

## RÄKNEÖVNINGAR

Ta med detta häfte till räkneövningstillfällena. Ta också med en fickräknare med log och trig. Lösningarna börjar på sidan 11.

### Elementär akustik

1. Beräkna skillnaden i ljudhastighet mellan tropikerna  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  och svensk höst  $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ange svaret i procent. (7,1%)
  2. Hur förhåller sig partikelhastigheten  $v$  till ljudhastigheten  $c$ ? Ställ upp formeln och förklara med ord.
  3. Ett typiskt värde på  $Z_0$  i luft är  $400\text{ Ns/m}^3$ . Hur stor är partikelhastigheten om ljudtrycket är  $1\text{ Pa}$  (effektivvärdet)? Jämför med ljudhastigheten. ( $2,5 \cdot 10^{-3}\text{ m/s}$ )
  4. Vågtalet är en frekvens i rummet snarare än i tiden, närmare bestämt "rumsvinkelfrekvens". En LP-skiva av vinyl har diametern  $30\text{ cm}$ . Över vilken frekvens börjar skivan få betydelse som akustisk reflektor? (vid  $360\text{ Hz}$ )
  5. Om ljudtrycket är  $3\text{ Pa}$ , vad är då ljudtrycksnivån? Antag den vanliga definitionen av referensnivån. ( $103,5\text{ dB}$ )
  6. Intensiteten  $J$  från en rundstrålande källa i fri rymd är  $10\text{ }\mu\text{W/m}^2$  på  $5\text{ meters}$  håll. Beräkna
    - a) ljudintensitetsnivån  $L_J$  ( $70\text{ dB}$ )
    - b) den av källan utstrålade effekten  $W$  (sid 3-6) ( $3,14\text{ W}$ )
  7. Hur stor effekt behövs i slutförstärkaren, om ljudnivån på  $25\text{ meters}$  håll ska vara  $85\text{ dB}$ ? Antag att högtalaren är rundstrålande, står nära marken, och dess verkningsgrad är  $1\%$ . ( $124\text{ W}$ )
  8. Publiken på en fotbollsmatch vrålar när det görs mål.  $4000$  personer hejar på hemmalaget, och  $1000$  personer hejar på bortalaget.
    - a) Hur många dB starkare blir vrålet för hemmalaget? ( $6\text{ dB}$ )
    - b) Låter detta som mer eller mindre än dubbelt så starkt?
  9. En oktav är en musikalisk beteckning på frekvensförhållandet  $2:1$ . Denna term är vanlig inom ljudtekniken. Över hur många oktaver sträcker sig det hörbara frekvensområdet  $20\text{ Hz} \dots 20\text{ kHz}$ ? Ange svaret med två decimaler. ( $9,97$  oktaver)
  10. Beräkna effektivvärdet för en signal med toppamplituden  $\pm 10\text{ Pa}$ , om vågformen är
    - a) en sinusvåg, ( $10/\sqrt{2}\text{ Pa}$ )
    - b) en symmetrisk fyrkantvåg ( $10\text{ Pa}$ ),
    - c) en symmetrisk triangelvåg ( $10/\sqrt{3}\text{ Pa}$ ).
-

## Hörsel

11. Vid vilken ljudnivå måste en ton på 50 Hz presenteras, om den ska låta lika stark som en ton på 1000 Hz som presenteras vid 30 dB ljudnivå? Vad blir tonernas hörnivå i fon? (57 dB ljudnivå, 30 phon hörnivå)
12. Orkestermusik har mest energi i området omkring 500 Hz. Om man repeterar tre timmar per dag, vilken skulle vara den högsta ihållande ljudnivå som ger en tillåten bullerdos enligt arbetarskyddsnormen? (ca 94 dB)
13. Man har en störton på 200 Hz med en ljudnivå om 90 dB. Hur stark måste då en mätton vid 500 Hz vara för att inte maskeras? (40 dB)

---

### 14. Exempel på tentamensuppgift.

För en experimentell radioteater ska du framställa en binaural inspelning (endast för återgivning i hörlurar) som ger illusionen av att en talare står 45 grader till höger om lyssnaren. Råmaterialet är en ljudfil med en högklassig monoinspelning av talaren, gjord i studio utan rumsklang. Verktöget är ett ordinärt flerkanaligt ljudredigeringsprogram med mixning och några enkla filter.

- a) Huvudets ljudskugga har i verkligheten en lågpas-karakteristik som är litet mer komplicerad än ett första ordningens lågpasfilter, men det är den enda filtertyp som finns i ditt ljudredigeringsprogram. Ungefär vilken brytfrekvens bör väljas på detta filter? Motivera. (3 p) (540 Hz)
- b) Beskriv steg för steg hur du manipulerar signalen för att åstadkomma ett så illusoriskt resultat som möjligt. Endast direktljudet behöver simuleras. (5 p)
- c) Regissören vill nu ge intryck av att lyssnaren och talaren står utomhus på hård plan mark, på 4 meters avstånd från varandra, utan andra väggar eller föremål i närheten. Antag att huvudena är 1,5 m över marken. Beskriv steg för steg hur du simulerar markreflexen. Tips: Rita strålgången. (4 p)
- d) Tror du att det spelar någon roll om man lägger till markreflexen innan eller efter man gör om monoinspelningen till stereo; och hur skulle du göra? Motivera. (3 p)

---

## Rumsakustik

15. Beräkna efterklangstiderna vid 125, 500 och 2000 Hz i ett rektangulärt rum med tegelväggar och med betong i tak och golv. Rummets dimensioner är  $l_x = 3,0$   $l_y = 4,7$   $l_z = 2,5$  [m].  
(5.36 sec, 3.28 sec, 2.27 sec)
16. En tom sal med måtten  $8 \times 7 \times 3$  meter har en efterklangstid på 1,6 sekunder vid 500 Hz.
  - a) Vad blir efterklangstiden om man monterar upp tunga draperier med en area på  $10 \text{ m}^2$  som hänger fritt i rummet, så att båda sidorna exponeras? (1,0 sec)
  - b) Vad blir efterklangstiden om dessutom 40 vuxna studenter sitter som publik i salen? (0,7 sec)
  - c) Vad är efterklangsradien i den tomma salen? (0,58 m)
  - d) Vad är efterklangsradien i salen med både draperier och studenter? (0,88 m)
  - e) Hur långt från en talare kan man anse ha goda lyssningsförhållanden i fallet med både draperier och elever? (3,1 m)

- f) Skvalmusik spelas upp i en högtalare i den tomma salen och ger då en genomsnittlig ljudintensitetsnivå på 78 dB i det diffusa fältet. Hur mycket akustisk effekt strålas då ut av högtalaren? (0,27 mW)
- g) Vad blir diffusa ljudintensitetsnivån från högtalaren i föregående uppgift när draperierna är monterade? (76 dB)
17. En rektangulär hytt ska användas för akustisk inspelning av en elbas (med egen förstärkare+högtalare) på en musikstudio. Hytten har invändigt måtten  $3 \times 4,3 \times 2,3$  m.
- a) Beräkna frekvenserna för de tre lägsta rumsresonanserna i hytten. Antag  $c = 340$  m/s. (40 Hz, 57 Hz, 69 Hz)
- b) Var i rummet finns trycknoder där man kan placera högtalaren för att i möjligaste mån undvika att excitera dessa resonanser? Rita.
18. Akustikerlärlingen Johan har genom en mätning kommit fram till följande rumsakustiska storheter i ett vardagsrum, vars volym är  $50 \text{ m}^3$ . Ett av resultaten är fel med mer än 10%.
- $T = 0,82$  s (efterklangstiden)
- $\mathcal{A} = 11,43 \text{ m}^2$  (ekvivalenta absorptionsarean)
- $r_r = 0,47$  m (efterklangsradien)
- $f_s = 225$  Hz (Schröders gränshfrekvens)
- (a) Vilket mått är fel, och vilket värde borde det ha? ( $T=0,7$  sec)
- (b) Johan har tillgång till en effektkalibrerad ljudkälla med sinus och brus, en ljudnivåmätare, en kurvskrivare till nivåmätaren, och en startpistol med knallskott. På vilka sätt kan han ha använt dessa för sin mätning?

## Placering av mikrofoner och högtalare

### 19. Kamfiltereffekt och mikrofonplacering

Om en stark reflex t.ex. via golvet når mikrofonen strax efter direktljudet, kan interferensen mellan direktljud och reflex bli hörbar. För vissa frekvenser blir nivån 6 dB högre, för andra kan ljudet släckas ut nästan helt.

- (a) Givet ett hårt golv, en höjd  $b$  över golvet för både källa och mikrofon, samt ett avstånd  $l$  mellan källa och mikrofon, ställ upp det uttryck som behövs för att beräkna de "tysta" respektive de mest förstärkta frekvenserna. Rita strålgången så blir det lättare. ( $f_n = k_n \cdot c / (2 [(l_D/2)^2 + b^2]^{1/2} - l_D)$ ,  $k_n = n$  förstärkning,  $k_n = n + 1/2$  utsläckning, och  $n = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ )
- (b) Rita upp en skiss av frekvensgången (nivå som funktion av frekvens), med maxima och minima på rätt ställen, om  $l = 4$  m och  $b = 1,5$  m. (+5,1 dB, -14,0 dB)
- (c) Med bara *en* reflekterande yta så kan man aldrig få total utsläckning, eftersom reflexen har gått en längre väg, och därför är något svagare än direktljudet. Men kan man få total utsläckning om man har *flera* reflexer?

## Flera ljudkällor

*Bakgrund:* (jfr också avsnitt 2.3.2 samt 12.2.11 i kompendiet) Betrakta fallet med en högtalare nära ett oändligt plant golv, dvs i s.k. fri halvrymd. Vi får då endast **en** spegelkälla. Spegelkällans bidrag till den totala ljudnivån beror av i vilken mån direktljudet och det reflekterade ljudet är **korrelerade** med varandra.

Eftersom det reflekterade ljudet är detsamma som en fördröjd version av direktljudet, blir frågan därför hur mycket **signalen liknar sig själv** som den var innan fördröjningen. Man brukar använda en korrelationskoefficient, som kan variera från +1 (positivt korrelerad, i fas) till 0 (okorrelerad) till -1 (negativt korrelerad, i motfas). För musik och tal, som hela tiden varierar, kan vi oftast anta att korrelationen är nära 0, om bara fördröjningen motsvarar flera våglängder. Detsamma gäller dock inte för periodiska testtoner.

Om källan och spegelkällan är mycket nära varandra (i förhållande till våglängden!), blir reflexens fördröjning mycket liten, och korrelationen blir nära +1.

För *helt okorrelerade* signaler ska *effekterna* adderas, medan för *helt korrelerade* signaler ska *trycken* adderas. *Delvis* korrelerade signaler måste behandlas mer ingående, men det gör vi inte i denna kurs.

### 20. Nivå från flera ljudkällor

(a) Om ljudnivån med en viss ljudkälla väljs till referens, 0 dB, hur hög blir då ljudnivån om flera likadana men okorrelerade ljudkällor tillkommer? Beräkna för fallen med 2, 3, 4, 5, 8 och 10 ljudkällor. (3,01; 4,77; 6,02; 6,99; 9,03; 10,00 dB)

(b) Om ljudnivån med en viss ljudkälla väljs till referens, 0 dB, hur hög blir då ljudnivån om flera likadana och helt korrelerade ljudkällor tillkommer? Beräkna för fallen med 2, 3, 4, 5, 8 och 10 ljudkällor. (6,02; 9,54; 12,04; 13,98; 18,06; 20,00 dB)

### 21. Inverkan av högtalares placering i rum

(a) Förklara varför man får störst nivåökning i basområdet, när en högtalare ställs intill väggen, riktad mot rummets mitt (två orsaker).

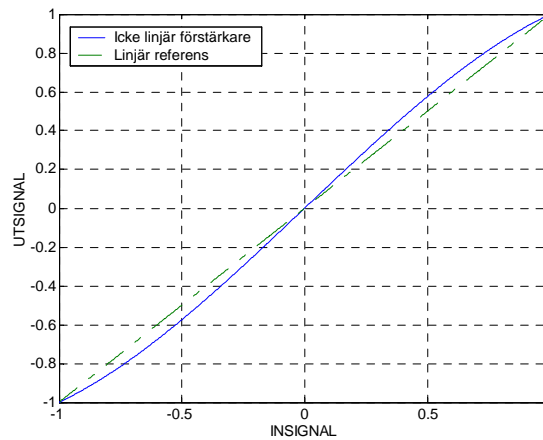
(b) Beräkna ljudnivåökningen när en rundstrålande högtalare ställs mycket nära en, två och tre väggar som är vinkelräta mot varandra. (+6, +12, +18 dB)

Om vi har mer än tre väggar (sex väggar är vanligast) så blir det väldigt många spegelkällor. De flesta är dock så långt isär att korrelationen mellan dem blir liten för vanliga signaler. Men i små rum eller för låga frekvenser eller för stationära signaler har spegelkällorna alltid betydelse.

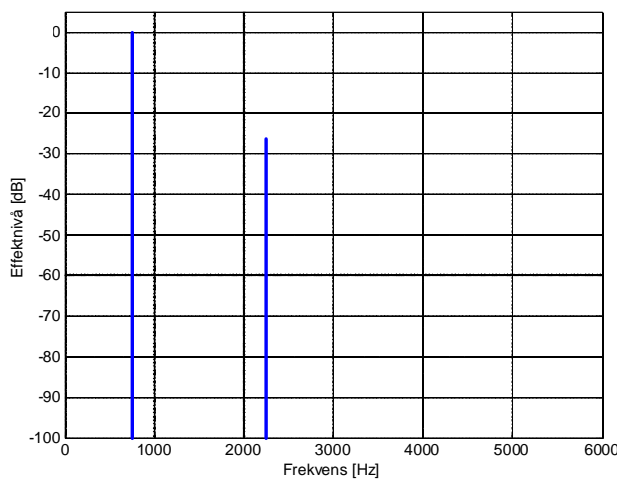
# Signalers representation och distorsion

## 22. Distorsion

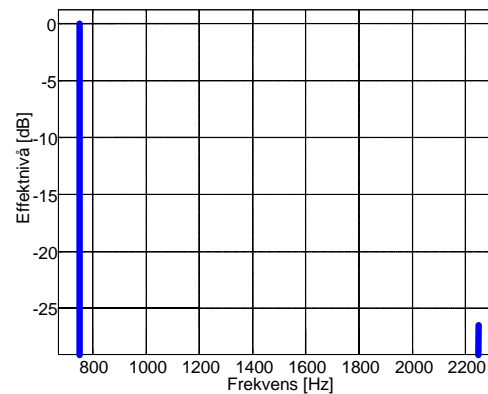
En sinuston går igenom ett litet förstärkarsteg för ljud. Förstärkaren är dock inte helt linjär. Figuren till höger visar förstärkarens beteende: Utsignal som funktion av insignal. Vore förstärkaren linjär så skulle insignalen vara direkt proportionell mot utsignalen.



När insignalen utnyttjar hela området från  $-1$  till  $1$  fås följande effektspektrum för utsignalen (dvs. effekten som funktion av frekvensen). (Figur nedan)



FÖRSTORING:



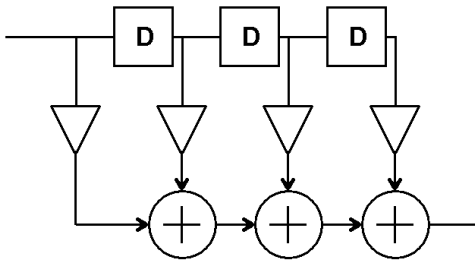
- Vilken är insignalens frekvens? (750 Hz)
- Vilken typ av distorsion rör det sig om? Motivera. (Tredjetonsdistortion)
- Distorsionen  $d$  hos en distorderad sinuston (en summa av sinustoner  $1 \dots n$ ) kan beräknas med formeln

$$d = U_d / U_{tot} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} / \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$$

där  $U_n$  är amplituden för delton nummer  $n$ . Distorsion anges av konvention som ett förhållande mellan spänningar. Beräkna distorsionshalten i förstärkarens utsignal. Ange svaret i procent. (5%)

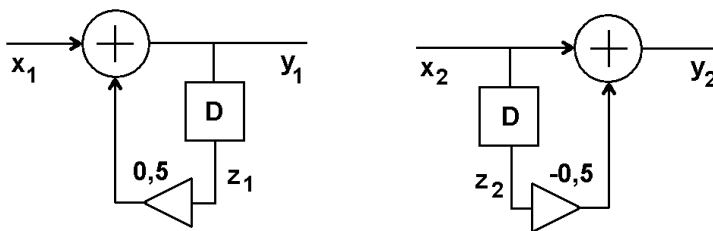
- Beskriv hur nivåerna för de två topparna i effektspektrum ändras om vi minskar insignalens amplitud till en tiondel. Någon beräkning behövs ej, men motivera svaret.

23. I en ljudstudio har man gjort en inspelning med flera instrument på separata kanaler. Inspelningen sparas digitalt på hårddisk. D/A-omvandlarna arbetar med en samplingsfrekvens på 96 kHz samt en upplösning av 24 bitar. Inspelningen krävde 15 kanaler. Hur många byte/s går åt vid inspelningen? (4,32 Mbyte/sec)
24. Om vi vill säkerhetskopiera multikanalsinspelningen till en vanlig CD-skiva, hur lång inspelning får då ungefär plats i ovanstående fall på en vanlig CD-skiva. Antag att alla kanalerna används hela tiden, samt att en CD-skiva rymmer 650 Mbyte. (2,5077 min)
25. Vad är den teoretiska skillnaden i signal-störförhållande (SNR, i dB) mellan ett 16 bitars-system och ett 24 bitars-system? (48,2 dB)
26. En sinuston med frekvensen  $F$  skall samplas. Rita en tänkbar följd av sampelvärden om samplingsfrekvensen är (a)  $5F$  (b)  $2F$  (c)  $F$  (d)  $0,6F$  (e)  $0,5F$
- a) Rita så många perioder som behövs för att följderna ska repetera.  
b) Hur kommer den resulterande samplade vågformen att låta i respektive fall när den spelas upp?
27. Ett filter gör en medelvärdesbildning av 4 på varandra följande sampel.



Om filtret matas med en sinussignal med toppvärdet 1, hur stark blir då signalen ut från filtret om signalens frekvens är 0 Hz,  $f_s/8$ ,  $f_s/4$ ,  $3f_s/8$ , eller  $f_s/2$ . Skissa filtrets tonkurva.

28. a) Räkna ut impulssvaret för nedanstående två filter:

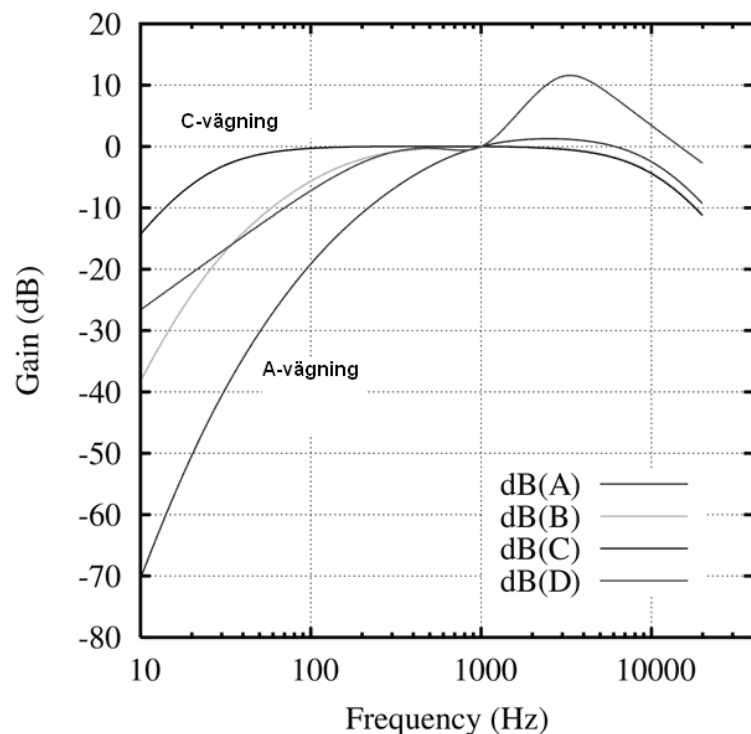


- b) Om man kopplar de två filtren efter varandra, vad blir det då för impulssvar? Spelar ordningen någon roll?

## Ljudnivåmätning

### 29. A-vägning

Ett medelspektrum av ljudet i en fabrikslokal hade två tydliga toppar: en vid 20 Hz och 88 dB, och en annan vid 1200 Hz och 72 dB. Ungefär hur mycket visar en nivåmätare om den är inställd på A-vägning resp. C-vägning? (72 dB med A-vägning, 83 dB med C-vägning)



### 30. Ekvivalentnivån (Tentamensuppgift från 2007 - hela extentor finns på kursens hemsida)

*Bakgrund:* Risken för hörselskador anses vara proportionell mot den totala *energi* som örat utsätts för, alltså *effekt*  $\times$  *tid* (eller, om effekten varierar, integralen av effekten över tiden). Om bullernivån varierar under en mätning så förenklar man därför till ett enda mätetal genom att ange den s.k. *ekvivalentnivån*,  $L_{eq}$ . Den beräknas genom att ta *medelvärdet av intensiteten* över det givna tidsintervallet, och sedan uttrycka den erhållna medelintensiteten som en nivå i decibel. Ekvivalentnivån blir på så vis den konstanta nivå som skulle ha resulterat i samma totala energi som den varierande nivån. Märk att  $L_{eq}$  alltså *inte* är tidsmedelvärdet av intensitetsnivån, som ger ett annat resultat.

Ekvivalentnivå	Medelnivå
$L_{eq} = 10 \cdot \log \left( \frac{\frac{1}{T} \int_0^T J(t) dt}{J_{ref}} \right)$	$\bar{L}_J = \frac{1}{T} \int_0^T L_J(t) dt$

*Uppgift:* Inspektören från hälsovårdsnämnden har ålagt en discoägare att minska ekvivalentnivån på dansgolvet från 110 till 99 dB. Discoägaren tänker då (felaktigt) att detta är en minskning med 10%, och han lägger därför in 2 minuters tyst drinkpaus, var tjugonde minut—utan att ändra volymen på ljudet under de 18-minuters perioder som musiken pågår.

- a) Beräkna med hur många decibel  $L_{eq}$  minskar, om man gör som discoägaren. Discomusikens nivå kan antas vara konstant. (3 p) (0,5 dB lägre)
- b) Beräkna hur mycket paus (i procent av hela tiden) som man egentligen måste lägga in för att  $L_{eq}$  verkligen ska minska till 99 dB, om ljudanläggningen fortfarande spelar med 110 dB när den spelar. (3 p) (92% av tiden)
- c) Enligt skyddsnormerna, hur länge får man dagligen vistas på dansgolvet om ljudnivån vid 500 Hz är 110 dB? (2 p) (högst 5 minuter)
- d) Om man trots allt skulle räkna ut tidsmedelvärdet av intensitetsnivån ("medelnivån" i tabellen ovan), skulle detta ge ett högre eller lägre värde än ekvivalentnivån? Motivera, eventuellt med ett exempel. (2 p) (med. nivå = 95 dB, lägre än ekv. nivå = 97,4 dB)

*Ledning:* Ingen integralkalkyl behövs för att lösa uppgiften. Utnyttja att decibel uttrycker förhållanden.

---

31. Vilket ger högst ekvivalentnivå? Beräkna.

- (1) En larmklocka som på det givna avståndet ger intensitetsnivån 96 dB, om den ljuder tolv sekunder var tjugonde minut,
- (2) Ett ihållande bakgrundsbuller med 74 dB i korttidsmedelvärde. (larmklockan ger högstequivivalentnivå)

## Fler sammansatta problem

Dessa problem är representativa för tentamensuppgifterna, de brukar ge ca 10 p på tentan.

---

Uppgift 32. **På hög nivå.**

- (a) Osannolikt svaga ljud: beräkna den ljudtrycksnivå som råder när ljudtrycket är  $2 \cdot 10^{-6}$  Pa. (-20 dB)
- (b) Osannolikt starka ljud: Tryckförändringar i det statiska atmosfärstrycket, normalt ca 1010 hPa, orsakas av hög- och lågtryck i vädret, mellan extremerna 970 och 1050 hPa. Om man ser dessa tryckförändringar som ett extremt lågfrekvent ljud, vad är då dess ljudtrycksnivå? Antag en sinusformad variation. (163 dB)
- (c) Visa, med hänvisning till relevanta relationer ur kompendiet, att de tunna diagonala strecken för den av källan avgivna effekten har rätt läge, rätt lutning och rätt inbördes avstånd (fig 2-3 i boken).

Uppgift 33. **Mysteriet med den vandrande talaren.**

- (a) När hörseln lokaliserar en ljudkälla sker det på flera sätt. Dels bestäms ljudets infallsriktning mot lyssnaren (A), dels avgör hörseln om det uppfattade ljudet är ett direktljud eller en reflex (B). Har precedenseffekten att göra med (A) eller (B)? Motivera.
  - (b) Vilken av *del*figurerna på sidan 3-14 i kompendiet är mest relevant för att beskriva inverkan av en panoreringsratt på en mixer? Motivera.
  - (c) För en radioteaterproduktion ska du skapa en illusion av att en talare börjar tala helt nära lyssnaren, och sedan gradvis förflyttar sig allt längre bort i en stor tom hangar. Talarens röst finns studio-inspelad i mono med konstant nivå och utan efterklang. Diskutera i detalj vilka ljudmanipulationer som skulle kunna bidra till illusionen.
-



---

**Uppgift 34. Ljud eller oljud på dagis.**

- Kvinnliga förskollärare är påtagligt överrepresenterade bland dem som söker hjälp vid landets talvårdskliniker för röstproblem. Röstforskare har funnit att förskollärare talar eller ropar under upp till 25% av tiden under en arbetsdag från 08.00 till 16.00. Till forskningsresultaten hör också att det genomsnittliga taltonläget (grundtonsfrekvensen) under denna tid är 25% högre än i normal samtalston. *Beräkna ungefär hur många gånger under hela arbetsdagen stämbanden slår ihop hos en kvinnlig förskollärare, under de givna betingelserna.* ( $1,8 \times 10^6$ )
- Ljudnivån på ett visst dagis varierar med aktiviteten (lek, rast, lunch), men är i genomsnitt 78 dB, med den huvudsakliga energin vid frekvenser runt 500 Hz. *Kan denna miljö utgöra en fara för de vuxnas hörsel, enligt bullernormen för arbetarskydd? (sv: nej)*
- Allrummet på ett dagis i ett äldre stenhus befinner sig för hög ljudnivå. Personalen menar att barngruppen har blivit för stor, med 20% fler barn än det var tänkt från början. Akustikkonsulten menar istället att det är rummets inredning som är fel på. Genom att byta till bättre akustik-plattor i taket kan man sänka ljudnivån med 3 dB, hävdar hon. *Skulle nya plattor innebära en större förbättring än att återställa barngruppens storlek? Motivera, under antagandet att barnens röstlägen **inte** påverkas av åtgärderna (egentligen påverkas de, men det blir så krångligt då).* (0,8 dB)

---

**Uppgift 35. Rumsakustik.**

Vid planeringen av en konferens för 240 deltagare befärrar man att den kala gamla aulan som ska användas för en av sessionerna kanske har för lång efterklangstid. Salens volym är knepig att uppskatta direkt på grund av dess oregelbundna form. Dock lyckas man konstatera att dess efterklangstid sjunker från 2,7 (tom aula) till 2,3 sekunder när 40 personer finns i salen.

- Beräkna salens volym ( $1164 \text{ m}^3$ )
  - Hur kort blir efterklangstiden när alla 240 anländer? (1,32 sec)
  - När väldigt många kommer in, minskar ju faktiskt salens akustiska volym också något. Gör ett rimligt antagande om människokroppars volym och beräkna huruvida denna effekt kan vara något att bry sig om i detta fall. ( $19,2 \text{ m}^3$ )
  - Om man i den fullsatta salen vill spela ljudexempel med 75 dB ljudnivå på åhörarplass, hur många akustiska watt måste den rundstrålande högtalaren på podiet då kunna avge? (1,1 mW)
-

## Uppgift 36. Rumsakustik

Rita av diagrammet nedan och rita sedan in enkla, raka pilar som visar i vilken riktning följande storheter *ökar*, dvs någon av  $\rightarrow \nearrow \uparrow \nwarrow \leftarrow \swarrow \downarrow \searrow$ . Skriv också en *kort* motivering för varje svar, med gjorda antaganden om så behövs (t ex att större rumsvolym  $V$  också medför en större total väggyta  $S$ .)

Efterklangstiden EKT

- Efterklangsradien EKR
- Genomsnittliga tiden  $T_{\text{ref}}$  till första ordningens reflexer (dvs ljud som har studsats precis en gång)
- Ekvivalenta absorptionsytan  $A$
- Den diffusa intensiteten  $J_{\text{diff}}$
- Schroeders gränshfrekvens  $f_s$

