Tallinna Ülikool

peacecop kalmer:

Akustika muusikas praktikaraport

seminaritöö

Katrin Laas

Harku 2022-2023

Sisukord

1 Reeglistik **9**

2 Kõrv ja kuulmine **11**
2.1 Teooria 11
2.2 Eesmärk 11
2.3 Töövahendid 11
2.4 Heli samavaljusjoone mõõtmine iseendal 12
2.5 Heli kuulmise sageduste ulatus 15

3 Heli intensiivsus ja interferentsist **17**
3.1 Heli intensiivsus 17
3.2 Interferents 25

4 Intervallid **31**
4.1 Teooria 31
4.2 Eesmärgid 31
4.3 Töövahendid 31
4.4 Töö käik 31
4.5 Tulemused 33
4.6 Arutelu 44

Välised allikad **45**

Joonised

2.1 Samafoonid. Rohelisega on märgitud juhendaja viidatud mõõtmisvahendiga testitud graafik, punasega uuema mõõtmisvahendiga testitud graafik. Musta värvi joonega on kirjeldatud n-ö keskmise noore täiskasvanud inimese kuulmist[1(lk 14-52)] ja selle asukoht võrreldes muud värvi graafikutega ei pruugi olla õige. 14

3.1 Võimsusintensiivsuse sõltuvus kaugusest. 24
3.2 Helilainete interferents kõlarite üksteise kõrval paiknemise korral. Konstruktiivse interferentsi alad on esitatud pruuni värviga, destruktiivse interferentsi alad sinise värviga. 27
3.3 Helilainete interferents kõlarite üksteisest eemal paiknemise korral. Konstruktiivse interferentsi alad on esitatud pruuni värviga, destruktiivse interferentsi alad sinise värviga. 28

Tabelid

3.1 Heli intensiivsus. 23

4.1 Intervallide sagedused. 38
4.2 Konsonantne ja dissonantne kolmkõla. 43

Peatükk 1

Reeglistik

```
I_0 <- 1e-12  # 1
```

Inimese kuulmislävel on võimsustihedus $1 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$[1(lk 14-52)].

Helitaseme arvutamiseks võimsustiheduste järgi saab kasutada valemit (1.1) leheküljel 9. Selle valemi dimensionaalanalüüs on esitatud avaldises (1.2) leheküljel 9, millest johtuvalt on ühik 1 või spetsiifiliselt detsibell.

$$\beta = 10 \times \log(\frac{I}{1 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}}}) \tag{1.1}$$

[2(lk 331)].

$$1 \times \log(\frac{\frac{\mathrm{M}\times\mathrm{L}\times\mathrm{L}}{\mathrm{T}^3\times\mathrm{L}^2}}{\frac{\mathrm{M}\times\mathrm{L}\times\mathrm{L}}{\mathrm{T}^3\times\mathrm{L}^2}}). \tag{1.2}$$

```
#' This function calculates the sound level.  # 1
#'                                             # 2
#' @param I the power intensity                # 3
#'                                             # 4
```

```r
#' @returns the sound level                    # 5
calculate_sound_level <- function(I) {        # 6
  return(10 * log10(I / I_0))                 # 7
}                                             # 8
```

Avaldan helitaseme valemist (1.1) leheküljel 9 võimsusintensiivsuse avaldises (1.5) leheküljel 10

$$\frac{\beta}{10} = \log(\frac{I}{1 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}}}) \tag{1.3}$$

$$10^{\frac{\beta}{10}} = \frac{I}{1 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}}} \tag{1.4}$$

$$I = 1 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}} \times 10^{\frac{\beta}{10}}. \tag{1.5}$$

```r
#' This function calculates the power intensity.  # 1
#'                                                # 2
#' @param beta the sound level                    # 3
#'                                                # 4
#' @returns the power intensity                   # 5
calculate_power_intensity <- function(beta) {     # 6
  return(I_0 * 10^(beta / 10))                    # 7
}                                                 # 8
```

Võimsusintensiivsuse sõltuvus kaugusest on esitatud avaldises (1.6) leheküljel 10.

$$I = \frac{P}{4 \times \pi \times r^2}, \tag{1.6}$$

milles P on võimsus ja r kaugus heliallikast[2(lk 310)].

Peatükk 2

Kõrv ja kuulmine

2.1 Teooria

inimesed kuulevad sama sagedusega heli eri valjusega ning isegi sama inimene kuuleb eri sagedusega helisid, mis on tegelikult sama võimsusintensiivsusega, eri valjusega.

2.2 Eesmärk

Oma kõrva samafooni kõver on määratud.

2.3 Töövahendid

1. Arvuti.
2. *WH-1000XM4* kõrvaklapid[3].
3. Samavaljuse test võrgus[4].
4. Suurima sageduse test võrgus[5].

2.4 Heli samavaljusjoone mõõtmine iseendal

2.4.1 Töö käik

1. Ühendasin kõrvaklapid arvutiga *Bluetooth*'i kaudu esimese peamise seadmena.

2. Avasin samavaljuse testi saidi.

3. Klikkisin heli sageduse 1 kHz vertikaalselt keskel asuvale paneelile. Hindasin helivaljuse sobivaks: see ei olnud liiga vali ning ületas taustahelide valjuse. Märkisin graafikule 2.1 leheküljel 14 testitud heli sageduse ja valjuse.

4. Klikkisin viimati testitud heli sagedusele vahetult vasemal asuvas tulbas samal kõrgusel olevale paneelile, kuulasin ja võrdlesin heli valjust. Kui heli valjus vasemas paneelis oli suurem kui paremas, klikkisin vasemast paneelist vahetult madalamal olevale paneelile. Kui ka see heli oli liiga vali võrreldes parema paneeli heliga, siis liikusin niimoodi testides mööda vasemaid paneele allapoole, kuni leidsin paneeli, mille heli valjus oli sama mis paremas paneelis. Kui vasema paneeli heli oli hoopis nõrgem võrreldes parema paneeli heliga, siis liikusin mööda vasemaid paneele ülespoole, kuni leidsin paneeli, mille heli valjus oli sama mis parema paneeli heli valjus. Märkisin vasema paneeli heli valjuse graafikule.

5. Kordasin sammu 4 tegevusi, kuni vasemal polnud enam paneele.

6. Klikkisin heli sagedusele 1 kHz vahetult paremal asuvas tulbas samal kõrgusel olevale paneelile, kuulasin ja võrdlesin heli valjust. Kui heli valjus paremas paneelis oli suurem, klikkisin paremast paneelist vahetult madalamal olevale paneelile. Kui ka see heli oli liiga vali võrreldes parema paneeli heliga, siis liikusin niimoodi testides mööda paremaid paneele allapoole, kuni leidsin paneeli, mille valjus oli sama mis sagedusele 1 kHz paneelis. Kui parema paneeli heli oli hoopis nõrgem võrreldes sageduse 1 kHz heliga, siis liikusin mööda paremaid

paneele ülespoole, kuni leidsin paneeli, mille heli valjus oli sama mis sageduse 1 kHz heli valjus. Märkisin parema paneeli heli valjuse graafikule.

7. Kordasin sammu 6 tegevusi, kuni paremal polnud enam paneele.
8. Ühendasin graafikule kantud punktid sujuva joonega.
9. Kordasin sammude 3-9 tegevusi saidil oleval uuemal mõõtmise vahendil.

2.4.2 Tulemus

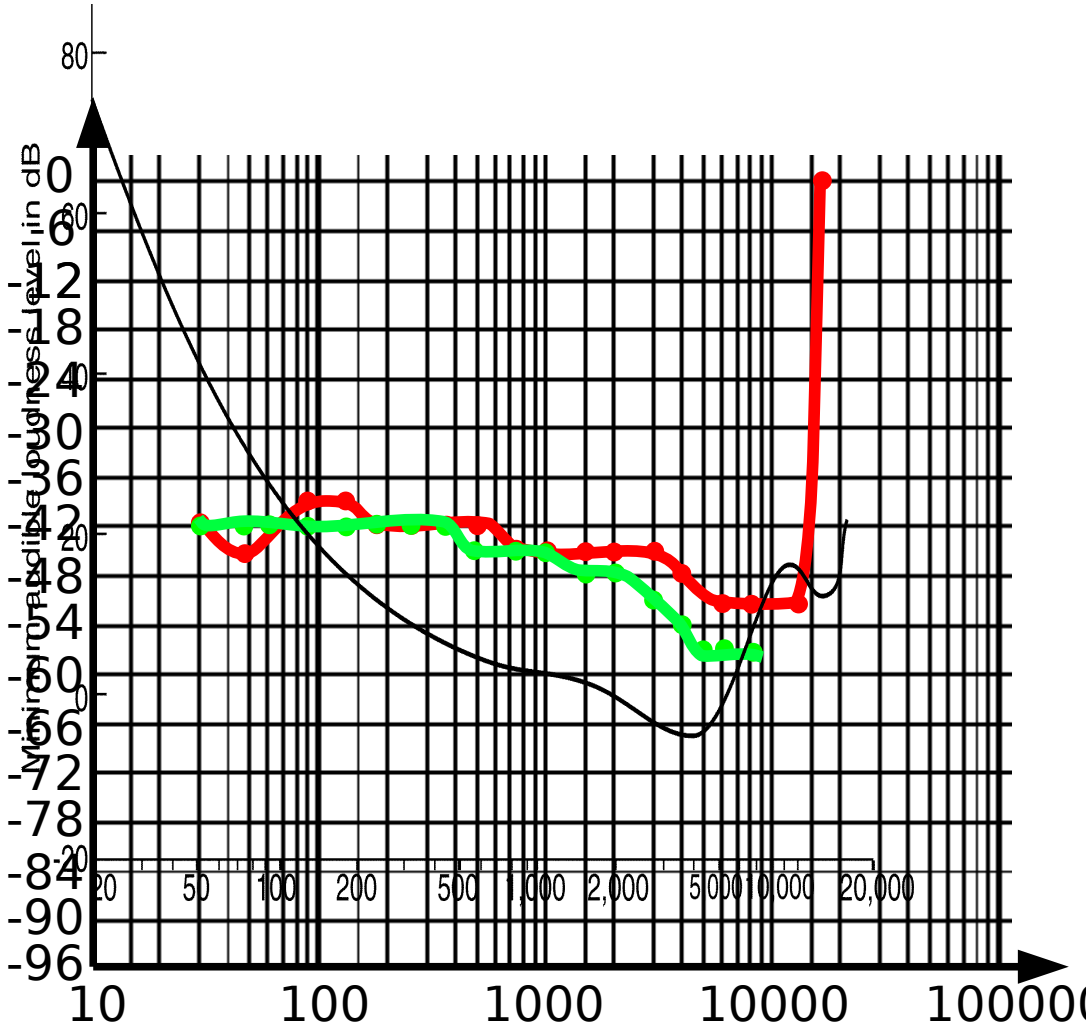
Samafoonid on esitatud joonisel 2.1 leheküljel 14.

juhendaja viidatud mõõtmisvahendiga ei kuulnud ma sagedusel 16 kHz mitte midagi peale sahina, mis viitas sellele, et helifail küll mängib, aga heli kuulda ei ole. Uuema mõõtmisvahendiga kuulsin nimetatud sagedusel üksnes kõige valjemat heli ning sedagi ainult esimesel korral. Ilmselt see mõõtmisvahend siiski hästi ei toimi.

2.4.3 Arutelu

minu saadud samavaljusjooned joonisel 2.1 leheküljel 14 kirjeldavad, kuidas ma tajusin sama valjust heli eri sagedustel. Kui võrreldes originaalsagedusega kuulsin sama valjusega heli mingil muul sagedusel valjemini, siis sellel muul sagedusel on mu kuulmine tundlikum. Kui võrreldes originaalsagedusega kuulsin sama valjusega heli mingil muul sagedusel vaiksemini, siis sellel muul sagedusel on mu kuulmine tundetum. Sagedusest 1 kHz väiksema sagedusega heli kuulen järelikult enamasti tundetumalt ja sellest referentssagedusest suurema sagedusega heli enamasti tundlikumalt.

Kandsin graafikule ka n-ö standardse noore täiskasvanud inimese kuulmise graafiku teosest *CRC Handbook of Chemistry and Physics*[1(lk 14-52)]. Paigutasin selle musta graafikuna enda graafikutest veidi madalamale, sest



Joonis 2.1: Samafoonid. Rohelisega on märgitud juhendaja viidatud mõõtmisvahendiga testitud graafik, punasega uuema mõõtmisvahendiga testitud graafik. Musta värvi joonega on kirjeldatud n-ö keskmise noore täiskasvanud inimese kuulmist[1(lk 14-52)] ja selle asukoht võrreldes muud värvi graafikutega ei pruugi olla õige.

ma ei usu, et mina inimese kuulmisvaljuse alampiiril midagi kuulen. Näeme, et musta graafiku kuju vastab vahemikus 500 Hz to (numerical range) 5000 Hz minu rohelisele graafikule. Keskmine täiskasvanud inimene kuuleb vastavalt graafikute kujule kehvemini kui mina helisid madalamal sagedusel kui 500 Hz ja kõrgemal sagedusel kui 5000 Hz.

Kahel erineval inimesel täpselt sama heli samavaljusjoon ei saa olla, kuivõrd pole olemas kaht täpselt ühesugust inimest. Samas, kui arvestada mõõtevahendis olevaid vahemikke, siis selle vahendiga mõõtes on küll võimalik, et lausa paljudel inimestel on samavaljusjoon ühesugune.

Kui tahaksin joonistada samavaljusjoone muu valjusega helide kohta, siis selleks valin lävendsageduse 1 kHz korral mingi muu algvaljuse referentsiks võrreldes sellega, mille oma eksperimendis valisin.

Kuulmisläve fooni väärtus on null.

Eksperimendi kaudu sain teada, et minu kuulmine on eri sagedusega helide puhul erinev. Eksperiment oli seetõttu edukas.

2.5 Heli kuulmise sageduste ulatus

2.5.1 Töö käik

1. Ühendasin kõrvaklapid arvutiga *Bluetooth*'i kaudu esimese peamise seadmena.
2. Avasin maksimaalse sageduse testi lehe.
3. Testisin helifaili ja sättisin helivaljuse selliseks, et oleks mugav kuulata.
4. Käivitasin helifaili algusest ja lasin sellel mängida, kuni ma peaaegu enam ei kuulnud, ning peatasin mängimise registreerides ühtlasi sageduse.
5. Vaheldumisi lasin failil edasi mängida lühidalt, et kuuleksin, kas on veel kuulda või mitte. Kui oli kuulda, siis registreerisin sageduse ja jätkasin testimist, kuni enam kuulda ei olnud.

2.5.2 Tulemus

Maksimaalne heli sagedus, mille puhul ma seda veel kuulsin, oli $14\,417$ Hz.

Peatükk 3

Heli intensiivsus ja interferentsist

3.1 Heli intensiivsus

3.1.1 Teooria

Heliallikast kaugenedes väheneb heli võimsusintensiivsus pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga.

3.1.2 Eesmärk

Uuritud, kuidas heli intensiivsus kahaneb kauguse kasvades.

3.1.3 Töövahendid

1. Digitaalne heligeneraator[6].
2. Kõlar *SRS-XB20*[7].
3. Nutitelefon.
4. Nutitelefoni rakendus *SPARKvue*[8].
5. Joonlaud skaalaga kuni $40{,}5\,\mathrm{cm}$.

3.1.4 Töö käik

1. Asetasin joonlaua lauale nii, et joonlaua mõõdiku algus oli kõlari väljundi vastas.
2. Avasin *SPARKvue*.
3. Lõin uue eksperimendi valides sensoriks sisseehitatud mikrofoni ning lasin mõõta nii helitaset kui -intensiivsust. Mõõtmismeetodiks valisin käsitsimõõtmise.
4. Avasin digitaalse heligeneraatori ja käivitasin heli sinusoidgraafikuna sagedusel $440\,\mathrm{Hz}$.
5. Käivitasin mõõtmise.
6. Paigutasin nutitelefoni lauale lebama, nii et mikrofon oli $5\,\mathrm{cm}$ kaugusel kõlari väljundist.
7. Fikseerisin helitaseme ja -intensiivsuse.
8. Paigutasin nutitelefoni lauale lebama, nii et mikrofon oli $10\,\mathrm{cm}$ kaugusel kõlari väljundist.
9. Fikseerisin helitaseme ja -intensiivsuse.
10. Paigutasin nutitelefoni lauale lebama, nii et mikrofon oli $20\,\mathrm{cm}$ kaugusel kõlari väljundist.
11. Fikseerisin helitaseme ja -intensiivsuse.
12. Paigutasin nutitelefoni lauale lebama, nii et mikrofon oli $30\,\mathrm{cm}$ kaugusel kõlari väljundist.
13. Fikseerisin helitaseme ja -intensiivsuse.
14. Paigutasin nutitelefoni lauale lebama, nii et mikrofon oli $40\,\mathrm{cm}$ kaugusel kõlari väljundist.
15. Fikseerisin helitaseme ja -intensiivsuse.
16. Lõpetasin mõõtmise.

17. Lülitasin heligeneraatori genereerima heli sagedusel 100 Hz.
18. Kordasin samme 5-16.
19. Lülitasin heligeneraatori välja.
20. Eksportisin andmed Comma-Separated-Values-kujul.
21. Koostasin eksporditud andmetega tabeli 3.1 leheküljel 23.

```
imported_sound_levels <- read.table("rmd/akustika-2.csv", header =
↪  TRUE, sep = ",", dec = ".")
↪  # 1
r_cm <- c(5, 10, 20, 30, 40)
↪  # 2
r_m <- r_cm * 1e-2
↪  # 3
I_at_440_Hz_calculated <- calculate_power_intensity(beta =
↪  imported_sound_levels$Sound.Level..dBC..Run.1)
↪  # 4
I_at_440_Hz = imported_sound_levels$Sound.Intensity..µW.m...Run.1 *
↪  1e-6
↪  # 5
I_at_100_Hz_calculated <- calculate_power_intensity(beta =
↪  imported_sound_levels$Sound.Level..dBC..Run.2)
↪  # 6
I_at_100_Hz = imported_sound_levels$Sound.Intensity..µW.m...Run.2 *
↪  1e-6
↪  # 7




sound_levels <- data.frame(
↪  # 9
  r_cm = r_cm,
   ↪  # 10
```

```
  r_m = r_m,
   ↪ # 11
  L_at_440_Hz = imported_sound_levels$Sound.Level..dBC..Run.1,
   ↪ # 12
  I_at_440_Hz_calculated = I_at_440_Hz_calculated,
   ↪ # 13
  I_at_440_Hz = I_at_440_Hz,
   ↪ # 14
  L_at_100_Hz = imported_sound_levels$Sound.Level..dBC..Run.2,
   ↪ # 15
  I_at_100_Hz_calculated = I_at_100_Hz_calculated,
   ↪ # 16
  I_at_100_Hz = I_at_100_Hz
   ↪ # 17
)
 ↪ # 18



librarian::shelf(c(
 ↪ # 20
  "dplyr",
   ↪ # 21
  "kableExtra"
   ↪ # 22
))
 ↪ # 23



colnames(sound_levels) <- c(
 ↪ # 25
```

```
  "$\\frac{\\mathrm{Kaugus}}{\\unit{\\cm}}$",
   ↪  # 26
  "$\\frac{\\mathrm{Kaugus}}{\\unit{\\m}}$",
   ↪  # 27
  "$\\frac{\\mathrm{Helitase}}{\\mathrm{dB}}$",
   ↪  # 28

   ↪  paste("$\\frac{\\text{Võimsusintensiivsus}}{\\unit{\\W\\per\\m\\squared}
   ↪  footnote_marker_number(1)),
   ↪  # 29

   ↪  paste("$\\frac{\\text{Võimsusintensiivsus}}{\\unit{\\W\\per\\m\\squared}
   ↪  footnote_marker_number(2)),
   ↪  # 30
  "$\\frac{\\text{Helitase}}{\\mathrm{dB}}$",
   ↪  # 31

   ↪  paste("$\\frac{\\text{Võimsusintensiivsus}}{\\unit{\\W\\per\\m\\squared}
   ↪  footnote_marker_number(1)),
   ↪  # 32

   ↪  paste("$\\frac{\\text{Võimsusintensiivsus}}{\\unit{\\W\\per\\m\\squared}
   ↪  footnote_marker_number(2))
   ↪  # 33
)
 ↪  # 34



print_table(
 ↪  # 36
  table = sound_levels,
   ↪  # 37
```

```
  caption = "Heli intensiivsus.",
   ↪  # 38
  digits = 7,
   ↪  # 39
  footnotes = c(
   ↪  # 40
    paste("minu koostatud funktsiooniga arvutatuna kasutades
     ↪  võimsusintensiivsuse valemit \\@ref(eq:power-intensity)
     ↪  leheküljel ", render_pageref(reference =
     ↪  "eq:power-intensity", escape = TRUE)), # 1  # 41
    "$SPARKvue$ arvutatuna" # 2
     ↪  # 42
  ),
 ↪  # 43
  additional_header = c(
   ↪  # 44
    " " = 2,
     ↪  # 45
    "Sagedus $\\\\qty{440}{\\\\Hz}$" = 3,
     ↪  # 46
    "Sagedus $\\\\qty{100}{\\\\Hz}$" = 3
     ↪  # 47
  )
 ↪  # 48
) %>%
 ↪  # 49
  landscape()
   ↪  # 50
```

Tabel 3.1: Heli intensiivsus.

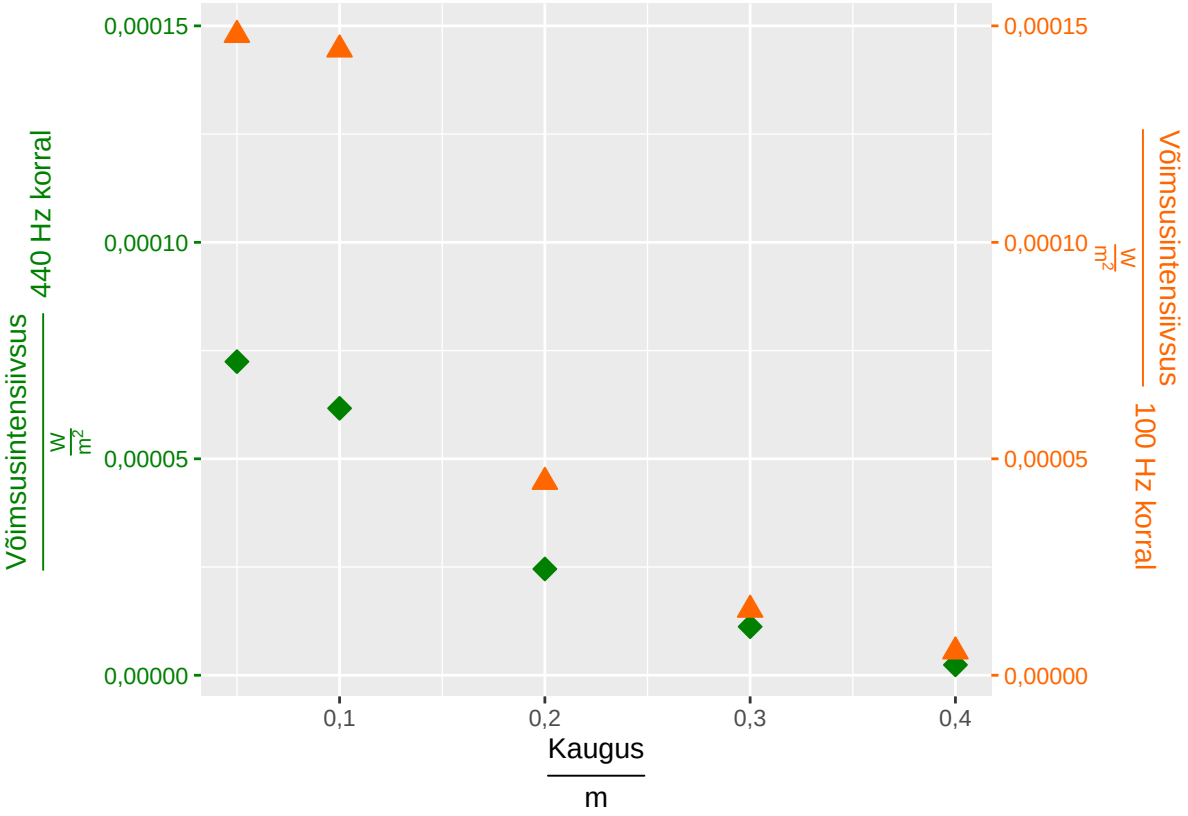
		Sagedus 440 Hz			Sagedus 100 Hz		
Kaugus cm	Kaugus m	Helitase dB	Võimsusintensiivsus 1 W m^{-2}	Võimsusintensiivsus 2 W m^{-2}	Helitase dB	Võimsusintensiivsus 1 W m^{-2}	Võimsusintensiivsus 2 W m^{-2}
5	0,05	78,6	7,24e-05	7,16e-05	81,7	0,0001479	0,0001495
10	0,10	77,9	6,17e-05	6,10e-05	81,6	0,0001445	0,0001447
20	0,20	73,9	2,45e-05	2,46e-05	76,5	0,0000447	0,0000446
30	0,30	70,5	1,12e-05	1,12e-05	71,8	0,0000151	0,0000150
40	0,40	63,8	2,40e-06	2,40e-06	67,4	0,0000055	0,0000055

[1] minu koostatud funktsiooniga arvutatuna kasutades võimsusintensiivsuse valemit (1.5) leheküljel 10

[2] $SPARKvue$ arvutatuna

able} \end{landscape}

22. Koostasin graafiku, mille horisontaalsel teljel on kaugus ja püstisel teljel võimsusintensiivsus (joonis 3.1 leheküljel 24).



Joonis 3.1: Võimsusintensiivsuse sõltuvus kaugusest.

3.1.5 Arutelu

Vastavalt võimsusintensiivsuse sõltuvuse valemile kaugusest heliallikast (1.6) leheküljel 10 on võimsusintensiivsus pöördruutsõltuvuses kaugusest heliallikast. Vastavalt sellele valemile: mida suurem on kaugus heliallikast, seda väiksem on võimsusintensiivsus. Jooniselt 3.1 leheküljel 24 on näha, et kui mikrofon oli kõlari väljundile hästi lähedal, siis oli heli võimsusintensiivsus võrdlemisi suur ja kaugenedes heli intensiivsus vähenes. Eriti hästi paistab see välja 100 Hz heli puhul.

```
perceived_change_in_I <- calculate_power_intensity(beta = 2)  # 1
```

Inimkõrv tajub helitaseme muutumist üksnes paari detsibelli ulatuses[2(lk 332)],

see on $2 \times 10^{-12}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$.

Jooniselt on näha, et enamasti oli väiksema sagedusega heli võimsusintensiivsuse muutus suurem. Seega võib järeldada, et heli intensiivsuse kahanemine sõltub heli sagedusest. Samas, väikese vahemaa puhul oli väiksema sagedusega intensiivsuse muutus väiksem kui suurema sagedusega heli puhul, nii et otsest sõltuvust ei saa välja lugeda. Suurema sagedusega olev heli kipub heliallikast teatud kauguses hajuma, kui kuni selle kauguseni ilmselt muutub heliintensiivsus sõltumata sagedusest.

3.2 Interferents

3.2.1 Teooria

Kohas, kus eri heliallikatest pärit helilainete laineharjad- või nõod liituvad, on tajutav heli kõige võimsam. Kohas, kus ühest heliallikast pärit heli lainehari kohtub teisest heliallikast pärit heli lainepõhjaga, kostub heli kõige vaiksemalt.

3.2.2 Eesmärk

Uuritud, kuidas tekib heli interferents ja kuidas me seda kuuleme.

3.2.3 Töövahendid

1. Digitaalne heligeneraator[6].
2. *SRS-XB20* kõlar[7].
3. *Redmi Note 10 Pro* nutitelefon mõõtmiseks.
4. Nutitelefoni rakendus *SPARKvue*[8].
5. *LG X screen*i nutitelefon teise kõlarina.
6. Mõõdulint.
7. Eraldi arvuti vahendina 2 märgitud kõlariga ühendamiseks.

3.2.4 Töö käik

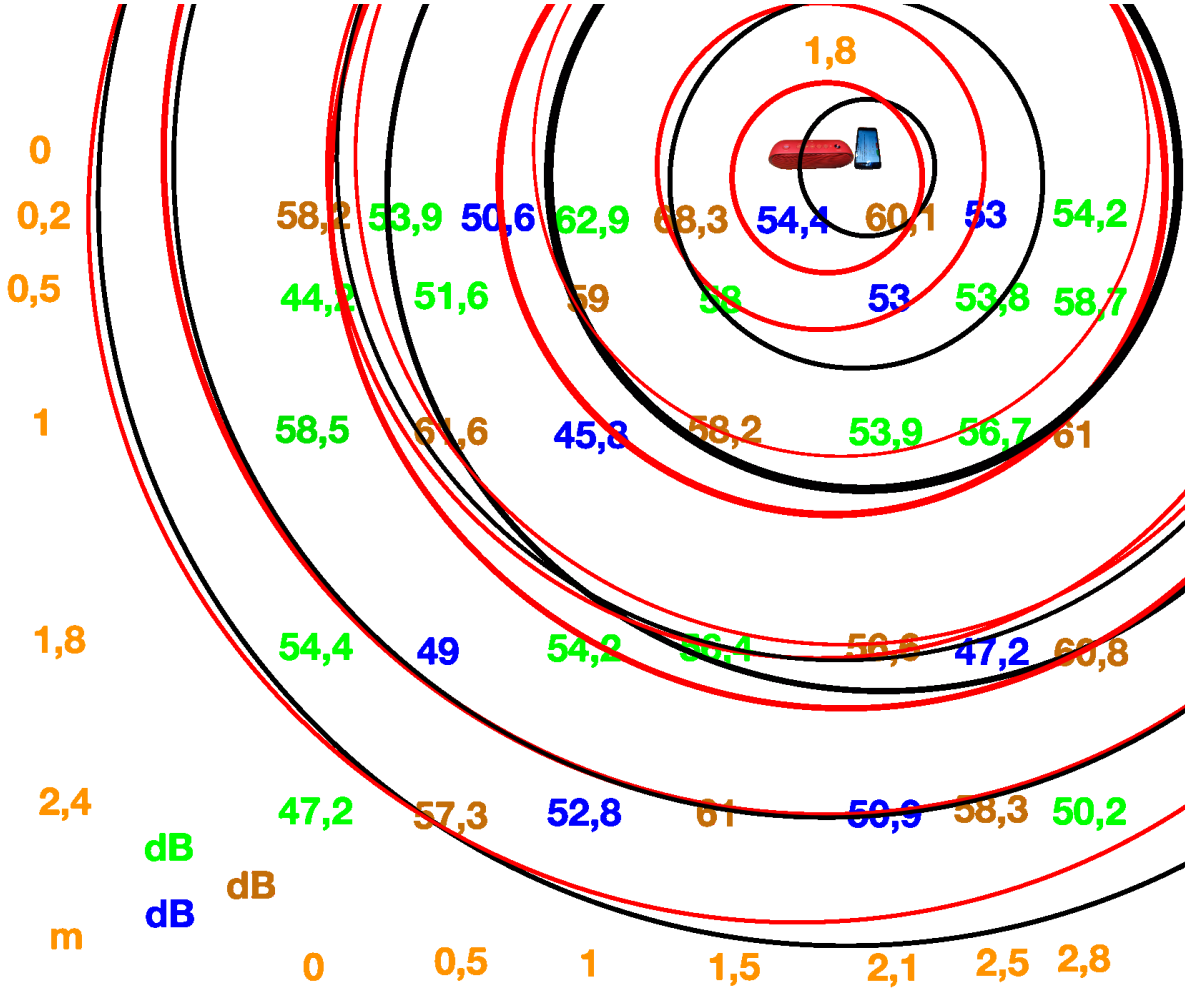
1. Sättisin kõlarid üksteise kõrvale.
2. Tekitasin ruumi virtuaalse võrgu nii, et iga sõlm asuks visuaalselt meeldejäävas kohas. Mõõtsin iga sõlme kauguse ühest seinast ning seinaga risti olevast kõlaritesihist ning märkisin kaugused üles.
3. Avasin *SPARKvue*.
4. Lõin uue eksperimendi valides sensoriks sisseehitatud mikrofoni ning lasin mõõta nii helitaset kui -intensiivsust. Mõõtmismeetodiks valisin käsitsimõõtmise.
5. Avasin digitaalse heligeneraatori sülearvutis ja käivitasin heli sinusoidgraafikuna sagedusel $440\,\mathrm{Hz}$.
6. Avasin digitaalse heligeneraatori vahendis 5 ja käivitasin heli sinusoidgraafikuna sagedusel $440\,\mathrm{Hz}$.
7. Sättisin kummagi kõlari helivaljuse sarnaseks.
8. Käivitasin mõõtmise.
9. Liikusin järjest läbi kõik virtuaalse võrgu sõlmed ja igas sõlmes registreerisin helitaseme.
10. Lõpetasin mõõtmise.
11. Paigutasin kõlarid üksteisest eemale jättes need samale sammul 2 mainitud kõlaritesihile.
12. Kordasin samme 8-10.
13. Lõpetasin heligeneraatorite genereerimise.
14. Eksportisin andmed Comma-Separated-Values-vormingus.
15. Käivitasin heligeneraatori vahendisse 2 sagedusel $500\,\mathrm{Hz}$.
16. Käivitasin heligeneraatori vahendisse 5 sagedusel $500\,\mathrm{Hz}$.
17. Asetasin vahendi 2 endast $2\,\mathrm{m}$ kaugusele ja vahendi 5 endast $1{,}4\,\mathrm{m}$

kaugusele.

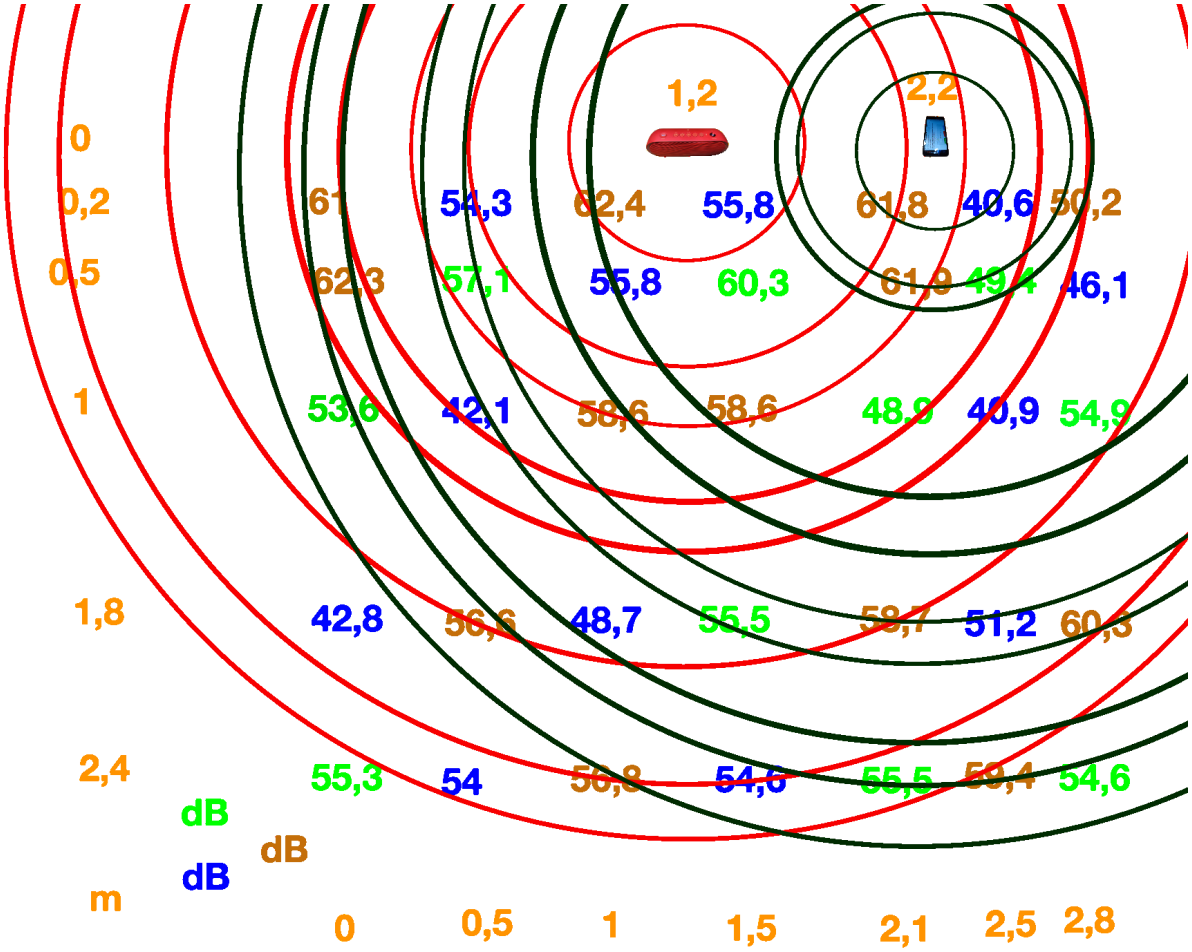
18. Kogesin heli nii sammul 17 nimetatud enda asukohas kui sellest veidi eemal ühe kõrvaga ja kahe kõrvaga.

3.2.5 Tulemused

Tulemused kõlarite üksteise kõrval paiknemise korral tehtud mõõtmiste järel on esitatud joonisel 3.2 leheküljel 27 ja tulemused kõlarite üksteisest eemal paiknemise korral tehtud mõõtmiste järel on esitatud joonisel 3.3 leheküljel 28.



Joonis 3.2: Helilainete interferents kõlarite üksteise kõrval paiknemise korral. Konstruktiivse interferentsi alad on esitatud pruuni värviga, destruktiivse interferentsi alad sinise värviga.



Joonis 3.3: Helilainete interferents kõlarite üksteisest eemal paiknemise korral. Konstruktiivse interferentsi alad on esitatud pruuni värviga, destruktiivse interferentsi alad sinise värviga.

3.2.6 Arutelu

Kohtades, kus kummagi kõlari helilainete harjad või põhjad liitusid, oli helitase kõige kõrgem. Kohtades, kus ühe kõlari helilaine hari ja teise kõlari helilaine põhi liitusid, oli helitase kõige madalam. Mõõta neid kohti kõrvakuulmise järgi oli üsna võimatu, sest seleks pidanuks hoidma nutitelefoni mikrofoni täpselt kõrva juures ja oskama vajutada õigele virtuaalsele nupule. Seetõttu veendusin eelnevalt, et ruumis esinevad eri helivaljusega kohad, ning toimetasin mõõtmise hiljem eraldi.

Kui kõlarid olid üksteisest eemal, siis oli valjemaid ja vaiksemaid kohti lihtsam eristada.

Juhendis kästakse vaadata illustratsioonipilti interferentspildi kohta ühelt lehelt, mida enam ei ole. Seetõttu ma ei saanud ka sellel pildil midagi teha.

Heli sagedusel $500\,\mathrm{Hz}$ kogemine kahest eri kaugusel olevast kõlarist kahe kõrvaga andis ainult mõju, et ma ei saanud aru, kuskohast heli täpselt tuleb. Kui kuulasin ainult ühe kõrvaga, siis ühest kõlarist $2\,\mathrm{m}$ ja teisest $1{,}4\,\mathrm{m}$ kaugusel olles oli helitase madalam kui ümbruskonnas. Järelikult oli selles punktis tegemist destruktriivse interferentsiga.

Kahe või enama helilaine interferentsi tuleb arvestada ruumides, kus heli peab ühtlaselt kostuma. Destruktiivset interferentsi saab kasutada kõrvaklappides ümbritseva müra summutamiseks. Selleks salvestavad kõrvaklapid välist müra ja mängivad seda kõrva pärismüraga sirgnurga all faasinihkes. Kui on vaja hoopis destruktiivset inteferentsi minimeerida, toimetatakse vastupidi ja pannakse kõlarid sõltuvalt asukohast mängima üksteise suhtes faasinihkes.[9].

Peatükk 4

Intervallid

4.1 Teooria

Helitoonidel on igaühel oma sagedus, mille suhe tähendab heliintervalli. Sõltuvalt sageduste suhtest on helide kooskõla meeldiv kuulata või mitte.

4.2 Eesmärgid

1. Intervallid kui sageduste suhted uuritud.
2. Konsonantsete ja dissonantsete kooskõlade tekkimine mõistetud.

4.3 Töövahendid

1. Multiple Tone Generator[10].
2. *Audacity*[11].

4.4 Töö käik

1. Vastavalt juhendile *Recording desktop audio*[12] seadistasin *Audacity* salvestama arvuti väljundheli.

2. Avasin vahendi 1.
3. Lülitasin sisse väikese sekundi[13] helid[1(lk 14-51)].
4. Jäädvustasin *Audacity*'ga mõne sekundi seda helidekombinatsiooni.
5. Lülitasin helid välja.
6. Lasin kuvada graafiku vastavalt juhendile *Plot Spectrum*[14] valides valimi suuruseks 32768.
7. Liigutasin hiirekursoriga iga kõrgeima tipu alale ja tuvastasin kõikvõimalikud eri sagedused, mille *Audacity* ära tundis, ja täitsin saadud andmetega tabelit 4.1 leheküljel 38.
8. Lisasin tabelisse referentsnootide andmed[1(lk 14-51)].
9. Lülitasin sisse suure sekundi (juhendis on terts) helid.
10. Kordasin samme 4-8.
11. Lülitasin sisse väikese tertsi heild.
12. Kordasin samme 4-8.
13. Lülitasin sisse suure tertsi helid.
14. Kordasin samme 4-8.
15. Lülitasin sisse puhta kvardi helid.
16. Kordasin samme 4-8.
17. Lülitasin sisse puhta kvindi helid.
18. Kordasin samme 4-8.
19. Lülitasin sisse suure seksti helid.
20. Kordasin samme 4-8.
21. Lülitasin sisse väikese septimi helid.
22. Kordasin samme 4-8.
23. Lülitasin sisse suure septimi helid.

24. Kordasin samme 4-8.
25. Lülitasin sisse puhta oktaavi helid.
26. Kordasin samme 4-8.
27. Lasin arvutada sageduste suhted.
28. Lülitasin sisse toonika kolmkõla helid[15].
29. Kordasin samme 4-6.
30. Liigutasin hiirekursori iga kõrgeima tipu alale ja tuvastasin kõikvõimalikud eri sagedused, mille *Audacity* ära tundis, ja täitsin saadud andmetega tabelit 4.2 leheküljel 43.
31. Lisasin tabelisse referentsnootide andmed[1(lk 14-51)].
32. Lülitasin sisse sekstakordi helid[16].
33. Kordasin samme 29-31.
34. Lülitasin sisse dissonantse kolmkõla helid[17].
35. Kordasin samme 29-31.
36. Lasin arvutada sageduste suhted.

4.5 Tulemused

Kakskõlade tulemused on kantud tabelisse 4.1 leheküljel 38.

```
note_1 <- c("$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{C_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{C_4}$")           # 1
note_2 <- c("$\\mathrm{C\\#_4}$", "$\\mathrm{D_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{D\\#_4}$", "$\\mathrm{E_4}$", "$\\mathrm{F_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{G_4}$", "$\\mathrm{A_4}$", "$\\mathrm{A\\#_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{B_4}$", "$\\mathrm{C_5}$")  # 2
```

```r
f_1 <- c(262, 262, 262, 262, 262, 262, 262, 262, 262, 262)
 ↪  # 3
f_2 <- c(277, 294, 311, 330, 349, 392, 440, 466, 494, 523)
 ↪  # 4
f_1_reference <- c(261.63, 261.63, 261.63, 261.63, 261.63, 261.63,
 ↪  261.63, 261.63, 261.63, 261.63)
 ↪  # 5
f_2_reference <- c(277.18, 293.66, 311.13, 329.63, 349.23, 392, 440,
 ↪  466.16, 493.88, 523.25)
 ↪  # 6
f_2_over_f_1 <- f_2 / f_1
 ↪  # 7
f_2_reference_over_f_1_reference <- f_2_reference / f_1_reference
 ↪  # 8



intervals = data.frame(
 ↪  # 10
  note_1 = note_1,
   ↪  # 11
  note_2 = note_2,
   ↪  # 12
  f_1 = f_1,
   ↪  # 13
  f_2 = f_2,
   ↪  # 14
  f_1_reference = f_1_reference,
   ↪  # 15
  f_2_reference = f_2_reference,
   ↪  # 16
  f_2_over_f_1 = f_2_over_f_1,
   ↪  # 17
```

```
  f_2_reference_over_f_1_reference = f_2_reference_over_f_1_reference
   ↪  # 18
)
 ↪  # 19



colnames(intervals) = c(
 ↪  # 21
  "1. noot",
   ↪  # 22
  "2. noot",
   ↪  # 23
  "$\\frac{\\text{1. noodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}$",
   ↪  # 24
  "$\\frac{\\text{2. noodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}$",
   ↪  # 25
  "$\\frac{\\text{1. referentsnoodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}$",
   ↪  # 26
  "$\\frac{\\text{2. referentsnoodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}$",
   ↪  # 27
  "Mõõdetud nootide sageduste suhe",
   ↪  # 28
  "Referentsnootide ligikaudne sageduste suhe"
   ↪  # 29
)
 ↪  # 30



rownames(intervals) = c(
 ↪  # 32
```

```
  "m2",
   ↪  # 33
  "M2",
   ↪  # 34
  "m3",
   ↪  # 35
  "M3",
   ↪  # 36
  "P4",
   ↪  # 37
  "P5",
   ↪  # 38
  "M6",
   ↪  # 39
  "m7",
   ↪  # 40
  "M7",
   ↪  # 41
  "P8"
   ↪  # 42
)
 ↪  # 43



librarian::shelf(c(
 ↪  # 45
  "dplyr",
   ↪  # 46
  "kableExtra"
   ↪  # 47
))
 ↪  # 48
```

```
print_table(table = intervals, caption = "Intervallide sagedused.") %>%
 ↪  column_spec(8, width = "5em") %>% column_spec(9, width = "5em") %>%
 ↪  landscape()
 ↪  # 50
```

Tabel 4.1: Intervallide sagedused.

	1. noot	2. noot	1. noodi sagedus / Hz	2. noodi sagedus / Hz	1. referentsnoodi sagedus / Hz	2. referentsnoodi sagedus / Hz	Mõõdetud nootide sageduste suhe	Referentsnootide ligikaudne sageduste suhe
m2	C_4	$C\#_4$	262	277	261,63	277,18	1,06	1,06
M2	C_4	D_4	262	294	261,63	293,66	1,12	1,12
m3	C_4	$D\#_4$	262	311	261,63	311,13	1,19	1,19
M3	C_4	E_4	262	330	261,63	329,63	1,26	1,26
P4	C_4	F_4	262	349	261,63	349,23	1,33	1,33
P5	C_4	G_4	262	392	261,63	392,00	1,50	1,50
M6	C_4	A_4	262	440	261,63	440,00	1,68	1,68
m7	C_4	$A\#_4$	262	466	261,63	466,16	1,78	1,78
M7	C_4	B_4	262	494	261,63	493,88	1,89	1,89
P8	C_4	C_5	262	523	261,63	523,25	2,00	2,00

\end{landscape}

Kolmkõlade tulemused on kantud tabelisse 4.2 leheküljel 43.

```
f_tonic_1 <- 261.63
 ↪  # 1
f_tonic_2 <- 329.63
 ↪  # 2
f_tonic_3 <- 392
 ↪  # 3
f_sext_3 <- 523.25
 ↪  # 4
f_dissonant_2 <- 466.16
 ↪  # 5
f_dissonant_3 <- 554.37
 ↪  # 6
note_in_triad_1 <- c("$\\mathrm{C_4}$", "$\\mathrm{E_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{G_4}$")
 ↪  # 7
note_in_triad_2 <- c("$\\mathrm{E_4}$", "$\\mathrm{G_4}$",
 ↪  "$\\mathrm{A\\#_4}$")
 ↪  # 8
note_in_triad_3 <- c("$\\mathrm{G_4}$", "$\\mathrm{C_5}$",
 ↪  "$\\mathrm{C\\#_5}$")
 ↪  # 9
f_in_triad_1 <- c(f_tonic_1, f_tonic_2, f_tonic_3)
 ↪  # 10
f_in_triad_2 <- c(f_tonic_2, f_tonic_3, f_dissonant_2)
 ↪  # 11
f_in_triad_3 <- c(f_tonic_3, f_sext_3, f_dissonant_3)
 ↪  # 12
ratio_tonic_2_1 <- f_tonic_2 / f_tonic_1
 ↪  # 13
```

```
ratio_tonic_3_1 <- f_tonic_3 / f_tonic_1
 ↪  # 14
ratio_sext_2_1 <- f_tonic_3 / f_tonic_2
 ↪  # 15
ratio_sext_3_1 <- f_sext_3 / f_tonic_2
 ↪  # 16
ratio_dissonant_2_1 <- f_dissonant_2 / f_tonic_3
 ↪  # 17
ratio_dissonant_3_1 <- f_dissonant_3 / f_tonic_3
 ↪  # 18
ratio <- c(paste(signif(ratio_tonic_3_1, digits = 5),
 ↪  signif(ratio_tonic_2_1, digits = 5), 1, sep = ":"),
 ↪  paste(signif(ratio_sext_3_1, digits = 5), signif(ratio_tonic_2_1,
 ↪  digits = 5), 1, sep = ":"), paste(signif(ratio_dissonant_3_1, digits
 ↪  = 5), signif(ratio_dissonant_2_1, digits = 5), 1, sep = ":"))  # 19



triads <- data.frame(
 ↪  # 21
  note_in_triad_1 = note_in_triad_1,
   ↪  # 22
  note_in_triad_2 = note_in_triad_2,
   ↪  # 23
  note_in_triad_3 = note_in_triad_3,
   ↪  # 24
  f_in_triad_1 = f_in_triad_1,
   ↪  # 25
  f_in_triad_2 = f_in_triad_2,
   ↪  # 26
  f_in_triad_3 = f_in_triad_3,
   ↪  # 27
```

```
  ratio = ratio
   ↪  # 28
)
 ↪  # 29



colnames(triads) <- c(
 ↪  # 31
  "1. noot",
   ↪  # 32
  "2. noot",
   ↪  # 33
  "3. noot",
   ↪  # 34
  "$\\mathrm{\\frac{\\text{1. noodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}}$",
   ↪  # 35
  "$\\mathrm{\\frac{\\text{2. noodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}}$",
   ↪  # 36
  "$\\mathrm{\\frac{\\text{3. noodi sagedus}}{\\unit{\\Hz}}}$",
   ↪  # 37
  "Kolmkõla sageduste suhe"
   ↪  # 38
)
 ↪  # 39



rownames(triads) <- c(
 ↪  # 41
  "Toonika kolmkõla",
   ↪  # 42
```

```
  "Sekstakord",
   ↪  # 43
  "Dissonantne kolmkõla"
   ↪  # 44
)
 ↪  # 45



librarian::shelf(c(
 ↪  # 47
  "dplyr",
   ↪  # 48
  "kableExtra"
   ↪  # 49
))
 ↪  # 50



print_table(table = triads, caption = "Konsonantne ja dissonantne
 ↪  kolmkõla.") %>% landscape()
 ↪  # 52
```

Tabel 4.2: Konsonantne ja dissonantne kolmkõla.

	1. noot	2. noot	3. noot	$\frac{\text{1. noodi sagedus}}{\text{Hz}}$	$\frac{\text{2. noodi sagedus}}{\text{Hz}}$	$\frac{\text{3. noodi sagedus}}{\text{Hz}}$	Kolmkõla sageduste suhe
Toonika kolmkõla	C_4	E_4	G_4	261,63	329,63	392,00	1,4983:1,2599:1
Sekstakord	E_4	G_4	C_5	329,63	392,00	523,25	1,5874:1,2599:1
Dissonantne kolmkõla	G_4	$A\#_4$	$C\#_5$	392,00	466,16	554,37	1,4142:1,1892:1

\end{landscape}

4.6 Arutelu

Mõõdetud intervallide nootide suhe oli sama mis referentsnootide sageduste suhe. Graafikult saab välja lugeda, millise sagedusega helid on kõige võimsamad. Kuna nende helide sagedused olid mul sisestatud heligeneraatorisse ja see tegi järelikult õige sagedusega heli, mida *Audacity* oskas ka õigesti analüüsida. Tarkvara näitas küll sagedusi täisarvulisena, mis olid referentsraamatus esitatud arvud ümardatuna. Nii kujunesidki sageduste suhted ühesuguseks.

mulle tundub, et igasugune testitud helide kooskõla n-ö kriipis kõrva, välja arvatud puhas oktaav. Seega peaks sageduste suhe olema täisarvuline, et kooskõla oleks minu jaoks konsonantne.

Puhta oktaavi puhul võngub heli noodi C_4 puhul kaks korda, et täis saada liitlaine periood. Seejuures võngub heli noodi C_5 puhul ühe korra.

Puhta kvindi puhul võngub heli noodi C_4 puhul kolm korda, et täis saada liitlaine periood. Seejuures võngub heli noodi G_4 puhul kaks korda.

Dissonantses kolmkõlas on kasutuses noote, millega koos kolmkõla ei ole meeldiv kuulata. Konsonantses kolmkõlas selliseid noote kasutuses pole. Dissonantset kolmkõla kuuleme dissonantsena, kuna selle helide sageduste suhe on dissonantne.

Muusika on produkt, mille tootmine põhineb füüsikal ja matemaatikal isegi siis, kui muusika looja neid valdkondi ei kasuta. Kõik siin maailmas võngub mingil sagedusel ning see, kuidas selle maailma osad kokku sobivad, sõltub, kuidas võnkesagedused kokku sobivad.

Välised allikad

1. Haynes, W. M. (2014). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th Edition. Taylor & Francis Ltd.
2. Giancoli, D. C. (2014). Physics : principles with applications. Pearson.
3. Sony WH-1000XM4 Wireless Noise Cancelling Headphones. (s.a.). Sony. Salvestatud 25. jaanuar 2023, https://www.sony.com/lr/electronics/headband-headphones/wh-1000xm4
4. Equal loudness contours and audiometry - Test your own hearing. (s.a.). www.animations.physics.unsw.edu.au. https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/hearing.html
5. Hearing Test - Online Tone Generator - Free, Quick, No Sign Up Required. (s.a.). onlinetonegenerator.com. Salvestatud 26. jaanuar 2023, https://onlinetonegenerator.com/hearingtest.html?
6. Online Tone Generator - Free, Simple and Easy to Use. (s.a.). onlinetonegenerator.com https://onlinetonegenerator.com/
7. Support for SRS-XB20 | Sony USA. (s.a.). www.sony.com. Salvestatud 26. jaanuar 2023, https://www.sony.com/electronics/support/speakers-wireless-speakers/srs-xb20?cpint=rvi
8. SPARKvue® Software. (s.a.). PASCO scientific. Salvestatud 26. jaanuar 2023, https://www.pasco.com/products/software/sparkvue#overview-panel
9. 18.3: Normal Modes of a Standing Sound Wave. (2022). Physics LibreTexts. https://phys.libretexts.org/Sandboxes/tmzoughi_at_gsu.edu/GSU-TM-Physics_I_(2211)/18%3A_Wave_Interference_and_Standing_Waves/18.03%3A_Normal_Modes_of_a_Standing_Sound_Wave
10. Multiple Tone Generator. (s.a.). onlinetonegenerator.com. Salvestatud 26.

jaanuar 2023, https://onlinetonegenerator.com/multiple-tone-generator.html

11. Audacity. (2019). Audacity ® | Free, open source, cross-platform audio software for multi-track recording and editing. Audacityteam.org. https://www.audacityteam.org/
12. Recording desktop audio - Audacity Support. (2023). Audacityteam.org. https://support.audacityteam.org/basics/recording-desktop-audio
13. Watson, A. (2022). Musical Intervals - An Important Part of Music Theory. EzMusicBox.com. https://ezmusicbox.com/blog/musical-intervals/#comment-374
14. Plot Spectrum - Audacity Manual. (s.a.). manual.audacityteam.org. https://manual.audacityteam.org/man/plot_spectrum.html
15. Bayer, J. (2022). What is tonic in the key of C major? TimesMojo. https://www.timesmojo.com/what-is-tonic-in-the-key-of-c-major/
16. Sixth chord. (2022). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Sixth_chord
17. Grimm, G. (s.a.). Constructing Major, Minor, Augmented and Diminished Triads. MusicTheorySite. Salvestatud 27. jaanuar 2023, https://musictheorysite.com/triads/