

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

**VIRRANMITTAUSANTURIN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI TAAJUUS-  
MUUTTAJAKÄYTTÖÖN**

Työn tarkastajina toimivat professori Tuure Tuuva ja professori Juha Pyrhönen. Työn ohjaajana toimi diplomi-insinööri Ahti Karjalainen.

Lappeenrannassa 10.04.2007

Harry Nyström  
Sunisenkatu 5 C 19  
53810 Lappeenranta  
GSM: +358-40-734 7953

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Sähkötekniikan osasto

Harry Nyström

### **Virranmittausanturin suunnittelu ja simulointi taajuusmuuttajakäyttöön**

Diplomityö

2007

Diplomityö sisältää 86 sivua, 42 kuvaa, 7 taulukkoa ja 3 liitettä.

Tarkastajat: Professori Tuure Tuuva  
Professori Juha Pyrhönen

Hakusanat: virranmittaus, anturi, magneettikenttä, magnetokonsentraattori, hall-ilmiö, taajuusmuuttaja

Virranmittausantureita tarvitaan monenlaisissa käyttökohteissa, joissa ne mittaavat sekä virran suuruutta että laatua ja toimivat osana niiden säätelyjärjestelmää. Virranmittausantureita tarvitaan myös vikatilanteiden määrittämiseen erilaisissa suojauspiireissä. Taajuusmuuttajissa virranmittaus on hyvin tärkeää ja suurista virroista sekä taajuuksista johtuen se täytyy suunnitella huolella. Tässä diplomityössä käsitellään ja tutkitaan eri virranmittausmenetelmiä, joiden avulla taajuusmuuttajan luotettava virranmittaus voidaan toteuttaa.

Työssä tutkitaan eri menetelmiä virranmittauksen toteuttamiseksi, minkä jälkeen niistä valitaan sopiva menetelmä ja tutkitaan sen eri toteutusvaihtoehtoja. Sopivan toteutusvaihtoehdon valinnan jälkeen työssä suunnitellaan oma virranmittausanturi, joka sopii nimenomaisesti taajuusmuuttajakäyttöön. Suunnitellun anturin ominaisuuksia tutkitaan lopuksi simuloimalla, jonka jälkeen arvioidaan sen soveltumista käytännön sovelluksiin sekä arvioidaan erilaisia keinoja sen parantamiseksi.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Department of Electrical Engineering

Harry Nyström

### **Designing and Simulating a Current Sensor for Inverter Use**

Master's Thesis

2007

This Master's Thesis contains 86 pages, 42 figures, 7 tables and 3 appendices.

Examiners: Professor Tuure Tuuva  
Professor Juha Pyrhönen

Keywords: current sensing, sensor, magnetic field, magnetoconcentrator, hall-effect, inverter

Current sensors are needed in many different applications, in which they measure both the density of current and the quality of current, and are part of the application's adjustment system. Current sensors are also needed to determine fault situations in different protective circuits. Current sensing is very important in inverters, and because of high currents and frequencies it has to be designed properly. In this master's thesis, different applications of reliable current sensing methods that are suitable for inverters are introduced and studied.

Different methods for producing a current sensor are introduced. After that the most suitable method is chosen and different approaches to realize the method are studied. After choosing the most suitable approach, a current sensor suitable for inverter use is designed. Finally, the properties of the designed sensor are studied with simulations and the use of the sensor for practical applications is evaluated. Also different methods are considered for improving the sensor.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla osana ABB:n ja TEKES:n rahoittamaa PIEKO -projektia.

Haluan kiittää työni tarkastajia, professori Tuure Tuuvaa ja professori Juha Pyrhöstä sekä työni ohjaajaa, diplomi-insinööri Ahti Karjalaista, arvokkaista neuvoista ja kommentteista diplomityötäni kohtaan. Haluan myös kiittää ABB:tä edustanutta Markku Niemelää tärkeistä kommentteista ja avusta diplomityöni edetessä. Lisäksi haluan kiittää työyhteisöä kaikesta saamastani tuesta ja avusta sekä ennen kaikkea hyvästä seurasta eli yhteisistä hetkistä. Projektiin osallistuminen on ollut erittäin mielenkiintoista ja opettavaista.

Haluan myös kiittää vanhempiani ja veljiäni korvaamattomasta tuesta, jota olen saanut opiskelujeni aikana. Oman kiitoksensa ansaitsevat myös ne ystävät, joihin olen tutustunut opiskelujeni aikana, sillä he ovat tehneet opiskelustani mieluisampaa ja vaikuttaneet olemassaolollaan omaan opintomenestykseeni.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET .....</b>	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Virranmittausmenetelmät ja niiden käyttökohteet .....</b>	<b>8</b>
1.1.1 Resistiivinen mittausmenetelmä .....	9
1.1.2 Magneettikenttään perustuvat mittausmenetelmät.....	10
<b>1.2 Diplomityön tavoitteet ja tulokset .....</b>	<b>10</b>
<b>2 MAGNEETTIKENTTÄÄN PERUSTUVAT VIRRANMITTAUSANTURIT.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Pienen kentän anturit .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 SQUID-anturi.....	15
2.1.2 Search-coil-anturi .....	16
<b>2.2 Maan magneettikentän anturit.....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Fluxgate-anturi.....	17
2.2.2 Magnetoinduktiivinen anturi.....	18
2.2.3 AMR-anturi.....	18
<b>2.3 Suuren kentän anturit .....</b>	<b>21</b>
2.3.1 Virtamuuntaja.....	21
2.3.2 Rogowski-kela .....	22
2.3.3 Reed switch -anturi.....	23
2.3.4 Puolijohdemagnetoistorit.....	24
2.3.5 Hall-anturit.....	26
2.3.6 GMR-anturit .....	27
2.3.7 Optiset anturit.....	30
2.3.8 Closed loop -mittaus .....	31
<b>2.4 Yhteenveto magneettikenttään perustuvista virranmittausantureista.....</b>	<b>33</b>
<b>3 VIRRANMITTAUSMENETELMÄN VALINTA.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Virranmittausanturin valinnassa huomioitavat seikat .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Hall-elementtiin perustuvan virranmittausmenetelmän valinta .....</b>	<b>35</b>

3.2.1 Edut oman anturin suunnittelussa .....	35
3.2.2 Perinteinen Hall-elementin käyttötapa .....	35
3.2.3 Uusi Hall-elementin käyttötapa .....	36
3.2.4 Magnetokonsentraattorit .....	37
3.3 Valmiit virranmittausanturit.....	40
3.3.1 Sentron CSA-1V.....	41
3.3.2 Honeywell HMC1021.....	41
<b>4 VIRRANMITTAUSANTURIN SUUNNITTELU .....</b>	<b>43</b>
4.1 Haluttuja ominaisuuksia .....	43
4.2 Hall-elementin suunnittelu.....	44
4.3 Magnetokonsentraattorien suunnittelu .....	46
4.3.1 Koko .....	46
4.3.2 Materiaali .....	47
4.3.3 Muoto .....	50
4.4 Rakenteiden yhdistäminen.....	50
<b>5 SUUNNITELLUN ANTURIN SIMULOINTI .....</b>	<b>53</b>
5.1 Simuloinnin tavoitteet.....	53
5.2 Simulointiohjelmisto .....	53
5.3 Simuloinnissa käytetyn rakenteen kuvaus .....	54
5.4 Simulointimenetelmät.....	56
5.5 Simulointiohjelmiston epäideaalisuudet.....	56
5.5.1 Äärellisten elementtien määrän vaikutus .....	57
5.5.2 Simuloidun rakenteen ympärille määritellyn tilan vaikutus.....	60
5.5.3 Mitattavan johtimen pituuden vaikutus simuloidussa rakenteessa .....	60
5.5.4 Ohjelmaversioin vaikutus tuloksiin.....	61
5.6 Simulointitulokset .....	61
5.6.1 Muoto ja koko .....	61
5.6.2 Ilmaväli .....	65
5.6.3 Hall-elementtien sijainti ja etäisyys konsentraattoreista .....	67
5.6.4 Mitattavassa johtimessa oleva virrantiheys .....	69
5.7 Simuloinnin yhteenveto .....	71

<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET .....</b>	<b>72</b>
<b>6.1 Anturin rakenne.....</b>	<b>72</b>
<b>6.2 Anturin tuottaman signaalin parantaminen .....</b>	<b>73</b>
<b>6.2.1 Signaalin vahvistaminen.....</b>	<b>73</b>
<b>6.2.2 Offsetin poisto .....</b>	<b>74</b>
<b>6.2.3 Kohinan poisto .....</b>	<b>75</b>
<b>6.2.4 Taajuuskaistan suurentaminen .....</b>	<b>75</b>
<b>6.2.5 Herkkyyden parantaminen.....</b>	<b>76</b>
<b>6.3 Käytettävyys .....</b>	<b>76</b>
<b>6.4 Jatkotoimenpiteet.....</b>	<b>77</b>
<b>7 YHTEENVETO .....</b>	<b>79</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>81</b>

<b>LIITE</b>	<b>I</b>	<b>Laskennalliset magneettivuontiheydet tyhjässä eri virroilla ja eri etäisyyksillä pyöreästä johtimesta</b>
	<b>II</b>	<b>Vitrovac 6150F -materiaalin hystereesisilmukka</b>
	<b>III</b>	<b>Erisuuruisilla virran arvoalueilla aistitut magneettivuontiheyden z-komponentit magnetokonsentraattoreilla.</b>

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$A$	pinta-ala
$\mathbf{B}$	magneettivuontiheys; vektori
$B_{\min}$	minimivuontiheys
$B_{\max}$	maksimivuontiheys
$B_{\text{rem}}$	remanenssivuo
$B_{\text{sat}}$	kyllästysvuontiheys, saturaatiovuontiheys
$B_{\text{sat,ulk}}$	ulkoisen saturaatiovuontiheys
$\mathbf{B}_z$	magneettivuontiheyden z-akselin suuntainen komponentti
$\mathbf{B}_{z,\max}$	z-akselin suuntainen maksimivuontiheys
$\mathbf{B}_{z,\min}$	z-akselin suuntainen minimivuontiheys
$d$	paksuus
$e$	alkeisvaraus = $1,60217733 \times 10^{-19}$ As
$\mathbf{E}$	sähkökentänvoimakkuus; vektori
$f$	taajuus
$\mathbf{F}$	voima
$\mathbf{F}_L$	Lorentzin voima; vektori
$\mathbf{H}$	magneettikentän voimakkuus; vektori
$H_c$	koersiivivoima
$\mathbf{H}_d$	demagnetoiva magneettikenttä
$H_{\text{sat}}$	saturaatiokentänvoimakkuus
$\mathbf{i}$	virta; vektori
$I$	virran tehollisarvo
$I_{\max}$	virran suurin arvo
$J$	virrantiheys
$l$	pituus
$\mathbf{M}$	magnetoituma
$n$	varauksenkuljettajien tiheys
$N_1$	ensiökäämin kierroslukumäärä
$N_2$	toisiökäämin kierroslukumäärä
$N_m$	muotokerroin



$q$	varaus
$r$	säde
$R$	resistanssi
$S$	herkkyys
$U$	jännite
$U_{\text{bias}}$	biasointijännite, esijännite
$U_{\text{H}}$	Hall-jännite
$U_{\text{out}}$	lähtöjännite
$U_{\text{out}^+}$	lähtöjännite, positiivinen
$U_{\text{out}^-}$	lähtöjännite, negatiivinen
$\mathbf{v}$	varauksenkuljettajan nopeus; vektori
$\mu$	permeabiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
$\mu_{\text{näenn}}$	näennäispermeabiliteetti
$\mu_{\text{r}}$	suhteellinen permeabiliteetti
ABB	Asea Brown Boweri ltd.
AMR	Anisotropic Magnetoresistance
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
bcc	body-centered cubic -lattice eli tilakeskinen kuutiollinen hila
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CMR	Colossal Magnetoresistance
DC	Direct Current, tasavirta
FeMn	rautamangaani
GaAs	galliumarsenidi
GMI	Giant Magneto-Impedance
GMR	Giant Magnetoresistance
GND	maapotentiaali, ground
InAs	indiumarsenidi
InSb	indiumantimonidi
NiFe	nikkelirauta
NiO	nikkelioksidi

NiSb	nikkeliantimonidi
PIEKO	Pienkohinaiset etuasteet
SDT	Spin Dependent Tunneling
Si	pii
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device

## 1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajan jatkuva-aikainen virranmittaus asettaa virranmittauspiirille suuria vaatimuksia. Taajuusmuuttajan syöttövirta voi olla hyvinkin suuri ja se voi sisältää suuritaajuisia komponentteja, jonka vuoksi jotkin virranmittausmenetelmät eivät sovellu luotettavaan taajuusmuuttajan virranmittaukseen. Nykyisissä kolmivaiheisissa taajuusmuuttajissa virranmittaus on toteutettu suuremmalti osin Hall-anturin ja ferriittirenkaan avulla, tai vaihtoehtoisesti sivuvastuksen avulla. Virta voidaan mitata kahdesta vaiheesta ja kolmannen vaiheen virta saadaan laskettua Kirchhoffin lain avulla, jonka mukaan symmetrisen kolmivaihejärjestelmän virtojen summa on nolla. Kumpikaan näistä laajalti käytetyistä menetelmistä ei ole ongelmaton, joten uusia menetelmiä kehitetään jatkuvasti. Sivuvastukseen perustuvan menetelmän suurin ongelma on se, että se tulee liittää mitattavaan piiriin, kun taas ferriittirenkaaseen ja Hall-anturiin perustuvan menetelmän ongelmana on muun muassa sydänmateriaalirenkaan tuoma koko, paino ja kustannukset.

Tässä diplomityössä tutustutaan nykyisiin virranmittausmenetelmiin ja -tekniikoihin ja tutkitaan niiden soveltuvuutta taajuusmuuttajakäyttöön. Tarvittavien ominaisuuksien mukaan valitaan käyttötarkoitukseen soveltuva menetelmä ja suunnitellaan sitä vastaava virranmittausanturi. Anturin tulee myös olla kustannuksiltaan kilpailukykyinen taajuusmuuttajien piensarjatuotantotasolla. Työssä ei kuitenkaan esitetä analyysia anturin mahdollisista valmistuskustannuksista. Suunnitellun anturin ominaisuuksia tutkitaan simuloimalla anturia tarkoitukseen soveltuvalla simulointiohjelmistolla. Simuloinnista saatujen tuloksien valossa pohditaan sekä anturin soveltuvuutta käytännön sovelluksiin että erilaisia tapoja anturista saadun signaalin parantamiseksi.

Työn rakenne on seuraavanlainen:

Luvussa 1 käsitellään virranmittauksen kahta perustekniikkaa, niiden ominaisuuksia sekä käyttökohteita. Lopuksi käydään läpi diplomityön tavoitteita.

Luvussa 2 perehdytään tarkemmin magneettikenttään perustuviin virranmittausmenetelmiin ja tutkitaan erilaisia magneettikentän mittaukseen perustuvia antureita sekä niiden ominaisuuksia.

Luvussa 3 valitaan sopiva virranmittausmenetelmä ja pohditaan valintaan liittyviä seikkoja sekä tutustutaan kahteen valmiiseen virranmittausanturiin.

Luvussa 4 suunnitellaan virranmittausanturi haluttujen ominaisuuksien mukaan.

Luvussa 5 käydään läpi simuloinnin tavoitteita, simulointiohjelmistoa ja mittausmenetelmiä, jonka jälkeen simuloidaan suunniteltua anturia ja tutkitaan eri muuttujia vaihtelemalla, miten ne vaikuttavat anturin mittaustarkkuuteen.

Luvussa 6 esitetään johtopäätökset työstä ja pohditaan mahdollisia parannusmahdollisuuksia sekä jatkotoimenpiteitä.

Luvussa 7 käydään läpi yhteenveto diplomityöstä.

### **1.1 Virranmittausmenetelmät ja niiden käyttökohteet**

Virranmittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin: resistiiviseen mittaukseen sekä magneettikenttään perustuviin menetelmiin. Resistiivisellä virranmittauksella virtaa mitataan vastuksen yli syntyvän jännitteen avulla, kun taas magneettikenttään perustuvissa menetelmissä virtaa mitataan virtajohtimen synnyttämän magneettikentän avulla. Hyvänä esimerkkinä resistiivisestä virranmittausmenetelmästä voisi mainita yleismittareiden virranmittauksen, joka kahden koettimen avulla suoritetaan resistiivisesti siten, että virta kulkee yleismittarissa olevan resistanssin läpi, jonka yli syntyvää jännitettä mitataan. Magneettikenttään perustuvista virranmittausmenetelmistä voisi esimerkkinä mainita niin ikään yleismittarin, mutta sellaisen mallin, jolla on virranmittauspihti eli silmukka, jonka lävitse mitattava johdin asetetaan kulkemaan. Johtimessa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän, jota virranmittauspihti mittaa ja muuntaa vastaavaksi virran arvoksi. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi nämä kaksi tärkeintä menetelmää sekä niiden käyttökohteita hieman tarkemmin.

### 1.1.1 Resistiivinen mittaamenetelmä

Resistiivisessä virranmittauksessa piirissä kulkeva virta kuljetetaan sopivan sarjaan kytketyn vastuksen läpi. Mittaamalla jännitehäviötä tietynsuuruudessa vastuksessa, voidaan jännite muuntaa taas virraksi. Virta saadaan siis laskettua Ohmin lauseella

$$U = RI \Leftrightarrow I = \frac{U}{R}, \quad (1.1)$$

jossa  $U$  on jännite,  $I$  on virta ja  $R$  on sivu- eli shunttivistuksen resistanssi. Yhtälöstä (1.1) on myös huomattavissa, että vastuksen arvon tulee olla hyvin pieni, jotta piirissä tapahtuvat jännitehäviöt minimoituvat. Tyypillisesti jännitehäviö mitoitetaan noin 50 mV suuruiseksi suurimmalla sallitulla virralla. Tällä mitoitusperiaatteella esimerkiksi 100 A maksimivirralla shunttivistuksen arvoksi saataisiin 0,5 mΩ. Tällaiset hyvin pienet vastusarvot saadaan muodostettua esimerkiksi lyhyellä johdinkappaleella.

Vastusta kutsutaan usein shunttivistukseksi, sillä se on kytketty rinnan sitä mittaavan jännitemittarin kanssa, vaikkakin se on liitetty sarjaan mitattavan piirin kanssa. Tästä johtuen resistiivinen virranmittaus liittyy aina galvaanisesti mitattavaan piiriin. Vastuksen resistanssi valitaan mahdollisimman pieneksi, jotta se synnyttäisi mahdollisimman vähän häviöitä mitattavassa piirissä. Menetelmän mittausskaala ulottuu erittäin pienistä suuriin virtoihin ja sen tarkkuus on erittäin hyvää tasoa. Vaihtovirran mittausherkkyyys vaihtelee keskinertaisesta suureen.

Menetelmän suurin ongelma on se, että se vaatii aina galvaanisen yhteyden piiriin ja se täytyy huomioida suunnittelussa jo etukäteen. Galvaaninen yhteys voi osoittautua ongelmalliseksi esimerkiksi vikavirtatilanteissa, joissa nopea virtapiikki voi tuhota vastuksen, jota ei ole eristetty piiristä. Tämän lisäksi menetelmän suurehko lämpötilariippuvuus voi myös aiheuttaa ongelmia joissakin tilanteissa ja asennuksesta syntyvät jännitykset aiheuttavat vaihteluita liitosresistansseissa. Menetelmän eduista voisi mainita hintatason, joka on matalasta keskinertaiseen, sekä tarkkuuden, joka on erittäin hyvä. Resistiivistä virranmittausta ja siihen liittyvää teoriaa on käsitelty muun muassa kirjassa [1], opetusmonisteissa [2] sekä www-dokumenteissa [3] ja [4].

On olemassa myös optisesti kytketty resistiivinen virranmittausmenetelmä, joka on suuremmalti osin samanlainen kuin resistiivinen menetelmä. Suurin ero muodostuu siitä, että optisesta kytkennästä johtuen virranmittaus on erotettu galvaanisesti mitattavasta piiristä. Mittausskaala on keskisuurista suuriin virtoihin ja sekä tarkkuus että vaihtovirtamittauksen herkkyys ovat matalasta keskisuureen. Hintatasoltaan menetelmä on matalasta keskisuureen, joka on sen etuna. Menetelmän heikoin ominaisuus on se, että galvaanisesta erotuksesta huolimatta se joudutaan liittämään mitattavaan piiriin fyysisesti, jolloin se täytyy ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. [3].

### **1.1.2 Magneettikenttään perustuvat mittausmenetelmät**

Magneettikenttään perustuvassa virranmittauksessa johdossa kulkeva vaihtovirta aiheuttaa ympärilleen magneettikentän, joka on verrannollinen johtimessa kulkevaan virtaan, ja sitä voidaan mitata sopivaksi katsotulla menetelmällä. Erilaisia menetelmiä, jotka perustuvat joko muuttuvan tai staattisen magneettikentän tai molempien mittaamiseen, on useita ja niitä käsitellään tarkemmin luvussa 2, samoin kuin magneettikentän syntymiseen liittyviä ilmiöitä.

Magneettikenttään perustuvien virranmittausmenetelmien mittausskaala ulottuu keskisuurista erittäin suuriin virtoihin, tarkkuuden ollessa keskinkertaista tai hyvää tasoa. Vaihtovirran mittausherakkyys on myös keskinkertainen. Menetelmän suurin etu on se, että se on galvaanisesti erotettu eli se ei liity mitattavaan piiriin, joten sen käyttökohteet ovat monipuolisemmat kuin resistiivisellä menetelmällä. Täten se ei myöskään synnytä mitattavaan piiriin häviöitä eikä voi vikaantuessaan aiheuttaa vikatilaa myös mitattavaan piiriin. Etenkin mitattaessa kohteita, joissa on hyvin suuria jännitteitä, on turvallisuuden ja mittaus-tarkkuuden säilyttämiseksi tärkeää mitata virta liittymättä galvaanisesti mitattavaan kohteeseen. Ongelmana kuitenkin on toistaiseksi melko korkea hintataso verrattuna resistiiviseen virranmittaukseen, joten menetelmää käytetään lähinnä teollisuudessa suurille ja suuritaajuisille virroille. [3].

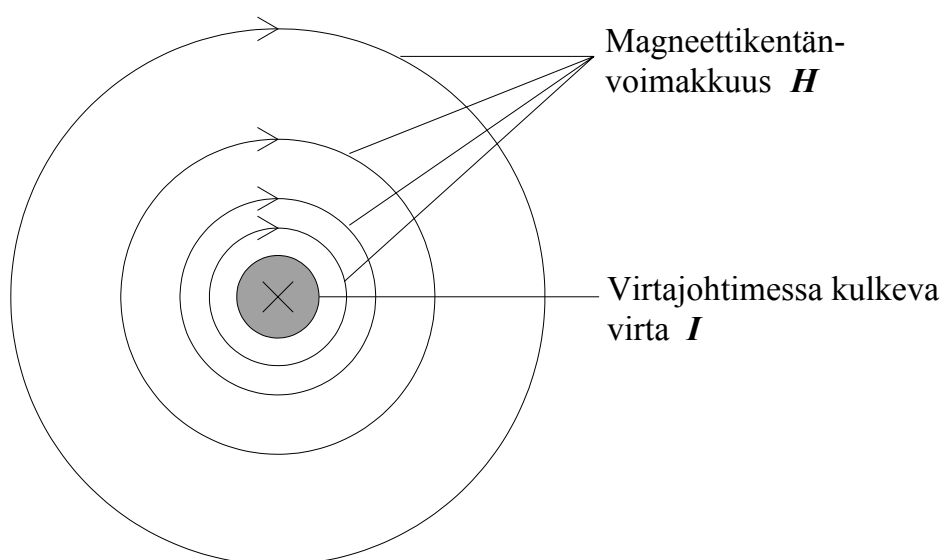
## **1.2 Diplomityön tavoitteet ja tulokset**

ABB Drives valmistaa taajuusmuuttajia ja on niiden valmistuksessa markkinajohtaja maailmanlaajuisesti. Jokaisessa taajuusmuuttajassa on virranmittausantureita, joilla voidaan mitata

lähtevää virtaa ja diagnosoida vikatiloja. Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia tarjolla olevia virranmittaustekniikoita ja valita luotettava, tarkka, pienikokoinen ja kustannustehokas ASIC (Application Specific Integrated Circuit) -piiriin perustuva virranmittausmenetelmä taajuusmuuttajan kolmivaihelähtöön, suunnitella valittuun tekniikkaan perustuva esimerkkianturi, ja sen jälkeen simuloimalla tutkia suunnitellun anturin ominaisuuksia käyttäen tarkoitukseen sopivaa simulointiohjelmistoa. Virranmittauspiiri sijoitetaan virtakiskon tai johdon läheisyyteen, joten työ keskittyy ainoastaan magneettikenttään perustuviin virranmittausmenetelmiin. Tämä diplomityö perustuu PIEKO (pienkohinaiset etuasheet) -projektin osaamisalueisiin ja diplomityössä saatujen tuloksien avulla tulisi olla helppoa valita haluttu virranmittausmenetelmä erilaisiin taajuusmuuttajiin ja suunnitella se valmistusta varten.

## 2 MAGNEETTIKENTTÄÄN PERUSTUVAT VIRRANMITTAUSANTURIT

Johtimessa kulkeva vaihtovirta luo ympärilleen magneettikentän kuvan 2.1 mukaisesti. Tämä magneettikenttä on mitattavissa erilaisin keinoin ja sen avulla voidaan määrittellä hyvin tarkasti johtimessa kulkevan virran suuruus ilman, että johtimeen täytyy olla galvanista yhteyttä. Magneettikenttään perustuvien virranmittausantureiden paras ominaisuus onkin niiden kyky mitata virtaa tietyltä etäisyydeltä johtimesta, jolloin mittaus on eristetty mitattavasta kohteesta. Näin vältetään esimerkiksi potentiaalierojen aiheuttamilta ongelmilta, jos virranmittaus ja mitattava kohde ovat eri potentiaaleissa. Tässä työssä keskitytään nimenomaan magneettikenttää aistivien antureiden käyttämiseen virranmittauksessa.



Kuva 2.1. Vaihtovirtajohtimen ympärille muodostuva magneettikentänvoimakkuus.

Magneettikentänvoimakkuus johtimen ympärillä voidaan muodostaa Amperen lain mukaan yhtälöllä

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I, \quad (2.1)$$

jossa  $\mathbf{H}$  on magneettikentänvoimakkuus,  $I$  on suljettu tie, jota pitkin integroidaan ja  $I$  on johtimessa kulkeva virta. Magneettikentänvoimakkuuden suunta määräytyy niin sanotun



oikean käden säännön mukaan, jossa oikea käden sormet puristetaan nyrkkiin pitäen samalla peukalo pystyssä, jolloin peukalo näyttää virran suunnan ja muut sormet magneettikentänvoimakkuuden suunnan. Magneettivuontiheyden  $\mathbf{B}$  ja magneettikentänvoimakkuuden  $\mathbf{H}$  välille pätee yhtälö

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}, \quad (2.2)$$

jossa  $\mu$  on permeabiliteetti,  $\mu_r$  on materiaalin suhteellinen permeabiliteetti ja  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti. Tiedetään, että magneettikentänvoimakkuus on missä tahansa pyöreän johtimen ympärillä yhtä suuri, kun etäisyys johtimesta pidetään vakiona. Tällöin yhtälöistä (2.1) ja (2.2) saadaan muodostetuksi yhtälö

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_r \mu_0 I, \quad (2.3)$$

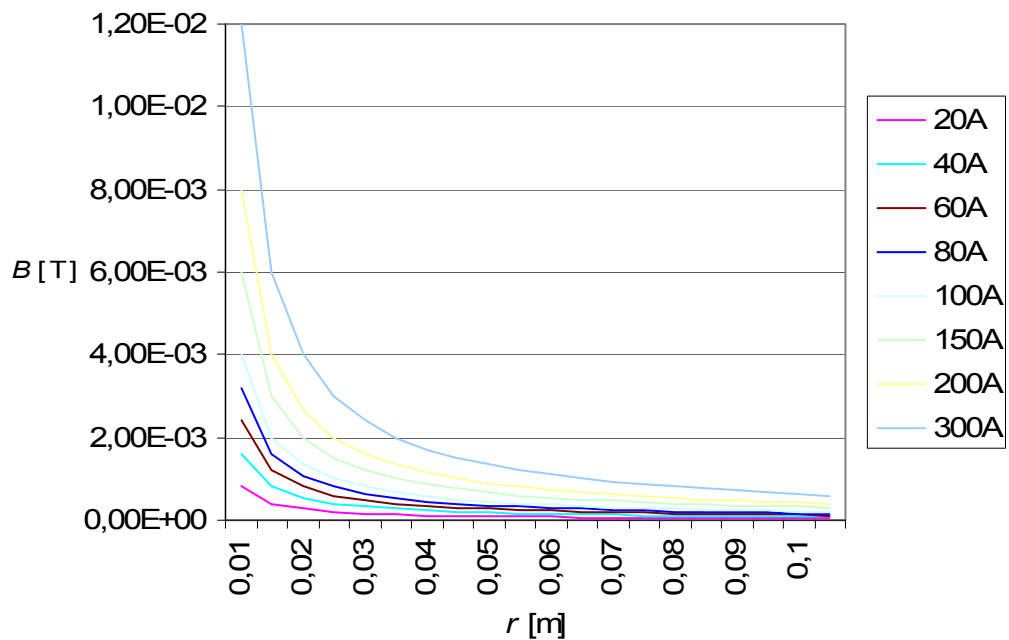
jonka avulla voidaan laskea magneettivuontiheys millä tahansa etäisyydellä johtimesta. Oletetaan, että johtimen ympärillä on ilmaa, jolloin suhteelliseksi permeabiliteetiksi saadaan  $\mu_r = 1$ . Koska magneettikentänvoimakkuuden vektori, samoin kuin magneettivuontiheyden vektori, on yhdensuuntainen suljetun tien yksikkövektorin  $d\mathbf{l}$  kanssa, saadaan yhtälön (2.3) vektoreiden pistetulo korvattua muuttujien kertolaskulla. Lisäksi tiedetään, että magneettivuontiheys pysyy vakiona valitun silmukan alueella, jolloin yhtälö saadaan muotoon

$$B \oint dl = \mu_0 I, \quad (2.4)$$

jossa suljetun ympyrän viivaintegraali on yksinkertaisesti  $r$ -säteisen ympyrän kehä  $2\pi r$ . Tällöin yhtälöstä (2.4) saadaan äärettömän pitkän pyöreän virtajohtimen ympärilleen tyhjiössä etäisyydelle  $r$  synnyttämän magneettivuontiheyden arvoksi yhtälö

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (2.5)$$

josta on selkeästi nähtävissä, että magneettivuontiheys on kääntäen verrannollinen etäisyyteen johtimesta, [4], [6], [7]. Kun tiedetään mitattava virta sekä etäisyys, on yhtälöllä (2.5) helppoa laskea suuntaa antava magneettivuontiheys, jota magneetikenttään perustuvan virranmittausanturin tulee aistia. Taulukko lasketuista magneettivuontiheyksistä eri virroilla ja etäisyyksillä on esitetty liitteen I taulukossa I.1, ja niistä on piirretty kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Pyöreän virtajohtimen synnyttämät magneettivuontiheydet tyhjässä erisuuruksilla virroilla ja eri etäisyyksillä johtimesta.

Kuvasta 2.2 on nähtävissä, että suurin osa lasketuista magneettivuontiheyksistä vaihtelee muutamista millitesloista milliteslan kymmenesosiin. Magneettivuontiheys alkaa nousta voimakkaasti vasta aivan lähellä johdinta eli noin 10 mm ja sitä pienemmillä etäisyyksillä. Tätä kuvaajaa voidaan käyttää apuna, kun tiedetään millaisia magneettivuontiheyksiä anturi kestää lineaarisella alueellaan.

Magneetikenttään perustuvat virranmittausanturit voidaan jakaa karkeasti ottaen kolmeen eri luokkaan mitattavan magneettivuontiheyden mukaan. Pienen kentän anturit pystyvät mittaamaan alle  $0,1$  nT:n vuontiheyksiä, maan magneetikentän eli keskisuuren kentän anturit pystyvät mittaamaan  $0,1$  nT:n –  $1$  mT:n vuontiheyksiä ja esimagnetoivan kentän eli

suuren kentän anturit pystyvät mittaamaan myös yli 1 mT:n vuontiheyksiä. Jokainen näistä kolmesta luokasta pitää sisällään useita erilaisia käytännön sovelluksia, [3], [4], [5]. Lisäksi on olemassa joukko hieman harvinaisempia sovelluksia, joita ei tässä työssä käydä läpi. Tällaisia ovat esimerkiksi protonien ydinmagneettiseen resonanssiin perustuvat anturit, GMI (Giant Magnetoimpedance) -anturit, magnetoelastiset anturit, optisesti pumpatut anturit, magneto-optiset anturit, magnetotransistorit ja magnetodiodit.

## 2.1 Pienen kentän anturit

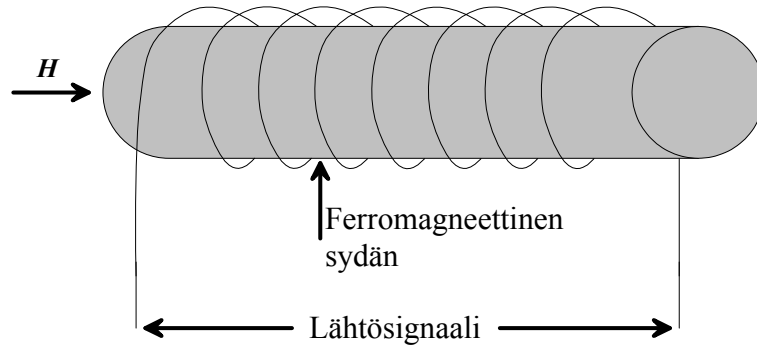
Pienen kentän anturit mittaavat nimensä mukaisesti hyvin pieniä kenttiä. Pienen kentän antureiksi luokitellaankin kaikki anturit, jotka pystyvät havaitsemaan alle 0,1 nT:n magneettivuontiheyksiä. Yleensä tällaisia erittäin tarkkoja antureita tarvitaan vain hyvin vaativissa ja tarkkoissa mittalaitteissa, kuten esimerkiksi lääketieteessä tai armeijan valvontalaitteissa. Pienen kentän antureiden ongelmaksi muodostuvat ensinnäkin niiden suhteellisen suuri koko ja korkea hinta sekä toisekseen se, että maan magneettikentän vaihtelut voivat olla sen verran suuria, että ne ylittävät antureiden mittausrajat ja näkyvät siten mittauksissa väärinä tietona.

### 2.1.1 SQUID-anturi

Pienen kentän antureista herkin on SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) -anturi. Vuonna 1962 kehitetty SQUID-anturi pystyy havaitsemaan kenttiä erittäin suurella mittausalueella; muutamasta femtoteslasta jopa muutama kymmeneen teslaan. Tekniikka perustuu suprajohtavasta materiaalista valmistettuun silmukkaan, jonka läpi mitattava vuo kulkee, ja tällöin silmukkaan indusoituu virta. Suprajohtavasta materiaalista johtuen virta reagoi välittömästi pienimpäänkin muutokseen magneettivuossa, jonka vuoksi anturi on kaikista anturityypeistä herkin. Lääketiede käyttää menetelmää mm. ihmisaivojen neuropeptidien kentän aistimiseen, jonka suuruus on ainoastaan muutamia femtoteslan kymmenyksiä. Lisäksi jotkin tutkimuslaitokset ja yliopistot käyttävät SQUID-anturia magneettisten materiaalien aineominaisuuksien selvittämiseen. Anturin käyttöä vaikeuttaa ainoastaan sen toimintalämpötila, joka on noin 4 K eli nestemäisen heliumin lämpötila. Anturi toimii myös hieman korkeampien lämpötilojen suprajohteilla, mutta sen herkkyys pienenee lämpötilojen kasvaessa. Tämä asettaa ymmärrettävästi melkoiset vaatimukset anturin käytölle, jonka vuoksi se ei ole sovelias työssä esiteltyyn käyttötarkoitukseen. [5], [8].

### 2.1.2 Search-coil-anturi

Search-coil on yleisesti käytetty pienten kenttien anturi. Rakenne on yksinkertainen; ferromagneettisen sydänmateriaalitangon ympärille on kierretty kela, ja sydänmateriaalin keräämä vuo synnyttää kelaan vuon mukaisesti muuttuvan virran kuvan 2.3 mukaisesti.



Kuva 2.3. Search-coil-anturi.

Search-coil-anturin toiminta perustuu Faradayn induktiolakiin, jonka mukaan käämiin indusoitunut jännite on suoraan verrannollinen käämiin läpi kulkevaan muuttuvaan magneettikenttään, ja samainen jännite synnyttää virran, jonka suuruus on suhteessa kentän muutosnopeuteen. Search-coil-anturin herkkyys on riippuvainen sydänmateriaalin permeabilitetista sekä käämiin kierrosluvusta ja pinta-alasta. Anturin huono puoli on se, että sen täytyy toimiakseen olla joko muuttuvassa magneettikentässä tai liikkua itse staattisessa magneettikentässä. Sen taajuuskaista on noin 1 Hz – 1 MHz. Toisin sanoen se ei pysty havaitsemaan staattista tai hyvin hitaasti muuttuvaa magneettikenttää. Kooltaan anturi voi vaihdella noin 5 cm:n ja jopa noin 130 cm:n välillä eri käyttökohteista riippuen. Search-coil-antureita käytetään laajalti liikennevaloissa havainnoimaan valoihin saapuvaa liikennettä, ja lisäksi sen avulla on tutkittu silmän liikettä. Mittausskaala ulottuu todella alhaisista (1 pT) todella suuriin (100 kT) magneettikenttiin, ja ylärajaa ei oikeastaan edes ole. Koska anturi toimii vain muuttuvassa magneettikentässä, ei se ole sovelias työssä esiteltyyn käyttötarkoitukseen. [5], [8].

## 2.2 Maan magneettikentän anturit

Maan magneettikentän anturit eli keskisuuren kentän anturit pystyvät mittaamaan nimensä mukaisesti maan magneettikentän suuruisia kentänvoimakkuuksia. Maan magneettikentän voimakkuus vaihtelee 30  $\mu\text{T}$ :n ja 60  $\mu\text{T}$ :n välillä mittauspisteen maantieteellisestä sijain-

nista riippuen, mutta maan magneettikentän antureilla mittausskaala on kuitenkin suurempi kuin edellä mainittu; vaihdellen 0,1 nT:n ja 1 mT:n välillä. Maan magneettikenttää käytetään esimerkiksi navigaatiojärjestelmissä kompassisuuntiman määrittämiseksi. Lisäksi sen avulla on mahdollista havaita säännöttömyyksiä maan magneettikentässä, ja niiden avulla voidaan määrittää esimerkiksi kulkuneuvojen sijainteja.

### 2.2.1 Fluxgate-anturi

Fluxgate-anturi, eli niin sanottu vuoto- tai kyllästysmagnetometri, on nykyään laajemmalti käytetty kompassinavigaatiojärjestelmien anturi. Se kehitettiin vuonna 1928 ja myöhemmin sitä muokattiin käytettäväksi mm. sukellusveneiden havaitsemiseen. Anturia on käytetty myös asennonmäärityssovelluksissa, ja esimerkiksi kolmella erillisellä fluxgate-anturilla voidaan tuottaa kolmiulotteinen asennonmääritys.

Rakenne koostuu ferromagneettisesta sydäimestä sekä kahdesta sen ympärille käämitystä kelasta. Primääriseen kelaan syötetään vaihtovirtaa taajuudella  $f$ , mikä saa sydänmateriaalin värähtelemään kyllästyspisteiden välillä eli se ajautuu perätysten syvään kyllästystilaan. Sekundaarisella kelalla mitataan kelaa, ja johtuen perättäisistä kyllästystiloista, mittaus on epälineaarinen. Sekundaariseen kelaan indusoitunut jännite sisältää runsaasti harmonisia värähtelyjä ja kyseessä olevan jännitteen pulssisuhde siis määrittelee ulkopuolisen kentän suhteessa saturoivaan kenttään. Parillisten harmonisten amplitudi onkin suoraan verrannollinen sekundaarisen mittauskäämin suuntaisen kentän komponentin amplitudiin.

Fluxgate-magnetometrit pystyvät mittaamaan ilman suuntatietoa niinkin pieniä kuin kymmenien pikoteslojen suuruisia magneettikenttiä, mutta vektorimittauksessa tarkkuus jää noin 100 nT:n tarkkuuteen, kun taas mittauksen yläraja on noin 10 mT:n suuruusluokassa. Fluxgate-antureilla voidaan mitata staattisten magneettikenttien suuruutta sekä suuntaa, joka onkin sen suurin ero ja samalla etu verrattaessa sitä search-coil-anturiin. Toisaalta fluxgate-anturit kykenevät mittaamaan taajuudeltaan maksimissaan vain 1 kHz:n suuruisia signaaleja johtuen niiden syöttösignaalin taajuudesta, joka on noin 10 kHz. Lisäksi fluxgate-anturi on melko kookas ja ei niin kestävä kuin pienemmät, integroidut anturityypit. Jo kokonsa puolesta on todettavissa, että anturi ei ole sovelias taajuusmuuttajakäyttöön. [5], [8].

### 2.2.2 Magnetoinduktiivinen anturi

Magnetoinduktiivinen anturi patentoitiin ensimmäisen kerran vasta 1989, joka tekee siitä suhteellisen uuden anturityypin. Se on rakenteeltaan yksinkertainen, halpa ja sen virrankulutus on matala. Sensori rakentuu yhdestä kelasta, joka on ferromagneettisen sydänmateriaalin päällä. Ferromagneettinen sydän muuttaa permeabiliteettiaan maan magneettikentän mukaan ja kela toimii oskillaattoriin induktanssielementtinä, jolloin oskillaattorin taajuus on verrannollinen mitattavaan kenttään. Kela pidetään lineaarisella toiminta-alueella esimagnetointivirran avulla ja oskillaattorin taajuutta voidaan seurata esimerkiksi mikroprosessorin avulla. Anturi on kuitenkin akselisuuntauksesta hyvin tarkka, sillä siinä tapahtuva taajuusmuutos voi olla jopa 100 %, kun anturia käännetään 90 ° magneettikentässä.

Magnetoinduktiivista anturia käytetään muun muassa kompassinavigaatiojärjestelmissä, mutta sillä on tiettyjä rajoituksia. Rajallinen toimintalämpötila-alue on -20 ja 70 celsiusasteen välillä, mittausalue rajoittuu pienimmillään noin 0,5  $\mu\text{T}$ :aan, ja lisäksi sen pieni koko ja muoto vaikeuttavat sen akselisuuntausta sekä käyttöä automaattisilla kokoonpanolinjoilla. [5].

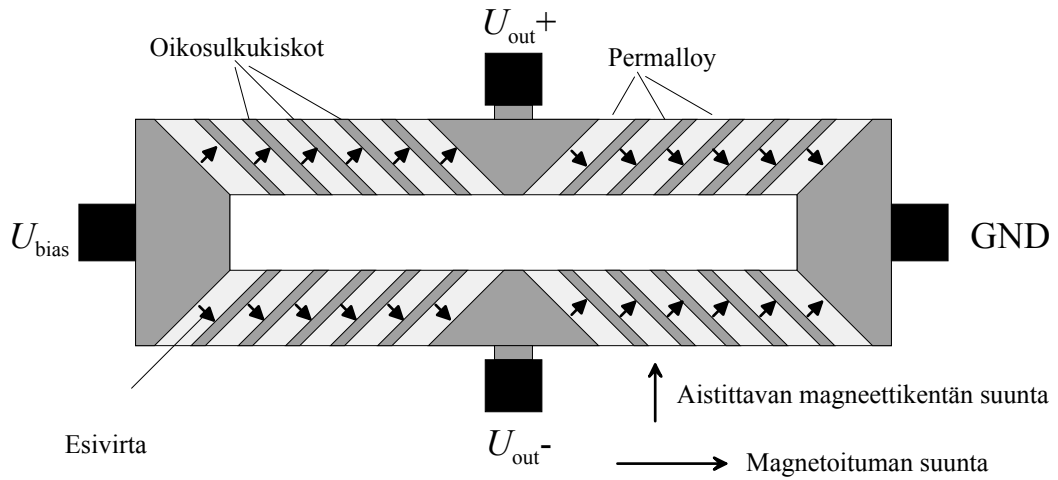
### 2.2.3 AMR-anturi

AMR (Anisotropic Magnetoresistive) -anturit perustuvat William Thompsonin vuonna 1856 tekemiin huomioihin ferromagneettisten materiaalien magnetoresistiivisistä vaikutuksista, mutta vasta yli sata vuotta myöhemmin kehitettiin tarvittava teknologia toimivan anturin rakentamiseksi. Magnetoresistiivisiä antureita on monenmuotoisia, ja niitä valmistetaan muun muassa virranmittaukseen, kulkuneuvojen havaitsemiseen, kompassinavigaatiolaitteisiin, lukupäiksi nauha- ja levyasemiin sekä autoteollisuudessa pyörännopeuden ja kampiakselin anturointiin. AMR-antureilla voidaan mitata sekä tasavirran aiheuttamia staattisia magneettikenttiä että vaihtovirran aiheuttamien muuttuvien magneettikenttien voimakkuutta ja suuntaa.

AMR-anturin yleisin rakenne perustuu piisirun päälle kasvatetusta, ohuesta NiFe (nikkeli-rauta) -kerroksesta. Edellä mainituksi kerrokseksi tosin soveltuu jokin muukin ferromagneettinen permalloy- eli korkeapermeabiliteettiseos. Lopulta kerros syövytetään fotolito-

grafian avulla resistiiviseksi nauhaksi ja yleensä näitä nauhavastuksia kytketään neljä kappaletta niin sanotuksi Wheatstone-sillaksi. Tämä mahdollistaa sekä magneettikentän suunnan että sen voimakkuuden mittaamisen yhden akselin suuntaisesti.

Jotta AMR-anturilla olisi korkea herkkyys, luotettava toistokyky sekä pieni hystereesi, täytyy permalloy-nauhan magneettisten alueiden olla yhdensuuntaisia. Yhdensuuntaisuus saavutetaan valmistusvaiheessa altistamalla kalvo voimakkaalle magneettikentälle, joka määrää magnetoituman suunnan kalvon pitkän sivun suuntaisesti jompaankumpaan suuntaan. Kalvossa kulkevan virran suunnan ja magnetoituman välinen kulma määrää kalvon resistiivisyyden. Suurin resistiivisyys saavutetaan kulmalla  $0^\circ$  ja pienin kulmalla  $90^\circ$ , jolloin anturin lineaarinen toiminta-alue jää  $45^\circ$ :n kulman molemmin puolin. Kalvon sivun normaalin suunnasta tuleva ulkoinen magneettikenttä liikuttaa magnetoituman suuntaa, jolloin resistiivisyys muuttuu virran suunnan pysyessä samana. Virta tulee saada siis kulkemaan  $45^\circ$ :een kulmassa kalvon pitkän sivun suhteen, jotta anturin toiminta-alue pysyy lineaarisena. Helpoiten se onnistuu niin sanotulla barber pole -suuntauksella, joka viittaa parturien Yhdysvalloissa käyttämään tunnuksen eli pyörivään lieriöön, jossa on vuorotellen punaisia ja valkeita juovia  $45^\circ$ :een kulmassa. Samoin AMR-anturissa permalloy-kalvoon muodostetaan tasaisin välein  $45^\circ$ :een kulmassa olevia, matalaresistanssisia oikosulkukiskoja. Kun virta haluaa kulkea lyhyintä reittiä kalvon läpi, se hyppii oikosulkukiskosta toiseen  $45^\circ$ :een kulmassa kalvon piteuden suhteen, ja täten anturi toimii lineaarisella alueella. Barber pole -suunnatun, neljästä Wheatstone-siltaan kytketystä magnetoresistorista koostuvan, AMR-anturin kaaviokuva on esitetty kuvassa 2.4, jossa on nimetty anturilta saatavan lähtöjännitteen liitännät ( $U_{out+}$  ja  $U_{out-}$ ), esijännitteen liitännät ( $U_{bias}$  ja GND), esivirta, permalloy-liuskat, oikosulkukiskot ja sekä magnetoituman että aistittavan magneettivuon suunnat. Kuvasta 2.4 on helposti nähtävissä miten barber pole -suuntaus toimii.



Kuva 2.4. Neljän Wheatstone-siltaan kytketyn barber pole -suunnatun magneetoresistorin muodostama AMR-anturi.

Yhden ongelman muodostaa ferromagneettinen materiaali, jonka magneettisten alueiden tulee anturin toimivuuden kannalta olla yhdensuuntaisia. Magneettisten alueiden suunnat voivat nimittäin kääntyä ulkopuolisen magneettikentän vaikutuksesta, jolloin piirin toimivuus heikkenee huomattavasti. Ongelman voi korjata niin sanotuilla set- ja reset-pulsseilla. Kyseisessä menetelmässä kalvon yli muodostetaan sen pitkän sivun suuntainen voimakas magneettikenttä, joka kääntää magneettiset alueet yhdensuuntaisiksi kymmenissä nanosekunneissa. Yksi ratkaisu set- ja reset-pulssien muodostamiseksi on käyttää joko piirin sisään tai ulkoista kelaan Wheatstone-sillan magneetoresistorien ympärillä. Syöttämällä voimakas virtapulssi kelaan, saadaan synnytettyä voimakas magneettikenttä, joka suuntaa magneetoresistorien magneitoituman joko oikeaan suuntaan (set-pulssi) tai päinvastaiseen suuntaan (reset-pulssi). Lisäksi omat ongelmansa aiheuttaa offsetin poistaminen anturista.

Rakenteensa ansiosta AMR-anturin ohuiden permalloy-nauhojen resistanssi muuttuu 2–3 %:n ulkoisessa magneettikentässä, kun vastuksien muodostaman Wheatstone-sillan resistanssi on esimerkiksi 1 k $\Omega$ :n luokkaa. Tyypillisen AMR-anturin kaistanleveys on 1–5 MHz:n välillä ja se pystyy aistimaan 50 pT:n – 5 mT:n suuruisia magneettikenttiä.

Magneetoresistiivinen ilmiö on hyvin nopea, mikä tekee siitä hyvän anturin nopeutta vaativiin mittauksiin. Lisäksi AMR-anturi voidaan valmistaa CMOS-prosessilla suoraan piisirulle ja siten sijoittaa kaupallisiin integroituihin piireihin. AMR-anturin hyviä puolia ovat



nopeus, edullisuus, korkea herkkyys, vähäinen kohina sekä luotettavuus. Lisäksi se aistii anturin kanssa yhdensuuntaista vuon komponenttia, jolloin se voidaan asentaa vaivattomasti esimerkiksi piirilevyille virtajohdinliuskan päälle havainnoimaan siinä kulkevaa virtaa. Heikkouksia ovat esimerkiksi taipumus kyllästyä jo alle 1 mT:n kentillä ja se, että anturi vaatii toimiakseen set- ja reset-pulssin. [3], [5], [8] - [13].

### 2.3 Suuren kentän anturit

Suuren kentän, tai esimagnetoivan kentän, antureiksi voidaan luokitella anturit, jotka voivat mitata myös yli 1 mT:n suuruisia magneettikenttiä. Niiden tulee ensinnäkin pystyä mitaamaan kenttiä, jotka ovat suurempia kuin maan magneettikenttä, ja toisaalta suuret kentät eivät saisi vaikuttaa niihin pysyvästi.

Useimmat teolliset anturit käyttävät kestopagneetteja mitatun magneettikentän lähteenä, jolloin nämä kestopagneetit esimagnetoivat anturin lähellä olevia ferromagneettisia kappaleita herkemälle tai lineaarisemmalle alueelle. Tämän jälkeen anturi aistii kokonaiskentässä tapahtuvat muutokset. Tällaisia antureita ovat muun muassa Reed switch -anturit, InSb-magnetoresistorit, Hall-anturit sekä GMR-anturit. Vaikka osalla näistä antureista voidaankin mitata vuontiheyksiä, jotka ulottuvat suurimmillaan jopa useisiin tesloihin, voidaan toisaalta esimerkiksi GMR-anturilla havaita pienimmillään jopa nanoteslojen vuontiheyksiä.

#### 2.3.1 Virtamuuntaja

Virtamuuntaja rakentuu sydänmateriaalisilmukasta, jonka läpi mitattava johdin kulkee sekä toisiokäämistä, jonka kierrosmäärä on hyvin korkea. Ensiökääminä toimiva mitattava johdin synnyttää siis vaihtovirralla ympärilleen muuttuvan magneettikentän, jonka vuon sydänmateriaalisilmukka kerää itseensä. Sydänmateriaalin ympärillä oleva toisiokäämi taasen muuttaa sydänmateriaalissa kulkevan vuon mittausvirraksi muuntosuhteella

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \Leftrightarrow i_2 = i_1 \cdot \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.6)$$

jossa  $i_1$  on ensiossa eli mitattavassa johtimessa kulkeva virta,  $i_2$  on toisioon muodostuva mittaavvirta,  $N_1$  on ensiön kierroslukumäärä (tässä tapauksessa  $N_1 = 1$ ) ja  $N_2$  toisiosion kierroslukumäärä.

Virtamuuntaja on toimiva virranmittausmenetelmä hyvin suurille virroille, joiden mittaamiseen sitä käytetään. Suurilla taajuusvaihteluilla sen tarkkuus ei kuitenkaan ole kovin hyvä ja lisäksi se kärsii melko suurista häviöistä johtuen suuresta rengassydäimestä. Suurten taajuuksien aiheuttamista häviöistä päästään osittain eroon käyttämällä sydänmateriaalina esimerkiksi laminoitua muuntajalevyä tai ferriittiä. Ferromagneettinen sydänmateriaalirengas lisää joka tapauksessa mittausjärjestelmän kokoa, painoa ja kustannuksia merkittävästi, ja se on myös altis kyllästymään korkeilla magneettikentänvoimakkuuksilla hystereesistä johtuen. Mittausalue vaihtelee koosta ja materiaaleista riippuen mikrotresloista aina muutama teslaan. Lisäksi virtamuuntaja on hidas ja sillä voidaan mitata vain vaihtovirtaa, joten se ei sovi suunniteltuun käyttötarkoitukseen. [6].

### 2.3.2 Rogowski-kela

Rogowski-kela, joka tunnetaan myös nimellä ”Maxwell’s worm” perustuu samaan menetelmään kuin virtamuuntaja, mutta eroaa siitä sydänmateriaalin osalta. Rogowski-kelassa ei ole lainkaan magneettista sydänmateriaalia, vaan toisiokäämi kierretään toroidiksi ei-magneettisen renkaan ympärille. Käämiä ei kytketä suljetuksi silmukaksi virtamuuntajan tapaan, vaan se jätetään avoimeksi, ja sen päiden välinen lähtöjännite on suoraan verrannollinen mitattavassa johtimessa kulkevan virran aikaderivaataan. Tämän aikaderivaatan vuoksi Rogowski-kela tulee kytkeä integraattoriin, jotta saadut tulokset ovat käytännöllisiä. Lisäksi tehoelektroniikkaa varten kela ja integraattori tulee kytkeä piiriin, joka nolaa integraattorin aina, kun mitattavassa johtimessa kulkeva virta on 0, jotta vältetään myös offset- ja bias-virheiden summaamisesta.

Rogowski-kelan etuna perinteiseen virtamuuntajaan on ilmasydäimestä johtuva pienempi induktanssi ja siten suurempi nopeus, joten se soveltuu paremmin korkeataajuisille virroille. Mittausalue on samaa suuruusluokkaa virtamuuntajan kanssa; mikrotresloista muutama teslaan. Lisäksi Rogowski-kelan etuna on myös se, että sen toisen pään voi kuljettaa ilmasydämen tapauksessa alkupäähän kierrosten sisällä siten, että se molemmat päät ovat

samalla puolella kela. Tällöin kela voidaan kiertää johtimen ympärille silmukaksi ilman, että johdinta täytyy irrottaa liitántärajapinnoistaan. Kela ei myöskään kärsi kyllästysongelmista, joten se sopiikin paremmin suurille virroille ( $I > 50 \text{ A}$ ) suurilla taajuuksilla ( $f > 1 \text{ kHz}$ ). Toisaalta kela on altis viereisten virtajohtimien aiheuttamille häiriökentille, joka huonontaa sen tarkkuutta. Rogowski-kelalla voidaan kuitenkin mitata vain vaihtovirtaa, joten se ei sovi suunniteltuun käyttötarkoitukseen. [15].

### 2.3.3 Reed switch -anturi

Reed switch -anturi lienee teollisuuden käytössä olevista antureista eräs yksinkertaisimmista. Se koostuu kahdesta taipuisasta ferromagneettisesta kontaktista, jotka ovat suljettu hermeettisesti esimerkiksi lasiseen säiliöön, joka sisältää inerttiä kaasua eli passiivista suoja-kaasua. Ferromagneettisten kontaktien pitkän sivun suuntainen magneettikenttä magnetoi kontaktit synnyttäen niiden välille vetovoiman, jolloin piiri sulkeutuu niiden koskettaessa toisiaan. Piirin sulkevien ja avaavien kenttien välillä on yleensä huomattava määrä hystereesiä, joten ne ovat melko immuuneja pienille vaihteluille kentänvoimakkuudessa.

Reed switch on siis kytkin, joka kytkeytyy päälle ja pois ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Hermeettisesti suljettuna sen toiminta ei häiriinny epäpuhtauksista eikä sitä myöskään tarvitse huoltaa. Mittausalue vaihtelee 0,5 mT:n ja 0,5 T:n välillä. Tyypilliset suorituskyvyt ovat kytkentävirralla 0,1–0,2 A ja kytkentäjännitteelle 100–200 V, ja elinikä 10 mA:n kytkentävirralla on  $10^6$ – $10^7$  toimintakertaa.

Matalat kustannukset, yksinkertainen rakenne ja luotettavuus tehonkulutuksen ollessa nollassa tekevät kytkimestä hyvin suosittu. Reed switch yhdistettynä pieneen kestopagneettiin muodostaa yksinkertaisen induktiivisen anturin, jota voidaan käyttää esimerkiksi turvajärjestelmissä ovi- ja ikkuna-anturina, joka kertoo ovatko ne kiinni vai auki. Toiminta perustuu siihen, että kestopagneetti sijoitetaan liikkuvaan osaan eli ikkunaan tai oveen ja anturi on kiinteässä rakenteessa eli ovenpielessä tai ikkunakehyksessä. Kun kestopagneetti tulee tarpeeksi lähelle anturia eli ikkuna tai ovi on kiinni, reed switch kytkeytyy päälle. Reed switch kylläkin aistii magneettikenttää, mutta toimii ainoastaan kytkimenä, joten se ei sovellu virranmittaukseen. [5].

### 2.3.4 Puolijohdemagnetoresistorit

Puolijohdemagnetoresistorit perustuvat Lorentzin voimaan puolijohdeissa, joka on esitetty yhtälössä

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.7)$$

jonka mukaan varauksenkuljettajaan  $q$  kohdistuu Lorentzin voima  $\mathbf{F}_L$  sen kulkiessa nopeudella  $\mathbf{v}$  magneettikentässä, jonka magneettivuontiheys on  $\mathbf{B}$  sekä sen ollessa sähkökentässä, jonka kentänvoimakkuus on  $\mathbf{E}$ . Koska Lorentzin voima on suoraan verrannollinen nopeuden ja magneettivuontiheyden ristituloon, on sen suunta kohtisuora molempiin nähden. Mikäli muita voimia ei ole läsnä, on magneettikentässä nopeudella  $\mathbf{v}$  liikkuvan varauksenkuljettajan rata kaareva. [5] - [7], [26].

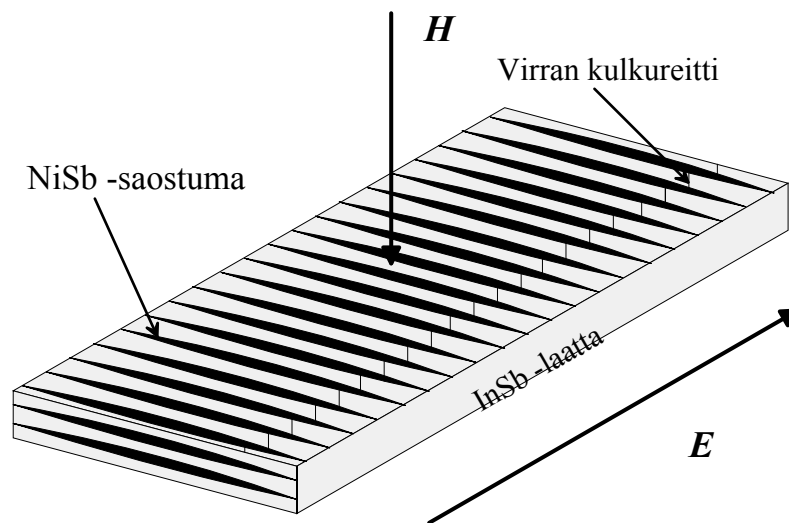
Yksinkertaisin Lorentzin voimaa hyödyntävä laite on magnetoresistori, jossa käytetään puolijohdetta, jolla on hyvä varauksenkuljettajien liikkuvuus huoneenlämmössä. Tällaisia puolijohdemateriaaleja ovat muun muassa InSb (indiumantimonidi) ja InAs (indiumarseniidi). Rakenne perustuu ohueen puolijohdemateriaalilaattaan, jonka yli muodostetaan jännitesiten, että laatan läpi kulkee virta. Tällöin laatan resistanssi on mitattavissa. Jos edellä mainittu laatta joutuu kohtisuoraan magneettikenttään, pyrkii Lorentzin voima kääntämään varauksenkuljettajat laatan sivuille, mutta mikäli laatan leveys on huomattavasti suurempi kuin sen pituus, eivät varauksenkuljettajat keräänny laatan reunoille, vaan kulkevat päästä päähän kaarevaa reittiä. Magnetoresistorit pyrkivät juuri edellä kuvattuun tilanteeseen, sillä pidempi reitti tietää suurempaa resistanssia.

Suurilla magneettikentillä ( $> 0,2$  T) anturi on hyvin herkkä ja resistanssi voi kasvaa jopa useita satoja prosentteja, kun vastaavasti pienemmällä magneettikentillä resistanssierot ovat huomattavasti pienempiä ja anturi on hyvin epäherkkä. Resistanssi on suoraan verrannollinen magneettikentän neliöön, mutta anturi pystyy aistimaan vain puolijohdelaatan pinnan suhteen kohtisuoraa magneettikentän komponenttia. Anturia suositellaan käytettäväksi vain hyvin suurien virtojen mittaamisessa.

Rakenne koostuu muutaman mikrometrin levyisistä puolijohdeliuskoista, joiden väliin muodostetaan jaksoittaisesti matalaresistanssisia, metallisia oikosulkukiskoja. Jokainen

oikosulkukisko muodostaa tasapotentiaalisen puolijohdeliuskan yli, jolloin muodostuu useita sarjaan kytkettyjä puolijohde-elementtejä, joilla on oikeanlainen leveyden ja pituuden suhde.

Toinen rakennevaihtoehto koostuu InSb-laatasta, johon on muodostettu neulanmuotoisia, matalaresistanssisia NiSb (nikkeliantimonidi) -saostumia. Nämä saostumat toimivat oikosulkukiskoina, jotka yhdistävät niiden väliin jäävät InSb-puolijohdeosat toisiinsa kuvan 2.5 mukaisesti.



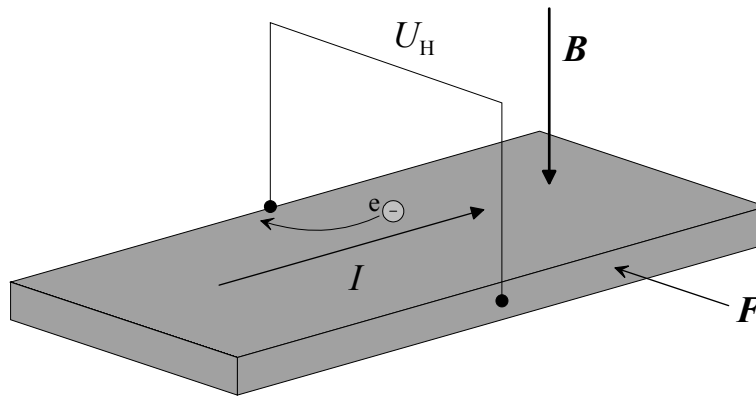
Kuva 2.5. InSb-magnetoresistorin rakenne.

Anturit tehdään joko yksittäisistä magnetoresistoreista tai niiden suunnatuista pareista. Mikäli halutaan mitata magneettikentän gradientteja, yhdistetään suunnattuun pariin ulkoisia vastuksia Wheatstonen sillan muodostamiseksi ja usein piiriin lisätään vielä kestopagneetti, joka esimagnetoi magnetoresistorit hieman herkemälle toiminta-alueelle. Ominaisuuksiensa puolesta teknologia voisi sopia taajuusmuuttajakäyttöön, mutta anturin epäherkkyys pienillä kentänvoimakkuuksilla on sen verran merkittävää, ettei sen valitseminen ole järkevää. [5].

### 2.3.5 Hall-anturit

Myös Hall-anturi toimii yhtälössä (2.7) esitettyyn Lorentzin voimaan perustuen. Hall-anturi koostuu puolijohdesta valmistetusta Hall-elementistä sekä yleensä joistakin samalle sirulle integroiduista oheispiireistä. Hall-elementti pystyy aistimaan magneetoresistiivisen anturin tavoin ainoastaan elementin pinnan suhteen kohtisuoraa magneettivuon komponenttia, mutta magneetoresistiivisestä anturista poiketen Hall-elementin puolijohdelaatan pituus on suuri verrattuna leveyteen, sillä tarkoituksena on nimenomaan saada varauksenkuljettajia ohjautumaan laatan reunoille. Kun varauksenkuljettajia on kertynyt reunoille tarpeeksi, synnyttävät ne laatan poikittaissuunnan yli sähkövarauksen, jonka muodostamaa potentiaaliero kutsutaan Hall-jännitteeksi. Edellä mainittu Hall-jännite kasvaa lopulta niin suureksi, että se kumoaa varauksenkuljettajiin vaikuttavan Lorentzin voiman, jolloin varauksenkuljettajien rata laatan yli on taas lähes suora ja lisävarausta ei pääse syntymään. Ja koska varauksenkuljettajien lopullinen rata on lähes suora, ei laatan päiden välinen resistanssi juurikaan vaihtele magneettikentän vaikutuksesta. [5], [7], [8].

Hall-jännitettä mitataan puolijohdelaatan molempien sivujen keskelle asetetuista elektrodeista ja sen suuruus vaihtelee suhteessa magneettikentän kohtisuoran komponentin voimakkuuteen. Hall-jännitteen suhdetta esivirtaan kutsutaan Hall-resistanssiksi ja tulojännitteen suhdetta esivirtaan tuloresistanssiksi. Hall-resistanssi ja Hall-jännite kasvavat lineaarisesti magneettikentän kasvaessa jopa useisiin tesloihin asti. Sekä tuloresistanssi että Hall-jännite ovat kuitenkin lämpötilariippuvaisia, mikä johtuu varauksenkuljettajien liikkuvuuden lämpötilariippuvuudesta. Eri materiaaleilla ja eri seostusasteilla saadaankin muodostetuksi erilaisia kompromisseja anturin herkkyyden ja lämpötilariippuvuuden välillä. Hall-anturi pystyy aistimaan magneettivuontiheyksiä hyvin laajalla mitta-alueella, käytännössä noin  $10 \mu\text{T}$ :n ja  $100 \text{T}$ :n välillä, minkä vuoksi se on hyvin monikäyttöinen magneettikentän anturi. Hall-anturin periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 2.6, jossa  $U_H$  on Hall-jännite,  $I$  on elementin läpi kulkeva esivirta,  $\mathbf{B}$  on kohtisuoraan elementin läpi kulkeva magneettivuontiheys,  $\mathbf{F}$  on magneettikentän kohdistama voima (Lorentzin voima) varauksenkuljettajaan ja  $e$  on elektroni, jonka rata kaartuu voiman  $\mathbf{F}$  vaikutuksesta.



Kuva 2.6. Hall-elementin periaatteellinen rakenne.

Hall-anturit ovat useimmiten valmistettu piistä (Si), sillä se on edullisin materiaali suurissa tuotantomäärissä. Mikäli halutaan esimerkiksi toiminnallisesti erittäin laajaa lämpötila- tai taajuusaluetta tai suurempaa herkkyyttä, on materiaaliksi valittava esimerkiksi GaAs (galliumarsenidi), InAs, InSb tai muu vastaava puolijohdemateriaali, jolloin myös kustannukset kasvavat.

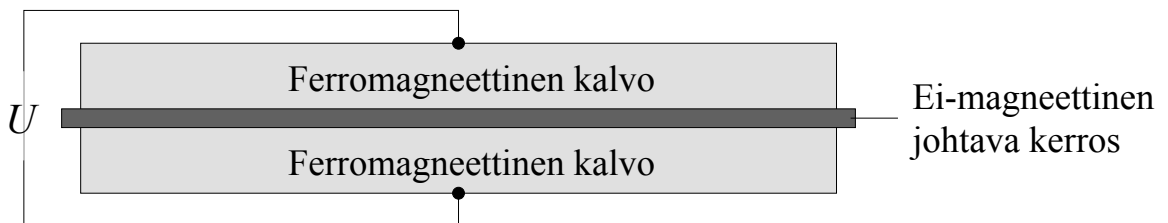
Hall-elementtejä yhdistetään lähes aina muiden puolijohdekomponenttien kanssa integroituihin piireihin. Esimerkiksi vahvistimilla voidaan vahvistaa Hall-jännitettä, suodatuksella voidaan poistaa kohinaa sekä lisäksi on olemassa erilaisia keinoja poistaa offset-häiriöitä. Lisäksi Hall-antureihin yhdistetään usein ferromagneettinen sydänmateriaali, jolla ohjataan anturin aistimaa magneettikenttää juuri anturin kohdalle. Hall-elementti pystyy aistimaan vain elementin suhteen kohtisuoraa vuon komponenttia, joten sen täytyy olla esimerkiksi piirilevylläkin pystyssä, jolloin piirilevyllä kulkevien virtajohdinliuskojen virranmittaus on vaikeaa tai mahdotonta. Muilta ominaisuuksiltaan Hall-anturi on kustannustehokas ja pieni ASIC-piiri, joka sopii taajuusmuuttajan virranmittaukseen. Nykyiset mittausjärjestelmät perustuvatkin Hall-elementin ja sydänmateriaalirenkaan yhdistettyyn rakenteeseen, mutta se on kookas ja hankala käyttää muuhun kuin virranmittaukseen erillisestä virtajohtimesta. [5], [7] - [8], [16] - [18].

### 2.3.6 GMR-anturit

GMR (Giant Magnetoresistance) -anturi eli suuren magneto-resistanssin anturi on kirjaimellisesti magnetovastus, jonka resistanssi muuttuu huomattavasti ulkoisen magneettikentän

vaikutuksesta. Ensimmäisen kerran ilmiö havaittiin Ranskassa 1988, jolloin resistanssin muutos oli 70 %:n suuruinen. Verrattuna AMR-antureiden muutaman prosentin muutoksiin, ei ole ihme, että tätä anturia ryhdyttiin kutsumaan GMR-anturiksi.

GMR-anturit valmistetaan ohutkalvotekniikalla, jossa kahden ohuen ferromagneettisen kalvon väliin muodostetaan ohut ei-magneettinen johtava kerros. Poikkileikkauskuva yleisimmästä GMR-rakenteesta, niin sanotusta unpinned sandwich GMR -rakenteesta, on esitetty kuvassa 2.7. Anturin resistanssia voidaan muuttaa sen mukaan, ovatko ferromagneettisten kerrosten magneettiset momentit yhdensuuntaisia vai eivät. Kerroksilla, joilla on yhdensuuntaiset momentit, on pienempi resistanssi kuin erisuuntaisilla momenteilla varustetuilla kerroksilla. Yksi kerros on yleensä alle 10 nm paksu, sillä kerrosten täytyy olla ohuempia kuin elektronien keskimääräinen törmäysväli materiaalissa, jotta spinistä riippuva sironna vaikuttaisi merkittävästi kokonaisresistanssiin. Useissa ferromagneettisissa materiaaleissa keskimääräinen törmäysväli on kymmeniä nanometrejä, joten nanometreissä mitattavat kerrospaksuudet ovat sopivia. GMR-anturit kehitettiin tästä syystä vasta ohutkalvotekniikan kehityksen myötä.



Kuva 2.7. GMR-anturin poikkileikkaus.

GMR-antureissa käytetyt rakenteet voidaan jakaa muutamaan alatyyppeihin, joita ovat unpinned sandwich GMR, antiferromagneettiset monitasot, spin-venttiilit, SDT (Spin Dependent Tunneling) -rakenteet eli spinistä riippuvaiset kanavoivat rakenteet sekä CMR (Colossal Magnetoresistance) -anturi eli kolossaalisen magnetoresistanssin anturi.

Unpinned Sandwich GMR -rakenteen viittaa nimellään anturin voileipämäiseen rakenteeseen, jollainen on esitetty kuvassa 2.7. Ferromagneettisina kerroksina käytetään pehmeitä magneettisia lejeerinkejä, jotka koostuvat esimerkiksi raudasta, nikkelistä ja koboltista. Ei-magneettisena, johtavana kerroksena käytetään esimerkiksi kuparia. Kyseinen rakenne rea-



goi ainoastaan liuskan kanssa yhdensuuntaiseen magneettikenttään synnyttäen noin 4–9 %:n resistanssivaihteluita.

Antiferromagneettiset monitasot koostuvat useista vuorottelevista johtavista magneettisista materiaaleista sekä ei-magneettisista materiaaleista. Koska rajapintoja on useampia kuin niin sanotuissa voileipäarakenteissa, on myös GMR-ilmiö voimakkaampi. Tällaisilla monitasoisilla GMR-antureilla onkin yleensä parempi lineaarisuus sekä matalampi hystereesi kuin voileipäarakenteilla, ja resistanssi voi vaihdella noin 12–16 %:n välillä. Toisaalta rakenne vaatii hyvin tarkat ja ohuet kerrospaksuudet, joten valmistusprosessin pitää nimenomaan olla tarkka ohutkalvojen muodostamisen osalta.

Spin-venttiilit eli antiferromagneettisesti suunnatut spin -venttiilit ovat rakenteeltaan hyvin samankaltaisia kuin kuvan 2.7 voileipäarakenteinen GMR. Erona voileipäarakenteeseen on joko alle tai päälle lisätty ylimääräinen kerros antiferromagneettista materiaalia, joka voi olla esimerkiksi ferromanganaa ( $\text{FeMn}$ ) tai nikkelioksidia ( $\text{NiO}$ ). Kyseinen antiferromagneettinen kerros kytkeytyy viereiseen magneettiseen kerrokseen ja lukitsee sen kiinteään suuntaan, jolloin vain toinen magneettinen kerros voi pyöriä vapaasti. Spin-venttiileitä on käytetty paljon magneettisissa lukupäissä esimerkiksi kiintolevyissä. Resistanssivaihtelut voivat olla spin-venttiileissä noin 4–20 %:n luokkaa.

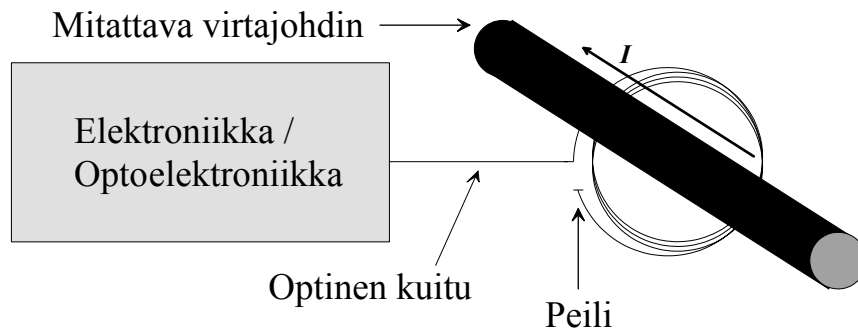
SDT (Spin Dependent Tunneling) eli spinistä riippuvaiset kanavoivat rakenteet ovat myös hyvin samankaltaisia kuin kuvan 2.7 voileipäarakenne, mutta ohuen johtavan kerroksen sijaan ferromagneettisten kerrosten välissä on hyvin ohut eristävä kerros. Johtavuus syntyy kvanttikanavoinnista eristeen läpi, ja kanavoivan virran suuruutta voidaan moduloida kahden ferromagneettisen tason magnetoituman suunnalla. SDT-rakenne mahdollistaa hyvin herkkien ja suuriresistanssisten antureiden valmistamisen, jotka soveltuvat akkukäyttöön. Resistanssivaihtelut voivat olla SDT-rakenteilla noin 10–20 %:n luokkaa.

CMR-anturit eli kolossaalisen magnetoresistanssin anturit voivat synnyttää jopa  $10^3$ – $10^8$  %:n resistanssivaihteluita, mutta vaativat siihen hyvin suuria magneettikenttiä sekä nestemäisen tyyppien lämpötiloja. Nykyisin on tosin kehitetty huoneenlämmössä toimivia antureita, joita pystytään yhdistämään Wheatstonen siltaan, mutta tekniikka on vieläkin tutkimuksen alla ja jokseenkin harvinainen näky kaupallisissa laitteissa.

GMR-antureita käytetään jonkin verran virranmittauksessa johtuen siitä, että niillä voidaan mitata sekä tasa- että vaihtovirtaa. Ohuiden kalvojen vuoksi antureilla voidaan mitata myös todella suuritaajuisia virtoja; aina 100 MHz:iin asti. Mittausalue vaihtelee 0,1  $\mu\text{T}$ :n ja 10 kT:n välillä. Erisuuruisia virtoja varten anturin täytyy kuitenkin sijaita eri etäisyyksillä johtimesta ja lisäksi anturi on hyvin tarkka asennostaan johtimeen nähden. GMR-anturi pystyy aistimaan vain anturin suhteen yhdensuuntaista magneettivuon komponenttia, joten se soveltuu hyvin esimerkiksi piirilevyllä olevien virtajohdinliuskojen virranmittaukseen. Rakenne on kuitenkin monimutkainen valmistaa perinteisellä CMOS-prosessilla, sillä anturin kerrosmateriaalit lisätään sirulle sputteroimalla, ja lisäksi menetelmä on kallis johtuen käytettävistä materiaaleista sekä siitä, ettei anturien alueella saa olla muita integroituja piirejä. GMR-anturi sopii ominaisuuksiensa puolesta taajuusmuuttajan virranmittaukseen, mutta monimutkaiset valmistusmenetelmät sekä suuret kustannukset eivät tee siitä toistaiseksi kovin yleistä anturia. [5], [9].

### 2.3.7 Optiset anturit

Optinen virranmittausanturi koostuu optisesta kuidusta, joka kierretään mitattavan johtimen ympärille sekä siihen liittyvästä elektroniikasta. Elektroniikka voi sijaita kaukanakin itse anturointipisteestä, sillä signaali kulkee häviöttömästi optista kuitua pitkin. Itse elektroniikka koostuu valonlähteestä, optisesta vaihemodulaattorista, polarisaation analysaattorista, optoilmaisimesta, signaalinkäsittely-yksiköstä ja muusta elektroniikasta. Toiminta perustuu Faradayn ilmiöön, jossa valon polarisaatio muuttuu johtimen synnyttämän ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Tätä polarisaation muutosta analysoidaan tietyn siirtofunktion avulla määrittää johtimessa kulkeva virta. Muutosta analysoidaan seuraavasti: Aluksi muodostetaan polarisoitu valosignaali, jonka jälkeen se lähetetään optiseen kuituun, joka kulkee mitattavan johtimen ympärillä. Optisen kuidun päässä on peili, josta valo heijastuu takaisin ja päättyy lopulta polarisaatiota analysoivalle elektroniikalle. Lähetetyn ja saapuvan valon välinen polarisaatiokulman muutos muunnetaan sopivalla algoritmilla virran arvoksi. Periaatteellinen rakennekuva optisesta virranmittausanturista on esitetty kuvassa 2.8.



Kuva 2.8. Optisen virranmittausanturin rakenne.

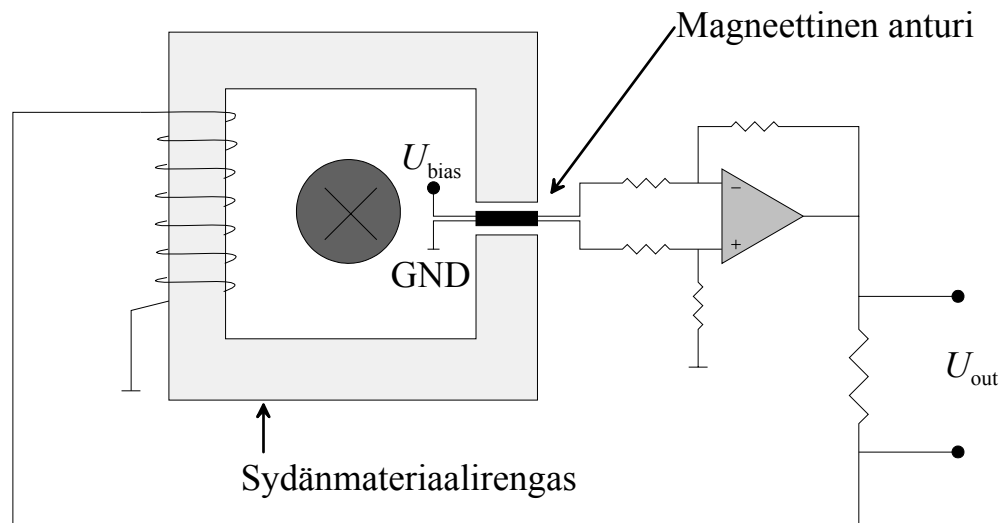
Optisen anturin etuja ovat galvaaninen erotus mitattavasta johtimesta, immuniteetti radio- taajuiselle sähkömagneettiselle säteilylle, mittaus reagoi välittömästi virran suuruuteen eikä sen aikaderivaattaan, lyhyt virran suuruudesta riippumaton vasteaika sekä se, ettei anturi voi kyllästyä. Anturin signaalikohinasuhdetta voidaan kasvattaa lisäämällä johtimen ympärille kierrettäviä kuitukierroksia, mutta toisaalta se aiheuttaa anturin tuottaman signaalin leikkaantumista suurilla vikavirroilla. Mittausalue on  $0,1 \text{ pT} - 1 \text{ mT}$ , mutta taajuuskaista rajoittuu alle  $60 \text{ kHz}$ :n taajuuksille. Anturi sopii erittäin suurien vikavirtojen nopeaan ja melko tarkkaan aistimiseen, mutta toisaalta se aistii pieniä vikavirtoja huonolla tarkkuudella. Lisäksi anturi sisältää monimutkaisia optisia ja elektronisia osia sekä optista kuitua, jotka tekevät siitä kalliin. Anturi on siis erittäin hyvä vikavirtojen havaitsemisessa, mutta ei virranmittauksessa. Optisia antureita käytetään jonkin verran suurjännitesovelluksissa, esimerkiksi sähkönsiirtoverkkojen mittauksissa, ja se soveltuu lisäksi hyvin esimerkiksi suurten tasavirtojen mittaukseen. Ominaisuuksiensa vuoksi optinen anturi ei siis sovellu tässä työssä esitettyyn käyttötarkoitukseen. [8], [19] - [21].

### 2.3.8 Closed loop -mittaus

Closed loop -mittaus ei itsessään ole oma anturityyppinsä vaan tapa käyttää anturia, millä kasvatetaan anturin virranmittauskykyä entisestään. Nykyiset virranmittaukset perustuvat hyvin pitkälti tähän mittausmenetelmään johtuen muun muassa sen hyvästä häiriönsietokyvystä.

Rakenne perustuu siihen, että jokin virranmittausanturi, esimerkiksi Hall-anturi, asetetaan sydänmateriaalisilmukassa olevaan aukkoon ja mitattava johdin sijoitetaan kulkemaan sil-

mukan läpi. Mitattava johdin synnyttää ympärilleen magneettikentän, joka ohjautuu kulkemaan sydänmateriaalissa ja siten myös sen ilmvälissä olevan Hall-anturin läpi. Anturi aistii magneettikentän ja sen vaikutuksesta synnyttää lähtöjännitteeksi Hall-jännitteen. Anturin lähtöjännite synnyttää vahvistimen kautta virran, joka kulkee niin sanotun kompensointikelan läpi, joka on pyöritetty sydänmateriaalirengaan ympärille. Kompensointikelan läpi kulkeva virta synnyttää sydänmateriaalissa kulkevaan vuohon verrattuna vastakkaisuuntaisen vuon, joka ajaa sydänmateriaalissa kulkevan vuon nolleen. Kompensointikelan käämikierrosten lukumäärä on valittu siten, että nollavuo on mahdollista saavuttaa kelassa kulkevalla virralla. Kompensoivan käämin läpi kulkeva virta kulkee myös pienen kuormavastuksen kautta, jolla mitataan kuinka paljon virtaa tarvitaan mitattavan johtimen synnyttämän vuon kumoamiseksi, ja tämä virta on verrannollinen mitattavassa johtimessa kulkevaan virtaan. Kyseessä on siis eräänlainen takaisinkytkentäsilmukka, josta menetelmä on myös saanut nimensä. Esimerkki closed loop -mittauksesta on esitetty kuvassa 2.9.



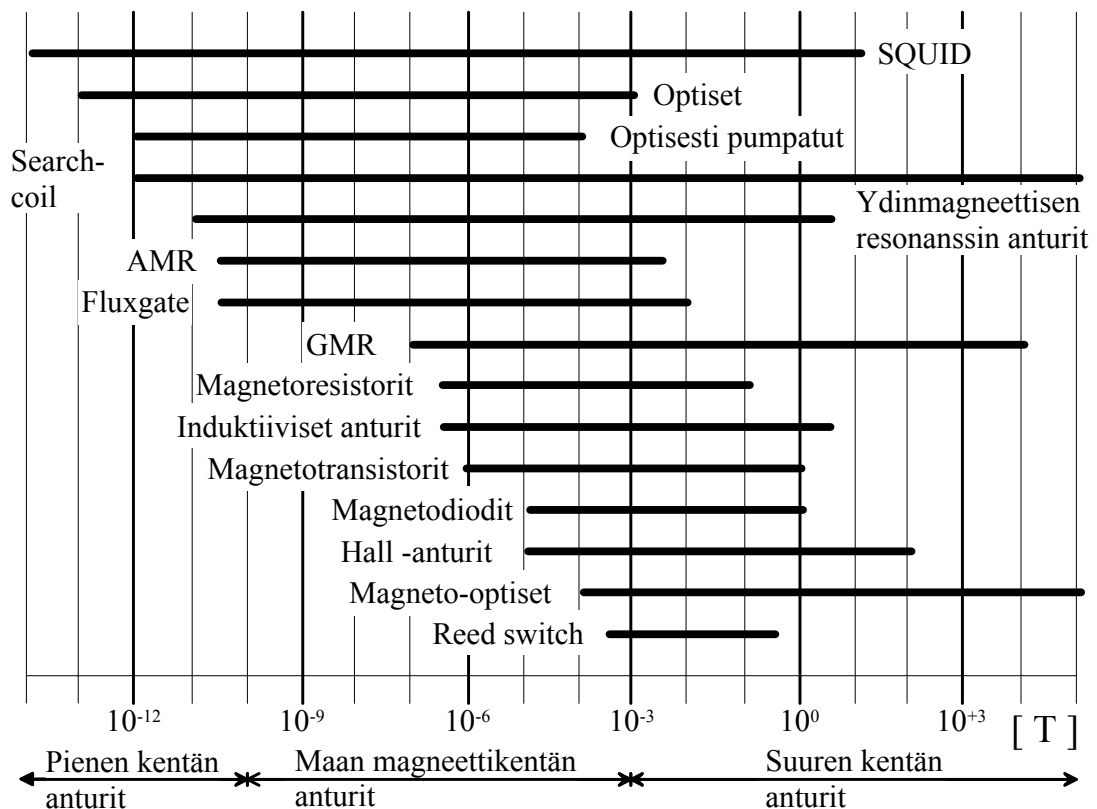
Kuva 2.9. Closed loop -mittauksen rakenne.

Closed loop -mittauksessa on monia hyötyjä verrattuna pelkän anturin käyttämiseen. Se sallii esimerkiksi suurempienkin virtojen mittauksen ilman, että se saturoi anturin. Lisäksi anturin lähtö on hyvin lineaarinen ja tarkka, taajuuskaista on leveä, suuri silmukavahvistus minimoi komponenttien vaihtelujen vaikutuksen mittaukseen sekä anturin dynaaminen alue on laaja. Ongelmia kuitenkin tuottavat sekä paino että koko ja niiden tuomat kustan-

nukset, sillä menetelmä perustuu kookkaan sydänmateriaalirenkaan käyttöön vuon ohjauksessa anturille. [4].

## 2.4 Yhteenveto magneettikenttään perustuvista virranmittausantureista

Virranmittausantureita voi siis jaotella mitattavan magneettikentän mukaan pienen kentän, maan magneettikentän ja suuren kentän antureihin, kuten aiemmin on esitetty. Jaottelu on hieman keinotekoinen, sillä osa antureista kykenee mittaamaan magneettikenttiä myös jaottelun mukaisen alueen ulkopuolelta. Magneettikenttää aistivien antureiden mittausalueita magneettikentän voimakkuuden mukaan on esitetty kuvassa 2.10. Lisäksi kuvassa näkyvät myös edellä mainitut mittaaluejaot.



Kuva 2.10. Magneettikenttään perustuvien antureiden mittausalueet.

### 3 VIRRANMITTAUSMENETELMÄN VALINTA

Virranmittausmenetelmän valinta on prosessi, johon liittyy monia tekijöitä. Koska tässä diplomityössä on päätetty keskittyä magneettikenttään perustuviin mittausmenetelmiin, tulee anturin myös perustua sellaiseen menetelmään. Itse anturin valinnassa on mahdollista tehdä päätös useiden tekniikoiden ja niiden toteutustapojen kesken riippuen siitä, millaiset vaatimukset mitattava virta, toimintaympäristö sekä asiakkaan tarpeet anturille asettavat. Lisäksi täytyy tarkastella jo valmiiksi olemassa olevia kaupallisia sovelluksia, jotka voisivat sopia käyttötarkoitukseen.

#### 3.1 Virranmittausanturin valinnassa huomioitavat seikat

Magneettikentän havaitsemiseen perustuvissa virranmittausantureissa on muutamia käyttötarkoitukseen sopivia tekniikoita. Käyttökohteena olevassa taajuusmuuttajassa kulkee sekä virraltaan että taajuudeltaan suuria signaaleja, joten häiriölähteitä on paljon. Häiriötekijöiden minimoimiseksi on mielekkäämpää sijoittaa epäherkkä anturi lähelle johdinta kuin herkkä anturi kauas johtimesta. Tämä tarkoittaa melko suurien magneettikenttien mittausta, joten anturityypiksi täytyy valita suuren kentän eli esimagnetoivan kentän anturi.

Suuren kentän antureista Reed switch on kytkin eikä siksi sovellu tarkoitukseen. Käyttötarkoitukseen sopivimmat ovatkin magnetoresistiivinen anturi (puolijohdemagnetoresistori / AMR / GMR / CMR) sekä Hall-anturi, jotka ovat samalla teollisuuden tärkeimmät magneettikentän anturit. Molemmat edellä mainituista perustuvat Lorentzin voiman käyttöön anturoinnissa ja pystyvät aistimaan riittävän suuria magneettikenttiä käyttötarkoitusta varten. Karkeasti yleistettynä voisi sanoa, että magnetoresistiiviset anturit ovat herkkiä ja so-pivat hyvin pienille magneettikentille, kun taas Hall-anturit ovat vähemmän herkkiä ja so-pivat hyvin ainoastaan suurille magneettikentille. Taajuusmuuttajakäytössä magneettiken-tät ovat melko suuria, joten valinnan kohteeksi muodostuu Hall-anturi. Lisäksi Hall-anturi on helppo ja edullinen valmistaa CMOS-prosessilla ASIC-piiriksi. Magnetoresistiivisistä antureista AMR on herkkä satureitumaan jo alle 1 mT:n magneettikentillä ja toisaalta GMR kärsii suuresta hystereesistä ja voi siten tuhoutua jo kohtalaisen pienilläkin magneet-tikentillä, joten siksi tämä työ ei jatkossa keskity näihin anturitekniikoihin.

### **3.2 Hall-elementtiin perustuvan virranmittausmenetelmän valinta**

Hall-elementti ei itsessään ole kovin hyvä magneettikentän anturi, sillä se on melko epälineaarinen ja sen antama jännitesignaali on hyvin heikko. Jotta Hall-elementistä saataisiin parempi virranmittausanturi, tulee sen antamaa signaalia vahvistaa ja häiriökestoisuutta parantaa. Lisäksi valmistustekniikkaa, eli CMOS-prosessia, ajatellen anturi on ongelmallinen, sillä vuon tulisi kulkea Hall-elementin läpi kohtisuorassa elementin pintaan nähden, jotta anturi toimisi. Olisi huomattavasti helpompaa valmistaa CMOS-prosessilla piiri, joka on rakennettu kokonaisuudessaan vaakasuoralle sirulle liitántärajapintoineen ja kotelointineen. Perinteinen Hall-anturin käyttötapa vaatii sen asentamista pystyyn, mutta on olemassa myös uusi menetelmä vuon ohjaamiseksi kohtisuoraan vaakasuorassa olevalle Hall-elementille. Tässä työssä keskitytään tämän uuden menetelmän käyttöön.

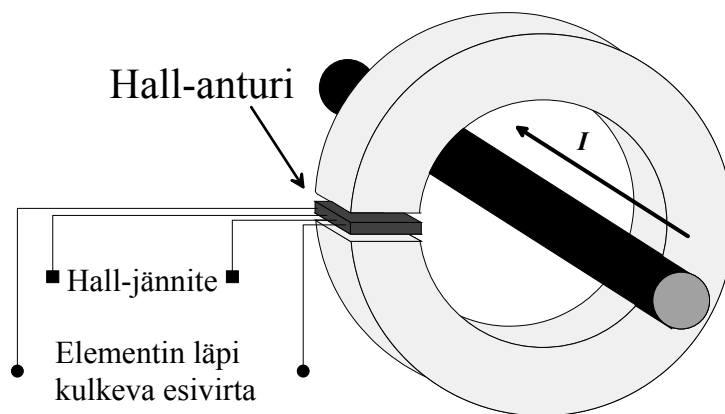
#### **3.2.1 Edut oman anturin suunnittelussa**

Hall-antureita, kuten muitakin magneettikenttää aistivia antureita, löytyy kaupallisesti monenlaisia ja moniin eri tarkoituksiin. Taajuusmuuttajakäyttöä varten on hyödyllistä optimoida tiettyjä ominaisuuksia anturista, joita ei välttämättä kaupallisista antureista löydy tai jotka ei kaupallisissa sovelluksissa pystytä parantamaan. Ostamalla valmiin ratkaisun, joutuu usein tyytymään tiettyjen ominaisuuksien osalta kompromisseihin tai jopa muuttamaan muun järjestelmän osia saadakseen anturin soveltumaan osaksi järjestelmää. Suunnitteleamalla oma anturi on mahdollista saada vain halutut ominaisuudet paremmiksi ja tinkiä muista ominaisuuksista anturin käyttökohteen ja siltä vaaditun suorituskyvyn mukaisesti. On mahdollista esimerkiksi suunnitella anturin integrointi muuhun taajuusmuuttajan ohjauselektroniikkaan sekä suunnitella anturin suodatusta. Lisäksi suunnittelutyön etuna on mahdollisuus kehittää uusia ratkaisuja, joita muut valmistajat eivät ole vielä keksineet.

#### **3.2.2 Perinteinen Hall-elementin käyttötapa**

Yleisimmin Hall-elementtejä käytetään lähinnä ferromagneettisen rengassydämen kanssa siten, että Hall-elementti on pystyssä rengassydämessä olevassa ilmavälissä, jolloin rengassydämen läpi kulkevan virtajohtimen synnyttämä magneettivuoto kerääntyy sydänmateriaaliin ja kulkee siten tarkemmin Hall-elementin läpi. Etuina edellä mainitun kaltaisessa järjestelyssä on hyvä vuon ohjautuminen sekä häiriöttömyys, mutta sen heikkouksiksi

muodostuvat suuri koko ja paino sekä lisäkustannukset. Hall-anturi joudutaan myös koto-loimaan pystysuunnassa. Kyseistä rengassydämeen perustuvaa anturointimenetelmää käytetään myös siten, että anturista muodostetaan nollavuonon ilmaisimen aiemmin kuvailulla closed loop -menetelmällä. Tällöin anturin tarkkuus ja häiriösietoisuus paranevat huomattavasti eikä se kärsi kyllästysongelmista. Perinteisen Hall-anturin käyttötavan periaatepiirros on esitetty kuvassa 3.1 ja toimintaperiaatepiirros closed loop -mittauksesta on esitetty kuvassa 2.9.

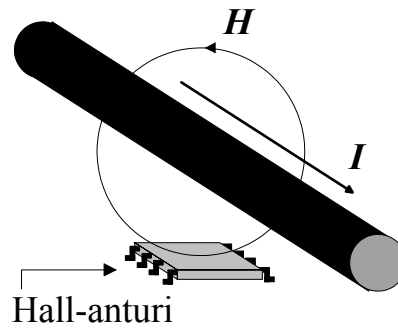


Kuva 3.1. Perinteinen Hall-anturin käyttötapa.

### 3.2.3 Uusi Hall-elementin käyttötapa

Hall-elementin heikkous on se, että se pystyy aistimaan vain pintaansa nähden kohtisuoraa magneettivuon komponenttia. Tämä aiheuttaa myös sen, että itse anturin täytyy olla kohtisuorassa johtimen pituuden suhteen. Mikäli Hall-anturi voitaisiin valmistaa kokonaisuudessaan vaakatasossa, helpottaisi se monia asioita, kuten esimerkiksi piirilevyn pinnalla olevassa johdinliuskassa kulkevan virran mittausta sekä anturin valmistusprosessia. Uusi Hall-elementin käyttötapa pyrkii puuttumaan juuri näihin seikkoihin muuttamalla anturin rakenteen vaakatasoon eräillä rakenteellisilla muutoksilla. Piirros uudesta Hall-elementin käyttötavasta on esitetty kuvassa 3.2.



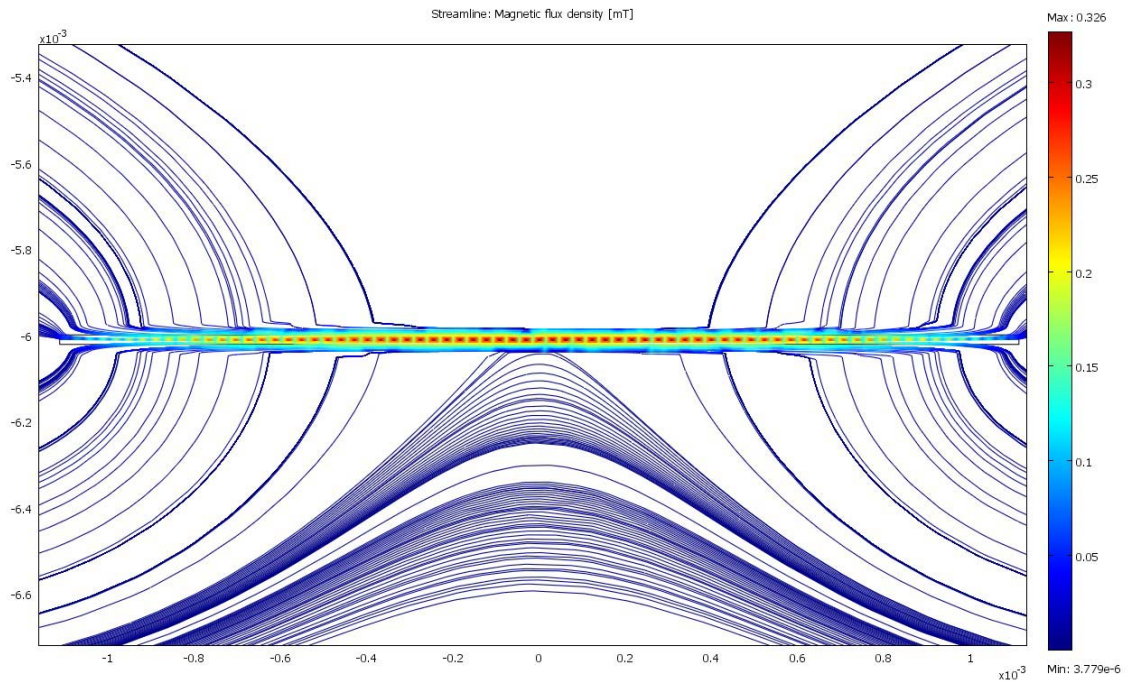


Kuva 3.2. Uusi Hall-elementin käyttötapa.

Hall-elementin tulee siis olla vaakatasossa mikropiirillä ja sen tulisi aistia piirin suhteen yhdensuuntaista ulkopuolista magneettivuota. Magneettivuon pitäisi siis kulkea Hall-elementin kohdalla kohtisuoraan vaakatasoon nähden, kun piirin ulkopuolella se kulkee yhdensuuntaisesti vaakatasoon nähden. Tätä varten magneettivuo täytyy ohjata paikallisesti kohtisuoraksi piirin pintaan nähden, ja se tehdään eräänlaisilla integroiduilla keskittimillä, joiden tehtävänä on keskittää vuo haluttuun suuntaan halutussa kohdassa piiriä. Jotta magneettivuo saataisiin keskittymään juuri näiden keskittimien kohdalle, tulee niiden permeabiliteetin olla huomattavasti ympäristöä korkeampi. Tämän vuoksi keskittimet tulee valmistaa jostakin ferromagneettisesta aineesta. Magneettivuota sitovien ominaisuuksiensa vuoksi tällaisia keskittimiä kutsutaankin jatkossa magnetokonsentraattoreiksi.

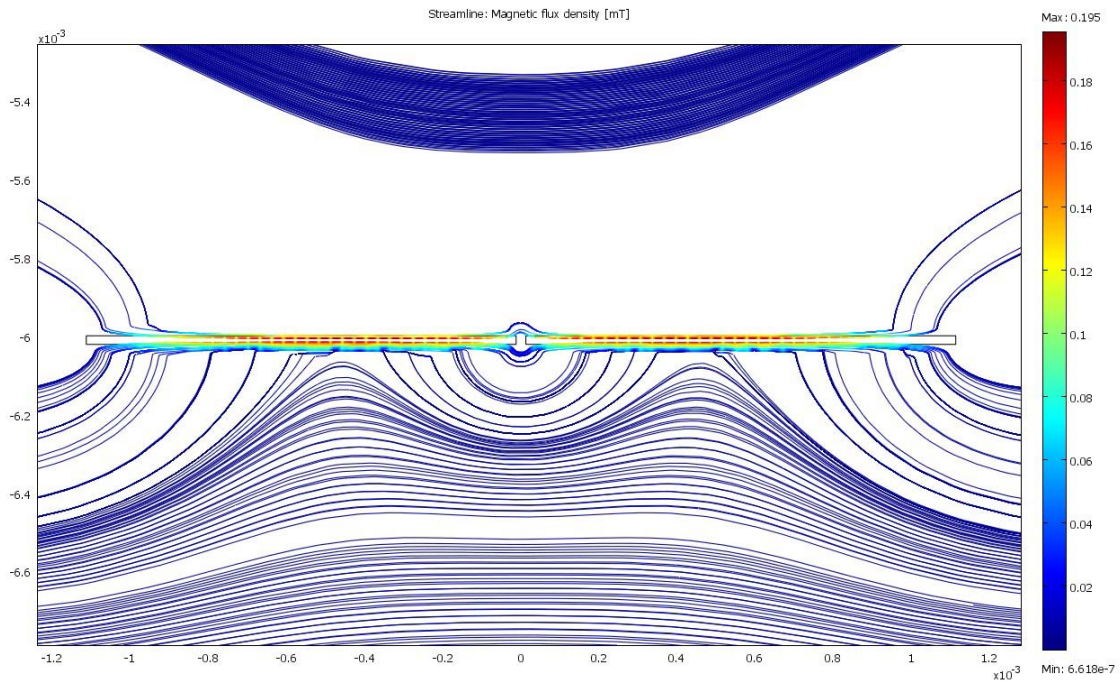
### 3.2.4 Magnetokonsentraattorit

Magnetokonsentraattoreiden tulee jollakin tavalla kerätä magneettikentän vuoviivat itseensä ja ohjata ne tai osa niistä Hall-elementtien kohdalla piirin pinnan suhteen kohtisuoraksi magneettivuoksi. Kun tarkastellaan ulkoisen magneettikentän käyttäytymistä ferromagneettisessa levyssä, huomataan, että reuna-alueilla vuo saapuu ja lähtee levystä osittain lähes kohtisuoraan levyn pintaan nähden. Vuon käyttäytymistä ferromagneettisessa levyssä on esitetty kuvassa 3.3, jossa johtimessa oletetaan kulkevan 100 A:n virta, levy on 6 mm:n etäisyydellä johtimesta ja suorakulmaisen levyn pituus on 2,225 mm, leveys 250  $\mu\text{m}$  ja korkeus 22  $\mu\text{m}$ .



Kuva 3.3. Virtajohtimen, jossa kulkee 100 A:n virta, synnyttämän magneettivuon käyttäytyminen 6 mm johtimen alapuolella olevassa homogeenisessa ferromagneettisessa levyssä, jonka pituus on 2,225 mm, leveys 250  $\mu\text{m}$  ja korkeus 22  $\mu\text{m}$ .

Nyt jos kuvan 3.3 konsentraattorilevy katkaistaan keskeltä kahtia ottamalla siitä pois 25  $\mu\text{m}$ :n pituinen pala, syntyy myös levyjen väliin pullistuva kenttä. Tämän vuoksi konsentraattoreita tarvitaan kaksi, ja niiden väliin tulee saada hyvin pieni ilmaväli suunnilleen piirin keskelle. Kohdatessaan ilmavälin magneettivuo jakautuu kahteen komponenttiin, joista toinen komponentti jatkaa suoraan lyhyintä reittiä seuraavaan konsentraattoriin, kun taas toinen ikään kuin hyppää ilmaraon yli muodostaen lähelle ilmaväliä piirin pinnan suhteen kohtisuoran vuon komponentin. Vuon käytöstä ilmavälissä on esitetty kuvassa 3.4, josta on selvästi nähtävissä 25  $\mu\text{m}$ :n pituisen ilmavälin aiheuttama vuon paikallinen pullistuma.



Kuva 3.4. Virtajohtimen synnyttämän magneettivuon käyttäytyminen johtimen alla olevien kahden magnetokonsentraattorin välisessä, 25  $\mu\text{m}$ :n pituisessa ilmvälissä.

Konsentraatioilmion muodostumiseksi tulee magnetokonsentraattorien materiaalin olla permeabiliteetiltään hyvin paljon ympäröivää materiaalia, kuten esimerkiksi ilmaa, suurempaa. Suurella permeabiliteetillä saavutetaan kyky johtaa paremmin magneettivuota, jolloin vuoviivat kulkevat mieluummin magneettisessa materiaalissa kuin sitä ympäröivässä, permeabiliteetiltään pienemmässä, materiaalissa. Mikäli halutaan tämän lisäksi minimoida pyörrevirrat materiaalissa, olisi materiaalin syytä olla myös sähkönjohtokyvyltään mahdollisimman pieni tai rakenteeltaan hyvin ohutta kalvoa. Riittävän ohut kalvo vähentää merkittävästi pyörrevirtojen aiheuttamia häviöitä materiaalissa ja siksi nykyiset sydänmateriaalit laminoidaankin usein lukemattomista ohuista, päällekkäisistä levyistä. Lisäksi hystereesihäviöiden minimoimista ajatellen tulisi koersiivivoiman olla mahdollisimman pieni, jotta remanenssivuo jäisi pieneksi. On siis pyrittävä tietynlaiseen kompromissiin näiden ominaisuuksien välillä, jolloin jokin ferromagneettinen materiaali sopisi ominaisuuksiltaan hyvin magnetokonsentraattoriksi. Riittävien magneettisten ominaisuuksien saavuttamiseksi olisi suositeltavaa käyttää ferriittiä tai vaihtoehtoisesti jonkinlaista permalloy-tyyppistä ferromagneettista metalliseosta.

Ferriitti on ferromagneettinen keraaminen materiaali, jolla on raudan tai rautavaltaisten metalliseosten kiderakenne. Tämä kiderakenne perustuu ferriitillä aina bcc-hilaan eli tilakeskiseen kuutiolliseen hilaan. Ferriitit voidaan jakaa magneettisesti pehmeisiin ja koviin ferriitteihin. Rautaoksidin lisäksi magneettisesti kovassa ferriitissä on usein esimerkiksi joko bariumoksidia tai strontiumoksidia, kun taas magneettisesti pehmeä ferriitti sisältää nikkeli-, sinkki- tai mangaaniyhdisteitä. Magneettisesti kovalla ferriitillä on korkea permeabiliteetti ja korkea koersiivivoima, kun taas pehmeällä ferriitillä permeabiliteetti on suuri, mutta koersiivivoima on pieni. Yhteistä molemmille on huono tai olematon sähkönjohtokyky, joka minimoi pyörrevirtojen muodostumista ja niiden aiheuttamia häviöitä. Lisäksi ferriitti on keraamisena materiaalina kovaa ja haurasta, joten sen muokkaaminen on työlästä ja vaikeaa. [6], [7].

Permalloy, joka kuuluu magneettisesti pehmeisiin materiaaleihin, on sähköä johtava metalliseos, jonka permeabiliteetti on hyvin korkea ja koersiivivoima pieni. Nämä ominaisuudet tekevät siitä erinomaisen vaihtoehdon magnetokonsentraattorin materiaaliksi. Tyypillisin permalloy-seos koostuu 80-prosenttisesti nikkelistä ja 20-prosenttisesti raudasta, mutta permalloy-tyyppisiä magneettisia materiaaleja on useita erilaisia eri valmistajilta, ja niitä voidaan tarvittaessa vielä muokata valmistajien toimesta lämpökäsittelyillä, jotta niihin saataisiin yksilöllisesti haluttuja ominaisuuksia esimerkiksi hystereesisilmukan muotoa muuttamalla. Materiaali on siis mahdollista valita käyttökohteen vaatimien ominaisuuksien mukaan. [6], [7], [16], [22].

### **3.3 Valmiit virranmittausanturit**

Markkinoilla on useita erilaisia valmiita sovelluksia magneettikenttään perustuvaan virranmittausanturointiin. Yleisimmät valmiit tuotteet perustuvat AMR- ja GMR-antureihin sekä Hall-antureihin. Virranmittausantureita löytyy esimerkiksi valmistajilta Honeywell, Sentron, Allegro, Siemens, Zetex ja Tamura. Tässä työssä esitellään kaksi eri valmistajien anturia, jotka perustuvat eri anturointitekniikoihin ja jotka voisivat ominaisuuksiensa puolesta sopia käyttötarkoitukseen.

### 3.3.1 Sentron CSA-1V

Sentron on valmistanut magneettikentän antureita jo yli kymmenen vuotta ja on johtava valmistaja esimerkiksi eristetyissä virranmittausmenetelmissä. Virranmittausanturi CSA-1V perustuu Sentronin rekisteröimään IMC-Hall-virranmittausanturitekniikkaan, jossa on käytetty Hall-elementtejä, magnetokonsentraattoreita sekä muuta oheiselektroniikkaa samalle CMOS-piirille integroituna. Tuotteen toiminta-alue on  $-5...5$  mT, herkkyys on  $280 \pm 10$  V/T, taajuuskaista on tasavirrasta 100 kHz:n vaihtovirtaan, offset-virhe on  $-15...15$  mV, ja kohina alhainen ( $125$  nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ). Epälineaarisuus on suuruusluokkaa  $0,1-0,2$  %. Anturin hyviä puolia magneetoresistiivisiin antureihin nähden ovat hyvin suurten magneettikenttien sietokyky, hystereesihäviöiden olemattomuus, nollauksen tarpeettomuus, parempi sietokyky sähkömagneettisille häiriöille sekä edullisuus. Herkkyys on samaa luokkaa kuin esimerkiksi magneetoresistiivisellä anturilla. Mitattavan virran suuruus riippuu sen muodostamasta magneettikentästä, ja on siten erittäin riippuvainen johtimen etäisyydestä, kuten yhtälö (2.5) osoittaa. Taulukossa 3.1 on esitetty anturin herkkyyskärsiä ja resoluutioita eri virttojen arvoilla. [23].

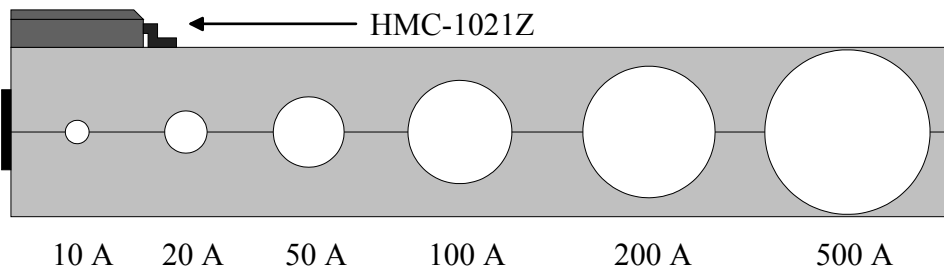
Taulukko 3.1. Virranmittausanturin CSA-1V mittaustarkkuuksia ja etäisyyksiä johtimesta mitattavan virran suuruuden funktiona herkkyydellä 300 V/T.

$I_{\text{max}}$ [A]	Etäisyys [mm]	Herkkyys [mV / A]	Likimääräinen resoluutio [A]	Epälineaarisuus [%]
10	0,2	120	0,1	< 0,1
50	2	25	0,5	< 0,1
100	4	12	1,0	< 0,1
500	20	3	3,5	< 0,1
1000	40	1,5	7,0	< 0,1

### 3.3.2 Honeywell HMC1021

Honeywell on yksi maailman suurimpia anturivalmistajia ja keskittyy erityisesti magneetoresistiivisiin antureihin. Magneettikentän anturi HMC1021 perustuu magneetoresistiiviseen ilmiöön ja soveltuu erinomaisesti pienten kenttien anturoimiseen. Tuotteen toiminta-alue on  $-0,6...0,6$  mT, herkkyys on  $40...62,5$  V/T, taajuuskaista tasavirrasta 5 MHz:n vaihtovirtaan, offset-virhe on  $-10...11,25$  mV ja kohina hyvin alhainen ( $48$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ). Epälineaari-

suudeksi on ilmoitettu täydellä toiminta-alueella 1,6 % ja resoluutioksi 10 Hz:n kaistanleveydellä 8,5 nT. Anturin ominaisuuksia on esitelty tarkemmin valmistajan tuotedokumentaissa [14]. Anturin hyviä puolia ovat sen laaja taajuuskaista. Anturin heikkouksia taasen ovat monimutkaiset asetus- ja nollausmenetelmät sekä offsetin poistomenetelmät, tuhoutumisalttius suurilla magneettikentillä ja anturin sijainnin vaikutus mittausvirheisiin. Viimeiseen ongelmaan on keksitty ratkaisu kehittämällä eräänlainen pidike, jossa anturi on kiinni. Pidikkeessä on eri kohdissa aukot johtimille, joissa kulkee erisuuruisia virtoja. Pidike on esitetty kuvassa 3.5. [4].



Kuva 3.5. Virranmittausanturin HMC1021Z pidike erisuuruisia virtoja varten.

Erisuuruisille virtajohtimille on siis halkaisijaltaan erikokoinen pidike, joka on tietyllä, määrättyllä etäisyydellä itse anturista. Vastaavat eri virroille tarkoitetut etäisyydet sekä vaakatasossa että pystytasossa on esitetty taulukossa 3.2. Kuten kuvasta 3.5 on huomattavissa, pysyy pystysuuntainen etäisyys anturiin jokaisella virran arvolla samana katsottuna johtimen keskipisteestä.

Taulukko 3.2. Virtajohtimen etäisyys anturista HMC1021Z erisuuruisilla virran arvoilla.

Virta [A]	Etäisyys vaakasuunnassa [mm]	Etäisyys pystysuunnassa [mm]
10	0	3,5
20	3,3	3,5
50	6,8	3,5
100	10,2	3,5
200	14,9	3,5
500	21,3	3,5

## 4 VIRRANMITTAUSANTURIN SUUNNITTELU

Virranmittausanturin suunnittelu lähtee aina liikkeelle käyttötarkoituksesta sekä käyttökohteen asettamista vaatimuksista ja niiden selvittämisestä. Käytännössä anturille pitää siis asettaa tiettyjä haluttuja ominaisuuksia, joita lähdetään saavuttamaan suunnitteluprosessin myötä. Virranmittausmenetelmäksi on valittu Hall-elementtiin perustuva tekniikka, johon liitetään magnetokonsentraattorit ohjaamaan magneettivuo Hall-elementtien vaatimaan kohtisuoraan suuntaan. Suunnittelu etenee haluttujen ominaisuuksien selvittämisestä Hall-elementin sekä magnetokonsentraattorien suunnitteluun sekä lopulta näiden kahden erillisen rakenteen yhdistämiseen.

### 4.1 Haluttuja ominaisuuksia

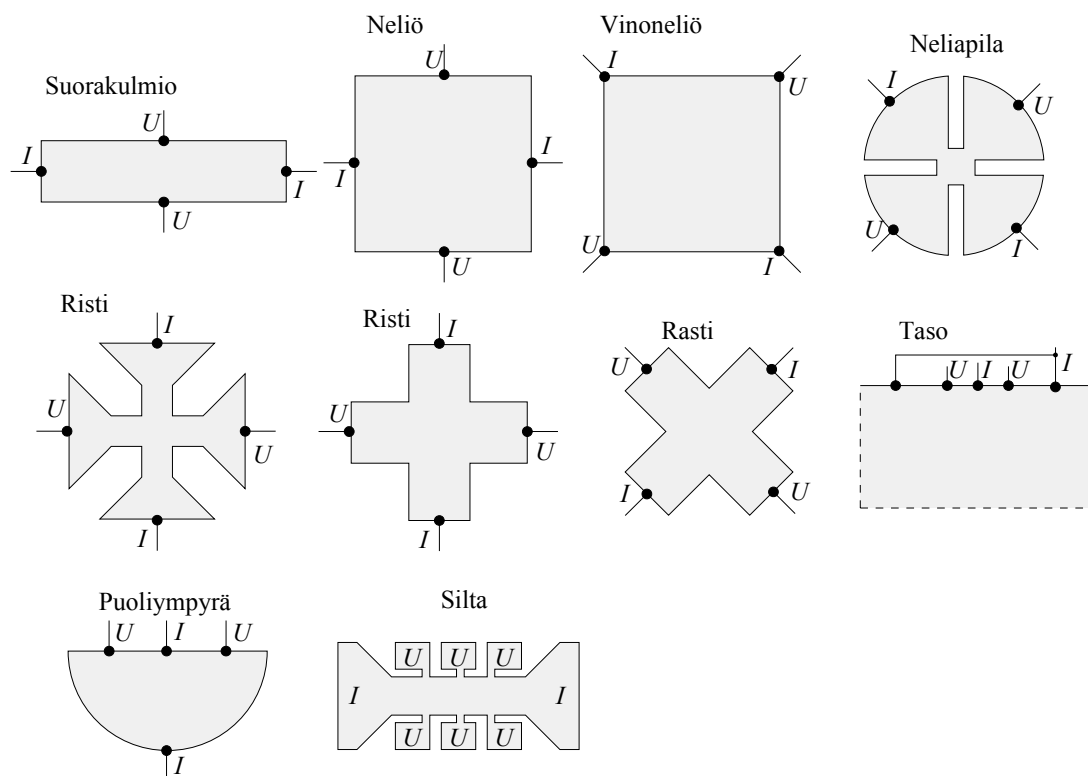
Virranmittausanturi tulee kolmivaiheiseen taajuusmuuttajakäyttöön, jossa kulkee suuria virtoja suurilla taajuuksilla. Tässä diplomityössä suunniteltavan virranmittausanturin haluttuja ominaisuuksia ovat luotettavuus, tarkkuus, pieni koko, helppo kalibroituavuus sekä kustannustehokkuus. Lisäksi virranmittausanturin tulisi perustua ASIC-piiriin eli sen tulisi olla valmistettavissa CMOS-prosessilla. Anturin tulisi kyetä mittaamaan virtoja jatkuva-aikaisesti noin 100 A:iin asti taajuuksilla 0–100 kHz. Tarkkuuden tulisi tavoitteen mukaan olla vähintään 1 %, mutta mielusti alle sen etenkin pienillä virroilla. Lisäksi häiriösietoisuuden tulisi olla hyvä, sillä taajuusmuuttajissa on paljon häiriölähteitä johtuen suurista virroista ja taajuuksista.

Valitaan esimerkkilaitteeksi ABB ACS 601-0030-5 -taajuusmuuttaja. Kyseisen taajuusmuuttajan kolmivaihelähdön alumiinikaapeleiden halkaisija on 4 mm. Laitteen nimellisvirta on 41 A ja hetkellinen maksimikuormitusvirta 62 A. Edellä mainitut ovat virran tehollisarvoja, joten hetkellinen huippuarvo voi siis olla vieläkin suurempi. ABB:n ACx 601 -sarja sisältää kuitenkin useita taajuusmuuttajia, joiden nimellisvirrat vaihtelevat mallista riippuen 7,6–178 A:n välillä ja hetkelliset maksimikuormitusvirrat 9–294 A:n välillä. Taajuusmuuttajien tiedot ovat esitelty tarkemmin valmistajan omassa ohjekirjassa [24]. Näillä tiedoilla voidaan arvioida mitattavan virran suuruutta. Kuvassa 2.2 on esitetty erisuuruisten virtojen aiheuttamat magneettivuontiheydet eri etäisyyksillä johtimesta, kun väliaineena on ilma. Kuvasta voidaan päätellä, että taajuusmuuttajien synnyttämät magneettivuontiheydet

ovat noin milliteslan – milliteslan kymmenesosien suuruusluokkaa riippuen mitattavasta virrasta ja etäisyydestä johtimeen.

## 4.2 Hall-elementin suunnittelu

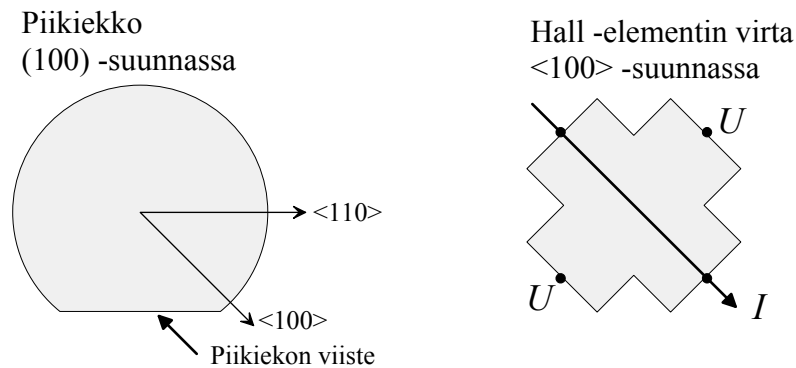
Hall-elementin rakenne perustuu puolijohdelaataan, jonka läpi kulkee virta, ja jonka sivujen yli mitataan jännitettä. Jännite muuttuu ulkoisen magneettikentän mukaisesti yhtälössä (2.7) esitetyn Lorentzin voiman vaikutuksesta. Piilaatta on helppo valmistaa CMOS-prosessilla piikiekolle, joten valmistustekniikka ei tuota ongelmia. Piilaatan dimensiot riippuvat melko paljon käytettävien magnetokonsentraattoreiden muodosta ja koosta, mutta useimmiten pituus on huomattavasti suurempi kuin leveys, jotta varauksenkuljettajat ehtivät kerääntyä laatan reunoille. Yleisimmissä rakenteissa pituus on 2–5 kertaa suurempi kuin leveys. Perinteinen rakenne on suorakulmainen laatta, mutta esimerkiksi neliö-, risti- ja apilarakennetta käytetään laajalti. Erilaisia Hall-elementin rakenteita on esitetty kuvassa 4.1, jossa  $I$ -kontaktien välillä kulkee esivirta ja  $U$ -kontaktien väliltä mitataan Hall-jännitettä.



Kuva 4.1. Erilaisia vaihtoehtoisia rakenteita Hall-elementille.



Useimmiten CMOS-teknologian käyttämien piikiekkojen kidetaso on suunnassa (100). On tutkittu, että kidetason suunnasta johtuen on häviöiden minimoimiseksi sijoittaa kontaktit puolijohdelaatan kulmiin siten, että esivirta kulkee Hall-elementin läpi suunnassa  $\langle 100 \rangle$ , jolloin pietsoresistiiviset vaikutukset ovat minimissään n-tyypin altaaseen muodostetulle Hall-elementille, [16]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että virta kulkee suunnassa, joka on  $45^\circ$ :een kulmassa kiekossa olevaan viisteeseen nähden kuvan 4.2 mukaisesti.



Kuva 4.2. Piikiekkon kidetason suunnan vaikutus Hall-elementin suuntaan.

Hall-elementin tulee olla myös erittäin ohut; paksuuden tulee olla huomattavasti pienempi kuin elementin pituuden. Tyypillinen paksuus Hall-elementeissä vaihtelee välillä  $0,1-2 \mu\text{m}$ . Hall-jännite voidaan esittää muodossa

$$U_H = \frac{IB}{ned}, \quad (4.1)$$

jossa  $U_H$  on Hall-jännite,  $I$  on elementin läpi kulkeva esivirta,  $B$  on elementtiä vastaan kohtisuorassa olevan magneettivuontiheyden komponentti,  $n$  on varaustenkuljettajien tiheys,  $e$  on elektronin varaus ja  $d$  on elementin paksuus. Yhtälöstä (4.1) on helposti huomattavissa anturin paksuuden vaikutus Hall-jännitteen suuruuteen. [25], [27], [28].

Materiaalivalintaan vaikuttaa sekä herkkyys että kustannukset. Myös mitattavan virran taajuudella on merkitystä. Tunnetusti piillä taajuuskäyttäytyminen ei ole kovin hyvä erittäin suurilla taajuuksilla, joten suositeltavaa olisi käyttää vaihtoehtoisia puolijohdelaattoja. Taajuuskäyttäytymiseltään ja herkkyydeltään parempia puolijohdelaattoja ovat esimerkiksi GaAs-,

InSb- tai InAs-puolijohdeet, sillä niissä on varauksenkuljettajien liikkuvuus huomattavasti suurempi kuin piillä. InSb:stä valmistettua Hall-elementtiä on käsitelty artikkelissa [29] ja GaAs:sta valmistettua Hall-elementtiä artikkelissa [30]. Ongelmana on kuitenkin valmistustekniikka, joka on vaikeampi ja kalliimpi kuin piillä käytetty CMOS-prosessi, joten kustannustehokkuuden säilyttämiseksi olisi tässä työssä tärkeää suunnitella piistä valmistettu Hall-elementti. CMOS-prosessi mahdollistaa myös sen, että samassa prosessissa voidaan valmistaa tarvittavia oheiskomponentteja samalle sirulle. Lisäksi täytyy ottaa huomioon, että piistä valmistetun Hall-anturin taajuusominaisuudet riittävät suunniteltua käyttökohdetta varten.

### **4.3 Magnetokonsentraattorien suunnittelu**

Magnetokonsentraattoreiden tehtävänä on ohjata magneettivuo paikallisesti piirillä oleville Hall-elementeille. Tästä johtuen niiden täytyy mahtua piirin päälle ja muodon tulee olla sellainen, että voimakkain magneettivuon pintaa vastaan kohtisuora komponentti ohjautuu oikeaan paikkaan. Magnetokonsentraattorien välissä tulee olla kapea ilmaväli, jotta magneettivuo käyttäytyy halutusti, kuten kuvassa 3.4 on esitetty. Itse magnetokonsentraattoreiden tulee olla levymäisiä ja ferromagneettisesta materiaalista valmistettuja, jotta ne keräävät vuon itseensä. Magnetokonsentraattorien suunnittelua on käsitelty artikkelissa [9], väitöskirjassa [16] sekä artikkeleissa [17] ja [31] - [34].

#### **4.3.1 Koko**

Magnetokonsentraattorien koko määräytyy hyvin pitkälti sen piisirun mukaisesti, jonka päälle ne sijoitetaan. Piisirujen valmistuksessa koko vaikuttaa hyvin pitkälti hintaan, sillä koko määrittelee sen, kuinka monta sirua saadaan yhdestä kiekosta. Ja koska kustannustehokkuudella on merkitystä tässä työssä, on oletettava, että piisirun koko on optimoitu tarkasti. Piisirut ovat edullisimmillaan, kun niiden pinta-ala on noin  $2 \text{ mm}^2$ , jolloin pituus on noin 2 mm ja leveys noin 1 mm ja siksi se on myös keskimääräinen sirukoko, kuten väitöskirjassa [16] on todettu. Nämä dimensiot määrittelevät myös magnetokonsentraattorien yhteenlasketun maksimikoon. Ja koska magnetokonsentraattoreita on kaksi ja niiden välissä on ilmaväli, on vastaavasti yhden magnetokonsentraattorin pituus maksimissaan noin 1 mm. Leveys voi tässä tapauksessa olla maksimissaan noin 1 mm eli sirun reunasta reunaan.

Levyäisen magnetokonsentraattorin korkeus ja ilmavälin pituus vaikuttavat magneettiseen vahvistukseen siten, että vahvistus on suurin niiden ollessa yhtä suuret, [16]. Koska esimerkiksi Vacuumschmelze valmistaa magnetokonsentraattoreiksi sopivia magneettisesti pehmeitä materiaaleja noin 20  $\mu\text{m}$ :n paksuisina nauhoina, voidaan suunnittelussa käyttää sekä paksuuden että ilmavälin pituuden arviona lukua 20–25  $\mu\text{m}$ , [22]. Magneettista vahvistusta voidaan edelleen suurentaa kasvattamalla magnetokonsentraattorien pituutta ilmavälin pituuden suhteen, mutta samalla myös lineaarinen toiminta-alue pienenee, [16]. Magnetokonsentraattorien pituus on siis kompromissi vahvistuksen ja lineaarisen toiminta-alueen suhteen.

### 4.3.2 Materiaali

Materiaalivalinta perustuu kustannuksiin, mittaustarkkuuteen ja haluttuihin ominaisuuksiin. Materiaalin tulee olla ferromagneettista, jotta se kerää vuon itseensä tarpeeksi voimakkaasti. Ferromagneettisen materiaalin ominaisuuksiin vaikuttavat eniten sen suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r$ , kyllästysvuontiheys  $B_{\text{sat}}$  sekä koersiivivoima  $H_c$ . Magneettikenttä, joka aiheuttaa ferromagneettisen materiaalin ajautumisen kyllästykseseen on esitetty yhtälössä

$$H_{\text{sat}} = H_c + \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_0 \mu_{\text{näenn}}}, \quad (4.2)$$

jossa  $H_{\text{sat}}$  on kyllästyskentänvoimakkuus ja  $\mu_{\text{näenn}}$  on näennäinen permeabiliteetti, joka riippuu materiaalin muodosta, [16]. Muodon vaikutus perustuu siihen, että ulkoisen kentän synnyttämä magnetoituma  $\mathbf{M}$  ferromagneettisessa aineessa muodostaa materiaaliin vastakaissuuntaisen demagnetoivan kentän  $\mathbf{H}_d$ , joka heikentää materiaalin permeabiliteettiä. Demagnetoivan kentän voimakkuus riippuu taas materiaalin muodosta, jolloin muodon vaikutusta varten voidaan määritellä niin sanottu muotokerroin  $N_m$ , jonka arvo vaihtelee 0 ja 1 välillä. Muotokerroin olisi lähellä nollaa, mikäli ferromagneettisessa kappaleessa ei olisi ilmaväliä. Voidaan karkeasti todeta, että lyhyillä ja leveillä magnetokonsentraattoreilla muotokerroin on suurempi kuin pitkillä ja kapeilla. Nyt näennäinen permeabiliteetti voidaan esittää yhtälöllä

$$\mu_{\text{näenn}} = \frac{\mu_r}{1 + N_m(\mu_r - 1)}, \quad (4.3)$$

josta on nähtävissä, että  $\mu_{\text{näenn}} = \mu_r$ , kun  $N_m = 0$  ja toisaalta  $\mu_{\text{näenn}} = 1$ , kun  $N_m = 1$ . Erot näennäisessä permeabiliteetissa voivat olla siis hyvin suuria materiaalin muotokertoimesta riippuen, [16]. Yhtälö (4.3) voidaan yksinkertaistaa muotoon

$$\mu_{\text{näenn}} \cong \frac{1}{N_m}, \quad (4.4)$$

kun permeabiliteetti on suuri, ja muotoon

$$\mu_{\text{näenn}} \cong \mu_r, \quad (4.5)$$

kun permeabiliteetti on hyvin pieni.

Häviöiden minimoimiseksi materiaalissa tulisi olla pieni koersiivivoima, jotta remanenssi-  
vuo  $B_{\text{rem}}$  ei kasvaisi liikaa, [16]. Koersiivivoiman vaikutusta remanenssivuohon on esitetty  
yhtälössä

$$B_{\text{rem}} = \mu_0 \mu_{\text{näenn}} H_c, \quad (4.6)$$

josta on nähtävissä myös näennäisen permeabiliteetin vaikutus remanenssivuohon [16].

Lisäksi täytyy kiinnittää huomiota materiaalin kyllästysvuontiheyteen, joka kertoo kuinka  
suuressa magneettikentässä materiaalin kaikki magneettiset alueet ovat yhdensuuntaisia eli  
materiaali on kyllästynyt. Tästä johtuen sillä on suuri merkitys anturin lineaariseen toiminta-  
alueeseen. Nyt ulkoiselle magneettivuontiheydelle, joka aiheuttaa magnetokonsentraat-  
toreiden kyllästymisen, voidaan kirjoittaa yhtälöiden (2.2) ja (4.2) avulla yhtälö

$$B_{\text{sat,ulk}} = \mu_0 \mu_r H_{\text{sat}} = \mu_0 \mu_r H_c + \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_{\text{näenn}}}, \quad (4.7)$$

jossa  $B_{\text{sat,ulk}}$  on ulkoinen magneettivuontiheys eli kyllästysvuontiheys ja  $\mu_r$  on ilmalle 1. Koersiivivoima voidaan jättää huomiotta, sillä se on hyvin paljon pienempi kuin kyllästyskentänvoimakkuus, jolloin yhtälöksi saadaan

$$B_{\text{sat,ulk}} = \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_{\text{näenn}}} . \quad (4.8)$$

Ferromagneettisilla materiaaleilla kyllästysvuontiheys  $B_{\text{sat}}$  vaihtelee noin 0,5...2,5 T:n välillä, mutta suurin osa materiaaleista jää 0,5...1,8 T:n välille. Kyllästysvuontiheyden ja ulkoisen saturaatiovuontiheyden vaikutusta näennäiseen permeabiliteettiin on esitetty taulukossa 4.1.

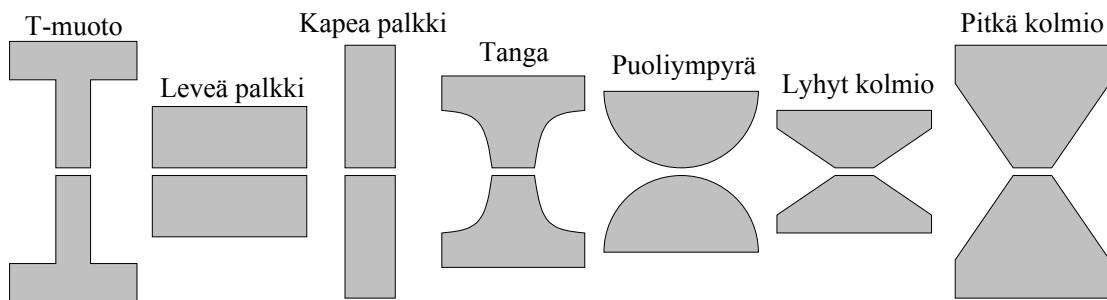
Taulukko 4.1. Materiaalin kyllästysvuontiheyden  $B_{\text{sat}}$  ja ulkoisen kyllästysvuontiheyden  $B_{\text{sat,ulk}}$  vaikutus ferromagneettisen materiaalin näennäiseen permeabiliteettiin.

$B_{\text{sat,ulk}} \backslash B_{\text{sat}}$	0,01 mT	0,05 mT	0,1 mT	0,5 mT	1,0 mT	5,0 mT	10,0 mT	15,0 mT
0,5 T	50000	10000	5000	1000	500	100	50	33,33
1,0 T	100000	20000	10000	2000	1000	200	100	66,66
1,8 T	180000	36000	18000	3600	1800	360	180	120

Taulukosta 4.1 on nähtävissä, että materiaalin näennäisen permeabiliteetin täytyy olla hieinan suuremmilla ulkoisen magneettivuontiheyden voimakkuuksilla jopa yllättävän pieni. Näennäinen permeabiliteetti riippuu siis muodosta, jota muotokerroin kuvaa, ja sen on todettu olevan lähes riippumaton materiaalin suhteellisesta permeabiliteetista, [16]. On siis tärkeämpää valita materiaali, jolla on mahdollisimman suuri kyllästysvuontiheys ja pieni koersiivivoima kuin korkea permeabiliteetti. Tässä työssä valittiin materiaaliksi Vacuum-schmelzen Vitrovac 6150F, jonka suhteellinen alkupermeabiliteetti on  $\mu_r = 2000$ , koersiivivoima  $H_c = 0,8$  A/m sekä kyllästysvuontiheys  $B_{\text{sat}} = 1,0$  T. Lisäksi kyseistä materiaalia on mahdollista saada noin 25  $\mu\text{m}$ :n paksuisina liuskoina, jotka sopivat käyttötarkoitukseen erinomaisesti. Valitun Vitrovac 6150F -materiaalin hystereesikäyrä on esitetty liitteen II kuvassa II.1.

### 4.3.3 Muoto

Magnetokonsentraattorit voivat olla monen muotoisia. Yksi tärkeimpiä vaatimuksia on, että konsentraattorit ovat keskenään samanmuotoisia, jotta magneettikenttä käyttäytyisi mahdollisimman symmetrisesti ilmapälin ympärillä. Toinen tärkeä ominaisuus on, että magnetokonsentraattorit pysyisivät joko tasamittaisina tai kapenisivat ilmapäliä kohti mentäessä, jotta vuo keskittyisi nimenomaan ilmapälin kohdalle. Lisäksi täytyy huomata, että kapeimman kohdan leveyden tulisi olla sen suuruinen, että sen alle mahtuu joko yksi tai kaksi suunnitellun kokoista Hall-elementtiä. Suositeltavia muotoja ovat kolmiomalliset rakenteet, joista on leikattu kulmat tasapäisiksi sekä kahdeksankulmiot, suorakulmiot, puolipyörät ja niin sanottu tanga-muoto. Kuvassa 4.3 on esitelty erilaisia magnetokonsentraattoreiden muotoja.



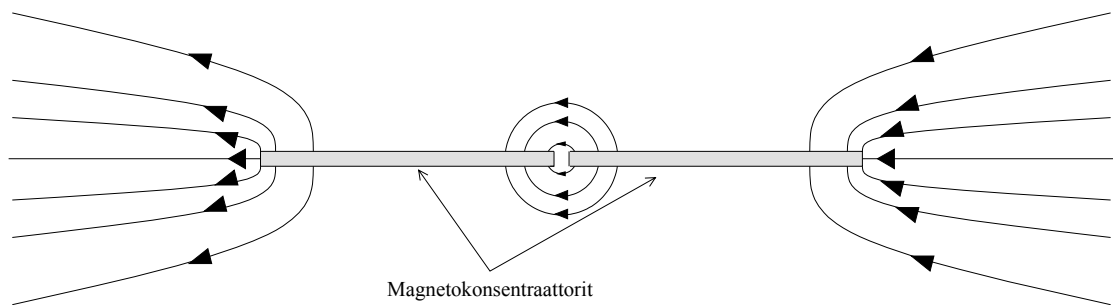
Kuva 4.3. Erilaisia muotoja magnetokonsentraattoreille.

Muoto vaikuttaa muotokertoimeen, joka osaltaan vaikuttaa näennäiseen permeabiliteettiin yhtälön (4.3) mukaisesti. Kuten taulukosta 4.1 on nähtävissä, näennäisen permeabiliteetin maksimiarvoksi saadaan  $\mu_{\text{näenn}} = 120$ , mikäli käyttökohteen mitta-alue on  $-15 \dots 15$  mT ja materiaalin kyllästysvuontiheys on 1 T. On tutkittu, että näennäinen permeabiliteetti voi jäädä hieman samankaltaisilla rakenteilla arvoon  $\mu_{\text{näenn}} < 100$ , joten laskettu maksimitulos on realistinen [16]. Tällöin muotovakioksi saadaan yhtälön (4.3) avulla  $N_m = 0,0083$ .

## 4.4 Rakenteiden yhdistäminen

Hall-elementin ja magnetokonsentraattorien yhdistäminen samalle piirille onnistuu nykyisillä valmistusmenetelmillä melko helposti. Yhdistämisessä tärkeitä huomioitavia tekijöitä ovat Hall-elementin etäisyys magnetokonsentraattoreista korkeussuunnassa ja Hall-elementtien lukumäärä sekä sijainti magnetokonsentraattoreiden alla.

Symmetriasyistä on järkevää sijoittaa Hall-elementit mahdollisimman keskelle piiriä, jotta magnetokonsentraattoreista saadaan tarvittaessa niin suuret kuin on piirin dimensioista riippuen mahdollista. Kuten yhtälöstä (2.5) huomattiin, magneettivuontiheys on kääntäen verrannollinen sen etäisyyteen magneettikentän synnyttävästä virtajohtimesta. Tämä etäisyyden funktiona pienenevä magneettivuontiheys pätee myös magnetokonsentraattoreille, joten Hall-elementtien tulisi olla mahdollisimman lähellä magnetokonsentraattoreita piirin korkeussuunnassa. Hall-elementtejä kannattaa käyttää pareina, sillä kytkemällä ne rinnan kumotaan iso osa offset-häiriöistä. Tällöin elementtejä voi sijoittaa magnetokonsentraattorien alle 2 tai 4 kappaletta niiden koosta ja konsentraattorien kärkien leveydestä riippuen. Tutkitaan hieman tarkemmin jo kuvassa 3.4 esitettyä magneettivuon käytöstä magnetokonsentraattorien ilmvälissä. Tilanne on esitetty selkeämmin kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Ulkoisen magneettikentän synnyttämän magneettivuon vuoviivojen kulku magnetokonsentraattoreiden ympäristössä.

Kuvasta 4.4 on nähtävissä, miten ulkoinen vuo saapuu konsentraattoreille, hyppää ilmvälin yli ja poistuu konsentraattoreista. On suunniteltu, että Hall-elementit tulevat konsentraattoreiden alle olevalle sirulle, jolloin niiden tulee olla ilmvälin molemmiin puolin magnetokonsentraattorien kärkien alla. Toisaalta kuvasta 4.4 on myös nähtävissä, että magneettivuon suunta ei ole sama eri puolilla ilmväliä. Tämä täytyy ottaa huomioon Hall-antureiden sijoittelussa sekä kytkennöissä, sillä Hall-jännite on erimerkkinen Hall-elementeillä, jotka ovat vastakkaisilla puolilla ilmväliä.

Ferromagneettiset magnetokonsentraattorit on mahdollista saada levyille muutamalla eri menetelmällä. Yksi menetelmä on käyttää elektrolyysiä metallikerroksen kasvattamiseksi, mutta elektrolyysillä muodostettujen materiaalien magneettiset ominaisuudet eivät ole riit-

täviä tämän työn kannalta. Toinen menetelmä on sputteroida eli pommittaa metalli-ioneja piirin pinnalle magnetokonsentraattorien muodostamiseksi, mutta tämäkään menetelmä ei sovellu käyttötarkoitukseen, sillä sputteroidut amorfiset metallikerrokset ovat usein vain 1 µm paksuisia. Niin ohut kalvo ei mahdollista riittävän suuren magneettivuon kulkemista magnetokonsentraattoreissa. Kolmas vaihtoehto on sekoittaa ferromagneettisia metallihiukkasia epoksihartsiin ja levittää se kiekon pinnalle, jonka jälkeen se muokataan fotolitografian avulla haluttuun muotoon. Kyseisellä menetelmällä ei kuitenkaan materiaalista johtuen saada konsentraattoreille haluttuja magneettisia ominaisuuksia. Menetelmistä viimeinen on ferromagneettisen liuskan liimaaminen piirin pinnalle, mikä mahdollistaa sekä halutun materiaalin valinnan että halutun paksuuden materiaalille. Liimakerroksen paksuus on hyvin pieni, noin mikrometrin paksuinen, joten se ei kasvata konsentraattorien etäisyyttä Hall-elementeistä liikaa. Lisäksi menetelmää voidaan käyttää jo valmiille yksittäisille siruille sekä useita siruja sisältäville piikiekoille. Piikiekoille on mahdollista liimata koko kiekon mittainen levy ferromagneettista ainetta, jonka jälkeen se syövytetään fotolitografian ja kemiallisen etsauksen avulla halutun muotoisiksi magnetokonsentraattoreiksi jokaiselle kiekolla olevalle sirulle. Tällainen prosessi pienentää tuntuvasti kustannuksia laajamittaisessa anturivalmistuksessa. On huomattava, että etenkin prototyyppivaiheessa olisi tärkeää saada magnetokonsentraattorit muodostettua myös yksittäisten piirien päälle testusta varten. Ja koska liimaaminen on toimiva ratkaisu sekä piikiekoille että yksittäisille piireille, on se hyvä valinta magnetokonsentraattoreiden integrointimenetelmäksi.



## 5 SUUNNITELLUN ANTURIN SIMULOINTI

Kuten suunnitteluvaiheessa on osoitettu, ei suorien laskelmien kautta saada tarkkoja tietoja anturin eri ominaisuuksista ja mitoista. Suunnittelemalla saadaan suuntaa antavia raja-arvoja, joita on hyvä testata tarkemmin simulaation keinoin. Tässä luvussa käydään läpi simuloinnin tavoitteet, ohjelmisto, simuloitun rakenteen kuvaus, mittausten menetelmät, ohjelmiston aiheuttamat epäideaalisuudet tuloksissa sekä lopulta itse simulaatiotulokset.

### 5.1 Simuloinnin tavoitteet

Simuloinnilla on tarkoitus osoittaa miten magnetokonsentraattorien muodon, materiaalin, koon ja etäisyyksien muuttaminen vaikuttaa Hall-elementeillä aistittavaan magneettivuontiheyteen ja siten mitattuun Hall-jännitteeseen. Näitä tuloksia voidaan sitten käyttää apuna Hall-anturin suunnittelussa ja haluttujen ominaisuuksien saavuttamisessa. Lisäksi tarkoitus on tutkia simulointiohjelmiston ja -laitteiston ominaisuuksia ja sitä, miten ne vaikuttavat simulointituloksien tarkkuuteen ja luotettavuuteen.

### 5.2 Simulointiohjelmisto

Sähkömagneettisten ilmiöiden mallintamiseen löytyy muutamia ohjelmistoja, joista tärkeimmät lienevät Flux3D ja Comsol 3.3. Molempien ohjelmistojen ominaisuudet riittävät halutun kaltaisen rakenteen mallintamiseen, joten valinta on lähinnä mielipidekysymys. Lukuisten suositusten jälkeen tässä työssä päädyttiin käyttämään simulointiohjelmaa Comsol Multiphysics 3.2b, joka oli päätöshetkellä ohjelmiston uusin versio.

Comsol Multiphysics on osittaisdifferentiaaliyhtälöihin perustuva interaktiivinen ohjelmisto erilaisten tieteellisten ja teknisten ongelmien ratkaisemiseen ja mallintamiseen. Sen etuna on yhdenlaisen tekijän mallintamisen laajentaminen monen erilaisen tekijän yhteisvaikutuksen mallintamiseksi. Ohjelmistolla voidaan esimerkiksi aluksi selvittää, miten suuri- ja alijännitevirta jakautuu johtimessa ja sen jälkeen lisätä siihen lämpötilavaikutukset ja tutkia, miten se vaikuttaa jo kerran mallinnettuun virran jakautumiseen. Tähän voitaisiin vielä lisätä jokin ulkoinen häiriölähde, kuten voimakas magneettikenttä, ja tutkia näiden kaikkien vaikutusta samanaikaisesti. Ohjelmisto perustuu, kuten Flux3D, FEM (Finite Element

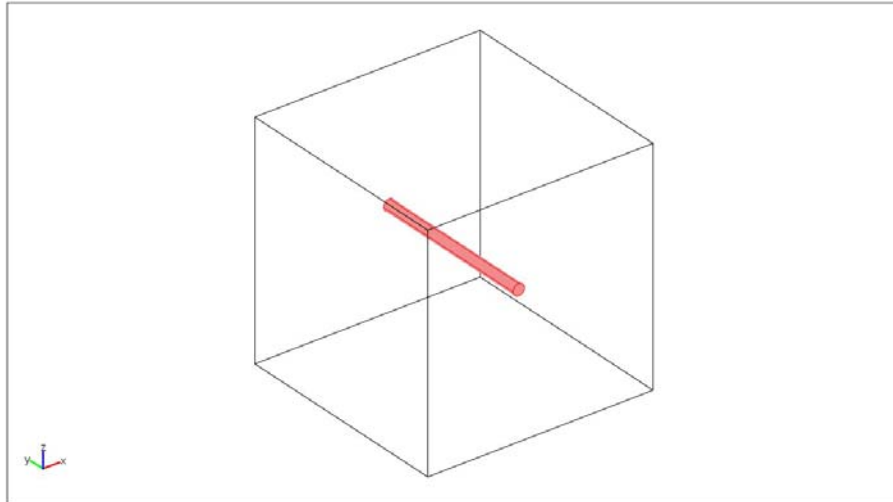
Method) -mallinnukseen eli äärellisten elementtien menetelmään pohjautuvaan mallinnukseen. Ohjelmassa on toimiva graafinen käyttöliittymä sekä valmiita malleja, joiden avulla erilaisten ongelmien ratkaisu on tehty helpoksi. Ohjelmassa on toki mahdollisuus vielä erikseen kirjoittaa omat osittaisdifferentiaaliyhtälöt, mikäli ohjelmasta itsestään ei löydy oikeanlaisia yhtälöitä. Ohjelma mahdollistaa myös kolmiulotteisten rakenteiden mallintamisen, joka on ehdottoman tärkeää tämän diplomityön osalta. Ohjelmiston ominaisuuksia on esitelty internetsivulla [36].

### 5.3 Simuloinnissa käytetyn rakenteen kuvaus

Aluksi ohjelmaan täytyy määritellä simulointeja varten jonkinlaiset ulkorajat eli määritelty alue, jonka sisällä kaikki simuloinnit toteutetaan. Alueen kokoon vaikuttaa suunniteltujen rakenteiden koko sekä simuloinnissa käytetty tietokone, sillä mitä tehokkaampi tietokone on käytössä simulointeja varten, sitä suurempi voi mitattava rakenne olla. Simulaatioita varten on käytettävissä vain kannettava tietokone, joten hyvin raskaita simulaatioita sillä ei voida toteuttaa. Simuloitavan alueen dimensioita sopivasti pienentämällä saadaan simulaatiot suoritettua ja tulokset riittävän tarkoiksi. Dimensioita valitessa tarkastellaan myös esimerkkilaitteena toimivaa taajuusmuuttajaa ABB ACS 601-003-05, [24]. Kyseisessä taajuusmuuttajassa on kolmivaihelähtö eli kolme mitattavaa virtaa, mutta simuloinnit tehdään vain 1 vaiheen osalta, jotta ne eivät muuttuisi liian raskaiksi dimensioiden kasvaessa.

Määritellään siis aluksi kuutio, jonka sivujen pituudeksi valitaan 80 mm. Kuution materiaaliksi valitaan ilma (1 atm). Tämän kuution sisälle rakennetaan työssä simuloitava rakenne eli johdin, jossa virta kulkee sekä magnetokonsentraattorit, jotka ohjaavat magneettivuota. Johtimen pituudeksi valitaan 60 mm, joka lyhydestään johtuen mahtuu hyvin määritellyn kuution sisälle. Lyhyestä johtimesta ei kuitenkaan ole haittaa mittauksissa, sillä taajuusmuuttajan sisällä kolmivaihelähdössä tuskin on yli 60 mm:n matkalta suoraan kulkevia kaapeleita, vaan ne ovat mutkalla lähes koko pituudeltaan. Toisaalta virranmittausanturiin vaikuttaa suuremmalti osin vain se osa kaapelista, joka on suoraan anturin päällä. Esimerkkilaitteen ABB ACS 601-003-05 lähdeissä on käytetty pyöreätä alumiinijohdinta, jonka halkaisija on 4 mm, [24]. Näitä ominaisuuksia käytetään myös simuloinnissa kuvaamaan mitattavaa johdinta. Kolmiulotteinen malli simuloitavasta rakenteesta ilman

magnetokonsentraattoreita on esitetty kuvassa 5.1, jossa johdin on maalattu havainnollisuuden vuoksi punaiseksi.



Kuva 5.1. Simuloinnissa käytetty rakenne ilman magnetokonsentraattoreita. Kuution sivun pituus on 80 mm ja johtimen pituus 60 mm.

Magnetokonsentraattorien etäisyydeksi johtimen keskipisteestä valitaan 6 mm, joka on tarkoituksella hyvin pieni kahdesta eri syystä. Ensinnäkin tällöin havaittava magneettivuontiheys pysyy hyvin suurena jokaisella kuvan 2.2 virroista, koska on häiriöllisesti edullisempaa sijoittaa epäherkkä anturi mahdollisimman lähelle mitattavaa kohdetta, kuin herkkä anturi kauas kohteesta. Yhtälöllä (2.5) voidaan laskea pienin ja suurin aistittava magneettivuontiheys taajuusmuuttajaperheen ACx601 minimivirralla 7,6 A ja maksimivirralla 294 A, jolloin  $B_{\min} = 0,25$  mT sekä  $B_{\max} = 9,8$  mT, [24]. Huomataan, että saatu maksimivuontiheys pysyy selvästi valitun mitta-alueen -15...15 mT sisällä. Toisaalta on oletettavaa, että myös simulointiohjelman tulokset muuttuvat epätarkemmiksi, kun etäisyys johtimeen kasvaa, joten etäisyyden on hyvä olla mahdollisimman pieni. Magnetokonsentraattorien paksuudeksi valitaan 22  $\mu\text{m}$ , joka vastaa hyvin valmiita materiaaleja, joiden paksuus vaihtelee 20–25  $\mu\text{m}$  välillä. Magnetokonsentraattorien suhteelliseksi permeabiliteetiksi asetetaan 10000. Luku on korkeampi kuin valitulla materiaalilla, mutta sillä on vain tarkoitus korostaa simulointiohjelmistolle magnetokonsentraattorien sekä ympäröivän ilman magneettisten ominaisuuksien suurta eroa. Muita magnetokonsentraattorien dimensioita ja

muotoja on tarkoitus vaihdella simuloinnin aikana, joten niille ei määrätä tässä vaiheessa staattista arvoa.

#### **5.4 Simulointimenetelmät**

Simuloinnissa on tarkoitus selvittää eri dimensioiden ja muotojen vaikutusta anturin rakenteessa muuntelemalla niitä yksi kerrallaan ja tutkimalla muutoksen vaikutusta magneettivuontiheydessä. Jotta muutoksien vaikutus selviäisi, tulee simulaatiosta tehdä jonkinlainen kuvaaja tai kuva, jonka avulla muutokset voidaan konkreettisesti nähdä. Koska magnetokonsentraattorien alle tulevat Hall-elementit pystyvät aistimaan vain pystysuoraa magneettivuontiheyden komponenttia, on juuri se valittu tarkkailtavaksi suureeksi.

Pystysuoran magneettivuontiheyden komponentin kuvaaminen ei ole Comsol-ohjelmistolla erityisen selkeätä 3D-tarkasteluna. Tämän vuoksi on helpompi tutkia muutoksia muodostamalla haluttuun kohtaan poikkileikkaustasokuvaaja, joka näyttää halutun vuon komponentin graafisesti. Poikkileikkaustaso on helpointa sijoittaa välittömästi magnetokonsentraattorien alle, jonne Hall-elementitkin sijoitetaan. Lisäksi tason etäisyyttä muuntelemalla voidaan helposti havaita Hall-elementtien ja magnetokonsentraattorien välisen etäisyyden vaikutus aistittavaan magneettivuontiheyteen. Muista mahdollisista kuvaajista ainoastaan vuoviivakuvaaja käytetään havainnollistamaan vuoviivojen jakaumaa sekä muotoa simuloitussa rakenteessa. Esimerkiksi kuvat 3.3 ja 3.4 ovat Comsol-ohjelmistolla tuotettuja vuoviivakuvaajia.

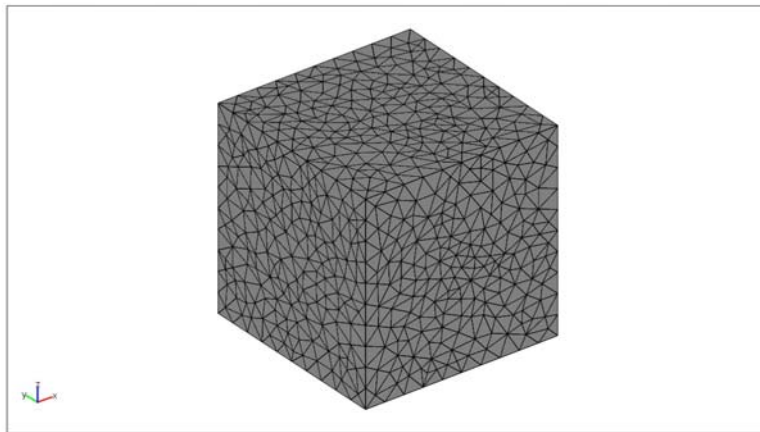
#### **5.5 Simulointiohjelmiston epäideaalisuudet**

Comsol-ohjelmistossa, kuten muissakin simulointiohjelmistoissa, on omat epäideaalisuutensa johtuen muun muassa laskenta-algoritmeista sekä käytetyistä osittaisdifferentiaaliyhtälöistä. Epäideaalisuuksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä ohjelmiston ominaisuuksia, jotka aiheuttavat epätarkkuutta simulointituloksissa. Simulointituloksien epätarkkuutta on syytä tutkia muutamien tekijöiden osalta. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi äärellisten elementtien määrä, simuloitun rakenteen ympärille määritellyn tilan koko, mitattavan virtajohtimen pituus sekä eri ohjelmaversiot.

### 5.5.1 Äärellisten elementtien määrän vaikutus

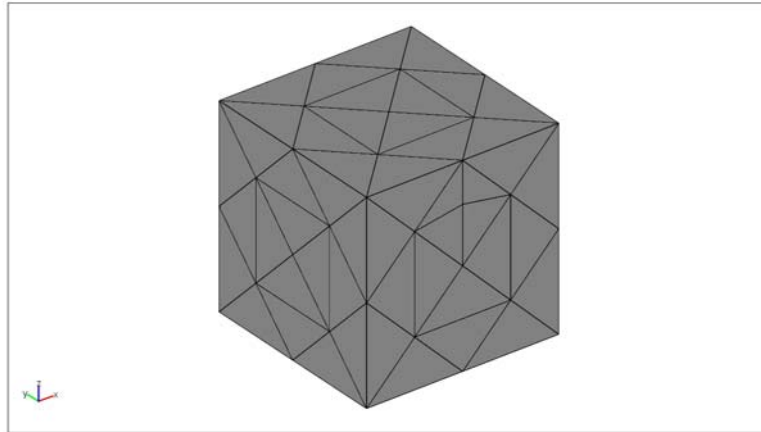
Comsol laskee simulointitulokset äärellisten elementtien menetelmällä (FEM), joka tarkoittaa sitä, että piirretyt rakenteet jaetaan kolmioihin tai tetraedreihin riippuen siitä, onko rakenne 2- vai 3-ulotteinen. Simulointitulokset lasketaan siis erikseen jokaiselle tällaiselle elementille ja näiden elementtien tulokset muodostavat yhdessä koko rakenteen tuloksen. On helppo ymmärtää, että mitä pienempi koko elementillä on, sitä enemmän elementtejä mahtuu rakenteeseen. Tästä voidaan myös päätellä, että mitä enemmän elementtejä rakenteessa on, sitä tarkempi simulointituloks saadaan. Elementtien määrää voi säädellä sekä käsin että automaattiasetuksilla. Erilaisia valmiita asetuksia on 8; asetuksesta ”extra fine” (erittäin hieno) asetukseen ”extremely coarse” (äärimmäisen harva).

Tarkastellaan elementtien määrän vaikutusta simuloituihin tuloksiin kuvassa 5.1 esitetyn kolmiulotteisen mallin avulla. Kun elementtiverkko piirtyy rakenteeseen, hävittää se ulkoreunojen sisäpuolelle jäävät alueet näkyvistä. Ulkoreunoilla on nähtävissä suurimmat elementit ja ne pienenevät automaattisesti lähestyessään sisällä olevia pienempiä rakenteita. Kuvassa 5.2 on esitetty elementtien jakauma kuution ulkopinnalla asetuksilla ”normal”.



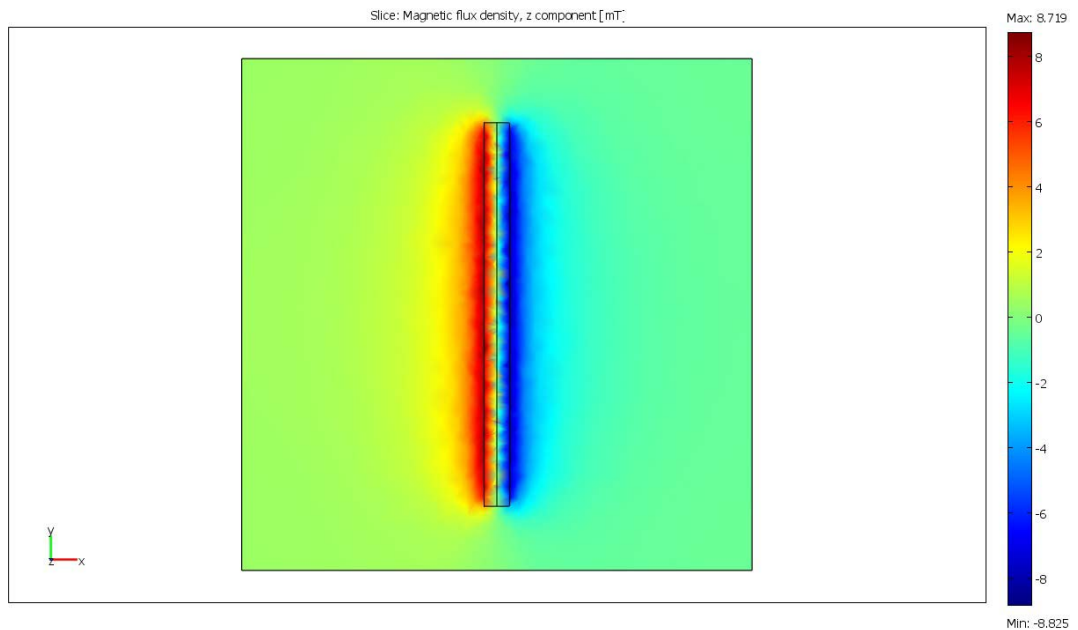
Kuva 5.2. Elementtien jakauma tilakuution ulkopinnalla asetuksella ”normal”.

Asetuksella ”extremely coarse” elementtien määrä pienenee huomattavasti elementtikoon kasvaessa, joka on helposti nähtävissä kuvasta 5.3.



Kuva 5.3. Elementtien jakauma tilakuution ulkopinnalla asetuksella ”extremely coarse”.

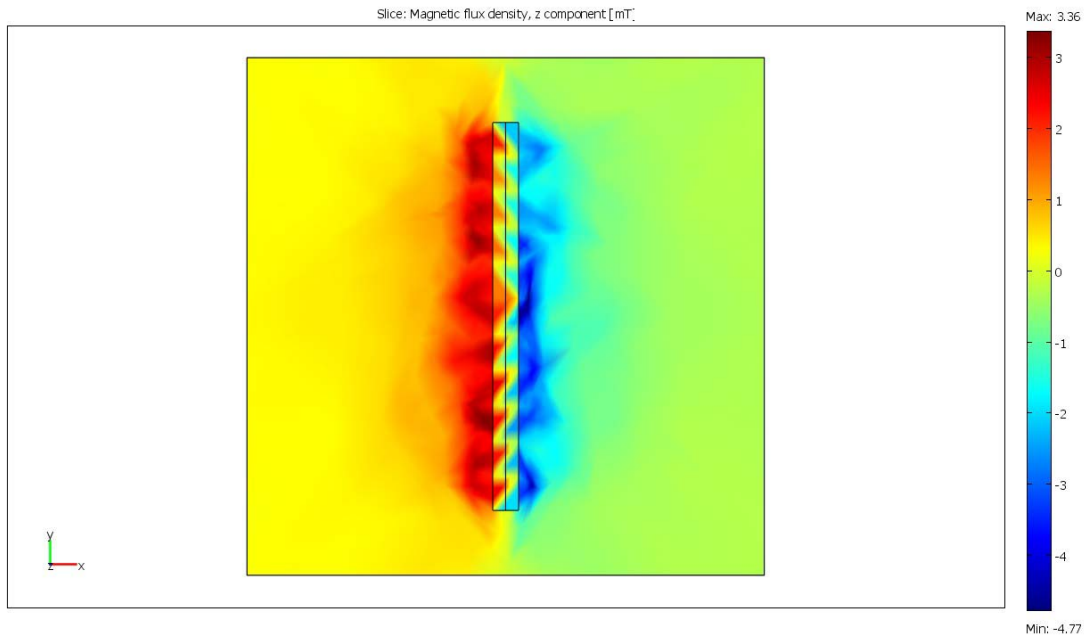
Kuvissa 5.4 ja 5.5 on esitetty johtimen ympärilleen synnyttämä z-akselin suuntainen magneettivuontiheyden komponentti poikkileikkaustason muodossa. Poikkileikkaustaso kulkee yhdensuuntaisesti johtimen kanssa halkaisten johtimen kahteen yhtä suureen osaan.



Kuva 5.4. Elementtiasetuksella ”normal” simuloitu magneettivuontiheyden z-komponentti johtimen pituus-suuntaisessa tasossa.

Kuvista 5.4 ja 5.5 on helppo huomata elementtien määrän vaikutus simulointituloksiin. Asetuksella ”extremely coarse” on vielä selvästi nähtävissä elementtikolmioiden aiheutta-

mat teräväkulmaiset muodot magneettivuontiheyden z-komponentissa, kun taas asetuksella ”normal” on saatu huomattavasti tasaisempi kuvaaja. Kuvan 5.4 simuloinnissa on käytetty yli 37 kertaa suurempaa määrää elementtejä kuin kuvan 5.5 simuloinnissa, joka näkyy myös saadun tuloksen tarkkuudessa.



Kuva 5.5. Elementtiasetuksella ”extremely coarse” simuloitu magneettivuontiheyden z-komponentti johtimen pituussuuntaisessa tasossa.

Kuvien 5.4 ja 5.5 merkittävin ero on simuloitussa maksimivuontiheydessä  $B_{z,max}$ , jonka arvoksi saadaan asetuksella ”extremely coarse” 3,36 mT ja asetuksella ”normal” 8,72 mT. Voidaan päätellä, että elementtiverkon tulisi olla mahdollisimman tiheä simulointia tehtäessä. Simuloinnissa käytetty tietokone kuitenkin aiheuttaa sen, että asetusta ”fine” tai sitä tiheämpiä elementtiverkkoja ei voitu käyttää, sillä tietokoneen muisti ei tällöin riittänyt simuloinnin suorittamiseen. Taulukossa 5.1 on esitetty eri elementtiasetusten, elementtimäärien sekä maksimivuontiheyksien eroja.

Taulukko 5.1. Elementtiasetusten, elementtimäärien sekä simuloitun maksimivuontiheyden välisiä eroja. Simulointiin käytetyn tietokoneen tehot eivät enää riittäneet asetuksilla ”fine” – ”extra fine”.

Elementti- asetus	extremely coarse	extra coarse	coarser	coarse	normal	fine	finer	extra fine
Lukumäärä	889	2207	5471	11024	33135	66056	159589	506969
$B_{z,max}$ [mT]	3,36	5,86	6,06	7,58	8,72	-	-	-

### 5.5.2 Simuloitun rakenteen ympärille määritellyn tilan vaikutus

Simuloitua rakennetta tehtäessä rakenteen ympärille määriteltiin tila, jonka suuruus määräytyi lähinnä valinnan kautta. Tosiasia on kuitenkin se, että mitä suurempi alue rakenteen ympärillä on, sitä enemmän se vaatii simulointiin käytettävältä tietokoneelta suorituskykyä. On siis syytä selvittää, onko pienen tilan käyttämisellä merkitystä tuloksissa. Rakennetta simuloitiin kuutioilla, joiden sivujen pituus oli 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ja 100 mm, ja tätä simulointia varten johtimen pituus pienennettiin 10 mm mittaiseksi. Simuloinneista saadut vuon maksimi- ja minimiarvot osoittivat, ettei ympärille määritellyn tilan koolla ollut selvää vaikutusta simulointituloksiin. Kuutioiden välille syntyi kyllä epälineaarisia eroja, mutta ne johtuivat lähinnä elementtiasetuksen ”extra coarse” aiheuttamista epätarkkuuksista.

### 5.5.3 Mitattavan johtimen pituuden vaikutus simuloitussa rakenteessa

Mitattava johdin voi olla korkeintaan niin pitkä kuin ympärillä olevan kuution sivun pituus, joten tilaa kuvaava kuutio määrää paljolti johtimen pituutta. On kuitenkin hyvä selvittää miten johtimen pituuden muuttaminen suuressa kuutiossa vaikuttaa mitattujen vuontiheyksien maksimi- ja minimiarvoihin. Simuloinnit suoritettiin ympäröivää tilaa kuvaavan kuution sivun pituuden ollessa 80 mm, jolloin johtimen pituutta vaihdeltiin arvojen 20 mm, 40 mm, 60 mm ja 80 mm välillä. Kun johtimen pituus on 80 mm, se rajautuu ympäröivän tilan reunaan. Koska reuna-alueille voi muodostaa omia ehtoja, suoritettiin 80 mm:n pituisella johtimella kaksi simulointia. Toisessa simuloinnissa päät olivat magneettisesti eristettyjä ja toisessa vain sähköisesti eristettyjä. Simulointien jälkeen oli pääteltävissä, että muutokset vuontiheyksissä olivat sen verran epäsäännöllisiä, että johtimen pituuden muuttami-



sella ei todettu olevan merkitystä saatuihin tuloksiin. On todennäköistä, että erot syntyvät elementtiasetuksen aiheuttamista epätarkkuuksista.

#### **5.5.4 Ohjelmaversion vaikutus tuloksiin**

Aivan simulointien loppuvaiheessa ohjelmistosta ilmestyi uusi versio Comsol 3.3, ja lisenssipalvelimen version päivittämisen jälkeen myös simulointiohjelma piti päivittää uuteen, kun vanha lopetti toimintansa. Uutta ohjelmaversiota ei ehditty testaamaan kovin paljoa, mutta lyhyiden testien jälkeen huomattiin, että kaikissa simuloinneissa oli suhteessa yhtä suuri ero ohjelmiston vanhalla versiolla tehtyihin simulaatioihin. Ero oli melko suuri; kaikki tulokset uudella versiolla olivat noin 25 % pienempiä kuin vanhalla versiolla ja ero oli jokaisessa simulaatiossa prosentuaalisesti sama. Erojen syytä ei ehditty tutkimaan, mutta ne eivät vaikuta tuloksien luotettavuuteen, mikäli tuloksia tulkitaan yleisellä tasolla eli arvioidaan enemmän muutoksien suuruutta kuin tarkkoja arvoja. Ohjelmiston uusia ominaisuuksia on esitelty internetsivulla [37].

### **5.6 Simulointitulokset**

Simuloinnit suoritettiin pitkällä aikavälillä ja niistä otettiin talteen useita kymmeniä poikkeileikkauskuvaajia ja vuoviivakuvaajia, ja niistä saaduista tuloksista piirrettiin kaavioita havainnollistamaan eri suureiden muuttamisen vaikutusta simuloimalla saatuihin magneettivuontiheyksiin. Asioita, joita haluttiin simuloimalla tutkia, olivat magnetokonsentraattorien muoto ja koko, magnetokonsentraattorien välissä oleva ilmaväli, Hall -elementtien sijainti ja etäisyys magnetokonsentraattoreista sekä mitattavassa johtimessa kulkevien virtojen synnyttämien vuon arvojen vaikutukset mittaustuloksiin.

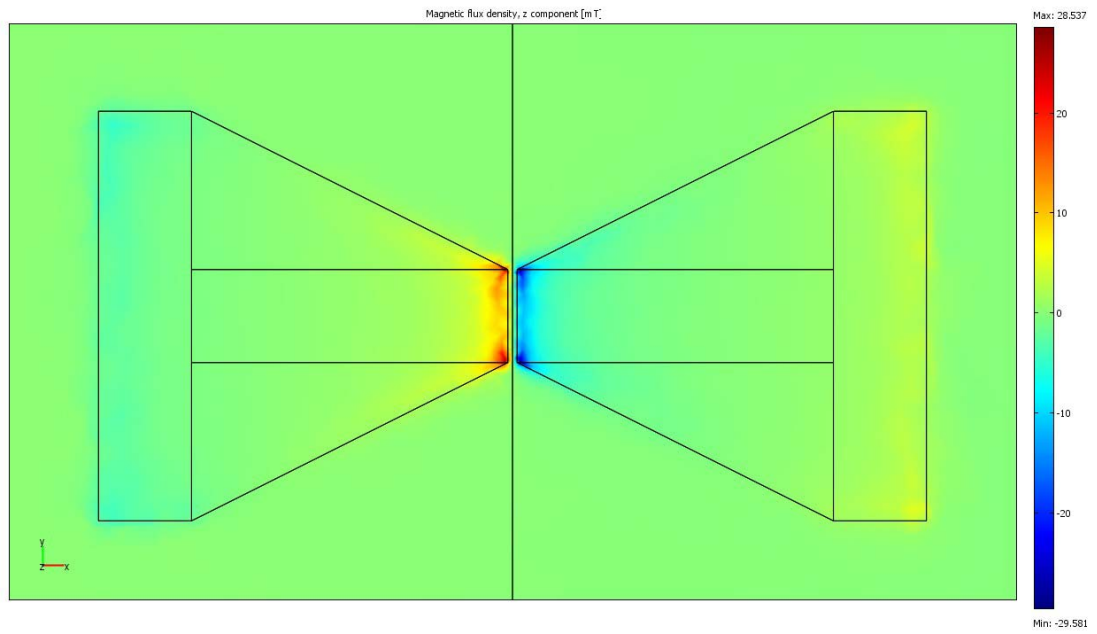
#### **5.6.1 Muoto ja koko**

Magnetokonsentraattorien optimaalista muotoa ja kokoa eri käyttötarkoituksiin on tutkittu paljon ja on huomattu, että muoto on kompromissi magneettisen vahvistuksen sekä lineaarisen toiminta-alueen välillä, [31]. Siinä missä konsentraattorien pituuden kasvattaminen lisää magneettista vahvistusta, se myös samalla kaventaa anturin lineaarista toiminta-aluetta. Piisiru, jolle anturi muodostetaan, asettaa tietyt rajat konsentraattorien koolle, ku-

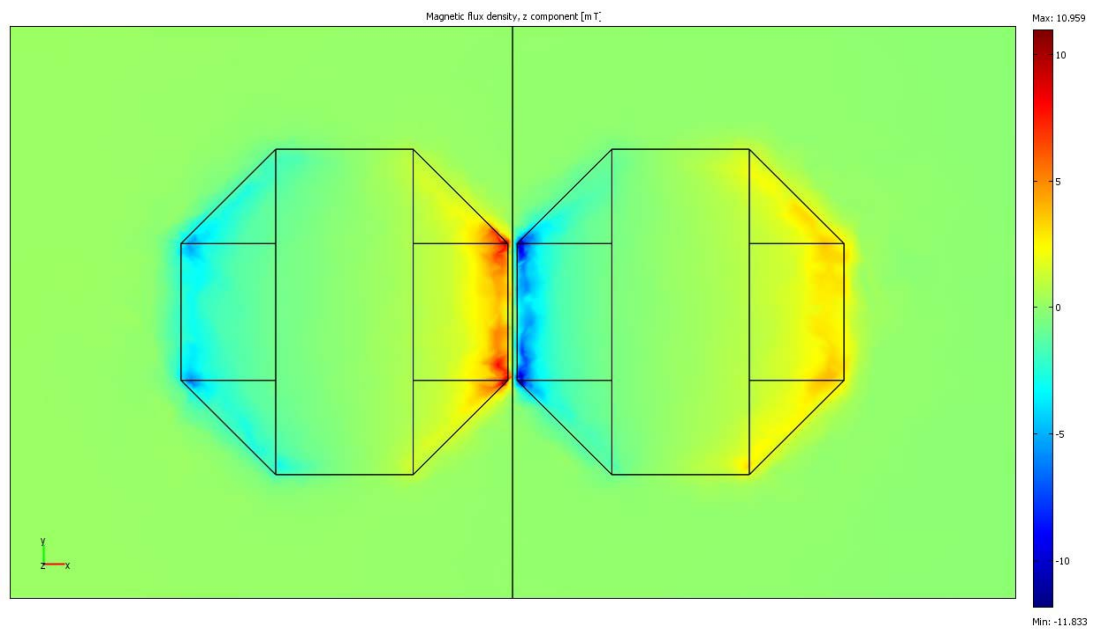
ten aiemmin on todettu. Oletetaan, että sirun pinta-ala on keskimäärin  $2 \text{ mm}^2$ , [16]. Alustava pituus ja leveys ovat valittavissa pinta-alan mukaisesti esimerkiksi  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ .

Paksuuden taas määrittävät valittu materiaali ja paksuudet, joissa sitä on mahdollista saada. On myös todettu, että suurin mahdollinen vahvistus saavutetaan konsentraattorien paksuuden ollessa sama tai lähes sama kuin niiden välinen ilmaväli, [16], [31]. Tämän vuoksi ilmavälin pituuden määrää materiaalin paksuus; tässä tapauksessa 20–25  $\mu\text{m}$ . Ilmavälin pituudeksi valitaan 25  $\mu\text{m}$  ja materiaalin paksuudeksi 22  $\mu\text{m}$ .

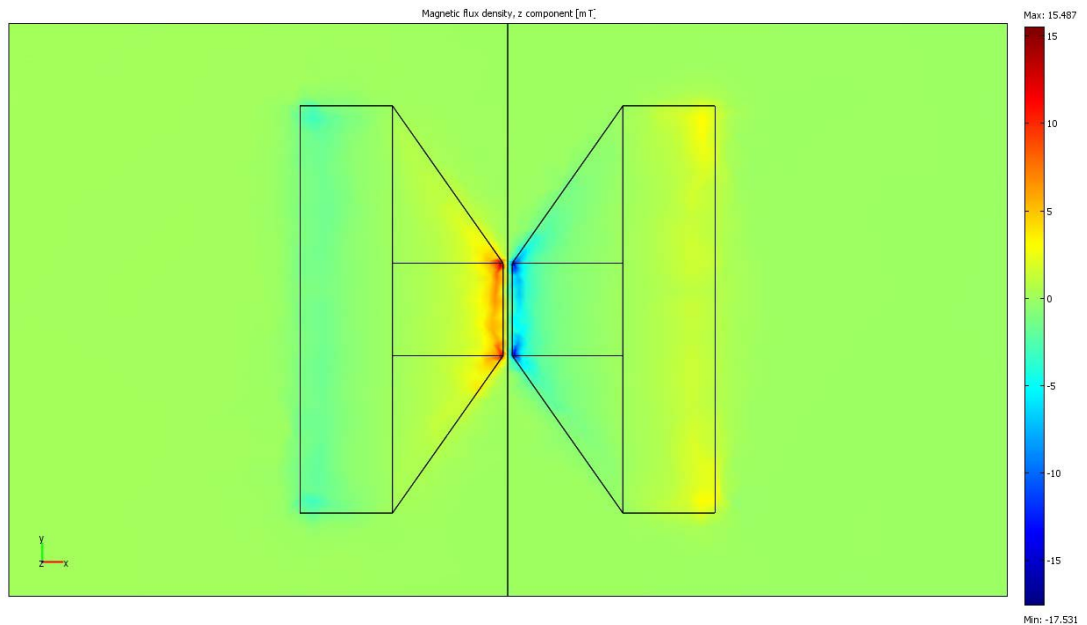
Magnetokonsentraattorien erilaisia muotoja on esitetty kuvassa 4.3. On tutkittu, että suurimman vahvistuksen antavat järjestyksessä t-muoto, tanga, kolmio, puoliympyrä, leveä palkki ja kapea palkki, [31]. Kahdeksankulmion vahvistusta ei ole tutkittu samassa yhteydessä, mutta sen voi muotonsa puolesta olettaa koostuvan kahdesta kolmiosta tai puoliympyrästä. Koska pituuden on oltava kahdeksankulmiossa sama kuin leveyden, on niiden pituus pienempi kuin muilla rakenteilla, joka taas tarkoittaa pienempää vahvistusta. Tässä työssä keskitytään enemmän lineaariseen toiminta-alueeseen kuin vahvistukseen, joten huomio keskittyy muotoihin pitkänomainen kolmio ja kahdeksankulmio, joiden eroja tutkittiin simuloimalla. Lisäksi simuloitiin kolmiota, jonka pituus on puolet pitkänomaisen kolmion pituudesta, ja selvitettiin sen eroja pitkänomaiseen kolmioon. Simuloidut muodot pitkänomainen kolmio, kahdeksankulmio ja lyhyt kolmio on nimetty vastaavasti termeillä ”pitkä kolmio”, ”kahdeksankulmio” ja ”lyhyt kolmio”. Pitkän kolmion pituudeksi valitaan 1,1 mm, leveydeksi 0,85 mm ja kapean kärjen leveydeksi 0,25 mm. Lyhyen kolmion pituudeksi valitaan 0,55 mm, leveydeksi 0,85 mm ja kapean kärjen leveydeksi 0,25 mm. Kahdeksankulmion pituudeksi ja leveydeksi valitaan 0,88 mm siten, että ilmaväliä lähinnä oleva ”kärki” on leveydeltään 0,370 mm. Simuloidut muodot ovat esitetty kuvissa 5.5, 5.6 ja 5.7, joissa muotojen sisällä näkyvät viivat ovat muotojen piirtämistä helpottavia apuviivoja ja kuvissa keskellä näkyvä pystyviiva kuvaa aistittavan virtajohtimen asentoa.



Kuva 5.5. Magnetokonsentraattorien muoto ”pitkä kolmio”.

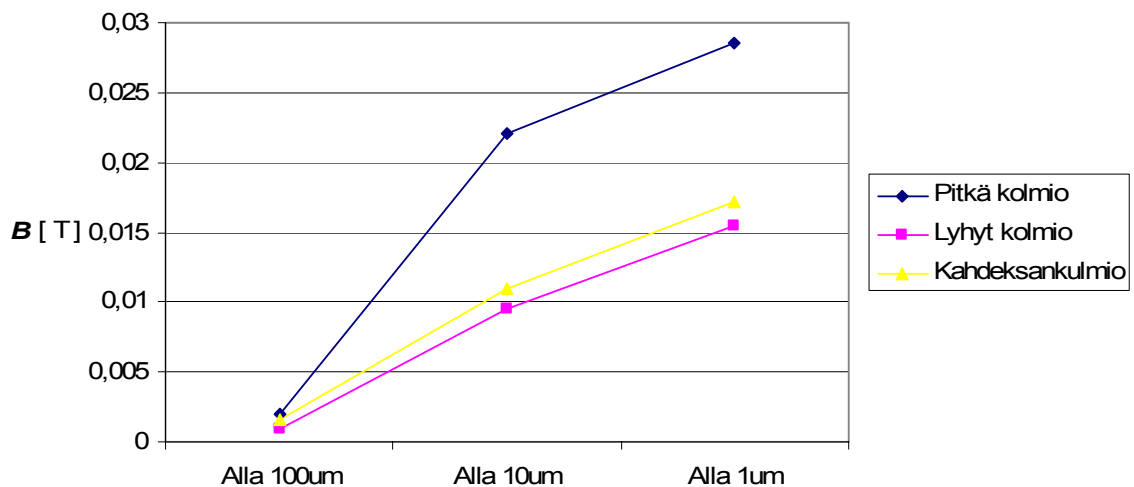


Kuva 5.6. Magnetokonsentraattorien muoto kahdeksankulmio.

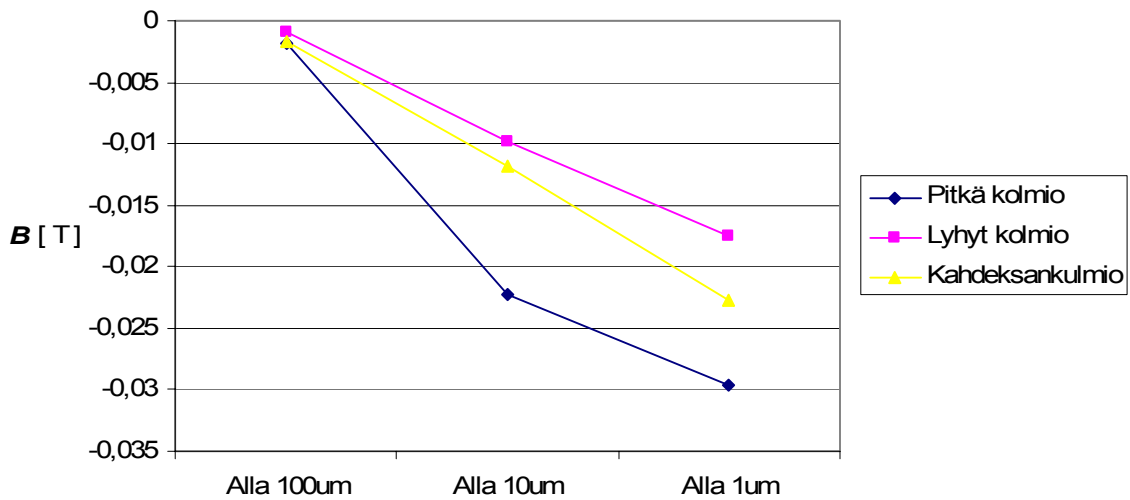


Kuva 5.7. Magnetokonsentraattorien muoto ”lyhyt kolmio”.

Simuloimalla tutkitaan ohjelmiston poikkileikkaustason ilmoittamaa suurinta ja pienintä z-akselin suuntaista magneettivuontiheyden komponenttia  $B_{z,max}$  ja  $B_{z,min}$ . Negatiivinen arvo tarkoittaa sitä, että suunta on vastakkainen positiiviseen nähden. Simuloidut poikkileikkaustasot muodostettiin  $1\ \mu\text{m}$ :n,  $10\ \mu\text{m}$ :n ja  $100\ \mu\text{m}$ :n etäisyydelle magnetokonsentraattorien alle ja niistä saadut tulokset on esitetty kuvaajissa 5.8 ja 5.9.



Kuva 5.8. Magneettivuontiheyden z-komponentin suurin arvo  $B_{z,max}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla ja eri etäisyyksillä magnetokonsentraattoreista.

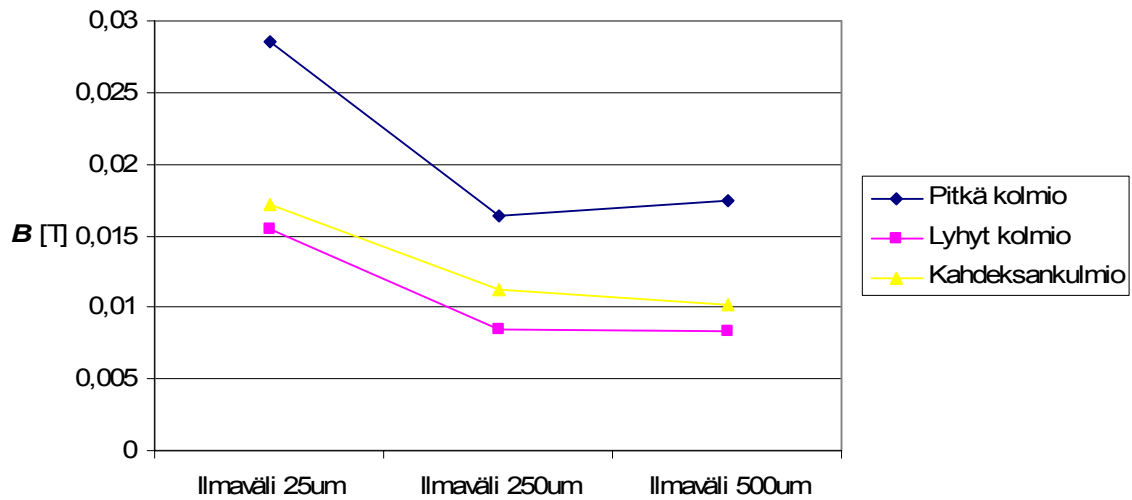


Kuva 5.9. Magneettivuontiheyden z-komponentin pienin arvo  $B_{z,\min}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla ja eri etäisyyksillä magnetokonsentraattoreista.

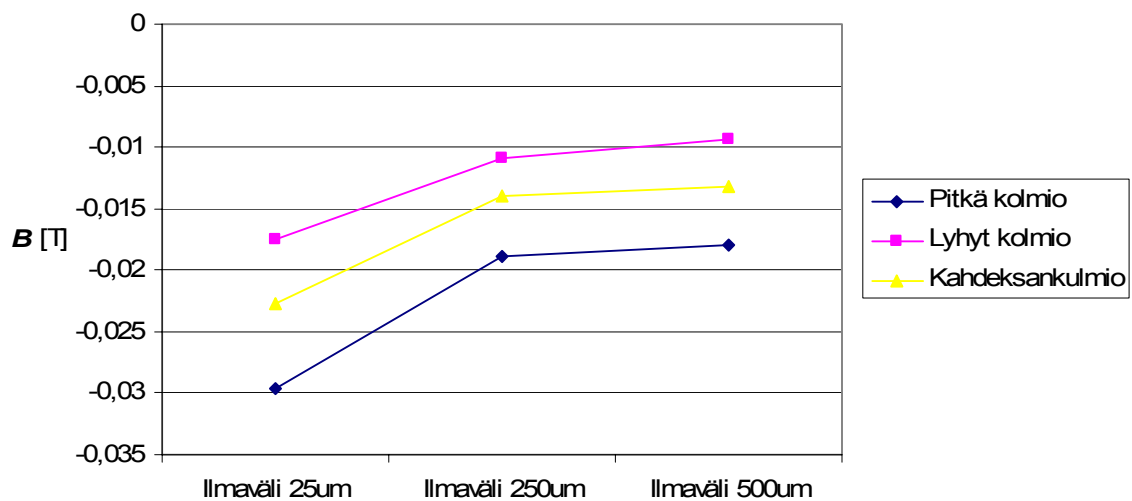
Kuten kuvista 5.8 ja 5.9 on huomattavissa, saadaan suurimmat magneettivuontiheyden arvot muodolla ”pitkä kolmio”. Tämä osaltaan myös osoittaa, että pituuden kasvattaminen lisää automaattisesti magneettista vahvistusta. Simuloituista tuloksista johtuen valitsimme muodoksi pitkänomaisen kolmion.

### 5.6.2 Ilmaväli

Kuten aiemmin on todettu, on vahvistus suurin, kun ilmaväli on yhtä pitkä kuin materiaalin paksuus. Tästä huolimatta ilmavälin vaikutusta simuloitiin kolmella eri ilmavälin pituudella; 25  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  ja 500  $\mu\text{m}$ . Poikkileikkaustason etäisyydeksi magnetokonsentraattoreista valittiin 1  $\mu\text{m}$  virheiden minimoimiseksi. Simulointituloksista piirretyt kuvaajat on esitetty kuvissa 5.10 ja 5.11.



Kuva 5.10. Magneettivuontiheyden z-komponentin pienin arvo  $B_{z,max}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla sekä erisuuruisilla ilmaväleillä.



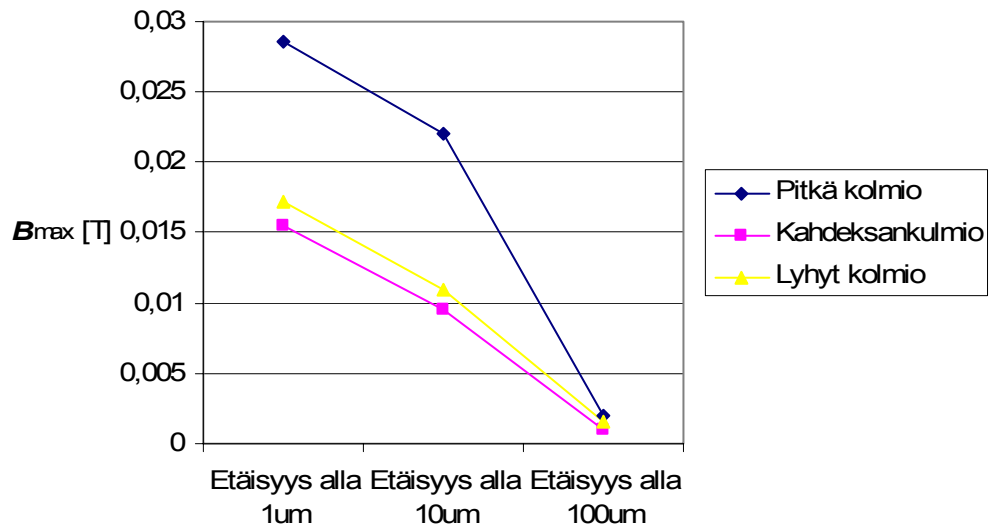
Kuva 5.11. Magneettivuontiheyden z-komponentin pienin arvo  $B_{z,min}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla sekä erisuuruisilla ilmaväleillä.

Kuvista 5.10 ja 5.11 on pääteltävissä, että suurin magneettinen vahvistus saadaan ilmavälillä 25  $\mu\text{m}$ . Toisaalta on myös nähtävissä, että ilmavälin kaksinkertaistaminen 250 mikrometrinästä 500 mikrometriin ei muuta simuloitua vuontiheyden komponenttia kovinkaan paljoa. On siis perusteltua pitäytyä lähellä materiaalin paksuutta, joten ilmaväliksi valitaan 25  $\mu\text{m}$ .

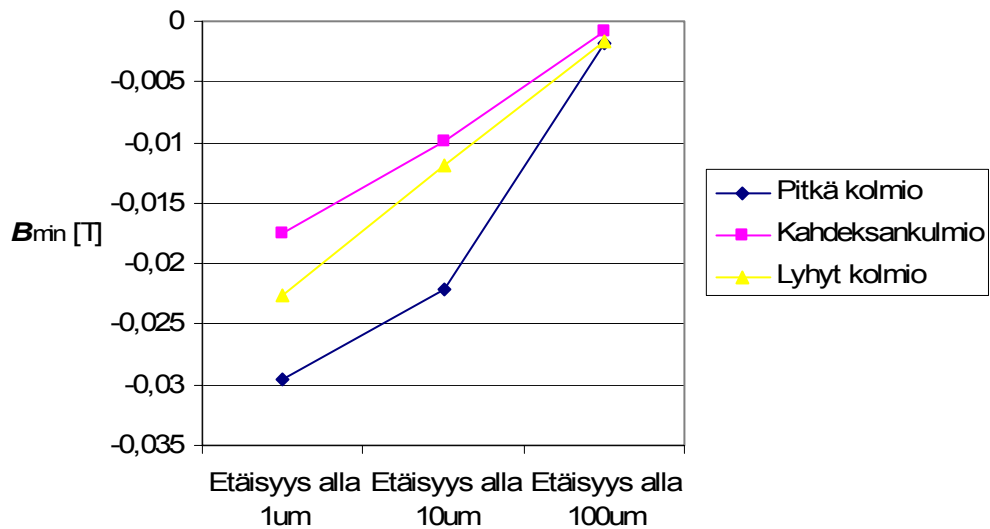
### 5.6.3 Hall-elementtien sijainti ja etäisyys konsentraattoreista

Hall-elementtien sijaintia päätettäessä riittää, kun tutkitaan kuvassa 5.5 esitettyä muotoa ”pitkä kolmio”, joka on valittu magnetokonsentraattorien muodoksi. Huomataan, että suurin vuontiheys on kolmioiden ilmavälin puoleisissa kulmissa (tummimman punaiset ja tummimman siniset kohdat). Tästä voidaan päätellä, että neljän Hall-elementin tapauksessa niiden tulisi sijaita näissä kulmissa ja kahden Hall-elementin tapauksessa niiden tulisi olla kolmion ilmavälin puoleisen kärjen mittaisia ja sijoitettuna siten, että niiden läpi kulkisi koko kärjen alueelle kohdistuva vuontiheyden z-komponentti. Esimerkiksi kahden suorakulmaisen Hall-elementin tapauksessa ja konsentraattorien muodon ollessa pitkä kolmio voisi Hall-elementtien pituus olla silmämääräisesti arvioituna noin 300  $\mu\text{m}$  sekä leveys noin 70–75  $\mu\text{m}$ . Mikäli muotovalinta olisi jokin toinen, kuvia 5.6 ja 5.7 tutkimalla olisi helppo päätellä myös kyseisten muotojen osalta sijainnit, joissa magneettivuontiheys on suurimmillaan.

Etäisyyden vaikutusta on helppo tutkia simuloimalla. Poikkileikkaustasokuvaaja on siis xy-tason kuvaaja, jonka korkeutta voidaan säätää helposti z-akselilla. Tämä korkeus vastaa etäisyyttä konsentraattoreista ja saatu tasokuvaaja saadaan esittämään magneettivuontiheyden z-komponenttia. Ja koska Hall-elementit tulevat konsentraattoreiden alle, tulee etäisyyden olla laskettuna konsentraattorien alapinnan tasosta. Etäisyyden vaikutusta tutkittiin etäisyyksillä 1  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  ja 100  $\mu\text{m}$ . Lisäksi simulaatioita toistettiin erilaisilla ilmaväleillä ja erilaisilla konsentraattorien muodoilla, ja huomattiin että tulokset ovat hyvin yhdenmukaisia. Simulointituloksista piirretyt kuvaajat ovat esitetty kuvissa 5.12 ja 5.13.



Kuva 5.12. Magneettivuontiheyden z-komponentin suurin arvo  $B_{z,max}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla sekä erisuuruksilla pystysuuntaisilla etäisyyksillä magnetokonsentraattoreihin.



Kuva 5.13. Magneettivuontiheyden z-komponentin pienin arvo  $B_{z,min}$  eri magnetokonsentraattorien muodoilla sekä erisuuruksilla pystysuuntaisilla etäisyyksillä magnetokonsentraattoreihin.

Kuvista 5.12 ja 5.13 on selvästi nähtävissä, että magneettivuontiheyden z-komponentti on sitä suurempi, mitä lähempänä magnetokonsentraattoreita ollaan. Tässä tapauksessa etäisyyteen vaikuttaa valmistustekniikka eli Hall-elementtien päälle tulevat oksidikerrokset sekä sirun ja magnetokonsentraattorien väliin tulevan liimakerroksen paksuus. Täten etäisyyttä ei ole syytä kasvattaa keinotekoisesti, vaan sen tulee olla niin pieni kuin käytetyllä



valmistustekniikalla on mahdollista. Voidaan kuitenkin olettaa, että etäisyys ei kasva suureksi, vaan pysyy korkeintaan muutamissa mikrometreissä, joten aistitut magneettivuontiheydet eivät pienene liikaa.

#### 5.6.4 Mitattavassa johtimessa oleva virrantiheys

Virrantiheydellä tarkoitetaan johtimessa kulkevan virran suuruutta pinta-alayksikköä kohden. Virrantiheys lasketaan yhtälöllä

$$J = \frac{I}{A}, \quad (5.1)$$

jossa  $J$  on virrantiheys,  $I$  on virta ja  $A$  on johtimen poikkipinta-ala. Simulointiohjelmistona käytetty Comsol vaatii kyseiseen simulointiin nimenomaan virrantiheystiedon, joten se lasketaan erikseen eri virroille, kun johtimen poikkipinta-ala pysyy vakiona. Esimerkiksi 100 A:n virralla ja tähän työhön valitulla johtimella, jonka säde on 2 mm, saadaan poikkipinta-alaksi noin  $0,0126 \text{ mm}^2$  ja siten virrantiheydeksi noin  $7,96 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ . Virrantiheyden merkityksen määrittämiseksi virrantiheyksiä simuloitiin neljällä eri skaalalla ja tuloksia tutkittiin sekä vuoviivakuvaajien että poikkileikkauskuvaajien avulla. Todellisuudessa virta ajautuu johtimen pintaan suurilla taajuuksilla, joten virrantiheys ei ole vakio johtimen sisällä. Tätä ei kuitenkaan voitu ottaa huomioon simulointiohjelmassa, joten johtimen virrantiheyden oletetaan olevan pinta-alaa kohden vakio.

Koska virrantiheys ei havainnollista johtimessa kulkevan virran määrää kovin hyvin, käytetään tässä työssä virran tehollisarvoa kuvaamaan johtimessa kulkevaa virtaa. Simulointiohjelma laskee virrantiheyden itsenäisesti eri simuloiteja varten jokaisella annetulla virran tehollisarvolla. Virrantiheyden merkitystä arvioitaessa haluttiin nimenomaan saada selville miten paljon virrantiheyden muutos vaikuttaa simuloituun magneettivuontiheyden z-komponentin arvoon. Tämän vuoksi simuloinnit jaettiin neljään eri osaan, jotka on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Virrantiheyden merkitystä magneettivuontiheyteen simuloitaessa käytetyt virtaskaalat.

Virta-alue [A]	10 ... 150	90 ... 110	99,0 ... 101,0	99,90 ... 100,10
Muutosaskel [A]	10	1	0,1	0,01
$B_{z,max}$ -vaihteluväli [mT]	2,548 ... 38,222	22,933 ... 28,093	25,226 ... 25,736	25,456 ... 25,507
$B_{z,min}$ -vaihteluväli [mT]	-2,006 ... -30,09	-18,054 ... -22,066	-19,859 ... -20,26	-20,04 ... -20,08

Tarkemmat kuvaajat simuloiduista magneettivuontiheyden maksimi- ja minimiarvoista on esitetty liitteen III kuvissa III.1 - III.8. Simuloiduista arvoista on myös laskettu jokaista muutosaskelta kohden syntyvä magneettivuontiheyden muutos, ja nämä tulokset on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Erisuuruisilla virran muutosaskelilla syntyvä keskimääräinen muutos maksimi- ja minimivuontiheyksissä.

Muutosaskel	10 A	1 A	0,1 A	0,01 A
$\Delta B_{z,max}$ [T]	0,002548143	0,0002548	2,55E-05	2,55E-06
$\Delta B_{z,min}$ [T]	-0,002006	-0,0002006	-2E-05	-2E-06

Kuten liitteen III kuvat osoittavat, aiheuttaa virrantiheyden muutos lineaarisen muutoksen myös simuloidussa magneettivuontiheydessä. Tämä muutosaskelta kohti syntyvä keskimääräinen muutos on esitetty taulukossa 5.3, josta taas on nähtävissä se, että virrantiheyden muutos on suoraan verrannollinen sen synnyttämään magneettivuontiheyteen. Kun johtimessa kulkeva virta kasvaa esimerkiksi kymmenkertaiseksi, kasvaa myös magnetokonsentraattoreiden alla havaittava magneettivuontiheyden z-komponentti kymmenkertaiseksi. Lisäksi taulukosta 5.3 on nähtävissä, että jokaisella mittauksella magnetokonsentraattorin herkkyys on maksimivuontiheydellä 0,255 mT/A ja minimivuontiheydellä 0,201 mT/A.

### 5.7 Simuloinnin yhteenveto

Simuloinnin tarkoituksena oli saada suuntaa antavia tuloksia suunnitellun piirin toiminnasta sekä selvittää miten muotoa, mittoja ja etäisyyksiä muuttamalla voidaan vaikuttaa suunnitellun anturin toimintaan. Saatujen tuloksien valossa voidaan sanoa simulointien sujuneen hyvin sekä asetettujen tavoitteiden toteutuneen riittävällä tarkkuudella.

Vaikkakin käytetty laitteisto asetti simuloinnin tarkkuudelle rajoituksia, voi tuloksia pitää luotettavina, kun tarkastellaan suureiden muutosta ja suhdetta toisiinsa eikä niinkään niistä saatuja absoluuttisia arvoja. Lisäsimuloinneista voisi kuitenkin olla apua ohjelmistoversion vaihtumisen myötä ja etenkin tapauksessa, jossa käytettävissä olisi tehokkaampi simulointilaitteisto. Lisäksi simulointeja voitaisiin tehdä yhä tarkemmilla arvoilla, jolloin saadut tulokset kuvaisivat paremmin simuloitua rakennetta. On myös joitakin tilanteita ja ominaisuuksia, joita ei aikataulun puitteissa ehditty simuloimaan; tällaisia ovat esimerkiksi vierekkäisten kolmivaihevirtajohtimien synnyttämien magneettikenttien vaikutukset vierekkäisiin virranmittaussensoreihin.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Hall-elementit yhdistettyinä sisäänrakennettuihin magnetokonsentraattoreihin on toimiva ja nykyään laajalti käytetty tekniikka virranmittausanturointiin. Rakenteen valmistaminen kokonaisuudessaan CMOS-prosessilla on helppoa johtuen sen rakenteesta, joka on kokonaan vaakatasossa. Lisäksi piirit ovat edullisia valmistaa, jos puolijohdealustana käytetään piitä. Rakenne- ja materiaalivaihtoehtoja on sekä Hall-elementeille että magnetokonsentraattoreille useita riippuen käyttökohteista ja niiden asettamista vaatimuksista. Laskelmien ja simulointien perusteella on osoitettu, että anturin tiettyjä rakenteita muuntelemalla voidaan vaikuttaa suuresti anturin lineaariseen mitta-alueeseen sekä vahvistukseen.

### 6.1 Anturin rakenne

Muodoksi valittiin kuvassa 5.5 esitetty pitkänomainen kolmio, jonka pituus on 1100  $\mu\text{m}$ , leveys 850  $\mu\text{m}$ , paksuus 22  $\mu\text{m}$  ja kärjen leveys 250  $\mu\text{m}$ . Mittoja voidaan myös muunnella jonkin verran käytetyn piisirun dimensioista riippuen ja lisäksi rakenteen päälle on mahdollista liimata vielä ulkoiset magnetokonsentraattorit vahvistamaan vuota entisestään. On silti huomattava, että magnetokonsentraattorien pituuden kasvattaminen pienentää anturin lineaarista toiminta-aluetta, vaikkakin vahvistus kasvaa. Ilmavälin pituudeksi on hyvä valita sama tai lähes sama kuin konsentraattorien paksuus, jotta saadaan suurin mahdollinen vahvistus. Tässä tapauksessa ilmavälin pituudeksi valittiin 25  $\mu\text{m}$ . Etäisyys johtimesta on 6 mm.

Hall-elementtien todettiin olevan järkevää sijoittaa ilmavälin molemmin puolin konsentraattorien alle. Mikäli elementtejä on 2, sijoitetaan ne konsentraattorien kärkien keskikoh-tien alle; yksi ilmavälin molemmin puolin. Mikäli elementtejä on 4, sijoitetaan ne konsentraattorien kärkien kulmien alle; kaksi ilmavälin molemmin puolin. Pystysuora etäisyys konsentraattoreista Hall-elementteihin tulee olla mahdollisimman pieni, ja se määräytyy valmistusprosessin mukaisesti. Etäisyys on kuitenkin joka tapauksessa mikrometrien suuruusluokassa. Lisäksi todettiin virran kasvun aiheuttavan suoraan verrannollisen kasvun myös mitatussa magneettivuontiheydessä ja selvitettiin erisuuruisten virranmuutosten aiheuttamat muutokset antureille tulevassa magneettivuontiheydessä.

## 6.2 Anturin tuottaman signaalin parantaminen

Suunniteltu anturi koostuu toistaiseksi vain Hall-elementeistä sekä magnetokonsentraattoreista, ja sen signaali sisältää sekä häiriöitä että virheitä. Signaalia täytyy kuitenkin muokata monilla mittaustarkkuutta ja luotettavuutta parantavilla menetelmillä. Anturilta saatuun signaaliin on helpointa vaikuttaa vahvistamalla sitä ja suodattamalla siitä suurin osa kohinasta, parantamalla sen herkkyyttä, poistamalla mahdollisimman paljon offset-virhettä sekä suurentamalla taajuuskaistaa.

### 6.2.1 Signaalin vahvistaminen

Hall-elementin tuottama Hall-jännite on suoraan verrannollinen elementissä kulkevan virran suuruuteen sekä elementin läpi kulkevaan magneettivuontiheyteen, ja toisaalta kääntäen verrannollinen elementin puolijohdemateriaalin varauksenkuljettajien tiheyteen, niiden varaukseen sekä elementin paksuuteen yhtälön (4.1) mukaisesti. Tutkitaan anturiin syntyvää Hall-jännitettä eri magneettivuontiheyksillä. Valitaan elementin läpi kulkevaksi esiviräksi 1 mA, varauksenkuljettajien tiheydeksi  $1 \times 10^{21} \text{ 1/m}^3$ , varaukseksi alkeisvaraus  $q = 1,6022 \times 10^{19} \text{ C}$  ja paksuudeksi 1  $\mu\text{m}$ . Nyt virran suuruutta vaihtelemalla aiheutetaan muutos magneettivuontiheydessä, joka vuorostaan synnyttää Hall-elementille Hall-jännitteen. Otetaan esimerkkitapaus simuloinneista, jossa magnetokonsentraattorien etäisyys johtimesta on 6 mm ja Hall-elementtien etäisyys konsentraattoreista on 1  $\mu\text{m}$ , ja johtimessa kulkeva virta synnyttää Hall-elementeille pystysuoran magneettivuontiheyden  $B_z$ . Jokaiselle virran arvolle saadaan simuloitua magneettivuontiheydet ja siten voidaan laskea elementtiin syntyvät Hall-jännitteet, jotka on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Erisuuruisten magneettivuontiheyksien synnyttämät Hall-jännitteet. Magnetokonsentraattorien etäisyys johtimesta on 6 mm sekä Hall-elementtien etäisyys konsentraattoreista on 1  $\mu\text{m}$ .

$I$ [A]	100 A	10 A	1 A	0,1 A
$B_z$ [mT]	25,481	2,5481	0,25481	0,025481
$V_H$ [mV]	159,0	15,9	1,59	0,159

Taulukosta 6.1 on nähtävissä, että Hall-jännitteen muutos on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan mitattavan virran muutokseen. Lisäksi on helposti pääteltävissä, että Hall-elementissä kulkevan virran kymmenkertaistaminen 1 milliampeerista 10 milliampeeriin

kasvattaa myös Hall-jännitteen kymmenkertaiseksi. Samoin varauksenkuljettajien tiheyden pienentäminen kymmenesosaan eli arvoon  $1 \times 10^{20} \text{ 1/m}^3$  kasvattaa Hall-jännitteen myös kymmenkertaiseksi. On siis laskennallisesti osoitettavissa, että Hall-elementin läpi kulkevaa virtaa sekä Hall-elementin varauksenkuljettajien tiheyttä muuttamalla voidaan helposti vahvistaa anturilta saatavaa Hall-jännitettä.

Magnetokonsentraattorien lisäksi piirin päälle on vielä mahdollista lisätä niin sanotut makrokonsentraattorit, jotka kasvattavat jo piirillä olevien magnetokonsentraattorien kokoa ja siten niiden muodostamaa magneettista vahvistusta. On tutkittu, että makrokonsentraattorien avulla magneettinen vahvistus voidaan saada jopa arvoon 100. [32].

Lisäksi signaalia voidaan vahvistaa esimerkiksi pienikohinaisella differentiaalivahvistimella, jotta signaalitaso kasvaisi ja siitä saataisiin käyttökelpoisempi signaali esimerkiksi prosessorille, joka käsittelisi anturilta saapuvaa tietoa. Tässä työssä ei kuitenkaan perehdytä tarkemmin erilaisiin vahvistintekniikoihin.

### 6.2.2 Offsetin poisto

Hall-elementit kärsivät offset-häiriöstä eli pysyvästä säätöpoikkeamasta, joka voi johtua muun muassa valmistusvaiheessa siruun kohdistuneesta mekaanisesta rasituksesta tai esimerkiksi fotolitografiassa tapahtuneesta maskin kohdistusvirheestä. Offset on riippuvainen käyttöjännitteestä, lämpötilasta sekä rasituksesta ja se käytännössä määrää pienimmän anturilla mitattavan kentän. Offsetin poistamiseksi ja pienentämiseksi on useita keinoja ja osaa niistä voi yhdistellä parhaan tuloksen saamiseksi. Ottaen huomioon, että offset on tyypillisesti jopa useita millitesloja, on sen poistaminen tärkeää anturin resoluution parantamiseksi. Nykytekniikoilla offset on kuitenkin helposti pienennettävissä menetelmästä riippuen noin milliteslaan ja parhailla menetelmillä jopa muutamiin mikrotresloihin.

Anturin symmetriaa parantamalla voidaan helposti vähentää maskin kohdistusvirheen mahdollisuutta. Tällä hetkellä suosituin keino offsetin poistoon on niin sanottu ”spinning current” -menetelmä eli pyörivän virran menetelmä, jota on tutkittu artikkeleissa [18] ja [38] - [40]. Se perustuu Hall-elementin tulo- ja lähtönastojen jaksottaiseen permutaatioon eli käytännössä virran suunnan vaiheittaiseen muutokseen; siis pyörimiseen. Sen ainoa on-

gelma on kytkentäpiiri, joka aiheuttaa kytkentäkohinaa, jonka vuoksi offsetin poistoon on kehitetty myös artikkelissa [17] esitetty tekniikka, jossa ei hyödynnetä pyörivän virran menetelmää. Myös aiemmin tässä työssä mainittu keino Hall-elementtien suuntaamiseksi kideatasojen mukaan on hyvä keino pienentää offset-häiriöitä, sillä se minimoi pietsosähköisiä tekijöitä, jotka kasvattavat offsetia, [41]. Samoin Hall-elementtien kytkeminen rinnan kahden tai neljän elementin ryhmään kohtisuoraan toisiinsa nähden vähentää offsetia edelleen, [16].

### 6.2.3 Kohinan poisto

Kuten aiemmin on todettu, synnyttää pyörivän virran menetelmä kytkentäkohinaa, joka vaikuttaa saadun Hall-jännitteen laatuun, mutta toisaalta kyseinen menetelmä voi myös poistaa lähes kokonaan niin sanotun  $1/f$ -kohinan, [42]. Kytkentäkohina voi nykyisissä CMOS-prosessilla valmistetuissa Hall-elementeissä vastata noin muutaman sadan mikrotleslan säröä mitatussa magneettikentässä, joka vastaa noin  $1 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$  asti ulottuvaa ekvivalenttista magneettista kohinatiheyttä. On siis huomattava, että pieniä virtoja mitattaessa kohinalla on merkitystä. Monilla nykytekniikoilla voidaan yltää niinkin pieneen kuin satojen tai jopa kymmenien nanoteslojen kohinatiheyteen. Esimerkiksi aiemmin esitellyllä GMW Sentron CSA-1V -anturilla on  $125 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  kohinatiheys. On myös syytä huomioida, että magnetokonsentraattorien aiheuttama vahvistus parantaa anturin signaalikohinasuhdetta.

### 6.2.4 Taajuuskaistan suurentaminen

Kuten aiemmin on todettu, ei Hall-elementtien taajuuskaista ole kovin suuri. Koska anturi tulisi taajuusmuuttajakäyttöön, olisin kuitenkin tärkeää, että se kykenee mittaamaan virtoja taajuuskaistalla DC...100 kHz. Hall-ilmiön teoreettinen toiminta-alue rajoittuu noin 1 THz:n taajuuteen, joka on huomattavasti enemmän kuin haluttu kaistanleveys. Todellisuudessa korkein rajataajuus on paljon pienempi, sillä Hall-elementin taajuuskaistaa rajoittavat mikropiirille valmistetun rakenteen loiskapasitanssit, jotka muodostavat oikosulkutien korkeataajuiselle vaihtovirralla mikropiirissä. Tämän loiskapasitanssin teoreettinen laskenta ei kuitenkaan anna kovin tarkkoja tuloksia, sillä korkeataajuisen magneettikentän mittaaminen on hyvin monimutkaista johtuen kapasitiivisesta ja induktiivisesta kytkeytymisestä. Voidaan kuitenkin todeta, että yleisimmät kaupalliset piirit toimivat taajuuskaistalla 30–100 kHz, joten haluttu taajuuskaista on mahdollista toteuttaa, [23], [43], [44], [45].

Koska suurin osa kaupallisista tuotteista perustuu pyörivän virran tekniikkaan, niiden taajuuskaistaa rajoittaa lähtösuotimen rajataajuus, joka on yleisimmin noin 30 kHz tai vähemmän. Piitä harvinaisemmilla ja kalliimmilla puolijohdemateriaaleilla voitaisiin päästä helpommin haluttuun taajuuskaistaan, mutta ne eivät tule tässä tapauksessa kysymykseen kustannustehokkuuden säilyttämiseksi.

### 6.2.5 Herkkyyden parantaminen

Anturin herkkyys voidaan laskea Hall-jännitteen sekä virtajohtimen ympärilleen muodostaman magneettivuontiheyden avulla. Kun johtimessa kulkee 100 A:n virta, yhtälöllä (2.5) saadaan etäisyydelle 6 mm magneettivuontiheydeksi 3,3 mT. Herkkyyden yhtälöksi saadaan

$$S = \frac{U_H}{B}, \quad (6.1)$$

jossa  $S$  on herkkyys,  $B$  on pyöreän johtimen ympärilleen muodostama magneettivuontiheys tietyllä etäisyydellä ja  $U_H$  on Hall-jännite. Toisin sanoen herkkyydellä tarkoitetaan Hall-jännitteen suuruutta suhteessa mitattuun magneettivuontiheyteen. Hall-jännite saadaan taulukosta 6.1, joten herkkyyden arvoksi saadaan 47,7 V/T. Herkkyys on kohtalainen, mutta jos oletetaan, että Hall-elementtien ominaisuuksia muuttamalla Hall-jännite esimerkiksi kymmenkertaiseksi, muuttuu myös herkkyys kymmenkertaiseksi, joka olisi jo erittäin hyvä herkkyys. Herkkyyttä on siis helppo säätää Hall-jännitteen avulla. Hall-jännitettä voidaan taas säätää Hall-elementtien sekä magnetokonsentraattorien parametreilla.

### 6.3 Käytettävyys

Anturin soveltuvuutta erisuuruksille virroille on helppo säätää muuttamalla anturin etäisyyttä mitattavasta johtimesta. Tätä varten on helppo valmistaa esimerkiksi muovista erilaisia edullisia puristimia, jotka lukitsevat anturin tietylle etäisyydelle johtimesta. Anturin mitta-alue voidaan toki säätää myös muuttamalla sen parametreja, kuten esimerkiksi Hall-elementtien esivirtaa, joka vaikuttaa muodostuvan Hall-jännitteen suuruuteen.



Rakenteeltaan vaakatasoinen piiri on halpa ja helppo valmistaa, joten sen massatuotanto on tarvittaessa mahdollista. Lisäksi se on helppo koteloida ja asettaa piirilevylle. Kotelointi muodostaa sähköisen eristyksen mikropiirille, jolloin piiri voidaan asentaa esimerkiksi suoraan piirilevyllä kulkevan johdinliuskan päälle mittaamaan siinä kulkevaa virtaa.

Anturin kalibrointi voidaan toteuttaa esimerkiksi helposti digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla, jolloin signaalissa ilmeneviä häiriöitä on mahdollista poistaa, mutta on myös huomattava, että esimerkiksi suuri osa offsetista poistuu jo rakenteellisilla ratkaisuilla. Toisaalta, anturin herkkyyttä muille, vaikeasti kalibroinnilla poistettaville, ulkopuolisille häiriöille on vaikea arvioida. On selvää, että konsentraattorirakenne suojaa Hall-elementtejä jonkin verran, mutta lopullisesti häiriöiden vaikutus anturiin selvinnee vasta prototyypin testausvaiheessa. Erilaisten suojaavien ratkaisujen suunnitteleminen ja toteuttaminen on toki mahdollista, mutta se vaatisi lisää suunnittelua ja simulointeja.

Lisäksi suunniteltua esimerkianturia on helppoa muokata haluttuun suuntaan, kun tiedetään miten eri parametrit vaikuttavat magnetokonsentraattorien muodostaman magneettivuontiheyden z-komponentin voimakkuuteen sekä Hall-elementtien antamaan signaaliin. Tällöin tiettyjä ominaisuuksia muuntelemalla anturista saadaan eri mittausalueille ja eri tarkkuusvaatimuksille sopiva virranmittausmenetelmä.

#### **6.4 Jatkotoimenpiteet**

Suunniteltua anturia kannattaisi simuloida lisää tehokkaammalla laitteistolla siten, että tuloksista ei saisi ainoastaan luotettavaa muutoksen suhteellista arvoa, vaan myös realistisesti tarkempia yksittäisiä arvoja. Lisäksi vertailun vuoksi olisi järkevää simuloida anturin toimintaa myös Flux3D-simulointiohjelmalla, jotta voitaisiin selvittää kahden eri simulointiohjelmiston antamien tuloksien eroja.

Tärkeää olisi myös selvittää simulointituloksien tarkkuutta erilaisin lisäsimuloinnein. Eräiden materiaaliparametrien syöttö simulointiohjelmistoon ei onnistunut simulointeja tehdessä ja niillä voisi olla pieniä vaikutuksia saatuihin tuloksiin. Lisäksi olisi järkevää simuloida myös kolmen vierekkäisen kolmivaihevirtajohtimen synnyttämien hajavuoarvojen vaikutusta vierekkäisiin virranmittausantureihin. Tätä varten tarvittaisiin myös tehokkaampi si-

mulointilaitteisto, jotta aikaharmoninen analyysi onnistuisi riittäväällä tarkkuudella. Samalla voitaisiin simuloida magnetokonsentraattorien lisäksi asennettavia ulkoisia makrokonsentraattoreita sekä niiden vaikutusta anturilta saatavaan signaaliin. Myös anturin kalibroinnin toteutus olisi tärkeää suunnitella tarkemmin.

Lisäksi kannattaisi selvittää miten anturin ympärille olisi muodostettavissa eräänlainen integroitu kompensointikela. Nykyisillä ohutkalvotekniikoilla sellaisen muodostaminen suoraa sirulle olisi mahdollista. Kela toimisi käytännössä samalla tavalla kuin closed loop -mittauksessa eli anturin signaali ohjattaisiin kelaan, joka muodostaisi samansuuruisen, mutta vastakkaisuuntaisen vuon anturin alueelle, ja siten Hall-anturi voisi toimia niin sanottuna nollavuon ilmaisimena. Samanlaista tekniikkaa käytetään muun muassa AMR-antureissa set- ja reset-pulssien muodostamiseksi. Kompensointikelaa voisi käyttää nolla-detektorin asemesta myös automaattiseen kalibrointiin, jolla voisi minimoida muun muassa koteloinnissa syntyvien jännitystilojen aiheuttamia poikkeamia. On jo osoitettu, että tietyn kokoiselle Hall-elementille 3-kierroksinen integroitu kela voisi muodostaa 1 mA:n virralla 15 mT:n suuruisen kelan läpi kulkevan magneettivuon, [46].

## 7 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia tarjolla olevia virranmittausmenetelmiä ja valita niistä luotettava, tarkka, pienikokoinen ja kustannustehokas ASIC-piiriin perustuva virranmittausmenetelmä taajuusmuuttajan kolmivaihelähtöön. Tavoitteena oli myös suunnitella valittuun teknologiaan perustuva anturi, ja sen jälkeen simuloimalla tutkia suunnitellun anturin ominaisuuksia käyttäen tarkoitukseen sopivaa simulointiohjelmistoa. Diplomityössä esiteltiin yleisimmät virranmittaukseen soveltuvat teknologiat keskittyen magneettikentän aistimiseen perustuviin antureihin ja vertailtiin niiden soveltuvuutta taajuusmuuttajan virranmittauskäyttöön. Anturit jaoteltiin magneettikentän aistimiskykynsä perusteella kolmeen eri kategoriaan; pienen kentän antureihin, maan magneettikentän antureihin sekä suuren kentän antureihin.

Tutkituista anturityypeistä valittiin Hall-elementtiin perustuva virranmittausanturi, joka suunniteltiin taajuusmuuttajakäyttöön sopivaksi. Suunnittelu keskittyi piirille integroitaviin magnetokonsentraattoreihin, jotka ohjaavat piirin pinnan suhteen yhdensuuntaisen vuon paikallisesti piirin pinnan suhteen kohtisuoraksi vuoksi, jota piirille muodostetut Hall-elementit pystyvät aistimaan. Magneettivuon suuntausominaisuutensa lisäksi magnetokonsentraattoreilla on myös passiivista magneettista vahvistusta, joka parantaa anturin virranmittaustarkkuutta huomattavasti samalla, kun virranmittausanturin koko pysyy halutun pienenä. Näin vältetään suurilta ja kalliilta rengassydänrakenteilta, joita käytetään useimmissa moderneissa taajuusmuuttajissa. Suunnittelussa keskityttiin magnetokonsentraattorien rakenteeseen sekä materiaalivalintaan. Suunnittelun tuloksena syntyi CMOS-prosessilla toteutettavissa oleva Hall-elementtirakenne, johon on integroituna kaksi levyäistä magneettisesti pehmeästä materiaalista valmistettua magnetokonsentraattoria.

Suunniteltua anturia simuloitiin Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Simuloinnilla selvitettiin magnetokonsentraattorien rakenteen vaikutusta magneettiseen vahvistukseen tarkastelemalla yksi kerrallaan eri parametreja, jotka liittyvät magnetokonsentraattorien kokoon, muotoon tai sijaintiin. Simulointitulokset osoittivat, että suunniteltu rakenne toimii halutulla tavalla sekä sen, miten eri parametreja muuttamalla voidaan vaikuttaa anturissa syntyvään magneettiseen vahvistukseen. Simulointi antoi selvän kuvan magneettivuon käyttäy-

tymisestä magnetokonsentraattorien läheisyydessä ja simulointituloksien avulla on helppoa suunnitella yksilöllinen virranmittausanturi erilaisiin käyttökohteisiin.

Työssä tutkittiin myös erilaisia menetelmiä anturilta saatavan signaalin parantamiseksi. Todettiin, että offsetin pienentäminen, kohinan vaimentaminen ja vahvistuksen kasvattaminen onnistuvat melko yksinkertaisilla toimenpiteillä, jotka parantavat anturin tarkkuutta huomattavasti. Taajuuskaistan kasvattamisen todettiin olevan edellisiä vaikeampaa, ellei valmistuksessa siirrytä kalliimpiin puolijohdemateriaaleihin. Toisaalta taajuusmuuttajakäyttöä ajatellen piistä valmistetun Hall-anturin taajuuskaista on riittävä, joten tarvetta kalliimmille puolijohdemateriaaleille ei tässä tapauksessa ole. Simuloidun anturin herkkyys oli hyvä taajuusmuuttajakäyttöä ajatellen, ja sitä voidaan tarvittaessa pienentää tai suurentaa anturin parametreja muuttamalla.

Voidaan todeta, että valittu Hall-elementtiin perustuva virranmittausmenetelmä soveltuu hyvin taajuusmuuttajakäyttöön, ja suunniteltu sekä simuloitu anturi vastaa työlle asetettuja tavoitteita. Työn tuloksista on merkittävää apua taajuusmuuttajakäytön virranmittauksen toteuttamiseksi kustannustehokkaalla ASIC-piirillä.

**LÄHTEET**

- [1] L. Aura, A. J. Tonteri, 1986. Sähkämiehen käsikirja : 1 : Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo, WSOY. ISBN 9-5101-3672-7.
- [2] J. Partanen, 1997. Sähköenergiatekniikan perusteet. Opetusmoniste, EN C-98. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. ISBN 9-5176-4123-0.
- [3] Zetex Semiconductors, 2004. Current Measurement Applications Handbook. Application Note 39, Issue 4 [verkkodokumentti]. Updated February, 2004. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.zetex.com>
- [4] Honeywell Solid State Electronics Center, 2000. Magnetic Current Sensing. Application Note 209 [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.ssec.honeywell.com>
- [5] T. Bratland, M. J. Caruso, R. Schneider, C. H. Smith, 1998. A New Perspective on Magnetic Field Sensing. Technical Article, Honeywell Solid State Electronics Center [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.ssec.honeywell.com>
- [6] J. Nerg, 2002. Sähkömagneettiset komponentit. Luentomoniste, syksy 2002. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [7] J. Pyrhönen, 2002. Sähkömagnetismi. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 2002. ISBN 9-5176-4625-9.
- [8] J. E. Lenz, 1990. A Review of Magnetic Sensors. Proceedings of the IEEE, vol. 78, issue 6, pp. 973-989. ISSN 0018-9219.

- [9] R. S. Popovic, P. M. Drljaca, C. Schott, 2002. Bridging the Gap Between AMR, GMR, and Hall Magnetic Sensors. 23<sup>rd</sup> International Conference on Microelectronics, vol. 1, pp. 55-58. ISBN 0-7803-7235-2.
- [10] LUST Antriebstechnik GmbH, 2000. Magneto-resistive Current Sensor. FUSE Application Experiment EPC1 EU Nr. 24744 [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.fuse-network.com>
- [11] Honeywell Control Systems Ltd, 2003. CSN Series Magneto-resistive (MR) Closed Loop Current Sensor [www-tuotedokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://sensing.honeywell.com>
- [12] Sypris Test & Measurement, F. W. Bell, 2004. CMR-25 Datasheet [www-tuotedokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.sypris.com>
- [13] Sypris Test & Measurement, 2007. Magneto-resistive Technology Tutorial [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.sypris.com>
- [14] Honeywell, 2004. 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002 HMC1021/1022 [www-tuotedokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.honeywell.com/>
- [15] A. Radun, 1995. An Alternative Low-cost Current-sensing Scheme for High-Current Power Electronics Circuits. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 1, February 1995, pp. 78-84. ISSN 0278-0046.
- [16] H. Blanchard, 1999. Hall Sensors with Integrated Magnetic Flux Concentrators. Hartung-Gorre Verlag Konstanz, Germany, 1999.
- [17] Z. B. Randjelovic, M. Kayal, R. Popovic and H. Blanchard, 2002. Highly Sensitive Hall Magnetic Sensor Microsystem in CMOS Technology. IEEE Journal of Solid-state Circuits, vol. 37, no. 2, 2002.

- [18] R. S. Popovic, Z. Randjelovic and D. Manic, 2001. Integrated Hall-effect Magnetic Sensors. *Sensors and Actuators A91*, 2001, pp. 46-50.
- [19] J. D. P. Hrabliuk, 2002. Optical Current Sensors Eliminate CT Saturation. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 1478-1481. ISBN 0-7803-7322-7.
- [20] A. P. Steer, S. J. Turner, P. R. B. Farrie, R. P. Tatam, A. N. Tobin, J. D. C. Jones, D. A. Jackson, 1989. Optical Fibre Current Sensor for Circuit Protection. *Fourth International Conference on Developments in Power Protection*, Edinburgh, United Kingdom, 1989, pp. 296-300.
- [21] H.Y. Li, P.A. Crossley, R. K. Aggarwal, 1997. Application of Fibre Optical Current Transducer to Protection. *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection*, Nottingham, United Kingdom, 1997, pp. 274-277. ISBN 0-85296-672-5.
- [22] Vacuumschmelze. Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007].  
Saatavissa: <http://www.vacuumschmelze.de>
- [23] GMW Sentron, 2005. CSA-1V Current Sensor [www-tuotedokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.gmw.com/>
- [24] ABB, ACS/ACC/ACP 601 Hardware Manual [www-tuotedokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.abb.fi>
- [25] National Institute of Standards and Technology, 2007. Hall Effect Measurements [www-sivu]. Updated February 2, 2007. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.eeel.nist.gov/812/hall.html>

- [26] Hyperphysics, 2005. Lorentz Force Law [www-sivu]. Updated June 29, 2005. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfor.html>
- [27] Hyperphysics, 2005. Hall Effect. Hall Voltage for Positive Charge Carriers [www-sivu]. Updated September 6, 2003. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>
- [28] Wikipedia, 2007. Hall Effect [www-sivu]. Updated January 14, 2007. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hall\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect)
- [29] N. Kotera, J. Shigeta, K. Narita, T. Oi, K. Hayashi and K. Sato, 1979. A Low-noise InSb Thin Film Hall Element: Fabrication, Device Modeling, and Audio Application. IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-15, no. 6, November 1979, pp. 1946-1955.
- [30] H. Tanoue, T. Tsurushima and S. Kataoka, 1980. GaAs Hall Element Fabricated by Ion Implantation. IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-27, no. 6, June 1980, pp. 1188-1192.
- [31] P. M. Drljaca, F. Vincent, P-A. Besse and R. S. Popovic, 2002. Design of Planar Magnetic Concentrators for High Sensitivity Hall Devices. Sensors and Actuators A97-A98, 2002, pp. 10-14.
- [32] P. M. Drljaca, V. Schlageter, F. Vincent and R. S. Popovic, 2001. High Sensitivity Hall Magnetic Sensors Using Planar Micro and Macro Flux Concentrators. Transducers '01, Eurosensors XV, Munich, Germany, June 2001.
- [33] H. Blanchard, L. Chiesi, R. Racz and R. S. Popovic, 1996. Cylindrical Hall Device. International Electron Devices Meeting, San Francisco, California, USA, December 1996, pp. 541-544. ISBN 0-7803-3393-4.



- [34] R. S. Popovic and P. M. Drljaca, 2001. Integrated Hall Sensor / Flux Concentrator Microsystems. Invited Paper [verkkodokumentti]. Updated October 16, 2002. [viitattu 12.2.2007].  
Saatavissa: <http://www.sentron.ch/support/techpapers.htm>
- [35] P. Leroy, C. Coillot, A. Roux and G. Chanteur, 2006. Optimisation of the Shape of Magnetic Field Concentrators to Improve the Sensitivity of Hall Sensors. *Tm – Technisches Messen*, vol. 73, issue 6, June 2006, pp. 339-349. ISSN 0171-8096.
- [36] Comsol, 2007. Comsol Multiphysics [www-sivu]. Updated January, 2007. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.comsol.fi/products/multiphysics>
- [37] Comsol, 2007. Comsol Multiphysics: New Features in 3.3 [www-sivu]. Updated January, 2007. [viitattu 12.2.2007].  
Saatavissa: <http://www.comsol.fi/products/multiphysics/features>
- [38] R. Steiner, A Häberli, F.-P. Steiner and H. Baltes, 1997. Offset Reduction in Hall Devices by Continuous Spinning Current Method. International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Transducers '97, Chicago. ISSN 0924-4247.
- [39] P. Munter, 1990. A Low-offset Spinning-current Hall Plate. *Sensors and Actuators A21-A23*, 1990, pp. 743-746.
- [40] P. Munter, 1991. Electronic Circuitry for a Smart Spinning-current Hall Plate with Low Offset. *Sensors and Actuators A27*, 1991, vol. 27, pp. 747-751.
- [41] S. Bellekom and L. Sarro, 1997. Offset Reduction of Hall Plates in Three Different Crystal Planes. International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Transducers '97, Chicago, vol. 1, pp. 233-236. ISBN 0-7803-3829-4.

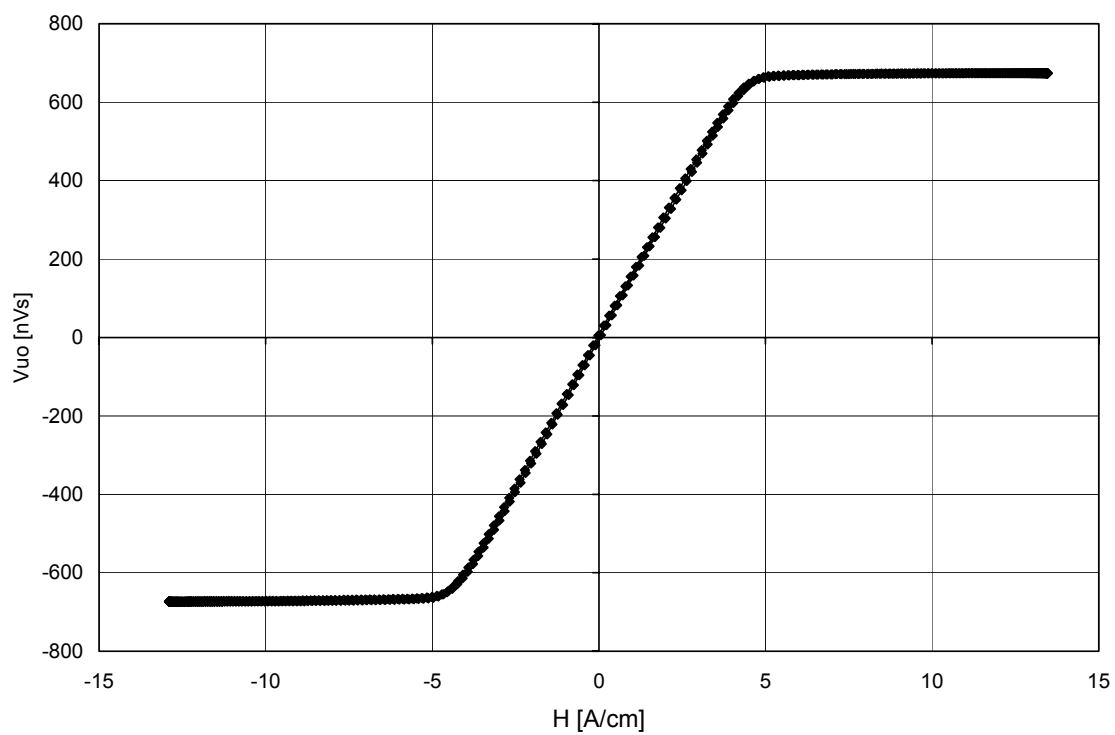
- [42] A. Bakker, A. Bellekom, S. Middlehoek and J. H. Huijsing, 1999. Low-offset Low-noise 3.5 mW CMOS Spinning-current Hall Effect Sensor with Integrated Chopper Amplifier. Proceedings of the XIII European Conference on Solid-state Transducers, The Netherlands, 1999, pp. 1045-1048.
- [43] Allegro, Hall-effect Current Sensors [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://ww.allegro.com>
- [44] Melexis, Hall-effect IC's [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.melexis.com>
- [45] Micronas, Hall-effect Sensors [verkkodokumentti]. [viitattu 12.2.2007]. Saatavissa: <http://www.micronas.com>
- [46] J. Trontelj, 1999. Optimization of Integrated Magnetic Sensor by Mixed Signal Processing. Proceedings of the 16<sup>th</sup> IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Italy, 1999, pp. 299-302. ISBN 0-7803-5276-9.

## LIITE I

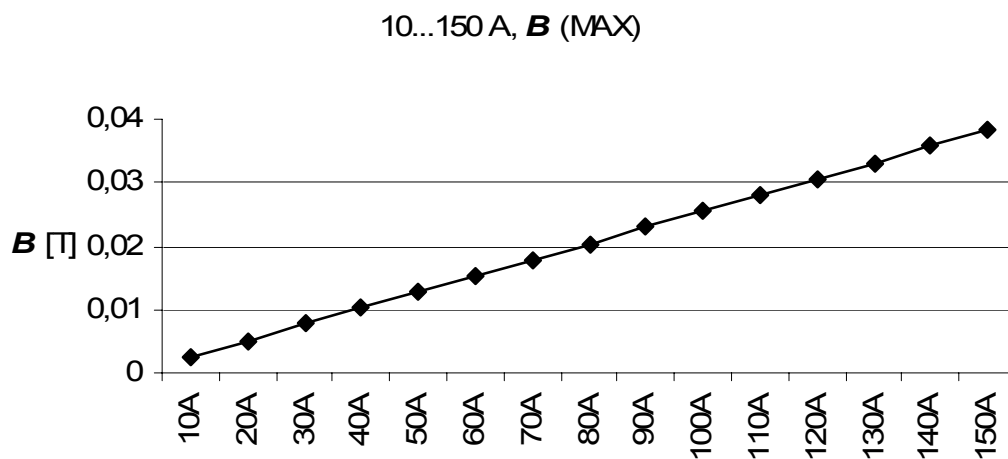
Taulukko I.1. Pyöreän virtajohtimen synnyttämät magneettivuontiheydet erisuuruksilla virroilla ja eri etäisyyksillä johtimesta.

$r$ [m] \ $I$ [A]	20	40	60	80	100	150	200	300
<b>0,005</b>	8,00E-04	1,60E-03	2,40E-03	3,20E-03	4,00E-03	6,00E-03	8,00E-03	1,20E-02
<b>0,01</b>	4,00E-04	8,00E-04	1,20E-03	1,60E-03	2,00E-03	3,00E-03	4,00E-03	6,00E-03
<b>0,015</b>	2,67E-04	5,33E-04	8,00E-04	1,07E-03	1,33E-03	2,00E-03	2,67E-03	4,00E-03
<b>0,02</b>	2,00E-04	4,00E-04	6,00E-04	8,00E-04	1,00E-03	1,50E-03	2,00E-03	3,00E-03
<b>0,025</b>	1,60E-04	3,20E-04	4,80E-04	6,40E-04	8,00E-04	1,20E-03	1,60E-03	2,40E-03
<b>0,03</b>	1,33E-04	2,67E-04	4,00E-04	5,33E-04	6,67E-04	1,00E-03	1,33E-03	2,00E-03
<b>0,035</b>	1,14E-04	2,29E-04	3,43E-04	4,57E-04	5,71E-04	8,57E-04	1,14E-03	1,71E-03
<b>0,04</b>	1,00E-04	2,00E-04	3,00E-04	4,00E-04	5,00E-04	7,50E-04	1,00E-03	1,50E-03
<b>0,045</b>	8,89E-05	1,78E-04	2,67E-04	3,56E-04	4,44E-04	6,67E-04	8,89E-04	1,33E-03
<b>0,05</b>	8,00E-05	1,60E-04	2,40E-04	3,20E-04	4,00E-04	6,00E-04	8,00E-04	1,20E-03
<b>0,055</b>	7,27E-05	1,45E-04	2,18E-04	2,91E-04	3,64E-04	5,45E-04	7,27E-04	1,09E-03
<b>0,06</b>	6,67E-05	1,33E-04	2,00E-04	2,67E-04	3,33E-04	5,00E-04	6,67E-04	1,00E-03
<b>0,065</b>	6,15E-05	1,23E-04	1,85E-04	2,46E-04	3,08E-04	4,62E-04	6,15E-04	9,23E-04
<b>0,07</b>	5,71E-05	1,14E-04	1,71E-04	2,29E-04	2,86E-04	4,29E-04	5,71E-04	8,57E-04
<b>0,075</b>	5,33E-05	1,07E-04	1,60E-04	2,13E-04	2,67E-04	4,00E-04	5,33E-04	8,00E-04
<b>0,08</b>	5,00E-05	1,00E-04	1,50E-04	2,00E-04	2,50E-04	3,75E-04	5,00E-04	7,50E-04
<b>0,085</b>	4,71E-05	9,41E-05	1,41E-04	1,88E-04	2,35E-04	3,53E-04	4,71E-04	7,06E-04
<b>0,09</b>	4,44E-05	8,89E-05	1,33E-04	1,78E-04	2,22E-04	3,33E-04	4,44E-04	6,67E-04
<b>0,095</b>	4,21E-05	8,42E-05	1,26E-04	1,68E-04	2,11E-04	3,16E-04	4,21E-04	6,32E-04
<b>0,1</b>	4,00E-05	8,00E-05	1,20E-04	1,60E-04	2,00E-04	3,00E-04	4,00E-04	6,00E-04

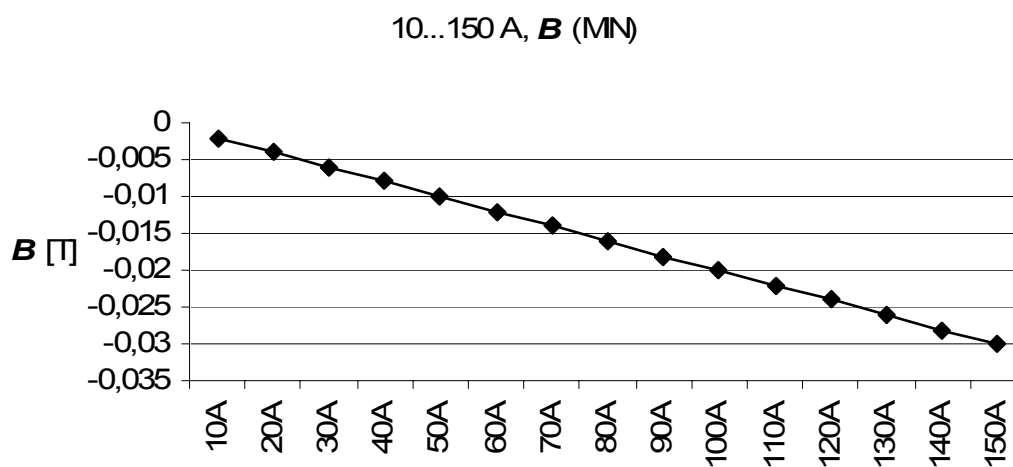
Vitrovac 6150F



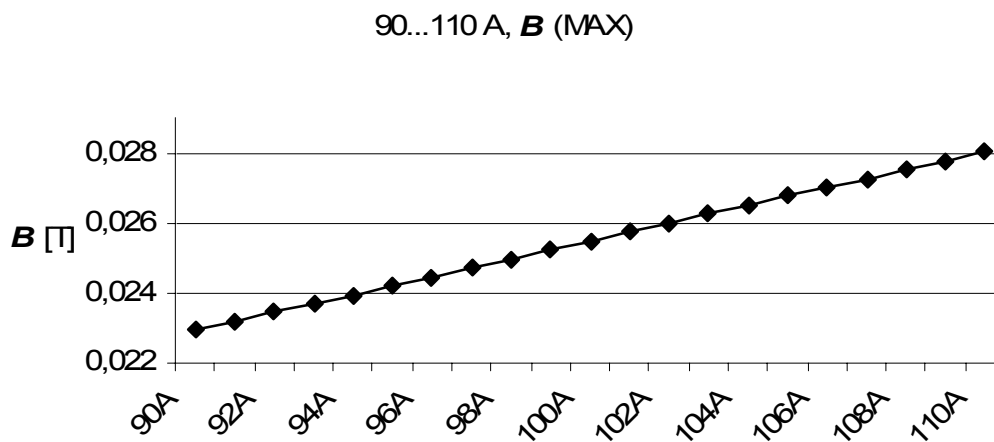
Kuva II.1. Vitrovac 6150F -materiaalin hystereesisilmukka.



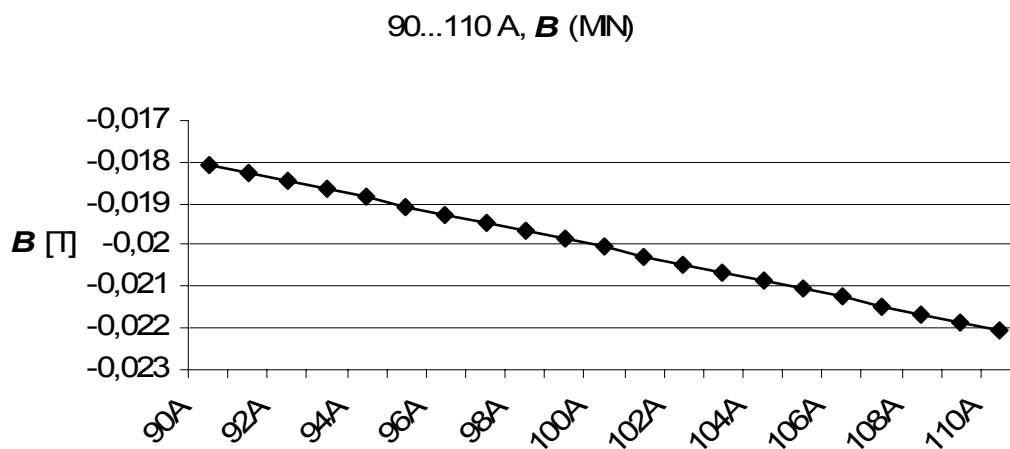
Kuva III.1. Virran arvoilla 10-150 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin maksimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



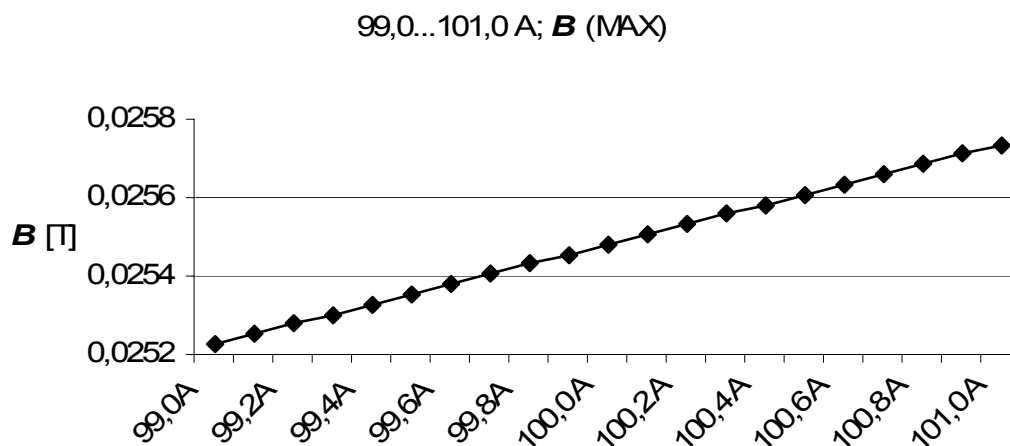
Kuva III.2. Virran arvoilla 10-150 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin minimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



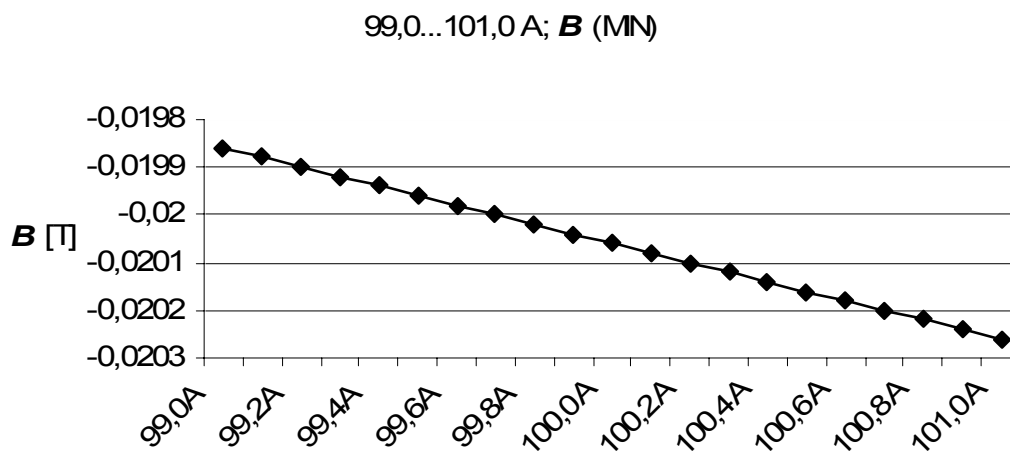
Kuva III.3. Virran arvoilla 90-110 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin maksimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



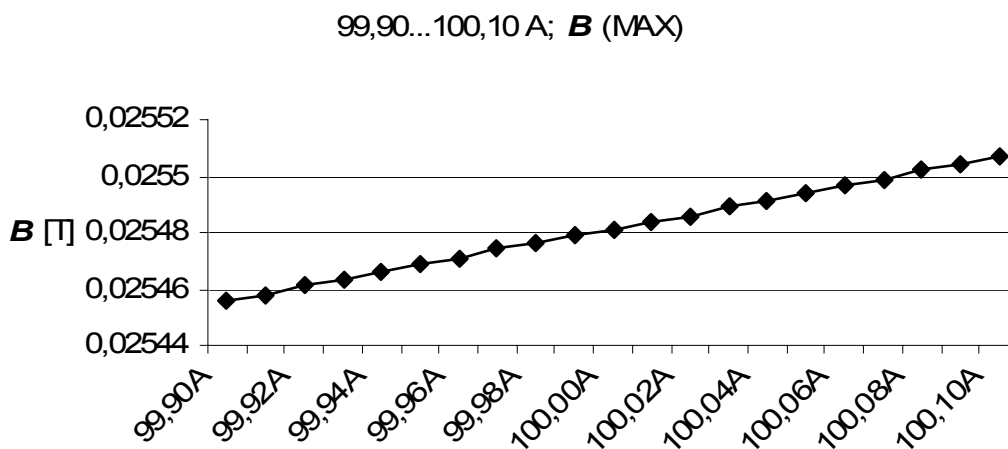
Kuva III.4. Virran arvoilla 90-110 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin minimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



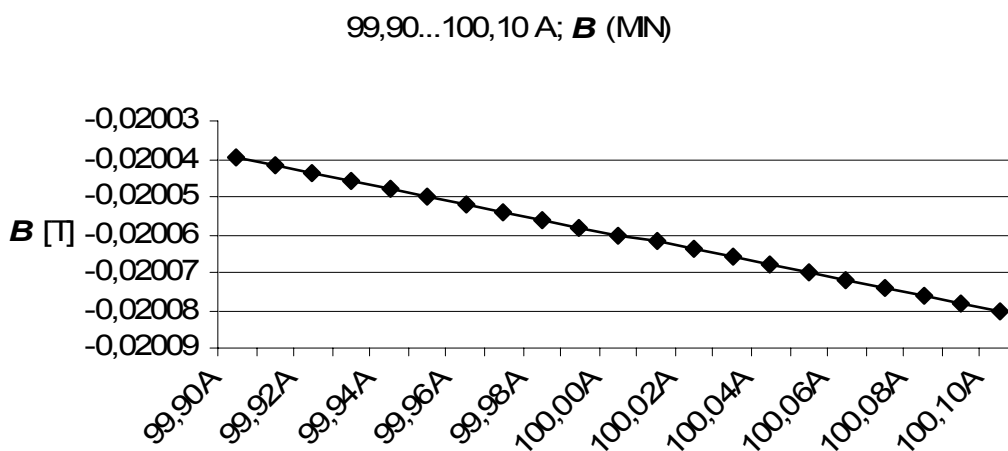
Kuva III.5. Virran arvoilla 99-101 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin maksimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



Kuva III.6. Virran arvoilla 99-101 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin minimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



Kuva III.7. Virran arvoilla 99,9-100,1 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin maksimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.



Kuva III.8. Virran arvoilla 99,9-100,1 A syntyvä magneettivuontiheyden z-komponentin minimiarvo etäisyydellä 1  $\mu\text{m}$  magnetokonsentraattoreista.