

# 14. Akustiikkaa

## Tehtävä 14.1.

Väitteistä oikein: a), e)

Väitteistä väärin: b), c), d)

Korjaukset vääriin väittämiin:

- b) Ääniaalto voi taittua kahden aineen rajapinnassa. Äänen taipumisessa eli diffraktiossa äänen kulkusuunta muuttuu, kun ääniaalto kohtaa esteen.
- c) Äänen intensiteettitaso konsertissa ei yleensä saa ylittää 70 dB:n rajaa lähimpien asuinrakennusten luona. Konserttilavan edessä äänen intensiteettitaso on usein huomattavasti tätä korkeampi.
- d) Konserttisalissa jälkikaiunta-ajan tavoitearvo on noin 1,5 s – 2,0 s.

## **Tehtävä 14.2.**

Akustiikka on fysiikan osa-alue, jossa tutkitaan ääntä. Akustiikan tutkimuskohteita ovat esimerkiksi äänentoisto, meluntorjunta, signaalinkäsittely ja äänen käyttäytyminen eri tiloissa.

## **Tehtävä 14.3.**

- a) Kylpyhuoneen pinnat ovat yleensä kovia ja tasaisia. Tämän vuoksi suuri osa äänestä heijastuu pinnoista ja äänet kylpyhuoneessa kaikuvat paljon.
  
- b) Tyhjässä asunnossa äänet kaikuvat paljon, sillä pinnat ovat pääosin tasaisia, yhtenäisiä ja kovia. Kalusteet ja esimerkiksi verhot absorboivat ääntä, jolloin kaiun määrä on vähäisempää kuin tyhjässä asunnossa.

## Tehtävä 14.4.

- a) Jälkikaiunta-aika on aika, jonka kuluessa kaikuneen äänen intensiteettitaso laskee 60 dB alkuperäisestä äänestä.
- b) Luokkahuoneessa akustiikka suunnitellaan puheäänien näkökulmasta, konserttisalissa musiikin näkökulmasta. Musiikin taajuusalue on laajempi kuin puheen. Kaikkien musiikin taajuuksien tarkoituksenmukainen kaikuminen ja seisovien aaltojen muodostumisen hallitseminen on tärkeää. Luokkahuoneessa akustiikka on yleensä hyvä, jos kaikua on vain vähän. Tällöin puheesta saa parhaiten selvää. Konserttisalissa tavoitellaan äänen hallittua kaikumista.

## Tehtävä 14.5.

- a) Kaikuluotaus perustuu äänen etenemiseen eri nopeudella eri aineissa. Lisäksi ääni etenee aina vakionopeudella väliaineessa. Ääni heijastuu rajapinnoissa, jolloin tasaisen liikkeen matkan yhtälön avulla voidaan määrittää rajapintojen etäisyys, kun pulssin edestakainen aika väliaineessa tiedetään.
- b) Ultraäänen käyttö kuvantamisessa ei ole vaarallista. Sillä saadaan monesta tutkimuskohteesta riittävän tarkkoja kuvia. Ultraäänen käyttö kuvantamisessa on edullista sekä laitteiden valmistus moniin muihin lääketieteen kuvantamislaitteisiin verrattuna on edullista. Ultraäänen käyttö monissa kuvantamiskohteissa ei tarvitse erityislupia, kuten esimerkiksi ionisoivan säteilyn käyttö vaatii aina käytöstä vastaavan henkilön sekä luvan STUK:lta.

## Tehtävä 14.6.

- a) Seinät heijastavat ja absorboivat ääniaaltoja. Kun seinät rakennetaan vinoiksi, ei ääni heijastu takaisin tulosuuntaansa. Tällöin konserttisaliin ei pääse syntymään seisovia aaltoja, jotka haittaisivat salin akustiikkaa.
- b) Konserttisalin seinän huokoiset materiaalit vaimentavat ääniaalloa. Hyvin ääntä vaimentavat seinämateriaalit lyhentävät jälkikaiunta-aikaa.

## Tehtävä 14.7.

- a) Sinfoniaorkesterin soittimien taajuusalue voi olla 40 Hz – 5 000 Hz.
- b) Sinfoniaorkesterin hentoääniset jousi- ja puhallinsoittimet sijoittuvat orkesteria johtavan kapellimestarin lähelle. Vaskipuhaltimet ja lyömäsoitinten tuottamien äänten intensiteetit ovat suurimpia, joten nämä soittimet on sijoitettu sinfoniaorkesterissa kapellimestarista katsoen sivuille ja taakse.

## Tehtävä 14.8.

huoneen seinien välimatka  $L = 5,1 \text{ m}$   
äänen nopeus ilmassa  $v = 343 \text{ m/s}$

Perustaajuudella syntyy pisin mahdollinen seisova aalto.  
Perustaajuudella seisovan aallon solmukohdat ovat seinien kohdalla, ja niiden välissä on yksi kupu.



Aallonpituudelle on tällöin voimassa  $L = \frac{\lambda}{2}$ .

Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan saadaan syntyneen seisovan aallon taajuudeksi

$$v = f\lambda = f2L$$

$$f = \frac{v}{2L} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \cdot 5,1 \text{ m}} = 33,62 \text{ Hz} \approx 34 \text{ Hz}.$$

b) Ihmisen puheäänien taajuus on pienimmillään noin 80 Hz, joten syntynyt ääni ei ole ihmisen puheäänien taajuusalueella.

## Tehtävä 14.9.

kaiutinkotelon syvyys  $L_1 = 0,186 \text{ m}$

kaiutinkotelon korkeus  $L_2 = 0,213 \text{ m}$

äänen nopeus ilmassa  $v = 343 \text{ m/s}$

- a) Kun äänen taajuus vastaa kotelon perustaajuutta, kaiutinkoteloon syntyy seisova aalto, jossa on yksi kupu. Syntyneen seisovan aallon aallonpituudelle on voimassa syvyyssuunnassa

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{2}$$

ja korkeussuunnassa

$$L_2 = \frac{\lambda_2}{2}.$$

Syntyneiden seisovien aaltojen aallonpituudet ovat

$$\lambda_1 = 2L_1$$

$$\lambda_2 = 2L_2.$$

Aaltoliikkeen perusyhtälön  $v = f\lambda$  mukaan syntyneiden seisovien aaltojen taajuudet ovat

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L_1} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,186 \text{ m}} = 922,04 \text{ Hz} \approx 922 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{2L_2} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,213 \text{ m}} = 805,16 \text{ Hz} \approx 805 \text{ Hz}.$$



b) Kaiuttimen sisälle syntyy seisova aalto, jonka keskellä on kupu ja päissä on solmut. Kuvun kohdalla ilmamolekyylien liike on suurinta. Kun koko kaiuttimen kotelon täyttää ääntä absorboivalla materiaalilla, materiaali vaimentaa kaiutinkotelon sisälle syntyneitä seisovaa aaltoliikettä. Kaiutinkotelon reunoille syntyy seisovan aaltoliikkeen solmukohdat, joissa molekyylien liike on vähäistä. Jos vain reunoille laitettaisiin materiaalia, kaiutinkotelon sisälle syntyneet seisovat aallot eivät vaimenisi. Lisäksi kaiuttimen sisälle syntyy seisovan aaltoliikkeen ylätaajuuksia. Kun koko kotelo on täytetty ääntä absorboivalla materiaalilla, materiaali vaimentaa myös ylätaajuuksia.

## Tehtävä 14.10.

Veden syvyys mittaushetkellä kaikuluotaimen mukaan on  $s = 10,7 \text{ m}$ .

Ultraääni kulki vedessä tasaisella nopeudella, jonka lämpötila oli  $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , joten taulukkokirjan perusteella lähinnä tätä lämpötilaa oleva ultraäänen nopeus vedessä on  $v = 1\,484 \text{ m/s}$ .

Ultraääni kulkee vedessä veneestä aineiden rajapintaan ja takaisin, jolloin ultraäänen kulkema kokonaismatka on  $s_{\text{kok}} = 2s$ . Lasketaan kulunut aika.

$$s_{\text{kok}} = vt$$

$$t = \frac{s_{\text{kok}}}{v} = \frac{2s}{v} = \frac{2 \cdot 10,7 \text{ m}}{1\,484 \text{ m/s}} = 0,014\,32 \text{ s} \approx 14 \text{ ms.}$$

## Tehtävä 14.11.

Melu on häiritsevää tai kuulolle haitallista ääntä. Kotiin melua voi tulla ulkoa, kuten liikenteestä, tai kodin sisältä esimerkiksi kodinkoneiden, ilmanvaihtokoneiden ja vesiputkien aiheuttamasta kohinasta ja rakenteiden kautta asuntoon kantautuvista äänistä. Myös äänien kaikuminen seinäpinnoista aiheuttaa melua.

Melua voidaan pienentää vähentämällä melunlähteiden tuottamien äänten intensiteettejä. Esimerkiksi liikenteen melua voidaan pienentää käyttämällä niin kutsuttuja hiljaisia tienpinnoitteita, alentamalla nopeusrajoituksia tai vaikkapa parantamalla rautatiekiskojen kiinnitys- ja liitoskohtia.

Melua voidaan vaimentaa eri tavoin. Ulkopuolelta kotiin tulevaa melua voidaan vaimentaa esimerkiksi siten, että suunnitteluvaiheessa rakennuksen ikkunoita ja ovia ei sijoiteta melunlähteiden suuntaan. Melua voidaan vaimentaa myös ääntä eristävillä ikkunoilla ja ovilla sekä käyttämällä seinärakenteessa ääntä vaimentavia eristemateriaaleja. Myös ovien ja ikkunoiden tiivisteiden parantaminen saattaa vähentää kotiin tulevan melun voimakkuutta.

Kovat pinnat heijastavat enemmän ääntä, joten pehmeiden materiaalin käyttö sisustuksessa pienentää kaiusta aiheutuvaa melua. Siksi esimerkiksi seinäpinnoissa

voidaan käyttää pehmeitä materiaaleja tai esimerkiksi puupanelointia, josta ääni heijastuu eri suuntiin. Myös sisustuksella, kuten matoilla, verhoilla tai seinävaatteilla sekä huonekaluilla, voidaan vaikuttaa merkittävästi meluun. Ilmastointikanavien melua voidaan pienentää käyttämällä ilmanvaihtokoneessa tarkoitukseen suunniteltuja äänenvaimentimia. Kodinkoneiden energiamerkintöjen avulla voi valita kodinkoneita, jotka tuottavat mahdollisimman vähän melua.

## Tehtävä 14.12.

melun intensiteettitaso yöraja asuinalueella  $L_2 = 70$  dB  
äänen intensiteettitaso miksauspöydän kohdalla  $L_1 = 95$  dB  
miksauspöydän etäisyys konserttilavasta  $r_1 = 65$  m

a) Äänen intensiteetti miksauspöydän kohdalla saadaan äänen intensiteettitaso avulla

$$L_1 = 10 \lg \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \text{ dB} \quad \| : 10 \text{ dB}$$

$$\frac{L_1}{10 \text{ dB}} = \lg \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \quad \| 10^{(\ )}$$

$$10^{\lg \left( \frac{I_1}{I_0} \right)} = 10^{\frac{L_1}{10 \text{ dB}}}$$

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{\frac{L_1}{10 \text{ dB}}} \quad \| \cdot I_0$$

$$I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10 \text{ dB}}}$$

$$= 1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^{\frac{95 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}} = 1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^{9,5} = 1 \cdot 10^{-2,5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$= 3,162 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 3,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$$

b) Äänen intensiteettitason avulla voidaan määrittää, kuinka suuri voi äänen intensiteetti olla asuinalueella. Melun intensiteetti asuinalueella voi olla

$$L_2 = 10 \lg \left( \frac{I_2}{I_0} \right) \text{ dB} \quad \parallel : 10 \text{ dB}$$

$$\frac{L_2}{10 \text{ dB}} = \lg \left( \frac{I_2}{I_0} \right) \quad \parallel 10^{(\cdot)}$$

$$10^{\lg \left( \frac{I_2}{I_0} \right)} = 10^{\frac{L_2}{10 \text{ dB}}}$$

$$\frac{I_2}{I_0} = 10^{\frac{L_2}{10 \text{ dB}}} \quad \parallel \cdot I_0$$

$$I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10 \text{ dB}}}$$

$$= 1,0 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^{\frac{70 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}} = 1,0 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^{7,0} = 1,0 \cdot 10^{-5,0} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$$

Äänilähteen tuottaman äänen intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön  $I \sim \frac{1}{r^2}$ .

Intensiteettien suhteeksi saadaan  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$ .

Asuinalueen tulee olla konserttilavasta etäisyydellä

$$r_2^2 = \frac{I_1}{I_2} r_1^2$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{I_1}{I_2} r_1^2} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-2,5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,0 \cdot 10^{-5,0} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot (65 \text{ m})^2} = 1155,882 \text{ m} \approx 1200 \text{ m}.$$

c) Todellisuudessa ääni absorboituu väliaineeseen. Tämän vuoksi intensiteetti pienenee teoreettista mallia enemmän ja konsertti voidaan pitää myös laskettua tulosta lähempänä.

## Tehtävä 14.13.

- a) Lääketieteellisessä diagnostiikassa käytettävässä ultraäänitutkimuksessa ultraäänikuva muodostetaan kudosten rajapinnoilta heijastuneiden signaalien perusteella. Kun ultraääni osuu rajapintaan, osa ultraäänestä läpäisee rajapinnan ja osa heijastuu. Kun ultraäänisignaalin nopeus kudoksessa tunnetaan, ultraäänisignaalin ja kaiun välisestä aikaerosta saadaan selville, kuinka kaukana rajapinta sijaitsee. Ultraääntä käytetään hyvin yleisesti esimerkiksi sikiön tai pehmytkudoksen, kuten sydämen tai sappirakon tutkimisessa.
- b) Dopplerin ilmiössä aaltoliikkeen taajuus muuttuu, jos aaltolähde tai havaitsija liikkuu. Doppler-ultraäänilaitteella voidaan siten mitata esimerkiksi veren keskimääräinen nopeus verisuonessa. Kun ultraääni heijastuu liikkuvista punasoluista, ultraäänien taajuus muuttuu. Doppler-ultraäänilaitteella voidaan myös tutkia napanuoran sijaintia istukassa tai kuunnella sikiön sydämenlyöntejä.



c) kaikuluotaus esim. veneilyssä

- vaskulaarinen ultraääni, esim. veren virtauksen määrä ja veren nopeus
- neurosonografia, esim. aivojen visualisointi ja poikkeamat verenkierrassa
- ekokardiografia, esim. sydämen aortan ja keuhkovaltimon tutkiminen, neulan ohjaaminen paiseeseen ultraäänen avulla
- ultraäänitutka autoissa
- fysioterapia: polven eturistisiteen tutkiminen, lihaksen kudusrakenteen koon ja muodon tutkiminen
- ultraäänipesuri: pienten asioiden, kuten kellojen koneistojen osien puhdistaminen, tieteessä käytettävien pienten mitta-astioiden puhdistaminen. Perustuu ultraäänipesurin pesuveteen tapahtuvaa kavitaatioon. Ultraääni aiheuttaa pesuveteen kavitaatioilmakuplia, joiden nopea puhkeaminen synnyttää paineaaltoja. Paineaallot aiheuttavat lian värähtelyn ja lika irtoaa puhdistettavan esineen pinnasta.

## Tehtävä 14.14.

intensiteettitaso  $L_1 = 90$  dB

intensiteettitaso lopussa  $L_2 = 30$  dB.

a) Johdetaan yhtälö äänen intensiteetille.

$$L_x = 10 \lg \left( \frac{I_x}{I_0} \right) \text{ dB} \quad \parallel : 10 \text{ dB}$$

$$\frac{L_x}{10 \text{ dB}} = \lg \left( \frac{I_x}{I_0} \right) \quad \parallel 10^{(\cdot)}$$

$$10^{\lg \left( \frac{I_x}{I_0} \right)} = 10^{\frac{L_x}{10 \text{ dB}}}$$

$$\frac{I_x}{I_0} = 10^{\frac{L_x}{10 \text{ dB}}} \quad \parallel \cdot I_0$$

$$I_x = I_0 \cdot 10^{\frac{L_x}{10 \text{ dB}}}$$

b) Lasketaan äänen intensiteetti alussa

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10 \text{ dB}}} \\ &= 1,0 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^{\frac{90 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}} = 1,0 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 10^9 = 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \end{aligned}$$

c) Jälkikaiunta-ajan aikana äänen intensiteettitaso on laskenut 60 dB eli intensiteettitaso jälkikaiunta-ajan jälkeen on  $L_2 = 90 \text{ dB} - 60 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$ .

Lasketaan intensiteettien suhde

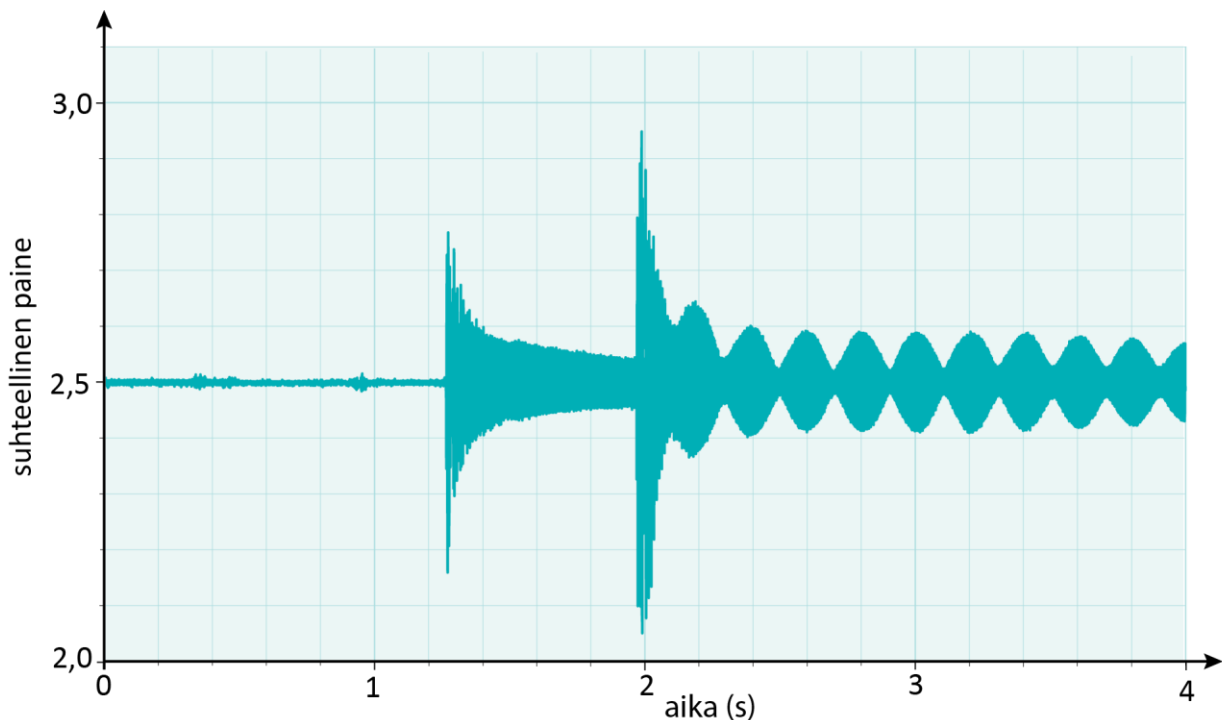
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10 \text{ dB}}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10 \text{ dB}}}} = \frac{10^{\frac{90 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}}}{10^{\frac{30 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}}} = 1\,000\,000.$$

Äänen intensiteetti on miljoonaertainen alussa verrattuna intensiteettiin lopussa.

## Tehtävä 14.15.

Ääni vaimenee ilmassa enemmän kuin juomalasissa, jolloin ääni kuuluu hieman selvempänä, kun korva on juomalasissa kiinni. Seinästä ääni siirtyy lasiin rakenneosasten mekaanisena värähtelynä.

## Tehtävä 14.16.



- a) Kitaran soinnissa havaitaan huojunta. Jos äänten taajuudet eivät ole täsmälleen samat, interferenssi voimistaa ja heikentää kuultavan äänen voimakkuutta jaksollisesti. Tällöin ääniaaltojen muodostaman summa-aallon amplitudi vuoroin suurenee ja pienenee. Tätä kutsutaan huojunnaksi.
- b) Kuvaajasta voidaan mitata, että viiteen jaksottaiseen äänen voimakkuuden vaihteluun kuluva aika on  $t = 1,1017$  s. Huojunnan taajuus on sama kuin soitettujen sävelten taajuusero. Taajuuseroksi saadaan  $f = 1/T = 5/t = 5/1,1017 \text{ s} \approx 4,5 \text{ Hz}$ .

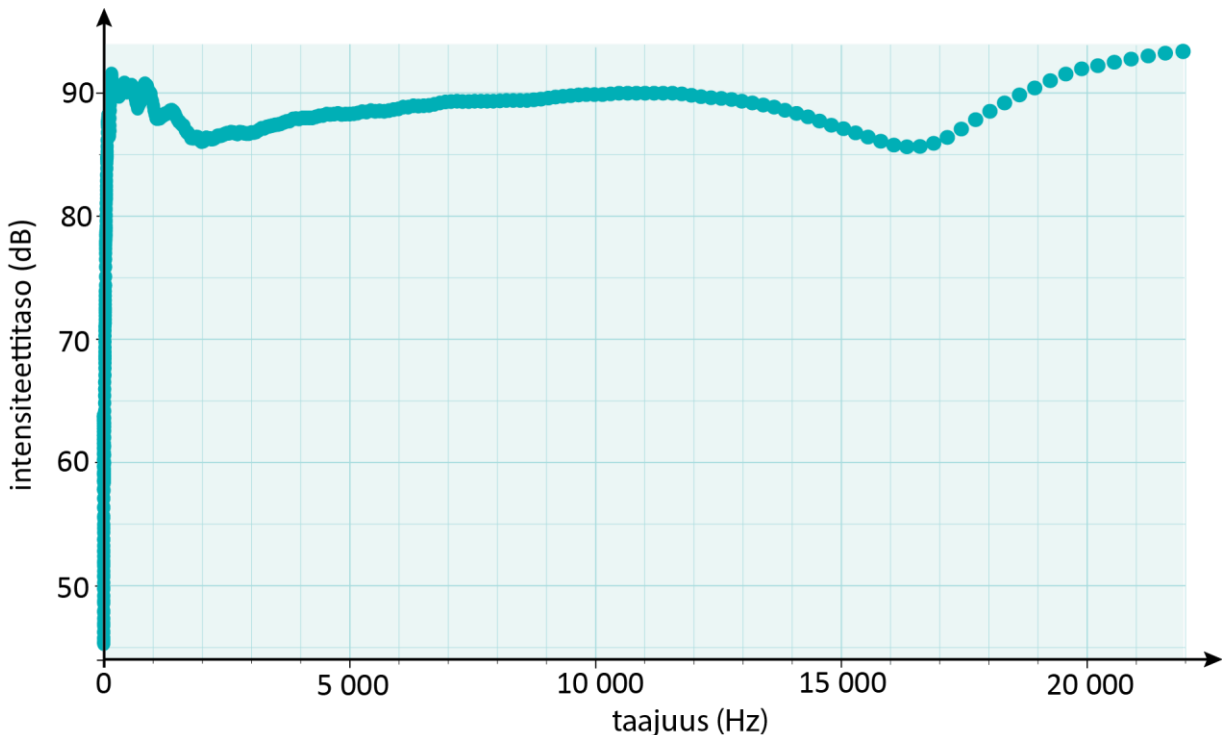
## Tehtävä 14.17.

Kuvaaja A esittää kylpyhuoneessa ja kuvaaja B makuuhuoneessa tehtyä mittausta.

Ääni etenee huoneilmassa lähes vakionopeudella. Kun ääni osuu seinään, osa äänestä heijastuu, osa absorboituu ja taittuu seinämateriaaliin. Mitä vähemmän ääni heijastuu seinästä, sitä nopeammin ääni vaimenee huoneessa. Kylpyhuoneen seinän pintamateriaalit ovat tyypillisesti kovia ja tasaisia, jolloin huoneeseen tuotettu ääni heijastuu seinästä enemmän kuin normaalissa huoneessa. Makuuhuoneen seinämateriaali on pehmeämpää ja makuuhuoneessa on huonekaluja, jonka pehmeät materiaalit absorboivat ääntä kylpyhuoneen kovia pintoja enemmän. Koska makuuhuoneen materiaalit absorboivat ääntä voimakkaammin, äänen suhteellinen paine pienenee nopeammin kuin pesuhuoneessa. Kuvaajassa B äänen suhteellinen paine pienenee nopeammin, joten se on mitattu makuuhuoneessa ja kuvaajan A mittaus pesuhuoneessa.

## Tehtävä 14.18.

a)



b) Interpoloidaan kuvaajasta taajuus, joka ylittää 85 dB:n intensiteettitason. Kuullun äänen matalin taajuus on  $f = 79$  Hz.

c) Alle 79 Hz:n taajuuksia tuotetaan subwoofer-kaiuttimilla. Nämä ovat kaiuttimia, jotka on suunniteltu matalien äänien toistoon. Subwoofer-kaiuttimissa on yleensä iso bassoelementti. Iso elementti pystyy värähtelemään hitaasti ja samalla se tuottaa riittävän suuren äänen paineen muutoksen, joka kuullaan äänenä.

## Tehtävä 14.19.

a) Jos jousivakio on suuri, materiaali on kovaa. Mitä suurempi jousivakio on, sitä enemmän tarvitaan voimaa aineen puristamiseksi kokoon. Jos jousivakio on pieni, materiaali on pehmeämpi.

b) Yksittäiselle jouselle värähtelyn jaksonaika on  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

Yhtälöstä voidaan päätellä, että mitä suurempi jousivakio on, sitä lyhyempi värähdyksen jaksonaika on. Tästä voidaan päätellä, että monen jousen systeemissä värähdys etenee nopeasti, jos jousivakio on suuri ja hitaasti, jos jousivakio on pieni.

c) Edellisten kohtien perusteella voidaan päätellä, että kovien materiaalien jousivakiot ovat arvoltaan suuria ja pehmeiden materiaalien jousivakiot ovat pieniä. Kovissa materiaaleissa äänen nopeus on siis suuri.

Materiaaliin tuleva ääni kokonaisuudessaan heijastuu pinnasta, ellei ääni osu pintaan kohtisuorasti. Tämän vuoksi kovat materiaalit heijastavat suuremman osan tulevasta äänestä kuin pehmeät.

## Tehtävä 14.20

a) Heijastuskerroin  $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ . Heijastumista ei tapahdu lainkaan, kun  $R = 0$ . Näin käy, kun  $Z_1 = Z_2$ . Tällöin aineiden akustiset impedanssit ovat samat, eikä heijastumista tapahdu.

b) ilman akustinen impedanssi  $Z_{1,\text{ilma}} = 0,00041 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} = 410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$

geelin akustinen impedanssi  $Z_{1,\text{geeli}} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$

ihon akustinen impedanssi  $Z_2 = 1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$

Heijastuskerroin ilman ja ihon rajapinnassa on

$$R = \frac{Z_2 - Z_{1,\text{ilma}}}{Z_2 + Z_{1,\text{ilma}}} = \frac{1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} - 410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}{1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} + 410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}$$

$$= 0,99959 \approx 100\%.$$

Koska ilman ja ihon akustiset impedanssit ovat niin erilaiset, käytännössä kaikki ultraääni heijastuu ilman ja ihon rajapinnasta, eikä ultraääntä etene lainkaan kudokseen.



Heijastuskerroin geelin ja ihon rajapinnassa on

$$R = \frac{Z_2 - Z_{1,\text{geeli}}}{Z_2 + Z_{1,\text{geeli}}} = \frac{1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} - 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}{1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} + 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}$$
$$= 0,14040 \approx 14\%.$$

eli ainoastaan 14 % ultraäänestä heijastuu geelin ja ihon rajapinnassa.

Kun ihon pinnalle levitetään tarkoitukseen suunniteltua geeliä, saadaan ultraääni etenemään tutkittavaan kudokseen. Ilman geeliä mittausta on mahdoton tehdä.

- c) Kun poskiontelo on terve ja täynnä ilmaa, ultraääni heijastuu voimakkaasti jo ontelon etureunasta eli läheltä posken ihon pintaa.

Kun poskiontelo on tulehtunut ja se on täynnä märkäistä eritettä, ultraääni etenee poskessa aina ontelon takana olevaan luuhun saakka. Luusta saadaan voimakas ultraäänikaiku. Poskiontelon takaseinä on aikuisella ihmisellä vähintään 2,5 cm:n etäisyydellä posken etureunasta, joten tulehtuneesta poskiontelosta saadaan voimakas kaiku vasta melko syvältä kudoksesta.

- d) alkuperäinen taajuus  $f_0 = 3\,052,0$  Hz  
heijastuvan ultraäänen taajuus on  $f = 3\,053,9$  kHz  
ultraäänen ja veren virtaussuunnan välinen kulma  $\theta = 70^\circ$   
ultraäänen nopeus veressä on  $c = 1\,575$  m/s

Taajuuden muutos on

$$\Delta f = f - f_0 = 3\,053,9 \text{ kHz} - 3\,052 \text{ kHz} = 1,9 \text{ kHz}.$$

Heijastuvan ultraäänipulssin taajuuden muutos on

$$\Delta f = 2 \frac{v}{c} f_0 \cos \theta.$$

Veren virtausnopeudeksi saadaan yhtälön perusteella

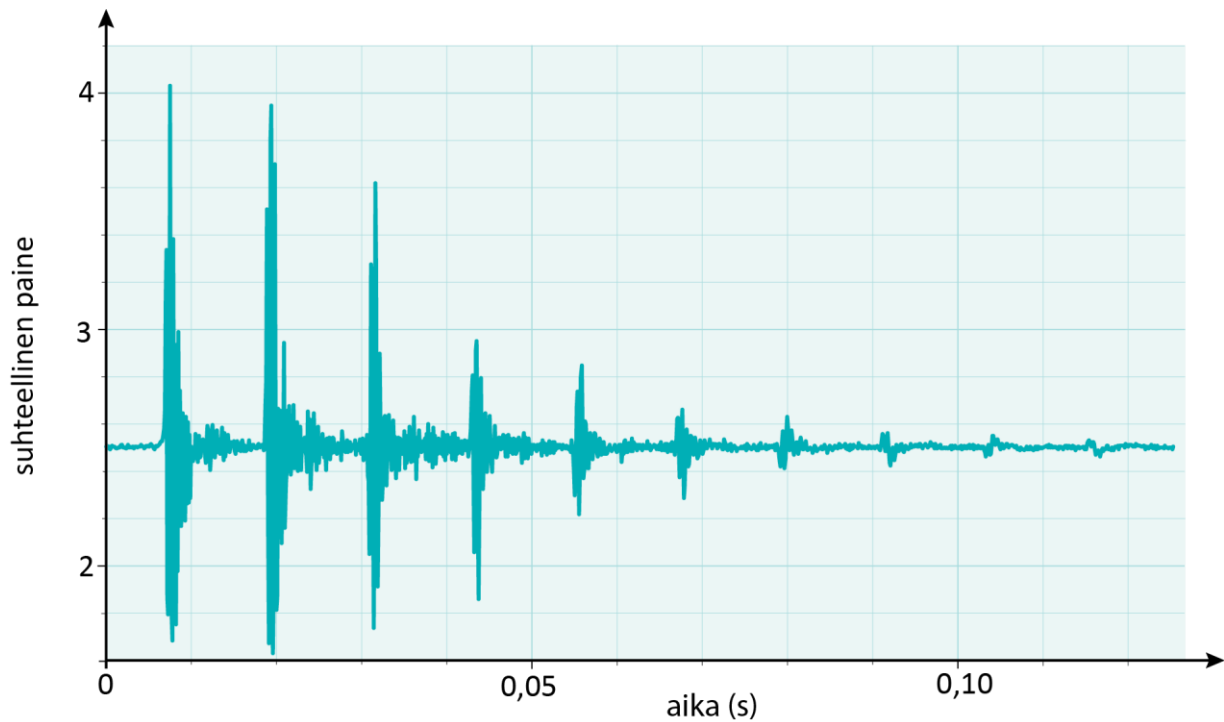
$$v = \frac{c \Delta f}{2 f_0 \cos \theta} = \frac{1\,575 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,9 \text{ kHz}}{2 \cdot 3\,052 \text{ kHz} \cdot \cos 70^\circ} = 1,433 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Ultraäänisignaali heijastuu veren punasoluista takaisin kohti anturia. Koska anturin havaitsema heijastuneen äänen taajuus kasvaa, Dopplerin ilmiön mukaan heijastuneen äänen lähde liikkuu kohti ultraäänianturia. Koska äänen taajuus kasvaa, veri virtaa kohti anturia.

## Tehtävä 14.21.

putken pituus on  $l = 2\,055\text{ mm}$

a)



(akselit oikein päin 1 p, mittauspisteet näkyvät kuvaajassa 1 p, kuvaaja on selkeä 1 p)

b) Kuvaajassa ensimmäinen piikki on naksuttimesta syntynyt ääni. Muut piikit ovat putken toisesta päästä heijastuneen äänen tuottamia paineaaltoja. (1 p)

Ääni kulkee putken pituisen matkan, heijastuu ja kulkee saman matkan takaisin. (1 p)

Määritetään kuvaajasta viiteen edestakaiseen matkaan kulunut aika.

$t = 0,0601$  s. (1 p, Huom! Ajan voi määrittää yhdestäkin edestakaisesta matkasta.)

Ääni etenee vakionopeudella. Äänen kulkema matka edellä määritetyssä ajassa on

$s = 5 \cdot 2l = 10l = 10 \cdot 2\,055 \text{ mm} = 20\,550 \text{ mm}$ . (1 p)

Äänen nopeus on

$$v = \frac{s}{t} = \frac{10l}{t} = \frac{10 \cdot 2\,055 \text{ mm}}{0,0601 \text{ s}} = 341,93 \text{ m/s} \approx 342 \text{ m/s}. \quad (2 \text{ p})$$

c) Äänen nopeuden määrittäminen riippuu äänen kulkeman matkan ja ajan määrittämisestä. Mittauksessa syntyneitä virheitä voidaan pienentää, kun pienennetään mittausajan ja matkan virheitä (2 p).

Mitä pidemmän matkan ääni kulkee, sitä pienempi matkan määrittämisen virhe on. (1 p) Matka pitenee, mikäli tutkimus suoritetaan käyttämällä pidempää putkea. Mitä useampi edestakainen matka saadaan mitattua, sitä pienempi mittausvirhe on. (1 p)

Ajan mittaamiseen liittyvää virhettä voidaan pienentää, kun valitaan tarkalleen sama aallon kohta, josta äänen kulkema aika määritetään. Myös mittaustajuuksien suurentaminen pienentää virhettä. (1 p)

Äänen nopeuden virhettä voidaan pienentää myös toistamalla koe useita kertoja ja määrittämällä toistokokeissa saatujen äänen nopeuksien keskiarvo. (1 p)

TAI

Koe voidaan suorittaa eripituisilla putkilla. Tällöin eripituisilla putkilla voidaan määrittää äänen kulkema matka ja aika ja nämä mittaukset voidaan esittää  $(t, s)$ -koordinaatistossa. Koordinaatistoon merkittyihin mittauspisteisiin sovitettuna suorana fysikaalinen kulmakerroin on äänen nopeus.