



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KÕLARIELEMENDI MAGNETAHELA MODELLEERIMINE JA 3D-PRINTIMINE

MODELLING AND 3D PRINTING THE MAGNETIC CIRCUIT OF A LOUDSPEAKER

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marcus Pärtel

Üliõpilaskood: 213732EAAB

Juhendaja: Martin Sarap, doktorant-
nooremteadur

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"....." 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." 2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Marcus Pärtel,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kõlarielemendi magnetahela modelleerimine ja 3D-printimine“,

mille juhendaja on Martin Sarap,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Marcus Pärtel, 213732EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/17 - Elektroenergeetika ja mehhatroonika;
elektroenergeetika

Juhendaja: doktorant-nooremteadur Martin Sarap

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kõlarielemendi magnetahela modelleerimine ja 3D-printimine

(inglise keeles) Modelling and 3D Printing the Magnetic Circuit of a Loudspeaker

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida 3D-printimise võimalusi kõlarielementide valmistamisel
2. Modelleerida olemasolevale kõlarielemendile efektiivsem magnetahel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetiliste põhitõdede leidmine ja analüüs	22.12.2023
2.	Varasemate uurimuste tulemuste analüüs	23.01.2024
3.	Poest ostetava kõlari lammutamine ja osade modelleerimine	16.02.2024
4.	Paremate omadustega osade modelleerimine	29.03.2024
5.	Osade 3D-printimine	26.04.2024
6.	Esmane versioon valmis	03.05.2024
7.	Lõplik versioon valmis	09.05.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "....."..... 2024 a

Üliõpilane: Marcus Pärtel

.....

"....."..... 2024 a

/ allkiri /

Juhendaja: Martin Sarap

.....

"....."..... 2024 a

/ allkiri /

Programmijuht: Marek Tull

.....

"....."..... 2024 a

/ allkiri /

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna	6
Sissejuhatus	7
1. Elektromagnetiline valjuhääldi	8
1.1 Valjuhääldi ehitus	9
1.2 Elektromagnetism valjuhääldis	10
1.2.1 Mähise elektromagnetism	11
1.2.2 Magnetahela elektromagnetism	13
1.3 Kihtlisandusmeetodil magnetahelate loomine	16
2. Optimeeritud magnetahela modelleerimine ja valmistamine	19
2.1 Varasemad uuringud magnetahela optimeerimise kohta	21
2.2 Valjuhääldi elektromagnetiline mudel	22
2.3 Magnetahela topoloogia optimeerimine	25
2.4 Topoloogia optimeerimise tulemused	27
2.5 Optimeeritud magnetahela prototüüp	30
3. Mõõtetulemused	34
3.1 Järeldused	36
Kokkuvõte	37
Summary	38
Kasutatud kirjanduse loetelu	39

EESSÕNA

Lõputöö teema andis juhendaja Martin Sarap. Antud teema pakkus autorile kohe huvi ja mõtteainet. Autoril on olnud läbi aegade huvi helitehnika vastu ning antud teema sobis ideaalselt, et veelgi rohkem teadmisi koguda. Töö koostati varasematest uuringutest pärit andmete ja ideede edasiarendustest ning neid uurides suurenes uudishimu veelgi.

Autor soovib tänada juhendajat Martin Sarapit meeldiva koostöö ja innustamise eest. Lisaks tänusõnad ka autori isale, kes pakkus tuge ja uusi ning huvitavaid mõtteid antud teemal. Metallist eseme 3D-printimise tegi võimalikuks Tallinna Tehnikaülikool.

Märksõnad: 3D-printimine, kõlar, topoloogia optimeerimine, bakalaureusetöö.

SISSEJUHATUS

3D-printimine on esile toonud uusi viise kuidas tooteid disainida väiksema materjalikuluga, efektiivsemalt või vajadusel keeruka kujuga. Praegusel hetkel aga ei ole uuritud, mis uusi võimalusi ja eeliseid pakub kõlarite, valjuhääldite, kõrvaklappide ja muu sarnase helitehnika 3D-printimine. Arvestades, et kõlarite efektiivsus on madal võrreldes enamike elektrit tarbivate seadmetega [1] ning neid kasutatakse üha enam erinevate suurustega seadmetes, siis 3D-printimine annab uusi võimalusi ehitada efektiivsemaid ja väiksemaid kõlareid. Sellest tuleb ka antud töö hüpotees: 3D-printimisega saab muuta kõlarielemendi efektiivsemaks.

Töö eesmärgiks on uurida 3D-printimise poolt pakutavaid arengusuundi kõlarielementide valmistamisel. Eesmärgi saavutamiseks modelleeritakse ja lõpuks printitakse olemasolevale valjuhääldile pehmest magnetmaterjalist südamik, mis oleks efektiivsem kui esialgsel kõlarielemendil olev. Efektiivsema kõlarielemendi saamiseks kasutatakse tarkvara COMSOL, millega viiakse läbi magnetahela topoloogia optimeerimine.

Esimeses peatükis kirjeldatakse akustikaalast teooriat ning kõlarielemendi osasid. Lisaks antakse lühiülevaade valjuhääldite ajaloost. Leitakse vajalikud valemid, graafikud ja joonised, mis aitavad eesmärke saavutada. Selgitatakse kuidas kõlar heli tekitab ehk kuidas toimib kõlar ja selle magnetahel ning milliste füüsikaliste valemite abil on võimalik valjuhääldit optimeerida. Lõpuks kirjeldatakse lühidalt erinevaid 3D-printimise tüüpe.

Teises peatükis kirjeldatakse lähemalt antud töös kasutatavat valjuhääldit. Analüüsitakse varasemat kirjandust ja uurimusi antud teemal ning mainitakse põhilisemaid arenguid. Lisaks kirjeldatakse kuidas antud töös magnetahelat modelleeritakse, simuleeritakse ja optimeeritakse tarkvaras COMSOL. Lõpuks antakse edasi simulatsioonide tulemused ning nende võrdlus.

Kolmandas peatükis kirjeldatakse 3D-printimise protsessi ja läbi viidud katseid. Lisaks võrreldakse katsetulemusi simulatsioonide tulemustega ja tehakse järeldused antud töö tulemuste kohta.

1. ELEKTROMAGNETILINE VALJUHÄÄLDI

Kõlar on vahend, mis on mõeldud heli tekitamiseks. Heli on defineeritud kui õhurõhu muutused ehk vibratsioonid õhus, mida kuuleme oma kõrvadega. Keskmise inimese kõrv kuuleb helisid sagedusega 20 kuni 20 000 hertsi (Hz) [2], kuid vananedes see vahemik väheneb, põhiliselt kõrgemate sageduste arvelt. Inimese kõrv on kõige tundlikum sagedustele vahemikus 2000 kuni 3000 Hz [3], kuid tundlikkus oleneb ka helivaljusest, mida mõõdetakse detsibellides (dB). Detsibell on logaritmiline ühik [4] ja selle tõttu võimsuse suurenemine kaks korda suurendab helivaljust 3 dB. Helilainete kiirus õhus sõltub temperatuurist, niiskustasemest ja rõhust, kuid tavaliselt võetakse arvutustes kiiruseks 343 m/s [2].

Kõlari näol on tegemist muunduriga, mis muundab elektrienergia mehaaniliseks ning selle lõpptulemust kuuleme oma kõrvadega [1]. Kõlar koosneb valjuhääldi(te)st, korpusest ja vajadusel elektroonikaskeemist [5]. Antud töös keskendutakse just valjuhääldi modelleerimisele. Valjuhääldeid on mitmeid erinevaid tüüpe aga siin töös on uurimise all selline, mis koosneb püsomagnetist ja võnkepoolist. Heli tekitajaks on võnkepooli külge kinnitatud koonusekujuline membraan [5]. Sarnaselt elektrimootorile ja -generaatorile, on omavahel seotud ka valjuhääldi ja mikrofon, mis toimivad samadel põhimõtetel ning koosnevad sarnastest komponentidest. Üks tekitab heli elektrilisest signalist, teine muudab helilained elektriliseks signaaliks. Seetõttu on stuudiotel olnud tihti praktikas kasutusel Yamaha NS-10 kõlar hoopis basstrummi mikrofonina [3].

Esimese elektrilise kõlari leiutas sakslane Johann Philipp Reis aastal 1861 oma leiutatud telefoni tarbeks [6]. Kõlar oli võimeline esitama ainult üksikuid toone [7]. Kõlarite algusajal andsid märkimisväärse panuse valjuhääldite arengule Alexander Graham Bell ja Ernst Siemens [7]. Nende seadmed suutsid esitada arusaadavalt ka inimese kõne [7]. Ameeriklased Edward Washburn Kellogg ja Chester Williams Rice patenteerisid esimese liikuva mähisega elektromagnetilise ehk dünaamilise kõlari elemendi aastal 1925 [5], mis on tänapäevaste valjuhääldite otsene eelkäija. Esimestel kümnenditel toimusid suured edasimineked kõlarite kvaliteedis ja võimekuses. Peale seda on areng pidurdunud, sest suuri hüppeid on olnud raske saavutada [5].

Võnkepooli külge kinnitatakse valjuhääldi koonusekujuline membraan. Membraane tehakse paberist, alumiiniumist, süsinikkiust, kevlarist või muust sobivast materjalist [1]. Membraan peab olema võimalikult kerge aga piisavalt tugev ja jäik, et ei painduks heli tekitamise ajal liigselt, sest see tekitaks moonutusi [4].

Koonusekujuline membraan on valjuhääldi raami külge kinnitatud kahest kohast. Koonuse laiemas otsas on kummist [7] ääris, mis laseb membraanil liikuda edasi-tagasi piisavalt vabalt, tagades, et membraan jääks liikuma lineaarselt ettenähtud vahemikus. Koonuse kitsamas otsas on pehmest materjalist, näiteks riidest [7], vedru põhimõttel töötav laineline rõngas, millel on ülesanne hoida membraan oma õiges alas vabalt liikumas. Lisaks on mõlemal kinnitusvahendil ülesanne viia membraan tagasi nii-öelda nullasendisse kui vool kõlari mähisist ei läbi [6].

Membraani keskel on tolmu eest kaitsev kate. Kuna valjuhääldi sees võnkepooli ja pealisplaadi vahel on väga vähe ruumi, ei tohi sinna sattuda tolmu ja selle tõttu ei saa membraani keskele jätta ava, mis aga on vajalik valjuhääldi kokku panemisel [9].



Joonis 1.2 Kõlari osad [9]

1.2 Elektromagnetism valjuhääldis

Antud lõputöös on keskendunud kõlari magnetilise ahela uurimisele, modelleerimisele ja 3D-printimisele. Täiustatakse magnetit ümbritsevat tagaplaati ja pealisplaati.

Kaod valjuhääldis tekivad mähises ja magnetahelas, kus tekivad hüstereesikaod ja pöörivoolukaod [10]. Lisaks tekitavad kadusid reluktants ja õhutakistus [11]. Ilma

rauata kõlariement oleks efektiivsema magnetahelaga, kergem ja vähemate moonutustega, kuid palju keerulisem toota [10].

Joule'i-Lenzi seaduse kohaselt soojendab mähist seda läbiv vool, mis kõrgete temperatuuride korral sulatab üles mähist koos hoidva liimi [12]. Probleemiks on liigne soojus ka magneti jaoks. Pierre Curie järgi nime saanud Curie punkt väljendab seda temperatuuri, millal püsomagnet kaotab oma magnetilised omadused. Nende tõttu on tähtis hoida valjuhääldi temperatuuri kontrolli all [12].

1.2.1 Mähise elektromagnetism

Kõlariemendi toimimine põhineb Lorentzi jõududel [13]. Hans Christian Ørsted leidis, et vool läbides elektrijuhti, tekitab magnetvälja juhi ümber [14]. Helilained muudab mikrofon vahelduvvoolu signaaliks [3]. Esitades kõlariga salvestatud helisid, tekib kõlariemendi mähisesse vahelduvvoolu tõttu muutuv magnetväli, mis püsिमagneti poolt tekitatud magnetvälja tõttu paneb mähise võnkuma [7]. Mähise külge kinnitatud membraan hakkab koos võnkepooliga vibreerima, tekitades sellega kuuldavast heli.

Hendrik Lorentzi järgi nimetatud Lorentzi jõu valem [15]:

$$F = q(E + v \times B) \quad (1.1)$$

kus F - osakesele mõjuv jõud, N;
 E - elektrivälja tugevus, V/m;
 B - magnetvoo tihedus, T;
 q - osakese laeng, C;
 v - osakese kiirus, m/s.

Valemit 1.1 lihtsustatakse ja saadakse Ampère'i seadus [16]:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (1.2)$$

kus B - magnetvoo tihedus, T;
 I - juhti läbiv vool, A;
 l - juhi pikkus, m;
 α - nurk voolu ja magnetvälja suundade vahel.

Jõu suuna määramist Ampère'i seaduse järgi nimetatakse vasaku käe reegliks. Kui vasaku käe väljasirutatud sõrmed osutavad voolu suunda ja magnetväli on suunatud peopessa, siis väljasirutatud põial näitab juhtmelõigule mõjuva jõu suunda [16]. Vooluga juhtmele mõjuv magnetjõud on suunatud alati risti nii voolu kui ka magnetvälja

suunaga [16]. Selle tõttu saab jätta valemist 1.2 välja nurga ja alles jääb ainult juhi pikkuse, voolutugevuse ja magnetvoo tiheduse korrutis. Tuleneb, et magnetvoo tihedus B on magnetjõud, mis mõjub juhile sellega ristuvast magnetväljas [16].

Magnetvoo tiheduse saab leida ka valemiga [13]:

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

kus H - magnetvälja tugevus, A/m;

μ - absoluutne magnetiline läbitavus.

Materjali absoluutne magnetiline läbitavus μ leitakse valemiga [13]:

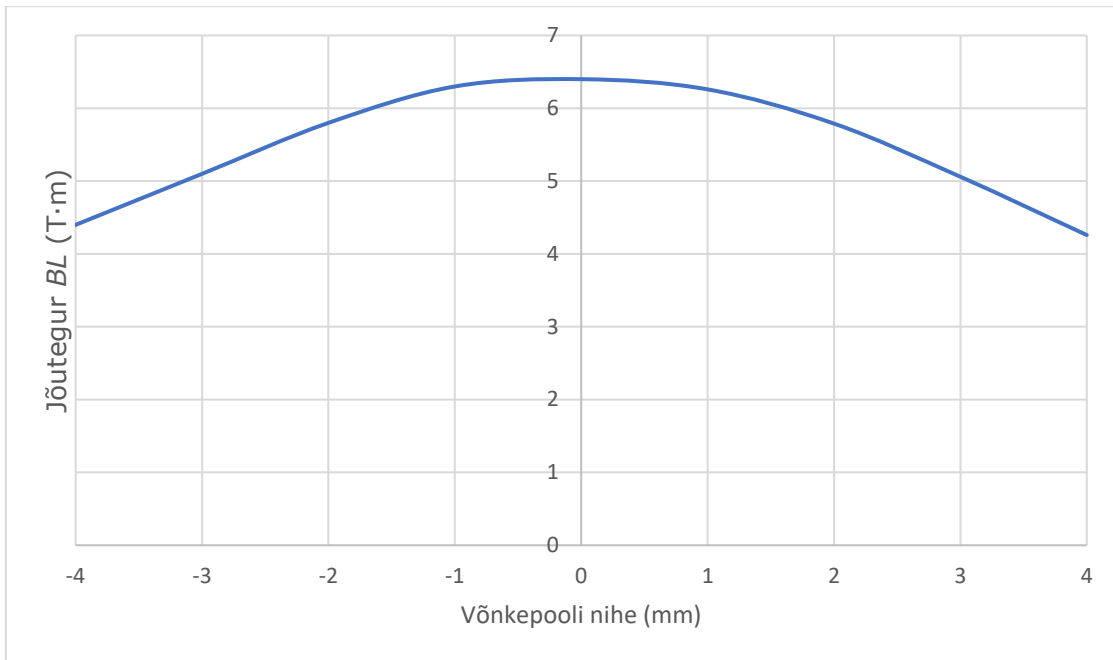
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1.4)$$

kus μ_0 - vaakumi magnetiline läbitavus, $\sim 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m;

μ_r - materjali suhteline magnetiline läbitavus.

Kõlariehituse jaoks on vaja võimalikult suure suhtelise magnetilise läbitavusega materjali ehk ferromagneetikut, sest tähtis on saavutada võimalikult suur magnetvoo tiheduse väärtus õhupilus [13].

Võnkepoolile mõjuva jõu suurus oleneb edasi-tagasi liikuva võnkepooli asendist, sest magnetväli õhupilus pole ühtlane, mistõttu mähisele mõjuvad jõud ei ole ühtlased nagu on näidatud joonisel 1.3. Selle tulemusel võib valjemate helide korral tekkida moonutusi kõlapilti. Magnetilist tugevust näitab jõutegur BL , mis on magnetvoo tiheduse B ja mähise pikkuse L korrutis [17]. BL -i ühikuks võib olla nii T·m kui ka Wb/m. Efektiivse kõlari saavutamiseks oleks vajalik võimalikult suur ja ühtlane BL väärtus mähisega õhupilus. Parema efektiivsuse saavutamiseks peaks olema õhupilu võimalikult kitsas [11].



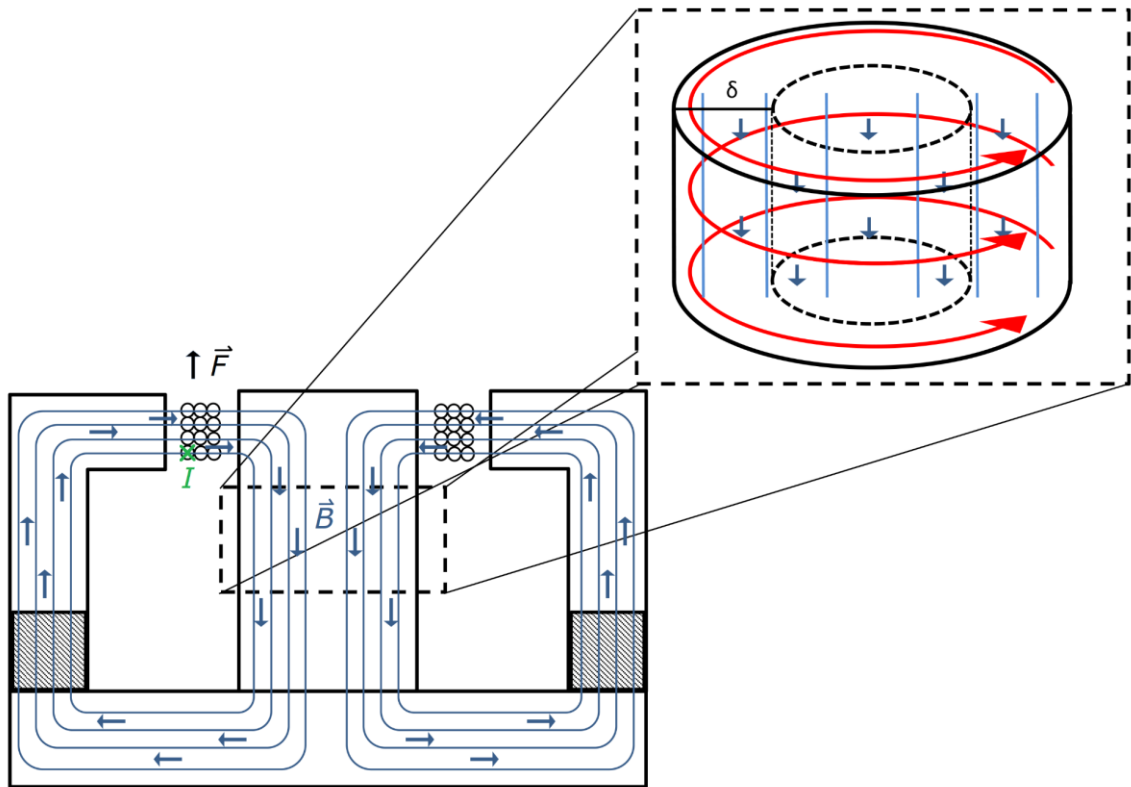
Joonis 1.3 Jõuteguri BL suurus võrreldes võnkepooli asukohaga neutraalpunkti suhtes keskmisel kõlaril [18].

Madalatel sagedustel toimib võnkepool ideaalse poolina [13], kus takistust ja mahtvuskomponenti ei ole. Kõrgematel sagedustel tulevad mängu aga pöörivoolud, mille tõttu võnkepooli ekvivalentsesse aseskeemi tekib lisaks induktiivsusele ka takistus, mis suureneb sageduse kasvades [13].

1.2.2 Magnetahela elektromagnetism

Mähist läbiv vahelduvvool tekitab ajas muutava magnetvälja, mis kandub edasi südamikku, kus tekivad pöörivoolud. Pöörivoolusid kasutatakse edukalt ära näiteks metallidetektorites ja rongi pidurisüsteemides aga kõlari magnetahelas tekitavad need energiakadusid, soojendades kõlari elementi [13].

Vahelduvvoolu muutuva magnetvälja tõttu tekkivaid jõudusid on illustreeritud joonisel 1.4. Lenzi seaduse kohaselt kujutavad pöörivoolud endast magnetvoo tihedust mingi pinna ristlõikes [13]. Sellist ebaühtlast magnetvoo tiheduse jagunemist materjalis nimetatakse pinnaefektiks [13]. See tähendab, et kõlari elemendi südamikus juhib voolu õhuke kiht [11], mistõttu väheneb magnetvoo tugevus valjuhääldi õhupilus ning tekib soojus [13]. Selle tõttu muutub pöörivooludega arvestamine oluliseks, kuna takistus suureneb ja sellega väheneb kõlari võimekus [13]. Pöörivoolude vähendamiseks on soovitatav kasutada lamineeritud taga- ja pealisplaati [17], mida antud lõputöös ei käsitleta.



Joonis 1.4 Jõud kõlarielemendi magnetahelas [13]

Pinnaefekti paksust saab leida valemiga [13]:

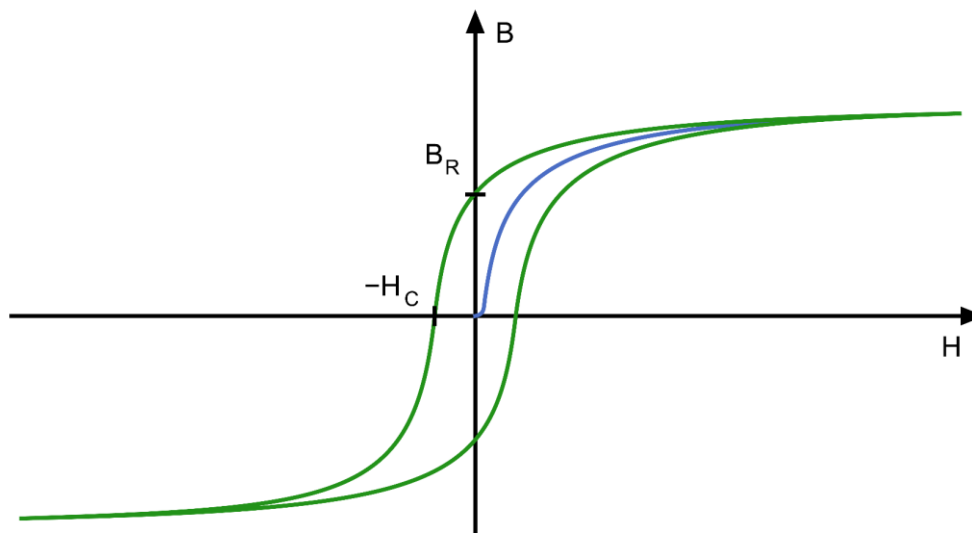
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \quad (1.5)$$

kus σ - juhtivus, S/m;

μ - absoluutne magnetiline läbitavus;

ω - voolu nurksagedus.

Valemi 1.5 järgi on madalatel sagedustel pinnaefekti paksus suurem kui südamiku raadius ja selle tõttu ei oma pöörivoolud tähtsust. Kõrgemate sageduste korral on pinnaefekti paksus väiksem kui on südamiku raadius ja pöörivoolud hakkavad tekitama kadusid ning vähendama õhupilus jõuteguri BL väärtust [13].



Joonis 1.5 Hüstereesisilmus [19]

Jääkmagneetumus (inglise keeles *remanence*) B_R on magneetumus, mis jääb materjali alles peale välise magnetvälja eemaldamist. Jääkmagneetumuse kaotamiseks tuleb ferromagneetikule rakendada vastassuunalist magnetvälja, mille suurus määrab ferromagneetiku koertsitiivsuse H_C [20]. Graafiliselt väljendub see sõltuvus hüstereesisilmusena [21], mis on kujutatud joonisel 1.5.

Koertsitiivsus näitab, kui tugevat magnetvälja on vaja, et demagneetida ferromagneetik [20]. Koertsitiivsuse järgi jagatakse ferromagneetilised materjalid kolme rühma: pehmed, keskmised ja kõvad. Pehmete magnetmaterjalide koertsitiivsus on väike: $H_C < 1$ kA/m. Keskmiste magnetmaterjalide korral $H_C = 1..30$ kA/m ning kõvade magnetmaterjalide $H_C > 30$ kA/m [21]. Kõlarites kasutatav püsomagnet on kõva magnetmaterjal. Tagaplaadi ja pealisplaadina kasutatakse pehmet magnetmaterjali. Jääkmagnetismi vähendavad ka põrutused ja suure amplituudiga vibratsioonid ning püsimagneti soojendamisel üle Curie temperatuuri kaob jääkmagnetism täielikult [20].

Magnetahela reluktants on olemuselt sarnane Oomi seadusega [22]. Reluktants takistab magnetvoo läbi õhu edasi kandumist ühelt esemelt teisele [22]. Ainuke erinevus on Oomi seadusega on, et reluktants ei soojenda elektri juhti. Reluktantsi ühik on H^{-1} ja selle saab leida valemiga [22]:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (1.6)$$

- kus l - magnetvoo teekonna pikkus, m;
 A - magnetvoo teekonna ristlõike pindala, m^2 ;
 μ - absoluutne magnetiline läbitavus;
 \mathcal{F} - magnetomotoorjõud, A.

Valemi 1.6 järgi tuleb välja, et mida väiksem on õhupilu, seda suuremad jõud toimivad õhupilus. Selle valemi tõttu peakski kõlarielemendi õhupilu olema võimalikult kitsas ning mähisega paralleelselt olevad pealisplaadi ja tagaplaadi pinnad võimalikult suure pindalaga.

1.3 Kihtlisandusmeetodil magnetahelate loomine

3D-printimine on viimaste aastatega kõvasti edasi arenenud ning kasvatanud oma populaarsust. On olemas mitmeid tehnoloogiaid, kuidas esemeid kolmemõõtmeliselt printida. Kõige laialt levinum lahendus on ekstrusioon (inglise keeles *Material Extrusion* ehk MEX) [23]. Selleks sulatatakse sobiv materjal, mis siis vastavalt arvutimudelile liikuvast düüsist välja voolab ning kivistub ja kiht-kihi haaval soovitud eseme prindib. Materjalina kasutatakse erinevaid plastikuid, nagu ABS (akrüülnitriilbutadienüstüreen, inglise keeles *acrylonitrile butadiene styrene*) ja PLA (polülaktiid, inglise keeles *polylactic acid*), kuigi võib kasutada ka metalli, betooni ja palju muudki.



Joonis 1.6 SLM printimise protsess [26]

Teine meetod on vaigu kõvastamine (inglise keeles *Vat Polymerization*) [23]. Vedela vaigu peale suunatakse valguskiir, mis muudab vaigu tahkeks ja nii kiht-kihi haaval soovitud detail valmib. Sellise meetodi korral on tähtis, et peale printimist eemaldataks üleliigne vaik ning päikesevalguse käes saaks valmistatud komponent veelgi kivistuda

[25]. Sellise meetodi suurim eelis on siledad detailid, mis teiste 3D-printimismeetoditega ei ole lihtsasti saavutatavad [25].

Kolmas meetod on lasersulatus (inglise keeles *Selective Laser Melting* ehk SLM või ka laialdasem väljend *Power Bed Fusion* ehk PBF) [26]. Plaadi peale valatakse väga õhuke kiht pulbrit, mille suure võimsusega laser õigetest kohtadest vedelaks sulatab (joonis 1.6) ja siis see osa aja jooksul tahkub. Edasi lisatakse uus kiht pulbrit ning protsess kordub kuni detail on valmis. Peale printimist tuleb üleliigne pulber eemaldada (joonis 1.7) ja ese korralikult puhastada. Keerukamate detailide korral tekitatakse toed, mis tuleb hiljem eemaldada ja võib võtta palju aega. Pulbri materjaliks võib olla nii plastik kui ka metall või metallisegud, vastavalt soovitud eseme materjalile [25]. Lasersulatus eelised on tugevad konstruktsioonid ja keerukate geomeetria valmistamise võimekus [26].



Joonis 1.7 Üleliigse pulbri eemaldamine peale lasersulatusprintimist [26]

3D-printimise tehnoloogiad on veelgi. Kasutatakse pihustite süsteemi, kus vaik või mõni muud vedelam aine valatakse õigesse kohta ja valguse käes tahkub (inglise keeles *Material Jetting*) [25]. Veel on olemas meetod, kus kasutatakse pulbrit ja sidumisvedelikku (meetodi nimetus inglise keeles on *Binder Jetting*) [25]. Pulber pihustatakse sobivasse kohta ning siis lisatakse vedelik, mis pulbri omavahel kokku ühtseks tervikuks seob. DED (*Directed Energy Deposition*) meetodiga kuumutatakse pihusti otsas metall ja lastakse valguda 3D-mudeli järgi sobivasse kohta, kus vedel aine jahtub ja kivistub [25]. DED meetod on kõige sarnasem keevitamisele.

Suurimaid 3D-printimise eeliseid on võrdlemisi kiire prototüüpide tegemine ning keerukate disainide realiseerimine (joonis 1.8), eriti optimeeritud geomeetria

valmistamine magnetmaterjalide jaoks, mis poleks kuidagi teistmoodi, näiteks treipingis või CNC masinaga, teostatav, eriti kui detail peaks seest tühi olema või peaks olema väga ebakorrapärane [23].

Antud töös kasutatakse lasersulatusprinterit, et valmistada topoloogia optimeeritud kujuga kõlarielemendi magnetahela osad: tagaplaat ja pealisplaat.

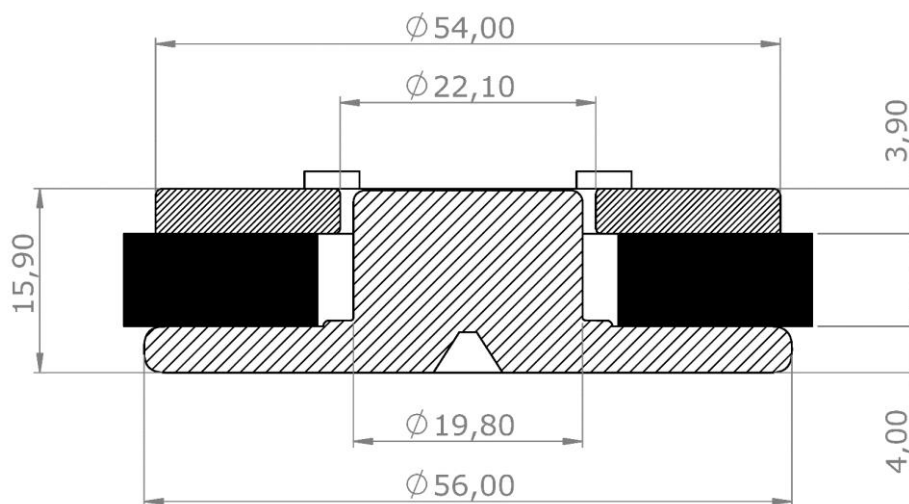


Joonis 1.8 3D-prinditud detail [24]

2. OPTIMEERITUD MAGNETAHELA MODELLEERIMINE JA VALMISTAMINE

Antud töö eesmärk on muuta kõlarielement efektiivsemaks ehk teha nii, et kõlarielement teeks valjemat häält kui originaalne valjuhääldi, samade võimsuste juures. Selle saavutamiseks on mitmeid võimalusi. Antud töös on kasutatud COMSOL tarkvara ja sellega optimeeritud magnetahela topoloogiat, et saada võimalikult suur BL väärtus. Oleks võimalik leida ka vönkepoolile mõjuv jõud njuutonites valemi 1.2 järgi, aga lihtsustamiseks eemaldatakse arvutustest voolutugevus ja alles jääbki jõutegur BL . Ehk mida suurem oleks BL , seda parem.

Esialgseks kõlariks on valitud Visaton FRS-8 (8 oomi variant) [27]. See valiti sobilike mõõtude ja madala tundlikkuse ehk halva efektiivsuse tõttu, eeldades, et siis oleks palju parendusruumi. Lisaks nendele põhjustele langes valik sellele tootele, sest tootja kodulehel on palju informatsiooni antud toote kohta, mis võib kasuks tulla antud töös. Joonisel 2.1 on näidatud algse kõlarielemendi mõõtmed. Väiksemate kumeruste ja nurkade mõõtmed on märkimata, et oleks lihtsam kujust ja suurustest aru saada. Mustaga täidetud riskülik on magnet, mida antud töös ei muudeta.

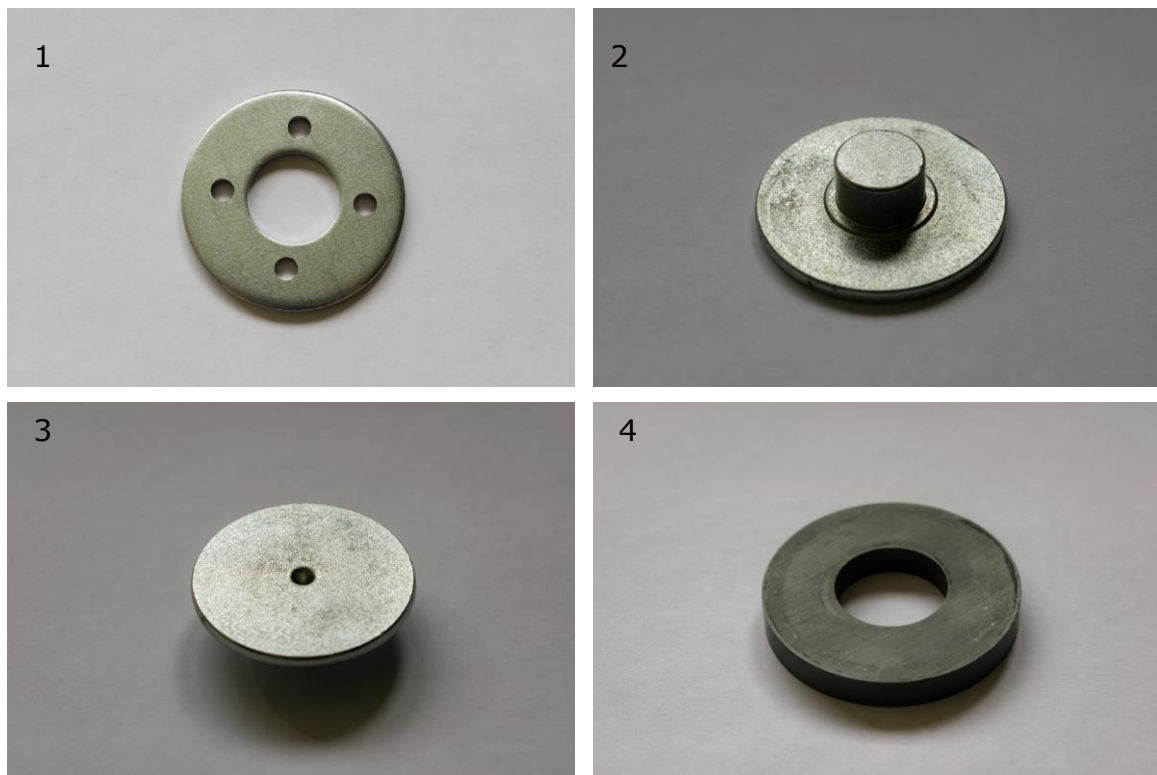


Joonis 2.1 Esialgse valjuhääldaja tähtsaimad mõõtmed

Tihedama viirutusega on joonisel 2.1 kujutatud pealisplaadi ristlõiget ja hõredama viirutusega tagaplaati. Neid pehmest magnetmaterjalist osasid optimeeritakse COMSOL-iga. Joonisel 2.2 on kujutatud Visaton FRS-8 kõlarielemendi membraan, ühendusklemmid ja raam.



Joonis 2.2 Visaton FRS-8 valjuhääldi membraan



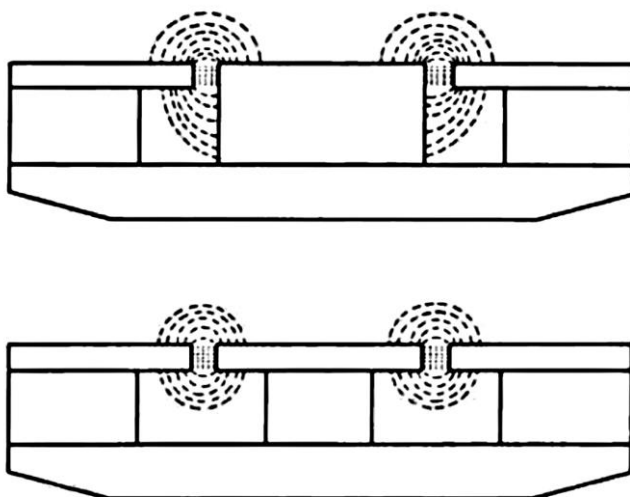
Joonis 2.3 Esialgse kõlarielemendi magnetahela osad. 1 – pealisplaat; 2 – tagaplaadi pealtvaade; 3 – tagaplaadi altvaade; 4 – magnet.

Mõõtude võtmiseks ja hiljem uue magnetahela katsetamiseks ja mõõtmiseks tuli valjuhääldi võimalikult tervelt koost lahti võtta. Joonisel 2.3 on näha antud elemendi magnetahela osad. Pealisplaadi sisse on puuritud augud, sest vastasel korral poleks tervelt seda raamist saanud eraldada. Makropildi järgi sai üle lugeda ka mähise keerdude arvu, milleks on 56.

2.1 Varasemad uuringud magnetahela optimeerimise kohta

Viimaste kümnete aastatega on uuritud kuidas muuta kõlareid efektiivsemaks ja väiksemaks, kuna keskmine koonusekujuline kõlar on efektiivsusega alla 10% ehk üle 90% läheb soojuseks kõlari sees [1] ning valjemat häält teha suutvad kõlarid on tavaliselt ka suuremad. Läbi aastate on peamiselt alati olnud rõhk BL väärtuse suurendamisel [17], mis on ka antud töö eesmärk, tehes seda aga uute meetodite ja vahenditega.

Joonisel 2.4 on näidatud ettevõtte JBL mitu kümnendit tagasi leiutatud mudel, kuidas oleks võimalik saavutada ühtlasem magnetväli vönkepooliga õhupilus, mis aitaks muuta valjuhääldi lineaarsemaks ehk oleks väiksemate moonutustega.

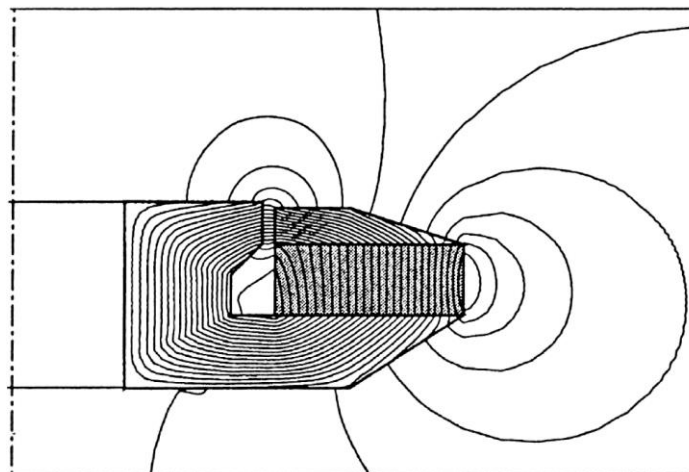


Joonis 2.4 Üleval klassikaline disain, all JBL-i loodud mudel ühtlasema magnetjõu tugevuse saavutamiseks õhupilus [6]

2015 aastal viisid A. Okyay, M. B. Khamesee ja K. Erkorkmaz [28] läbi uuringu, kus mõõtsid, kuidas mõjutab magneti välimise ääre kaugus pehme magnetmaterjali äärest magnetvoo tiheduse tugevust õhupilus ning mis efekti annab tagaplaadi alumisele osale kalde lisamine. A. Okyay, M. B. Khamesee ja K. Erkorkmaz uurimuse järgi peaks magneti välimine diameeter olema 1,5 mm suurem kui tagaplaadi ja pealisplaadi läbimõõdud ning mõneprotsendilise eelise annab ka tagaplaadi alumise osa kumeraks tegemine.

M. Marinescu, N. Marinescu ja S. Kuhn [17] aastal 2016 võtsid kokku aastatel 1970 kuni praeguseni toimunud arengud magnetahelate kuju muutumisest ning pakkusid välja seniajani teadaolevalt parima lahenduse, et saaks võimalikult efektiivse ja moonutuste

vaba kõlarielemendi. Joonisel 2.5 on kujutatud nende leidudel põhinev parim kontseptsioon.



Joonis 2.5 Teadlaste M. Marinescu, N. Marinescu ja S. Kuhn poolt leitud soovituslik magnetahela kuju [17]

Lisaks sellele leidsid M. Marinescu, N. Marinescu ja S. Kuhn oma uurimuses, et parima tulemuse saaks siis kui pealisplaadi paksuse ja õhupilu suhe oleks umbes 6 ning magneti välimise raadiuse ja õhupilu suhe oleks vahemikus 36 kuni 39.

Aastal 2023 magistritöö raames Bruno Sciarrone [29] leidis kolmele kõlarielemendile COMSOL-iga optimeeritud ahelad. Kõlariteks olid 3, 10 ja 15 tolliste membraanidega elemendid. Simuleerides esialgsed kõlarielemendid COMSOL tarkvaras ning siis kasutades topoloogia optimeerimist ja neid võrreldes, sai B. Sciarrone selgelt paremate omadustega valjuhääldid. Optimeeritud kõlarite kujud tulid keerukamate kujudega, mida on võimalik päriselus teha ainult 3D-printimise abil. Optimeerimise tulemusel kõlarielementide jõutegur BL suurenes kuni 10 protsenti ning valjuhääldite kaal vähenes kuni 30 protsenti.

2.2 Valjuhääldi elektromagnetiline mudel

Antud töös on kasutusel programm COMSOL Multiphysics® versiooniga 6.2.0.339, et luua esialgselt kõlarielemendist efektiivsem versioon, kasutades COMSOL-i topoloogia optimeerimise võimekust. Rakendus COMSOL on väga võimekas füüsikaliste probleemide lahendamisel ja arvutamisel ning sobib antud probleemi lahendamiseks suurepäraselt. COMSOL kasutab probleemi lahendamiseks LEM-i (lõplike elementide meetod, inglise keeles Finite Element Method ehk FEM), kus uuritavad objektid

jagatakse väikesteks osadeks ehk luuakse *mesh* ehk võrgustik [30]. Väiksemaid osi on lihtsam arvutil arvutada ning nii ei võta kalkulatsioonid palju aega, aga võivad esineda väikesed ebatäpsused [30].

COMSOL-i veebilehelt sai leitud sobivaid näited valjuhääldite kohta ning nende abil hakati looma mudelit COMSOL-i. Valjuhääldi magnetahel on telgsümmeetriline (inglise keeles *axisymmetrical*), mistõttu tuleb COMSOL-isse kirjutada ainult raadiused, mitte diameetrid. Sellepärast on enamikul kordadel kujutatud ka ainult pool magnetahela ristlõikest, kuna see on 360° ulatuses sama ümber kesktelje.

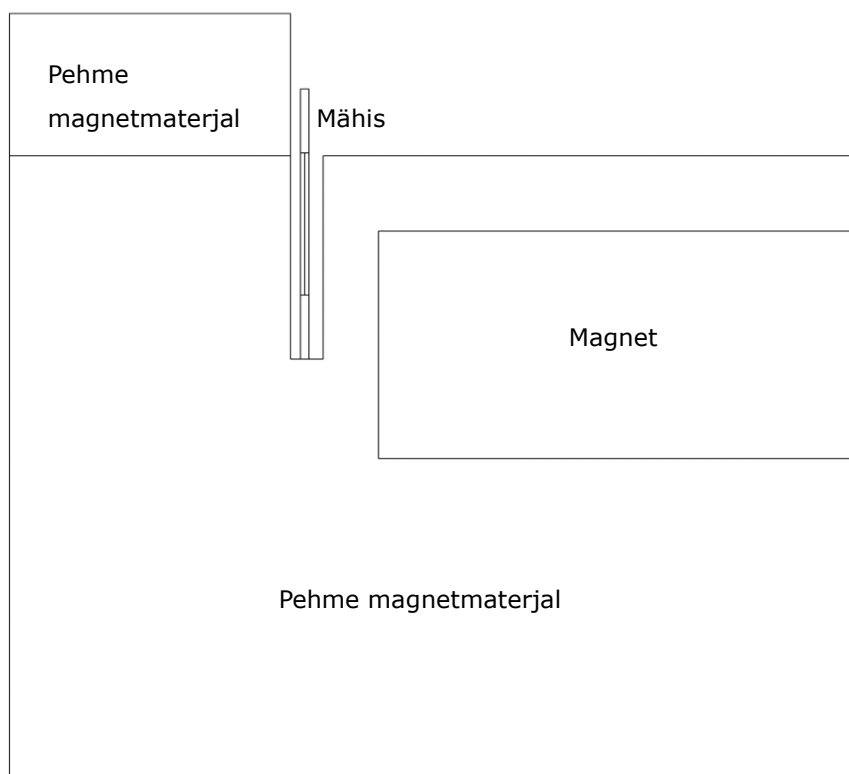
Järgmisena sai sisestatud valjuhääldi mõõtmed. Topoloogia optimeerimise jaoks on targem vältida ebavajalikult keerukaid kujusid, et programm saaks võimalikult hea tulemuse. Selle tõttu otsustati, et magneti ümber peaks olema pealisplaadi ja tagaplaadi asemel suur ristkülik, mis ümbritseb magnetit igast suunast nii palju kui võimalik arvestades ka raami ja mähise mõõtmeid. Topoloogia optimeerimise ajal piltlikult öeldes eemaldab COMSOL üleliigsed osad ristkülikust ja jätab alles ainult kõige suurema mõjuga osad. Ristküliku laiuks sai katsetamise tulemusel 30 mm ja kõrguseks 22 mm. Selliste mõõtmete juures tuleb topoloogia optimeeritud mudel sama ruumalaga kui oli originaalse kõlariemendi pehme magnetmaterjal. Tasub aga märkida, et sellisel juhul on optimeeritud valjuhääldi natuke pikem kui esialgne valjuhääldi. Topoloogia optimeerimise tarvis on vaja valida ka soovitud tiheduse väärtus. See näitab, mitu protsenti detailist on pehmest magnetmaterjalist, ja ülejäänud on õhk. Antud töös leiti, et parim valik on 1 ehk 100% on pehmest magnetmaterjalist ja õhku detaili sees pole, sest 3D-printimisega on see võimalik ja nii saaks eelduslikult suurima jõuteguri *BL* väärtuse.

Veel otsustati, et õhupilu suurus jääb samaks, mis oli originaalsel elemendil. On leitud, et kitsam õhupilu suurendaks *BL* väärtust [17], aga lihtsustamise mõttes ning võrreldavama tulemuse saamiseks leiti, et seda ei muudeta antud töös. Õhupilu kujutatakse ka ristkülikuna, mis eemaldab tüki pehme magnetmaterjali ristkülikust.

Mähise keerdude arvuks sisestati 56 ehk see arv, mis saadi päris kõlariemendi pealt lugedes. Mähise paksus mõõdeti päriselus üle ja saadi tulemuseks 0,3 mm ning mähise kõrguseks 4,5 mm nagu on ka tootja kodulehel. Mähise ehk vönkepooli diameeter on umbes 20 mm, COMSOL-i sisestati mähise raadius. Tootja Visaton kodulehelt sai informatsiooni, et antud mudelil liigub mähis edasi-tagasi 2,5 mm ulatuses ning ka see arv sai sisestatud COMSOL-i.

Selles töös magnetit ei plaanita printida ega muuta ehk selle mõõtmed jäid samaks. Küll aga sai katsetada liigutades magnetit üles-alla 0,1 mm kaupa, et leida magnetile parim koht. Ferriidist magneti jääkmagneetuvuseks leiti interneti allikatest 0,35 T [31], mis sisestati COMSOL-i.

Magnetahela materjaliks valiti pehme magnetmaterjali nimetusega *Soft Iron (With Losses)* ning magnetiks *Generic Ferrite*. Joonisel 2.6 on kujutatud optimeerimise eelsed osad magnetahelast.



Joonis 2.6 Optimeeritava kõlarielemendi kuju

COMSOL-is leitakse BL -i väärtus integreerides valemit:

$$\left(\frac{Br \cdot N_0 \cdot 2 \cdot \pi}{w_{coil} \cdot h_{coil}} \right) \cdot z_{coil} \quad (2.1)$$

kus Br - magneti jääkmagneetuvus;

N_0 - mähise keerdude arv;

w_{coil} - mähise paksus;

h_{coil} - mähise kõrgus;

z_{coil} - mähise loogiline tingimus asukoha määramiseks COMSOL-is.

Valemi 2.1 ühikuks peale integreerimist on Wb/m.

Kõlari efektiivsust saab arvutada valemiga [7]:

$$\eta_0 = \frac{[\rho_0(BL)^2 \cdot S_D^2]}{2\pi c \cdot R_E \cdot M_{MS}^2} \quad (2.2)$$

kus ρ_0 - õhu tihedus, kg/m³ (tavaliselt 1,204);

B - magnetvoo tihedus, T;

L - pooli pikkus, m;

S_D - membraani pindala, m²;

c - heli kiirus, m/s (tavaliselt 343);

R_E - pooli takistus, Ω ;

M_{MS} - liikuva osa kaal, kg.

Kasutades valemit 2.2 saab kõlari elemendi efektiivsuseks 3,4% võttes näiteks JBL 2226H elemendi, mille väärtused on:

$$BL = 19,2 \text{ T}\cdot\text{m};$$

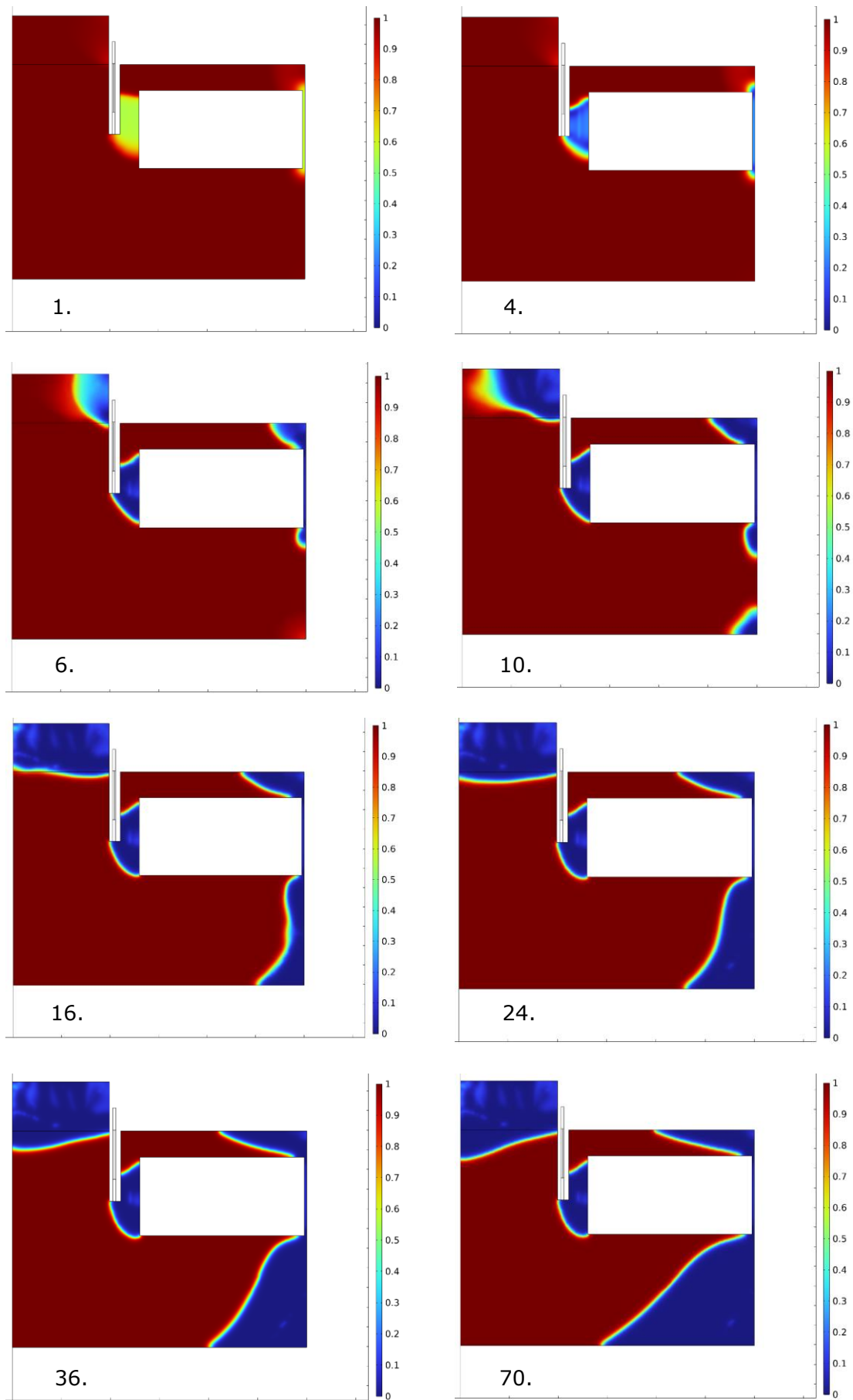
$$R_E = 5 \Omega;$$

$$M_{MS} = 0,096 \text{ kg};$$

$$S_D = 0,088 \text{ m}^2.$$

2.3 Magnetahela topoloogia optimeerimine

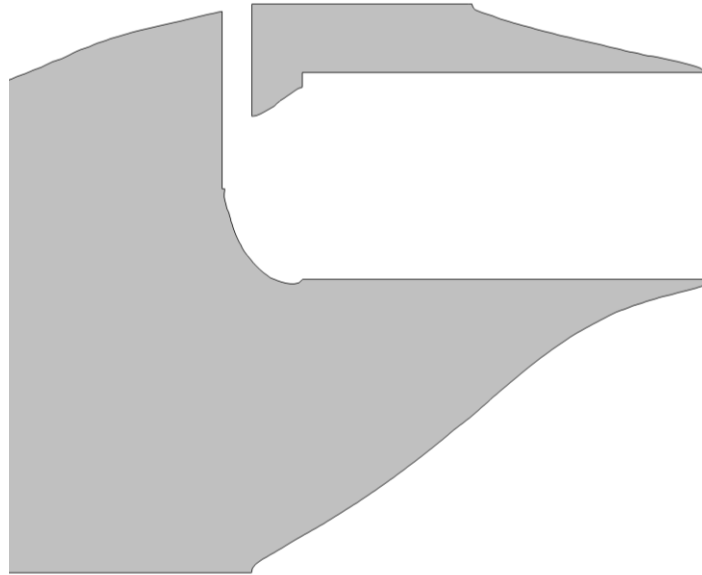
Topoloogia optimeerimine lahendatakse kasutades MMA-d (liikuvate asümptootide meetod, inglise keeles *Method of Moving Asymptotes*). Lahenduse leidmine toimub iteratsioonide põhiselt. Kokku tehti 101 iteratsiooni, et jõuda tulemuseni. Joonisel 2.7 on kujutatud iteratsioonide vahetulemused järjekorra numbriga 1, 4, 6, 10, 16, 24, 36 ja 70. Kujutatud on materjali tihedus, kus väärtus 1 on 100% pehme magnetmaterjal ja 0 on 100% õhk. On näha, kuidas iga iteratsiooniga jääb materjali (punane) vähemaks.



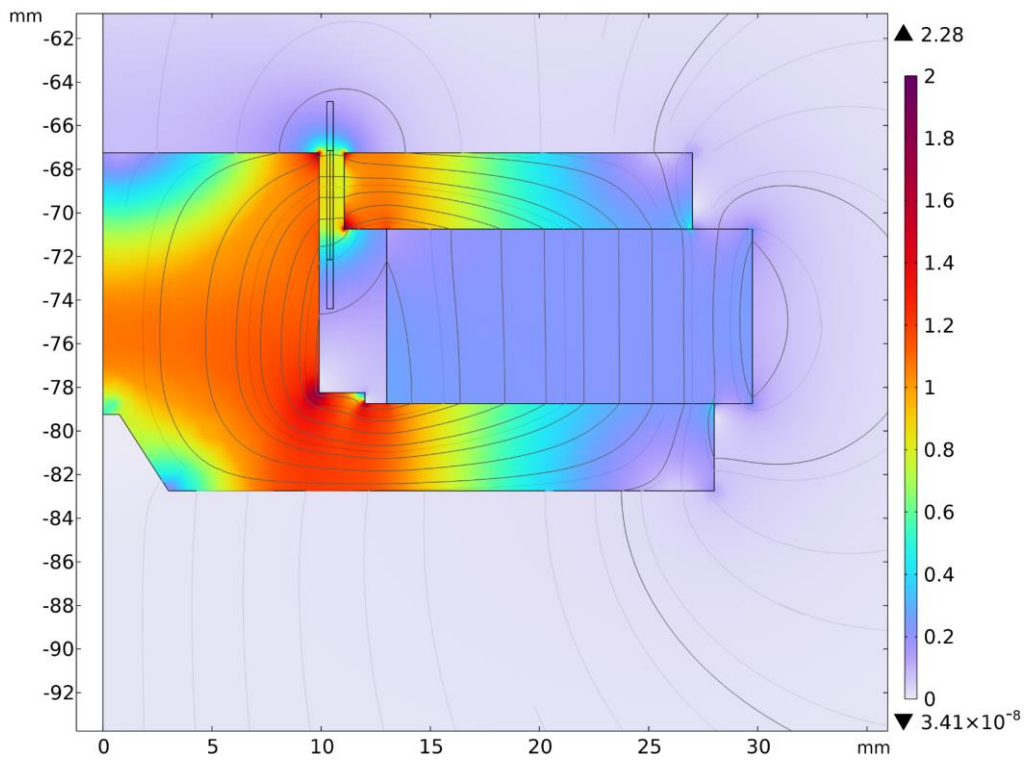
Joonis 2.7 COMSOL-i iteratsioonide vahetulemused

2.4 Topoloogia optimeerimise tulemused

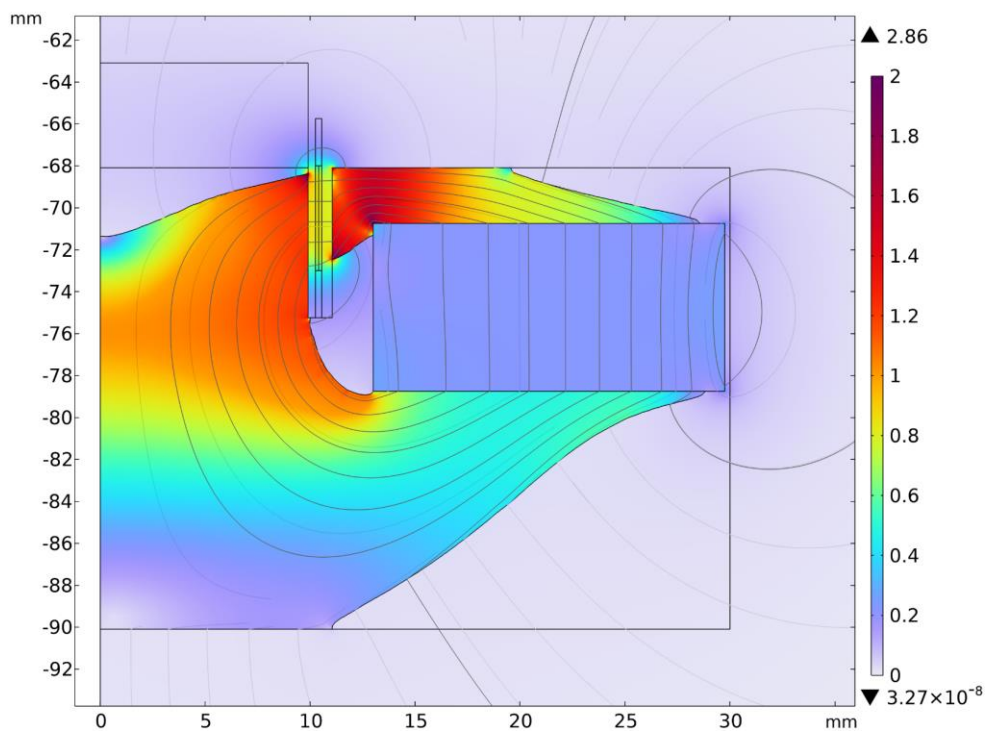
Joonisel 2.8 on näidatud topoloogia optimeerimise lõpptulemus. Kujutatud on kõlarielemendi pealisplaat ja tagaplaat, mis on võrreldes esialgsega (joonis 2.1) märgatavalt muutunud. Alles on palju vähem sirgeid jooni ning tagaplaat on magneti alumisest küljest mõõdetuna 4 mm asemel 12 mm paksune. On näha ka lohku südamiku üleval keskel. Lisaks on suurenenud mähisega paralleelselt olev pealisplaadi pind. Tähelepanu tuleb pöörata ka pealisplaadi ja tagaplaadi väga teravatele otstele, mis erinevad märgatavalt esialgse magnetahela ümaratest otsest. Kuju ja iteratsioonide vahetulemuste järgi saab ka väita, et kui poleks tagaplaadil mõõtmete piiranguid, oleks see veelgi suurem.



Joonis 2.8 Topoloogia optimeeritud kuju pehme magnetmaterjali jaoks

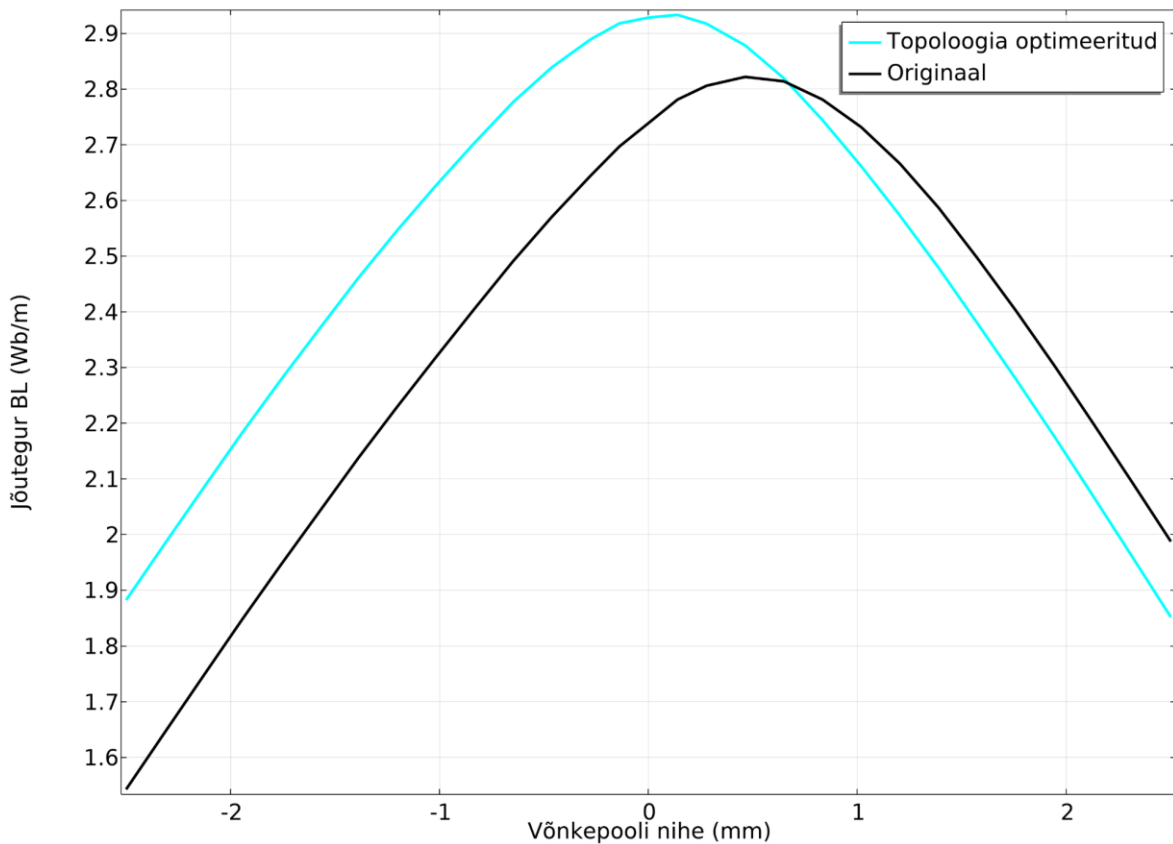


Joonis 2.9 Esialgse kõlari magnetvoo tihedus Teslades



Joonis 2.10 Topoloogia optimeeritud magnetahela magnetvoo tihedus

Magnetvoo tiheduse joonistel 2.9 ja 2.10 näha, et optimeeritud variandil on tiheduse väärtus suurem just võnkepooliga õhupilu lähedal, kui algasel elemendil on suurim väärtus mähisest üpriski kaugel ja asub selle all.



Joonis 2.11 *BL* väärtused

Joonisel 2.11 on näidatud optimeeritud ja esialgse kõlarielemendi simuleeritud *BL* väärtused vastavalt mähise nihkele. Suurim *BL* väärtus esialgsel kõlarielemendil on 2,8216 ning optimeeritud variandil 2,9331 Wb/m. Selle järgi leidub, et optimeeritud mudel on ligikaudu 4% tugevama jõuga.

Kasutades valemit 2.2 saab leida antud toote efektiivsuse vastavalt tootja kodulehelt leitavatele andmetele ja simulatsiooni tulemustele:

$$\eta_0 = \frac{[1,204 \cdot (2,8216)^2 \cdot 0,0031^2]}{2\pi \cdot 343 \cdot 7,2 \cdot 0,0025^2} = 0,00095 = 0,0950\%$$

Ja optimeeritud magnetahela korral oleks efektiivsus 0,103%. Kõlarielement on muutunud efektiivsemaks, kuigi mitte palju, aga tähelepanu peaks pöörama ka *BL* väärtuse sümmeetrilisusele. Optimeeritud elemendil on see võnkepooli neutraalsest asendist mõlemas suunas selgelt võrdsem, ehk tegemist võiks olla natuke efektiivsema aga palju kvaliteetsema helipildiga ehk vähemate moonutustega kõlariaga, millele küll siin töös ei keskenduta.

Valjuhääldi tundlikkuse saab leida valemiga [32]:

$$Tundlikkus \left[dB \left(\frac{1m}{1W} \right) \right] = 112 + 10 \log_{10}(\eta_0) \quad (2.3)$$

kus η_0 - valjuhääldi efektiivsus.

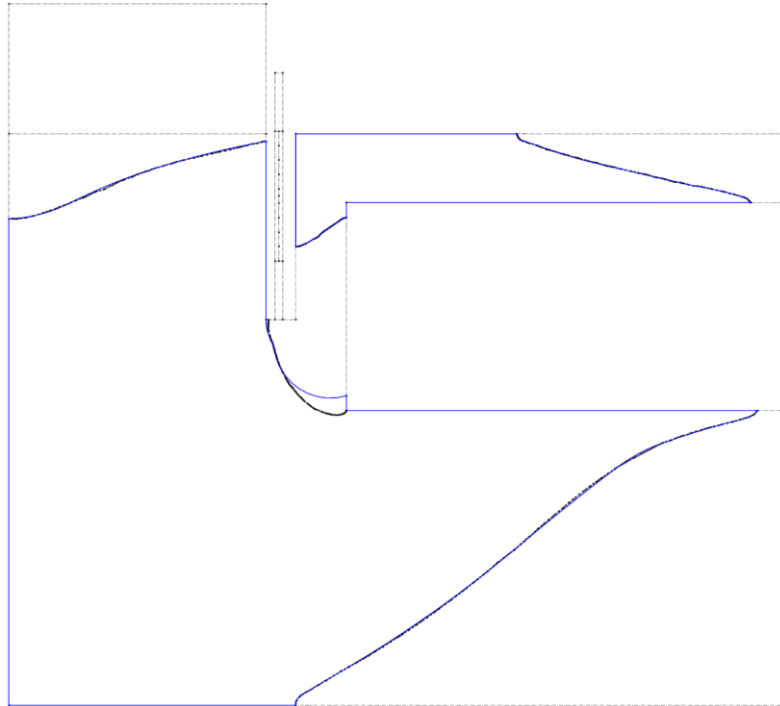
Valemi 2.3 järgi on originaalse kõlari tundlikkus 81,8 dB, ehk helirõhk, kui seda mõõta ühe meetri kauguselt ühe vatische võimsuse korral. Tootja kodulehel on kirjas tundlikkuse väärtuseks 82 dB, mis on üpriski võrreldav simulatsiooniga. Topoloogia optimeeritud magnetahela korral oleks tundlikkus 82,1 dB, mis ei ole eriti palju rohkem. Tabeli 2.1 täpsustuseks tuleb meelde tuletada, et detsibelli ühik on logaritmiline võimsuste suhtes, mistõttu 3 dB suurem tundlikkus oleks 100% kasv.

Tabel 2.1 Optimeeritud ja esialgse kõlari parameetrite võrdlus COMSOL-is

	Originaalne	Optimeeritud	$\Delta\%$
Efektiivsus [%]	0,095	0,103	+7,8
Tundlikkus [dB 1m/1W]	81,8	82,1	+7,2

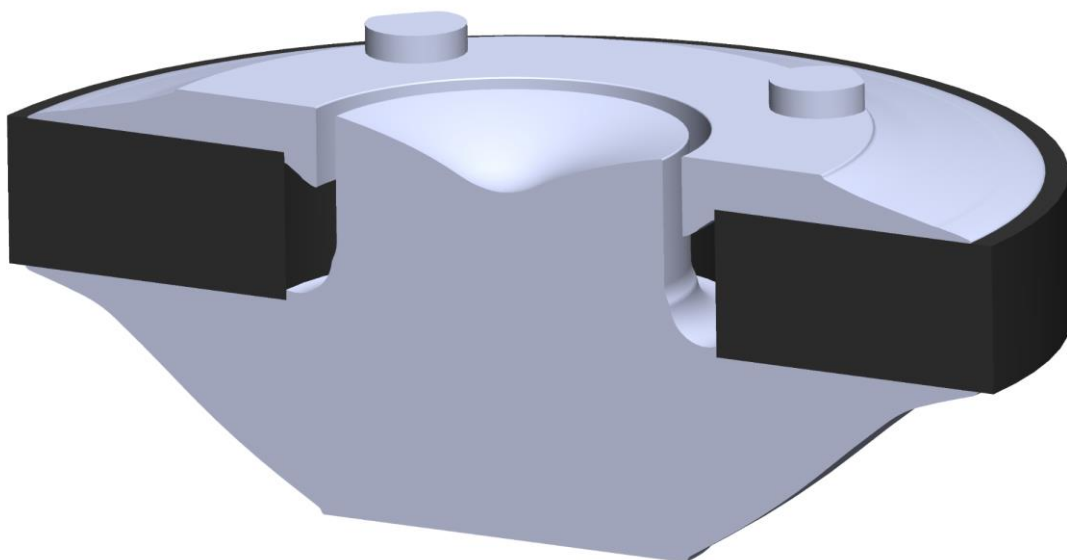
2.5 Optimeeritud magnetahela prototüüp

COMSOL-ist eksporditud kahemõõtmelise mudeli magnetahela detailide äärejooned tehti käsitsi üle, et saada sujuvamad ääred. Seejärel pöörati 2D geomeetria ümber oma telje ja loodi 3D-mudel. Lisaks muudeti südamikku ja põhja kuju, mida on näha joonisel 2.12, et see sobituks paremini magnetiga kokku, nii et magnet oleks kindlamini paigal omal kohal ega oleks suurt lõtku. COMSOL-i magnetvoo mudeli kohaselt ei tohiks antud muudatus kõlari toimimist eriti muuta.



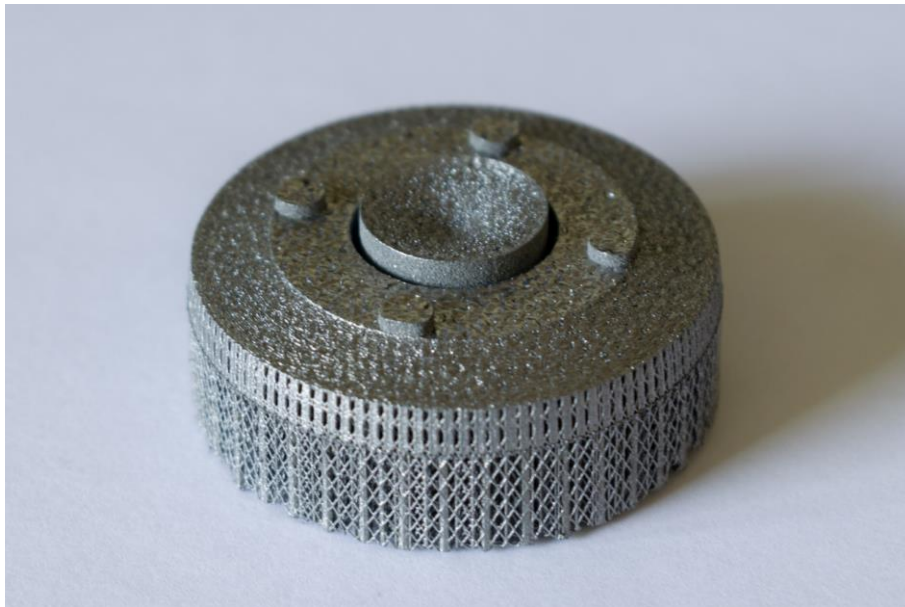
Joonis 2.12 Optimeeritud magnetahela joonis. Hallikalt on COMSOL-ist imporditud jooned ja sinisega käsitsi tehtud jooned.

3D-mudelile lisati pealisplaadile ka neli kinnituskohta, kuhu külge sobitub kõlarielemendi raam membraaniga, et ka see oleks õiges asendis ja kohas ega saaks liigselt kõikuda. Joonisel 2.13 on näha poolikut topoloogia optimeeritud valjuhäädaja 3D-mudelit, kus paistavad ka kaks raami kinnituspunkti ning musta värviga on kujutatud magnet, mis antud töös printimisele ei kuulu.

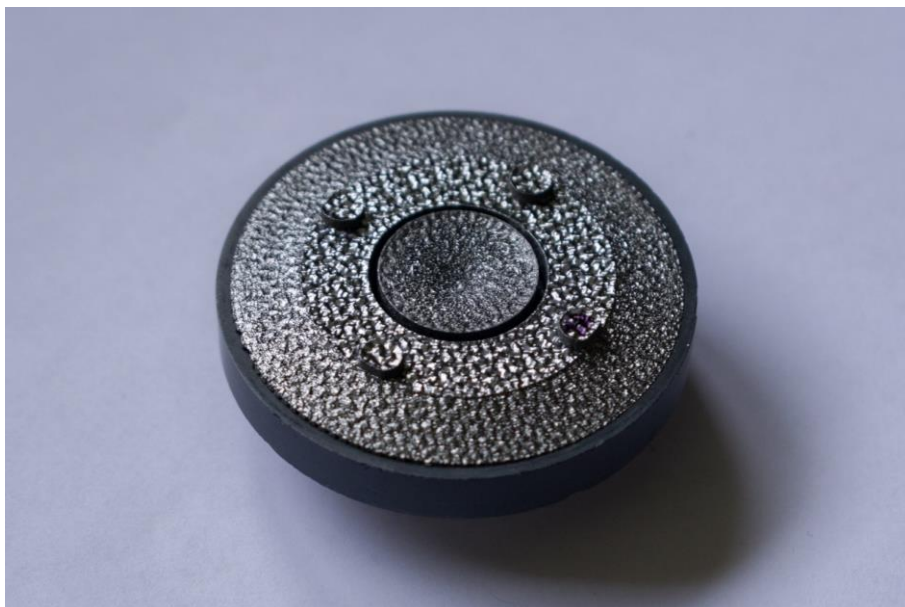


Joonis 2.13 3D-mudeli poolitatud vaade optimeeritud magnetahelast

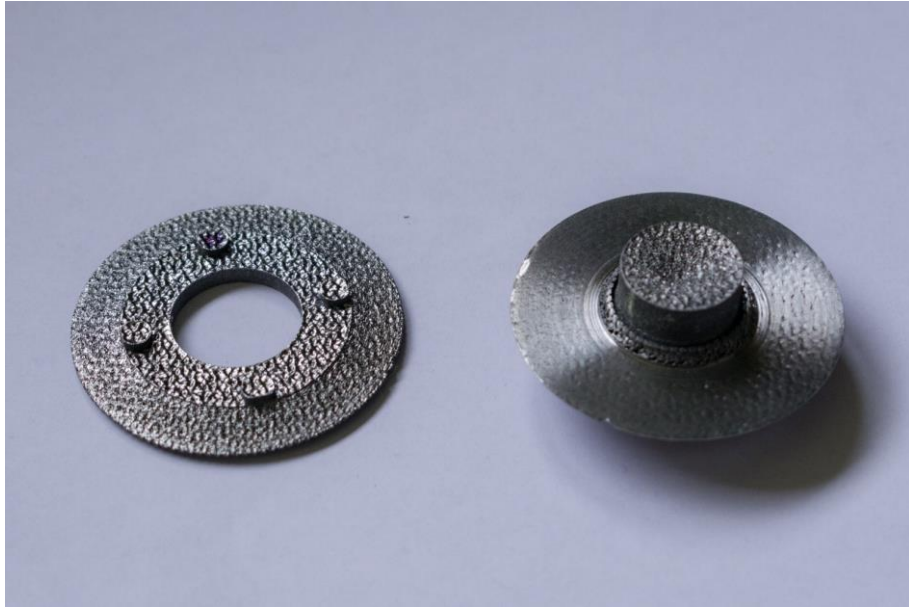
Printimine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis oleva Nikon SLM Solutions metalli lasersulatusprinteriga SLM 280 [33]. Peale printimist tuli detailidelt eemaldada printimise jaoks vajalikud toed ning kõik ilusti ära puhastada. Joonisel 2.14 on näidatud pilti, kui 3D-prinditud mudel on eemaldatud aluse küljest aga kõik printimiseks vajalikud toed on veel eemaldamata. Joonistel 2.15 kuni 2.17 on pildid 3D-prinditud osade lõpptulemustest.



Joonis 2.14 3D-prinditud detail enne tuge eemaldamist ja puhastust



Joonis 2.15 3D-prinditud osadega magnetahela pealtvaade



Joonis 2.16 3D-prinditud osad pealtvaates



Joonis 2.17 3D-prinditud osad altvaates

3. MÕÕTETULEMUSED

Prinditud detailidega viidi läbi katsed, kus võrreldi esialgse kõlarielemendi tundlikkust optimeeritud ja 3D-prinditud valjuhääldi tundlikkusega. Mõõtmisel kasutati kalibreeritud mõõtemikrofoni MiniDSP UMIK-1, mis oli asetatud 50 cm kaugusele kõlarist ning oli 45° nurga all, mida on näidatud joonisel 3.1. Mõõtetäpsus on 0,2 dB mikrofoni kalibreerimisaruande järgi. Kõlari ja mikrofoni ümbruses olevad põrand ja seinad olid kaetud helipeegeldusi vähendava kattega. Signaaliks kasutati arvutiprogrammi poolt genereeritud roosat lärmi ja 1 kHz sagedusega tooni. Roosa lärm on helisignaali tüüp, kus kõikidel sagedustel on võrdne energia [34]. Signaalide väljundvõimsus võimendist Dayton Audio DTA-2.1BT oli konstantne mõõtmiste ajal. Mõõtmised viidi läbi kasutades programmi REW versiooniga 5.31.



Joonis 3.1 Mõõtmisprotsess

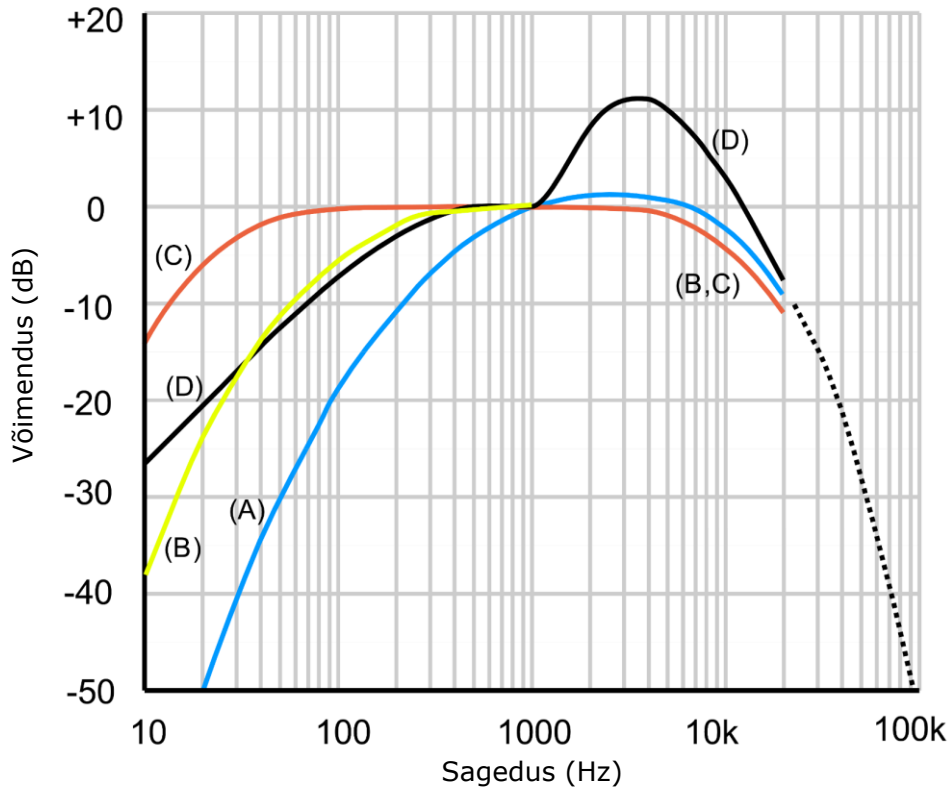
Tabel 3.1 Mõõtmistulemused originaalse ja optimeeritud kõlarielemendiga

	Roosa lärm [dBA]	Roosa lärm [dBC]	1 kHz toon [dBZ]
Originaalne	80,5	78,9	80,0
Optimeeritud	79,3	77,9	76,6
Müratase	38	45	53

Tabelis 3.1 on mõõtemikrofoniga saadud mõõtetulemused. On näha, et optimeeritud variant on vaiksema heliga, mis on vastuolus simulatsioonide tulemustega. Autor ei oska selle kohta selget põhjust välja tuua. On võimalik, et erinevused on tingitud materjalide erinevusest või ei ole 3D-prinditud detail piisavalt sile, mistõttu on pehmest magnetmaterjalist detailide ja magneti vahel väikesed õhupilud ja -mullid ja magnetjõud ei kandu maksimaalselt edasi.

Mõõdeti üle ka tausta müratase, et saaks olla kindel, et väline müra ei mõjutaks mõõtmistulemusi. Leiti, et taustamüra on palju vaiksem kui kõlarielemendi poolt tekitatud helid, mistõttu saab väita, et mõõtmised on võrreldavad. Mõõtmisteks kasutatava ruumi RT60 väärtus on 0,3 sekundit. RT60 näitab kui kaua kulub aega, et helirõhk langeks 60 dB [35]. Mida lühem on RT60 väärtus, seda vähem kaja tekib ruumis, mis annab parema ülevaate kõlari omadustest.

Mõõtmistel kasutati erinevaid mikrofoni filtreid ehk tundlikkuse režiime. Z-filtri korral ei vähendata ühegi sageduse valjust [36]. C-filtri korral vähendatakse madalate ja kõrgete sagedustega helide valjust vähesel määral ning A-filtri korral suurel määral [36], mida on näha joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Mikrofonide tundlikkuse režiimid [37]

3.1 Järeldused

Varasemaid uuringuid kõlarite efektiivsemaks muutmise teemal on mitmeid aga ükski neist ei käsitle 3D-printimist, on ainult teatud arvutisimulatsioone. Simulatsioonide järgi on alati olnud topoloogia optimeeritud variant efektiivsem, nagu ka antud töös. 3D-printimise protsessis on aga vajakajäämisi, mistõttu antud töös on mõõtetulemuste järgi topoloogia optimeeritud valjuhääldi madalama efektiivsusega kui oli esialgne valjuhääldi. Autoril on keeruline öelda, miks ei ole 3D-prinditud mudel suurema ega isegi mitte sama efektiivsusega.

Selle jaoks peaks tulevikus kindlasti palju rohkem pöörama tähelepanu just 3D-printimisele. Proovimise mõttes kasvõi 3D-printida esialgsele kõlarielemendile samade mõõtmega magnetahel, ilma topoloogia optimeerimist tegemata. Leida kas samade mõõtmete ja kujudega saaks samasugused mõõtetulemused nii 3D-prinditud kui ka esialgse valjuhääldiga. Tuleks proovida mitmeid erinevaid 3D-printeri seadistusi. Sealt edasi saaks 3D-printida juba topoloogia optimeeritud variandi ja ka võrrelda simulatsioone päriseluliste mõõtmistega.

Tuleviku mõistes oleks hea variant ka terve kõlari optimeerimine, mitte ainult magnetahela. Nii saaks 3D-printida kõlari, mis võiks olla väga palju efektiivsem, kui ainult mõni protsent nagu saadi antud töös.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärk oli optimeerida olemasoleva kõlarielemendi magnetahelat, et see oleks efektiivsem sama ruumala juures. Selle jaoks sai alguses uuritud ja selgitatud kõlariite heliakustika põhilisi mõisteid ning valjuhääldite osasid ja toimimispõhimõtet. Lisaks anti lühike ülevaade varasematest uuringutest kõlarielementide efektiivsemaks muutmiste kohta.

Käesoleva lõputöö autor kasutas tarkvara COMSOL, et optimeerida magnetahela topoloogiat, simuleerida ning võrrelda saadud tulemusi esialgse kõlarielemendi disainiga. COMSOL-isse sisestati vajalikud valemid ning kõlarielemendi mõõtmed ja lasti tarkvaral läbi teha 101 iteratsiooni, et leida optimaalseim magnetahela kuju. COMSOL-iga saavutatud optimeeritud kõlarielemendi kahemõõtmeline kuju muudeti 3D-mudeliks. Sellele tehti vajalikud muudatused paremaks detailide omavaheliseks sobitamiseks, mis ei mõjuta magnetahela toimimist. 3D-mudel prinditi välja Tallinna Tehnikaülikoolis oleva lasersulatusprinteriga. 3D-prinditud detailid puhastati ning neilt eemaldati printimisel tekkinud toed. 3D-prinditud pehmest magnetmaterjalist detailid pandi kokku olemasoleva magnetiga ning kinnitati membraani külge. Lõpuks sooritati mõõtmised mõõtemikrofoniga, et neid võrrelda simulatsioonide tulemustega.

Simulatsioonide tulemustest ja võrdlustest selgus, et topoloogia optimeeritud magnetahelaga valjuhääldi on 7% efektiivsem, aga valjuhääldi efektiivsus on kokkuvõttes ikkagi pigem madalavõitu, jäädes kõigest umbes 0,1% juurde. 3D-prinditud detailidega läbiviidud mõõtmistulemuste järgi on optimeeritud variant hoopis väiksema efektiivsusega. Sellele ei ole selget põhjendust.

Tulemustest järeldub, et COMSOL-iga topoloogia optimeerimine annab simulatsioonide järgi efektiivsema kõlarielemendi aga 3D-printimine vajaks rohkem läbimõtlemit, et ka päriselu mõõtmised oleksid kooskõlas simulatsioonidega. Lõpetuseks peab nentima, et mõningad kõlarielemendid ongi väga halva efektiivsusega ja nende täiustamine nõuab lisavõtteid ja suuri pingutusi.

SUMMARY

The aim of this thesis was to optimize the magnetic circuit of the existing speaker element so that it would be more efficient at the same volume. For this, at the beginning, the basic concepts of sound acoustics, as well as the parts of loudspeakers and the principle of operation were studied and explained. In addition, a brief overview of previous studies on making speaker elements more efficient was given.

The author of this thesis used the COMSOL software to optimize the topology of the magnetic circuit, simulate and compare the obtained results with the original speaker element design. The necessary formulas and speaker element dimensions were entered into COMSOL and the software was allowed to perform 101 iterations to find the most optimal magnetic circuit model. The two-dimensional shape of the optimized loudspeaker was transformed into a 3D model. The necessary changes were made to make the matching of the parts easier, which do not affect the operation of the magnetic circuit. The 3D model was printed with a laser fusion printer at Tallinn University of Technology. The 3D printed parts were cleaned and the supports created during printing were removed from them. The 3D-printed soft magnetic material parts were assembled with the existing magnet and attached to the membrane. Finally, measurements were taken with a measurement microphone to compare them with the results of the simulations.

The results of the simulations and comparisons revealed that the loudspeaker with the topology optimized magnetic circuit is 7% more efficient, but the efficiency of the loudspeaker is still rather low overall, remaining at only about 0.1%. According to the results of measurements carried out with 3D-printed parts, the optimized variant has lower efficiency. There is no clear rationale for this.

The results show that optimizing the topology with COMSOL gives a more efficient speaker element according to the simulations, but 3D printing would need more consideration so that the real-life measurements are consistent with the simulations. In conclusion, it must be stated that some speaker elements are of very poor efficiency and their improvement requires additional techniques and great efforts.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] MISCO Minneapolis Speaker Company, *Loudspeakers 101*, 2023.
- [2] J. Burnett, „Decibels - dB and Frequency,” Lenard Audio, 24. oktoober 2009. [Võrgumaterjal]. LINK: https://education.lenardaudio.com/en/03_db.html. [Kasutatud 20. detsember 2023].
- [3] J. Burnett, „Microphones,” Lenard Audio, 9. detsember 2008. [Võrgumaterjal]. LINK: https://education.lenardaudio.com/en/10_mics.html. [Kasutatud 25. aprill 2024].
- [4] J. Burnett, „Speakers - Power,” Lenard Audio, 17. detsember 2008. [Võrgumaterjal]. LINK: https://education.lenardaudio.com/en/05_speakers_2.html. [Kasutatud 20. detsember 2023].
- [5] J. Burnett, „Speakers - Principles,” Lenard Audio, 21. juuni 2010. [Võrgumaterjal]. LINK: https://education.lenardaudio.com/en/05_speakers.html. [Kasutatud 20. detsember 2023].
- [6] G. Ballou, *Handbook for Sound Engineers*, BLinkington: Taylor & Francis, 2013.
- [7] J. Eargle, *Loudspeaker Handbook*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [8] Rohitbd, „Loudspeaker cross section,” 25. veebruar 2006. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [9] MISCO Speaker and Audio, „Build A Speaker Video Series. Video #2: 5.25" Woofer Component Parts,” YouTube, 7. märts 2023. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.youtube.com/watch?v=qdqgagugOKc>. [Kasutatud 20. detsember 2023].
- [10] V. Lemarquand, R. Ravaud ja G. Lemarquand, „A new linear voice-coil motor for ironless loudspeaker: Analytical Study,” ICEM, Rooma, 2010.
- [11] G. Lemarquand, „Ironless Loudspeakers,” IEEE, Le Mans, 2007.
- [12] J. C. M. Fried, „Measuring the Voice Coil Temperature of Electrodynamic Speakers with the HF Method according to Anazawa,” Ilmenau University of Technology, Ilmenau, 2020.
- [13] A. L. Doyle, „Measurement And Analysis of Impedance In Loudspeakers,” The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2018.
- [14] National MagLab, „Magnetic Field Around a Wire,” National MagLab, 5. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://nationalmaglab.org/magnet-academy/watch->

- play/interactive-tutorials/magnetic-field-around-a-wire-i/. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [15] S. W. Ellingson, „Lorentz Force,” LibreTexts, 5. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electromagnetics_II_\(Ellingson\)/02%3A_Magnetostatics_Redux/2.01%3A_Lorentz_Force](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electromagnetics_II_(Ellingson)/02%3A_Magnetostatics_Redux/2.01%3A_Lorentz_Force). [Kasutatud 5. mai 2024].
- [16] K. Tarkpea ja H. Voolaid, Elektromagnetism, Tallinn: Kirjastus Maurus, 2013.
- [17] M. Marinescu, N. Marinescu ja S. Kuhn, „Optimization of magnetic circuits for loudspeakers 1970 and now,” International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, Bukarest, 2016.
- [18] E. Santini ja S. Teodori, „Modeling, FEM Analysis and Dynamic Simulation of a Moving Coil Loudspeaker,” International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Rooma, 2014.
- [19] W. Dvorak, „Hysteresiskurve,” 16. juuli 2010. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [20] W. D. Callister, Materials Science and Engineering, 9th Edition SI Version, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [21] Ideal Magnet Solutions, Inc., „Understanding Coercivity,” Ideal Magnet Solutions, Inc., 5. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://idealmagnetsolutions.com/knowledge-base/understanding-coercivity/>. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [22] Electrical4U, „Magnetic Reluctance: What is it? (Formula, Units & Applications),” Electrical4U, 3. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.electrical4u.com/magnetic-reluctance/>. [Kasutatud 5. mai 2024].
- [23] Dassault Systèmes, „Plastic 3D Printing,” Dassault Systèmes, 24. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/plastic-3d-printing>. [Kasutatud 24. aprill 2024].
- [24] SLM Solutions, „Additive Manufacturing,” SLM Solutions, 4. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.slm-solutions.com/additive-manufacturing/>. [Kasutatud 4. mai 2024].
- [25] . C. Schwaar, „The 7 Main Types of 3D Printing Technology,” All3DP, 23. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>. [Kasutatud 24. aprill 2024].
- [26] I. Kauppila, „Selective Laser Melting (SLM 3D Printing) – The Ultimate Guide,” All3DP, 1. veebruar 2023. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>. [Kasutatud 24. aprill 2024].

- [27] VISATON GmbH & Co. KG, „FRS 8 - 8 Ohm,” Visaton, 16. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.visaton.de/en/products/drivers/fullrange-systems/frs-8-8-ohm>. [Kasutatud 16. aprill 2024].
- [28] A. Okyay, M. B. Khamesee ja K. Erkorkmaz, „Design and Optimization of a Voice Coil Actuator for Precision Motion Applications,” IEEE, Waterloo, 2015.
- [29] B. Sciarrone, „Topologic Optimization of Magnetic Circuits in Loudspeakers,” Politecnico, Milano, 2023.
- [30] COMSOL, „The Finite Element Method (FEM),” COMSOL, 17. veebruar 2017. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. [Kasutatud 28. aprill 2024].
- [31] HyperPhysics, „Coercivity and Remanence in Permanent Magnets,” HyperPhysics, 10. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/magperm.html>. [Kasutatud 10. veebruar 2024].
- [32] sengpielaudio, „Loudspeaker efficiency versus sensitivity,” sengpielaudio, 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://sengpielaudio.com/calculator-efficiency.htm>. [Kasutatud 28. aprill 2024].
- [33] Tallinna Tehnikaülikool, „MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT - Teenused,” Tallinna Tehnikaülikool, 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://taltech.ee/mehaanika-ja-toostustehnika-instituut/teenused#p21639>. [Kasutatud 28. aprill 2024].
- [34] D. Foley, „White Noise Definition Vs. Pink Noise,” Acoustic Fields, 12. veebruar 2014. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.acousticfields.com/white-noise-definition-vs-pink-noise/>. [Kasutatud 9. mai 2024].
- [35] Larson Davis, „Reverberation Time Measurements,” Amphenol Corporation, 9. mai 2024. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://www.larsondavis.com/learn/building-acoustics/Reverberation-Time-in-Room-Acoustics>. [Kasutatud 9. mai 2024].
- [36] ATP Instrumentation Ltd, „A, C & Z Frequency Weightings Explained,” ATP Instrumentation Ltd, 4. november 2022. [Võrgumaterjal]. LINK: <https://atp-instrumentation.co.uk/blog/a-c-z-frequency-weightings-explained/>. [Kasutatud 8. mai 2024].
- [37] Lindosland, „Acoustic weighting curves,” 13. aprill 2009. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 9. mai 2024].