

Opinnäytetyö (AMK)
Elektroniikan koulutusohjelma
Elektroniikkasuunnittelu
2015

Maarit Peltomäki

MAGNETOMETRIEN TESTAUKSESSA KÄYTETTÄVÄN KELAJÄRJESTELMÄN VALIDOINTI



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maarit Peltomäki

MAGNETOMETRIEN TESTAUKSESSA KÄYTETTÄVÄN KELAJÄRJESTELMÄN VALIDOINTI

Tämän tutkimustyön tavoitteena oli mitata ja varmistaa Afore Oy:lle suunniteltujen kelajärjestelmien sopivuus osaksi magnetometriä testata. Lisäksi työhön sisältyi Afore Oy:n Kronos-testauskäsittelijään integroitavan lopullisen testausjärjestelmän kehittäminen.

Kelajärjestelmät oli suunniteltu tuottamaan homogeeninen magneettikenttä, ja työssä tutkittiin tuon kentän tasaisuutta sekä kehitettiin mittausrjestelmä. Työ jakaantui kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kehitettiin käytettävissä olleisiin laboratorio-olosuhteisiin sopivia mittausrjestelyjä, mitattiin ja vertailtiin kahden eri kelajärjestelmän tuottaman magneettikentän tasaisuutta sekä valittiin lopullisessa testausjärjestelmässä käytettävä kelasysteemi. Toisessa vaiheessa suunniteltiin testauskäsittelijään integroitava magnetometriä testausjärjestelmä.

Ensimmäinen vaihe suoritettiin tekemällä samanlaisia yhdeksän pisteen mittauksia kahdelle eri prototyypille. Mittaustuloksia analysoitiin laskemalla mittauspisteiden suurin poikkeama keskiarvosta, ja näiden avulla määritettiin tasaisemman kentän tuottava kelajärjestelmä. Toisessa vaiheessa selvitettiin yrityksellä jo käytössä olevan järjestelmän toiminta sekä valittiin sopivat komponentit järjestelmän täydentämiseen magneettikenttätestauksen osalta.

Ensimmäisen vaiheen mittauksen perusteella valittiin prototyyppi, joka tulotisiin integroimaan testauskäsittelijään. Vaikka prototyyppi ei tuottanut niin homogeenistä magneettikenttää kuin oli suunniteltu, tuloksia pidettiin riittävän hyvänä jatkokehitystä varten.

Opinnäytetyön puitteissa suunniteltiin lopullista mittausrjestelmää, mutta aikataulun venymisen vuoksi lopullisia mittaustuloksia ei tässä työssä ole käsitelty. Odotettavissa kuitenkin on tulosten parantuminen kentän homogeenisuuden osalta, sillä lopullinen mittausrjestelmä tulee olemaan tietokoneohjattu ja tarkemmin mitoitettu kuin ensimmäisen vaiheen mittausrjestelyt.

ASIASANAT:

sähkömagneettiset ilmiöt, kalibrointi, magneettikentät, magneettiset ominaisuudet, magnetismi, mittausr, mittaustekniikka, sähköstatiikka, tasasähkö, johtimet, käämi, kela, empiirinen tutkimus, havainnointi, laboratoriotyöt, mittausrmenetelmät, testaus, testauslaitteet, testausmenetelmät, tutkimustyö, validointi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics design

2015 | 49

Instructor: Antti Haarto, Ph. D

Maarit Peltomäki

VALIDATION OF A COIL-BASED SYSTEM USED IN TESTING OF MAGNETOMETERS

The objective of this thesis was to measure and assure the suitability of coil-based systems designed for magnetometer testing for Afore Oy. An additional aim was to develop the final measuring system integrated in the company's test handler called Kronos.

The coil systems were designed to produce a homogeneous magnetic field, and the work included both examination of the field's homogeneity as well as development of the measuring system. The work was divided into two phases. The first phase included developing a suitable measuring system for the conditions that were in use, measuring and comparing the fields produced by two different kinds of coil systems and choosing the system to be used in the final testing conditions. The second phase included the design of the magnetometers' testing system to be included in the test handler.

The first phase was realized by conducting several 9-point measurements for the two coil systems. The results were analyzed by counting the deviation from the measurements' averages' in percentage, and the coil system to be used in the final conditions was chosen based on those measurements. In the second phase, the operation of the measuring system used in the company was clarified and suitable components were chosen to complement the system with the magnetic field testing.

The results of the first phase measurements were less homogeneous than the simulated results, but one of the two coil systems was found suitable for further development. A measuring system to be integrated in the test handler was designed, but due to some delays, the final results were not available for publishing in this thesis. However, it was expected that the results would improve compared to the first phase, since the final measurement system would be computer-controlled and therefore more accurate.

KEYWORDS:

electromagnetic phenomena, calibration, magnetic field, magnetic characteristics, magnetism, measurement, measurement technique, electrostatics, direct electricity, conductors, coil, empiric study, observation, laboratory work, testing, testing equipment, testing methods, research, validation

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT	7
1 JOHDANTO	8
2 MAGNEETTIKENTTIEN TEORIAA	10
2.1 MAGNEETTIKENTTÄ JA MAGNEETTISET MATERIAALIT	10
2.2 BIOTIN-SAVARTIN LAKI	14
2.3 HELMHOLTZIN KELAT JA MUITA AIHEESEEN LIITTYVIÄ TUTKIMUKSIA	19
3 TAVOITE	23
3.1 KELAJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET	23
3.2 TUTKIMUSTYÖN TAVOITTEET	24
3.3 TAVOITELTU MITTAUSJÄRJESTELMÄ	24
4 MITTAUKSET	25
4.1 MITTALAITTEET	25
4.2 MITTAUSJÄRJESTELYT	30
4.3 ENSIMMÄISEN PROTOTYYPIN MITTAUKSET	33
4.3.1 MITTAUSKYTKENTÖJEN MITOITUKSET	34
4.3.2 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI	37
4.4 TOISEN PROTOTYYPIN MITTAUKSET	38
5 LOPULLINEN MITTAUSJÄRJESTELMÄ	41
5.1 KRONOS- LIIKEANTUREIDEN TESTAUSKÄSITTELIJÄ	41
5.2 KELAJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	42
5.3 MITTAUSTEN VALIDOINTI ERI MAGNETOMETRIEN AVULLA	43
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
LÄHTEET	48

LIITTEET

Liite 1. Validointiin käytettävien magnetometrien kommunikointilevyn kytkentäkaavio.

KUVAT

Kuva 1. Vuoviivat kuvastavat magneettivuon tiheyttä ja suuntaa. [3]	10
Kuva 2. Hystereesikäyrä esittää aineen magneettivuon tiheyden muutoksen ulkoisen magneettikentän funktiona. [6]	13
Kuva 3. Johtimen äärettömän pienen segmentin ds etäisyys pisteestä A on r .	15
Kuva 4. Äärellisen pitkä virtajohdin xy -tasossa. [9]	16
Kuva 5. Vektori r yksikköympyrässä.	17
Kuva 6. Ympyräjohdin xy -tasossa. [9]	19
Kuva 7. Helmholtzin kelat.	20
Kuva 8. Merrittin ja Purcellin tutkimuksen kelajärjestelmän kuvaus. [10]	21
Kuva 9. Phywen teslamittari 13610-93.	25
Kuva 10. Phywen teslamittarin mittapäät: vasemmalla 13610-02 ja oikealla 13610-01.	26
Kuva 11. MAG3110-anturin käyttöliittymä.	27
Kuva 12. HMR2300-anturin käyttöliittymän iskujen lukumäärä -ikkuna.	29
Kuva 13. Mittauspisteet ja akselien suunnat.	30
Kuva 14. Mittausjärjestelyissä käytetty ristisyöttöpöytä.	32
Kuva 15. Yksinkertaistettu kuva ensimmäisen prototyypin eri kelakerroksista.	34
Kuva 16. Ensimmäinen mittauskytkentä.	34
Kuva 17. Virtalähdekytkentä.	36
Kuva 18. Toisen prototyypin mittauskytkentä.	39
Kuva 19. Kronos-testauskäsittelijän kaksi rajattomasti kääntyvää akselia.	41
Kuva 20. Kelojen ristikytkentälevyn kytkentäkaavio.	43
Kuva 21. Ensimmäinen prototyyppi.	45
Kuva 22. Teippikehys testauskäsittelijään kiinnitettynä, magnetometri ympyröity punaisella.	47

TAULUKOT

Taulukko 1. Joidenkin aineiden magneettisia susceptibiliteetteja huoneenlämpötilassa. [4], [6]	12
Taulukko 2. Käytössä olleiden antureiden keskeisiä ominaisuuksia. [12], [13]	27
Taulukko 3. Esimerkki MAG3110-anturin mittaustulosten tulkinnasta.	28
Taulukko 4. Pisteiden 1–4 ja 6–9 koordinaatit (x, y, z) .	31
Taulukko 5. Ristisyöttöpöydän raudan vaikutusta tutkivia mittaustuloksia.	33
Taulukko 6. Käytettävissä olleiden vastusten tehon- ja virrankestot.	35

Taulukko 7. Ensimmäisen prototyypin mittaustuloksia.	38
Taulukko 8. Toisen prototyypin mittaustuloksia.	39
Taulukko 9. Mittausjärjestelmän validointiin valitut magnetometrit.[20] [21] [22]	44

KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT

B	magneettivuon tiheys
T	tesla, magneettivuon tiheyden yksikkö
H	magneettikentän voimakkuus
A/m	magneettikentän voimakkuuden yksikkö
μ	permeabiliteetti
$V_s/(Am)$	permeabiliteetin yksikkö
χ_m	magneettinen susceptibiliteetti
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto
DC	tasavirta
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
AC	vaihtovirta
I	virta
N	kelan kierroslukumäärä, yksikötön
V	voltti, jännitteen yksikkö
A	ampeeri, virran yksikkö
L	induktanssi, kela
R	resistanssi, vastus
Ω	ohmi, resistanssin yksikkö
W	watti, tehon yksikkö
P	teho
U	jännite
PNP	transistorin tyyppi
Vdc	tasajännitelähde
g	putoamiskiihtyvyyys, maan pinnalla noin 9,81 m/(s ²)
NI	National Instruments, teknologiayritys
SPI	Serial peripheral interface, ohjelmoinnissa käytettävä protokolla

1 JOHDANTO

Tuotantoautomaatiolaitteita valmistava Afore Oy on kehittänyt Kronos-nimisen testauskäsittelijän, jolla testataan kulmanopeus- ja matalakiihtyvyyssantureita. Yritys halusi täydentää tämän järjestelmän ominaisuuksia magnetometriä testauksella ja kalibroinnilla. Tätä varten tuli kehittää systeemi, joka tuottaisi tunnetun, homogeenisen magneettikentän ennalta määritellylle alueelle. Haastetta työlle aiheutti erityisesti se, että magneettikentän tuottava järjestelmä tuli pystyä integroimaan olemassa olevaan laitteeseen ja näin ollen järjestelmän fyysiset rajoitukset olivat tarkkaan määrättyt.

Homogeenisen magneettikentän tuottamisesta on hankalaa löytää suomenkielistä kirjallisuutta ja näin ollen myöskään opinnäytetöitä kyseisestä aiheesta ei löytynyt. Löydetyt magneettikenttiin liittyvät opinnäytetyöt tutkivat yleensä jonkin komponentin tai laitteen aiheuttamaa magneettikenttää. Markus Viitanen keskittyy opinnäytetyössään [1] pintaliitoskelojen magneettikentän tasaisuuden mittaamiseen eri taajuuksilla valitulla etäisyydellä kelasta. Lisäksi on tehty useita töitä liittyen terveydenhuoltoalalla käytettävien laitteiden aiheuttamien magneettikenttien tutkimiseen.

Luvussa 2 käsitellään magneettikentän teoriaa, erilaisten magneettisten aineiden ominaisuuksia sekä magneettikentän syntyä. Lisäksi kerrotaan tunnetuista menetelmistä tuottaa lähes homogeeninen magneettikenttä, sekä näiden menetelmien rajoitteista. Tasaisen magneettikentän tuottamisesta löytyi kirjallisuutta erityisesti American Institute of Physicsin kokoelmista, ja näistä julkaisuista kerrotaan luvussa 2.3. Luvussa käsitellään myös sitä, miksi näitä menetelmiä ei voitu käyttää työhön liittyvässä projektissa, vaan oli tarve kehittää uudenlainen, tähän sovellukseen sopiva tapa tuottaa homogeeninen magneettikenttä.

Tämä opinnäytetyö on osa projektia, jonka tavoitteet jaettiin useaan vaiheeseen. Projektin ensimmäisessä vaiheessa määriteltiin ne parametrit, joiden perusteella magneettikentän tuottamista suunniteltiin. Magneettikenttää päätettiin tuottaa kela-järjestelmällä, jonka suunnittelu ei kuulunut tähän opinnäytetyöhön. Luvussa 3 on

kuitenkin kirjattu myös kelajärjestelmän suunnitteluvaiheen tavoitteet, sillä niiden perusteella arvioitiin kelajärjestelmien mittausvaiheessa saatuja tuloksia. Mittausvaiheen ja sitä seuranneen lopullisen järjestelmän suunnittelun tavoitteista on myös kerrottu luvussa 3.

Luvussa 4 käydään läpi prototyyppien mittauksessa käytetyt menetelmät sekä arvioidaan kokeiltujen menetelmien toimivuutta. Mittauksissa oli lopulta käytössä kaksi erilaista kelaprototyyppiä, ja nämä vaativat omanlaisensa mittausjärjestelyt. Neljännessä luvussa kerrotaan myös tavasta, jolla tulokset analysoitiin sekä tulosten perusteella tehdyt johtopäätökset lopullisessa järjestelmässä käytettävästä kelasysteemistä.

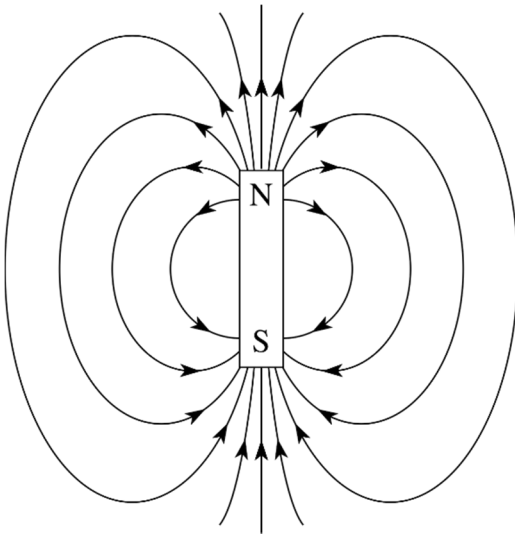
Sopivan kelajärjestelmän valinnan jälkeen työssä suunniteltiin lopullinen mittausjärjestelmä integroitavaksi yrityksen olemassa olevaan käsittelijään. Tästä suunnittelutyöstä on kerrottu luvussa 5, minkä lisäksi luvussa esitellään tarkemmin käsittelijää ja sen ominaisuuksia.

2 MAGNEETTIKENTTIEN TEORIAA

2.1 MAGNEETTIKENTTÄ JA MAGNEETTISET MATERIAALIT

Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan staattisia eli ajasta riippumattomia magneettikenttiä. Näin ollen dynaamiset magneettikentät ja niiden teoria jätetään käsittelemättä.

Staattinen magneettikenttä syntyy joko pysyvästi magnetoituneen materian ympärille, tai se voidaan synnyttää liikkuvien sähkövarausten avulla. Magneettikenttää kuvataan vuoviivoilla, jotka ovat aina sulkeutuvia käyriä [2]. Kuvasta 1 nähdään, että sauvamagneetilla on pohjois- ja eteläkohtiot, joita merkitään vastaavasti kirjaimilla N ja S. Magneettikentän suunnaksi on magneetin ulkopuolella sovittu pohjoiskohtiosta eteläkohtioon. Magneettivuon tiheimmillään lähellä magneetin napoja.



Kuva 1. Vuoviivat kuvastavat magneettivuon tiheyttä ja suuntaa. [3]

Vuoviivojen tiheyttä kuvastaa suure magneettivuon tiheys B (yksikkönä T eli tesla, $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$). Tämän lisäksi tärkeimpiä magnetismiin liittyviä suureita ovat magneettikentän voimakkuus H (yksikkö A/m) ja permeabiliteetti μ , joka koostuu tulona

tyhjän permeabiliteetista μ_0 ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am)) sekä väliaineen suhteellisesta permeabiliteetista μ_r .

Tekstissä ja kaavoissa vektorit erotetaan skalaariluvuista merkitsemällä vektorit lihavoidulla fontilla (esim. magneettikentän tiheys $\mathbf{B} = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}$). Karteesisen koordinaatiston akselien x, y ja z suuntaisia yksikkövektoreita merkitään \mathbf{i} , \mathbf{j} ja \mathbf{k} .

Magneettikentän voimakkuus \mathbf{H} ja tiheys \mathbf{B} ovat vektorisuureita, eli niillä on sekä suuruus että suunta. Magneettikentän tiheys ja voimakkuus yhdistyvät toisiinsa kaavan

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

kautta.

Kaavan (1) lineaarisuuteen vaikuttavat väliaineen magneettiset ominaisuudet, joita voidaan kuvata magneettisella susceptibiliteetillä, merkintänä χ_m . Magneettinen susceptibiliteetti on SI-järjestelmässä laaduton suure. Magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välinen yhteys voidaan kirjoittaa susceptibiliteetin avulla muotoon

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \cdot \mathbf{H} = \mu \cdot \mathbf{H}$$

Jos $\chi_m < 0$, ainetta kutsutaan diamagneettiseksi, ja se heikentää ulkoista magneettivuon tiheyttä. Jos taas $\chi_m > 0$, kutsutaan ainetta paramagneettiseksi, ja se vahvistaa ulkoista magneettikenttää. [4]

Para- ja diamagneettisilla aineilla susceptibiliteetti on pieni, yleensä $|\chi_m| < 10^{-3}$ [3], joten niiden magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välinen yhteys on melko lineaarinen ja aineen permeabiliteetti voidaan laskuissa olettaa samaksi kuin tyhjän permeabiliteetti. Ferromagneettisilla aineilla (esim. rauta, koboltti ja myy-metalli) yhteys magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välillä ei ole lineaarinen. Näihin aineisiin muodostuu niiden atomien kokoon nähden suuria magneettisia alkeisalueita, kun aineen magneettimomentit pyrkivät kääntymään samansuuntaisiksi. Ulkoinen magneettikenttä kasvattaa näitä alkeisalueita, ja samalla kenttä pyrkii kääntämään kaikki alkeisalueet samansuuntaisiksi.

Taulukossa 1 on esitetty joidenkin aineiden susceptibiliteetteja huoneenlämpötilassa. Kuten taulukosta 1 nähdään, ferromagneettisista aineista selkeästi suurin susceptibiliteetti on myy-metallilla, jonka nimikin juontaa juurensa sen suureen permeabiliteettiin eli μ -arvoon. Myy-metalli koostuu pääosin nikkelistä (noin 80 %) ja molybdeenistä (noin 4-5 %) [5].

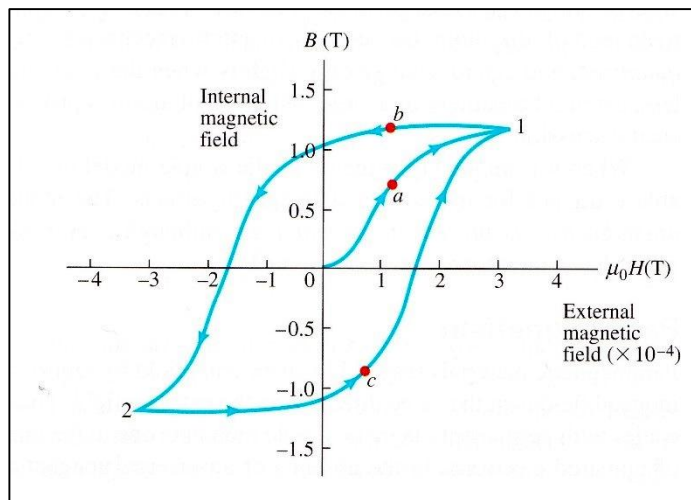
Taulukko 1. Joidenkin aineiden magneettisia susceptibiliteetteja huoneenlämpötilassa. [4], [6]

aine	magneettinen susceptibiliteetti
alumiini	$2,1 \cdot 10^{-5}$
elohopea	$-2,8 \cdot 10^{-5}$
happi	$193,5 \cdot 10^{-8}$
hopea	$-2,4 \cdot 10^{-5}$
kulta	$-3,5 \cdot 10^{-5}$
kupari	$-0,98 \cdot 10^{-5}$
magnesium	$1,2 \cdot 10^{-5}$
rauta	$5,5 \cdot 10^3$
myy-metalli	$1 \cdot 10^5$

Myy-metallista tuotetaan muun muassa magneettisia suoja. Nämä suojat eivät perustu magneettikenttien eristämiseen, vaan kenttien kulkusuunnan hallitsemiseen. Yksi myy-metallista tehtyjen suojien suurimmista valmistajista on amerikkalainen Magnetic Shield Corporation, joka on kehittänyt aineen käyttöä jo yli 70 vuotta. Magneettisten suojien kehittäminen alkoi alun perin NASAn tarpeista kontrolloida magneettikenttiä laitteissaan, ja myy-metallista tehtyjen suojien kysyntä kasvoi toisen

maailmansodan aikana. Suojia voidaan käyttää sekä DC-kenttiä että korkeataajuisia (1 MHz) AC-kenttiä tuottavien lähteiden ja kytkentöjen yhteydessä. Niiden tarve on monipuolistunut käytettäessä yhä herkempiä elektronisia komponentteja laitteissa. [5]

Ferromagneettisilla aineilla permeabiliteetti μ on ulkoisen magneettikentän voimakkuuden H funktio, eli $\mu = \mu(H)$. Magneettikentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden välinen epälineaarisuus käy ilmi hystereesikäyrästä (kuva 2).



Kuva 2. Hystereesikäyrä esittää aineen magneettivuon tiheyden muutoksen ulkoisen magneettikentän funktiona. [6]

Alkutilanteessa, kun ulkoinen kenttä on 0, myös aineen magneettivuon tiheys on 0. Ulkoisen kentän kasvaessa aineen kenttä seuraa polkua a . Saavutettuaan niin sanotun kyllästystilan, aineen magneettivuon tiheys kasvaa lineaarisesti ulkoisen kentän mukana. Kun ulkoinen magneettikenttä alkaa pienentyä, pienenee aineen magneettivuon tiheys polun b mukaisesti. Ferromagneettisilla aineilla ulkoisen magneettikentän kasvattaminen siis voimistaa aineen magneettivuuden tiheyden kasvamista, ja magneettikentän pienentyessä magneettivuon tiheyden pieneneminen hidastuu.

Ferromagneettiset aineet jaetaan magneettisesti pehmeisiin ja magneettisesti koviin materiaaleihin. Magneettisesti pehmeillä materiaaleilla hystereesikäyrä on kaapea, eli magnetoituminen on lähes lineaarista. Magneettisesti kovilla materiaaleilla

taas hystereesikäyrä on leveä, jolloin niiden magnetointi vaatii suuren ulkoisen magneettikentän. Tällaisia materiaaleja käytetään kestopagneettien valmistuksessa, sillä niiden magnetisoitumisen purkaminen on yhtä lailla suuren työn takana.[6]

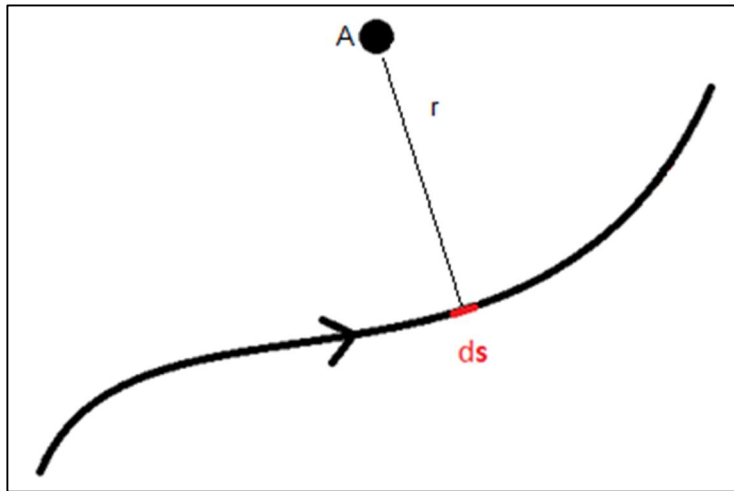
Maapallon magneettikenttä käyttäytyy samalla tavoin kuin suuri sauvamagneetti, jonka pohjoiskohtio sijaitsee lähellä maantieteellistä Etelänapaa ja eteläkohtio lähellä maantieteellistä Pohjoisnapaa. Maan magneettikenttä vaihtelee eri puolilla maapalloa välillä $20 \mu\text{T} - 70 \mu\text{T}$ [7]. Suomessa muutoksia magneettikentässä, niin lyhyt- kuin pitkäaikaisiakin, seurataan Nurmijärven geofysiikan observatoriossa sekä Oulun yliopiston Sodankylän geofysiikan observatoriossa [8].

Tässä työssä keskitytään monikerroksisten virtasilmutkoiden, toisin sanoen kelojen aiheuttamiin magneettikenttiin, kun niille syötetään tasasähkövirtaa. Edellä mainittujen ominaisuuksien vuoksi ferromagneettisten aineiden käyttö mittaussjärjestelyissä saattaisi vaikuttaa tuloksiin, joten niiden käyttöä on pyritty välttämään. Ferromagneettiset aineet mittaussjärjestelmässä voisivat aiheuttaa mittausalueelle hallitsemattomia kenttiä ja vääristää näin ollen mittaustuloksia. Esimerkiksi kelojen sydänaineena ferromagneettiset aineet keskittävät magneettikentän kelan sydämeen. Näin ollen työssä käytetään ilmasydämisiä keloja, sillä ilman suhteellinen permeabiliteetti on noin 1. Kaavan (1) perusteella siis $\mu = \mu_0$. Muiden mittauksiin vaikuttavien ulkoisten tekijöiden huomioon ottamisesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.

2.2 BIOTIN-SAVARTIN LAKI

Symmetristen virtajohdinten, kuten ympyrän muotoisen virtasilmutkan tai sylinterisymmetrisen virtajohtimen, magneettikenttä voidaan ratkaista esimerkiksi Ampèren lakia tai lävistyslakia käyttäen. Nämä lait eivät kuitenkaan ole käyttökelpoisia epäsymmetrisessä tilanteessa, jolloin voidaan näiden sijaan käyttää joko vektoripotentiaalia tai Biotin-Savartin lakia. Tässä työssä käytetyt kelat on suunniteltu Biotin-Savartin lakia käyttäen, joten tämän lain taustaa esitellään seuraavaksi tarkemmin.

Virran kulkiessa johtimessa, virran aiheuttama magneettikenttä pisteessä A etäisyydellä r voidaan laskea summaamalla johtimen äärettömän pienten segmenttien ds aiheuttamat magneettikenttävektorit kyseisessä pisteessä (kuva 3).



Kuva 3. Johtimen äärettömän pienen segmentin ds etäisyys pisteestä A on r .

Merkitään johtimen osion ja pisteen A välisen etäisyyden r suuntaista yksikkövektoria symbolilla \mathbf{r} , jolloin Biotin-Savartin lain mukaan johtimen osaa ds vastaavan magneettivuon tiheyden osuus pisteessä A on

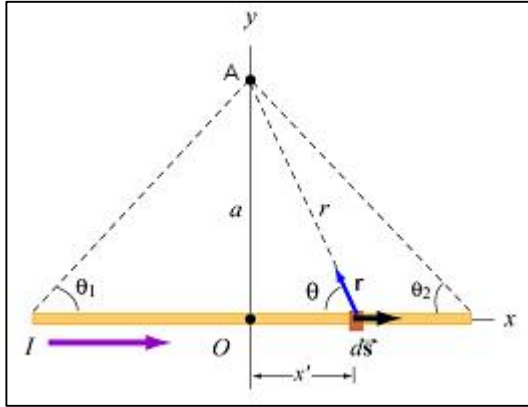
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I \, d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{r^2},$$

missä I on johtimessa kulkeva virta ampeereina ja μ väliaineen permeabiliteetti. Tästä lausekkeesta voidaan ratkaista magneettivuon tiheys \mathbf{B} integroimalla. Mikäli johtimessa on useita kierroksia, lisätään kaavaan tämä kierroslukumäärä N kertojaksi.

Esimerkkejä Biotin-Savartin lain käytöstä [9]

Tarkastellaan ensimmäisenä esimerkkinä Biotin-Savartin lain käytöstä äärellisen, suoran virtajohtimen aiheuttaman magneettikentän laskemista. Asetetaan kuvan 4

mukaisesti johdin x-akselille symmetrisesti y-akselin suhteen ja tutkitaan siinä kulkevan virran aiheuttamaa magneettikenttää y-akselilla sijaitsevassa pisteessä A. Virtajohdin ja piste A sijaitsevat siis xy-tasossa, joten z-koordinaatti on joka paikassa 0.



Kuva 4. Äärellisen pitkä virtajohdin xy-tasossa. [9]

Kuvassa 4 a on virtajohtimen ja pisteen A välinen kohtisuora etäisyys, r on virtajohtimen äärettömän pienen osan ds etäisyys pisteeseen A, ja \mathbf{r} on r :n suuntainen yksikkövektori. I on johtimessa kulkevan virran suuruus ampeereina. Piste A paikkavektori on siis $a\mathbf{j}$, ja äärettömän pienen johtimen osan ds paikkavektori on $x'\mathbf{i}$. Näin ollen etäisyyttä r kuvaava vektori on $a\mathbf{j} - x'\mathbf{i}$, ja etäisyys on

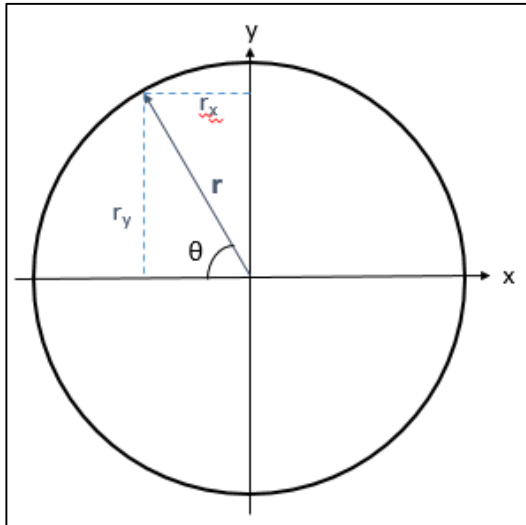
$$r = \sqrt{a^2 + (-x')^2} = \sqrt{a^2 + x'^2}.$$

Näistä saadaan vektorien laskusäännöillä määritettyä yksikkövektori \mathbf{r} :

$$\mathbf{r} = \frac{a\mathbf{j} - x'\mathbf{i}}{\sqrt{a^2 + x'^2}}$$

Koska yksikkövektorin pituus on aina 1, voidaan \mathbf{r} ilmaista myös kulman θ ja akselien suuntaisten yksikkövektoreiden \mathbf{i} ja \mathbf{j} avulla (kuva 5):

$$\mathbf{r} = r_y\mathbf{j} - r_x\mathbf{i} = \sin(\theta)\mathbf{j} - \cos(\theta)\mathbf{i}$$



Kuva 5. Vektori \mathbf{r} yksikköympyrässä.

Näin ollen

$$d\mathbf{s} \times \mathbf{r} = dx' \mathbf{i} \times (\sin(\theta) \mathbf{j} - \cos(\theta) \mathbf{i}) = (dx' \cdot \sin(\theta)) \cdot \mathbf{k}$$

Magneettivuon tiheys voidaan nyt siis kirjoittaa muotoon

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I dx' \cdot \sin(\theta)}{r^2} \cdot \mathbf{k}$$

Tuloksesta nähdään, että magneettivuon tiheyden suunta kyseisessä tapauksessa on positiivisen z-akselin suuntaan, eli paperin tasosta ulospäin. Tätä kutsutaan myös oikean käden kiertosäännöksi; jos otetaan kuvitteellisesti oikealla kädellä johtimesta kiinni ja asetetaan peukalo osoittamaan virran suuntaan, osoittavat muut sormet magneettikentän suuntaan.

Määritetään seuraavaksi dx' ja r johtimen ja tarkastelupisteen välisen etäisyyden a suhteen.

$$\tan(\theta) = \frac{a}{x'} \Leftrightarrow x' = \frac{a}{\tan(\theta)} \Leftrightarrow dx' = \frac{-a}{\sin^2(\theta)} d\theta$$

$$\sin(\theta) = \frac{a}{r} \Leftrightarrow r = \frac{a}{\sin(\theta)}$$

Siis:

$$dB = \frac{\mu I}{4\pi} \cdot \frac{-a}{\sin^2(\theta)} \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\sin^2(\theta)}{a^2} d\theta = -\frac{\mu I \cdot \sin(\theta)}{4\pi a} d\theta$$

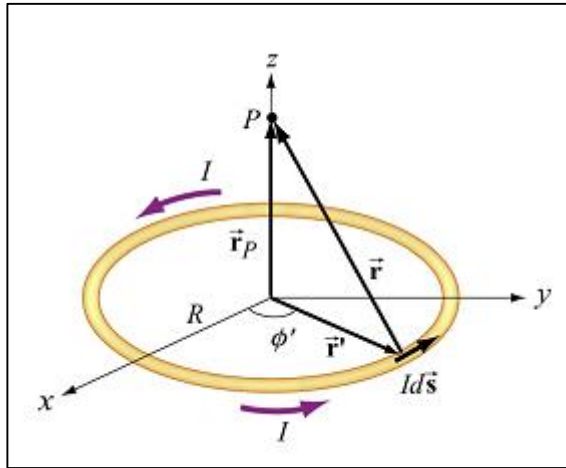
Kuvan merkintöjä käyttäen lasketaan magneettivuon tiheys integroimalla kulmasta $\pi - \theta_1$ kulmaan θ_2 .

$$\begin{aligned} B &= -\frac{\mu I}{4\pi a} \cdot \int_{\pi - \theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) d\theta = -\frac{\mu I}{4\pi a} \cdot (-\cos(\theta_2) + \cos(\pi - \theta_1)) \\ &= \frac{\mu I}{4\pi a} \cdot (\cos(\theta_2) - \cos(\pi - \theta_1)) \end{aligned}$$

Tästä saadaan johdettua myös äärettömän pitkän johdon magneettivuon tiheys, kun merkitään johdon pituutta L , eli $L \rightarrow \infty$ ja $\theta_1 = \theta_2 = 0$:

$$B = \frac{\mu I}{4\pi a} \cdot (\cos(0) - \cos(\pi)) = \frac{\mu I}{4\pi a} \cdot (1 + 1) = \frac{\mu I}{2\pi a}$$

Samalla tavoin kuin johdettiin suoran johdon magneettivuon tiheys, voidaan Biotin-Savartin lain avulla ratkaista ympyrän muotoisen virtajohtimen aiheuttama magneettivuon tiheys. Ratkaisuun päästään määrittämällä äärettömän pienen virta-alkion paikkavektori sekä tarkastelupisteen paikkavektori tähän virta-alkioon nähden. Soveltamalla lakia tilanteessa, jossa tarkastelupiste on ympyrän muotoisen johdinten keskiakselilla ja johdin xy -tasossa (kuvan 6 mukainen tilanne) saadaan tulos, jonka mukaan magneettivuon tiheyden x - ja y -komponentit ovat 0.



Kuva 6. Ympyräjohtin xy-tasossa. [9]

Pystyakselin eli z-akselin suuntainen kenttäkomponentti voidaan kirjoittaa:

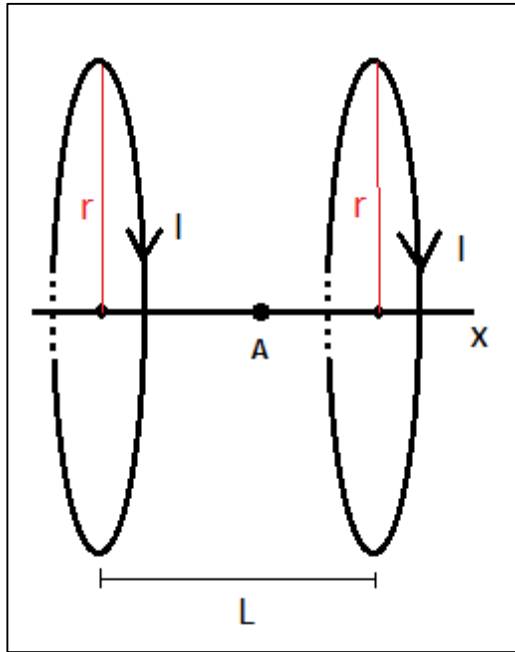
$$B_z = \frac{\mu I R^2}{2 \cdot (R^2 + z^2)^{3/2}}$$

missä I on johtimessa kulkevan virran suuruus, z tarkastelupisteen etäisyys origosta ja R ympyräjohtimen säde. Mikäli tarkastelupiste sijaitsee ympyräjohtimen tasossa eli $z = 0$, supistuu kaava muotoon

$$B_z = \frac{\mu I}{2R}$$

2.3 HELMHOLTZIN KELAT JA MUITA AIHEESEEN LIITTYVIÄ TUTKIMUKSIA

Yksi tunnettu tapa tuottaa kelojen avulla lähes homogeeninen magneettikenttä on Helmholtzin kelat. Asetetaan kaksi saman säteistä virtasilmuksaa niin, että niiden keskiakselit kulkevat x-akselin suuntaisesti (kuva 7).



Kuva 7. Helmholtzin kelat.

Biotin-Savartin lain mukaan magneettivuon tiheys pisteessä A, joka sijaitsee x-akselilla yhtä kaukana molempien silmukoiden keskipisteestä, on

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot r^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\left[\left(x - \frac{L}{2} \right)^2 + r^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left[\left(x + \frac{L}{2} \right)^2 + r^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right)$$

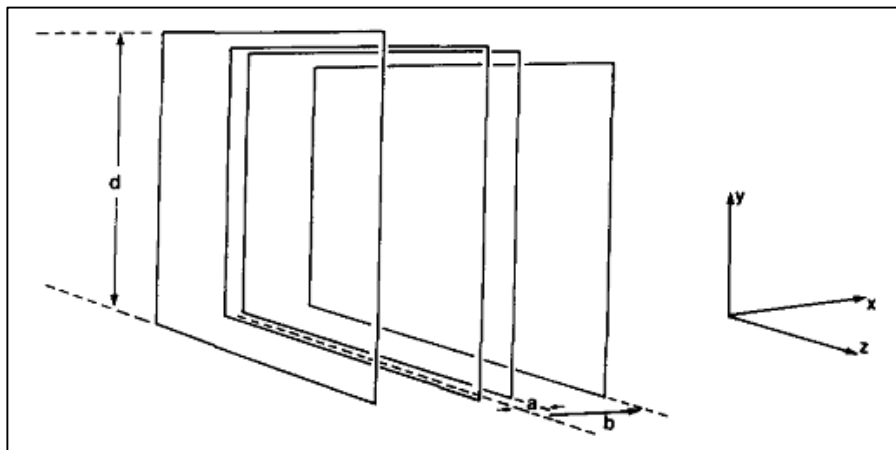
Huomioitavaa on tässä, että magneettivuon tiheyden suunta on x-akselin suuntaisen, sillä symmetria kumoaa y- ja z-akselien suuntaiset komponentit. Helmholtzin keloilla kelojen keskipisteiden välimatka L on yhtä suuri kuin kelojen säde r , joten yhtälö supistuu muotoon

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot r^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\left[x^2 - x \cdot r + \frac{5}{4} r^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left[x^2 + x \cdot r + \frac{5}{4} r^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Magneettikentän homogeenisuutta kelojen välillä voidaan tutkia yhtälön derivaatan avulla, kun valitaan $x = 0$. Edellisen yhtälön derivaatta dB/dx on nolla, kun x on nolla. Voidaan osoittaa, että myös toinen ja kolmas derivaatta on 0, ja neljäskin derivaatta on hyvin pieni. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että magneettikenttä on lähes homogeeninen pienellä alueella kelojen keskellä. [9]

Helmholtzin keloista on kehitetty menetelmiä tuottamaan vieläkin tasaisempia magneettikenttiä käyttäen useampia keloja. Lisäksi Helmholtzin keloista on kehitelty neliön muotoisia kelajärjestelmiä, jotka vievät vähemmän tilaa.

Merrittin ja Purcellin vuonna 1983 tehdyn tutkimuksen [10] perusteella kuvan 8 mukaisella neljän kelan systeemillä saadaan magneettivuon tiheyden kuudeskin derivaatta arvoon 0 origossa. Tässä tapauksessa origo on asetettu kelojen keskiakselille pisteeseen, joka sijaitsee välimatkan a päässä sisemmistä keloista. Tällaiseen lopputulokseen päästään, kun välimatkan a ja kelojen sivun pituuden d suhde on 0,128106 ja uloimpien kelojen välimatkan keskipisteestä b ja sivun pituuden d suhde on 0,505492.



Kuva 8. Merrittin ja Purcellin tutkimuksen kelajärjestelmän kuvaus. [10]

Suomessa on Nurmijärven geofysiikan observatoriossa Helmholtzin keloihin perustuva järjestelmä, jonka avulla voidaan esimerkiksi kumota Maan magneettikenttä. Tästä on hyötyä erityisesti mittalaitteiden kalibroinnissa. [8]

Lambert ja Wright tutkivat [11] sauvamagneettien avulla toteutetun magneettikentän homogeenisuutta. Yksi heidän tutkimuksensa tavoitteista oli kumota laboratoriotilojen magneettisten materiaalien aiheuttamat epähomogeenisuudet magneettikentässä. He pystyivätkin tuottamaan pienelle alueelle (pallonmuotoinen alue, jonka halkaisija oli noin metri) magneettikentän, jonka voimakkuus vaihteli alle 8 nanoteslaa noin 10 cm:n matkalla keskiakselilla. Magneettikenttä tuotettiin viiden sauvamagneettiparin avulla. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin Helmholtzin kelaparia kumoamaan Maan magneettikenttä mittausalueella. [11]

Helmholtzin kelojen tai niihin perustuvien kelasysteemien käyttö tässä työssä jouduttiin kuitenkin hylkäämään rajoitetun tilan vuoksi. Samasta syystä ei tässä työssä voitu tuottaa magneettikenttää sauvamagneettien avulla. Tila, johon lopullisen kelasysteemin tuli mahtua, oli xy-tasossa noin 100 mm:n levyinen, ja xz- sekä yz-tasoissa tila oli mittaustason alapuolella rajoitettu kahteen millimetriin. Työn tavoitteena oli homogeenisen magneettikentän muodostaminen kaikissa kolmessa suunnassa (x, y, z), joten kelapareja tai -systeemejäkin olisi tarvittu kolme kappaletta. Lisäksi näiden kelasysteemien käyttäminen olisi vaatinut tilaa mittaustason alapuolella enemmän kuin oli tarjolla.

3 TAVOITE

Työn tavoitteet jaettiin kolmeen osa-alueeseen. Kelajärjestelmän suunnitteluperusteet muodostivat reunaehdot, joiden sisällä lopullisen järjestelmän tuli toimia. Tutkimustyön tavoitteet kattoivat ne asiat, joita itse mittauksissa tutkittiin ja joihin mitaustuloksia verrattiin. Yritykselle rakennettavan mittausjärjestelmän tavoitteet määräytyivät yrityksen käytettävissä olevien resurssien ja asiakasvaateiden mukaan. Tässä luvussa on käsitelty näiden kolmen osa-alueen tavoitteita.

3.1 KELAJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET

Työn tilanneella yrityksellä oli tarkat vaatimukset kelasysteemin fyysisten mittojen sekä tuotetun magneettikentän suhteen. Opinnäytetyön tekemiseen ei liittynyt itse kelasysteemin suunnittelua, joten siihen ei tässä raportissa keskitytä muutoin kuin kertomalla järjestelmälle asetetut vaatimukset.

Työn lopullinen tavoite oli piirilevylle rakennettavissa oleva järjestelmä, joka tuottaa piirilevyn alapuolelle tasaisen magneettikentän 20 mm x 20 mm alueelle. Tällä järjestelmällä on tarkoitus testata ja kalibroida kulutuselektroniikan, esimerkiksi matkapuhelinten, navigointisovelluksissa käytettäviä antureita.

Järjestelmällä tuli pystyä tuottamaan tasainen magneettikenttä vuorotellen x-, y- ja z-akseleille. Magneettikentän tiheyden itseisarvon tuli olla vähintään 500 μT , ja tavoite tasaisuudelle oli 0,2 μT . Lopullisen järjestelmän käyttöjännite haluttiin maksimissaan olevan 24 V ja virta maksimissaan 2 A.

Haastetta järjestelmän toteuttamiseen toi muun muassa se, että järjestelmän fyysinen koko oli rajoitettu pieneksi suhteessa tasaisen magneettikentän tavoitealueeseen. Piirilevyn alapuolella komponenttien maksimikorkeus oli 2 mm, joten käytännössä koko kelajärjestelmän tuli sijaita piirilevyn yläpuolella. Tämän vuoksi esimerkiksi aiemmin esitellyt Helmholtzin kelat tai niiden kehitelmät eivät olleet käytökelpoisia. Lisäksi piirilevyn leveys oli rajoitettu 100 mm:iin.

3.2 TUTKIMUSTYÖN TAVOITTEET

Tutkimustyön tärkeimpänä tavoitteena oli tutkia toteutettujen prototyyppien tuottaman magneettikentän tasaisuutta ja verrata sitä teoreettisiin arvoihin. Lisäksi tavoitteena oli testata mittausjärjestelmän luotettavuutta ja mittausten toistettavuutta sekä löytää ratkaisuja mahdollisiin ongelmakohtiin ennen siirtymistä lopulliseen mittausjärjestelmän suunnitteluun. Tällaisia ongelmakohtia voisivat olla muun muassa Maan magneettikentän ja muun taustasäteilyn huomioon ottaminen mittaustuloksissa sekä magneettisten materiaalien käyttö mittausjärjestelmän komponenteissa.

3.3 TAVOITELTU MITTAUSJÄRJESTELMÄ

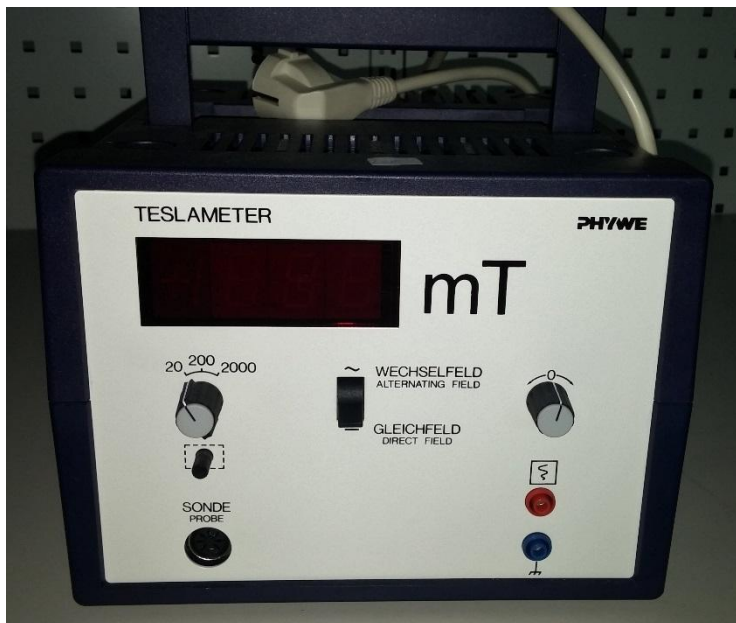
Lopullisen mittausjärjestelmän osalta tärkein tavoite oli kelajärjestelmän soveltuvuus jo olemassa olevan järjestelmän osaksi. Tämän perusteella luotiin kelajärjestelmän fyysiset rajoitukset. Lisäksi lopulliseen mittausjärjestelmään tuli valita komponentteja, joilla olisi mahdollista tehdä mittauksia mahdollisimman automatisoidusti ja tehokkaasti. Mittausjärjestelmän testaukseen ja validointiin tuli myös valita erilaisia magnetometrejä, jotta järjestelmä saataisiin validoitua mahdollisimman tarkasti.

4 MITTAUKSET

Tässä luvussa kerrotaan tutkimustyöstä, jonka tavoitteet kirjattiin luvussa 3.2.

4.1 MITTALAITTEET

Ensimmäiset referenssimittaukset tehtiin Phywen teslamittarilla 13610-93 (kuva 9), jonka herkkyys on $10 \mu\text{T}$ ja jonka kanssa oli käytettävissä kaksi erilaista mittapäää (Phywe 13610-01, aksiaalinen mittapää ja Phywe 13610-02, tangentiaalinen mittapää, kuva 10).



Kuva 9. Phywen teslamittari 13610-93.

Molemmat mittapääät sisälsivät Hallin jännitteeseen perustuvan komponentin, jonka avulla magneettikentän tiheys saatiin mitattua halutulta alueelta. Phywen mittarin käyttäminen tässä tutkimuksessa oli kuitenkin haasteellista, sillä käsin siirreltävä mittapää todettiin liian epätarkaksi tutkimuksen kohteena olleen pienen alueen mit-

taamisen. Mittalaitteen tarkkuus ei myöskään olisi riittänyt tavoitteena olleen kentän tasaisuuden toteamiseen, ja lisäksi mittarilla ei ollut valmista mahdollisuutta tallentaa mittaustuloksia suoraan tietokoneelle.



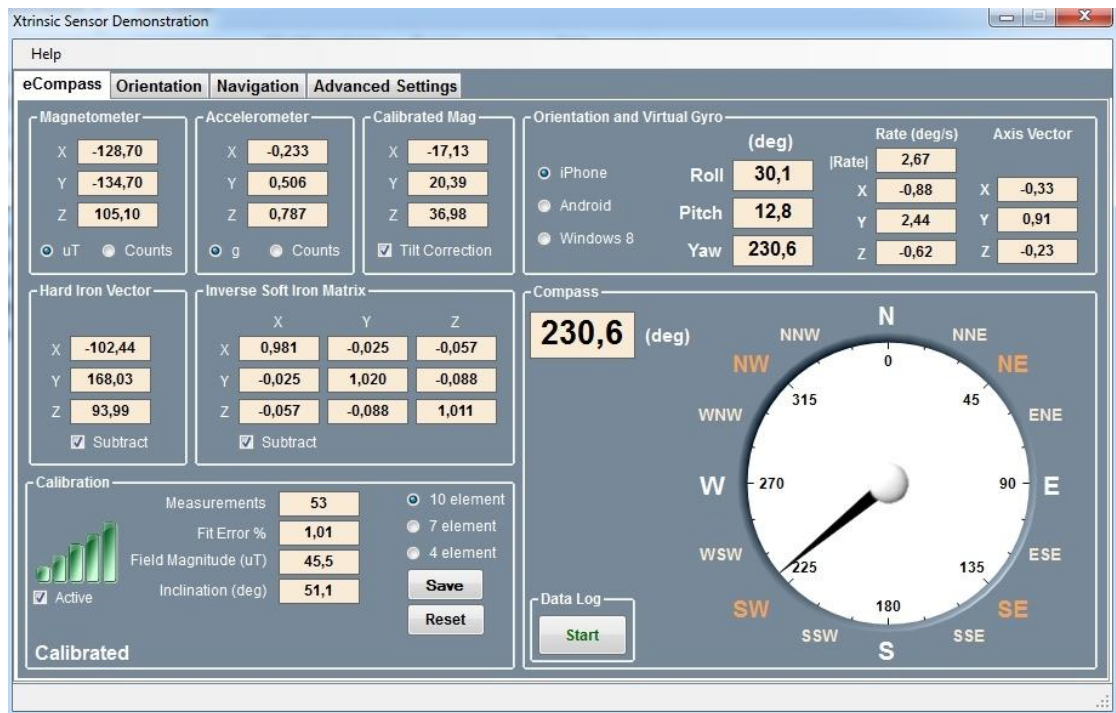
Kuva 10. Phywen teslamittarin mittapäät: vasemmalla 13610-02 ja oikealla 13610-01.

Työn tilanneelta yritykseltä saatiin testikäyttöön kaksi magnetometriä, Freescalen valmistama MAG3110 ja Honeywellin valmistama HMR2300. Näiden antureiden etu Phywen teslamittariin verrattuna oli se, että anturit mittasivat x-, y- ja z-akseleita ilman erillistä, käsin siirreltävää mittapäätä. Lisäksi anturit sisältyivät moduuliin, johon oli valmiiksi rakennettu tarvittava elektronikka suoraan tietokoneeseen liittämiseen, ja tarvittavat käyttöliittymät olivat ladattavissa Internetistä omalle tietokoneelle. Taulukosta 2 ilmenee antureiden keskeiset ominaisuudet.

Taulukko 2. Käytössä olleiden antureiden keskeisiä ominaisuuksia. [12], [13]

Anturi	HMR2300	MAG3110
Valmistaja	Honeywell	Freescale
Tarkkuus	< 7 nT	0,1 μ T
PC-liitäntä	RS-232-sarjaportti	USB
Mittausnopeus	10–154 mittausta sekunnissa	10–80 mittausta sekunnissa
Mittausalue	\pm 200 μ T	\pm 1000 μ T

MAG3110-komponentti sisältää myös kiihtyvyyssanturin, ja anturin käyttöliittymä (kuva 11) tallentaa jokaiselle mittaukselle 33 eri arvoa. Tässä tutkimustyössä oltiin kiinnostuneita ainoastaan kalibroimattomista magneettikenttäkomponenteista, joten tulosten järjestäminen tarkoituksenmukaisella tavalla oli hieman työlästä, mutta tarpeellista tulosten luettavuuden kannalta. Ohjelma tallentaa magneettikenttään liittyvät arvot mikrotlesloina.



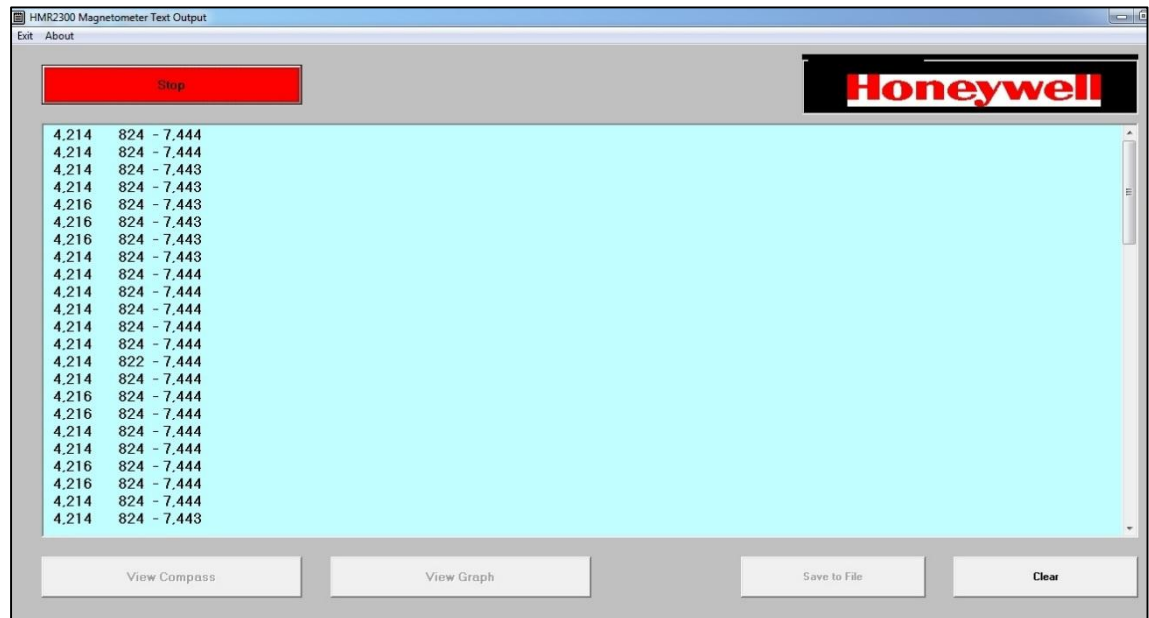
Kuva 11. MAG3110-anturin käyttöliittymä.

Mittaukset suoritettiin 10 Hz:n nopeudella niin, että ensin tallennettiin muutaman sekunnin ajan magneettikenttää ilman kelajärjestelmissä kulkevaa virtaa, jonka jälkeen kytkettiin virta päälle ja mitattiin magneettikenttää jälleen muutaman sekunnin ajan. Anturin käyttöliittymä tallensi tulokset tekstitiedostoksi, joka siirrettiin Excel-tilaukkoon. Näin menetellen ja Excelin ominaisuuksia käyttäen saatiin lasketua jokaiselle yksittäiselle mittauspisteelle keskiarvo sekä taustakentästä että ke-loissa kulkevan virran aiheuttaman kentän ja taustakentän summasta. Lopuksi las-kettiin näiden kahden keskiarvon erotus, jolloin tuloksena saatiin ainoastaan ke-loissa kulkevan virran tuottaman magneettikentän tiheys. Esimerkki yhden pisteen mittaustuloksista kalibroimattomien magneettikenttäkomponenttien osalta on esi-tetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Esimerkki MAG3110-anturin mittaustulosten tulkinnasta.

Mittaus ilman virtaa			Mittaus virran kulkiessa		
Bpx	Bpy	Bpz	Bpx	Bpy	Bpz
-115,1	-204,9	112,4	-369,5	-216,1	29,8
-114,9	-204,9	113,3	-369,3	-215,5	30,6
-115	-204,9	113,4	-369,4	-215,6	30
-115	-204,8	113,4	-368,7	-216,2	29,4
-115	-205,2	113,3	-369,3	-216,1	30,1
-114,9	-204,8	113,5	-369,6	-216,2	30,8
-115	-204,6	113,6	-369,3	-216,1	30,1
-114,6	-204,7	113,4	-369,4	-216	29,1
-114,3	-204,7	113,5	-369,3	-215,9	29,8
-114,4	-204,9	113,4	-369,2	-216	30,1
-114,7	-204,9	113,3	-369,1	-216,3	29,3
-114,1	-204,6	113,7	-369,3	-216,3	30
-114,9	-205,2	112,4	-369,2	-216,3	29,7
-115,1	-204,7	113,1	-369,3	-216,2	29,3
-114,8	-204,9	112,3	-368,8	-216,1	29,7
-115	-204,4	113,1	-369,1	-215,7	30,7
-115,1	-204,7	112,7	-369,2	-216,2	30,4
-114,8	-205	113,2	-369,1	-216,1	29,9
-114,8166667	-204,8222222	113,1666667	-369,2277778	-216,05	29,93333333
Virrallisen ja virrattoman mittauksen keskiarvojen erotus					
	x-akseli	y-akseli	z-akseli		
	-254,4111111	-11,2277778	-83,23333333		

HMR2300-anturin käyttöliittymällä (kuva 12) oli mahdollista seurata magneettivuon tiheyttä reaaliaikaisella viivakaaviolla, kompassinäkyellä tai iskujen (engl. counts) lukumääränä.



Kuva 12. HMR2300-anturin käyttöliittymän iskujen lukumäärä -ikkuna.

Käyttöliittymällä oli mahdollista tallentaa ainoastaan viimeksi mainittu tekstitiedostona, ja valmistajalta saadun tiedon mukaan lukumäärän skaalaus oli 15 000 iskua 1:tä gaussia kohden. HMR2300-anturilla tehtiin mittauksia samalla tavoin kuin MAG3110-anturilla, mutta lopuksi mittaustulokset muunnettiin Excel-tiedostossa mikrotuloiksi vertailun helpottamiseksi.

Taulukossa 2 esitetty Honeywellin anturin mittausalue, $\pm 200 \mu\text{T}$, oli riittämätön tavoitellun $\pm 500 \mu\text{T}$:n toteamiseksi, mutta magneettikentän tiheys voitiin tässä työssä käytetyillä mittaussjärjestelyillä olettaa lineaariseksi käytetyn virran suhteen. Honeywellin anturin toimivuus tässä tutkimuksessa haluttiin testata, sillä tarvittaessa samalta valmistajalta olisi voitu tilata laajemman mittausalueen anturi lopulliseen mittaussjärjestelmään.

Referenssimittausten yhteydessä todettiin kuitenkin, että Honeywellin anturin käyttö pienellä mittausalueella (20 mm x 20 mm) tuotti ongelmia anturin suuren

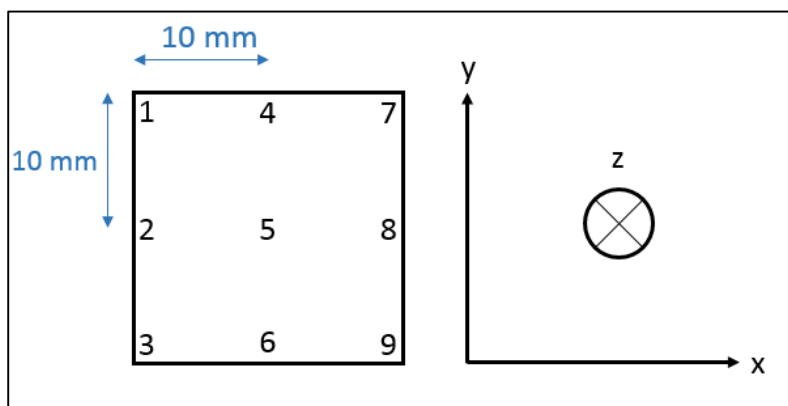
fyysisen koon vuoksi. Anturi koostui kahdesta komponentista, jotka kattoivat noin 11 mm leveän, 15 mm pitkän ja 4 mm korkean alueen. Tämän lisäksi mittaustulosten tallentaminen ja muokkaaminen haluttuun muotoon oli työläämpää kuin Freescalen anturilla, joten kaikki ensimmäisessä vaiheessa tehdyt mittaukset päätettiin suorittaa MAG3110-anturia käyttäen.

Magnetometriä lisäksi mittauksissa käytettiin virtalähteenä IL-Powerin valmistamaa LPS-150-virtalähdettä sekä virran mittaamiseen Appa Technology Corporationin APPA95-yleismittaria.

4.2 MITTAUSJÄRJESTELYT

Ensimmäisen vaiheen mittaukset tehtiin koulun laboratoriotiloissa, joissa oli samanaikaisesti käynnissä muita mittauksia ja projekteja. Tämän seurauksena taustakentät muuttuivat jatkuvasti, ja ne otettiin huomioon luvussa 4.1 ja taulukossa 3 esitellyllä tavalla.

Mitattava alue, 20 mm x 20 mm, jaettiin kuvan 13 osoittamalla tavalla yhdeksään mittauspisteeseen. Mittauspisteet asetettiin xy-tasolle, ja z-akselilla pysyttiin kohdassa 0 koko ajan. Mikäli pisteen 5 koordinaateiksi määrätään $(0, 0, 0)$, ovat muiden pisteiden koordinaatit taulukon 4 mukaiset.



Kuva 13. Mittauspisteet ja akselien suunnat.

Taulukko 4. Pisteiden 1–4 ja 6–9 koordinaatit (x, y, z).

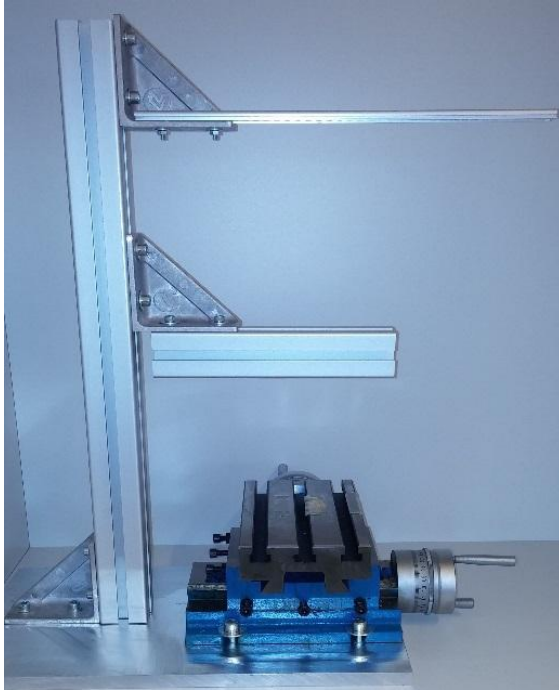
Piste	Koordinaatit [m]	Piste	Koordinaatit [m]
1	(-0,01; 0,01; 0)	6	(0; -0,01; 0)
2	(-0,01; 0; 0)	7	(0,01; 0,01; 0)
3	(-0,01; -0,01; 0)	8	(0,01; 0; 0)
4	(0; 0,01; 0)	9	(0,01; -0,01; 0)

Tulosten käyttökelpoisuuden takaamiseksi mittausten vaatima mekaniikka pyrittiin rakentamaan ei-magneettisia materiaaleja käyttäen. Tällaisia käytössä olleita materiaaleja olivat puu, muovi ja alumiini.

Ensimmäinen mittausjärjestelmä suunniteltiin niin, että anturi pysyy paikallaan ja kelaa liikutellaan anturin yläpuolella. Anturille rakennettiin puinen alusta, ja kelojen alusta tehtiin läpinäkyvästä muovista. Puualustan ja muovin välillä käytettiin aluksi alumiinisia tappeja, jotka myöhemmissä mittauksissa vaihdettiin muovisiin. Muovialustaan tehtiin 9-pistemittauksen mukaiset kohdistuskolot, ja alustaa siirrettiin käsin pisteestä toiseen.

Edellä kuvattu järjestely sisälsi sekä alustan rakentamisvaiheen että mittausvaiheen haasteista johtuvia epäideaalisuuksia. Alustojen sekä niitä yhdistävien kolojen ja tappien mitoitus tehtiin käsin, jolloin mittauspisteet eivät välttämättä osuneet täysin kohdilleen. Lisäksi mittausvaiheessa kelajärjestelmän manuaalinen siirtäminen saattoi aiheuttaa mittavirheitä erityisesti xy-tasossa, mihin viittasi x- ja y-akseleilla mittausten välillä havaitut suuret erot.

Mittauksiin saatiin käyttöön ristisyöttöpöytä (kuva 14), joka mahdollisti huomattavasti tarkemman siirtymisen xy-tasossa mittauspisteiden välillä. Anturi kiinnitettiin pöytään ja kelajärjestelmä sen yläpuolelle. Anturia siis siirrettiin mittauspisteestä toiseen, ja kelajärjestelmää oli mahdollista siirtää z-akselin suuntaisesti.



Kuva 14. Mittausjärjestelyissä käytetty ristisyöttöpöytä.

Ristisyöttöpöytä sisälsi rautaa, joka on ferromagneettinen materiaali. Raudan vaikutusta anturitasolla havaittavaan magneettivuon tiheyden tasaisuuteen testattiin kokeellisesti muuttamalla anturin etäisyyttä pöydän rautaosasta. Tämä tehtiin sijoittaen anturin ja pöydän väliin erikorkuisia ei-magneettisesta materiaalista valmistettuja kappaleita. Lopuksi eri etäisyyksiltä saatuja mittaustuloksia verrattiin keskenään tutkimalla sitä, onko mittaustulosten ja kelan alareunan etäisyydellä pöydän tasosta lineaarista yhteyttä.

Kentän tasaisuutta on kuvattu laskemalla ensin eri mittauspisteiden tulosten keskiarvo, jonka jälkeen on laskettu mittaustulosten suurin poikkeama keskiarvosta prosentteina. Osa näiden mittausten tuloksista on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Ristisyöttöpöydän raudan vaikutusta tutkivia mittaustuloksia.

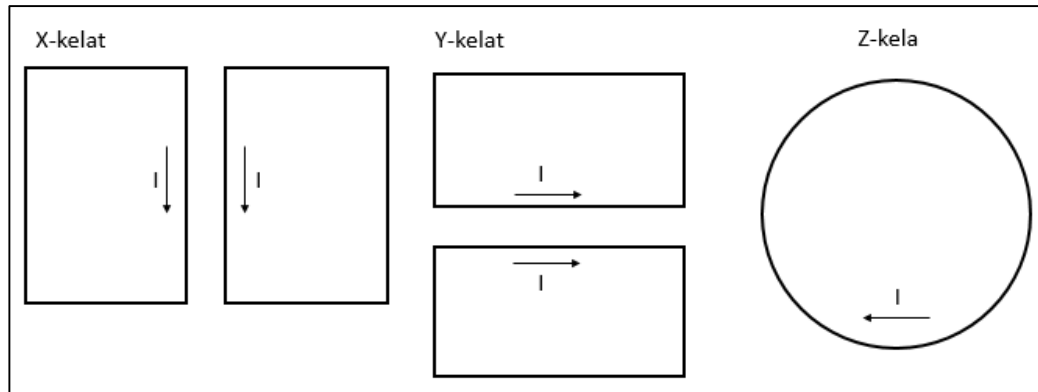
Ensimmäinen prototyyppi	Kelan alareunan etäisyys pöydän tasosta (mm)	Suurin poikkeama keskiarvosta (%)
Mittaus 1.1	57	8,6
Mittaus 1.2	40	7,06
Mittaus 1.3	22	7,11
Toinen prototyyppi	Kelan alareunan etäisyys pöydän tasosta (mm)	Suurin poikkeama keskiarvosta (%)
Mittaus 2.1	123	1,41
Mittaus 2.2	100	1,35
Mittaus 2.3	77	1,35
Mittaus 2.4	52	1,51

Näiden mittausten perusteella voitiin todeta, että ristisyöttöpöydän sisältämä rauta ei vaikuta oleellisesti ensimmäisen vaiheen mittauksiin, sillä kelan etäisyyden pöydän tasosta ja mittaustulosten poikkeamien välillä ei havaittu riippuvuutta. Poikkeamat mittaustuloksissa johtuivat muista tekijöistä, kuten kelojen kiinnityksestä ja anturin osumisesta oikeille koordinaateille.

4.3 ENSIMMÄISEN PROTOTYYPIN MITTAUKSET

Ensimmäinen prototyyppi oli toteutettu käämimällä kelat käsin muovisen kelarungon ympärille. Prototyyppi oli suunniteltu tuottamaan haluttu magneettivuon tiheys 1 A:n virralla. Kuvassa 15 on yksinkertaistettu malli kelajärjestelmän eri kerroksista, ja kuvaan merkityt virran suunnat keloissa tuottavat kuvan 13 mukaisille akselille positiivisen magneettivuon tiheyden. Mittauksissa merkityksellistä oli ainoastaan x- ja y-kelaparien kelojen keskinäisillä virran suunnilla, sillä mittaustuloksissa riitti tarkkailla magneettivuon tiheyden itseisarvoa.

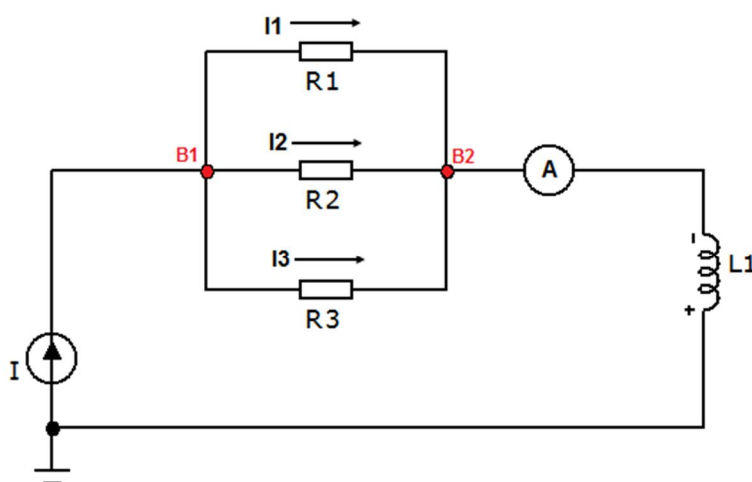
Kuvassa 15 on vasemmalla x-akselin suuntaisen kentän muodostava kelapari, keskellä y-akselin suuntaisen kentän muodostava kelapari ja oikealla z-akselin suuntaisen kentän muodostava kela.



Kuva 15. Yksinkertaistettu kuva ensimmäisen prototyypin eri kelakerroksista.

4.3.1 MITTAUSKYTKENTÖJEN MITOITUKSET

Ensimmäinen mittauskytkentä sisälsi kolme tehovastusta kytkettynä rinnakkain, ja näiden kanssa sarjassa oli kytkettynä kelajärjestelmä, jota kuvassa 16 on merkitty L1:nä.



Kuva 16. Ensimmäinen mittauskytkentä.

Käytettävissä oli 15 Ω :n ja 10 Ω :n vastuksia, joiden tehonkesto vaihteli 10–15 W. Taulukosta 6 selviää kytkentään valittujen vastusten vastusarvo, tehonkesto ja suurin virran kesto. Virrankesto on laskettu ohmin lakia soveltaen kaavalla

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}},$$

missä I on vastuksen läpi kulkeva virta, P on vastuksen tehonkesto ja R vastusarvo.

Taulukko 6. Käytettävissä olleiden vastusten tehon- ja virrankestit.

Vastuksen nimi	Vastusarvo (Ω)	Tehonkesto (W)	Virrankesto (A)
R1	10	10	1
R2	10	15	1,22
R3	15	11	0,86

Vastusten läpi kulkevat virrat laskettiin niin ikään ohmin lain avulla. Kaavassa U on kuvassa 16 näkyvien pisteiden B1 ja B2 välinen jännite. Ohmin lain perusteella:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{10\ \Omega} + \frac{U}{10\ \Omega} + \frac{U}{15\ \Omega} = 1\ \text{A}$$

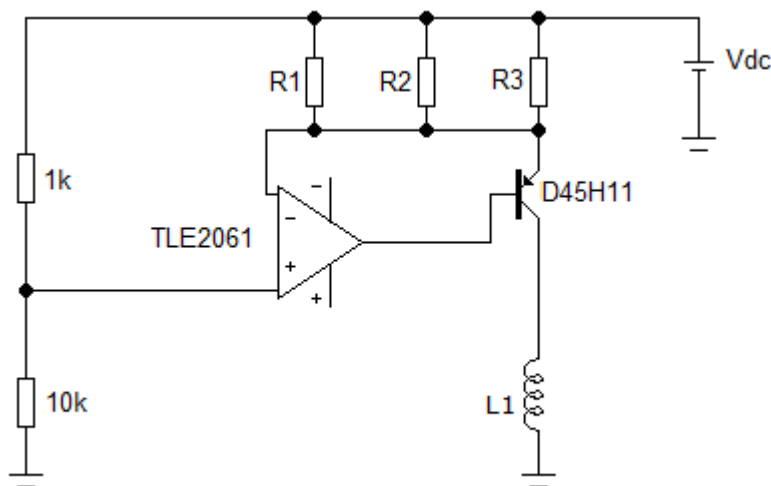
Tästä ratkaisemalla vastusten yli vaikuttava jännite saadaan tulos $U = 3,74\ \text{V}$, joten

$$I_1 = I_2 = \frac{3,75\ \text{V}}{10\ \Omega} = 0,375\ \text{A} \quad \text{ja} \quad I_3 = \frac{3,75\ \text{V}}{15\ \Omega} = 0,25\ \text{A}.$$

Vertailemalla edellisen laskun lopputuloksia ja taulukon 6 mukaisia vastusten virrankestoja, voidaan todeta vastusten rinnankytkennän kestävän vaaditun 1 A:n virran.

Teoriassa kela voidaan korvata oikosululla tasavirtaa käytettäessä, mutta käytännössä mitä enemmän kelassa on kierroksia, sitä suuremmaksi sen resistanssi kasvaa. Ensimmäisissä mittauksissa havaittiin 1 A:n virran lämmittävän kelajärjestelmää siinä määrin, että lämmön aiheuttaman resistanssin kasvun seurauksena kytkennän virta laski mittauksen aikana. Lämpökameralla havaittiin kelan lämpötilan nousevan nopeasti noin 60 celsiusasteeseen, ja virtalähde ei pitänyt virran suuruutta tasaisena. Koska kelan tuottama magneettikenttä on lineaarinen siinä kulkevan virran suhteen, vaikutti virran lasku myös mittaustuloksiin.

Ratkaisuna toteutettiin yksinkertainen vakiovirtakytke, jonka avulla kelan läpi kulkeva virta saatiin pidettyä tasaisesti 1 A:ssa. Kytkennässä käytettiin operaatiovahvistinta TLE2061 ja PNP-transistoria D45H11. Transistorin absoluuttinen maksimivirrankesto on 10 A, ja emitterin ja kollektorin välistä jännitettä se kestää 80 V [14]. Transistorin virranvahvistuskerroin on datalehden [14] mukaan minimissään 60, joten operaatiovahvistimen ulostulonastan tulee kestää $(1 \text{ A})/60 \approx 16,7 \text{ mA}$ virtaa. Operaatiovahvistimen absoluuttinen ulostulonastan virrankesto on 80 mA [15], joten nämä komponentit soveltuivat kuvassa 17 esitettyyn kytkentään.



Kuva 17. Virtalähdekytkentä.

Vastukset R1, R2 ja R3 määrsivät kelalle L1 kulkevan virran suuruuden. Edellisessä kytkennässä käytetyt 10 Ω ja 15 Ω tehovastukset päätettiin korvata vastusarvoltaan

pienemmillä, $2,2 \Omega$ ja $2,7 \Omega$ tehovastuksilla, sillä näin menetellen 1 A virran saamiseksi kelaan riitti pienempi Vdc-jännite. KytKentä simuloitiin tietokoneohjelmalla, jonka avulla löydettiin sopiva Vdc:n arvo 1 A:n virran saamiseksi. Tämä arvo oli noin 16,4 V.

Simulaation perusteella pystyttiin myös varmistamaan vastusten soveltuvuus kytkentään virran osalta, sillä simulaation mukaan vastusten virrat vaihtelivat välillä 296 – 364 mA. Laskuissa meneteltiin samalla tavoin kuin ensimmäisen mittauskytkennän laskuissa. Vastusarvot valittiin lopulta niin, että $R1 = R2 = 2,2 \Omega$ ja $R3 = 2,7 \Omega$. Jokaisen vastuksen tehonkesto oli 5 W, joten jokainen vastus olisi myös yksinään kestänyt 1 A virran.

4.3.2 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Mittaustuloksia analysoitiin niin, että jokaisesta yhdeksän pistettä sisältäneestä mittauksesta laskettiin suurin poikkeama keskiarvosta prosentteina. Lopullisessa järjestelmässä mielenkiinnon kohteena tulisivat olemaan myös pisteiden väliset erot tesloissa, mutta ensimmäisissä mittauksissa edellä kuvattu analyysikeino riitti kelajärjestelmien tuottaman magneettikentän tasaisuuden toteamiseen.

Taulukkoon 7 on koottu ensimmäisen prototyypin mittaustulosten suurimpia poikkeamia keskiarvoista. Mittauksia on tehty eri päivämäärinä, ja erot eri päivinä tehtyjen mittausten tuloksissa selittyvät esimerkiksi kytkentöjen rakentamiseen liittyvillä epätarkkuuksilla. Mittausjärjestelyjä kehitettiin jatkuvasti mittauksia tehdessä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman totuudenmukaisia. Ongelmia mittauksissa tuotti muun muassa kelajärjestelmän kiinnitys ristisyöttöpöytään niin, että järjestelmä pysyi suorassa, sekä mittauspisteen 5 sijoittaminen aivan kelan keskikohtaan. Lisäksi vaikeuksia tuotti kelajärjestelmän alareunan asettaminen oikealle etäisyydelle anturitasosta.

Taulukko 7. Ensimmäisen prototyypin mittaustuloksia.

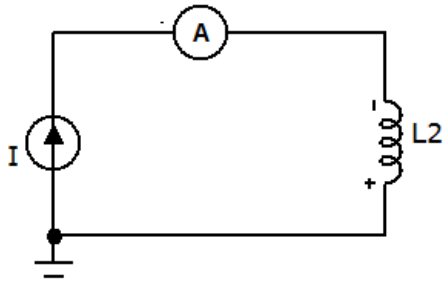
	x-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	5,40	7,66	7,09	6,67	5,71	7,11	5,22
	y-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	2,79	4,59	3,49	2,49	2,83	5,34	2,25
	z-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	1,45	2,79	1,90	1,56	1,18	1,30	1,89

Taulukosta 7 nähdään, että z-akselin suuntaisen magneettikentän muodostava kela tuotti kaikkein tasaisimman kentän, kun taas x-akselin suuntaisen kentän muodostava kelapari oli kaikkein epätasaisin. Tämä selittynee sillä, että x-akselin suuntaisen kentän muodostava kelaparin yksi sivu oli suunniteltu koveraksi, ja näin ollen kelaparin käytännön toteutus oli hankalaa. Yleisesti tuloksista voitiin todeta, että niiden tulokset eivät vastanneet tavoitearvoja, sillä simulaatiossa suurin mittaustuloksen poikkeama keskiarvosta oli ollut yhden prosentin luokkaa [16].

4.4 TOISEN PROTOTYYPIN MITTAUKSET

Toinen prototyyppi tehtiin piirilevytoteutuksena. Kelajärjestelmän rakenne oli muutoin samankaltainen kuin kuvassa 15 esitetty ensimmäisen prototyypin yksinkertaistettu rakenne. Toinen prototyyppi oli suunniteltu niin, että se tarvitsisi noin 0,4 ampeerin virran tuottaakseen vaaditun $\pm 500 \mu\text{T}$:n suuruisen magneettivuon tiheyden [17]. Ensimmäisen vaiheen mittauksissa virta pidettiin noin 0,2 ampeerin suuruisena, sillä virran ja magneettikentän tiheyden lineaarisen suhteen vuoksi tuloksia pystyttiin helposti vertaamaan tavoitteisiin.

Myös toisen prototyypin lämpötilaa ja resistanssin nousua tarkkailtiin. Lämpökameralla kuvattuna prototyypin lämpötila nousi 0,4 A virralla noin 35 asteeseen. Resistanssi ei kasvanut oleellisesti, joten virtalähteestä syötetty virta pysyi mittausten ajan tasaisena ilman vakiovirtalähdekytkentöjä. Näin ollen toisen prototyypin mittaustuloksissa virta kytkettiin ensin lähteestä virtamittarille ja siitä suoraan kelajärjestelmään (kuva 18).



Kuva 18. Toisen prototyypin mittauskyskentä.

Toisen prototyypin mittaustuloksia analysoitiin samalla tavoin kuin ensimmäisen prototyypin kohdalla, ja tuloksia on esitetty taulukossa 8. Luvussa 4.3.2 on kerrottu todennäköisistä syistä, joiden vuoksi mittaustulokset vaihtelevat eri mittausten välillä.

Taulukko 8. Toisen prototyypin mittaustuloksia.

	x-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	0,73	1,61	1,58	1,71	1,34	0,82	0,72
	y-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	2,20	2,17	2,44	2,54	1,85	1,71	1,88
	z-akseli						
Suurin poikkeama keskiarvosta (%)	1,47	1,71					

Kelojen valmistaja toimitti z-akselin suuntaisen kentän muodostavan kelan mittauskäyttöön myöhemmin kuin x- ja y-keilat, minkä vuoksi z-akselin mittaustuloksia on vähemmän kuin x- ja y-akselin.

Taulukosta 8 nähdään, että toinen prototyyppi tuotti huomattavasti tasaisempia tuloksia kuin ensimmäinen. Edelleen tulokset poikkesivat simuloituista arvoista, joiden suurin poikkeama keskiarvosta oli noin 0,1 % [17]. Mittaustulokset olivat kuitenkin tasaisuudeltaan sellaisia, että työn tilaaja hyväksyi ne. Tulokset todettiin riittävä hyviksi jatkokehitystä varten, ja prototyypille päätettiin tehdä kenttätetit lopullisessa mittausympäristössä eli Afore Oy:n testauskäsittelijään integroidussa järjestelmässä.

5 LOPULLINEN MITTAUSJÄRJESTELMÄ

Lopullinen mittausjärjestelmä suunniteltiin integroitavaksi Afore Oy:n Kronos-testauskäsittelijään. Lopullisen järjestelmän suunnitteluun kuului muun muassa kela-järjestelmään yhdistettävien virtalähteen ja -mittarin sekä ohjaukortin valinta, validointiin käytettävien magnetometrien valinta sekä näiden magnetometrien kommunikointipiirilevyn ja liitäntöjen suunnittelu. Magnetometrien kommunikointipiirilevyjen suunnittelua tehtiin yhteistyössä piirilevyvalmistajan ja ohjelmistosuunnittelijan kanssa.

5.1 KRONOS- LIIKEANTUREIDEN TESTAUSKÄSITTELIJÄ

Laite on suunniteltu testaamaan kulmanopeus- ja matalakiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyysheräte perustuu anturin kääntelemiseen tarkasti maan vetovoimakenttään nähden ($\pm 1 g$). Kulmanopeusantureiden testaamista varten antureita voidaan pyörittää nopeuksilla 1-750 °/s. Kahden rajattomasti kääntyvän akselin avulla (kuva 19) voidaan stimuloida 3-akselisia kiihtyvyyss- ja kulmanopeusantureita itsenäisesti jokaisen akselin suhteen.



Kuva 19. Kronos-testauskäsittelijän kaksi rajattomasti kääntyvää akselia.

Laitteen suunnittelun suurimmat haasteet ovat olleet esimerkiksi pyörimiskiivyyteen liittyvän voiman huomioon ottaminen sekä elektroniikan integroiminen pyörivään järjestelmään.

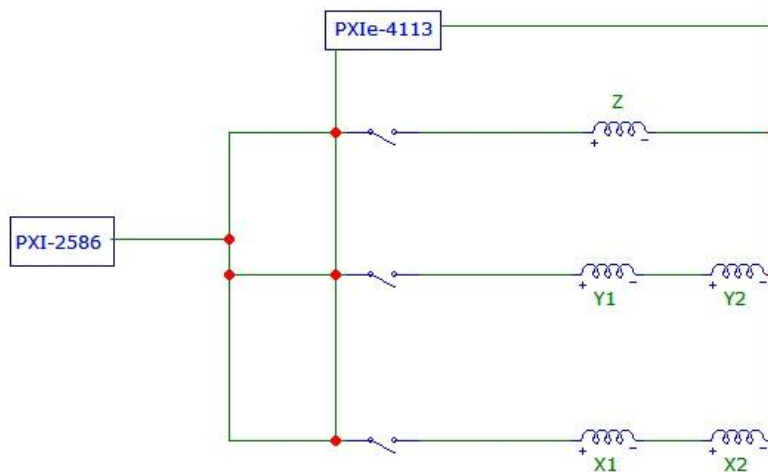
Tuotteet voidaan syöttää käsittelijään kiekkoittain (engl. bare wafer) tai teippikehykseen (engl. film frame) kiinnitettyinä. Tämän opinnäytetyön aiheena olevassa soveluksessa anturit testataan kiinnitettyinä teippikehyksellä olevaan sahausteippiin (engl. dicing tape). Sahausteipin käyttäminen komponenttialustana mahdollistaa antureiden testaamisen suoraan erottelun jälkeen, ilman erillistä poimintaa (engl. pick & lace). Tällä saavutetaan lyhin mahdollinen testausprosessi ja sen mukana merkittävät kustannussäästöt perinteisiin menetelmiin verrattuna. Teippikehys on myös komponentin koosta ja muodosta riippumaton käsittelymedia, joten sen vuoksi käsittelijällä on kätevää esimerkiksi erilaisten prototyyppien testaaminen. Käsittelijän suurin etu on kuitenkin suurten tuotemäärien testaaminen kustannustehokkaasti. [18]

Testauskäsittelijään on suunniteltu integroitavaksi National Instrumentsin laitteita anturien mittaamista varten, joten mittausjärjestelmää täydentävät laitteet valittiin myös NI:n valikoimista. Mittausjärjestelmään valikoiduista komponenteista kerrotaan tarkemmin luvuissa 5.2 ja 5.3.

5.2 KELAJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

Luvussa 4.2. kuvailtu kelajärjestelmän lämpeneminen ja siitä aiheutuva resistanssin kasvu ei lopullisessa järjestelmässä ollut ongelma, sillä virtalähteeksi voitiin valita laite, joka pitää virran vakiona. Syöttölaitteen valintaperusteina oli muun muassa se, että siitä syötettävää virtaa voitaisiin tarkkailla mittausten aikana. Lisäksi merkitystä oli laitteen tuottaman jännitteen tarkkuudella sekä sillä, moneenko eri paikkaan laitteen syöttö voitaisiin kytkeä.

Kelajärjestelmän virtalähteeksi valikoitui lopulta NI:n PXIe-4113 –lähde, jonka maksimivirta on 6 A ja jossa on mahdollisuus virran ja jännitteen seurantaan. Datalehden [19] mukaan ohjelmoitavan virran tarkkuus on noin 0,15 %, joten esimerkiksi 400 mA:n virralla tarkkuus on noin 0,6 mA. Virtalähteen lisäksi järjestelmään valittiin kytkimeksi kymmenkanavainen PXI-2586, jotta virtaa voidaan syöttää eri kela-levyille yksi kerrallaan. Koska x- ja y-akselien suuntaisen kentän tuottamat kelajärjestelmät sisälsivät kumpikin kaksi kela, olisi vaihtoehtoisesti voitu suunnitella molemmille keloille omat virransyötöt. Jotta virta olisi kuitenkin sama molemmissa keloissa, päätettiin nämä kelaparit kytkeä sarjaan ja käsitellä niitä mittauksissa yhtenä kelana. Kelojen virransyöttöön suunniteltiin yksinkertainen ristikytkentälevy, jonka kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Kelojen ristikytkentälevyn kytkentäkaavio.

5.3 MITTAUSTEN VALIDOINTI ERI MAGNETOMETRIEN AVULLA

Mittausten validointiin valittiin kolmen eri valmistajan magnetometrejä. Näiden valintaperusteena oli samanlainen komponenttien sommittelumahdollisuus (toisin sanoen komponenttien tuli olla fyysiseltä kooltaan yhtä suuria), pinnien sama lukumäärä sekä se, että magnetometrejä pystyttäisiin käyttämään samoilla käyttöjännit-

teillä. Näin ollen pystyttiin suunnittelemaan yksi kytkentäkaavio ja sen avulla kommunikointipiirilevy, jota olisi mahdollista käyttää eri magnetometreille komponentteja vaihdellen. Taulukossa 9 on lueteltu valitut magnetometrit ja niiden oleelliset ominaisuudet.

Taulukko 9. Mittausjärjestelmän validointiin valitut magnetometrit.[20] [21] [22]

Laite	Pinnien lukumäärä	Koko (LxPxK, mm)	Maksimikäyttöjännite (V)	Mittausalue (μT)
FXOS8700CQR1	16	3 x 3 x 1,2	3,6	± 1200
LSM303DTR	16	3 x 3 x 1	4,8	± 1200
BMC-050	16	3 x 3 x 0,95	4,0	± 1200

KytKentäkaaviot suunniteltiin datalehtien perusteella, ja se aloitettiin tekemällä jokaiselle anturille kytkentäkaaviot erikseen. Magnetometriin ohjelmisto tilattiin ulkopuoliselta yritykseltä, ja ohjelmoinnissa käytettiin SPI-protokollaa. Protokollan valintaperusteet tai ohjelmiston suunnittelu ei kuulunut tämän opinnäytetyön sisältöön, joten näitä ei käsitellä tässä tarkemmin. Valittu protokolla vaikutti magnetometriin kommunikointipiirilevyn suunnitteluun joiltakin osin, sillä SPI-protokollaa käytettäessä dataväylille ei useimmiten tarvita ylösvetovastuksia.

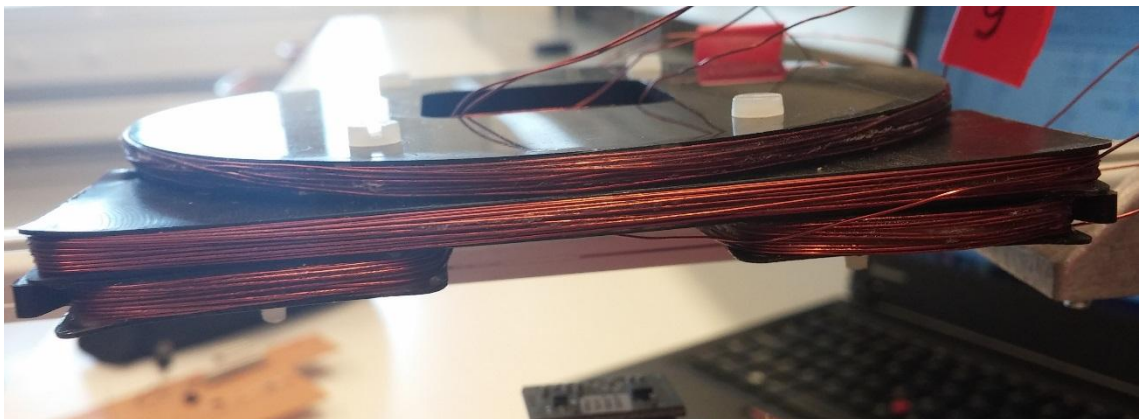
Lopuksi magnetometriin kytkentäkaaviot yhdistettiin yhdeksi kokonaisuudeksi lisäämällä kaavioon paikkoja, jotka tarpeen mukaan kalustettiin oikosuluiksi tai katkoksiksi. Lopullinen kytkentäkaavio on esitelty liitteessä 1. Kommunikointilevyjä valmistettiin jokaiselle validointiin valitulle magnetometrille omansa, ja jokaiseen piirilevyyn tehtiin rinnakkain kaksi kappaletta kytkentöjä. Näin ollen voidaan validointivaiheessa testata kahta magnetometriä samanaikaisesti.

Testauksessa käytettävä ohjelmisto ei valmistunut tämän opinnäytetyön puitteissa, joten lopullisia testituloksia ei tässä käsitellä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kelajärjestelmien tuottaman magneettikentän tasaisuutta verrattuna teoreettisiin tuloksiin on käsitelty aiemmin luvussa 4 mittaustulosten ohessa. Prototyypeille yhteistä oli se, että niiden tuottaman magneettikentän tasaisuus jäi tavoitteesta. Kuitenkin prototyyppi 2 tuotti huomattavasti tasaisemman magneettikentän kuin ensimmäinen prototyyppi.

Kelajärjestelmien teoreettisia magneettivuon tiheyksiä simuloitaessa oletettiin, että kelat ovat äärettömän ohuita. Todellisuudessa ensimmäisen prototyypin jokainen kelakerros oli noin 5 mm paksu (kuva 21), ja toisenkin prototyypin yhden kelakerroksen paksuus oli noin 1,6 mm. Näiden kahden prototyypin tuloksia vertaillen huomattiin, että mitä ohuempi kelajärjestelmä pystytään tekemään, sitä paremmin mittaustulokset vastaavat teoreettisia arvoja.



Kuva 21. Ensimmäinen prototyyppi.

Prototyypin 2 tuottamaa magneettikenttää tasaisempiin tuloksiin päästäisiin todennäköisesti luvussa 2.3 kuvatun kaltaisilla Helmholtzin keloista kehitellyillä järjestelmillä. Tässä työssä kuitenkin järjestelmien fyysinen koko oli tarkkaan ennalta rajattu, sillä järjestelmä integroitiin jo olemassa olevaan laitteeseen.

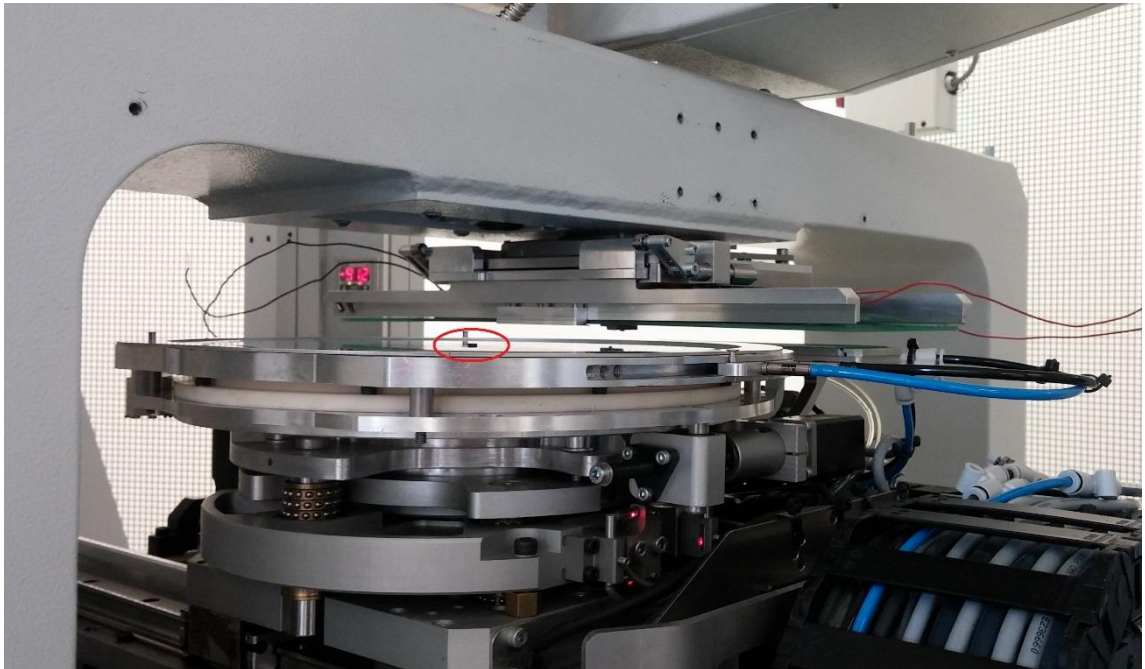
Hyvin ohuita keloja pystytään valmistamaan, mutta mitä ohuempi kelajärjestelmä tehdään, sitä hankalampi on saavuttaa tarpeeksi suuri magneettivuon tiheys. Ohut kelajärjestelmä vaatii ohuen johtimen, jolloin johtimen virrankesto alenee. Mikäli virran nostaminen magneettivuon tiheyden kasvattamiseksi ei ole mahdollista, voidaan toisena vaihtoehtona lisätä kierrosten määrää. Tämä kuitenkin johtaa jälleen paksumpaan kelajärjestelmään.

Tasaisen magneettikentän tuottava, mahdollisimman kapeassa tasossa sijaitseva kelajärjestelmä voitaisiin todennäköisesti saavuttaa parhaiten empiirisillä tutkimuksilla. Tällaiseen tutkimukseen haasteen asettaa se, että kelajärjestelmän tulisi olla helposti muokattavissa, mutta kuitenkin pysyä tiiviinä pakettina. Ensimmäinen vaatimus ei täyty piirilevytoteutuksen kohdalla, kun taas jälkimmäinen olisi hankalaa, mikäli keloja käännettäisiin käsin. Molemmissa tapauksissa keloista on vaikea tehdä kovin monimutkaisia muotoisia, mikäli haluttaisiin kokeilla perinteisistä suorakulmion tai ympyrän muotoisista keloista poikkeavia toteutuksia.

Simulaation ja todellisen toteutuksen välisiä eroja pystyisi mahdollisesti pienentämään ottamalla todellisen kelan paksuus huomioon simuloinnissa. Tässä tapauksessa kuitenkin todennäköisesti jo simulaatiossa huomattaisiin, että paksummalla kelalla ei ole mahdollista saavuttaa yhtä tasaisia magneettivuon tiheyksiä kuin äärettömän ohuella kelalla. Lähemmäs simulaation tulosta voitaisiin käytännön mittauksissa päästä niinkin, että kumottaisiin Helmholtzin kelojen kaltaisella systeemillä mittaustilan magneettikentät. Toisaalta myös lopullisessa käyttökohteessa (Afore Oy:n asiakkaalla) tulee olemaan hajamagneettikenttiä mittaustilassa, joten opinnäytetyön aikana suoritettut mittaukset olivat tältä kannalta melko totuudenmukaisia.

Nämä edellä mainitut seikat huomioon ottaen ensimmäisen vaiheen mittaukset onnistuivat sellaisella tarkkuudella, joka riitti käytettävän kelajärjestelmän valintaan. Lisäksi mittausten perusteella voitiin todeta, että varsinkin toinen prototyyppi oli hyvin kehityskelpoinen lopullista käyttötarkoitusta ajatellen. Oli myös syytä olettaa, että mittaukset olisivat tarkempia ja näin ollen tuloksetkin tasaisempia lopullisessa

järjestelmässä. Kronokseen integroitavassa järjestelmässä luvussa 4 kuvatut mitausjärjestelyistä johtuvat epätarkkuudet on minimoitu. Kelajärjestelmän levyt on mitoitettu testauskäsittelijään sopiviksi niin, että mitattava alue on kohdistettu täsmälleen oikeaan paikkaan suhteessa keloihin. Myös validoinnissa käytettävät magnetometrit ja niiden kommunikointipiirilevyt on mitoitettu samalla tavoin. Kuvassa 22 on malliksi kiinnitetty yksi magnetometri (ympyröity punaisella) sahausteippiin, ja magnetometrin yläoikealla näkyy suunniteltu kommunikointipiirilevy sekä kela-järjestelmien piirilevyt. Testauksen alkaessa magnetometri kohdistuu kommunikointilevyyn Kronoksen konenäköjärjestelmän ohjaaman x-, y-, z-mekaniikan avulla.



Kuva 22. Teippikehys testauskäsittelijään kiinnitettynä, magnetometri ympyröity punaisella.

Lopulliseenkin järjestelmään tulee vaikuttamaan ulkopuoliset magneettikentät ja testauskäsittelijän sisältämät magneettiset materiaalit. Tämä tullaan ottamaan mitauksissa huomioon laskemalla magneettivuon tiheyden erotusta samalla tavoin kuin ensimmäisen vaiheen mittauksissa.

LÄHTEET

- [1] Viitanen, M. 2007. *Pintaliitoskelejen magneettikentän mittausjärjestelmän kehittäminen*. Tampereen ammattikorkeakoulu. [opinnäytetyö] Saatavilla: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10302/TMP.objres.1025.pdf?sequence=2>. (Luettu: 25.4.2015).
- [2] Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2003. *Momentti 2. Insinöörifysiikka*. 2. p. Helsinki. Kustannusosakeyhtiö Otava.
- [3] University of Reading. *Physics 4.2: Introducing magnetism*. N.d. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.met.reading.ac.uk/pplato2/h-flap/phys4_2.html. (Luettu: 24.5.2015).
- [4] Koskinen, H. *Luku 6: Magneettikenttä väliaineessa*. N.d. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://theory.physics.helsinki.fi/~xfiles/ed/05/luento/ED2005_6.pdf. (Luettu: 24.5.2015).
- [5] Magnetic Shield Corporation. *Technical guide to MuMETAL® and Magnetic Shielding*. 2015. [www-dokumentti, luottamuksellinen]. (Luettu: 9.8.2015).
- [6] Fishbane, P., Gasiorowicz, S. & Thornton, S. 2005. *Physics for scientists and engineers, volume II*. 3. p. New Jersey. Pearson prentice hall, Pearson education Inc.
- [7] United States' National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) ja the United Kingdom's Defence Geographic Centre (DGC). *US/UK World Magnetic Model*. 2014. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_F_MERC.pdf. (Luettu: 22.8.2015).
- [8] Ilmatieteen laitos. *Nurmijärven geofysiikan observatorio*. 31.8.2010. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/nurmijarven-geofysiikan-observatorio>. (Luettu: 12.6.2015).
- [9] Liao, S., Dourmashkin, P. & Belcher, J. 2004. *Chapter 9: Sources of magnetic fields*. Saatavilla: <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>. (Luettu: 24.5.2015).
- [10] Merritt, R. and Purcell, C. & Stroink, G. 1983. "Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils". *Review of Scientific Instruments*, 54, 7, 879-882. AIP Publishing.
- [11] Lambert, R. & Wright, J. 1967. "Production of small uniform magnetic fields". *Review of Scientific Instruments*, 38, 10, 1385-1387. AIP Publishing.
- [12] Freescale semiconductor, Inc. *Xtrinsic MAG3110 Three-Axis, Digital Magnetometer*. 2013. [Datalehti]. Saatavilla: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf?fasp=1. (Luettu: 12.6.2015).
- [13] Honeywell International Inc. *Smart digital magnetometer HMR2300*. 2012. [Datalehti]. Saatavilla: <https://aerospace.honeywell.com/~~/media/Images/Plymouth%20Website%20PDFs/Magnetic%20Sensors/Data%20Sheets/HMR2300.ashx>. (Luettu: 12.6.2015).
- [14] STMicroelectronics. *D44H8 - D44H11, D45H8 - D45H11*. 2009. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000942.pdf>. (Luettu: 15.6.2015).
- [15] Texas Instruments Inc. *TLE206x, TLE206xA, TLE206xB. EXCALIBUR JFET INPUT HIGH-OUTPUT-DRIVE μ POWER OPERATIONAL AMPLIFIERS*. 1997. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tle2061.pdf>. (Luettu: 15.6.2015).
- [16] Haarto, A. 2015. *Magneettikentän muodostaminen*. [Pdf-dokumentti, luottamuksellinen].

- [17] Haarto, A. 2015. *Magneettikentän muodostaminen virtamaton ja ympyräkelan avulla*. [Pdf-dokumentti, luottamuksellinen].
- [18] Afore OY. *KRONOS test handler for motion sensors*. N.d. Datalehti. Saatavilla: http://afore.fi/datasheets/afore_kronos_datasheet.pdf. (Luettu: 17.8.2015).
- [19] National Instruments Corporation. *NI PXIe-4113 and NI PXIe-4112 Power Supplies*. 2015. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-502>. (Luettu: 11.8.2015).
- [20] Freescale Semiconductor, Inc. *FXOS8700CG, 6-Axis Sensor with Integrated Linear Accelerometer and Magnetometer*. 2015. [Datalehti]. Saatavilla: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/FXOS8700CQ.pdf. (Luettu: 15.6.2015).
- [21] STMicroelectronics. *Ultra-compact high-performance eCompass module: 3D accelerometer and 3D magnetometer*. 2013. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00057547.pdf>. (Luettu: 11.6.2015).
- [22] Bosch Sensortec GmbH. *BMC050 Electronic compass*. 2011. [Datalehti]. Saatavilla: <http://aebst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmc050/BST-BMC050-DS000-10.pdf>. (Luettu: 11.6.2015).

Validointiin käytettävien magnetometrien kommunikointilevyn kytkentäkaavio

