

---

# ETLYAK

## Lyd og Akustik

---



---

# Indholdsfortegnelse

---

<b>1</b>	<b>Karakterisering af lyd</b>	<b>1</b>
1.1	Lektion 01-02-2018 . . . . .	1
1.1.1	Lyd i et medium . . . . .	1
1.1.2	Lydtryk . . . . .	3
1.1.3	Ohms lov analogi . . . . .	5
1.1.4	Vægtning . . . . .	6
1.1.5	Lydens udbredelse . . . . .	7
1.1.6	Opgaver . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Måling/Opsamling af lyd</b>	<b>11</b>
2.1	Lektion 08-02-2018 . . . . .	11
2.1.1	Måling af lydtryk . . . . .	11
2.1.2	Mikrofon . . . . .	12
2.1.3	Mikrofon for-forstærkere . . . . .	15
2.1.4	Udstyr til lydmåling . . . . .	15
2.1.5	Måleprincipper . . . . .	17
2.1.6	Opgaver . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Psykoakustik - Menneskets opfattelse af lyd</b>	<b>22</b>
3.1	Lektion 15-03-2018 . . . . .	22
3.1.1	Psykoakustik . . . . .	22
3.1.2	Ørets opbygning . . . . .	23
3.1.3	Lydniveau . . . . .	24
3.1.4	Frekvensopfattelse . . . . .	25
3.1.5	Tonehøjde . . . . .	25
3.1.6	Lokalisering af lydkilder . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Lydens opførsel i lukkede rum</b>	<b>28</b>
4.1	Lektion 15-02-2018 . . . . .	28
4.1.1	Stående bølger . . . . .	28
4.1.2	Geometrisk rumakustik . . . . .	31
4.1.3	Statistisk rumakustik . . . . .	33

4.1.4	Absorptionskoefficienter . . . . .	33
4.1.5	Opgaver . . . . .	34
4.1.6	Øvelser . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Virtuel akustik - Spejlkildemodel</b>	<b>40</b>
5.1	Lektion 22-02-2018 . . . . .	40
5.1.1	Virtuel Akustik . . . . .	40
5.1.2	Ray Tracing Method . . . . .	41
5.1.3	Image Source Method . . . . .	41
5.1.4	Reflektogram . . . . .	43
5.1.5	Øvelser . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Virtuel akustik - Auralisation</b>	<b>44</b>
6.1	Lektion 01-03-2018 . . . . .	44
6.1.1	Impulsrepsonser . . . . .	44
6.1.2	Auralisation af rum . . . . .	45
6.1.3	Binaural Analysis . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Gengivelse af lyd</b>	<b>48</b>
7.1	Lektion 22-03-2018 . . . . .	48
7.1.1	Højtalerens model . . . . .	48
7.1.2	Snittegning . . . . .	49
7.1.3	Elektriske system . . . . .	49
7.1.4	Mekaniske system . . . . .	51
7.1.5	Akustiske system . . . . .	52
7.1.6	Thiele-Small parametre . . . . .	53
7.1.7	Elektrisk og mekanisk impedans . . . . .	53
7.1.8	Mekanisk og akustisk impedans . . . . .	54
7.1.9	Lydtryk . . . . .	55
7.1.10	Øvelser . . . . .	55
<b>8</b>	<b>Højtalerdesign</b>	<b>58</b>
8.1	Lektion 05-04-2018 . . . . .	58
8.1.1	Åben baffel . . . . .	58
8.1.2	Lukket kabinet . . . . .	61
8.1.3	Basreflex . . . . .	62
8.1.4	Passiv slave . . . . .	63
8.1.5	Øvelser . . . . .	64
<b>9</b>	<b>Lyddæmpning og lyddiffusion</b>	<b>65</b>

---

# 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:**

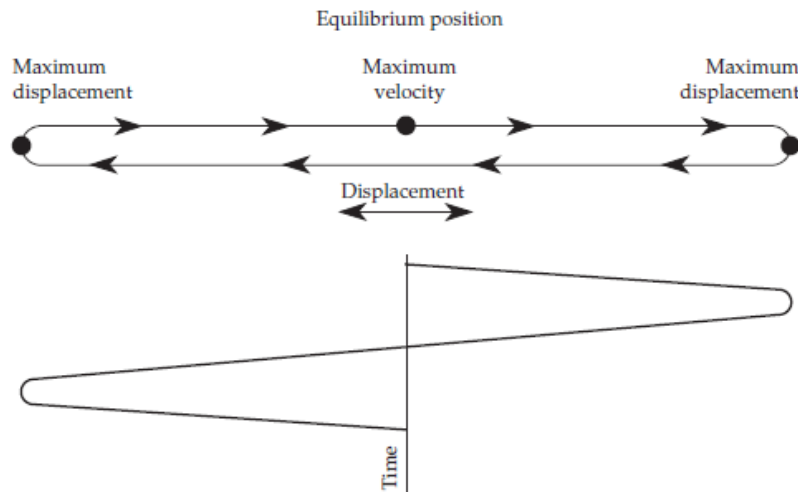
1. Lyd og Akustik - Lektion 1 - opgaver og øvelser

### 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.*

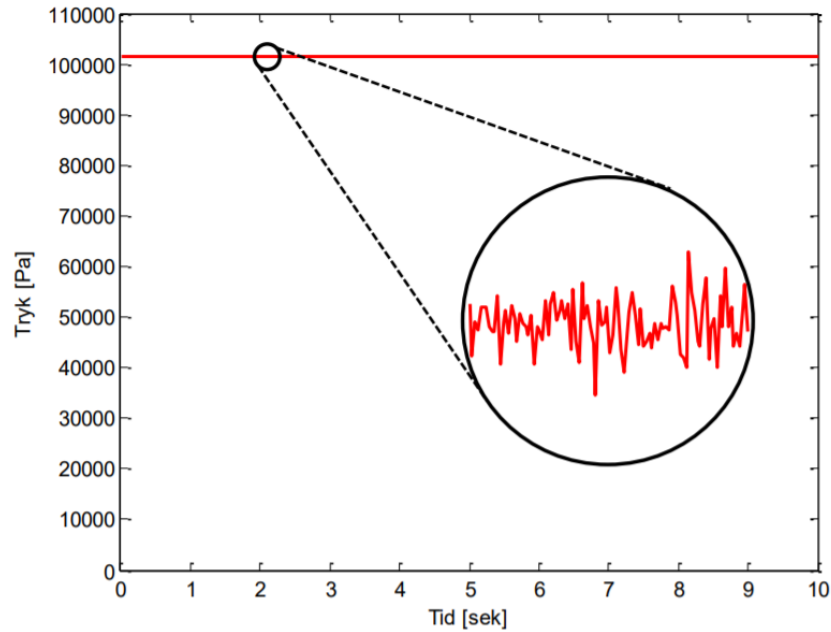
- Lyd er svingning i et medium omkring ligevægt. Uden et medium kan lyd ikke blive udbredt.

- 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 af temperatur og luftfugtighed.
    - \* Jo højere temperatur, jo hurtigere udbredes lyden.
    - \* Jo højere luftfugtighed, jo hurtigere udbredes lyden.



Figur 1.2: Variationerne omkring 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 Lydtryk

- 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  $L_p = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$ .

$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} \quad (1.3)$$

$PWL$  = sound-power level, dB

$W$  = sound power, watts

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

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

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad (1.4)$$

$SPL$  = sound-pressure level, dB

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

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

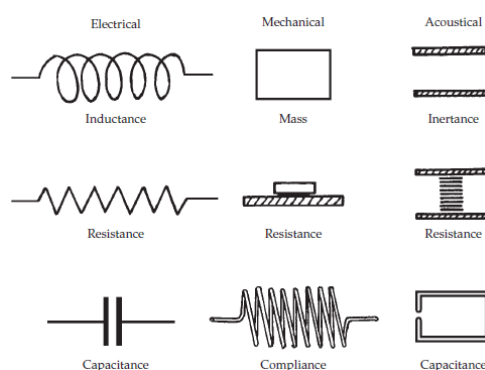
	Equation (1.4)	Equation (1.5)
Parameter	$10 \log_{10} \frac{a_1}{a_2}$	$20 \log_{10} \frac{b_1}{b_2}$
<b>Acoustic</b>		
Intensity	X	
Power	X	
Air particle velocity		X
Pressure		X
<b>Electric</b>		
Power	X	
Current		X
Voltage		X
<b>Distance</b>		X
(From source-SPL; inverse square)		

Figur 1.3: 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 1.4: 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
	$F(t)$	$v(t)$	$F = \frac{1}{C} \int v dt$	$F = R v$	$F = M \frac{dv}{dt}$
<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 <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	1/m <sup>3</sup> N	Ns/m <sup>5</sup>	kg/m <sup>4</sup>
	$p(t)$	$q(t)$	$p = \frac{1}{C} \int q dt$	$p = R q$	$p = M \frac{dq}{dt}$
<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)
	$T(t)$	$P(t)$	$T = \frac{1}{C} \int P dt$	$T = R P$	(ingen)

Figur 1.5: Analogier for komponenter i et elektrisk, mekanisk og akustisk system.



### 1.1.4 Vægtning

#### Tidsvægtning

- Lineær

$$p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (1.5)$$

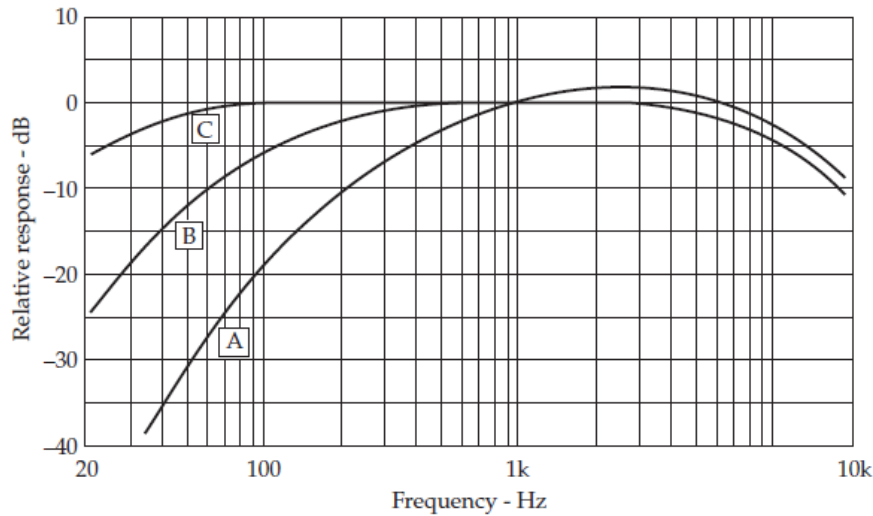
- Eksponentiel midling

$$p_{RMS}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^\infty e^{-\frac{t}{T_c}} p^2(\tau - t) dt} \quad (1.6)$$

- SLOW:  $T_c = 1000$  ms
  - \* Menneskets opfattelse af lydstyrke
- FAST:  $T_c = 125$  ms
  - \* Skadepåvirkning af ørene
- IMPPULSE:  $T_c = 35$  ms
  - \* Hurtige ændringer i lydniveauet i tid

#### Frekvensvægtning

- 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.
  - Lineær vægtning svarer til ingen vægtning.
  - 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 1.6: Weighting response characteristics for sound-level meters.

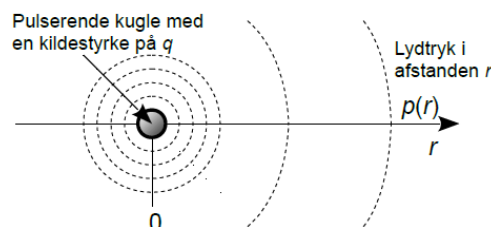
For sound-pressure levels of 20 to 55 dB, use network A.

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

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

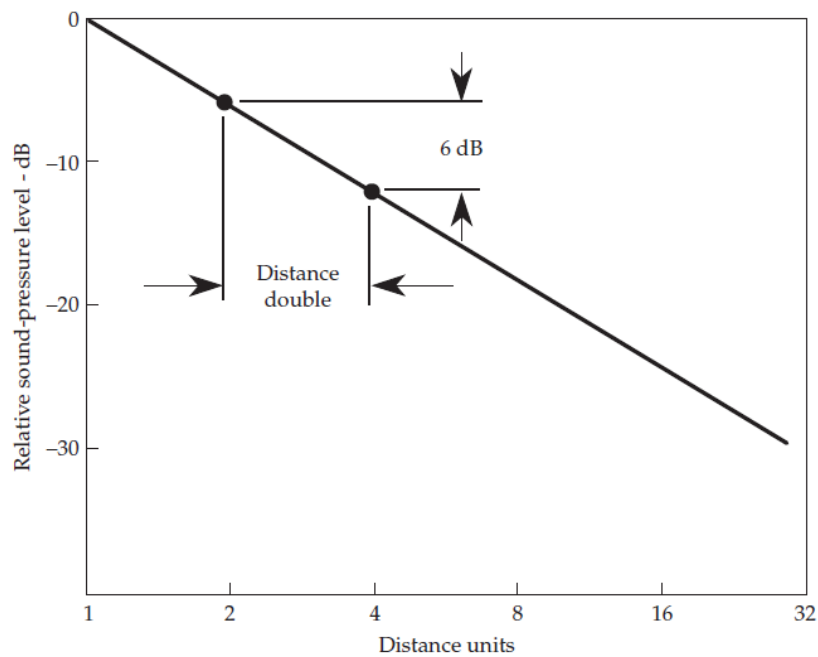
### 1.1.5 Lydens udbredelse

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



Figur 1.7: Lydens udbredelse fra en punktkilde.

- 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 1.8: Afstandsregel.

### 1.1.6 Opgaver

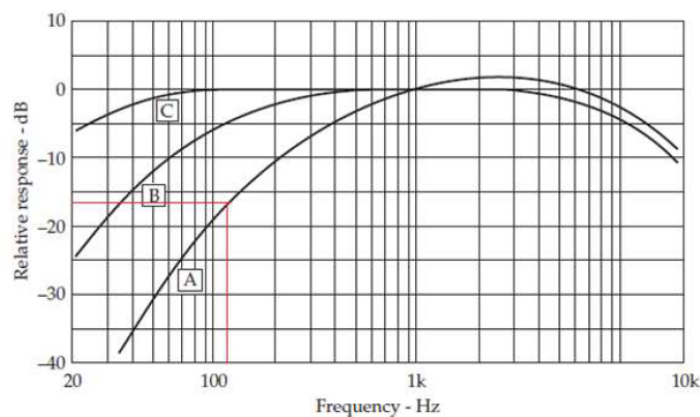
1. Beregn dB værdien af det maksimalt mulige lydtryk.
2. Beregn det A-vægtede lydtryk af 76 dB ved 125 Hz.
3. Et lydtryk reduceres 8 dB, hvor mange gange er det?
4. Hvor meget lydtryk skal der til, for at vi opfatter lyden - ved 63 Hz og ved 2 kHz?

1.

```
L = 20*log10(10^5/(20*10^-6));
disp(['Det maksimalt mulige lydtryk er ', num2str(L), ' dB'])
```

Det maksimalt mulige lydtryk er 193.9794 dB

2.



$$R_A(f) := \frac{12194^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20.6^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2) (f^2 + 737.9^2)} \cdot (f^2 + 12194^2)}$$

```
f = 125;

R_A = (12194^2*f^4)/((f^2+20.6^2)*sqrt((f^2+107.7^2)*(f^2+737.9^2))*...
(f^2+12194^2));

A = 20*log10(R_A)+2;

disp(['Det A-vægtede lydtryk af 76 dB ved 125 Hz er ', num2str(76+A), ...
```

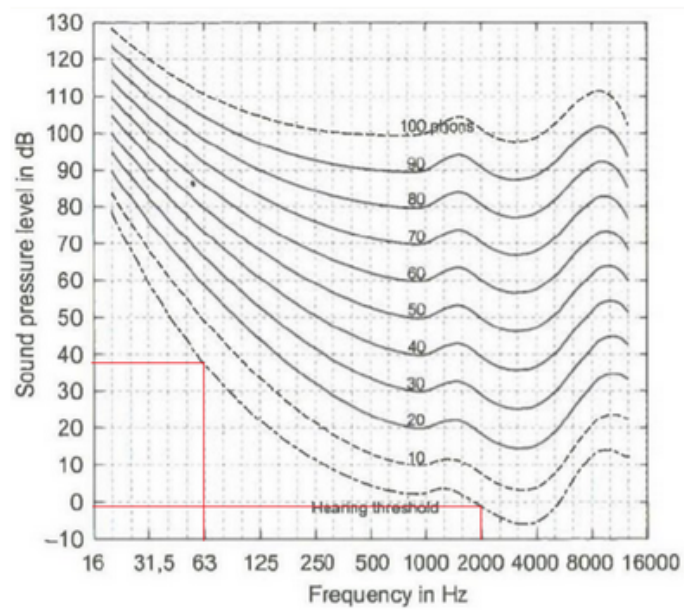
Det A-vægtede lydtryk af 76 dB ved 125 Hz er 59.8103 dB

3.

```
gg = db2mag(8);  
disp(['Lydtrykket reduseres 8 dB = ', num2str(gg), ' ganges redusering'])
```

Lydtrykket reduseres 8 dB = 2.5119 ganges redusering

4.



Figur 1.9: 63 Hz = 38 dB, 2 kHz = -1 dB

---

# Måling/Opsamling af lyd

---

## 2.1 Lektion 08-02-2018

1. Måling af lydtryk
2. Mikrofon
3. Udstyr til lydmåling
4. Måleprincipper

- **Pensum:**

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

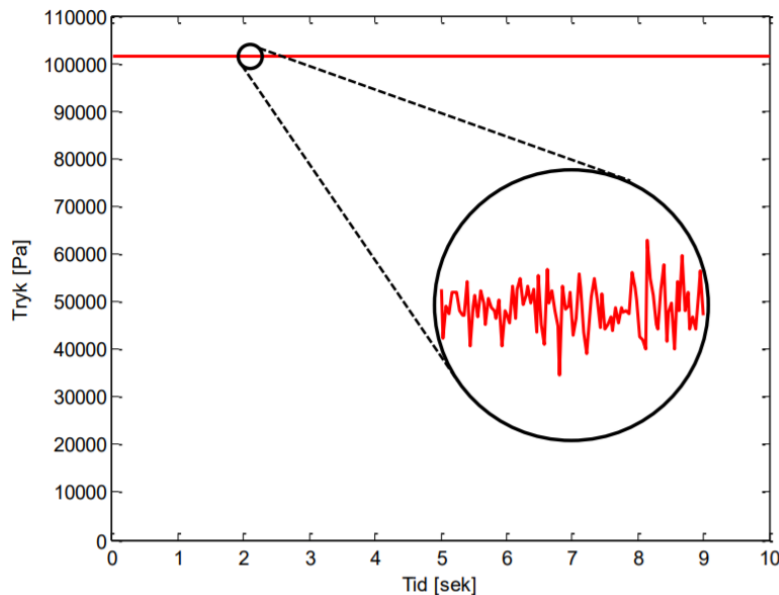
- **Opgaver:**

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

### 2.1.1 Måling af lydtryk

- Lyd er ganske små variationer omkring det statiske lufttryk,
- Et reference lydtryk er valgt til at være  $20 \mu\text{Pa}$  hvilket svarer til den mindste ændring i tryk et menneske kan opfange.
- Forholdet mellem det statiske tryk og reference lydtrykket er 1 : 5.066.250.000.
  - Lydtryk (Engelsk: Sound Pressure)
  - Enhed: Pascal [Pa]

- Lydtrykniveau (Engelsk: Sound Pressure Level - SPL)
- Enhed: Decibel [dB]



Figur 2.1: Trykvariationer omkring det statiske lufttryk.

- Lydstyrker udtrykt som lydtrykniveau [dB, SPL] i stedet for lydtryk [Pa]

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad (2.1)$$

- $SPL$  = sound-pressure level, dB
- $p$  = acoustic pressure,  $\mu\text{Pa}$
- $p_{ref}$  = acoustic reference pressure,  $20 \mu\text{Pa}$ .

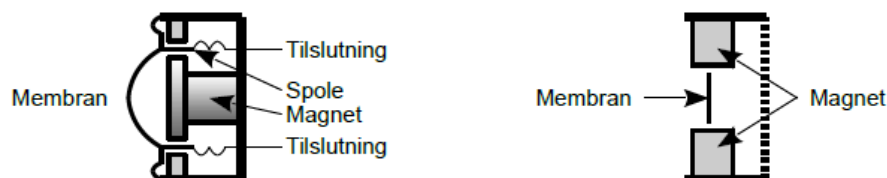
### 2.1.2 Mikrofon

- 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.

- Mikrofoner – 4 hovedgrupper
  - Studiemikrofoner (Dynamiske- og kondensator mikrofoner)
  - Målemikrofoner (Kondensator mikrofoner)
  - Mikrofonkapsler (Elektret mikrofoner)
  - MEMS mikrofoner (Silicium mikrofoner)

### 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:** membranen er i et kraftigt magnetfelt. Når lydtrykket får membranen 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° og 180°).
    - \* Der kan ikke registreres lyd fra siden (90°).



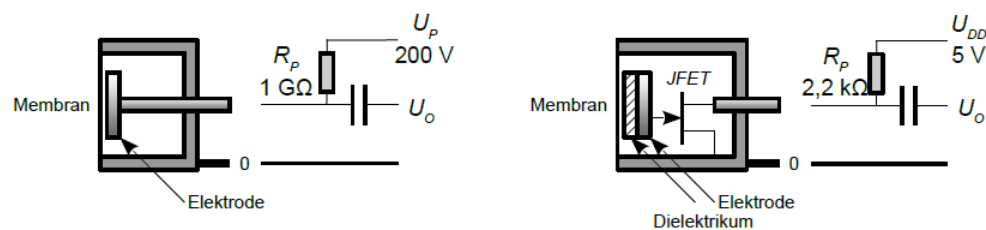
Figur 2.2: V: svingspolen drives af en membran til at svinge i et magnetfelt. H: En tynd metalfolie svinger i et magnetfelt og signalet tages ud ved båndets ender (ud af papiret og ind i papiret).

- Beregnet til optagelser af musik og sang.
- Ikke forberedt til at blive kalibreret.
- Frekvensrespons er designet til at lyde ”godt”, ”fedt” eller ”spændende”.
- Fysisk størrelse er ikke vigtig (forskellige designs afhængig af brand).
- Typisk lavt støjniveau pga. stor membran diameter.
- Ikke velegnet til akustiske målinger.



### 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 2.3: Kondensatormikrofons 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.
- Beregnet til til akustiske målinger da "alle" specifikationer er kendte.
- Generelt er der to typer: "Frit-felts kalibrede" og "Tryk-felts kalibrede".
- Tager højde for at den måde mikrofonen selv forstyrrer lydfeltet på.
- Stor diameter vælges til lave frekvenser og lave lydtryk.
- Lille diameter vælges til høje frekvenser og høje lydtryk.

**Elektretmikrofoner**

- Mikrofonkapsler.
- Velegnet til mange forskellige formål – også målinger selvom få specifikationer er kendte.
- Prisen er meget attraktiv: 1-2 \$
- Ingen forskel på ”Frit-felt” og ”Tryk-felt” grundet lille membran-åbning.
- Vælg mellem kommunikations mikrofoner og bredbåndet mikrofon.
- Som regel 6-10 mm diameter.
- Benytter 2-10 VDC strømforsyning.
- Kvaliteten afhænger meget af forstærker og strømforsyning.

**MEMS mikrofoner**

- Silicium mikrofoner.

**2.1.3 Mikrofon for-forstærkere**

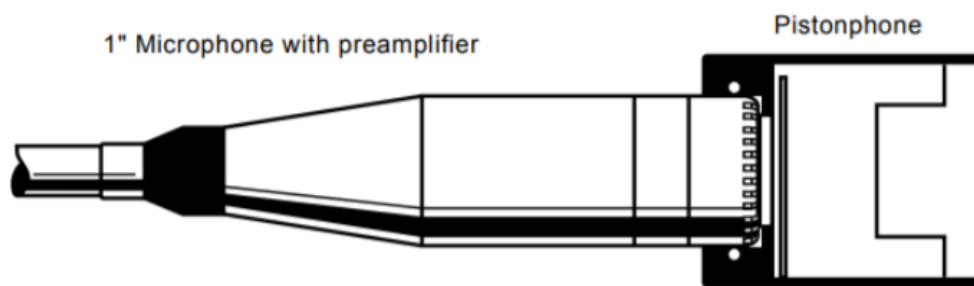
- LM337/LM137, 3-Terminal Adjustable Regulators
  - Justerbar  $V_{out}$ .
  - 1/3 støj på  $V_{out}$ .
    - \* Overvej en 2-trinsregulering (1/3 af 1/3 støj).
- LM8333/OP27, Audio Operational Amplifier
  - Made for audio purpose.
  - Specified low noise voltage.

**2.1.4 Udstyr til lydmåling**

- Pistonfon
- Lydtrykkalibrator
- Elektrostatisk aktuator
- Reciprocitets kalibrering

### Pistonfon

- Frembringer et meget veldefineret lydtryk i et lille kammer.
- Ind i åbningen stikkes mikrofonen, som herved påvirkes med et kendt lydtryk.
  - Lydtrykniveau: 124 dB
  - Tolerance:  $\pm 0.2$  dB
  - Testfrekvens: 250 Hz



Figur 2.4: Pistonfon.

### Lydtrykkalibrator

- Lydtrykniveau: 94 dB eller 114 dB
- Tolerance:  $\pm 0.3$  dB
- Testfrekvens: 1000 Hz

### Elektrostatisk Aktuator

- Lydtrykniveau: 70 dB - 90 dB
- Tolerance:  $\pm 0.5$  dB
- Testfrekvens: 1.0 kHz-40.0 kHz

### PC-baseret udstyr til lydmåling

- TrueRTA.com
- YMEC.com

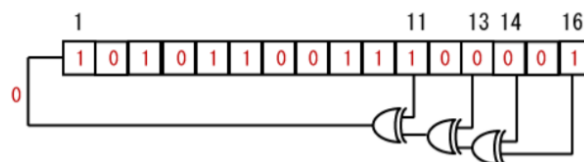
## 2.1.5 Måleprincipper

### Frekvensanalyse

- Stepped sinus
- Sinus sweep
- Oktavbåndsanalyse (Constant Percentage Bandwidth - CPB)
- Fast Fourier Transform (FFT)

### Impulsresponsen og overføringsfunktioner

- En impulsrespons eller overføringsfunktion kan fuldstændig beskrive et LTI-system (Lineært og Tidsinvariant).
- Disse responser kan bestemmes ved at tilføje et velegnet input-signal til systemet og derefter samtidig betragte input,  $x[n]$  og output,  $y[n]$ .
- Med krydskorrelation kan vi bestemme impulsresponsen (xcorr i matlab)
- Et velegnet input signal kan være:
  - Random Noise
  - MLS (maximum length sequence)
    - \* Sekvensen repeteres efter  $(2 \cdot N - 1)$  samples for et  $N$ ' te ordens skifteregister.
    - \* Output amplitude er binary  $[-1; 1]$ .
    - \* Output er 'pseudo random' hvid støj.
    - \* Auto-correlation er næsten perfekt.
    - \* Sekvens længden vil altid være et radix-2 antal af samples  $-1$ .
    - \* Dækker hele frekvensintervallet fra 0 Hz til  $\frac{f_s}{2}$ .



Figur 2.5: MLS sekvens.

- Logaritmisk sinus sweep
  - \* Output har konstant amplitude.
  - \* Auto-correlation er god.
  - \* Sekvensens længde kan vælges arbitrært men bestemmer måletiden.
  - \* Fantastisk udnyttelse af dynamic området (højt signal-støj forhold, SNR).
  - \* Sweeps kan bade være stigende og faldende i frekvens.
  - \* Dækker frekvensområdet  $[f_1-f_2]$ .

$$x(t) = \sin \left[ \frac{2\pi f_1 T}{\ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \left( e^{\frac{t}{T} \ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} - 1 \right) \right] \quad (2.2)$$

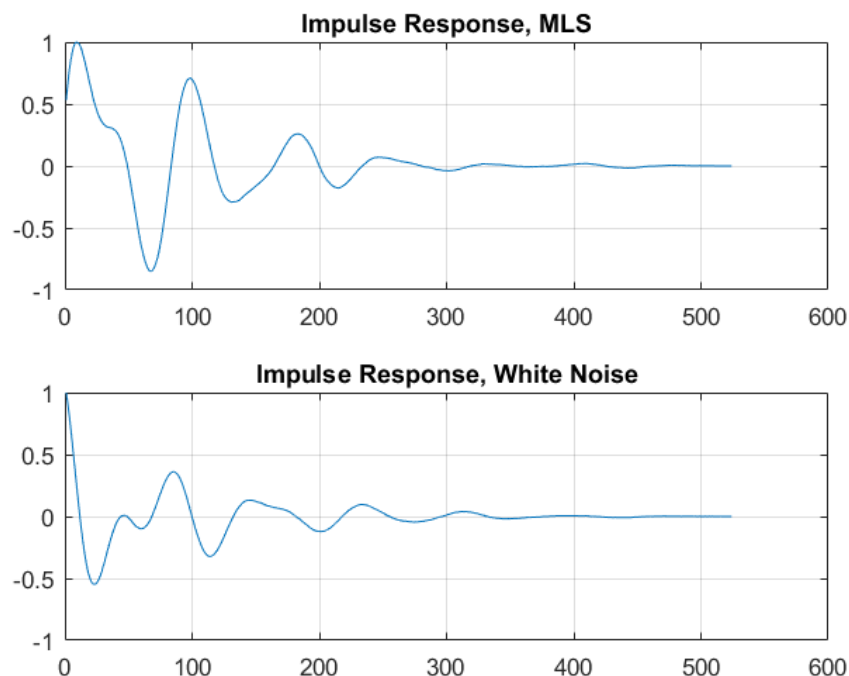
- Matematiske funktioner for sekvenser
  - **Filtrering**
    - \* Convolution  $(f \otimes g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau$
  - **Mønstergenkendelse**
    - \* Cross-corelation  $(f \star g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f * (\tau)g(t + \tau)d\tau$
  - **Gentagelsesgrad**
    - \* Auto-correlation  $(f \star f)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f * (\tau)f(t + \tau)d\tau$
- En lang måletid giver mere præcise resultater end korte måletider.
  - Hver gang man fordobler antallet af målinger (repetitioner) kan SNR forbedres med 6 dB ved midling.
- De mest præcise resultater for konstant måletid er ”Logaritmisk Sinus Sweep”.

## 2.1.6 Opgaver

1. Lav et MLS signal med orden 10.

```
1 %% LYAK L2 08-02-2018
2 % Lav et MLS signal med orden 10
3 m = 10;
4 buf = ones(1,m);
5
6 tap1=3;
7 tap2=10;
8
9 for i = (2^m)-1:-1:1
10 xorbit = xor(buf(tap1),buf(tap2)); % feedback bit
11
12 buf = [xorbit buf(1:m-1)];
13 y(i) = (-2 .* xorbit) + 1;          % 0 -> 1; 1 -> -1
14 end
```

2. Find impulsresponsen ud fra de sammenhørende excitations- og målesignaler i filen meassigs.mat. Systemet er "målt" både med MLS og hvid støj.



```
1 %% LYAK L2 08-02-2018
2 % Find impulsresponsen ud fra de sammenhørende
3 % excitations- og maalesignaler i filen meassigs.mat
4 load('meassigs.mat');
5 N = 524;
6
7 % Cross correlation
8 rxy_mls = xcorr(x_mls,y_mls);
9 % Flip the correlation result and take the first N samples
10 ryx_mls = fliplr(rxy_mls(1:N));
11
12
13 subplot(2,1,1)
14 plot(ryx_mls/max(ryx_mls));
15 title('Impulse Response, MLS');
16 grid;
17
18 % Cross correlation
19 rxy_wn = xcorr(x_wn,y_wn);
20 % Flip the correlation result and take the first N samples
21 ryx_wn = fliplr(rxy_wn(1:N));
22
23 subplot(2,1,2)
24 plot(ryx_wn/max(ryx_wn));
25 title('Impulse Response, White Noise');
26 grid;
```

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?

a.

Virkningsgrad

$$\eta := 0.01$$

Tilført effekt

$$P_E := \frac{(2.83 \text{ V})^2}{6 \, \Omega} = 1.33 \text{ W}$$

Akustisk effekt

$$P_A := \eta \cdot P_E = 13.3 \text{ mW}$$

b.

Arealet af kuglen i afstanden r

$$S := 4 \pi \cdot (2.5 \text{ m})^2 = 78.5 \text{ m}^2$$

Akustisk intensitet

$$I_A := \frac{P_A}{S} = 0.17 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

Lydens hastighed

$$c := 344 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luftens densitet

$$\rho := 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Lydtryksniveauet i afstanden r

$$p_{RMS} := \frac{1}{2.5 \text{ m}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c \cdot P_A}{4 \pi}} = 0.26 \text{ Pa}$$

$$L := 20 \cdot \log \left( \frac{p_{RMS}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}} \right) = 82.4 \text{ dB}$$

c.

Mikrofonens følsomhed

$$S := 5 \frac{\text{mV}}{\text{Pa}}$$

Mikrofonen leverer

$$V_{mic} := S \cdot p_{RMS} = 1.31 \text{ mV}$$



---

# Psykoakustik - Menneskets opfattelse af lyd

---

## 3.1 Lektion 15-03-2018

1. Ørets opbygning
2. Frekvensopfattelse
3. Lydniveau
4. Tonehøjde
5. Lokalisering af lydkilder (retningsbestemmelse)

- **Pensum:**

1. Master Handbook Of Acoustics, ch. 4
2. Audio Meetering, sec. 7, 10
3. Elektroakustik, TAS, p. 7-11

- **Opgaver:**

1. Lyd og Akustik - Lektion 3 - opgaver og øvelser

### 3.1.1 Psykoakustik

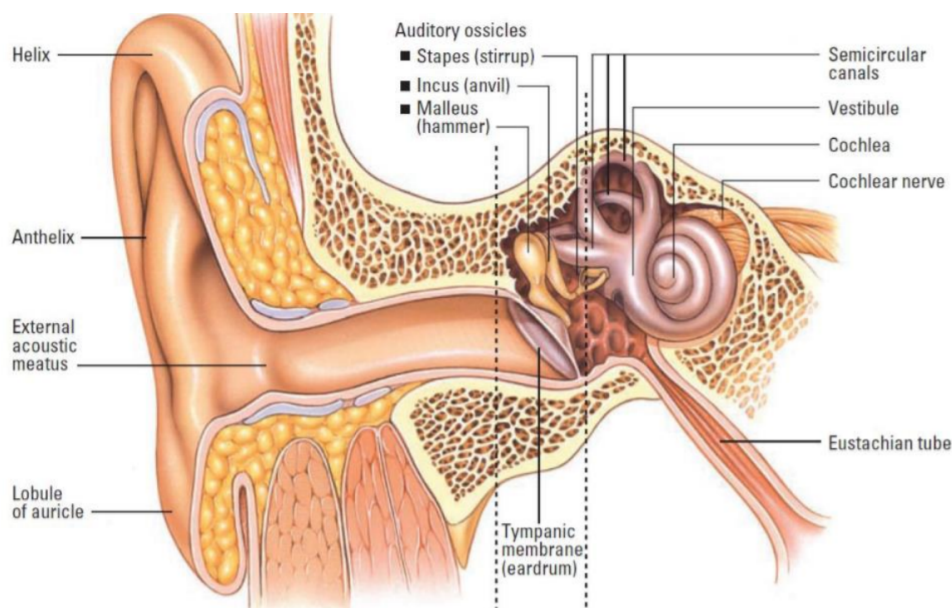
- Transmissionen fra en lyd i den fysiske verden til en menneskelig opfattelse.
- Detektion via sanseapparatet (uden erkendelse) eller som et egentlig lydindtryk (med erkendelse).

## Psykometri

- Eksperiment med person under velkontrollerede forhold i en lydi-soleret kabine. En uforstyrret forsøgsperson skal følge en simpel instruktion og afgive svar afhængigt af hvad han eller hun hører.

### 3.1.2 Ørets opbygning

- Det ydre øre
  - Består af et bruskskelet, beklædt med hud.
  - Trommehinden, en membran, adskiller øregangen fra mellemøret.
- Mellemøret
  - Et luftfyldt hulrum mellem trommehinden og øresneglen.
  - Er forbundet til svælget via en luftkanal, som sikrer at trykket i mellemøret kan udlignes med omgivelserne (flyve, dykke).
  - Bygget op af 3 små knogler.
    - \* Hammeren (malleus)
    - \* Ambolten (incus)
    - \* Stigbøjlen (stapes)
  - Øreknoglerne benytter vægtstangsprincippet til at overføre energien i vibrationerne fra trommehinden til væsken i det indre øre.

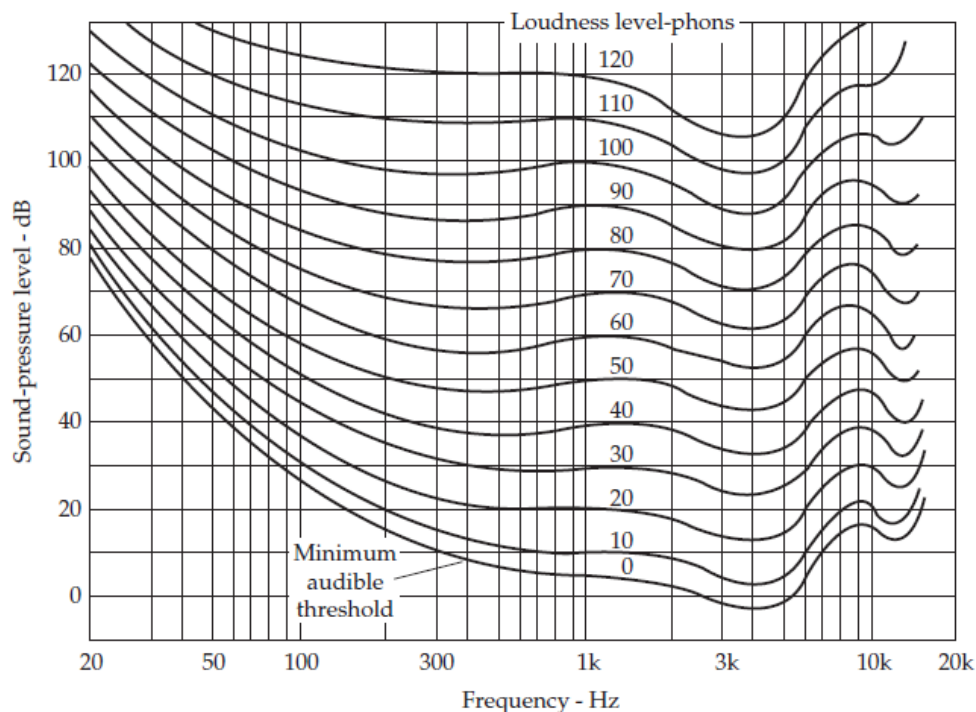


Figur 3.1: Ørets opbygning.

- Det indre øre
  - Består af øresneglen kaldet cochlea.
    - \* Er ca 3.5 cm lang, Ø2mm og roterer ca 2.5 omgange.
    - \* Indeholder sansetråde, der opfatter lydimpulser.
    - \* Lydbølgerne bliver omsat til elektriske nerveimpulser.
  - Otoakustisk emission.
    - \* Et normalt øre udsender selv lyde!

### 3.1.3 Lydniveau

- Øret er ikke lige så sensitiv for bas toner ved lave lydniveauer.
- Inverteres kurverne fåes ørets frekvensrespons i forhold til lydniveau (vægtningskurver hvor A svarer til nedslidningen af hørelsen).
- 40-phon contour = 40 dB lydtryksniveau ved 1 kHz.
- Figur 3.2 viser hvordan lydtryksniveaut ændres for forskellige frekvenser for at blive opfattet som samme lydstyrke som 1 kHz referencen ved 40 phon.



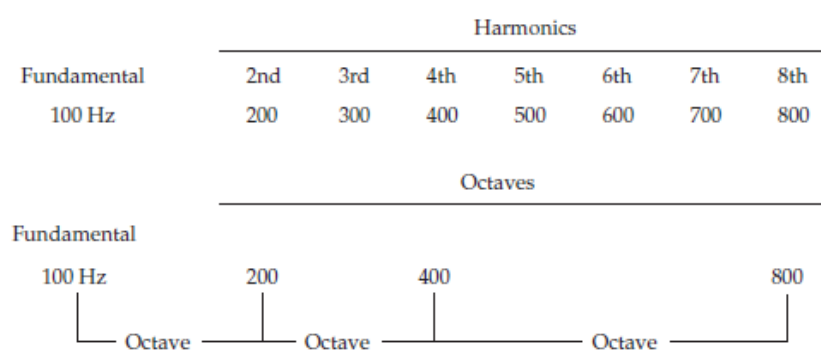
Figur 3.2: Equal-loudness contours of the human ear for pure tones.

### 3.1.4 Frekvensopfattelse

- Frekvens er en objektiv parameter (generatorer, analysatorer).
- Pitch eller tonehøjde er en subjektiv parameter (oplevet).
  - I midt-frekvens området er opfattelsen af tonehøjde uafhængig af lydniveau.
  - I lav- og højfrekvens området er opfattelsen af tonehøjde en lille smule lydniveau afhængig.

### 3.1.5 Tonehøjde

- 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 3.3: Sammenligning mellem harmoniske og oktaver.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (3.1)$$

$f_2$  = 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).

### 3.1.6 Lokalisering af lydkilder

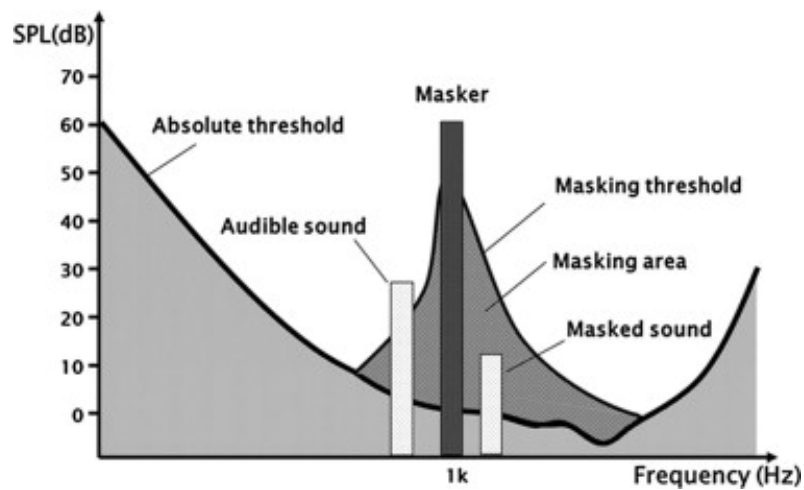
#### Retningsbestemmelse

- Øregangen fungerer som en kvart-bølge rør der er lukket i den ene ende af trommehinden og danner resonanser.
- Overførelsesfunktionen ved indgangen til øregangen ændres ved forskellige retninger (horisontal og vertikal) af lyden.
- Man kan retningsbestemme helt ned til  $1^\circ$  ændring i lydens lokation.

#### Maskering

- En lyd kan overdøve (maskere) en anden lyd.
- **Simultan maskering** hvor det maskerende og det maskerede signal til stede samtidig.
  - **Fuldstændig maskering** hvor det maskerede signal overdøves fuldstændigt af det maskerende signal.
  - **Partiel maskering** hvor det maskerede signal ikke overdøves fuldstændigt, men den oplevede styrke (hørestyrken) påvirkes.
  - **Central maskering** hvor hørestyrken på det ene øre kan påvirkes af en lydpåvirkning af det andet øre.
- **Pre-maskering** hvor et lydsignal maskeres af et efterfølgende kraftigere signal.
  - Bagud i tid (ca. 20 ms).
  - Ikke specielt afhængig af niveauet af det maskerende signal.

- **Post-maskering** hvor et lydssignal maskeres af et forudgående kraftigere signal.
  - Fremad i tid.
  - Afhængig af maskeringssignalets varighed (kortere signal medfører kortere maskering).



Figur 3.4: Maskering.

---

# Lydens opførsel i lukkede 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

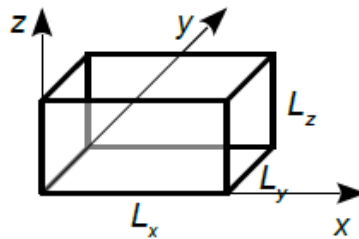
Et retvinklet rum vil have et system af egenfrekvenser. Her vil plane bølger spejles så de understøtter bestemte frekvenser. Dette sker gennem konstruktiv interferens.

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.

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

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

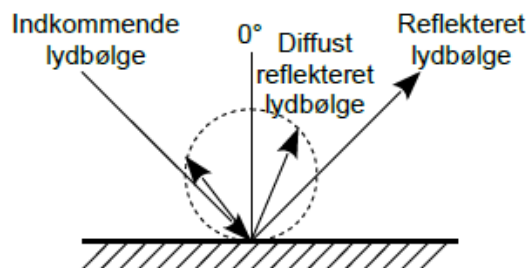
### 4.1.2 Geometrisk rumakustik

En lydbølge fra lyd giveren udbredes med en konstant hastighed i alle retninger. En lytter i nogen afstand fra lyd giveren 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 det 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.

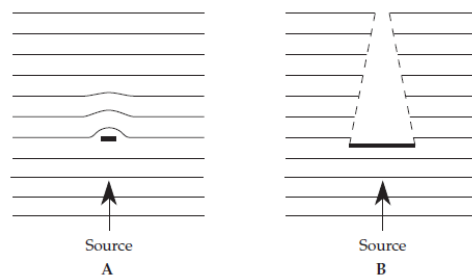


Figur 4.2: En lydbølges refleksioner sker både som en direkte spejling af lydbølgen og som en diffus lydbølge.

## Diffraction

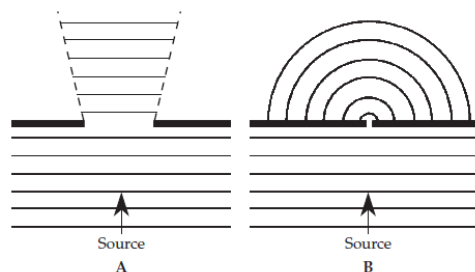
Hvordan lydbølger bøjes af små forhindringer og hvordan lydbølger udbredes efter små åbninger.

- 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-energi 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.

### 4.1.5 Opgaver

1.

Beregn de første 10 rum-resonanser i lytttestuen. Angiv hvilke der er aksiale. Beregn også Schröder-frekvensen og estimer efterklangstiden T60.

```
% Konstanter
Lx = 5; Ly = 4; Lz = 2.5;      % Rummets dimensioner
c = 344;                      % Lydens hastighed (m/s)

f1 = (c/2) * (sqrt(((1^2)/Lx^2) + ((0^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f1 = 34.4000

f2 = (c/2) * (sqrt(((0^2)/Lx^2) + ((1^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f2 = 43

f3 = (c/2) * (sqrt(((1^2)/Lx^2) + ((1^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f3 = 55.0669

f4 = (c/2) * (sqrt(((0^2)/Lx^2) + ((0^2)/Ly^2) + ((1^2)/Lz^2)))

f4 = 68.8000

f5 = (c/2) * (sqrt(((1^2)/Lx^2) + ((0^2)/Ly^2) + ((1^2)/Lz^2)))

f5 = 76.9207

f6 = (c/2) * (sqrt(((0^2)/Lx^2) + ((1^2)/Ly^2) + ((1^2)/Lz^2)))

f6 = 81.1322

f7 = (c/2) * (sqrt(((2^2)/Lx^2) + ((0^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f7 = 68.8000

f8 = (c/2) * (sqrt(((1^2)/Lx^2) + ((1^2)/Ly^2) + ((1^2)/Lz^2)))

f8 = 88.1238

f9 = (c/2) * (sqrt(((0^2)/Lx^2) + ((2^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f9 = 86

f10= (c/2) * (sqrt(((2^2)/Lx^2) + ((1^2)/Ly^2) + ((0^2)/Lz^2)))

f10 = 81.1322
```

```

% Indeks
fLx = zeros(1,2);
fLy = zeros(1,2);
fLz = zeros(1,2);

% Aksiale resonanser
for n = 1:2
    fLx(n) = (n*c)/(2*Lx);
    fLy(n) = (n*c)/(2*Ly);
    fLz(n) = (n*c)/(2*Lz);
end
fLx

```

```

fLx =
    34.4000    68.8000

```

```
fLy
```

```

fLy =
     43     86

```

```
fLz
```

```

fLz =
    68.8000   137.6000

```

```

V = Lx*Ly*Lz;           % Rumets volume (m3)
S = (Ly*Lz);            % Lydabsorberende areal S (alpha for gardin)
T60 = 55.3*(V/(S*c))    % Efterklangstiden (s)

```

```
T60 = 0.8038
```

```
fs = 2000*sqrt(T60/V)    % Schröder frekvensen
```

```
fs = 253.5790
```

## 2.

Giv et bud på delay og relativ styrke for alle 1. ordens reflektioner (for faste kilde/lytter placeringer). Tegn impulsresponsen som søjler langs en tidsakse, hvor lyddæmpningen medtages efter afstandsreglen og eventuelt en vurdering af dæmpningen ved refleksion i fx loftplader.

## 3.

Beregning af efterklangstiden T60 efter Sabine for forskellige rum. Vurdering af absorption ved brug af kurverne i Elektroakustik, side 50-51 eller "Report 2 – Absorber" fra Campus, eller formler fundet på nettet.

```
% Beregning af efterklangstiden
Lx = 5; Ly = 4; Lz = 2.5;      % Rummet's dimensioner
V = Lx*Ly*Lz;                  % Rummet's volume (m3)

disp('T60 for skum, rockwool 25mm, gardin')

T60 for skum, rockwool 25mm, gardin

alpha = [1 0.83 0.35]          % [skum, rockwool 25mm, gardin]

alpha =

    1.0000    0.8300    0.3500

S = (Ly*Lz).*alpha;             % Lydabsorberende areal S

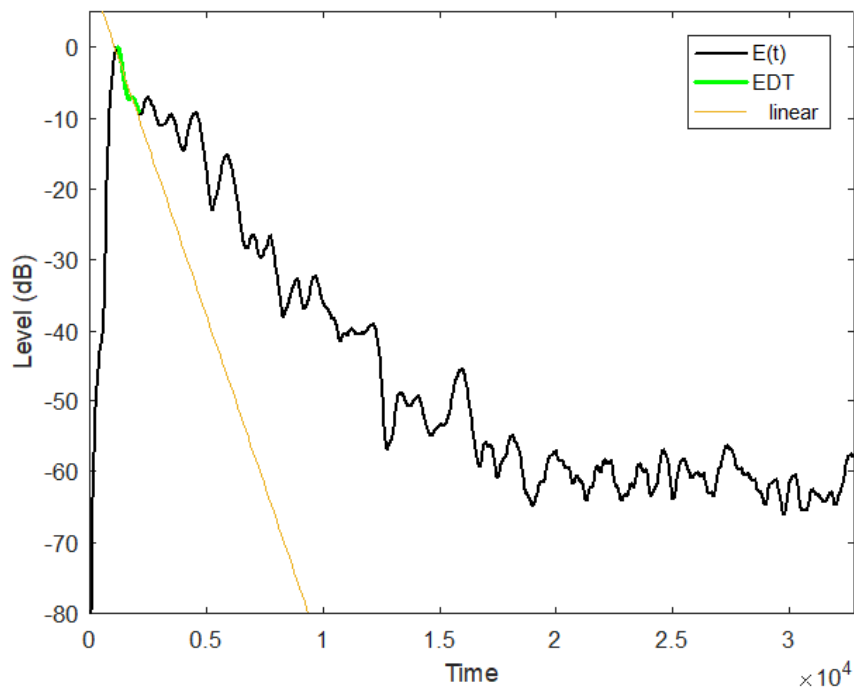
T60 = 0.16*(V./S)              % Efterklangstiden (s)

T60 =

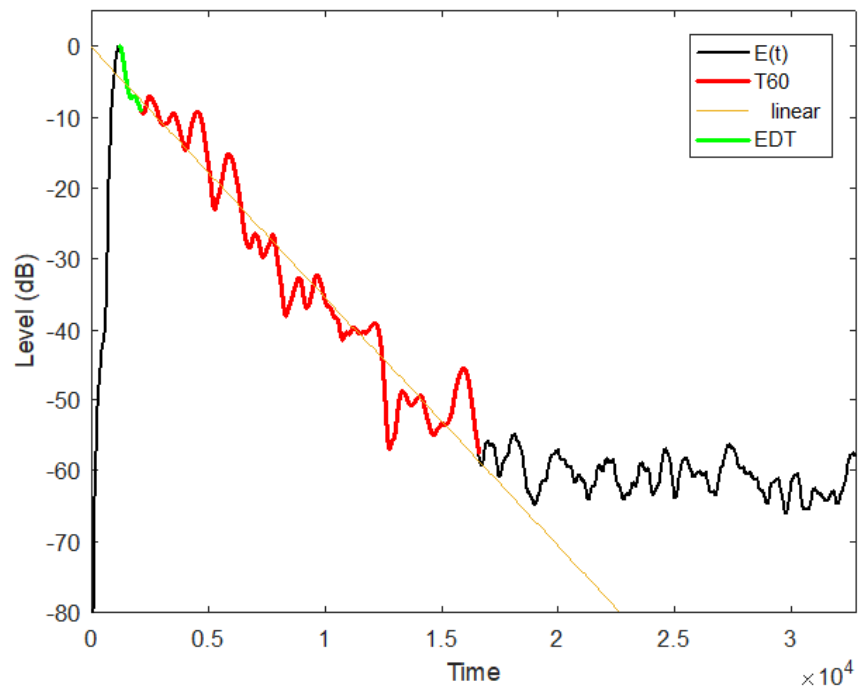
    0.8000    0.9639    2.2857
```

#### 4.

Bestem de rumakustiske parametre T60, EDT, og C80 ud fra impulsresponsen i filen roomir.mat.



Figur 4.5: Bestemmelse af EDT.



Figur 4.6: Bestemmelse af T60.



```

load roomir.mat
t=[0:length(room)-1]/48000;
figure(1)
plot(t*1e3, room/max(room))
xlabel('Time (ms)')

% 1/3 Octave filter
d = fdesign.octave(3,'Class 0','N,F0',6,398.1072,48000);
hd = design(d);
fvtool(hd);

hf = filter(hd,room);
% Data smoothing
hA = abs(hilbert(hf));

figure(2)
plot(t*1e3, hf/max(hf))
hold on
plot(t*1e3, hA/max(hA), 'r', 'LineWidth', 2)
legend('hf(t)', 'A(t)')
ylabel('Amplitude'), xlabel('Time (ms)')
hold off

% Moving average
m500 = 500;
m2000 = 2000;
h500 = 1/(m500) * ones(1,m500);
h2000 = 1/(m2000) * ones(1,m2000);

e500 = filter(h500, 1, hA);
e2000 = filter(h2000, 1, hA);

figure(3)
plot(t*1e3, 20*log10(hA/max(hA)))
hold on
plot(t*1e3, 20*log10(e500/max(e500)), 'g', 'LineWidth', 1)
hold on
plot(t*1e3, 20*log10(e2000/max(e2000)), 'r', 'LineWidth', 1)
legend('E(t)', 'E(t) M = 500', 'E(t) M = 2000')
ylabel('Level (dB)'), xlabel('Time')
hold off

figure(4)
plot(20*log10(e500/max(e500)), 'black', 'LineWidth', 1)
hold on
plot((1197:16597), 20*log10(e500(1197:16597)/max(e500(1197:16597))), 'r', 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot((1197:2088), 20*log10(e500(1197:2088)/max(e500(1197:2088))), 'g', 'LineWidth', 1.5)
legend('E(t)', 'T60', 'EDT')
ylabel('Level (dB)'), xlabel('Time')
axis([0 32768 -80 5])
hold off

EDT = (2088-1197)/48000*1e3
T60 = (16597-1197)/48000*1e3

```

EDT = 18.5625

T60 = 320.8333

### 4.1.6 Øvelser

#### Øvelse 4.1

Opstilling af en højttaler og eftersøgning efter resonansfrekvenserne fra opg. 1. Bestemmelse af tryk-maksima og sammenhold det med teorien for trykmaksima i hjørnet. Sammenligning med den beregnede øvre grænse  $f_{MAX}$  eller  $N$  for betydningen af afvigelser fra et rektangulært rum.

#### Øvelse 4.2

Måling af T60 ved en højttaler med hvid/rosa støj, der pludseligt afbrydes, eller ved et klap i hænderne: Klasseværelset, musiklytterummet (med en skrå væg), efterklangsrummet i kælderen og det lyddøde rum. Relater målingerne til de beregnede resultater fra opg. 3.

---

# Virtuel akustik - Spejlkildemodel

---

## 5.1 Lektion 22-02-2018

1. Virtuel Akustik
2. Ray Tracing Method
3. Image Source Method
4. Reflektogram

- **Pensum:**

1. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics, J. H. Rindel
2. Image Method For Efficiently Simulating Small-Room Acoustics, Jont B. Allen and David A. Berkley

- **Opgaver:**

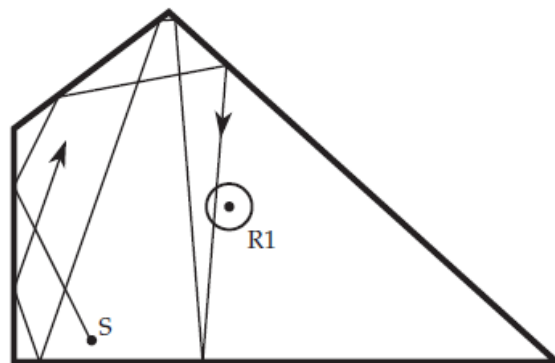
1. Lyd og Akustik - Lektion 5 - opgaver og øvelser

### 5.1.1 Virtuel Akustik

- Audio for virtual reality has many equivalent terms, such as auralization, virtual acoustics, binaural room simulation and auditory display.
- Common approach to auralization is a two-stage process:
  - Computation of an impulse response (IR) representing an acoustic space.
  - Convolution of this impulse response with a dry (anechoically recorded or synthetically generated) source signal.

### 5.1.2 Ray Tracing Method

- Den samlede energi der udsendes af en source er fordelt som stråler i et bestemt antal af retninger.
- Energien af hver enkel stråle er lig med den samlede energi delt med antallet stråler.
- Afhængig af overfladens absorption vil hver stråle spejles med indfaldsvinklen er lig med vinklen på refleksionen eller diffus reflekteret, hvor retningen af den reflekterede stråle er randomiseret.
- For at opnå et beregningsresultat relateret til en bestemt receiver position  $R1$  er det nødvendigt at definere et område eller en volumen omkring receiveren for at fange strålerne.
- Der er en risiko for beregne falske refleksioner og at nogle mulige refleksioner ikke findes.

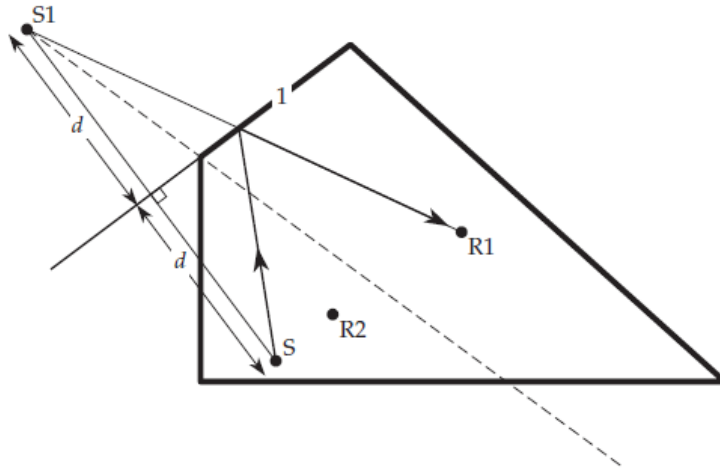


Figur 5.1: Ray Tracing - source S, receiver area R1.

### 5.1.3 Image Source Method

- Et virtuelt image af den faktiske kilde (real source) bestemmes ved at reflektere kilden vinkelret på tværs af en rumgrænse (boundary).
- Den virtuelle kilde (image source) er placeret i en afstand  $d$  der svarer til den dobbelte afstand mellem source og rumgrænsen (vinkelret).
- Afstanden mellem den virtuelle kilde  $S1$  og receiveren  $R1$  svarer til refleksions distancen (reflection path) mellem  $S$  og  $R1$ .

- Refleksionerne af alle reelle og virtuelle kilder, der krydser en rumgrænse, skaber et mirror image.
- Ved et rektangulært rum vil alle virtuelle kilder være synlige i alle positioner i rummet og beregningen er hurtig.
- Gælder ikke ved irregulære rum. Validering af hvert image er påkrævet og antallet af beregninger bliver hurtigt mange.
- 2. ordens refleksion når en stråle rammer 2 rumgrænser inden den når receiveren.



Figur 5.2: ISM - real source S, virtual source S1, receiver R1.

Estimat af antallet  $N$  refleksioner som receiveren vil modtage indenfor tiden  $t$ .

$$N_{refl} = \frac{4\pi c^3}{3V} t^3 \quad (5.1)$$

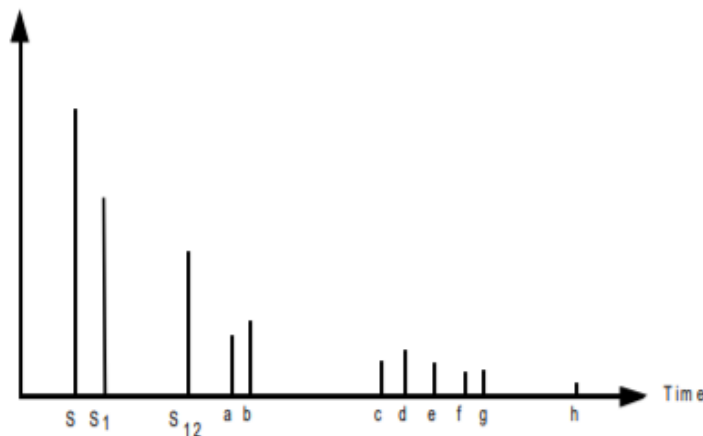
Ved  $n$  antal rumgrænser =  $n$  antal mulige 1. ordens image sources som kan medføre  $n-1$  2. ordens image sources.

Estimat af mulige image sources ved  $i$  ordens image source.

$$N_{sou} = 1 + \frac{n}{(n-2)}((n-1)^i - 1) \approx (n-1)^i \quad (5.2)$$

### 5.1.4 Reflektogram

- Viser ankomsten af tidlige refleksioner til en receiver.
- Arrival time ( $x$ -aksen) og energi af refleksionen ( $y$ -aksen).



Figur 5.3: Reflectogram for receiver R med 2 image sources.

### 5.1.5 Øvelser

1. **Øvelse 5.1:** Modeller et virtuelt rum vha. spejlkildemetoden. Bestem selv rummets dimensioner, absorptions-koefficienter for overfladematerialerne (keep it simple) og position af lydkilde og modtager. Generer et reflektogram  $h_1(n)$  fra en tænkt lydkilde (fast position) til en modtager. Modelleringsordenen  $N$  bør ikke overstige 10 – det skulle dække alle tidlige refleksioner.
2. **Øvelse 5.2:** Lav et estimat af efterklangstiden for det virtuelle rum i øvelse 5.1 via Sabine's formel og konstruer dernæst en efterklangs-hale (eksponentielt vægtet hvid støj), som hægtes efter  $h_1(n)$ . Så får vi et væsentligt længere reflektogram  $h_2(n)$ . Hvad mangler for at  $h_2(n)$  ligner en "rigtig" målt impulsrespons?

---

# Virtuel akustik - Auralisation

---

## 6.1 Lektion 01-03-2018

1. Impulsrepsonser
2. Auralisation af rum
3. Binaural Analysis

- **Pensum:**

1. Master Handbook of Acoustics, ch. 26 (5. edition) or ch. 30 (6. edition)
2. Modelling Acoustic Spaces For Audio Virtual Reality, U. Peter Svensson

- **Opgaver:**

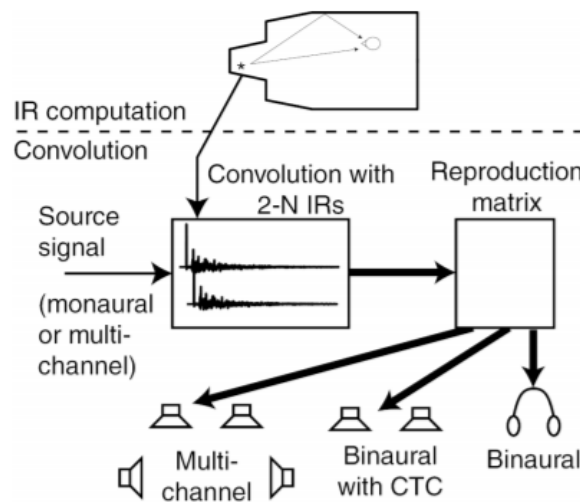
1. Lyd og Akustik - Lektion 6 - opgaver og øvelser

### 6.1.1 Impulsrepsonser

- Image Source Method og Ray Tracing kan bruges til at bestemme RIR (Room Impulse Response).
- Medregner frekvensafhængige karakteristikker såsom absorptionskoefficienter for materialer og højttalerens impulsrepsons.

### 6.1.2 Auralisation af rum

- Beregning af RIR (Room Impulse Response) og derefter BRIR (Binaural Room Impulse Response) er nødvendigt.
- Disse impulsresponser foldes med et signal som enten skal være syntetisk genereret eller optaget i lyddødt rum (tørt signal).



Figur 6.1: Auralisation system med impulsresponse (IR) og foldning.

### 6.1.3 Binaural Analysis

- Lytteren bliver karakteriseret med overførelsesfunktion HTRF (head-related transfer function).
- Differensen i responset ved hvert øre, med og uden en lytter tilstede.
- Information om arrival time, energi, og dets vinkel i forhold til receiveren (venstre/højre øre).
- Retningsopfattelse er vanskelig når ITD er nul ( $\pm 10 \mu s$ ).
- Eneste hjælp er det ydre øres frekvensfarvning.
- Vi benytter små hoveddrejninger for at forbedre lokaliseringen.



- Head-Related Transfer Function (HRTF)

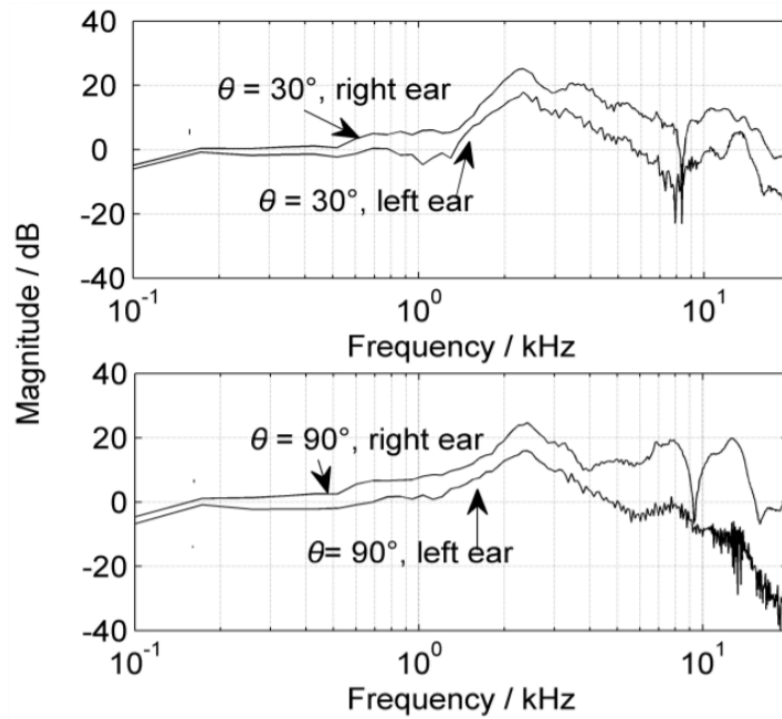


Figure 6.2: Head-Related Transfer Function (HRTF).

- Interaural Time Difference (ITD)
- Interaural Level Difference (ILD)

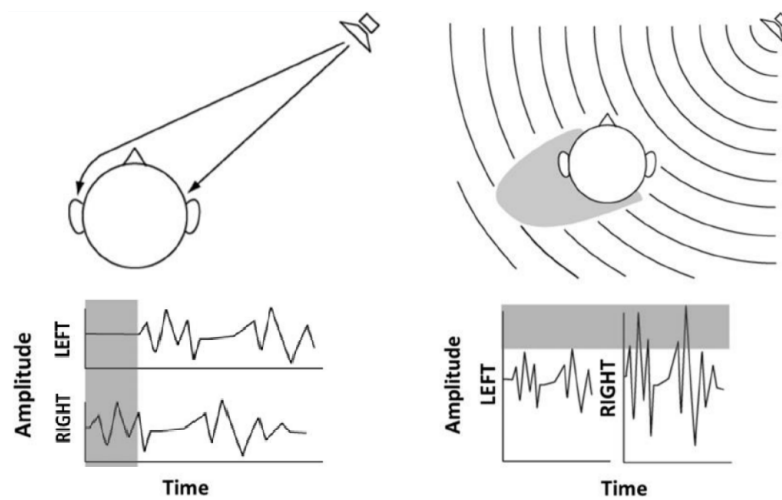
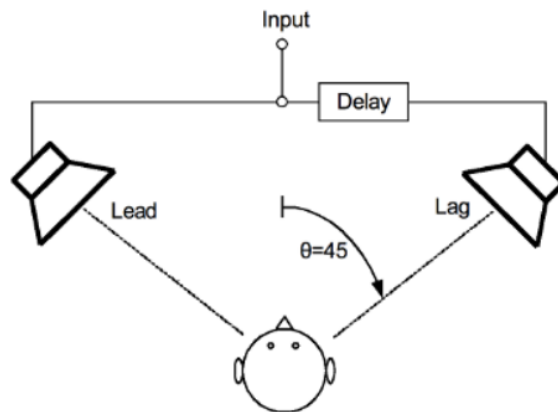


Figure 6.3: V: ITD. H: ILD.

- Precedence effekt
  - *Haas effect – Law of the first wave front.*
  - Fantomkilder ved stereo.



Figur 6.4: Haas effekt.

- Ekko kan være op til 10 dB kraftigere end den direkte lyd uden at ændre retningsopfattelse.

---

# Gengivelse af lyd

---

## 7.1 Lektion 22-03-2018

1. Højtalerens model
2. Elektrisk
3. Mekanisk
4. Akustisk

- **Pensum:**

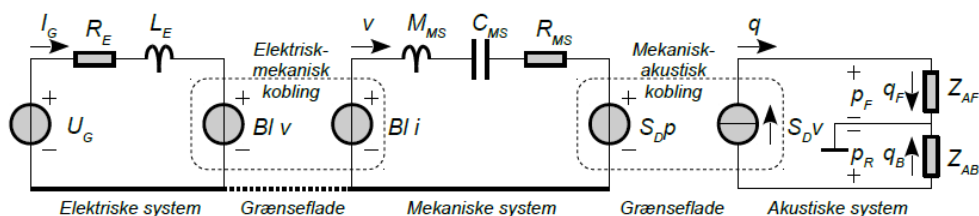
1. Elektroakustik, TAS, p. 29-41

- **Opgaver:**

1. Lyd og Akustik - Lektion 7 - opgaver og øvelser

### 7.1.1 Højtalerens model

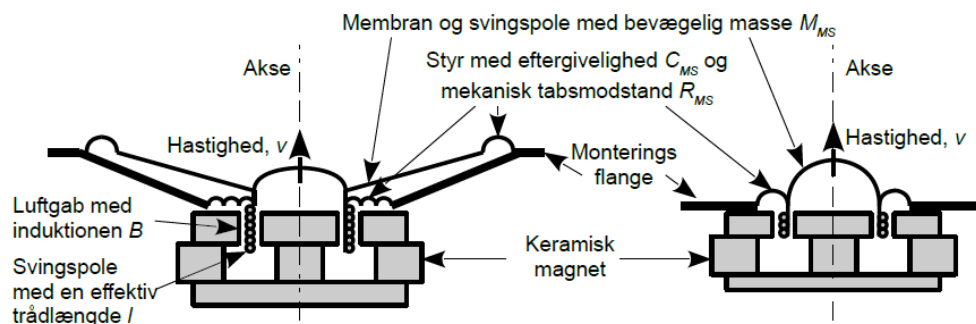
- Er en transducer som omsætter elektrisk energi til akustisk energi.
- Benytter en let og stiv membran som sættes i bevægelse af en elektromagnetiske kraft for at overføre energi til luften.



Figur 7.1: Model af elektro-dynamiske højttaler. (Elektroakustik, TAS)

### 7.1.2 Snittegning

- Membranen kan kun bevæge sig i akseretningen (lodret).
- For en bashøjttaler kan bagsidens lydtryk passere gennem huller i rammen og undertiden gennem et hul i magnetens centerdel.
- For en diskant højttaler er bagsiden spærret inde i et lukket rum.

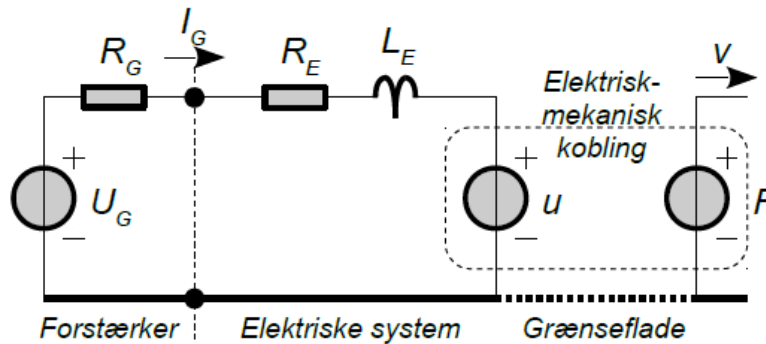


Figur 7.2: Snit igennem bashøjttaler (venstre) og diskant (højre).  
(Elektroakustik, TAS)

- Bas
  - Model gyldig til cirka 500 Hz
  - Radius  $a = 100$  mm
- Diskant
  - Model gyldig til cirka 2 kHz
  - Radius  $a = 12$  mm

### 7.1.3 Elektriske system

- Nær kobling mellem systemerne.
- Den elektriske impedans afspejler forholdene i det mekaniske- og akustiske system.
- Gør det er muligt at måle alle vigtige parametre for alle tre systemer alene fra den elektriske side.



Figur 7.3: Højttalerens elektriske system. (Elektroakustik, TAS)

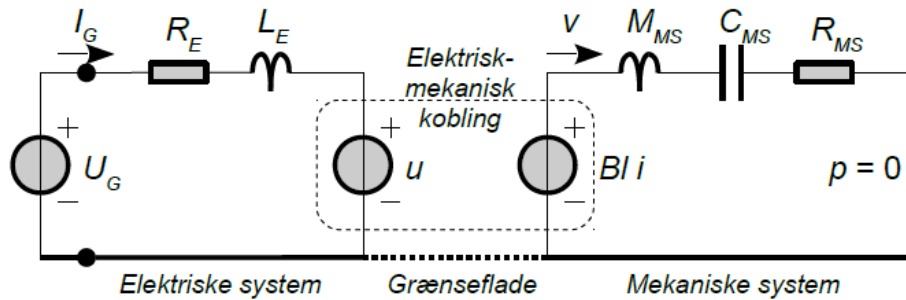
- Højttalerens elektriske system består af følgende:
  - Effektforstærkeren.
    - \* Repræsenteret ved en spændingskilde  $U_G$ .
  - Modstanden  $R_E$  fra svingspolens tråd.
  - Selvinduktionen  $L_E$  fra spolens bevikling.
- Reaktionen fra det mekaniske system beskrives ved:
  - Spændingskilden  $Blv$  for Faradays induktionslov som følge af den hastighed  $v$  svingspolen bevæger sig med.
- Højttalerens ”motor” beskrives ved:
  - Kraftfaktoren  $Bl$  hvor  $B$  er magnetfeltets induktion og  $l$  den effektive længde af tråd der befinder sig i magnetfeltet.
  - Svingspolens selvinduktion er betydende over frekvensen  $f_1$ .

### Typiske værdier

- $U_{G\text{RMS}} = 2.83\text{ V}$  for 1 W i nominelt  $8\ \Omega$  svarer til  $U_{G\text{PEAK}} = 4\text{ V}$ .
- $R_E$  = DC modstand af ledningen ( $\Omega$ ) typisk  $6.4\ \Omega$  for 8 ohm højttaler.
- $L_E$  = Selvinduktion af spolen (H) typisk 1 mH for bas.
- $Bl$  = højttalerens kraftfaktor (T m) typisk 10 T m ( $10\text{ N A}^{-1}$ ).

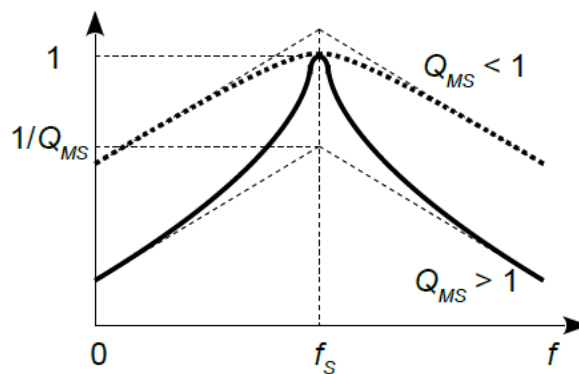
### 7.1.4 Mekaniske system

- Den elektrisk-mekanisk grænseflade beskrives ved højttalerens kraftfaktor  $Bl$ .



Figur 7.4: Højttalerens elektro-mekaniske model. (Elektroakustik, TAS)

- Kraften på svingspolen er givet ved højttalerens kraftfaktor og strømmens styrke  $F = Bl i$ .
  - Vil accelerere massen af svingspole og membran  $M_{MS}$  efter Newtons anden lov.
- Styrene fungerer som en fjeder når svingspole og membran bevæges.
  - Trækker svingspole og membran tilbage igen i takt med at afstanden øges fra ligevægt.
- Intern friktion i styrene gør at der tabes energi og modelleres ved en mekanisk modstand  $R_{MS}$ .
- Andre tabsmekanismer (dæmpningssmaterialet i kabinettet og den afgivne lydeffekt) kan inkluderes ved at justere på  $R_{MS}$ .



Figur 7.5: Resonansfrekvensen vil dø ud. (Elektroakustik, TAS)

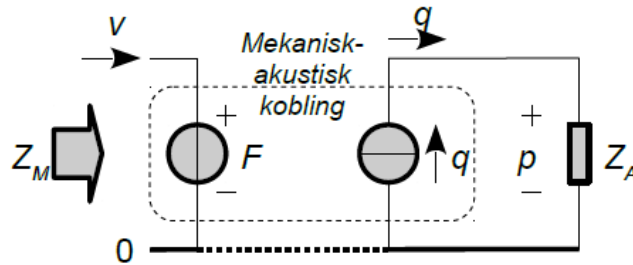
- Det mekaniske system vil svinge frivilligt hvis det sættes i gang.
- Hastigheden er proportional med frekvensen under den mekaniske resonans og den aftager med frekvensen over resonansen.
- $Q_{MS} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$

### Typiske værdier

- $M_{MS}$  = Masse af bevægeligt system (kg) typisk 5 g ... 20 g.
- $R_{MS}$  = Friktionstab ( $\text{N s m}^{-1}$ ) typisk  $1 \text{ N s m}^{-1}$ .
- $C_{MS}$  = Eftergivelse af membranstyr ( $\text{m N}^{-1}$ ) typisk  $1 \text{ mm N}^{-1}$ .
- $f_S$  = Resonansfrekvens (Hz) typisk 35 Hz.
- $Q_{MS}$  = Godhed af resonans typisk 0.35.

### 7.1.5 Akustiske system

- Den mekanisk-akustiske grænseflade udgøres af membranens areal  $S_D$ .



Figur 7.6: Højttalerens mekaniske-akustiske model (Elektroakustik, TAS)

### Typiske værdier

- $S_D = \pi a^2$  = stemplets areal ( $\text{m}^2$ )
- $q = S_D v$  = volumehastighed ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
- $Z_A = \frac{p}{q}$  = strålingsimpedansen ( $\frac{\text{Nm}^{-2}}{\text{m}^3 \text{s}^{-1}}$ )

### 7.1.6 Thiele-Small parametre

- Højtalerens parametre beskrives i dens datablad som dens Thiele-Small parametre.
- Den elektro-mekaniske model kan benyttes til at bestemme værdien af højtalerens parametre.

<b>Thiele-Small parameter</b>	<b>Symbol</b>
DC modstand	$R_E$
Svingspolens selvinduktion	$L_E$
Resonansfrekvens	$f_S$
Masse af bevægelige system	$M_{MS}$
Eftergivelihood af styr	$C_{MS}$
Mekanisk godhed	$Q_{MS}$
Elektrisk godhed	$Q_{ES}$
Mekanisk tabsmodstand (beregnet fra data)	$R_{MS}$
Ækvivalent volumen	$V_{AS}$
Kraftfaktor	$Bl$
Membranens effektive areal	$S_D$
Maksimal lineær bevægelse	$X_{MAX}$
Følsomhed ( $r = 1 \text{ m}$ , $U_{G_{RMS}} = 2,83 \text{ V}$ )	$S$

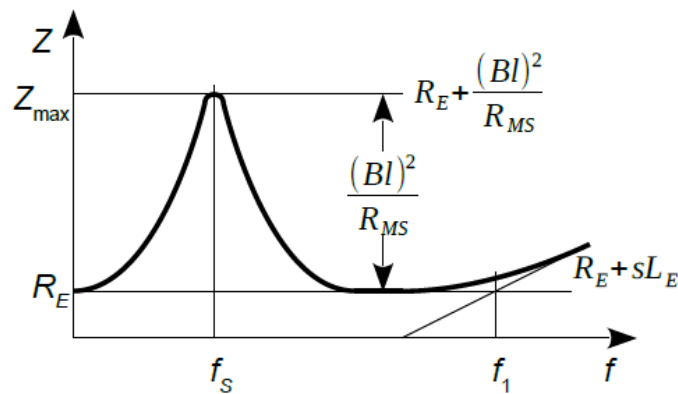
Figur 7.7: Højtalerens mekaniske-akustiske model (Elektroakustik, TAS)

### 7.1.7 Elektrisk og mekanisk impedans

- De seriekoblede impedanser fra det mekaniske system optræder nu som parallelkoblede reciprokke impedanser i serie med svingspolens DC modstand og selvinduktion.
- Impedansen vil have DC modstanden  $R_E$  som mindste værdi.
- Der vil være en top på  $R_E + R_{ES}$  ved den frekvens  $f_S$  hvor massen og eftergivelihooden går i resonans.
- Impedansen stiger for frekvenser over  $f_1$  på grund af svingspolens selvinduktion.



- Resonansfrekvens  $f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS}C_{MS}}}$
- Elektrisk impedans  $Z_E = \frac{u}{i} = \frac{(Bl)^2}{Z_M}$
- Mekanisk impedans  $Z_M = \frac{F}{v} = S_D^2 Z_A$
- $F = S_D p$



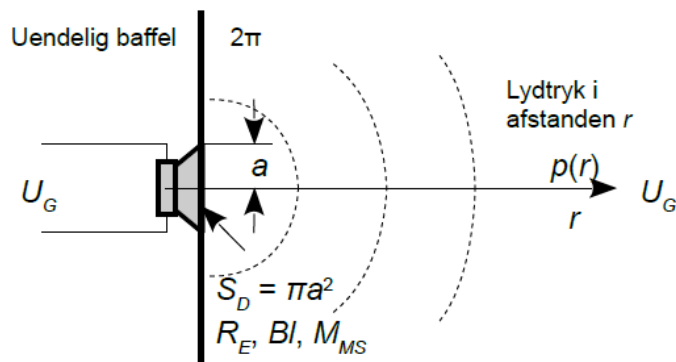
Figur 7.8: Elektrisk og mekanisk impedans kurve (Elektroakustik, TAS)

### 7.1.8 Mekanisk og akustisk impedans

- Den akustisk impedans  $Z_A$  er givet ved forholdet mellem lydtryk og volumehastighed.
- Volumehastigheden  $q$  der er hastigheden af det volumen af luft som membranen flytter.
- Lydtrykket  $p$  der er den kraft luften påvirker membranen med som følge af bevægelsen.
- Strålingsimpedans  $Z_A = \frac{p}{q} = \frac{Z_M}{S_D^2}$
- $q = S_D v$

### 7.1.9 Lydtryk

- Højttalerens måleblad benytter et halvt rum.
- Højttaleren placeres med målemikrofonen i en afstand på 1 m fra højttalerens akse.
- Effektforstærkeren indstilles til amplituden 4 V for en effekt på 1 W ved  $8\Omega$ .
- Lydtrykket  $p_{2\pi}$  i afstanden  $r$ .
- $|p_{2\pi}| = \frac{\rho S_D B l}{2\pi r M_{MS} R_E}$
- $L = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{2\pi rms}}{p_{ref}} \right)$



Figur 7.9: Højttaleren beskrives ved placering i en uendeligt baffel ( $2\pi$ ). (Elektroakustik, TAS)

#### Typiske værdier

- $p$  = amplituden af trykvariationen (Pa) typisk 1 Pa.
- $r$  = afstanden til mikrofonen (m) typisk 1 m.

### 7.1.10 Øvelser

#### Øvelse 7.1

Studer modellen med filnavnet: PC Loudspeaker.xmcd. Hvad betyder det at ændre styrets eftergivelse ( $C_{MS}$ ), det bevægelige systems masse ( $M_{MS}$ ) og den elektriske dæmpning til det dobbelte af den nominelle værdi af  $C_{MS}$ ,  $M_{MS}$  og  $R_E$ . Fx én efter én?

Det vi sigter efter er påvirkningen af resonansfrekvensen, dæmpningsfaktoren  $Q$  (godheden) og lydtrykket i det frekvensafhængige område.

### ELEKTRISK SYSTEM

$U_{\text{RMS}}$ FOR 1 W I NOMINELT $8 \Omega$	$U_G := 2.83 \text{ V}$
DC MODSTAND	$R_E := 6.0 \Omega$
SVINGSPOLENS SELVINDUKTION	$L_E := 0.65 \text{ mH}$

### MEKANISK SYSTEM

MASSE AF BEVÆGELIGE SYSTEM	$M_{MS} := 0.007 \text{ kg}$
EFTERGIVELIGHED AF STYR	$C_{MS} := 1.54 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$
FRIKTIONSTAB	$R_{MS} := 0.62 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}}$
HØJTALERENS KRAFTFAKTOR	$Bl := 5.1 \text{ T} \cdot \text{m}$

### AKUSTISK SYSTEM

STEMPLETS AREAL	$S_D := 0.0054 \text{ m}^2$
DENSITET AF LUFT	$\rho := 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

### PÅVIRKNING AF:

RESONANSFREKVENSEN	$f_S := \frac{1}{2 \pi \cdot \sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}} = 48.5 \text{ Hz}$
DÆMPNINGSAKTØREN	$Q_{TS} := \frac{1}{\frac{(Bl)^2}{R_E} + R_{MS}} \cdot \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} = 0.43$
LYDTRYKKET I DET FREKVENSAFHÆNGIGE OMRÅDE	$p_{2\pi} := \frac{\rho \cdot S_D \cdot Bl}{2 \pi \cdot 1 \text{ m} \cdot M_{MS} \cdot R_E} \cdot U_G = 0.35 \text{ Pa}$ $L := 20 \cdot \log \left( \frac{p_{2\pi}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}} \right) = 84.8 \text{ dB}$

- Fordobling af den nominelle værdi af
  - $C_{MS}$ 
    - \* Resonansfrekvensen  $f_S$  falder til  $\approx 34$  Hz
    - \* Dæmpningfaktoren  $Q$  ændres til  $\approx 0.3$
  - $M_{MS}$ 
    - \* Resonansfrekvensen  $f_S$  falder til  $\approx 34$  Hz
    - \* Dæmpningfaktoren  $Q$  ændres til  $\approx 0.6$
    - \* Lydtrykket  $L$  falder til  $\approx 78$  dB
    - \* Der skal mere energi til at systemet svinger
  - $R_E$ 
    - \* Resonansfrekvensen  $f_S$  ændres ikke
    - \* Dæmpningfaktoren  $Q$  ændres til  $\approx 0.8$
    - \* Lydtrykket  $L$  falder til  $\approx 79$  dB
    - \* Der skal mere spænding til at levere samme strøm

### Øvelse 7.2

Måling af lydtryk fra en højttaler (fx ved 300 Hz) og sammenligne med teorien for den massestyrede højttaler. Højttalerens mekaniske parametre ( $S_D$ ,  $Bl$ ,  $M_{MS}$  og  $R_E$ ) skal være kendt, mikrofonen skal være kalibreret og ligeledes for indstillingen af effektforstærkeren.

### Øvelse 7.3

Måling af nogle af en højttalers parametre, som beskrevet i Elektroakustik, side 33. For eksempel måling af DC modstand ( $R_E$ ) med ohmmeter, stempelareal ( $S_D$ ) med lineal og kraftfaktor ( $Bl$ ) ved brug af en lille masse og strøm i svingspolen.

---

# Højttalerdesign

---

## 8.1 Lektion 05-04-2018

1. Højttaler i kabinet
2. Åben baffel
3. Lukket kabinet
4. Basreflex
5. Slavebas

- **Pensum:**

1. Elektroakustik, TAS, p. 42-65

- **Opgaver:**

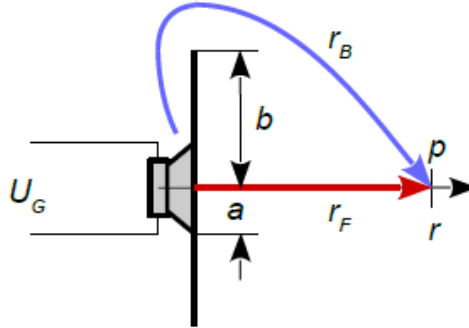
1. Lyd og Akustik - Lektion 8 - opgaver og øvelser

### 8.1.1 Åben baffel

#### Akustisk kortslutning

- Et overtryk på den ene side af membranen vil udligne det tilsvarende undertryk på den anden side.
- Ved gengivelse af dybe toner skal lydtrykket fra de to sider af membranen derfor holdes adskilt.
- Med et hul i en plade (en baffel) forsinkes og dæmpes trykbølgen fra bagsiden.

- Herved opstår kun en delvis udslukning af lyden.



Figur 8.1: Akustisk kortslutning. (Elektroakustik, TAS)

- Det resulterende lydtryk i afstanden  $r_F$  beregnes som differensen mellem de to lydtryk.

$$p = \frac{\rho}{r_F} \frac{BlS_D}{2\pi M_{MS}} \frac{U_G}{R_E} \left[ 1 - \frac{r_F}{r_B} D(ka) \exp(-jk(r_B - r_F)) \right] \quad (8.1)$$

- Under grænsefrekvensen  $f_B$  aftager lydtrykket med 6 dB/oktav.
- Under højttalerens resonans  $f_S$  øges hældningen til 18 dB/oktav.
- Ved høje frekvenser opstår interferens på grund af den skiftende fase for bagsidens signal.
- Grænsefrekvens ( $\lambda/4$ ) ved meget stor afstand til mikrofonen.
  - Cirkulær baffel med radius  $b$ .

$$f_B = \frac{c}{4b} \quad (8.2)$$

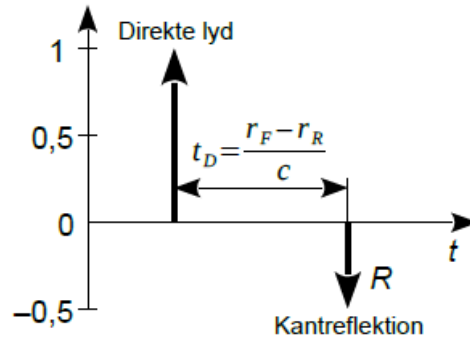
## Diffraction

- Lyden kan ikke uden videre bøjes omkring et skarpt hjørne.
- En kantrefleksion vil skabe interferens på samme måde som trykbølgen fra bagsiden af højttaleren.
- Efter den direkte lyds impuls kommer et svagere og inverteret ekko med en tidsforskel givet ved afstanden fra højttaleren til kanten.

- Refleksionskoefficient  $R$ .

$$- R_{Kasse} = -0.33$$

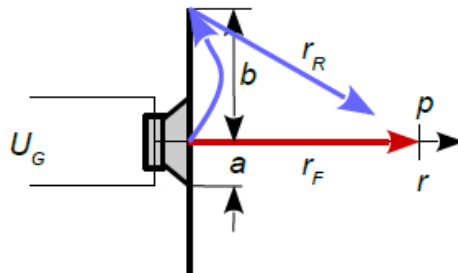
$$- R_{Plade} = -0.50$$



Figur 8.2: Impulsresponsen for en cirkulær baffel med en punktllydkilde i centrum. (Elektroakustik, TAS)

- Diffractionen kan beregnes på samme måde som for den akustiske kortslutning ved at addere det direkte bidrag med kantreflektionen.
- Det negative fortegn svarer til en subtraktion af det dæmpede og forsinkede ekko fra det direkte signal fra fronten.

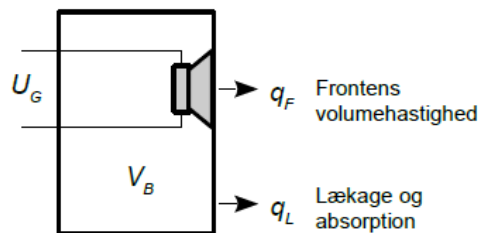
$$p = \frac{\rho}{r_F} \frac{BlS_D}{2\pi M_{MS}} \frac{U_G}{R_E} \left[ 1 - \frac{r_F}{2r_R} D(ka) \exp(-jk(r_R - r_F)) \right] \quad (8.3)$$



Figur 8.3: Diffraction for en cirkulær baffel med radius  $b$  og en punktformet lydkilde i centrum. (Elektroakustik, TAS)

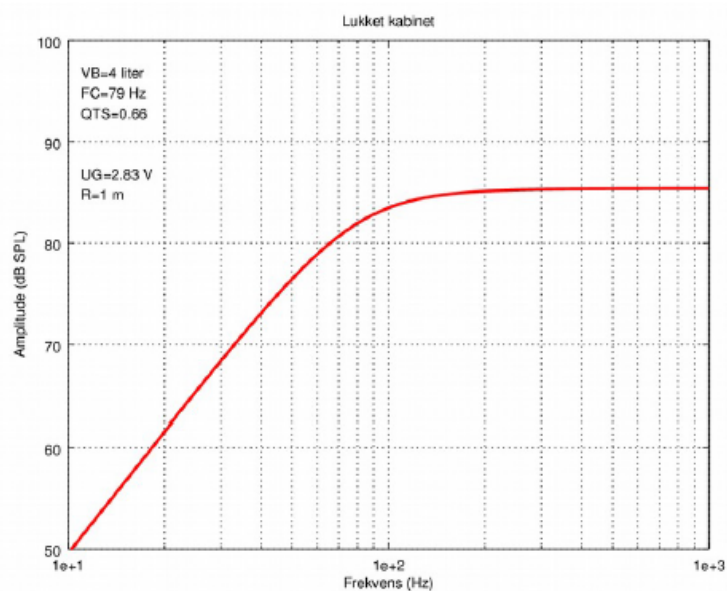
### 8.1.2 Lukket kabinet

- Eliminere udstrålingen fra bagsiden ved at montere højttaleren i et lukket kabinet for effektivt at holde de to sider adskilt.
- Den indespærrede luftvolumen  $V_B$  udgør en eftergivelse  $C_{AB}$  som belaster membranens bagside.
- En vigtig specifikation for en højttaler er dens ækvivalente volumen  $V_{AS}$ .
- En højttaler med resonansen 50 Hz monteres i et kabinet med samme volumen som  $V_{AS}$  specifikationen vil resonansen hæves 1.4 gange til 70 Hz.



Figur 8.4: Lukket kabinet. (Elektroakustik, TAS)

- Det resulterende lydtryk for et lukket kabinet.



Figur 8.5: Lukket kabinet. (Elektroakustik, TAS)

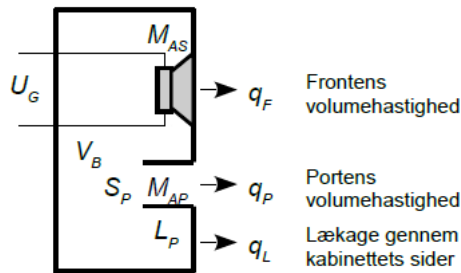


### 8.1.3 Basreflex

- Udnyttelse af effekten fra højttalerens bagside til at støtte basgengivelsen i et mindre frekvensområde ved et såkaldt ventileret kabinet.
- Massen af luften i porten danner en resonans med det indespærrede luftvolumen.
- Massen af luftproppen i porten beregnes som massefylden af luft  $\rho_0$  gange med luftvoluminet der er arealet af porten  $S_P$  ganget med længden af porten  $L_P$ .
- Den omregnes til akustisk masse  $M_{AP}$  ved division med  $S_P$  kvadreret

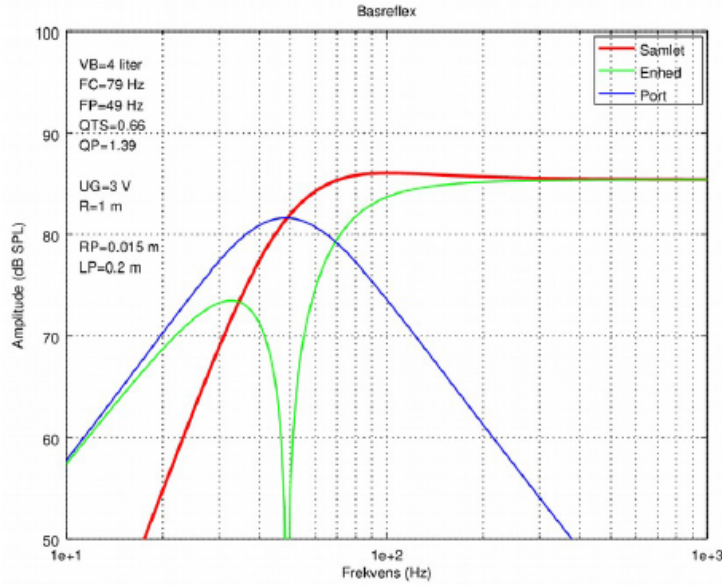
$$M_{AP} = \frac{\rho_0}{S_P} (L_P + 1.5 \sqrt{\frac{S_P}{\pi}}) \quad (8.4)$$

- $\rho_0 = 1.18 \text{ kg/m}^3$



Figur 8.6: Et basreflex kabinet inkluderer en port. (Elektroakustik, TAS)

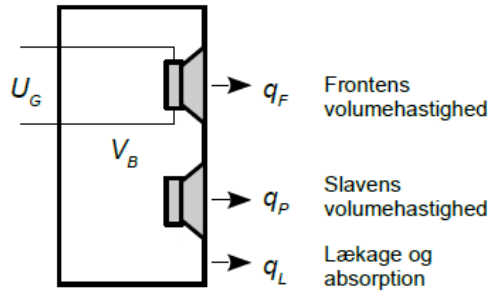
- Rød kurve er det resulterende lydtryk.
- Grøn kurve er lydtrykket fra højttalerenheden.
- Blå kurve viser hvor meget port står for.



Figur 8.7: basreflex kabinet. (Elektroakustik, TAS)

#### 8.1.4 Passiv slave

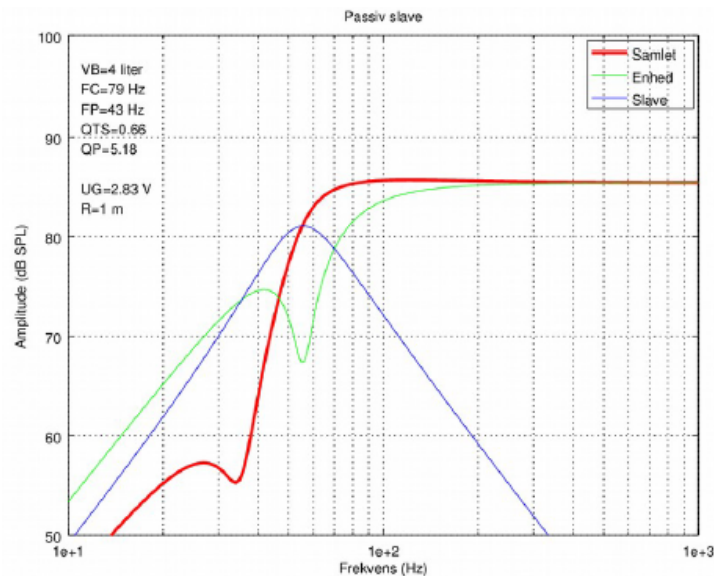
- Erstatte porten med en passiv højttaler, kaldet en slavebas.
- En højttaler med membran og styr, men uden magnet og svingpole.
- Portens masse  $M_{AP}$  erstattet af højttalerens  $M_{AS}$ ,  $C_{AS}$  og  $R_{AS}$ .



Figur 8.8: Et kabinet med en passiv slave. (Elektroakustik, TAS)

- $M_{AS} = \frac{M_{MS}}{S_D^2}$
- $R_{AS} = \frac{R_{MS}}{S_D^2}$
- $C_{AS} = C_{MS} S_D^2$

- Rød kurve er det resulterende lydtryk.
- Grøn kurve er lydtrykket fra højttalerenheden.
- Blå kurve viser hvor meget slave står for.



Figur 8.9: basreflex kabinet. (Elektroakustik, TAS)

### 8.1.5 Øvelser

#### Øvelse 8.1

Design et anden ordens delefilter for et tovejs system med en bas og diskant højttaler med udgangspunkt i formlerne fra noten Elektroakustik, s. 82. Find et par højttalere på nettet og benyt de rapporterede frekvenskarakteristikker og øvrige data for de valgte enheder til at finde en egnet delefrekvens.

Beslut om diskant højttaleren skal ompoles (inverteres) eller forskydes mekanisk på fronten for at få en korrekt faserelation mellem enhederne.

Vælg godheden  $Q$  for hver gren af delefiltret. Beslut om der skal korrigeres for bashøjttalerens stigende impedans (s. 37) og for diskant højttalerens resonans, og beslut om diskanten skal dæmpes for at passe til bashøjttaleren (s. 85). Begrund de truffne valg!

---

## Lyddæmpning og lyddiffusion

---