

Ville-Petteri Säily

## **INDUKTIOSILMUKAN AIHEUTTAMAN MAGNEETTIENTÄN SIMULOINTI**

Ville-Petteri Säily

## **INDUKTIOSILMUKAN AIHEUTTAMAN MAGNEETTIKENTÄN SIMULOINTI**

Ville-Petteri Säily  
Opinnäytetyö  
Syksy 2014  
Hyvinvointiteknologian koulutusoh-  
jelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Hyvinvointiteknologia

---

Tekijä: Ville-Petteri Säily

Opinnäytetyön nimi: Induktiosilmukan aiheuttaman magneettikentän simulointi

Työn ohjaaja(t): Kari Jyrkkä

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Syksy 2014

Sivumäärä: 43

---

Induktiosilmukka on huonokuuloisten ihmisten apulaite, jolla ääni siirretään kantataajuisena suoraan lähteestä kuulolaitteeseen magneettista induktiota käyttäen. QLU Oy tarvitsi induktiosilmukoiden suunnittelua ja analysointia varten simulaattorin, jolla voidaan tutkia erimuotoisten silmukoiden aiheuttamia magneettikenttiä. Tätä tietoa tarvitaan esimerkiksi magneettikentän suuntaamiseen yli-kuuluvuuden välttämiseksi sekä riittävän kentänvoimakkuuden saamiseksi halutuille alueille.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tietokonesimulaattori, joka pystyisi simuloimaan magneettikenttää laskennallisesti Biot–Savartin lakia hyödyntäen. Useiden silmukoiden simuloiminen oli myös tarpeellinen ominaisuus.

Työ vaati paljon vektorilaskennan, magnetismin ja Matlab-ohjelmoinnin opiskelua. Työn tuloksena saatiin toimiva ja testattu Matlab-simulaatio, joka kykenee laskemaan myös useamman silmukan aiheuttamia kenttiä. Simulaattori ei ota huomioon ympäristöstä aiheutuvia häiriöitä magneettikentässä. Tätä, kuten myös simulaattorin käytettävyyttä tulee tulevaisuudessa parantaa. Myös laskenta voisi nopeuttaa käyttämällä apuna C-kielisiä DLL-kirjastoja.

---

Asiasanat: magneettikenttä, simulointi, Matlab, induktiosilmukka, kuulolaitteet

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Biomedical engineering

---

Author(s): Ville-Petteri Säily

Title of thesis: Simulation of magnetic field generated by an induction loop

Supervisor(s): Kari Jyrkkä

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2014

Number of pages: 43

---

QLU Oy needs a simulator for designing and analysis of magnetic fields generated by different induction loop architectures. This simulation is needed to manage problems caused by overspilling and to generate strong enough magnetic field to desired areas. Induction loops are devices that transfer sound from source to hearing aid in baseband form, using induction and therefore skipping hearing aids own microphone.

The objective of the thesis was to create a computer simulation that could calculate magnetic field by using Biot–Savart law also in cases of unsymmetrical loops. The Simulator must be able to combine magnetic fields generated by several parallel loops.

The thesis required a lot studies regarding magnetism, vector mathematics and programming with Matlab. The Results were satisfying as working simulator capable of simulating different magnetic was made. The Simulator considers the environment as a homogenous vacuum, which isn't the case in everyday work in hearing aid business. The simulator requires improvements in usability to make calculating many loops easier and to make adding different loops more practical.

---

Keywords: magnetic field, simulation, Matlab, induction loop, hearing aid

# SISÄLLYS

	TIIVISTELMÄ.....	3
	ABSTRACT .....	4
	SISÄLLYS.....	5
1	JOHDANTO.....	6
2	TYÖN TEOREETTINEN TAUSTA.....	7
	2.1 Kuulo.....	7
	2.2 Huonokuuloisuus.....	7
	2.3 Erilaiset kuulovammat .....	8
	2.4 Kuulolaite.....	9
	2.5 Induktiokela .....	10
	2.6 Induktiosilmukka.....	10
	2.7 Magnetismi.....	12
	2.8 Biot–Savartin laki.....	13
	2.9 Matlab .....	15
3	TOTEUTUS .....	16
	3.1 Simulaattorin toimintaperiaate .....	16
	3.2 Biot–Savartin lain soveltaminen Matlabissa .....	17
	3.2.1 X-, Y- ja Z-komponenttien laskeminen .....	18
	3.2.2 Esimerkki laskennasta .....	19
	3.3 Koodin rakenne .....	21
4	TESTAUS.....	24
	4.1 Ympyräsilukkatestit .....	24
	4.1.1 8-pisteen silmukka .....	24
	4.1.2 16-pisteen silmukka .....	28
	4.1.3 32-pisteen silmukka .....	31
	4.1.4 Silmukkatestausten tuloksien analyysi .....	35
	4.2 Testit tiheämmällä testipistejoukolla .....	36
	4.3 Helmholtzin kela ja kahden kelan käsittely .....	38
5	POHDINTA.....	40
	LÄHTEET .....	41

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä kehitettiin induktiosilmukkasimulaattori Matlab-ohjelmaa hyväksi käyttäen. Simulaattorin tarkoituksena on mallintaa epämääräisen muotoisen induktiosilmukan aiheuttaman magneettikentän suunta ja voimakkuus. Kehitetyt laskentamallit antavat mahdollisuuden käsitellä useampaa kuin yhtä silmukkaa summaamalla yksittäisten laskentojen tulokset yhteen.

Simulaattorin kehittäminen edellytti tutustumista vektorilaskentaan, Biot–Savartin lakiin sekä magnetismin ilmiöön. Sähkökentän mallintaminen ei kuulunut työn tavoitteisiin.

Induktiosilmukka on kuulolaitteiden apulaite, jonka avulla äänisignaali voidaan siirtää suoraan äänilähteestä kuulolaitteeseen sähkömagneettisen induktion avulla. Äänilähteellä tarkoitetaan esimerkiksi puhujan käyttämää mikrofonia tai CD-soitinta. Äänen siirtäminen sähköisesti poistaa kuuntelutilan akustiikan aiheuttamat ongelmat, joita ovat esimerkiksi kaiku ja meluisuus.

Epämääräisen eli esimerkiksi epäsäännöllisen muotoisen lähteen aiheuttaman magneettikentän laskeminen käsin on erittäin haastava toimenpide. Tämän vuoksi työssä käytettiin integrointia eli säteilylähde hajotettiin pieniin suoriin palasiin, joiden aiheuttaman magneettikentän laskeminen on kohtuullisen yksinkertaista. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuu koneen laskentateho. Mitä pienempiä palasia tutkitaan, sitä enemmän tarvitaan laskutoimituksia. Myös testipisteiden tiheys eli se, kuinka monesta paikasta magneettikenttä lasketaan, vaikuttaa laskennan keston.

Työn tilaajana oli QLU Oy. Yritys tarjoaa induktiosilmukoihin liittyviä kartoitus- ja asiantuntijapalveluita. Kontaktihenkilöinä yrityksen puolelta toimivat Mikko Haho, Juha Nikula sekä Tapio Rautio. Työn ohjaajana toimi Kari Jyrkkä ja ulkopuolista asiantuntija-apua tarjosi Paavo Niemitalo.

## 2 TYÖN TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa käsitellään työn kannalta välttämättömät teoreettiset asiat. Kuuloa, kuulolaitetta, huonokuuloisuutta sekä induktiokelaa ja silmukkaa käsittelevät alaluvut määrittävät toimintaympäristöä. Magnetismia ja Biot–Savartin lakia käsittelevät kappaleet muodostavat tieteellisen pohjan työlle.

### 2.1 Kuulo

Kuulolla tarkoitetaan kykyä havainnoida ääntä. Korva on ihmisen ääniaistinelin, joka ottaa vastaan ääntä väliaineen värähtelyn muodossa ja muuttaa sen hermoimpulsseiksi. Varsinainen kuuloaistimus syntyy näiden impulssien myötä aivoissa. Korva on tärkeä myös tasapainon säilyttämisessä sekä pään asennon havainnoinnissa. (1.)

Korva voidaan jakaa kolmeen osaan: ulko-, väli- ja sisäkorvaan. Ulkokorvan muodostavat korvalehti ja korvakäytävä. Sen tehtäviä ovat väliaineen (yleensä ilman) värähtelyn vastaanotto ja siirto tärykalvolle. Välikorva alkaa tärykalvosta. Välikorvan korvaluut vahvistavat tärykalvon värähtelyä ja siirtävät värähtelyn eteisikkunan kautta sisäkorvaan. Sisäkorvassa mekaaninen värähtely muutetaan simpukassa hermoimpulsseiksi. Tämä tapahtuu simpukassa olevan nesteen liikuttaessa kuuloreseptorisoluja, jolloin niiden värekarvat osuvat katekalvoon aiheuttaen impulssin syntymisen. (1.)

Hermostusimpulssit siirtyvät kuulohermoja pitkin aivokuorelle, jossa aistimus äänestä syntyy (2).

Normaalikuuloisuuden rajana pidetään 10–20 dB:n tasoa (3).

### 2.2 Huonokuuloisuus

Suomessa 300 000 ihmistä kärsii kuulonalentumasta (4). Ikä on suurin kuulonalentumiin vaikuttava tekijä. Ikäkuulo etenee noin 0,5 dB/vuosi 50 ikävuodesta lähtien. Yli 60-vuotiaista kolmannes ja yli 80-vuotiaista lähes kaikki kärsivät kuulonalenemasta, joka häiritsee toimintaa meluisissa olosuhteissa. Lisäksi 6–10 %:lla väestöstä on merkittävä kuulovamma. 30 dB:n kuulonalentuma puheta-

juuksilla vaikeuttaa päivittäistä elämää, jolloin kuulolaitteen hankintaa tulee harkita. (5.) Kuulonalentuma mitataan ISO-standardin mukaan keskiarvona 0,5 kHz, 1 kHz ja 3 kHz taajuuksilta. Tärkein taajuusalue puheen ymmärtämiseksi on 1,5–2 kHz. Suomessa kuulokoje on yli 150 000 henkilöllä, joskin 25–30 % laitteista on käyttämättömiä sopeutumisprosessin vaikeuden vuoksi. Sopeutusvalmennus olisi tärkeää sopeutumisen kannalta. (4.)

Uuden tutkimustiedon mukaan myös nuorten kuulovammat ovat lisääntymässä. Syyksi tähän epäillään MP3-soittimien yleistyvää käyttöä sekä vapaa-ajan melua, kuten altistusta melulle konserteissa ja baareissa. (6.)

### **2.3 Erilaiset kuulovammat**

Kuulovammat jaetaan konduktiivisiin, sensorineuraalisiin, sentraalityypisiin ja sekatyypisiin vammoihin. (7.)

Konduktiivinen kuulovamma on nimensä mukaisesti äänen (eli mekaanisen värinän) johtumisen ongelma. Värinä ei saavuta sisäkorvaa tai värinä vaimenee liiaksi. Tämä voi johtua esimerkiksi korvakäytävän, tärkykalvon taikka kuuloluiden vammasta. Konduktiivisen kuulovamman hoidossa kuulolaitteella voidaan saavuttaa merkittävä parannus kuuloaistissa. (7.)

Sensorineuraalinen kuulovamma on sisäkorvan simpukan kuuloreseptoreista johtuva ongelma. Mekaaninen liike muuttuu hermoimpulsseiksi epätäydellisesti. Tällaisissa tapauksissa kuulolaitteella voidaan parantaa kuuloaistia jonkin verran. (7.)

Sentraalisessa kuulovammassa ongelma esiintyy aivokuorella. Kuulo saattaa olla testien mukaan normaali, mutta potilaalla voi olla ongelmia esimerkiksi kuullun ymmärtämisessä. Sekatyypisessä kuulovammassa on ongelmia usealla alueella. Taulukossa 1 on esitetty kuulonheikkenemien vakavuusluokitukset ja niistä aiheutuvat toiminnanvajakset. (7.)



## Kuulonheikkenemä Kuulotaso dB, ISO Toiminnanvajaus

Normaali kuulo	alle 25	
Vähäinen	26–40	Kuulee normaalin puheen
Kohtalainen	41–60	Kuulee äänekkään puheen
Vaikea	61–80	Kuulee huudetun puheen
Erittäin vaikea	yli 80	Ei kuule puhetta

### 2.4 Kuulolaite

Tärkein apuväline huonokuuloisille on kuulolaite eli kuulokoje. Se vahvistaa sähköisesti ääntä ja auttaa käyttämään jäljellä olevaa kuuloaistia, vähentäen pinnistelyn tarvetta (8). Kuulolaitteita on erilaisia tyyppiä (9):

- korvantauskoje
- korvakäytäväkoje
- taskukoje
- kommunikaattori
- BAHA-luukuuloke.

Kuvassa 1 on esitelty kuulokojeen lohkokaavio. Mikrofonin ottaa vastaan väliaineen mekaanisen värähtelyn ja muuttaa sen sähköiseksi, analogiseksi signaaliksi. Mikrofonin on yleensä herkkä ja laajakaistainen elektronimikrofoni. Myös suuntamikrofoneja käytetään. Ne koostuvat kahdesta peräkkäisestä mikrofoniasta, joiden tuottamien signaalien vaihe-erosta voidaan päätellä signaalin tulosuunta. Suuntamikrofonien avulla voidaan vähentää hälyäänien aiheuttamia ongelmia. Esivahvistin vahvistaa mikrofoniin tai mikrofoniin tuottamaa signaalia riittävälle tasolle A/D-muunninta varten. (10, s. 7–10.)



KUVA 1. Kuulolaitteen lohkokaavio (10, s. 7)

A/D-muunnin eli analog to digital -muunnin muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi. Digitaalisen signaalin käsittely on nykytekniikalla yksinkertaisempaa kuin analogisen. Signaalinkäsittelyvaiheessa signaali jaetaan taajuusalueisiin eli kanaviin, jotta vahvistus voidaan kohdistaa oikeille alueille kuulon puutteiden mukaan. Tässä vaiheessa signaalia myös suodatetaan kohinan ja hälyääniä minimoimiseksi. Kanavat yhdistetään takaisin yhdeksi signaaliksi ja D/A eli digital to analog -muunnin muuttaa signaalin takaisin analogiseen muotoon. Päätevahvistin vahvistaa signaalin tarvittavalle tasolle ja kaiutin eli kuuloke muuttaa analogisen signaalin mekaaniseksi liikkeeksi eli ääneksi. Lisäksi laitteissa on yleensä mahdollisuus ulkopuolisen signaalilähteen käyttöön. Näitä ovat mm. induktiivinen siirto induktiokelaa käyttäen, infrapunavalo sekä radiotaajuinen siirto esimerkiksi Bluetoothia käyttäen. Induktiivinen siirto on yleinen ja siihen käytettyjä induktiosilmukoita on yleisesti yleisissä tiloissa kuten virastoissa ja kirkoissa. IR-valoa käytettäessä tarvitaan näköyhteys IR-lähtetimen ja vastaanottavan laitteen välille. Radiotaajuisessa siirrossa on usein käytössä laitevalmistajan oma järjestelmä, jolloin erimerkkisille kuulolaitteille tarvittaisiin jokaiselle omat lähettimet. (10, s. 7–10.)

## **2.5 Induktiokela**

Kuulolaitteen sisäisen mikrofonin lisäksi useimmista laitteista löytyy induktiokela, jota käyttämällä ääntä voidaan siirtää ulkoisesta lähteestä suoraan laitteeseen sähkömagneettista induktiota käyttäen. Näin voidaan käyttää parempia, suurikokoisia mikrofoneja lähempänä äänilähdettä tai siirtää ääni suoraan lähteestä induktiosilmukkaan, jolloin signaali-kohinasuhde paranee ja hälyääniltä vältytään. Induktiokelaa käytettäessä ääni siirretään kantataajuisena eli samalla taajuudella kuin siirrettävä ääni. (11.)

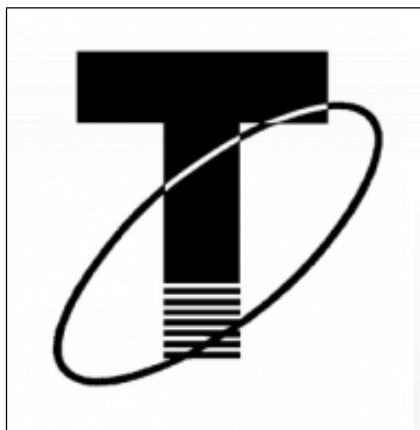
## **2.6 Induktiosilmukka**

Induktiosilmukka on kuulovammaisten apulaite, joka auttaa heitä käyttämään erilaisia palveluita mahdollistamalla paremman kuulemisen kuin pelkkä kuulolaite (12). Induktiosilmukka on kuparijohto, joka kiertää tilaa, tai se voi olla integroituna esimerkiksi pöytään tai tiskiinkin, jonka edessä keskustellaan. Silmukkaan syötetään äänisignaalin mukainen virta erityisellä silmukkavahvistimella. (11.)

Induktiosilmukan avulla voidaan välttää tilassa olevat häiriöäänet ja näin parantaa äänenlaatua ja sen ymmärrettävyyttä. Induktiosilmukasta ilmoitetaan kuvien 2 ja 3 mukaisilla merkeillä. Kuvan 2 merkki on virallisen standardin IEC 60118-4 mukainen. Tämä standardi määrittää myös silmukalta vaadittavat ominaisuudet. (12.)



*KUVA 2. Kansainvälinen CE-standardin mukainen induktiosilmukasta ilmoittava merkki (12)*



*KUVA 3. Vanhanmallinen induktiosilmukasta ilmoittava merkki, yhä osittaisessa käytössä (12)*

Induktiosilmukan toiminta on seuraava:

1. Ääni otetaan sisään järjestelmään joko mikrofonilla tai äänilähteen kuten CD-soittimen ääniulostulosta.
2. Äänisignaalia vahvistetaan erityisellä silmukkavahvistimella, jotta saadaan riittävä signaalinvoimakkuus.

3. Signaali syötetään tilaa kiertävään johdinsilmukkaan. Silmukassa kulkeva virta synnyttää tilaan magneettikentän, joka vaihtelee signaalin mukaan.
4. Kuulolaitteessa olevaan kelaan indusoituu virta, joka on alkuperäisen signaalin mukainen. Kelaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.5
5. Kuulolaite käsittelee signaalin kappaleen 2.4 mukaisesti. Lopputuloksen saadaan häiriöttämpi ääni kuin laitteen omia mikrofoneja käyttäen. (13.)

## 2.7 Magnetismi

Magneettikenttä voi syntyä kahdella eri tavalla: pysyvästi magnetoitunut materiaali aiheuttaa ympärilleen magneettikentän ja toisaalta magneettikenttä voidaan synnyttää sähkövirran avulla. Yksinkertaisin magneettikentän lähde on magneettinen dipoli, josta voidaan erottaa positiivinen ja negatiivinen napa. Magneettista monopolia ei ole havaittu, vaikkakin eräissä kosmologisissa teorioissa se esiintyy. (14, s. 164.)

Tämän työn kannalta sähkövirran synnyttämän magneettikentän tutkiminen on tärkeämpää. Vuonna 1820 tanskalainen Hans Christian Ørsted havaitsi sähkövirran vaikuttavan kompassineulaan. Ilmiön taustoja ei tuolloin vielä ymmärretty. (14, s. 164.)

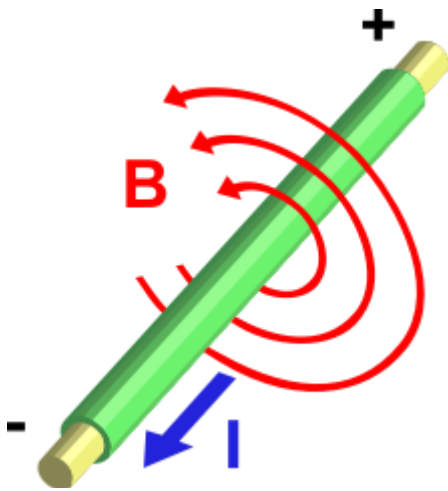
Yksinkertaisissa tapauksissa, kuten symmetrisissä virtalähteissä johtimen synnyttämä magneettikenttä voidaan laskea Amperen lain avulla. Yleisiä tapauksia voidaan laskea vektoripotentialien tai tässä työssä käytetyn Biot–Savartin lain avulla. Virtajohtimen aiheuttaman magneettikentän magneettivuon tiheys  $B$  (yksikkönä tesla eli  $V \cdot s / m^2$ ) on suoraan verrannollinen johtimen läpi kulkevaan virtaan ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen johtimesta. Myös väliaine eli aine jossa johdin sijaitsee vaikuttaa magneettivuon tiheyteen permeabiliteetin kautta. (14, s. 9)

Toinen magnetismin kenttäsuure on  $H$  eli magneettikentän voimakkuus. Tämän yksikkönä on henry eli  $A/m$  eli ampeeri metriä kohden. Ilmassa magneettikentän voimakkuutta  $H$  ja magneettivuon tiheyttä  $B$  yhdistää ilman permeabiliteetti ja ne muuttuvat samassa suhteessa. Magneettisesti polarisoituvissa aineissa näiden käyttäytyminen on kuitenkin erilaista. Sähkökentän voimakkuuden ja magneettikentän voimakkuuden välinen dualismi on nostanut magneettikentän voimakkuuden  $H$  laskennallisesti tärkeään rooliin, vaikkakin magneettikentän tiheys  $B$  on fysikaalinen perussuure.

Henryt muutetaan tesloiksi kertomalla väliaineen permeabiliteetilla ja teslat henryiksi jakamalla väliaineen permeabiliteetilla. (14, s. 9.)

## 2.8 Biot–Savartin laki

Epämääräisen silmukan aiheuttaman magneettikentän ratkaisussa yksinkertaisin ja suorin ratkaisu on Biot–Savartin laki. Toinen ratkaisuvaihtoehto olisi vektoripotentialin taikka skalaaripotentialin käyttäminen. Kuvassa 4 kuvataan suoran johtimen ympärilleen muodostaman magneettikentän muotoa. Lain kehittivät Jean-Baptiste Biot ja Felix Savart 1800-luvun alkupuolella. Virtasilmukka jaetaan lyhyisiin osiin eli alkioihin. Integroinnissa summataan virta-alkioiden muodostamia kenttiä, joiden yhteistulos on magneettikentän voimakkuus testipisteessä. Koska integroitavana on vektori, täytyy jokainen kolmesta komponentista käsitellä omana integraalinaan. (16.)



KUVA 4.. Virtajohtimen ympärilleen muodostama magneettikenttä (15)

Biot–Savartin laki perustuu mittapisteen, testipisteen eli kenttäpisteen ja virtalangan alkion määrittämisen alan integrointiin. Yhden alkion  $dB$  aiheuttama osuus magneettikenttään  $B$  lasketaan kaavalla 1. Korvaamalla permeabiliteetin arvolla yksi saadaan tulos henryinä. (14, s- 164)

KAAVA 1. Yksittäisen virta-alkion tyhjiössä aiheuttaman magneettivuon tiheyden laskukaava (16)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{(I ds \times r)}{r^2}$$

$\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti eli  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

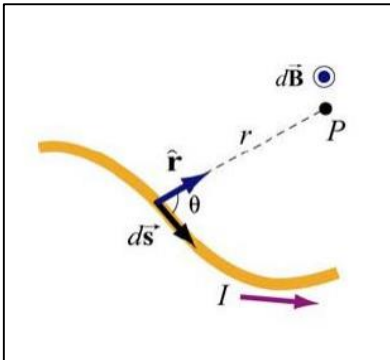
$I$  = alkiossa kulkeva virta

$d\mathbf{s}$  = virta-alkio

$\mathbf{r}$  = virta-alkiosta testipisteen suuntaan osoittava yksikkövektori

$r$  = matka virta-alkiosta testipisteeseen

Kuva 5 selventää laskennan perusteita. Virta kulkee nuolen  $I$  osoittamaan suuntaan, käsiteltävä alkio  $d\mathbf{s}$  on merkitty mustalla nuolella, Magneettikenttä  $d\mathbf{B}$  testipisteessä  $P$  osoittaa kohtisuoraan paperia päin.



KUVA 5. Yksittäisen virta-alkion aiheuttaman magneettikentän laskenta pisteessä  $P$  (16)

Kaavalla 2 lasketaan koko lähteen aiheuttama magneettikenttä. Siinä lasketaan integraali koko lähteen matkalta. Magneettikenttä testipisteessä on jokaisen virta-alkion testipisteeseen aiheuttamien magneettikenttien vektorisumma.

KAAVA 2. Silmukan aiheuttaman magneettivuon tiheyden laskentakaava (16)

$$\mathbf{B} = \int_{\text{lähde}} d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 * I}{4\pi} \int_{\text{lähde}} d\mathbf{s} \times d\mathbf{r} / r^2$$

$d\mathbf{B}$  = yhden alkion aiheuttama magneettikenttä

$\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti eli  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

$I$  = alkiossa kulkeva virta

$d\mathbf{s}$  = virta-alkio

$d\mathbf{r}$  = virta-alkion ja testipisteen suuntainen yksikkövektori

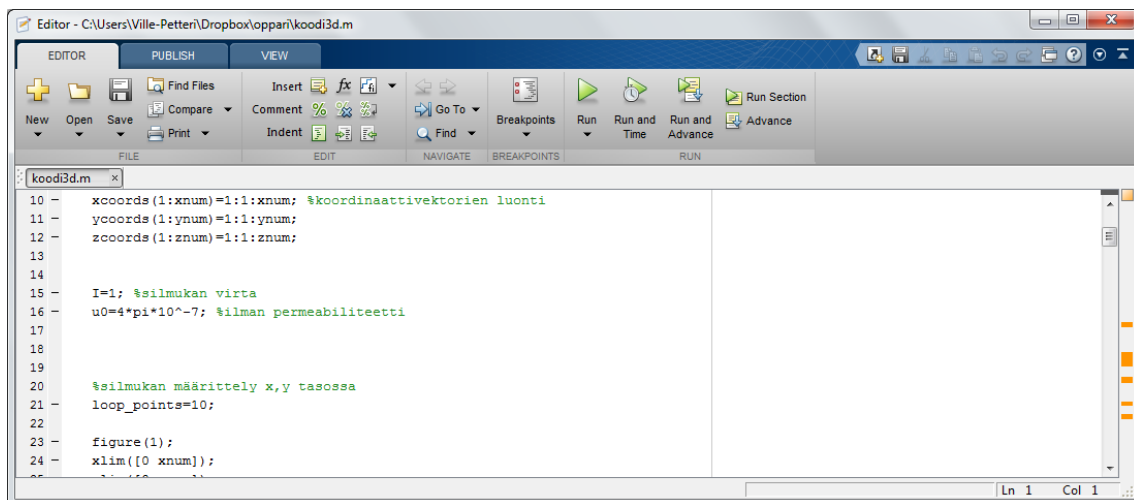
$r$  = matka virta-alkiosta testipisteeseen

Virta-alkio muodostaa magneettikentän, joka on kohtisuorassa virta-alkiota ja virta-alkion ja kenttäpisteen välistä yhdysjanaa vastaan. Jos virta-alkio osoittaa karteesisessa koordinaatistossa

suuntaan Y ja yhdysjana suuntaan Z, magneettikenttä osoittaa suuntaan X. Kenttä on nolla virta-alkion akselilla ja suurimmillaan kohtisuorassa alkiosta.

## 2.9 Matlab

Matlab on ohjelmisto, joka tarjoaa tehokkaita työkaluja ongelmanratkaisuun ja tulosten graafiseen esitykseen. Erityisen hyvin se soveltuu vektorilaskentaan, joka on tärkeää tätä työtä ajatellen. Datat säilyminen matriiseihin on toinen tärkeä ominaisuus jonka ohjelma tarjoaa.



```
Editor - C:\Users\Ville-Petteri\Dropbox\oppari\koodi3d.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Compare Find Files Insert Comment % fx
Indent Indent Find Go To Breakpoints Run Run and Run and Run Section
Advance Advance
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN
koodi3d.m
10 - xcoords(1:xnum)=1:1:xnum; %koordinaattivektorien luonti
11 - ycoords(1:ynum)=1:1:ynum;
12 - zcoords(1:znum)=1:1:znum;
13
14
15 - I=1; %silmukan virta
16 - u0=4*pi*10^-7; %ilman permeabiliteetti
17
18
19
20 %silmukan määrittely x,y tasossa
21 - loop_points=10;
22
23 - figure(1);
24 - xlim([0 xnum]);
Ln 1 Col 1
```

KUVA 6. Kuvakaappaus Matlab-simulaatiosta

Matlabia voi käyttää interaktiivisesti, eli annetaan komento ja ohjelma laskee tuloksen. Ohjelma mahdollistaa myös erilaisten skriptien ja ohjelmien kirjoittamisen. Ne ovat käytännössä yksittäisien käskyjen tallentamista ja niiden suorittamista laskevassa järjestyksessä. Matlabissa on myös perinteisen ohjelmoinnin työkaluja, kuten erilaisia silmukkarakenteita, jotka olivatkin erittäin tarpeellisia tässä työssä. Ne hidastavat laskentaa verrattuna vektoreilla ja matriiseilla suoritettavaan laskentaan ja niitä pidetään usein amatöörimäisenä tuhertamisena. Silmukkarakenteiden suurimittainen välttely heikentäisi kuitenkin koodin kehitysmahdollisuuksia esimerkiksi C-kieleen siirryttäessä. Työssä käytettiin pääosin Matlabin versiota R2013a. (17.)

### 3 TOTEUTUS

Työn tavoitteena oli magneettikenttäsimulaattorin kehittäminen. Simulaattori toteutettiin Matlab-ohjelmaa käyttäen. Laskennassa käytettiin Biot–Savartin lakia, joka mahdollistaa virtalähteen numeerisen integroinnin. Tämä on tärkeää, koska monimutkaiset silmukkarakenteiden integroiminen on mahdotonta.

#### 3.1 Simulaattorin toimintaperiaate

Magneettikentän voimakkuus lasketaan tietyissä testipisteissä. Näiden testipisteiden määrää rajoittaa tietokoneen laskentakapasiteetti. Testipisteet sijoitetaan ohjelmassa säännöllisesti kolmiulotteiseen matriisiin, yleisimmin testauksessa käytettiin  $10 \times 10 \times 10$  matriisia eli tuhatta testipistettä. Testipisteiden lisääminen miljoonaan eli  $100 \times 100 \times 100$ :taan pisteeseen oli työssä käytetylle tietokoneelle liian raskasta.

Erilaisten adaptiivisten laskentajärjestelmien kehittäminen, joissa testipisteitä voidaan asettaa tiheämmin erityisen mielenkiinnon kohteena oleville alueille, olisi yksi mahdollisuus laskennan keventämiseksi.

Testipisteiden joukkoon määritellään virtasilmutta, jonka aiheuttamaa magneettikenttää tutkitaan. Silmutta määritellään kolmiulotteisesti (X-, Y- ja Z-tasot) karteesisessa koordinaatistossa. Koordinaattien määrittelemät pisteet yhdistetään suorilla janoilla, joten pyöreän muodon saamiseksi koordinaatteja tulee asettaa tiheään. Tiheyttä rajoittaa integrointi askel eli yhden virta-alkion pituus. Aidosti kaarevaa linjaa on siis mahdotonta saavuttaa.

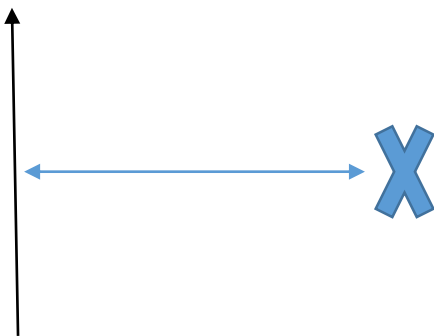
Silmukan koordinaattipisteiden väliset jannot jaetaan virta-alkioihin. Virta-alkiosta lasketaan vektorit jokaiseen testipisteeseen. Tätä vektoria tarvitaan magneettikentän laskemiseen. Jokaisen virta-alkion aiheuttama magneettikenttä jokaiseen testipisteeseen lasketaan normaalin vektorien yhteenlaskun muodossa. Tämä vektorisumma on magneettikentän voimakkuus testipisteessä.



### 3.2 Biot–Savartin lain soveltaminen Matlabissa

Biot–Savartin lain soveltaminen Matlabille sopivaksi oli kohtuullisen yksinkertaista, koska Matlab osaa käsitellä vektorisuureita. Ongelmia aiheutti Matlabin tapa kääntää koodia suorituksen aikana rivi kerrallaan. Tämä hidasti ohjelman suorittamista merkittävästi kun puhutaan miljoonista laskutoimituksista. Erityisesti jakolasku oli ohjelmalle raskas suorittaa. Numeerinen integrointi oli ainoa mahdollinen ratkaisu, koska mielivaltaisen silmukan yhtälön integroiminen olisi käytännössä mahdotonta.

Koska kyseessä on vektori-integraali, lasketaan integraali erikseen X-, Y- ja Z-komponenteille. Käytännön induktiosilmukkasovelluksissa tärkeintä on pystysuuntainen Z-komponentti, koska kuulolaitteessa sijaitsevan induktiokelan asennon takia Z-komponentti aiheuttaa virran induktoitumisen kelaan. Käytännössä laskennassa käsitellään sekä virta-alkiota että muodostuvaa magneettikenttää komponenttimuodossa. Jokaisen virta-alkiokomponentin aiheuttama magneettikenttä tutkitaan erikseen. Tällöin tutkittavat komponentit ovat aina kohtisuoraan toisiaan vastaan, mikä helpottaa laskentaa. Alkiokomponentin aiheuttama magneettikenttä on kohtisuoraan sekä alkiokomponenttia, sekä sitä ja testipistettä yhdistävää vektoria vastaan. Kuvassa 7 virta-alkio on musta, pystysuora nuoli. Magneettikenttä on X ja sen suunta on sisäänpäin paperia kohden. Niitä yhdistävä vektori on sininen, kaksipäinen nuoli. Magneettikentän suunta saadaan oikean käden säännöllä. Kun ylöspäin osoittava oikean käden peukalo kuvaa virta-alkiota, muut sormet osoittavat magneettikentän suunnan.



KUVA 7. Virta-alkio ja sen aiheuttama magneettikenttä

### 3.2.1 X-, Y- ja Z-komponenttien laskeminen

Kaavoilla 3, 4 ja 5 lasketaan yksittäisen virta-alkion aiheuttama magneettikenttä testipisteeseen. Niissä käytettävien alkioiden  $RX$ ,  $RY$ ,  $RZ$ ,  $dIX$ ,  $dIY$  ja  $dIZ$  laskenta on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Jokainen kaava palauttaa yhden vektorikomponentin magneettikentästä. Kaavalla 3 lasketaan testipisteeseen syntyvä X-suuntainen magneettikenttä. Kaavalla 4 lasketaan Y-suuntainen ja kaavalla 5 Z-suuntainen magneettikenttä.

*KAAVA 3. Yksittäisen virta-alkion aiheuttaman X-suuntaisen magneettikentän laskeminen (18)*

$$X = \frac{I}{4\pi} * \frac{(dIY * RZ - dIZ * RY)}{r^3}$$

$I$  = virta ampeereina

$dIY$  = virta-alkion Y-suuntainen komponentti

$RZ$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin Z-komponentti

$dIZ$  = virta-alkion Z-suuntainen komponentti

$RY$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin Y-komponentti

$r$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin pituus

*KAAVA 4. Yksittäisen virta-alkion aiheuttaman Y-suuntaisen magneettikentän laskeminen (18)*

$$Y = \frac{I}{4\pi} * \frac{(dIZ * RX - dIX * RZ)}{r^3}$$

$I$  = virta ampeereina

$dIZ$  = virta-alkion Z-suuntainen komponentti

$RX$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin X-komponentti

$dIX$  = virta-alkion X-suuntainen komponentti

$RZ$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin Z-komponentti

$r$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin pituus

*KAAVA 5. Yksittäisen virta-alkion aiheuttaman Z-suuntaisen magneettikentän laskeminen (18)*

$$Z = \frac{I}{4\pi} * \frac{(dIX * RY - dI * RX)}{r^3}$$

$I$  = virta ampeereina

$dIX$  = virta-alkion X-suuntainen komponentti

$RY$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin Y-komponentti

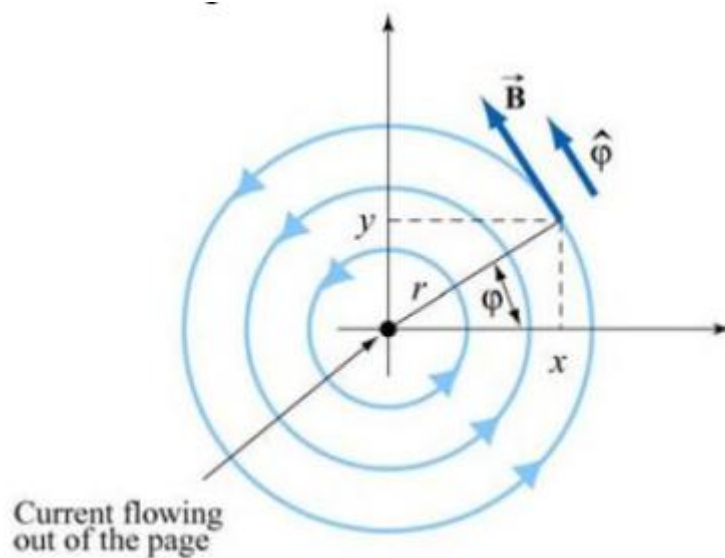
$dIY$  = virta-alkion Y-suuntainen komponentti

$RX$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin X-komponentti

$r$  = virta-alkioita ja testipistettä yhdistävän vektorin pituus

### 3.2.2 Esimerkki laskennasta

Esimerkkinä lasketaan kuvan 8 mukainen tilanne jossa origossa on Z-suuntainen 0,1 metrin mittainen virta-alkio. Virta kulkee katsojaa kohti. Testipiste sijaitsee koordinaateissa 1,1,0 (X, Y, Z). Alkiossa kulkee 1 ampeerin virta.



KUVA 8. Testitapaus, virta kulkee katsojaa kohti (16)

Ensimmäisenä lasketaan vektorin R komponentit. Nämä laskutoimitukset on esitetty taulukossa 2. Koska testipiste ja alkio ovat samassa tasossa on RZ nolla.

TAULUKKO 2. R-alkioiden laskenta

$RX = \text{testipisteen } X\text{-koordinaatti} - \text{alkion sijainnin } x \text{ koordinaatti}$
$0 - 1 = -1$
$RY = \text{testipisteen } Y\text{-koordinaatti} - \text{alkion sijainnin } Y \text{ koordinaatti}$
$0 - 1 = -1$
$RZ = \text{testipisteen } Z\text{-koordinaatti} - \text{alkion sijainnin } Z \text{ koordinaatti}$
$0 - 0 = 0$

Tämän jälkeen selvitetään virta-alkion komponentit. Tämä on tehty taulukossa 3. Koska alkio on pystysuoraan Z-akselin mukainen, on sillä vain Z-komponentti.

TAULUKKO 3. dl-alkioiden laskenta

$dIX = \text{alkion loppupään } X\text{-koordinaatti} - \text{alkion alkupään } X\text{-koordinaatti}$
$0 - 0 = 0$
$dIY = \text{alkion loppupään } Y\text{-koordinaatti} - \text{alkion alkupään } Y\text{-koordinaatti}$
$0 - 0 = 0$
$dIZ = \text{alkion loppupään } Z\text{-koordinaatti} - \text{alkion alkupään } Z\text{-komponentti}$
$0,1 - 0 = 0,1$

Seuraavaksi suoritetaan itse Biot–Savartin lain mukainen laskenta kaavojen 3, 4 ja 5 mukaisesti. Tarvittava etäisyysvektorin r pituus lasketaan taulukon 4 mukaisesti. Kun taulukoissa 2, 3 ja 4 saadut arvot syötetään taulukossa 5 kaavoihin 3, 4 ja 5 saadaan syntyvän magneettikentän komponentit henryinä.

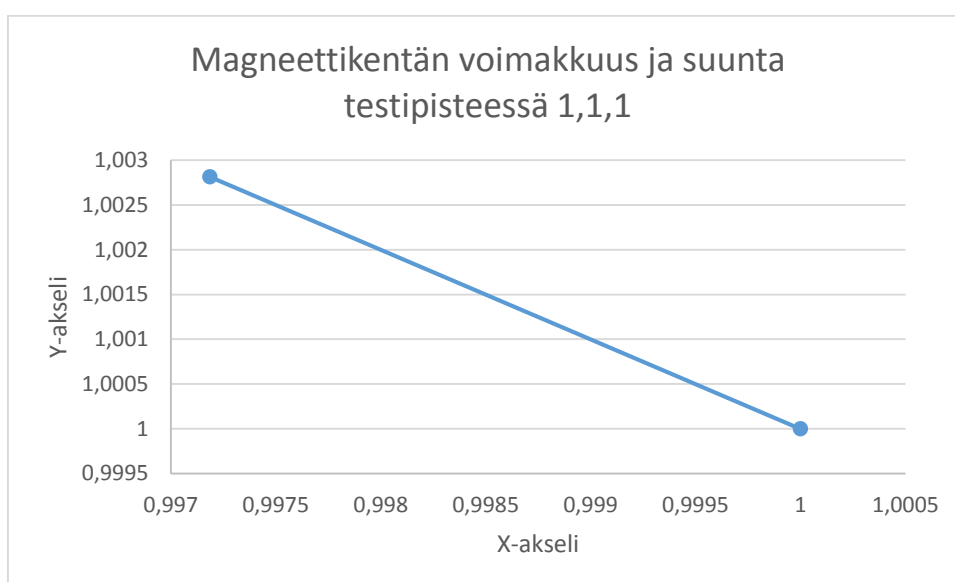
TAULUKKO 4. Etäisyysvektorin r pituuden laskenta

r	$\text{sqrt}(RX^2 + RY^2 + RZ^2)$	1,414214
---	-----------------------------------	----------

TAULUKKO 5. Biot–Savartin lain mukainen laskenta

X	$I / (4 * \pi) * (dLy * Rz - dLz * Ry) / (r^3)$	-0,00281
Y	$I / (4 * \pi) * (dLz * Rx - dLx * Rz) / (r^3)$	0,002813
Z	$I / (4 * \pi) * (dLx * Ry - dLy * Rx) / (r^3)$	0

Kuvassa 9 magneettikenttä on esitetty graafisesti. Se muodostaa noin 90 asteen kulman vektoria R-vastaan. Lievä epätarkkuus desimaalien käsittelyssä aiheuttaa noin 0,3% virheen. Janan pituus osoittaa magneettikentän voimakkuuden ja sen suunta magneettikentän suunnan. X-akselilla on magneettikentän X-komponentti ja Y-akselilla Y-komponentti. Z-komponentti ei näy kuvassa, kuvan ollessa kaksiulotteinen. Z-komponentti oli laskennan mukaan 0, koska sekä  $dLX$  että  $dLY$  komponentit ovat 0 virta-alkion ollessa Z-akselin suuntainen.



KUVA 9. Magneettikentän suunta ja voimakkuus. Piste 1,1 on testipiste.

### 3.3 Koodin rakenne

Tässä kappaleessa selvitetään koodin rakenne ja toimintaperiaate. Koodi on toimitettu tilaajalle ja siihen on merkitty tämän kappaleen mukaiset lohkot. Matlab suorittaa ohjelman rivi kerrallaan,

ylhäältä alas, kääntäen koodin lennossa, eli vasta juuri ennen suorittamista. Tämä poikkeaa esimerkiksi C-kielen toimintaperiaatteesta, jossa koodi käännetään konekielelle kokonaisuudessaan ennen suorittamista.

1. Edellisten suorituskertojen muuttujien poistaminen muistista sekä edellisen suorituskertojen kuvaikkunoiden sulkeminen. Tämä tehdään, jotta vältetään tiettyjen arvojen kertautumiselta suorituskertojen välillä.
2. Testipisteiden määrän valitseminen sekä testiavaruuden rajojen määrittely. Testipisteiden määrällä tarkoitetaan yhdelle akselille sijoitettavien testipisteiden määrää. Kymmenen testipistettä tarkoittaa siis  $10 \times 10 \times 10$ :tä eli 1000:tä testipistettä koko avaruudessa. Testialueen rajat vaikuttavat myös testipisteiden etäisyyteen toisistaan. Jos testipisteitä luodaan 10 ja alueen rajat ovat 0:sta 9:ään, tulee yhden pisteen etäisyydeksi toisesta metri, joka on käytännön sovelluksiin liian suuri, mutta jota käytettiin osassa ohjelman testauksista. 20 sentin pistevälillä saatiin hyviä tuloksia ja vain laskentateho rajoittaa pisteiden määrää. Tässä lohossa luodaan myös valikko, jossa käyttäjä voi valita erilaisten ennakkoon luotujen testitapausten väliltä.
3. Kolmannessa lohossa määritellään silmukassa kulkeva virta, ilman permeabiliteetti ja muut vastaavat laskutoimituksiin vaikuttavat fysikaaliset suureet. Tässä lohossa suoritetaan myös muutama kerto- ja jakolasku, jolloin vältetään niiden monikertainen toistaminen tulevien For-silmukoiden sisällä. Myös vaihtovirran simulointi onnistuu tässä lohossa toteutetun siniaallon luonnin mukaisesti, vaikkakin tulosten tallentuminen on epätäydellistä, eri virran arvojen tallentuessa toistensa päälle. Tulosten visualisointi toimii oikein. Vaihtovirran simulointi oli työn kannalta toisarvoista.
4. Neljännessä lohossa määritellään integrointi-askelen pituus. Mitä lyhyempi askel, sitä tarkempi tulos ja raskaampi laskenta.
5. Viidennessä lohossa luodaan valikko jonka kautta käyttäjä voi valita haluamansa testisilmukan. Testisilmukat määritellään lohossa syöttämällä silmukan koordinaatit ennakoita koodiin. Määrittelypisteet myös lasketaan myöhempää käyttöä varten.

6. Kuudennessa lohkossa määritellään ensiksi magneettikenttien jokaiselle komponentille omat matriisit, joihin ne myöhemmin tallennetaan. Nollia täynnä olevien matriisien etukäteen luonti helpottaa laskentaa, koska Matlab joutuisi muuten luomaan matriisin uudelleen aina kun sen koko kasvaa. Tämä vaatisi matriisin sisällön kopioimista, uuden matriisin luontia ja tulosten tallentamista matriisiin. Lohkossa 2 määritelty testipisteiden määrä määrittää matriisien koot.
7. Testipisteiden luonti lohkossa 2 määriteltyjen rajojen mukaan. Luodaan ensimmäinen ja viimeinen testipiste ja sijoitetaan loput tasaisesti muodostuvalle lukujanalle.
8. Luodaan kolme sisäkkäistä For-silmukkaa, joiden avulla käydään läpi kaikki testipisteet. Näiden silmukoiden sisällä käydään For-silmukassa läpi kaikki silmukan määrittelypisteiden väliset sektorit ja tämän silmukan sisällä kaikki sektorista erotettavat ds-alkiot. Ds-alkion pituus määriteltiin lohkossa 4. Lohkossa suoritetaan varsinainen magneettikentän laskenta ja tallennetaan tulokset lohkossa 6 määriteltyihin matriiseihin komponenttimuodossa.
9. Yhdeksännessä lohkossa tulokset esitetään kuvaajina. Ensimmäinen kuvaaja esittää magneettikentän suunnat ilman voimakkuustietoa. Toinen kuvaaja esittää myös magneettikentän voimakkuuden. Kolmannessa kuvaajassa esitetään Z-suuntainen komponentti valitulta tasolta.
10. Lohkon sisältö on tarkoitettu kahden kelan käsittelyyn. Tämä selvitetään paremmin testausosiossa.

## 4 TESTAUS

Testauksen tavoitteena oli selvittää, vastaako simuloinnin tulokset todellisuutta ja kuinka tiheästi virtasilmutta tulee määritellä tarkkojen tulosten saamiseksi. Lisäksi testattiin testipisteiden määrän lisäämistä ja kahden kelan simulointia Helmholtzin kelan avulla.

### 4.1 Ympyräsilmutkatestit

Metrin halkaisijaltaan oleva, pyöreä silmutta, jossa kulkee yhden ampeerin virta, aiheuttaa keskipisteeseensä yhden A/m magneettikentän. Tämä selviää kaavalla 6:

*KAAVA 6. Magneettikentän voimakkuus ympyrän mallisen virtasilmutkan keskipisteessä henryinä.*  
(19)

$$H = 1 / (2 * r)$$

$r$  = ympyrän säde

Simulaattorin testausta varten luotiin kolme testiympyrää, 8, 16 ja 32 pisteellä määriteltynä. Teoriassa simulaattorin tarkkuuden tulisi parantua, mitä lähemmäksi täydellistä ympyrää päästään. Integrointiaskeleena käytettiin yhtä senttimetriä ja testipisteitä oli 10\*10\*10 eli 1000. Tällä testipistemäärällä Z-tasosta oleva kuva vääristyy Matlab-ohjelman Surf-funktion ominaisuuksien vuoksi. Virhe ei vaikuta laskentaan, vaan on ainoastaan esteettinen. Ongelma pienenee testipisteitä lisätessä, kuten huonetta kiertävien silmutkoiden simulaatioista kappaleessa 4.2, voidaan huomata.

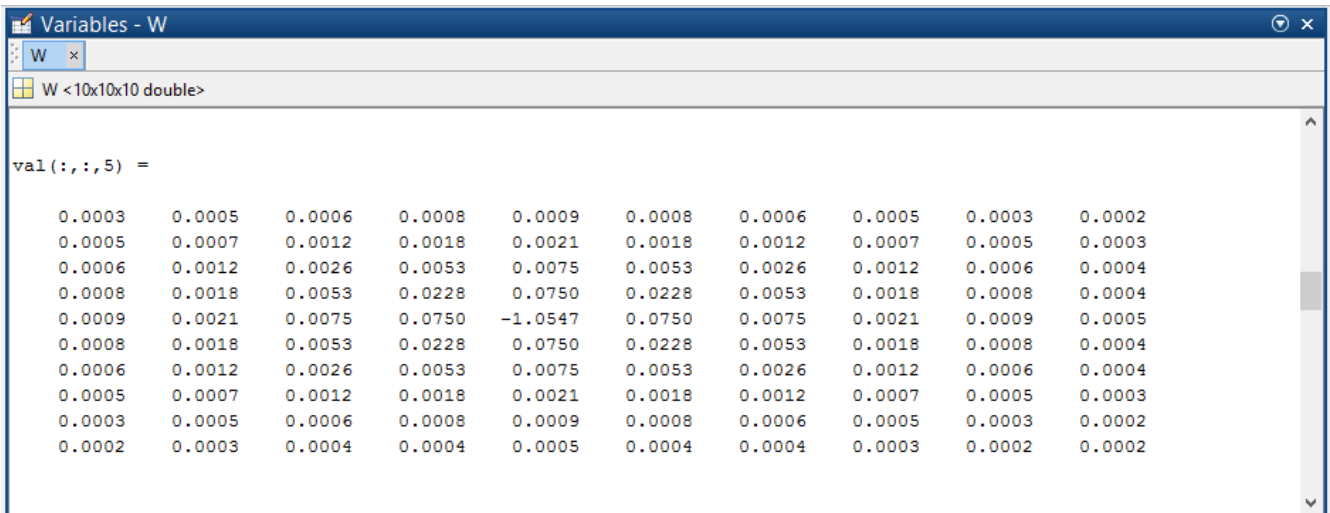
#### 4.1.1 8 pisteen silmutta

Taulukossa 6 on kahdeksalla pisteellä luodun silmutkan koordinaatit. Koordinaatit on laskettu Excel-ohjelmalla yksikköympyrää hyväksi käyttäen. X-koordinaatit saadaan kosinifunktiota ja Y-koordinaatit sinifunktiota käyttäen. Z-tason koordinaatti pysyy koko ajan samana silmutkan ollessa yhdessä tasossa.



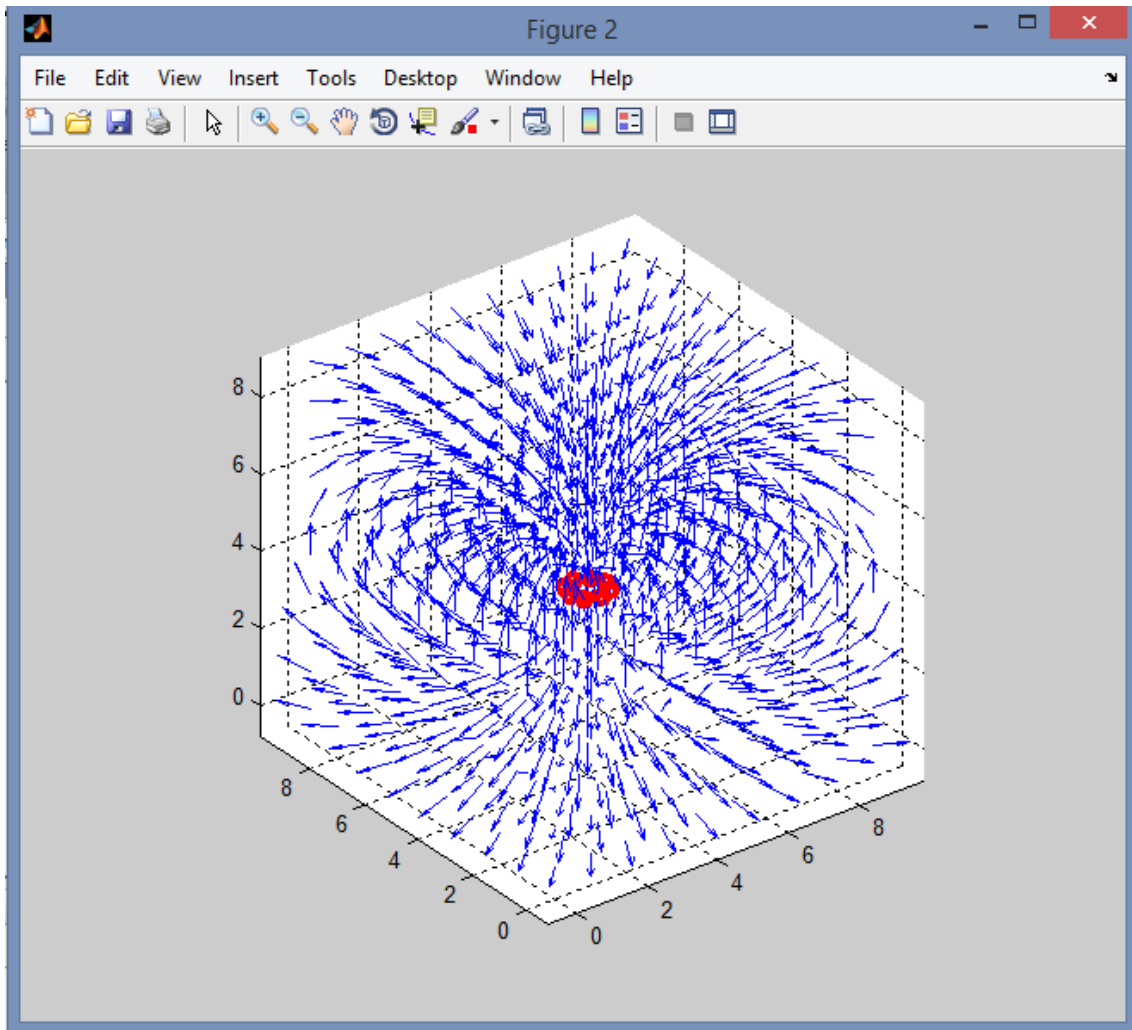
TAULUKKO 6. 8 pisteellä määritellyn ympyrän mallisen silmukan koordinaatit

x	y	z
4,5	4	4
4,353553	4,353553	4
4	4,5	4
3,646447	4,353553	4
3,5	4	4
3,646447	3,646447	4
4	3,5	4
4,353553	3,646447	4
4,5	4	4



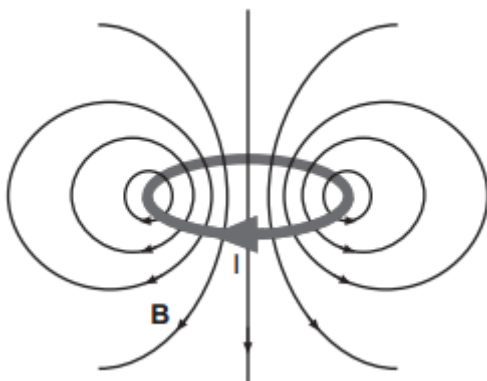
KUVA 10. 8 pisteellä määritellyn ympyrän muotoisen silmukan muodostama Z-suuntainen magneettikenttä silmukan tasalla

Kuvassa 10 on esitetty silmukan tasalla vallitsevat magneettikentän Z-komponentin suuntaiset voimakkuudet. Silmukan keskipiste sijaitsee koordinaateissa 5,5. Sen arvo  $-1,0547$  on erittäin lähellä teorian mukaista yhden henryn voimakkuutta. Arvo on negatiivinen koska virta on määritelty kulkemaan vastapäivään.

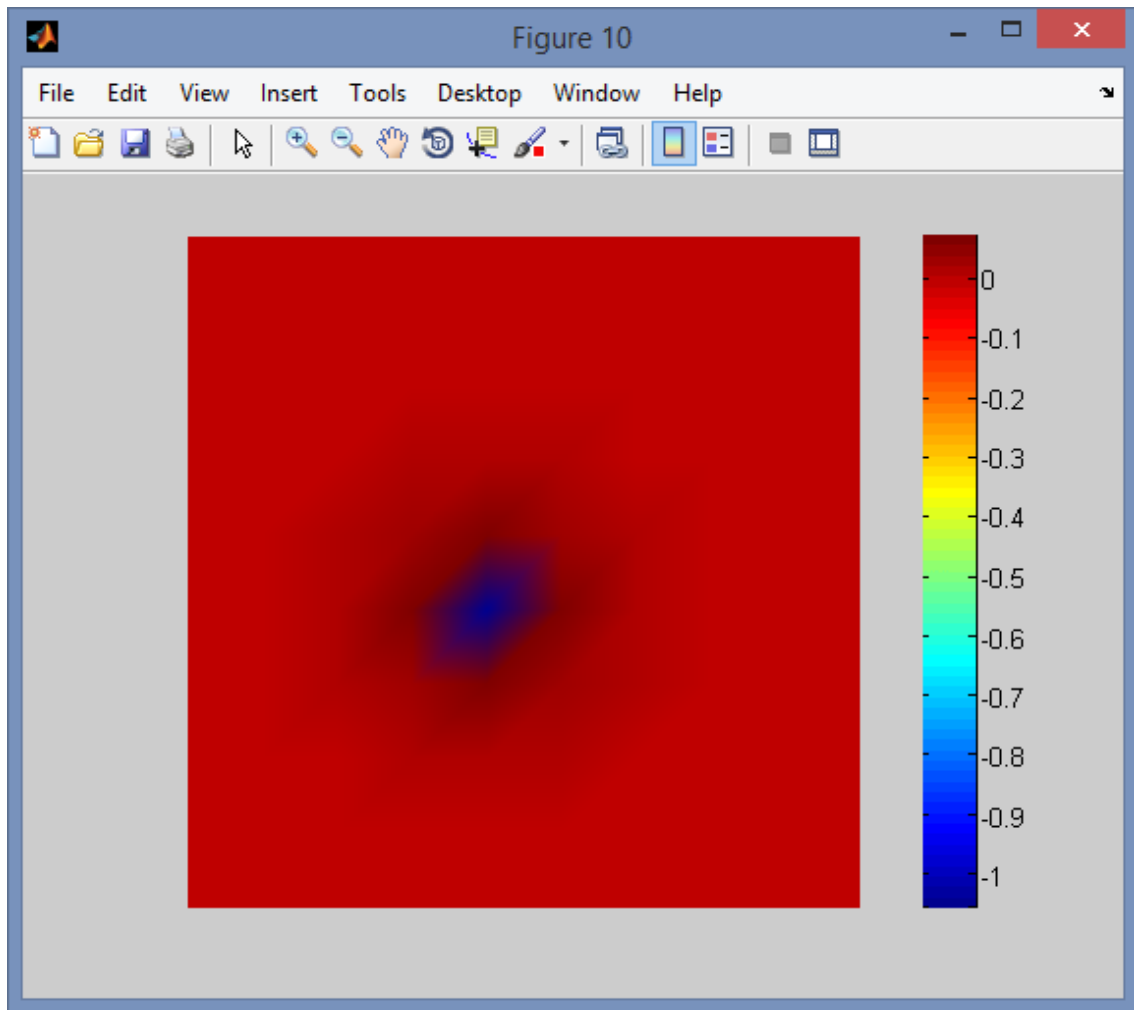


KUVA 11. Magneettikentän suunnat 8 pisteellä määritellyn, ympyrän muotoisen silmukan ympärillä. Virta kiertää vastapäivään

Kuvassa 11 on esitelty magneettikentän muoto silmukan ympärillä. Nuolen pituudet eivät kuvaa kentän voimakkuutta. Kenttä vaimenee lähteestä etääntyessä. Kentän muoto vastaa kuvassa 12 esiintyvää muotoa. Simulaation tulos siis vastaa kirjallisuuden mukaista oikeaa tulosta.



KUVA 12. Kirjallisuudessa esiintyvä magneettikentän muoto (20, s. 63)



*KUVA 13. Z-suuntainen magneettikentän voimakkuus henryinä 8 pisteellä määritellyn silmukan tasalla. Kenttä on negatiivinen, koska virta kiertää vastapäivään.*

Kuvasta 13 voidaan huomana harvan näytteistyksen aiheuttamat ongelmat tulosten graafisessa esittämisessä. Magneettikenttä vaimenee niin nopeasti, ettei kunnollista liukumaa ole havaittavissa.

#### 4.1.2 16 pisteen silmukka

Taulukossa 7 on kuudellatoista pisteellä luodun silmukan koordinaatit. Koordinaatit on laskettu Excel-ohjelmalla yksikköympyrää hyväksikäyttäen. X-koordinaatit saadaan kosinifunktiota ja Y-koordinaatit sinifunktiota käyttäen. Arvoja on 17, jotta silmukan päät yhdistyvät. Ensimmäiset ja viimeiset koordinaatit ovat siis samoja. Z-tason koordinaatti pysyy koko ajan samana silmukan ollessa yhdessä tasossa.

TAULUKKO 7. 16 pisteellä määritellyn ympyrän mallisen silmukan koordinaatit

x	y	z
5,5	5	5
5,46194	5,191342	5
5,353553	5,353553	5
5,191342	5,46194	5
5	5,5	5
4,808658	5,46194	5
4,646447	5,353553	5
4,53806	5,191342	5
4,5	5	5
4,53806	4,808658	5
4,646447	4,646447	5
4,808658	4,53806	5
5	4,5	5
5,191342	4,53806	5
5,353553	4,646447	5
5,46194	4,808658	5
5,5	5	5

W <10x10x10 double>

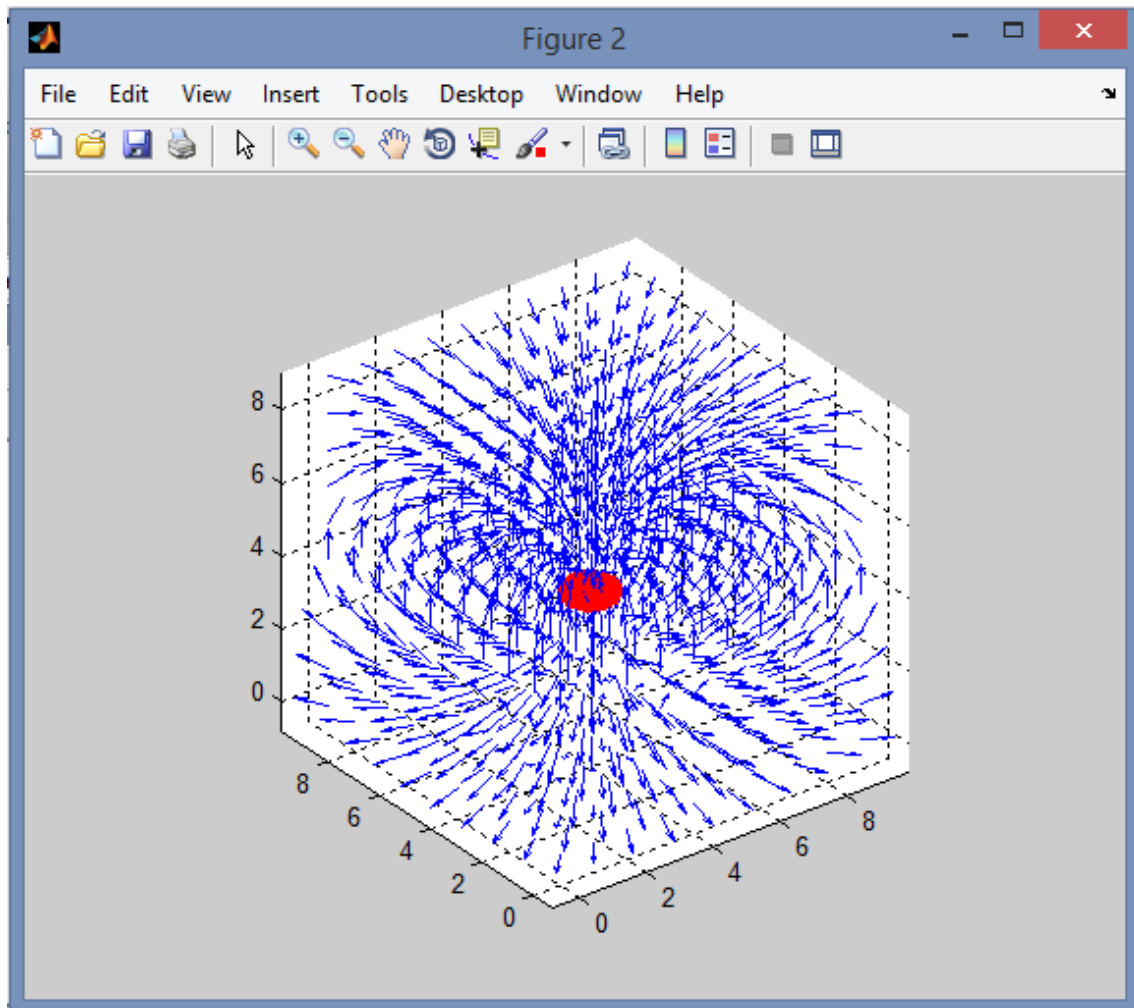
```

val(:, :, 5) =
    0.0003    0.0005    0.0007    0.0009    0.0010    0.0009    0.0007    0.0005    0.0003    0.0002
    0.0005    0.0008    0.0013    0.0020    0.0023    0.0020    0.0013    0.0008    0.0005    0.0003
    0.0007    0.0013    0.0028    0.0058    0.0082    0.0058    0.0028    0.0013    0.0007    0.0004
    0.0009    0.0020    0.0058    0.0249    0.0832    0.0249    0.0058    0.0020    0.0009    0.0005
    0.0010    0.0023    0.0082    0.0832    -1.0129    0.0832    0.0082    0.0023    0.0010    0.0005
    0.0009    0.0020    0.0058    0.0249    0.0832    0.0249    0.0058    0.0020    0.0009    0.0005
    0.0007    0.0013    0.0028    0.0058    0.0082    0.0058    0.0028    0.0013    0.0007    0.0004
    0.0005    0.0008    0.0013    0.0020    0.0023    0.0020    0.0013    0.0008    0.0005    0.0003
    0.0003    0.0005    0.0007    0.0009    0.0010    0.0009    0.0007    0.0005    0.0003    0.0002
    0.0002    0.0003    0.0004    0.0005    0.0005    0.0005    0.0004    0.0003    0.0002    0.0002

```

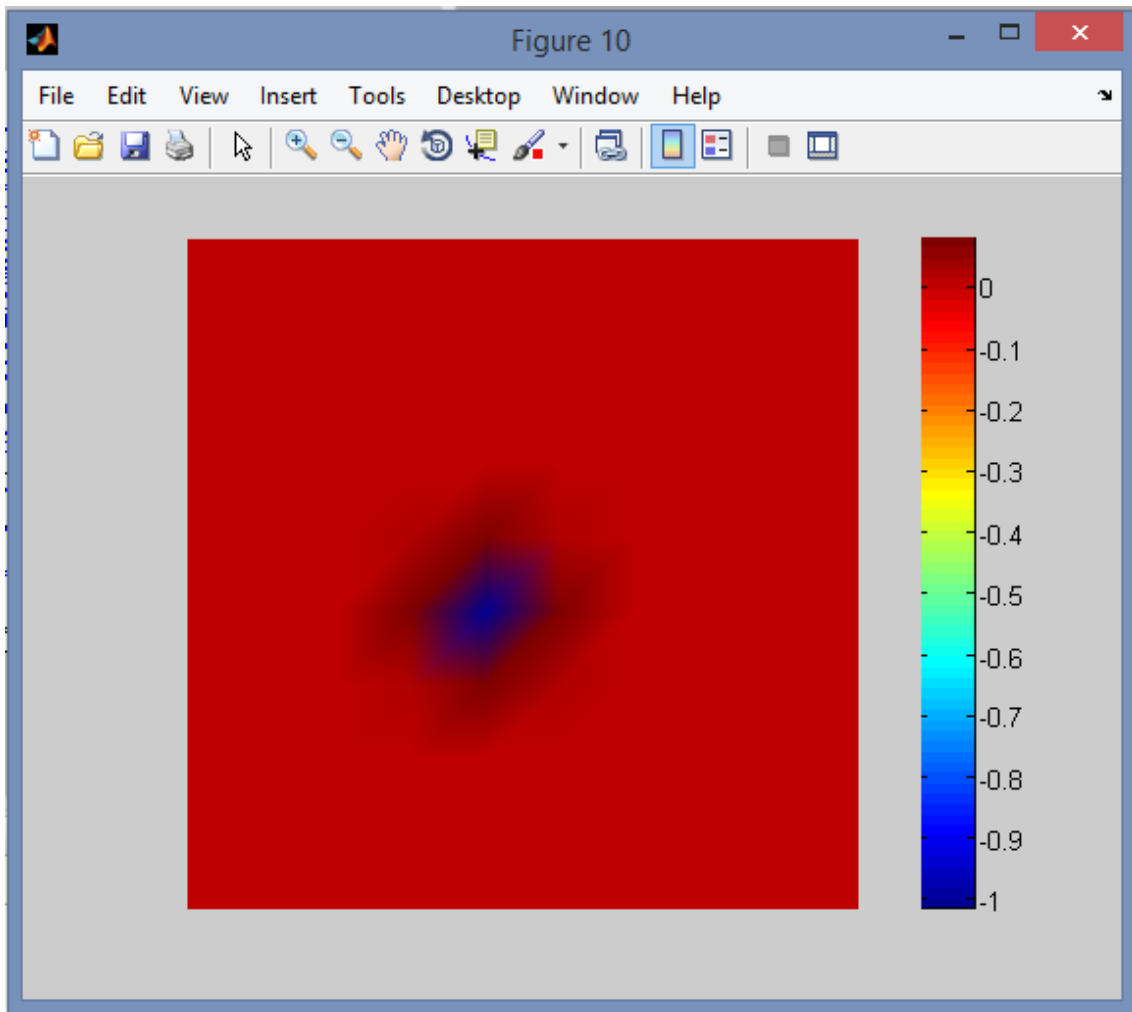
KUVA 14. 16 pisteellä määritellyn silmukan aiheuttama Z-suuntainen magneettikenttä silmukan tasossa.

Samoin kuin edellisessä testitapauksessa ympyrän keskipiste on viidennen sarakkeen viides arvo. Tulos  $-0,0129$  on hieman lähempänä oikeaa arvoa, mikä vahvistaa testioletusta. Arvo on negatiivinen virran kiertäessä vastapäivään. Tämä aiheutui yksikköympyrän käytöstä.



KUVA 15. Magneettikentän suunnat 16 pisteellä määritellyn silmukan ympäristössä. Virta kiertää silmukassa vastapäivään.

Vertaamalla kuvaa 15 ja kuvaa 11 visuaalisesti ei ole mahdollista huomata suuria eroja, vaikka kuvan 15 pitäisi vastata kuvan 12 tilannetta paremmin. Jo kahdeksan pisteen silmukka tuottaa hyviä tuloksia.



KUVA 16. Z-suuntainen magneettikentän voimakkuus henryinä 16 pisteellä määritellyn silmukan tasalla. Kenttä on negatiivinen, koska virta kiertää vastapäivään

Silmukan tarkempi määrittely ei poista ongelmia, jotka johtuvat harvasta testipisteiden asettelusta, kuten kuvassa 16 nähdään. Magneettikentän muutos kahden testipisteen välillä on liian suuri tämän kaltaiseen esitystapaan.

#### 4.1.3 32 pisteen silmukka

Taulukossa 8 on 32 pisteellä luodun silmukan koordinaatit. Koordinaatit on laskettu Excel-ohjelmalla yksikköympyrää käyttäen. X-koordinaatit saadaan kosinifunktiota ja Y-koordinaatit sinifunktiota käyttäen. Arvoja on 33, jotta silmukan päät yhdistyvät. Ensimmäiset ja viimeiset koordinaatit ovat siis samoja. Z-tason koordinaatti pysyy koko ajan samana silmukan ollessa yhdessä tasossa.

TAULUKKO 8. 32 pisteellä määritellyn ympyrän muotoisen silmukan koordinaatit

X	Y	Z
5,5	5	5
5,490393	5,097545	5
5,46194	5,191342	5
5,415735	5,277785	5
5,353553	5,353553	5
5,277785	5,415735	5
5,191342	5,46194	5
5,097545	5,490393	5
5	5,5	5
4,902455	5,490393	5
4,808658	5,46194	5
4,722215	5,415735	5
4,646447	5,353553	5
4,584265	5,277785	5
4,53806	5,191342	5
4,509607	5,097545	5
4,5	5	5
4,509607	4,902455	5
4,53806	4,808658	5
4,584265	4,722215	5
4,646447	4,646447	5
4,722215	4,584265	5
4,808658	4,53806	5
4,902455	4,509607	5
5	4,5	5
5,097545	4,509607	5
5,191342	4,53806	5
5,277785	4,584265	5
5,353553	4,646447	5
5,415735	4,722215	5
5,46194	4,808658	5
5,490393	4,902455	5
5,5	5	5



Variables - W

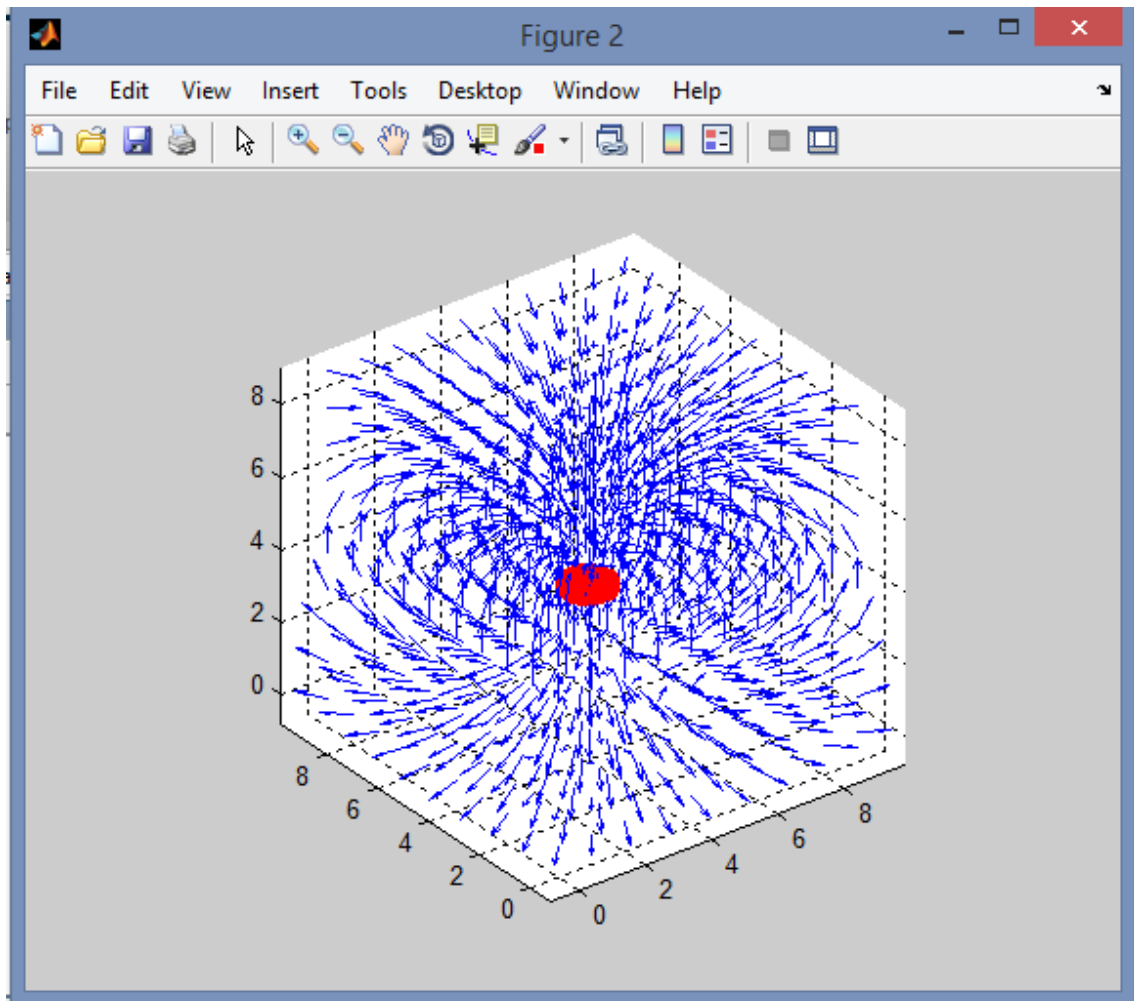
W <10x10x10 double>

val(:, :, 5) =

0.0003	0.0005	0.0007	0.0009	0.0010	0.0009	0.0007	0.0005	0.0003	0.0002
0.0005	0.0008	0.0014	0.0020	0.0024	0.0020	0.0013	0.0008	0.0005	0.0003
0.0007	0.0014	0.0028	0.0059	0.0083	0.0059	0.0028	0.0013	0.0007	0.0004
0.0009	0.0020	0.0059	0.0254	0.0854	0.0254	0.0058	0.0020	0.0009	0.0005
0.0010	0.0024	0.0083	0.0854	-1.0052	0.0841	0.0083	0.0024	0.0010	0.0005
0.0009	0.0020	0.0059	0.0254	0.0852	0.0253	0.0058	0.0020	0.0009	0.0005
0.0007	0.0013	0.0028	0.0059	0.0083	0.0059	0.0028	0.0013	0.0007	0.0004
0.0005	0.0008	0.0013	0.0020	0.0024	0.0020	0.0013	0.0008	0.0005	0.0003
0.0003	0.0005	0.0007	0.0009	0.0010	0.0009	0.0007	0.0005	0.0003	0.0002
0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002

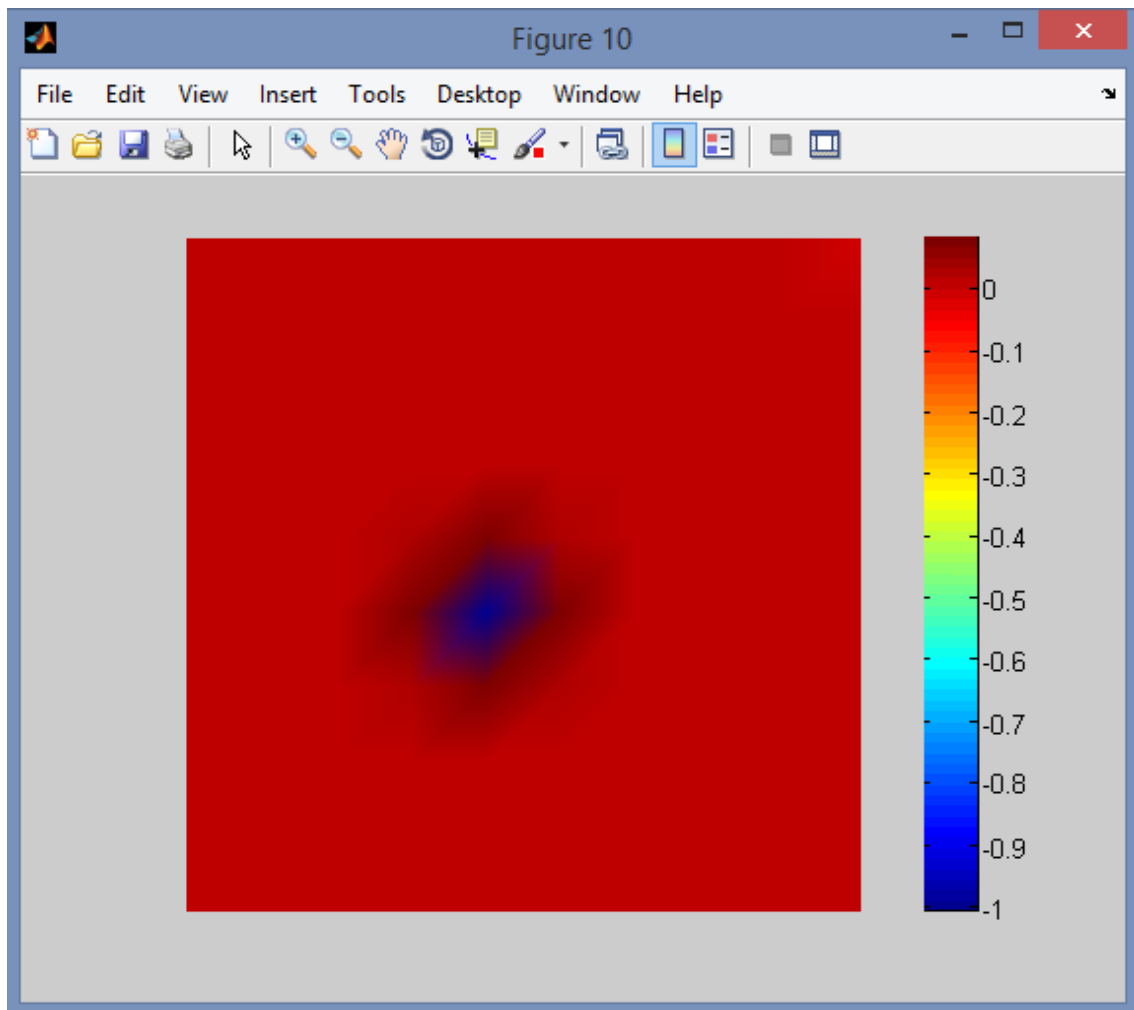
KUVA 17. 32 pisteellä määritellyn silmukan aiheuttama Z-suuntainen magneettikenttä silmukan tasossa.

Kuvassa 17 näkyy edelleen pienentynyt virhe verrattuna 8 ja 16 pisteen testeihin verrattuna. Keskipiste on tässäkin sijainnissa 5,5. Viita kiertää vastapäivään, mikä aiheuttaa negatiivisen arvon.



*KUVA 18. Magneettikentän suunnat 32 pisteellä määritellyn silmukan ympäristössä. Virta kiertää silmukassa vastapäivään.*

Kuvassa 18 magneettikentän muoto vastaa edelleen kuvan 12 osoittamaa, tieteellisessä kirjallisuudessa toteen näytettyä muotoa.



KUVA 19. Z-suuntainen magneettikentän voimakkuus henryinä 32 pisteellä määritellyn silmukan tasalla. Kenttä on negatiivinen, koska virta kiertää vastapäivään'

Kuvassa 19 nähdään muuttumattoman tilanteen harvan testipistekentän aiheuttamista ongelmista.

#### 4.1.4 Silmukatestauksien tuloksien analyysi

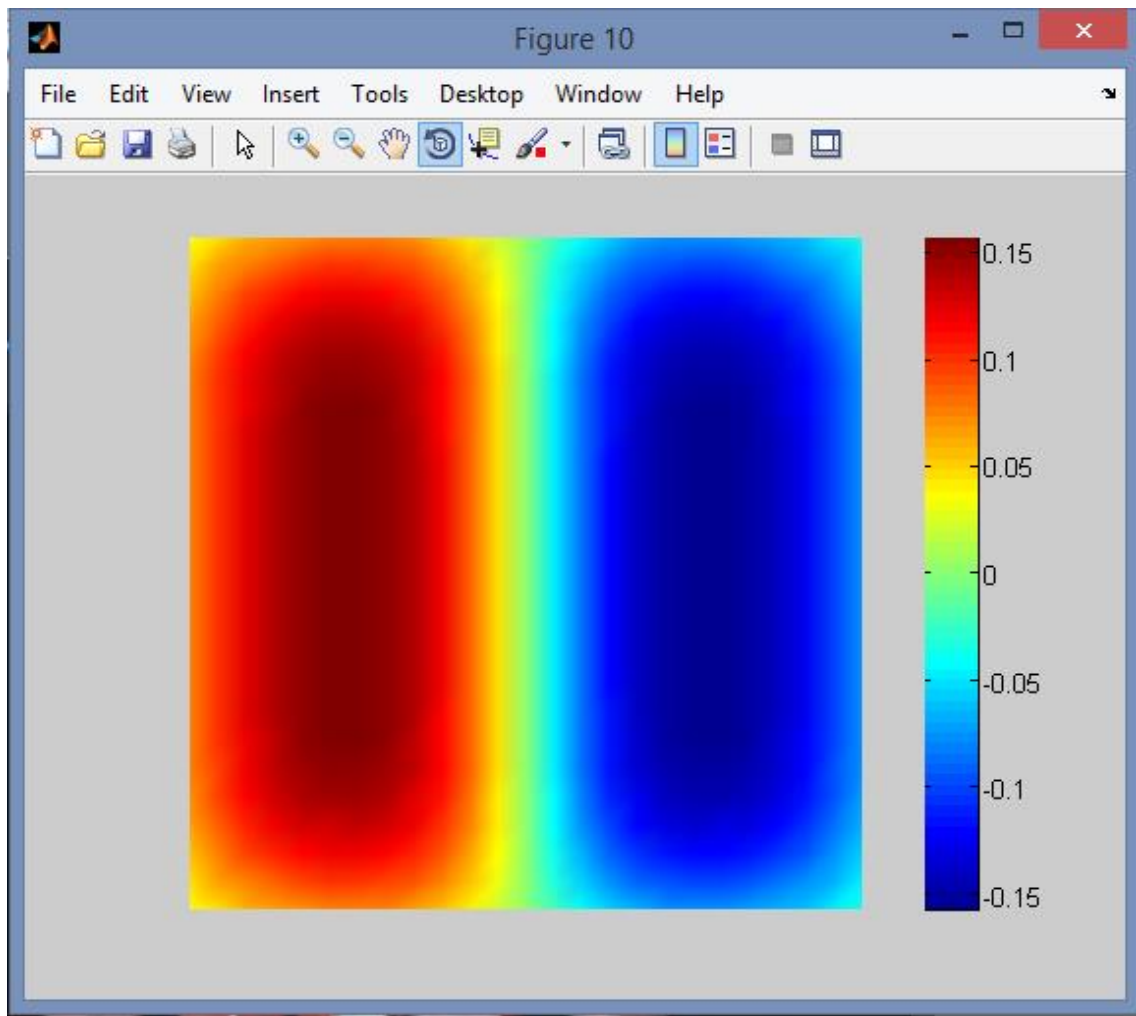
Tulokset ovat kiitettävän tarkkoja ja paranevat testipisteitä lisättäessä. 32 pisteellä simuloitaessa tulos on oikea 0,5 prosentin tarkkuudella, kuten taulukosta 9 nähdään. Tulosta voidaan pitää erittäin hyvänä. Induktiosilmukkaa tilaan asennettaessa ympäristön metallirakenteet aiheuttavat todennäköisesti huomattavasti suurempia poikkeamia. Magneettikentän muoto saatiin testeissä odotetun mallisena, mutta liian suuri testipisteiden väli aiheutti ongelmia kentän voimakkuuden kuvantamisessa. Myös silmukan fyysinen kasvattaminen parantaa kuvantamista.

TAULUKKO 9. Silmukkatestauksien tulokset virheprosentteineen

Määrittelypisteiden lukumäärä	Magneettikentän voimakkuus henryinä	Virheprosentti
8	-1,0547	5,47
16	-1,0129	1,29
32	-1,0052	0,52

#### 4.2 Testit tiheämmällä testipistejoukolla

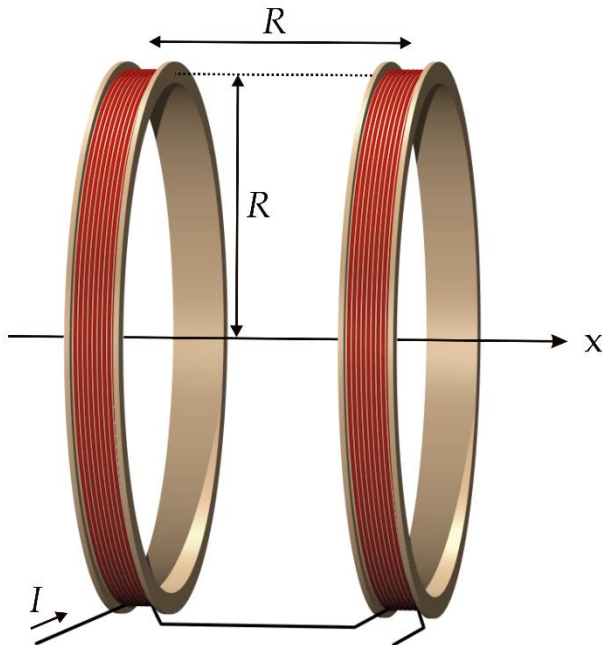
Kuvassa 20 nähdään, kuinka testipisteiden asettaminen 20 senttimetrin välein verrattuna kappa-  
leen 4.1 testien yhden metrin väleihin parantaa laskennan tulosten visualisointia. Tässä testissä 0-  
tasolla eli käytännön tapauksessa lattialla sijaitseva kahdeksikon muotoinen silmukka, joka kulkee  
seinänvierustoja pitkin ja ylittää huoneen sen keskeltä, aiheuttaa Z-suuntaisen magneettikentän  
160 cm:n korkeudelle. Silmukassa kulkee yhden ampeerin virta.



KUVA 20. Kahdeksikon muotoinen silmukan aiheuttama magneettikenttä

### 4.3 Helmholtzin kela ja kahden kelan käsittely

Helmholtzin kelassa kaksi samankokoista pyöreää virtasilmuksia asetetaan samansuuntaisesti vierekkäin. Kelojen välinen etäisyys on silmukoiden säde. Kuva 21 selventää asiaa.



KUVA 21. Helmholtzin kela. (21)

Silmukoiden keskiakselin (kuvassa 21 X-akseli) puoliväliin muodostuu kaavalla 7 laskettava magneettikenttä.

KAAVA 7. Magneettikentän voimakkuus Helmholtzin kelan keskellä (21)

$$\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} * \frac{I}{R}$$

I = silmukassa kulkeva virta

R = silmukoiden säde ja etäisyys toisistaan

Testitapauksena laskettiin halkaisijaltaan neljän metrin kelojen väliin muodostuva magneettikenttä. Silmukoissa kulkee ampeerin virta ja ne ovat kahden metrin etäisyydellä toisistaan. Kaavalla 7 laskeksen keskipisteeseen tulisi muodostua 0,357770876 henryn magneettikenttä. Simulaation tuloksena kentänvoimakkuudeksi saatiin -0,3596 henryä. Arvon negatiivisuus johtuu virran kiertosuunnasta. Virhe on 0,51 %.

```
val(:, :, 5) =
```

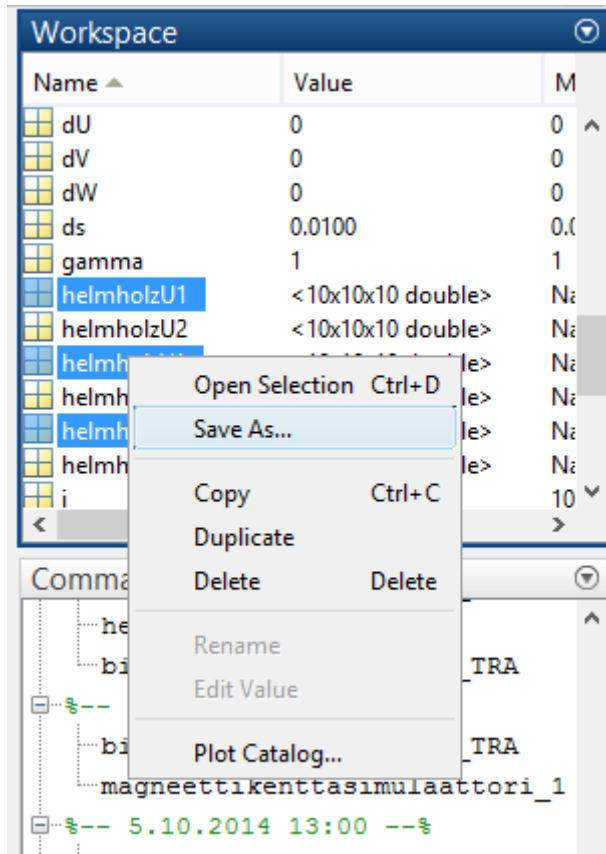
0.0054	0.0073	0.0095	0.0119	0.0139	0.0147	0.0139	0.0119	0.0095	0.0073
0.0073	0.0104	0.0147	0.0197	0.0241	0.0258	0.0241	0.0197	0.0147	0.0104
0.0095	0.0147	0.0225	0.0316	0.0357	0.0344	0.0357	0.0316	0.0225	0.0147
0.0119	0.0197	0.0316	0.0294	-0.0549	-0.1279	-0.0549	0.0294	0.0316	0.0197
0.0139	0.0241	0.0357	-0.0549	-0.2984	-0.3457	-0.2984	-0.0549	0.0357	0.0241
0.0147	0.0258	0.0344	-0.1279	-0.3457	-0.3596	-0.3457	-0.1279	0.0344	0.0258
0.0139	0.0241	0.0357	-0.0549	-0.2984	-0.3457	-0.2984	-0.0549	0.0357	0.0241
0.0119	0.0197	0.0316	0.0294	-0.0549	-0.1279	-0.0549	0.0294	0.0316	0.0197
0.0095	0.0147	0.0225	0.0316	0.0357	0.0344	0.0357	0.0316	0.0225	0.0147
0.0073	0.0104	0.0147	0.0197	0.0241	0.0258	0.0241	0.0197	0.0147	0.0104

KUVA 22. Z-suuntainen magneettikentän komponentti Helmholtzin kelan keskipisteessä

Kahden kelan aiheuttaman magneettikentän laskenta simulaattorilla toimii seuraavasti:

1. Lasketaan ensimmäisen aiheuttama magneettikenttä.
2. Tallennetaan kentän arvot väliaikaisesti kuvan 23 osoittamalla tavalla.
3. Lasketaan toisen kelan aiheuttama magneettikenttä.

Ajetaan yhdistämiskripti. Huomaa oikean tiedostonimen syöttö tallennettujen arvojen lataamiseksi.



KUVA 23. Muuttujien tallennus Matlabissa

## 5 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa simulaattori induktiosilmukan aiheuttaman magneettikentän voimakkuuden ja suunnan selvittämiseen. Simulaattorin tulisi pystyä simuloimaan epäsäännöllisiä silmukoita 3D-ympäristössä. Toteutustavaksi valittiin Matlab-simulaattori, joka laskee magneettikentän voimakkuuden ja suunnan hajottamalla ongelman pieniin, laskennaltaan yksinkertaisiin palasiin. Tuloksena saatiin toimiva ja testattu, joskin käytettävyydeltään kankea simulaattori.

Työn valmistuminen viivästyi ulkomaanvaihdon sekä työn haastavuuden vuoksi, mutta simulaation tarkkuus on ideaaliohjeissa hyvällä tasolla. Tulevaisuudessa ohjelmaa voi kehittää adaptiiviseen suuntaan. Testipisteet voisi keskittää erityistä huomiota vaativille alueille, kuten IEC 60118-4 standardin mukaisille 120 cm:n istumakorkeudelle ja 170 cm:n seisomakorkeudelle.

Toinen kehitystä kaipaava asia on ympäristötekijöiden huomioonottaminen. Tällä hetkellä simulaatio olettaa ympäristön olevan homogeeninen. Todellisuudessa erityisesti betonissa vahvikkeena käytettävä teräs vaikuttaa magneettikenttään suuresti. Nämä tekijät voitaisiin ottaa huomioon erilaisten korjauskertoimien avulla. Tarkan vaikutuksen selvittäminen laskennallisesti vaatisi tietoa seinien, lattian ja katon sisäisistä rakenteista. Yleensä tätä tietoa ei ole saatavilla. Lisäksi näiden vaikutusten laskeminen olisi erityisen haastavaa. Perussääntönä voidaan pitää sitä, että teräs vaihtelee magneettikenttää.

Silmukoiden muodon tuominen automaattisesti esimerkiksi CAD-ohjelmista helpottaisi nyt työstä manuaalista silmukoiden lisäämistä ohjelmaan. Toinen vaihtoehto on graafisen lisäsmahdollisuuden käyttöönotto. Yrityksen edustajan kanssa käydyssä keskustelussa tuli ilmi keino nopeuttaa laskentaa C-kielellä toteutetun Dynamic Link Libraryn eli DLL:n avulla. (22.)



## LÄHTEET

1. Kuuloliitto ry. 2014. Kuuleminen. Viitattu 10.3.2014 <http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/kuuleminen/>
2. Ilmoniemi, R. Aivojen rakenne ja toiminta. Helsingin yliopistollinen keskussairaala. Viitattu 3.4.2014 <http://www.biomag.hus.fi/braincourse/L7.html#RTFTtoC2>
3. Kuuloliitto ry. 2014. Kuulontutkimus ja audiogrammi. Viitattu 10.3.2014 <http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/kuuleminen/kuulontutkimus/>
4. Marttila, T. 2005. Kuulovammat . Kustannus Oy Duodecim. Viitattu 13.3.2014 [http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=suo00037#s2](http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=suo00037#s2)
5. Saarelma, O. 2014. Kuulon heikkeminen. Kustannus oy Duodecim. Viitattu 13.3.2014, [http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00287](http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00287)
6. Kuuloliitto ry. 2014. Huonokuuloisuus yleistyy. Viitattu 10.3.2014 <http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/huonokuuloisuus/>
7. Kuuloliitto ry. 2014. Erilaiset kuulovammat. Viitattu 10.3.2014 [http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/huonokuuloisuus/erilaiset\\_kuulovammat/](http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/huonokuuloisuus/erilaiset_kuulovammat/)
8. Kuuloliitto ry. 2014. Kuulokoje. Viitattu 15.5.2014, <http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/kuulokoje/>
9. Tapiovaara, H. 2005. Kuulolaite 1. kuulokoje <http://personal.fimnet.fi/laaketiede/hanski.tapiovaara/kuulolaite.htm>
10. Manninen, T. 2012. Kuulolaitteiden korjaustoiminta. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Automaatiotekniikka. Opinnäytetyö. Viitattu 19.2.2014, <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38457/Kuulolaite.pdf?sequence=1>

11. Ampetronic ltd. All about counter induction loops. 2013. Viitattu 6.10.2014 [http://www.ampetronic.com/write/Documents/Technical%20Library/Information%20Sheets/UP30073-1\\_All\\_about\\_counter\\_induction\\_loops.pdf](http://www.ampetronic.com/write/Documents/Technical%20Library/Information%20Sheets/UP30073-1_All_about_counter_induction_loops.pdf)
12. Kuuloliitto ry. 2014. Induktiosilmukka. Viitattu 20.3.2014 <http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/apuvalineet/induktiosilmukka/>
13. Ampetronic ltd. 2013. All about induction loops. Viitattu 6.10.2014 [http://www.ampetronic.com/write/Documents/Technical%20Library/Information%20Sheets/UP30072-1\\_All\\_about\\_induction\\_loops.pdf](http://www.ampetronic.com/write/Documents/Technical%20Library/Information%20Sheets/UP30072-1_All_about_induction_loops.pdf)
14. Lindell, I. & Sihvola, A. 2002. Sähkömagneettinen kenttäteoria 1. Staattiset kentät. 4. korjattu painos. Helsinki: Otatieto.
15. Wikiversity. 2010. Biot-Savart Law. Viitattu 5.5.2014 [http://en.wikiversity.org/wiki/Biot-Savart\\_Law](http://en.wikiversity.org/wiki/Biot-Savart_Law)
16. Subashki, G. 2013. Workshop Biot-Savart Law. Illinois Institute of Technology. Viitattu 20.7.2014, [http://www.iit.edu/arc/workshops/pdfs/Georgi\\_Subashki\\_Workshop\\_Biot\\_Savart\\_Law.pdf](http://www.iit.edu/arc/workshops/pdfs/Georgi_Subashki_Workshop_Biot_Savart_Law.pdf)
17. Apiola, H & Laine, M. 2010. Matlab-opas, osa 2. Matriisityöskentelyä. Aalto yliopisto. Viitattu 4.10.2014. <http://math.aalto.fi/~apiola/matlab/opas/ei-niin-lyhyt/osa2.html>
18. Sathyanarayan, R. 2013. Magnetic field of a Circular current loop using Biot Savart's Law. Viitattu 10.3.2014. [http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42329-magnetic-field-of-a-circular-current-loop-using-biot-savart-s-law/content/Biot\\_3d.m](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42329-magnetic-field-of-a-circular-current-loop-using-biot-savart-s-law/content/Biot_3d.m)
19. Georgia State University. 2000. Magnetic Field of Current Loop. Viitattu 6.10.2014. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/curloo.html>
20. Heikkinen, P. 2009. Tasavirrat ja magneettikentät. Viitattu 5.9.2014 [http://users.jyu.fi/~pheikkin/fysa220/Chapter\\_4.pdf](http://users.jyu.fi/~pheikkin/fysa220/Chapter_4.pdf)

21. Wikipedia foundation. 2014. Helmholtz coil. Viitattu 20.9.2014 [http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz\\_coil](http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_coil)

22. Rautio, T. 2014. Koodi. Työntekijä. QLU Oy. Sähköpostiviesti. Viitattu 6.10.2014