

---

# ETLYAK

## Sound and Acoustics

---





---

# Indholdsfortegnelse

---

<b>1</b>	<b>Karakterisering af lyd</b>	<b>7</b>
1.1	Lektion 01-02-2018 . . . . .	7
1.1.1	Lyd i et medium . . . . .	7
1.1.2	Hørelsen . . . . .	9
1.1.3	Ohms lov analogi . . . . .	12
1.1.4	Vægtning . . . . .	13
1.1.5	Lydens udbredelse . . . . .	14
1.1.6	Opgaver . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Måling/opsamling af lyd</b>	<b>17</b>
2.1	Lektion 08-02-2018 . . . . .	17
2.1.1	Mikrofon . . . . .	17
2.1.2	Højtaler (afstandsregel) . . . . .	19
2.1.3	Måling af lydtryk . . . . .	19
2.1.4	Opgaver . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Psykoakustik</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Lydens udbredelse i et rum</b>	<b>23</b>
4.1	Lektion 15-02-2018 . . . . .	23
4.1.1	Stående bølger . . . . .	23
4.1.2	Geometrisk rumakustik . . . . .	26
4.1.3	Statistisk rumakustik . . . . .	28
4.1.4	Absorptionskoefficienter . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Gengivelse af lyd</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Højtalerdesign</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Lyddæmpning og lyddiffusion</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>Lydens opførsel i lukkede rum</b>	<b>35</b>

**9 Menneskets opfattelse af lyd****37**

---

## Rettelser

---

Note: Mangler højtaler (aftandsregel) noter. . . . .	19
Note: Mangler måling af lydtryk noter. . . . .	19



---

# Karakterisering af lyd

---

## 1.1 Lektion 01-02-2018

1. Lyd i et medium
2. Hørelsen (opfattet lydniveau)
3. Ohms lov analogi
4. Vægtning (filtrering)
5. Lydens udbredelse (afstandsregel)

- **Pensum:**

1. Master Handbook Of Acoustics, ch. 1-3
2. Audio Meetering, sec. 1-6, 11, 13
3. Elektroakustik, TAS, p. 6

- **Opgaver:**

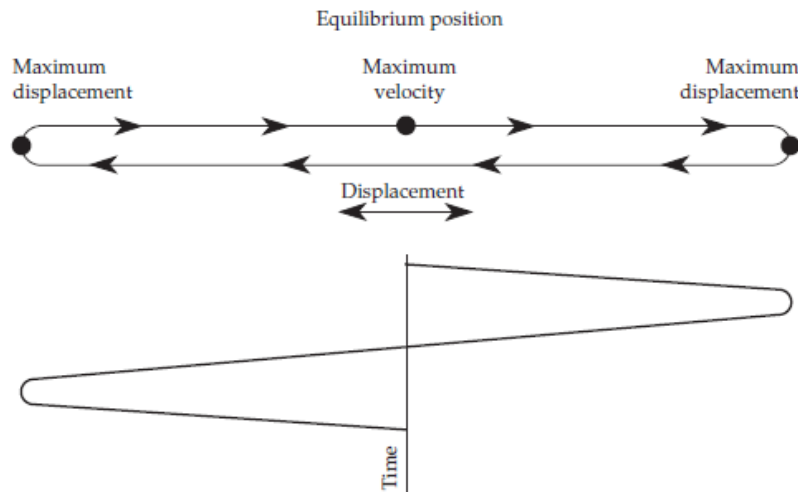
1. Lyd og Akustik - Lektion 1 - opgaver og øvelser

### 1.1.1 Lyd i et medium

*Sound can be viewed as a wave motion in air or other elastic media. In this case, sound is a stimulus. Sound can also be viewed as an excitation of the hearing mechanism that results in the perception of sound. In this case, sound is a sensation.*

- Lyd er svingning i et medium omkring ligevægt. Uden et medium kan lyd ikke blive udbredt.

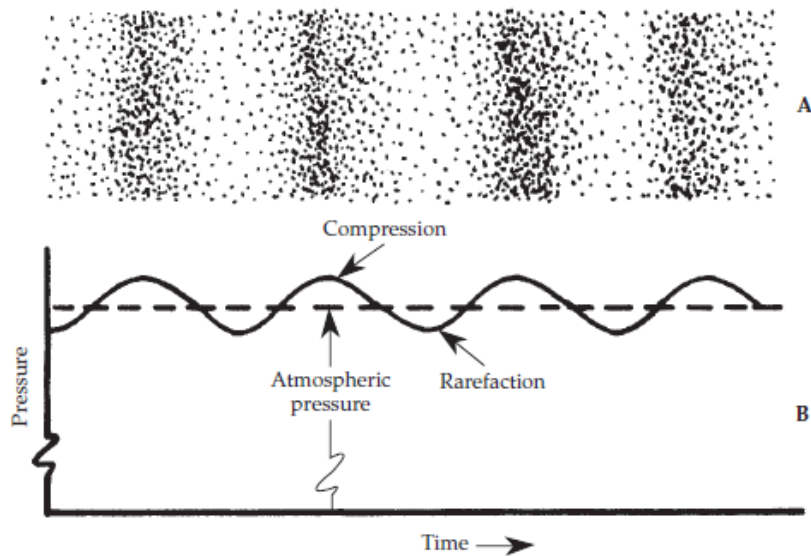
- Lyd kan udbredes i medier såsom luft, væsker og materialer af fast form. Lyd kan ikke udbredes i rummet, da mediet her er et vakuum.
- Hvis en luftpartikel bliver forskudt fra dens oprindelige position, vil elastiske kræfter forsøge at tilbagevende luftpartiklen til dens oprindelige position.



Figur 1.1: En luftpartikel der vibrerer rundt om dens medie som er i ligevægt (elastiske kræfter).

- Fluktuationerne i trykket omkring det atmosfæriske tryk er meget små.
  - Normal tale ses som små ripples i det atmosfæriske tryk.
  - Den mindste ændring i trykket et øre kan opfatte er således  $20 \mu\text{Pa}$ . Dette svarer til et tryk der er 5 millioner gange mindre end det atmosfæriske tryk.
- Lydens hastighed er  $c = 344 \text{ m s}^{-1}$ 
  - Lydens udbredelse (hastighed) afhænger af mediets densitet.
    - \* Jo større densitet, jo nemmere er det for partiklerne at overføre energi. Lyd udbredes derfor hurtigere i væsker og materialer i fast form end i luft.
  - Lydens udbredelse afhænger også af temperatur og luftfugtighed.
    - \* Jo højere temperatur, jo hurtigere udbredes lyden.
    - \* Jo højere luftfugtighed, jo hurtigere udbredes lyden.





Figur 1.2: (A) Variationer af lufttryk komprimerer luftpartiklerne.  
(B) Variationerne ligger lige over og lige under det atmosfæriske tryk.

- Bølgelængde og frekvens
  - Frekvens (waveform repetitions per unit of time)

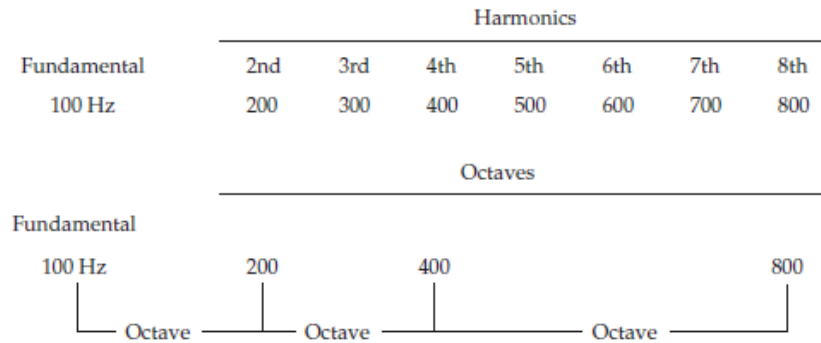
$$f = \frac{c}{T} \quad (1.1)$$

- – Wavelength (to complete one cycle)

$$T = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

### 1.1.2 Hørelsen

- Tonehøjden (pitch) af en frekvens høres forskelligt af øret.
- Tonehøjden for en **lav frekvens dæmpes** når intensiteten øges mens tonehøjden for en **høj frekvens øges** når intensiteten øges.
- Harmonisk er en lineær skala.
- Oktaver er en logaritmisk skala ofte anvendt i musik fordi den skalerer bedre til ørets opfattelse af lyd.
  - En oktav er defineret ved en 2:1 ratio af to frekvenser.
  - Intervallet fra 100 Hz til 200 Hz opfattes som værende større end intervallet fra 200 Hz til 300 Hz.



Figur 1.3: Sammenligning mellem harmoniske og oktaver.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (1.3)$$

$f_2$  = frequency of the upper edge of the octave interval, Hz

$f_1$  = frequency of the lower edge of the octave interval, Hz

$n$  = number of octaves

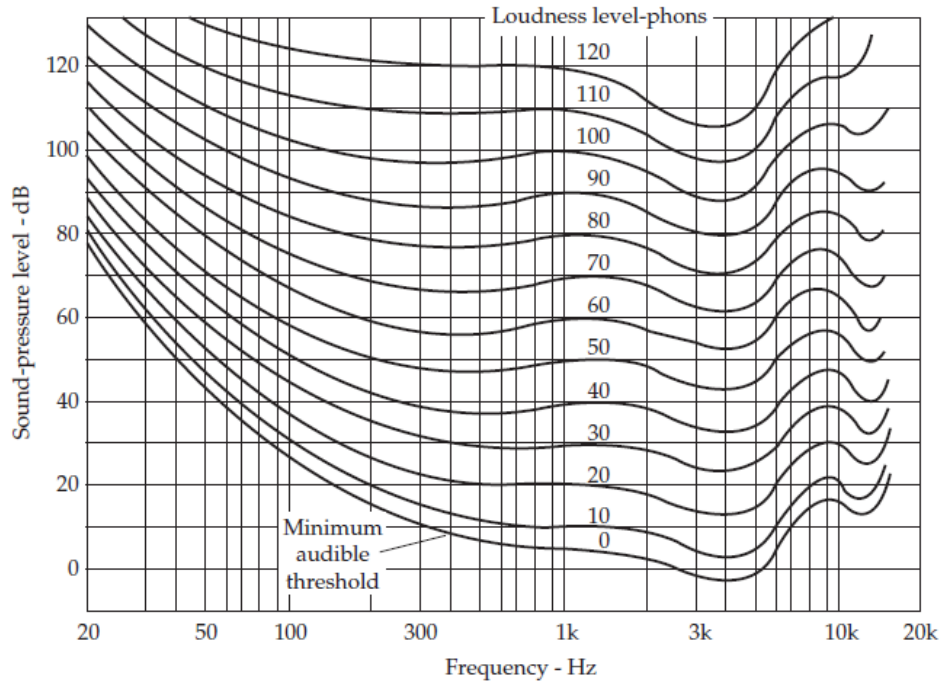
- Scopet af det hørbare spektrum er 20 Hz til 20 kHz.
  - Der er lyde der ikke kan høres af øret. Det er frekvenser der er lavere end det hørbare spektrum (infrasound) og frekvenser der er højere end det hørbare spektrum (ultrasound).
- Intensiteten af lyden  $I_L$  kan opgives i decibel [dB] ved at anvende reference  $I_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$  som er den mindste ændring i trykket et øre kan opfatte.
- Lydeffekten kan ligeledes opgives i dB ved at anvende reference effekt  $L_p = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$ .

$$PW_L = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} \quad (1.4)$$

$PW_L$  = sound-power level, dB

$W$  = sound power, watts

$W_{ref}$  = a reference power,  $10^{-12} \text{ W}$



Figur 1.4: Det menneskelige øres opfattelse af subjektivt konstant lydtryk.

- Lydintensitet er svært at måle. Men lydtryk (sound pressure level  $SP_L$ ) er derimod det nemmeste at måle. Derfor anvendes lydtryk ofte.
  - $SP_L$  er tæt på at være ens med  $I_L$ , hvor begge ofte bliver referet til som lydniveauet (sound level).

$$SP_L = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad (1.5)$$

$SP_L$  = sound-pressure level, dB

$p$  = acoustic pressure,  $\mu\text{Pa}$  or other

$p_{ref}$  = acoustic reference pressure,  $\mu\text{Pa}$  or other

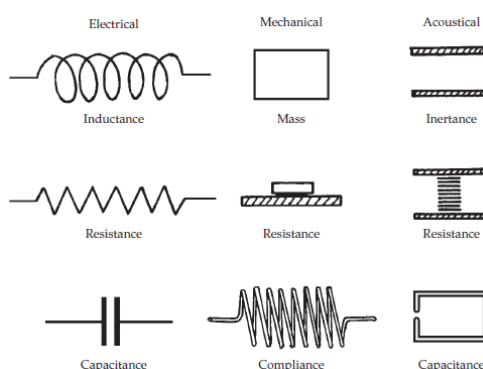
	Equation (1.4)	Equation (1.5)
Parameter	$10 \log_{10} \frac{a_1}{a_2}$	$20 \log_{10} \frac{b_1}{b_2}$
<b>Acoustic</b>		
Intensity	X	
Power	X	
Air particle velocity		X
Pressure		X
<b>Electric</b>		
Power	X	
Current		X
Voltage		X
<b>Distance</b> (From source-SPL; inverse square)		X

Figur 1.5: Om der skal bruges 10 log og 20 log.






- Når effekten fordobles svarer det til en 3 dB forøgelse uanset om effekten fordobles fra 1 W til 2 W eller fra 100 W til 200 W.

### 1.1.3 Ohms lov analogi

- Et akustisk system som en højttaler kan blive repræsenteret i termer der er ækvivalente med et elektrisk eller mekanisk system.



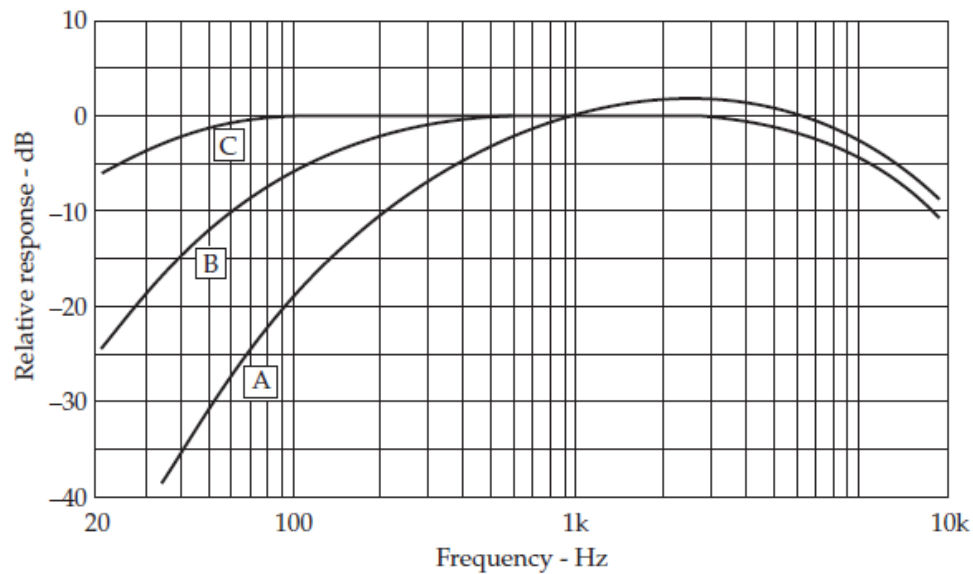
Figur 1.6: De 3 basale elementer af elektriske systemer og deres analogier i mekaniske og akustiske systemer.

System	Variable		Komponenter		
					
<b>Elektrisk</b>	<b>Spænding</b>	<b>Strøm</b>	<b>Kapacitet</b>	<b>Modstand</b>	<b>Selvinduktion</b>
Impedans: $V/A = \Omega$	V	A	$F = As/V$	$\Omega = V/A$	$H = Vs/A$
	$u(t)$	$i(t)$	$u = \frac{1}{C} \int i dt$	$u = R i$	$u = L \frac{di}{dt}$
<b>Mekanisk</b>	<b>Kraft</b>	<b>Hastighed</b>	<b>Fjeder</b>	<b>Modstand</b>	<b>Masse</b>
Impedans: $N/ms^{-1} = kg/s$	N	m/s	m/N	Ns/m	kg
	$F(t)$	$v(t)$	$F = \frac{1}{C} \int v dt$	$F = Rv$	$F = M \frac{dv}{dt}$
<b>Akustisk</b>	<b>Tryk</b>	<b>Vol.hast.</b>	<b>Fjeder</b>	<b>Modstand</b>	<b>Masse</b>
Impedans: $Nm^{-2}/m^3s^{-1} = kg/m^4s$	$Pa = N/m^2$	$m^3/s$	$1/m^3N$	$Ns/m^5$	$kg/m^4$
	$p(t)$	$q(t)$	$p = \frac{1}{C} \int q dt$	$p = Rq$	$p = M \frac{dq}{dt}$
<b>Termisk</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Effekt</b>	<b>Kapacitet</b>	<b>Modstand</b>	<b>(Ingen)</b>
Impedans: $K/W$	K	W	J/K	K/W	(ingen)
	$T(t)$	$P(t)$	$T = \frac{1}{C} \int P dt$	$T = RP$	(ingen)

Figur 1.7: Analogier for komponenter i et elektrisk, mekanisk og akustisk system.

### 1.1.4 Vægtning

- Ved måling af lydtryk benyttes ikke blot en mikrofon og en forstærker. Hørelsen er kompleks og for at efterligne hjernens opfattelse af et lydniveau benyttes nogle elektriske filtre
- Filtrene A, B og C modificerer frekvensresponsen så den efterligner hørekurven ved lavt, middel og højt lydniveau.
  - A-vejning korrelerer godt til nedslidningen af hørelsen ved kraftige signaler og benyttes derfor ved støjmåling.
  - B-vejning benyttes ikke mere.
  - C-vejning bruges til specifikation af kortvarige spidser for måling af støjens skadevirkning ved klassifikation af en arbejdsplads for påbudt brug af høreværn.



Figur 1.8: A, B, and C weighting response characteristics for sound-level meters.

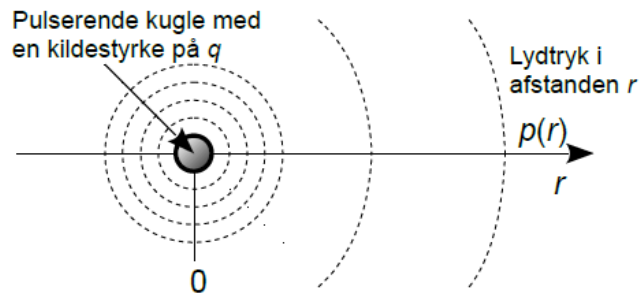
For sound-pressure levels of 20 to 55 dB, use network A.

For sound-pressure levels of 55 to 85 dB, use network B.

For sound-pressure levels of 85 to 140 dB, use network C.

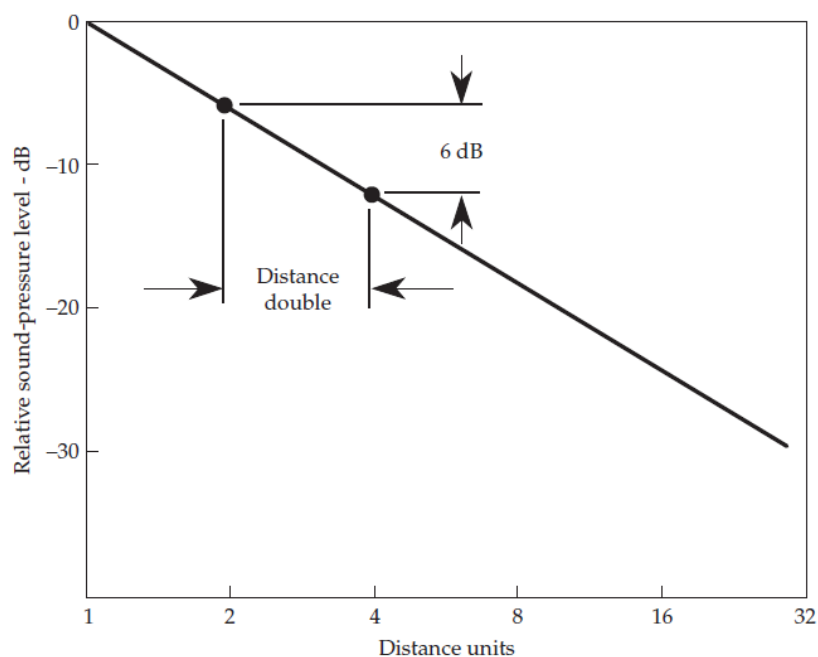
### 1.1.5 Lydens udbredelse

- Punktløydkilde: Lyden udbredes ligeligt i alle retninger.
  - Lyden fra en punktløydkilde ændrer **ikke** udseende ved stigende afstand.
  - En plan lydbølge er en matematisk abstraktion og følgende tilnærmelser anvendes:
    - \* Lydens udbredelse i smalle rør (musikinstrumenter, fjernvarme).
    - \* Lydens udbredelse i stor afstand fra lydkilden.
    - \* Højtalerens nærfelt.



Figur 1.9: Lyden fra en punktkilde udbredes fra kildens centrum og lydtrykket aftager ved stigende afstand.

- Lydtrykket aftager med stigende afstand idet effekten i den kugleformede bølgefront fordeles over et areal, der vokser kvadratisk med afstanden.
  - Nærfelt: Lydtrykket varierer ikke – plane bølger.
  - Fjernfelt:  $-6 \text{ dB/fordobling}$  – sfæriske bølger.



Figur 1.10: Afstandsregel.

### 1.1.6 Opgaver

1. Beregn dB værdien af det maksimalt mulige lydtryk.
2. Beregn det A-vægtede lydtryk af 76 dB ved 125 Hz.
3. Et lydtryk reduceres 8 dB, hvor mange gange er det?
4. Hvor meget lydtryk skal der til, for at vi opfatter lyden - ved 63 Hz og ved 2 kHz?

```
1 %% LYAK L1 01-02-2018
2 % 1. Beregn dB værdien af det maksimalt mulige lydtryk.
3 L = 20*log10(10^5/(20*10^-6));
4 disp(['Det maksimalt mulige lydtryk er ', num2str(L), ...
       ' dB'])
5
6 % 2. Beregn det A-vægtede lydtryk af 76 dB ved 125 Hz.
7 f = 125;
8
9 R_A = (12194^2*f^4)/((f^2+20.6^2)* ...
10 sqrt((f^2+107.7^2)*(f^2+737.9^2))*(f^2+12194^2));
11 A = 20*log10(R_A)+2;
12
13 disp(['Det A-vægtede lydtryk af 76 dB (125 Hz) er ', ...
       num2str(76+A), ' dB'])
14
15 % 3. Et lydtryk reduceres 8 dB, hvor mange gange er det?
16 gg = db2mag(8);
17 disp(['Lydtrykket reduceres 8 dB, hvilket svarer til ...
       ', num2str(gg), ' ganges reducereing'])
```



---

# Måling/opsamling af lyd

---

## 2.1 Lektion 08-02-2018

1. Mikrofon
2. Højttaler (afstandsregel)
3. Måling af lydtryk

- **Pensum:**

1. Audio Meetering, sec. 8-9, 26-29
2. Elektroakustik, TAS, p. 12-14

- **Opgaver:**

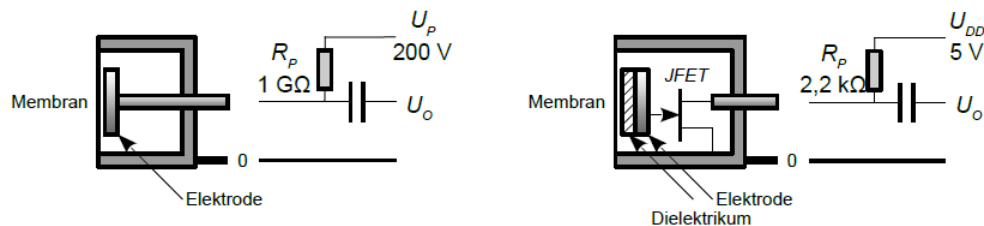
1. Lyd og Akustik - Lektion 2 - opgaver og øvelser

### 2.1.1 Mikrofon

- En transducer der omsætter et oscillerende lydtryk til et analogt elektrisk signal.
  - Kaldes også for en tryktransducer.
  - Måler lydtrykkets variation i et punkt uden reference til den retning lyden udbredes i.
  - Flere mikrofontyper er retningsbestemte på grund af deres opbygning.

## Kondensator mikrofon

- En tynd membran af udspændt metalfolie er anbragt tæt på en fastsiddende elektrode.
- Kondensatoren mellem membran og elektrode oplades gennem  $R_p$ .
- Spændingen mellem membran og elektrode vil variere efter definitionsligningen  $Q = C \cdot U$ .
  - $Q$  er den konstante ladning givet af polarisationsspændingen  $U_P$  der ved målemikrofoner typisk er 200 V.
- Den lave grænsefrekvens sættes af  $R_p$  og mikrofonens kapacitet  $C$ .
  - $C \approx 5 \text{ pF} - 20 \text{ pF}$  gør at  $R_p$  skal være mindst  $1 \text{ G}\Omega$  for måling af hørbar lyd.
- Den høje grænsefrekvens sættes af membranens masse.



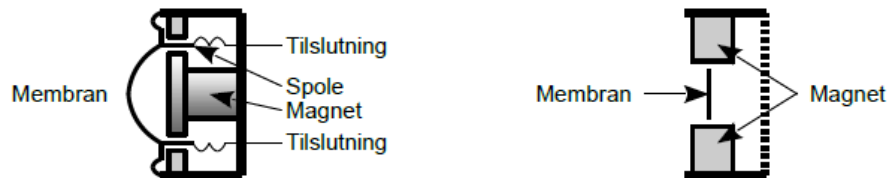
Figur 2.1: Kondensatormikrofonens opbygning.

- Alternativt indbygges en plastskive mellem membran og elektrode hvor en såkaldt "fastfrosset ladning" fungerer som  $Q$ .
- Den høje udgangsimpedans sænkes af en indbygget JFET og det eksterne kredsløb skal nu levere strøm til transistorens drain.
- Følsomheden er typisk  $\approx 5 \text{ mV/Pa}$ .

## Dynamisk mikrofon

- **Klassiske form:** minder om en højttaler (membranen sættes i bevægelse af lydtrykket). Derved bevæges svingspolen i magnetfeltet og der induceres en spænding.
- **Båndmikrofonen:** membran er i et kraftigt magnetfelt. Når lydtrykket får membran til at svinge induceres der en spænding over de to ender af båndet. Spændingen er normalt så lav at der skal benyttes en transformator for at løfte det op på et brugbart niveau.

- Lyden har adgang til begge sider af membranen.
  - \* Mest følsom for lyd på akse ( $0^\circ$  og  $180^\circ$ ).
  - \* Der kan ikke registreres lyd fra siden ( $90^\circ$ ).



Figur 2.2: (V: svingspolen drives af en membran til at svinge i et magnetfelt.) (H: En tynd metalfolie svinger i et magnetfelt og signalet tages ud ved båndets ender (ud af papiret og ind i papiret)).

### 2.1.2 Højtaler (afstandsregel)

### 2.1.3 Måling af lydtryk

### 2.1.4 Opgaver

1. Lav et MLS signal med orden 10.
2. Find impulsresponsen ud fra de sammenhørende excitations- og målesignaler i filen meassigs.mat. Systemet er "målt" både med MLS og hvid støj.
3. En 8 ohms højttaler har DC modstand på 6 ohm og virkningsgrad på 1 %.
  - (a) Bestem den producerede akustiske effekt, når højttaleren tilføres 2,83 volt.
  - (b) Lyden antages at udbrede sig sfærisk fra højttaleren. Beregn intensiteten og lydtrykniveauet på 2,5 meters afstand.
  - (c) Lydtrykket måles nu med en mikrofon hvis følsomhed er 5 mV/Pa. Hvilken spænding leverer mikrofonen?

FiXme Note:  
Mangler højttaler  
(afstandsregel)  
noter.

FiXme Note:  
Mangler måling af  
lydtryk noter.



---

# Psykoakustik

---



---

# Lydens udbredelse i et rum

---

## 4.1 Lektion 15-02-2018

1. Stående bølger
2. Geometrisk rumakustik
3. Refleksion
4. Diffraction
5. Statistisk rumakustik
6. Absorptionskoefficienter

- **Pensum:**

1. Master Handbook of Acoustics, ch. 6, 7, 11, 13
2. Elektroakustik, TAS, p. 89-96

- **Opgaver:**

1. Lyd og Akustik - Lektion 4 - opgaver og øvelser

### 4.1.1 Stående bølger

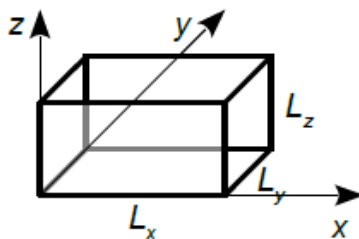
Et retvinklet rum vil have et system af egenfrekvenser. Her vil plane bølger spejles så de understøtter bestemte frekvenser. Dette sker gennem konstruktiv interferens.

Den laveste frekvens hvor der kan dannes resonans i en akseretning har en bølgelængde på halvdelen af længdedimensionen ( $L_x$ ,  $L_y$  og  $L_z$ ). Trykbølgen reflekteres ved væggen og refleksionen kan derfor understøtte den efterfølgende bølgefront.

- Ved 5 m afstand mellem to vægge er den lavest mulige resonans  $f_0 = 34$  Hz. Hertil kommer også resonans ved de harmoniske frekvenser på 68 Hz, 102 Hz, ... Tilsvarende gælder for de andre akseretninger.

Der er mulighed for stående bølger som involverer fire eller seks vægge. Dette beskrives ved at to eller tre værdier af index ( $n_x$ ,  $n_y$  og  $n_z$ ) er forskellige fra nul. De tre indekxsværdier kombineres til et enkelt ved at udnytte at  $N$  er den højest mulige værdi. Herved kan resonanserne plottes som funktion af et fælles indeks  $n$ .

Modellen gælder indtil frekvenser hvor usikkerheden på længderetningen bliver sammenlignelig med bølgelængden. Det kan vises at den øvre grænse er i cirka 550 Hz for et normalt beboelsesrum hvorved det enkelte indeks er begrænset til området  $n = 0 \dots 7$ .



Figur 4.1: Plane lydbølger kan eksistere i et rektangulært rum.

### Resonanser

$$f_n = \sqrt{\left(\frac{n_x c}{2L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y c}{2L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z c}{2L_z}\right)^2} \quad (4.1)$$

### Øvre grænse

$$f_{max} \approx \frac{c}{2\pi\Delta L} \quad (4.2)$$

$$N \approx 1 + \frac{V}{S\Delta L} \quad (4.3)$$

$V$  rummets volume  $m^3$

$\Delta L$  længdedimensionen

$S$  lydabsorberende areal



- Ved lave frekvenser er det let at adskille de enkelte resonanser.
- Ved højere frekvenser rykker resonanserne sammen og flere resonanser vil blive aktiveret i større eller mindre grad af en stationær tone.
- Når centerfrekvensen af et antal resonanser falder indenfor båndbredden af det enkelte filter er det umuligt at skelne mellem egenfrekvenserne.
- Grænsefrekvensen mellem det område hvor de enkelte resonanser kan erkendes og det område hvor de er smeltet sammen kaldes for Schröder frekvensen.
- Findes fra rummets volumen  $V$  og efterklangstid  $T_{60}$ . Teorien antager at der vil ligge mindst tre resonanser indenfor det midterste filters  $-3\text{dB}$  båndbredde.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (4.4)$$

- Rummets resonanser er ansvarlig for efterklangen i rummet.
- En højttaler udsender et støjsignal der indeholder alle frekvenser så samtlige resonanser i rummet aktiveres.
- Når lydniveauet er blevet konstant standses lyden fra højttaleren og lydniveauet aftager i takt med at lydenergien absorberes i tæpper, træpaneler og vinduer samt luften selv.
- Efterklangstiden  $T_{60}$  er defineret som tiden indtil signalet er reduceret til  $-60\text{ dB}$  af det oprindelige niveau.
- Resonanserne kan beskrives ved dæmpede svingninger der fra filterteorien repræsenteres af et anden-ordens filter for hver resonans.

$$H(s) = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{s^2 + 2d_n\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.5)$$

$$h(t) = \sum_{n=0}^N C_n \sin(\omega t) \exp(-d_n\omega_n t) \quad (4.6)$$

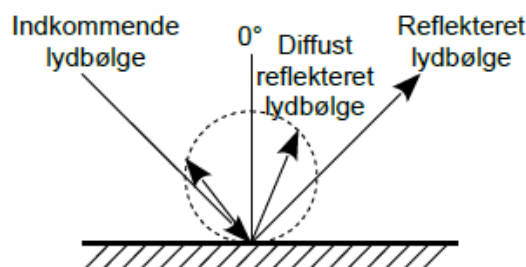
### 4.1.2 Geometrisk rumakustik

En lydbølge fra lydgiveren udbredes med en konstant hastighed i alle retninger. En lytter i nogen afstand fra lydgiveren vil modtage lydbølgen efter en forsinkelse  $t_D$  på cirka 3ms per meter.

Lydbølgen vil fortsætte sin udbredelse indtil den rammer en flade i rummet hvor den reflekteres og den reflekterede bølgefront kan derfor nå frem til lytteren efter yderligere forsinkelse. Øret vil modtage et system af lydbølger der både beskriver det materiale der lyttes på og det rum lydkilden og personen befinder sig i.

#### Refleksion

- Et rums impulsrespons kan beregnes ved at følge de veje som refleksionerne vil løbe. Resultatet bliver kun en tilnærmelse uanset hvor omhyggeligt der beregnes.
- En refleksion forløber ikke med stor præcision. Der opstår en udtværing af den reflekterede signals retning som nu spredes i enhver retning og ikke alene er givet af signalets ind- og udfaldsvinkler.
- Den direkte spejling står for cirka 80 % af energien i den indfaldne bølgefront og den diffuse udstråling i enhver retning står for den resterende energi.
- Som model af den diffuse stråling anvendes statistiske metoder for at ændre lidt på refleksionens retning i forhold til en direkte spejling.

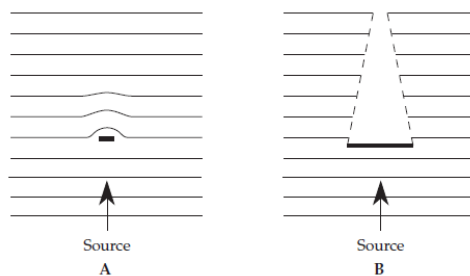


Figur 4.2: En lydbølges refleksioner sker både som en direkte spejling af lydbølgen og som en diffus lydbølge.

## Diffraction

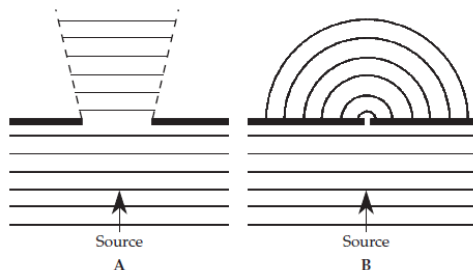
Hvordan lydbølger bøjes af små forhindringer og hvordan lydbølger udbredes efter små åbninger.

- En forhindring meget smallere end lydbølgen gør at lydbølgen kan passere uden at blive synderligt forstyrret.
- En forhindring større end lydbølgen vil resultere i at der bliver kastet en skygge (casts a shadow) der vil blive bestrålet fra kilder, der går forbi forhindringen.



Figur 4.3: Diffraction er wavelength-dependent.

- Diffractionen afhænger af den relative størrelse af åbningen.
- En stor åbning med hensyn til bølgelængde tillader lydbølger at gå igennem med en lille forstyrrelse.
  - Disse bølgefronter virker som nye kilder, der udstråler lyde-nergi i skyggezone.
- Hvis åbningen er lille i forhold til bølgelængden, vil de små bølgefronter, der trænger ind i åbningen virke som punktkilder.
  - Disse små bølgefronter vil udstråle et halvkugleformet lydfelt ind i skyggezone.



Figur 4.4: Lydbølger der rammer en barriere med en åbning.

### 4.1.3 Statistisk rumakustik

- Antager at lydenergien er konstant overalt i rummet.
- **Sabines formel** for efterklangstiden  $T_{60}$  som funktion af rummets volumen  $V$  og det lydabsorberende areal  $S$ .

$$T_{60} = \ln(10^6) \frac{4V}{Sc} = 55.3 \frac{V}{Sc} = 0.16 \frac{V}{S} \quad (4.7)$$

- For lyddæmpede rum giver Sabines formel en efterklangstid selv om der ikke er refleksioner. En modificeret udgave af Sabines formel blev udledt af Eyring.
- **Eyrings formel** er modificeret ud fra geometriske betragtninger.

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{4mV - S \ln(1 - \alpha)} \quad (4.8)$$

$$\alpha = \frac{1}{S} \sum_n S_n \alpha_n$$

$m \approx 0.0011 m^{-1}$  ved 1 kHz, 20 °C og 60 % relativ luftfugtighed

$m$  kan ignoreres for mindre rum og rum med ringe dæmpning bliver formelen lig med Sabines.

### 4.1.4 Absorptionskoefficienter

- Typisk opsætning af lydabsorberende skumplast og Rockwool er direkte på en hård betonavæg.
- Tykkelsen er afgørende for hvor lave frekvenser der kan dæmpes da partikelhastigheden er nul ved væggen så det er kun ved høje frekvenser at der er bevægelse i luften inde i materialet.
- For at opnå større absorption ved lave frekvenser kan benyttes absorbere baseret på en membran.
  - De består af en plade eller film af træ, plast eller metal som lydtrykket får til at vibrere.
  - Derved skal luften bag ved membranen også svinge så luften presses igennem det absorberende materiale.

---

## Gengivelse af lyd

---



---

# Højtalerdesign

---





---

## Lyddæmpning og lyddiffusion

---



---

## Lydens opførsel i lukkede rum

---



---

## Menneskets opfattelse af lyd

---