

9. Ääni

Tehtävä 9.1.

Oikeat vastaukset:

a) B

b) A

c) A

d) B

e) C

f) B

Tehtävä 9.2.

- a) Ääni syntyy, kun värähtelijä aiheuttaa ympäröivään väliaineeseen mekaanisen aallon.

- b) Ääni etenee ilman jaksottaisina tihentyminä ja harventumina. Ilmassa ääni etenee pitkittäisinä aaltoina.

Tehtävä 9.3.

- a) äänen nopeus ilmassa $v_1 = 343 \text{ m/s}$
äänen nopeus betonissa $v_2 = 4\,300 \text{ m/s}$
äänen aallonpituus $\lambda_1 = 0,78 \text{ m}$

Ääni noudattaa aaltoliikkeen perusyhtälöä $v = f\lambda$. Äänen taajuus on

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{343 \text{ m/s}}{0,78 \text{ m}} = 439,74 \text{ Hz} \approx 440 \text{ Hz}.$$

- b) Äänen taajuus ei muutu, kun ääni siirtyy aineesta toiseen. a-kohdan mukaan äänen taajuus on $f = \frac{v_1}{\lambda_1}$.

Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan äänen aallonpituus betonissa on

$$\lambda = \frac{v_2}{f} = \frac{v_2}{\frac{v_1}{\lambda_1}} = \frac{v_2 \lambda_1}{v_1} = \frac{4300 \text{ m/s} \cdot 0,78 \text{ m}}{343 \text{ Hz}} = 9,778 \text{ m} \approx 9,8 \text{ m}.$$

Vastaus: a) 440 Hz b) 9,8 m

Tehtävä 9.4.

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

äänen nopeus alumiinissa $v_a = 5080 \text{ m/s}$

äänen kulkuaika $\Delta t = 0,13 \text{ s}$

Ääni kulkee väliaineessa vakio nopeudella.

Äänen kulkemalle matkalle on voimassa $s = vt$

Ääni kulkee nopeammin alumiinissa Kirjoitetaan lauseke äänten aikaerolle.

$$\Delta t = t_i - t_a = \frac{s}{v_i} - \frac{s}{v_a} = s \left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_a} \right)$$

Alumiinikiskon pituus on

$$s = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_a} \right)} = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_a} \right)} = \frac{0,13\text{s}}{\left(\frac{1}{343\text{m/s}} - \frac{1}{5080\text{m/s}} \right)} = 47,819\text{m} \approx 48\text{m}.$$

Tehtävä 9.5.

- a) Äänen spektri on äänen taajuusjakauma, joka kertoo eri ääneksien suhteelliset voimakkuudet.
- b) FFT-analyysin tuottamasta kuvaajasta saadaan selville esimerkiksi soittimen äänen muodostamien taajuuksien suhteellisia amplitudeja. Tällaisessa esityksessä vaakakselille merkitään äänessä esiintyvät taajuudet ja pystyakselille taajuuksien suhteelliset amplitudit. FFT-kuvaajassa piikin korkeus kertoo taajuuden suhteellisen amplitudin. Mitä korkeampi piikki on, sitä suurempi on kyseisen taajuuden amplitudi verrattuna muihin taajuuksiin.

Tehtävä 9.6.

- a) Kun kieltä viritetään ja kahden eri kielen taajuudet lähenevät toisiaan, ilmiön voi havaita huojuntana. Huojunta on ilmiö, jossa kuultavan äänen voimakkuus voimistuu ja heikentyy jaksollisesti interferenssin vaikutuksesta.
- b) oikeassa vireessä soivan kielen taajuus $f_1 = 110,0$ Hz epävireisen kielen taajuus $f_2 = 105,7$ Hz

Huojunnan taajuus on

$$f_h = |f_1 - f_2| = |110,0 \text{ Hz} - 105,7 \text{ Hz}| = 4,3 \text{ Hz}.$$

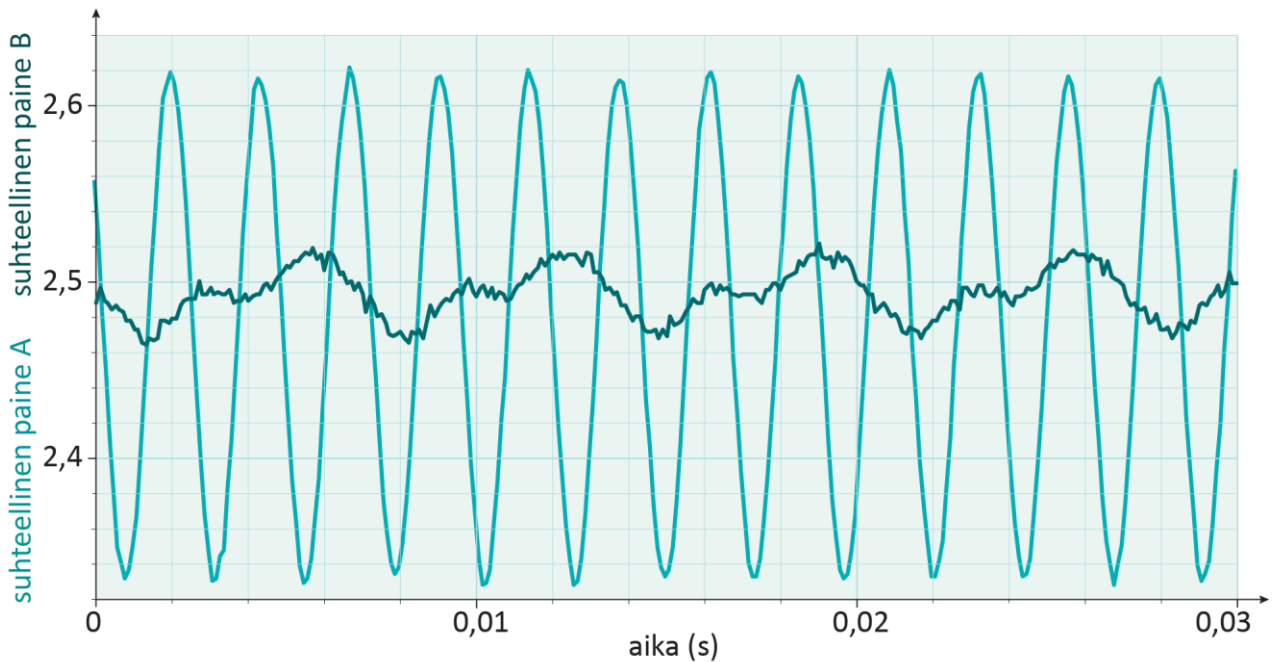
Tehtävä 9.7.

- a) Kaukana olevan kimalaisen ääni kuuluu heikosti, mutta mitä lähemmäksi kimalainen lentää, sitä voimakkaampana ääni kuuluu. Äänen energia jakautuu pallopinnalle. Pallon säde kuvaa äänilähteen ja havaitsijan välistä etäisyyttä. Mitä suurempi etäisyys on, sitä pienempi on äänen amplitudi.

Kun kimalainen tulee havaitsijaa kohti, havaitsijan kuuleman äänen taajuus kasvaa. Tällöin havaitsija kuulee äänen korkeampana. Loittonevan kimalaisen äänen taajuus kuullaan hieman matalampana. Juuri kun kimalainen on ohittamassa havaitsijaa, kimalaisen ääni kuulostaa yhtä korkealta kuin jos kimalainen olisi ilmassa paikallaan. Äänen taajuuden muutos aiheutuu Dopplerin ilmiöstä.

- b) Mitä korkeampi ääni on, sitä suurempi on äänen taajuus. Hyttysen tai kärpäsen tuottaman äänen taajuus johtuu niiden siipien edestakaisen liikkeen nopeudesta. Siipien edestakainen liike aiheuttaa ilmaan jaksottaisesti muuttuvia paineaaltoja, joka kuullaan äänenä. Mitä nopeammin edestakainen liike tapahtuu, sitä suurempi on siipien tuottaman äänen taajuus. Koska hyttysen liikuttaa siipiään edestakaisin nopeammin, on hyttysen siipien värähtelytaajuus suurempi kuin kärpäsen siipien värähtelytaajuus ja siksi hyttysen tuottaman äänen korkeus on myös suurempi.

Tehtävä 9.8.



Ääniraudalla tuotetun äänen spektrissä on vain yhtä värähtelytaajuutta. Syntyneen äänekseen kuvaaja on puhdas sinikäyrä, joten suhteellisen paineen A kuvaaja on ääniraudan tuottama. Kitaralla soitetun sävelen kuvaajassa esiintyy useita värähtelytaajuuksia. Suhteellisen paineen kuvaaja B on tuotettu kitaralla.

Tehtävä 9.9.

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

Rummun taajuus on $f = \frac{58}{60\text{s}} = \frac{58}{60} \text{ Hz}$.

Ääni kulkee väliaineessa vakionopeudella, jolloin äänen kulkemalle matkalle on voimassa $s = vt$.

Rumpua soitetaan taajuudella f . Rummun iskusta seuraavaan rummun iskuun kuluu aikaa $T = \frac{1}{f} = \frac{60}{58} \text{ s}$.

Tässä ajassa otetaan kaksi askelta. Yhden askeleen aika on puolet jaksonajasta eli $T/2$. Tässä ajassa ääni kulkee matkan

$$s = vt = v \frac{T}{2} = \frac{v}{2f} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \cdot \frac{58}{60 \text{ s}}} = 177,41 \text{ m} \approx 180 \text{ m}.$$

Partiolaisparaatin pituus on 180 m.

Tehtävä 9.10.

- a) Huojuntataajuus lasketaan yhtälöstä $f_h = |f_2 - f_1|$. Kun flyygelin kieltä kiristetään, taajuuksien ero pienenee. Kun kieltä edelleen kiristetään, flyygelin kielen taajuus on lopulta yhtä suuri kuin ääniraudan taajuus.
- b) Koska kielen kiristäminen nostaa kielen taajuutta, voidaan päätellä, että äänirauta soi aluksi suuremmalla taajuudella kuin flyygelin kieli.
- c) äänen taajuus $f = 440 \text{ Hz}$

kieleen syntyneen mekaanisen aallon aallonpituus
 $\lambda = 0,86 \text{ m}$

Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan $v = f\lambda$ saadaan äänen nopeus kielessä

$$v = f\lambda = 440\text{Hz} \cdot 0,86 \text{ m} = 378,4 \text{ m/s} \approx 380 \text{ m/s}.$$

Tehtävä 9.11.

äänen nopeus ilmassa $v = 340 \text{ m/s}$

havaitseijan nopeus $v_h = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{25 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}$

soitettu taajuus f_0

Ennen ohitusta pyöräilijä kuulee taajuuden

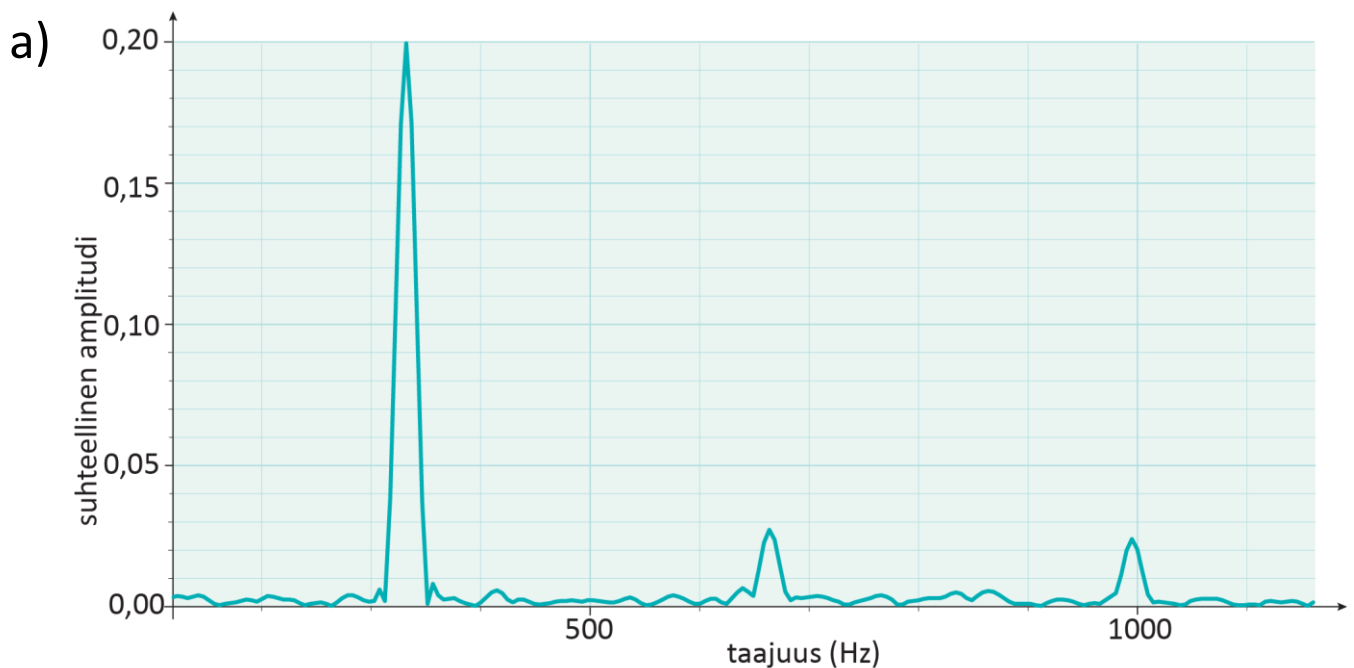
$$f = f_0 \frac{v + v_h}{v} = f_0 \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \frac{25 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,020\,424\,84 f_0 \approx 1,020 f_0$$

Ohituksen jälkeen pyöräilijä kuulee taajuuden

$$f = f_0 \frac{v - v_h}{v} = f_0 \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}} - \frac{25 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,979\,575\,16 f_0 \approx 0,980 f_0$$

Ennen ohitusta pyöräilijä kuulee 2,0 % korkeamman taajuuden kuin soitettu taajuus ja ohituksen jälkeen 2,0 % matalamman taajuuden kuin soitettu taajuus.

Tehtävä 9.12.



b) Äänen spektristä määritettynä kitaran kieli tuotti taajuudet

$f_1 = 332 \text{ Hz}$, $f_2 = 664 \text{ Hz}$ ja $f_3 = 996 \text{ Hz}$. Suurin suhteellinen amplitudi oli taajuudella 332 Hz.

c) Kun kitaran kielen tuottamien äänien taajuuksia tarkastellaan, havaitaan, että taajuus f_2 ja f_3 ovat taajuuden f_1 monikertoja.

Tehtävä 9.13.

potkujen välinen aika $T = 1,25 \text{ s}$

pinta-aallon nopeus $v = 0,58 \text{ m/s}$

sorsan nopeus $v_1 = 0,24 \text{ m/s}$

- a) Paikallaan oleva sorsa kohtaa uivan sorsan lähettämiä aaltoja tietyllä taajuudella. Kun sorsa lähettää aaltoja ja liikkuu paikallaan olevasta sorsasta poispäin, on kyseessä Dopplerin ilmiö, jossa aaltolähde liikkuu paikallaan olevasta havait sijasta poispäin. Tällöin paikallaan oleva sorsa kokee aallot harvemmin. Paikallaan olevan sorsan havaitseman aaltoliikkeen taajuus on pienempi kuin uivan sorsan tuottaman aaltoliikkeen taajuus.

b) Kyseessä on Dopplerin ilmiö, jossa äänilähde liikkuu poispäin havaitsijasta. Uivan sorsan lähettämien aaltojen taajuus on

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,25 \text{ s}} = 0,800 \text{ Hz.}$$

Paikallaan olevan sorsan kokemien aaltojen taajuus eli aaltojen määrä sekunnissa

$$f = f_0 \frac{v}{v + v_1}$$

$$f = \frac{1}{T} \cdot \frac{v}{v + v_1}$$

$$= \frac{1}{1,25 \text{ s}} \cdot \frac{0,58 \text{ m/s}}{0,58 \text{ m/s} + 0,24 \text{ m/s}} = 0,56585 \text{ Hz} \approx 0,57 \text{ Hz.}$$

Vastaus: b) 0,57 1/s

Tehtävä 9.14.

summa-aallon taajuus $f = 431 \text{ Hz}$

- a) Koska toisen ääniraudan taajuus oli syntyneen äänen taajuutta suurempi, merkitään tunnetun ääniraudan taajuutta $f_2 = 437 \text{ Hz}$.

Summa-aallon taajuus on äänen tuottamien äänirautojen värähtelytaajuuksien keskiarvo. Huojuntaäänen taajuudelle on voimassa

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2}.$$

Toisen ääniraudan taajuus on

$$f_1 = 2f - f_2 = 2 \cdot 431 \text{ Hz} - 437 \text{ Hz} = 425 \text{ Hz}.$$

- b) Kuullun äänen huojuntataajuus noudattaa yhtälöä

$$f_h = |f_2 - f_1| = |437 \text{ Hz} - 425 \text{ Hz}| = 12 \text{ Hz}.$$

Vastaus: a) 425 Hz b) 12 Hz

Tehtävä 9.15.

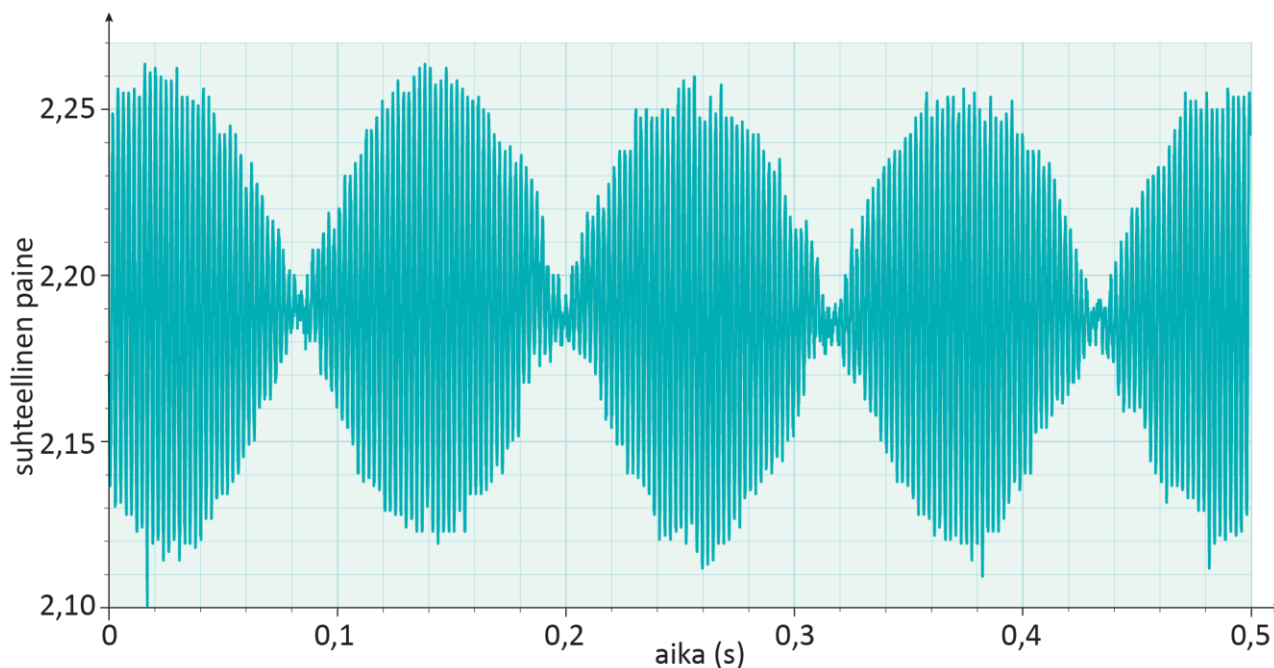
- a) Aallot värähtelevät lähes samalla taajuudella, joten peräkkäisille jaksoille summa-aalto on melkein sama. Taajuuseron vuoksi pientä siirtymää kuitenkin tapahtuu. Hyvin monen jakson toistuessa siirtymä näkyy summa-aallon amplitudissa huojuntana.
- b) Simulaation mukaan näyttäisi, että huojunta alkaa erottua summa-aallossa, kun taajuuksien ero on alle 20 %.

Tehtävä 9.17.

- a) Kun viivoitinta liikutetaan pöydän reunan yli, viivoittimen värähtelevän osan pituus kasvaa. Mitä pidempi on värähtelevän osan pituus, sitä matalampi on viivoittimen tuottaman äänen taajuus.
- b) Kun värähtelevä osa on pitkä, viivoitin värähtelee hitaasti. Kun viivoitin värähtelee ilmassa jaksottaisesti edestakaisin, viivoittimen liike tuottaa ympäröivään ilmaan paineen muutoksia. Nämä jaksottaiset paineen muutokset etenevät ilmassa ja ne havaitaan äänenä. Mitä hitaammin viivoitin värähtelee, sitä pienempi viivoittimen tuottaman äänen taajuus on ja sitä matalammalta ääni kuulostaa. Kun viivoittimen värähtelevä osa on lyhyempi, viivoittimen värähtelytaajuus on suurempi, jolloin havaitaan ääni, joka kuulostaa korkeammalta.

Tehtävä 9.18.

a)



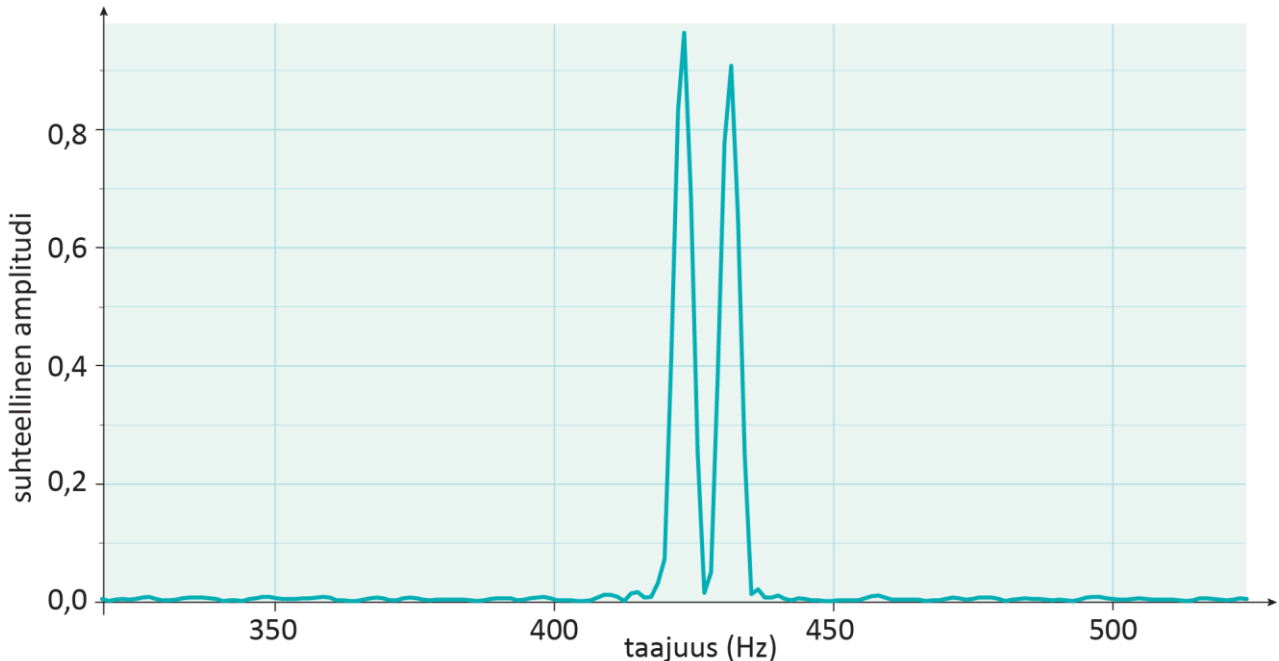
b) Huojuntataajuus saadaan määritettyä kuvaajalta huojunnan jaksonajasta eli peräkkäisten suhteellisen paineen amplitudien minimien välisestä ajasta. Kuvaajan perusteella kolmen peräkkäisen jakson aika on $t = 0,3487$ s.

Tästä voidaan laskea huojunnan jaksonaika $T = \frac{t}{3}$.

Huojuntataajuus on

$$f = \frac{1}{T} = \frac{3}{t} = \frac{3}{0,3487 \text{ s}} = 8,603 \text{ Hz} \approx 8,6 \text{ Hz}.$$

c) Huojuntaäänien muodostavien äänten taajuudet saadaan mittausaineistolle taajuusanalyysille tehdyn FFT-analyysillä.



Huojuntaäänien muodostavien äänten taajuudet ovat $f_1 = 423,58 \text{ Hz}$ ja $f_2 = 432,13 \text{ Hz}$.

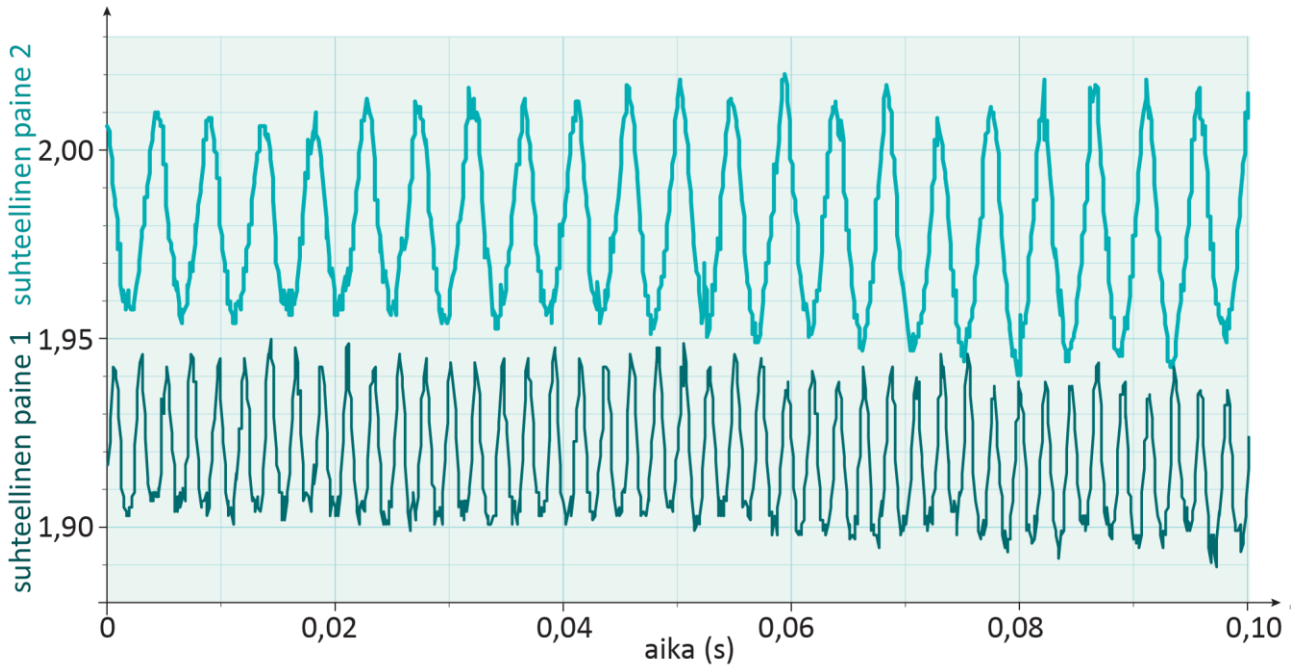
Summa-aallon taajuus on

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{423,58 \text{ Hz} + 432,13 \text{ Hz}}{2} = 427,855 \text{ Hz} \approx 428 \text{ Hz}.$$

Vastaus: b) 8,6 Hz c) 428 Hz

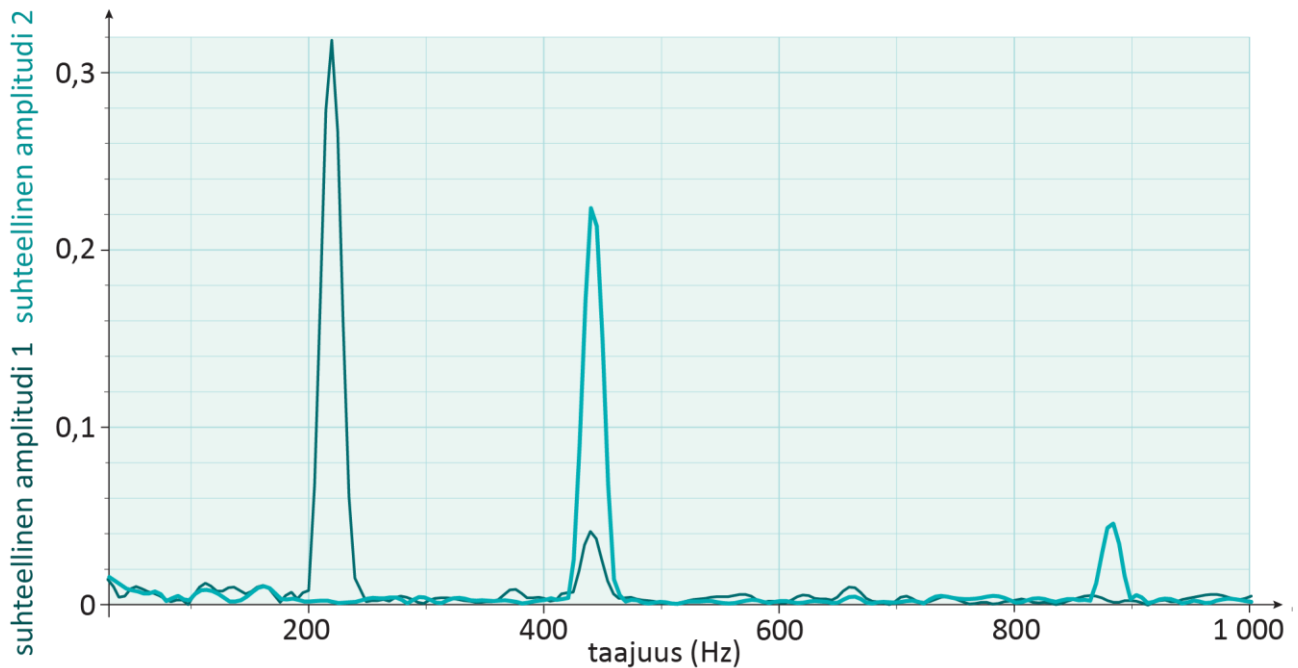
Tehtävä 9.19.

a)



b) Kuvaajasta nähdään, että kuvaajassa 2 jaksoaika on lyhyempi eli laulun 2 taajuus on selkeästi suurempi kuin laulun 1. Toisaalta laulun 1 amplitudi on suurempi, mikä kertoo, että kyseessä oli voimakkaampi ääni.

c) FFT-taajuusanalyysi kertoo lauluäänten spektrit.



Spektristä nähdään, että laulun 2 perustaajuus on yhtä suuri kuin laulun 1 ensimmäinen ylävärähtelytaajuus. Tämä tarkoittaa, että lauletuilla äänillä on oktaavin ero.

Tehtävä 9.20.

- a) Koska havaitsijan nopeus on pienempi kuin äänilähteen loittonemisnopeus, havaitsija kohtaa ääniaaltoja harvemmin kuin jos havaitsija ja äänilähde olisivat paikoillaan. Havaitsija kokee äänen taajuuden pienempänä eli havaittu äänen korkeus on matalampi.
- b) äänilähteen tuottaman äänen taajuus $f_0 = 300 \text{ Hz}$
äänilähteen nopeus $v_l = 120 \text{ km/h}$
havaitsijan nopeus $v_h = 97 \text{ km/h}$

Koska havaitsija loittonee äänilähteestä, Dopplerin ilmiön mukaan havaitsijan kokeman äänen taajuus pienenee. Tällöin yhtälön osoittajaan tulee miinusmerkki.

Äänilähde liikkuu kohti havaitsijaa, joten havaitsija kokee äänilähteen taajuuden kasvun ja yhtälön nimittäjään tulee miinusmerkki.

Autoilijan kokema äänen taajuus

$$f_h = \frac{v + v_h}{v - v_l} f_0 = \frac{343 \text{ m/s} - \frac{97 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{343 \text{ m/s} - \frac{120 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}} \cdot 300 \text{ Hz} = 306,1895 \text{ Hz} \approx 306 \text{ Hz}.$$

Tehtävä 9.21.

- a) Oktaavissa äänten taajuuksien suhde on 2:1. Lasketaan taajuus, joka on oktaavin päässä sävelestä c^1 .

$$f = 2f_0 = 2 \cdot 261,6 \text{ Hz} = 523,2 \text{ Hz}$$

C-duuriasteikon korkeampi c^1 muodostaa oktaavin perussävelen kanssa.

- b) Perussävel $f_0 = 261,6 \text{ Hz}$. Määritetään suuren terssin ja puhtaan kvintin päässä olevien sävelten taajuudet.

Suuri terssi noudattaa ehtoa $\frac{f_3}{f_0} = \frac{5}{4}$.

Lasketaan vastaava taajuus. $f_3 = \frac{5}{4}f_0 = \frac{5}{4} \cdot 261,6 \text{ Hz} = 327 \text{ Hz}$

Aineiston mukaan suuren terssin päässä perustaajuudesta on sävel e^1 .

Puhdas kvintti noudattaa ehtoa $\frac{f_5}{f_0} = \frac{3}{2}$.

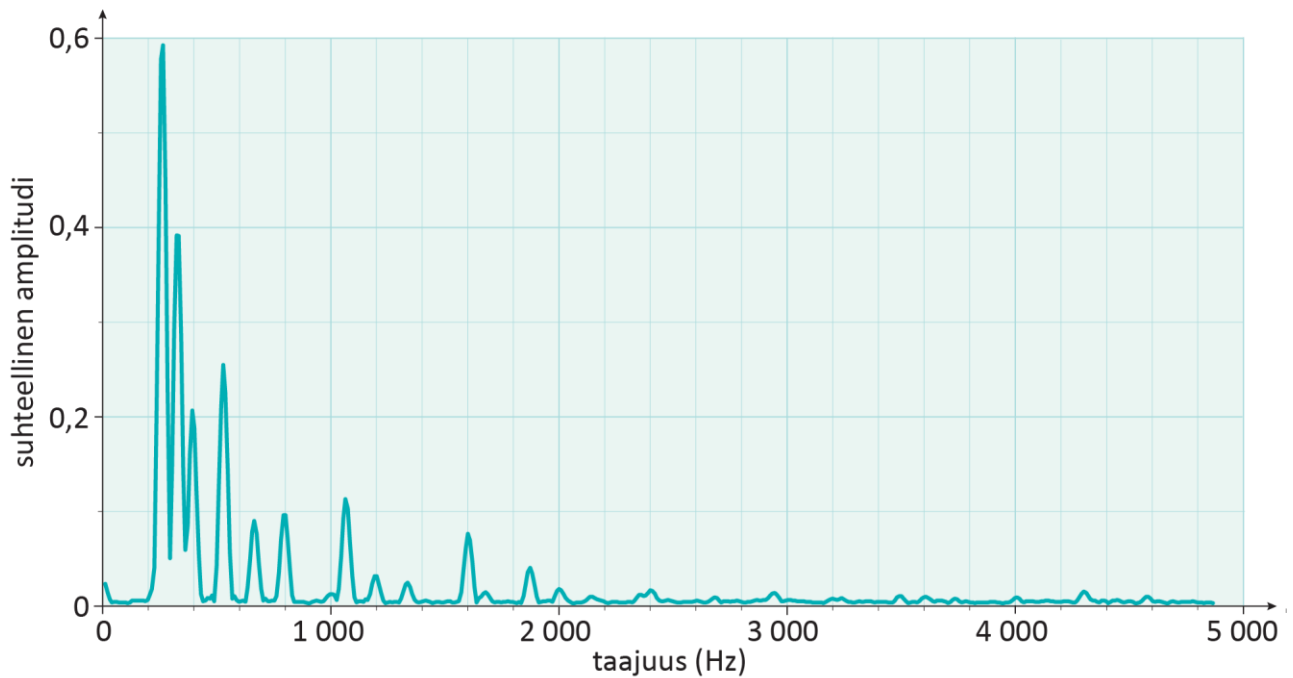
Lasketaan vastaava taajuus.

$$f_3 = \frac{3}{2}f_0 = \frac{3}{2} \cdot 261,6 \text{ Hz} = 392,4 \text{ Hz}$$

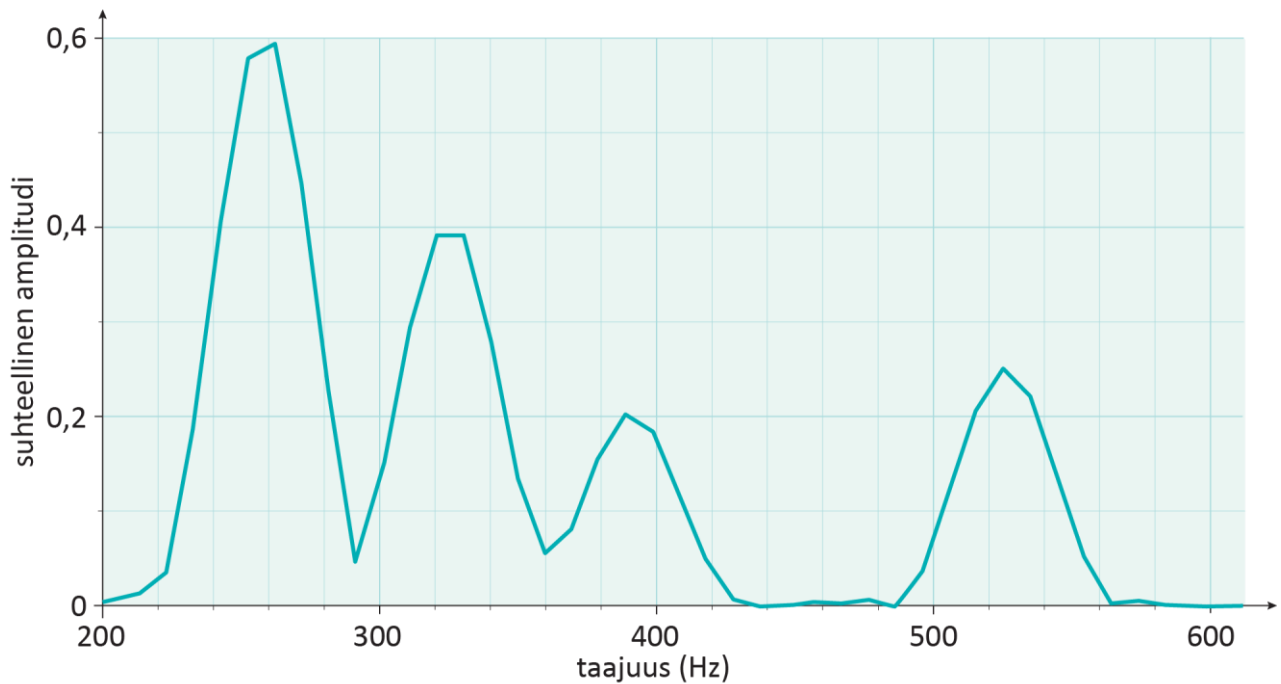
Aineiston mukaan terssin säveltä lähin on g^1 .

C-duurikolmisoinnun muodostavat sävelet c^1 , e^1 ja g^1 .

c) Esitetään äänen suhteellinen amplitudi taajuuden suhteen



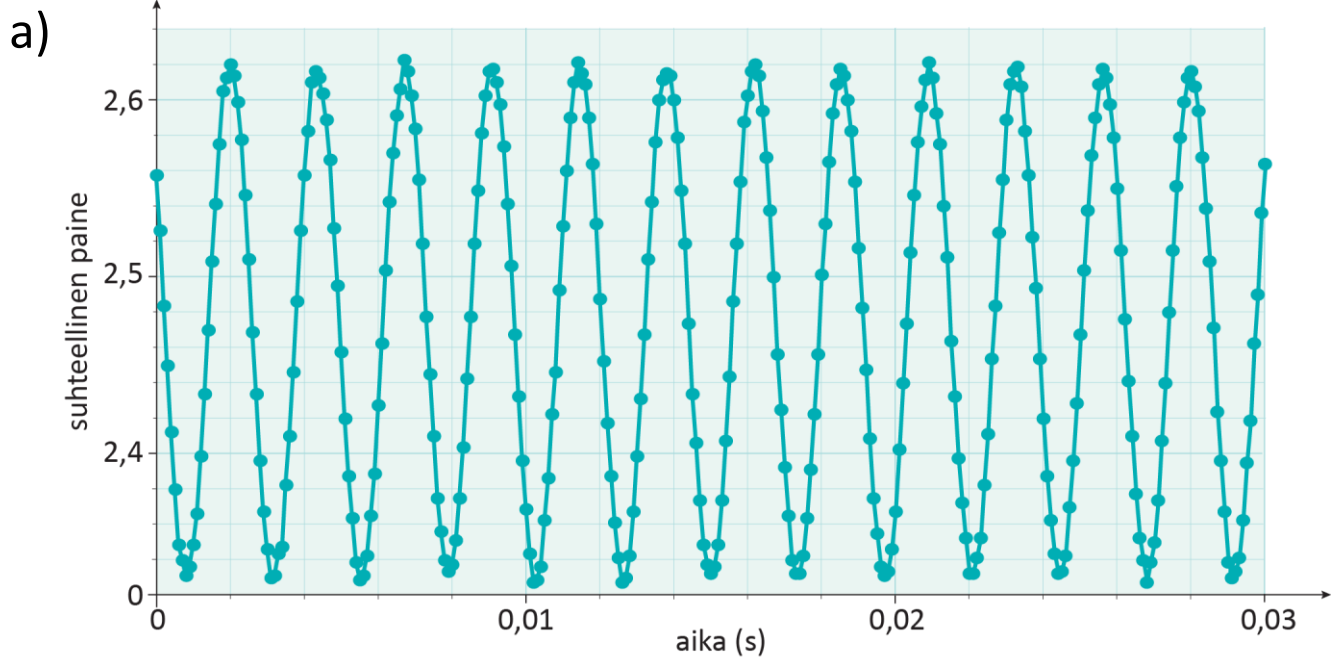
Tarkastellaan aineiston C-duuriasteikon taajuusaluetta.



Kuvaajasta interpoloimalla saadaan piikkien huippujen taajuuksiksi 261,4 Hz, 325,5 Hz ja 389,8 Hz. Mitatut arvot ovat hyvin lähellä teoreettisia arvoja. Poikkeama saattaa aiheutua esimerkiksi siitä, että kitaran viritys on ollut hieman epätarkka.

Kielet, jotka tuottavat e^1 - ja g^1 -sävelet värähtelevät teoreettista tilannetta pienemmällä taajuudella

Tehtävä 9.22.



(akselit oikein päin 1 p, mittapisteeet kuvaajassa 1 p

(ei ole pakko olla sovitusta))

Kuvaajan perusteella 11 jakson aika on $t = 0,026\ 04\ \text{s}$.

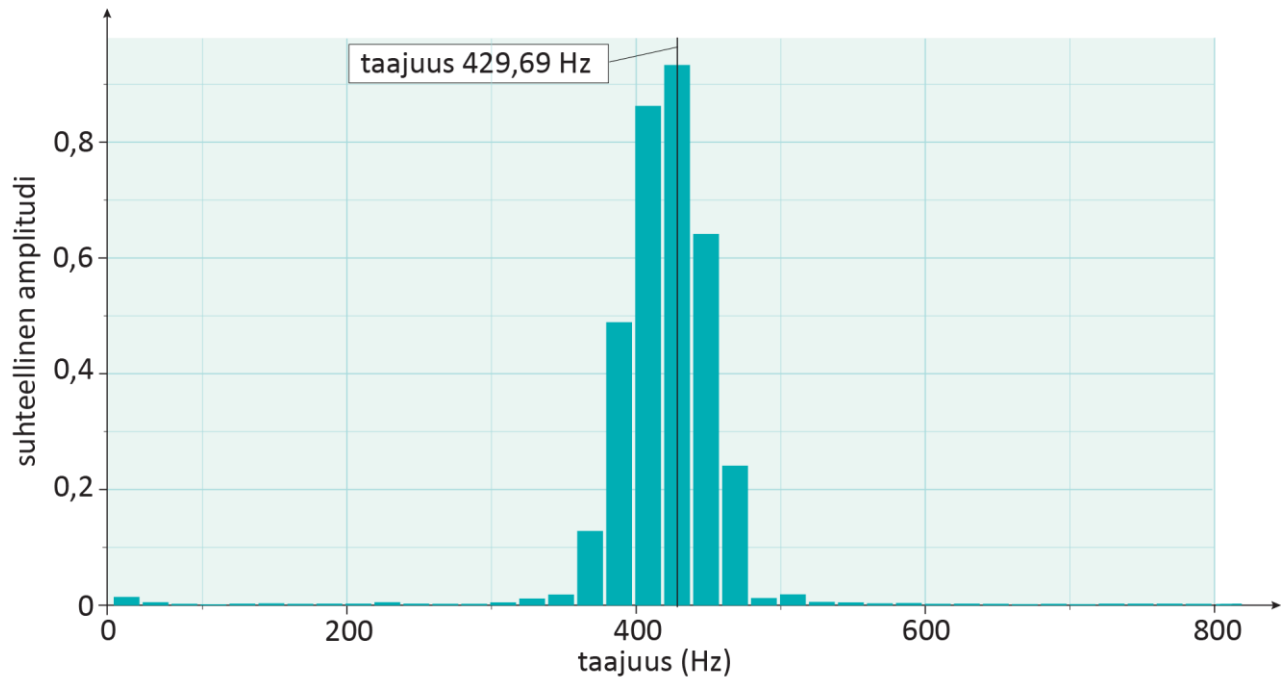
(1 p)

Jaksonaika on $T = \frac{t}{11} (= \frac{0,026\ 04\ \text{s}}{11} = 0,002\ 367\ \frac{1}{\text{s}})$.

Äänen taajuus

$$f = \frac{1}{T} = \frac{11}{t} = \frac{11}{0,026\ 04\ \text{s}} = 422,427\ \text{Hz} \approx 422\ \text{Hz}. \quad (2\ \text{p})$$

b)



(2 p)

FFT-analyysillä tehdyn taajuusanalyysin perusteella äänen taajuus $f = 429,69 \text{ Hz} \approx 430 \text{ Hz}$. (1 p)

c) aallon nopeus $v = 344 \text{ m/s}$

Ääniaallon aallonpituus saadaan aaltoliikkeen perusyhtälön avulla b-kohdan tuloksen mukaan (1 p)

$$v = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344 \text{ m/s}}{429,69 \text{ Hz}} = 0,800 577 \text{ m} \approx 80 \text{ cm}. \quad (2 \text{ p})$$

d) Kun äänirautaan lisätään punnus, ääniraudan massa suurenee. Mitä suurempi ääniraudan massa on, sitä pienemmällä taajuudella äänirauta värähtelee. (2 p)

Koska taajuus pienenee, ääni kuullaan matalampana.
(2 p)