



NTNU  
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon  
Akustikk

Faglig kontakt under eksamen:  
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, Gløshaugen  
Peter Svensson, 99572470

**EKSAMEN I TT3010: AUDIOTEKNOLOGI OG ROMAKUSTIKK,  
7,5 studiepoeng, 14. desember, 2011.  
Eksamenstid: 09:00-13:00**

Tillatte hjelpemidler: C - Typegodkjent kalkulator, med tomt minne, i samsvar med liste utarbeidet av NTNU.

Sensur: 14. januar 2012.

**Husk å redegjøre for antakelser som du gjør for å løse oppgavene!**

Lykke til!

**OPPGAVE 1.** (Instrument, 20%)

Vi skal gjøre opptak i en liten konsertlokal og prøver å finne egnede mikrofonposisjoner.

- a. Når vi plasserer flere mikrofoner i nærheten av en fiolin så legger vi merke til at forskjellen i mikrofonsignal (klangfarven) er ganske stor mellom de ulike mikrofonposisjonene. Hvorfor?

Viktigste årsaken er at en fiolin har et komplisert lydutstrålingsmønster. Fiolinen har et antall resonanser, som forsterker lyden, og enhver resonans gir forsterkning i et frekvensområde rundt en resonansfrekvens. Enhver resonans gis av et spesifikt vibrasjonsmønster i fiolinen og har et eget, karakteristisk utstrålingsmønster, og derfor varierer utstrålingsmønstret tydelig fra et frekvensområde til et annet. Dette leder til at den spektrale balansen kan variere ganske kraftig fra en retning til en annen.

- b. Hvorfor er forskjellene mellom mikrofonsignalene i ulike mikrofonposisjoner lavere hvis mikrofonene er plassert langt unna en fiolin?

Hvis vi er i et rom, og plasserer mikrofonen langt unna kilden så kommer etterklanglyden å være sterkere enn direktelyden. Etterklanglyden gis av lyd som har strålt ut i alle retninger fra kilden, dvs etterklanglyden gir et gjennomsnitt av alle utstrålingsretninger, uansett hvor vi plasserer mikrofonen. Altså kommer etterklanglyden å oppvise mye mindre forskjeller i spektral balanse.

- c. Vi merker oss at diskanten i et opptak fra klarinettene påvirkes en hel del av hvorvidt det plasseres teppe på gulvet på scenen, men dette virket ikke å være fallet for fiolinene. Forklar hvorfor.

En klarinett har anderledes utstrålingsforhold enn en fiolin: lyden stråles ut fra klokkestykket og fra noen av de åpne hullene. Ved høyere frekvenser kommer mer og mer av lyden å stråles ut fra klokkestykket, og i tillegg blir denne utstrålte lyden fra klokkestykket mer og mer direktiv i retningen som klarinetten peker, dvs ned i gulvet. Da kommer en økende andel av utstrålt lyd via en refleksjon i gulvet, hvilket da påvirkes av eventuelt teppe på gulvet.

**OPPGAVE 2.** (Romakustikk, 40%)

I ett undervisningsrom med lengde 10 meter, bredde 8 meter og høyde 4 meter, ble det målt en etterklangstid på 0.9 sekunder. Denne etterklangstiden er for lang for dette rommet, og du har fått i oppgave å forbedre det.

- a. Finn midlere absorpsjonsfaktor i rommet. Se bort fra luftabsorpsjon.

Vi bruker Sabines ligning som er oppgitt:

$$T60 = 0.16 * V / A$$

hvor  $A = S_{\text{total}} * \alpha_{\text{gjennomsnitt}}$  (uten luftabsorpsjon),  
 $S_{\text{total}}$  er totale overflatearealet i rommet.

$$\text{Da blir } \alpha_{\text{gjennomsnitt}} = 0.16 * V / (S_{\text{total}} * T60).$$

Numeriske verdier er:  $T60 = 0.9$  s,  $V = 10 * 8 * 4 \text{ m}^3 = 320 \text{ m}^3$ ,  $S_{\text{total}} = 2 * (10 * 8 + 10 * 4 + 8 * 4) \text{ m}^2 = 304 \text{ m}^2$ . Da får vi

$$\alpha_{\text{gjennomsnitt}} = 0.16 * 320 / (304 * 0.9) \approx 0.19.$$

Av hensyn til renhold, så kan ikke gulvet endres. Gulvet er et hardt linoleumsbelegg med absorpsjonsfaktor  $\alpha_{\text{gulv}} = 0.05$ . Videre så må det være en tavle på en av kortveggene. Tavlen strekker seg over hele kortveggenes bredde. Høyden til tavlen er 1.2 meter. Absorpsjonsarealet,  $A_{\text{tavle}}$ , til tavlen er  $1 \text{ m}^2$ .

b. Finn midlere absorpsjonsfaktor til de resterende flatene.

I (a) beregnet vi midlere absorpsjonsfaktor til 0.19. Denne beregnes slik fra de forskjellige overflatenes absorpsjonsfaktorer:

$$\alpha_{\text{gjennomsnitt}} = 1 / S_{\text{total}} * (S_{\text{gulv}} * \alpha_{\text{gulv}} + S_{\text{tavle}} * \alpha_{\text{tavle}} + S_{\text{resten}} * \alpha_{\text{resten}}) \text{ dvs}$$

$$\alpha_{\text{resten}} = 1 / S_{\text{resten}} * (S_{\text{total}} * \alpha_{\text{gjennomsnitt}} - S_{\text{gulv}} * \alpha_{\text{gulv}} - S_{\text{tavle}} * \alpha_{\text{tavle}})$$

Her trenger vi noen numeriske verdier:

$$S_{\text{gulv}} = 8 * 10 \text{ m}^2 = 80 \text{ m}^2.$$

$$S_{\text{tavle}} = 1.2 * 8 \text{ m}^2 = 9.6 \text{ m}^2. \alpha_{\text{tavle}} = A_{\text{tavle}} / S_{\text{tavle}} = 1 / 9.6 \approx 0.104.$$

$$S_{\text{resten}} = S_{\text{total}} - S_{\text{gulv}} - S_{\text{tavle}} = 304 - 80 - 9.6 = 214.4 \text{ m}^2. \text{ Da får vi}$$

$$\alpha_{\text{resten}} = 1 / 214.4 * (304 * 0.19 - 80 * 0.05 - 9.6 * 0.104) \approx 0.25.$$

Ønsket etterklangtid i rommet er 0.5 sekunder.

c. Hvor mye tilleggsabsorpsjon,  $A_{\text{tillegg}}$  (i  $\text{m}^2$ ), må inn i rommet for å oppnå kravet?

For å oppnå  $T60 = 0.5$  s så kan vi bruke Sabines ligning igjen, og få

$$A_{\text{ønsket}} = 0.16 * 320 / 0.5 \approx 102.4 \text{ m}^2.$$

$$\text{Eksisterende: } A_{\text{eksisterende}} = 0.16 * 320 / 0.9 \approx 56.9 \text{ m}^2.$$

Altså trenger vi en økning på  $102.4 \text{ m}^2 - 56.9 \text{ m}^2 \approx 45.5 \text{ m}^2 = A_{\text{tillegg}}$ .

Vi har tilgang til absorpsjonsplater med absorpsjonsfaktoren  $\alpha = 0.7$ .

- d. Hvor mange m<sup>2</sup> trenger man av den typen? NB! Husk at de nye absorpsjonsplatene legges over den eksisterende veggen/taket!

Hvis vi plasserer de nye absorpsjonsplatene på veggen, så kommer vi altså å erstatte en overflate med  $\alpha = 0.25$  (som vi beregnet i (b)) med  $\alpha = 0.7$ . Da får vi en økning av  $\alpha$  med 0.45! Hvis vi da trenger en tilleggs-absorpsjonsareal på 45.5 m<sup>2</sup> så trenges altså:

$S_{\text{absorbent}} = A_{\text{tillegg}} / \alpha_{\text{nettoøkning}} = 45.5 / 0.45 \approx 101 \text{ m}^2$ . Da kan vi f eks fylle hele taket (80 m<sup>2</sup>) + 21 m<sup>2</sup> på veggene.

Læreren i det ene faget er ganske høylytt, og lydtrykksnivået blir målt til 75 dB på 3 meters avstand i det forbedrede rommet.

- e. Hvor mange Watt lydeffekt prater læreren med? Anta at læreren stråler som en punktkilde.

Lydtrykksnivået i et rom gis av det enkle sambandet (når vi har en punktkilde)

$$L_p = L_W + 10 \cdot \log(1 / (4 \cdot \pi \cdot r^2) + 4/A).$$

Vi beregner dette numerisk:

$$\text{termen } 10 \cdot \log(1 / (4 \cdot \pi \cdot r^2) + 4/A) \text{ er}$$

$$10 \cdot \log(1 / (4 \cdot \pi \cdot r^2) + 4/A) \approx 10 \cdot \log(1 / (4 \cdot \pi \cdot 3^2) + 4/102.4) \approx -13.2 \text{ dB}$$

Da er altså  $L_p = L_W - 13.2 \text{ dB}$ , dvs  $L_W = L_p + 13.2 \text{ dB}$

Hvis  $L_p$  er 75 dB så er altså  $L_W = 75 + 13.2 \text{ dB} = 88.2 \text{ dB}$ .

Definisjonen av lydeffektnivå er

$$L_W = 10 \cdot \log(W/W_{\text{ref}}) \text{ hvor } W_{\text{ref}} = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W, dvs}$$

$$W = W_{\text{ref}} \cdot 10^{L_W/10}$$

Numerisk innsetting av vår verdi på  $L_W$  gir

$$W = 10^{-12} \cdot 10^{88.2/10} \approx 0.66 \text{ mW}.$$

### OPPGAVE 3. (Høytaler, 40%)

Du har nettopp bygd ferdig en ny høytaler, og ønsker å måle frekvensresponsen til den. Dessverre har du ikke tilgang på et ekkofritt rom, men du har lært at det går an å måle responsen i fritt felt, ved å bruke den delen av impulsresponsen som kommer før første refleksjon. Du er kjent med at den laveste frekvensen som kan måles er avhengig av tidsforskjellen mellom direktelyden og første refleksjon, og ønsker derfor størst mulig tidsforskjell. Derfor har du bygget et stativ som holder høytaleren 3 meter over bakken.

Du velger en åpen parkeringsplass på en rolig dag for å gjøre målingene. Mikrofonen er plassert i samme høyde, men 1.5 meter i fra høyttaleren.

- a. Hvilken er den laveste frekvensen du kan måle korrekt i frekvensresponsen? Anta at det er kun bakken som kan reflektere lyden.

Oppgitt formel er at den laveste frekvensen som kan måles nøyaktig er

$f_{\text{laveste}} = 1/T$  hvor  $T$  = tidsforskjellen mellom direktelyden og første refleksjonen.

Avstanden fra høyttaler til mikrofon er 1.5 m.

Avstanden fra høyttaler via bakken til mikrofonen er summen av to triangelhypotenusener:  $d = 2 \cdot \sqrt{0.75^2 + 3^2} = 6.18$  m. Da blir gangveisforskjellen  $6.18$  m -  $1.5$  m =  $4.68$  m, hvilket gir tidsforskjellen  $4.68$  m / ( $344$  m/s)  $\approx 13.6$  ms. Da blir  $f_{\text{laveste}}$

$$f_{\text{laveste}} \approx 1/0.0136 \approx 73 \text{ Hz.}$$

- b. Hvor høyt må du bygge stativet for å få en nøyaktig respons ned til 40 Hz? Avstanden mellom mikrofon og høyttaler er fortsatt 1.5 m.

For å få til en  $f_{\text{laveste}} = 40$  Hz så trenger vi en tidsforskjell  $T$  på  $1/40 = 0.025$  s = 25 ms. Da må gangveisforskjellen være  $344$  m/s \*  $0.025$  s =  $8.6$  m. Direktelyden har fortsatt gangveien  $1.5$  m, så gangveien via bakken må være  $8.6$  m +  $1.5$  m =  $10.1$  m. Gangveien via bakken er  $d = 2 \cdot \sqrt{0.75^2 + h^2}$  hvor  $h$  = høyden over bakken. Altså er  $h = \sqrt{(d/2)^2 - 0.75^2} \approx \sqrt{(10.1/2)^2 - 0.75^2} \approx 4.99$  m.

- c. Du måler 80 dB med mikrofonen din på 1.5 meters avstand. Hva er lydeffekten i Watt til høyttaleren? Anta at høyttaleren er en punktkilde.

Utendørs har vi kun direktelyd så da er (for en punktkilde)

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log(1/(4 \cdot \pi \cdot r^2)) \text{ dvs } L_w = L_p - 10 \cdot \log(1/(4 \cdot \pi \cdot r^2)).$$

Numerisk får vi  $L_w = 80 - 10 \cdot \log(1/(4 \cdot \pi \cdot 1.5^2)) \approx 94.5$  dB re 1 pW.

Som i oppgave 1(e) kan vi regne om dette til akustisk uteffekt  $W$ :

$$W = 10^{-12} \cdot 10^{94.5/10} \approx 2.8 \text{ mW.}$$

- d. I oppgave c ble høyttaleren matet med 0.5 W elektrisk effekt. Hva er virkningsgraden til høyttaleren?

Virkningsgraden er uteffekt/inneffekt, dvs

$$\text{virkningsgraden} = 0.0028\text{W}/0.5\text{W} = 0.0056 = 0.56\%.$$

Det er en rolig dag, men fortsatt litt bakgrunnsstøy. Du ønsker derfor å skru opp effekten på forsterkeren slik at du måler 100 dB på mikrofonen. Dette for å forsikre deg om at du får en støyfri måling.

- e. Hvor mye elektrisk effekt i Watt må høyttaleren mates med for å oppnå dette?

Vi ønsker å øke  $L_p$  med 20 dB. Da må vi øke  $L_w$  med 20 dB også, dvs  $L_w$  må økes fra 94.5 dB til 114.5 dB. Dette tilsvarer at akustiske uteffekten øker fra  $10^{-12} * 10^{94.5/10} \approx 2.8 \text{ mW}$  til  $10^{-12} * 10^{114.5/10} \approx 280 \text{ mW}$ .

Altså: en økning av lydnivå, eller lydeffektnivå, med 20 dB krever en økning av akustisk uteffekt 100 ganger. Da må elektriske inntak også økes 100 ganger, altså til 50W.

### OPPGITTE FORMLER

- Lydtrykksnivå  $L_p = 10 \log \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2}$  hvor  $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
- Lydeffektnivå  $L_w = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$  hvor  $W_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt}$
- $RT = 0.161 \cdot V/A$   
hvor  $V = \text{romvolum}$ ,  $A = \text{absorpsjonareal}$ .  
Totale absorpsjonsarealet  $A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i$ , hvor  $S_i$  er arealet for en del av veggoverflaten, og  $\alpha_i$  er absorpsjonsfaktoren for den samme del av veggoverflaten.
- $L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{DF_{kilde} \cdot DF_{mikrofon}}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$   
hvor  $r = \text{avstanden}$  og  $DF = \text{direktivitetsfaktoren}$ .
- Direktivitetsindeks  $DI = 10 \log(DF)$
- Frekvensresponsen for en høyttaler ved resonansfrekvensen  $f_0$ , med  $Q$ -verdi  $Q$ , er

$$L_p = 10 \log \left( \frac{(f/f_0)^2}{\left[1 - (f/f_0)^2\right]^2 + \frac{(f/f_0)^2}{Q^2}} \right)$$

- Resonansfrekvensen  $f_0$  gis av

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M \cdot C}}$$

- Laveste frekvens som kan måles med en trunkert impulsrespons er omtrent

$$f_{laveste} \approx \frac{1}{\Delta T}$$