

13. Aaltojen diffraktio ja interferenssi

Tehtävä 13.1.

Oikeat vastaukset:

- a) B
- b) A
- c) A
- d) C
- e) B

Tehtävä 13.2.

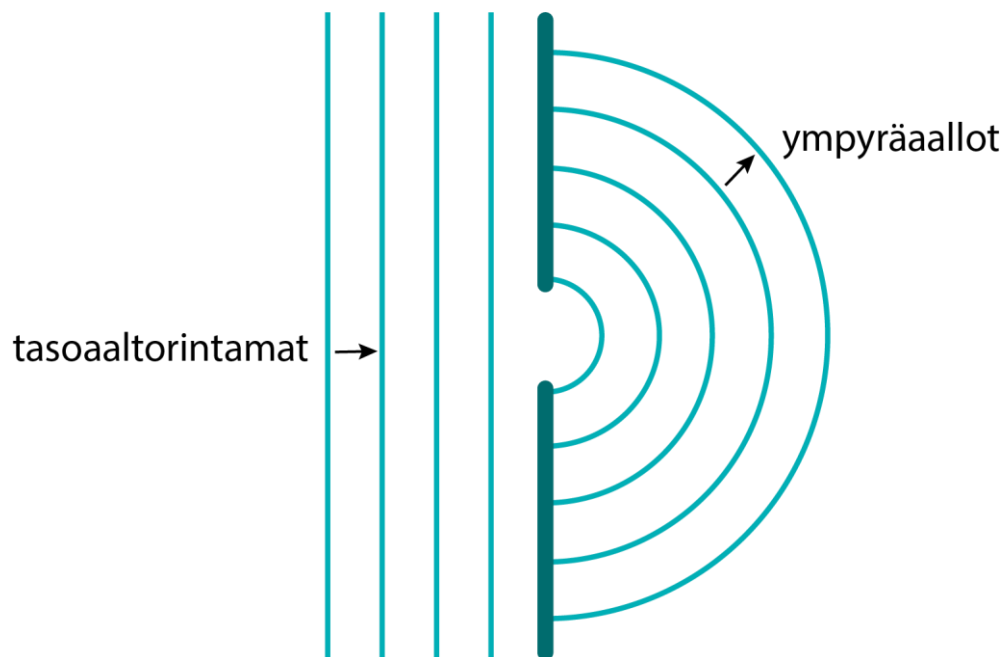
- a) Diffraktio eli taipuminen tarkoittaa aallon kulkusuunnan muuttumista, joka aiheutuu esteestä tai raosta.
- b) Diffraktio on sitä voimakkaampi, mitä pidempi aallonpituus on raon leveyteen verrattuna. Matalien äänien aallonpituus on pidempi kuin korkeiden, joten kuvan henkilö kuulee matalat äänet paremmin. Matalat äänet eivät absorboidu ilmaan yhtä voimakkaasti kuin korkeat äänet ja myös siksi matalat äänet kuuluvat paremmin.

Tehtävä 13.3.

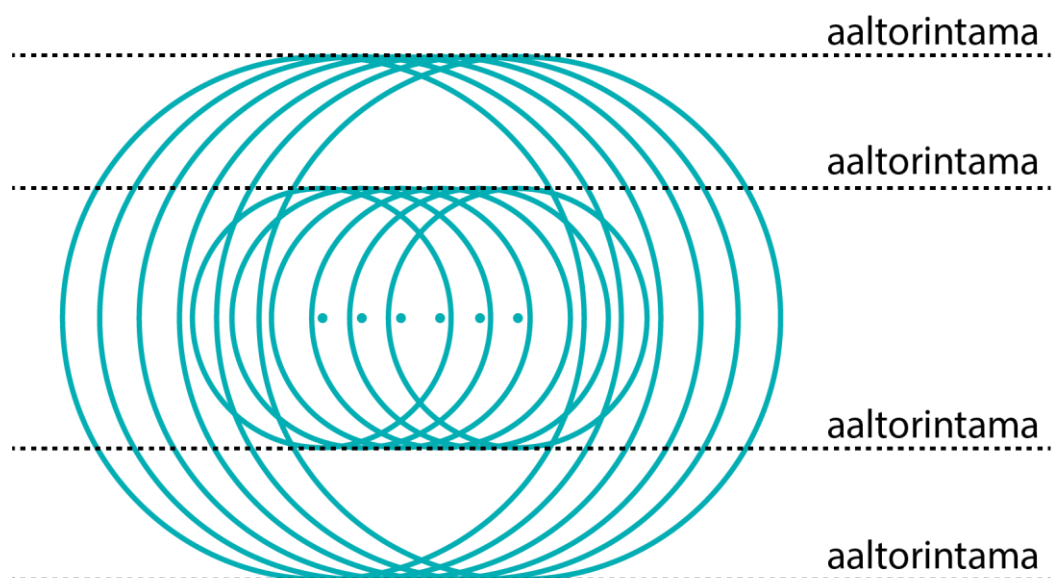
- a) Pisteiden A ja B välillä on kaksi kokonaista aaltoa ja sen lisäksi puolikas aalto. Pisteiden välinen matkaero $d = 2,5\lambda$.
- b) Koska pisteet A ja C ovat aallonharjoja, ovat pisteiden A ja C kohdalla olevat aallot samassa vaiheessa.

Tehtävä 13.4.

a)



b)



Tehtävä 13.5.

Kuvassa tummat alueet ovat aallonpohjia ja vaaleat alueet aallonharjoja. Kuvassa näkyvät säteen suuntaiset viivat, joissa ei erotu tummia ja vaaleita alueita, ovat alueita, joissa tapahtuu heikentävä interferenssi ja summa-aallon amplitudi on nolla. Muissa kohdissa aallot vahvistavat toisiaan.

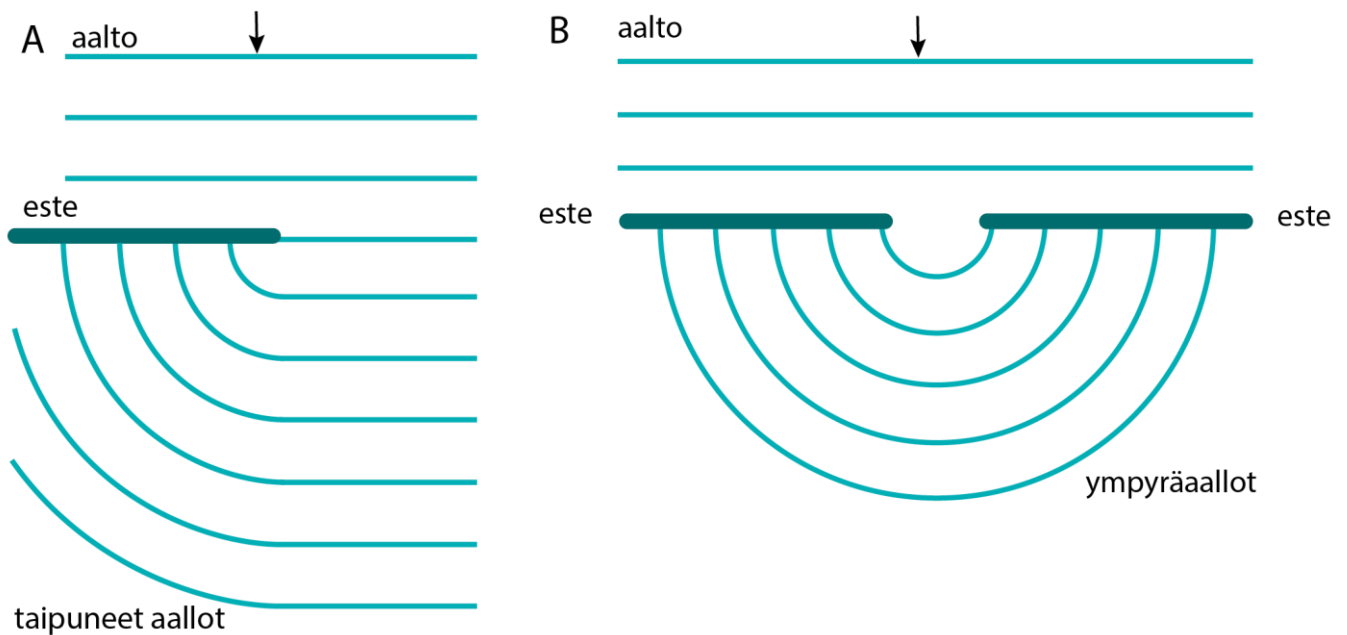


heikentävä interferenssi

vahvistava interferenssi

Tehtävä 13.6.

Kun tasoaalto kohtaa esteen, aalto heijastuu esteestä. Tilanteessa A esteen pää toimii uuden alkeisaallon lähteenä ja tuottaa ympyräaallon. Tasoaalto, joka tulee esteen ohi, jatkaa tasoaaltona. Tilanteessa B esteiden välillä oleva rako toimii uuden alkeisaallon lähteenä. Koska raon leveys on aallonpituuden luokkaa, syntyy raossa ympyräaalto. Tilanteessa B esteiden jälkeen on ympyräaalto.



Tehtävä 13.7.

- a) Molemmissa raoissa tapahtuu diffraktio. Kumpikin rako toimii Huygensin periaatteen mukaisesti ympyräaaltojen lähteenä. Raoista lähtevät ympyräaallot kohtaavat ja interferoivat. Tämän seurauksena syntyy diffraktiokuvio.
- b) Diffraktiokuvion muotoon vaikuttavat aallon etenemisnopeus, aallonpituus, rakojen leveys ja rakojen etäisyys toisistaan.

Tehtävä 13.8.

- a) Väärin. Värähtelijöiden välinen etäisyys on neljä aallonpituutta.

- b) Oikein. Koska molempien lähettämät aallot ovat aallonpohjana hetkellä, jolloin aalto on toisen värähtelijän kohdalla, värähtelee värähtelijät samassa vaiheessa.

- c) Oikein. Molempien värähtelijöiden lähettämät aallot ovat pisteessä A aallonharjoja, joten aallot ovat samassa vaiheessa.

- d) Oikein. Pisteessä C aallot ovat samassa vaiheessa, jolloin ne vahvistavat toisiaan.

- e) Väärin. Pisteessä B toisen aallon lähettämä aalto on aallonpohjana ja toisen aallonharjana, jolloin ne heikentävät toisiaan.

Tehtävä 13.9.

Kun pisara osuu vedenpintaan, osuma aiheuttaa veden pintaan häiriön. Osumiskohta toimii Huygensin periaatteen mukaan uuden alkeisaallon lähteenä, jolloin vedenpintaan syntyy ympyränmuotoinen aalto. Ympyräaalto etenee säteen suuntaan vakionopeudella. Kun aalto etenee osumakohdasta kauemmaksi, aallon amplitudi pienenee. Tämä johtuu siitä, että aallon energia jakautuu isommalle pinta-alalle.

Tehtävä 13.10.

a) Pisteessä A on molempien aaltojen aallonharja. Aallot ovat samassa vaiheessa, joten pisteessä A tapahtuu vahvistava interferenssi.

Pisteessä B aaltojen vaihe-ero on puoli aallonpituutta, eli aallot ovat vastakkaisissa vaiheissa. Näin ollen pisteessä B tapahtuu heikentävä interferenssi.

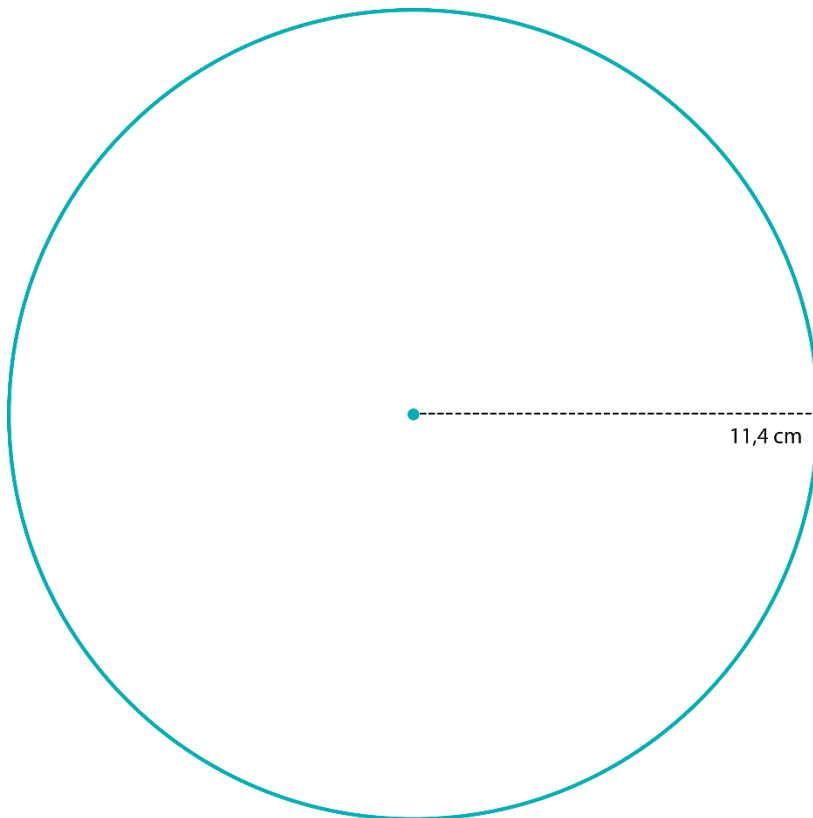
Pisteessä C on molempien aaltojen aallonpohja. Aallot ovat samassa vaiheessa, joten pisteessä C tapahtuu vahvistava interferenssi.

b) Kun aallot etenevät puolen aallonpituuden verran, alkuperäisten aallonharjojen kohdille syntyy aallonpohjat ja alkuperäisten aallonpohjien kohdille aallonharjat. Tällöin pisteessä A on edelleen vahvistava interferenssi, pisteessä B heikentävä interferenssi ja pisteessä C vahvistava interferenssi.

Tehtävä 13.11.

häiriön nopeus 11,4 cm/s

- a) Kun vesipisara osuu veteen, pisaran osuminen aiheuttaa häiriön. Huygensin periaatteen mukaan syntyy ympyrän muotoinen veden pinnalla etenevä pulssi. Syntynyt pulssi etenee veden pinnalla vakio nopeudella. Pulssi on edennyt 1,0 sekunnin aikana matkan $s = vt = 11,4 \text{ cm/s} \cdot 1,0 \text{ s} = 11,4 \text{ cm}$.



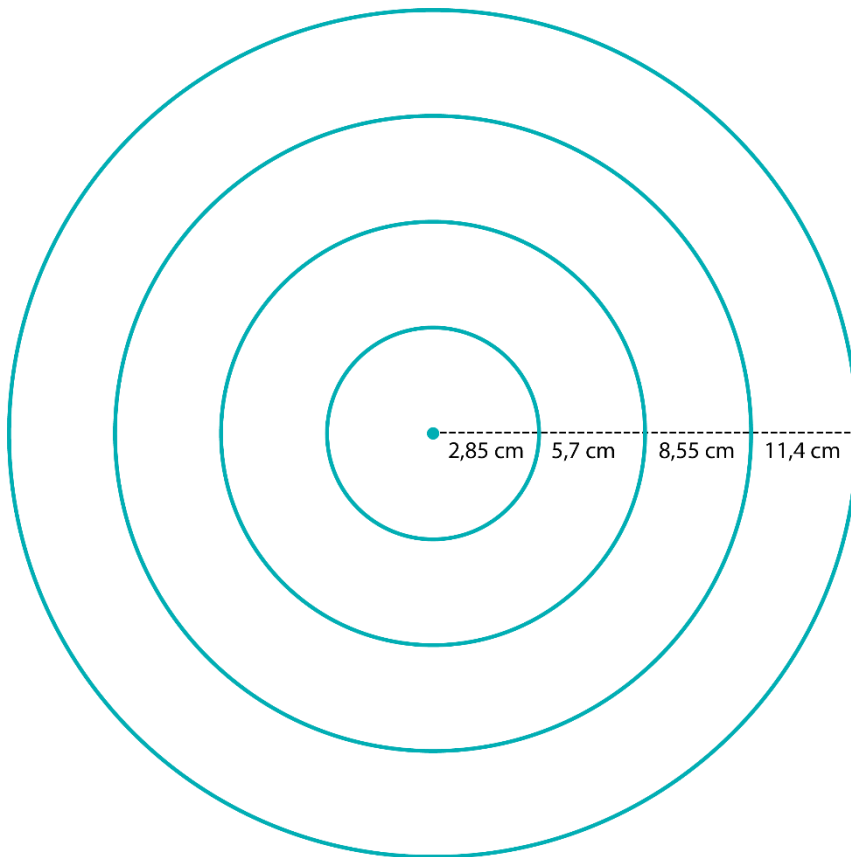
b) pisaroiden taajuus $f = 4,0 \text{ Hz}$

Lasketaan pisaroiden muodostamien aaltorintamien aallonpituus aaltoliikkeen perusyhtälöstä

$$v = f\lambda$$

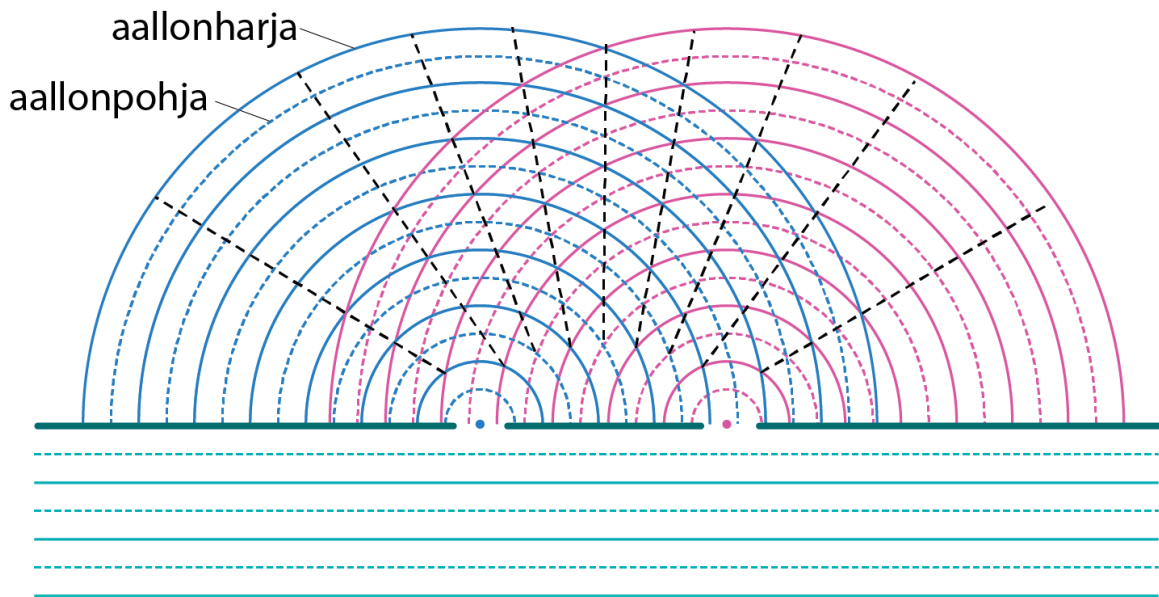
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{11,4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{4,0 \frac{1}{\text{s}}} = 2,85 \text{ cm.}$$

Hahmotellaan kuvaaja



Tehtävä 13.12.

- a) Interferenssi on vahvistava suunnissa, joissa aallot kohtaavat samassa vaiheessa. Suunnat on merkittynä kuvassa mustilla katkoviivoilla.



- b) Raoista lähtevien ympyräaaltojen amplitudi pienenee, kun ympyrän säde kasvaa. Diffraktiokuviossa suurimmat amplitudit ovat lähellä keskipistettä, sillä etäisyys molemmista raoista on tällöin pienimmillään.

Tehtävä 13.13.

- a) Mereltä saapuu tasoaaltoja aallonmurtajia kohti. Aallonmurtajat vaimentavat ja heijastavat mereltä tulevia aaltoja. Kun mereltä tulevat aallot kohtaavat aallonmurtajan pään, aallonmurtajan pää toimii uutena aaltolähteenä, joka synnyttää Huygensin periaatteen mukaan ympyräaaltoja. Jos mereltä tulevien tasomaisten aaltojen aallonpituus on aallonmurtajan muodostaman salmen leveyden luokkaa, aallonmurtajan muodostamassa salmessa syntyy uusi ympyräaalto, joka taipuu aallonmurtajan taakse.
- b) Jos mereltä saapuu aalto suoraan aallonmurtajan muodostamaan aukkoon, aukon kohdalla oleva vene kohtaa nämä aallot. Tämän veneen kohtaamilla aalloilla on likimain sama aallonpituus, amplitudi, taajuus ja nopeus kuin mereltä aallonmurtajaan tulevalla aallolla, mikäli meren syvyys ei merkittävästi muutu.

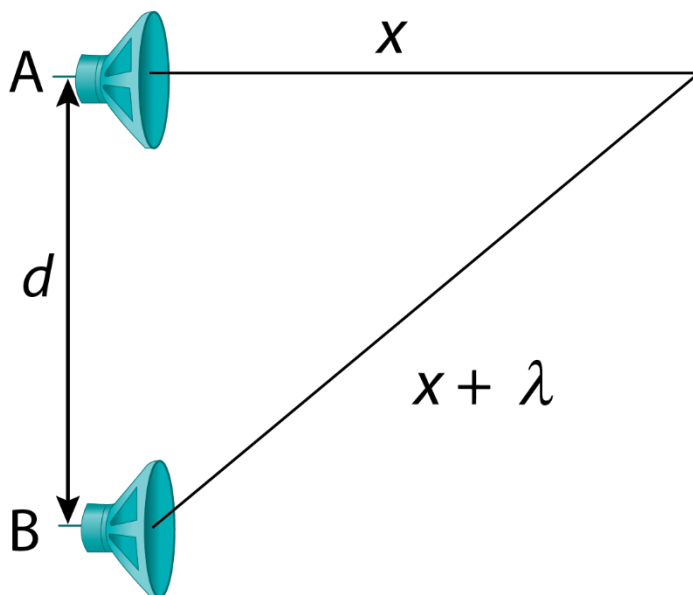
Aallonmurtajan pää synnyttää Huygensin periaatteen mukaan ympyräaaltoja. Aallonmurtajan takana olevat veneet kohtaavat nämä syntyneet ympyräaallot. Ympyräaaltojen taajuus on sama, mutta amplitudi on pienempi kuin mereltä aallonmurtajalle saapuvalla aaltoliikkeellä.

Tehtävä 13.14.

Ääni kuuluu voimakkaimmin kohdissa, joissa kaiuttimista lähtevien ääniaaltojen välillä on vahvistava interferenssi. Lisäksi etäisyyden äänilähteisiin pitää olla mahdollisimman pieni, sillä äänen voimakkuus pienenee etäisyyden kasvaessa.

Oikeanpuoleisen kaiuttimen edessä edelliset ehdot voivat toteutua, kun etäisyys vasemmanpuoleisesta kaiuttimesta on yhden aallonpituuden pidempi kuin etäisyys oikeanpuoleisesta kaiuttimesta.

Ratkaistaan etäisyys oikeanpuoleisesta kaiuttimesta Pythagoraan lauseen avulla.



$$x^2 + d^2 = (x + \lambda)^2$$

$$x^2 + d^2 = x^2 + 2x\lambda + \lambda^2$$

$$d^2 = 2x\lambda + \lambda^2$$

$$x = \frac{d^2 - \lambda^2}{2\lambda} = \frac{(2,00 \text{ m})^2 - (0,780 \text{ m})^2}{2 \cdot 0,780 \text{ m}} = 2,174 1026 \text{ m} \approx 2,17 \text{ m}$$

Ääni, jonka aallonpituus on 0,780 m, on voimakkaimmillaan oikeanpuoleisen kaiuttimen edessä, kun etäisyys kaiuttimesta on 2,17 m.

Tehtävä 13.15.

Järveltä tulee tasoaaltoja. Tasoaaltojen suunta kauempana järvellä on eri kuin lähellä rantaa, joten tasoaalto on taittunut. Kun aalto kohtaa kiven, kiven ympäristöön syntyy uusia ympyräaaltoja. Kun aalto tulee rantaan, aallon korkeus kasvaa juuri, kun aalto saavuttaa rannan. Aalto vaimenee, kun se osuu rantaan.

Tehtävä 13.16.

Diffraktiokuvio havaitaan reikälevyn oikealla puolella todennäköisemmin tilanteessa 1, koska aallon vaihe on sama molempien reikien kohdalla, kun aaltorintamat ovat reikälevyn suuntaisia. Sen sijaan tilanteessa 2 aallon vaihe ei ole välttämättä sama molempien reikien kohdalla, jolloin läpimenneiden aaltojen vahvistus jää heikommaksi kuin tilanteessa 1.

Tehtävä 13.17.

Arkielämässä havaitaan diffraktio, kun veden pinta-aalto osuu kiven reunaan ja kiven reunan taakse syntyy ympyräaalto. Äänen diffraktio havaitaan, kun opiskelija puhuu käytävällä vähän matkan päässä luokan avoimesta ovesta ja ääni kuuluu luokkaan.

Tehtävä 13.18.

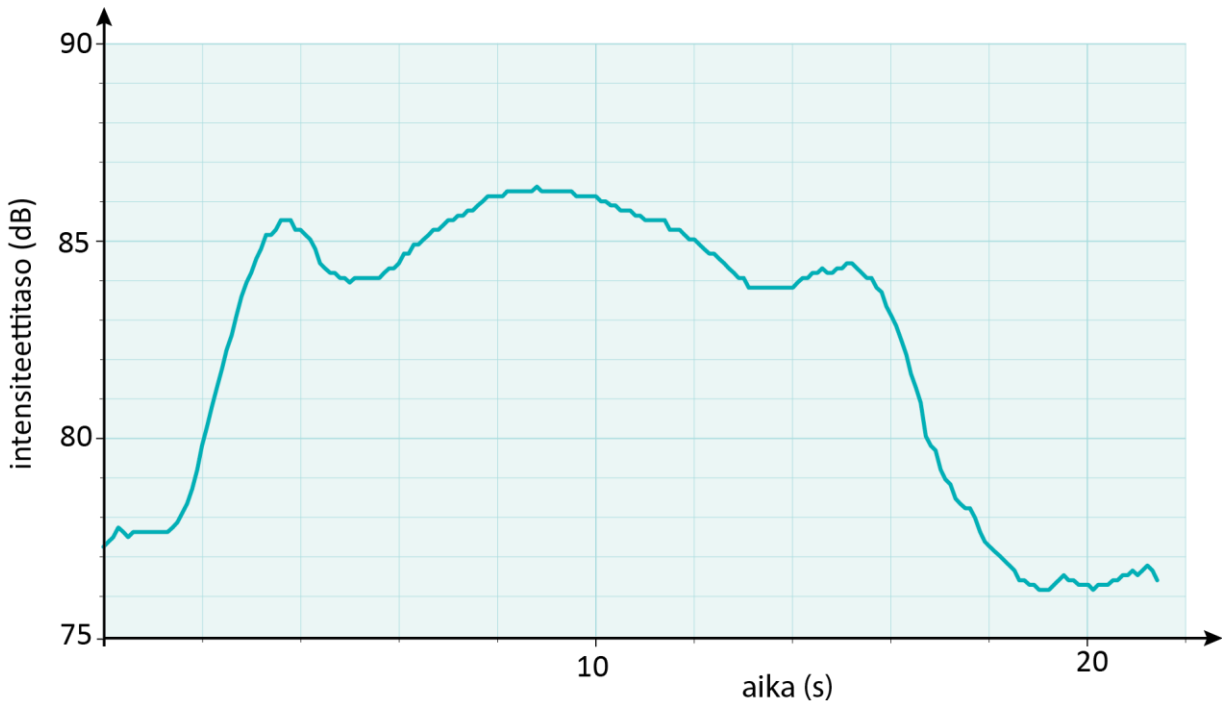
- a) Mitä kapeampi rako on, sitä voimakkaampana diffraktio ilmenee.

- b) Aaltojen amplitudi ei vaikuta diffraktiokuvion muotoon. Diffraktiokuviot kuitenkin erottuvat paremmin suurella amplitudilla kuin pienellä.

- c) Diffraktiokuviossa ei voi havaita kohtia, jotka pysyisivät paikallaan. Kun aalto etenee, heikentävän ja vahvistavan interferenssin paikat kulkevat aallonharjojen ja aallonpohjien mukana.

Tehtävä 13.19.

a)



b) Kuvaajasta havaitaan kolme intensiteettitason huippua. Keskimäinen huipuista on laajin ja intensiteettitaso on suurimmillaan noin 86 dB. Reunimmaisten ja keskimäisen huipun välillä on intensiteettitason alentuma. Kuvaaja on lähes symmetrinen keskimäisen intensiteettitason suhteen.

c) Intensiteettitason huiput kuvaavat tilanteita, joissa kaiuttimien lähettämät ääniaallot vahvistavat toisiaan ja intensiteettitason alenemat tilanteita, jossa ääniaallot heikentävät toisiaan. Molemmat reunoilla olevat intensiteettitason maksimit kuvaavat tilannetta, jossa ääniaaltojen matkaero kaiuttimista on tasan yhden aallonpituuden mittainen. Reunoilla olevat intensiteettimaksimien sivuilla intensiteettitaso putoaa selvästi. Tämä voidaan selittää mikrofonin etäisyydellä äänilähteestä. Kun etäisyys kaiuttimista kasvaa, intensiteettitaso pienenee selvästi.

Tehtävä 13.20.

- a) Vastamelukuulokkeen mikrofoni ja siihen liitetty mikropiiri mittaavat ja laskevat taustaäänien taajuutta ja amplitudia. Näiden tietojen perusteella kuulokkeen kaiuttimiin syötetään vastaääntä, jonka vaihe on vastakkainen taustaääneen verrattuna. Tapahtuu destruktiivinen interferenssi, jolloin taustaääni vaimenee kuulokkeissa.
- b) Kaiuttimien tuottaman vastaäänien pitää olla taustaääneen verrattuna vastakkaisessa vaiheessa. Vastakkainen vaihe tarkoittaa 180° :n lisäystä taustaäänien vaiheeseen eli $45^\circ + 180^\circ = 225^\circ$. Lisäksi pitää huomioida signaalin prosessointiaika $0,10$ ms, jonka aikana taustaäänien vaihe ehtii muuttua.

Harmonisen aallon funktiossa $y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi f}{v}x - 2\pi ft + \varphi\right)$

aika huomioidaan termissä $2\pi ft$, jossa

$f = 1$ kHz = 1000 1/s ja $t = 0,1$ ms = $0,0001$ s. Kulma

2π on sama kuin 360 astetta. Vaihekulman muutos

$0,1$ ms aikana on $360^\circ \cdot ft = 360^\circ \cdot 1000 \frac{1}{s} \cdot 0,0001 s = 36^\circ$.

Kaiuttimien tuottaman vastaäänien vaiheen pitää olla $225 - 36$ astetta, eli 189 astetta.

c) Aineiston perusteella taustääni aiheuttaa mikrofonin kalvoon värähtelyä, jolloin kondensaattorin jännite muuttuu. Mikrofonin kondensaattorin jännite on $U = \frac{Q}{C}$, jossa Q on kalvojen pysyvä varaus ja C on kapasitanssi, joka riippuu kalvojen välisestä etäisyydestä d eli $C \sim \frac{1}{d}$.

Koska kalvojen välinen etäisyys vaihtelee välillä $0,80d - 1,20d$, kun sijoitetaan kalvojen etäisyys yhtälöön $C \sim \frac{1}{d}$, saadaan kapasitanssin arvoiksi $0,8333C - 1,25C$.

Kun kapasitanssin arvot sijoitetaan yhtälöön $U = \frac{Q}{C}$, saadaan jännitteeksi $0,80U - 1,20U$. Toisin sanoen mikrofoni aiheuttaa vaihtojännitesignaalin, jonka amplitudi on $0,20U$ ja taajuus on $1,0$ kHz.

Tehtävä 13.21.

- a) Kun kamera on alussa paikallaan, kuultavan äänen korkeus ja voimakkuus eivät muutu. (1 p) Kun kamera liikkuu kohti kaiutinta, havaitaan äänen voimakkuuden kasvu. (1 p) Kun kamera liikkuu seinän taakse, kuullaan ääni (1 p), jonka voimakkuus on pienempi kuin äänen voimakkuus oviaukon kohdalla (1 p), mutta äänen taajuus ei muutu. (1 p)

b) Kun äänilähde ja havaitsija ovat paikoillaan, havaitsijan kuuleman äänen taajuus on sama kuin äänilähteen lähettämän äänen taajuus. (1 p)

Äänen voimakkuus ei muutu, sillä äänen voimakkuus riippuu äänen intensiteetistä. Intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. (1 p) Kun havaitsija on paikoillaan, ei havaitsijan etäisyys muutu, jolloin äänen voimakkuus ei muutu. (1 p)

Kun havaitsija liikkuu kohti kaiutinta, pienenee havaitsijan etäisyys äänilähteeseen nähden. Tällöin äänen intensiteetti kasvaa ja ääni kuullaan voimakkaampana. (2 p)

Ääni kuuluu, vaikka havaitsija siirtyy seinän taakse. Tämä aiheutuu äänen diffraktiosta. (1 p) Kun ääniaalto osuu oven reunaan, osa ääniaallosta taipuu oven taakse. (1 p). (Jos ei ole erikseen mainittu, että vain osa taipuu, niin tästä kohdasta 0 p). Taipuminen ei vaikuta äänen taajuuteen, joten kuullun äänen korkeus ei muutu. (1 p) Osa kaiuttimen lähettämästä äänestä absorboituu seinään ja heijastuu seinäpinnasta. Tämän vuoksi seinän takana kuullun äänen voimakkuus on pienempi kuin oviaukon kohdalla. (2 p)