



Lyd, Lydtryk og lydeffekt

Kompendium om lyd.

d. 15/10 2012

Valle.

Materialet er ikke færdig. Jeg modtager gerne ideer til ændringer eller tilføjelser.



Lyd, Lydtryk og Lydeffekt

Lyd er ganske små svingninger af luftens molekyler inden for det frekvensområde, det menneskelige øre kan opfatte. Disse svingninger giver sig udtryk i tilsvarende små variationer af lufttrykket. Lydens styrke kan derfor måles med en lydtrykmåler.

Når luftens molekyler svinger frem og tilbage, vil de pga. at luft er elastisk, skubbe til det næste molekyle, som igen skubber til det næste osv. Bevægelsen vil efter et stykke tid være nået fra kilden ud til en tilskuer.

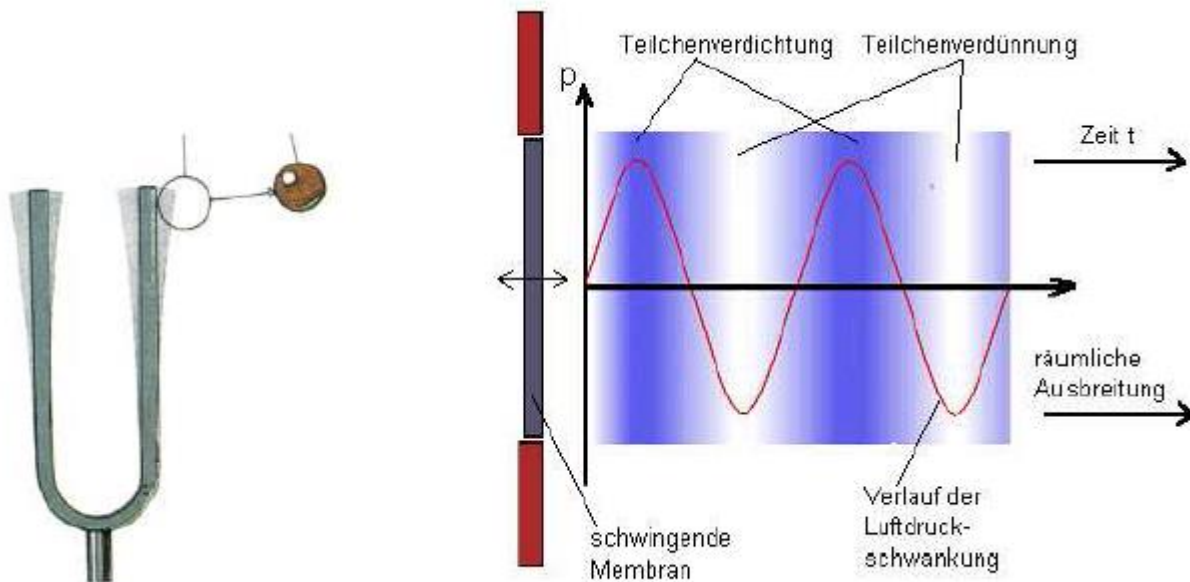
Molekylerne kan fx sættes i bevægelse af en tonegaffel, eller en svingende guitarstreng.

Molekylerne kan bevæge sig langt om deres ligevægtsstilling, Δx , og med en given frekvens.

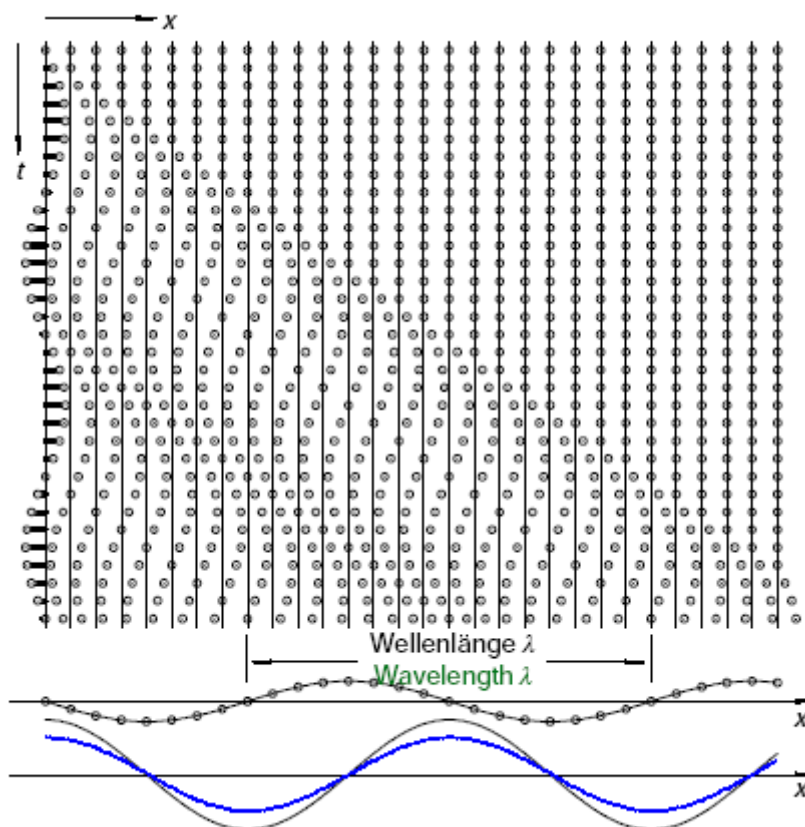
Bevægelserne fører til et overtryk – derefter undertryk – svingende omkring en ligevægtstryk, svarende til det atmosfæriske tryk. Det er de små over – undertryk, der når øret og sætter trommehinden i bevægelse.

Der sker ingen flytning af selve partiklerne. Efter lyden er ophørt, har molekylerne samme placering som før lyden!

Følgende billede viser en stemmegaffel i svingninger. Til højre ses lydets udbredelse, fortætninger og sammentrækningerne.



Næste billede viser nogle af luftmolekylerne. Deres sving omkring ligevægtstilstanden er afbildet, og udbredelsen af deres bevægelse.



Udbredelsen sker mod højre, tiden nedad !!

Lyds udbredelseshastighed: Speed of Sound.

De små overtryk / undertryk bevæger sig ud i mediet, (luft) med en given hastighed, afhængig af mediet, og dets temperatur. Følgende liste viser udbredelsen i forskellige medier:

Medium	Hastighed $v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
Luft (20 grader)	343
Luft (0 grader)	331
Havvand, 25 grader	1.533
Vand, 0 grader	1402
Vand 25 grader	1.493
Jern	5.950
Aluminium	6.420

Lydens hastighed afhænger af mediets temperatur. For luft findes følgende sammenhæng



$$v_{\text{Lyd i luft}} = 331 \cdot \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \text{ [m/s]}$$

Nogle kilder angiver formelen for udbredelseshastigheden ved forskellige temperaturer som tilnærmelsesvis flg.:

$$v \approx 331 + 0,6 \cdot t \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \text{ (Kilde# } ^1 \text{)}$$

Tordenvejr.

Torden brager fordi et lyn opvarmer luften, og det deraf opståede større tryk forplanter sig udad. Hvordan kan man relativt simpel konstatere hvor langt væk et lyn var?

Delfiner

Delfiner lokaliserer deres bytte ved at udsende korte lydimpulser. De kan lokalisere et objekt så lille som 7,5 cm i diameter på en afstand af 110 m. Hvor lang tid går der før den reflekterede lyd når tilbage til delfinen?

Frekvens: f [Hz]

Det menneskelige øre kan normalt opfatte lyd i frekvensområdet fra 20 Hz til ca. 20.000 Hz. (audible range). Det hørbare område varierer fra person til person, men især den øvre grænse er afhængig af personens alder og af den støjbelastning, øret har været udsat for gennem livet. For ældre kan den maksimale hørbare frekvens være 10 KHz eller mindre !!

Mange dyr kan høre ultrasoniske frekvenser. Ultralyd. Hunde fx kan høre lyde op til 50 KHz, og flagermus kan detektere frekvenser så høj som 100 KHz. (Ultralyd bruges fx ved skanninger, ultralydsskanninger af gravide).

Frekvenser under 20 Hz kaldes Infralyd (infrasonic). Infralyd kan stamme fra jordrustelser, torden, vulkaner, og bølger produceret af vibrerende maskiner. Infralyd kan være skadelige for det menneskelige legeme !! De kan sætte organer i svingninger (resonans) !!

Frekvensen er antal svingninger pr sekund. Frekvensen angives i hertz, [Hz] og defineres som:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

hvor T er periodetiden for en bølgebevægelse. Nogle gange bruges lambda i stedet for T.

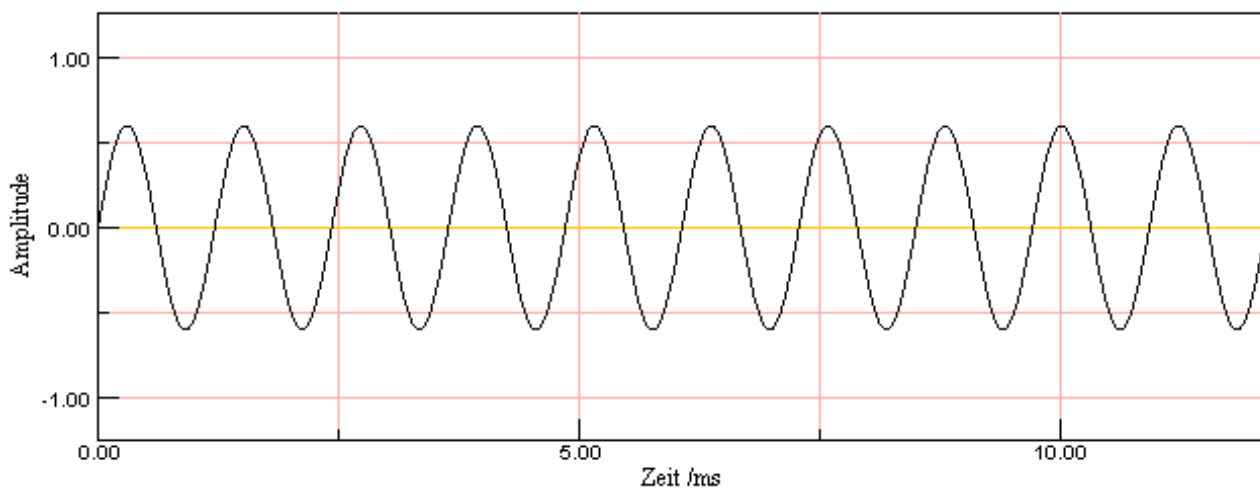
¹ Verificeret i Elector ? /05



Bølgelængden findes ved:

$$\lambda = \frac{v}{f} [m]$$

På adressen <http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/sinus1.html> kan der findes en javaaplet, hvor man kan ændre frekvens og amplitude, og samtidig høre lyden. Skærmbilledet ser således ud!



Amplitude A	A	<input type="text" value="0.598"/>	+0.598	
Frequenz f	f	<input type="text" value="0.825"/>	+0.825	kHz
Phase phi	phi	<input type="text" value="0"/>	+0	

Tryk i almindelighed

Vi lever alle i et lufthav, der jo også er en forudsætning for, at vi lever. Det luftlag, der omgiver jorden strækker sig flere km op. Og da luft ikke er vægtløs, (vejer omkring 1,2 kg pr m³) må der jo være et højere tryk ved jordoverfladen end højere oppe.

Ved 0 grader C vejer en m³ luft ca 1,293 kg. Kunne man skære en luftcylinder på 1 cm² ud fra jordoverfladen og op mod rummet, ville den have en vægt på 1 kg. Pga jordens tiltrækningskraft udgør den en kraft nedad på 10 Newton. Forstørres cylinderen til 1 m² får man en vægt på 10.000 x 10 Newton, = 100.000 Pa. Efter ældre definitioner er 100.000 Pa = 1 bar, eller 1000 mbar.

Da luften gradvist bliver tyndere opad, og fordi der er en mindre mængde luft over en, vil trykket falde efter som man bevæger sig opad i atmosfæren. Mellem havniveau og 1 km's højde er dette trykfald ca 0,125 hPa pr meter. Dvs. at på toppen af Himmelbjerget, der er 147 meter højt, vil et barometer vise et lufttryk, der er 18,4 hPa mindre end trykket ved havoverfladen. I ca. 5,5 Km's højde er trykket faldet til det halve

Følgende formel giver en tilnærmet værdi for trykket ved opstigning i atmosfæren:



$$\log_{10}(P) \approx 5 - \frac{h}{15500}$$

Højden h i meter, og trykket P i Pascal.

Omregnet findes:

$$P \approx 10^{\left(5 - \frac{h}{15500}\right)}$$

$$\text{Altitude} = 13512 \cdot \left(1 - \left(\frac{\text{Tryk}}{1013.25}\right)^{0,19}\right) \text{ [Meter]} \quad (\text{Fundet i Elector})$$

I meteorologi bruges ofte HektoPascal. 1 hPa = 100 Pa. Det betyder, at det tidligere brugte millibar svarer til hektopascal.

Trykket ved jordoverfladen er ca 1 atmosfære, 1030 mbar, eller ??? hekto Pascal. Trykket varierer med vejrets højtryk i fint vejr, eller lavtryk ved dårligt vejr.

Forudsigelser af vejret !		
dP/dt > 2,5	mbar/h	Klar ustabil vejr
+0,5 < dP/dt < +2,5	mbar/h	Klar stabil vejr
-0,5 < dP/dt < +0,5	mbar/h	Ingen ændringer
-2,5 < dP/dt < -0,5	mbar/h	Dårlig vejr, kontinuerlig regn
dP/dt < - 2,5	mbar/h	Fare, Meget ustabil vejr

Bevæger man sig opad vil trykket falde. Dette fænomen bruges til højdemåling i fx svævefly.

Kører man i bjergene, eller hurtigt ned ad en bakke fx ved Kolding, vil man kunne registrere, at trykket ændrer sig. Inde i mellemøret er der luft, og det har samme tryk, som luften udenfor. Ændrer det ydre tryk sig relativt hurtigt, vil trykket på trommehinden være forskelligt fra side til side, og trommehinden vil presses indad eller udad. Man får ondt i øret.

Det er også trykændringer, man oplever, når man stiger op fra startbanen i et fly, eller man begynder at lande. Ganske vist forsøger man i et fly at holde et vist tryk, men det kan ikke være samme tryk, som på jorden. Dette pga. at trykforskellen inde i flyet, og udenfor i 11 km højde ellers ville være så stor, at flyet ville sprænges.

Efterhånden får man udlignet trykket, idet der fra svælget er to rør op til mellemørerne, de såkaldte eustatiske rør. Ved at lave synkebevægelser eller tygge tyggegummi kan man presse lidt luft gennem røret, eller lukke lidt ud, så trykforskellen udlignes.



En masse på 100 gram udøver et tryk på 1 Newton. Fordeler man dette tryk på 1 m^2 får man trykket 1 N/m^2 som er lig 1 Pascal, [Pa]

Det menneskelige øre kan opfatte trykændringer på så lidt som $0,00002 \text{ Pa}$. Det er lig $0,002 \text{ g/m}^2$ eller 2 mg/m^2 .

Ved et tryk på 100 Pa fås tallene: 10 kg/m^2 , eller 100 g/cm^2 .

Den trykvariation, der forårsages af lyd, vil overlejlre atmosfærens tryk.

Lydeffekt. Lydenergi pr sekund Sound Power [W] [Watt]

Akustisk Power, akustisk effekt,

En lydkilde udstråler akustisk effekt. Effekt er energi pr sekund. Altså akustisk energi i eet sekund.

Den udstrålede effekt resulterer i et lydtryk. Dette svarer til, at et varmeapparat tilfører eller udstråler varme i et rum, - og resultatet er temperatur.

Enhver maskine der vibrerer, udsender akustisk energi. Lydeffekten siger noget om, hvor meget energi, der udsendes pr sekund. (energi pr tidsenhed.)

Lydkilden tilfører luftmolekylerne noget energi. Eller energi pr sek, = effekt. Dette får dem til at svinge frem og tilbage. Dvs. molekylerne veksler mellem at have potential energi eller kinetisk energi.

Energien tilføres hele tiden til omgivelserne omkring en lydkilde. Den udstråles, eller udbredes i rummet omkring kilden. Enten i alle retninger, hvis kilden fx er en fugl i frit rum. Eller i en halvkugle over jorden, hvis lydkilden er en plæneklipper.

Den samlede effekt, der udstråles, kan udtrykkes som intensiteten i et givet areal, fx pr m^2 , gange antal m^2 .

$$P_{\text{akustisk}} = I \cdot A [W]$$

Sound power level, (SWL) refererer til størrelsen i dB af en effekt i forhold til en referenceeffekt.

$$SWL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W}{W_{\text{ref}}} \right) [dB]$$

hvor $W_{\text{ref}} = 1 \cdot 10^{-12} [W] = 0 \text{ dB}$

W_{ref} er den mindste lyd-effekt, der kan høres !

Højtaler:



Formålet med højttalerdesign er, at maksimere størrelsen af akustisk effekt fra højttaleren, imens man forsøger at minimere elektrisk input effekt og forvrængning. I mange konventionelle højttalere, skal der tilføres så meget som 100 Watt elektrisk effekt for at få 1 Watt akustisk effekt. Dette fører til en virkningsgrad på kun 1 %

En højttaler bør også give det samme lydtryk over en frekvensvariation fra ca 30 Hz til 18.000 Hz +/- 3 dB for det samme indgangssignal amplitude !

Hvis lyden kan udsendes fokuseret mod en mindre areal fås en større lydtryk, og derfor højere lyd. Det er imidlertid ikke muligt at fokusere lave frekvenser. Kun høje. Derfor udformes diskanten specielt, evt med trompet-lignende udgang, for at lede lyden i ønsket retning.

Lydintensitet, Sound Intensity, I. $\left[\frac{W}{m^2} \right]$ Sound Intensity Level, SIL

Opgives nogle steder som J

Enhver maskine der vibrerer, udsender akustisk energi. Lydeffekten siger noget om, hvor meget energi, der udsendes pr sekund. (energi pr tidsenhed.)

Lydintensiteten beskriver energitransporten i rummet omkring lyd giveren, eller helt præcist: igennem et enhedsareal. I SI-systemet er dette enhedsareal $1 m^2$ og følgelig er enheden for lydintensitet Watt pr. kvadratmeter.

Lydintensitet giver også et retningsmæssigt mål. Lydintensitet er derfor en vektor, den har både størrelse og retning.

Modsat er lydtryk, (sound pressure) en skalar. Den er beskrevet blot ved sin størrelse.

Sædvanligvis måles lydintensitet i retningen vinkelret på det specificerede enhedsareal gennem hvilken lydenergien flyder.

Intensiteten I eller Sound Intensity kan udregnes som:

$$I = \frac{P_{\text{effekt}}}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot (\omega \cdot s_{\text{max}})^2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$I = \frac{\Delta P_{\text{tryk}}^2_{\text{max}}}{2 \cdot \rho \cdot v} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

ρ = densiteten af mediet, luft er ca 1,20 kg pr m^3 .

v = udbredelseshastigheden



$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (dvs. radianer pr sek.)

s_{\max} er max strækning væk fra ligevægt.

Kopi af billede side 4

På viste tegning udstråler en punktførm lydkilde lydenergi. Al denne energi må passere gennem en flade, der omslutter kilden. Da intensiteten er energitransport pr. areal må det være muligt at finde den samlede udsendte lydeffekt ved at opsummere intensiteterne i forskellige retninger. I et frit udbredelsesfelt vil intensiteten følge en kvadrat-afstandslov. Dette er illustreret på ovenstående tegning. I den dobbelte afstand fra kilden er den omsluttende kugleflade 4 gange så stor. Da den udstrålede lydeffekt er en konstant for kilden, passerer denne effekt altså i den dobbelte afstand ud gennem et 4 gange så stort areal. Følgelig må lydintensiteten i den dobbelte afstand være 4 gange så lille.

Arealet på en kugleflade er: $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$

$4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot I = P_0 \Leftrightarrow I = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$ I er intensiteten, P_0 er udstrålet energi pr tidsenhed, effekt.

Altså, intensiteten af lyden i en afstand fra kilden er:

$$I = \frac{P_{\text{Effekt}}}{A} = \frac{P_{\text{effekt}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Lydintensitets-målinger af støj fra fx en maskine er meget afhængig af det rum, hvori der måles. Der findes kun en simpel sammenhæng mellem lydtryk og lydeffekt under ganske særlige omstændigheder, som fx i et lyddødt rum, som også kan kaldes et frit felt, der ikke har nogle refleksioner fra omgivelserne (vægge fx)

Sound Intensity Level, (SIL) refererer til størrelsen af en lyd i forhold til en reference-lyd.

$$SIL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) [dB]$$

Den svageste lyd-intensitet I_{ref} et menneske kan høre er (Høretærskel)

$$I_0 = I_{ref} = 1 \cdot 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Lydtryk Sound pressure [Pascal] [Pa] Sound Pressure Level, SPL



Lydtrykket kommer af molekylernes skiftevis kompression og dekompression. Skiftevis højtryk og undertryk i forhold til det øjeblikkelige atmosfæriske tryk. Hvis molekylerne svinger omkring deres ligevægtsstilling, vil lydtrykket være afhængig af såvel frekvensen, f , [Hz] og størrelsen af molekylernes udsving, Δx [m].

Frekvensen måles i Hz, og molekylernes udsving kaldes s_{\max} , der er den maksimale strækning, molekylet er væk fra sin ligevægtsstilling. Udsvinget kaldes også for **displacement amplitude** for udsvinget. Jo kraftigere lyd, jo større udsving.

Displacementen er i retningen x i samme retning som udbredelsen af bølgen. Derfor er der tale om longitudinale bølger. Udbredelsen er i samme retning som udsvingene.

Tryk-amplituden ΔP målt i forhold til ligevægt varierer periodisk. Et udtryk er givet ved:

$$\Delta P_{\max} = \rho \cdot v \cdot \omega \cdot s_{\max}$$

ρ = densiteten af mediet, luft er ca 1,20 kg pr m^3 .

v = udbredelseshastigheden

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (dvs. radianer pr sek.)

s_{\max} er max strækning væk fra ligevægt.

En lydbølge kan følgelig opfattes som enten en displacement bølge eller en trykbølge. Pressure wave.

Bemærk, at trykvariationen er i max når displacement er nul, og modsat er displacement størst når trykvariationen er nul.

Et for højt lydtryk kan forårsage høreskader. For at bestemme den menneskelige reaktion på lyd, i form af genevirkning eller i form af høreskader, er lydtryk klart en størrelse, der skal måles. De trykvariationer, som opleves af den menneskelige trommehinde, er de samme, som påvirker membranen i en mikrofon.

Det lydtryk, vi hører eller måler med en mikrofon, afhænger af afstanden fra kilden, og af de akustiske omgivelser. Disse defineres af rummets dimensioner og af begrænsningsfladernes absorptionsevne. Så det er faktisk ikke muligt med en simpel lydtryksmåling at afgøre, hvor meget støj, fx en maskine udsender. Man må bestemme lydeffekten fordi denne størrelse er uafhængig af omgivelserne, og derfor en størrelse, som objektivt beskriver lydkilden.

Sound Pressure Level (SPL) angiver et lydtryk i forhold til en referencelydtryk.

$$SPL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) \text{ dB}$$

eller



$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) dB$$

Det svageste lydtryk, sound pressure, et menneskelig øre kan registrere er valgt som reference.

$$P_0 = P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} [Pa]$$

Det er det samme som 20 μ Pa.

Luftmolekylernes udsving Partikkel Displacement [m]

Partikkel amplitude !

Når der udsendes lyd, vil molekylerne i luften svinge frem og tilbage omkring en ligevægtsposition. Jo kraftigere lyd, jo større udsving.

Af formelen for lydtryk findes:

$$S_{max} = \frac{\Delta P_{Max}}{\rho \cdot v \cdot \omega} [m]$$

ρ = densiteten af mediet, luft er ca 1,20 kg pr m^3 .

v = udbredelseshastigheden

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (dvs. radianer pr sek.)

S_{max} er max strækning væk fra ligevægt.

Lydfelt.

Et lydfelt er et område hvor der er lyd. Lydfeltet karakteriseres efter hvordan lyden forplanter sig i området.

Fritfelt:

Her er der ingen refleksioner. Sådanne betingelser eksisterer i fri luft passende langt væk fra Jorden, eller i et lyddødt rum, hvor der ikke sker refleksioner fra væggene. Al lyd, der når begrænsningsfladerne absorberes. Et fritfeltsforhold er karakteriseret ved, at lydtryk og intensitet aftager med 6 dB for hver fordobling af afstanden fra lydkilden. Dette er blot en anden formulering af afstandsloven.

Diffust felt.

I et diffust lydfelt re reflekteres lyden så mange gange fra væggene, at den udbreder sig i alle retninger med samme niveau og sandsynlighed.



Lydniveauer i Decibel eller dB

Den svageste lyd, et normalt menneskeligt øre kan opfatte, har en amplitude på 20 milliontedele af en Pascal, (20 μPa). Det er ca $5 \cdot 10^9$ gange mindre end det normale atmosfæriske tryk. En trykvariation på 20 μPa er så lille, at den forårsager en udbøjning af trommehinden som er mindre end diameteren på et brintmolekyle. Og forbavsende nok kan øret tolerere lydtryk, der er mere end en million gange højere.

Afstanden mellem den mindste og den største kaldes dynamik-området. (audible range).

For forskellige størrelser findes:

frekvens	f	20 til 20.000	Hz
Intensitet	I	10^{-12} til 10	W/m^2
Lydtryk, Pressure	P	2^{-5} til 200	Pa

Man vil derfor når man måler lyd på en lineær skala, få en meget stor udstrækning af skalaen. Man vil ende op i nogle store uhåndterlige tal. For at undgå dette, bruges en anden skala, decibel eller dB – skalaen.

Denne skala anvendes også på grund af, det stort set er den samme skala, øret arbejder efter.

At angive en værdi i dB siger kun noget om et forhold. Angiver man en værdi i dB, siger man, at størrelsen er så mange gange større end en reference-værdi. Som referenceværdi er valgt den mindst hørlige størrelse.

Ved at transformere til en logaritmisk skala får man dette enorme dynamikområde klemmt sammen til en skala strækkende fra 0 dB til fx 180 dB

Decibel er ikke en absolut måleenhed, men et forhold. Det er forholdet mellem en målt størrelse og et vedtaget referenceniveau. dB-skalaen er logaritmisk og anvender høretærsklen på 20 μPa som referenceniveau. 20 μPa defineres som 0 dB. 20 μPa er lig 20 $\mu\text{Newton}/\text{m}^2$.

En nyttig egenskab ved dB-skalaen er, at den giver en langt bedre tilnærmelse til menneskets opfattelse af lydstyrke, end Pascal-skalaen. Det skal forstås således, at uanset hvor man befinder sig på dB-skalaen, opfatter øret en ændring af lydniveauet på fx 3 dB som den samme ændring.

Ændring af lydniveau	Sådan opleves det
1 dB	På grænsen af det opfattede
3 dB	En tydelig, men lille ændring
6 dB	En pæn ændring
10 dB	En stor ændring
20 dB	En meget stor ændring

Kilde: Steffan Alm, gengivet i Ing, Maj 79

Støjkilde	Lydeffekt (Watt)	Lydeffektniveau dB re 10^{-12} Watt
-----------	--------------------	--



Saturn raket	30.000.000.000	195
Turbojet	10.000	160
4-motors propelfly	1.000	150
75 mands symfoniorkester	10	130
Værktøjsmaskiner	1	120
Piano	0,1	110
Brøgende stemme	0,01	100
Privatbil på motorvej	0,001	90
Samtaleniveau	0,00001	70
Svag visken	0,000000001	30

Kilde: Steffan Alm, gengivet i Ing, Maj 79

Chart of sound levels and corresponding sound pressure and sound intensity			
Examples	Sound Pressure Level dB	Sound Pressure N/m ² = Pa	Sound Intensity watts/m ²
30 m from jet aircraft	140	200	100
Threshold of pain	130	63.2	10
Threshold of discomfort Loud rock concert	120	20	1
Chainsaw 1m distance	110	6.3	0.1
Disco 1 m from speaker	100	2	0.01
Diesel truck (10 m away)	90	0.63	0.001
Kerbside of busy road	80	0.2	0.0001
Auto interior at 90 km/h	75		0.00003
Vacuum cleaner, distance 1 m	70	0.063	0.00001
Conversational speech, 1m	60	0.02	0.000001
Average home	50	0.0063	0.0000001
Quiet library	40	0.002	0.00000001
Quiet bedroom at night	30	0.00063	0.000000001
Background in TV studio	20	0.0002	0.0000000001
Rustling leaf	10	0.000063	0.00000000001
Threshold of hearing	0	0.00002	0.000000000001

Referenceniveauer Treshold values

Lydtryk, P , intensitet I , og effekt P_{effekt} , angives ofte i decibel, dB

Decibel angiver et forhold mellem den målte værdi og en referenceværdi. Skalaen er logaritmisk. Dvs. et udtryk i dB blot angiver hvor mange gange en given størrelse er større end en grundværdi. (referenceværdi)



For lydtryk er referenceværdien valgt således, at den tilnærmelsesvis svarer til menneskets høretærskel, dvs. den mindste lydtryk, et menneske kan høre.

Reference-lydtrykket er pr definition $P_0 = 20 \mu [Pa]$ Enheden er [dB re 20 μPa].

Et lydtryk i dB udregnes som

$$P_{db} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

hvor P er det målte lydtryk, og P_0 er referencelydtrykket.

Lydtryk i dB udregnet efter Lyd-intensiteten, dvs. Watt/m² er:

$$db_{intensitet} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Referenceintensitet for lydintensitet, threshold of hearing, er $I_0 = 1,00 \cdot 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Referenceintensitet for lydintensitet er $I_0 = 2 \cdot 10^{-5} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ Enheden er dB re $2 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$

Iflg. Kilde 3 er reference-intensiteten (ved 1 KHz) $1 \cdot 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ Dette kaldes ”threshold of hearing”.

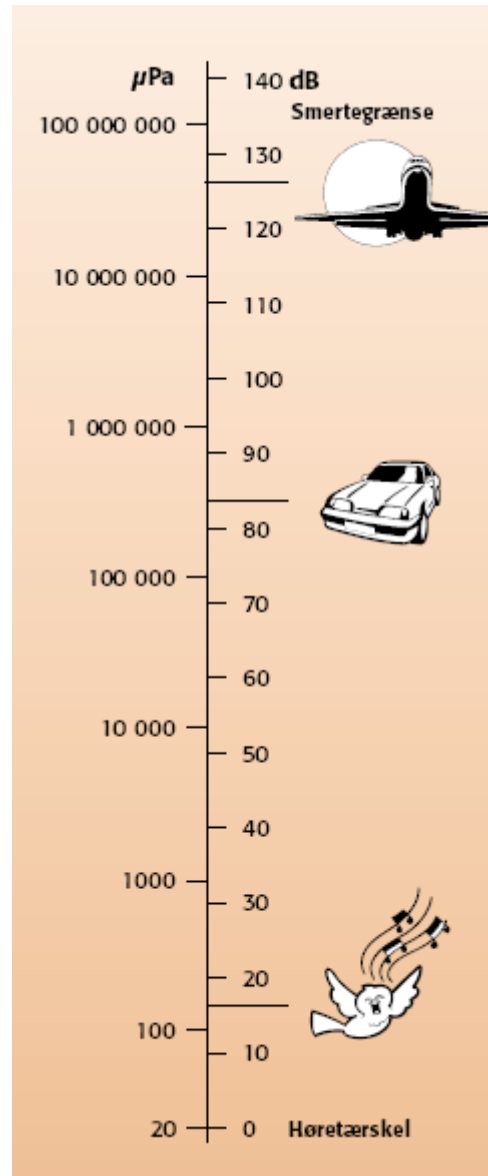
Den kraftigste lyd, øret kan tolerere ved 1 KHz svarer til $1,00 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ (threshold of pain)

Lydeffekt i dB $P_{effekt} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right)$ hvor $W_0 = 1p[W]$

Det er ret forvirrende, at P er formeltegn for både tryk i Pascal og for effekt !!!



Sammenhængen mellem tryk og dB ses af denne skitse:



Akustisk kortslutning

Når en højttaler i fri luft tilføres et sinus-signal, vil dens tragtformede pap bevæge sig proportional med signalets spænding. Bevæger pappet sig frem, skaber det et overtryk på forsiden, og samtidig et undertryk på bagsiden. Og modsat i næste halvperiode. Dette er jo også formålet med højttaleren.

Men overtrykket vil jo til en hvis grad udlignes af undertrykket på bagsiden. Sådan som også atmosfæriske overtryk får vinde til at gå mod lavtryk.

For dette ikke skal ske, skal højttalerens diameter være ca. en halv bølgelængde.

Bølgelængden findes af: $\lambda = \frac{c}{f} [m]$



En bashøjttaler, der fx skal gengive 20 Hz bør så være $0,5 \cdot \lambda = 0,5 \cdot \frac{340[m/s]}{20[1/s]} = 8,5[m]$.

Dette er jo ikke muligt, derfor forhindres kortslutningen ved at montere højttaleren i en kasse.

En diskant-højttaler, der gengiver 20 KHz, skal være mindst 8,5 mm. !!

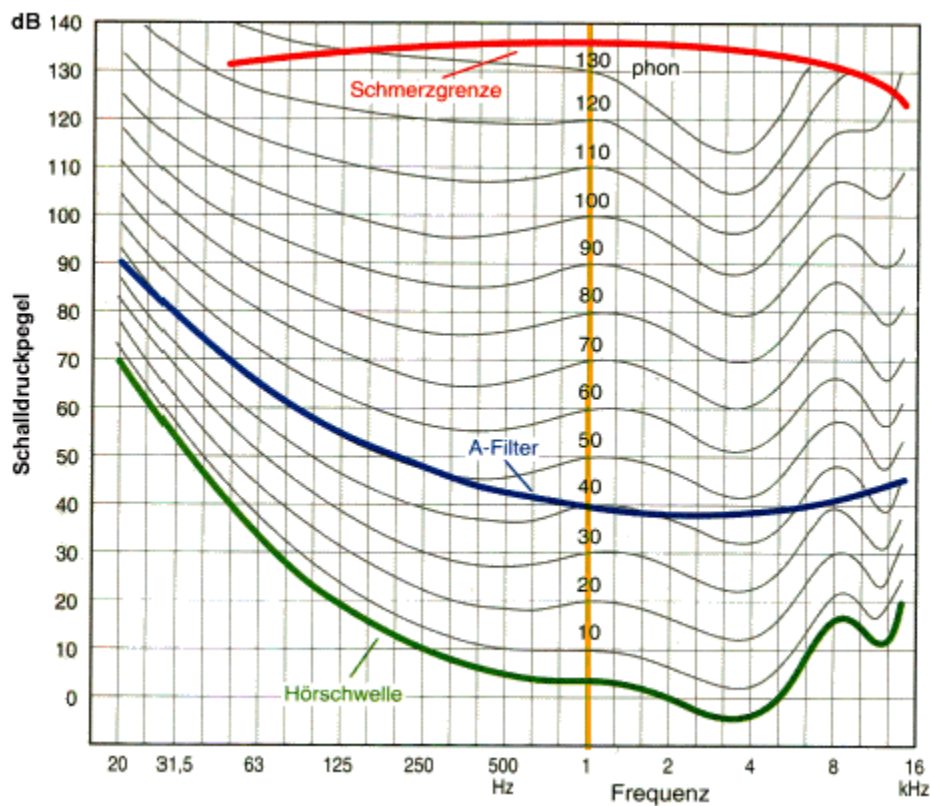
Dette kan tydeligt illustreres ved at sætte en plade med et hul i tæt ind foran en højttaler !!

Oplevelser af lydpåvirkning.

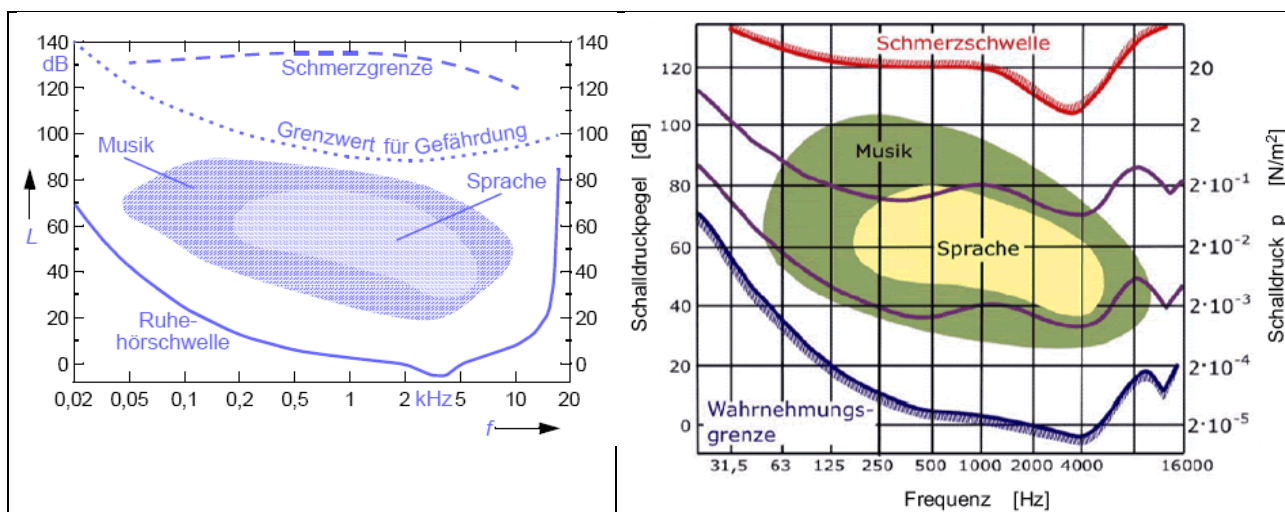
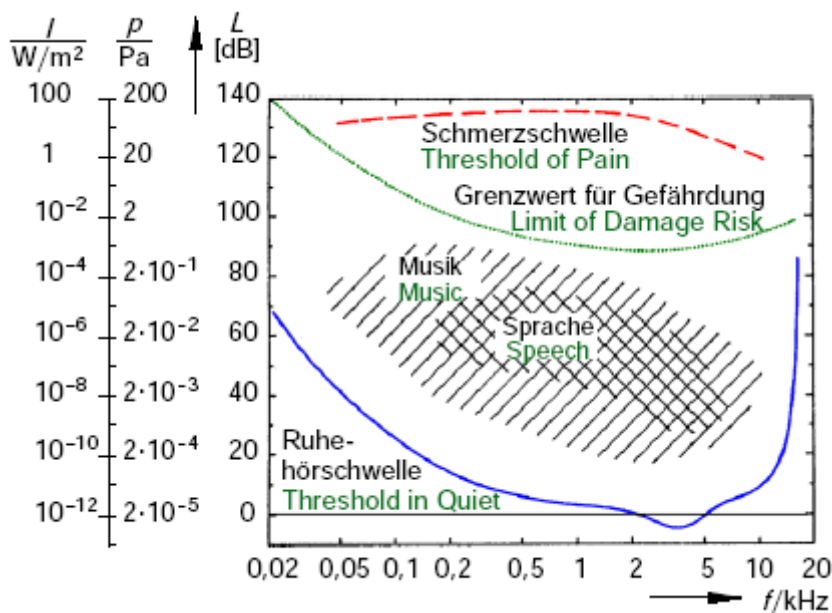
Hidtil har der været diskuteret lyde, uden at angive frekvens. Det har været angivet, at den laveste lydeffekt, et menneske kan registrere, er $10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$, korresponderende til en intensitet på 0 dB. I realiteten gælder dette kun ved 1 KHz. Dette er en standard reference i al akustik.

Hvis der udføres måle-eksperimenter for andre frekvenser, vil der findes nogen variation. Fx skal en lyd ved 100 Hz have et intensitets-niveau på 30 dB for i det hele taget at kunne høres. Øret er altså ikke lige følsomt for alle frekvenser. !!De 30 dB ved 100 Hz opfattes fysiologisk som samme styrke som 0 dB ved 1 KHz.

Indførtes resultaterne i en graf, fås følgende fremstilling !!



Der kan også findes andre måder at tegne illustrative grafer på



Elektronik, dvs. en mikrofon, er normalt lige gode til at registrere lydtryk over en bred vifte af frekvenser. Dvs. lave frekvenser, som øret ikke er så følsom overfor, får for stor vægt, hvis mikrofonen bruges direkte i måleudstyr.

Derfor laves der normalt noget elektronik, der virker som dæmper på de signaler, der modtages af mikrofonen, - og omformes til elektriske spændings-svingninger. De lave frekvenser dæmpes med et såkaldt "A-filter".

Eksempler:

1: En plæneklipper udstråler 0,01 Watt akustisk effekt. Hvad er det tilnærmelsesvise lydtryk og intensitetsniveau 1,5 meter fra plæneklipperen ?

I fri luft kan man antage, at der er friluftsbetingelser, og vi antager, at græsoverfladen er totalt reflekterende. ! Dvs. at hele lydeffekten (energien pr sekund) udstråles i en halvkugle.



Halvkuglens areal er $A = 2\pi \cdot r^2 [m^2]$ I 1,5 meters afstand er dette areal ca $14 m^2$. Derfor findes en intensitet på $\frac{0,01}{14} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ Dette siger umiddelbart ikke så meget om hvor højt et menneske vil opfatte lydtrykket !!

Intensiteten kan udregnes som 88,5 dB re $1 \mu W/m^2$.

$$dB = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left(\frac{0,01}{14} \right)}{10^{-12}} \right) = 88,5 \text{ dB} \quad \text{Ved effekter skal der ganges med 10, ikke 20 !!}$$

I frifelt vil lydtryksniveauet være tilnærmelsesvis det samme: 88,5 dB re $20 \mu Pa$. ???

2:

Hvis hele Danmarks befolkning på 5 mio. taler i munden på hinanden med almindelig samtalestyrke (70 dB), produceres en samlet lydeffekt på 50 Watt. Dette svarer nogenlunde til én læselampes forbrug !!

3:

Der skal tales meget kraftigt i omkring 100 år til en kop vand for at opvarme det til kogepunktet, så der kan blive en kop te ud af det !!

4:

Menneskets øre er ved 2 KHz i stand til at registrere en effekt på under 10^{-16} Watt. Det er så lidt, at det er svært at forestille sig. Forestiller man sig, at Vorherre ved Jordens skabelse for ca 5 milliarder år siden havde skabt en lille akkumulator, der lige siden havde opsamlet energi fra en energikilde med en effekt på 10^{-16} Watt – ville der i dag være opsamlet energi nok til at få en 15 Watt pære til at lyse i 1 sekund.

5:

Hvis et musikanlægs forstærkereffekt fordobles fra fx 30 til 60 W, så betyder det en forøgelse af det samlede lydniveau på kun 30 dB. Lydkomponenter, som ligger mere end 10 dB under den øvrige lyd bidrager ikke til det samlede niveau.

6:

To identiske maskiner er placeret i samme afstand fra en person. Lydens intensitet fra maskinerne ved personen er $2,0 \cdot 10^{-7} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ Hvad er lydniveauet ved personen ved hhv. 1 og begge maskiner startet. !

Med 1 maskine startet findes: $\beta_1 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2,0 \cdot 10^{-7} \left[\frac{W}{m^2} \right]}{1,00 \cdot 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]} \right) = 10 \cdot \log(2,0 \cdot 10^5) = 53 \text{ dB}$



Med 2 maskiner startet fås:

$$\beta_2 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4,0 \cdot 10^{-7} [\text{W}/\text{m}^2]}{1,00 \cdot 10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right) = 10 \cdot \log(4,0 \cdot 10^5) = 56 \text{ dB}$$

7:

Lydniveauet (sound level) målt 30 m fra en jetmotor er 140 dB. Hvad er lydniveauet 300 m væk ??

Først findes intensiteten 30 m fra flyet.

De 140 dB kommer af ligningen:

$$140 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I [\text{W}/\text{m}^2]}{10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right)$$

Der divideres med 10 på begge sider

$$14 \text{ dB} = \log_{10} \left(\frac{I [\text{W}/\text{m}^2]}{10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right)$$

Den inverse log-funktion tages på begge sider

$$10^{14} = \left(\frac{I [\text{W}/\text{m}^2]}{10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right)$$

Og der findes en intensitet på:

$$I [\text{W}/\text{m}^2] = 10^{14} \cdot 10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2] = 100 [\text{W}/\text{m}^2]$$

Altså, på 30 meters afstand er lydintensiteten 100 [W/m²].

En halv-kugles areal er $A = 2\pi \cdot r^2 [m^2]$ (Undergrunden regnes som totalt reflekterende)

Den totale lydeffekt udsendt er

$$100 [\text{W}/\text{m}^2] \cdot 2 \cdot \pi \cdot 30^2 [m^2] = 565487 [\text{W}]$$

Lydintensiteten 300 m væk er:

$$I_{300m} [\text{W}/\text{m}^2] = \frac{565487 [\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 300^2 [m^2]} = 1 [\text{W}/\text{m}^2]$$

I dB fås:

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 [\text{W}/\text{m}^2]}{10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right) = 120 \text{ dB}$$

Ps.: opstil et udtryk for forskellige afstande:



$$I_{X_{meter}} = \text{målt int ensitet} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{målt afstand}^2}{2 \cdot \pi \cdot \text{ny afstand}^2}$$

2 og pi forkortes: Der findes

$$I_{X_{meter}} [W / m^2] = \text{målt int ensitet} \cdot \frac{\text{målt afstand}^2}{\text{ny afstand}^2} [W / m^2]$$

8:

Hvor lille er luft-molekylernes udsving ved høretærsklen for en tone på 1000 Hz??

Altså amplituden for luftmolekylernes oscillationer.

Ved høretærsklen haves $I = 1 \cdot 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Vi har fra tidligere ligningen :

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot (\omega \cdot s_{\max})^2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

hvor:

ρ = densiteten af mediet, luft er ca 1,20 kg pr m³.

v = udbredeshastigheden, 343 m/s ved 20 grader C.

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (dvs. radianer pr sek.)

s_{\max} er max strækning væk fra ligevægt.

Ligningen omskrives til:

$$s_{\max} = \frac{1}{\pi \cdot f} \sqrt{\frac{I}{2 \cdot \rho \cdot v}}$$

Indsættes fås:

$$s_{\max} = \frac{1}{\pi \cdot 1 \cdot 10^3 [1/s]} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-12} [W/m^2]}{2 \cdot 1,2 [kg/m^3] \cdot 343 [m/s]}}$$

s_{\max} findes til $1,1 \cdot 10^{-11} [m]$

Heraf ses, hvor utrolig følsom, det menneskelige øre er. Det kan detektere et udsving, displacement, af luftmolekyler, som faktisk er mindre end diameteren af atomer, (ca $10^{-10} [m]$)



Skadelig virkning:

Kortvarig påvirkning på

40 timers arbejde i 90 dB(A) svarer i skadelighed til 20 timers arbejde i 93 dB, eller blot 10 timers arbejde i 96 dB



Sunde fimrehår

Ødelagte fimrehår

Knækkede hår gror ikke ud igen.

Musikinstrumenter

Baggrunden for at vi kan skelne forskellige musikinstrumenter og stemmer fra hinanden, ligger i den forskellige kombination af overtoner. Instrumenterne giver altså svingninger, der består af en grundfrekvens plus et antal harmoniske. Grundfrekvensen er jo den samme hvis instrumenterne spiller samme tone – eller node. Fx kammertonen, 440 Hz. !! Forskellen i lyden ligger i overtonerne.

Skal en lyd fra et instrument med en given frekvens forstærkes i en forstærker, skal forstærkeren selvfølgelig kunne gengive grundtonen, men altså også den dobbelte frekvens, den 3-dobbelte, den 4-dobbelte osv.

En god forstærker skal altså kunne håndtere betydelig højere frekvenser end 16 kHz for at kunne gengive høje frekvenser, der ikke er sinusformede.

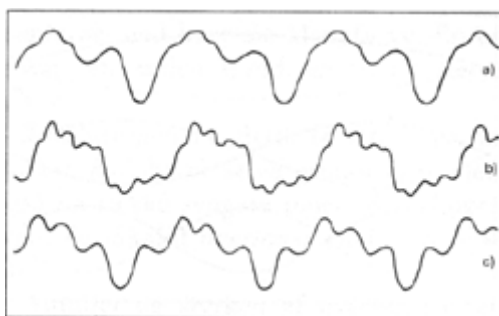
En ren tone betyder en tone som kun indeholder én frekvens. Matematisk betyder en ren tone, at tonen er sinusformet. Dvs. en sinussvingning kan principielt kun indeholde én frekvens. Det er fx sinussvingninger, der kommer ud af en tonegenerator. Musikalske toner, som de frembringes af et musikinstrument er harmoniske. De består af en grundtone plus en række harmoniske overtoner, dvs. deres frekvenser er én, to, tre osv. Gange grundtonens frekvens. Grundtonen og de harmoniske overtoner er alle sinusformede. En musikalsk tone kan derfor siges at bestå af sinusformede deltoner, nemlig grundtonen plus en række overtoner med et ganske bestemt frekvensforhold til grundtonen (Bøgh Brixen & Voetmann 1989, s. 14.).



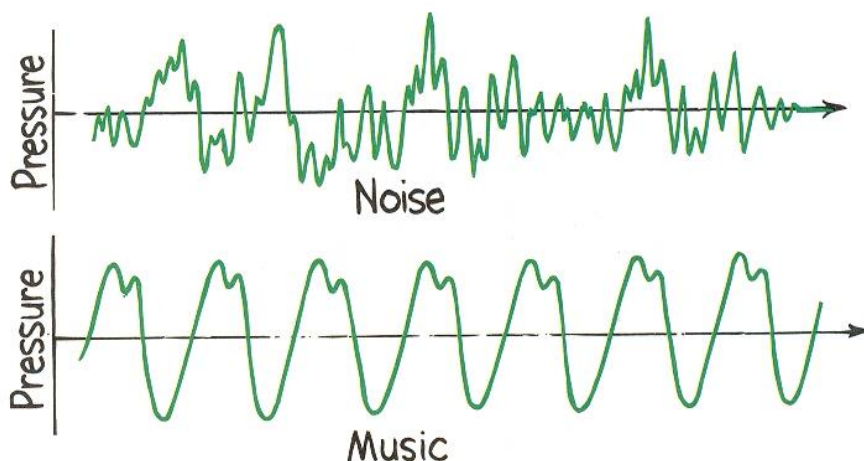
Eller sagt på en anden måde:

I virkeligheden er musikinstrumentet med til at farve tonen gennem de overtoner det frembringer. Disse varierer fra instrument til instrument. Det er derfor vi så klart kan skelne mellem f. eks tonen A frembragt på en fløjte fra samme tone frembragt på en violin eller en trompet” ”De fleste lyde – et brag, en knagen, et klik eller en tone fra et musikinstrument – har en sammensat bølgeform. Det betyder at lyden ikke består af én bestemt frekvens. Det er en af bølgeteoriens og matematikkens store landvindinger at der er ført bevis for at enhver periodisk svingning matematisk kan beskrives som en sum af sinusformede svingninger med forskellig frekvens og forskellig styrke”

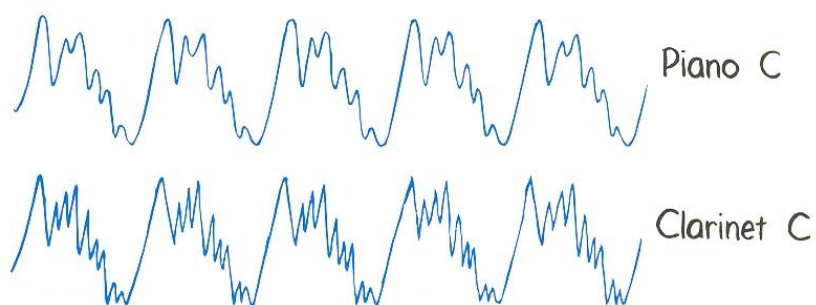
Hvorfor lyder instrumenter forskelligt ??



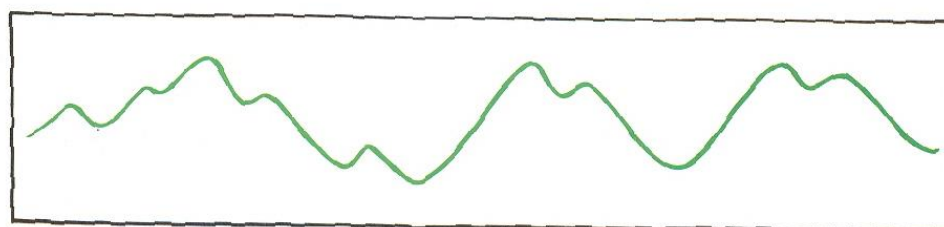
Den samme frekvens spillet på 3 forskellige instrumenter



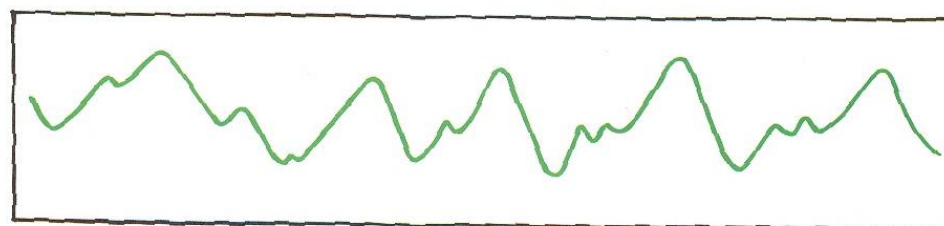
Følgende viser en skitse af forskellige instrumenter og deres overtoner.:



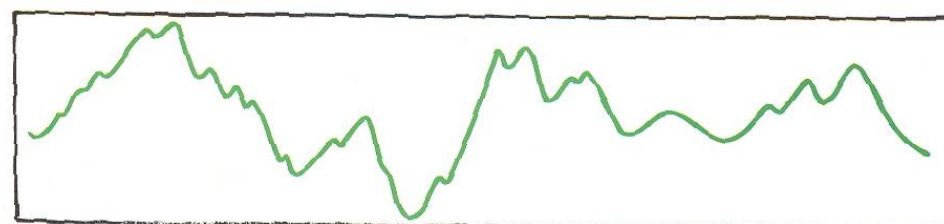
Her spilles den samme tone, = frekvens, på en piano og en klarinet. Grundtonen eller grundfrekvensen ses, og ”forvanskninger af den” giver den specifikke lyd.



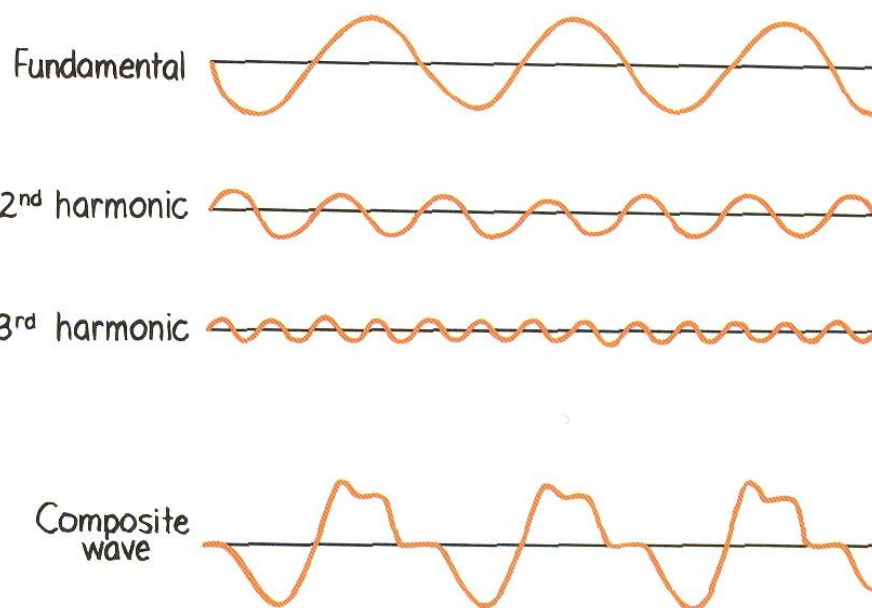
a Oboe

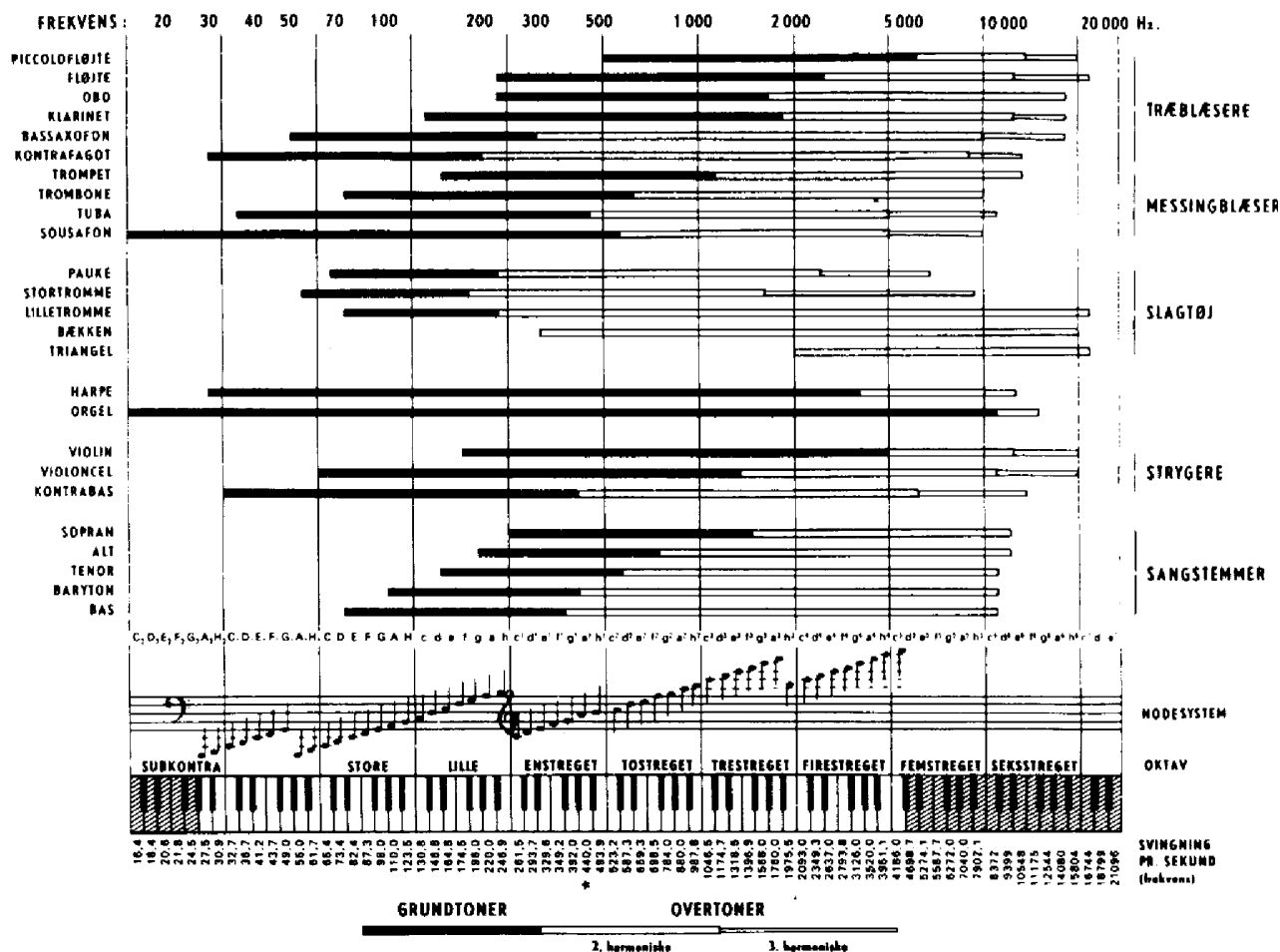


b Clarinet



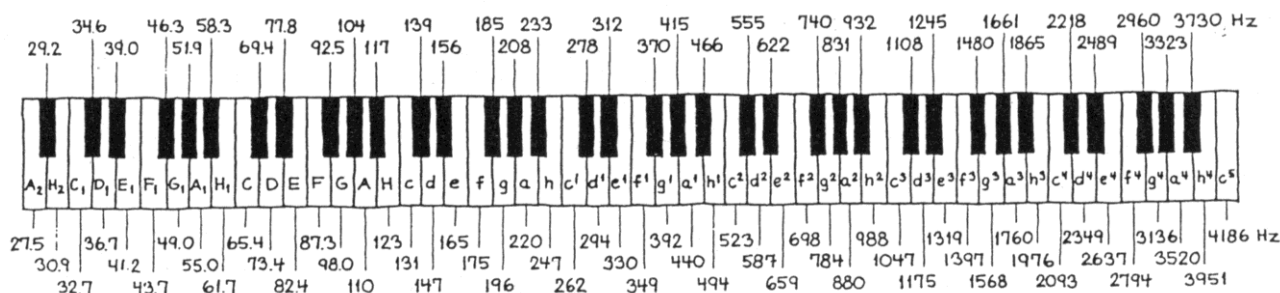
c Oboe and clarinet together





Illustrationen viser frekvensområderne, eller toneomfanget, for forskellige musikinstrumenter og sangstemmer. Til venstre grundtoner, den 2. harmoniske (overtone) og den 3. harmoniske. Nederst er også medtaget flyglets klaviatur samt nodesystemet.

Herunder er vist frekvenserne (grundtoner) for et klavers forskellige tangenter:



Klavertangenternes grundtoner



Nodeskalaen:

Nodeskalaen er konstrueret efter viste formel.

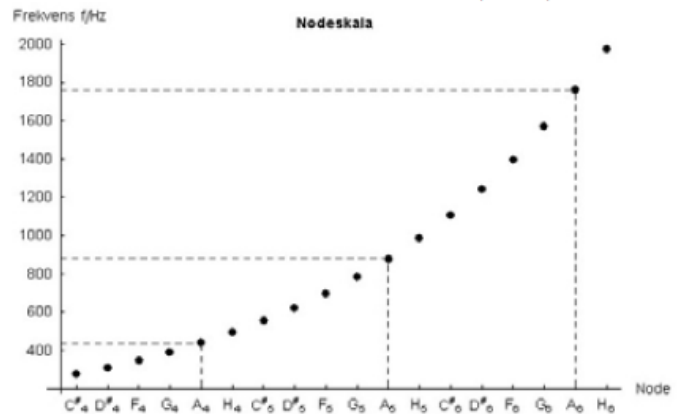
Kilde: <http://www.steelband.dk/science/kollokvium.pdf>

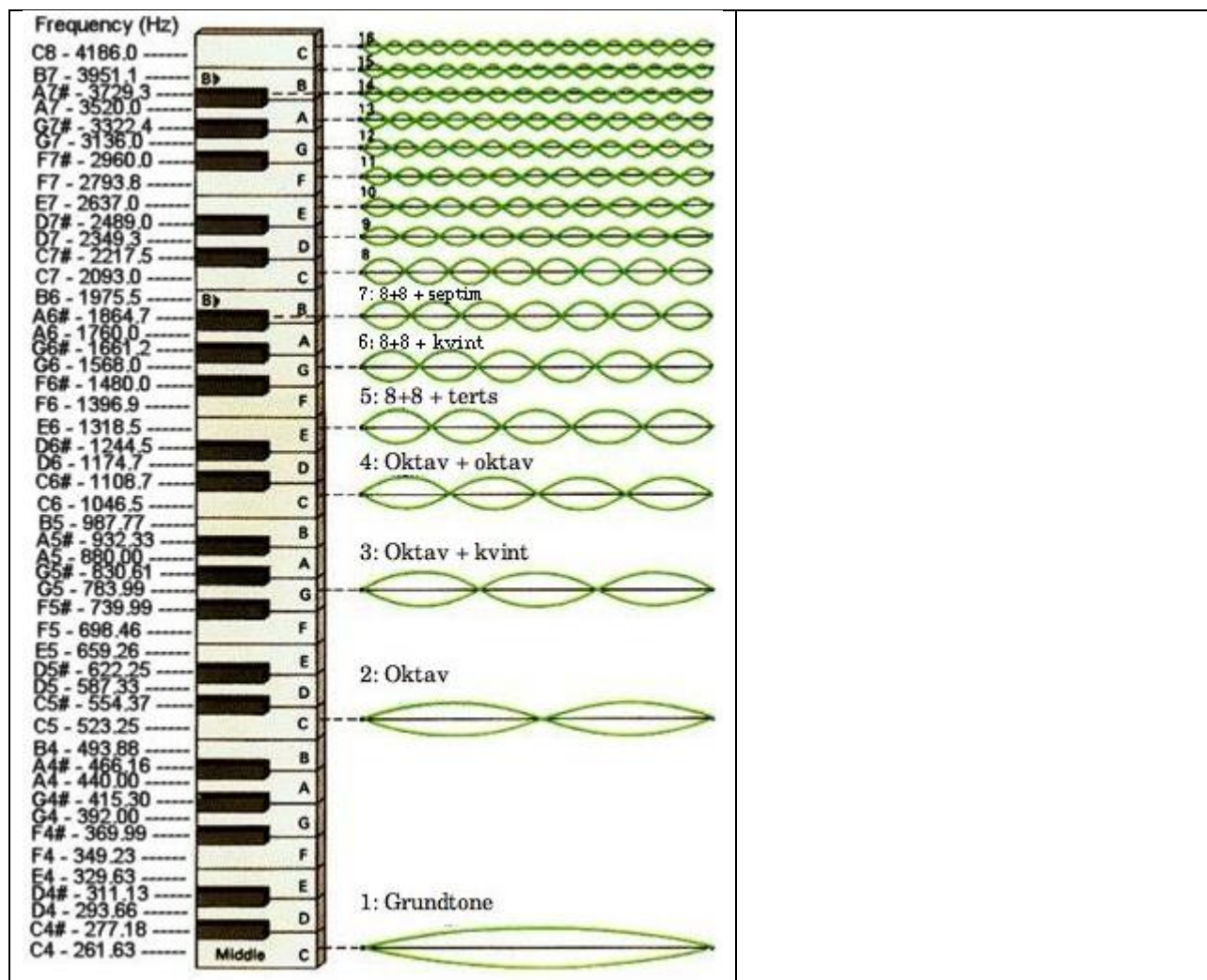
- $A_4 = 440$ Hz (kammertonen)

- Oktav = dobbelt frekvens

- 12 halvtoner pr. oktav

dvs. $f = 440 \text{ Hz} \cdot \left(\sqrt[12]{2}\right)^n$





<http://jakobmjensen.dk/musikkurser/historie/generelt/elektro.htm>

$$\begin{aligned}
 x_{\text{square}}(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)2\pi ft)}{(2k-1)} \\
 &= \frac{4}{\pi} \left(\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{5} \sin(10\pi ft) + \dots \right).
 \end{aligned}$$

Squarewave: http://en.wikipedia.org/wiki/Square_wave

Harmoniske Signaler

Alle periodiske svingninger kan opløses i en grundtone plus eller minus et antal højere harmoniske frekvenser, med aftagende amplitude..

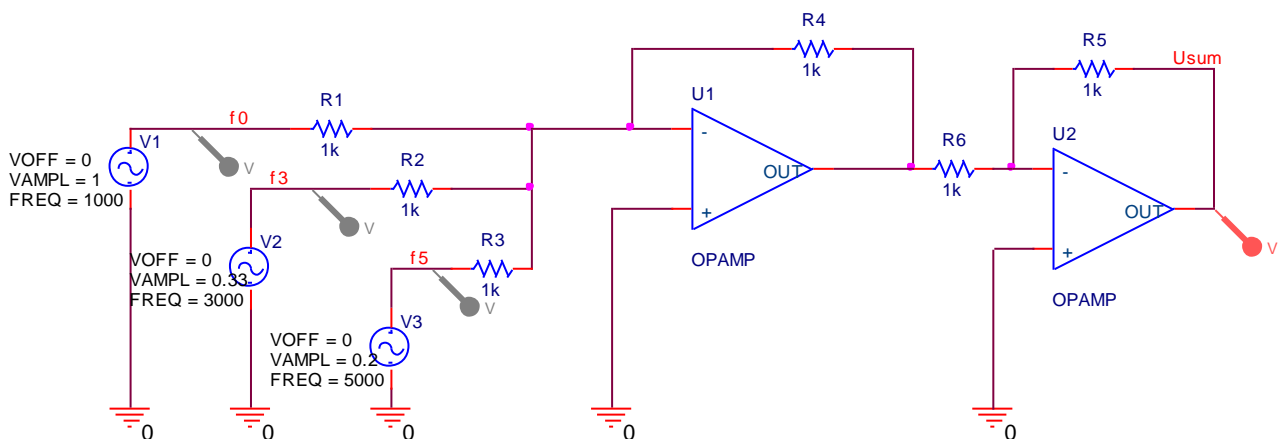


Ethvert periodisk signal, dvs. et, der gentager sig selv, kan uanset kurveform opløses i en række sinustoner med forskellig frekvens, amplitude og fase.

Fænomenet blev opdaget af en fransk matematiker, Jean-Baptiste Joseph Fourier [Fur'je']. Det gav senere navn til Fourier-analyse og Fouriertransformation.

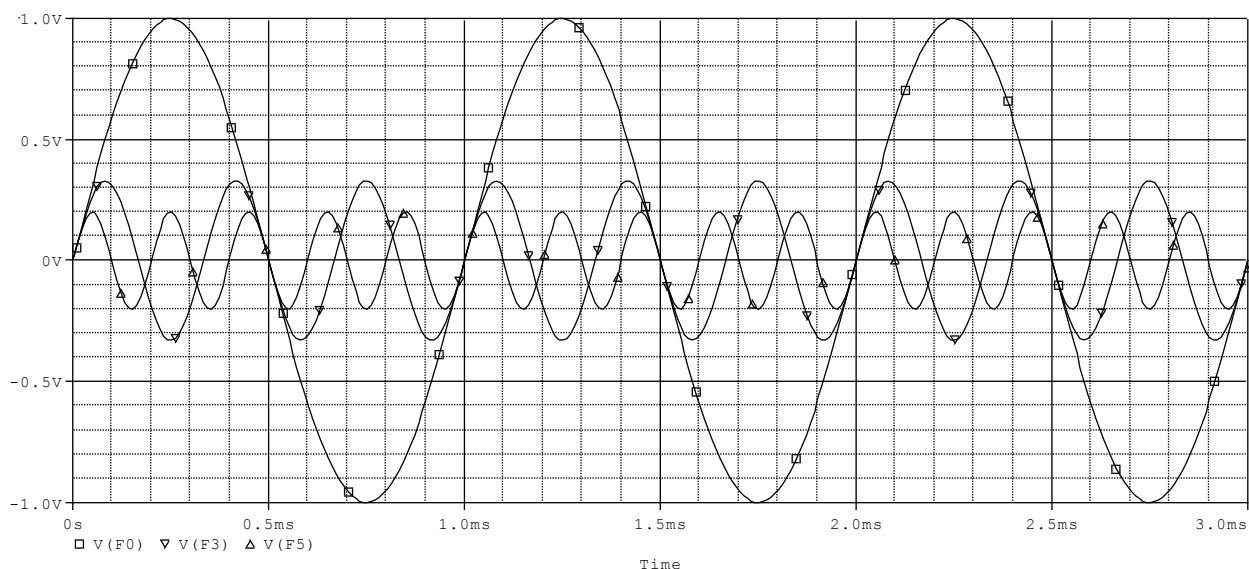
At overtonerne kan have forskellig fase betyder, at de kan være forskudt i tid.

Følgende kredsløb blev opbygget for at illustrere at:



Den første generators frekvens er 1000 Hz, og amplituden 1 Volt. Den anden er 3000 Hz med en amplitude på 1/3 Volt. Og den 3. har 5000 Hz og amplituden 1/5 Volt.

De 3 generatorer giver flg. signaler:

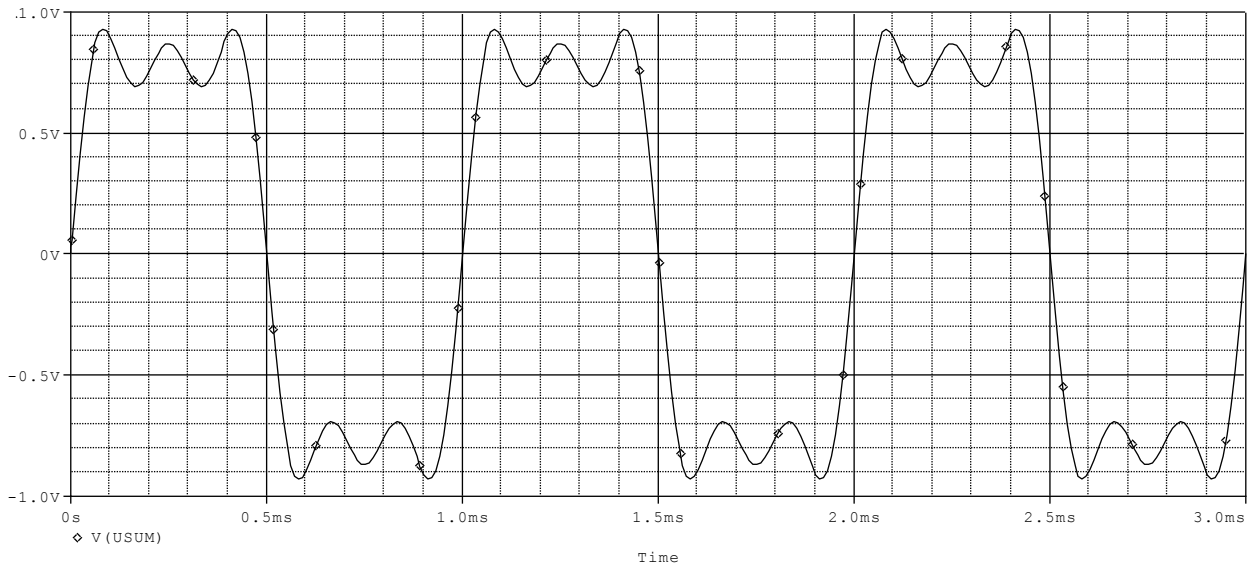


Den matematiske fremstilling er som flg.:

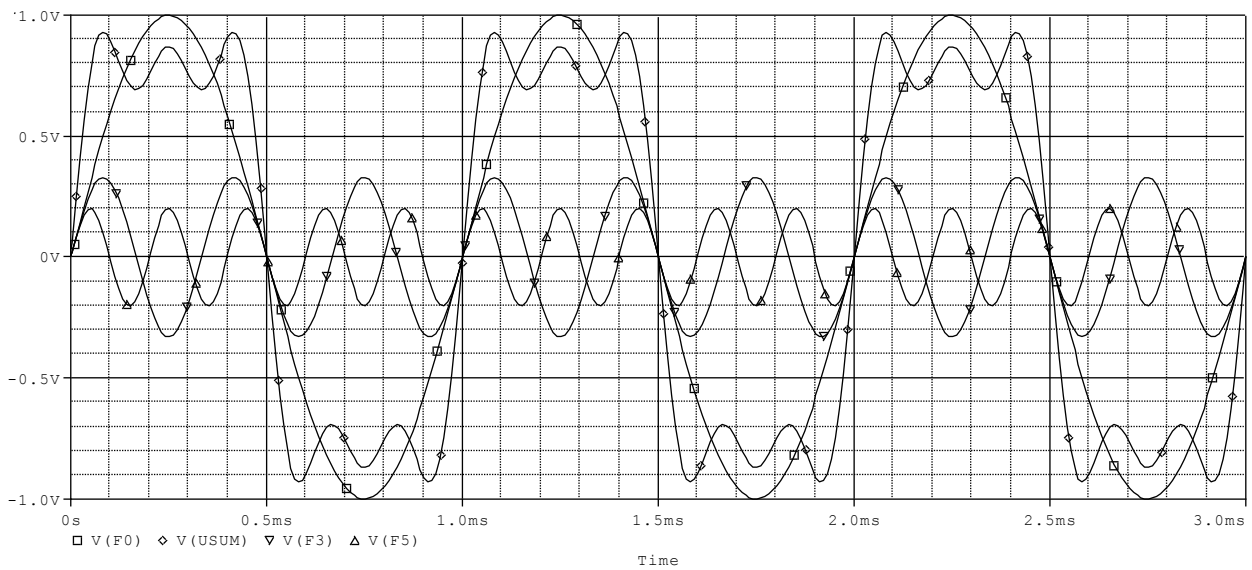


$$f(t) = \frac{4 \cdot A}{\pi} \cdot \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \text{ hvor } A \text{ er signalets amplitude, og } \omega \text{ er lig } 2\pi f.$$

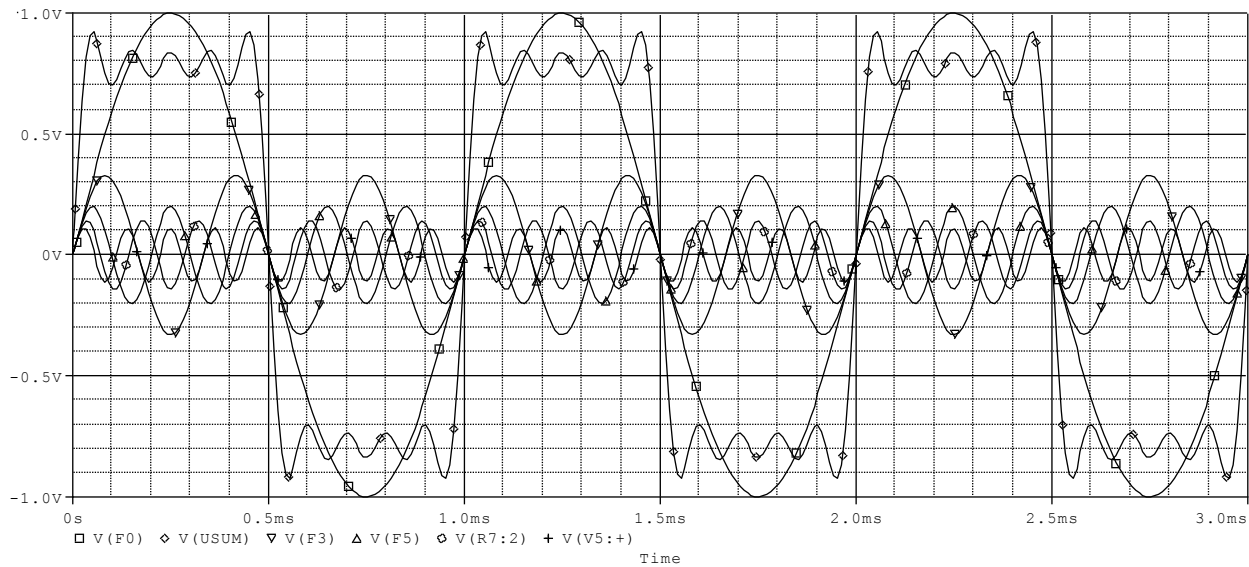
Adderes signalerne fås summen af dem. Det ser ud som flg.:



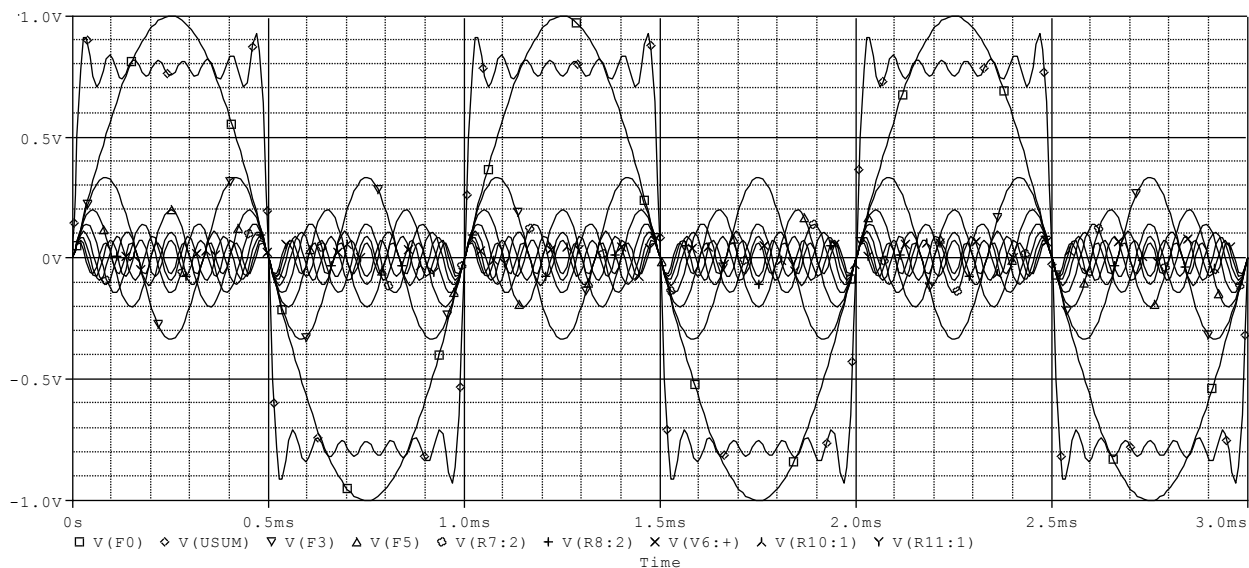
Her vises alle signaler sat sammen!



Og med 5 generatorer



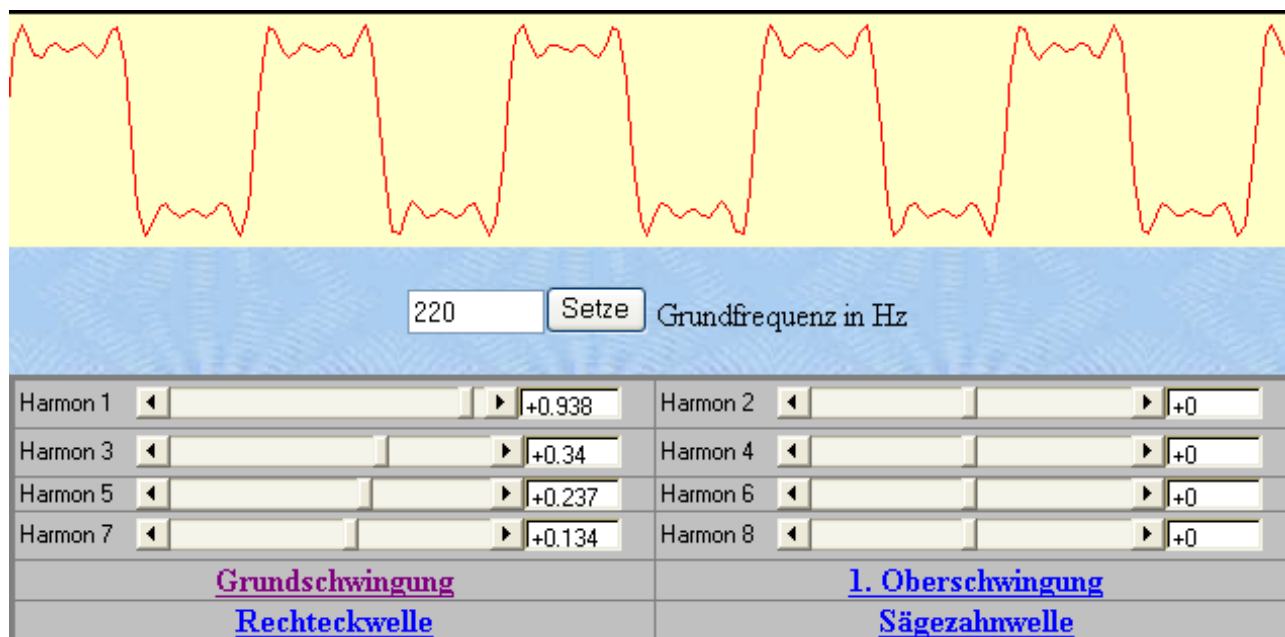
Med 7 generatorer



Det ses, at jo flere harmoniske signaler, der adderes, jo tættere kommer man på en ren firkant.

Dvs at ikke sinusformede signaler kan opløses i en grundsinus plus et antal harmoniske. Det betyder også, at skal et ikke sinusformigt signal forstærkes i en forstærker, skal forstærkeren kunne håndtere både grundtonen, og de højere harmoniske.

På adressen <http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/synthese.html> kan der findes en applet, hvor man kan indstille grundtonen og de højere harmoniske, og samtidig høre lyden! Skærbilledet ser således ud:



En anden, på engelsk, findes på

<http://webphysics.davidson.edu/faculty/dmb/Synthesizer/Synthbar.html>

<http://www.falstad.com/fourier/>



Ohms lov på akustik

Følgende skema viser Lyd-størrelser – og deres analogier over i den elektriske verden.

Størrelse	Formeltegn	Enhed	Analogi i elektricitet
Sound pressure, Lydtryk	P	N/m ² = Pa	U, Voltage, Spænding
Partikkel velocity Partikkel hastighed	V	M/s	I, Current, Strøm
Akustisk Impedans Akustisk modstand	Z	N S/m ³	R, Resistans, Modstand
Sound Intensity Lydintensitet	I	W/m ²	P, Power, Effekt

Partikkelhastighed er ikke lig lyds udbredelseshastighed, speed of sound !!.

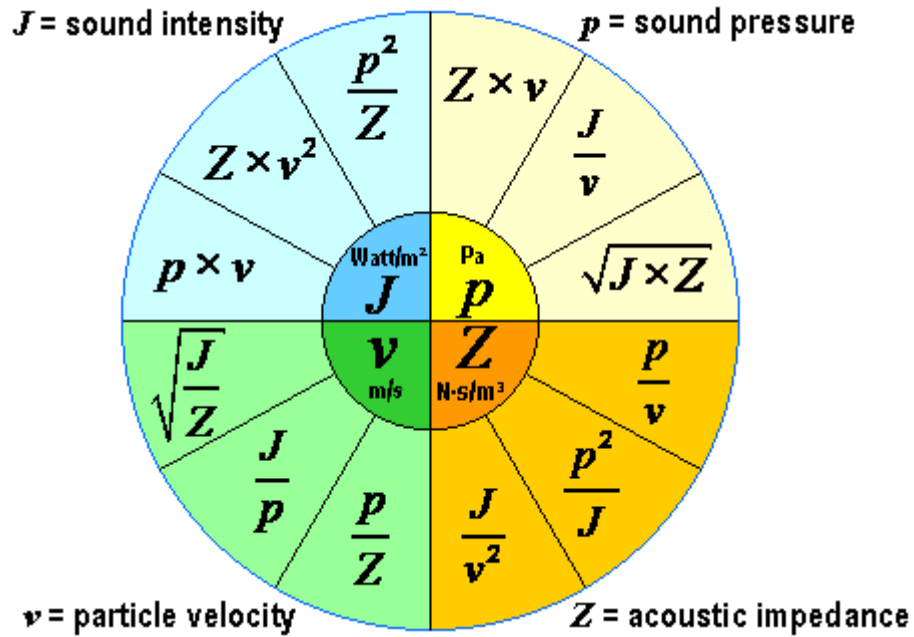
Akustisk impedans for luft $Z_0 = 413 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]$ ved 20 grader C.

(410 ved 25 grader C)

Følgende skema viser formler sat sammen som man traditionelt viser Ohms Lov, og de forskellige afledte formler. Den skal forstås således, at i fx 1. kvadrant findes, at Lydtrykket P er lig Z gange V, eller I / V osv.



Formel-hjul !!



Kilde: Se www.sengpielaudio.com/calculator-ak-ohm.htm

Kilder:

Lydintensitet, hæfte af Bryel & Kjær

Ingeniøren, Tema, maj 79

Physics for Scientists and Engineers, af Serway Jewett, 6th Edition

Ps. Der er mange andre appletter på <http://www.schulphysik.de/java/physlet/>