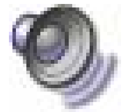
INF1040 - Digital representasjon
24.09.2008: Introduksjon til lyd



- **Foreleser:**
  - Fritz Albregtsen
  - Kontakt: fritz@ifi.uio.no, 911 63 005
- **Det blir en del stoff per forelesning**
  - Er det matematikk eller praktisk regning?
- **Gå på terminalstuegruppene**
  - Gjør hederlige forsøk på å løse ukeoppgavene
- **Gå på plenumsgruppene og få**
  - Alternativ gjennomgang av teori, eksempler, gjennomgang av løsningsforslag etc
- **Still spørsmål! Spør gruppelærerne om hjelp!**

fritz@ifi.uio.no

Introduksjon til lyd

Temaer i dag:

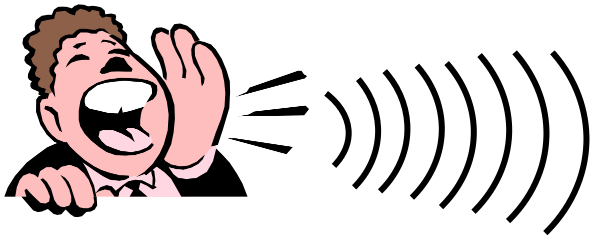
- Hvordan kan vi høre lyd?
- Lyd og lydbølger
- Begrepene amplitude, frekvens, periode og bølgelengde
- Hvordan representerer vi lydsignaler matematisk?
- Hvordan illustrerer vi lydsignaler grafisk?

Tilhørende tekst fra læreboka "Digital representasjon":

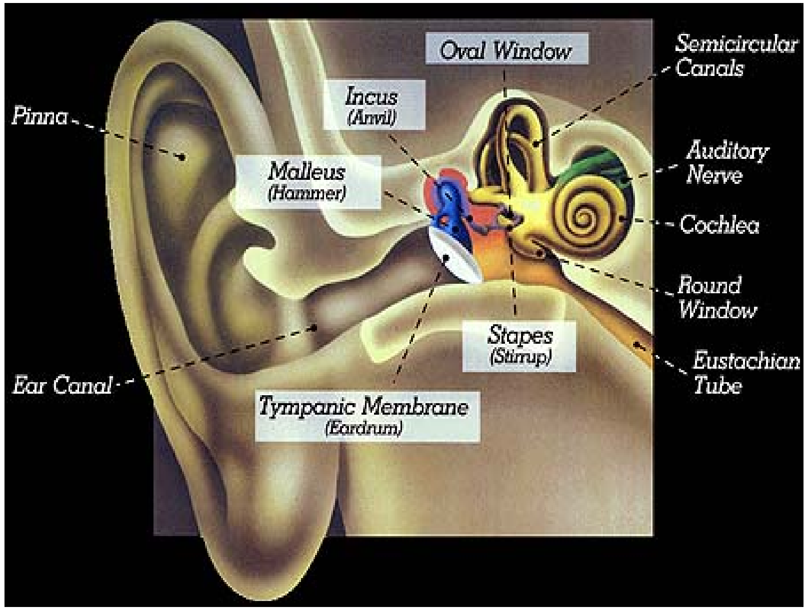
- Kapittel 9: Hørselen – hvordan virker den?
- Kapittel 10: Lydbølger – hvordan ser de ut?

Fra lydbølger til nerveimpulser

- Lydbølger detekteres av øret, omformes til nerveimpulser, og disse sendes til høresenteret i hjernen.



Trykkbølger



Trykkbølgene omdannes til nervesignaler.

- Øret har tre deler:
  - Det ytre øret
  - Mellomøret
  - Det indre øre

Mer på f.eks. http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/mmedia/waves/edl.html

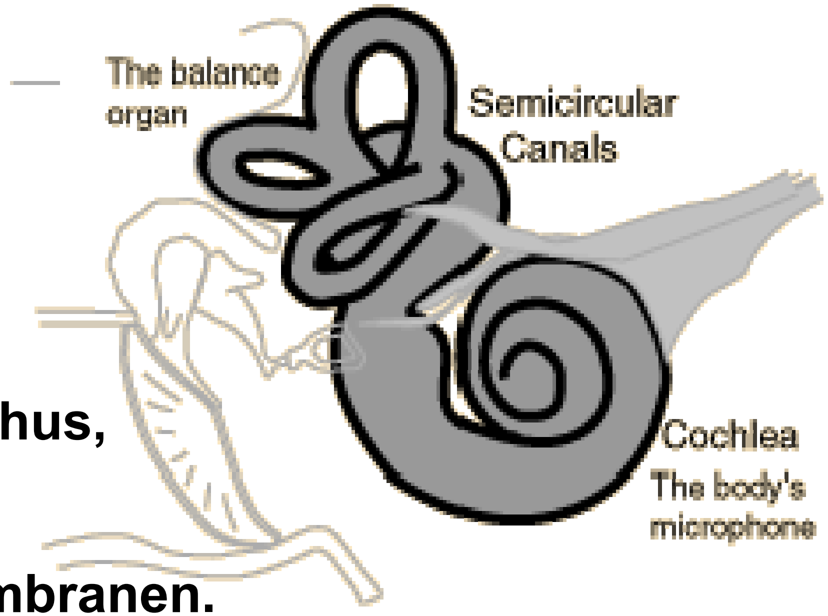
Det ytre øret

- **Det ytre øret fanger opp lydbølger og sender dem innover i ørekanalen, der de får trommehinna til å vibrere.**
- **Det ytre øret øker lyd-sensitiviteten med en faktor 2 – 3.**
- **Resonans i øregangen øker følsomheten for lyder ved 3 000 – 4 000 Hz.**
  - **Dette er viktig for oppfattelse av tale.**

Mellomøret

- Trommehinna er en membran som beskytter hørselssystemet, men som vibrerer i takt med lydbølgene som treffer øret.
- Lyden forplanter seg videre gjennom mellomøret via hammeren, ambolten og stigbøylen.
- Stigbøylen er festet til "det ovale vindu", som danner overgangen til det indre øre.
- Trommehinna er ca 15 ganger større enn det ovale vindu => 15 ganger forsterkning.
- Hammeren, ambolten og stigbøylen fungerer som vektstenger som forsterker svingningene med opptil en faktor 3.
- Vektstangsystemet er adaptivt: Demper altfor sterke svingninger.

Det indre øret

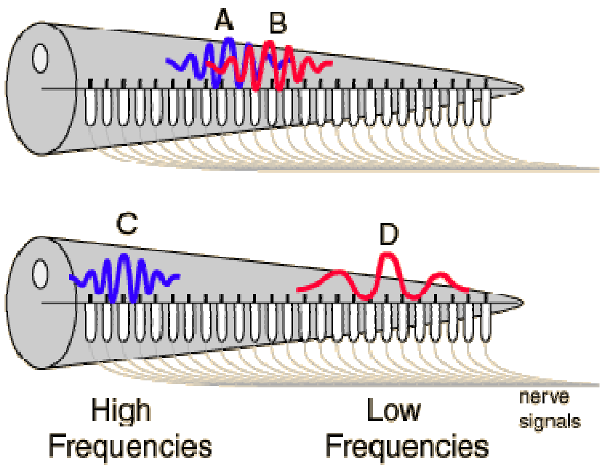


- I det indre øre finnes to organer: balanseorganet og cochlea, som er kroppens mikrofon.
- Cochlea er formet som et sneglehus, og er delt i tre parallelle kanaler.
- I den midterste ligger basilarmembranen.
- Her sitter 16 000 – 20 000 hårceller som registrerer lyd med forskjellige frekvenser. Hver hårcelle har flere hår.
- Vibrasjonene fra trykkbølger bøyer hårene, ionekanaler i bunnen av cellene åpnes, og en liten strømpuls sendes langs en nervefiber.

Hårceller

- Hårceller på forskjellige steder langs membranen reagerer på lyd med forskjellig frekvens.
  - Høyfrekvente lyder registreres langt ute i sneglehuset.
  - Bass-lyder registreres lenger inne i sneglehuset.
- To toner som er nesten like vil konkurrere om de samme hårcellene.

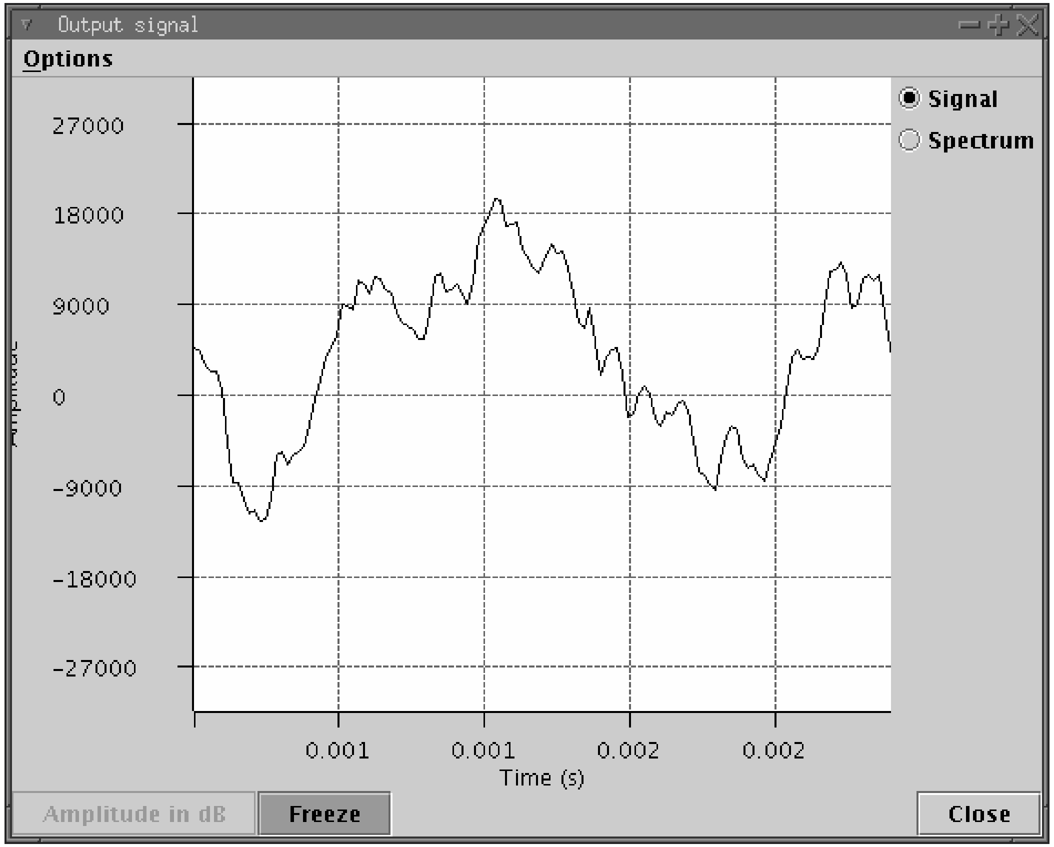
If sounds A, B,C, D are adjusted to have identical loudnesses when sounded alone, then the combination C+D would be expected to sound louder than A+B because C and D are not competing for the same nerve endings in the inner ear.



- De vil ikke høres like sterke ut som hvis de lå lenger fra hverandre.
- Dette utnyttes i kompakt lagring av lyd (for eksempel mp3).
- Hvis hårceller for en gitt frekvens knekker (pga for høy lyd) er hørselen på denne frekvensen svekket eller tapt for alltid.

  Se f.eks. http://facstaff.uww.edu/bradleys/radio/hlsimulation/

Lyd som en funksjon av tid



lyd1.wav

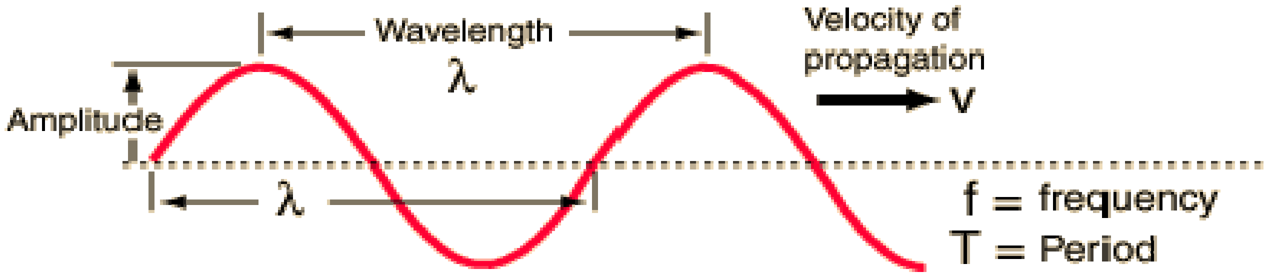
Her ser vi hvordan lydstyrken eller amplituden endrer seg med tiden
Legg merke til hvor raskt signalet endrer seg (millisekunder)

Lydens svingninger - frekvens

- Hvordan lyden høres ut, avhenger av hvor raske svingninger den inneholder.
- Antall svingninger per sekund er frekvensen til en tone.
  - Frekvensen til en tone måles i Hz (≡ s^{-1})
- Vi hører lydbølger
  - som svinger mellom 20 ganger per sekund og 20 000 ganger per sekund
  - høreterskelen er bare 2/10 000 000 000 av standard atmosfærisk trykk
  - Smerteterskelen svarer til en lydintensitet som er
    10 000 000 000 000 =10^{13} ganger høreterskelen.
- Hørselen svekkes med alderen.
  - Svekkelsen er ikke lik for alle frekvenser.
  - De ca 30 000 endepunktene for hørenervene slites / knekker.
- De fleste lyder består av flere rene toner med ulik frekvens.
- Øret er veldig følsomt for forandringer i frekvens (0.3% endring).

Bølgelengde og lydhastighet

- **Bølgelengden** λ er den **fysiske** lengde mellom to punkter på samme sted i svingningen.



- **Hastigheten** til en bølge er lik produktet av bølgelengde og frekvens

$$v = f\lambda$$

(gjelder generelt, både for lydbølger og elektromagnetiske bølger)

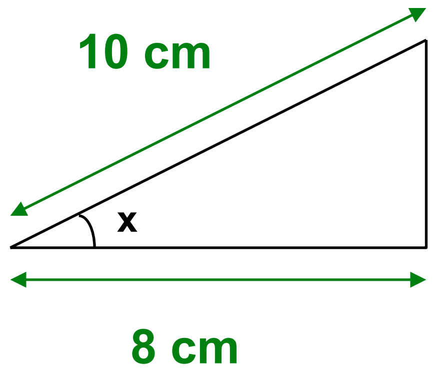
  - Bølgelengden for hørbare lydbølger
    - går fra λ = 17 m for f = 20 Hz til λ = 1,7 cm for f = 20 000 Hz.
  - En A på f = 440 Hz har en bølgelengde på λ = 75 cm, mens en A som er en oktav lavere (f = 220 Hz) har λ = 1,5 m.

Lyd som sinusoider

- Sinusoider er et felles navn på funksjonene cos(x) og sin(x).
- Periodisk signal:
  et periodisk signal gjentar seg etter en viss tid.
- Sinus og cosinus-funksjoner beskriver periodiske signaler.
- De brukes til å forklare hva slags informasjon et lydsignal inneholder.
- Vi trenger å lære litt om sinusoider for å skjønne hvordan lydsignaler lagres.

Funksjonen cos(x)

- cos(x) er kjent fra geometrien for å måle sidene i en trekant.
  Da er x en vinkel som måles i radianer (0 til 2π) eller grader (0-360°).

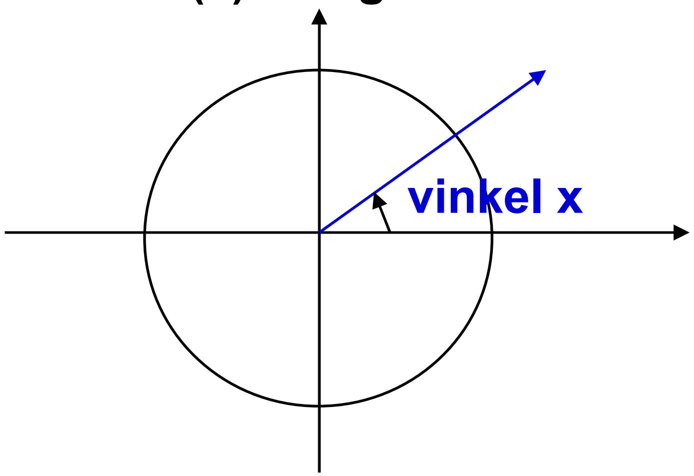


Vinkel x finnes ved at

$$\cos(x) = 8/10$$

Da blir $x = \cos^{-1}(8/10) = 36.8°$

- cos(x) svinger mellom 1 og -1 når x varierer mellom 0 og 2π i radianer.



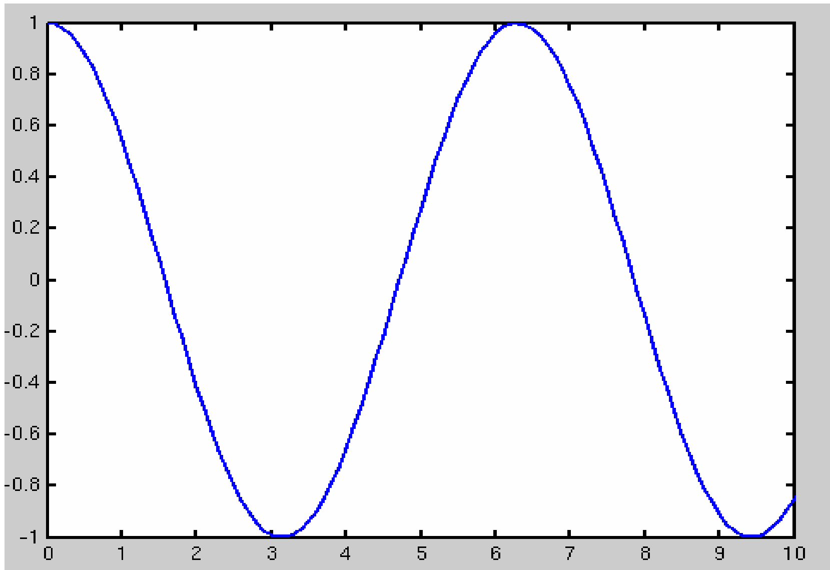
$x = 0$	(0°)	$\cos(x) = 1$
$x = \pi/2$	(90°)	$\cos(x) = 0$
$x = \pi$	(180°)	$\cos(x) = -1$
$x = 3\pi/2$	(270°)	$\cos(x) = 0$
$x = 2\pi$	(360°)	$\cos(x) = 1$

Dette gjentar seg når x roterer en gang til.

Funksjonen cos(x)

- cos(x) svinger mellom 1 og -1 når x varierer mellom 0 og 2π, og den svinger på samme måte når x varierer mellom 2π og 4π.
- Hvis x måles i radianer, og x ligger mellom 0 og 10 ser funksjonen cos(x) slik ut:

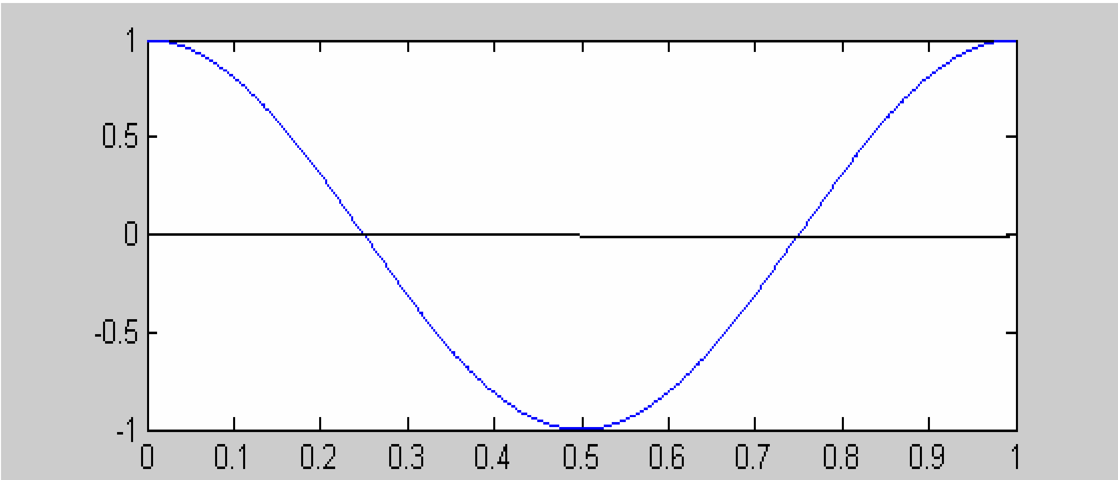
cos(x)



x

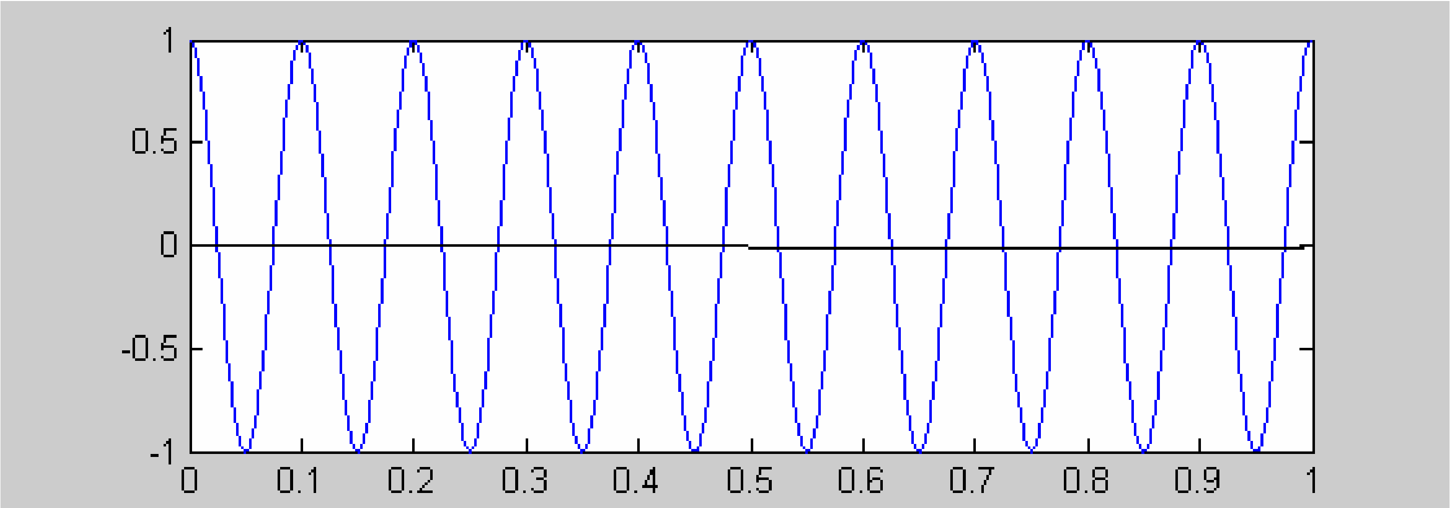
cos(t) for tidssignaler

- Ser på signaler som varierer med tiden t.
- Vi er interessert i antall svingninger pr. sekund.
  - Dette forteller oss frekvensen til signalet.
- Et triks vi bruker er å se på funksjonen $y(t) = \cos(2\pi t)$.
  - Dette gir oss noe som svinger fra 1 til -1 og tilbake til 1 i løpet av 1 sekund.



cos(2πft)

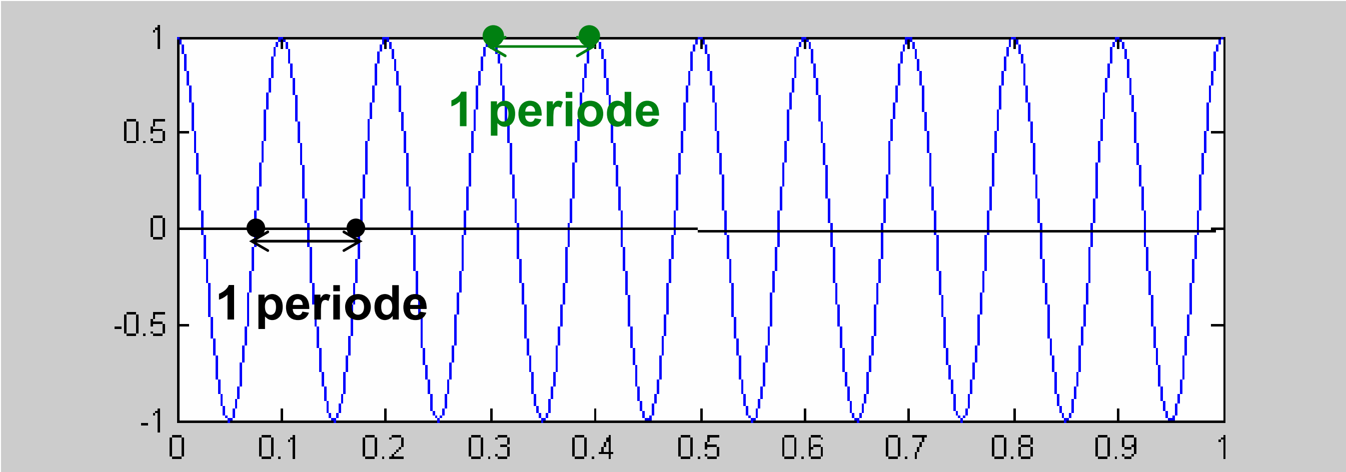
- Ser vi på y = cos(2πft) der f er et heltall (f.eks. 10), får vi noe som svinger f ganger (10 ganger) pr. sekund:



- f er antall svingninger pr. sekund og kalles frekvens.
- Frekvensen f måles i hertz (Hz).
  (1 kHz er 1000 svingninger i sekundet).

Periode

- Funksjonen y=cos(2π10t) gjentar seg selv 10 ganger pr. sekund.

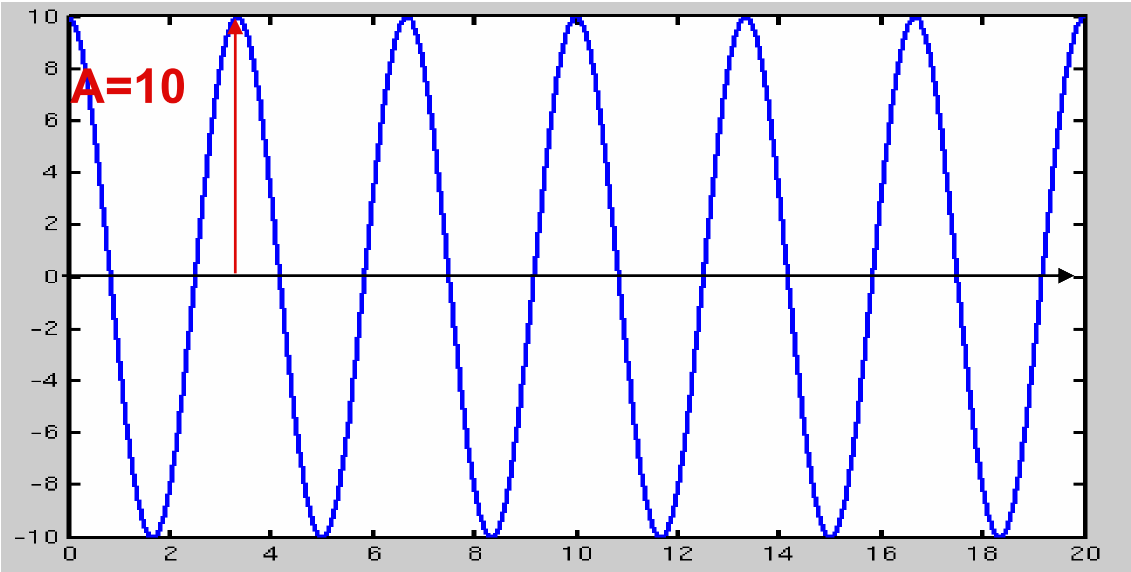


- Perioden kaller vi for T.
- Vi kan regne ut frekvensen som f = 1/T, eller T = 1/f.
- For å finne perioden ser vi på avstanden i sekunder mellom to punkter på samme sted i svingningen, for eksempel der funksjoner går fra negative til positive verdier (krysser null).
- Her kan vi måle at avstanden, dvs. perioden er 0.1 sekund.

Amplitude

Amplituden forteller hvor stort det maksimale trykk-utslaget er.

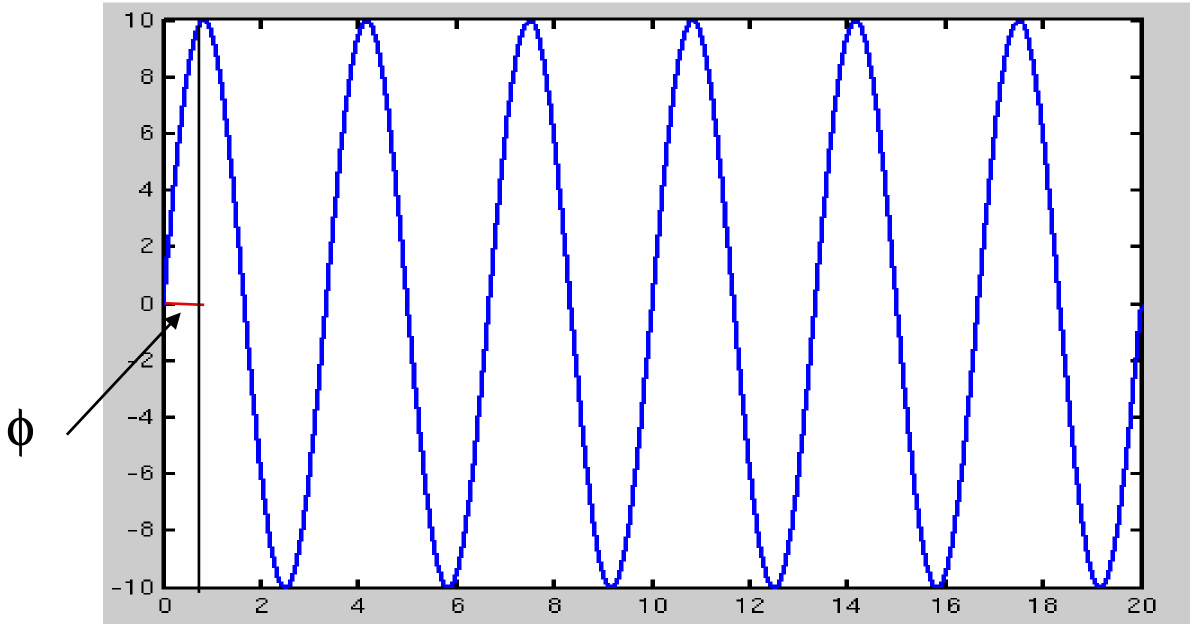
$$y(t) = A \cos(2\pi f_0 t)$$



Amplituden A til en cosinus-funksjon er maksimumsverdien funksjonen kan ha.

Faseforskyvning (bare for de viderekomne)

Vi ser på funksjonen $y(t) = A\cos(2\pi f_0 t + \phi)$

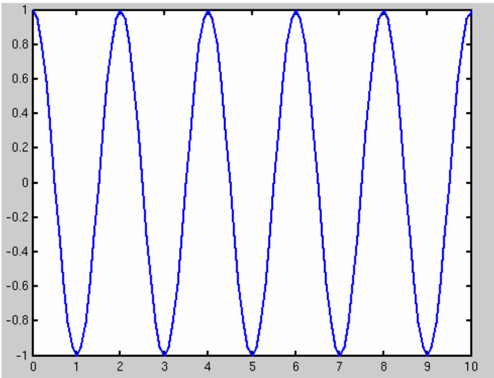


Sammenligner med funksjonen $y(t) = A\cos(2\pi f0t)$
Ser at vi har fått en forskyvning med et beløp ϕ
(startpunktet er forskjellig fra 0)

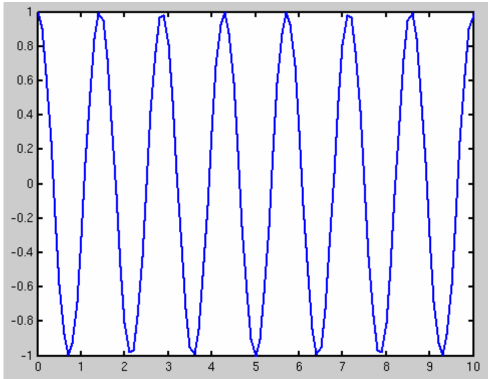
ϕ kalles "faseforskyvning"

Frekvens til cosinussignaler

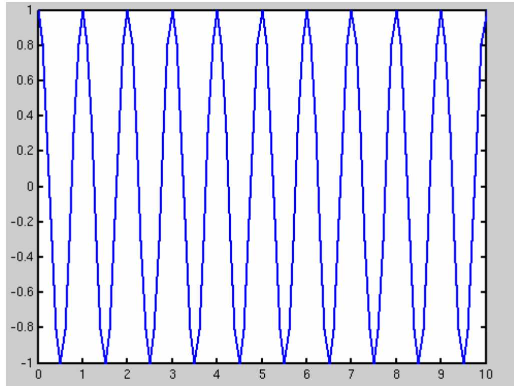
- Vi ser på $y(t) = A \cos(2\pi f_0 t)$
  - t er tiden
  - f_0 er frekvensen:



$\cos(2\pi*0.5*t)$
$f_0=0.5$



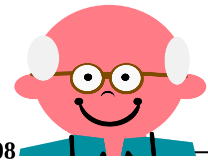
$\cos(2\pi*0.7*t)$
$f_0=0.7$



$\cos(2\pi t)$
$f_0=1$

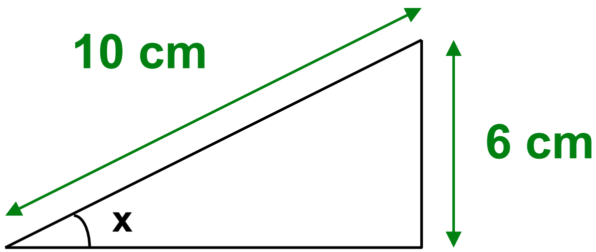
Høy frekvens: signalet varierer fort

Lav frekvens: signalet varierer langsomt



Funksjonen sin(x)

- sin(x) er kjent fra geometrien for å måle sidene i en trekant. Da er x en vinkel som måles i radianer (0 til 2π) eller grader (0-360°).

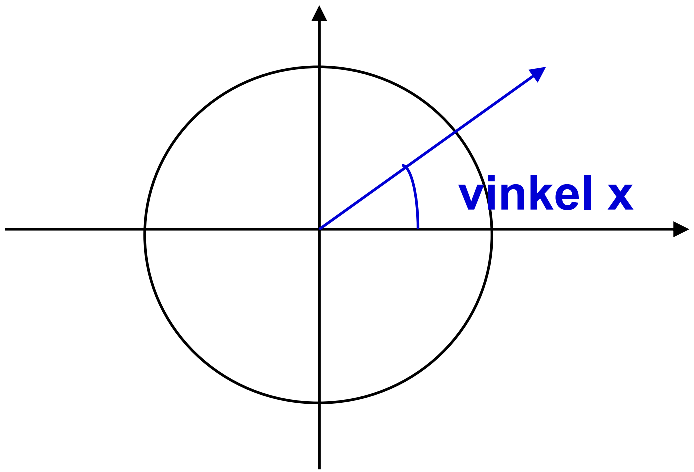


Vinkel x finnes ved at

$$\sin(x) = 6/10$$

Da blir $x = \sin^{-1}(6/10) = 36.8°$

- sin(x) svinger fra 0 til 1 til 0 til -1 til 0
  når x varierer mellom 0 og 2π i radianer.

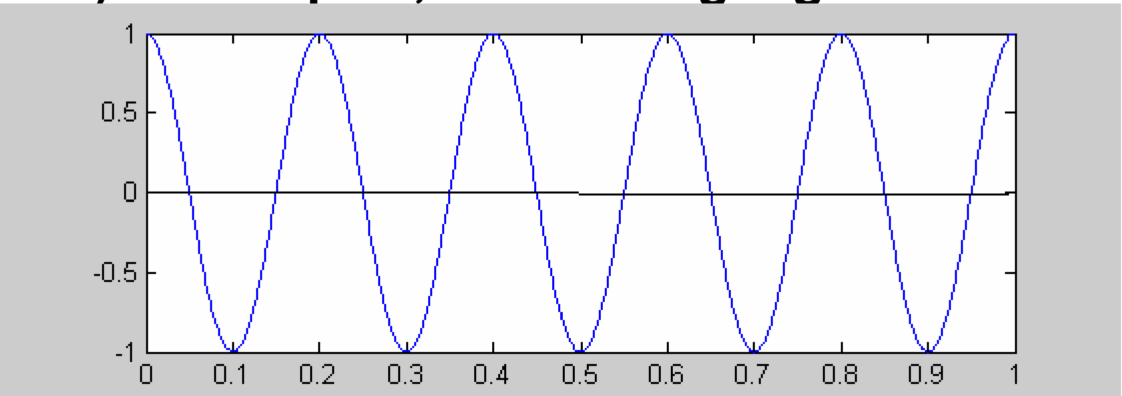


$x = 0$	(0°)	$\sin(x) = 0$
$x = \pi/2$	(90°)	$\sin(x) = 1$
$x = \pi$	(180°)	$\sin(x) = 0$
$x = 3\pi/2$	(270°)	$\sin(x) = -1$
$x = 2\pi$	(360°)	$\sin(x) = 0$

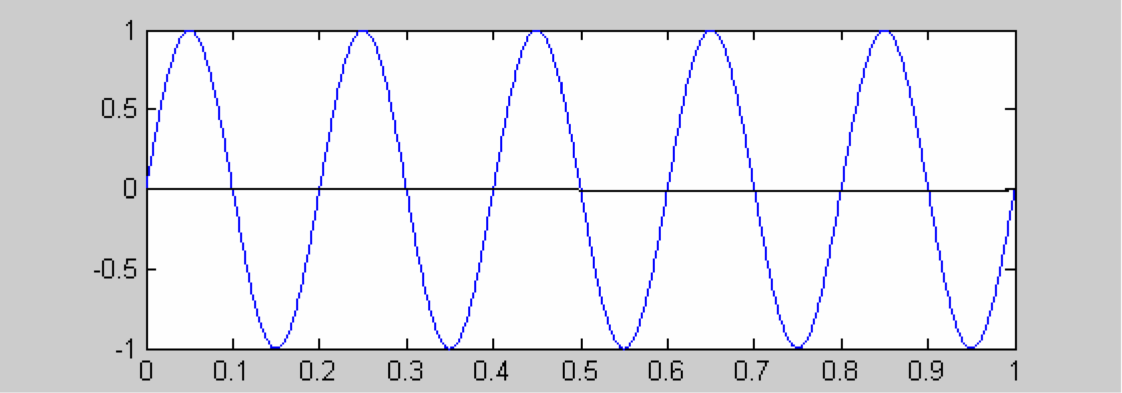
Dette gjentar seg når x roterer en gang til.

Hva er forskjellen på sin(2πft) og cos(2πft)?

- cos(2π5t) starter på 1, varierer 5 ganger i sekundet.



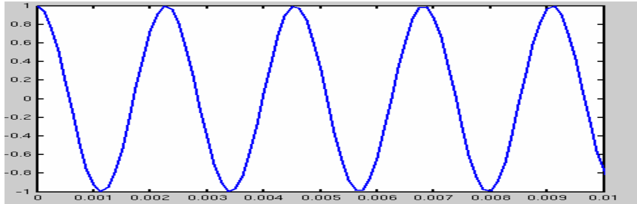
- sin(2π5t) starter på 0, varierer 5 ganger i sekundet.



Bare startpunktet, dvs. faseforskyvningen, er forskjellig.

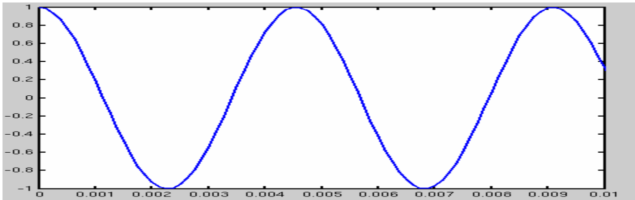
Lyd fra cosinuser

- En kammertone (A) har frekvens på 440 Hz:



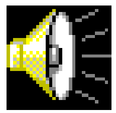
lyd3.wav

- En A som er en oktav lavere har halvparten så høy frekvens: 220 Hz



lyd4.wav

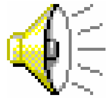
- I den tempererte tolvtoneskalaen:
  - Det er et konstant frekvensforhold mellom nabotoner
  - Vi får neste halvtone ved å multiplisere frekvensen med k = $2^{(1/12)}$
  - Frekvensen for en vilkårlig note N er gitt ved
    - $f = 440*(2^{1/12})^{(N-49)}$ der N er tonenr. fra keybord (49 for kammertonen)
    - A-dur skala lages ved N = 37, 39, 41, 42, 44, 46, 48, 49



Sound (OLE2)

Toner og frekvenser

- Tonens lydstyrke bestemmes av dens amplitude.
- Øret vårt hører godt forskjeller i frekvens
  (hvor hurtig en tone med samme styrke svinger),
  og vi hører lett forskjell på ulike toner
  (og om to instrumenter ikke er stemt høres det surt ut).

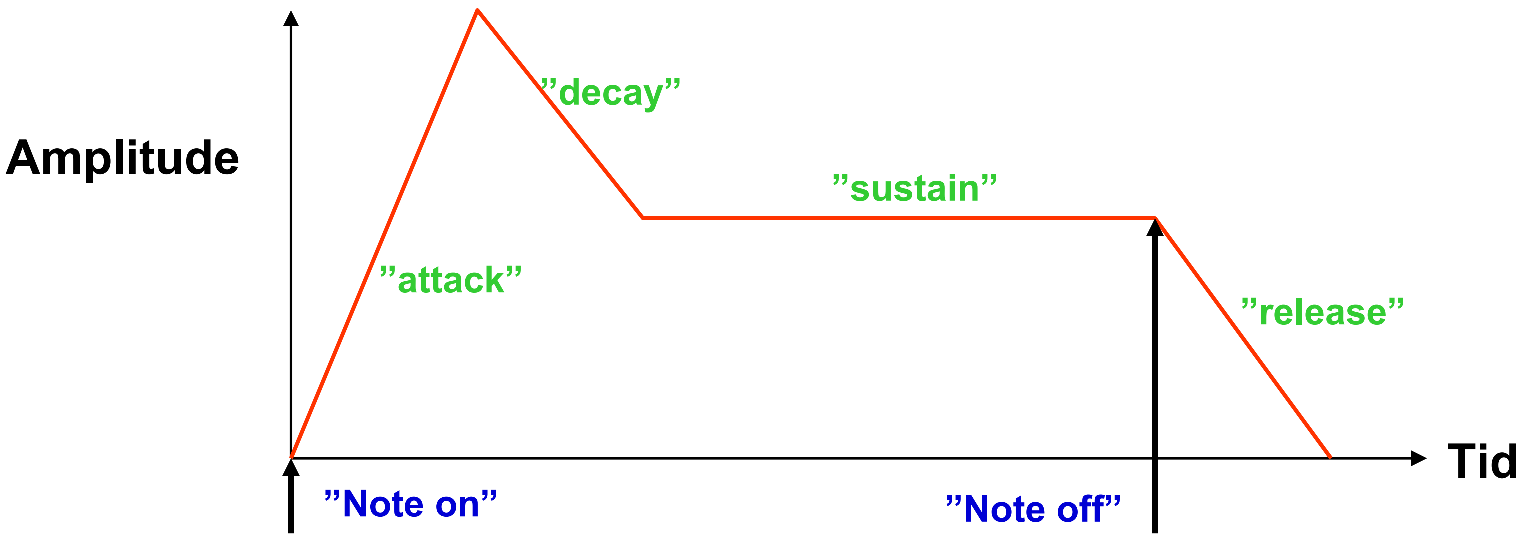


lyd6.wav

- En A på piano og klarinett høres likevel helt forskjellig ut:
  - Tonen har samme frekvens, 440Hz, dvs. de har en bølgeform som gjentar seg 440 ganger i sekundet.
  - Innen hver periode har lyden fra et piano og lyden fra en klarinett ulik kurve.
  - Tonen fra et piano består ikke bare av en ren sinus, men er satt sammen av mange sinuser med ulik frekvens og periode.
  - Ulike instrumenter har også ulik ansats, romklang, etterklang etc.

Forløpet av en tone

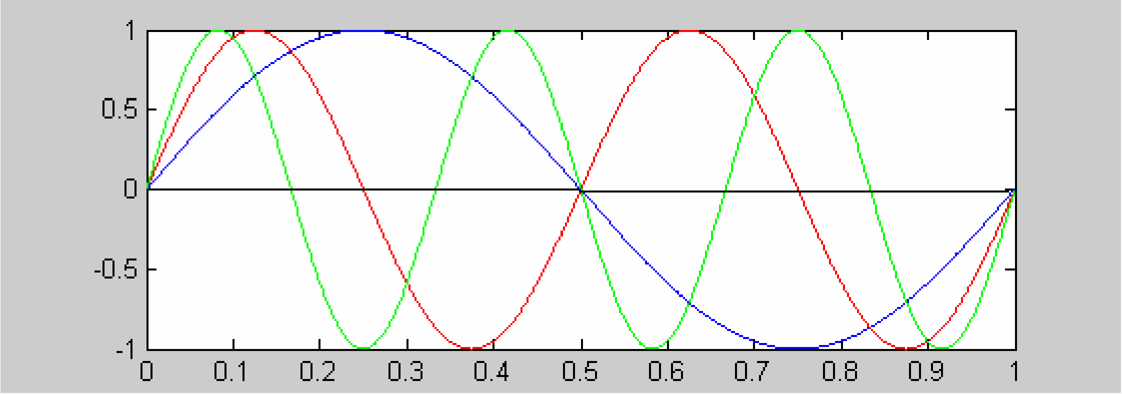
- Det er flere ting som bestemmer forløpet av en tone.
  - Hvilket instrument det er
  - Hvordan man spiller på det
- Lydstyrken er ikke konstant over tid.
- Ved syntetisering av lyd har man flere parametre:



Toner og overtoner

- En tone i musikken består av:
  - en grunntone (fundamental frekvens)
  - overtoner - harmonisk relaterte frekvenser
    (høyere frekvenser satt sammen som k * fundamental frekvens)
    - Grunnfrekvens 1 Hz (sin(2πt)) lyd11.wav
    - 1. harmoniske komponent 2 Hz (sin(2π2t)) lyd12.wav
    - 2. harmoniske komponent 3 Hz (sin(2π3t)) lyd13.wav

lyd14.wav



Hva om vi summerer cosinuser?

- Vi hørte at cos(2*π*300*t) + cos(2*π*500*t) ga oss to toner samtidig.

lyd15.wav

- Hvis vi lager et signal

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(2\pi f_i t)$$

  - A_i er amplituden/styrken til komponent i
  - f_i er frekvensen til komponent i

så kan vi lage mange lyder hvis N er stor.

A-dur treklang
cos(2π220t)+cos(2π292t)+cos(2π330t)

lyd16.wav

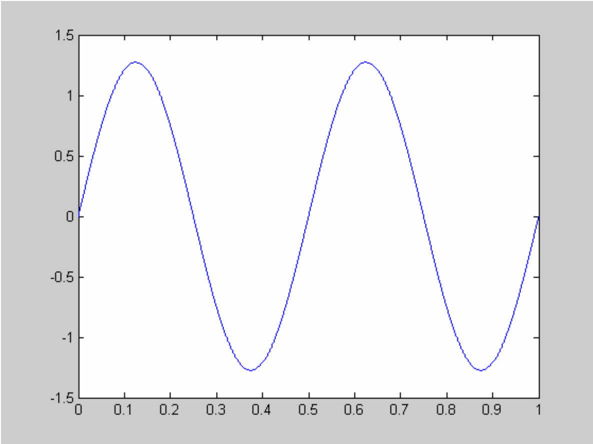
Alle tonene i en skala samtidig

lyd17.wav

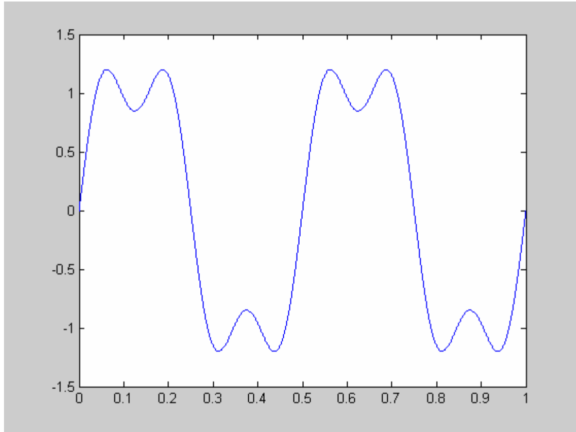
En tone pluss støy
(hvit støy - et jevnt sus av støy på mange frekvenser)

lyd18.wav

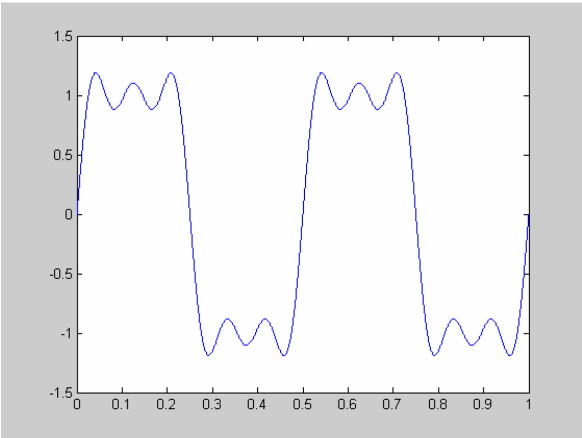
Sum av harmoniske sinus-komponenter



$4/\pi \sin(2\pi ft)$, $f=2$

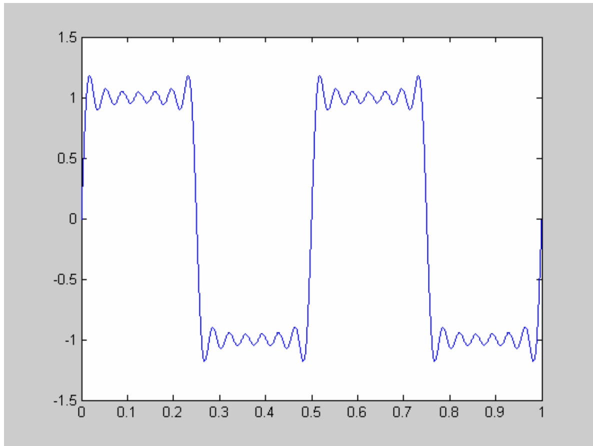


$4/\pi(\sin(2\pi ft)+ 1/3\sin(2\pi 3ft)$



$4/\pi(\sin(2\pi ft)+ 1/3\sin(2\pi 3ft)+1/5*\sin(2\pi 5ft)$

Sum av 3 harmoniske sinuser



$4/\pi(\sin(2\pi ft)+ 1/3\sin(2\pi 3ft)+...+1/13*\sin(2\pi 13ft)$

Sum av 7 harmoniske sinuser

Hvordan kan vi se hvilke frekvenser en lyd inneholder?

- Vi trenger et verktøy for å se hvilke frekvenskomponenter en lyd inneholder.
- Til dette bruker vi frekvensspekteret.
- Frekvensspekteret er basert på å ta Fourier-transformen til lydsignalet
  - Fourier-transformen dekomponerer lydsignalet i ulike basis sinus- og cosinuskomponenter med ulik frekvens og finner hvor sterkt bidrag hver komponent har.

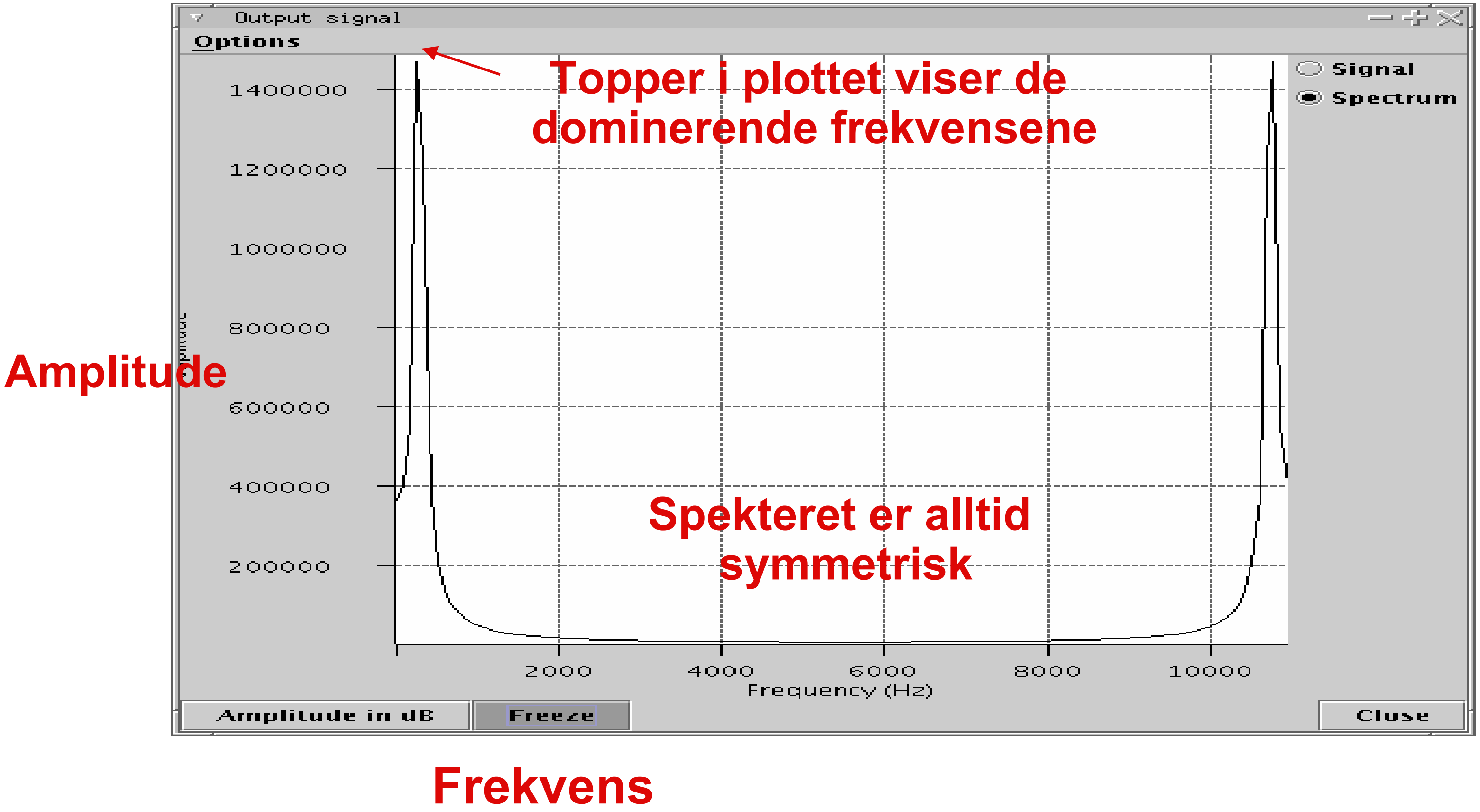
Generelle lydsignaler

- Vi kan uttrykke et vilkårlig periodisk signal y(t) som en sum av N sinusoider med hver sin amplitude A, frekvens f og fase φ.
- Vi kan skrive dette som

$$y(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{N} A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k)$$

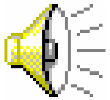
- Matematikken er ikke viktig her – det viktige er konseptet!
- Ved å plotte frekvensspekteret til signalet, kan vi se hvilke frekvenser signalet inneholder
- Du lærer mer om dette i kurs i Digital Signalbehandling
  - Se på http://www.ifi.uio.no/dsb

Hvordan ser frekvensspekteret ut?

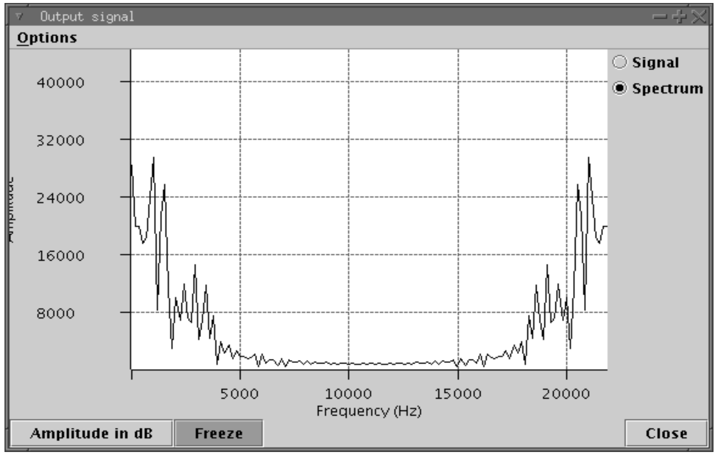


Frekvensspektret til et rent cosinus-signal med frekvens 300 Hz

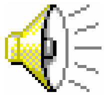
Noen lyder og frekvensspektere



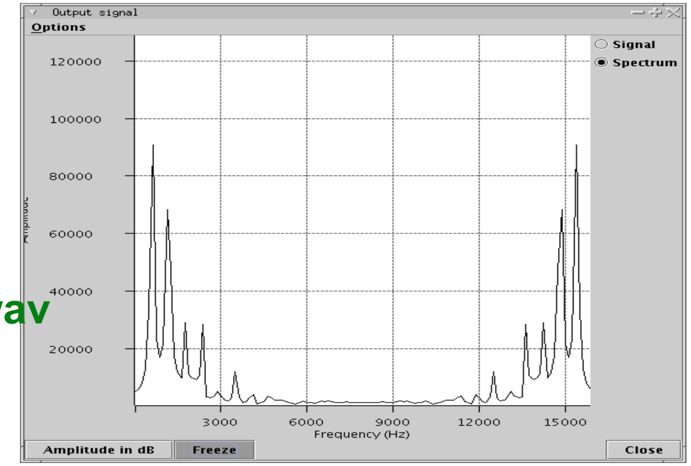
lyd7.wav



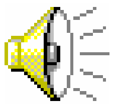
Messinginstrument



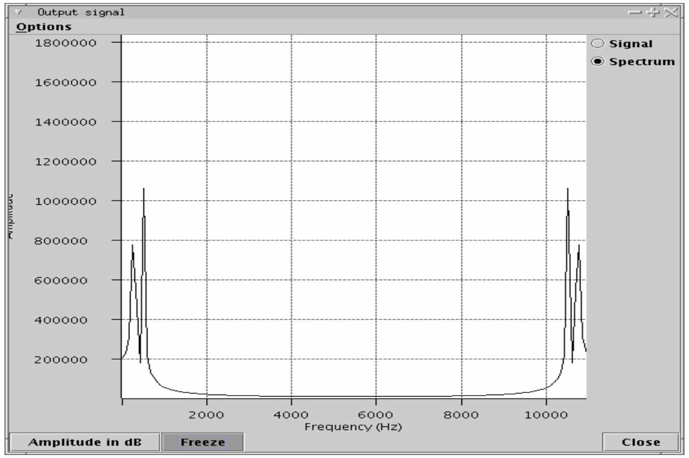
lyd8.wav



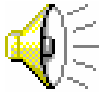
Klarinett



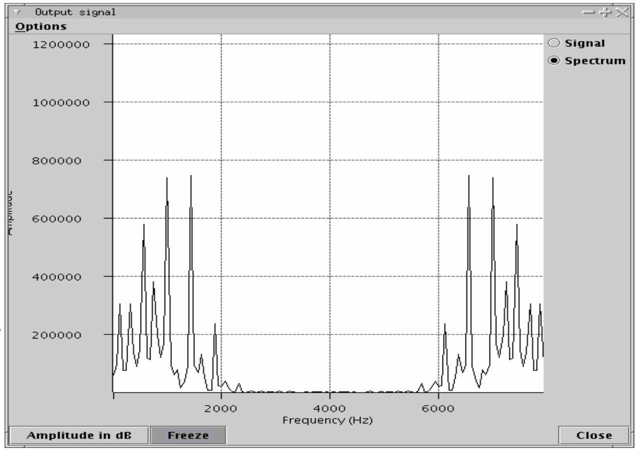
lyd9.wav



$a_1 \cos(2\pi\ 300\ t) + a_2 \cos(2\pi\ 500\ t)$



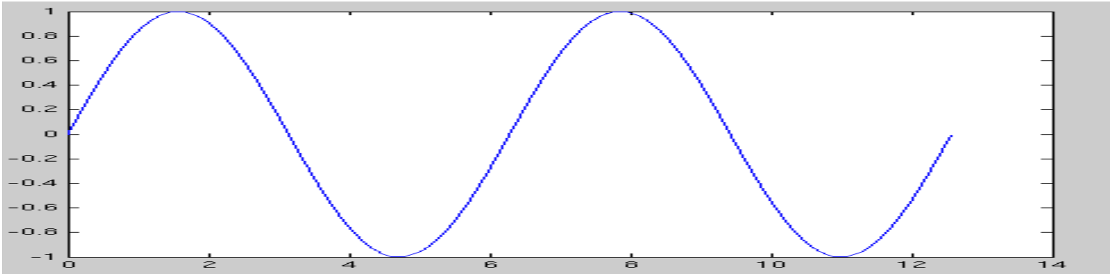
lyd10.wav



Klokke

Kan vi bruke andre bølgeformer enn sinus og cosinus?

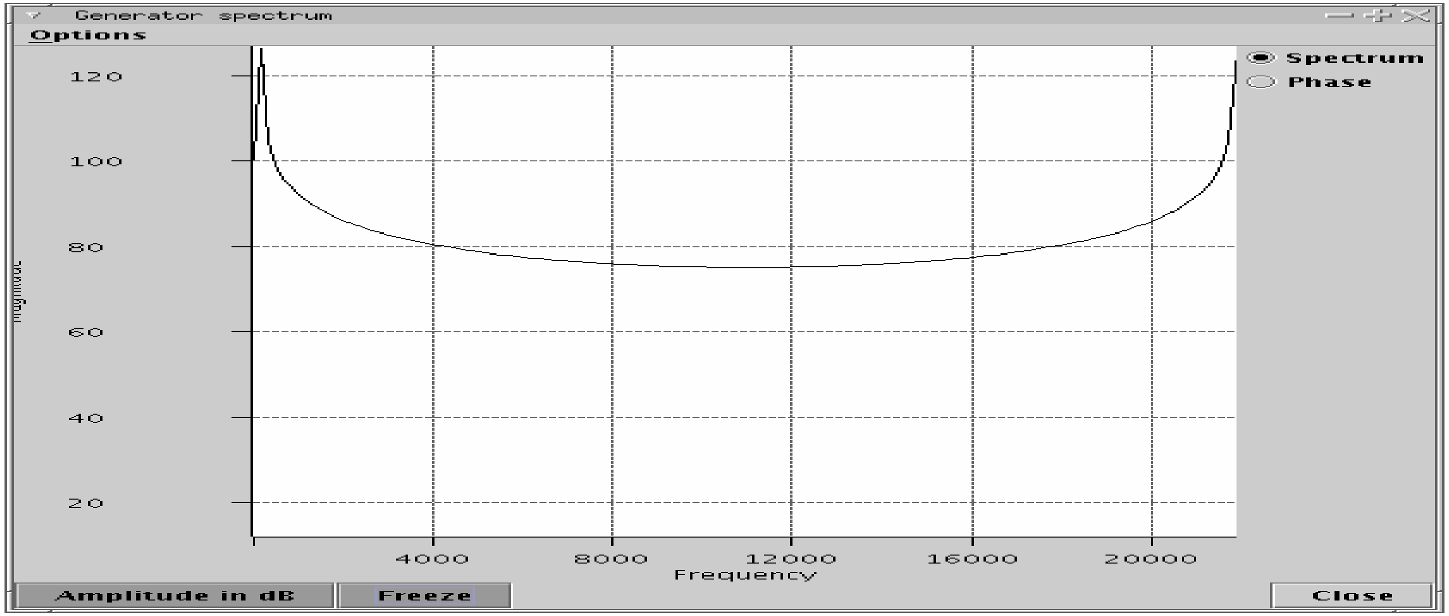
Sinus



lyd19.wav

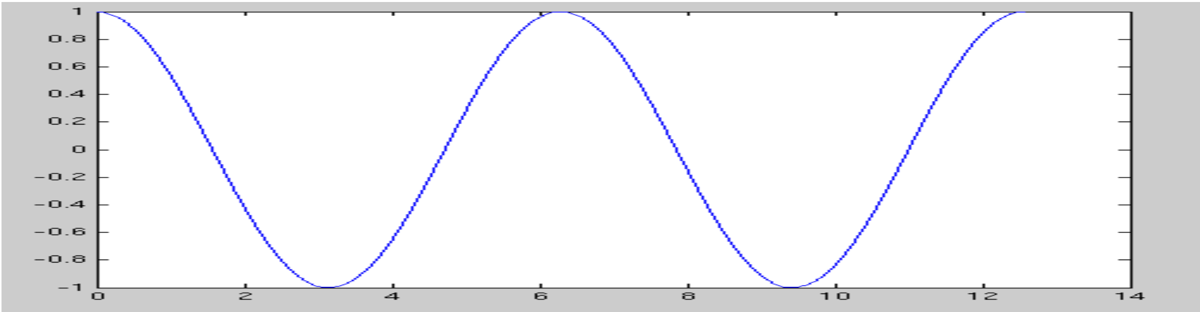
Frekvens-

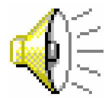
spekteret



Lyd fra cosinus

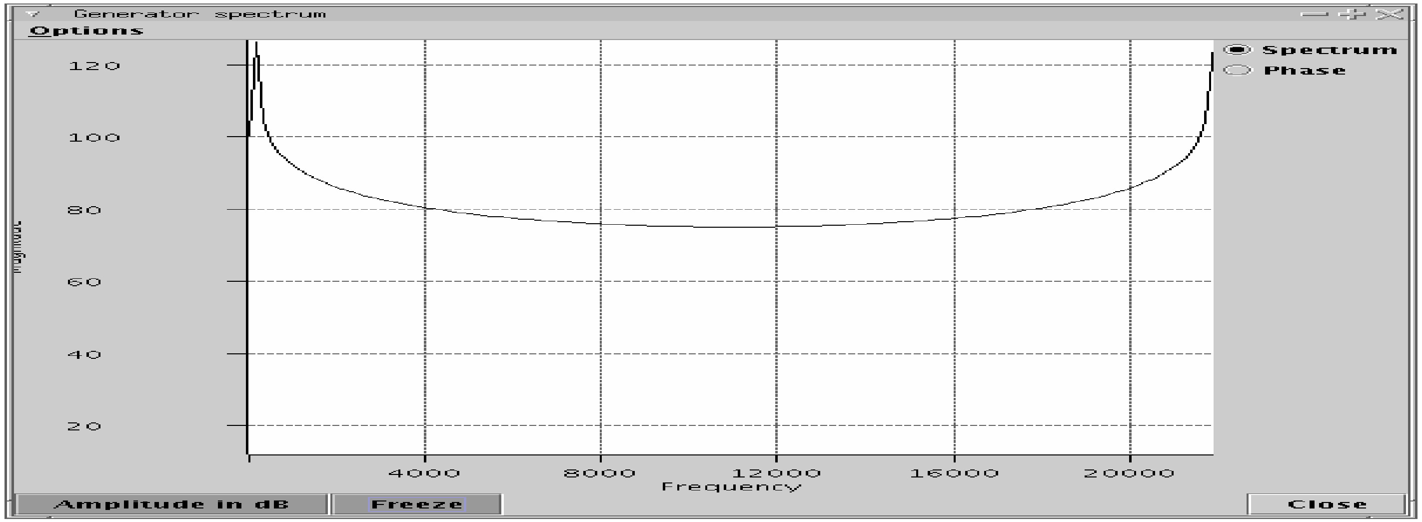
cos()





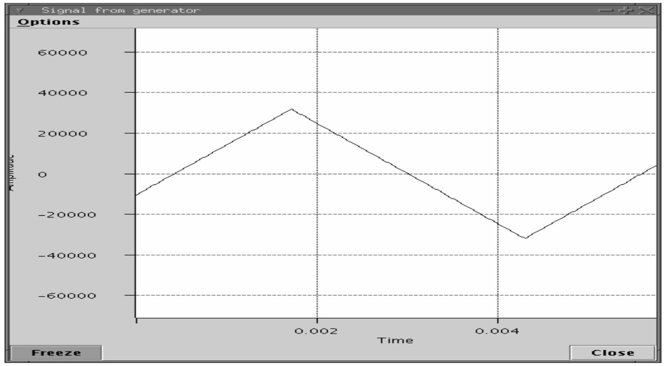
lyd20.wav

Spekteret



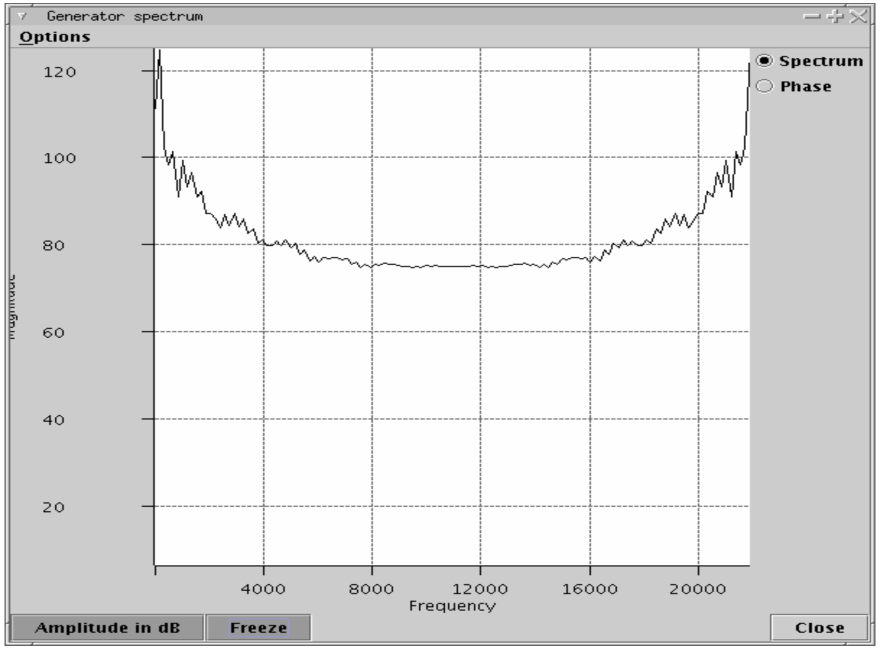
Lyd fra trekantpuls

Trekantpuls



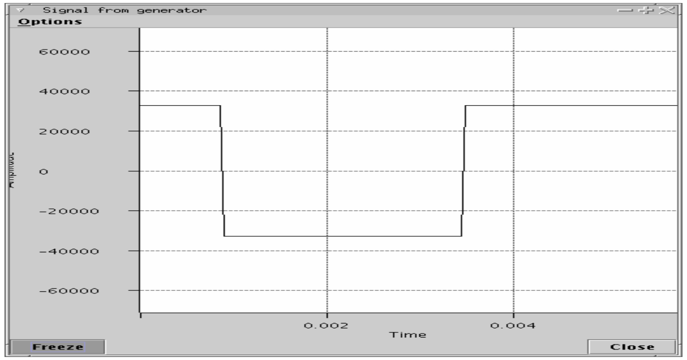
lyd22.wav

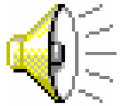
Spekteret til trekantpuls



Lyd fra firkantpuls

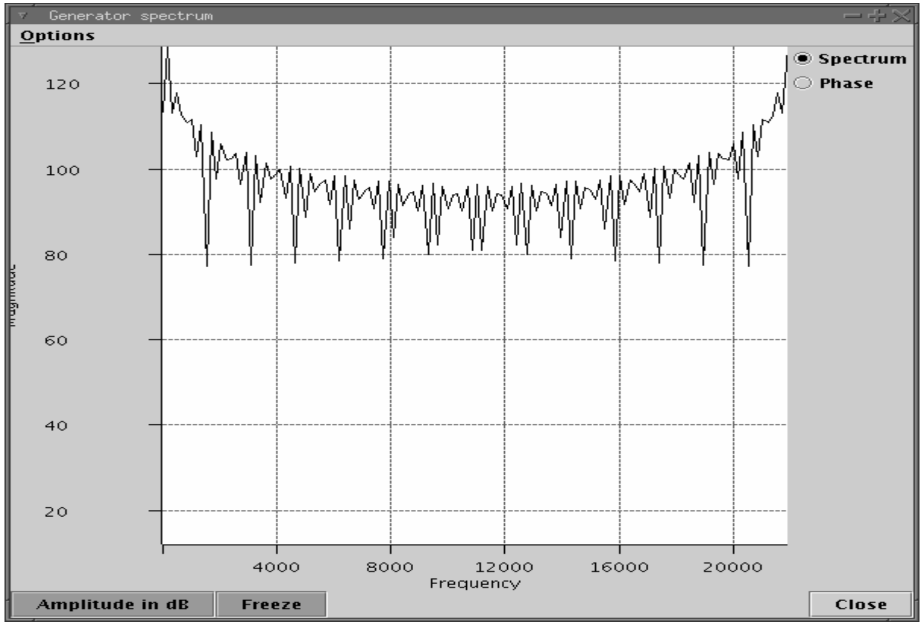
Firkantpuls





lyd21.wav

Spekteret til firkantpuls



Andre lyder

- En kompleks lyd som øret ikke oppfatter som en bestemt tone består av mange ulike frekvenskomponenter, og frekvensene er ikke harmonisk relaterte.
- En skarp lyd som f.eks. et dunk inneholder mange frekvenskomponenter
  - Vi trenger mange komponenter for å beskrive noe som endrer seg fort, f.eks. lyden av at en gjenstand faller i gulvet.
- Tale inneholder vanligvis færre frekvenser enn musikk (mindre båndbredde).

Frekvensinnhold og båndbredde

- Alle ydsignaler inneholder et endelig sett av ulike frekvenser.
- Begrepet båndbredde beskriver hvor mange frekvenser som finnes.
- Skal spille signaler opp til 20 000 Hz, må vi ha en båndbredde på 20 kHz.
- Dette må vi ta hensyn til når vi skal lagre lyd f.eks. på en CD.

- Ulike lydsignaler inneholder ulike bånd av frekvensspekteret:
  - Musikk setter store krav til båndbredde (20 000 Hz).
  - Tale ligger på max. 3 kHz. Øret mest følsomt mellom 1 og 4 kHz.
    - Dette brukes i telefonoverføringer (max 4 000 Hz).

- Kutter vi i båndbredden kan det gå ut over kvaliteten.
- Det mest sentrale er den maksimale frekvensen vi ønsker å representere.

Eksempel på ulike båndbredder

lyd30.wav Odd Børretzen med full CD-kvalitet

lyd31.wav Odd Børretzen - kun frekvenser opp til 22 050 Hz

lyd32.wav Odd Børretzen - kun frekvenser opp til 11 025 Hz

lyd33.wav Odd Børretzen - kun frekvenser opp til 8 000 Hz

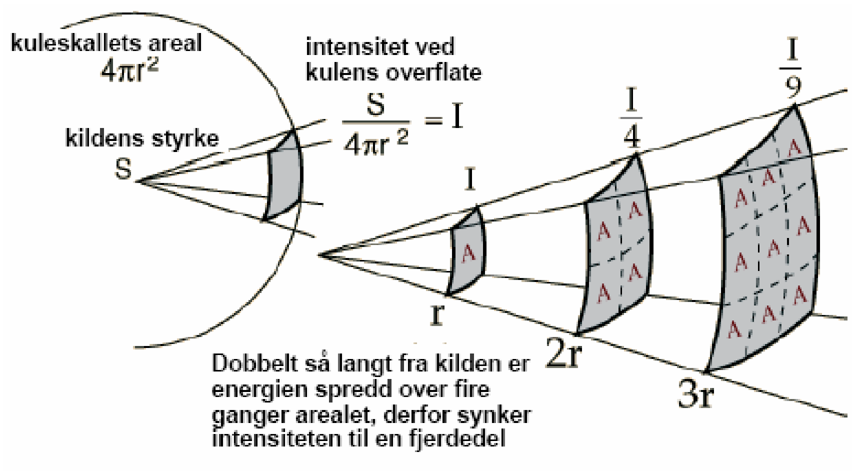
lyd34.wav Odd Børretzen - kun frekvenser opp til 4 000 Hz

lyd35.wav Odd Børretzen - kun frekvenser opp til 1 000 Hz

Lydintensitet

- Intensiteten er den mengde energi som passerer gjennom en flate pr tidsenhet, og vi måler dette i W/m².

- Lyd fra en punktkilde brer seg i alle retninger i rommet



  - Dobler vi radien i en kule, fordeles energien over en fire ganger så stor flate.
  - Tre ganger så stor radius gir ni ganger så stor flate.
  - Hvis vi skal sammenligne lydintensitetene i avstand a og 10 a fra en lydkilde, spiller det da noen rolle
    - ... hva avstanden a er?
    - ... hva lydintensiteten i avstand a er?

Lydintensitet

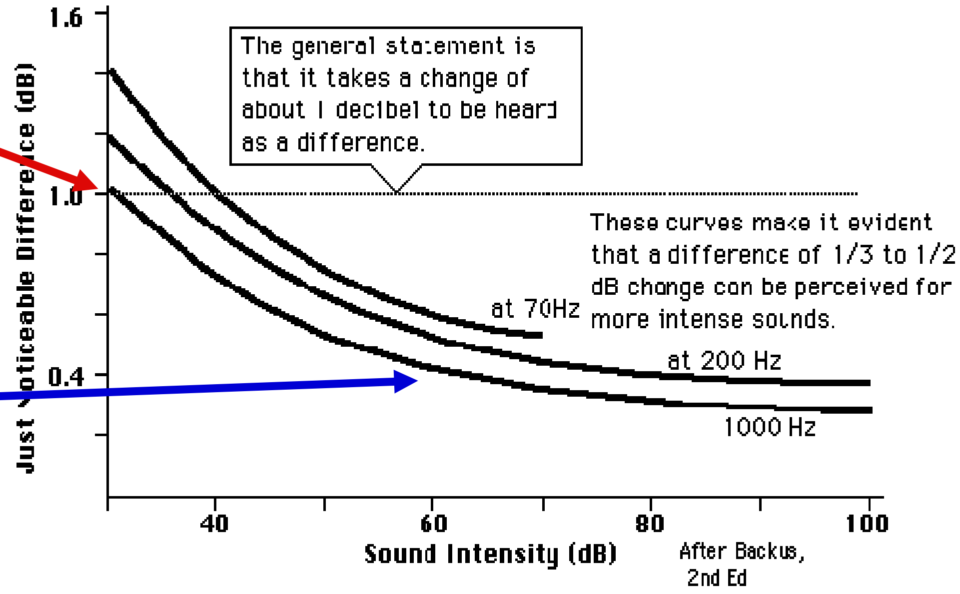
- Vi kan høre lyder over et stort omfang av intensiteter:
  - fra $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 , Høreterskelen til 10 W/m^2 , Smerteterskelen
- Oftest angir vi ikke absolutt lydintensitet i W/m^2
  - Vi angir intensiteten i forhold til høreterskelen I_0
  - Vi bruker en logaritmisk skala, decibelskalaen, forkortet dB

$$\beta(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

  - Logaritmen med basis 10 til et tall x,
    er den potensen vi må opphøye basistallet 10 i for å få tallet x.
  - Eksempel1: $\log_{10}(100) = 2$ fordi $100 = 10*10 = 10^2$
  - Eksempel 2: $\log_{10}(1\,000\,000) = 6$ fordi $1\,000\,000 = 10^6$

Mer om lydintensitet

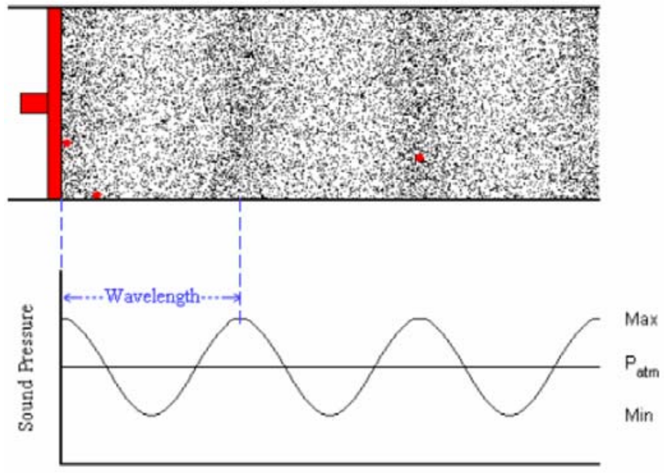
- Decibel måler intensiteten til en lyd i forhold til den svakeste lyden vi kan høre.
- En økning på 10 dB svarer til at lydintensiteten er økt med en faktor 10.
- Hvis en lyd har intensitet 40 dB og en annen 60 dB (økning = 20 dB) så har den andre lyden 10^2 =100 ganger høyere intensitet.
- Den minste hørbare endring i lydintensitet er ca 1 dB for en 1 000 Hz tone ved 30 dB.
- Vi kan høre mindre endringer ved høyere lydintensitet, og ved høyere frekvenser.



Noen eksempler på lydintensitet

Kilde	Intensitet (W/m²)	Intensitet i dB	#ganger sterkere enn TH
Terskel for hørsel ved 1 kHz (TH)	$1*10^{-12}$	0 dB	
Blader som rasler i vinden	$1*10^{-11}$	10 dB	10
Hvisking	$1*10^{-10}$	20 dB	$100=10^{2}$
Normal tale	$1*10^{-6}$	60 dB	$1\,000\,000=10^{6}$
Rushtrafikk	$1*10^{-5}$	70 dB	10^{7}
Støvsuger	$1*10^{-4}$	80 dB	10^{8}
Symfoniorkester	$1*10^{-3}$	98 dB	$10^{9.8}$
Walkman på max., hørselskader over lengre tid	$1*10^{-2}$	100 dB	10^{10}
Rockekonserter (ved scenen)	$1*10^{-1}$	110 dB	10^{11}
Smerteterskel	$1*10^{1}$	130 dB	10^{13}
Jagerfly (takeoff)	$1*10^{2}$	140 dB	10^{14}
Trommehinnen sprekker	$1*10^{4}$	160 dB	10^{16}

Lydtrykk



- Hørbar lyd er trykkbølger, eller tetthetsbølger.
- Både atmosfæretrykket og trykk-amplitude

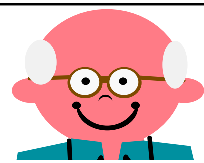
  P måles i Pascal(Pa=N/m^2).

  - 1 atm =101,325 kPa = 1013,25 hPa (1hPa = 1 millibar, brukt i meteorologi)
  - Høreterskelen er P_0 = 2 x 10^{-5} Pa
  - Lydtrykket i dB beregnes fra trykk-amplituden P :

$$L_p = 10\log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

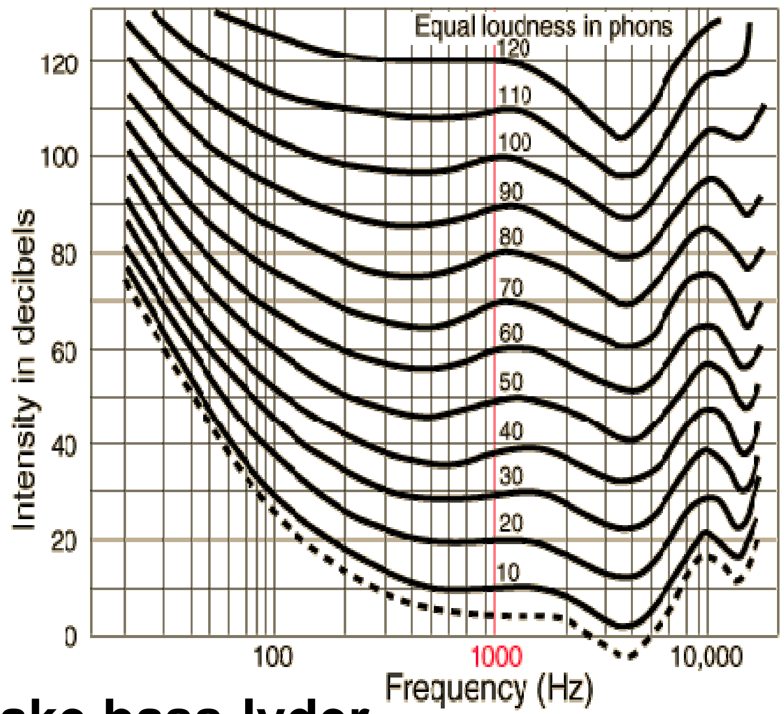
  - Faktoren 20 kommer av at 10-er logaritmen til kvadratet av et tall er 2 ganger logaritmen til tallet.

Effekten i en trykkbølge er proporsjonal med kvadratet av trykkamplituden.



Lydstyrke angitt i “phon”

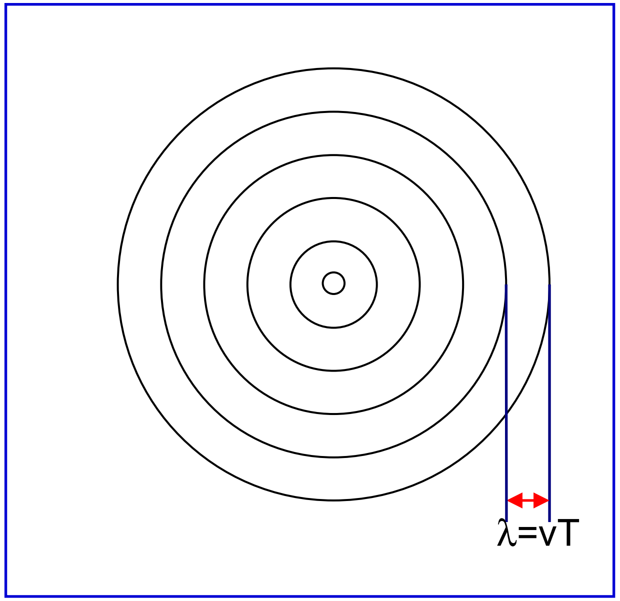
- Subjektiv lydstyrke er ikke det samme som objektiv lydintensitet.
- Vi må ta hensyn til ørets følsomhet for lyd på ulike frekvenser.
- Med 1 000 Hz som referanse kan vi plotte
  - den intensitet som skal til for at vi skal oppfatte den samme lydstyrke på andre frekvenser.



- Dette er basis for lydstyrke i ”phon”.
  - Hvis en lyd på en gitt frekvens er like sterk som en 60 dB lyd på 1000 Hz, så har den en styrke på 60 phon.
- Den subjektive lydstyrken dobles for hver 10 phon.
- Vi ser at: Øret er mindre følsomt for svake bass-lyder.
- Vi ser at: Øret er spesielt følsomt ved 3 000 – 4 000 Hz

Bølgemønster fra en lydkilde i ro

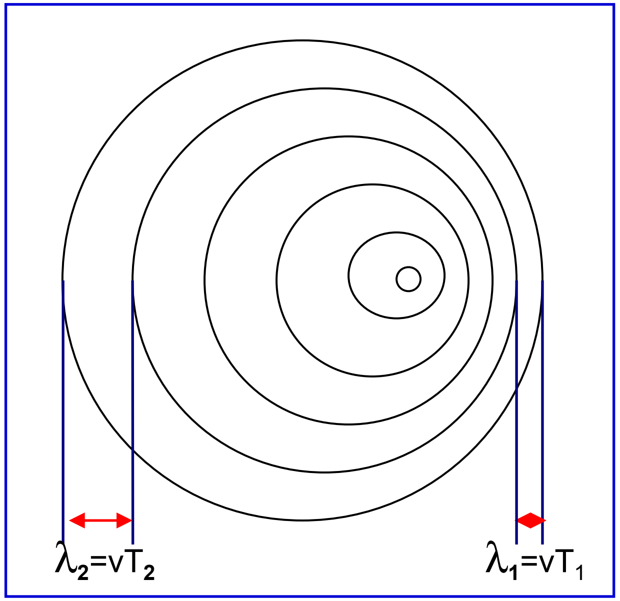
- **Antar at lydkilden er i ro.**
- **Frekvensen til lydkilden er $f = 1/T$**
- **Lydhastigheten i mediet er v**
- **Bølgelengden er gitt ved**
  - $\lambda = v/f = v\,T$
  - λ = *lydhastighet* $\times$ *periode*



- **Vi tegner en ring for hvert maksimum i trykkamplituden til lydbølgen**
  - *Bølgelengden – og dermed også frekvensen til lyden er den samme i alle retninger*

Lydkilde i bevegelse – Doppler-effekt

- **Anta at lydkilden kommer mot deg med en hastighet v_s**
- **Frekvensen til lydkilden og lydhastigheten i mediet er uforandret.**
  - **I perioden T har en bølge beveget seg en lengde vT**
  - **Lydkilden har i mellomtiden beveget seg $v_S T$**
  - **Neste bølge ligger derfor bare $\lambda_1 = (v - v_S)\,T$ bak**



- **Resultat: Du opplever en mindre periode**
  - $T_1 = \lambda_1 / v$
- **Dermed hører du en høyere frekvens**
  - $f_1 = 1 / T_1 = v / \lambda_1 = f\, v/(v - v_S)$
  - **fordi flere lydbølger passerer per tidsenhet enn om lydkilden hadde stått i ro.**
- ***En lydkilde som fjerner seg gir tilsvarende en lyd med lavere frekvens:***
  - $f_2 = \underline{f\, v / (v + v_S)}$

Dagens korte oppsummering - I

- Antall svingninger per sekund er **frekvensen** til en tone.
  - Frekvensen måles i Hz (≡ s^{-1}), og vi hører svingninger fra 20 Hz til 20 kHz.
- Produktet av bølgelengde og frekvens gir hastigheten til bølgen

  $v = f \lambda \quad \Rightarrow \quad \lambda = v/f$

  - f.eks λ = 330/440 = 0.75 m for v = 330 m/s og f = 440 Hz.
- Det enkleste periodisk varierende signal y(t) er en sinusoide med amplitude A, frekvens f og fase φ.

$$y(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi)$$

- Et vilkårlig periodisk signal kan uttrykkes som en sum av N slike sinusoider med hver sin amplitude A, frekvens f og fase φ.

$$y(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{N} A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k)$$

Dagens korte oppsummering - II

- Lydintensitet er lik energi transportert pr tidsenhet gjennom et enhetsareal.
- Lydintensiteten angis på en logaritmisk decibel-skala ved

$$\beta(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

  - der $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 er ”høreterskelen”.
  - En økning av intensiteten med 10 dB betyr en faktor 10 økning i intensiteten.
  - Vi kan høre intensitetsendringer mindre enn 1 dB.
- Den opplevde lydstyrken er ikke det samme som objektiv lydintensitet.
  - Subjektiv lydstyrke angis i ”phon”
  - Hvis en lyd på en gitt frekvens er like sterk som en 60 dB lyd på 1000 Hz, så har den en styrke på 60 phon.
- Nye begreper i neste forelesning:
  - Analog til digital konvertering
  - Sampling og kvantisering