
ETLYAK

Lyd og Akustik



Indholdsfortegnelse

1	Karakterisering af lyd	2
1.1	Lektion 01-02-2018	2
1.1.1	Lyd i et medium	2
1.1.2	Hørelsen	4
1.1.3	Ohms lov analogi	7
1.1.4	Vægtning	8
1.1.5	Lydens udbredelse	9
1.1.6	Opgaver	11
2	Måling/opsamling af lyd	12
2.1	Lektion 08-02-2018	12
2.1.1	Mikrofon	12
2.1.2	Højtaler (afstandsregel)	14
2.1.3	Måling af lydtryk	14
2.1.4	Opgaver	14
3	Psykoakustik - Menneskets opfattelse af lyd	15
3.1	Lektion 15-03-2018	15
3.1.1	Ørets opbygning	15
3.1.2	Frekvensopfattelse	15
3.1.3	Lydniveau	15
3.1.4	Lokalisering af lydkilder	15
4	Lydens opførsel i lukkede rum	16
4.1	Lektion 15-02-2018	16
4.1.1	Stående bølger	16
4.1.2	Geometrisk rumakustik	19
4.1.3	Statistisk rumakustik	21
4.1.4	Absorptionskoefficienter	21

5	Virtuel akustik - Spejlkildemodel	22
5.1	Lektion 22-02-2018	22
5.1.1	Virtuel Akustik	22
5.1.2	Ray Tracing Method	23
5.1.3	Image Source Method	23
5.1.4	Reflektogram	25
5.1.5	Øvelser	25
6	Virtuel akustik - Auralisation	26
6.1	Lektion 01-03-2018	26
6.1.1	Impulsrepsonser	26
6.1.2	Auralisation Af Rum	27
6.1.3	Binaural Analysis	27
7	Gengivelse af lyd	29
7.1	Lektion 22-03-2018	29
7.1.1	Højtalerens model	29
7.1.2	Snittegning	30
7.1.3	Elektriske system	30
7.1.4	Mekaniske system	32
7.1.5	Akustiske system	33
7.1.6	Thiele-Small parametre	34
7.1.7	Elektrisk og mekanisk impedans	34
7.1.8	Mekanisk og akustisk impedans	35
7.1.9	Lydtryk	36
7.1.10	Opgaver	37
8	Højtalerdesign	38
9	Lyddæmpning og lyddiffusion	39

Rettelser

Note: Mangler højtaler (aftandsregel) noter.	14
Note: Mangler måling af lydtryk noter.	14
Note: Mangler psykoakustik noter.	15
Note: Mangler virtuel akustik noter.	26

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:**

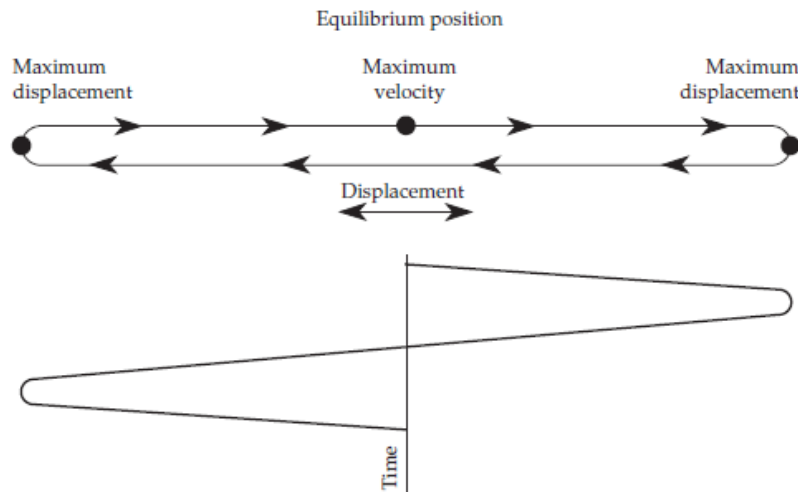
1. Lyd og Akustik - Lektion 1 - opgaver og øvelser

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.

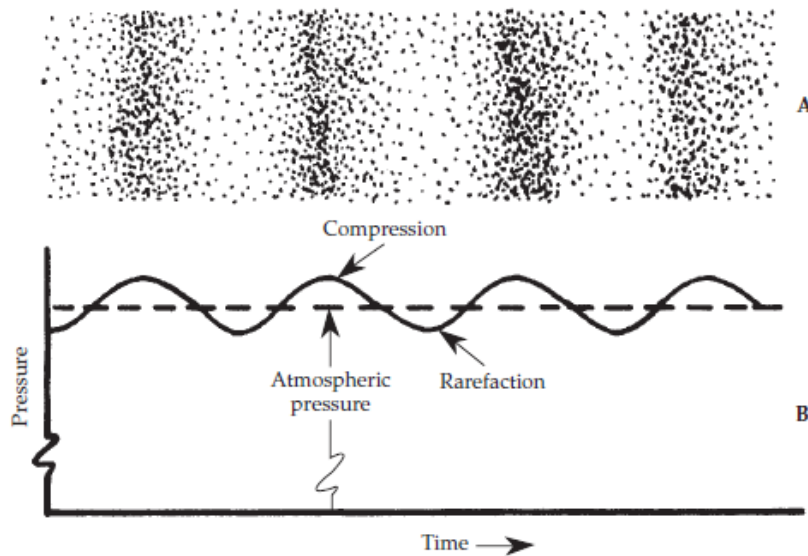
- Lyd er svingning i et medium omkring ligevægt. Uden et medium kan lyd ikke blive udbredt.

- 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)

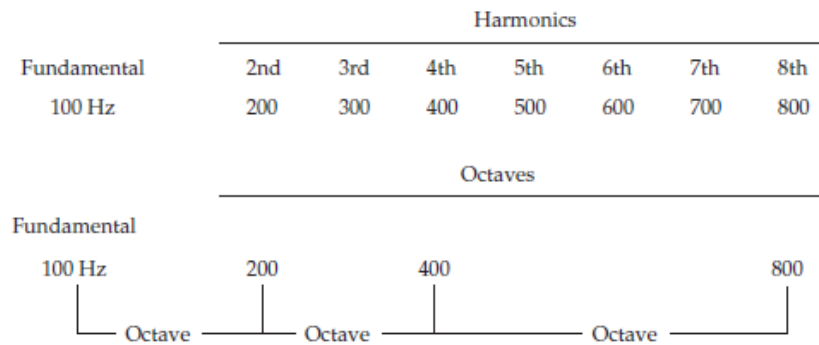
$$f = \frac{c}{T} \quad (1.1)$$

- – 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

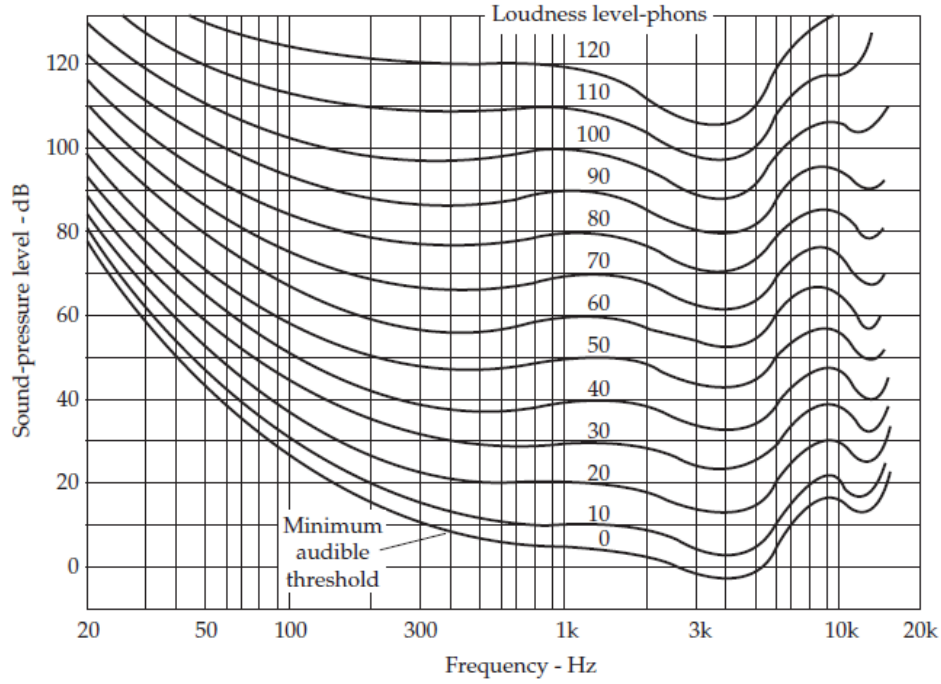
- Scopet af det hørbare spektrum er 20 Hz til 20 kHz.
 - Der er lyde der ikke kan høres af øret. Det er frekvenser der er lavere end det hørbare spektrum (infrasound) og frekvenser der er højere end det hørbare spektrum (ultrasound).
- Intensiteten af lyden I_L kan opgives i decibel [dB] ved at anvende 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} 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, μPa or other

p_{ref} = acoustic reference pressure, μPa or other

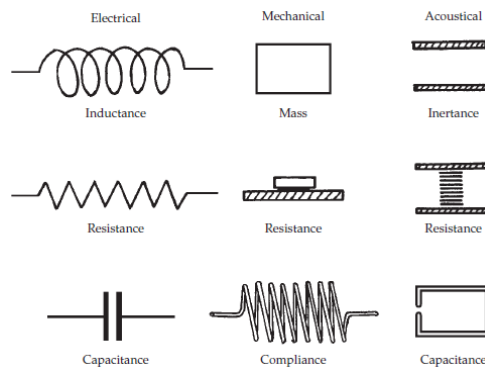
	Equation (1.4)	Equation (1.5)
Parameter	$10 \log_{10} \frac{a_1}{a_2}$	$20 \log_{10} \frac{b_1}{b_2}$
Acoustic		
Intensity	X	
Power	X	
Air particle velocity		X
Pressure		X
Electric		
Power	X	
Current		X
Voltage		X
Distance (From source-SPL; inverse square)		X

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.



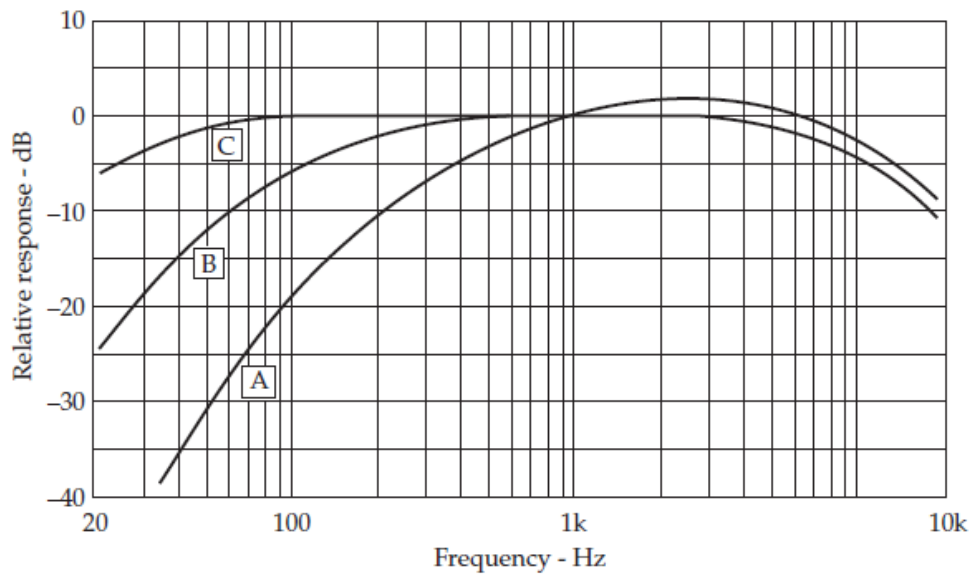
Figur 1.6: De 3 basale elementer af elektriske systemer og deres analogier i mekaniske og akustiske systemer.

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

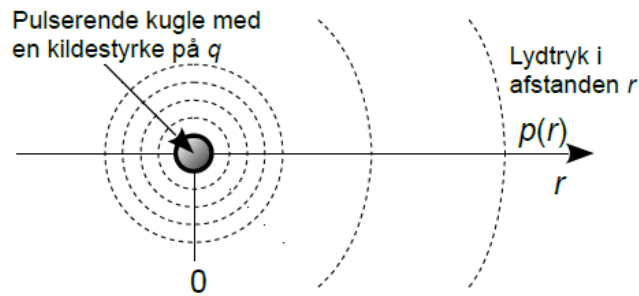
For sound-pressure levels of 20 to 55 dB, use network A.

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

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

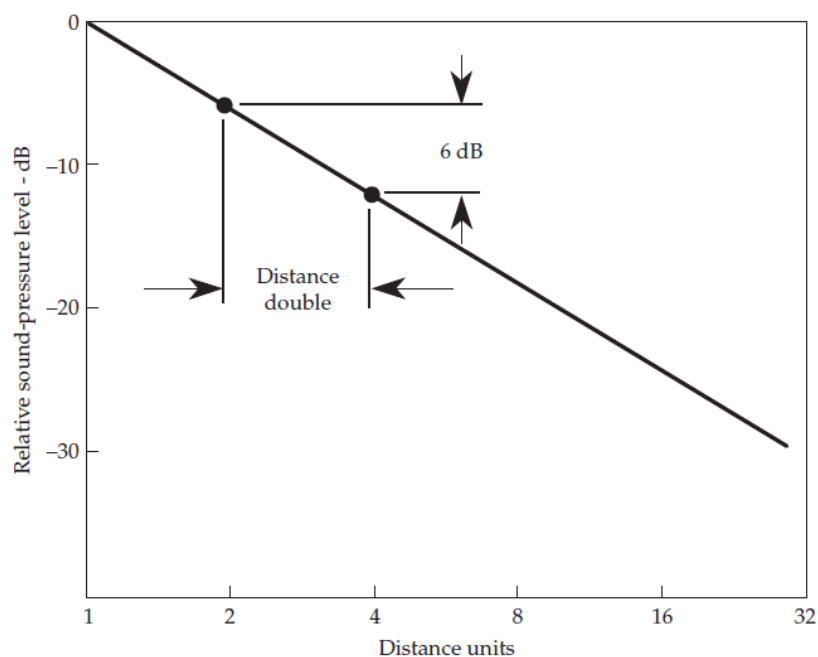
1.1.5 Lydens udbredelse

- 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 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. Højtaler (afstandsregel)
3. Måling af lydtryk

- **Pensum:**

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

- **Opgaver:**

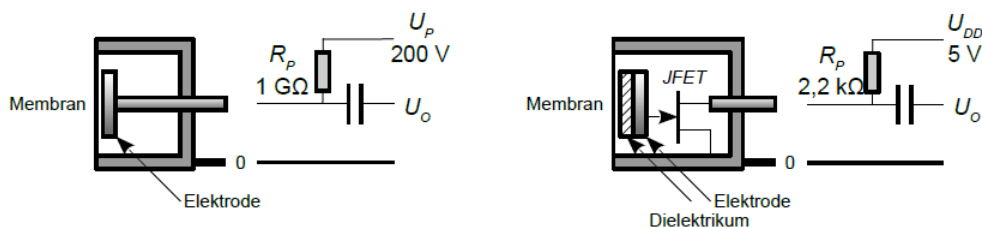
1. Lyd og Akustik - Lektion 2 - opgaver og øvelser

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.



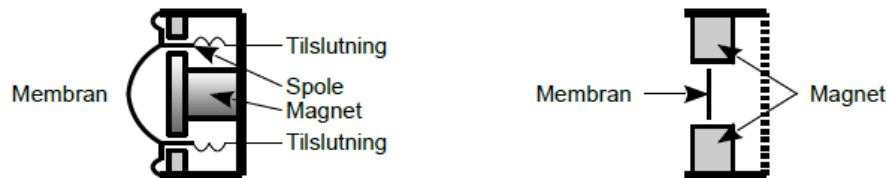
Figur 2.1: Kondensatormikrofonens opbygning.

- 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° 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)).

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
(af-
tandsre-
gel)
noter.
FiXme
Note:
Mangler
måling
af
lydtryk
noter.

Psykoakustik - Menneskets opfattelse af lyd

3.1 Lektion 15-03-2018

1. Ørets opbygning
2. Frekvensopfattelse
3. Lydniveau
4. 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 Ørets opbygning

3.1.2 Frekvensopfattelse

3.1.3 Lydniveau

3.1.4 Lokalisering af lydkilder

Retningsbestemmelse

FiXme
Note:
Mangler
psykoa-
kustik
noter.

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

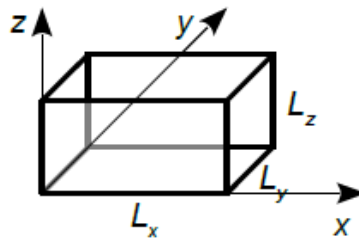
Et retvinklet rum vil have et system af egenfrekvenser. Her vil plane bølger spejles så de understøtter bestemte frekvenser. Dette sker gennem konstruktiv interferens.

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

ΔL 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 -3dB 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 dB af det oprindelige niveau.
- Resonanserne kan beskrives ved dæmpede svingninger der fra filterteorien repræsenteres af et anden-ordens filter for hver resonans.

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

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

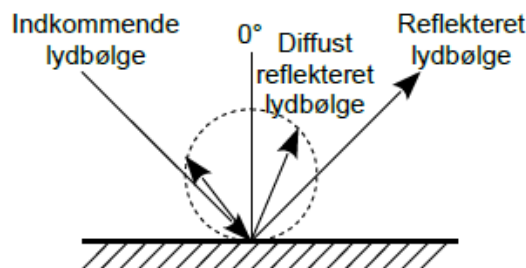
4.1.2 Geometrisk rumakustik

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.

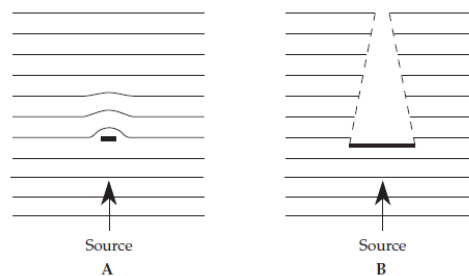


Figur 4.2: En lydbølges refleksioner sker både som en direkte spejling af lydbølgen og som en diffus lydbølge.

Diffraction

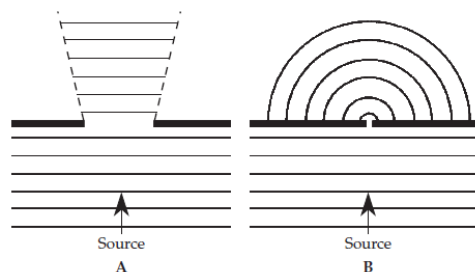
Hvordan lydbølger bøjes af små forhindringer og hvordan lydbølger udbredes efter små åbninger.

- 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-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.

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:**

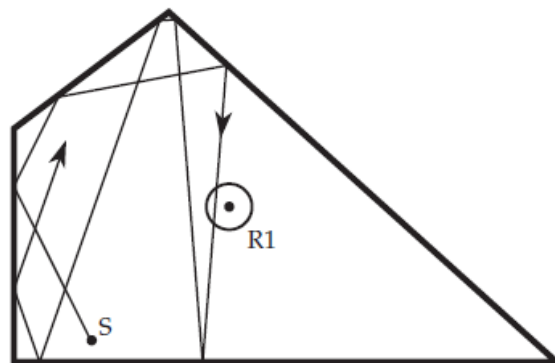
1. Lyd og Akustik - Lektion 5 - opgaver og øvelser

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.

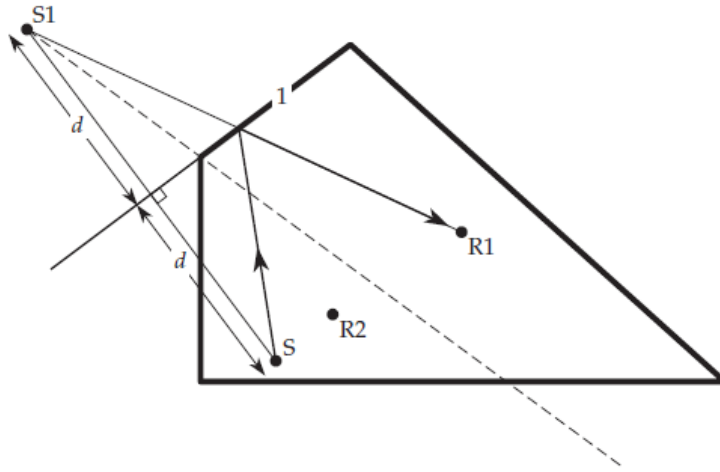


Figur 5.1: Ray Tracing - source S, receiver area R1.

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 .

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

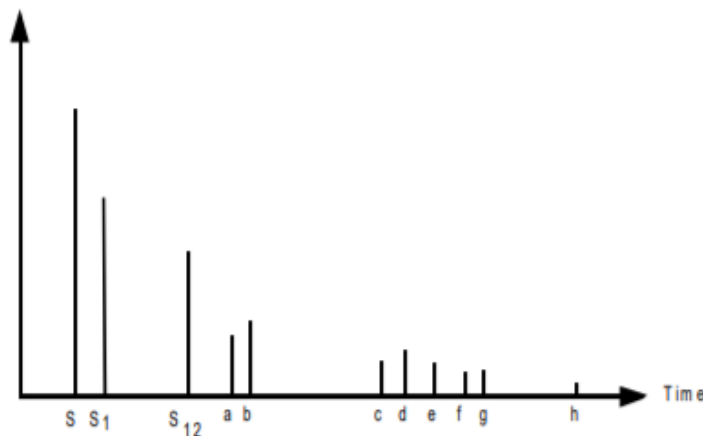
Ved n antal rumgrænser = n antal mulige 1. ordens image sources som kan medføre $n-1$ 2. ordens image sources.

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

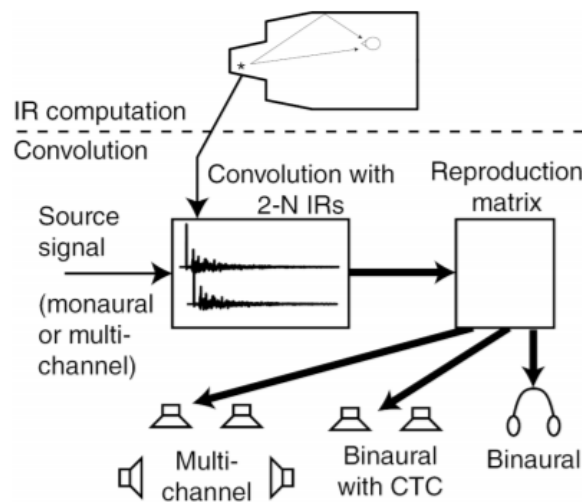
6.1.1 Impulsrepsonser

- 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.

FiXme
Note:
Mangler
virtuel
akustik
noter.

6.1.2 Auralisation Af Rum

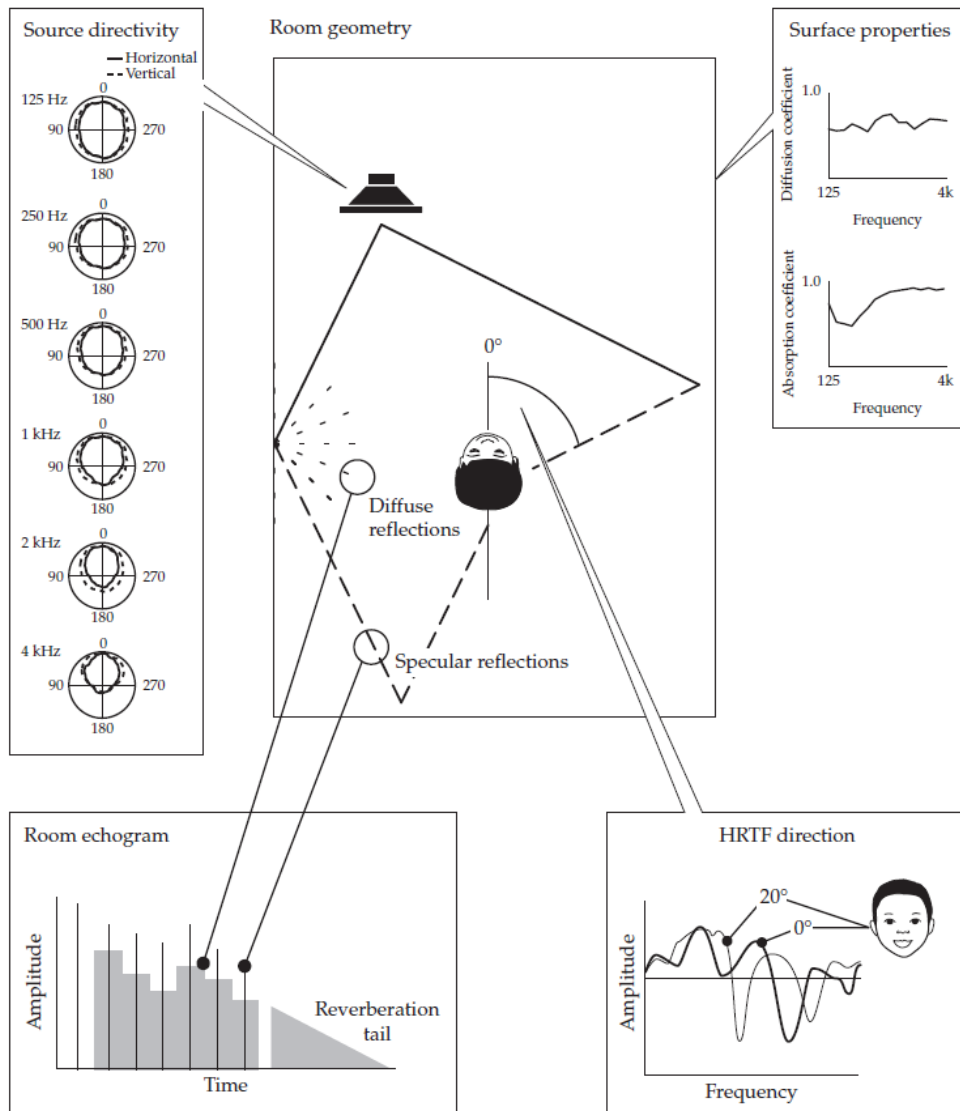
- Beregning af RIR (Room Impulse Response) og derefter BRIR (Binaural Room Impulse Response) er nødvendigt.
- Disse impulsresponser foldes med et signal som enten skal være syntetisk genereret eller optaget i lyddødt rum (tørt signal).



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).



Figur 6.2: Receiverens HRTF.

Gengivelse af lyd

7.1 Lektion 22-03-2018

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

- **Pensum:**

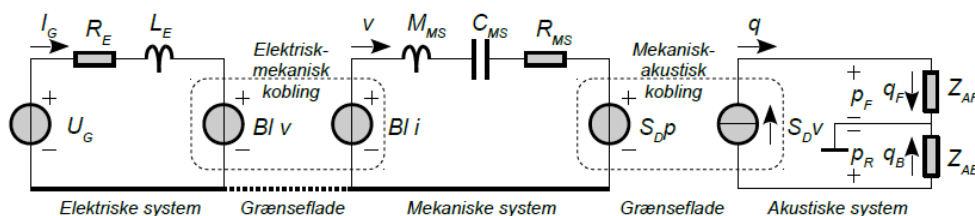
1. Elektroakustik, TAS, p. 29-41

- **Opgaver:**

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

7.1.1 Højttalerens model

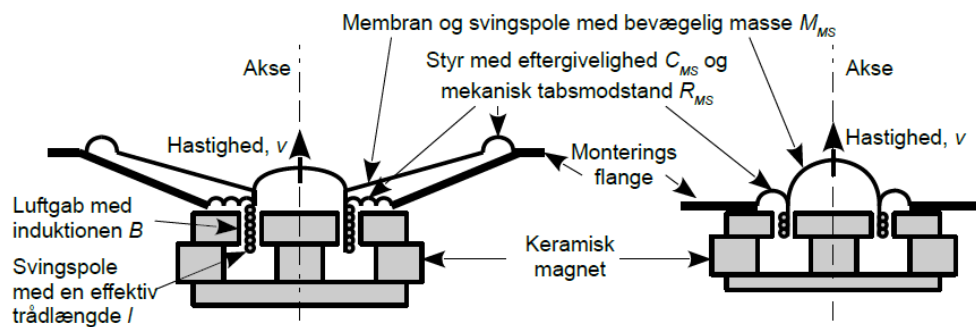
- Er en transducer som omsætter elektrisk energi til akustisk energi.
- Benytter en let og stiv membran som sættes i bevægelse af en elektromagnetiske kraft for at overføre energi til luften.



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.

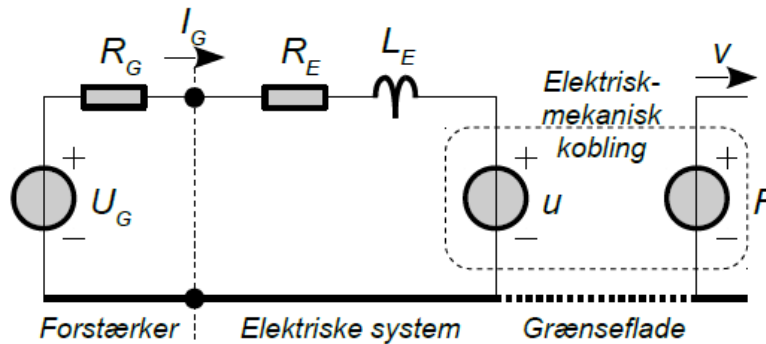


Figur 7.2: Snit igennem bashøjttaler (venstre) og diskant (højre).
(Elektroakustik, TAS)

- 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)

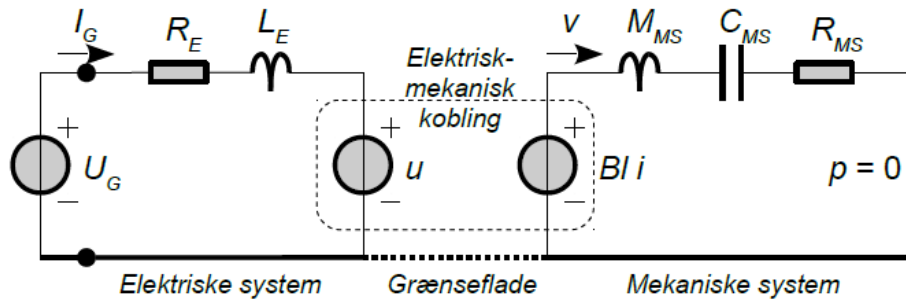
- Højttalerens elektriske system består af følgende:
 - Effektforstærkeren.
 - * Repræsenteret ved en spændingskilde U_G .
 - Modstanden R_E fra svingspolens tråd.
 - Selvinduktionen L_E fra spolens bevikling.
- Reaktionen fra det mekaniske system beskrives ved:
 - Spændingskilden Blv for Faradays induktionslov 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 (Ω) 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 N A^{-1}).

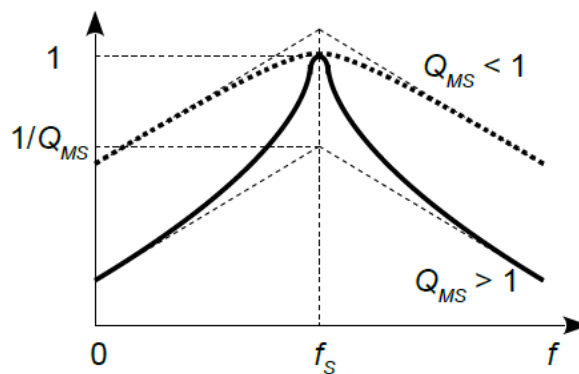
7.1.4 Mekaniske system

- 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)

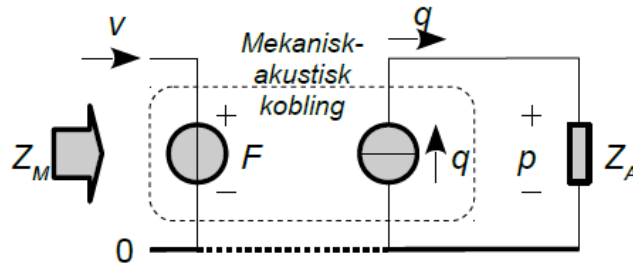
- Det mekaniske system vil svinge frivilligt hvis det sættes i gang.
- Hastigheden er proportional med frekvensen under den mekaniske resonans og den aftager med frekvensen over resonansen.
- $Q_{MS} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}}$

Typiske værdier

- M_{MS} = Masse af bevægeligt system (kg) typisk 5 g ... 20 g.
- R_{MS} = Friktionstab (N s m^{-1}) typisk 1 N s m^{-1} .
- C_{MS} = Eftergivelse af membranstyr (m N^{-1}) typisk 1 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 (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.

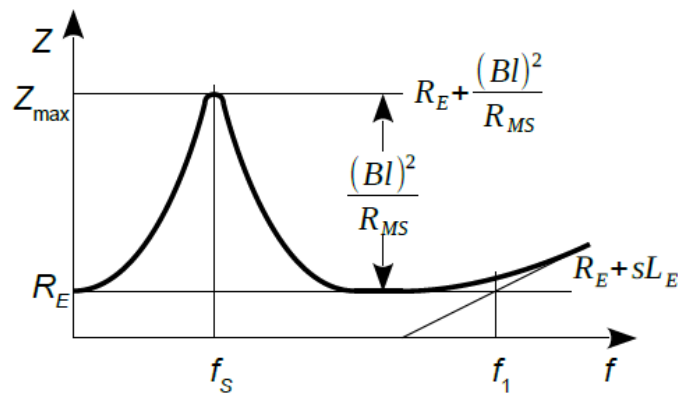
Thiele-Small parameter	Symbol
DC modstand	R_E
Svingspolens selvinduktion	L_E
Resonansfrekvens	f_S
Masse af bevægelige system	M_{MS}
Eftergivelihood af styr	C_{MS}
Mekanisk godhed	Q_{MS}
Elektrisk godhed	Q_{ES}
Mekanisk tabsmodstand (beregnet fra data)	R_{MS}
Ækvivalent volumen	V_{AS}
Kraftfaktor	Bl
Membranens 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 $Z_M = \frac{F}{v} = S_D^2 Z_A$
- $F = S_D p$



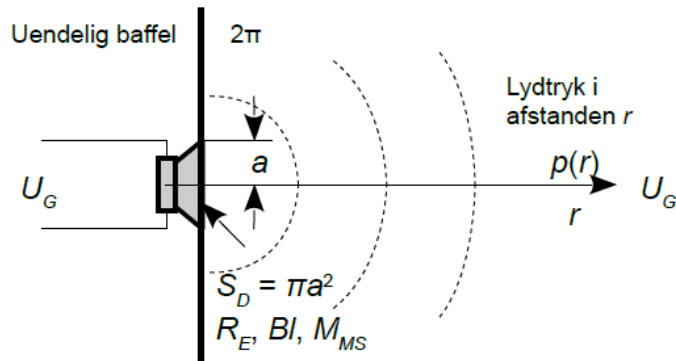
Figur 7.8: Elektrisk og mekanisk impedans kurve (Elektroakustik, TAS)

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 8Ω .
- 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 (2π). (Elektroakustik, TAS)

Typiske værdier

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

7.1.10 Opgaver

Jonas Lind au537812

22-03-2018

Lektion 7

Højtaleren som elektromekanisk transducer

Øvelse 7.1

ELEKTRISK SYSTEM

 U_{RMS} FOR 1 W I NOMINELT 8 Ω $U_G := 2.83 \text{ V}$
DC MODSTAND $R_E := 6.0 \text{ }\Omega$ 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 $f_S := \frac{1}{2 \pi \cdot \sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}} = 48.5 \text{ Hz}$

 DÆMPNINGSAKTOREN $Q_{TS} := \frac{1}{\frac{(Bl)^2}{R_E} + R_{MS}} \cdot \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} = 0.43$

 LYDTRYKKET I DET FREKVENSUAFHÆNGIGE OMRÅDE $p_{2\pi} := \frac{\rho \cdot S_D \cdot Bl}{2 \pi \cdot 1 \text{ m} \cdot M_{MS} \cdot R_E} \cdot U_G = 0.35 \text{ Pa}$
 $L := 20 \cdot \log \left(\frac{p_{2\pi}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}} \right) = 84.8 \text{ dB}$

Højtalerdesign

Lyddæmpning og lyddiffusion
