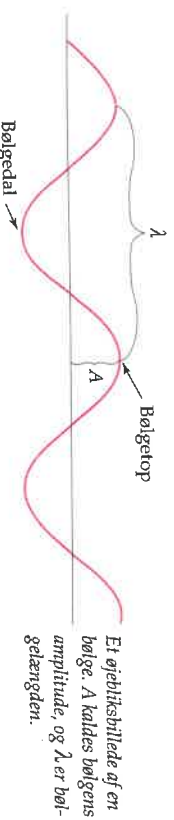


1 Bølgetyper



Bølgebevægelse er et almindeligt fænomen i naturen. Vi kender bl.a. lyd, lys, vandbølger, bølger på en streng (f.eks. på en guitarstreng) og jordskælvsbølger. Vi kan beskrive en bølge ved hjælp af *amplitude*, *frekvens*, *periode*, *bølgelængde* og *hastighed*.



En bølge med bølgelængden λ og frekvensen f bevæger sig med hastigheden v givet ved:

$$v = \lambda \cdot f$$

Sammenhængen mellem bølgens frekvens f og periode T er:

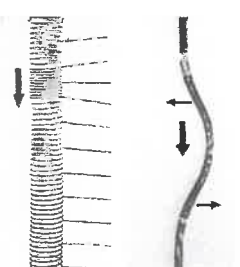
$$f = \frac{1}{T}$$

Bølgerne udbreder sig i forskellige medier som f.eks. vand, luft og faste stoffer. Elektromagnetiske bølger kan desuden udbrede sig i vakuum (lufttomt rum). Bølger giver også anledning til fænomener som interferens og stående bølger. Det skal vi se nærmere på i det følgende.

Vi skelner mellem to typer bølger: *tværbølger* og *længdebølger*.

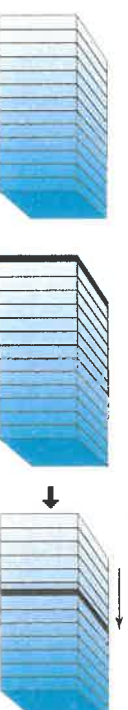
Tværbølger (eller *transversalbølger*): Svingningerne sker vinkelret på bølgens udbredelsesretning. Som eksempel kan vi nævne lys og bølger på en streng (snorbølger).

Længdebølger (longitudinalbølger): Svingningerne sker langs udbredelsesretningen. Som eksempel kan vi nævne fjeder- og lydbølger.

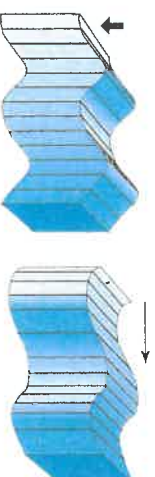


Jordskælv kan udbrede sig både som længde- og tværbølger. Man taler om P-, S- og L-bølger.

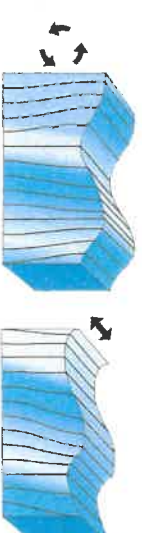
P-bølge



S-bølge



L-bølge

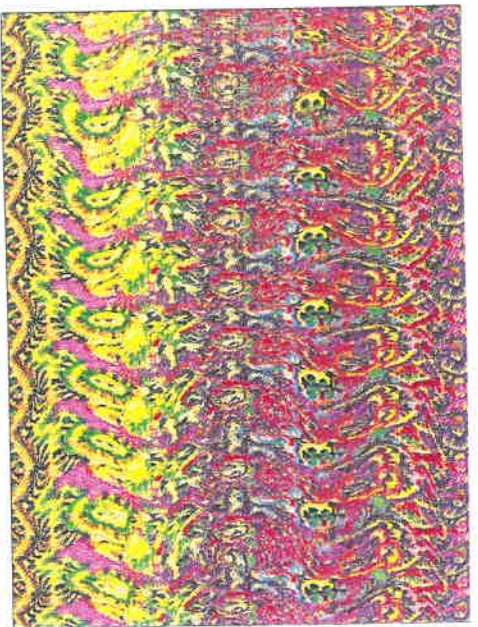


Rayleigh-bølge

Love-bølge

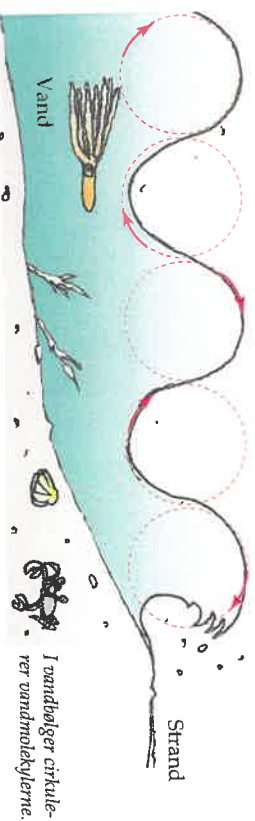
Der findes tre forskellige jordskælvsbølger: P-, S- og L-bølger.

P-bølger (primærbølger) er længdebølger, S-bølger (sekundærbølger) er tværbølger og L-bølger (Love- eller Rayleigh-bølger) er overfladebølger, der udbreder langs jordoverfladen som en kombination af længde- og tværbølger.



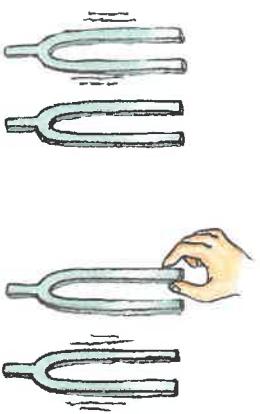
Stereogrammet viser en vandbølge (ringbølge). Start med at holde billedet tæt ved næsen. Lad øjet slippe af, og forsøg at "kigge gennem billedet". Bølgebilledet langsomt væk fra ansigtet. Lige pludselig dukker der et 3-dimensionalt motiv op. NB! Ikke alle mennesker er i stand til at se det "gænte" billede.

Vandbølger er en blanding af tværbølger og længdebølger, idet vandmolekylerne cirkulerer, når bølgen "ruller" frem. Hvis man under badning dykker ned i en bølge, bliver man først trukket ned og ind i bølgen (understrømmen). Derefter bliver man trukket op mod bølgetoppen på dens bagside.



Når bølgerne er tæt på kysten, er bølgenes friktion mod havbunden stor. Der sker så en omsætning af bølgeenergi til indre energi.

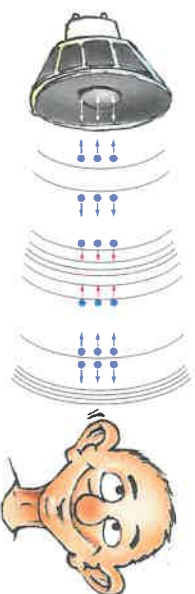
Når bølger udbreder sig i et stof, sker det, uden at stoffet bliver transporteret med bølgen. Det er energien, som bliver ført af stedet med bølgen.



På figuren ser vi to stemmegaffler. Sætter vi f.eks. kun den ene i svingninger og standser den igen efter et øjeblik, vil vi høre, at den anden stemmegaffel svinger. Dette viser, at lydbølgerne åbentbart transporterer energi. En del af svingningsenergien i den ene stemmegaffel er med lyden overført til den anden.

2 Lyd

Vi kan beskrive lyd som en bølgebevægelse, der udbreder sig som trykbølger fra en kilde til en modtager. Bølgebevægelsen kan ske gennem luft eller i væsker og faste stoffer. Trykbølgerne fremkommer ved, at de enkelte stofdele kommer i bevægelse, idet områder med fortætninger (lokalt overtryk) og fortyndinger (lokalt undertryk) bevæger sig fra kilden til modtageren.



Selvom lydølgen bevæger sig gennem luften, sker der ingen transport af luftmolekyler, da disse blot bevæger sig frem og tilbage. Trykændringerne er i en størrelsesorden på 10^{-3} Pa (luftens størrelsesorden ved jordoverfladen er $1,013 \cdot 10^5$ Pa = 101,3 kPa).

Selv ved de højeste lydstyrker bevæger de enkelte luftmolekyler sig kun i en størrelsesorden på 10^{-5} m frem og tilbage. Trykændringerne er heller ikke særligt store sammenlignet med luftens normaltryk ved jordoverfladen.

Lydens hastighed v_{lyd} i luft afhænger af luftens temperatur T , idet det gælder at

$$v_{\text{lyd}} = 331 \cdot \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \text{ m/s}$$

hvor T er den absolutte temperatur.

Ved en temperatur på f.eks. 293 K (20 °C) bliver lydens hastighed 343 m/s. Lyden kan som tidligere nævnt også forplante sig i væsker eller faste stoffer, men her er lydens hastighed langt større end i gasser. Nedenstående tabel viser lydens hastighed i forskellige medier.

STOF	luft ved 20 °C	CO ₂ ved 20 °C	vand ved 20 °C	træ (eg)	jern
v_{lyd} i m/s	343	268	1482	4100	5190

Når lyd udbreder sig i faste stoffer, sker udbredelsen ikke kun som længdebølger, men også som tværbølger.

Ved temperaturen 20 °C bevæger lyden sig i luft med hastigheden $v_{\text{lyd}} = 343$ m/s. Det betyder, at lyden i løbet af 1 s har bevæget sig en strækning på 343 m, og at lyden i løbet af 2 s har bevæget sig en strækning på 686 m. Vi har derfor, at når lyden bevæger sig en strækning s i løbet af tiden t , så er hastigheden v givet ved:

$$\text{hastighed} = \frac{\text{strækning}}{\text{tid}} \quad \text{eller} \quad v = \frac{s}{t}$$

4 Lydstyrke

En bølge transporterer energi uden at transportere stof. Kaster vi f.eks. en prop i vandet, ser vi, at den bevæger sig op og ned, men den bliver ikke skubbet frem af bølgerne.

En lydbølge overfører energi fra afsenderen til modtageren. Bliver energien udsendt i alle retninger, som f.eks. lyden fra en kirkeklokke, bliver den spredt over en kugleoverflade med voksende areal.

Bølgeenergien udsendes med effekten P_0 fra en klokke. Lydintensiteten I i afstanden r fra klokken er givet ved:

$$I = \frac{P_0}{A} = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$



Dette gælder, hvis der ikke sker en absorption af lyden. Intensiteten aftager altså med kvadratet på afstanden.

Det menneskelige øre kan opfatte lyd med meget lav intensitet, men øret er ikke lige følsomt ved alle frekvenser. Øret kan normalt høre frekvenser mellem 10 Hz og 20 kHz, og det er mest følsomt omkring 2-3 kHz. Her kan man høre lyde med en intensitet på ned til ca. $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Denne værdi kaldes *høretærsklen*. Den kraftigste lyd, man kan tåle at høre i kortere tid, inden hørelsen tager skade, har intensiteter på $I_{\text{max}} = 100 \text{ W/m}^2$. Denne værdi kaldes *smerte-grænsen*.

Det lydindtryk, som vi opfatter med vores ører, ændres ikke lineært med lydintensiteten. Høresansen er, som mange af kroppens øvrige sanser, logaritmisk afhængig af sansepåvirkningen. Det betyder f.eks., at en fordobling af lydintensiteten ikke medfører en fordobling af lydindtrykket. Ved måling af lydindtryk eller *lydstyrke* benytter vi enheden *bel* (B) eller *decibel* (dB). Denne enhed er opkaldt efter den amerikanske opfinder Graham Bell.

Ø9.5 En lydgiver har effekten $P_0 = 50 \text{ W}$. I afstanden $r = 10 \text{ m}$ er lydintensiteten I givet ved

$$I = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{50 \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (10 \text{ m})^2} = 0,040 \text{ W/m}^2$$

I afstanden 2,0 m fra en lydgiver er intensiteten $1,5 \text{ W/m}^2$.

Bestem lydgiverens effekt.

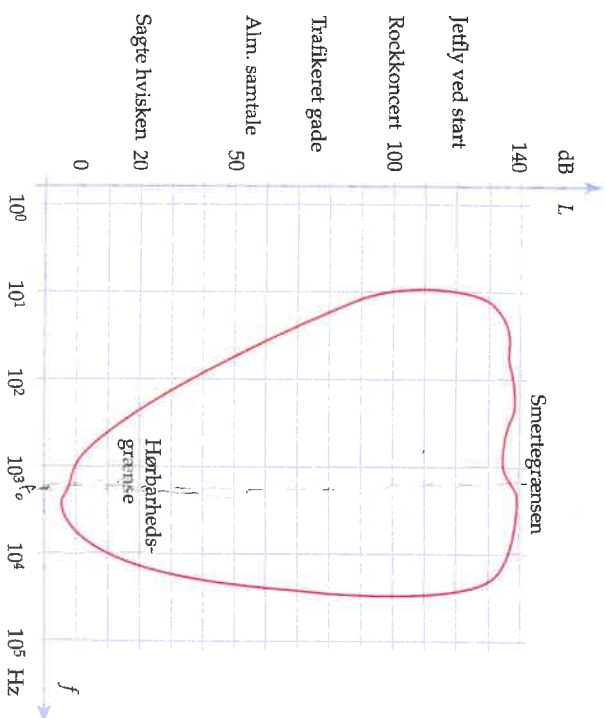
Ø9.11

Lydstyrken L ved lydintensiteten I er defineret som:

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

hvor $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ er høretærsklen.

Figuren herunder viser høreområdet for en person med normal hørelse.



Ø9.6 En person lytter til musik fra en højttaler og modtager lyd med en lydintensitet på $I = 0,00025 \text{ W/m}^2$. Lydstyrken L bliver da:

$$L = 10 \cdot \log \frac{0,00025 \text{ W/m}^2}{1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2} \text{ dB} = 84 \text{ dB}$$

Vi ser, at høretærsklen ($I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$) giver, at lydstyrken

$$L = 10 \cdot \log 1 \text{ dB} = 0 \text{ dB}$$

Er lydintensiteten det dobbelte af høretærsklen ($I = 2 \cdot I_0$) får vi, at

$$L = 10 \cdot \log 2 \text{ dB} = 3,0 \text{ dB}$$

Er lydintensiteten den firefoldede af høretærsklen ($I = 4 \cdot I_0$) får vi, at

$$L = 10 \cdot \log 4 = 6,0 \text{ dB}$$

$$\text{Er } I = 8 \cdot I_0 \text{ får vi, at } L = 9,0 \text{ dB}$$

Dette viser, at hver gang vi fordobler lydens intensitet, vokser lydstyrken med 3,0 dB.

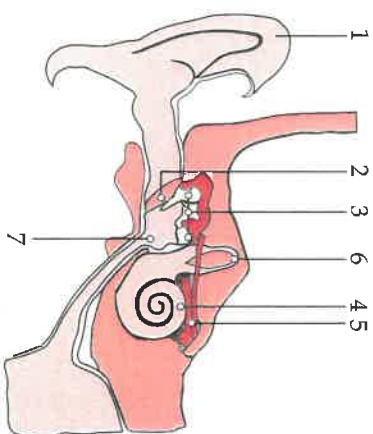
Ø9.13 En opvaskemaskine har en lydstyrke på 48 dB. Bestem den tilsvarende lydintensitet.

Ø9.12 Under en samtale registreres en lydintensitet på $1,58 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$.

Bestem lydstyrken for samtalen.

5 Øret

Øret. Det ydre øre (1) samler lydbølgerne og leder dem til trommehinden (2). Dennes vibrationer overføres via tre ganske små knogler, hammer, ambolt og stigbøjle (3) til sneglen (4). Herfra leder hørerøven (5) til hjernen. Væskebevægelse i sneglen og i balancegangene (6) er ansvarlig for balanceansen. Det eustachiske rør (7) udligner trykket mellem næseskåljet og mellemøret.



Den lyd, som vi til daglig hører, er et broget billede af bølger, med alle mulige frekvenser blandet sammen.

Lyden opfanges af øret og ledes gennem øregangen til trommehinden. Trommehinden er en elastisk membran af bindevæv, der sættes i svingninger. Trommehindens udslag føres videre til det indre øre via knogler, som på grund af deres udseende har fået navnene: hammer, ambolt og stigbøjle. Hammeren er sammenvokset med trommehinden, mens stigbøjlen er fæstnet på en ny membran med navnet "det ovale vindue". Bag dette vindue befinder et konkylieformet væskedyldt organ (snegle) sig. Inde i sneglen ligger der en separat, væskedyldt kanal, hvori høreplassen foregår. Høreplassen foretages af det cortiske organ, som består af en membran med op til 30.000 sanseceller (hårceller). Som tidligere omtalt kan et normalt øre opfatte lyde med frekvenser mellem 10 Hz og 20 kHz, men høreevnen aftager kraftigt med alderen.

Høreevnen kan også blive svækket, hvis man får høreskader. Det kan vise sig på forskellige måder. Det sædvanlige symptom er, at man har meget svært ved at høre svage lyde. De mest alvorlige høreskader er dem, hvor sansecellerne bliver ødelagt af f.eks. impulsstøj. Det kan være legetøj med "knald-effekt", som tilsyneladende ikke frembringer en stor lydstyrke, men det har hos et stort antal børn vist sig at føre til varige høreskader. Virkningen består især i, at forbindelsen mellem sanseceller og membran pludselig bliver afbrudt.

En udbredt lidelse er også tinnitus (øresusen), hvor patienten uden en egentlig ydre årsag hører en bestemt lyd i kortere eller længere tid. Almindeligvis er tinnitus et subjektivt symptom, som kun kan opfattes af patienten selv. Det kan være meget ubehageligt, og nogle mener eksempelvis, at den hollandske maler Vincent van Gogh skar sit ene øre af på grund af tinnitus. Ofte er tinnitus ledsaget af en høreneedsættelse, men forekommer også i for-

bindelse med normal hørelse. Tinnitus' karakter beskrives af patienter som konkyliesusen, kogen, lyden af udstrømmende damp, hyletone, maskinlyd osv., og mange patienter har svært ved at falde i søvn om aftenen. Det har også vist sig, at stress kan øge oplevelsen af tinnitus. Desværre er det ikke muligt at sige noget om varigheden af tinnitus. For nogle patienter går det over i løbet af et par dage, og for andre varer det resten af livet! Behandlingsmulighederne ved mange former for tinnitus er små, men der findes apparater, der i nogle tilfælde kan hjælpe plagede patienter. Apparatene udsender en hyletone, der kan snyde hjernen, så det i nogle tilfælde er muligt at mindske tinnitusfølelsen.

Ekspiment

Øret og hørelsen

Undersøg høreområdet, lydindtryk og lydhøret, måling af retningsbestemmelse mm.

#391



Ø914 Det ydre øre består af øregangen, der er lukket af trommehinden i den anden ende. Lydteknisk minder øregangen om et halvdøbt resonansrør med en længde på ca. 3,5 cm. Bestem resonansfrekvensen og sammenlign med hørekurven side 243.

Ved samble over en afstand på 2 m er lydstyrken i gennemsnit 60 dB. Bestem den gennemsnitlige lydstyrke ved samtalen. Hvor langt væk kan man høre samtalen?

Ø916

Ø915 Trommehinden brister ved en lydstyrke på 180 dB. Beregn den tilsvarende lydstyrke.

