres over det todimensjonale B-mode bildet.

Ulike nyanser av rødt visualiserer bevegelse i en retning mens blått viser bevegelse i motsatt retning.

S Weum 14.02.2002